فیزیکدانان بزرگ

از گالیله تا هاوکینگ

مجلّد اوّل

مکانیک
ترمودینامیک
الکترومغناطیس
مکانیک آماری
نسبیت

تألیف: ویلیام ه. کروپر
ترجمه: احمد خواجه نصیر طوسی

انتشارات فاطمی

فیزیکدانان بزرگ

از گالیله تا هاوکینگ

مجلّد اوّل

مکانیک
ترمودینامیک
الکترومغناطیس
مکانیک آماری
نسبیت

تألیف: ویلیام ه. کروپر
ترجمه: احمد خواجه نصیر طوسی

انتشارات فاطمی

Great Physicists: The Life and Times of Leading Physicists from Galileo to Hawking
William H. Cropper
Oxford University Press, 2001.

فیزیکدانان بزرگ
از گالیله تا هاوکینگ
مجلّد اوّل

تألیف ویلیام ه. کروپر
ترجمهٔ احمد خواجه‌نصیر طوسی
ناشر: انتشارات فاطمی
چاپ سوم، ۱۳۹۰
شابک X_۴۳۴_۳۱۸_۹۶۴
ISBN 964-318-434-X
تیراژ: ۱۵۰۰ نسخه
قیمت: ۶۰۰۰ تومان

آماده‌سازی پیش از چاپ: واحد تولید انتشارات فاطمی
- مدیر فنی تولید: فرید مصلحی
- طراح جلد: زهرا قورچیان
- حروفچینی و صفحه‌بندی (LaTeX-پارسی): مریم مهری، زهرا حلاج
- نمونه‌خوان: مهسا مهدیلو
- آماده‌سازی تصاویر: فاطمه ثقفی
- نظارت بر چاپ: علی محمدپور

چاپ و صحافی: چاپخانهٔ خاشع

کلیهٔ حقوق برای انتشارات فاطمی محفوظ است.

انتشارات فاطمی تهران، میدان دکتر فاطمی، خیابان جویبار، خیابان میرهادی، شمارهٔ ۱۴، کدپستی ۱۴۱۵۸۸۴۷۴۱، تلفن: ۸۸۹۴۵۵۴۵ (۲۰ خط)
www.fatemi.ir • info@fatemi.ir

کروپر، ویلیام ه.
فیزیکدانان بزرگ (مجلّد اوّل)/مؤلف ویلیام ه. کروپر؛ مترجم احمد خواجه نصیر طوسی.ــ تهران: فاطمی، ۱۳۸۷.
ISBN 964-318-434-X
فهرستنویسی بر اساس اطلاعات فیپا.
چاپ سوم: ۱۳۹۰
عنوان اصلی:
Great Physicists: the life and times of leading physicists from Galileo to Hawking, 2001.
مندرجات: ج۱. مکانیک، ترمودینامیک، الکترومغناطیس، مکانیک آماری، نسبیت.
۱. فیزیکدانان ــ سرگذشتنامه. الف. خواجه نصیر طوسی، احمد، ۱۳۰۶ ــ ، مترجم. ب. عنوان.
QC۱۵/ک۴ف۹
۱۳۸۷
کتابخانهٔ ملی ایران
۵۳۰/۰۹۲۲
م۸۵ـ۲۹۷۶۸

فهرست

پیشگفتار مؤلف . . . . . پنج
سخنی از مترجم . . . . . هفت

i. مکانیک

خلاصهٔ تاریخی ۱

۱. چگونگی حرکت افلاک ۳
گالیلئو گالیلی

۲. مردی همیشه در حال تفکر ۱۹
آیساک نیوتون

ii. ترمودینامیک

خلاصهٔ تاریخی ۴۷

۳. داستانی از دو انقلاب ۴۹
سادی کارنو

۴. دربارهٔ موضوعی ناشناخته ۵۹
رابرت مایر

۵. تعهد مقدس ۶۸
جیمز جول

۶. وحدتها و یک وحدت‌جو ۸۲
هرمان هِلمهُلتز

۷. دانشمندی با ذوق هنری ۹۱
ویلیام تامسن

۸. راهی به‌سوی انتروپی ۱۰۹
رودولف کلازیوس

۹. بیشترین سادگی ۱۲۴
ویلارد گیبس

۱۰. آخرین قانون ۱۴۶
والتر نرنست

iii. الکترومغناطیس

خلاصهٔ تاریخی ۱۵۹

۱۱. نیرویی از طبیعت ۱۶۱
مایکل فارادی

۱۲. دانشمندی همچون جادوگر ۱۸۲
جیمز کِلِرک ماکسول

iv. مکانیک آماری

خلاصهٔ تاریخی ۲۰۹

۱۳. مولکولها و انتروپی ۲۱۱
لودویک بولتزمن

v. نسبیت

خلاصهٔ تاریخی ۲۳۵

۱۴. ماجرای جسورانه در تفکر ۲۳۷
آلبرت اینشتین

وقایع‌نگاری رویدادهای عمده ۲۶۷

شرح واژه‌ها ۲۷۳

قدردانی ۲۷۹

پیشگفتار مؤلف

این کتاب شرحی است دربارهٔ زندگیهای علمی، به‌ویژه زندگی سی تن از مشاهیر بزرگ علم فیزیک. نام بعضی از آنان آشناست (نیوتون، اینشتین، کوری، هایزنبرگ، بور)، در حالی‌که نام دیگران ممکن است ناآشنا باشد (کلازیوس، گیبس، میتنر، دیراک، چاندراسخار). همهٔ آنان انسانهای فوق‌العاده‌ای بوده‌اند یا هستند، دست‌کم به همان‌قدر که موضوعاتشان مسحورکننده است. زندگینامهٔ کوتاه آنان در این کتاب بیان داستانهایی است هم از خود افراد و هم از علم فیزیک آنان.

فصلهای کتاب هم از لحاظ ساختار و هم از لحاظ اندازه متفاوت است، و بستگی دارد (گاهی به اختصار) به مطالب موجود دربارهٔ زندگینامهٔ آنان. بعضی از فصلها مجهّز به بخشهای کوتاهی است (با عنوان «درسها») شامل اطلاعات زمینهٔ موضوعاتی در ریاضی، فیزیک و شیمی که خواننده ممکن است از آنها آگاهی نداشته باشد.

تلقی مرسوم این است که خوانندهٔ عام از معادلات ریاضی می‌ترسد. من این توصیه را نپذیرفته‌ام و معادلاتی را در بعضی از فصول گنجانده‌ام. معادلات ریاضی زبان فیزیک را بیان می‌کند: خواننده نمی‌تواند پیام موردنظر را بدون یادگیری چیزی دربارهٔ این زبان دریافت کند. این دریافت امکان‌پذیر خواهد بود، هرگاه دانش مقدماتی (در حد دبیرستان) از جبر داشته باشید، و اگر لازم باشد به بخشهایی با عنوان «درسها» توجه کنید. واژه‌نامه و «وقایع‌نگاری رویدادهای عمده» در پایان کتاب نیز ممکن است سودمند باشد.

هیچ ادعایی نداریم که این کتاب یک بررسی جامع یا دانشورانه است؛ منظور این بوده است که مطالب خواندنی، تفریحی برای دانشمندان و دانشجویان علم (رسمی و غیررسمی) باشد. امید متواضعانهٔ من این است که شما این فصلها را به‌طور تصادفی و برای سرگرمی هم که شده خواهید خواند، و این درس را می‌آموزید که به‌رغم همه‌چیز، علم یک مجاهدت انسانی است.

ویلیام ه. کروپر

به‌نام خدا

سخنی از مترجم

هر علمی دو وجه بسیار متفاوت دارد، یکی وجه نظریه‌ای و دیگری وجه کاربردی آن است که تکنولوژی نامیده می‌شود. وجه نظریه‌ای علمی، شناخت طبیعت و مسیر تحولات آن در طی زمان از آغاز تا زمان حال و پیشگوییهای آینده و به‌طورکلی دانستن نادانستنیهایی است که تا ابد ادامه دارد. اما تکنولوژی اگر مهار شده باشد با مایه گرفتن از وجه نظریه‌ای، وسایلی ایجاد می‌کند که موجب پیشرفت علم نظریه‌ای و رفاه زندگی می‌شود.

این کتاب به‌طور عمده تاریخ علم نظریه‌ای را باز می‌نمایاند. مطالب کتاب شامل نُه بخش است. در هر بخش، مختصری دربارهٔ شرح حال و عمدتاً بیان نقش و فعالیتهای دانشمندانی که به‌ترتیب در پیشرفت آن بخش از فیزیک مؤثر بوده‌اند آمده است. توضیح کاملتر کتاب در پیشگفتار مؤلف ملاحظه می‌شود. مسیر مفاهیم هر بخش کتاب نشان می‌دهد که چگونه نکته‌ای به‌طور شهودی در ذهن شکوفا می‌شود و با روش علمی و پژوهشهای مداوم و بعضاً بسیار سرسختانه پیش می‌رود، و در این رهگذر افت‌وخیزهایی دارد اما جزمیت و نقطهٔ پایانی ندارد. فیزیک نظریه‌ای گرچه منشأ اختراعات و پیشرفت آن وابسته به تکنولوژی مهار شده است، اما از لحاظ مادی سودآور نیست. بدین معنی که پژوهش علمی عشق حقیقت‌جویی می‌طلبد و چندان پاداش مالی ندارد. بیان مطالب با استفاده از فرمولهای اساسی فیزیک بسیار صریح، قابل فهم و استادانه است. با توجه به این نکات و موارد دیگری که در طول کتاب آمده است، خواندن این کتاب برای طالبان علم به‌ویژه دانشجویانی که در مرحلهٔ تصمیم‌گیری و جهت‌یابی مسیر فعالیتهای آیندهٔ خود هستند، مفید خواهد بود.

با توافق ناشر قرار شد که ترجمهٔ کتاب در دو مجلّد منتشر شود. اکنون مجلّد اول کتاب، شامل بخشهای مکانیک، ترمودینامیک، الکترومغناطیس، مکانیک آماری و نسبیت تقدیم علاقه‌مندان می‌شود. بدیهی است نقد و اظهارنظرهای خوانندگان آمادگی ترجمهٔ مجلّد دوم را که شامل بخشهای مکانیک کوانتومی، فیزیک هسته‌ای، فیزیک ذرات، اخترشناسی، اخترفیزیک و کیهان‌شناسی است، تسهیل می‌کند. از سرکار خانم فروغ فرجود و آقای فرید مصلحی که متن این کتاب را بازخوانی کرده‌اند و نکاتی را در جهت بهبود کتاب یادآور شده‌اند صمیمانه سپاسگزاری می‌شود.

i

مکانیک

خلاصهٔ تاریخی

فیزیک از مشاهدات ساخته می‌شود. هیچ نظریهٔ فیزیکی نمی‌تواند موفقیت‌آمیز باشد، هرگاه با مشاهدات تأیید نشده باشد، و نظریه‌ای را که قویاً با مشاهدات حمایت می‌شود، نمی‌توان انکار کرد. برای ما این مطالب حقایقی بدیهی است. اما در اوایل قرن هفدهم این درسها هنوز آموخته نشده بود. کسی که نخستین‌بار این آموزه را مطرح کرد که مشاهدات در علم، عاملی اساسی است و منتها درجهٔ اهمیت را دارد، گالیلئو گالیلی (گالیله) بود.

گالیله ابتدا به مطالعهٔ حرکت اجسام زمینی، پاندولها، گلوله‌های در حال سقوط آزاد، و پرتابه‌ها پرداخت. او مشاهداتش را به زبان ریاضی تناسبها خلاصه و داده‌های آزمایشی‌اش را به‌صورت ایده‌آل‌شدهٔ بزرگی برونیابی می‌کرد که امروزه آن را «اصل اینرسی (لختی)» می‌نامیم. این اصل به ما می‌گوید، که یک جسم پرتاب‌شده در امتداد یک سطح بی‌نهایت بدون اصطکاک، حرکتش را برای همیشه، با سرعت ثابت، ادامه می‌دهد. مشاهدات او آغاز علم حرکت بود که امروزه آن را «مکانیک» می‌نامیم.

گالیله آسمان شب و روز را نیز با تلسکوپی که تازه اختراع شده بود، مشاهده کرد. او توانست اهلّهٔ زهره، کوههای ماه، لکه‌های خورشیدی و قمرهای مشتری را با تلسکوپ ببیند. این مشاهدات سماوی مبنای یک مکانیک سماوی شد که در آن خورشید در مرکز جهان جای می‌گرفت. آموزهٔ کلیسا به گونهٔ دیگری بود، یعنی زمین را مرکز عالم می‌دانست. تعارض بین تلسکوپ گالیله و جزمیّت کلیسا برای گالیله ادبارآفرین بود، اما درنهایت تلسکوپ فائق آمد و داستان شورانگیز این برخورد، مهمترین درس را به گالیله آموخت.

گالیله در سال ۱۶۴۲ چشم از جهان فرو بست و در همان سال، بزرگترین جانشین او، آیساک نیوتون چشم به جهان گشود. نیوتون از مبانی گالیله براساس مفاهیم جرم، اندازهٔ‌حرکت و نیرو و سه قانون حرکت، یک سیستم مکانیکی ساخت. نیوتون همچنین یک زبان ریاضی (روش «فلوکسیون»، بسیار نزدیک به حسابان «دیفرانسیل و انتگرال امروز ما») برای بیان سیستم مکانیکی‌اش، اختراع کرد. اما در یک پیچ و خم تاریخی بسیار عجیب، خود او به‌ندرت این زبان ریاضی را به‌کار گرفت.

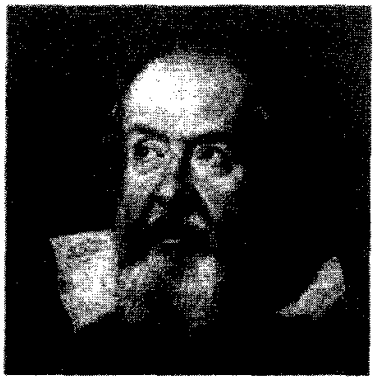
مکانیک نیوتون اهمیت جهانی داشت و هنوز هم دارد. این مکانیک برای توضیح حرکت اجسام زمینی و فراتر از آن برای سیارات، ستارگان و کهکشانها، به‌کار می‌آید. یک مفهوم وحدت‌بخش بزرگ نظریهٔ گرانش جهانی نیوتون است. براساس این مفهوم همهٔ اجسام کوچک، بزرگ و نجومی (به‌استثنای چند مورد نامتعارف)، با نیرویی که از یک قانون سادهٔ عکس مجذور پیروی می‌کند، یکدیگر را جذب می‌کنند.

گالیله و نیوتون بنیان‌گذاران فیزیک جدیدند. آنان قواعد بازی و این عقیدهٔ راسخ ماندگار را به ما اهدا کردند که جهان فیزیکی فهم‌پذیر و قابل درک است.

۱

چگونگی حرکت افلاک

گالیلئو گالیلی



قصهٔ بُرج پیزا

افسانه‌ای است مبنی بر اینکه روزی احتمالاً در سال ۱۵۹۱، جوانی بلندپرواز و در آن موقع استادی سرخورده از ریاضیات، با کیسه‌ای از گلوله‌های سربی و چوبی به بالای برج زنگ، واقع در پیزا می‌رود. در آنجا به جامعهٔ دانشگاهی پیزا اعلان می‌کند که می‌خواهد نادرستی نظریهٔ ارسطو در مورد سقوط اجسام را به‌وسیلهٔ آزمایش ثابت کند. ارسطو تقریباً دو هزار سال پیش از آن، یکی از آموزه‌هایش این بود که اجسام با آهنگی متناسب با وزنشان سقوط می‌کنند یعنی یک گلولهٔ ده پوندی ده برابر سریعتر از گلولهٔ یک پوندی سقوط می‌کند. استاد جوان در اوج شکوفایی به جمع شاگردان مشتاق و استادان فلسفهٔ ناراضی پایین برج، گلوله‌هایی انتخاب شده از یک ماده، اما با وزنهای بسیار متفاوت را نشان داد و آنها را ساقط کرد. در واقع دو گلوله با وزنهای متفاوت (از هر ماده‌ای) بدون مقاومت هوا (یعنی در خلأ) در یک زمان به زمین می‌رسند. این امر در روزی از سال ۱۵۹۱ در پیزا به‌وقوع نپیوست، اما به هر حال اصل قدیمی ارسطو به‌وضوح نقض شد، و آنچه استاد جوان به حضار گفت درسی آموزنده بود. شاگردان فریاد شادی کشیدند و استادان فلسفه مردّد ماندند.

قهرمان این داستان گالیلئو گالیلی[1] (گالیله) بود. او در واقع این «آزمایش» را در برج پیزا اجرا نکرد، اما اگر هم اجرا کرده بود به‌طور کلی به همان نتیجه می‌رسید. گالیله در دوران زندگی خود توجه اندکی به مقام و اقتدار داشت. یکی از اهداف همیشگی گالیله، آموزه‌های ارسطو بود که در دانشکده‌های فلسفهٔ دانشگاه زمان گالیله حرف آخر و در نهایتِ اعتبار بود. شیوهٔ اخلاقی گالیله مواجهه، درگیری، بذله‌گویی،

1. Galileo Galilei

طعنه و غالباً نیش زدن بود. شیوهٔ فکری او همچون آموزه‌های داستان بُرج این بود که نظریه‌های خود را نهایتاً با توسل به مشاهده‌ها بسازد.

فیلسوفان پیزا نه ازگالیله تأثیرپذیرفتند و نه از روشهای او، و حتی اگر شاهد آزمایش برج هم می‌بودند ابراز همنوایی نمی‌کردند. در این صورت عدم تجدید قرارداد گالیله با دانشگاه پیزا برای هیچ‌کس غیرمترقبه نبود.

پادوا

اما گالیله می‌دانست آنچه را می‌خواهد، چگونه به‌دست آورد. او پُستی را که در پیزا داشت به‌یاری مارکویز گویدوبالدو دل مونت[1]، نجیب‌زاده و ریاضیدان شایسته و بانفوذ به‌دست آورده بود. قصد بعدی گالیله به‌دست آوردن کُرسی خالی‌شدهٔ ریاضیات در دانشگاه پادوا[2] بود. حامی عمدهٔ او در پادوا جان وینچنتزیو پینلی[3]، شخصیت بانفوذ ثروتمندی در حیات فرهنگی و عقلانی پادوا بود. گالیله با پیروی از توصیهٔ پینلی، ممتحنان را شیفته کرد و تأیید سنای ونیزی را به‌دست آورد. (پادوا در جمهوری ونیز، در حدود بیست مایلی غرب شهر ونیز بود.) سخنرانی او در مراسم معرفی، شور و هیجان خاصی داشت.

پادوا برای بروز استعدادهای گالیله و شیوهٔ زندگی او محیطی بسیار مطلوبتر از محیط عقب‌ماندهٔ ذهنی پیزا بود. او در نزدیکی شهر ونیز آسایش و علاوه بر آن دوستانی اشرافی یافت. در میان آنان رفیق مباحثهٔ او جان‌فرانچسکو ساگردو[4]، نجیب‌زادهٔ ثروتمندی با نزاکت غیرعادی بود که گالیله او را می‌ستود. گالیله با بذله‌گویی و ابتکاری که برای مباحثه داشت به‌زودی با محافل شهر مأنوس شد. بنا به گفتهٔ جیمز رستونِ پسر[5]، یکی از زندگینامه‌نویسان گالیله، همسر او، مارینا گامبا[6] زنی بود تندخو، تنومند، خوش‌بنیه و احتمالاً بی‌سواد. گالیله و مارینا سه فرزند داشتند: دو دختر، به نامهای ویرجینیا[7] و لیویا[8] و یک پسر به‌نام وینچنتزو[9]. گالیله به هنگامی که در زندگی بعدی خود دچار گرفتاری مصیبت‌بار می‌شد، با معاشرت دختر بزرگترش ویرجینیا احساس آسایش فراوانی می‌کرد.

گالیله طی هجده سال در پادوا (۱۶۱۰ـ۱۵۹۲)، اکتشافات مهمی در مکانیک و اخترشناسی کرد. با مشاهدات دقیق قانون «توان دوم-زمانها» را فرمول‌بندی کرد. بنابر این قانون، فاصلهٔ قائم که یک جسم در سقوط آزاد یا در طول یک سطح شیبدار طی می‌کند متناسب با مربع (توان دوم) زمانِ سقوط آن است. (با نشانه‌گذاری جدید، معادلهٔ سقوط آزاد به‌صورت $s = \frac{gt^2}{2}$ بیان می‌شود که در آن s فاصلهٔ قائم، t زمان سقوط و g شتاب گرانی است.) او قانونهای حرکت پرتابی را نه با آزمایش برج، بلکه به‌صورت کنترل‌شده‌ای مشخص کرد که در آن گلوله‌ای روی میزی با سطح مایل می‌غلتد و سپس به‌طور افقی یا

1. Marquis Guidobaldo del Monte 2. Padua 3. Gianvincenzio Pinelli
4. Gianfrancesco Sagredo 5. James Reston,Jr 6. Marina Gamba 7. Virginia 8. Livia
9. Vincenzo

مایل از میز رها شده، به کف اطاق می‌افتد. گالیله دریافت که با تفکیک حرکت پرتابی به دو مؤلفهٔ افقی و عمودی می‌تواند محاسباتی به‌عمل آورد که تقریباً با آزمایشهای او سازگار باشد. مؤلفهٔ افقی با سرعت گلوله به هنگام رها شدن از میز معین می‌شود که «پایستار» است، یعنی مجدداً تغییر نمی‌کند و مؤلفهٔ قائم ناشی از وزن گلوله است که از قانون توان دوم- زمانها پیروی می‌کند.

گالیله سالها شیفتهٔ حرکت ساده و منظم پاندول بود. آنچه او را بیشتر تحت تأثیر قرار می‌داد ثابت بودن «دورهٔ» زمانی پاندول یعنی مدت زمانی بود که چرخهٔ رفت و برگشت آن کامل می‌شد. هرگاه زاویهٔ نوسان پاندول کمتر از حدود ۳۰° باشد، دورهٔ زمانی با تقریب خوبی، فقط بستگی به‌طول آن دارد. (افسانهٔ دیگری دربارهٔ گالیله، او را به‌صورت پسر نوزده‌ساله‌ای توصیف می‌کند که در کلیسا کمتر به مراسم دعا توجه دارد و با نبض خود زمان نوسانهای چراغی را که با سیم از سقف بلند آویزان است اندازه‌گیری می‌کند.) گالیله در پادوا قانون ثابت بودن دورهٔ نوسان پاندول را با آزمایشهای متعدد ثابت کرد و سپس به کشف بعضی از رموز ظریف آن پرداخت.

در سال ۱۶۰۹، این خبر به ونیز رسید که عینک‌سازان هلندی یک وسیلهٔ اُپتیکی (نوری) اختراع کرده‌اند که اجسام دور را بسیار نزدیکتر می‌نمایاند. این همان وسیله‌ای بود که بعداً تلسکوپ نامیده شد. گالیله با شنیدن این خبر فوراً فکر درخشانی به ذهنش راه یافت. اگر او می‌توانست مُدل اصلی آن را بسازد و پیش از آنکه بازرگانان هلندی وارد صحنه شوند، آن را در برابر مقامات ونیزی به نمایش بگذارد؛ پاداشهای غیرمنتظره‌ای نصیب او می‌شد. او به‌قدر کافی از اپتیک (نورشناسی) اطلاع داشت که حدس بزند طرح هلندی آن ترکیبی از عدسیهای کوژ و کاو بوده است. او و کسانی که برای او وسیله‌هایی می‌ساختند مهارت استثنایی لازم برای ساییدن عدسیها را داشتند. بنابر گزارش خود گالیله طی بیست و چهار ساعت، او تلسکوپی بهتر از آنچه صنعتگران هلندی ساخته بودند در دست داشت. گالیله می‌توانست برای اختراعش مبلغ گزافی درخواست کند و بدون تردید دریافت هم می‌کرد. اما برای او شهرت و نفوذ کارش بیشتر از دریافت پول اهمیت داشت. گالیله در مراسم پُرتشریفاتی تلسکوپی با توان هشت را به نیککولو کونتارینی[1]، رئیس کل دادگاههای ونیز، اهدا کرد. رستون در کتابی با عنوان گالیله مراسم اهدای تلسکوپ را چنین تصویر می‌کند: «جشن بزرگداشتی از نبوغ ونیزی، جملگی با لباسهای زربفت از مردان پیشرو و مترقی، مخبران ممتاز و مأموران مخفی برپا بود که ناگهان تلسکوپ به‌عنوان دانش شکوفندهٔ پادوایی ارائه شد.» گالیله پاداش بزرگی دریافت کرد، حقوقش دو برابر شد و مجدداً به مقام دانشگاهی خود، برای تمام عمر، منصوب گردید.

گالیله، سپس تلسکوپش را متوجه آسمان کرد و اکتشافات مهمی به‌عمل آورد. طی چند سال بعد سطح کوهستانی ماه، چهار قمر مشتری، هلالهای زهره، حلقه‌های زحل (که با تلسکوپ او به‌خوبی تفکیک نمی‌شد) و لکه‌های خورشید را مشاهده کرد. در سال ۱۶۱۰ گالیله مشاهدات خود را در اثری به‌نام پیک ستاره‌ای[2] منتشر کرد که نه‌تنها در ایتالیا بلکه در سراسر اروپا به‌سرعت شور و هیجانی ایجاد کرد.

1. Niccolò Contarini 2. Starry Messenger

اما گالیله بیشتر می‌خواست. او تدبیری اندیشید که به توسکانی و فلورانس، که بیشتر زندگی اولیهٔ او آنجا گذشته بود بازگردد. دوک بزرگ توسکانی کوزیمو دِ مدیچی[1] جوان، یکی از شاگردان اخیر گالیله بود. گالیله برای پیشبرد منظور خود، کتاب پیک ستاره‌ای را به دوک بزرگ اهدا و چهار قمر مشتری را اقمار مدیچی نام‌گذاری کرد. این عمل تملق‌آمیز او برای منظوری که داشت مؤثر افتاد. گالیله به‌زودی پیشنهاد عجیبی از فلورانس دریافت کرد: حقوقی معادل آنچه به بیشترین مقام درباری پرداخت می‌شد، بدون وظیفهٔ تدریس ـ در واقع بدون هیچ نوع وظیفه‌ای ـ با عنوان ریاضیدان و فیلسوف عالی برای دوک بزرگ توسکانی. گالیله در ونیز و پادوا از حسادت و تلخکامی برکنار بود.

فلورانس و رُم

گالیلهٔ خون‌گرم و بذله‌گو بار دیگر در میان نجبا دوستان فهمیده‌ای یافت. ارزشمندترین آنان دوستی جوان، بااستعداد و شکاک به‌نام فیلیپو سالویاتی[2] بود. گالیله و شاگردانش در ویلای زیبای سالویاتی در پانزده مایلی فلورانس به‌طور منظم گرد هم می‌آمدند. اما گالیله حتی در این محیط باصفا احساس ناراحتی می‌کرد. او می‌خواست دنیای بیشتری را تسخیر کند و آن رُم ـ یعنی کلیسا بود. گالیله در سال ۱۶۱۱ به وزیر خارجهٔ دوک بزرگ پیشنهاد کرد که دیداری رسمی از رُم داشته باشد. او می‌خواست در آنجا تلسکوپش را به نمایش بگذارد و واتیکان را با اهمیت اکتشافات نجومی خود تحت تأثیر قرار دهد.

این امر مبارزه‌ای مخاطره‌آمیز را در پی داشت. در میان اکتشافات گالیله شواهدی بود آشوبناک علیه تعلیمات کلیسا که زمین را مرکز عالم می‌دانست. بطلمیوس، اخترشناس و ریاضیدان یونانی در قرن دوم میلادی مدافع این نظر کیهان‌شناختی بود و این نظر مدتهای مدید، حکمی جزمی برای کلیسا شده بود. گالیله در مشاهدات خود می‌توانست آثار حرکت قمرهای مشتری به دور مشتری را ببیند و پُردردسرتر این بود که هلالهای زهره را ناشی از حرکت این سیاره به دور خورشید می‌دانست. در قرن شانزدهم، اخترشناس لهستانی نیکولاوس کوپرنیکوس[3] نظریه‌ای کیهان‌شناختی مطرح کرده بود مبنی بر اینکه خورشید در مرکز عالم جای دارد. در سال ۱۶۱۱ که گالیله به رم سفر کرد گرایش بسیاری به نظریهٔ کوپرنیک داشت. کتاب مقدس نیز ماه و خورشید را در اصل، اجرام کاملی به‌صورت عنصر پنجم می‌دانست؛ و تلسکوپ گالیله کوهها و دره‌هایی را در ماه و لکه‌هایی را در خورشید آشکار کرده بود.

اما در سال ۱۶۱۱ مغایرت میان تلسکوپ و کلیسا به‌طور موقت پنهان بود و گالیله تا حد زیادی موفق ماند. او با پاپ مستبد، پُلِ پنجم ملاقات کرد و از حمایت و دعای خیر او برخوردار شد. در آن زمان و بعد از آن، قدرت متفکر پشتیبانِ تخت پاپ، کاردینال رابرت بلارمین[4] بود. وظیفهٔ او بود که ادعاهای گالیله را ارزیابی و موضع رسمی او را اعلام کند. او به‌نوبهٔ خود از منجمان و ریاضیدانان کالج رُمی

1. Cosimo de Medici 2. Filippo Salviati 3. Nicolaus Copernicus 4. Robert Bellarmine

عیسویت نظرخواهی کرد. گزارش آنان دربارهٔ اینکه تلسکوپ واقعاً کوههای ماه را آشکار می‌کند تردیدآمیز بود، اما مهمتر آن بود که شواهد تلسکوپ، هلالهای زهره و حرکت قمرهای مشتری را تأیید کردند.

گالیله در رُم حامی اشرافیِ جدیدی یافت. او شاهزاده فردریکو چزی[1] بنیانگذار و رهبر «آکادمی لینکسها[2]» بود. این آکادمی مجمعی مخفی بود که اعضای آن «فیلسوفانی مشتاق دانش واقعی‌اند و می‌خواهند به مطالعهٔ طبیعت و به‌ویژه به ریاضیات دست یابند.» اعضای این مجمع جوان، تُندرو و به معنی استعاری لینکس، تیزبین و در رفتار با دشمنان بی‌رحم بودند. گالیله در جشن پرهزینه‌ای که به‌وسیلهٔ چزی برپا شد مهمان افتخاری بود، و پس از مدتی کوتاه به‌عنوان یکی از لینکسها انتخاب شد.

گالیله دوستان بانفوذ بسیاری در رُم و فلورانس یافت ـ و ناگزیر معدودی دشمنان متعهد هم داشت. عمده‌ترین آنها در فلورانس، لودویکو دلا کُلمب[3] بود که خودش را رهبر منصوب منتقدین گالیله می‌دانست. کُلمب در زبان ایتالیایی به‌معنی «کبوتر» است. گالیله برای ابراز تنفر خود، کلمب و یارانش را «لیگِ کبوتر» می‌نامید.

در اواخر سال ۱۶۱۱، کلمب، که صلاحیتهای لازم را نداشت، درصدد حمله برآمد و گالیله را برای یک مبارزهٔ عقلانی به چالش طلبید: مناظره‌ای عام دربارهٔ نظریهٔ اجسام شناور، به‌ویژه یخ. یک پروفسور پیزایی چالش رسمی را به گالیله واگذار کرد و گالیله با شادمانی پاسخ داد: «همیشه حاضرم از هر کس چیزی بیاموزم، من مصاحبه و استدلال با دوست شما را دربارهٔ این موضوع نوعی التفات می‌دانم.» محل مناظره در قصر پیتی[4] بود. در میان حضار دو کاردینال، دوک بزرگ کوزیمو و دوشس بزرگ کریستین، مادر کوزیمو بودند. یکی از کاردینالها مافئو باربرینی[5] بود که بعداً پاپ اوربان[6] هشتم شد و نقش عمده‌ای در ماجرای گالیله داشت.

در مناظره، گالیله این نظر را مطرح کرد که یخ و اجسام دیگر به این علت شناور می‌مانند که سبکتر از مایعی هستند که در آن غوطه‌ور می‌شوند. کُلمب موضع ارسطو را پیش کشید و گفت یک قطعه یخ نازک و مسطح به دلیل شکل خاصی که دارد در آب شناور می‌ماند. گالیله بنابر معمول، استدلال خود را با نمایش مجهز کرد. وقتی او نشان داد که قطعه‌هایی از آبنوس حتی اگر به شکلهای بسیار نازکی باشند، همواره در آب فرو می‌روند، در حالی‌که یک توده یخ در سطح آب می‌ماند، حضار از جمله کاردینال باربرینی را مجاب کرد.

آغاز خروش طوفان

گالیله پس از پیروزی در مناظره به‌شدت مریض شد و برای بهبود یافتن خود به ویلای سالویاتی بازگشت. او پس از بهبودی نکاتی را که دربارهٔ اجسام شناور موردنظرش بود در رساله‌ای خلاصه کرد

1. Prince Frederico Cesi

۲. Lynxes (لینکس جانوری از تیرهٔ گربه‌سانان است که چشمهای تیزی دارد. م.)

3. Ludovico della Colombe 4. Pitti 5. Maffeo Barberini 6. Urban

و با سالویاتی به مطالعهٔ لکه‌های خورشید پرداختند. آنان از حرکت لکه‌های بزرگ خورشید به‌صورتی نقشه‌برداری کردند که این لکه‌ها از میان سطح خورشید در نزدیکی استوا از غرب به شرق سیر می‌کردند.

در بهار سال ۱۶۱۲ خبر رسید که گالیله و سالویاتی رقیبی دارند. این رقیب خود را اَپلیز[1] می‌نامید. (بعداً معلوم شد او پدر کریستوفر شینر[2]، استاد ریاضی کاتولیکی در باواریا، است.) اپلیز مدعی بود که مشاهدات لکه‌های خورشیدی نخست از آن او بوده و این لکه‌ها را به‌صورت تصویرهای عبور ستارگان از جلوی خورشید توضیح داده است. این امر موجب نگرانی و یأس گالیله شد. اپلیز نه‌تنها با دروغ به حق تقدم گالیله تجاوز می‌کرد، بلکه تفسیر نادرستی از لکه‌ها را نیز بر سر زبانها انداخته بود. گالیله همیشه متمایل به نوعی سوءظن و بدگمانی بود، اما اکنون یقین داشت. او از طریق یک رابط چند نامهٔ جسورانه برای اپلیز ارسال کرد، و با موافقت چزی قرار شد که این نامه‌ها به‌وسیلهٔ آکادمی لینکسها در رُم منتشر شود. گالیله در این نامه‌ها برای نخستین‌بار طرفداری خود را از کیهان‌شناختی کوپرنیکی ابراز کرد. او به‌عنوان مدرک، مشاهداتی را که دربارهٔ سیارات به عمل آورده بود متذکر شد: «من به شما می‌گویم که زُحل نیز، مانند زهره هلالی می‌شود و به‌طور تحسین‌آمیزی با سیستم بزرگ کوپرنیکی توافق دارد. اکنون بادهای مساعدی بر این سیستم می‌وزد. دلیل اندکی برای ترس از بادهای مخالف و سایه‌هایی بر چنین راه روشنی باقی می‌ماند.»

گالیله به‌زودی فرصت دیگری یافت تا اعتقادش را نسبت به کوپرنیک‌گرایی اعلان کند. یکی از شاگردانش به‌نام بِنِدِتو کاستِلی[3] پُست قبلی گالیله، یعنی کرسی ریاضیات در پیزا را اشغال کرده بود. کاستلی در نامه‌ای به گالیله نوشت که اخیراً او با دوشس کریستین بزرگ مصاحبهٔ مذهبی مضطرب‌کننده‌ای داشته است. «سرکار خانم با استناد به کتاب مقدس علیه من شروع به جر و بحث کرد.» توجه خاص ایشان به‌عبارتی از سفر یوشع بود که می‌گوید خدا به خورشید فرمان داد که بی‌حرکت بماند. بنابراین، دشمنان یوشع که در حال عقب‌نشینی بودند نتوانستند به شب پناه ببرند. آیا این موضوع از نظریهٔ حرکت خورشید به دور زمین حمایت نمی‌کند و منکر ادعای کوپرنیکی نیست که می‌گوید زمین به دور خورشید می‌گردد و خورشید ثابت است؟

گالیله احساس خطر کرد. دوشس بزرگ قدرتمند بود، و گالیله از اینکه حمایت دوشس را از دست بدهد بیمناک شد. او برای نخستین‌بار آشکارا نظریات کوپرنیکی خود را به‌گونه‌ای در ارتباط با موضوعات مربوط به الهیات مطرح کرد. گالیله ابتدا نامه‌ای برای کاستلی نوشت. او نوشت که گاهی اشتباه است که کلمات کتاب مقدس را تحت‌اللفظی در نظر بگیریم. کتاب مقدس را باید به طریقی تفسیر کنیم که با مشاهدات مستقیم تناقض نداشته باشد: «وظیفهٔ مفسران خردمند این است که معانی درست عبارات کتاب مقدس را بیابند که در این صورت با شواهد تجربهٔ حسی، توافق خواهد داشت.» او استدلال کرد

1. Apelles 2. Christopher Scheiner 3. Benedetto Castelli

که خدا قادر بود به سهولت، هم بنابر کیهان‌شناسی کوپرنیکی و هم بنابر کیهان‌شناسی بطلمیوس به یوشع یاری رساند.

نامهٔ گالیله به کاستلی که دست به دست به گردش درآمد و سرانجام منتشر شد، به‌مدت بیش از یک سال واکنش انتقادی نداشت. در این فاصلهٔ زمانی گالیله اقدامات جدیتری کرد. او با تأکید اولویت مشاهدات بر تعلیمات به هنگامی که این دو در تناقض باشند، نامهٔ خود را بسط داد و مستقیماً برای دوشس کریستین بزرگ ارسال کرد. او نوشت: «قصد عمده و اولیهٔ کتاب مقدس، پرستش خداوند و نجات ارواح است.» اما «در جر و بحثهای مربوط به پدیده‌های طبیعی نباید موضوع را با اعتبار عبارتهای کتاب مقدس، بلکه باید با تجارب حسی و تشریح و استدلال لازم آغاز کرد.» او یادآور شد که کاردینال سزار بارونیوس[1] زمانی گفته بود: «کتاب مقدس به ما می‌گوید چگونه به خدا برسیم، نه اینکه افلاک چگونه حرکت می‌کنند.»

نخستین حمله به گالیله از سوی موعظهٔ کشیش دومینیکن جوانی به‌نام تومازو کاچینی[2] به‌عمل آمد. او موعظهٔ شدیداللحنی مبنی بر معجزهٔ یوشع و بیهودگی فهم چنان رویدادهای بزرگی بدون ایمان به تعالیم رسمی ایراد کرد. این نقطهٔ عطفی در داستان گالیله بود. رستون در این‌باره می‌گوید: «مشهورترین دانشمند ایتالیایی، فیلسوف دوک بزرگ توسکانی، دوست کاردینالهای قدرتمند در رُم در انظار عمومی توسط مأموری که خود را مدافع ایمان می‌دانست در موعظه‌ای مهم، به ارتداد متهم شد.» کاچینی و پدر نیککولو لورینی[3]، کشیش دومینیکنی دیگر، موضوع گالیله را به دادگاه تفتیش عقاید رم کشاندند و نامهٔ گالیله به کاستلی را به‌عنوان شاهد ارتداد ارائه کردند.

گالیله نتوانست این رویدادها را نادیده بگیرد. او می‌بایست به رم می‌رفت و با مفتشان دادگاه مواجه می‌شد. احتمالاً عامل مؤثر، کاردینال بلارمین بود که چهار سال قبل دربارهٔ مشاهدات نجومی گالیله گزارش مساعدی ارائه کرده بود. اما گالیله بار دیگر به‌مدت چند ماه مریض و ناتوان شد. سرانجام در اواخر سال ۱۶۱۵ به رم رفت.

به منظور آماده‌سازی مفتشان، هیئتی از واتیکان تعالیم کوپرنیک را وارسی کرده و رأی داده بودند که مطالب آن، از قبیل اینکه خورشید در مرکز جهان جای دارد، «احمقانه، چرند و رسماً ارتدادی است.» در ۲۵ فوریهٔ سال ۱۶۱۶ جلسهٔ دادگاه تفتیش عقاید تشکیل شد و دستوراتی از پاپ پل[4] دریافت کردند که گالیله را متوجه کنند تا دربارهٔ تعالیم کوپرنیک نه آموزش دهد، نه دفاع یا بحث کند. نافرمانی به زندان می‌انجامد.

در صبح روز بعد بلارمین و یک مفتش، این حکم را به‌طور شفاهی به گالیله ابلاغ کردند. گالیله این تصمیم را بدون اعتراض پذیرفت و برای دریافت حکم رسمی از واتیکان به انتظار ماند. پس از چند هفته که آن حکم رسید، به‌طور شگفت‌آوری با قضاوتی که بلارمین قبلاً گفته بود، تفاوت داشت. در این حکم ابداً از گالیله و نشریات او ذکری نشده بود، بلکه به‌جای آن محدودیتی کلی دربارهٔ کوپرنیک‌گرایی

1. Cardinal Cesare Baronius 2. Tommaso Caccini 3. Father Niccolò Lorini 4. Pope Paul

صادر شده بود: «به اطلاع گروه مقدس عابدین کلیسا رسیده است که تعالیم نادرست فیثاغورس، یعنی آنچه دربارهٔ حرکت زمین و بی‌حرکت بودن خورشید به‌وسیلهٔ نیکولاوس کوپرنیک تعلیم داده می‌شد و روی هم رفته مخالف کتاب مقدس است، هنوز هم منتشر می‌شود و به‌دست بسیاری از مردم می‌رسد. بنابراین، مبادا هر عقیده‌ای از این نوع جای خود را پیش کسی باز کند و به حقیقت کاتولیک آسیب برساند. به فرمان گروه مقدس این آثار نیکولاوس کوپرنیک معلق می‌ماند تا اصلاح شوند.»

گالیلهٔ همیشه خوش‌بین با چرخش این رویدادها امیدوار شد. با وجود دستور جدّی بلارمین، گالیله از سرزنش شخصی نجات یافت و وقتی «اصلاحاتی» دربارهٔ نظریهٔ کوپرنیک به‌عمل آمد، ناچیز بود. گالیله سه ماه در رُم ماند و فرصتهایی یافت تا رُک‌گوتر از همیشه باشد. سرانجام وزیر امورخارجه توسکان به او نصیحت کرد «سر به سر سگ خوابیده نگذارد» و اضافه کرد «شایعاتی هست که ما دوست نداریم».

ستاره‌های دنباله‌دار، یک بیانیه* و یک گفت‌وگو

گالیله بار دیگر در فلورانس اغلب اوقات سالهای ۱۶۱۷ و ۱۶۱۸ بیمار و افسرده بود. در چهار ماه آخر سال ۱۶۱۸ که سه دنباله‌دار در آسمان شب ظاهر شد او توانایی تفسیر آن را نداشت. اما، وقتی پدر هوراتیو گراسی[1]، استاد زیاضی درکالج رومانو یک طلبهٔ بااستعداد، کتابی منتشرکرد که در آن استدلال کرده بود ستاره‌های دنباله‌دار شواهد تازه‌ای علیه کیهان‌شناسی کوپرنیکی به‌دست می‌دهد، گالیله را برانگیخت که کاری بکند. ابتدا گالیله بسیار ضعیف شده بود و نمی‌توانست خودش واکنشی نشان دهد، ازاین رو این وظیفه را به یکی از شاگردانش به‌نام ماریو گویدوچچی[2]، یک حقوق‌دانِ فارغ‌التحصیل کالج رومانو واگذار کرد. جزوه‌ای با عنوان بحثی دربارهٔ ستاره‌های دنباله‌دار با نام گویدوچچی منتشر شد، اگر چه استدلالهای آن آشکارا از آنِ گالیله بود.

کار گراسی واکنش ارزشمندی را به‌بار آورد و گالیله در سالهای ۱۶۲۱ و ۱۶۲۲ به قدر کافی برانگیخته و سلامت خود را بازیافته بود که توانست بیانیهٔ صریح و روان خود را با عنوان تحلیلگر (Assayer) منتشر کند. او در این بیانیه مدعی شد که «فلسفه درکتاب بزرگ جهان به طریقی نوشته شده است که پی در پی در برابر چشمان خیرهٔ ما گشوده می‌شود. اما این کتاب را نمی‌توان فهمید، مگر آنکه ابتدا زبان خواندن آن و الفبایی را که این زبان از آنها ترکیب یافته است بیاموزیم. این کتاب به زبان ریاضیات نوشته شده و حروف آن مثلثها، دایره‌ها و دیگر اشکال هندسی است که بدون آن انسان نمی‌تواند یک کلمهٔ آن را بفهمد و بدون آن درکلافی پیچیده سرگردان می‌ماند».

بیانیهٔ تحلیلگر مورد تأیید واتیکان قرار گرفت، و کاردینال باربرینی، که گالیله را در مباحثه با دِلا کلمب حمایت کرده بود، نامه‌ای مستدل و دوستانه با این عبارت که «ما همواره در خدمت شما هستیم» برای گالیله نوشت. اما به‌طوری که معلوم شد، تعارفات مصلحت‌آمیز باربرینی اصلاً قول مساعدی نبوده است. او در سال ۱۶۲۳، با نام اوربان هشتم به‌عنوان پاپ انتخاب شد.

*. manifesto 1. Horatio Grassi 2. Mario Guiducci

گالیله پس از بهبود از ضعف مزاج زمستانی، بار دیگر در بهار سال ۱۶۲۴ راهی رُم شد، درحالی‌که چند میکروسکوپ به‌همراه داشت. طرح اصلی میکروسکوپ، مانند تلسکوپ از هلند بود، اما او اصلاحات فراوانی در آن به‌عمل آورده بود که کاربردهای علمی داشت. این میکروسکوپ که تصویرهای حشرات را بزرگتر نشان می‌داد، مایهٔ شگفتی متخصصان رُمی شد.

گالیله پس از مدت کوتاهی که به رم وارد شد، با اوربان هشتم که به‌تازگی انتخاب شده بود، دیدار کرد. گالیله انتظار داشت که کاردینال باربرینی سابق بار دیگر به او قول مساعدت بدهد، اما ناامیدانه با شخصیتی متفاوت مواجه شد. پاپ جدید، شخصیتی مستبد و یاوه‌گو بود که کارهایش را به خویشاوندانش می‌سپرد و دل‌مشغولی او مبارزات نظامی بود. با وجود این، گالیله در حالی رُم را ترک کرد که هنوز متقاعد بود راه روشنی در پیش دارد. او در نامه‌ای به چزی نوشت: «دربارهٔ مسئلهٔ کوپرنیک، مقام مقدس گفت که کلیسای مقدس عقاید او را محکوم نکرده و به‌عنوان عقایدی کفرآمیز محکوم نخواهد کرد، اما فقط بی‌پروایی کرده‌اید. مادامی که به‌درست بودن عقیدهٔ خود اصرار نورزید، ترس موجبی ندارد.»

اکنون تدبیر گالیله این بود که مباحث خود را، به‌صورت فرضیه‌ای بدون آنکه مدعی صحت مطلق آن باشد، ارائه کند. ابداع ادیبانهٔ او مناظرهٔ مکتوب بود. او سه شخصیت را خلق کرد که دربارهٔ شایستگیهای سیستم کوپرنیکی و سیستم ارسطویی گفتگو می‌کنند، اما ظاهراً در این گفتگو نیت خاصی مطرح نیست. او دو شخصیت را به‌خاطر دوستان فلورانسی و ونیزی مهربانش، جان‌فرانچسکو ساگردو و فیلیپو سالویاتی نامید، که هر دو مرده بودند. در این مناظره سالویاتی در نقش گالیله و ساگردو در نقش یک فرد عادی هوشمند است. شخصیت سوم که گالیله او را سیمپلیچو می‌نامد طرفدار ارسطو است.

این مناظره که نام کامل آن مناظره دربارهٔ دو سیستم عمدهٔ جهانی است، به‌طور متناوب مدت پنج سال، بین سالهای ۱۶۲۴ و ۱۶۲۹، ذهن گالیله را اشغال کرد. سرانجام در سال ۱۶۲۹ این مناظره آمادهٔ انتشار شد و گالیله به رم سفر کرد تا تصویب سریع کلیسا را به‌دست آورد. او با پاپ اوربان ملاقات کرد و در بازگشت متقاعد شده بود که موانع جدی در کار نیست.

سپس رویدادهای مخاطره‌آمیزی پیش آمد. نخست آنکه چزی مُرد. گالیله امیدوار بود که کتاب مناظره‌اش را به‌وسیلهٔ آکادمی لینکسهای چزی منتشر کند و چزی را جانشین خودش در رم می‌دانست. در این حال گالیله با مرگ چزی نمی‌دانست به کجا روی آورد. حتی نگرانی بیشتر، دریافت نامهٔ مصرانه‌ای از کاستلی بود مبنی بر اینکه به او توصیه می‌کرد هر چه زودتر کتاب مناظره را در فلورانس منتشر کند. گالیله موافق بود، تا حدی به این دلیل که در آن زمان رُم و فلورانس با شیوع طاعون از هم جدا شده بودند. گالیله در اواسط این بیماری چاپخانه‌ای در فلورانس یافت و چاپ کتابش انجام شد. اما برای تصویب کلیسا، دو سال به طول انجامید. وقتی کتاب مناظره منتشر شد، مقدمه و مؤخره‌ای داشت که آن را یک مفتش رمی نوشته بود. ابتدا این کتاب با استقبال خوانندگان مواجه شد. خوانندگان تحت تأثیر شکل مناظره‌ای قرار گرفتند که گالیله در کتاب به‌کار گرفته بود. آنان شخصیتهای داستانی کتاب، حتی طعنه‌های سیمپلیچو را، سرگرم‌کننده یافتند.

در اوت سال ۱۶۳۲، ناشر کتاب گالیله فرمانی از دادگاه تفتیش عقاید دریافت کرد، مبنی بر اینکه چاپ و فروش این کتاب باید متوقف شود. در پس این اقدام ناگهانی خشم اوربان نهفته بود. او در استدلالهای زیرکانهٔ سالویاتی و ساگردو و واکنشهای ضعیف سیمپلیچو احساس ناخشنودی می‌کرد. او حتی در کلمات سیمپلیچو بعضی از دیدگاههای خودش را می‌یافت. اوربان کمیته‌ای را به سرپرستی برادرزاده‌اش، کاردینال فرانچسکو باربرینی، مأمور کرد که کتاب را بازبینی کنند. این کمیته گزارشی به اوربان داد و موضوع به دادگاه تفتیش عقاید واگذار شد.

محاکمه

پس از مدتها تأخیر ناشی از تجدید بیماری شدید گالیله و بازگشت طاعون، گالیله در فوریهٔ سال ۱۶۳۳ وارد رُم شد تا در برابر دادگاه تفتیش عقاید از خود دفاع کند. محاکمه در ۱۲ آوریل آغاز شد. اعضای دادگاه توجه خود را بر حکم بلارمین که در سال ۱۶۱۶ دربارهٔ گالیله صادر شده بود متمرکز کردند. فرانچسکو نیککولینی سفیر توسکانی در رم، این موضوع را برای همکاران اداری‌اش این‌طور شرح می‌دهد: «مشکل عمده، این مسئله است که این آقایان (مفتشان) مدعی‌اند در سال ۱۶۱۶ او [گالیله] محکوم شده بود تا دربارهٔ حرکت زمین نه بحثی بکند و نه حرفی بزند. در مقابل، او می‌گوید شرایط حکم چنین نبوده، بلکه چنین بوده است که نمی‌باید این نظریه را مسلم بداند و از آن دفاع کند. او می‌پندارد این وسیله را دارد که خود را موجه جلوه دهد، چون درکتابش ابداً دیده نمی‌شود که نظریهٔ موردنظر را مسلم دانسته و از آن دفاع کرده باشد. . .یا آن را ثابت شده بداند.» گالیله به‌عنوان مدرک، نامه‌ای از بلارمین را که حامی ادعای او بود تسلیم دادگاه کرد مبنی بر اینکه تعبیر سخت‌گیرانهٔ مفتشان معتبر نبوده است.

تاریخ‌نویسان دربارهٔ اعتبار این سند بحث دوسویه کرده‌اند و براساس شواهد دقیقاً قانونی به این نتیجه رسیده‌اند که مورد گالیله قویتر بوده است. (در این میان شایان ذکر است که حکم سال ۱۶۱۶ هرگز امضا و گواهی‌شده نبوده است.) اما مفتشان امکان تبرئه نداشتند. آنچه آنان پیشنهاد کردند، یک توافق مناسب به‌نظر می‌رسید بدین معنی که گالیله می‌باید خطاکاری خود را بپذیرد و به یک حکم خفیف دادگاه تن در دهد. گالیله موافقت و اطاعت کرد. اما وقتی حکم در ۲۲ ژوئن صادر شد بسیار شدیدتر از آن بود که او انتظارش را داشت: کتاب او در فهرست کتابهای ممنوعه جای گرفت و خود او به حبس ابد محکوم شد.

آخرین کار

دوستان گالیله همواره از دشمنان او بیشتر بودند. اکنون که دشمنان او را شکست داده بودند، دوستانش پیش آمدند تا خُسران وی را ترمیم کنند. نیککولینی سفیر توسکانی ترتیبی داد تا این حکم به حضانت اسکانیو پیککولومینی[1] اسقف اعظم سیینا* تبدیل شود. «زندان» گالیله قصر اسقف در سیینا بود که

1. Ascanio Piccolomini

*. سیینا (Siena) شهری در جنوب ایتالیا، یک جمهوری که شامل این شهر و پیرامون آن می‌شد و در سال ۱۵۵۷ ضمیمهٔ توسکانی شد. م.

شاعران، دانشمندان، و موسیقیدانان به‌کرّات برای گرامی‌داشت گالیله در آنجا آمد و رفت می‌کردند. ذهن گالیله به‌تدریج به مسایل علمی، به‌عنوانهایی که از درگیریهای مربوط به الهیات در امان باشد، معطوف می‌شد. او مناظرهٔ مکتوبی را دربارهٔ «دو علم جدید» طراحی کرد که تلخیصی از کارهایش دربارهٔ حرکت طبیعی (یک علم) و همچنین مسائلی مربوط به استحکام مواد (علم دیگر) بود. نام سه شخصیت مناظرهٔ او بار دیگر سالویاتی، ساگردو و سیمپلیچو بود، اما این‌بار آنان نمایندهٔ سه دوران زندگی نویسنده بودند. سالویاتی گالیلهٔ عاقل در دوران پیری؛ ساگردو گالیلهٔ میان‌سال در پادوا و سیمپلیچو گالیلهٔ جوان بود.

اما گالیله نتوانست در سیینا بماند. نامه‌هایی که از دخترش ویرجینیا دریافت می‌کرد خاطراتش را عمیقاً برمی‌انگیخت. ویرجینیا در آن موقع با نام خواهر ماریا چلست[1] در صومعهٔ سنت‌ماتیو[2] در شهر آرچتری[3]، نزدیک فلورانس بود. گالیله قبلاً ویلایی در آرچتری گرفته بود تا نزدیک ویرجینیا و دختر دیگرش، لیویا باشد که او نیز خواهری در صومعه بود. گالیله از پاپ تقاضا کرد که اجازه دهد تا به آرچتری بازگردد. سرانجام درخواست او اجابت شد، اما این خبر پس از آن دریافت شد که ماریا چلست به‌شدت بیمار بود و مهمتر آنکه پس از آن بود که عوامل پاپ گزارش داده بودند که «مجازات» راحت مرتد، در سیینا با جرم او مطابقت ندارد. فرمان پاپ مبنی بر این بود که گالیله به ویلای خود بازگردد و در محل بازداشت تحت نظر باشد.

گالیله در اواخر سال ۱۶۳۳ در آرچتری اقامت گزید، و به‌مدت چند ماه مراقب ویرجینیا دختر بیمارش بود. ویرجینیا بهبود نیافت و در بهار سال ۱۶۳۴ فوت شد. این امر برای گالیله تقریباً ضربهٔ نهایی بود. اما بار دیگر کار برای او حیات‌بخش شد. وی به‌مدت سه سال بر کتابی با عنوان گفتارهایی دربارهٔ دو علم جدید، متمرکز شد. این اثر، شاهکار نهایی‌اش، در سال ۱۶۳۷ به اتمام رسید، و در سال ۱۶۳۸ در هلند منتشر شد. (البته پس از آنکه دستنوشتهٔ او به‌طور قاچاق از ایتالیا به هلند برده شد.) با گذشت زمان چشمان گالیله به کوری گرایید. اوربان تنها با اکراه به گالیله اجازه داد برای مداوای پزشکی مدت کوتاهی به فلورانس برود.

اما پس از همهٔ رنجهایی که متحمل شده بود، گالیله هرگز ایمانش را از دست نداد. استیلمان دریک[4]، تاریخ علم‌نویس معاصر، می‌نویسد: «ثبات عقیدهٔ گالیله هم به‌عنوان یک کاتولیک، هم به‌عنوان یک دانشمند آشکار بود. او در موقعی تقریباً در حال ناامیدی نوشت که احساس می‌کند همهٔ آثار علمی‌اش در حال سوختن است؛ اما او هرگز چنانکه می‌پنداشت به ایمانش پشت نکرد. کلیسا از گالیله روی‌گردان شد و او را به‌خاطر آنچه کرده بود کم رنج نداد، اما گالیله فقط بعضی از کسانی را که در کلیسا قضاوت نادرستی در مورد کارهای او کرده بودند سرزنش کرد.»

1. Maria Celeste 2. St. Matthew 3. Arcetri 4. Stillman Drake

روشها

تجهیزات ریاضی گالیله ابتدایی بود. غالب روشهای ریاضی را که امروزه بخوبی به‌کار می‌بریم کشف نشده بودند یا در زمان گالیله کاربرد قابل اعتمادی نداشت. او نمادها یا معادلات ریاضی را به‌کار نمی‌گرفت، بجز تانژانتها که مفاهیم مثلثاتی بودند. اعدادی را که به‌کار می‌گرفت همواره به‌صورت اعداد صحیح مثبت بودند و هرگز به‌صورت اعداد اعشاری نبودند. حساب دیفرانسیل و انتگرال که بعدها به‌وسیلهٔ نیوتون و گاتفرید لایبنیتز کشف شد، در دسترس او نبود. او برای محاسبه از نسبتها و تناسبها، آن‌طور که در کتاب اصول (Elements) اقلیدس تعریف شده بود، مدد می‌گرفت. استدلال او غالباً هندسی بود، که آن هم آموزه‌ای از اقلیدس بود.

سبک ریاضی گالیله در بسیاری از قضایای او دربارهٔ حرکت یکنواخت و شتابدار آشکار است. در این‌جا مقداری از آنها را ارائه و سپس از طریق برگرداندن به زبان جبر «نوسازی» می‌کنیم. نخستین قضیه مربوط به حرکت یکنواخت است:

> هرگاه ذرّهٔ متحرکی با سرعت ثابت به‌طور یکنواخت منتقل شود و دو مسافت را طی کند، فاصله‌های زمانی لازم نسبت به یکدیگر به نسبت دو مسافت طی شده است.

برای ما (اما نه برای گالیله) این قضیه براساس معادلهٔ جبری $s = vt$ است، که در آن، s مسافت، v سرعت و t زمان است. این یک محاسبهٔ عادی است. مثلاً اگر به‌مدت سه ساعت (ساعت $t = ۳$) با سرعت شصت مایل در ساعت ($v =$ ۶۰ مایل بر ساعت) سفر کنید، مسافتی را که طی کرده‌اید ۱۸۰ مایل (مایل $s = ۳ \times ۶۰ =$ ۱۸۰) است. در قضیهٔ گالیله، ما دو مسافت را که $s_۱$ و $s_۲$ می‌نامیم برای دو زمان $t_۱$ و $t_۲$ با سرعت یکسان v به‌صورت زیر محاسبه می‌کنیم

$$s_۱ = vt_۱ \quad و \quad s_۲ = vt_۲$$

با تقسیم کردن دو طرف این معادله‌ها بر یکدیگر، نسبتِ قضیهٔ گالیله را به‌دست می‌آوریم،

$$\frac{t_۱}{t_۲} = \frac{s_۱}{s_۲}$$

قضیهٔ پیچیده‌تر به‌صورت زیر است که در آن دو سرعت برابر نیستند:

> هرگاه دو ذرّه با آهنگی یکنواخت، اما با سرعتهای نابرابر در مسافتهای نابرابر حرکت کنند، در این صورت نسبت فاصله‌های زمانی طی‌شده، حاصلضرب نسبت مسافتها در معکوس نسبت سرعتها خواهد بود.

در این قضیه، درگیری دو سرعت متفاوت $v_۱$ و $v_۲$ وجود دارد و دو معادله عبارتند از

$$s_۱ = v_۱t_۱ \quad و \quad s_۲ = v_۲t_۲$$

اگر بار دیگر دو طرف این معادله را بر هم تقسیم کنیم، خواهیم داشت

$$\frac{s_۱}{s_۲} = \frac{v_۱}{v_۲}\frac{t_۱}{t_۲}$$

برای تکمیل اثبات قضیه، دو طرف این معادله را در $\frac{v_۲}{v_۱}$ ضرب می‌کنیم

$$\frac{t_۱}{t_۲} = \frac{s_۱}{s_۲}\frac{v_۲}{v_۱}$$

اکنون ملاحظه می‌کنید که طرف راست معادله حاصلضربی است از نسبت مستقیم فاصله‌ها $\frac{s_۱}{s_۲}$ و نسبت معکوسی است از سرعتها $\frac{v_۲}{v_۱}$، آن‌طورکه برای اثبات قضیهٔ گالیله لازم است.

در قضایای مذکور فرض بر این است که سرعت v همواره ثابت است، یعنی حرکت شتاب ندارد. یکی از مهمترین نقشهای گالیله نحوهٔ برخورد او با حرکت شتابدار یکنواخت بود، هم در سقوط آزاد و هم در سطوح شیب‌دار رو به پایین. در این‌جا «یکنواختی» بدین معنی است که سرعت با مقادیر برابر در فاصله‌های زمانی برابر تغییر می‌کند. اگر شتاب یکنواخت را با a نشان دهیم، تغییر سرعت v در زمان t با معادلهٔ $v = at$ محاسبه می‌شود. مثلاً، اگر به اتوموبیلی شتابی با آهنگ یکنواخت هر ثانیه ساعت/مایل $a = ۵$ بدهید، به‌مدت ۱۰ ثانیه سرعت نهایی آن ساعت/مایل $v = ۵ \times ۱۰ = ۵۰$ می‌شود. یک معادلهٔ درجهٔ دوم $s = \frac{at^۲}{۲}$، مسافت s طی‌شده در زمان t را با شتاب یکنواخت a محاسبه می‌کند. این معادله مانند معادلات ذکر شدهٔ فوق چندان آشنا و عادی نیست. آن را با سهولت بسیار می‌توان با حساب دیفرانسیل و انتگرال توجیه کرد که در فصل بعدی این کتاب بیان خواهیم کرد.

حرکت یک گوی با هر وزنی در سقوط آزاد، در جهت قائم، یعنی عمود بر سطح زمین شتاب می‌گیرد، با آهنگی که برحسب قرارداد با نماد g نشان داده می‌شود و تقریباً در هر جای زمین یکسان است. بنابراین، در مورد سقوط آزاد، یا $a = g$، آخرین دو معادلهٔ ذکر شده $v = gt$ برای سرعت حاصل از سقوط آزاد در زمان t و $s = \frac{gt^۲}{۲}$ برای مسافت طی شدهٔ متناظر با آن است.

معادلهٔ $s = \frac{gt^۲}{۲}$ در دسترس گالیله نبود، اما او از طریق مشاهدات آزمایشی توان دوم $(t^۲)$ این معادله را کشف کرد. استنتاج او در قضیهٔ زیر بیان شده است،

> فاصله‌های مکانی پیموده شده به‌وسیلهٔ یک جسم که از حالت سکون با حرکت شتابدار یکنواخت ساقط می‌شود نسبت به یکدیگر به‌صورت مربعها (توانها)ی فاصله‌های زمانی منقضی شده در عبور از این مسافتهاست.

اثبات امروزی ما از این قضیه با دوبار نوشتن معادلهٔ سقوط آزاد آغاز می‌شود،

$$s_۱ = \frac{gt_۱^۲}{۲}$$

و

$$s_۲ = \frac{gt_۲^۲}{۲}$$

از تلفیق این دو معادله، معادلهٔ زیر به‌دست می‌آید

$$\frac{s_۱}{s_۲} = \frac{t_۱^۲}{t_۲^۲}$$

گالیله علاوه بر مطالعات جداگانه‌ای که دربارهٔ حرکت یکنواخت و حرکت شتابدار به‌عمل آورد، به مطالعهٔ ترکیبی از این دو حرکت در حرکت پرتابی پرداخت. او ثابت کرد مسیری را که یک پرتابه دنبال می‌کند سهموی‌شکل است. وی با استفاده از یک روش هندسی پیچیده، فرمولی برای محاسبهٔ ابعاد سهمی حاصل از یک پرتابه (مثلاً، یک گلولهٔ توپ) را، با هر زاویه‌ای که به‌سوی بالا پرتاب شود، به‌دست آورد. این فرمول در مقایسه با روش مثلثاتی که امروزه ما برای چنین محاسباتی به‌کار می‌بریم عجیب و پرزحمت است، اما درستی آن کمتر نیست. گالیله فایدهٔ روش خود را به‌وسیلهٔ محاسبهٔ بسیار دقیق و تهیهٔ جدولی تفصیلی از ابعاد سهمی برای زوایایی از ۱° تا ۸۹° ثابت کرد.

در برابر روشهای ریاضی گالیله که عمدتاً از اقلیدس گرفته شده، روشهای آزمایشی او برای ما بیشتر جدید به‌نظر می‌رسد. او آحادی نظیر آحاد خودمان ابداع کرد که به‌خوبی در آزمایشهایش برای حرکت پاندول به‌کار می‌آمد. مقیاس مسافت او که آن را پونتو (Punto) می‌نامید، معادل ۰٫۰۹۴ سانتی‌متر بود. این مقیاس باریکترین فاصله بین بخشهای روی یک خطکش برنجی بود. برای اندازه‌گیری زمان، او آبی را که از یک ظرف با آهنگ ثابت، در حدود سه اونس سیال در ثانیه، جاری می‌شد جمع‌آوری و توزین می‌کرد. او وزنهای آب را برحسب گرین* (گرین ۴۸۰ = ۱ اونس) ثبت می‌کرد و واحد زمانش را که تمپو (Tempo) می‌نامید، مدت زمانی بود که ۱۶ گرین آب جاری می‌شد. این واحد زمان معادل ۱/۹۲ ثانیه است. این واحدها آن‌قدر کوچک بودند که نتیجهٔ اندازه‌گیریهای گالیله از مسافت و زمان همواره اعدادی بزرگ می‌شدند. این امر ضروری بود، زیرا اعداد اعشاری جزء لوازم ریاضی گالیله نبود؛ تنها راهی که او می‌توانست در محاسبات خود به ارقام با معنی بیفزاید این بود که اعداد بزرگتری به‌دست آورد.

میراث گالیله

گالیله دانش متافیزیک را از علم فیزیک جدا کرد و به این ترتیب داستانی آغاز می‌شود که در فصلهای باقیماندهٔ این کتاب آشکار خواهد شد. استفن هاوکینگ می‌نویسد: «گالیله، احتمالاً بیش از هر شخص تنهای دیگری بانی تولد علم جدید بود... گالیله یکی از نخستین کسانی بود که با استدلال می‌گفت انسان می‌تواند به فهم چگونگی کار جهان امیدوار باشد و علاوه بر آن می‌گفت که انسان می‌تواند با مشاهدهٔ جهان واقعی به این ادراک برسد.» هیچ فیزیکدان عملگرا، یا هر دانشمندی که با چنین موضوعی سر و کار داشته باشد، نمی‌تواند بدون پیروی از این توصیهٔ گالیله کار خود را انجام دهد.

من قبلاً بسیاری از دست‌آوردهای خاص گالیله را متذکر شدم، اما کار او در علم مکانیک ارزش آن را دارد تا بار دیگر نمای کلی آن را بیان کنم، زیرا کار او راه را برای بزرگترین جانشینش هموار کرد. (گالیله

*. گرین (grain) در آحاد قدیم ایران، گندم نامیده می‌شد که کوچکترین واحد وزن بود. م.

در ژانویهٔ سال ۱۶۴۲ چشم از جهان فرو بست و در روز کریسمس همان سال، آیساک نیوتون دیده به جهان گشود.) مکانیک گالیله عمدتاً راجع به اجسامی است که با سرعت ثابت یا بر اثر شتاب ثابت که معمولاً شتاب گرانی (ثقل) است، حرکت می‌کنند. از دید ما، مبنای قضیه‌هایی که معرف مکانیک گالیله‌اند، معادلات $v = gt$ و $s = \frac{1}{2}gt^2$ است، اما در نوشته‌های گالیله این معادلات و معادلات جبری دیگری از این قبیل دیده نمی‌شود. او برای محاسبات عددی از نسبتها و تناسبها کمک می‌گرفته است. او پی برد که حرکت پرتابی برآیند یک مؤلفهٔ عمودی تحت اثر شتاب گرانی و یک مؤلفهٔ افقی ثابت حاصل از پرتاب شدن پرتابه است. این امر تشخیص اولیه‌ای بود از اینکه کمیتهای فیزیکی جهت‌دار که امروزه «بُردار» نامیده می‌شوند، ممکن است به دو مؤلفهٔ راست گوشه تجزیه شوند.

جزء دیگری از ساختار مکانیک گالیله را که متذکر شدم، اما تأکید نکردم چیزی است که امروزه آن را «اصل لختی» (اینرسی) می‌نامیم. در نوشته‌ای، گالیله این اصل را چنین بیان می‌کند: «ذره‌ای را تصور کنید که در امتداد یک سطح افقی، بدون اصطکاک، پرتاب شده باشد، در این صورت می‌دانیم. . .که آن ذره در امتداد این سطح با حرکتی یکنواخت و دایمی حرکت خواهد کرد، مشروط بر آنکه سطح حدود نداشته باشد.» این گفته بازتابی از نبوغ گالیله برای اختراع یک شکل ایده‌آل شدهٔ بنیادی از رفتار واقعی است. اگر یک گلولهٔ واقعی را روی یک سطح افقی هُل دهید حرکت آن به‌طور دایمی ادامه نخواهد یافت، زیرا نه سطح کاملاً صاف و صیقلی است، نه گلوله. و دیر یا زود گلوله به‌علت آثار اصطکاک متوقف خواهد شد. گالیله همهٔ پیچیدگیهای اصطکاک را نادیده گرفت و یک اصل موضوع مفید برای علم مکانیکش به‌دست آورد. سپس او این اصل را در عمل حرکت پرتابه، به‌کار گرفت ـ هرگاه پرتابه‌ای در فضا پرتاب شود، مؤلفهٔ افقی حرکت آن، در غیاب مقاومت هوا، ثابت است و در آن راه ثابت باقی می‌ماند، درحالی‌که مؤلفهٔ عمودی آن تحت تأثیر گرانی زمین است.

مکانیک گالیله شامل تعاریفی از مفاهیم نیرو و انرژی نشد، درحالی‌که هر دو آنها در مکانیکِ جانشینان گالیله اهمیت به‌سزایی یافت. گالیله راهی برای اندازه‌گیری این کمیتها نداشت، ازاین‌رو آنها را فقط در یک جهت کیفی می‌گنجاند. علم حرکت گالیله شامل بیشتر اجزایی است از آنچه که امروزه «سینماتیک» می‌نامیم. سینماتیک به ما نشان می‌دهد که حرکت چگونه صورت می‌گیرد، بدون توجه به نیروهایی که حرکت را کنترل می‌کنند. با گنجانده شدن نیروها، چنانکه در مکانیک نیوتونی گنجانده شده، سینماتیک به «دینامیک» تبدیل می‌شود.

همهٔ فعالیتها و مشارکتهایی که گالیله در پیشرفت علم مکانیک داشته است، برای نیوتون و جانشینان او امری ضروری و بنیادی بوده است. اما فراتر از همهٔ این فعالیتها، اصرار مجدّانهٔ گالیله بر این امر بوده است که موفقیت یا عدم موفقیت یک نظریهٔ علمی بستگی به مشاهده‌ها و اندازه‌گیریها دارد. استیلمان دریک ما را به این خلاصهٔ نافذ از فعالیتهای علمی گالیله احاله می‌دهد: «تا هنگام تولد گالیله، دو هزار سال علم فیزیک به این نتیجه نرسید که حتی اندازه‌گیریهای تقریبی و ناقصی از حرکتهای واقعی به‌عمل آید. این واقعیتی شگفت‌آور است که تاریخ هر علم عقبهٔ پیوسته‌ای با نخستین کاربرد اندازه‌گیری

را نشان می‌دهد، که پیش از آن نَسَبی جز متافیزیک نداشته است. در این صورت معلوم می‌شود که چرا تقریباً همهٔ فیلسوفان زمان او، به‌شدت با علم گالیله مخالفت می‌کرده‌اند. گالیله تا آنجا که می‌توانست فیزیک را از قید متافیزیک آزاد کرد. این اقدام با اندازه‌گیری انجام شد، اندازه‌گیری دقیق تا آنجا که با وسایل موجود برای گالیله ممکن بود یا گالیله به ابداع آنها پرداخت.»

۲

مردی همیشه در حال تفکر

آیساک نیوتون

تفکر مدام

در واپسین سالهای زندگی آیساک نیوتون، از وی پرسیده شد که چگونه به نظریهٔ گرانش جهانی دست یافته است. پاسخ ساده و سرراست او این بود که «با تفکر مدام دربارهٔ آن». «تفکر مدام» برای نیوتون تقریباً فراتر از ظرفیت انسانی بود. او می‌توانست با چنان شور و شعفی خود را وقف مطالعاتش کند که دیگران در روابط عشقی تجربه می‌کنند. موضوع مطالعهٔ او ممکن بود مشغولیتی ذهنی بشود، بی‌وقفه ذهن او را تسخیر کند و بدون غذا یا خواب و مافوق خستگی او را تا آستانهٔ نابودی بکشاند.

جهانی که نیوتون در آن سکونت گزیده بود برای او شور و شوق عظیمی داشت. ریچارد وستفال[1]، زندگینامه‌نویس اصلی نیوتون در این قرن، این «جهان تفکر» را چنین توصیف می‌کند: «با نگاهی از دور، زندگی عقلانی نیوتون به‌طور غیرقابل تصوری پربار به‌نظر می‌رسد. او به چیزی کمتر از کل فلسفهٔ طبیعی (علم) تن درنمی‌داد. او دربارهٔ چند موضوع ممتاز که گسترهٔ آن از فیزیک و ریاضی گرفته تا کیمیاگری می‌رسید، کاوش می‌کرد. در فلسفهٔ طبیعی، او اپتیک (نورشناسی)، مکانیک و دینامیک سماوی را به جهت جدیدی کشانید و ابزاری ریاضی (انتگرال و دیفرانسیل) را اختراع کرد. این اختراع باعث شد علم جدید راههای بیشتری را جستجو کند که او روشن کرده بود. این اختراع او در جستجوی آن بود که به کُنهِ ارادهٔ خداوند و طرح ابدی او برای جهان و بشریت آن‌طور که در اخبار کتاب مقدس آمده است پی بَرد.»

اما، با این حال، نیوتون انسان بود. شور و شوقش برای یک تحقیق فروکش می‌کرد و بدون ترکیب کردن، کامل کردن و انتشار یک اثرش به موضوع بزرگ دیگری می‌پرداخت. وستفال می‌نویسد: «وقتی دربارهٔ موضوعی فکر می‌کرد، می‌توان گفت که منحصراً دربارهٔ آن مدام در حال تفکر بود، اما دوران

1. Richard Westfall

کاری او پراکنده و جزء به جزء بود». نیوتون برای ساختن یک کُل منسجم گاه‌به‌گاه یک موضوع را بارها در یک دورهٔ ده‌ساله تجدید نظر می‌کرد.

وولستورپ

نیوتون روز کریسمس سال ۱۶۴۲، در ملک اربابی وولستورپ[1]، نزدیک لینکُلن‌شایر[2]، دهکدهٔ کُلسترورث[3]، در شصت مایلی شمال غربی کمبریج و یک‌صد مایلی لندن زاده شد. پدر نیوتون که نام او هم آیساک بود، سه ماه پیش از تولد پسرش مُرد. این پسر یتیم با مادرش هانا[4] سه سال زندگی کرد. در سال ۱۶۴۶، هانا با بارناباس اسمیت[5] کشیش سالخوردهٔ نورث ویتهام[6] ازدواج و به خانه‌ای نزدیک کلیسای محلی نقل مکان کرد. او آیساک خردسال را در وولستورپ به‌جای گذاشت تا با پدر و مادربزرگ مادری‌اش، جیمز و مری آیسکُف[7] زندگی کند. اسمیت با استانداردهای قرن هفدهم مردی ثروتمند بود، و با پرداخت مبالغی برای مرمتهای گسترده در وولستورپ کار آیسکف را جبران می‌کرد.

به‌نظر می‌رسد نیوتون دلبستگی چندانی نسبت به ناپدری و پدر و مادربزرگش، خواهران و برادر ناتنی‌اش و حتی مادرش، نداشته است. و این امر در اعتراف به گناهانش که پس از ترک وولستورپ و رفتن به کمبریج به‌عمل آمد مشاهده می‌شود.

در سال ۱۶۵۳ بارناباس اسمیت درگذشت. هانا با سه بچهٔ اسمیت به وولستورپ بازگشت و دو سال بعد آیساک وارد گرامر اسکول* در گرانتهام[8]، حدود هفت مایلی وولستورپ شد. نبوغ نیوتون در این مدرسه به‌تدریج ظاهر شد، اما نه ابتدا در کلاس درس. در مدارس امروزی تشخیص استعداد علمی، نخست یک نظر اجمالی به توانایی و ذوق ریاضیات است. نیوتون چنین فرصتی نداشت؛ برنامهٔ استاندارد گرامر اسکول آن زمان عملاً ریاضیات عرضه نمی‌کرد. او در عوض ابتکار شگفت‌انگیز مکانیکی‌اش را نشان داد. ویلیام استاکلی[9]، نخستین زندگینامه‌نویس نیوتون به ما می‌گوید که او فوراً ساختن آسیای بادی را یاد گرفت و مدل کارامدی از آن ساخت که با پا زدن به پره‌های آن به‌کار می‌افتاد [مثل چرخ چاه]. سپس ارابه‌هایی ساخت که با چرخاندن هندل به حرکت درمی‌آمد، همچنین با «کاغذ چروک‌خورده» فانوسهایی می‌ساخت و آنها را به دنبالهٔ بادبادکها متصل می‌کرد. بنا به گفتهٔ استاکلی نمایش این چیزها «برای مدتی همهٔ ساکنان محل را شگفت‌زده کرده بود».

علاقه‌مندی مهم دیگر خارج از برنامهٔ او دکّان دوافروشی محله بود که از آن به‌عنوان «آقای کلارک» یاد می‌کردند. نیوتون در خانوادهٔ کلارک پانسیون و با دکان دوافروشی مأنوس شد. شگفتی بطریهایی از مواد شیمیایی در قفسه‌ها همراه با فرمولبندیهای دارویی، در جهت‌گیری علاقه‌مندیهای بعدی او به شیمی و فراتر از آن به کیمیاگری، یاری کرد.

---

1. Woolsthorpe 2. Lincolnshire 3. Colsterworth 4. Hannah 5. Barnabas Smith
6. North Witham 7. Mary Ayscough

*. گرامر اسکول (grammar school) مدرسه‌ای در بریتانیا برای شاگردانی بین ۱۱ تا ۱۸ سال با استعداد بالا. م.

8. Grantham 9. William Stukely

نیوتون با اتمام دورهٔ درسی عادی گرامر اسکول به سر دو راهی رسید. هانا احساس می‌کرد که او باید راه پدرش را دنبال کند و به ادارهٔ ملک وولستورپ بپردازد. در این صورت او به تحصیل بیشتر نیازی نداشت. هانا در این امر اصرار می‌ورزید و او را به خانه فرا خواند. اما ویلیام آیسکف، برادر هانا، که در کمبریج بود و جان استوکس[1]، مدیر مدرسهٔ گرانتهام، که هر دو به شکوفایی ذهن عقلانی نیوتون توجه داشتند، به جانبداری از او، قاطعانه با هانا صحبت کردند و هانا متقاعد شد. هانا پس از نه ماه، زندگی با پسر ناآرامش در خانه، تشخیص داد که بدون شک او از عهدهٔ ادارهٔ مزرعه برنمی‌آید. شاید همین امر نیز کمک کرده باشد تا استوکس درصدد برآید پرداخت شهریهٔ چهل شیلینگ اضافی را که معمولاً از غیرساکنان گرانتهام گرفته می‌شد، لغو کند. نیوتون پس از عبور از این بحران، در سال ۱۶۶۰ به گرانتهام بازگشت و آمادهٔ رفتن به کمبریج شد.

کمبریج

نیوتون در ژوئن سال ۱۶۶۱ به‌عنوان «سابسایزر subsizar» در کالج ترینیتی[2] کمبریج وارد شد. در سلسله‌مراتب اجتماعی کمبریج «سایزر sizar» دانشجویی بود که کمک‌هزینهٔ تحصیلی دریافت می‌کرد و سابسایزر در ازای خدمتکاری، آموزش و خورد و خوراک رایگان دریافت می‌کرد و این هر دو، در پایین‌ترین سطح اجتماعی بودند. ظاهراً، هانا اسمیت می‌توانست وسیلهٔ بهتری برای پسرش فراهم کند، اما به دلیلی (شاید خسّت) راهی را انتخاب کرد که هزینه‌ای نداشته باشد.

نیوتون با وضع نامناسبی که به‌عنوان یک سابسایزر داشت و با میل به درون‌گرایی که قبلاً در او توسعه یافته بود، از همشاگردیهایش، از استادش و از بیشترین برنامهٔ درسی کمبریج (که عمدتاً متمرکز بر آرای ارسطو بود) دوری می‌جست. شاید هم با معذوریتهایی راه خود را می‌رفت. او طرح مسیر تفکر عقلانی خود را در یک «دفتر یادداشت فلسفی» آغاز کرد که بخشی از آن شامل عنوان لاتینی Quaestiones quaedam philosophicam (بعضی مسائل فلسفی) است. در این یادداشتها بسیاری از عنوانهایی را که مستلزم کنجکاوی نامحدود اوست فهرست کرده و مورد بحث قرار داده است. بعضی از این اقلام چندان مهم نیست، اما بعضی دیگر با عنوانهای «حرکت» و «رنگ» مفصل و سرآغاز مطالعات عمدهٔ بعدی اوست.

پس از حدود یک سال در کمبریج، نیوتون تقریباً برای نخستین‌بار در حوزهٔ ریاضیات وارد شد و طبق معمول دورهٔ درسی خود را دنبال کرد. او به‌زودی آن‌قدر در جهان آنالیز ریاضی قرن هفدهم سیر کرد تا به آغاز اکتشافات خود رسید. دیری نپایید که این مطالعات مقدماتی او را به نمایش هندسی قضیهٔ بنیادی حسابان (دیفرانسیل و انتگرال) کشاند.

در آغاز تابستان سال ۱۶۶۵ در کمبریج و بسیاری از بخشهای دیگر انگلیس با شیوع بیماری هولناک طاعون زندگی عادی در هم پاشید. در حدود دو سال کالجها بسته شد. نیوتون درحالی‌که بسیاری از بینشهای ریاضیات و فلسفهٔ طبیعی به‌سرعت در ذهن او می‌شکفت، به وولستورپ بازگشت.

1. John Stokes 2. Trinity College

نیوتون تنها کسی در انگلیس بوده است که از سالهای طاعونی ۶۶ـ۱۶۶۵ تا حدی با دلبستگی یاد می‌کند. در حدود پنجاه سال بعد، او می‌نویسد «در آن روزها، در عنفوان جوانی بیش از هر زمان بعدی آمادهٔ اختراع و خواهان ریاضیات و فلسفه بودم.» در این سالها که بعدها «سالهای معجزه» نامیده شد، او تفکر دربارهٔ روش فلوکسیون* (اصطلاحی که او برای حسابان (دیفرانسیل و انتگرال) به‌کار می‌برد)، نظریهٔ رنگها و گرانش را آغاز کرد. در سالهای بعد، چندبار نیوتون به بازدیدکنندگان خود گفته است که اندیشهٔ گرانش، زمانی به ذهن او راه یافته که ناظر سقوط سیبی در باغ وولستورپ بوده است؛ و به این فکر افتاده که اگر گرانی، سیب را پایین می‌برد، چرا نمی‌تواند آن را بالا تا ارتفاع ماه ببرد؟

این اندیشه‌ها هنوز پراکنده، ولی با وجود این عمیق بودند. آنها بعداً می‌باید به‌صورت مبانی مهمترین کار نیوتون ساخته شوند. وستفال می‌گوید: «معجزه در برنامهٔ مطالعه‌ای باورنکردنی قرار داشت که در خلوت و انزوا به عهده گرفته شده بود و تنها به‌وسیلهٔ مرد جوانی پی‌گیری می‌شد که دست‌آورد یک قرن را جذب کرد و پیشگام ریاضیات و علم در اروپا شد.»

نبوغی با این قدر، مستلزم بازشناسی است، اما همیشه حاصل نمی‌شود. نیوتون خوشبختانه موفق بود. پس از فراغت از تحصیل با درجهٔ کارشناسی، تنها راهی که او می‌توانست در کمبریج بماند و به مطالعاتش ادامه دهد این بود که به‌عنوان عضوی از کالج ترینیتی انتخاب شود. آینده تاریک بود. ترینیتی سه سال عضوی انتخاب نکرده بود، فقط نُه جای خالی بود که نامزدهای بسیاری داشت. وضع سابسایزر بودن قبلی و برنامهٔ مطالعهٔ نامتعارف نیوتون مانعی برای او بود. اما به‌رغم شانس کم، او در میان انتخاب‌شده‌ها جای گرفت. ظاهراً او یک حامی داشت، و این حامی احتمالاً همفری بابینگتون[1] خویشاوند کلارک، دوافروش گرانتهام، و یک عضو ارشد ترینیتی بود.

نیوتون سال بعد، پس از انتخابش به‌عنوان یک عضو «کهتر» به دریافت درجهٔ تحصیلی کارشناسی ارشد نایل آمد و به عضویت «ارشد» انتخاب شد. سپس در سال ۱۶۶۸، در سن بیست‌وهفت‌سالگی که هنوز هم قُرب و منزلتی در کالج، دانشگاه و سلسله‌مراتب علمی نداشت به‌عنوان استاد لوکاسین[2] ریاضیات منصوب شد. حامی او برای این ارتقای شگفت‌انگیز آیساک بارو[3] بود که از کرسی لوکاسین بازنشسته شده بود و انتظار مقام بانفوذتری خارج از دانشگاه داشت. بارو به اندازهٔ کافی کار نیوتون را دیده بود که درخشش استعداد او را شناسایی کند.

عضویت نیوتون در ترینیتی مقرراتی داشت که او را با بحران جدی دیگری مواجه می‌کرد. او برای حفظ مقام خود ملزم بود که مرتباً عقیدهٔ خود را دربارهٔ آرای کلیسای انگلیسی تأکید کند و سرانجام به سمت یک کشیش گماشته شود. نیوتون چندبار با این مقررات مواجه شد، اما در سال ۱۶۷۵، وقتی دیگر نتوانست از آیین برگماری به سمت کشیشی بگریزد، نظر او به‌سوی کژآیینی، حتی بدعت گرایید.

*. فلوکسیون لفظ فرانسهٔ فلوکشن (fluxion) به معنی تغییر مداوم است. م.

1. Humphrey Babington 2. Lucasian 3. Isaac Barrow

در سالهای ۱۶۷۰، نیوتون خود را غرق در مطالعات دین‌شناسی کرد که سرانجام او را به طرد کردن تعلیمات تثلیث رسانید. این امر بدعت به‌شمار می‌آمد و اگر اقرار می‌شد، به‌معنی انهدام دوران شغلی او بود. گرچه او عقیدهٔ خود را پنهان می‌کرد، اما برگماری به سمت کشیش برای وی امکان‌پذیر نبود و در این صورت عضویت ترینیتی و آیندهٔ او در کمبریج نابودشده به‌نظر می‌رسید.

اما مشیت الهی بار دیگر به‌صورت آیساک بارو مداخله کرد. بارو پس از ترک کمبریج به‌عنوان قاضی عسگر سلطنتی به خدمت گمارده شد. او با دربار سلطنتی ارتباطی داشت و ترتیبی داد تا با اِعمال قدرت دربار، استاد لوکاسین را از مقررات فرمان کلیسا معاف کند. در این صورت باب جدید دیگری در زندگی نیوتون گشوده شد که پایان خوشی داشت.

انتقادها

نیوتون نمی‌توانست در برابر انتقاد ایستادگی کند و انتقادهای بسیاری به او می‌شد. مهمترین و بانفوذترین این منتقدان رابرت هوک[1] در انگلیس و کریستین هویگِنس[2] و گاتفرید لایبنیتز در اروپا بودند.

هوک هرگز با طرفداران نیوتون سر سازش نداشت. یکی از معاصرانش او را چنین توصیف می‌کند: «او بدخلق‌ترین و متکبرترین مرد در جهان است، اکثر افراد انجمن سلطنتی از او متنفر و بیزارند، او همهٔ اختراعات دیگر را به‌محض اینکه به‌وسیلهٔ مبدعان آنها کشف می‌شد، از آن خود می‌دانست». در این‌باره اندک حقیقتی دربارهٔ خصلت هوک وجود دارد، اما او سزاوار توصیف بهتری است. در علم، او مشارکتهایی در اپتیک، مکانیک و حتی زمین‌شناسی کرده است. مهارتهای وی به‌عنوان یک مخترع، یک مساح و یک ارشیتکت مشهور بود. از لحاظ شخصیت، هوک و نیوتون دو قطب متضاد بودند. هوک شخصی برون‌گرا، اجتماعی و معاشرتی بود، درحالی‌که نیوتون، دست‌کم، در بیشترین سالهای خلاقیتش تودار و درون‌گرا بود. هوک هر اندیشه‌ای که به نظرش موجه و معتبر می‌رسید عجولانه به چاپ می‌رساند، اما نیوتون مفاهیمی را که به ذهنش می‌رسید، طی سالها بلکه دهها سال اندیشیدن، آنها را شکل می‌داد. هیچ‌کس نمی‌تواند قبول هر نفوذی از دیگری را بپذیرد. اما وقتی علایق آنها همپوشانی پیدا می‌کند برخوردهای تلخ اجتناب‌ناپذیر است.

در میان فیزیکدانان قرن هفدهم، هویگنس همترازی بیشتری با نیوتون داشت. او اقدامات عمده‌ای در پیشرفت ریاضیات به عمل آورد. هویگنس ساعت پاندولی را اختراع کرد و با استفاده از فنرها، وسایل تنظیم‌کنندهٔ (رگولاتورهای) ساعت را توسعه داد. او مطالعاتی دربارهٔ تلسکوپها و میکروسکوپها به‌عمل آورد و اصلاحاتی برای طرح آنها ارائه کرد. مطالعات او در مکانیک به استاتیک، هیدرواستاتیک، برخوردهای کشسان، حرکت پرتابی، نظریهٔ پاندول، نظریهٔ گرانی و مفهوم ضمنی نیرو، از جمله مفهوم نیروی مرکزگریز مربوط می‌شد. او نور را به‌صورت رشته‌ای از جبهه‌های موج تصور می‌کرد که از محیطی مرکب از ذرات کِشسان منتقل می‌شود. در موضوعات مربوط به فیزیک، این فهرست اندیشه‌های

1. Robert Hooke 2. Christiaan Huygens

عقلانی با ذهنیات نیوتون مطابقت چشمگیری داشت. با وجود این، تأثیر هویگنس بعد از قرن خودش ناچیز بود، در حالی‌که نفوذ نیوتون فوق‌العاده بود. یکی از محدودیتهای هویگنس این بود که به‌تنهایی کار می‌کرد و شاگردان معدودی داشت.

او همچنین مانند نیوتون، غالباً در انتشار کار خود تردید می‌کرد و سرانجام وقتی به چاپ می‌رسید، دیگران به همان مطلب رسیده بودند. اما مهمتر از همه گرایش فلسفی‌اش بود. او در این عقیده که پدیده‌های طبیعی باید توضیحات مکانیکی داشته باشند، پیرو رِنه دکارت بود. او نظریهٔ گرانش جهانی نیوتون را رد می‌کرد و آن را «چرند» می‌نامید، زیرا چیزی بیش از ریاضیات نبود و هیچ مکانیسمی را مطرح نمی‌کرد.

لایبنیتز، دومین منتقد اصلی نیوتون در اروپا، بیش از اینکه یک فیزیکدان باشد یادآور یک ریاضیدان است. او همچون هویگنس فیزیکش محدود به فلسفهٔ مکانیکی بود. لایبنیتز در ریاضیات دو سهم عمده داشت، یکی اختراع مستقل حسابان (پس از نیوتون) و دیگری دستاورد اولیهٔ اصول منطق نمادین بود. یک نمود از حسابان لایبنیتز را می‌توان در نمادگذاری کتابهای درسی بی‌شمار ریاضی و فیزیک امروزی، دید. اعمال اساسی حسابان، مشتق‌گیری و انتگرال‌گیری است که به مشتقها و انتگرالها می‌انجامد. نمادهای لایبنیتز برای مشتقها (مثلاً $\frac{dy}{dx}$) و انتگرالها (مثلاً $\int y dx$) بیش از سیصد سال است که به‌کار می‌رود. او برخلاف بسیاری از همکاران علمی‌اش، هرگز پست آموزشی نداشت. او بجز کار آموزشی همه کار می‌کرد، مشاور حقوقی بود، دولتمرد، سیاستمدار، و نسب‌شناس حرفه‌ای بود و مأموریتهایی از قبیل ترتیب دادن مذاکرات صلح، ردیابی شجره‌های سلطنتی و طرح‌ریزی اصلاحات قانونی را انجام می‌داد. لایبنیتز و نیوتون بعدها درگیر مشاجرهٔ ناشایست شدند که چه کسی ابتدا حسابان را کشف کرده است.

درسهای حسابان

جهان طبیعی در حال تغییر دائمی است و این جریان هرگز پایانی ندارد. هدف حسابان تشریح ریاضیِ این تغییر دائمی است. بنابر دید فیزیکدانان جدید، روشهای حسابان دو مسئلهٔ مربوط به هم را حل می‌کند. فرض کنید معادله‌ای داریم که یک تغییر مداوم را بیان می‌کند، معادلهٔ آهنگ این تغییر چیست؟ و برعکس فرض کنید معادله‌ای برای آهنگ تغییر داریم، معادلهٔ تغییر چیست؟ رویکرد نیوتون با حسابان به این طریق بود، اما غالباً با استدلالهای هندسی که برای آنان که هندسهٔ کافی نمی‌دانند، به‌طور عذاب‌آوری دشوار است. من می‌خواهم از ساختارهای پیچیدهٔ نیوتون اجتناب کنم و در این‌جا، برای ارجاع آینده، چند درس حسابان مقدماتی را، بیشتر به سبک جدید ارائه دهم.

فرض کنید می‌خواهیم حرکت یک گلولهٔ در حال سقوط آزاد از برج پیزا را توصیف کنیم. در این‌جا تغییر مداوم موردنظر، مسیر گلوله است که به‌صورت معادلهٔ زیر بیان می‌شود

$$s = \frac{gt^2}{2} \qquad (1)$$

که در آن t نمایندهٔ زمان، s فاصلهٔ گلوله از رأس برج و g ثابتی است که ما می‌خواهیم بعداً به‌عنوان شتاب گرانشی تعبیر کنیم. یکی از مسائل حسابان این است که ما معادلهٔ (۱) را شروع کنیم و آهنگ سقوط در هر لحظه را محاسبه کنیم.

این محاسبه به‌آسانی با نمادهای لایبنیتز انجام می‌شود. فرض کنید که گلوله در زمان t در فاصلهٔ s از رأس برج جای دارد و در یک لحظه بعد، در زمان $t+dt$ در $s+ds$ است؛ دو فاصلهٔ زمانی و مکانی dt و ds در اصطلاح حسابان «دیفرانسیلها» نامیده می‌شوند که نسبتاً بسیار کوچک‌اند و ما معادلهٔ (۱) را برای زمان t در آغاز این لحظه داریم. اکنون این معادله را برای $t+dt$ در پایان لحظه که گلوله در $s+ds$ است می‌نویسیم،

$$\begin{aligned} s+ds &= \frac{g(t+dt)^{۲}}{۲} \\ s+ds &= \frac{g}{۲}[t^{۲}+۲tdt+(dt)^{۲}] \qquad (۲) \\ s+ds &= \frac{gt^{۲}}{۲}+gtdt+\frac{g}{۲}(dt)^{۲} \end{aligned}$$

به جملهٔ s در سمت چپ آخرین معادله و جملهٔ $\frac{gt^{۲}}{۲}$ در سمت راست آن توجه کنید. بنابر معادلهٔ (۱)، این دو جمله با هم برابرند، بنابراین، آنها را می‌توان از آخرین معادله حذف کرد، باقیمانده می‌شود

$$ds = gtdt+\frac{g}{۲}(dt)^{۲} \qquad (۳)$$

در قلمرو اعمال حسابان، فاصلهٔ زمانی dt بسیار کوچک است، و $(dt)^{۲}$ بسیار کوچکتر از آن است. (مربع اعداد کوچک، اعدادی بسیار کوچکترند؛ به‌عنوان مثال، ۰٫۰۰۱ را با $(۰٫۰۰۱)^{۲} = ۰٫۰۰۰۰۰۱$ مقایسه کنید.) ازاین‌رو جملهٔ شامل $(dt)^{۲}$ بسیار کوچکتر از جملهٔ شامل dt است، در واقع، به‌قدری کوچک است که می‌توانیم از آن صرف‌نظر کنیم، و نهایتاً معادلهٔ (۳) به‌صورت زیر کاهش می‌یابد

$$ds = gtdt \qquad (۴)$$

با تقسیم دو طرف معادلهٔ فوق بر عامل dt، خواهیم داشت

$$\frac{ds}{dt} = gt \qquad (۵)$$

(همچنان‌که هر ریاضیدانی می‌داند، این عمل دور از یک محاسبهٔ دقیق از عملکرد حسابان است.)

این نتیجه یک معنی سادهٔ فیزیکی دارد. با آن سرعت لحظه‌ای گلوله در زمان t محاسبه می‌شود. به‌خاطر دارید که محاسبهٔ سرعت، از تقسیم فاصلهٔ مکانی بر فاصلهٔ زمانی انجام می‌گیرد. (مثلاً اگر گلوله‌ای با سرعت ثابت به‌مدت ۲ ثانیه، ۱۰ متر ساقط شود، سرعت آن، ثانیه/متر $۵ = \frac{۱۰}{۲}$ است.) در معادلهٔ (۵) از تقسیم فاصلهٔ لحظه‌ای بر زمان لحظه‌ای، سرعت لحظه‌ای $\frac{ds}{dt}$ به‌دست می‌آید.

نسبت $\frac{ds}{dt}$ در معادلهٔ (۵) یک «مشتق» نامیده می‌شود و معادلهٔ آن را شبیه به هر معادلهٔ دیگری که شامل یک مشتق است «معادلهٔ دیفرانسیل» می‌نامیم. در فیزیک، ریاضی معادله‌های دیفرانسیلی همه‌جا به چشم می‌خورد. بیشترین نظریه‌های ذکر شده در این کتاب بر مبنای معادله‌های دیفرانسیلی است. یکی از قواعد فیزیک نظری (با معدودی استثنا) این است که قوانین آن به‌طور بسیار فشرده به زبان رایج معادلات دیفرانسیل بیان می‌شوند.

مثالی را که در نظر گرفته‌ایم ما را از معادلهٔ (۱) برای تغییر مداوم به معادلهٔ (۵) برای آهنگ تغییر در هر لحظه می‌برد. حسابان، همچنین شیوه‌ای را عرضه می‌کند که این استدلال معکوس شود و ما معادلهٔ (۱) را از معادلهٔ (۵) استخراج کنیم. نخستین مرحله این است که به معادلهٔ (۴) بازگردیم و توجه داشته باشیم که این معادله تنها یک مرحلهٔ دیفرانسیلی یعنی ds را در مسیر گلوله محاسبه می‌کند. برای استخراج معادلهٔ (۱) ما باید برای به‌دست آوردن مسیر کامل، همهٔ مراحل را با هم جمع کنیم. این عمل جمع کردن (summation) یک عمل انتگرال‌گیری است و با نمادگذاری لایبنیتز با یک Sـ دراز شده به‌صورت $\int$ نشان داده می‌شود. بنابراین، برای انتگرال معادلهٔ (۴) می‌نویسیم

$$\int ds = \int gtdt \qquad (۶)$$

می‌دانیم که این معادله می‌باید با معادلهٔ (۱) برابر باشد، بنابراین، پی می‌بریم به اینکه قواعد برآورد کردن «دو انتگرال» در معادلهٔ (۶) به‌صورت زیر خواهند بود

$$\int ds = s, \qquad (۷)$$

و

$$\int gtdt = \frac{gt^۲}{۲} \qquad (۸)$$

انتگرالها و انتگرال‌گیری درست به همان‌قدر در فیزیک نظری اساسی است که معادلات دیفرانسیل. نظریه‌پردازان، نخست با نوشتن معادلات دیفرانسیلی نظریهٔ خود را می‌سازند، اما این معادلات برای کار اساسی‌تر، یعنی مقایسهٔ پیشگویی نظریه با آزمایش و مشاهدات دیگر، کافی به‌نظر نمی‌رسد. ازاین رو، انتگرال‌گیری معادلات غالباً یک ضرورت است. بدبختی بزرگ این است که انتگرال‌گیری بعضی از معادلات دیفرانسیلی گرچه بی‌اشکال به‌نظر می‌آیند، فوق‌العاده مشکل است. در بعضی موارد مهم (از جمله یکی از آنها که نیوتون سالها با آن درگیر بود، انتگرال‌گیری معادلات حرکت سیستم مرکبی شامل زمین، ماه و خورشید است.) معادلات را بدون تقریبها، ابداً نمی‌توان دستکاری کرد.

با نگاهی به کتاب درسی حسابان، قاعدهٔ مشتق‌گیری به‌کار گرفته شده برای رسیدن به معادلهٔ (۵)، قواعد انتگرال‌گیری (۷) و (۸) و دهها مورد دیگر آشکار می‌شود. حسابان، چنانکه از نام آن برمی‌آید طرحی برای محاسبه، به‌ویژه برای محاسباتی شامل مشتقها و معادلات دیفرانسیلی است. این طرح حول قواعد مشتق‌گیری و انتگرال‌گیری سازمان یافته است.

حسابان متن ریاضی کاملی برای مفاهیم مکانیک فراهم می‌کند. به‌عنوان مثال، مشتق $\frac{ds}{dt}$ یک سرعت را محاسبه می‌کند. هر سرعت v دیگری نیز به همین طریق محاسبه می‌شود،

$$v = \frac{ds}{dt} \qquad (۹)$$

اگر سرعت با زمان تغییر کند ـ اگر شتابی موجود باشد ـ آن را می‌توان به‌صورت آهنگ تغییر در v، مانند مشتق $\frac{dv}{dt}$ بیان کرد. بنابراین، معادلهٔ دیفرانسیلی شتاب به‌صورت زیر است

$$a = \frac{dv}{dt} \qquad (۱۰)$$

که در آن a نمایندهٔ شتاب است. سقوط آزاد گلوله شتاب دارد، یعنی سرعت آن با زمان زیاد می‌شود. ترکیبی از معادلهٔ (۵) با معادلهٔ (۹) که به‌صورت زیر نوشته می‌شود، آن را نشان می‌دهد.

$$v = gt \qquad (۱۱)$$

ضریب ثابت g شتاب سقوط آزاد، یعنی شتاب گرانشی است.

در این بحث همه‌جا از نمادگذاری لایبنیتز استفاده شده است. نمادگذاری نیوتون در حسابان مشابه همان است ولی سهولت کمتری دارد. او با تأکید بر آهنگ تغییر برحسب زمان، آن را «fluxion» می‌نامید و آن را با گذاشتن نقطه‌ای در بالای نماد آن نشان می‌داد. مثلاً در نمادگذاری نیوتون معادلهٔ (۵) می‌شود

$$\dot{s} = gt$$

که در آن $\dot{s}$، نماد نیوتون برای $\frac{ds}{dt}$، فلوکسیون مسافت و معادلهٔ (۱۰) به‌صورت زیر است

$$a = \dot{v}$$

که در آن $\dot{v}$ نمایندهٔ $\frac{dv}{dt}$، فلوکسیون سرعت است.

نورشناسی (اپتیک)

نخستین کاری که توجه جامعهٔ علمی را به نیوتون جلب کرد، یک کار نظری یا حتی ریاضی نبود، بلکه یک موفقیت فنی تحسین‌آمیز بود. نیوتون در سال ۱۶۶۸، اندکی پیش از انتصاب وی به استادی لوکاسین، یک تلسکوپ «بازتابی» را طراحی کرد و ساخت. در تلسکوپهای پیشین که با اختراع یک هلندی آغاز شد و گالیله در آن اصلاحاتی به‌عمل آورد، نور به‌وسیلهٔ عدسی شکسته و کانونی می‌شد. تلسکوپ نیوتون نور را به‌وسیلهٔ یک آینهٔ مقعر بازتابیده و کانونی می‌کرد. تلسکوپهای شکستی توان تفکیک محدودی داشتند و برای به‌دست آوردن بزرگنمایی زیاد می‌باید به‌طور ناراحت‌کننده‌ای طویل باشند. (طول بعضی از تلسکوپهای شکستی به صد فوت می‌رسید و حتی یک تلسکوپ هزار فوتی طراحی شده بود.) طرح نیوتون در هر دو مورد پیشرفت چشمگیری داشت.

برنامهٔ ساختن تلسکوپ نیوتون، حتی از کار گالیله جالبتر بود. او بدون کمک (گالیله یک وسیله‌ساز مستعد را به‌کار گرفته بود) آینه را قالب‌ریزی کرد و ساییید، با استفاده از آلیاژی از مس که آماده کرده بود، آینه را صیقل داد، لولهٔ تلسکوپ، پایه و لوازم آن را ساخت و آنها را سوار کرد. طول تلسکوپ کامل شده فقط شش اینچ و بزرگنمایی آن چهل بود، معادل با یک تلسکوپ شکستی که طول آن به شش فوت می‌رسید.

نیوتون نخستین کسی نبود که تلسکوپ بازتابی را طراحی کند. جیمز گرگوری[1]، استاد ریاضیات در دانشگاه سنت آندرو[2] در اسکاتلند، قبلاً طرحی مشابه با طرح نیوتون را منتشر کرده بود، اما استادکار ماهری را نیافته بود که آن را بسازد.

تلسکوپ نیوتون، همچون تلسکوپ گالیله، مورد تحسین فراوان قرار گرفت. در سال ۱۶۷۱ بارو، تلسکوپ نیوتون را در گردهمایی فیلسوفان طبیعی سرشناس لندن به‌نام انجمن سلطنتی، به نمایش گذاشت. هنری اُلدنبرگ[3]، دبیر انجمن در نامه‌ای به نیوتون نوشت که تلسکوپ او «به‌وسیلهٔ بعضی از برجسته‌ترین متخصصان علم و عمل نورشناسی بررسی شد و مورد تحسین آنان قرار گرفت.» نیوتون بی‌درنگ به عضویت انجمن سلطنتی برگزیده شد.

نیوتون پیش از ساختن تلسکوپ بازتابی، مطالعات عمده‌ای در زمینهٔ اپتیک کرده بود. در اواسط سالهای ۱۶۶۰ نظریه‌ای به ذهن او راه یافت مبنی بر اینکه نور سفید مخلوطی از رنگهای خالص است که به‌ترتیب از قرمز به نارنجی، زرد، سبز، آبی و بنفش در رنگین‌کمان دیده می‌شود. هرگاه باریکه‌ای از نور سفید از یک منشور بگذرد چنین رنگین‌کمانی ظاهر می‌گردد. نظر نیوتون این بود که منشور هر یک از اجزای خالص نور را به‌اندازهٔ متفاوتی می‌شکند و بدین ترتیب آنها را از هم جدا می‌کند. این نظریه، با نظریهٔ رایجی که هوک از آن طرفداری می‌کرد، در تناقض بود. نظریهٔ رایج این بود که نور در خالصترین شکل خود سفید است و رنگها تغییرات جزیی و تعدیلهایی از نور سفید ناب هستند.

نیوتون مفروضات نظریهٔ خود را با به‌کار گرفتن دو منشور به‌نمایش گذاشت. او با منشور اول نور خورشید را طبق معمول به اجزایی از قرمز تا بنفش جدا کرد و سپس همهٔ رنگها، بجز یکی از آنها را که به‌صورت باریکه‌ای به منشور دوم می‌رسید، مسدود کرد. مشاهدهٔ قاطع این بود که منشور دوم هیچ تغییر بیشتری در این نور ایجاد نمی‌کرد. نیوتون در سال ۱۶۶۶ مشاهده کرد «پرتوهای کاملاً قرمز که به‌وسیلهٔ منشور دوم شکسته می‌شود رنگهای دیگری بجز رنگ قرمز ایجاد نمی‌کنند و پرتوهای کاملاً آبی بجز رنگ آبی به رنگهای دیگر درنمی‌آیند». قرمز و آبی و دیگر رنگهای تولید شده به‌وسیلهٔ منشور، رنگهای خالص‌اند، نه سفید.

نیوتون در سال ۱۶۷۱ پس از موفقیت هیجان‌انگیزش در مورد تلسکوپ بازتابی، مقاله‌ای با توضیح مفصل دربارهٔ این نظریه برای اُلدنبرگ ارسال کرد. این مقاله در مجمع سلطنتی خوانده شد و با واکنش

1. James Gregory 2. St. Andrews 3. Henry Oldenburg

مساعد شورانگیزی مواجه شد. نیوتون هنوز به‌عنوان یک دانشمند شناخته نشده بود. بنابراین، اُلدنبرگ به‌عنوان گام بعدی از هوک که علایقی چندگانه از جمله اپتیک داشت، غیرمغرضانه، درخواست کرد که دربارهٔ نظریهٔ نیوتون اظهارنظر کند. هوک طی سه ساعت مقاله‌ای نوآورانه و پیچیده به او داد و به اُلدنبرگ گفت که استدلالهای نیوتون قانع‌کننده نیست.

این واکنش نیوتون را متأثر کرد و سرآغاز مشاجره‌ای قلمی با منتقدانش شد. نخستین پاسخ او به‌آرامی و خویشتنداری بود. هوک تحریک شد تا مقاله‌ای دربارهٔ مسئله‌ای دقیقتر ارائه کند. او بر این فرضیهٔ نیوتون که نور شبه‌ذره است متمرکز شد. (هوک در این مورد تناقضی یافته بود؛ نیوتون مدعی بود که بر فرضیه‌ها متکی نیست.) نیوتون مدتی ساکت بود. اما هوک ساکت نمی‌شد و ادعا کرد که تلسکوپ بازتابی را پیش از نیوتون ساخته است. سپس هویگنس و یک کشیش کاتولیک به‌نام گاستن پاردیس[1] وارد این مشاجره شدند. هویگنس، ظاهراً به حمایت نیوتون نوشت. «نظریهٔ آقای نیوتون دربارهٔ نور و رنگها به‌نظر من بسیار استادانه و مبتکرانه است.» پاردیس در ارتباطی با نشریهٔ خلاصهٔ مذاکرات فلسفی انجمن سلطنتی، آزمایش منشور نیوتون را زیر سؤال برد. پاسخ نیوتون، که آن هم در خلاصهٔ مذاکرات منتشر شد، نوعی خوارشماری بود. هوک به اُلدنبرگ شکایت کرد که نیوتون مباحثه را تحقیر می‌کند، و اُلدنبرگ نامه‌ای اخطارآمیز برای نیوتون نوشت. در این موقع نیوتون به‌قدر کافی برانگیخته شده بود و در نامهٔ مفصلی به انجمن سلطنتی همهٔ اعتراضات هوک را رد کرد. این نامه هم در نشریهٔ خلاصهٔ مذاکرات منتشر شد. با این حال مشاجره به‌طور کامل پایان نیافت؛ در یک رویداد نهایی هویگنس با انتقادهایی مشابه آنچه هوک ارائه کرده بود، بار دیگر وارد مشاجره شد.

در بسیاری جهات، این بُن‌بست میان نیوتون و منتقدانش پیش‌پا افتاده بود. امّا سرانجام به‌صورت بسیار مهمی درآمد. استدلال نیوتون به‌طور قاطع بر شواهد تجربی استوار بود، درحالی‌که هوک و هویگنس اهمیتی برای این شواهد قائل نبودند. این درست همان درسی بود که گالیله در اوایل قرن، امید تعلیم آن را داشت؛ و اکنون نوبت نیوتون بود.

کیمیاگری و ارتداد

دیوید بروستر[2]، در قرن نوزدهم، دربارهٔ زندگی‌نامهٔ نیوتون با کشف عجیبی، خوانندگانش را شگفت‌زده کرده است. او برای نخستین‌بار مدارکی شامل مجموعهٔ عظیمی از کتابها، دستنوشته‌ها، یادداشتهای آزمایشگاهی، دستورعملها و اطلاعات رونویسی شدهٔ نیوتون را فاش کرده است. بروستر جویای این نکته بود که چگونه ممکن است «ذهنی چنان قدرتمند . . . آن‌قدر نزول کرده باشد که حتی به رونویس‌کردن اشعار محقر کیمیاگری تن در دهد.» بروستر فراتر از این، مطلب زیادی برای گفتن دربارهٔ کیمیاگری نیوتون نداشته است.

1. Gaston Pardies 2. David Brewster

زمانی که بروستر زندگی‌نامهٔ او را می‌نوشت، کیمیاگری تلاش مرده‌ای بود و رشتهٔ تحصیلی جدید شیمی با آهنگ سریعی پیش می‌رفت. در قرن نیوتون شکاف بین کیمیاگری و شیمی تازه آغاز می‌شد و در قرن پیش از آن شیمی همان کیمیاگری بود.

کیمیاگران، مانند شیمیدانان امروزی تبدیل موادی به مواد دیگر را مطالعه می‌کردند و قواعد و دستورعملهای حاکم بر این تغییرات را معین می‌کردند. نهایت عمل تبدیل برای کیمیاگران استحالهٔ فلزات از جمله استحالهٔ معروف سرب به طلا بود. نظریهٔ استحاله گوناگونی و پالودگی بسیاری داشت، اما بخش اساسی آن، این عقیده بود که فلزات از جیوه و گوگرد ترکیب یافته‌اند ـ نه جیوه و گوگرد معمولی، بلکه جوهر اصلی که از آنها استخراج و «روح گوگرد» و «جیوهٔ فلسفی» نامیده می‌شد. هدف کیمیاگران این بود که این مواد اصلی را از جیوه و گوگرد ناخالص استخراج کنند، و در صورت حصول، بتوانند از ترکیب آنها استحاله‌های مطلوب را به‌دست آورند. در قرن هفدهم، این اعمال هنوز به‌قدری پذیرفتنی و ظاهرفریب بود که توجه دست‌اندرکاران و حامیان آنان، از جمله پادشاهان را جلب می‌کرد.

نوشته‌جات کیمیاگری بسیار دشوار و رعب‌انگیز بود. صدها کتاب (نیوتون ۱۳۸ نوشته از آنها را در کتابخانهٔ خود داشت.) بود پُر از واژگان عجیب‌وغریب. کیمیاگران این واژگان اسرارآمیز را ابداع کرده بودند تا کارشان از دست رقیبان محفوظ بماند. اما نیوتون متقاعد شده بود که می‌تواند با مطالعهٔ کامل و موشکافانه و با آزمایش کردن همبستگی آنها را پیدا کند، او می‌توانست بدون هرگونه تظاهر و ترفندی به رگه‌ای از آزمایشهای قابل اطمینان نقب بزند. بنابراین، در حدود سال ۱۶۶۹ در جهان کیمیاگری غوطه‌ور شد. او از چالشهایی که برای تنظیم نوشته‌جات درهم و برهم کیمیاگری می‌کرد لذت می‌برد و در مهارتهای آزمایشگاهی که مستلزم دستورعملهای مبهم کیمیاگری بود، استاد شده بود.

شور و شوق نیوتون برای کیمیاگری تقریباً سی سال ادامه یافت. او بیش از یک میلیون واژه از مطالب دست‌نویسی شده را جمع‌آوری کرد. دستیار او همفری نیوتون (خویشاوند او نبود) نقل می‌کند که آزمایشهای کیمیاگری در آزمایشگاه برای نیوتون «مایهٔ بسی رضایت‌خاطر و خرسندی است... آتش [در کوره‌های آزمایشگاه] به‌ندرت در شبانه‌روز خاموش می‌شود... رنجهای او، سخت‌کوشی او در آن ایام، مرا به این فکر می‌انداخت که هدف او چیزی فرای دسترسی به هنر و صنعت انسانی است.»

نیوتون طی سالهایی که با کیمیاگران همراه بود چه آموخت؟ آزمایشهای او در مورد استحاله ناموفق بود، اما به درک یک درس بنیادی دست یافت که هنوز در شیمی و شیمی‌فیزیک جدید تدریس می‌شود، به این مضمون که: ذرات مواد شیمیایی تحت تأثیر نیروهای جاذبه و دافعه‌اند. او در بعضی از پدیده‌های شیمیایی یک «اصل هم‌گرایی» و در بعضی دیگر «نوعی رفتار دورگزینی» می‌دید. به گفتهٔ وستفال، «این موضوع بحث‌انگیز، مهمترین محصول شیمی قرن هفدهم بود»، که خبر از نظریهٔ جدید «میل ترکیبی شیمیایی» را می‌داد. نظریه‌ای که در فصل ۱۰ به آن خواهیم پرداخت.

برای نیوتون، نیروهای جاذبه‌ای که در بوته‌ها می‌دید، هم‌جنس نیروی گرانشی بودند. شواهدی در دست نیست که او این دو نوع نیرو را یکسان بداند، اما تصور بعضی از مفسران این است که مفهوم گرانش جهانی او ملهم از درسهای بسیار پیچیدهٔ کیمیاگری بوده است، نه از سقوط سیب در لینکُلن‌شایر.

در سالهای ۱۶۷۰، نیوتون موضوع دیگری برای تداوم مطالعه و فکرکردن داشت. او به‌جای متون علمی به متون کتاب مقدس روی آورده و قانع شده بود که کتاب مقدس اولیه با اعتقاد به توحید بیان شده است. بنابراین اعتقاد، مسیح گرچه قابل ستایش است، اما او تابع خداوند است. نیوتون با استناد به شواهد تاریخی نقل می‌کند که در قرن چهارم میلادی، این متن با ارائهٔ آیین تثلیث تحریف شده است. در قرن هفدهم هر نوع بحثی مخالف آیین تثلیث، ارتداد محسوب می‌شد. نیوتون برای حفظ عضویت در کمبریج، عقاید نامتعارفش را پنهان می‌کرد و همچنان‌که گفتیم، وقتی نتوانست از شرایط برگماری عضویت بگریزد، با نوعی مشیت خاص الهی، رهایی یافت.

پرسش هالی

در پاییز سال ۱۶۸۴، ادموند هالی[1]، اخترشناسی ماهر، به کمبریج سفرکرد تا پرسشی را با نیوتون مطرح کند. هالی به این نتیجه رسیده بود که نیروی گرانشی بین خورشید و سیارات از قانون عکس مجذور فاصله پیروی می‌کند، یعنی ارتباط بین این «نیروی مرکزگرا» (آن‌طور که نیوتون بعداً آن را می‌نامید) و فاصلهٔ r بین مراکز سیاره و خورشید به‌صورت زیر است

$$\text{نیروی مرکزگرا} \propto \frac{۱}{r^۲}$$

(نماد $\propto$ را بخوانید «متناسب با».) اگر r دوبرابر شود، این نیرو به‌صورت $\frac{۱}{۴} = \frac{۱}{۲^۲}$ و اگر r سه‌برابر شود به‌صورت $\frac{۱}{۹} = \frac{۱}{۳^۲}$ و غیره، کاهش می‌یابد. دیدار هالی و پرسش او، بعداً توسط آبراهام دِمُوار[2]، شاگرد نیوتون، بیان شد:

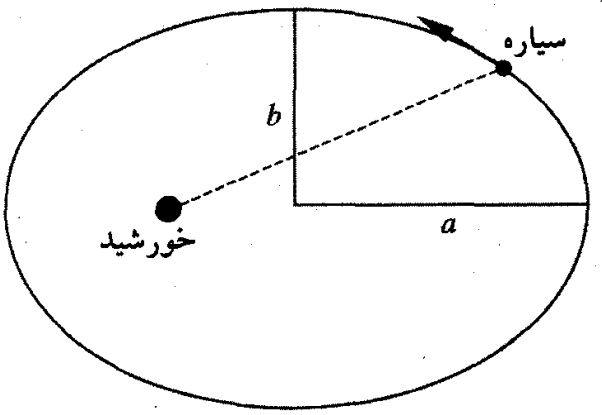
> در سال ۱۶۸۴، دکتر هالی برای ملاقات [با نیوتون] به کمبریج آمد، پس از مدتی که با هم بودند، دکتر از او پرسید، با فرض اینکه نیروی جاذبه به‌سوی خورشید عکس مجذور فاصله باشد، نظر شما دربارهٔ انحنای مسیری که سیارات می‌پیمایند چه خواهد بود. سِر آیساک بلافاصله پاسخ داد یک [بیضی]، دکتر با خوشحالی و حالتی شگفت‌زده پرسید، چگونه دانستید، او گفت به دلیل اینکه محاسبه کرده‌ام، سپس دکتر هالی بی‌درنگ درخواست کرد که محاسباتش را ببیند، سِر آیساک کاغذهایش را زیرورو کرد اما نتوانست آن را بیابد، اما قول داد که محاسباتش را تجدید کند و برای او بفرستد.

چندماه بعد، هالی نامهٔ موعود را دریافت کرد، مقاله‌ای بود مختصر، اما استثنایی با عنوان *De motu corporum in gyrum* (دربارهٔ حرکت اجرام در مدار). در آن مقاله نه‌تنها به پرسش هالی پاسخ داده بود، بلکه کلیات سیستمی جدید از مکانیک سماوی و مبنایی نظری برای سه قانون حرکت سیارهٔ کپلر بیان شده بود.

1. Edmond Halley 2. Abraham DeMoivre

قانونهای کپلر

یوهانس کپلر متعلق به نسل گالیله بود، گرچه این دو هرگز ملاقاتی نداشته‌اند. کپلر در سال ۱۶۰۰ دستیار تیکو براهه، اخترشناس بزرگ دانمارکی شد و با مرگ تیکو، هم شغل و هم اندوختهٔ وسیع رصدهای نجومی او را به ارث برد. کپلر از داده‌های تیکو سه قانون تجربی بزرگ را استخراج کرد.



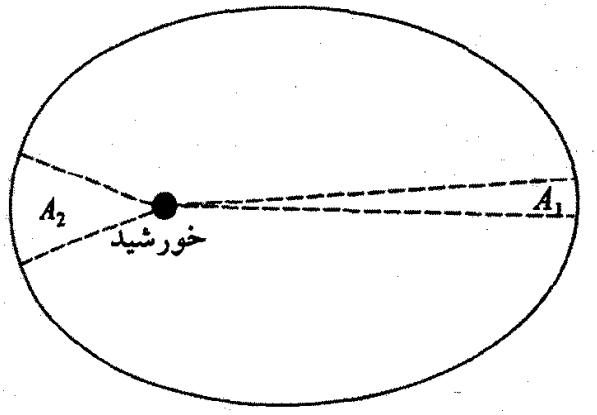
شکل ۲ـ۱ یک مدار سیاره‌ای بیضوی. این مدار تا حدی با اغراق نشان داده شده است. اکثر مدارهای سیاره‌ای تقریباً مدورند.

۱. قانون مدارها: سیارات در مدارهای بیضوی، که خورشید در یک کانون بیضی جای دارد، حرکت می‌کنند.

شکل ۲ـ۱ هندسهٔ بیضی سیاره‌ای را نشان می‌دهد. توجه داشته باشید که ابعاد a و b به‌ترتیب محورهای نیمقطر اطول و نیمقطر اقصر، و خورشید در یک کانون بیضی است.

۲. قانون سطوح برابر: خطی که هر سیاره را به خورشید متصل می‌کند، در زمانهای برابر سطوح برابری را جاروب می‌کند.

شکل ۲ـ۲ تصویری از این قانون است که نشان می‌دهد خطوط شعاعی، یک سیاره را به خورشید متصل می‌کند و با سیر سیاره در بخشهای متفاوتی از مدار بیضویش، این خطوط در زمانهای مساوی



شکل ۲ـ۲ قانون کپلر دربارهٔ سطوح برابر. مساحت سطوح A_1 و A_2 با هم برابرند.

سطوحی را جاروب می‌کنند. این سطوح با هم برابرند، و هنگامی که سیاره به خورشید نزدیکتر است سریعتر حرکت می‌کند.

۳. قانون دوره‌ها: مربع دورهٔ هر سیاره به دور خورشید متناسب با مکعب طول محور نیمقطر اطول آن است.

دورهٔ یک سیاره، زمان لازم برای سیر مدار کامل آن است، مثلاً برای زمین ۳۶۵ روز است. اگر دوره را با P و طول محور نیمقطر اطول را با a و متناسب بودن را با $\propto$ نشان دهیم، قانون مذکور را می‌توانیم به‌صورت رابطهٔ زیر بنویسیم

$$p^۲ \propto a^۳$$

پاداش هالی

نیوتون زمانی اظهار کرده بود که «من همواره موضوعی را پیش خود محفوظ می‌دارم و منتظر می‌مانم تا نخستین طلیعه‌ها به کُندی (در ذهنم) ظاهر شوند و کم‌کم به‌وضوح و روشنی کاملی برسند.» قوانین کپلر از دوران تحصیل در ذهن نیوتون بوده است. در «نخستین طلیعه‌ها» او ارتباطهای بین قانون نیروی عکس مجذور و قانونهای اول و سوم کپلر را یافته بود، و اکنون در De motu با «وضوح و روشنی کامل» به کل یک بنای نظری که مؤید قوانین کپلر و رصدهای دیگر نجومی بود، می‌نگریست. بار دیگر، کار نیوتون «مطالعهٔ پرشور مردی همیشه در حال تفکر»، و موضوع اصلی کار او نظریهٔ ریاضی گرانش جهانی بود.

او ابتدا به تجدید نظر De motu پرداخت و آن را بسط داد، اما هنوز بر مکانیک سماوی متمرکز بود، و سپس متوجه هدفی بزرگتر، یعنی دینامیک عمومی شد که هم پدیده‌های زمینی و هم پدیده‌های سماوی را دربرمی‌گرفت. این کاری بسیار فراتر از De motu بود و حتی می‌بایست عنوان دیگری داشته باشد. نیوتون برای کار نهایی عنوان لاتینی *Philosophiae naturalis principia mathematica* (اصول ریاضی فلسفهٔ طبیعی) را انتخاب کرد که معمولاً به‌اختصار Principia نامیده می‌شود.

سرانجام، وقتی پرینسیپیا شکل گرفت، شامل یک مقدمه و سه کتاب بود. این مقدمه شامل تعاریف و مواردی است که نیوتون برای قوانین اساسی حرکت در نظر گرفته بود. از این مبانی، در کتاب ۱ تجهیزات ریاضی گسترده و پیچیده‌ای ساخته می‌شود، و برای اجسام متحرک بدون مقاومت، مثلاً، در یک محیط خلأ به‌کار می‌رود. کتاب ۲ به حرکت در محیط مقاوم ـ مثلاً در یک مایع ـ مربوط می‌شود. و کتاب ۳ کیهان‌شناسی نیوتون، یعنی «سیستم جهانی» او را ارائه می‌کند.

به یک معنی می‌توان گفت که استحقاق هالی در اعتبار پدید آوردن پرینسیپیا کمتر از نیوتون نبود. نخستین دیدار با هالی در کمبریج یادآور کار ناتمام نیوتون دربارهٔ مکانیک سماوی شد و او را به نوشتن De motu وادار کرد. وقتی هالی در نوامبر سال ۱۶۸۴، De motu را دید، آن را آغاز انقلابی در علم مکانیک دانست. او بدون فوت وقت برای ترغیب و حمایت بیشتر نیوتون به کمبریج بازگشت. اما

لزومی نداشت. نیوتون با تمام قوا علم دینامیک جدید را دنبال می‌کرد. وستفال می‌نویسد: «از اوت سال ۱۶۸۴ تا بهار سال ۱۶۸۶ زندگی نیوتون وقف تکمیل پرینسیپیا شد.»

در آوریل سال ۱۶۸۶ کتاب ۱ و ۲ کامل شد، و هالی فعالیت شدیدی را آغاز کرد تا انجمن سلطنتی این کتابها را منتشر کند. به‌دلیلی (شاید با اصرار هالی از اعتبار محدودی که به‌عنوان منشی انجمن داشت) اعضای انجمن در یک اجلاس عمومی قانع شدند و تصمیمی اتخاذ شد مبنی بر این دستور «که کتاب اصول ریاضی فلسفهٔ طبیعی آقای نیوتون بدون فوت وقت چاپ شود». مسئولیت انتشار به‌عهدهٔ هالی گذاشته شد.

اکنون هالی می‌بایست پرینسیپیا را در مسیر انتشار پیش ببرد، اما این مسیر جاده‌ای پردست‌انداز و ناهموار بود. در آغاز کار، هوک ایجاد مزاحمت کرد. هوک معتقد بود که قانون عکس مجذور گرانش را او کشف کرده است و می‌خواست که نیوتون آن را تصدیق کند. اگر نوعی سپاسگزاری لازم می‌بود، می‌باید در کتاب ۳ که در حال اتمام بود می‌آمد. نیوتون شناسایی تقدم هوک را رد کرد و تهدید کرد که کتاب ۳ را متوقف می‌کند. هالی هنوز کتاب ۳ را ندیده بود، اما احساس می‌کرد بدون آن، پرینسیپیا کالبدی بدون سر خواهد بود. او به نیوتون نوشت: «سِر، من باید بار دیگر از شما تقاضا کنم، اجازه ندهید آزردگی شما به‌حدّی فوران کند که ما از کتاب سوم شما محروم بمانیم». نتیجه آنکه بی‌سر شدن کالبد کتاب رفع شد، و تقاضاهای سیاستمدارانهٔ هالی ممکن است عامل قطعی این امر بوده باشد.

علاوه بر وظایف ویراستاری، از هالی خواسته شده بود که برای انتشار پرینسیپیا کمک مالی بکند. انجمن سلطنتی نزدیک به ورشکستگی بود و حتی نمی‌توانست پنجاه پوند ماهانهٔ هالی را که منشی انجمن بود بپردازد. هالی در جوانی ثروتمند بود، اما در سالهای ۱۶۸۰ او خرجی یک خانواده را به‌عهده داشت و دارایی او کاهش یافته بود. انتشار پرینسیپیا یک قمار بود، و احتمال زیان مالی سنگینی داشت.

اما سرانجام، در ۵ ژوئیهٔ سال ۱۶۸۷ توانست در نامه‌ای به نیوتون اعلام کند که «بالاخره کتاب شما را به پایان رساندم». نخستین چاپ کتاب به‌سرعت فروش رفت. هالی دست‌کم هزینه‌هایش را بازیافت و مهمتر آنکه سپاسگزاری نیوتون را آن‌طور که شایستهٔ او بود دریافت کرد: «آقای ادموند هالی تیزبین‌ترین و فاضلترین قاطبهٔ مردم، نه‌تنها مرا در تصحیح غلطهای چاپی و تهیهٔ شکلهای هندسی یاری کرد، بلکه بنابه درخواستهای او بود که این کتاب انتشار یافت.»

پرینسیپیا

آنچه را که هالی با خوش‌زبانی از نیوتون به‌دست آورده بود یکی از بزرگترین شاهکارهای ادبیات علمی است. همچنین یکی از کتابهایی است که فهم آن بسیار دشوار است. مباحث پرینسیپیا ظاهراً به‌صورت گزاره‌هایی با استدلالهای (بعضاً ناکامل) ارائه شده است. بعضی از گزاره‌ها به‌صورت قضیه و گزاره‌های دیگر به‌صورت محاسبات تصویری به‌نام «مسئله» بسط یافته‌اند. خواننده باید به‌توالی با هر گزاره به چالش بپردازد تا مبحث موردنظر را بفهمد.

خوانندهٔ امروزی پرینسیپیا باید با سبک منحصربه‌فرد ریاضی نیوتون نیز آشنا شود. گزاره‌ها با زبان هندسی و معمولاً با ارجاع به شکل، بیان و اثبات شده‌اند. (پرینسیپیا، در حدود پانصد صفحه، ۳۴۰ شکل دارد که بعضی از آنها فوق‌العاده پیچیده است.) برای ما این یک سهو تاریخی به‌نظر می‌رسد. در سالهای ۱۶۸۰، که پرینسیپیا در حال شکل گرفتن بود، نیوتون قبلاً روش فلوکسیون حسابان را ایجاد کرده بود. چرا او برای بیان علم دینامیکش از حسابان، آن‌طورکه امروزه ما به‌کار می‌بریم، استفاده نکرد؟

این امر تا حدی یک انتخاب زیباشناختی بود. نیوتون هندسهٔ «باستانی» به‌ویژه اقلیدس و آپولونیوس[1] را به جبر دکارت، که به‌تازگی ارائه شده بود و نقش اساسی در معادلات فلوکسیونی داشت، ترجیح می‌داد. او دریافته بود که روش هندسی «بسیار ظریفتر از روش دکارت است. . . دکارت نتیجه را به‌وسیلهٔ محاسبهٔ جبری به‌دست می‌آورد که اگر با کلمات نوشته شود (بر طبق روال نوشته‌های باستانیان) آشکارا کسل‌کننده و تا حد زجرآوری نامفهوم می‌ماند.»

مسئلهٔ دیگری هم وجود داشت. نیوتون نمی‌توانست زبان فلوکسیون را که بیست سال پیش اختراع کرده بود به‌کار گیرد زیرا به دلایل عملی آن را هرگز منتشر نکرده بود (و برای بیست سال دیگر هم هنوز منتشر نمی‌شد). چنانکه فرانسوا دِگانت[2]، تاریخ‌نویس علم توضیح می‌دهد، «ویژگی نوآورانهٔ پرینسیپیا مطمئناً موجب برانگیختن اختلاف نظر و مشاجره می‌شد. ترکیب این ویژگی نوآورانه با نوآوری دیگر، این‌بار در ریاضی، و ایجاد طرزکار منتشر نشده در ریاضیات به‌عنوان اساس اظهارات فیزیکی شگفت‌آور، با این خطر مواجه می‌شد که اصلاً چیزی حاصل نشود».

بنابراین، نیوتون پرینسیپیا را به سبک هندسی باستانی نوشت و در صورت لزوم برای نشان دادن تغییر مداوم، آن را اصلاح کرد. اما او به خوانندگانش دسترسی نیافت. تنها معدودی از معاصران او با فهم مطلب پرینسیپیا را خواندند، و نسلهای بعدی این انتخاب را ترجیح دادند، که اگر ظرافت کمتری هم داشته باشد آن‌را به‌صورت ترکیبی از جبر و حسابان نیوتون-لایبنیتز ترجمه کنند. سرنوشت پرینسیپیا مانند بعضی از شاهکارهای ادبیات علمی دیگر (کلازیوس[3] در ترمودینامیک، ماکسول[4] در میدان الکترومغناطیسی، بولتزمن[5] در نظریهٔ گازها، گیبس[6] در ترمودینامیک و اینشتین در نسبیت عام) بیشتر از آنکه خوانده شود، مورد تحسین قرارگرفت.

چالش وحشتناک پرینسیپیا در مباحث مفصل آن است. در طرح کلی، جدا از هندسهٔ پیچیده و شکلهای دیوانه‌کننده، این اثر بسیار بیشتر قابل فهم است. این اثر با دو مفهوم از اساسی‌ترین مفاهیم مکانیک آغاز می‌شود.

تعریف ۱: کمیت ماده اندازه‌ای از ماده است که از چگالی و گُندگی آن توأماً ناشی می‌شود.

1. Appolonius 2. François De Gandt 3. Clausius 4. Maxwell 5. Boltzmann 6. Gibbs

تعریف ۲: کمیت حرکت، اندازه‌ای از حرکت است که از سرعت و کمیت ماده به‌طور توأمان ناشی می‌شود.

منظور نیوتون از «کمیت ماده» همان است که ما آن را «جرم» می‌نامیم، «کمیت حرکت» به‌اصطلاح ما «اندازهٔ حرکت» است، «گُندگی» را می‌توان به‌صورت حجم اندازه‌گیری کرد، و «چگالی» جرم بر واحد حجم است. (سرب چگالتر از آب، و آب چگالتر از هوا است.) ترجمهٔ این دو تعریف به زبان جبر به‌صورت زیر است:

$$m = \rho V \qquad (۱۲)$$

و

$$p = mv \qquad (۱۳)$$

که در آنها جرم با m، چگالی با ρ، حجم با V، اندازهٔ حرکت با p و سرعت با v نشان داده می‌شود.

به دنبال این دو تعریف اصول موضوع نیوتون، سه قانون حرکت مشهور او می‌آید. نخستین آنها قانون لختی (اینرسی) گالیله است:

قانون ۱: هر جسم در حالت سکونش، یا حالت حرکت یکنواختش در امتداد خط مستقیم باقی می‌ماند، مگر بر اثر نیروهای وارد بر آن مجبور به تغییر حالت شود.

قانون دوم حرکت دربارهٔ مفهوم نیرو مطلب بیشتری دارد:

قانون ۲: تغییر حرکت متناسب با نیروی محرکهٔ موثر است؛ و در جهت خط راستی که نیرو اثر می‌کند، ایجاد می‌شود.

منظور نیوتون از «تغییر حرکت» آهنگ لحظه‌ای تغییر در اندازهٔ حرکت معادل با مشتق زمانی $\frac{dp}{dt}$ است. در قرارداد جدید، نیرو به وسیلهٔ این مشتق معین می‌شود، و معادله‌ای که برای محاسبهٔ یک نیروی f به‌کار می‌رود به‌صورت سادهٔ زیر است

$$f = \frac{dp}{dt} \qquad (۱۴)$$

یا، با توجه به معادلهٔ (۱۳) که اندازهٔ حرکت p سنجیده می‌شود، خواهیم داشت

$$f = \frac{d(mv)}{dt} \qquad (۱۵)$$

این دو قانون حامل پیامهای فیزیکی ساده‌ای است. اتوموبیلی را تصورکنید که با موتور خاموش و دندهٔ خلاص در جادهٔ مسطحی در حال حرکت است. اگر اتوموبیل با مقاومتی (مثلاً، به‌صورت آثار

اصطکاک) مواجه نباشد، بنابر قانون اول نیوتون، حرکت آن با اندازهٔ حرکت و جهت اولیه‌اش تا ابد ادامه خواهد یافت. حال اگر موتور آن روشن شود و پای راننده روی پدال گاز باشد، اتوموبیل با نیروی موتور رانده می‌شود و بنابر قانون دوم نیوتون اندازهٔ حرکت آن با آهنگی $\left(=\frac{dp}{dt}\right)$ برابر با نیرو، افزایش می‌یابد. به گفتهٔ دیگر با فشار آوردن بر پدال گاز نیرو افزایش می‌یابد و اندازهٔ حرکت اتوموبیل زیاد می‌شود.

قانون سوم نیوتون بیانگر محدودیت لازم برای نیروهایی است که متقابلاً بین دو جسم عمل می‌کنند:

> **قانون ۳**: برای هر کنشی همواره واکنشی برابر و مخالف آن وجود دارد، یا: کنشهای متقابل دو جسم بر یکدیگر همواره برابر و در جهتهای مخالف هم‌اند.

مثال سادهٔ نیوتون به یادمان می‌آورد که «اگر سنگی را با انگشتمان فشار دهیم، انگشتمان هم به‌وسیلهٔ سنگ فشرده خواهد شد.» در غیر این صورت سنگ چیز نرمی خواهد بود که شباهتی به سنگ ندارد.

نیوتون با ساختاری که آغازی چنین ساده و قابل فهم دارد ما را به سیاحت بزرگی از علم دینامیک زمینی و سماوی می‌برد. او در کتاب ۱ عکس مجذور نیروی مرکزگرا را فرض می‌گیرد و سه قانون کپلر را استخراج می‌کند. در امتداد راه (در گزارهٔ ۴۱)، مفهوم وسیعی که امروزه به‌عنوان پایستاری انرژی مکانیکی می‌شناسیم، ظاهر می‌شود، گرچه نیوتون واژهٔ «انرژی» را به‌کار نمی‌برد و بر مضمون پایستاری تأکیدی ندارد.

کتاب ۱ حرکت اجسامی (مثلاً، سیارات) را تشریح می‌کند که بدون مقاومت حرکت می‌کنند. در کتاب ۲، نیوتون به مسئلهٔ پیچیده‌تر حرکت در یک محیط مقاوم نزدیک می‌شود. این کتاب چیزی از یک فکر بعدی بود که در اصل به‌عنوان بخشی از کتاب ۱ در نظر گرفته شده بود. تخصصی بودن آن بیشتر از دو کتاب دیگر و در طرح بزرگ نیوتون اهمیت کمتری داشت.

کتاب ۳، پرینسیپیا را به اوج می‌برد. در این کتاب نیوتون «سیستم جهانی‌اش» را براساس سه قانون حرکت، روشهای ریاضی که پیش از آن، عمدتاً در کتاب ۱، آماده کرده بود و همچنین مطالب خام تجربی موجود از رصدهای نجومی سیارات و اقمار آنها می‌سازد.

سه گزارهٔ نخست سیارات و اقمارشان را در مدارهای بیضوی قرار می‌دهد که با عکس مجذور نیروهای مرکزگرا کنترل می‌شوند. سیارات به دور خورشید و قمرها به دور سیاره‌های مربوط به آنها می‌گردند. این گزاره‌ها نیروهای مرکزگرا را به‌طور ریاضی توصیف می‌کنند، اما چیزی دربارهٔ ماهیت فیزیکی آنها بیان نمی‌کند.

گزارهٔ ۴ این گام سرنوشت‌ساز را برمی‌دارد. این گزاره بیان می‌کند که «ماه به‌سوی زمین جذب می‌شود و همواره بر اثر نیروی گرانی از حرکت در خط مستقیم پس کشیده می‌شود و در مدارش می‌ماند». منظور نیوتون از «نیروی گرانی» نیرویی است که سبب می‌شود سنگ (یا سیب) بر زمین بیفتد. این گزاره به ما می‌گوید که ماه همچون یک سنگ است و آن نیز به نیروی گرانی واکنش نشان می‌دهد.

اثبات گزارهٔ ۴ نیوتون از سادگی عجیبی برخوردار است. ابتدا، او از ابعاد مشاهده شدهٔ مدار ماه نتیجه‌گیری کرد که ماه برای ماندن در مدارش در هر ثانیه ۱۵٫۰۰۹ «فوت پاریسی» (= ۱۶٫۰۰۰ فوت انگلیسی) به‌سوی زمین سقوط می‌کند. سپس او با استفاده از داده‌های دقیقی که هویگنس دربارهٔ پاندول مشاهده کرده بود، تعداد فوتهایی را که ماه (یا هر چیز دیگری) در یک ثانیه بر سطح زمین سقوط می‌کند، محاسبه کرد. نتیجه‌ای که به‌دست آورد ۱۵٫۱۰ فوت پاریسی بود. این دو نتیجه آن‌قدر به هم نزدیک بود که گزارهٔ موردنظر را اثبات می‌کرد.

در گزارهٔ ۵ به آسانی می‌پذیریم که آنچه برای زمین و ماه درست است، برای مشتری و زحل و اقمار آنها و برای خورشید و سیارات آن نیز درست است.

سرانجام در دو گزارهٔ بعدی، نیوتون به‌وضوح قانون جهانی گرانش خود را اعلام می‌کند. من در این‌جا می‌خواهم از شرح بعضی از جزئیات و موشکافیهای مطلب صرف‌نظر کنم و سرراست به معادله‌ای جبری که معادل با محاسبهٔ عکس مجذور نیروی جاذبهٔ گرانشی F نیوتون بین دو جسم که جرم آنها m_1 و m_2 است بپردازم

$$F = G\frac{m_1 m_2}{r^2} \qquad (16)$$

که در آن r فاصلهٔ مراکز دو جسم جدا از هم است و G که «ثابت گرانشی» نامیده می‌شود یک ثابت جهانی است. به‌استثنای موارد معدود غریبی از قبیل ستاره‌های نوترونی و سیاه‌چاله‌ها، این معادله برای هر دو جسمی در جهان اعم از سیارات، قمرها، دنباله‌دارها، ستارگان و کهکشانها به‌کار می‌رود. ثابت گرانشی G همیشه مقدار معینی دارد و شاخص نظریهٔ گرانی است. در داستان بعدی ما، این ثابت با چند ثابت جهانی دیگر که هر یک در جای خود منحصر به‌فردند، در یک نظریهٔ بزرگ، پیوند خواهند یافت.

در گزاره‌های باقیماندهٔ کتاب ۳، نیوتون به مسائل جزئی‌تری می‌پردازد. او شکل زمین را محاسبه می‌کند (قطر زمین در استوا اندکی بیشتر از قطر آن در قطبهاست)، نظریه‌ای دربارهٔ کِشندها (جزر و مد) مطرح می‌کند، و نشان می‌دهد که چگونه می‌توان با استفاده از داده‌های حاصل از پاندول، تغییرات وزن در نقاط متفاوت زمین را اثبات کرد. او می‌کوشد تا پیچیدگیهای مدار ماه را محاسبه کند، اما توفیق کاملی ندارد زیرا دینامیک او محدودیت گریزناپذیری دارد. بررسی کنش متقابل (گرانشی یا نوع دیگر) دو جسم آسان است، اما برای مسئلهٔ سه جسم یا بیشتر راه‌حل دقیقی ندارد. مدار ماه عمدتاً، نه به‌طور کامل، با جاذبهٔ گرانشی معین می‌شود. محاسبهٔ کامل آن یک مسئلهٔ «سه‌جسمی» است که اثر جزئی خورشید را نیز شامل می‌شود. نیوتون در کتاب ۳ با ایجاد یک روش تقریبی محاسبه، ابتدا مسئلهٔ زمین ـ ماه را به‌دقت حل کرد و سپس با به‌حساب آوردن اثر «مختل‌کنندهٔ» خورشید، آن را اصلاح کرد. این راهکار یکی از تقریبهای متوالی در محاسبه است. محاسبه با دستور این «نظریهٔ مختل‌کننده» خسته‌کننده و ملال‌آور است، و نیوتون نتوانست برای به‌دست آوردن دقت مطلب به‌قدر کافی دشواری آن را تحمل کند. او شکایت داشت از اینکه چشم‌انداز تحمل محاسبات دقیقتر برای او «دردسر آفرین» است.

انتشار کتاب پرینسیپیا توجه بیشتری را به خود نیوتون جلب کرد تا به کتابش. تنها افراد معدودی که غالباً گمنام و سطحی بودند این کتاب را وارسی کردند. دگانت در این‌باره می‌نویسد: «فلاسفه و بشردوستان این دوران و نسلهای بعدی این احساس را داشتند که شگفتیهای بزرگی در صفحات این کتاب وجود دارد؛ به آنان گفته شده بود که نیوتون حقیقت را آشکار کرده است و آنان به این امر باور داشتند . . . اما پرینسیپیا همچنان مهر و موم شده باقی ماند.»

کتاب اُپتیکس (نورشناسی)

نیوتون به‌عنوان یک مرد جوان با هوک و دیگران دربارهٔ نظریهٔ رنگها و دیگر وجوه اُپتیک درکشمکش بود. سرانجام، این مجادله او را به‌مدت سی سال دربارهٔ موضوع اپتیک به سکوت کشانید، به عذر اینکه او نمی‌خواهد «درگیر مشاجره برای این موضوعها» باشد. آنچه او را ترغیب کرد تا سکوتش را بشکند و بیشتر کارهای قبلی اپتیکی و همچنین بعضی از تأملات برجسته‌اش را منتشر کند، ممکن است مرگ مخالف عمدهٔ او، هوک در سال ۱۷۰۳ بوده باشد. به هر حال، نیوتون شاهکار دیگر خود، کتاب اپتیکس (*Opticks*) را در سال ۱۷۰۴ منتشر کرد.

مطالب پرینسیپیا و اپتیکس فرق نمایان دارند. هویت این دو کتاب با هم متفاوت است، و درواقع ممکن است بازتاب تغییر شخصیت نیوتون باشد. پرینسیپیا در محیط منزوی دانشگاهی کمبریج و اپتیکس در محیط اجتماعی و سیاسی نیوتون پس از ورود به لندن نوشته شده است. اپتیکس کتابی است که بیشتر از پرینسیپیا قابل درک است. این کتاب بیشتر به زبان انگلیسی نوشته شده است تا لاتینی، و خواننده را با بحثهای ریاضی دشوار آزار نمی‌دهد. جای شگفتی نیست که اخلاف نیوتون به فراوانی از اپتیکس ذکری به میان آورده و به‌ندرت به پرینسیپیا توجه داشته‌اند.

درکتاب اپتیکس، نیوتون هم مبانی آزمایشی علم اپتیک را نشان می‌دهد و هم می‌کوشد که مبانی نظری آن را مطرح کند. او آزمایشهایی را شرح می‌دهد که خواص فیزیکی پرتوهای نور را نشان می‌دهند؛ از جملهٔ آنها بازتاب، میزان شکست، پراش و تداخل پرتوهای نور است.

واژهٔ «تداخل» در واژگان نیوتون نیست، اما او آثار تداخل نور را در آنچه امروز «حلقه‌های نیوتونی» می‌نامیم شرح می‌دهد. در آزمایش نمایشی، اگر دو منشور با اندکی تحدب، با لایهٔ نازکی از هوا بین آنها، به‌هم فشرده شوند، الگوی جالبی از حلقه‌های هم‌مرکز رنگین، دوروبر نقاطی که منشورها با هم در تماسند، ظاهر می‌شوند.

آثار پراش وقتی نشان داده می‌شود که در اتاقی باریکهٔ نازکی از نور خورشید از سوراخ کوچکی وارد شود، در این صورت مشاهده می‌کنیم سایه‌هایی که با این منبع نور بر پرده‌ای می‌افتد «فریزها یا نوارهای موازی در نور رنگین» در لبهٔ آنها دارد.

نیوتون برای توضیح این فهرست از آثار اپتیکی، درکتاب اپتیکس، نظریه‌ای براساس این مفهوم ارائه می‌کند که پرتوهای نور پرتابه‌هایی از ذرات کوچک‌اند. او در یکی از «پرس وجو»هایی که با نتیجه‌گیریهای

آنها کتاب اپتیکس را به پایان می‌برد این پرسش را مطرح می‌کند که: «آیا پرتوهای نور اجرام بسیار کوچکی نیستند که از مواد درخشنده گسیل می‌شوند؟ زیرا چنین اجرامی از میان ملأها در امتداد خطوط مستقیم عبور می‌کنند، بدون آنکه به درون سایه خم شوند، که این ماهیت پرتوهای نور است».

در پرس‌وجوی دیگری، نیوتون حدس می‌زند که ذرات نور با نوعی از نیروهای اپتیکی متأثر می‌شوند: «آیا اجسام در یک فاصله بر نور اثر ندارند و اثر آنها نیست که پرتوهای نور را خم می‌کند؛ و چنین نیست که در کمترین فاصله قویترین اثر را دارد؟»

نیوتون در کتاب اپتیکس، با ذرات و نیروها به‌عنوان عوامل اصلی، یک مکانیک اپتیکی می‌سازد، که طرح کلی آن را قبلاً در پایان کتاب ۱ پرینسیپیا ریخته است. او بازتاب و شکست نور را با فرض اینکه نیروهای اپتیکی در ملأهای متفاوت، تفاوت دارند و پراش نور را با فرض اینکه پرتوهای نور به هنگام عبور از یک جسم نزدیک با نیروهایی قویتر از نیروهای اجسام دورتر متأثر می‌شوند، توضیح می‌دهد.

برای توضیح حلقه‌ها، نیوتون نظریهٔ «برازشها» [fits]یش را براساس این فکر و گمان ارائه می‌کند که پرتوهای نور بین «برازندگیهای بازتاب آسان و. . . برازندگیهای انتقال آسان، نوسان می‌کنند.» به این طریق، او برای پرتوها نوعی تناوب یعنی خاصیت شبه‌موج قائل می‌شود. اما، او دیدگاه ذره‌ای را ترک نمی‌کند، و به این ترتیب وارد یک دوگانگی پیچیده می‌شود.

ما امروزه حلقه‌های نیوتونی را به‌عنوان یک پدیدهٔ تداخل می‌شناسیم که وقتی دو رشته موج به هم برخورد می‌کنند، به‌وجود می‌آید. این نظریه به‌وسیلهٔ تامس یانگ[1] مطرح شد. یانگ یکی از نخستین کسانی بود که تقریباً یک قرن پس از انتشار کتاب اپتیکس، به امتیازات یک نظریهٔ موجی ساده برای نور پی برد. در سالهای ۱۸۳۰ یانگ در انگلیس و اگوستین فِرنِل[2] در فرانسه نشان داده بودند که همهٔ خواص فیزیکی شناخته‌شدهٔ نور در آن زمان را می‌توان به آسانی با یک نظریهٔ موجی توضیح داد.

نظریهٔ ذره‌ای نیوتون با این ضربه دوام نیافت. به‌مدت هفتاد و پنج سال نظریهٔ ذره‌ای فراموش شد، تا در سال ۱۹۰۵، که با شگفتی همگان آلبرت اینشتین آن را بازگرداند. (اما اکنون ما داریم به حدود دو قرن فراتر از داستان نیوتون می‌رسیم. من می‌خواهم دنبالهٔ این مطلب را به بعد [فصل ۱۹] موکول کنم و در آنجا به سیر گستردهٔ جهان عجیب امواج نور و ذرات بپردازم.)

پرس‌وجوهایی که کتاب اپتیکس را به پایان می‌رساند، به ما نشان می‌دهد که نیوتون کجا دربارهٔ دو مفهوم بزرگ فیزیکی متوقف شده است. در پرس‌وجوهای ۱۷ تا ۲۴، ما را با تصور یک ملأ جهانی به‌نام «اتر» ترک می‌کند. اتری که نیروهای اپتیکی و گرانشی را از خود عبور می‌دهد، حامل پرتوهای نور و منتقل‌کنندهٔ گرما است. در پرس‌وجوی ۱۸ می‌پرسد: «آیا این ملأ فوق‌العاده رقیقتر و ظریفتر از هوا نیست، و فوق‌العاده کشسانتر و فعالتر نیست؟ آیا به آسانی همهٔ اجسام را پر نمی‌کند؟ و آیا

1. Thomas Young 2. Augustin Fresnel

(با نیروی کشسانی) در همهٔ آسمان گسترده نمی‌شود؟» مفهوم اتر به یک شکل یا شکلی دیگر مورد توجه نظریه‌پردازان قرنهای هجدهم و نوزدهم بود، تا آنکه در سال ۱۹۰۵ مضمحل شد. در این سال سرنوشت‌ساز، اینشتین نه‌تنها ذره‌ای بودن نور را احیا کرد، بلکه نشان داد مفهوم اتر اصلاً ضرورتی ندارد.

در پرس‌وجوی ۳۱، نیوتون کتاب اپتیکس را با تأملات و گمانه‌هایی دربارهٔ اتم‌گرایی به پایان می‌برد، که او آن را به‌عنوان یکی از بزرگترین مفاهیم وحدت‌آفرین در فیزیک می‌داند. (همان‌طورکه ما می‌دانیم.) او اتمها را در قلمرو مفهوم بزرگ دیگری، یعنی در قلمرو نیروها جای می‌دهد: «آیا ذرات کوچک اجسام قدرتها، تواناییها و نیروهای خاصی ندارند که با آنها نه‌تنها بتوانند بر پرتوهای نور برای بازتابش، شکست و خمیده کردن اثر کنند، بلکه با اثر بر یکدیگر بخش بزرگی از پدیده‌های طبیعت را تولید کنند؟»

او با استفاده از دانش شخصی خود از شیمی، شواهدی برای نیروهای جاذبه و دافعهٔ میان ذرات همه نوع از مواد شیمیایی از جمله فلزات، نمکها، اسیدها، حلالها، روغنها و بخارها، استخراج می‌کند. او استدلال می‌کند که این ذرات جنبشی و غیرقابل تخریب‌اند: «با در نظرگرفتن همهٔ این چیزها، برای من محتمل به‌نظر می‌رسد که خدا در آغاز ماده را به‌صورت ذرات، توپر و سنگین، سخت، غیرقابل نفوذ و جنبش‌پذیر ساخته است. این ذرات با چنان اندازه‌ها و چنان شکلها، متناسب با فضا است که به بهترین وجه به مقصودی که او آنها را ساخته است، می‌رساند؛ آن ذرات به‌قدری سخت‌اند که هرگز شکسته و فرسوده نمی‌شوند؛ هیچ موجود قدرتمندی نمی‌تواند آنچه را خدا خودش یک‌بار در نخستین آفرینش ساخته است بشکافد و تقسیم کند.»

لندن

در زندگی بزرگسالی نیوتون دو وجه متمایز وجود دارد: در اواسط سالهای ۱۶۶۰ از محیط‌های روستایی لینکلن‌شایر تا دنیای دانشگاهی کمبریج، و سی سال بعد، به هنگامی که پنجاه و چهارساله بود، از محیط منزوی کمبریج تا زندگی اجتماعی و سیاسی در لندن با منصبی مناسب در نظام دولتی. رفتن به لندن احتمالاً ملهم از احساسی باشد که شهرت روزافزون او شایستهٔ پاداش مادی بیشتر از آن بوده که در استادی لوکاسین به او پرداخت شده است. همچنین ما می‌توانیم حدس بزنیم او آگاهی یافته بود که استعداد فوق‌العاده‌اش برای کار خلاق علمی تحلیل می‌رود.

در سال ۱۶۹۶ نیوتون کمبریج را ترک کرد و در لندن اقامت گزید و به‌عنوان سرپرست ضرابخانه دورهٔ زندگی جدیدی را آغاز کرد. این پست پیشنهاد چارلز مونتاگ[1] شاگرد قبلی و دوست صمیمی او بود که به تازگی به‌عنوان وزیر خزانه‌داری منصوب شده بود. مونتاگ ضمن شرح ادارهٔ این پست به‌عنوان یک کار بدون مسئولیت برای نیوتون متذکر می‌شود که «این کار مشغلهٔ آن‌چنان زیادی ندارد و مستلزم حضور و مراقبت مستمری بیش از آن نیست که موجب تلف کردن وقت شما باشد». اما این چیزی نبود که نیوتون در ذهن خود داشت؛ این خصیصهٔ او نبود که کاری را، کوچک یا بزرگ، به‌طور سطحی انجام دهد.

1. Charles Montague

نیوتون همان کاری را کرد، که همیشه وقتی با مسئلهٔ پیچیده‌ای مواجه می‌شد انجام می‌داد: او به مطالعه پرداخت، کتابهایی دربارهٔ علم اقتصاد، بازرگانی و ادارهٔ امور مالی خرید و برای تحقیق درستی بعضی از امور پرس‌وجوهایی کرد. یادداشتهای فراوانی نوشت. آنچه او کرد شانس خوبی برای انگلستان بود. رئیس ضرابخانه که سرپرست می‌باید زیر نظر او باشد، تامس نیل[1] بود. او به‌جای اینکه با وظیفهٔ بزرگی که دارد با مشکلات دست‌وپنجه نرم کند و به ضرابخانه رنگ و جلایی بدهد، بیشتر به معاملات قماری و ثروت‌اندوزی خود توجه داشت. پول رایج و خزانه‌داری انگلیس دچار بحران شده بود. دو نوع سکه در گردش بود، یک نوع سکه‌هایی که با چکش زدن یک قالب بر ورقهٔ فلزی تولید می‌شد و نوع دیگر که با ماشین‌آلات خاصی ساخته می‌شد، سکه‌هایی بود که هر یک لبهٔ کنگره‌داری داشتند. سکه‌های چکشی به‌آسانی قابل جعل و تقلب بودند، و ارزش آنها کمتر از سکه‌های کنگره‌دار، با همان نام بود. طبیعتاً سکه‌های چکشی مصرف و سکه‌های کنگره‌دار جمع‌آوری می‌شد.

یک راه رهایی از این مشکل تهدیدکننده، ضرب سکهٔ جدید سراسری بود که حکم آن، پیش از ورود نیوتون به ضرابخانه صادر شده بود. او چالش تجدید ضرب سکه را به‌عهده گرفت، اگرچه این امر یکی از مسئولیتهای او به‌عنوان سرپرست نبود. بنابه نظر وستفال، «نیوتون مدیری مادرزاد بود، و ضرابخانه از حضور او منتفع شد.» در پایان ۱۶۹۶، کمتر از یک سال پس از ورود او به ضرابخانه، بحران تحت کنترل درآمد. مونتاگ بعدها در این گفته تردید نداشت که، بدون نیوتون، تجدید ضرب سکه امکان‌پذیر نبود. در سال ۱۶۹۹ نیل مرد، و نیوتون که از آن پس درواقع، اگرچه بدون اسم و رسم، رئیس ضرابخانه بود، جانشین نیل شد.

شخصیت نیوتون معماهای بسیاری دارد. یکی از بغرنجترین آنها برخورد او نسبت به زنان است. ظاهراً او هرگز ارتباط صمیمانه‌ای با مادرش نداشته است. غیر از زنی که نیوتون در دوران جوانی شیفتهٔ او بوده و ممکن است به وی پیشنهاد ازدواج کرده باشد، یک زن دیگر در زندگی او بوده است. این زن، کاترین بارتون دختر هانا اسمیت، خواهر ناتنی نیوتون بود. پدر این دختر، کشیش رابرت بارتون[2] در سال ۱۶۹۳ درگذشت، و او زمانی در اواخر سالهای ۱۶۹۰ به لندن رفت تا با نیوتون زندگی کند. کاترین دختری زیبا و جذاب بود و دلباخته‌های فراوانی داشت، از جمله حامی نیوتون، چارلز مونتاگ. کاترین نامزد مونتاگ شد که بدون شک با موافقت نیوتون بود. این امر ادامه یافت؛ وقتی مونتاگ مُرد درآمد سخاوتمندانه‌ای برای کاترین به‌جای گذاشت. کاترین دوست جاناتان سویفت[3] نیز بود، و او بارها در مجموعهٔ یادداشتهایش، از کاترین یاد کرده است. وُلتر[4] شایعه‌پردازی و مهمل‌بافی‌هایی کرد به این مضمون که: «من فکر می‌کنم . . . چنین نبوده است که نیوتون موفقیتش را با شایستگی‌اش به‌دست آورده باشد. آیساک نیوتون دختر خواهر بسیار زیبایی داشت. . . که وزیر سیاستمدار (مونتاگ) را تسخیر کرد.

1. Thomas Neale 2. Robert Barton 3. Jonathan Swift 4. Voltaire

فلوکسیونها و گرانش، بدون دختر خواهر زیبایش بی‌فایده می‌بود.» کاترین بارتون، پس از مرگ مونتاگ، با جان کوندویت[1] ازدواج کرد. او مردی ثروتمند بود که موفقیت خود را در خدمت ارتش بریتانیا به‌دست آورده بود. این ازدواج او را به‌آسانی برای کار دیگری آماده کرد: او نخستین زندگی‌نامه‌نویس نیوتون شد.

مدیریت نیوتون در نجات دو مؤسسه‌ای که در آستانهٔ فاجعه بودند، تأثیری حیاتی داشت. در سال ۱۷۰۳، مدتها پس از بحران ضرب سکه در ضرابخانه، او به‌عنوان رئیس انجمن سلطنتی انتخاب شد. همچون ماجرای ضرابخانه، انجمن به هنگام ورود نیوتون شدیداً نیازمند رهبریِ قدرتمندی بود. از اوایل سالهای ۱۶۹۰، رئیسان انجمن، اشرافی بودند که بیشتر جنبهٔ تشریفاتی داشتند. نیوتون این شکل و شمایل را به سرعت تغییر داد. او چهره‌های مجربی را معرفی کرد که با گردهمایی در زمینه‌های عمدهٔ علم (ریاضیات، مکانیک، اخترشناسی و نورشناسی، زیست‌شناسی، گیاه‌شناسی و شیمی) انجمن را خانهٔ جدید خود می‌یافتند. او هالی را به‌عنوان دبیر انجمن منصوب کرد و به دنبال آن بعضی از شاگردانش را به‌کار گماشت. او اعتبار انجمن را بازگرداند، اما راهی هم برای دو مشاجرهٔ ننگین باز کرد.

در ۱۶ آوریل سال ۱۷۰۵ ملکه آن[2] لقب نایت[3] (سِر) را در ترینیتی کالج کمبریج به او اعطا کرد. به‌نظر می‌رسد که این مراسم بیش از آنکه حاصل تشخیص اقدامات علمی نیوتون باشد، القاء سیاسی مونتاگ بوده است. (نیوتون از آن پس طرفدار پارلمان بود.) این افتخار سیاسی یا غیرسیاسی نتیجهٔ حال‌وهوای سالهایی بود که نیوتون در لندن به‌سر می‌برد.

مشاجرات بیشتر

نیوتون ستیزه‌گر بود، و سرسخت‌ترین مخالف او، رابرت هوک به‌همان اندازه ستیزه‌گری داشت. اما داستان نیوتون بدون توضیح دو مشاجرهٔ کینه‌آمیز دیگر او کامل نمی‌شود. نخستین آنها جنگ بر سر داده‌های اخترشناسی بود. جان فلامستید[4] نخستین اخترشناس سلطنتی یک سری رصدهایی از ماه داشت که نیوتون معتقد بود برای تأیید و اصلاح نظریهٔ اختلالهای قمری‌اش به آنها احتیاج دارد. فلامستید با اکراه رصدهای درخواستی او را برآورده کرد، اما نیوتون دریافت که داده‌ها نادرست است، و فلامستید از اظهارنظرهای انتقادی او خشمگین شد.

در حدود ده سال بعد، نیوتون هنوز از نظریهٔ قمری‌اش ناراضی بود و هنوز نیازمند داده‌های رصدی فلامستید از ماه بود. اکنون او رئیس انجمن سلطنتی بود، با ناشکیبایی عادی‌اش، از موقعیتی که داشت استفاده کرد و کوشید تا فلامستید را به انتشار کاتالوگی از داده‌های رصدی وادارکند. فلامستید مقاومت کرد. نیوتون حمایت شاهزاده جرج، شوهر ملکه آن را به‌دست آورد و فلامستید با اکراه به تهیهٔ کاتالوگ پرداخت.

حوزهٔ طرح معین نشده بود. فلامستید می‌خواست درکاتالوگ خود، اخترشناسان پیشین از بطلمیوس تا هیولیوس[5] را بگنجاند، اما نیوتون فقط داده‌های مورد نیاز برای محاسبات خودش را می‌خواست.

1. John Conduitt 2. Queen Anne 3. knight 4. John Flamsteed 5. Hevelius

فلام‌استید به‌مدت چند سال تعلّل کرد، شاهزاده جرج مرد، و نیوتون به‌عنوان رئیس انجمن سلطنتی کنترل استبدادی بر رصدهای اخترشناسی سلطنتی را به‌دست گرفت. بعضی از داده‌ها را با عنوان *Historia Coelestis* (تاریخ آسمان) در سال ۱۷۱۲ با ویراستاری هالی، منتشر کرد. نه انتشار و نه ویراستاری آن مورد قبول فلام‌استید قرار نگرفت.

نیوتون در مبارزه پیروز شد، اما جنگ پایان نیافت. فرصتهای سیاسی فلام‌استید فزونی یافت و فرصتهای نیوتون با مرگ ملکه آن در سال ۱۷۱۴ و مونتاگ در سال ۱۷۱۵ رو به زوال بود. فلام‌استید نسخه‌های باقی‌ماندهٔ تاریخ آسمان را به‌دست آورد، مقالات هالی را جدا کرد و «آنها را قربانی حقیقت سماوی کرد.» (به این معنی که آنها را سوزاند.) سپس او به طرحی که پیش از دخالت نیوتون مطرح کرده بود، بازگشت، و نزدیک به اتمام طرح بود که در سال ۱۷۱۹ درگذشت. این کار به‌وسیلهٔ دو دستیار پیشین او کامل شد و با عنوان *Historia coelestis britannica* در سال ۱۷۲۵ منتشر شد. اما نیوتون، هرگز همهٔ داده‌هایی را که می‌خواست به‌دست نیاورد و سرانجام مغلوب دشواری محض محاسبات قمری دقیق، شد.

شخص دیگری که در سر راه نیوتون قرار گرفت و مبارزهٔ جانانه‌ای ایجاد کرد، گاتفرید لایبنیتز بود. این‌بار جدال بر سر یکی از گرانبهاترین متصرفات عقلانی یک دانشمند، یعنی حق تقدم بود ـ نیوتون و لایبنیتز هر دو مدعی اختراع حسابان بودند.

اگر نیوتون رساله‌ای را که در سال ۱۶۶۶ دربارهٔ روش فلوکسیون خود نوشته بود، منتشر می‌کرد هیچ مشاجره‌ای پیش نمی‌آمد. او آن را یا درواقع هیچ اثر ریاضی دیگری را تا چهل سال بعد منتشر نکرد. اما پس از سال ۱۶۷۶ لایبنیتز دست‌کم به‌طور جزیی از کار نیوتون در ریاضیات آگاه شد. در آن سال نیوتون دو نامه برای لایبنیتز نوشت و در آنها طرح کلی آخرین تحقیقش دربارهٔ جبر و فلوکسیونها را بیان کرد. لایبنیتز در سال ۱۶۷۵ مفاهیم اساسی حسابانش را بسط داد، و در سال ۱۶۸۴ گزارش طرح‌واره‌ای را که به مشتق‌گیری منحصر می‌شد، بدون ذکر نامی از نیوتون منتشر کرد. نیوتون از انتشار آن گزارش و خودداری از ذکر نام وی ناراحت شد. به گفتهٔ وستفال «گناه لایبنیتز چنان غیراخلاقی و نامتعارف بود که مگر لطف الهی دربارهٔ آن داوری کند».

طی سالهای ۱۶۸۰ و ۱۶۹۰، لایبنیتز حسابانش را بسط بیشتری داد تا شامل انتگرال‌گیری شود. نیوتون مقاله‌ای با عنوان *De quadratura* نوشت (اما منتشر نکرد)، (*quadratura* نخستین واژه برای انتگرال‌گیری بود) و جان والیس[1] گزارش مختصری از فلوکسیونها را در جلد دوم کتابش به‌نام *Algebra* منتشر کرد. در سال ۱۶۹۹، نیکلاس فاتیو دویلر[2]، دست‌پروردهٔ پیشین نیوتون، رساله‌ای فنی با عنوان *Lineae brevissimi* (خط سریعترین فرود) منتشر کرد، که در آن او مدعی شده بود

1. John Wallis (ریاضیدان انگلیسی) 2. Nicholas Fatio de Duillier

نیوتون نخستین مخترع و لایبنیتز دومین مخترع حسابان بوده‌اند. یک سال بعد، لایبنیتز در بررسی و نقد رسالهٔ مذکور، اظهار داشت که کتاب ۱۶۸۴ او شاهد تقدم اوست.

درحالی‌که آتش مشاجره افروخته شده بود، جان کیل[1] شاگرد دیگر نیوتون با متهم کردن لایبنیتز به سرقت ادبی، به این افروختگی دامن زد. لایبنیتز در مورد «اتهامات نامربوط و گستاخانه» کیل به دبیر انجمن سلطنتی، هانس اسلون[2]، شکایت کرد. نیوتون با استفاده از این فرصت، به‌عنوان رئیس انجمن، هیئتی را مأمور رسیدگی به شکایات لایبنیتز و کیل کرد. بدیهی است که هیئت به نفع نیوتون رأی داد و مشاجره تشدید شد. کوششهایی که برای نزدیکی نیوتون و لایبنیتز به‌عمل آمد ناموفق ماند. با درگذشت لایبنیتز در سال ۱۷۱۶ مجادله سرد شد، اما خاموش نشد. نیوتون و لایبنیتز دست‌کم به‌مدت پنج سال با هم درگیر بودند.

نزدیکی به خدایان

زندگینامه‌نویسان و مفسران دربارهٔ شخصیت و منش نیوتون اجماع نظر ندارند و هرگز نظر مساعد و جامعی به ما نمی‌دهند. معاصران وی یا او را شبه‌خدا می‌دیدند یا از او هیولایی عجیب و غریب می‌ساختند. عقاید آنان بستگی دارد به اینکه نویسنده دوست یا دشمن او بوده است. در قرن نوزدهم زندگینامه‌نویسی اولیا و قدیسین شایع و نیوتون به‌عنوان الگویی تمام‌عیار ظاهر شد. در زمان ما به‌نظر می‌رسد که مدل هیولایی در حال بازگشت است.

در یک ارزیابی شکی نیست که نیوتون همواره بزرگترین نابغهٔ خلاق فیزیک بوده است. هیچ‌یک از برترین‌های دیگر (همچون اینشتین، ماکسول، بولتزمن، گیبس و فاینمن) از لحاظ جامعیت موفقیتهای بزرگی که او به‌عنوان نظریه‌پرداز، آزمایشگر و ریاضیدان به‌دست آورده بود، همتای او نبودند.

نیوتون از این قاعده مستثنا نبود که نوابغ خلاق به‌سوی زندگی خودخواهانه و غیرعادی کشیده می‌شوند. او شخصی تودار، درون‌گرا، کج‌خلق و عفیف‌نما بود. نیوتون نمی‌توانست انتقاد را تحمل کند و در رفتار با منتقدانش رفتاری فریبکارانه داشت. در سراسر زندگی عصبی‌مزاج بود و دست‌کم یک‌بار تا سر حد مرگ پیش رفت.

اما نیوتون هیولا نبود. او با همکارانش چه کهتر و چه مهتر و همچنین با خویشاوندان تهی‌دستش گشاده‌دست و سخی بود. او در مشاجرات، معمولاً حد اعتدال را رعایت می‌کرد. نیوتون هرگز ازدواج نکرد، اما زن‌گریز نبود، گواه آن اشتیاقی بود که نسبت به کاترین بارتون داشت. او در کمبریج بی‌میلی و اکراه نشان می‌داد و برای همکاران دانشگاهیش تحسین اندکی قائل بود، اما در محیط عقلایی فعالتر لندن او به‌خوبی از همکاران پذیرایی و مهمان‌نوازی می‌کرد.

1. John Keill 2. Hans Sloane

اگر می‌توانستید مسیر زمان را به عقب، به قرن هفدهم بازگردانید و با او ملاقات کنید، ممکن بود او را مانند سراینده‌ای بیابید که در سطر نخست هر کس را به خشم می‌آورد و سپس وقتی به صحنه می‌رود، همچون فرشته‌ای نغمه‌سرایی می‌کند. این نغمه چنان مورد تحسین فراوانی قرار می‌گرفت که رفتار نفرت‌انگیز اولیه فراموش می‌شد.

هالی که بیش از هر کس با رفتار نیوتون آشنا بود، در شعری بر پیشگفتار کتاب پرینسیپیا می‌نویسد به این مضمون که «نزدیکی به خدایان او را جاودانه کرده است.» آلبرت اینشتین که بی‌تردید از لحاظ نظریه‌پردازی همتراز نیوتون بوده است، در پیشگفتار چاپی از کتاب اپتیکس این قدردانی را آورده است:

> نیوتون خوشبخت، شادکامی دوران کودکی علم است! کسی که وقت و خاطری آسوده داشته باشد، با خواندن این کتاب می‌تواند رویدادهای شگفتی را که نیوتون کبیر در روزهای جوانی‌اش تجربه کرده است، بار دیگر زنده کند. طبیعت، از نظر او کتابی گشوده است که او می‌تواند حروف آن را بدون سخت‌کوشی بخواند. مفاهیمی را که او به‌کار می‌گیرد تا برای جا انداختن موضوع تجربه، آنها را مرتب کند، به‌نظر می‌رسد که به‌طور خودبه‌خود از تجربهٔ خودش جاری می‌شود. از آزمایشهای زیبایی جاری می‌شود که به‌ترتیب مانند اسباب‌بازی ردیف کرده است و جزئیات فراوان آنها را با مهربانی و ملایمت شرح می‌دهد. او آزمایش، نظریه‌پردازی و مکانیک را به‌تنهایی در شخصیت خود ترکیب کرده است و همچون یک هنرمند، آنها را به نمایش می‌گذارد. او در برابر ما قوی و مطمئن و تنها ایستاده است: لذت او در آفرینش و دقت موشکافانهٔ او در هر کلمه و در هر شکلی آشکار است.

ii

ترمودینامیک

خلاصهٔ تاریخی

اکنون تاریخ ما از مکانیک، علم حرکت، به ترمودینامیک، علم گرما باز می‌گردد. نظریهٔ گرما تا اواخر قرن هجدهم، که گرما را سیّالی بی‌وزن به‌نام «کالریک» می‌دانستند، به‌صورت یک علم کمّی ظاهر نشد. شباهت این سیال را به‌صورت «جریان» ظاهری گرما از دمایی بالا به دمایی پایین تصور می‌کردند. مهندسان قرن هجدهم می‌دانستند که یک «ماشین حرارتی» چنانچه اجزای آن ماهرانه طراحی شده باشند، با استفاده از این جریان گرمایی می‌تواند برونداد کار مفیدی تولید کند.

فرض اساسی نظریهٔ کالریک این بود که گرما «پایستار» است، یعنی تباهی‌ناپذیر و خلق‌ناشدنی است. این فرض برای پیشگامان نظریهٔ گرمایی، از جمله سادی کارنو[1]، که مطالعات او دربارهٔ ماشین حرارتی آغاز داستان ما از ترمودینامیک است، به‌خوبی کارآمد بود. اما در سالهای ۱۸۴۰، رابرت مایر[2]، جیمز جول[3]، هرمان هلمهلتز[4] و دیگران این فرض پایستاری گرما را به نقد کشیدند. انتقاد آنان نظریهٔ کالریک را از میان برد، اما برای ایجاد یک نظریهٔ جدید راهنمایی اندکی داشت.

وظیفهٔ ساختن علم گرمایی جدید که سرانجام ترمودینامیک نامیده شد، در سالهای ۱۸۵۰ به دامان ویلیام تامسن[5] و رودولف کلازیوس[6] افتاد. یکی از اجزای اساسی نظریهٔ آنان، این مفهوم بود که هر سیستمی یک خاصیت ذاتی دارد. تامسن این خاصیت را «انرژی» نامید و بر این باور بود که انرژی تا حدی با حرکت کاتوره‌ای مولکولهای سیستم مربوط است. او نتوانست این تعبیر مولکولی را بهبود بخشد، زیرا در اواسط قرن نوزدهم ساختار، رفتار و حتی وجود مولکولها بحث‌انگیز و مورد اختلاف بود. اما او به این دریافت رسید که انرژی سیستم پایستار است، نه گرمای آن. او این استنتاج را در معادلهٔ دیفرانسیلی ساده‌ای بیان کرد.

در ترمودینامیک جدید، انرژی، شریکی همتراز، به‌نام «انتروپی» دارد. کلازیوس مفهوم انتروپی را ارائه و نامگذاری کرد، اما دربارهٔ تشخیص اهمیت بنیادی آن مردّد بود. او در یک معادلهٔ دیفرانسیلی

1. Sadi Carnot 2. Robert Mayer 3. James Joule 4. Hermann Helmholtz
5. William Thomson 6. Rudolf Clausius

سادهٔ دیگر نشان داد که چگونه انتروپی با گرما و دما مربوط می‌شود، و رسماً قانونی را بیان کرد که امروزه به‌عنوان قانون دوم ترمودینامیک مشهور است، با این بیان که: در سیستم منزوی، انتروپی به یک مقدار ماکزیمم افزایش می‌یابد. اما تردید داشت که از این پیشتر برود. این حالت تردید، بار دیگر ناشی از اعتبار فرضیهٔ مولکولی بود.

ترمودینامیک، نیوتون خودش را داشت و آن ویلارد گیبس[1] بود. در جایی که کلازیوس تردید داشت، گیبس مردد نبود. گیبس به مشارکت انرژی-انتروپی واقف بود و به آن «مفهوم پتانسیل شیمیایی» را افزود که در مطالعهٔ تغییر شیمیایی بسیار سودمند است. او بدون گرفتن راهنمایی زیاد از نتایج آزمایشی-که معدودی از آنها در دسترس بود- طرح خود را در مورد فهرست طویلی از پدیده‌های متفاوت به‌کارگرفت. شاهکار گیبس طولانی بود و اما نوشتهٔ فشرده‌ای، به‌عنوان رساله‌ای دربارهٔ ترمودینامیک، در سالهای ۱۸۷۰ منتشر شد.

رسالهٔ گیبس چشم‌اندازهای نظری بسیار فراتر از نظریهٔ گرما را که کلازیوس و تامسن در جستجوی آن بودند، گشود. وقتی پیامهای متعدد گیبس فهمیده (یا کشف مجدّد) شد، قلمرو جدیدی پدید آمد. یکی از کاوشگران این قلمرو والتر نرنست[2] بود. او در جریان تحقیق نظریه‌ای بود برای میل ترکیب شیمیایی، یعنی نیرویی که واکنش شیمیایی را به‌راه می‌اندازد. وی از راه غیرمستقیم در قلمرو فیزیک و شیمی دمای پایین به نظریهٔ مطلوب خود دست یافت.

1. Willard Gibbs 2. Walther Nernst

۳

داستانی از دو انقلاب

سادی کارنو

تأملات

داستان ترمودینامیک در سال ۱۸۲۴ در پاریس آغاز می‌شود. فرانسه پس از ۳۵ سال جنگ، انقلاب و دیکتاتوری، بر پایه‌های خود لرزید. شاهی اعدام شد، قانونهای اساسی نوشته شد، ناپلئون دوبار آمد و رفت، و سلطنت دوبار رواج یافت. ناپلئون ارتش خود را از کشورهای اروپایی با موفقیت گذراند و سپس در روسیه به‌طور فجیعی ناموفق ماند. به‌دنبال آن فرانسه مورد تاخت‌وتاز قرار گرفت، اشغال شد و تاوان جنگی عظیمی را پرداخت.

در سال ۱۸۲۴ گزارشی فنی به‌وسیلهٔ مهندس ارتشیِ جوانی که در این جهان آشوبناک اجتماعی، جنگی و سیاسی متولد شده بود، منتشر شد. نام این مهندس سادی کارنو و عنوان کتاب او تأملاتی دربارهٔ توان محرکهٔ آتش بود. منظور او از «توان محرکه»، کار یا آهنگ انجام کار و «آتش» اصطلاح او برای گرما بود. هدف وی حل کردن مسئله‌ای بود که حتی تصور آن برای اسلاف او دشوار بود. امید کارنو کشف اصول کلّی عملکرد ماشینهای بخار و دیگر وسایل ماشینی گرمایی بود که از درونداد گرما، برونداد کار حاصل می‌شد. او به‌طورکامل به مقصود خود نرسید وکتابش در زمان انتشار چندان مورد توجه واقع نشد، اما پس از مدتی بیش از بیست سال، تجدید نظر آن الهام‌بخش کار بعدی در ترمودینامیک شد.

لازار کارنو[1]

سادی کارنو گرچه همواره در حواشی جهان علمی زمان خود کار می‌کرد، اما از جهات دیگر درگمنامی نمی‌زیست. پدر او لازار در اواخر قرن هجدهم و اوایل قرن نوزدهم یکی از قدرتمندترین مردان فرانسه بود.

1. Lazare Carnot

سادی در قصر لوکزامبورگ پاریس، در سال ۱۷۹۶، زمانی که لازار یکی از پنج عضو اجرایی دیرکتوار[1] بود، به دنیا آمد. لازار کارنو تنها در حدود چهار سال در سطح مقامات عالی خدمت کرد امّا انجام امور سیاسی و عمر طولانی او برای آن زمانهای آشفته غیرعادی بود. او پیش از عضویت در حکومت دیرکتوار عضو مؤثر کمیتهٔ بسیار قدرتمند امنیت عمومی به رهبری ماکسیمیلین دو روبسپیر[2] بود. لازار در این مقام، مسئولیت تلاشهای جنگ انقلابی را به‌عهده داشت. امور لوژستیک و استراتژی را چنان درخشان اداره می‌کرد که غیر از آن ممکن بود برای ارتش فاجعه‌آمیز باشد. درکتابهای درسی تاریخ فرانسه، او به‌عنوان «کارنوی کبیر» و «سازمانده پیروزی» مشهور است. وی تنها عضو امنیت عمومی بود که در سال ۱۷۹۴ روبسپیر را از سقوط نجات داد و به دیرکتوار پیوست. در یک کودتای چپ به سال ۱۷۹۷ به اجبار تبعید شد، اما به‌عنوان وزیر جنگ ناپلئون بازگشت. (در سال ۱۷۹۷ ناپلئون فرماندهی ارتش ایتالیا را به او سپرد.) شیوه‌های دیکتاتوری ناپلئون پس از چندی آشکار شد، اما لازار به عقاید جمهوری‌خواهی خود پای‌بند بود، و پس از چند ماه استعفا کرد. اما بار دیگر در سال ۱۸۱۴، نزدیک به انتهای رژیم ناپلئونی، نخست به فرمانداری آنت‌ورپ[3] و سپس به‌عنوان آخرین وزیر داخلهٔ ناپلئون منصوب شد.

موقعیت لازار را در تاریخ می‌توان بی‌همتا دانست. او نه‌تنها در امور سیاسی و جنگی شهرت داشت، بلکه اکتشافات مهمی در علم و مهندسی به‌عمل آورد. به‌عقیدهٔ چارلز گیلیسپی[4] زندگی‌نامه‌نویس لازار، گزارش علمی او که در سال ۱۷۸۳ منتشر شد، نخستین تلاش برای پرداختن به موضوع مکانیک مهندسی از یک دید نظری بود. هدف لازار از این کار و کار بعدی او در علم مهندسی انتزاع اصول کلّی عملی (operation) از کارهای مکانیکی ماشین‌آلات پیچیده بود. گیلیسپی می‌نویسد: «هدف لازار مشخص کردن شرایط بهینه به‌طریقی کاملاً کلّی برای عمل هر نوع ماشین بود.» او به‌جای آنکه به وارسی بسیاری از جزئیات طرح ماشینها بپردازد، که مرسوم آن زمان بود، دربارهٔ روشهایی نظری تحقیق می‌کرد که اصول آن نیازی به آن جزئیات نداشته باشد.

استنتاج کلّی لازار کارنو، که گیلیسپی آن را «اصل تداوم توان» می‌نامد، بیان این نکته بود که می‌باید از شتابها و تکانه‌ها در اجزای متحرک ماشینها اجتناب شود، زیرا آنها موجب از دست رفتن «گشتاور فعالیت» یا برونداد کار ماشین می‌شوند. ماشین ایده‌آل، ماشینی است که در آن، توان به‌طور مداوم در مراحل بسیار کوچک منتقل شود. به‌کار گرفتن نظر لازار در ماشینهای آبی (مثلاً چرخهای آبی) تجویز می‌کند که برای بازده ماکزیمم نباید برخورد آشفته یا ضربه‌ای بین آب و ماشین باشد، و آبی که از ماشین خارج می‌شود نباید سرعت زیادی داشته باشد.

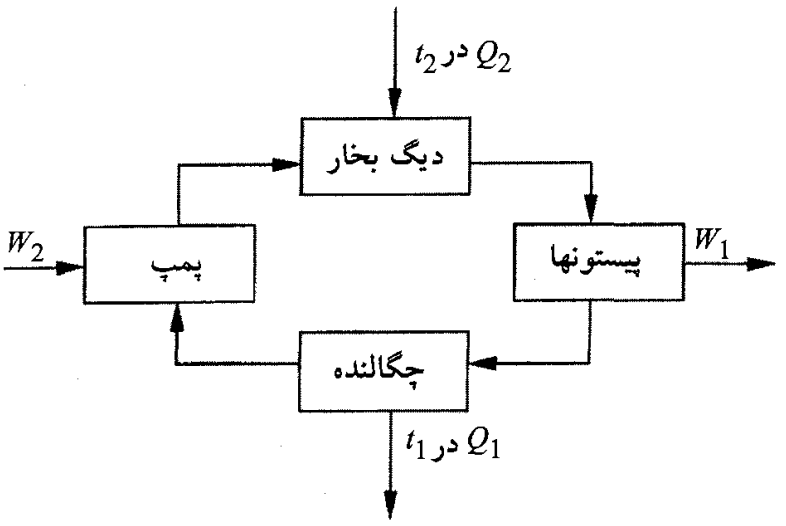
تعدادی از گزارشهای شخصی لازار امروزه به‌عنوان سهم عمده‌ای در علم مهندسی تأیید نشده است، اما از جهت مهمّی اثر او ماندگار است. نگرش او نشانهٔ روشنی به پسرش، سادی می‌داد که از کجا

1. Directory (گروه اجرایی پنج نفری در جمهوری اول فرانسه به نام دیرکتوار) 2. Maximilien de Robespierre
3. Antwerp 4. Charles Gillispie

کار دربارهٔ نظریهٔ ماشینهای حرارتی را آغازکند. به‌نظر می‌رسد که نظرهای لازار در زمینهٔ طرح ماشینهای آبی تأثیر خاصی داشته است. چرخهای آبی و انواع دیگر ماشین‌آلات هیدرولیکی که با سقوط آب به‌کار می‌افتند، هرچه سقوط بیشتر باشد، برونداد کار ماشین بر واحد درونداد آب بیشتر است. این امر اندیشهٔ سادی کارنو را به قیاس بین سقوط آب در ماشینهای آبی با سقوط گرما در ماشینهای حرارتی راهنمایی کرد. او چنین استدلال کرد که یک ماشین حرارتی نمی‌تواند کاری انجام دهد مگر آنکه طرح آن شامل جسمی با دمای بالا و جسمی با دمای پایین باشد تا با افت گرما بین آن دو، سبب به‌کار افتادن اجزای مؤثر ماشین شود.

ماشینهای حرارتی، در آن زمان و اکنون

ماشینهای حرارتی مورد علاقهٔ سادی کارنو، ماشینهای بخاری بودند که برای کارهایی مانند ماشین‌آلات رانندگی، کشتیرانی و حمل‌ونقل از آنها استفاده می‌شد. ماشین بخار که به‌وسیلهٔ مردی اهل کرنوال[1] به‌نام آرتور وولف[2] اختراع شد، در سالهای ۱۸۱۰ و ۱۸۲۰ در فرانسه مورد استقبال خاصی قرار گرفت. نمودار عمل ماشین وولف در شکل ۳ـ۱ نشان داده شده است. گرمای Q_2، با سوختن نوعی سوخت، به دمای زیاد t_2 می‌رسد، و این گرما در دیگ بخار، آب را به بخار آب تبدیل و آن را به فشار زیاد می‌رساند. این بخار دو پیستون را می‌راند و آنها برونداد کار W_1 را تأمین می‌کنند. (در این فصل و فصلهای دیگر این کتاب از جمله فصلهای ۱ و ۲، نماد «t» نمایندهٔ دما است نه زمان.) بخار آب، درحالی‌که دما و فشار آن کاهش یافته است، پیستونها را ترک می‌کند. سپس گرمای Q_1 در یک چگالنده بیرون کشیده می‌شود، در جایی که بخار آب سردتر شده، به دمای باز هم پایینتر t_1 می‌رسد و نهایتاً به‌صورت آب مایع، متراکم می‌شود. سرانجام آب مایع از یک پمپ می‌گذرد، پمپ با صرف کار W_2



شکل ۳ـ۱ نمودار ماشین بخار وولف

1. Cornwall 2. Arthur Woolf

و دمای پایین، فشار زیاد برقرار می‌کند و آب را تحت فشار به دیگ بخار باز می‌گرداند. این چرخه‌ای از عملهایی است که نتیجهٔ خالص آن افت گرما از دمای بالای t_2 به دمای پایین t_1، با برونداد کاری W_1 از پیستونها و درونداد کاری بسیار کمتر W_2 به پمپ است.

ماشین بخار وولف و انواع آن با تکنولوژی وسیع امروزی تکامل یافته است. اکثر نیروگاههای معاصر مشابه همین شیوه عمل می‌کنند. در نیروگاههای امروزی مقیاس آنها بسیار بزرگتر، فشار و دمای بخار بیشتر و وسیلهٔ مؤثر آنها به‌جای پیستون، توربین است. اما مفهوم اُفت گرما بین یک دمای بالا و یک دمای پایین با برونداد کار خالص در این‌جا نیز کاربرد دارد.

چرخهٔ کارنو

سادی کارنو همان رؤیاهای پدرش را داشت. او امیدوار بود، از پیچیدگیهای مفصلِ ماشین‌آلات واقعی، اصول کلّی مختص بهترین کارکردهای ممکن را انتزاع کند. تحلیل لازار بر عمل مکانیکی ایده‌آل متمرکز بود؛ اما هدف سادی برای ایده‌آل مکانیکی و همچنین برای عمل ایده‌آل گرمایی بود.

سادی کارنو، اول از همه، توانست پی ببرد به اینکه وقتی گرما در یک ماشین حرارتی، از دمای بالا به دمای پایین افت می‌کند، می‌تواند کار انجام دهد. مدل ذهنی او براساس قیاسی بین ماشینهای حرارتی و ماشینهای آبی بود. با این قیاس او نتیجه‌گیری کرد که یک ماشین بخار، برای بازدهی ماکزیمم، باید به گونه‌ای طراحی شود که عمل آن با سقوط مستقیم گرما از داغی به سردی نباشد، درست مانند ماشین آبی ایده‌آل که نباید بخشی از جریان آب، بدون آنکه چرخ آبی را بگرداند به‌طور مستقیم بیرون بریزد. این بدان معنی است که در ماشینهای حرارتی کامل، بخشهای داغ و سرد در تماس با هم باید از لحاظ دمایی فقط تفاوت جزئی داشته باشند. تا حدی به زحمت، می‌توان گفت که نیروهای محرک گرمایی (یعنی تفاوتهای دما) در ماشین حرارتی ایده‌آل کارنو می‌باید بسیار کوچک باشند. مشابهت این طرح با اصل لازار کارنو مبتنی بر تداوم در انتقال توان مکانیکی، بیش از یک مشابهت تصادفی است.

بیان اختصاصی‌تر مطلب این است که، کارنو تصور می‌کرد ماشین حرارتی ایده‌آلش یک مادهٔ کارآمد گازی ـ چیزی شبیه به بخار در پیستونهای ماشین بخار وولف ـ را به‌کار می‌گیرد و آن را به تغییرات چرخه‌ای وامی‌دارد. چرخه‌های کارنو شامل چهار مرحله است:

۱. یک انبساط تکدما[1] (ثابت ـ دما) که در آن گاز، گرما را از یک «مخزن» گرمایی جذب می‌کند و آن را در یک دمای t_2 بالا نگه می‌دارد.

۲. یک انبساط بی‌دررو[2] (عایق شده) که دمای گاز را از t_2 به t_1 پایین می‌آورد.

۳. یک تراکم تکدما که در آن گاز گرما را به یک مخزن روانه می‌کند و آن را در یک دمای t_1 پایین نگه می‌دارد.

۴. یک تراکم بی‌دررو که گاز را به دمای زیاد t_2 اولیه باز می‌گرداند.

1. Isothermal 2. Adiabatic

مراحل ۱ و ۳ با جذب گرما در یک دمای بالا و روانه کردن آن به یک دمای پایین، سقوط گرما را به انجام می‌رسانند. کاری که به‌وسیلهٔ گاز در انبساط مرحلهٔ ۱ انجام می‌شود بیشتر از کاری است که در تراکم مرحلهٔ ۳ بر گاز صورت می‌گیرد، و مقادیر کارهایی که بر یا به‌وسیلهٔ گاز در مراحل ۲ و ۴ انجام می‌شوند تقریباً یکدیگر را حذف می‌کنند. بنابراین، در هر نوبت چرخه، گرما از دمای بالا به دمای پایین سقوط می‌کند و برونداد کار خالص حاصل می‌شود.

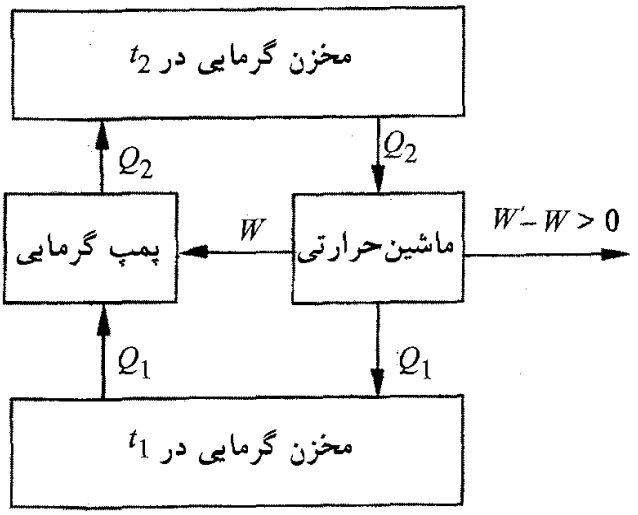
اصل کارنو

به‌طور خلاصه، کارنو ماشین حرارتی ایده‌آلش را همان‌طوری ساخت که لازار ماشین‌آلات ایده‌آل خودش را بنا کرده بود؛ به‌نحوی که همهٔ بخشها و مراحل آن به‌طور مداوم درگامهای بسیارکوچک، تحت نیروهای بسیارکوچک گرمایی و محرک مکانیکی عمل می‌کرد. کارنو دریافت که این موضوع و ضرورت عمل در چرخه‌های بین دو دمای ثابت از ویژگیهای عمدهٔ لازم برای کل عمل ماشین حرارتی ایده‌آل است. ویژگیهای چهار مرحلهٔ چرخهٔ گازی مفید بود، اما ضروری نبود. راههای دیگری می‌توان یافت که گرمایی بین دو مخزن گرمایی ساقط شود و برونداد کاری ایجاد کند.

دیدگاه کارنو تأکید بر آن دارد که نیروهای محرکهٔ یک ماشین حرارتی ایده‌آل باید آن‌قدر کوچک باشند که بتوانند بدون اثر اضافی خارجی معکوس و باعث شوند ماشین در جهت مخالف عمل کند. مسیر رفت در روال عادی، عملش به‌صورت یک ماشین حرارتی است. در ماشین ایده‌آل گرما، فرضاً بین دماهای t_2 و t_1 ساقط می‌شود و برونداد کاری فراهم می‌کند. مسیر بازگشت، با همهٔ نیروهای محرکه‌اش معکوس می‌شود. ماشین ایده‌آل مستلزم درونداد کاری است که گرما را از t_1 به t_2 بالا می‌برد. این یک پمپ گرمایی است، شبیه به یک وسیلهٔ مکانیکی که آب را از سطح پایین به سطح بالا پمپ می‌کند. کارنو به این استنتاج بنیادی رسید که عمل بر ماشین حرارتی ایده‌آل، که با نیروهای بسیار کوچک عمل می‌کند حقیقتاً «برگشت‌پذیر» است و همهٔ مراحل آن، بدون هیچ اثر قابل ملاحظه‌ای از محیط، امکان برگشت دارد. این ماشین حرارتی به پمپ گرمایی و برعکس آن تبدیل می‌شود.

این جنبهٔ بازگشت‌پذیری عمل ماشین حرارتی، ایده‌آل کارنو را به نتیجهٔ اصلی‌اش کشانید. این نتیجه بر مبنای برهانی بود که هر ماشین حرارتی ایده‌آل وقتی بین مخزنهای گرمایی ابقا شده در دماهای t_2 و t_1 عمل می‌کند، می‌باید به‌ازای درونداد گرمای معین Q_2، برونداد کار W یکسانی ایجاد کند. اگر دو ماشین حرارتی ایده‌آل برونداد‌های کار متفاوت W و W' می‌داشتند و برونداد کاری W' بیشتر از W می‌بود، ماشینی که برونداد کاری بیشتر W' را داشت می‌توانست ماشینی با برونداد کار W را به‌کار اندازد، گرمای Q_2 آن را در جهت معکوس پمپ کند و آن را به سطح گرمایی اولیه در مخزن گرمایی‌اش بازگرداند و علاوه بر آن برونداد کاری $W' - W$ را داشته باشد (شکل ۳ـ۲).

اگر این دستگاه مرکب امکان‌پذیر بود، به‌صورت ماشینی با حرکت دائم به‌کار می‌آمد، زیرا بدون نیاز به تجدید ذخیرهٔ گرمایی مخزن گرمایی بالایی، کار ایجاد می‌کند؛ هر واحد گرما که در ماشین گرمایی



شکل ۳ـ۲ تصویری از برونداد کار دائمی ناممکن که به‌وسیلهٔ اتصال دو ماشین حرارتی ایده‌آل با برونداد‌های کاری متفاوت W و W' به‌دست می‌آید.

سقوط می‌کند به‌وسیلهٔ پمپ گرمایی بازگردانده می‌شود. به گفتهٔ دیگر این ماشین گرمایی مرکب، بدون لزوم سوزاندن سوخت می‌تواند به‌طور دائم کار کند. لازار کارنو قویاً بر این اصل موضوعه تکیه داشت که حرکت دائمی از هر نوع از لحاظ فیزیکی غیرممکن است. سادی کارنو نیز بی‌چون و چرا امکان حرکت دائمی را رد می‌کرد و این یکی دیگر از درسهایی بود که سادی از پدرش آموخته بود. بنابراین، نتیجه می‌گرفت که دو ماشین حرارتی ایده‌آل در یک ماشین مرکب می‌باید برونداد کاری یکسانی داشته باشند یعنی $W = W'$.

صریحتر بگوییم، نتیجه‌گیری کلّی کارنو این بود که همهٔ ماشینهای حرارتی ایده‌آل در چرخه‌های بین دو دمای t_1 و t_2 با درونداد گرمایی Q_2 عمل می‌کنند و برونداد کاری W یکسانی دارند. جزئیات طرح تفاوتی نمی‌کند. مادهٔ کارآمد ممکن است بخار، هوا، یا حتی مایع یا جامد باشد؛ بخش مؤثر این چرخه می‌تواند انبساط گاز، مانند چرخهٔ کارنو، یا ممکن است چیز دیگری باشد. برونداد کاری W ماشین حرارتی ایده‌آل دقیقاً فقط با سه چیز معین می‌شود، درونداد گرمایی Q_2 و دماهای t_1 و t_2 دو مخزن که بین آنها ماشین حرارتی عمل می‌کند. این گزاره بیان «اصل کارنو» است. این اصل منبع گریزناپذیر و الهام‌بخش برای همهٔ جانشینان کارنو بود.

تابع کارنو

کارنو برای تحلیل اندیشه‌هایش می‌بایست تا آنجا که می‌تواند با توجه به ماهیت فیزیکی و ریاضی عملکرد ماشین ایده‌آل نتیجه‌گیری کند. در این مورد او به‌نظرش می‌رسید که باید از این ایده‌اش که ماشینهای حرارتی با افت گرما از دمای بالاتر به پایینتر کار انجام دهد، بهره‌برداری بیشتری بکند. اکنون چنین می‌نمود که توانایی گرما برای انجام کار در یک ماشین حرارتی بستگی به تراز گرمایی دارد که با دمای t مشخص می‌شود، درست همان‌طور که توانایی آب برای انجام کار در یک ماشین آبی به تراز گرانشی بستگی دارد.

کارنو بر یک تابع $F(t)$ تأکید می‌ورزید که بازده عمل ماشین حرارتی ایده‌آل در دمای t را بیان می‌کرد. او سه محاسبهٔ قابل ملاحظه با مقادیر عددی از تابع $F(t)$ خود به‌عمل آورد. این محاسبات براساس سه طرح ماشین حرارتی متفاوت بود که در آنها از هوا، آب در حال جوش، و الکل در حال جوش به‌عنوان مواد کارآمد استفاده می‌شد. نظریهٔ کارنو مستلزم آن بود که رفتار ماشین حرارتی ایده‌آل کاملاً مستقل از ماهیت مادهٔ مؤثر و دیگر ویژگیهای طراحی خاص باشد. مقادیر به‌دست آمده برای $F(t)$ در این سه مورد نیز می‌باید فقط وابسته به دمای t باشد. گرچه داده‌های اولیه‌ای که کارنو به آنها دسترسی داشت برای محاسبه از دقت محدودی برخوردار بود، اما نتایجی که او برای $F(t)$ به‌دست می‌آورد، برای نیازش رضایت‌بخش به‌نظر می‌رسید. بدون تردید این موفقیت موجب آن می‌شد که کارنو قانع شود نظریهٔ ماشین حرارتی‌اش از لحاظ بنیادی درست است.

کارنو برای تکمیل نظریه‌اش ناچار بود نه فقط اعداد، بلکه عبارتی ریاضی برای تابع $F(t)$ خود بیابد. او در این تلاش ناموفق ماند؛ او تنها توانست پی ببرد به اینکه $F(t)$ با افزایش دما، کاهش می‌یابد. بسیاری از جانشینان او نیز شیفتهٔ این مسئله شدند. گرچه سرانجام معلوم شد که تابع کارنو چیزی پیچیده‌تر از بیان دوسویه بودن دما بر یک مقیاس مطلق نیست، اما مدت زمانی، بین دو نسل طول کشید تا ترمودینامیکدانانی که تعداد آنها کمتر از هشت تن نبود، به صراحت این نتیجه‌گیری را به اثبات برسانند. پنج تن از آنان (کارنو، کلازیوس، ژول، هلمهلتز و تامسن) چهره‌های عمدهٔ فیزیک قرن نوزدهم بودند.

انتشار اثر و بی‌توجهی به آن

اثر سادی کارنو به‌صورت یک گزارش علمی خصوصی در سال ۱۸۲۴، یک سال پس از مرگ لازار کارنو، منتشر شد و به سرنوشت عجیبی دچار شد. این گزارش را یک ناشر علمی پیشرو منتشر کرد، به‌طوری مطلوب مرور و تجدیدنظر کرد، در یک مجلهٔ مهم دربارهٔ آن مطلبی نوشت و سپس به‌مدت بیست سال تقریباً فراموش شد. به‌استثنای یک مورد مساعد، هیچ‌یک از جمع مهندسان و فیزیکدانان معتبر فرانسوی به گزارش کارنو توجه قابل ملاحظه‌ای نکردند.

دربارهٔ علت این بی‌توجهی، تنها می‌توان به حدس وگمان متوسل شد. شاید مخاطبان عاجل کارنو سبک نوشتن علمی او را نمی‌پسندیده‌اند. کارنو با سبکی نیمه عامه‌پسند می‌نوشت، مانند پدرش، که کار او نیز ابتدا مورد توجه واقع نشد. کارنو به‌ندرت از معادلات ریاضی استفاده می‌کرد، و معمولاً آنها را به زیرنویس صفحات می‌برد، بیشتر محاسبات را با کلام بیان می‌کرد. ظاهراً کارنو، همچون پدرش مطالب خود را برای مهندسان می‌نوشت، اما کتاب او برای مهندسان ماشین بخارکه می‌باید آن را می‌خواندند، بسیار جنبهٔ نظریه‌ای داشت. نخبگان علم هم در جستجوی زبان ریاضی تحلیلی بودند که عموماً در آن زمان برای رساله‌های مکانیک به‌کار می‌رفت. بنابراین، شاید حرفهای این جوان گمنام را که اصرار داشت با استفاده از کلام مطالب علمی خود را فرمولبندی کند، جدّی نمی‌گرفتند. هیچ‌یک از این دو وجه برای کارنو که شخصاً درون‌گرا و بیمناک از هر نوع شهرتی بود، چاره‌ساز نبود. یکی از قواعد اخلاق

و رفتار او این بود که «از آنچه می‌دانی کم سخن بگو، از آنچه هیچ نمی‌دانی هرگز چیزی مگو.» سرانجام کتاب او، همچون پرینسیپیای نیوتون خوانندگانش را از دست داد.

شاید دیری نمی‌پایید که کارنو شاهد قدرشناسی کتابش باشد، اگر در فرانسه نمی‌شد، احتمالاً در جای دیگری که تحقیق نظریه‌ای دربارهٔ گرما و ماشینهای حرارتی فعالتر بود، می‌شد. اما کارنو هرگز فرصت آن را نیافت تا منتظر دریافت جهان علمی باشد. در سال ۱۸۳۱ او مبتلا به تب مخملک شد که به «التهاب مغزی» منجر گردید. او تا حدی بهبود یافت و برای گذراندن دورهٔ نقاهت به بیرون از شهر رفت. اما بعد، در سال ۱۸۳۲ درحالی‌که آثار شیوع بیماری وبا را مطالعه می‌کرد، خودش قربانی وبا شد. این بیماری طی چند ساعت او را کشت. به هنگام مرگ، او سی و شش‌ساله بود. اکثر مقالات و آثار او در آن زمان به‌علت احتیاط مرسوم از سانحهٔ وبا از بین برده شد.

پس از کارنو

مردی که اثر کارنو را از فراموشی حتمی نجات داد امیل کلاپیرون[1]، همکلاسی پیشین او در مدرسهٔ پلی‌تکنیک بود. کلاپیرون در مقاله‌ای که به سال ۱۸۳۴ در *Journal de l'École Polytechnique* منتشر شد، پیام کارنو را به زبان آنالیز ریاضی قابل قبولی ارائه کرد. مهمتر آنکه، کلاپیرون چند شرح کلامی کارنو در مورد چگونگی محاسبهٔ بازده تابع $F(t)$ او را به معادلات دیفرانسیلی برگرداند.

مقالهٔ کلاپیرون به انگلیسی و آلمانی ترجمه شد و به‌مدت ده سال و اندی تنها رابط بین کارنو و پیروان او بود. نظریهٔ کارنو به‌صورتی که کلاپیرون آن را به زبان ریاضی برگردانده بود، در سالهای ۱۸۴۰ و اوایل ۱۸۵۰ نقطهٔ عزیمتی برای دو تن از ترمودینامیکدانان نسل دوم شد. یکی، دانشجوی جوان آلمانی در دانشگاه هاله[2] به‌نام رودولف کلازیوس[3] و دیگری ویلیام تامسن[4] که به‌تازگی از دانشگاه کمبریج فارغ‌التحصیل شده بود (تامسن بعداً لرد کلوین[5] نامیده شد). تامسن در سال ۱۸۴۵ چند ماهی را در آزمایشگاه ویکتور رینیو[6] در پاریس گذراند. او همهٔ کتابفروشیهای پاریس را زیر پا گذاشت تا نسخه‌ای از گزارشات کارنو را بیابد اما توفیقی نیافت. هیچ‌کس کتاب و نویسندهٔ آن را به‌خاطر نداشت.

کلازیوس و تامسن به دو طریق متفاوت اثر کارنو را در علم گرما، که تامسن سرانجام آن را ترمودینامیک نامید، بسط می‌دادند. یکی از معادلات دیفرانسیلی کلاپیرون جزء ثابتی در رویکرد تامسن به ترمودینامیک شد. تامسن راهی یافت تا این معادله را برای تعریف یک مقیاس دمای مطلق به‌کار گیرد. بعداً او مفهوم انرژی را ارائه و با آن یک نقص اساسی در نظریهٔ کارنو را حل کرد و آن اتکای آشکار کارنو به نظریهٔ کالریک بود. میان مقالات کلازیوس توضیح دقیقی از تحلیل ماشین حرارتی کارنو بود، که

1. Émile Clapeyron 2. Halle 3. Rudolf Clausius 4. William Thomson 5. Lord Kelvin
6. Victor Regnault

مشخص می‌کرد گرما نه‌تنها در ماشین حرارتی از دمای بالا به دمای پایین سقوط می‌کند، بلکه بخشی از آن نیز به‌کار تبدیل می‌شود. این انحرافی از قیاس ماشین آبی کارنو بود، و در تحقیق بعدی به مفهوم انتروپی گرایید.

قدرشناسی

بدین ترتیب بود که نظریهٔ سادی کارنو احیا شد و مورد استفاده قرار گرفت، و سرانجام آشکار شد که کارنو را می‌باید همچون پدرش به‌عنوان یک انقلابی بزرگ تجلیل کرد. کارنو در یک انقلاب سیاسی زاده شد و یک انقلاب علمی را آغاز کرد. نظریهٔ او از بن جدید و بدیع بود. هیچ‌یک از اسلاف او از این ایده بهره‌برداری یا حتی اشاره‌ای هم نکرده بودند که سقوط گرما نیروی محرکهٔ عموم ماشینهای حرارتی است.

گرچه معاصران او فاقد بصیرت ارزیابی کار کارنو بودند اما جانشینان متعدد کارنو، دست‌کم برای آیندگان، خسران نادیده گرفتن آن را جبران کردند. اکنون تاریخ‌نویسان علم، کارنو را به‌عنوان یکی از خلاقترین دانشمندان می‌نگرند. ارزیابی دونالد کاردول[1] برای ما این است که در تاریخ ترمودینامیک از وات تا کلازیوس موفقیت شگفت‌انگیز کارنو در به اتمام رساندن هدف بزرگ لازار کارنو یعنی انتزاع اصول کلّی فیزیکی از پیچیدگیهای ماشین‌آلات بود: «شاید یکی از درست‌ترین شاخصهای عظمت کارنو، مهارت بی‌خطا و درست اوست که با آن از وسایل اختراع‌شدهٔ بسیار پیچیده که ماشینهای حرارتی بود. . . اصول و تنها اصول آنها را انتزاع کرد. استدلالش هیچ‌چیز غیرضروری دربر نداشت و هیچ‌چیز اصولی از چشم او دور نماند. درواقع بسیار مشکل است تصور کنیم که در تاریخ علم از آموزهٔ گالیله به بعد موضوعی کارآمدتر از انتزاع. . . اساس روش [علمی] باشد.»

مدارک مختصری از زندگی و شخصیت کارنو باقی مانده است. ما، در دو تصویر منتشرشدهٔ او، چهره‌ای حساس و هوشمند می‌بینیم با چشمانی بزرگ، استوار و اندکی خیره و افسرده. بیشترین شرح حال کارنو حاصل مقالهٔ کوتاهی است که هیپولیت[2]، برادر سادی نوشته است. (لازار کارنو مایل به نامهای عجیبی برای پسرانش بود.) هیپولیت از استقلال رأی و شجاعت کارنو، حتی در دوران کودکی‌اش، حکایتی می‌گوید. پدر در ملاقاتهایی که با ناپلئون در اقامتگاه او داشت، سادی را که هنوز کودکی بیش نبود، به‌همراه خود می‌برد. وقتی لازار کارنو و بناپارت به کار خود می‌پرداختند، مادام بناپارت از سادی مراقبت می‌کرد. در یک مورد که مادام بناپارت و چند بانوی دیگر در برکه‌ای سرگرم قایق‌رانی بودند، بناپارت به کنار برکه آمد و با سنگ انداختن به نزدیکی قایق به آنان آب می‌پاشید. سادی که در آن زمان چهارساله بود با تماشای این منظره با حالتی برآشفته و متغیر با بناپارت روبه‌رو شد و او را «کنسول اول وحشی» نامید و اصرار کرد که از این کار دست بردارد. بناپارت با تعجب به این مهاجم فسقلی خیره شد و سپس با قهقهه خندید.

1. Donald Cardwell 2. Hippolyte

کودکی که ناپلئون را به مبارزه می‌طلبید، بعدها به هنگامی که موفقیتهای ارتش فرانسه در حال افول بود، وارد مدرسهٔ پلی‌تکنیک فرانسه شد. دو سال بعد ناپلئون در حال عقب‌نشینی کامل بود و فرانسه مورد تهاجم قرار گرفت. هیپولیت می‌گوید که سادی نتوانست بی‌کار و عاطل بماند. او از ناپلئون درخواست اجازهٔ تشکیل یک بریگاد جنگی برای دفاع از پاریس کرد. شاگردان شجاعانه در وانسن[1] جنگیدند، اما پاریس به‌دست ارتش متفقین افتاد و ناپلئون مجبور به کناره‌گیری شد. هیپولیت در مورد دیگری از شجاعت برادرش می‌نویسد، روزی سادی در پاریس قدم می‌زد، ناگهان سواره‌نظام مستی را دید که چهار نعل در خیابان می‌تازید، «شمشیرش را در دست می‌چرخاند و به عابرانی که از کنار او می‌گذشتند می‌کوبید.» سادی پیش می‌رود و با ترفندی از میان اسب و شمشیر جاخالی می‌دهد، سرباز را به چنگ می‌آورد و او را به جوی کنار خیابان می‌اندازد. سپس سادی «به راه خود ادامه می‌دهد تا از میان جمعیتی که برای عمل شجاعانهٔ او شگفت‌زده ابراز احساسات می‌کردند، بگریزد.»

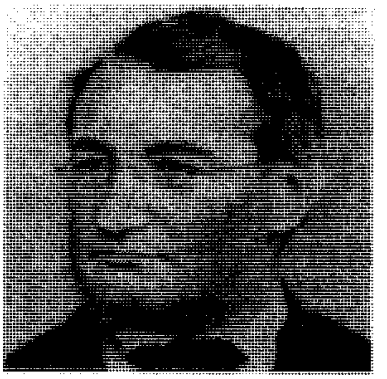
سادی در زمانی می‌زیست که فعالیت علمی در حال پیشرفت و عمدهٔ این فعالیت در پاریس متمرکز بود. فهرست فیزیکدانان، ریاضیدانان، شیمیدانان مشهور و مهندسانی که در پاریس، در خلال عمر کوتاه کارنو فعالیت داشتند عبارتند از: پی‌یر-سیمون لاپلاس[2]، آندره-ماری آمپر[3]، اگوستین فرنل[4]، سیمون-دنیس پواسون[5]، آدرین-مارین لژاندر[6]، پی‌یر دولن[7]، الکسیس پتی[8]، اوریست گالوا[9] و گاسپار دِکوریولیس[10]. بسیاری از این نامها در فهرست اسامی هیئت علمی و شاگردان در مدرسهٔ پُلی‌تکنیک، جایی که کارنو دورهٔ آموزشی خود را می‌گذراند، دیده می‌شود. بجز عنوان شاگرد، کارنو هرگز جزئی از این گروه ممتاز نبود. او همچون بعضی از نوابغ غیرقابل مقایسهٔ دیگر در تاریخ علم (به‌ویژه، گیبس[11]، ژول[12] و مایر[13] در داستان ما) کار مهم خود را به‌صورت یک بیگانهٔ علمی انجام می‌داد. اما تردیدی نیست که نام کارنو متعلق به هر فهرستی از فیزیکدانان بزرگ فرانسه است و شاید هم بزرگترین همهٔ آنها بوده است.

1. Vincennes 2. Pierre-Simon Laplace 3. André-Marie Ampère 4. Augustin Fresnel
5. Siméon-Denis Poisson 6. Adrien-Marie Legendre 7. Pierre Dulong 8. Alexis Petit
9. Evariste Galois 10. Gaspard de Coriolis 11. Gibbs 12. Joule 13. Mayer

۴

دربارهٔ موضوعی ناشناخته

رابرت مایر



چیزی پایستار است

برای دانشجوی امروزی، واژهٔ انرژی معنایی دارد که تقریباً بدیهی است. اما برای دانشمندان اوایل قرن نوزدهم معنای روشنی نداشت. آثار بسیاری را که سرانجام با مفهوم انرژی متحد می‌شد غالباً به‌صورت پدیده‌های متفاوت می‌دانستند. گمان می‌شد که آثار مکانیکی، گرمایی، شیمیایی، الکتریکی و مغناطیسی چیزی مشترک داشته باشند، اما ارتباط میان آنها ناکامل، مبهم و آشفته بود.

آنچه در سالهای ۱۸۲۰ و ۱۸۳۰ آشکار شد، این بود که آثار متفاوت به‌طور چشمگیری به‌هم قابل تبدیل‌اند. پیل الکتریکی آلس‌ساندرو ولتا[1] که در سال ۱۸۰۰ اختراع شده بود از آثار شیمیایی، آثار الکتریکی ایجاد می‌کرد. در سال ۱۸۲۰، هانس کریستیان اورستد[2] مشاهده کرد که از آثار الکتریکی، آثار مغناطیسی تولید می‌شود. مغناطیس، حرکت (آثار مکانیکی) ایجاد می‌کند و از مدتها معلوم شده بود که حرکت می‌تواند از طریق اصطکاک، آثار الکتریکی ایجاد کند. این توالی زنجیره‌ای از «تبدیلها» است:

اثر الکتریکی → اثر مکانیکی → اثر مغناطیسی → اثر الکتریکی → اثر شیمیایی

در سال ۱۸۲۲ توماس سی‌بک[3] نشان داد که وقتی به یک اتصال دوفلزی گرما دهیم، اثر الکتریکی ایجاد می‌شود، و دوازده سال بعد ژان پلتیه[4] تبدیل معکوس را گزارش کرد، یعنی تولید سرما با اثر الکتریکی. ماشینهای حرارتی به‌عنوان وسایل تبدیل عمل می‌کنند، اثر گرمایی (گرما) را به یک اثر مکانیکی (کار) تبدیل می‌کنند.

---

1. Alessandro Volta (ایتالیایی) 2. Hans Christian Oersted (دانمارکی) 3. Thomas Seebeck
4. Jean Peltier (فرانسوی)

بیشترین نظریه‌های عمدهٔ علم را یک تن یا حداکثر چند تن از دانشمندان کشف کرده‌اند. پژوهش برای وحدتهای نظریه‌ای گسترده، کار فردی دشواری است، و اکتشافات مهم علمی معمولاً به‌حدی دقیق و موشکافانه است که مستلزم نوعی نبوغ خاص برای شناخت و توسعهٔ آنها است. اما به گفتهٔ توماس کوهن[1]، دست‌کم یک استثنای برجسته برای این قاعده وجود دارد. مطالعات نظریه‌ای مُلهم از اکتشافات فرایندهای تبدیل، که سرانجام ما را به مفهوم انرژی رسانید، بسیار دور از یک تلاش فردی است. کوهن دوازده دانشمند را که در مراحل اوّلیهٔ این «اکتشاف همزمان» شرکت فعالی داشته‌اند نام می‌برد.

ایده‌ای که ـ نه کاملاً همزمان ـ بلکه به‌طور مستقل در ذهن هر دوازده نفر راه یافت، این بود که تبدیل به‌نحوی با پایستگی [بقا] ارتباط دارد. هرگاه یک اثر به اثر دیگری تبدیل می‌شد، اندازه‌ای از نخستین اثر، از لحاظ کمّی، با همان اندازه از اثر دوم جابه‌جا می‌شد. این اندازه قابل اندازه‌گیری برای همه نوع آثار تبدیل‌پذیر گوناگون، پایسته بود: یعنی در سراسر یک فرایند تبدیل، اندازهٔ اثر خواه برای ارزیابی یک اثر، اثر دیگر یا هر دو آنها، دقیقاً ثابت بود.

دوازده کاشف همزمان، نخستین کسانی نبودند که به اهمیت استفاده از یک اصل پایستاری پی برده باشند. اصول پایستاری، به یک شکل یا شکل دیگر، تقریباً به‌طور شهودی به‌نظر می‌رسد که سالهای بسیاری برای دانشمندان عمومیت داشته است. نظریه‌پردازان، در میان مؤثرترین اقدامات کشفیاتشان کمّیتهایی را پذیرفته‌اند که بودشدنی و نابودشدنی نبوده است. طرفداران نظریهٔ کالریک، پایستاری [بقای] گرما را به عنوان یک اصل موضوعه، پذیرفته بودند. در اواخر قرن هجدهم، آنتوان ـ لوران لاوازیه و دیگران ثابت کردند که جرم در واکنشهای شیمیایی پایستار است؛ هرگاه یک واکنش شیمیایی در محفظهٔ مسدودی انجام پذیرد، در جرم کلّی تغییری حاصل نمی‌شود.

بنابراین، برای نظریه‌پردازانی که فرایندهای پایستگی را مطالعه می‌کردند، طبیعی بود تا تلاش کنند نظریه‌های خود را بر مبنای یک قانون پایستگی بسازند. اما، همواره در فرمولبندی یک اصل پایستگی، ابتدا می‌باید به یک پرسش مشکل پاسخ داده می‌شد که این کمیّت پایسته چیست؟ چنانکه بعداً معلوم شد، پاسخ مفیدی برای این پرسش، بدون شناختی از خود قانون پایستگی عملاً غیرممکن است، زیرا آشکارترین خاصیت کمیّت پایستار که نهایتاً هویت آن به‌عنوان انرژی مشخص شد، آن چیزی بود که می‌باید پایستار باشد. اما هیچ اندازه‌گیری مستقیمی مانند اندازه‌گیری جرم در دسترس نبود که بتواند صحت خاصیت پایستگی را تأیید کند. این امر مستلزم پژوهش برای یافتن چیزی بود که کاملاً تعریف شده نبود، تا آنکه واقعاً یافت شد.

سفر اکتشافی با کشتی

یکی از نخستین کسانی که در این گرهٔ کور عقلانی نفوذ کرد، رابرت مایر، پزشک و فیزیکدان آلمانی بود که بیشتر زندگی‌اش را در هیلبرون[2] آلمان گذراند. مایر معاصر جیمز جول (فصل ۵)، و مانند جول در

1. Thomas Kuhn 2. Heilbronn

زمینه‌های علمی که توجه او را بیشتر جلب می‌کرد، غیرحرفه‌ای بود. تحصیل دانشگاهی او در زمینهٔ پزشکی بود، و آنچه از گزارشهای دورهٔ دانشجویی وی در دانشگاه تیوبینگن[1] برمی‌آید نشانهٔ اندکی از نبوغ عقلانی را می‌نمایاند. او بیلیاردباز و ورق‌باز ماهری بود، با انجمن دانشجویی صمیمیت و با مقامات دانشگاهی سر عناد و بیزاری داشت؛ تا حدی که به‌مدت یک سال از تحصیل محروم شد. با بازنگری می‌توانیم پی ببریم که واکنش مایر به این محرومیت ـ شش روز اعتصاب غذا ـ شاهدی برای لجاجت و حساسیت به انتقاد و حتی نوعی هشدار مشکلات ذهنی بعدی او بوده است.

اما، رفتار مایر جوان یک شورش تمام عیار نبود؛ وقتی مقامات تیوبینگن اجازهٔ بازگشت دادند، او پایان‌نامهٔ خود را به اتمام رساند و امتحان دکتری‌اش را گذراند. اما او هنوز بسیار ناراحت بود که طرح زندگی آینده‌اش را طبق انتظارات مرسوم (و خانوادگی) ادامه دهد. او به‌جای اقامت و پرداختن به کار پزشکی عادی، تصمیم گرفت به‌عنوان یک جراح در یک کشتی هلندی که روانهٔ هند شرقی بود، سفر کند. او در این سفر، هم از لحاظ مجالست با همکارانش و هم از لحاظ کیفیت و کمیت مواد غذایی کشتی، ایده‌های جدید اندکی یافت. اما این سفر، روی هم رفته، برای رفع عطش اشتیاق و خستگی و دلتنگی او ارزشمند بود.

مایر داستان غریبی از تصور علمی برای ما نقل می‌کند، دربارهٔ رویدادی در جاوه که او را در مسیری عقلانی قرار می‌دهد، مسیری که بقیهٔ عمرش آن را دنبال می‌کند. او در سال ۱۸۴۰ به هنگامی که در چند مورد از دریانوردان بندری در شرق جاوه خون می‌گیرد، ملاحظه می‌کند که خون سیاهرگ آنان به‌طور شگفت‌انگیزی رنگ قرمز روشن دارد. مایر حدس می‌زند که این رنگ قرمز غیرعادی خون در نواحی استوایی حاکی از آهنگ آهسته‌تر اکسایش سوخت‌وساز بدن است. او متقاعد می‌شود که اکسایش مواد غذایی، گرمای درونی تولید می‌کند و دمای بدن را ثابت نگه می‌دارد. مایر استدلال می‌کند که در اقلیم گرم، آهنگ اکسایش کاهش می‌یابد.

برای کسانی از ما که متمایل به دید تخیلی و افسانه‌ای هستند و می‌پندارند که نظریه‌پردازان بیشترین پیشرفتهایشان را با جهشهای شهودی به‌دست می‌آورند، این داستان و پی‌آمدهای آن مسحورکننده و جذاب است. ارتباط مفروض مایر بین رنگ خون و آهنگ اکسایش سوخت‌وساز بدن ساده‌انگاری بیش از اندازه و تاحدی نادرست بود. اما هستهٔ این نظریه، شور و شوق و انگیزشی عقلانی برای مایر فراهم آورد که پیش از آن هرگز تجربه نکرده بود. مدتی طول نکشید تا مایر پی ببرد به اینکه کشف او چیزی بیشتر از یک واقعیت جدید پزشکی نیست: این واقعیت که اکسایش سوخت‌وساز (metabolic) یک فرایند تبدیل فیزیولوژیکی است که در آن از مواد غذایی گرما تولید می‌شود، یک اثر شیمیایی است که اثر گرمایی ایجاد می‌کند. مایر معتقد شده بود که اثر شیمیایی و اثر گرمایی به‌نحوی با هم ارتباط دارند؛ با استفادهٔ از اصطلاحات آن زمان او پذیرفته بود که نظریه‌اش را بدین‌گونه بیان کند که واکنش شیمیایی «نیرویی» است که صورت آن تغییر می‌کند، اما قدر مطلق آن در فرایندهای سوخت‌وساز تغییر نمی‌کند. و مهمتر آنکه از نظر مایر، تعبیر اکسایش سوخت‌وساز، تنها نمونه‌ای از یک اصل کلّی است.

1. Tübingen

پایستاری نیرو (انرژی)

مایر در سال ۱۸۴۱ که تازه به هیلبرون بازگشته بود، نوشتن مقاله‌ای را آغاز کرد. در این مقاله خلاصهٔ دیدگاه او با واضحترین لحن بیان شده است؛ او نوشت که «همهٔ اجسام در معرض تغییرند. . . که این تغییر بدون علت رخ نمی‌دهد. . . علتی که ما آن را نیرو می‌نامیم، و ما می‌توانیم همهٔ پدیده‌ها را ناشی از یک نیروی اصلی بدانیم» و اینکه «این نیروها مانند ماده ثابتند.» مایر می‌گوید قصد وی این است که فیزیک را به‌صورت علمی در ارتباط با «ماهیت وجود نیرو» بنویسد. برنامهٔ این فیزیک به‌موازات برنامهٔ شیمی است. شیمیدانان با خواص ماده سروکار دارند و متکی بر این اصل‌اند که جرم پایستار است. فیزیکدانان باید به‌طور مشابهی نیروها را مطالعه کنند و اصل پایستگی نیرو را بپذیرند. هم شیمی و هم فیزیک بر این اساس استوارند که «کمیت ذواتشان تغییرناپذیر است و تنها کیفیت این ذوات تغییرپذیر است.»

واژهٔ نیرو را که مایر به‌کار می‌برد مستلزم اندکی توضیح است. برای فیزیکدانان قرن نوزدهم، مفهوم نیرو معمولاً معنی دوگانه‌ای داشت. گاهی آنان نیرو را به‌معنی نیوتونی آن به‌کار می‌بردند که دلالت به هُل دادن و کشیدن داشت. اما غالباً نیرو همان‌طور که ضمنی فهمیده می‌شد، مترادف با واژهٔ انرژی امروزی بود. تعریف امروزی واژهٔ «انرژی» ـ ظرفیت انجام کار ـ تا سالهای ۱۸۵۰ که ویلیام تامسن آن را معرفی کرد، مطرح نشده بود. در نقل‌قولهای فوق، و در اغلب نوشته‌های مایر می‌باید کاربرد دوم را در نظر داشته باشیم و «نیرو» را «انرژی» بخوانیم. با این تغییر ساده اما مهم، نظر مایر تأکیدی بر اصل پایستگی انرژی می‌شود.

پذیرفته نشدن

مایر مقالهٔ سال ۱۸۴۱ خود را تسلیم سالنامهٔ فیزیک و شیمی یوهان پوگندورف[1] کرد. مقالهٔ او برای انتشار پذیرفته نشد، یا حتی با نوعی سپاسگزاری بازگردانده نشد. اما بنا به گفتهٔ یکی از زندگینامه‌نویسان مایر به‌نام بروس لیندزی[2]، این رفتار نسنجیده توفیقی اجباری بود. استدلالهای تفصیلی مایر در این مقاله «برمبنای سوءِ تفاهم عمیق از مکانیک» بود. گرچه این رد شدن ضربه‌ای به غرور مایر بود، اما امر خیری بود برای اعتبار وجههٔ بعدی او که مقاله به‌نظر عامه نرسد.

اگر مایر غرورِ فوق‌العاده‌ای داشت، لجاجت بیشتری به‌خرج می‌داد. اما او به کمک دوستش کارل بور[3] (که بعداً استاد ریاضیات در اشتوتگارت شد) مقاله را اصلاح کرد، آن را در چند جهت بسط داد و سرانجام در سال ۱۸۴۲ شاهد انتشار آن در سالنامهٔ شیمی و داروسازیِ یوستوس فن لیبیگ[4] شد. مهمترین بخش اضافی مایر به مقاله‌اش، محاسبهٔ اثر مکانیکی بود، یعنی کار انجام‌شده در انبساط گاز که با اثر گرمایی، یعنی گرم کردن گاز، تولید می‌شود. این یک ارزیابی از «معادل مکانیکی گرما» بود، مسئله‌ای که جول تقریباً در همان زمان مستقلاً به آن می‌پرداخت. اینکه آیا مایر نخست محاسباتش را

1. Johann Poggendorff (فیزیکدان آلمانی) 2. R. Bruce Lindsay 3. Carl Baur
4. Justus von Liebig

انجام داد یا جول، مجادلهٔ مشهوری شد. یک چیز که حق تقدم مایر را تضعیف کرد این بود که او در مقالهٔ ۱۸۴۲ خود، همهٔ جزئیات محاسباتش را حذف کرده و فقط به نتیجهٔ آن پرداخته بود. مایر در سال ۱۸۴۵، در مقاله‌ای گسترده‌تر، روش کار خود را آشکار کرد. در همان سال، جول اندازه‌گیریهای آزمایشی شورانگیز معادل مکانیکی گرما را گزارش کرد.

مایر در مقالهٔ سال ۱۸۴۲ خود نهایتاً محاسبات مشهورش را براساس این واقعیت آزمایشی استوار کرد که برای صعود دمای یک گاز در فشار ثابت، گرمای بیشتری لازم است تا در حجم ثابت. او از این تفاوت بین فشار ثابت و حجم ثابت به این نتیجه رسید که مقداری گرما به مقدار معادلی از کار تبدیل می‌شود، کاری که به‌وسیلهٔ گاز به هنگام انبساط، به‌منظور ثابت ماندن فشار، انجام می‌شود. او همچنین توانست مقدار این کار و نسبت کار-به-گرما را محاسبه کند، این نسبت برآوردی عددی از معادل مکانیکی گرما بود. محاسبات او نشان می‌داد که تبدیل یک کیلوکالری گرما به کار می‌تواند یک کیلوگرم را ۳۶۶ متر بالا ببرد. به گفتهٔ دیگر معادل مکانیکی گرما را که مایر یافته بود، ۳۶۶ کیلوگرم-متر بر کیلوکالری بود.

این همان کمیّتی است که جول اندازه‌گیری کرده بود، یا می‌خواست اندازه‌گیری کند. اندازه‌گیری این کمیّت در یک سلسله آزمایشهای به‌یاد ماندنی در سال ۱۸۴۳ آغاز شد. بهترین نتیجه‌ای که جول به‌دست آورد (و بعدها با نماد J معمول شد) به‌صورت زیر بود

$$J = ۴۲۵ \quad \text{کیلوگرم-متر بر کیلوکالری}$$

محاسبات مایر اصولاً به‌علت خطاهای اندازه‌گیریهای گرما نادرست بود. اندازه‌گیریهای دقیقتر که به‌وسیلهٔ ویکتور رینیو[1] در سالهای ۱۸۵۰ به‌عمل آمد نتیجهٔ محاسبه را به نتیجهٔ جول بسیار نزدیکتر کرد،

$$J = ۴۲۶ \quad \text{کیلوگرم-متر بر کیلوکالری}$$

مایر در مقالهٔ سال ۱۸۴۵ خود، علاوه بر روشن کردن تعیین معادل مکانیکی گرما، تحقیقات خود را دربارهٔ پایستگی انرژی یا نیرو (با اصطلاحی که او به‌کار می‌برد) گسترش داد. دو نقل‌قول از وی نشان می‌دهد که مایر چگونه با مفهوم پایستگی درگیر شده بود: «آنچه شیمی نسبت به ماده اجرا می‌کند، فیزیک باید در مورد نیرو اجرا کند. تنها رسالت فیزیک این است که با نیرو در صور گوناگون آشنا شود و شرایط حاکم بر تغییر آن را تحقیق کند. خلق و نابودی نیرو، اگر معنایی داشته باشد، خارج از حوزهٔ اندیشه و عمل انسان است» و «درواقع تنها یک نیرو وجود دارد. در تبادل بی‌پایان، این چرخه‌ها از همهٔ طبیعت بی‌جان و جاندار می‌گذرند. در اوّلی همچنان‌که در دومی، هیچ‌چیز بدون تغییر صورت نیرو، روی نمی‌دهد!»

مایر مقالهٔ سال ۱۸۴۵ خود را برای انتشار به سالنامهٔ لیبیگ تسلیم کرد. کمک ویراستار سالنامه، ظاهراً پس از یک مطالعهٔ سرسری، مقاله را رد کرد و به مایر توصیه کرد که آن را به سالنامهٔ پوگندورف

1. Victor Regnault

بدهد. اما مایر مایل نبود که بار دیگر آن مسیر انتشار را دنبال کند. سرانجام، او مقاله را به‌طور خصوصی منتشر کرد و امیدوار بود که بتواند با توزیع وسیع، آن را بشناساند. اما بجز در معدودی از مجلات که مقاله‌ها را به‌اختصار فهرست می‌کردند، مقاله‌ای که شاهکار مایر بود، مورد توجه قرار نگرفت.

در لبهٔ تاریکی و بازگشت

گرچه در آن زمان، مایر در نبرد علیه یأس و نومیدی روحیهٔ خود را باخته بود، اما هنوز استقامت او پابرجا بود. او در سال ۱۸۴۶ مقالهٔ دیگری نوشت (این مقاله دربارهٔ مکانیک سماوی، شروع کاری بود که بعدها ویلیام تامسن آن را به انجام رساند.) و بار دیگر مجبور بود شخصاً انتشار آن را بپذیرد.

در این موقع، مشکلات حرفه‌ای مایر با دشواریهای خانوادگی و سلامتی او در هم آمیخته بود. طی سالهای ۱۸۴۶ تا ۱۸۴۸، سه فرزندش فوت شدند، و زندگی زناشویی او رو به وخامت نهاد. سرانجام، او در سال ۱۸۵۰ تقریباً دچار ازکارافتادگی کشنده‌ای شد. حملهٔ بیماری بی‌خوابی او را به مرحلهٔ خودکشی رسانید، اما تلاش او ناموفق ماند. در این حال مایر می‌باید از اعماق ناامیدیش شاهد شکست دیگری باشد.

مایر در تلاش برای بهبودیش داوطلبانه به یک آسایشگاه رفت. با معالجات آنجا حالش بدتر شد و سرانجام کارش به تیمارستان کشید، جایی که طرز رفتار با او بسیار بی‌اعتنا وگاه وحشیانه بود. تشخیص پزشکی حالت روانی و بدنی او چنان تیره و تار شد که مقامات پزشکی ناامید شدند و او در سال ۱۸۵۳ از آنجا ترخیص شد.

شاید بزرگترین موفقیت او این بود که زنده ماند و حتی تا حدی از این رویداد وحشتناک رهایی یافت. او پس از ترخیص، به هیلبرون بازگشت، به‌طریق محدودی به مداوای خود ادامه داد و در حدود ده سال، عمداً همهٔ فعالیتهای علمی‌اش را کنار گذاشت. طی مراحلی کند، گاهی ضمن عودت بیماری، بازگشت سلامتی او آغاز شد. به‌نظر می‌رسد که مایر با یک ارادهٔ محکم توانست سلامتی نسبتاً عادی خود را بازیابد، اگر هیچ کار دیگری نمی‌کرد، ثابت می‌شد که حالت ذهنی او به طرز ناامید کننده‌ای نامتوازن بوده است. ترک کلّی علاقهٔ علمی او به‌مدت ده سال، که دل‌مشغولی او شده بود، سندی آشکار از سلامتی شعور و قوهٔ تمیز او بود.

سالهای ۱۸۵۰، دورانی که مایر کناره‌گیری اجباری خود را می‌گذراند، زمان فعالیت بزرگ در توسعهٔ ترمودینامیک بود. انرژی به‌عنوان یک مفهوم، تثبیت شده بود، و اصل پایستگی انرژی را بیشترین نظریه‌پردازان پذیرفته بودند. عمدهٔ این کار به‌وسیلهٔ جیمز جول در انگلیس، رودولف کلازیوس در آلمان، ویلیام تامسن و مککورن رانکین[1] در اسکاتلند انجام شده بود، با اندکی قدرشناسی از تلاشهای مایر. طی این زمان نه‌تنها نظریهٔ مایر نادیده گرفته شده بود، بلکه در سال ۱۸۵۸ گزارشی از لیبیگ به‌دست او رسید که مایر در تیمارستان فوت شده است. اعتراضات مایر مانع آن نشد که به وقوع مرگ رسمی او در فرهنگنامهٔ دستی (*Hand wörterbuch*) پوگندورف توجهی شود.

1. Macquorn Rankine

موفقیت عجیب

صحنهٔ نهایی در این زندگی مملو از طعنه‌های روزگار، طعنه‌ای نهایی به‌نظر می‌رسد. قدرشناسی از دستاوردهای مایر سرانجام صورت گرفت، اما اصلاً به‌طریق شایسته از مردی نبود که آن همه بی‌تفاوتی، طرد شدن، شکست، معالجهٔ پزشکی بی‌رحمانه و گزارشهایی از مرگ خودش را متحمل شده بود. در اوایل سالهای ۱۸۶۰ که مایر با آرامش سرگرم ادارهٔ تاکستانهایش بود، ناگهان در کانون مجادلهٔ علمی مشهوری قرار گرفت.

همه‌چیز از زمانی آغاز شد که جان تندال[1]، مدرّس محبوب، استاد، و همکار مایکل فارادی در مؤسسهٔ سلطنتی لندن، خود را برای یک رشته درسهایی دربارهٔ گرما آماده می‌کرد. او برای کسب اطلاعات نامه‌ای به هرمان هلمهلتز و رودولف کلازیوس در آلمان نوشت. پاسخ کلازیوس شامل نقدی بود مبنی بر اینکه نوشته‌های مایر اهمیت چندانی ندارد. ضمناً کلازیوس قول داده بود که نسخه‌هایی از مقالات مایر را برای تندال ارسال کند. اما پیش از آنکه مقالات را پست کند آنها را، ظاهراً برای نخستین‌بار با دقت خواند. او نامهٔ دومی را با ارزیابی کاملاً متفاوت نوشت: «من باید اظهارات آخرین نامه‌ام را در مورد اینکه شما در نوشته‌های مایر چیز مهمی نخواهید یافت، تکذیب کنم؛ من از کثرت اندیشه‌های درست و زیبایی که در این مقالات هست، شگفت‌زده شده‌ام.» کلازیوس اکنون قانع شده بود که مایر یکی از نخستین کسانی بوده که به مفهوم انرژی و نظریهٔ پایستگی آن دست یافته است. هلمهلتز نیز تقریظهای مطلوب و موافقی دربارهٔ مایر ارسال کرد که در آن اشارهٔ خاصی به ارزیابی اولیهٔ معادل مکانیکی گرمایی او داشت.

تندال مردی بود که مجادله را دوست می‌داشت و از بی‌عدالتی متنفر بود. چون افکارش به خصلت دومش مربوط می‌شد، غالباً با کسان دیگری که همتراز او، در کار مجادلهٔ عمومی مهارت داشتند سهیم نبود. او بیشتر درگیر مباحثاتی می‌شد که سرزنده و پرتحرک باشند، و البته همیشه هم دوستانه نبود. هنگامی که تندال مصمم شد مدافع مایر باشد، او به آنچه ممکن بود بیشترین نقش را در مجادلاتش داشته باشد، مبادرت می‌ورزید. تندال به‌طور معمول محل تبادل نظر را مؤسسهٔ سلطنتی انتخاب کرد که در آنجا سخنرانیهای عمومی ایراد می‌شد. او عجولانه تصمیم گرفت که موضوع بحث خود را از گرما به موضوع کلّی انرژی که در آن وقت، در سالهای ۱۸۶۰ غالباً فهمیده شده بود، گسترش دهد. عنوان سخنرانی او «دربارهٔ نیرو» بود. (فارادی و همکارانش در مؤسسهٔ سلطنتی هنوز استفاده از اصطلاح «نیرو» را ترجیح می‌دادند، درحالی‌که منظور آنان «انرژی» بود.)

تندال سخنش را با فهرست کردن مثالهای بسیاری از تبدیل انرژی و پایستگی انرژی آغاز کرد، و سپس نقش مایر را رسماً با این بیان خلاصه کرد که: «همهٔ آنچه را برای شما ارائه کردم حاصل زحمات یک فیزیکدان آلمانی به‌نام مایر است.» او گفت، مایر را می‌باید به‌عنوان یکی از نخستین ترمودینامیکدانان شناخت. «مردی نابغه به مهمترین نتایجی می‌رسد که گاهی از کسانی که همهٔ عمر خود را وقف فلسفهٔ طبیعی کرده‌اند پیشی می‌گیرد.» تندال هیچ تردیدی نمی‌کند که مایر بر جول حق

1. John Tyndall

تقدم دارد: «آقای جول در سال ۱۸۴۳ نخستین مقاله‌اش را با عنوان «دربارهٔ ارزش مکانیکی گرما» منتشر کرد، اما مایر در سال ۱۸۴۲ معادل مکانیکی گرما را واقعاً محاسبه کرد.» در دنیای بزرگ‌منشانهٔ قرن نوزدهم این خطابهٔ علمی به منزلهٔ دعوتی برای نزاعی کلامی بود. این امر موجب پاسخهای سریعی از طرف جول، تامسن، و پیتر گاتری تیت[1]، دوست نزدیک تامسن، استاد فلسفهٔ طبیعی در دانشگاه اِدینبورو[2]، و همچنین هماوردی تندال در فن مشاجرهٔ قلمی شد.

ابتدا جول در مقاله‌ای که در مجلهٔ فلسفی منتشر شد پاسخ داد. او می‌گفت من نمی‌توانم بپذیرم که «نظریهٔ دینامیکی گرما» (یعنی، نظریه‌ای که گرما، در میان چیزهای دیگر، اساس ارتباط گرما-کار است) به‌وسیلهٔ مایر، یا هر یک از مؤلفان دیگری که دربارهٔ معنی فرایندهای تبدیل تعمق کرده‌اند، بنیان‌گذاری شده باشد. او نوشت نتیجه‌گیریهای موثق «مستلزم آزمایش است و بنابراین، من بدون واهمه از حقی که برای حفظ موقعیت خودم دارم دفاع می‌کنم، حقی که عموماً یاران فیزیکدانم به من اعطا کرده و مرا به‌عنوان نخستین کسی می‌دانند که درست بودن این نظریه را با محک آزمایش، قطعاً به اثبات رسانده است.»

تندال با ارسال مقالهٔ دیگری به مجلهٔ فلسفی، ضمن پاسخ به جول، تأکید کرد که نمی‌خواهد به دست‌آوردهای جول بی‌اعتنایی و بی‌احترامی کند: «اطمینان دارم که در اظهارات من چیزی نخواهید یافت که از طرف من میلی به تردید حق خدمت شما، استاد بزرگواری که با آزمایش معادل گرما و کار را ثابت کرده‌اید، داشته باشم.» تندال درصدد برآمد تا مطلب بیشتر را به خود مایر واگذار کند. بنا به پیشنهاد تندال، مقالات مایر دربارهٔ موضوع انرژی ترجمه و در مجلهٔ فلسفی منتشر شد.

اما این سبب فروکش کردن نزاع نشد. بار دیگر مقاله‌ای که نویسندگان آن تامسن و تیت بودند (گرچه سبک نگارش آن به‌نظر می‌رسید از آنِ تیت باشد) در مجلهٔ عامه‌پسندی به‌نام گود وردز [*Good Words*] منتشر شد که چارلز دیکنس بعداً آن را ویرایش کرده بود. در این مقاله، مقالهٔ سال ۱۸۴۲ مایر عمدتاً به‌صورت نقلی از کار پیشین او با چند پیشنهاد برای آزمایش خلاصه شده بود؛ از جمله «روشی برای یافتن معادل مکانیکی گرما مطرح شده بود.» نویسندگان مقاله اعلام کردند که این مطلب موفقیتی جزئی است و آنان دلیلی نمی‌یابند که از حقوق بریتانیایی صرف‌نظر کنند:

> به‌استناد انتشار این مقاله کوششی به‌عمل آمده است تا مدعی اعتباری برای مایر شود که او نخستین کسی بوده که به‌طور کلّی عمومیت اصل پایستگی انرژی را به‌اثبات رسانده است. درست است که علم وطن ندارد [*La science n'a pas de patrie*] و بسیار قابل تحسین است که فیلسوفان بریتانیایی چنان آزادمنشانه بنابر این ضرب‌المثل عمل می‌کنند، اما نمی‌توان تصور کرد که در این مورد وطن‌دوستی علمی وجود ندارد، یا اینکه به میل خودمان به بهانهٔ اجرای عدالت دربارهٔ یک خارجی، حقوق هموطنانمان را سرکوب کنیم و کم‌ارزش بدانیم.

1. Peter Guthrie Tait 2. Edinburgh

تندال بار دیگر در مجلهٔ فلسفی پاسخی داد که اظهاراتش به‌منظور خاصی تنها متوجه تامسن می‌شد و بصیرت مطالب مهمی همچون تقدم علمی را در صفحات یک مجلهٔ عامه‌پسند زیر سؤال می‌برد. او اکنون، موضع اصلی‌اش سست شده بود و جول و مایر را در یک نقش مشترک می‌دید:

> زحمات مایر تا حدی نشان از شهود عمیق دارد، با وجود این، اعتقاد راسخ به انرژی را در ذهن نویسنده برمی‌انگیزد. زحمات جول، متقابلاً مبنی بر آزمایش است. این مطلب درستی است که مایر بنابر غریزهٔ باطنی کشورش استنتاجات بزرگ و مهم را از قضایای سستی استخراج می‌کند درحالی‌که فرد انگلیسی، بیش از هر چیز هدفش را بر واقعیات محکم برقرار می‌کند و جول این واقعیتها را به‌اثبات رسانده است. من فکر می‌کنم تاریخ‌نویسان آینده اینان را مخالف و متضاد هم نخواهند دانست.

تیت بعداً از این مطالب آگاه شد. او به یکی از ویراستاران مجلهٔ فلسفی نوشت، نخست آنکه اگر عرضهٔ اظهار نظر در مجلهٔ گود وردز جای مناسبی برای مباحثهٔ علمی نیست، مطمئناً یک رشته سخنرانیهای عامه‌پسند هم در مؤسسهٔ سلطنتی جای مناسبی نخواهد بود. سپس ادامه می‌دهد: «بیشترین بدشانسی پروفسور تندال داشتن پیش‌داوری و تعصب ذهنی است که غالباً او را باز می‌دارد. . .از این واقعیت که حقوق افرادی که آنان را خطاکار می‌پندارد، پیش از مداخلهٔ او، کاملاً در معرض افکار عمومی موردبحث قرار گرفته و به‌وسیلهٔ فتوای عموم افراد علمی مطرح شده است. آیا، پروفسور تندال می‌داند که مقالهٔ مایر ابداً حقی بر نوآوری یا درست بودن ندارد، بجز اینکه، با یک قیاس خوش‌شانسی به نتیجه‌ای تقریباً درست از یک قیاس کاملاً کاذب رسیده است؟»

حتی اگر از این جرّوبحثها اجتناب شده بود، هر کوششی برای حل اختلاف بر سر حقوق جول و مایر بی‌نتیجه می‌ماند. اگر یک‌بار برای همیشه هدف مذاکره، تشخیص کاشف مفهوم انرژی می‌بود، نه جول و نه مایر هیچ‌یک برندهٔ رقابت نبودند. داستان مفهوم انرژی پایان ندارد، حتی با حدسیات مایر و واقعیتهای تجربی جول آغاز نمی‌شود. چند تن از کاشفان انرژی همزمان کهن[1]، پیش از جول و مایر بوده‌اند، گرچه کارشان ابتدایی و من‌باب آزمایش بوده است. در اواخر سالهای ۱۸۴۰، پس از مایر و جول که مهمترین مشارکتها را در این امر به‌عمل آورده‌اند، مفهوم انرژی هنوز به‌صورت نیم‌بند فهمیده شده بود، حتی وجه تمایز جدید بین اصطلاحات نیرو و انرژی روشن نشده بود. هنوز مشارکتهای مهم و بنیادی برای هلمهلتز، کلازیوس و تامسن باقی مانده بود.

کسانی که وقت خود را صرف جنگیدن حق تقدم می‌کنند، می‌باید ادعاهای خود را فراموش کنند و به ارزش جنبهٔ مهمتر جامعه‌شناسی علم توجه داشته باشند، به اینکه جامعهٔ علمی با همهٔ گوناگونی آن از نژاد، طبقه و ملیت می‌گذرد و می‌تواند، همچنان‌که غالباً توانسته است، وارد اجماعی قابل پذیرش برای همگان شود. داوری نهایی در مجادلهٔ جول ـ مایر این درس را به ما می‌آموزد. در سال ۱۸۷۰ تقریباً ده سال پس از آخرین طغیان تندال با تیت، انجمن سلطنتی مدال معتبر کوپلی (Copley) را به جول و سال بعد به مایر اعطا کرد.

1. Kuhn

۵

تعهد مقدّس

جیمز جول

دانشمند غیرحرفه‌ای (آماتور)

باورکردن داستان جیمز جول اندکی دشوار به‌نظر می‌رسد. او مدت زیادی نزدیک منچستر، انگلستان دور از فضای علمی، جایی که خانواده‌اش در یک کارخانهٔ آبجوسازی کار می‌کردند، می‌زیست. در این کارخانه آبجوهای کمرنگ (ale) و پررنگ (porter) ساخته می‌شد. او بعضی از مهمترین کارهایش را در صبح زود و عصر، پیش و پس از کار روزانه‌اش در آبجوسازی، انجام می‌داد. جول تحصیلات دانشگاهی نداشت و آموزش رسمی او به دشواری گذشت و اصلاً در رشتهٔ علمی نبود. به‌عنوان یک دانشمند، او از هر حیث مانند مایر غیرحرفه‌ای بود. جول ابتدا مورد بی‌اعتنایی تشکیلات علمی قرار گرفت. اما، او به‌رغم غیرحرفه‌ای بودن، انزوا و بی‌اعتنایی، ترتیبی داده بود که بیشتر از هر کس دیگری در آن زمان (اوایل و اواسط سالهای ۱۸۴۰) رموز آزاردهندهٔ فرایندهای تبدیل را عمیقاً کاوش کند. و (به‌خلاف مایر) از بی‌اعتنایی طولانی رنج نبرد. داستان پیشرفت سریع جول، از دل‌مشغولی تا مقامی ممتاز در علم بریتانیایی را، در دنیای مراکز تحقیقاتی و دورهٔ طولانی تحصیلات علمی امروزی، به‌دشواری می‌توان تصورکرد.

هم‌ارزیها

موضوعی که از آغاز تا پایان بر پژوهش جول حاکمیت داشت، و به‌عنوان راهنمای الهام‌بخش نظریه‌ای به کار او می‌آمد، این اعتقاد بود که هم‌ارزیهایی کمّی را می‌توان میان آثارگرمایی، شیمیایی، الکتریکی و مکانیکی، یافت. او معتقد شده بود که حدّ وگسترهٔ هر یک از آثار را می‌توان با واحدهایی از هر یک از آثار دیگر ارزیابی کرد. جول این ارتباطهای کمّی را در بیش از هشت طریق متفاوت بررسی کرد: در

پژوهشهایی از تبدیل آثار شیمیایی به آثار گرمایی، الکتریکی و مکانیکی؛ از تبدیل آثار الکتریکی به آثار گرمایی، شیمیایی و مکانیکی؛ و از تبدیل آثار مکانیکی به آثار گرمایی و الکتریکی.

در آغاز، جول کاملاً به اهمیت آثار مکانیکی، در این طرح هم‌ارزها پی نبرده بود. اولین کار او بر آثار شیمیایی، الکتریکی و گرمایی متمرکز بود. در سال ۱۸۴۰، هنگامی که او هنوز بیست‌ودوساله بود، رشته‌ای شامل پنج پژوهش را آغاز کرد که مسبب آن، علاقه‌ای بود که به الکتروشیمی داشت. (جول پیش از آنکه فیزیکدان باشد، الکتروشیمیدان بود.) او نخست دقیقاً نشان داد که گرمای حاصل از جریان الکتریکی در یک سیم متناسب با توان دوم جریان I و مقاومت R است ـ «قانون گرمایش I^2R.» اثبات آزمایشی او مستلزم اندازه‌گیریهای دما در یک «گرماسنج» (ظرفی شامل آب یا مایعی دیگر که کاملاً عایق باشد و خوب به‌هم زده شود)، اندازه‌گیریهای جریان الکتریکی با وسیله‌ای که خودش طراحی کرده بود، و اختراع سیستمی از واحدهای مطلق الکتریکی بود.

سپس جول کوشش قابل‌ملاحظه‌ای را صرف مطالعات گوناگونی کرد تا نقش قانون گرمایش خود را در فرایندهای شیمیایی که در سلولهای الکتریکی تولید می‌شود، بیابد. او «سلولهای ولتایی» (مانند باتری چراغ‌قوهٔ امروزی) را که برونداد الکتریکی فراهم می‌کند، و «سلولهای الکترولیز» (مثلاً، سلول تجزیهٔ آب به اکسیژن و هیدروژن) را که درونداد الکتریکی مصرف می‌کند، به‌کار گرفت. جول در این آزمایشها یک سلول الکترولیز را با یک باتری از سلولهای ولتایی به‌کار انداخت. سرانجام او به این نتیجه رسید که جریان الکتریکی ایجاد شده به‌وسیلهٔ واکنش شیمیایی در سلول ولتایی، «اثر گرمازایی» یا «گرمای شیمیایی» را از جای واکنش اولیه، یا به یک مقاومت خارجی می‌برد که در آنجا می‌تواند بنابر قانون گرمایش I^2R به «گرمای آزاد» تبدیل شود یا به یک سلول الکترولیز می‌برد که در آنجا، همه یا بخشی از آن می‌تواند به‌صورت «گرمای نهان» صرف واکنش الکترولیز شود.

جول برای تعیین کل گرمای شیمیایی Q_e، که از سلولهای ولتایی به سلول الکترولیز می‌رسد، قطعه سیمی با مقاومت R_e یافت که می‌توانست جانشین سلول الکترولیز شود، و بدون آنکه تغییرات الکتریکی دیگر ایجاد کند، جریان الکتریکی I در این سیم را اندازه‌گیری و Q_e را با قانون گرمایش I^2R_e محاسبه کرد. او همچنین صعود دما در یک الکترولیز را که بَدَلی از گرماسنج بود، اندازه‌گیری و از آن گرمای آزاد Q_t تولید شده در این سلول را محاسبه کرد. او دریافت که Q_e اساساً همواره بیشتر از Q_t است؛ در موارد حادی، گرمایشی در سلول وجود نداشت و Q_t برابر صفر بود. تفاوت $Q_e - Q_t$، آنچه را که جول می‌خواست محاسبه کند نشان می‌داد و آن گرمای شیمیایی تبدیل شده به گرمای نهان واکنش الکترولیز بود. اگر گرمای واکنش الکترولیز را با Q_r نشان دهیم محاسبهٔ جول به‌صورت زیر می‌شود:

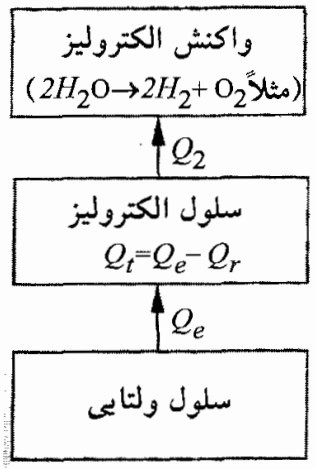
$$Q_r = Q_e - Q_t$$

این گزاره‌ای است که جول در سال ۱۸۴۶ آن را برای تعیین چند گرمای نهان از واکنشهای الکترولیزی، با دقت جالبی به‌کار گرفت. این گزاره کاربردی، پیچیده و دقیق از قانون اول ترمودینامیک

است، که به‌نظر می‌رسد جول برحسب درونادها و برونادها به سلول الکترولیز فهمیده بود. بدیهی است که معادلهٔ فوق را می‌توانیم با تجدید آرایش زیر بنویسیم

$$Q_t = Q_e - Q_r$$

که در این صورت Q_e یک درونداد به سلول، Q_r به‌دلیل اینکه در واکنش از دست می‌رود یک برونداد، و Q_t تفاوت بین درونداد و برونداد است (شکل ۵ـ۱ را ببینید). این یک موازنه یا نوعی حسابداری از محاسبه بود، و ضمناً دلالت بر فرض پایستگی داشت: وجود تعادل نمی‌تواند درون سلول، خلق یا نابود شده باشد. جول نامی برای آنچه پایسته شده بود، نداشت. شش سال بعد رودولف کلازیوس و ویلیام تامسن آن را مشخص کردند و تامسن آن را «انرژی» نامید. جول گرچه وارد مفهوم انرژی نشد، امّا به وضوح، پیشاپیش معاصرانش، گام بزرگی در شناخت مؤثر قانون اوّل ترمودینامیک برداشت.



شکل ۵ـ۱ درونداد و برونداد یک سلول الکترولیز بنا به نظر جول. گرمای آزاد اندازه‌گیری‌شدهٔ Q_t در سلول تنها به درونداد Q_e از سلول ولتایی، و برونداد Q_r به واکنش الکترولیز بستگی دارد. Q_t برابر است با درونداد Q_e منهای برونداد Q_r یعنی $Q_t = Q_e - Q_r$.

وقتی مقالات الکتروشیمیایی جول برای نخستین‌بار منتشر شد، چندان مورد توجه قرار نگرفت، نه رد و نه پذیرفته شد، فقط سکوت. یک دلیل برای این بی‌تفاوتی احتمالاً ماهیت غیرعادی روش جول بود. در آن زمان محاسبهٔ درونداد ـ برونداد به‌علت دشواری، فهمیده نمی‌شد، اما علاوه بر آن، جول عادت داشت تا گرماهای اندازه‌گیری‌شدهٔ واکنشهای الکترولیزی‌اش را با گرماهای واکنشهای احتراق (یعنی واکنش با گاز اکسیژن) محاسبه کند. مثلاً، او گرمای دقیق برای واکنش احتراق هیدروژن را به‌دست آورد،

$$۲H_۲ + O_۲ \rightarrow ۲H_۲O$$

که درست معکوس واکنش الکترولیز آب است،

$$۲H_۲O \rightarrow ۲H_۲ + O_۲$$

و بنابراین، جول فرض می‌کرد که قدرمطلق گرمای آن، همان گرمای واکنش الکترولیز است.

این راه عجیب و غریبی برای بررسی یک واکنش احتراق بود. اُزبُرن رینولدز[1]، نخستین زندگینامه‌نویس جول می‌نویسد که «دیدگاههای مقالات الکتروشیمیایی و دیگر مقالات جول بسیار پیشرفته‌تر از هر چیز پذیرفته شده در آن زمان بود که هیچ‌کس اعتماد کافی نداشت تا به عقیدهٔ خود، یا بر یقین کافی از فهم معنی کامل اکتشافاتی که مبنای نظرهای او بودند، جرئت ابراز قبول یا رد آنها را داشته باشد.» ما می‌توانیم خواننده‌ای معاصر او را تصور کنیم که با خواندن این مقاله‌ها سردرگم شده است، و سرانجام به این نتیجه رسیده است که نویسندهٔ آنها یا نابغه بوده است یا شخصی غیرعادی.

اما برای جول روش پیچیده و بغرنج، طبیعی بود و ظاهراً به اینکه مقالاتش برای خوانندگان قابل فهم باشد یا نباشد، توجهی نداشت. علاقهٔ اولیه‌اش، در آن موقع تعیین دقیق هم‌ارزهای میان آثار گرمایی، الکتریکی و شیمیایی بود. او برای گلاویز شدن و حل کردن این مسئله راهی بهتر از به‌کار بردن اندازه‌گیریهای الکتریکی و گرماسنجی برای محاسبهٔ اثر گرمایی از یک اثر شیمیایی به‌نظرش نمی‌رسید.

هم‌ارزیهای مکانیکی

جول با افزودن آثار بسیار مهم مکانیکی به سیستم هم‌ارزهایش مسیر دور و درازی را برای اکتشافات علمی دنبال کرد و در این راه مرتکب اشتباهی شد که پی‌آمد مساعدی داشت. او در چهارمین مقالهٔ الکتروشیمیایی‌اش، داده‌های پتانسیل الکتریکی (در واحدهای امروزی، ولتاژهای) اندازه‌گیری‌شده بر مبنای سلولهایی ولتایی را گزارش کرد که از واکنشهای الکترودی اکسید شدن روی و فلزات دیگر تولید می‌شد. او اشتباهاً باور داشت که این پتانسیلهای واکنشی را به‌همان طریق گرماهای واکنش می‌توان به‌کار برد، این باور که برای یک واکنش معین، بدون توجه به اینکه واکنش چگونه انجام شده است همواره پتانسیل یکسانی وجود دارد. این تعبیر با ترمودینامیک امروزی مجاز نیست مگر آنکه پتانسیلها به‌طور دقیق (به‌طور بازگشت‌پذیر) اندازه‌گیری شده باشند. اما جول و معاصران او از این محدودیت آگاه نبودند. این اشتباه جول، او را به محاسبهٔ هم‌ارزهای الکتریکی و گرمایی برای فرایندی سوق داد که در آن اکسیژن حل شده «حالت الاستیکش» معلوم باشد، نتیجه‌گیری جول از واکنش

$$O_2(\text{گاز}) \rightarrow O_2(\text{حل شده})$$

مرتبه‌ای از بزرگی بسیار زیاد بود. اما چون اشتباه او به‌طورکمّی بود این محاسبه، درک ذهنی جول را به‌طور وسیعی ترفیع داد، زیرا او باورکرد که هم‌ارزهای گرمایی و الکتریکی را برای یک اثر مکانیکی، یعنی تشکیل گاز اکسیژن از محلول به‌دست آورده است. در تخیل پُربار جول این امر پرمعنی بود. جول در چهارمین مقاله‌اش اظهارکرده بود که قبلاً دربارهٔ راههای اندازه‌گیری هم‌ارزهای مکانیکی اندیشیده است. او امیدوار بود این استنتاج را تحکیم کند که «توانهای مکانیکی و گرمایشی یک جریان با یکدیگر متناسب‌اند.»

جول به این طریق تصادفی، آزمایشهایی را برای تعیین هم‌ارزهای مکانیکی و گرما آغاز کرد که امروزه به‌نام آزمایشهای جول مشهور است. نخستین آزمایشها، از سری آزمایشهای بزرگ او در سال

1. Osborne Reynolds

۱۸۴۳، به‌هنگامی که جول بیست‌وچهارساله بود انجام شد. در این آزمایشهای اولیه او یک جریان الکتریکی را در پیچه‌ای از سیم، به‌وسیلهٔ چرخاندن آن به‌طور مکانیکی در یک میدان مغناطیسی قوی، القا کرد. این پیچهٔ الکتریکی در لولهٔ شیشه‌ای پر از آب و عایق‌بندی شده، گنجانده شده بود، به‌طوری که اندازه‌گیری هر گرمایش در سیم‌پیچ با فرو بردن یک دماسنج پیش و پس از چرخاندن ممکن می‌شد. جریان القاشده در پیچه، به‌وسیلهٔ اتصال پیچه به یک مدار خارجی شامل یک گالوانومتر، اندازه‌گیری شد. گرچه منشأ جریان القا شده با جریان ولتایی که جول قبلاً بررسی کرده بود، کاملاً تفاوت داشت، اما کارکرد آنها یکسان بود: در هر دو مورد، جریان سبب گرمایشی می‌شد که از قانون I^2R پیروی می‌کرد.

در آزمایشهای نهایی این طرح، چرخِ وسیلهٔ القا با سقوط وزنه‌هایی به‌کار می‌افتاد. با سقوط وزنه‌ها اثر مکانیکی به‌صورت کار مکانیکی اندازه‌گیری، و مستقیماً برحسب فوت‌ـپوند (ft-lb) محاسبه می‌شد: یک فوت‌ـپوند واحدی بود هم‌ارز کار لازم برای بالا بردن یک پوند به ارتفاع یک فوت. گرما با واحدی اندازه‌گیری می‌شد که با اندازه‌گیریهای دما تناسب داشت: یک واحد گرما مقدار گرمایی بود که دمای یک پوند آب را ۱° فارنهایت (F) بالا می‌برد. ما از این پس برای واحد گرما، اصطلاح Btu (مختصرشدهٔ "British thermal unit" واحد گرمایی بریتانیایی) را به‌کار می‌بریم.

جول در یک آزمایش، وزنه‌هایی برابر با ۴٫۷۵ پوند را از ارتفاع ۵۱۷ فوت ساقط کرد (وزنه‌ها بارها بالا برده و ساقط می‌شد) که سبب صعود دمای ۲٫۴۶°F شد. او وزن لولهٔ شیشه‌ای، پیچهٔ سیمی، و آبی را که صعود دما در آنها صورت گرفته بود، همگی را به وزنی با هم‌ارز گرمایی ۱٫۱۱۴ lb آب، تبدیل کرد. بنابراین، اثر گرمایشی ۲٫۴۶°F در ۱٫۱۱۴ lb آب بود. اگر این مقدار گرما در ۱ lb آب تولید شده بود، اثر گرمایش $\frac{(۲٫۴۶)(۱٫۱۱۴)}{۱} = ۲٫۷۴$°F می‌شد. جول نتیجه‌گیری کرد که در این مورد (۴٫۷۵)(۵۱۷) ft-lb هم‌ارز ۲٫۷۴ Btu است. او به‌طور معمول کار مکانیکی هم‌ارز یک Btu را تعیین کرد. این عدد که تامسن بعدها آن را به افتخار جول "J" نامید، برای این آزمایش به‌صورت زیر بود:

$$J = \frac{(۴٫۷۵)(۵۱۷)}{(۲٫۷۴)} = ۸۹۶ \text{ ft-lb/Btu}$$

این نتیجه یک مورد تعیین هم‌ارزی مکانیکی گرما بود. جول سیزده آزمایش از این نوع انجام داد و نتایجی در گسترهٔ $J = ۵۸۷$ تا $J = ۱۰۴۰$ ft-lb/Btu به‌دست آورد که برای آنها مقدار میانگین ۸۳۸ ft-lb/Btu راگزارش کرد. مقدار «صحیح» مورد ملاحظهٔ امروزی $J = ۷۷۸$ ft-lb/Btu است.

اگر جول نتایج این آزمایشها را با دقت ٪۲۷± هم به‌دست می‌آورد، چندان مؤثر به‌نظر نمی‌رسید، و هر کس ممکن بود از منتقدان جول که نمی‌توانستند ادعاهای او را دربارهٔ هم‌ارزی مکانیکی گرمایی‌اش باور داشته باشند، طرفداری کند. اما جول می‌کوشید برای مشکل آزمایشی اندازه‌گیریهایش معیارهای جدیدی برقرارکند. بنابه گفتهٔ رینولدز، در مقالهٔ سال ۱۸۴۳ جول، آزمایشهایی گزارش شده بود که بسیار دشوارتر از هر آزمایشی بود که قبلاً فیزیکدانی به آن مبادرت ورزیده باشد.

به هر حال، جول به‌زودی توانست کارهای بسیار بهتری انجام دهد. او در سال ۱۸۴۵ طریق بسیار متفاوت دیگری برای هم‌ارزی مکانیکی گرما را گزارش کرد، که به‌طور شگفت‌انگیزی با اندازه‌گیری قبلی او توافق داشت. در این سری دوم از آزمایشها، او تغییرات دما را اندازه‌گیری و گرمای حاصل از فشرده شدن هوا را محاسبه کرد. از رفتار فیزیکی شناخته‌شدهٔ گازها، او توانست اثر مکانیکی متناظر با کار انجام‌شده بر هوا را به‌هنگام فشرده‌شدن، محاسبه کند.

جول در یک آزمایش با فشردن هوا مقدار کار ۱۱۲۳۰ ft-lb و از صعود دمای اندازه‌گیری‌شدهٔ ۰٫۳۴۴°F اثر گرمایشی ۱۳٫۶۲۸ Btu را محاسبه کرد که در این صورت هم‌ارزی مکانیکی گرما برابر بود با

$$J = \frac{۱۱۲۳۰}{۱۳٫۶۲۸} = ۸۲۴ \text{ ft-lb/Btu}$$

آزمایش دیگری به‌همین طریق انجام شد، که در آن جول تغییر دمای ۰٫۱۲۸°F را اندازه‌گیری کرد و نتیجهٔ آزمایش $J = ۷۹۶$ ft-lb/Btu شد. میانگین نتایج این دو آزمایش ۸۱۰ ft-lb/Btu می‌شد که گرچه تصادفی بود اما از این لحاظ که با نتیجهٔ ۸۳۸ ft-lb/Btu گزارش شدهٔ او در سال ۱۸۴۳ توافق داشت، جلب‌نظر می‌کرد.

جول همچنین به انبساط هوای فشرده و کاری که در برابر فشار اتمسفر انجام می‌گیرد، پرداخت. اندازه‌گیریهایی از دما به‌عمل آورد، اما این‌بار کاهش دما اندازه‌گیری می‌شد. جول در یکی از این آزمایشهای انبساط، تغییر دمای ۰٫۱۷۳۸°F− را اندازه‌گیری کرد که در نتیجهٔ اثر گرمایشی به ۴٫۰۸۵ Btu کاهش می‌یافت. محاسبهٔ کار متناظر آن ۳۳۵۷ ft-lb/Btu را نشان می‌داد، بنابراین،

$$J = \frac{۳۳۵۷}{۴٫۰۸۵} = ۸۲۲ \text{ ft-lb/Btu}$$

جول دو آزمایش دیگر از این نوع انجام داد و تغییرات دمایی ۰٫۰۸۱°F− و ۰٫۰۸۵۵°F− را اندازه‌گیری کرد، که نتایج $J = ۸۱۴$ و $J = ۷۶۰$ ft-lb/Btu را به‌دست آورد.

وقتی همکاران جول به این نتایج می‌نگریستند، نخستین چیزی که توجه آنان را جلب می‌کرد، صحت مورد ادعا برای اندازه‌گیریهای بسیار کوچک تغییرات دما بود. در زمان جول، اندازه‌گیری صحیح یک درجه تغییر دما به‌قدر کافی دشوار بود. جول اعشار یک درجه را با سه یا چهار رقم با معنی گزارش می‌کرد و نتیجه‌گیریهای او بر مبنای چنین تغییرات ناچیزی بود. بنا به اظهارنظر ویلیام تامسن، «جول بجز یک‌صدمین‌های یک درجه چیزی نداشت تا با آن دعوی خود را به‌اثبات برساند.» ولی، اکثر ادعاهای جول توجیه‌پذیر بود. او اندازه‌گیریهای دما را با دماسنجهای جیوه‌ای که حساسیت و صحت بی‌سابقه‌ای داشتند، انجام می‌داد. او در یادداشتهای زندگینامهٔ شخصی خود، داستان این دماسنجها را چنین بیان می‌کند: «در این آزمایشها ضروری بود که از دماسنجهایی بسیار دقیقتر و ظریفتر از آنچه در آن زمان امکان خرید داشت، استفاده کنم. بنابراین، من تصمیم گرفتم که بعضی از انواع آنها را عملاً به شیوه‌ای

که رینو درجه‌بندی کرده بود فراهم کنم. در این راه با حمایت آقای دانسر مهارت یافتم [ج. ب. دانسر[1] وسیله‌ساز مشهور منچستر]، مدتی هر روز صبح به کارگاه او می‌رفتم تا سرانجام ما توانستیم نخستین دماسنجهای دقیقی را که تا آن زمان در انگلستان ساخته نشده بود، کامل کنیم.»

جول هم‌ارزی گرمایی ـ مکانیکی ـ کار را با سومین آزمایش انبساط گاز نشان داد. این آزمایش یکی از خلاقترین طرحهای آزمایشی بود که همهٔ طرحهای او را یک کاسه می‌کرد. در این آزمایش دو ظرف مسی با حجم ثابت، یکی خلأ شده و دیگری دارای هوای فشرده، با شیری که آنها را به هم متصل می‌کرد، در یک گرماسنج جای داده شد. با بازکردن شیر، اندازه‌گیریهای معمولی دما به‌عمل آمد. در این مورد جول دریافت که هیچ تغییر گرمایی محسوسی حاصل نشده است. انبساط هوا در ظرف تحت فشار، اندکی سرد و جریان هوا در ظرف خلأ اندکی گرم شده، اما هیچ تغییر دمای محسوسی مشاهده نشده بود.

این بود آنچه جول انتظارش را داشت. زیرا سیستم مرکبی، شامل دو ظرف متصل به هم، مسدود بود و حجم معینی داشت، تمامی کار در درون و پشت سر هم، بین دو ظرف انجام می‌شد. کار انجام‌شده به‌وسیلهٔ گاز در یک ظرف با کار انجام‌شده بر گاز در ظرف دیگر برابر بود، بنابراین، هیچ کار اضافی انجام نشده بود. هم‌ارزی گرمایی برای کار صفر نیز صفر بود، بنابراین، تصور جول از هم‌ارزی گرمایی ـ مکانیکی ـ کار ایجاب می‌کرد تا همچنان‌که مشاهده کرده بود، در این آزمایش هیچ اثر گرمایی اضافی تولید نشود.

مرحلهٔ بعدی، در جستجوی بی‌امان جول برای یافتن مقدار صحیح و دقیق هم‌ارزی مکانیکی گرما، که در سال ۱۸۴۷ آن را آغاز کرد، چند سری آزمایش بود که با آنها او گرمای تولیدشده به‌وسیلهٔ فرایندهای اصطکاکی گوناگون را اندازه‌گیری کرد. آثار اصطکاکی در گرماسنجی پر از آب، جیوه یا روغن که چرخ پرّه‌داری آن را به‌هم می‌زد، تولید می‌شد. این چرخ پرّه‌دار به‌وسیلهٔ سقوط وزنه‌هایی، مانند آزمایشهای سال ۱۸۴۳، به‌حرکت درمی‌آمد. کار انجام‌شده به‌وسیلهٔ وزنه‌ها مستقیماً به‌وسیلهٔ همزن چرخ پرّه‌دار به گرما تبدیل می‌شد که او می‌توانست با دماسنج موجود در گرماسنج آن را اندازه‌گیری کند.

از همهٔ اختراعات جول، این طرح آزمایشی، که مشهورترین یادمان نبوغ او شد، آسانترین و سرراسترین نمایش هم‌ارزی گرمایی ـ مکانیکی ـ کار بود. ژول با این روش، نمایش هم‌ارزی را به‌عوامل اصلی‌اش تقلیل داد. دیگر نه دستگاههای القایی پیچیده ضرورت داشت، نه تقریبهای محاسباتی، فقط سقوط وزنه‌ها و یکی از دماسنجهای حیرت‌انگیز او کافی بود.

جول به‌وسیلهٔ چرخ پرّه‌دار و آب به‌عنوان مایع گرماسنج، از صعود دمای $0.563^{\circ}F$، مقدار $J = 773.64$ ft-lb/Btu را به‌دست آورد. او با استفاده از جیوه در گرماسنج $J = 773.762$ و 776.303 ft-lb/Btu را به‌دست آورد. در دو سری آزمایشهای دیگر، جول وسایلش را طوری برقرار کرد که با سقوط وزنه‌ها، دو حلقهٔ چُدنی در گرماسنجی پر از جیوه، با هم اصطکاک داشته باشند؛ نتایج به‌دست آمده $J = 776.997$ و 774.880 ft-lb/Btu بود.

1. J. B. Dancer

جول آزمایشهای چرخ پرّه‌دار سال ۱۸۴۷ خود را در اجلاسی از انجمن بریتانیایی برای پیشرفت علم در اکسفورد، تشریح کرد. چون مقالات قبلی او علاقهٔ اندکی را برانگیخته بود، از او درخواست شد که تا حد ممکن مطالب خود را به‌اختصار ارائه کند. جول بعدها یادآوری کرد «این بود آنچه من می‌کوشیدم انجام دهم، بحثی که نکات موردنظر من دریافت نشد و اگر مرد جوانی در این مقطع ظاهر نمی‌شد و با مشاهدات هوشمندانه‌اش، علاقهٔ نشاط‌انگیزی به این نظریهٔ جدید نشان نمی‌داد، بحث من بدون هیچ نقد و تفسیری بی‌ثمر می‌ماند.»

سرانجام سکوت شکسته شد. این مرد جوان ویلیام تامسن بود که به‌تازگی به استادی فلسفهٔ طبیعی در دانشگاه گلاسکو منصوب شده بود. تامسن نظریه‌هایی دربارهٔ درست یا نادرست بودن کار جول داشت که از اظهار آنها امتناع می‌کرد، اما تشخیص داده بود که نمی‌توان کار جول را نادیده گرفت. تامسن برای پدرش نوشت، «من اطمینان دارم که بسیاری از ایده‌های جول نادرست است، اما به‌نظر می‌رسد بعضی از واقعیت‌های بسیار مهمی را کشف کرده است، مثلاً این واقعیت را که از اصطکاک سیالات، گرما ایجاد می‌شود.» تامسن در سال ۱۸۸۲ یادآور شد که «مقالهٔ جول در اجلاس اکسفورد شور و احساس فراوانی ایجاد کرد. فارادی آنجا بود و بسیار تحت تأثیر قرار گرفت اما به‌طور کلّی وارد این نظرهای جدید نمی‌شد. . . پس از مدتی کوتاه استوکس به من گفت که متمایل به طرفداری از جول شده است.» جرج استوکس[1] فیزیکدان و ریاضیدان برجستهٔ جوان دیگر در سال ۱۸۴۷ عضو کالج پمبروک[2] کمبریج بود و طی دو سال به‌عنوان استاد لوکاسین ریاضیات، که زمانی کرسی استادی نیوتون بود، منصوب شد.

پس از گذشت سه سال از اجلاس اکسفورد، جول از گمنامی به مقامی برجسته در تشکیلات علمی بریتانیا، ارتقا یافت. قدرشناسی از او نخست در اروپا به‌عمل آمد: یک مجلهٔ معتبر فرانسوی، به‌نام *ComptesRendu* گزارش مختصری از آزمایشهای سال ۱۸۴۷ جول را منتشر کرد و در سال ۱۸۴۸ جول به‌عنوان عضو افتخاری فرهنگستان سلطنتی علوم در تورین[3] انتخاب شد. تنها دو دانشمند بریتانیایی دیگر، فارادی و ویلیام هرشل، از طرف فرهنگستان تورین به این افتخار نایل شده بودند. در سال ۱۸۵۰، جول به هنگامی که سی‌ویک‌ساله بود نشان پذیرش هیئت علمی بریتانیا را دریافت کرد و به‌عنوان عضو انجمن سلطنتی انتخاب شد.

پس از این سالهای پرماجرا، تلاش پژوهشی عمدهٔ جول، همکاری طولانی با تامسن دربارهٔ انبساط گازها بود. این یکی از نخستین کوششهای جمعی در تاریخ بود، که استعدادهای یک نظریه‌پرداز و یک آزمایشگر به‌طور موفقیت‌آمیز و با خرسندی متحد می‌شد.

1. George Stokes 2. Pembroke College 3. Turin

نیروی زنده و گرما

جول باور داشت که آب در انتهای آبشار می‌باید اندکی گرمتر از آب بالای آن باشد، و کوششهایی به‌عمل آورد تا چنین آثاری را آشکارسازی کند. (بنابر داستان مشکوک و در هر حال پرآب‌وتابی از قول تامسن، او حتی در موقع ماه عسل در سویس از این کار دست برنمی‌داشت.) این امر برای جول نمونه‌ای از اصل پایستگی بود که «گرما، نیروی زنده و جاذبه در فضا... متقابلاً به یکدیگر تبدیل‌پذیرند. در این تبدیلها هرگز چیزی از دست نمی‌رود.» اما، این گزاره مستلزم اندکی توضیح و تفسیر است.

مکانیک نیوتونی تلویحاً اشاره دارد به اینکه انرژی مکانیکی یک وجه «پتانسیل» و یک وجه «سینتیک» دارد که به‌طور بنیادی به‌هم مربوط‌اند. «انرژی پتانسیل» در وزنه‌ای که بالای زمین نگه داشته می‌شود آشکار است. این وزنه انرژی دارد، زیرا بالا بردن آن مستلزم انجام کار است. بازیافت کامل این کار در صورتی ممکن است که با رها کردن وزنه، سقوط آن بسیار آهسته باشد و ماشینی را به‌حرکت درآورد که هیچ‌گونه اتلاف اصطکاکی نداشته باشد. همان‌طور که می‌توان انتظار داشت، انرژی پتانسیل وزنه متناسب با جرم و ارتفاع آن از بالای زمین است: اگر شروع آن از ارتفاع ۱۰۰ فوتی باشد می‌تواند کاری دو برابر مقدار کاری که شروع آن از ارتفاع ۵۰ فوت است، انجام دهد.

اگر وزنه به‌طور آزاد ساقط شود، به‌طوری که با آلات ماشینی پیوندی نداشته باشد، کاری انجام نمی‌دهد، اما شتاب می‌گیرد و با افزایش سرعت «انرژی سینتیک [جنبشی]» کسب می‌کند. انرژی جنبشی، مانند انرژی پتانسیل، می‌تواند با نوع مناسبی از ماشین‌آلات، به‌کار تبدیل شود و همچنین متناسب با جرم وزنه است. اما ارتباط آن با سرعت، بنابر قانون دوم نیوتون دربارهٔ حرکت، توان دوم سرعت است.

در سقوط آزاد، وزنه انرژی‌ای مکانیکی دارد که برابر با مجموع انرژی جنبشی و انرژی پتانسیل است،

$$\text{انرژی مکانیکی} = \text{انرژی جنبشی} + \text{انرژی پتانسیل} \qquad (۱)$$

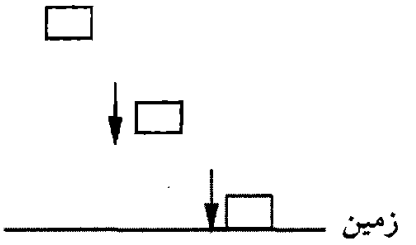
وزنه‌ای که در حال سقوط آزاد است، هنگامی که به زمین نزدیک می‌شود انرژی پتانسیل از دست می‌دهد و چون شتاب دارد، انرژی جنبشی کسب می‌کند. قانون دوم نیوتون این آگاهی را به ما می‌دهد که این دو تغییر دقیقاً یکدیگر را جبران می‌کنند و اینکه انرژی مکانیکی کل پایسته است، هرگاه تعریف کنیم

$$\text{انرژی جنبشی} = \frac{mv^2}{2} \qquad (۲)$$

$$\text{انرژی پتانسیل} = mgz \qquad (۳)$$

در معادله‌های (۲) و (۳)، m جرم وزنه، v^2 سرعت آن، z فاصلهٔ وزنه در بالای زمین و g مقدار ثابتی است که در بالا به‌صورت شتاب گرانشی شناخته می‌شود. اگر انرژی مکانیکی کلّی را با E نشان دهیم، معادلهٔ (۱) می‌شود

$$E = \frac{mv^2}{2} + mgz \qquad (۴)$$



$mv^2/2$	0	5	10
mgz	10	5	0
E	10		10

شکل ۵ـ۲ نمایش تبدیل انرژی پتانسیل به انرژی جنبشی به‌وسیلهٔ سقوط وزنه، و پایستگی انرژی کلّی مکانیکی.

و قانون پایستگی که با قانون دوم نیوتون محقق شده، ضمانت می‌کند که E همواره ثابت است. در شکل ۵ـ۲ فرایند تبدیل انرژی پتانسیل به انرژی جنبشی نشان داده شده است. در این شکل، وزنه پیش از شروع ساقط شدن ۱۰ واحد انرژی، انرژی پتانسیل دارد و انرژی جنبشی ندارد. در نیمهٔ راه سقوط به زمین، ۵ واحد انرژی پتانسیل و ۵ واحد انرژی جنبشی دارد، و در لحظهٔ پیش از برخورد با زمین، انرژی پتانسیل ندارد و ۱۰ واحد انرژی جنبشی دارد. در هر زمان، انرژی کل مکانیکی آن ۱۰ واحد است.

اصطلاح «نیروی زندهٔ» (یا به لاتینی Vis viva) جول، تقریباً همان انرژی جنبشی $\frac{mv^2}{2}$ است، و عبارت «جاذبه در فضا» همان معنی انرژی پتانسیل را دارد. بنابراین، اظهارات جول مبنی بر اینکه نیروی زنده و جاذبه در فضا قابل تبدیل به یکدیگرند، و اینکه در این تبدیل چیزی از دست نمی‌رود با تبدیل انرژی مکانیکی نیوتونی قابل قیاس است. آب در رأس آبشار فقط انرژی پتانسیل دارد و درست پیش از رسیدن به حوضچهٔ انتهایی آبشار، فقط انرژی جنبشی دارد. یک لحظه بعد، آب در حوضچه آرام می‌شود و بنابر اصل جول، سومین کمیت پایسته یعنی گرما را شامل می‌شود. آب گرمتر می‌شود، زیرا انرژی مکانیکی به گرما تبدیل شده است. جول هرگز برای قطعی کردن این اثر موفق نشد. انتظار نداریم که بزرگترین آبشار، تغییر دمایی بیشتر از یک‌دهم درجه تولید کند. جول حتی نتوانست چنین تغییر دمایی را در کنار یک کوه آشکارسازی کند.

تصور مکانیکی جول از گرما او را بیشتر به این باور رسانید که در تبدیل حرکت یک جسم به گرما، حرکت درواقع از دست نمی‌رود، زیرا خود گرما نتیجهٔ حرکت است. او گرما را به‌صورت حرکت بی‌نظم درونی ذرات تشکیل‌دهندهٔ ماده می‌دانست. این ایدهٔ کلّی تاریخی طولانی داشت که دست‌کم به رابرت بویل و دانیل برنولی در قرن هفدهم باز می‌گردد.

جول ذرات ماده را به‌صورت اتمهایی می‌پنداشت که با چرخش «اتمسفرهای الکتریسیته» احاطه شده‌اند، نیروی مرکزگریز این اتمسفرها سبب می‌شوند که گاز به هنگام کاهش فشار یا افزایش دما منبسط شود. انرژی مکانیکی تبدیل شده به گرما موجب حرکت چرخشی این اتمسفرهای اتمی می‌شوند. این تصورات جول نشانهٔ آغاز پیدایش و توسعهٔ نظریه‌ای بود که بعدها «نظریهٔ مولکولی (یا جنبشی) گازها» نامیده شد. متعاقب جول، کار قطعی در این زمینه به‌وسیلهٔ کلازیوس، ماکسول و بولتزمن به‌عمل آمد.

شرح مختصری دربارهٔ جول

اُزبرن رینولدز، که جول را در سال ۱۸۶۹ ملاقات کرد، از رفتار و ظاهر او در میانسالی، این برداشت را به ما می‌دهد: «جول که پنجاه‌ویک‌ساله بود، قدی نسبتاً زیر متوسط، چهره‌ای تا حدی گرد و مصمّم داشت، لباسش گرچه تمیز، اما بسیار پیش‌پا افتاده و معمولی بود. حالات و حرکاتش ظرافت طبیعی نداشت. درحالی‌که رفتارش تا حدی عصبی بود و مهارت زیادی در سخن گفتن نداشت، روی هم رفته نشان سادگی و عدم هرگونه ظاهرسازی و تکلّف را که شاخص زندگی اوست، منتقل می‌کرد.»

جول در سال ۱۸۴۷ با امیلیا گریمز ازدواج کرد، در این موقع او بیست و نه‌ساله و گریمز سی و سه‌ساله بود. آنان دو فرزند، یک پسر و یک دختر داشتند. امیلیا در سال ۱۸۵۴ فوت شد. تازه‌ترین زندگینامه‌نویس جول، دونالد کاردول[1] می‌نویسد: «مدتی مدید طول کشید تا اثر این ضربه ترمیم شود. دوستان جول و معاصرانش توافق داشتند این مردی که هیچ‌گاه خیلی صبور و محکم نبود، درون‌گرا و افسرده‌تر شد.» در حدود چهارده سال بعد، جول بار دیگر عاشق شد، این‌بار به عموزاده‌اش فرانسس تاپندن[2]، مشهور به «فانی.» او در نامه‌ای به تامسن می‌نویسد: «ناگهان مهر و محبتی میان من و دخترعمویم که شما آخرین‌بار او را در این‌جا دیدید، پدید آمد. اما موانعی در راه است که شاید حاصلی نداشته باشد.» این «موانع» مانع ازدواج شد و سرانجام فانی با مرد دیگری ازدواج کرد.

تمایلات سیاسی جول محافظه‌کارانه و سنتی بود. او بیزاری شدید و گاهی غیرعقلانی، نسبت به ذهنیت اصلاح‌طلب سیاستمداران لیبرالی مانند گلادستون و جان برایت داشت. او در نامه‌ای به تندال نوشت: «آقای گلادستون ماشینِ تروتمیز مدروزی از 'خودنمایی' بود، به این منظور که خود را در قدرت نگه دارد. . . . آیندگان دربارهٔ او به‌عنوان بدترین 'دولتمردی' که انگلستان داشته داوری خواهند کرد و رأی آنان نسبت به آن پارلمان ایضاً، همان خواهد بود.»

بنابه اظهارات ج.گ. کرودِر[3]، زندگینامه‌نویس دیگر، جول شخصیتی داشت که «کاملاً در حالت تعلیق» بود. از یک جهت آزمایشهایی را با نهایت دقت و حوصله انجام می‌داد، و از جهت دیگر علیه سیاستمداران لیبرال پرخاشگری می‌کرد. او می‌ترسید از اینکه تلاش ذهنی بسیار زیاد سلامتی‌اش را به‌خطر اندازد. در سال ۱۸۶۰ یک کرسی استادی فیزیک در اُونز کالج[4] منچستر ایجاد شد، و او می‌توانست آن را به‌دست آورد، اما تصمیم گرفت که از این موقعیت استفاده نکند. او در نامه‌ای برای تامسن توضیح داد که «من جرئت به‌کارگیری کرسی استادی اُونز را ندارم. واقعیت این است که احساس می‌کنم اضافه کردن کار مغز، برای من مفید نباشد. چند سال پیش، احساس کردم یک تلاش ذهنی بسیار اندک برای من تحمل‌ناپذیر است، و درنتیجه تا آنجا که ممکن بود خود را از تفکر زیاد کنار کشیدم. بهبودی تدریجی را احساس کرده‌ام، اما گمان نمی‌کنم برای من انباشت کار فکری بسیار زیاد مناسب باشد. با آسان‌گیری مسائل، در طولانی‌مدت می‌توانم کارهای بیشتری انجام دهم.»

1. Donald Cardwell 2. Frances Tappenden 3. J.G. Crowther 4. Owens College

در این زمان زندگی جول پرتکاپو و طاقت‌فرسا بود، و شاید هم خود را در آستانهٔ فروپاشی احساس می‌کرد. امیلیا در سال ۱۸۵۴ مرد، آبجوسازی در همان سال فروخته شد و آزمایشهای او با تامسن در حال پیشرفت بود. در طی شش سال بعد دوبار خانواده و آزمایشگاهش را جابه‌جا کرد. پس از دومین جابه‌جایی، درگیر ناراحتی مشاجرات زننده‌ای با همسایه‌اش بود، که به سروصدا و دود ماشین بخار او اعتراض می‌کرد. این ماشین با توان سه اسب بخار از جمله وسایل جول بود. این همسایه «آقای بروکر، عضو ارشد شورای محلی منچستر و رئیس کمیتهٔ مزاحمان، به‌نظر خودش مرد بسیار مهمی بود، مانند بیشتر مردمی که از لایه‌های پایین جامعه بالا می‌آیند.»

در طی همین دوران، جول به زحمت از آسیب شدید شکستگی یک قطار رهایی یافته بود، و پس از آن تقریباً به‌طور غیرقابل کنترلی، از سفر با قطار می‌ترسید. در عین حال او سفر دریایی را، حتی وقتی خطرناک بود، دوست می‌داشت. او در نامه‌ای به فانی، یک سفر ده‌مایلی به جزیرهٔ تروی در اقیانوس اطلس، حوالی ساحل ایرلند را که در آنجا برادرش ملکی داشت، بدین‌گونه شرح می‌دهد: «موجهایی بود از قله‌ای به قلهٔ دیگر در حدود ۴ تا ۶۰۰ فوت و ارتفاع ۲۰ فوت. دکتر برادی که با ما بود و بیست‌وپنج سال در اقیانوس قایقرانی کرده بود، می‌گفت هرگز در دریایی خطرناکتر از این نبوده است، اما شکوه آن احساس نامساعد بودن خطری را که امکان وقوع داشت، دور می‌کرد.»

از لحاظ مقایسه، توانایی علمی جول چندان ابهتی نداشت. او به‌عنوان نظریه‌پرداز شایستگی داشت، اما نظریه‌پرداز برجسته‌ای نبود. او با فصاحت سخن نمی‌گفت و در جامعهٔ علمی زمان خود از اهمیت ویژه‌ای برخوردار نبود. اما جول سه ویژگی فوق‌العاده داشت: مهارت آزمایش، استقلال فکری و الهام نظر.

او نخستین کسی بود که فهمید به‌دست آوردن اصول هم‌ارزی نامبهم و مشخص، فقط با بیشترین توجه ملهم از صحت آزمایش امکان‌پذیر است. او هدف خود را با انتخاب دقیق اندازه‌گیریهایی که منظورش را برآورده می‌کرد، به‌انجام می‌رساند. کرودر از سرراست بودن و سادگی راهبردهای آزمایشی جول اظهار شگفتی می‌کند: «او کورکورانه، مقداری از حقیقت را از تعداد زیادی آزمایشهای ناموفق سوا نمی‌کرد. تقریباً همهٔ آزمایشهای او چنان به‌طور کامل طرح‌ریزی شده به‌نظر می‌رسید که نخستین پیش‌نویس آنها را می‌شد، بدون بازنگری، برای انتشار به مجلات ارسال کرد.»

جول درآمد مستقل کافی برای زندگی‌اش داشت. این امر به او امکان می‌داد که به‌طور خصوصی یک دورهٔ علمی را دنبال کند، و نوعی استقلال عقلانی مورد نیاز خود را فراهم آورد. کِرودِر دربارهٔ این وجه از زمینهٔ زندگی جول می‌گوید:

> او به‌عنوان یک مرد جوان ثروتمند، نیازی به آموزش رسمی نداشت تا او را واجد شرایط برای حرفهٔ خاصی کند، یا او را با دوستان قدرتمند آتی آشنا سازد. دنبال کردن پژوهشهای اولیهٔ او تا حدی تحت تأثیر میهمانی اشراف‌زادهٔ جوانی بود که تصادفاً به‌جای بحث جنگ، امور سیاسی و قمار، دربارهٔ علم بود. مشکل است باور کنیم که هیچ دانشجویی که مدتی طولانی آموزش دانشگاهی دریافت کرده بود، توانسته باشد تحقیقات را با لحنی برابر با

عقلانیت جول توصیف کند. دانشجوی مستعدی که زیر نظر استاد بزرگی تعلیم دیده بود، تقریباً به‌طور مسلم در نخستین مقالاتش، رأی کمتر مستقلی را اتخاذ می‌کرد؛ زیرا او علاوه بر تمکین و احترام مقتضی به دستاوردهای مقام ارشد خود، می‌باید نگرش یک شاگرد به مقام ارشدش را رعایت کند. دانشجویی که رعایت چنین حرمتی را نکند، پس از آموزش ممتاز تقریباً همیشه فردی معمولی است.

جول هم کلاً از آموزش خصوصی ممتاز بی‌بهره نبود. در آغاز سال ۱۸۳۴ جول و برادرش بنجامین، به‌مدت سه سال نزد جان دالتن تحصیل می‌کردند؛ دالتن در آن زمان شصت‌وهشت ساله بود و مثل همیشه با آموزش مبادی علم و ریاضیات به شاگردان، پول به‌دست می‌آورد. تحصیلات جول با دالتن، به‌ویژه از لحاظ فن تعلیم موفقیت‌آمیز نبود. دالتن آموزش آنان را از حساب و هندسهٔ (اقلیدسی) آغاز می‌کرد و سپس به ریاضیات عالیتر، با اندکی توجه به فیزیک و شیمی پیش می‌برد. برنامه‌های درسی دالتن مناسب علایق جول نبود، اما جول به راههای غیررسمی از آنها بهره می‌برد. جول بعدها در یادداشتهای زندگینامه‌اش نوشت: «دالتن برای جلب علاقهٔ شاگردانش به حقیقت علمی، توانایی نادری داشت؛ و از همین وجه آموزش او بود که برای نخستین‌بار این اشتیاق در من ایجاد شد تا دانش خود را با پژوهشهای جدید و اصیل افزایش دهم.» دالتن، نه در جریان تدریس، بلکه در آثار نوشتاریش تأکید می‌ورزید که اندازه‌گیریهای صحیح در ساختن مبانی علم فیزیک نهایت اهمیت را دارد، این درسی بود که جول آموخت و بیش از همه آن را به‌کارگرفت. دالتن به‌عنوان سرمشق، با شهرت بین‌المللی برای نظریه‌های شیمیایی‌اش، آن هم به‌طور خودآموز، و زیستن و عمل کردن در منچستر، می‌باید جول را متقاعد کرده باشد، که او نیز می‌تواند به آینده امیدوار باشد.

استقلال فکری و اعتماد به نفس جول در پیشینهٔ ذهنی و استعدادهای او، خواه به‌طور طبیعی یا آموخته شده از دالتن، در سالهای بعد، بارها آزموده شد، اما هرگز متزلزل نشد. نخستین تلاش او که در سال ۱۸۴۳ برای تعیین هم‌ارزی مکانیکی گرما به‌عمل آمد، نادیده گرفته شد و به تعیین هم‌ارزیهای بعدی دیگر او توجه چندانی نشد، تا آنکه در سال ۱۸۴۷، در اجلاس انجمن بریتانیایی، مورد توجه تامسن و استوکس قرار گرفت.

وقتی جول خلاصه‌ای از آزمایشهای اصطکاکش را برای انتشار ارائه کرد، مقالهٔ او با سه نتیجه‌گیری به پایان می‌رسید، که در آنها به هم‌ارزی گرمایی ـ مکانیکی ـ کار در آزمایشهای اصطکاک اصرار می‌ورزید، مقدار J اندازه‌گیری شده‌اش را نقل می‌کرد و اظهار می‌داشت که «اصطکاک منوط به تبدیل توان مکانیکی به گرما است.» داوری که دربارهٔ مقاله اظهارنظر می‌کرد (احتمالاً فارادی) درخواست کرد که نتیجه‌گیری سوم متوقف شود.

انجمن سلطنتی، انتشار نخستین مقالهٔ الکتروشیمیایی جول، بجز چکیده‌ای از آن را، رد کرد. آرتور شوستر[1] می‌نویسد، وقتی از جول پرسیدم واکنش شما در برابر رد شدن این مقالهٔ مهم چه بود، پاسخ

1. Arthur Schuster (فیزیکدان، استاد دانشگاه منچستر)

جول خصلت اختصاصی او بود: «من تعجبی نکردم، می‌توانم آقایانی را تصور کنم که در لندن دور میزی نشسته‌اند و به یکدیگر می‌گویند: چه چیز خوبی ممکن است از شهری [منچستر] پیدا شود، جایی که شامشان را وسط روز می‌خورند.»

اما جول با همهٔ استعدادها، امتیازات مادی، و استقلال ذهنی‌اش، اگر نوعی اندیشهٔ الهام‌گونهٔ غیرعادی راهنمای او نبود، هرگز نمی‌توانست آنچه را که می‌کند به کمال برساند. «مطالعهٔ طبیعت و قوانین آن» برای جول «اساساً وظیفه‌ای مقدس» بود. او می‌توانست شکیبایی شگفت‌آور لازم برای تشخیص و ارزیابی خطاهای کوچک در یک‌سری طویل از اندازه‌گیریها را به‌دست آورد و در عین حال فراسوی جزئیات برود و کار خود را به‌صورت یک موضوع تحقیقی «برای آشنایی با قوانین طبیعت. . . برای آشنایی با مشیت خداوند که در آن مشهود است» بنگرد: گاهی نظریه‌پردازان بزرگ، اندیشه‌هایی از این نوع داشته‌اند ـ شاید بتوان همین معنا را از اظهارنظر اینشتین که می‌گوید «رمز سرمدی جهان ادراک‌پذیری آن است» به‌دست آورد ـ اما آزمایشگران که ظاهراً کارهای معمولی روزمرّهٔ آنان قرائت دستگاهها و طراحی وسایل آزمایشی است به‌ندرت احساس می‌کنند که با «مشیت الهی» در ارتباط‌اند.

مشکل بتوان میراثی علمی را یافت که همچون میراث جول در عین سادگی از اهمیت عمیقی در تاریخ علم برخوردار باشد. دستاورد عمدهٔ جول را می‌توان با تک گزارهٔ زیر خلاصه کرد:

$$J = ۷۷۸ \text{ ft-lb/Btu}$$

شایان ذکر است که این نتیجه با صحت و دقت فوق‌العاده‌ای به‌دست آمد. این یادمانی از جول در نوشته‌های علمی است که امروزه به‌صورت ۴٫۱۸۴۰ کیلوگرم ـ متر برکالری نقل می‌شود و دانشجویان امروزی به‌طور عادی و بدون قدرشناسی، آن را برای انتقال کمّی یک واحد انرژی به واحد انرژی دیگر به‌کار می‌برند.

در سالهای ۱۸۴۰ اندازه‌گیریهای جول از لحاظی بسیار جذابتر و از لحاظی نگران‌کننده‌تر شد. مفهوم انرژی هنوز (حتی پنج یا ده سال بعد هم) ایجاد نشده بود، و عدد جول، به‌عنوان شاخص تبدیل و پایستگی انرژی جای پای محکمی نیافته بود. با وجود این، پژوهش جول آشکارا نشان می‌داد که چیزی تبدیل می‌شود و پایستگی دارد، و سررشتهٔ محکمی به‌دست می‌داد که آن چیز، چیست.

۶

وحدتها و یک وحدت‌جو

هرمان هِلمهُلتز

وحدت‌جویان و متنوع‌کاران

علم عمدتاً حاصل تلاش دو گروه مکمل است که می‌توانیم آنان را نظریه‌پردازان و آزمایشگران بنامیم، تا حدّی شبیه به آنان که عضویت و نمایندگی دو حزب را دارند. فریمن دایسون[1]، یک نظاره‌گر تیزبین، ویژگیها و راه و روش دانشمندان را تقریباً هم‌ارز می‌داند. اما تقسیم‌بندی او بیشتر ملهم از بینشها وگرایشها و طرفداریهای علمی است. بنا به‌نظر دایسون، علم در سراسر تاریخش با اندازهٔ مساوی از «وحدت‌جویان» و «متنوع‌کاران» به‌وجود آمده است. وحدت‌جویان، غالباً نظریه‌پردازان، در جریان تحقیق اصولی هستند که ساختار وحدت علم را آشکار می‌کنند. متنوع‌کاران احتمالاً آزمایشگرانی هستند که واقعیتهای متنوع علم را کشف می‌کنند. تلاشهای وحدت‌جویان علمی و متنوع‌کاران فوق‌العاده مکمل یکدیگرند. از مجموع واقعیتهای بسیاری که متنوع‌کاران جمع‌آوری می‌کنند، نظریه‌های وحدت‌جویان پدید می‌آید. این نظریه‌ها متنوع‌کاران را به مشاهدات جدیدی راهنمایی می‌کند، که بعضاً نتایج مصیبت‌باری برای وحدت‌جویان دارد.

ترمودینامیکدانانی که تاکنون به تجلیل آنان پرداختیم، از جملهٔ بزرگترین وحدت‌جویان قرنهای نوزدهم و بیستم بودند. سه داستان پیش‌گفتهٔ ایشان از سادی کارنو و تجسس او برای وحدت‌یابی در پیچیدگیهای حیرت‌انگیز ماشین‌آلات بود؛ از رابرت مایر و تأملات و گمانه‌زنیهای وسیع او دربارهٔ مفهوم انرژی بود، و سرانجام از جیمز جول و تعیین دقیق هم‌ارزیهای میان آثار گرمایی، الکتریکی، شیمیایی و مکانیکی بود. اکنون ما در ادامهٔ این گفتار با توجه به ثبت وقایع تاریخی، به توسعهٔ بیشتر مفهوم انرژی می‌پردازیم. ترمودینامیکدان این صحنه هرمان هلمهلتز[2] است که از موثقترین وحدت‌جویان زمان خود به‌شمار می‌آید.

1. Freeman Dyson 2. Hermann Helmholtz

پزشکی و فیزیک

هلمهلتز، مانند مایر، یک دورهٔ پزشکی آموخت. شاید بهتر بود که او به تحصیل فیزیک و ریاضیات بپردازد، اما تنها امید برای آموزش علمی او، با توجه به حقوق ناچیز پدرش به‌عنوان معلم دبیرستان، یک بورس تحصیلی دولتی در پزشکی بود. هلمهلتز با این بورس تحصیلی در مؤسسهٔ فردریک ویلهلم در برلین تحصیل کرد و پایان‌نامهٔ دکتری‌اش را با یوهانس مولر[1] گذراند. در آن زمان مولر و حلقهٔ دانشجویان بااستعدادش کار مقدماتی یک رویکرد شیمیایی و فیزیکی برای مطالعهٔ فیزیولوژی را مطرح می‌کردند، که آغاز رشتهٔ تحصیلی مشهور امروزی با عنوان زیست فیزیک و زیست شیمی است. هدف مولر رهایی علم پزشکی از همهٔ افراط‌کاریهای متافیزیکی انباشته در آن، و تنها حفظ آن اصولی بود که اساس تجربی موثقی دارند. هلمهلتز به گروه سه نفری شاگردان مولر، امیل دو بوا-ریموند[2]، ارنست بروک[3] و کارل لودویگ[4] پیوست. این چهار تن که بعدها به «گروه ۱۸۴۷» معروف شدند، استعدادها و زندگی حرفه‌ای خود را درگرو این کار گذاشتند که فیزیولوژی را به یک علم فیزیکوشیمیایی تغییر شکل دهند.

بقای قوت (*Die Erhaltung der Kraft*)

گرچه پزشکی نخستین انتخاب هلمهلتز نبود، با وجود این پزشکی به او خوب خدمت کرد (و او به پزشکی خدمت کرد)، حتی وقتی شرایط فرساینده بود. بورس پزشکی او مشروط به هشت سال خدمت جراحی پزشکی در ارتش بود. او این خدمت را با اشتیاق زیاد ادامه داد. زندگی به‌عنوان یک جراح در هنگ پوتسدام اندکی از هیجان عقلانی را که در برلین یافته بود، به او عرضه کرد. اما هلمهلتز تا حدّی غیرعادی توانایی آن را داشت که انگیزش عقلانی‌اش را تأمین کند. گرچه از لحاظ منابع به‌شدت در مضیقه بود، و نمی‌توانست پس از ساعت پنج صبح که شیپورچی، شیپورش را به صدا درمی‌آورد، بخوابد، اما به‌سرعت برنامهٔ پژوهشی کاملی را آغاز کرد. برنامه‌ای در ارتباط با عنوانهایی مانند نقش متابولیسم در فعالیت ماهیچه، هدایت گرما در ماهیچه و سرعت انتقال تکانهٔ عصبی.

طی این مدت هلمهلتز، درحالی‌که غالباً در انزوای علمی بود، مقاله‌ای دربارهٔ پایستگی (بقای) انرژی نوشت؛ مقاله‌ای که توجه به آن موجب می‌شود ما او را یکی از ترمودینامیکدانان بزرگ بدانیم. (بار دیگر همچون داستانهای کارنو، مایر و جول، تاریخ با یک بیگانهٔ علمی ساخته می‌شد.) عنوان مقالهٔ هلمهلتز *Über die Erhaltung der Kraft* (دربارهٔ پایستگی نیرو) بود. این مقاله به انجمن فیزیکی برلین، که به‌تازگی به‌وسیلهٔ دو بوا-ریموند و شاگردان دیگر مولر و گوستاو مگنوس[5] در ژوئیهٔ سال ۱۸۴۷ سازمان یافته بود، ارائه شد.

به‌طوری که از عنوان مقاله برمی‌آید، مقالهٔ ۱۸۴۷ هلمهلتز به مفهوم «نیرو»-در آلمانی "Kraft"- مربوط می‌شود، که آن را به‌صورت «ظرفیت (ماده) برای حصول نتایج» تعریف می‌کند. مسئلهٔ مورد

1. Johannes Müller 2. Emil du Bois-Reymond 3. Ernst Brücke 4. Carl Ludwig
5. Gustav Magnus

توجه او، همچنان‌که مایر پیش از او به آن توجه داشت، آمیزه‌ای از مفهوم جدید انرژی (که تا سالهای ۱۸۵۰ در متون ترمودینامیکی به‌وضوح تعریف نشده بود) و مفهوم نیروی نیوتونی بود. بعضی از موارد کاربرد واژهٔ "Kraft" هلمهلتز را می‌توان بدون هیچ اختلال به‌صورت «انرژی» ترجمه کرد. در موارد دیگر نمی‌توان به این طریق معنی کرد، به‌ویژه وقتی خواص جهت‌دار مفروض باشد. در این موارد Kraft به‌معنی «نیرو» با معنی ضمنی نیوتونی است.

هلمهلتز بعدها نوشت، الهام اصلی مقالهٔ ۱۸۴۷ او، واکنش وی به‌عنوان یک دانشجو به مفهوم «نیروی حیاتی» بود که در آن زمان میان فیزیولوژی‌دانان، از جمله مولر رواج داشت. هلمهلتز دریافته بود نمی‌تواند این ایدهٔ اساسی را بپذیرد که فرایندهای حیات، نه‌تنها با رویدادهای فیزیکی و شیمیایی، بلکه با یک نیروی حیاتی نیز کنترل می‌شوند. «منبع حیات درونی یا نیروی حیاتی، فعالیتهای [فیزیکی و شیمیایی] را کنترل می‌کند. پس از مرگ، عمل آزادانهٔ نیروهای فیزیکی و شیمیایی سبب تجزیه می‌شود، اما به هنگام زنده بودن عمل آنها مدام با روح زندگی تنظیم می‌شود.» هلمهلتز این مطلب را امری متافیزیکی می‌دانست. به‌نظر او نیروی حیاتی نوعی حرکت دایمی زیست‌شناختی است. او می‌دانست که در فرایندهای فیزیکی و شیمیایی، حرکت دایمی مجاز نیست و احساس می‌کرد که همان ممنوعیت می‌باید برای همهٔ فرایندهای حیاتی بسط یابد.

هلمهلتز در مقالهٔ خود دربارهٔ آنچه از نویسندگان مکانیک قرن هفدهم ـ و هجدهم ـ به‌ویژه از دانیل برنولی[1] و ژان دالمبر[2] آموخته بود بحث می‌کند. از این بخش مقاله معلوم می‌شود که عقاید پیش از تجربه در این امر دخالت دارند، اما اساسی‌ترین این مفروضات به‌درستی بیان نشده است. یهودا الکانا[3]، تاریخ‌نویس علم، نکات از قلم افتاده را برای ما تکمیل می‌کند: «هلمهلتز به دو عقیدهٔ بنیادی ـ پیش از تجربه ـ بسیار پایبند بود: (الف) همهٔ پدیده‌های فیزیک به فرایندهای مکانیکی قابل تحویل‌اند (هر کس که آثار هلمهلتز را خوانده باشد در این امر تردید نمی‌کند) و (ب) ذاتی در طبیعت هست که [از لحاظ کمی] پایستگی دارد، گرچه در بسیاری از عبارات آثار هلمهلتز آشکار نیست.» با آوردن فیزیولوژی در دیدگاه او، عقیدهٔ سومی ضرورت داشت که «فرایندهای آلی قابل تحویل به فیزیک‌اند.» این ایده‌های کلّی آشکارا شبیه به ایده‌هایی به‌نظر می‌رسید که مایر مطرح کرده بود، اما در سال ۱۸۴۷ هلمهلتز مقاله‌های مایر را نخوانده بود.

مشکل مهم هلمهلتز، چنانکه خود او می‌پنداشت، مشخص کردن این ذات پایسته بود. هلمهلتز مانند مایر، اما مستقل از او کمیت "Kraft" را به‌عنوان نقش مرکزی در اصل پایستگی‌اش، انتخاب کرد. مایر نتوانسته بود از آشفتگی معنی دوگانه "Kraft" که اکثر همعصران او پذیرفته بودند، رهایی یابد. اما هلمهلتز یکی از نخستین کسانی بود که این ابهام و ناهمخوانی را تشخیص داد. او با دانشی که از مکانیک داشت توانست بفهمد که وقتی نقش یک کمیت پایسته را به "Kraft" می‌دهد، این

1. Daniel Bernoulli 2. Jean d'Alembert 3. Yehuda Elkana

واژه دیگر نمی‌تواند به‌معنی نیوتونی آن به‌کار برده شود. نظریهٔ مکانیکی آشکار کرده است که نیروهای نیوتونی به هر طریق معمول، کمیتهای پایسته نیستند.

این استدلال، هلمهلتز را به تشخیص هویت مؤثری از این کمیت پایستهٔ مبهم نزدیکتر کرد. اما او (و دو ترمودینامیکدان برجستهٔ دیگر، کلازیوس و تامسن) هنوز موضوع مفهومی دشواری را پیش‌رو داشتند. او می‌توانست الگوی مکانیک را دنبال کند، توجه داشته باشد که انرژی مکانیکی خاصیت پایستگی دارد، و بپذیرد کمیت پایسته‌ای که برای اصل موردنظرش لازم است ویژگیهایی (دست‌کم واحدهایی) از انرژی مکانیکی دارد. به‌نظر می‌رسد هلمهلتز در این‌باره تعقل کرده است، اما شواهدی در دست نیست که او بیش از این به درک کامل مفهوم انرژی نزدیکتر شده باشد. به هر حال پیام او تا آنجا که پیش رفت، حائز اهمیت بود و سرانجام پذیرفته شد. الکانا می‌نویسد: «پس از [مقالهٔ ۱۸۴۷] که مفهوم انرژی در معرض مرحلهٔ تثبیت قرار گرفت، Kraft آلمانی فقط به‌معنی انرژی شد (در زمینهٔ پایستگی) و سپس به آهستگی جای خود را به‌اصطلاح Energie داد. Kraft نیوتونی با بعدهای جرم ضرب در شتاب فقط به آنچه ما نیرو می‌نامیم محدود شد.»

من به موضوع اصلی که مقالهٔ ۱۸۴۷ هلمهلتز را اشغال کرده بود متمرکز شدم. درواقع مقاله طولانی بود، با شرح و تصویرهای بسیاری از اصل پایستگی در فیزیک گرما، مکانیک، الکتریسیته، مغناطیس و (به‌اختصار در یک پاراگراف) فیزیولوژی.

نقاط قوّت و ضعف

وقتی تلاش هلمهلتز جوان، در مقاله‌اش (او در سال ۱۸۴۷ بیست‌وشش‌ساله بود) به اعضای جوان انجمن فیزیک برلین ارائه شد، مورد استقبال قرار گرفت. این استقبال در مجامع علمی دیگر کمتر بود. هلمهلتز مقاله‌اش را برای انتشار به سالنامهٔ پوگندورف ارسال کرد، و مانند مایر در پنج سال پیش از آن، پاسخ رد دریافت کرد. بار دیگر نویسنده‌ای با مطالب مهمی برای گفتن دربارهٔ مفهوم انرژی، می‌بایست به انتشار شخصی متوسل شود. با ضمانت دو بوا ـ ریموند در مورد اهمیت مقاله، ناشری به‌نام گ.ا. ریمر[1] موافقت کرد که آن را در سال ۱۸۴۷ منتشر کند.

هلمهلتز در سالهای بعد، چندبار دربارهٔ نحوهٔ خاص تلقی مقامات در کتاب خاطرات علمی‌اش انتقاد کرد. او در سال ۱۸۸۱ نوشت: «وقتی من کتاب خاطرات علمی را شروع کردم مطمئناً آن را به‌عنوان یک اثر انتقادی می‌پنداشتم، نه به‌عنوان یک کشف اصیل..... بعداً که با مخالفت خبرگان مواجه شدم تا حدی تعجب کردم... در میان اعضای فرهنگستان برلین تنها کارل گوستاو یاکوبی[2] ریاضیدان، آن را پذیرفته بود. در آن زمان با ارائهٔ یک اصل جدید، شهرت و پاداش مادی عاید نمی‌شد، بلکه کاملاً خلاف آن بود.» او در سال ۱۸۹۱ در یک زندگینامهٔ شخصی مختصر نوشت که آنچه بیش از هر چیز او را شگفت‌زده کرد واکنش فیزیکدانان بوده است. او انتظار بی‌اعتنایی داشت («همهٔ ما آن را می‌دانیم. این

1. G.A. Reimer 2. C.G.J. Jacobi

دکتر جوان چه فکری در سر می‌پروراند که خود را در موضعی احضارشده می‌بیند تا همهٔ فکر خود را به تفصیل، توضیح دهد؟ ») آنچه نصیب او شد جملهٔ تند و تیزی به استنتاج‌هایش بود: «آنان [فیزیکدانان] می‌خواستند صحت قانون را انکارکنند. . . مقالهٔ مرا یک مطلب خیالی دور از واقع تلقی کنند.»

بعدها، پس از پراکنده شدن غبارهای نقادی، مسائل حق تقدم به‌میان آمد. با مطرح کردن مقاله‌های مایر شباهتهای آشکار میان اندیشه‌های هلمهلتز و مایر نشان داده شد. احتمالاً به‌علت محدود بودن منابع در پوتسدام، هلمهلتز در سال ۱۸۴۷ مقاله‌های مایر را نخوانده بود. بعداً در بسیاری از موارد، آشکارا حق تقدم مایر و همچنین جول را تصدیق و قدردانی کرد.

با ارزیابی امروزی، مقالهٔ ۱۸۴۷ هلمهلتز، از جهاتی، محدود به‌نظر می‌رسد. این مقاله مطمئناً مطالب آشنا را (آنچنان‌که موردنظر هلمهلتز بوده است) شامل می‌شود، اما در ساختن مبانی فیزیکی و ریاضی برای اصل پایستگی انرژی موفق نیست. با وجود این، تردیدی نیست که این مقاله تأثیر و نفوذ فوق‌العاده‌ای داشته است. جیمز کلارک ماکسول، دانشمند برجسته در میان فیزیکدانان بریتانیایی سالهای ۱۸۶۰ و ۱۸۷۰، برنامهٔ کلّی هلمهلتز را به‌عنوان وجدانی هشیار برای پیشرفتهای آیندهٔ علم فیزیک می‌دانست. ماکسول در تقدیری از هلمهلتز در سال ۱۸۷۷ می‌نویسد: «برای تقدیر ارزش کامل علمی رسالهٔ کوچک هلمهلتز. . . ما باید ازکسانی که بزرگترین اکتشافات در ترمودینامیک و شاخه‌های دیگر فیزیک جدید را مدیون آنان هستیم، بپرسیم چندبار این رساله را تماماً خوانده‌اند و چند وقت یک‌بار در حین پژوهشهایشان احساس کرده‌اند که بیانات وزین هلمهلتز مانند یک توان محرک مقاومت‌ناپذیر بر ذهنشان اثر گذاشته است؟»

آنچه ماکسول و فیزیکدانان دیگر به آن توجه کرده‌اند عبارتهایی از این قبیل بوده است: «وظیفه [علم نظریه‌ای] وقتی کامل خواهد شد که تحویل یا فروکاستی پدیده‌ها به نیروهای ساده، کامل شده باشد و همزمان بتوان ثابت کرد که تنها برای پدیده‌ها، چنین فروکاستی امکان‌پذیر خواهد بود. در این صورت این امر به عنوان نوعی روش مفهومی لازم برای ادراک طبیعت خواهد شد، و ما می‌توانیم حقیقت عینی به طبیعت نسبت دهیم.» هنوز هم درگسترهٔ وسیعی، برنامهٔ فیزیک نظریه‌ای همین است.

فیزیولوژی

هلمهلتز پس از سال ۱۸۴۷، تنها گاه و بی‌گاه به مطالب مربوط به ترمودینامیک می‌پرداخت. در این زمان کار او متمرکز بر علم پزشکی، بخصوص مبانی فیزیکی فیزیولوژی بود. او می‌خواست بنای علم زیست فیزیکی را بسازد که مقدمات کار آن به‌وسیلهٔ مولر[1]، استاد فیزیکش در برلین، و به‌وسیلهٔ همکارانش دو بوا-ریموند[2]، لودویگ و بروک[3] از مکتب ۱۸۴۷ مطرح شده بود. پیشرفتهای هلمهلتز در زمینه‌های علمی خارق‌العاده بود. او به‌مدت شش سال استاد فیزیولوژی درکونیگزبرگ و سپس به‌مدت

1. Müller 2. duBois-Reymond 3. Brücke

سه سال استاد فیزیولوژی و کالبدشناسی در بُن بود. وی از بُن به هایدلبرگ، یکی از پیشرفته‌ترین مراکز علمی در اروپا رفت. طی سیزده‌سالی که به‌عنوان استاد فیزیولوژی در هایدلبرگ بود، بیشترین کار در زمینهٔ زیست‌فیزیکش را به‌پایان رساند. مسائل اصلی مورد علاقهٔ او، نظریه‌های بینایی و شنوایی، و مسئلهٔ کلی او، ادراک بود. هلمهلتز بین سالهای ۱۸۵۶ و ۱۸۶۷ تألیف جامعی دربارهٔ بینایی، سه مجلد رساله‌ای در باب نورشناسی فیزیولوژیکی و در سال ۱۸۶۳ اثر مشهورش با عنوان احساسهای لحن صوت (*Sensations of Tone*) وگزارش وسیعی دربارهٔ شنوایی و موسیقی را منتشرکرد. اثر هلمهلتز دربارهٔ ادراک، در زمان حیات او، با تحسین فراوان مواجه شد، اما مهمتر آنکه به‌لحاظ تلاشهای دانشمندی که کار تحقیقی دشواری را از مراحل اولیهٔ آن به‌انجام رسانده است، هلمهلتز هنوز هم در میان آنان که برای فهمیدن ادراک می‌کوشند مورد احترام است. ادوارد بورینگ[1] نویسندهٔ متن جدیدی دربارهٔ احساس و ادراک، کتابش را با این شرح به هلمهلتز اهدا کرد که: «اگر کسی اعتراض کند که کتاب را نباید به شخص متوفی اهدا کرد، پاسخ من این است که هلمهلتز نمرده است. تن آدمی ممکن است پیش از عقل و ذهنش بمیرد، و یا برعکس. اهدای من بیانگر جاودانگی هلمهلتز است ـ نوعی جاودانگی که برای بسیاری از ما آرزویی تحقق‌ناپذیر است.»

فیزیک

در سال ۱۸۷۱، هلمهلتز با رسیدن به سن پنجاه‌سالگی موفقیتی بیشتر از هر فیزیولوژیدان دیگری در جهان داشت و یکی از مشهورترین دانشمندان آلمان بود. او فوق‌العاده سخت‌کوش بود، غالباً تا حدی که سلامتی بدنی و روانی او را به‌مخاطره می‌انداخت. او می‌توانست آهنگ سریع و بی‌امانش را به آرامش تبدیل کند و مانند دیگران با دستاوردها و افتخاراتش زیور دانشگاهی شود. در عوض، او به دورهٔ کاری جدید و مهاجرتی فکری مبادرت ورزید که در سالنامه‌های علمی بی‌همتا بوده و هست. او در سال ۱۸۷۱ به‌عنوان استاد فیزیک در دانشگاه برلین، به برلین رفت.

تبدیل شدن فیزیولوژیدان به فیزیکدان، تجدید حیات اعجاب‌آوری نبود. فیزیک نخستین عشق هلمهلتز بود، اما شرایط او را وادارکرد که دوره‌ای را در پزشکی و فیزیولوژی بگذراند. اوکه همواره دیدی عملگرایانه داشت، دربارهٔ مرزهای فیزیک و فیزیولوژی کاوش کرد، اعتبار خوبی به‌دست آورد، و بیش از هرکس دیگر پایه‌های علم جدید زیست‌فیزیک را تثبیت کرد. اما دلبستگی به فیزیک ریاضی و رؤیای او فروکش نکرد. با مرگ گوستاو مگنوس، کرسی استادی فیزیک در برلین خالی ماند. هلمهلتز و گوستاو کیرشهوف[2]، استاد فیزیک در هایدلبرگ، تنها نامزدهای این کرسی بودند. کیرشهوف ترجیح داد که در هایدلبرگ بماند. دو بوا ـ ریموند می‌نویسد: «بنابراین، رویداد بی‌مانندی به‌وقوع پیوست. یک دکتر و استاد فیزیولوژی به مهمترین مقام فیزیک در آلمان منصوب شد، و هلمهلتزکه خود را مادرزاد

1. Edward Boring **2.** Gustav Kirchhoff

فیزیکدان می‌دانست درنهایت به مقامی دست یافت که مناسب استعدادهای خاص و تمایلات وی بود. در نامه‌ای که برای من نوشت چنین برمی‌آمد که او از آن پس نسبت به فیزیولوژی بی‌تفاوت شده و واقعاً تنها به فیزیک ریاضی علاقه‌مند است.»

بنابراین، هلمهلتز در برلین یک فیزیکدان بود. او توجه خود را عمدتاً بر موضوع الکترودینامیک متمرکز کرد، حوزه‌ای که احساس می‌کرد «بیابانی بی‌راهه» از نظریه‌های مشاجره‌آمیز شده است. او به کار ویلهلم وِبر[1] که در آن وقت تأثیر مسلّطی بر نظریهٔ الکترودینامیک در آلمان داشت، حمله کرد. هلمهلتز پیش از اکثر همکارانش در اروپا [بجز بریتانیا] مطالعات فارادی و ماکسول بریتانیایی را دربارهٔ نظریهٔ الکترومغناطیسی ستود. هاینریش هرتز[2]، شاگرد هلمهلتز و بعداً دستیار او، آزمایشهایی انجام داد که وجود امواج الکترومغناطیسی را ثابت و نظریهٔ ماکسول را تأیید می‌کرد. همچنین از جملهٔ گروه شاگردان برجسته و دستیاران هلمهلتز، لودویگ بولتزمن[3]، ویلهلم وین[4] و آلبرت مایکلسن[5] بودند. بولتزمن بعداً بنیانهایی برای تفسیر آماری ترمودینامیک پی‌ریزی کرد. (فصل ۱۳ را ببینید.) کار بعدی وین دربارهٔ تابش گرما، یکی از سررشته‌های لازم را برای نوشتن مقالهٔ انقلابی نظریهٔ کوانتوم به ماکس پلانک، استاد فیزیک نظریه‌ای در برلین و دست‌پروردهٔ هلمهلتز، داد. آزمایشهای بعدی مایکلسن دربارهٔ سرعت نور مبنای نظریهٔ نسبیت اینشتین را فراهم آورد. هلمهلتز «آخرین فیزیکدان بزرگ کلاسیک» بعضی از نظریه‌پردازان و آزمایشگران را که درصدد اکتشاف فیزیک جدیدی بودند در برلین گردآوری کرده بود.

تصویری مبهم

این تصویری بود از هلمهلتز دانشمند و متفکر مشهور. اما او چگونه انسانی بود؟ با وجود برجستگی فوق‌العادهٔ او، پاسخ چنین پرسشی دشوار است. زندگینامهٔ معتبری تألیف لیوکونیگز برگر[6]، دربارهٔ واقعیتهای زندگی و کار هلمهلتز صادقانه است، ولی از لحاظ موثقیت ذکر کامل ویژگیهای شخصی او نیز تحسین‌برانگیز است. نوشته‌های هلمهلتز چندان ثمربخش نیست، گرچه قصد او این بوده است که مقالاتش را برای خوانندگان معمولی بنویسد سبک نگارش او نیز به‌شدت برون‌گرایانه‌تر از آن است که چیزی بیشتر از نگاه اجمالی گاه و بیگاه احساسی و الهامی که در کار او آورده می‌شد، به‌دست دهد. برای ما قطعاتی از ویژگیهای انسان هلمهلتز به‌جا مانده است. ما باید مانند باستان‌شناسان این قطعه‌ها را با هم جفت‌وجور کنیم.

ما می‌دانیم که هلمهلتز استعداد علمی شگفت‌انگیز و ظرفیت بسیاری برای کارهای سخت داشت. جلساتی با تلاشهای ذهنی شدید، احتمالاً او را خسته و فرسوده می‌کرد و گاهی بر اثر حمله‌های میگرنی ناتوان می‌شد. اما همواره بهبود می‌یافت و در سراسر زندگی‌اش عادتهای کارکردن یک معتاد به‌کار را داشت.

1. Wilhelm Weber 2. Heinrich Hertz 3. Ludwig Boltzmann 4. Wilhelm Wien
5. Albert Michelson 6. Leo Königsberger

او از موهبت دو ازدواج رضایت‌بخش برخوردار بود. مرگ نخستین همسرش، الگا، پس از سالها که به‌صورت نیم‌علیل با هلمهلتز گذرانده بود، او را ماهها با سردرد، تب، و حمله‌های غشی عاجز کرده بود. با وجود این، مانند همیشه، کار عامل نیروبخشی برای او بود و کمتر از دو سال بعد، هلمهلتز بار دیگر ازدواج کرد. همسر دوم او، آنا، جوان و زیبا و بنا به مضمون نامه‌ای که برای تامسن نوشته بود، «یکی از زیبارویان هایدلبرگ» بود. کونیگزبرگر می‌نویسد آن زن همسری بود که «همهٔ نیازهای هلمهلتز را برآورده می‌کرد. . . فردی با قدرت روحی بسیار، مستعد، با دیدهای وسیع و آرزوهای رفیع، زرنگ در جامعه و پرورش‌یافته در جرگه‌ای بود که در آن عقل و منش انسانی به یکسان توسعه می‌یافت.» آنا در ادارهٔ امور خانواده و مسئولیتهای اجتماعی همسرش که به‌سرعت گسترش می‌یافت و به‌طورکلی در داستان موفقیت هلمهلتز در هایدلبرگ و برلین سهمی اساسی داشته است.

هلمهلتز برای انجام آنچه موفق به انجام آنها شده است، می‌باید به‌شدت جاه‌طلب بوده باشد، اما به‌نظر می‌رسد او راه موفقیت را بدون تظاهر و ادّعا پیموده است، بدون آنکه بحثی در مورد جامعیت، مهارت علمی او و موارد دیگری از این قبیل در میان باشد. ماکس پلانک، کسی که می‌توان به رأی او دربارهٔ جامعیت و پیشوایی روشنگری عقلانی بدون تظاهر اعتماد کرد، در مورد دوستی‌اش با هلمهلتز در سالهای ۱۸۹۰ در برلین می‌نویسد:

> من با هلمهلتز . . . به‌عنوان یک انسان شریف آشنا شدم و به‌عنوان یک دانشمند به او احترام می‌گذارم. زیرا او با همهٔ شخصیت، صداقت در اعتقادها و خصلت فروتنی، تجسمی از شکوه و صحت علم بود. این ویژگیهای شخصیتی که با مهربانی صادقانهٔ انسانی تکمیل می‌شد، قلب مرا عمیقاً تحت تأثیر قرار می‌داد. زمانی در حین مذاکره‌ای، او با چشمانی آرام، کنجکاو، نافذ، و با وجود این بسیار رئوفانه به من نگاه می‌کرد، گویی من با یک احساس اطمینان و دلبستگی بی‌حدّ کودکانه منکوب می‌شدم و احساس می‌کردم که می‌توانم هرچه را در ذهن دارم به او واگذار کنم.

کسان دیگری که هلمهلتز را بیشتر از دور شناخته‌اند برداشتهای متفاوتی داشته‌اند. انگلبرت برودا[1] اظهارنظر می‌کند که بولتزمن «بیشترین احترام را به‌عنوان دانشمند جهانی برای هلمهلتز قایل بود. اما هلمهلتز. . . او را به سردی ترک می‌کرد.» هلمهلتز در میان شاگردان و بعضی از همکارانش «صدراعظم رایش فیزیک آلمان» نامیده می‌شد.

هیچ تردیدی نیست که هلمهلتز علاقهٔ پرشوری به پژوهش علمی و چنگ‌اندازی دایرةالمعارفی به واقعیتها و اصول علم داشته است. با وجود این در شخصیت او چیز مخالفی برای او مشکل‌ساز بود تا بتواند احساسات و دانش خود را در کلاس درس به شاگردان منتقل کند. بار دیگر دربارهٔ وضوح تصویری از هلمهلتز در سالن سخنرانی، مدیون پلانک هستیم (در برلین): «آشکار بود که هلمهلتز هرگز

1. Englebert Broda

مطالب سخنرانیهایش را به‌طور مناسبی آماده نمی‌کند، با مکث و تردید سخن می‌گوید، و سخنش را برای یافتن داده‌های لازم از دفتر یادداشت کوچکش، قطع می‌کند. علاوه بر این، او به‌طور مکرر در محاسبه‌هایی که روی تخته سیاه انجام می‌داد دچار اشتباه می‌شد و اثر غیرقابل تردیدی داشت که درست همان‌قدر که ما کِسل می‌شدیم، او هم آزرده می‌شد. سرانجام کلاسهای او بیشتر و بیشتر خلوت شد، و نهایتاً دو یا سه شاگرد در کلاس درس حاضر می‌شد که یکی از آنها من بودم.»

هلمهلتز مطالعهٔ علمی را به طریق شخصیِ خاصی می‌نگریست. احتمالاً کلیات معمول را که برای دانشجویان در یک دورهٔ درسی لازم است برای او اساس علم نبود. به هر حال هلمهلتز نخستین دانشمند مشهوری نبود که از عهدهٔ بیان صریح و ایجاد جاذبهٔ علمی در کلاس درس برنیاید و (به گواهی کسانی که به‌عنوان کارآموز علمی در دانشگاه خدمت کرده‌اند) آخرین آنها هم نبوده است.

نیروی محرکهٔ عقلانی زندگی هلمهلتز تجسس پایان‌ناپذیری برای اصول بنیادی وحدت‌جویی بود. او یکی از نخستین کسانی بود که دریافت پایستگی انرژی مهمترین اصل وحدت‌جویی در فیزیک است. در سال ۱۸۸۲ او یکی از نخستین مطالعات در زمینهٔ بین رشته‌ای را آغاز کرد که به‌زودی شیمی‌فیزیک نامیده شد. اثر او دربارهٔ ادراک، وحدت فیزیک و فیزیولوژی را آشکار کرد. علاوه بر این، نظریه‌های دیدن و شنیدن او کاوشی بود دربارهٔ معنی زیباشناختی رنگ و موسیقی، که پلی بین هنر و علم ایجاد کرد. او قبلاً در چند مورد و پس از آن هم مطالبی دربارهٔ وحدت عینی و ذهنی و از زیباشناختی و عقل بیان کرده بود.

او امیدوار بود تا اصلی بیابد که از آن بتوان همهٔ فیزیک را استخراج کرد، وحدتی از وحدتها. او سالهای بسیاری را صرف این تلاش کرد. او می‌پنداشت «اصل کمترین کنش» که ویلیام رُوان هامیلتون[1]، ریاضیدان و فیزیکدان ایرلندی کشف کرده بود، منظور بزرگ او را برآورده خواهد کرد، اما هلمهلتز پیش از آنکه در کارش توفیقی حاصل شود، وفات یافت. در حدود همان زمان تامسن در تلاشی برای آنکه نظریهٔ دینامیکی‌اش را شامل همه‌چیز کند، ناموفق ماند. در قرن بیستم آلبرت اینشتین در کوشش طولانی برای فرمولبندی نظریهٔ وحدت‌یافته‌ای از الکترومغناطیس و گرانی ناموفق ماند. در سالهای ۱۹۶۰ فیزیکدانان ذره‌ای، شِلدُن گلاشو[2]، عبدالسلام[3] و استفن وینبرگ[4] نظریهٔ وحدت‌یافته‌ای از الکترومغناطیس و نیروی هسته‌ای ضعیف را بسط دادند. هنوز تحقیق برای نظریه‌های گسترده‌تر، متحد کردن فیزیک اتمی، هسته‌ای و ذره‌ای با فیزیک گرانی ادامه دارد. ما امیدواریم که این پژوهشها برای یک «نظریه‌ای برای همه‌چیز» سرانجام موفقیت‌آمیز باشد. ولی ممکن است به این تشخیص برسیم که محدودیتهایی وجود دارد. دانشمندان ممکن است هرگز روزی را نبینند که وحدت‌جویان ارضا شده باشند و متنوع‌کاران سرگرم کار نباشند.

1. William Rowan Hamilton 2. Sheldon Glashow 3. Abdus Salam 4. Steven Weinberg

۷

دانشمندی با ذوق هنری

ویلیام تامسن

یک فرد مشکل‌گشا

ویلیام تامسن خصوصیات متعددی داشت ـ فیزیکدان، ریاضیدان، مهندس، مخترع، معلم، سیاستمدار و شخصیتی مشهور بود ـ اما بیش از همه فردی مشکل‌گشا بود. او با همه نوع مسائل و مشکلات علمی و فنی ورزیده شده بود. مشکل هرچه بود، انتزاعی یا کاربردی، تامسن معمولاً بینشی خلاق و راه‌حلی ارزشمند داشت. او به‌عنوان یک دانشمند و فن‌شناس، فردی باذوق و خوش‌قریحه بود.

حتی هلمهلتز، دانشمند دیگری که شهرت مشکل‌گشایی داشت، از عملکردهای ماهرانهٔ تامسن در حیرت بود. هلمهلتز پس از نخستین ملاقات با تامسن به همسرش نوشت: «از لحاظ عقل، هوشیاری و روانی فکر، بسیار فراتر از بزرگ‌مردان علم است، که من با آنان آشنایی شخصی داشته‌ام، به‌طوری که گاهی در کنار او احساس حقارت می‌کنم.» هلمهلتز بعداً به پدرش نوشت: «او مطمئناً یکی از نخستین ریاضی‌فیزیکدانان دقیق روزگار خود است، با چنان تواناییهایی در سرعت اختراع که در دیگران ندیده‌ام.»

تامسن و هلمهلتز دوستان خوبی شدند، و در سالهای بعد، تامسن بحثهای موضوعات مورد علاقهٔ متقابلشان را به یک رقابت ممتد می‌کشانید که می‌توانیم بپذیریم تامسن معمولاً برنده بوده است. در یک مورد، وقتی هلمهلتز برای ملاقات تامسن در اسکاتلند سوار قایق تفریحی او بود، موضوع بحثی طولانی و ماراتونی، نظریهٔ امواج بود. هلمهلتز (در نامهٔ دیگری برای همسرش) می‌نویسد: «او مشتاق بود بین ما مسابقه برقرار کند.» وقتی تامسن مجبور بود برای چند ساعتی به ساحل برود، به مهمان خود گفت: «هلمهلتز مواظب باش وقتی من دور می‌شوم در فکر امواج نباشی.»

استعداد مشکل‌گشایی تامسن بیشتر بر مبنای ذوق ریاضی غیرعادی او بود. او در ریاضیات اعجوبه‌ای بود. در دوران نوجوانی در دانشگاه گلاسکو (جایی که پدرش استاد ریاضیات بود) پذیرفته

شد و جایزه‌های فلسفهٔ طبیعی و نجوم را دریافت کرد. در شانزده‌سالگی نظریهٔ تحلیلی فوریه دربارهٔ گرما را خواند، و به‌درستی از روشهای ریاضی فوریه در برابر انتقاد فیلیپ کلاند[1]، استاد ریاضیات دانشگاه ادینبورو، دفاع کرد. این کار در سال ۱۸۴۱، سالی که تامسن به‌عنوان دانشجوی دورهٔ کارشناسی وارد کمبریج شد، در مجلهٔ ریاضی کمبریج انتشار یافت. تامسن زمانی که فارغ‌التحصیل شد، دوازده مقالهٔ تحقیقاتی منتشر کرده بود که عنوان همهٔ آنها دربارهٔ ریاضیات محض و کاربردی بود. اکثر این مقاله‌ها با نام مستعار ".P.Q.R" نوشته شده بود، زیرا برای یک دانشجوی دورهٔ کارشناسی مناسب نمی‌دانستند که وقت خود را صرف نوشتن مقالات بدیع و بی‌سابقه کند.

عنصر دیگر استعداد تامسن که مطمئناً در موفقیت وی تأثیر داشته، ظرفیت عظیم کار سخت او برای یک هدف معین بوده است. او ۶۶۱ مقاله نوشت و حق ثبتهایی برای ۶۹ اختراع داشت. بین سالهای ۱۸۴۱ و ۱۹۰۸، او هر سال دست‌کم دو و گاهی تا بیست‌وپنج مقاله منتشر کرد. او هرجا مسافرت می‌کرد، نمونه‌های چاپی و یادداشتهای پژوهشی‌اش را با خود می‌برد و هر وقت آمادگی روحی داشت که اغلب اوقات هم داشت، روی آنها کار می‌کرد. هلمهلتز (در یکی از نامه‌های پرشور برای همسرش) از حال‌وهوای عرشهٔ قایق تفریحی تامسن به هنگامی که انبوهی از «محاسبات» ذهنش را اشغال کرده بود می‌نویسد:

> تامسن به‌قدری خود را آزاد و فارغ از محیط می‌پنداشت که دفتر یادداشت ریاضی‌اش را به‌همراه داشت و به‌محض اینکه در میان مدعوین موردی برای او پیش می‌آمد، شروع به محاسبه می‌کرد که نوعی بهت‌زدگی در مهمانی ایجاد می‌شد. چه می‌شد اگر من هم برلینی‌ها را با همین شیوه عادت می‌دادم؟ اما ساده‌لوحانه‌ترین این رفتارها در روز جمعه‌ای بود که او مهمانان زیادی را به قایق تفریحی‌اش دعوت کرده بود. به‌محض اینکه قایق در مسیری به حرکت درآمد و هرکس از لحاظ ایمنی تلوتلوخوردن قایق در جایی از عرشه نشست، تامسن ناپدید شد. او به کابین رفته و مشغول محاسبه بود، درحالی‌که مهمانان به حال خود ماندند تا مادامی که حال و حوصله دارند یکدیگر را سرگرم کنند، طبیعی است که آنان خیلی سرحال نباشند.

ممکن است تامسن میزبان باملاحظه‌ای نبوده باشد، اما او قادر بود در تشکیلات علمی، صنعتی و دانشگاهی زمان خود با کارایی فراوانی تأثیرگذار باشد. او در بیست‌ویک‌سالگی استاد فلسفهٔ طبیعی در دانشگاه گلاسکو شد. یکی از نخستین دستاوردهای علمی او تأسیس اولین آزمایشگاه فیزیک بریتانیایی بود. تحقیقات او، نه‌تنها در بریتانیا بلکه در اروپا به‌سرعت شهرت یافت. او در بیست‌وهفت‌سالگی به عضویت انجمن سلطنتی انتخاب شد. در سی‌ویک‌سالگی ۹۶ مقاله منتشر کرده بود، و مهمترین دستاوردهای فیزیک و ریاضیات را پشت سر داشت.

1. Philip Kelland

او در سال ۱۸۵۵ به دوران کاری جدیدی مبادرت ورزید، کاری که استعدادهایش، به هر حال، به‌نحوی شگفت‌انگیز برای آن کار مناسبتر بود تا برای پژوهش علمی. او مدیر شرکت تلگراف آتلانتیک شد. شرکتی که تشکیل شده بود تا کار غول‌آسای کابل‌گذاری و کاراندازی کابل تلگراف به طول دو هزار مایل در امتداد اقیانوس اطلس، از ایرلند تا نیوفوندلند را، به انجام برساند. این کابل‌گذاری یکی از عجایب تکنولوژی جهان شد، اما بدون مشورت و توصیه‌های تامسن دربارهٔ طرح وسایل و نیز دربارهٔ نظریه و ساخت کابل، به‌احتمال زیاد شکست و ناکامی چشمگیری پیش می‌آورد.

پس از افسانهٔ بزرگ کابل آتلانتیک که موفقیت نهایی آن به مدت ده سال به‌طول انجامید، شهرت تامسن بسیار فراتر از محافل علمی و دانشگاهی گسترده شد. او مشهورترین دانشمند بریتانیایی بود، همچنان‌که هلمهلتز سزاوار بود مشهورترین دانشمند آلمان باشد. تامسن از درآمد شرکت کابل و از اختراعاتش ثروتمند شد، و برای سرمایه‌گذاریهایش ترتیب عاقلانه‌ای داد. در سال ۱۸۶۶، سالی که طرح کابل‌گذاری کامل شد، تامسن به لقب سِر نایل آمد. او در سال ۱۸۹۲ تا حدی به‌خاطر دلایل سیاسی (تامسن عضو فعال حزب لیبرال هواخواه اتحاد بود که با خودمختاری برای ایرلند مخالفت می‌کرد.) به عضویت مجلس لُردها، با عنوان بارون کلوین از لارجز[1] ارتقا یافت. (لارجز شهرکوچکی در دهانهٔ رود کلاید، محل مِلک تامسن بود؛ رودخانهٔ کلوین از دانشگاه گلاسکو می‌گذرد.)

چنانکه یکی از زندگینامه‌نویسهای او، سیلوانوس تامپسن[2]، به ما می‌گوید، تامسن «مردی غرق‌شده در کارش» بود. اما او همسری فداکار و خانواده‌دوست بود. او همیشه با پدرش، خواهرش الیزابت و برادرش جیمز، استاد مهندسی که در علاقه‌مندی به ترمودینامیک با او سهیم بود، ارتباط صمیمانه‌ای داشت. تامسن دوبار ازدواج کرد. همسر اول او مارگارت کِروم[3] در تمام مدت ازدواجش علیل بود و به مراقبت فراوان نیاز داشت که تامسن با بلندنظری دریغ نمی‌کرد. مرگ او در سال ۱۸۷۰ ضربهٔ شدیدی برای تامسن بود. چند سال بعد او با فرانسیس بلاندی[4] که همیشه فانی نامیده می‌شد ازدواج کرد، فانی دختر زمیندار ثروتمندی بود. هرچه ازدواج اول او مصیبت‌بار بود، در عوض ازدواج دومش خجسته و با خوشبختی همراه بود. فانی خونگرم، اجتماعی و خوش‌ذوق بود. او مدیر کارآمد خانوادهٔ تامسن شد و یک زندگی اجتماعی اشرافی را در گلاسکو با عنوان بانوی دوم تامسن و سپس با عنوان بانو کلوین بنا نهاد.

مسئلهٔ کارنو ـ جول

دورهٔ زندگی تامسن وجوه متعددی داشت، سیمایی از او که در اینجا موردنظر ماست کارش دربارهٔ اصول ترمودینامیک است. این فصل از زندگی تامسن در سال ۱۸۴۶ آغاز شد. او پس از فارغ‌التحصیل شدن از کمبریج راهی پاریس شد و به‌مدت شش ماه در آنجا ماند تا با ریاضیدانان و آزمایشگران

1. Largs 2. Silvanus Thompson 3. Margaret Crum 4. Frances Blandy

فرانسوی ملاقات کند. او با ژ.ب. بایو[1] و ا.ل. کوشی[2] ملاقات کرد، گفتگوی طولانی با ژوزف لایوویل[3] و شارل فرانسیو استورم[4] داشت و طی ماههای تابستان در آزمایشگاه ویکتور رینو کار کرد. اما دو فرانسوی که بیشترین تأثیر را بر او داشتند دیگر زنده نبودند.

تامسن در پاریس، ابتدا جداً در فکر کار سادی کارنو بود. مقالهٔ کلاپیرون دربارهٔ روش کارنو توجهش را جلب کرد و او بیهوده برای به‌دست آوردن یک نسخه از کتاب اصلی خاطرات (*memories*) او، همه‌جای پاریس را جستجو کرد. چنانکه در فصل ۳ دیدیم، نظریهٔ کارنو به طرحهای ماشین حرارتی از جمله ماشینهای بخار مربوط می‌شد که عمل آنها به‌صورت چرخه‌هایی است از تولید برونداد کار از درونداد گرما. کارنو به این نتیجه رسیده بود که ماشینهای حرارتی با «سقوط» گرما از دماهای بالا به دماهای پایین به راه می‌افتند، بسیار شبیه چرخهای آبی که با سقوط آب از ترازهای گرانش بالا به ترازهای گرانش پایین به حرکت درمی‌آیند. کارنو همچنین به این نتیجه رسید که ماشین گرمایی ایده‌آل ـ ماشینی که برونداد کار ماکزیمم بر واحد درونداد گرما را فراهم می‌کند ـ همواره می‌باید با نیروهای محرکهٔ بسیار کوچک عمل کند. چنین دستگاه ایده‌آلی می‌تواند، بدون هیچ تغییر محسوسی در ماشین حرارتی یا محیط آن، معکوس شود.

تامسن پیش از آنکه از طریق کلاپیرون با کارنو در سال ۱۸۴۵ آشنا شود، قویاً تحت تأثیر نظریه‌پرداز بزرگ دیگر فرانسوی، مرحوم ژوزف فوریه قرار گرفته بود. تامسن حتی پیش از ورود به کمبریج شاهکار فوریه دربارهٔ نظریهٔ گرما را خوانده بود. او بخصوص روش نظریه‌ای اگنوستیکی (ندانم‌گرایی) فوریه را تحسین می‌کرد، روشی بر مبنای مدلهای ریاضی که مفید بودند، اما در عین حال دربارهٔ پرسش دشوار ماهیت گرما پاسخ مشخصی نداشت.

نظریهٔ متداول در زمان کارنو، گرما را ماده‌ای سیال به‌نام «کالریک» می‌دانست که انهدام‌پذیر و ایجادشدنی نیست. کارنو نظریهٔ کالریک را پذیرفت و سقوط کالریک را، آب‌گونه، از دماهای بالا به پایین تصور کرد، که وقتی سقوط می‌کند ماشین‌آلات حرارتی را به‌حرکت درمی‌آورد. در سالهای ۱۸۴۰، نظریهٔ کالریک معارضانی اندک، اما در حال رشد داشت. در میان آنان جیمز جول بود که اصرار می‌ورزید گرما به کالریک ارتباطی ندارد، بلکه به‌نحوی با حرکت مولکولهای تشکیل‌دهندهٔ ماده مربوط است. بر طبق این دیدگاه ـ که تامسن بعداً آن را «نظریهٔ دینامیکی گرما» می‌نامید ـ اثر مکانیکی یک ماشین حرارتی با سقوط کالریک تولید نمی‌شود، بلکه مستقیماً حاصل حرکت مولکولی است.

نظریهٔ فوریه در این مناقشه طرفداری هیچ‌یک را نمی‌کند، ولی به توصیف دقیق انواع وسیعی از پدیده‌های گرمایی می‌پردازد. تامسن بخصوص تحت تأثیر نحوهٔ برخورد فوریه با «رسانش» [هدایت] آزاد گرما از دمایی بالا به دمایی پایین بدون تولید هیچ اثر مکانیکی، قرار گرفته بود. این مورد منتها درجهٔ مخالف دستگاه ماشین حرارتی ایده‌آل کارنو بود. گرچه در هر دو مورد گرما از داغی به سردی می‌رود، کارنو تصور می‌کرد با سقوط گرما برونداد کار ماکزیمم تولید می‌شود، درحالی‌که تصور فوریه

1. J.B. Biot 2. A.L. Cauchy 3. Joseph Liouville 4. C.F. Sturm

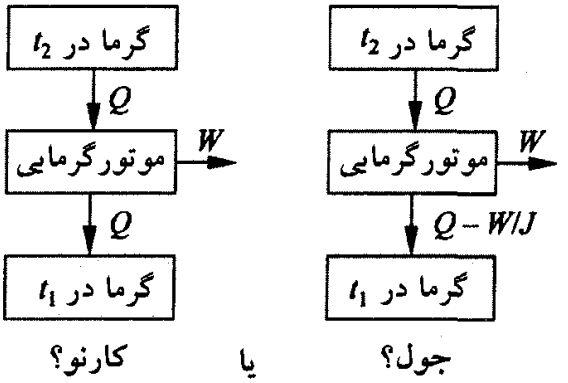
این بود که اصلاً برونداد کاری وجود ندارد. برای تامسن تفاوت بین دریافتهای کارنو و فوریه جالب بود. او مطمئن بود که وقتی یک سیستم کارنویی، با بهترین اجرای ممکن، به یک سیستم فوریه‌ای، با بدترین اجرای ممکن تبدیل می‌شود، چیز مهمی از لحاظ نظریه و عمل از دست می‌رود.

کارنو و فوریه، هر دو در بسط و توسعهٔ دیدگاه تامسن دربارهٔ نظریهٔ گرما تأثیر قاطع و بسیار مهمی داشته‌اند. هر دو دانشمند فرانسوی دربارهٔ فرایندهای گرمایی مطالب مهمی برای گفتن داشتند، و تامسن نمی‌توانست ناسازگاری در استنتاجات آنان بیابد. در سال ۱۸۴۷، تامسن ناگهان با نفوذ فرد سومی مواجه شد. درگردهمایی سال ۱۸۴۷ انجمن بریتانیایی برای پیشرفت علم در اکسفورد، تامسن با جیمز جول ملاقات کرد و با بعضی دیدگاههای نظریه‌ای و نتایج آزمایشگاهی او آشنا شد، که تامسن ترجیح می‌داد آنها را نادیده بگیرد، زیرا با تعبیر و تفسیرهای او از کارنو در تضاد بود.

در اجلاس اکسفورد، جول نتایجی را که از آزمایشهای مشهور چرخ پرّه‌دارش به‌دست آورده بود گزارش کرد. در سال ۱۸۴۷، زمانی که تامسن مطالبی را از او شنید، جول توانسته بود به‌طور قانع‌کننده‌ای ثابت کند که هم‌ارز مکانیکی گرما، در آزمایشهای گوناگونش، دقیقاً ثابت است. جول آزمایشهایش را با فرض اینکه گرما و کار مستقیماً و دقیقاً به یکدیگر تبدیل‌پذیرند، تعبیر می‌کرد. کار انجام‌شده به‌وسیلهٔ چرخ پرّه‌دار و دیگر وسایل کارآمد در طرحهای آزمایشهایش، گم نمی‌شد: این کار کاملاً به یک مقدار هم‌ارز از گرما تبدیل می‌شد. جول همچنین متقاعد شده بود که تبدیل مخالف، گرما به کار امکان‌پذیر است. به‌نظر او، این تبدیل با هر وسیلهٔ ماشین حرارتی انجام می‌شود. درونداد گرمایی خالص به ماشین حرارتی از دست نمی‌رود؛ این گرما به یک مقدار هم‌ارز کار تبدیل می‌شود.

تبدیل گرما به کار در یک ماشین حرارتی، ادعای دوم جول بود که تامسن را آشفته می‌کرد. در سال ۱۸۴۷ تامسن به نظریهٔ کالریک که گرما را نوعی سیال می‌دانست اعتقادی نداشت، اما او دلیلی نمی‌دید که اصل متعارف دیگر نظریهٔ کالریک یعنی پایستگی گرما را کنار بگذارد. برای تامسن و پیشینیان او، از جمله کارنو، این بدان معنی بود که یک سیستم در یک حالت معین مقدار گرمای ثابتی دارد. اگر این حالت با حجم معین V و دمای t معین شده باشد، گرمای Q محتوی سیستم تنها به V و t بستگی دارد. به زبان ریاضی، گرما یک تابع حالت است و می‌توان آن را به‌صورت $Q(Vt)$ نوشت که وابستگی دقیق گرما به دو متغیر تعیین‌کنندهٔ حالت یعنی V و t را نشان می‌دهد. در سال ۱۸۴۷ برای تامسن این اصل یک بخش اساسی از نظریهٔ کارنو بود و «با انکار آن، کل نظریهٔ گرما که در آن پایستگی گرما اصل بنیادی است، واژگون می‌شود.»

ماشینهای گرمایی مفید همیشه به‌صورت چرخه‌هایی عمل می‌کنند. در یک چرخهٔ کامل، سیستم در یک حالت معین آغاز می‌شود و به آن حالت بازمی‌گردد، پس، بنابر اصل متعارف پایستگی، یک ماشین گرمایی در انتهای چرخه‌اش محتوی همان مقدار گرمایی است که در آغاز چرخه داشته است. بنابراین، در یک چرخهٔ عمل، نمی‌تواند کسر خالصی از گرما به کار یا چیز دیگری تبدیل شده باشد. شکل ۷ـ۱ این محدودیت و معضل تامسن و همچنین عمل ماشین حرارتی را بنابر ادعای جول نشان می‌دهد.



شکل ۷ـ۱ ماشین حرارتی بین یک دمای بالای t_2 و یک دمای پایین t_1 عمل می‌کند، آن‌طور که تامسن در نظریه‌های بحث‌انگیز کارنو و جول می‌دید. Q نمایندهٔ گرما، W کار، J هم‌ارز مکانیکی گرمای جول، $\frac{W}{J}$ هم‌ارز گرمایی برای W. در طرح کارنو، هیچ گرمایی از دست نمی‌رود، اما به تصور جول، مقدار $\frac{W}{J}$ گرما از دست می‌رود.

حتی مشکل بیشتر، وفق دادن نظریهٔ جول بود با آنچه ظاهراً در فرایندهای رسانش‌ـگرمایی‌ـآزاد روی می‌دهد، از نوعی که فوریه تحلیل می‌کرد. گرما را به‌جای اینکه به‌طور آزاد هدایت شود، همیشه می‌توان به یک ماشین حرارتی متصل و آن را وادار به تولید کار کرد. وقتی فرایندهای رسانش (هدایت) امکان وقوع داشته باشد برای این کار استفاده نشده چه روی می‌دهد؟ بنا به تعبیر جول، در عمل ماشین حرارتی هیچ چیز از دست نمی‌رود. اما تامسن اطمینان داشت در سیستمی بدون انجام کار، با رسانش محض (یا هر دستگاهی که امکان رسانش گرمای آزاد داشته باشد) چیزی از دست می‌رود. او در یکی از نخستین مقالاتش دربارهٔ نظریهٔ گرما که در سال ۱۸۴۹ منتشر شد، تردید و سردرگمی‌اش را چنین بیان می‌کند: «وقتی عمل گرمایی به این نحو در رسانش گرما داخل یک جسم جامد مصرف می‌شود، اثر مکانیکی‌ای که می‌تواند تولید کند، چه می‌شود؟ هیچ چیز نمی‌تواند در اعمال طبیعت از بین برود، هیچ انرژی‌ای نابود نمی‌شود. در این صورت چه اثری به‌جای اثر مکانیکی از دست‌رفته، تولید می‌شود؟ نیاز به یک نظریهٔ کامل برای گرما ضروری است تا به این پرسش پاسخ دهد. اما در وضع فعلی علم، هیچ پاسخی نمی‌توان داد.» این نخستین موردی بود که تامسن واژهٔ «انرژی» را به‌کار می‌برد و نخستین گام به‌سوی معنی جدید این واژه بود.

مسئلهٔ دماسنجی

تامسن در همان زمان که درکشمکش با این مسائل بود، جنبهٔ دیگر میراث کارنو، یعنی تابع وابسته به دما را تحقیق می‌کرد که کارنو آن را با F نشان می‌داد. تامسن این تابع را با μ نشان داد و آن را «تابع کارنو» نامید. او پیشنهاد کرد که دو خاصیت بنیادی این تابع‌ـاینکه فقط وابسته به دما باشد و اینکه محاسبات آن در همه حال، شکل ریاضی یکسان داشته باشدـ برای تعریف یک مقیاس دمای مطلق جدید به‌کار گرفته شود.

قبلاً، دماهای مطلق با مقیاسی بنابر رفتار یک گاز ایده‌آل بیان می‌شد. اگر دما را ثابت بگیریم، حجم V یک گاز ایده‌آل با افزایش فشار، کاهش می‌پذیرد،

$$\mathrm{V} \propto \frac{1}{P} \quad \text{(دمای ثابت)}$$

اگر فشار ثابت گرفته شود، حجم گاز ایده‌آل با افزایش دما، افزایش می‌یابد،

$$V \propto T \quad \text{(فشار ثابت)}$$

T دمای اندازه‌گیری شده، مقیاس مطلقی را نشان می‌دهد که از صفر آغاز می‌شود و مقادیر منفی در آن مجاز نیست. از ترکیب دو تناسب به‌صورت یک تناسب، به‌طور کلی خواهیم داشت

$$\mathrm{V} \propto \frac{T}{P}$$

یا

$$\frac{PV}{T} = \text{ثابت} \qquad (۱)$$

ثابت این معادله را، چون مقداری ثابت است، می‌توان با اندازه‌گیری P و V در هر دمای T معین کرد. معمولاً، دمای مخلوطی از آب و یخ ($0^\circ\mathrm{C}$) انتخاب شده است. هرگاه P_0، V_0 و T_0 در آن دما اندازه‌گیری شوند، معادلهٔ (۱) ثابت را به‌صورت زیر ارزیابی می‌کند

$$\text{ثابت} = \frac{P_0 V_0}{T_0}$$

بنابراین،

$$\frac{PV}{T} = \frac{P_0 V_0}{T_0} \qquad (۲)$$

دمای مطلق T چگونه با دمای معمولی اندازه‌گیری شدهٔ t، مثلاً، با مقیاس سلسیوس، مربوط می‌شود؟ فرض کنیم که دو مقیاس با ثابت a با هم تفاوت داشته باشند، به‌طوری که

$$T = t + a \qquad (۳)$$

با جانشین کردن این معادله در معادلهٔ (۲) خواهیم داشت

$$PV = \frac{P_0 V_0}{T_0}(t + a) \qquad (۴)$$

انبساط گاز با افزایش دما، که به‌صورت ریاضی با مشتق $\frac{dV}{dt}$ بیان می‌شود، قابل اندازه‌گیری است. این مشتق با تقسیم بر حجم V خودش «ضریب انبساط» α را معین می‌کند که آن هم قابل اندازه‌گیری است.

$$\alpha = \frac{1}{V}\frac{dV}{dt}$$

بر طبق این معادله و معادلهٔ (۴) با به‌کارگرفتن $P = P_0$ خواهیم داشت

$$\alpha = \frac{1}{t + a} \qquad (۵)$$

پس مقدار اندازه‌گیری‌شده‌ای از ضریب انبساط α در یک دمای معلوم، ثابت a در معادلهٔ (۳) را ارزیابی و تعریف دمای مطلق را کامل می‌کند. در اواسط قرن نوزدهم، ژوزف گیلوساک و جان دالتون،

مستقل از هم α را برای چند گاز اندازه‌گیری کردند و مقداری در حدود ۲۶۷ را برای ثابت a در مقیاس سلسیوس به‌دست آوردند، که مقدار جدید متناظر آن ۲۷۳ است. در صفر دمای مطلق $T = 0$، و بر طبق معادلهٔ (۳)، دمای سلسیوس $t = -a = -273^\circ\mathrm{C}$ است.

تامسن از این طرز عمل مقیاس دمای مطلق رضایت نداشت. او معترض بود که این عمل مبنای رضایت‌بخشی برای یک نظریهٔ کلی دربارهٔ دما نیست. او استدلال می‌کرد که گازهای حقیقی هرگز به‌طور واقعی ایده‌آل نیستند، و این به‌معنی پیچیدگیهای خاص قانون گاز است که برای هر گازی تفاوت می‌کند و برای اندازه‌گیریهای صحیح دما باید معین شود: قانون همگانی گاز برای گازهای حقیقی وجود ندارد. از سوی دیگر تابع کارنو دقیقاً فاقد همگانی بودن گاز حقیقی بود. این تابع همیشه یکسان بود و اهمیتی نداشت که چه ماده‌ای برای تعیین آن به‌کار برده می‌شود.

تامسن پیشنهاد کرد که تابع کارنو به‌عنوان مبنایی برای یک مقیاس دمایی جدید به‌کارگرفته شود. او در سال ۱۸۴۸ این مفهوم را به‌عنوان اصلی از دماسنجی مطلق بیان کرد. ایدهٔ اصلی او چنانکه بعداً مطرح کرد این بود که «تابع کارنو (از خواص هر مادهٔ خالصی، هرچه باشد به‌دست می‌آید، ولی برای همهٔ اجسام در دمای یکسان، یکسان است.) یا هر تابع دلخواهی از تابع کارنو را می‌توان به‌عنوان دما تعریف کرد و بنابراین، اساس یک سیستم مطلق دماسنجی است.» تامسن دو پیشنهاد دربارهٔ این تابع مقتضی مطرح کرد، یکی در سال ۱۸۴۸ که بعداً متروک ماند و دیگری در سال ۱۸۵۴.

تامسن دریافت که تصمیم‌گیری دربارهٔ مسئلهٔ دماسنجی آسان نیست. تصمیم نهایی او تا وقتی که جنبه‌های دیگر نظریهٔ گرمایی او حل و فصل نشده بود، حاصل نشد. مانع عمدهٔ پیشرفت، باز هم جنبهٔ دیگر مُعضل دوراهی کارنو-جول بود. تامسن راههایی یافت برای به‌دست آوردن معادلاتی از نظریهٔ کارنو که ممکن بود برای محاسبهٔ تابع μ کارنو به‌کار آید، و در سال ۱۸۴۹ جدول وسیعی از مقادیر μ فراهم آورد. در ابتدا، این محاسبه، بر مبنای اعتبار کارنو، مورد اطمینان کامل تامسن بود، اما پایان سستی داشت که او نمی‌توانست آن را نادیده بگیرد. جول در سال ۱۸۴۸ در نامه‌ای به تامسن، پیشنهاد کرده بود که تابع کارنو بنابر معادلهٔ زیر متناسب با معکوس دماست

$$\mu = \frac{J}{T} \qquad (۶)$$

که در آن T بنابر مقیاس مطلق گاز ایده‌آل و J هم‌ارز مکانیکی گرمای جول است. در حدود همان زمان، هلمهلتز به همان نتیجه رسید، اما کار او هنوز در بریتانیا شناخته نشده بود.

وقتی تامسن مقایسه‌هایی بین محاسبات خود و محاسباتی براساس معادلهٔ (۶) جول انجام داد، نتوانست چیزی بهتر از توافق تقریبی به‌دست آورد. او بار دیگر با مسئله‌ای مواجه شده بود که از چالش جول با نظریهٔ کارنو مطرح می‌شد. جول به‌درستی به این جهت فکری متمایل شده بود که در داده‌هایی که تامسن برای محاسبهٔ جدول مقادیر μ به‌کار برده، اشتباهاتی وجود داشته است.

مک‌کورن رانکین[1]

تا اواخر قرن نوزدهم، اکثر ترمودینامیکدانان موضوع مورد نظرشان را در یک اثر پدیدارشناسانه می‌پروراندند: آنان دقیقاً توجه خود را به توصیف رویدادهای ماکروسکوپی معطوف می‌کردند. قانونهای ترمودینامیکی آنان از هیچ لحاظ متکی بر مدلسازی نظریه‌ای میکروسکوپی نبود، یعنی به ساختار مولکولی ماده، الگوهایی از طبیعت که می‌تواند قوانین را «توضیح» دهد توجهی نداشتند. همهٔ ترمودینامیکدانان اولیه به‌استثنای یک مورد درخور توجه، تا زمانی که مبانی نظریه‌های پدیدارشناسانهٔ ایشان محفوظ بود، در برابر وسوسه‌ای که مدلهای مولکولی نظری ابداع کنند، مقاومت می‌کردند.

این ترمودینامیکدان استثنایی مک‌کورن رانکین بود که پس از سال ۱۸۵۵ استاد مهندسی راه و ساختمان در دانشگاه گلاسکو و یک همکار تامسن شد. رانکین مانند کلازیوس و تامسن درک خوبی از پدیدارشناسی علم ترمودینامیک داشت، اما او ترجیح می‌داد روش خاص خودش را از یک مدل پیچیدهٔ فرضیه‌ای رفتار مولکولی به‌دست آورد. معاصران و اخلاف او فهم این رویکرد، و حتی باورکردن آن را بسیار دشوار می‌دانستند. مثلاً تردید مؤدبانهٔ ارزشیابی ویلارد گیبس از پرداختن رانکین به مسائل ترمودینامیک را چنین می‌خوانیم: «رانکین در روش خاص خود، با یکی از ابداعات شگفت‌انگیز قوهٔ تصور همراه است که تخمین دقیق آن بسیار دشوار است.»

رانکین مولکولهای یک گاز را در تماس نزدیک با یکدیگر تصور می‌کرد. به‌نظر او هر مولکول مرکب از یک هسته با چگالی زیاد و یک محیط کروی «اتمسفر کشسان» با چگالی نسبتاً کم است. این اتمسفرها با نیروهای جاذبهٔ هسته، در جای خود می‌مانند و عناصر اجزای سازندهٔ آنها چند نوع حرکت دارند. برجسته‌ترین آنها در محاسبات ترمودینامیکی رانکین، حرکت چرخشی بود که با تعداد زیادی از حرکات کوچک گردابی ـ شبه ـ تورنادو به‌وجود می‌آید که حول جهات شعاعی مولکول تشکیل می‌شوند. رانکین نشان داد که یک نیروی مرکزگریز در این گردابها ایجاد می‌شود، که موجب کشسانی مولکولهای منفرد و فشار برای سیستمی از مولکولها می‌شود.

به‌گفتهٔ کیت هاچیسن[2]، تاریخ‌نویس علم، سهم رانکین در علم ترمودینامیک «زودگذر بود. درواقع جای تردید است اگر بگوییم کسی از معاصران رانکین بجز تامسن حوصله داشته است که جزئیات اثر رانکین را به‌دقت خوانده باشد.» اما برای یک مخاطب دقیق، نه برای کس دیگری، نظریهٔ گرداب رانکین نوعی مکاشفه، یا رمزگشایی بود. کروزبی اسمیت[3] و م. نورتون وایز[4]، زندگینامه‌نویسان اخیر تامسن می‌نویسند: «گرچه تامسن فرضیهٔ مکانیکی خاص رانکین دربارهٔ ماهیت گرما را نپذیرفت، اما به‌زودی آماده شد تا یک نظریهٔ کلی دینامیکی گرما را بپذیرد، به این معنی که گرما نیروی زنده (vis viva) یا نوعی انرژی جنبشی است.» یکی از جاذبه‌های یک نظریهٔ دینامیک گرما ـ از رانکین یا هر کس دیگر ـ این بود که ادعای جول، یعنی تبدیل گرما به کار را موجه و مستدل می‌کرد.

1. Macquorn Rankine 2. Keith Hutchison 3. Crosbie Smith 4. M. Norton Wise

پیتر گوتری تیت[1]، فیزیکدان اسکاتلندی دیگر، می‌نویسد: «ظاهر رانکین به نهایت درجه جالب و جاذب بود و نزاکت او تقریباً شبیه اشراف‌زاده‌ای سُنّت‌گرا می‌نمود.» برونداد خلاقیت او بسیار زیاد بود، از جمله، علاوه بر مقالات متعدد دربارهٔ ترمودینامیک، مقالاتی دربارهٔ کشسانی، تراکم‌پذیری، تبدیلهای انرژی و نظریهٔ نوسانی نور نیز بود. او همچنین یک‌سری کتابهای درسی مهندسی، چهار رسالهٔ بزرگ مهندسی، و چند کتاب دستی پرطرفدار منتشر کرد. او هلمهلتز قرن نوزدهم علم مهندسی بود.

رانکین یک «اسکاتلندی از اسکاتلندیها»، می‌توانست تبار خود را به رابرت بروس[2] برساند. او به جمع دانشمندان و مهندسان بزرگ اسکاتلندی، از جمله جوزف بلک و جیمز وات در قرن هجدهم و تامسن و ماکسول در میان معاصرانش، پیوست. او همچون کارنو دورهٔ آموزشی مهندسی دیده بود و روشهای فیزیک را برای پیشرفت علم مهندسی پذیرفته بود.

رانکین، با کلازیوس و تامسن، یکی از بنیانگذاران ترمودینامیک کلاسیک بود. با وجود این تأثیر او تقریباً در ترمودینامیک جدید نامرئی است. این قصور بعضاً به‌علت نامفهوم بودن پیچیدگی نظریهٔ گردابی اوست. اما حتی بدون در نظر گرفتن گردابها، فرمولبندی ترمودینامیک او مبهم و در بعضی نکات کلیدی، اشتباه بود. نظریهٔ او چندان مطلوب نبود که در رقابت با کلازیوس و تامسن بر پا بماند.

مسئلهٔ کارنو ـ جول حل شد

تامسن، تا حدود سال ۱۸۵۰ مسئلهٔ نظریه‌پردازی‌اش را به‌صورت انتخابی از جول ـ یا ـ کارنو می‌دید؛ به‌مدت چند سال به‌نظر می‌رسید که موفقیتهای مؤثر کارنو، کفهٔ این تعادل را به‌سمت کارنو می‌کشد. اما وجدان نظریه‌پردازی تامسن به او یادآور می‌شد که پیام جول را نمی‌توان نادیده گرفت. زمانی در سال ۱۸۵۰ یا ۱۸۵۱، تامسن کم‌کم به گشایشی پی می‌برد که در یک نظریهٔ دینامیک گرمایی، اصل تبدیل‌پذیری متقابل گرما و کار جول را بدون دور انداختن آنچه در نظریهٔ کارنو اساسی است، می‌توان حفظ کرد. او کشف کرد که نتیجه‌گیریهای مهم کارنو با نظریهٔ جول سازگار است.

این به‌معنی پیشرفت، بدون اصل پایستگی گرمای جول بود، ولی تامسن دریافت که این اصل را می‌توان با زیانی کمتر از آنچه می‌پنداشته است از نظریهٔ کارنو جدا کرد. مهمتر از همه، معادلات ریاضی اساسی‌ای بود که او از نظریهٔ کارنو استخراج کرده بود و یکی از آنها را برای محاسبهٔ مقادیر تابع μ کارنو به‌کار برده بود. استخراج این معادلات هم بدون این فرض و هم با آن، به‌خوبی ممکن می‌شد. تامسن با برداشتن این گام بسیار مهم، در سال ۱۸۵۱ به‌سرعت توانست اصول جول و کارنو را به‌هم بپیوندد و بیشترین بخش مقالهٔ طولانی‌اش را با عنوان نظریهٔ دینامیکی گرما، براساس این اصول منتشر کند.

تامسن به‌عنوان محور نظریه‌اش، برای نخستین‌بار این ایده را معرفی کرد که انرژی یک خاصیت ذاتی هر سیستم مورد نظر است. بدین لحاظ، انرژی بستگی به حجم و دمای سیستم دارد. افزایش دما سبب افزایش انرژی سیستم می‌شود. بدین معنی که انرژی سینتیک مولکولهای آن افزایش می‌یابد.

1. Peter Guthrie Tait

۲. Robert the Bruce: پادشاه اسکاتلند بین سالهای ۱۳۲۹ـ۱۳۰۶ م.

افزایش حجم ممکن است افزایش انرژی ایجاد کند. هرگاه انبساط علیه نیروهای جاذبهٔ میان مولکولها انجام شود، پیام ریاضی آن این است که انرژی یک تابع حالت است. برای حالاتی که با حجم V و دمای t معین می‌شوند، نظریهٔ تامسن به‌جای تابع گرمای $Q(V,t)$ پیشین، تابع حالت جدید انرژی $e(V,t)$ را به‌کار می‌گیرد.

گمان تامسن این بود که انرژی سیستم تنها می‌تواند با برهم‌کنش بین سیستم و محیطش تغییر کند: طبیعت مکانیسم درونی خاصی برای ایجاد یا نابودی انرژی درون مرزهای یک سیستم فراهم نکرده است. به این معنی، انرژی پایستار است. اگر یک سیستم «بسته» باشد، یعنی هیچ‌چیز مادی در آن وارد یا خارج نشود، برهم‌کنشهای آن با محیط فقط دو نوع است، گرمایش و انجام کار. گرمایش برهم‌کنش گرمایی و انجام کار، هرگونه برهم‌کنش غیرگرمایی (معمولاً مکانیکی) است. این گزاره‌ها به‌سهولت در یک معادله خلاصه می‌شوند: اگر dQ و dW گرما و کار جزیی ورودی به یک سیستم باشند، تغییر جزیی متناظر آنها در سیستم انرژی به‌صورت زیر خواهد بود

$$de = JdQ + dW \qquad (۷)$$

عامل ضرب J در dQ برای تبدیل واحدهای گرمای لازم dQ به واحدهای مکانیکی ضروری است. به‌طوری که بتوان آن را به dW اضافه کرد، همچنین با واحدهای مکانیکی بیان کرد.

سهم حساس و حیاتی تامسن، دوری گزیدن از تأکید انحصاری پیشینیانش برگرما و کار بود ـ سنتی که از کارنو آغاز شد و جول و کلازیوس از آن پیروی کردند ـ و تشخیص اینکه انرژی، این کمیّت پایسته یک خاصیت ذاتی سیستم است که تحت تأثیر گرمایش و انجام کار تغییر می‌کند. این بدان معنی نیست که بگوییم گرما و کار دو شکل انرژی‌اند، مفهوم انرژی دقیقتر از آن است. گرمایش و انجام کار دو طریق متفاوتی است که یک سیستم می‌تواند با محیط برهم‌کنش داشته باشد و انرژی آن تغییر کند.

انرژی، انرژی است، صرف‌نظر از مسیر گرمایش یا انجام کاری که می‌یابد تا وارد سیستم یا از آن خارج شود. ماکسول در نامه‌ای این مطلب را ضمن انتقاد از کلازیوس و رانکین برای تیت بیان کرد. اینان انرژی موجود در یک سیستم را با جزئیاتی بیشتر از آنچه ماکسول مجاز می‌پنداشت، تصور می‌کردند: «با توجه به شناخت ما از حالت انرژی درون یک جسم، هم رانکین و هم کلازیوس، وانمود می‌کنند که چیزی دربارهٔ آن می‌دانند. ما قطعاً می‌دانیم چه مقدار انرژی به درون جسم می‌رود یا بیرون می‌آید، و می‌دانیم که در هنگام ورود یا خروج به‌صورت گرماست یا کار، اما آنچه سیمای مبدلی به آن می‌دهد، فرضهایی در رموز اجسام است . . . که فقط رانکین، کلازیوس و همکارانشان می‌دانند.»

کلازیوس وجود یک تابع حالت $U(V,t)$ را نیز تشخیص داد که معادل $e(V,t)$ تامسن بود. اثر کلازیوس که در سال ۱۸۵۰ منتشر شد در حدود یک سال مقدم بر نظریهٔ دینامیکی گرمای تامسن بود. در سال ۱۸۵۰ او معنی فیزیکی تابع حالت $U(V,t)$ خودش را نیم‌بند می‌فهمید.

تامسن ابتدا اصطلاح «انرژی مکانیکی» را برای انرژی نظریه‌اش به‌کار گرفت. او در سال ۱۸۵۶ برای تأکید انرژی به‌عنوان وجودی که در تصرف یک سیستم است، اصطلاح «انرژی ذاتی» را معرفی کرد. هلمهلتز بعداً اصطلاح «انرژی درونی» را برای نوع انرژی مورد نظر تامسن به‌کار گرفت.

مسئلهٔ فوریه

نظریهٔ دینامیکی گرمای تامسن، شاهکار او در ترمودینامیک بود. این نظریه راه‌حل کامل و رضایت‌بخشی از کشمکش مفهومی جول-کارنو بود که دو سال پیش از آن بسیار نگران‌کننده شده بود. در آن زمان تامسن نگرانی کشمکشهای بین نظریه‌های جول و فوریه را نیز داشت. استدلال جول این بود که در عمل ماشین حرارتی واقعاً چیزی از دست نمی‌رود. هر گرمایی که ماشین حرارتی مصرف می‌کند-یعنی شامل بخشی از برونداد گرمایی نباشد-از دست نمی‌رود: آن گرما به مقدار هم‌ارزی از کار تبدیل می‌شود. اکنون تامسن می‌توانست این تحلیل از عملکرد یک ماشین حرارتی در شیوهٔ عمل بازگشت‌پذیر ایده‌آل کارنو را بپذیرد. در این مورد هیچ‌چیز از دست نمی‌رود؛ بازده ماشین حرارتی و برونداد کار، ماکزیمم مقادیر را دارند، بنابراین، چیز بیشتری نمی‌توان به‌دست آورد.

اما در منتهی‌الیه دیگر، سیستمهایی بود از نوعی که فوریه تحلیل می‌کرد. سیستمهایی که درونداد گرمایشان به برونداد گرما هدایت می‌شد و اصلاً به کار تبدیل نمی‌شد. تامسن دقیقاً متقاعد بود که در این مورد اتلافهای مهمی وجود دارد؛ همان درونداد گرما را می‌توان به یک ماشین حرارتی بازگشت‌پذیر داد و به ماکزیمم مقدار کار تبدیل کرد. در سیستم فوریه برای همهٔ این کار چه روی می‌دهد؟ سؤال مشابهی را می‌توان پرسید دربارهٔ هر ماشین حرارتی که برونداد کار آن فاقد مقدار ماکزیمم باشد. در همچون موردی، کاری که ممکن بود در یک شیوهٔ عمل بازگشت‌پذیر مفید واقع شود، از دست می‌رود.

در سال ۱۸۵۲، تامسن مقالهٔ کوتاهی منتشر کرد که به این پرسشها پاسخ می‌داد. محور ایدهٔ او این بود که گرچه انرژی هرگز در یک سیستم نابود نمی‌شود، اما ممکن است به هنگامی که به‌عنوان برونداد کار در یک عمل بازگشت‌پذیر به‌کار برده می‌شود، تخریب یا تلف شود. میزان اتلاف انرژی را می‌توان برای یک سیستم، از مقایسهٔ برونداد کار واقعی با مقدار بازگشت‌پذیری حاصل از محاسبه ارزیابی کرد. کروزبی اسمیت، تاریخ‌نویس علم که نقش تامسن در پیشرفت علم ترمودینامیک را مطالعه کرده است، خصلت غیرعادی اصل اتلاف انرژی تامسن را در ارتباط با «نظم و ترتیب» و «خلاقیت انسان» توصیف می‌کند. او در این توصیف با نقل‌قولهایی از پیشنویس نظریهٔ دینامیک گرمای تامسن، می‌گوید:

> تامسن معتقد است، در جایی که هدایت [گرما] صورت می‌گیرد، کاری که می‌باید به‌صورت یک تفاوت دمایی صورت گرفته باشد «به‌طور برگشت‌ناپذیری برای انسان از دست می‌رود» و در دسترس انسان نخواهد بود، حتی اگر در جهان مادی از دست نرفته باشد. بنابراین، چنین تغییر و تبدیلهایی از کنترل منابع قدرت انسان خارج است «که اگر فرصتی برای بازگرداندن آن دگرگونیها به سود انسان ایجاد شده بود، استفاده از قدرت فراهم می‌شد.» در اینجا استفاده از کار یا اثر مکانیکی بستگی به «خلاقیت انسان» دارد-به سازمان‌دهی مؤثر ماشینهایش برای تغییر و تبدیل تراکمهای انرژی [مثلاً گرمای دمای بالا] به آثار مکانیکی-و در این صورت این یک مسئلهٔ آرایش و نظام است، نه خلق از هیچ.

در اینجا یک مثال ساده به روشن کردن منظور تامسن کمک می‌کند. وزنه‌ای که در بالای زمین نگه داشته شده می‌تواند کار مفید انجام دهد، هرگاه بسیار آهسته سقوط کند و در عین حال ماشینی را به‌کار اندازد. اگر این ماشین ایده‌آل باشد، کار آن می‌تواند به‌صورت درونداد برای ماشین ایده‌آل دیگری وزنه را تا موضع اولیهٔ آن بالا ببرد. بنابراین، سقوط آهستهٔ وزنه در اتصال با ماشین ایده‌آل دقیقاً بازگشت‌پذیر است ـ یعنی وزنه و محیطش می‌توانند به حالت اولیه بازگردند و در این صورت هیچ اتلاف انرژی به مفهومی که تامسن توصیف می‌کند وجود ندارد.

حال فرض کنید وزنه با سقوط آزاد، بدون وجود ماشین، ساقط شود. وقتی وزنه ساقط شود انرژی پتانسیل آن به انرژی سینتیک (جنبشی) تبدیل و وقتی وزنه با زمین برخورد کند، انرژی سینتیک آن به گرما تبدیل می‌شود (مانند اثر آبشار جول) ـ در این مورد ما فرایندی «بازگشت‌ناپذیر» داریم. بدون ماشین و بدون برونداد کار، نمی‌توانیم وزنه را به موضع اولیهٔ آن در بالای زمین، بدون بعضی از ضرورتهای رفع‌نشده در محیط بازگردانیم، و قطعاً وزنه‌ها هم نمی‌توانند خودبه‌خود بالا بروند. این یک مورد حاد از بازگشت‌ناپذیری و اتلاف انرژی است: همهٔ انرژی پتانسیل اولیهٔ وزنه به گرما تبدیل و به‌طور دائم برای مقاصد مفید غیرقابل دسترس شده است.

سقوط گرما شبیه به سقوط وزنه‌هاست. گرما نیز انرژی پتانسیل دارد (نسبت به دمای مطلق)، که می‌تواند بدون اتلاف در عمل یک ماشین حرارتی بازگشت‌پذیر به‌کار گرفته بشود، یا در فرایند رسانش آزاد بازگشت‌ناپذیر فوریه کاملاً تلف شود، یا چیزی بینابین، در یک ماشین حرارتی حقیقی باشد. ما یک انتخاب تکنولوژیکی داریم: می‌توانیم یک ماشین حرارتی کارآمد یا ناکارآمد طراحی کنیم، به‌طوری که اسراف‌کننده باشد یا اسراف‌کننده نباشد.

مسئلهٔ دماسنجی حل شد

تامسن با انتشار مقاله‌اش دربارهٔ اصل اتلاف انرژی احساس کرد که توانسته است بین نظرات جول، کارنو و فوریه هم‌آهنگی ایجاد کند. اما بنیاد علم ترمودینامیکش هنوز به‌درستی کامل نشده بود. او هنوز دربارهٔ مسئلهٔ آزاردهندهٔ دماسنجی که تقریباً به‌مدت پنج سال مزاحم او بود، رأی قاطعی نداشت. مسئلهٔ اساسی این بود که چگونه وابستگی دمایی تابع کارنو μ را با دمای مطلق مربوط کند.

جای آن نیست که من در اینجا محاسبهٔ کامل کار تامسن دربارهٔ این مسئلهٔ سرسخت و یأس‌آور را ارائه کنم. تامسن امیدوار بود بتواند با استفاده از معادلاتی که از نظریهٔ کارنو به‌دست آورده بود، مقادیر تابع μ کارنو را محاسبه کند. اما وقتی فهمید بعضی از مفروضاتی را که برای محاسبه به‌کار برده معتبر نیست، شکست در این تلاش را پذیرفت. تامسن در تلاش دقیقتر و پیچیده‌تری برای محاسبهٔ مقادیر μ از جول مساعدت خواست. هدف اصلی کار جول ـ تامسن بررسی رفتار گاز حقیقی (غیرایده‌آل) بود که نتیجه‌ای موفقیت‌آمیز داشت. اما تامسن کوشید تا با استفاده از داده‌های جول، مقادیر μ را محاسبه کند و بار دیگر در جمع‌آوری امکانات محاسباتی برای کامل کردن کار، ناکام ماند.

سرانجام، در سال ۱۸۵۴، تامسن مصمم شد برای پی‌گیری تابع باز هم پیچیده و مبهم کارنو رویهٔ متفاوتی را در نظر بگیرد. او به اصل دماسنجی سال ۱۸۴۸ خود بازگشت که اظهار کرده بود تابع کارنو، یا هر تابعی از تابع کارنو را می‌توان به‌عنوان مبنایی برای تعریف یک مقیاس دمای مطلق به‌کار گرفت. بی‌تردید او تحت تأثیر ارزیابی جول از تابع کارنو در معادلهٔ (۶)، مقیاس دمای مطلق جدیدی را تعریف کرد که همین شکل را داشت. فرض او برای نشان دادن دماهایی بر مقیاس T عبارت بود از

$$T = \frac{J}{\mu} \qquad (۸)$$

او همچنین پذیرفته بود که درجهٔ مقیاس جدید، معادل درجهٔ مقیاس سلسیوس است. حتی اگر محاسبهٔ تابع μ کارنو با داده‌های موجود آن‌موقع به‌درستی امکان‌پذیر نبود، تامسن مطمئن بود که سرانجام محاسبه خواهد شد، و اصل دماسنجی او محفوظ می‌ماند. این اصل هر رابطهٔ مفروض بین دمای مطلق و μ را مجاز می‌دانست. تامسن دریافت که معادلهٔ (۶)، یکی از ساده‌ترین گزینشهای ممکن و در توافق با مقیاس دمای مطلق گاز ایده‌آل، قابل قبول و بهترین انتخاب است. پاداش زحمات تامسن در مورد مقیاس دمای مطلق این بود که دمای مطلق «کلوین» نامیده شد ("kelvin" با حروف کوچک) و نماد اختصاری آن "K" (حرف بزرگ).

مخاطرات مهارت هنر علمی

چنانکه از جمیع مطالب یافت شده درکتابهای درسی برمی‌آید، ساختار علم ترمودینامیک براساس سه مفهوم بنیادی، انرژی، انتروپی و دمای مطلق و سه قانون بزرگ فیزیکی است که نخستین آنها قانون انرژی و دوم و سوم آنها قانونهای انتروپی است. تنها بخشی از این توصیف در اثر منتشرشدهٔ تامسن دیده می‌شود. او به‌طور یقین از اهمیت مفاهیم انرژی و دمای مطلق آگاه بود، و آنها را بهتر از رقبای خود می‌فهمید، اما او در شناخت مفاد قدرتمند نظریهٔ انتروپی ناکام ماند.

درواقع، تامسن در سال ۱۸۵۴ دست به محاسبه‌ای زد که مبنایی شد برای مفهومی که کلازیوس بعداً تحقیق بیشتری به‌عمل آورد و سرانجام آن را انتروپی نامید. اما چون بیشتر اوقات موردی در کار تامسن پیش می‌آمد، عمدتاً مسئلهٔ خاصی الهام‌بخش او می‌شد که در این مورد ترموالکتریسیته یا تولید آثار الکتریکی از آثار گرمایی بود. او دربارهٔ معنی اساسی انتروپی اظهاراتی کرد و نشان داد که مبادی نظریهٔ انتروپی را می‌فهمد، اما تحلیل آن را تنها برای مسئلهٔ خاصی به‌کار می‌بُرد، و هرگز به موضع نظریهٔ جدید و مهمی نرسید که کلازیوس به‌زودی درصدد اکتشاف آن برآمد.

کلازیوس هم فوراً به مفهوم انتروپی معتقد نشد. در حدود ده سال طول کشید تا مطمئن شد که نام و نمادی برای تابع جدیدش عرضه کند. زمانی که تامسن نظری اجمالی بر ایدهٔ انتروپی داشت، ظاهراً حوصله یا انگیزه‌ای برای چنین تلاش طولانی‌مدت و احتمالاً مخاطره‌آمیز نداشت.

کرودر[1] یکی از زندگینامه‌نویسان تامسن، اظهار می‌دارد که تامسن بیش از یک بار از «حدس زدن» مفهوم ژرفترین اکتشافاتش بازماند. او می‌نویسد: «تامسن قدرت فوق‌العاده‌ای درگمانه‌زنی علمی نداشت، او برخلاف دانشمندان بزرگ نتوانست حدس بزند که در ماورای واقعیتهای آنی چه نهفته است. او در بالاترین حوزهٔ پژوهش علمی نامنضبط بود. شاید این امر ناشی از فقدان طبیعی و همیشگی تماس او با جریان کلی تفکر علمی بوده است. این عدم انضباط به سطوح پایینتر، به عادات کاری او نفوذ می‌کرد. تامسن برحسب عادت مقالاتش را با مداد و غالباً روی تکه‌هایی از کاغذ می‌نوشت، و به‌همین صورت برای چاپ ارسال می‌کرد.»

جوزف لارمور[2]، زندگینامه‌نویس دیگر تامسن، تصویری از یک هنرمند علمی به ما می‌دهد، مملوّ از راه‌حلهای درخشان برای مسائل فنی، از هر نوع، به‌طوری که وقت برای نوشتن همهٔ آنها را ندارد، و هرگز فرصتی پیدا نمی‌کند تا بزرگترین موفقیتهای خود را به‌صورت یک کل وحدت‌یافته سازمان دهد. اغلب مقالاتش به‌گفتهٔ لارمور «صرفاً خرده‌ریزهایی بود که از ذهن او سرریز می‌شد. . . به نزدیکترین انتشاراتی. . .در نخستین نیمهٔ زندگی‌اش نتایج بنیادی به چنان حجمی رسید که غالباً همه‌گونه شانس رُشد و توسعهٔ مؤثر را پشت سر می‌گذاشت. در میان چنین انباشتگی، او شارح و مفسّر شایسته‌ای نشد. این امر تنها با ردیابی فراز و نشیب فعالیت او در آثار تکه‌تکه منتشرشده‌اش معلوم می‌شود، و بنابراین، پی‌درپی منظری ازکار و حرفه‌اش حاصل می‌شود که فقط ممکن است به چشم‌اندازهایی که مدام بر وی گشوده می‌شد، برسد.»

دنبال کردن رگه‌های تفکر تامسن در «فراز و نشیب آثار تکه‌تکه منتشرشده‌اش» قطعاً دشوار است، اما کار او هم قطعاً از بصیرت وافر برخوردار است. چنانکه اسمیت تأکید می‌ورزد، وسعت حوزهٔ کار تامسن دست‌کمی از وسعت کار هر یک از دوستان فیزیکدانش نداشت. در زمانی که ترمودینامیکدانان دیگر توجهشان بر فرایندهای برگشت‌پذیر متمرکز بود، تامسن به فرایندهای بازگشت‌ناپذیر ترمودینامیک در سیستمهای روان و ترموالکتریک توجه داشت. بعضی از روشهای تحلیل وی تا مدتها بعد مورد استفادهٔ عموم قرار نگرفت. تامسن اهمیت مفهوم انتروپی را نادیده انگاشت، اما به‌خوبی از نیاز به قانون دومی برای ترمودینامیک آگاه بود. اصل اتلاف انرژی او پی‌آمد گزارهٔ جدیدی از قانون دوم است.

تامسن با شیوهٔ پراکنده‌کاری‌اش، به هر یک از مسائل عمدهٔ ترمودینامیک اشاره‌ای کرده است، اما بجز مقیاس دما و تعبیر مفهوم انرژی، کار او در شرح کتابهای درسی ترمودینامیک امروزی یافت نمی‌شود. گرچه تامسن در میان ترمودینامیکدانان، همتراز کلازیوس و گیبس است، اما میراث علمی او محدودتر از آنان است. مقایسهٔ تامسن با کلازیوس جالب است. سن هر دو آنان تقریباً یکسان، و هر دو میراث‌خوار کارنو بودند و علاقه‌مندی ترمودینامیکی یکسان داشتند. با وجود این طرح ترمودینامیکی کلازیوس براساس دو مفهوم انرژی و انتروپی و قوانین آنها بود که گیبس، ترمودینامیکدان اصلی نسل سوم، را تحت تأثیر قرار داد. ممکن بود کلازیوس نیز ناشناخته بماند، اما او هیچ تردیدی دربارهٔ بنیانهای

1. J. G. Crowther 2. Joseph Larmor

مفهومی نظریه‌هایش به‌جا نگذاشت و راهنماییهای ضروری را در اختیار گیبس گذاشت تا او بتواند آنها را یک کاسه کند و طرحی را که امروزه در متون ترمودینامیک می‌بینیم به‌وجود آورد.

دربارهٔ خودِ تامسن

ما یادمانِ نوعاً متفاوتی از تامسن داریم: می‌دانیم این مرد، بااستعداد هنرمندانهٔ علمی‌اش تا چقدر مانند یک انسان معمولی بود. کلازیوس به دلایلی که ظاهراً به شخصیت ستیزه‌جویانه و فقدان شهرت خارج از دنیای علمی‌اش مربوط می‌شد هرگز نظر زندگینامه‌نویس ماهری را جلب نکرد، اما برخلاف او، تامسن موضوع محبوب و پرطرفداری برای بحث و تفسیر زندگینامه‌نویسی بوده و هنوز هم هست. نخستین زندگینامهٔ تامسن با عنوان زندگی ویلیام تامسن نوشتهٔ شخصی همنام او (با یک p اضافی) سیلوانوس تامپسن[1] بود. گاهی اوقات از صحت و دقت تامسن زیاد تحسین می‌شود و شخص ممکن است در شیفتگی‌اش با آموزه‌های کمبریج سهیم نباشد، اما دشوار خواهد بود که برای ورود به دنیای تامسن راهی دلپذیرتر از گذراندن چند روزی با کتاب دوجلدی سیلوانوس تامپسن بیابد.

حتی اگر سیلوانوس تامپسن بیش از حد تحت تأثیر فضائل تامسن می‌بود، این احساس سودمند را داشت که به‌تفصیل از دیگران، از دوستان، شاگردان و بستگان تامسن که به‌طور کاملتری شاهد رفتار او بودند، نقل کند. ما نمی‌توانیم برای بستن پروندهٔ این شرح حال، کاری بهتر از توجه به اظهارنظر دو شخص جوانی بکنیم که در تماس با تامسن، از او تأثیر پذیرفته، سرگرم بوده و اندکی غمناک شده‌اند.

نخست از نوهٔ برادر تامسن، مارگارت گلادستون[2]، که عزیزکردهٔ تامسن بود، بشنویم: مارگارت دختر جوانی بود که غالباً برای دیدار تامسن به ملک او در نظِرال[3] می‌رفت. (دو جنبهٔ بیشتر جالب توجه زندگی مارگارت گلادستون: مارگارت دختر ج. ه. گلادستون بود که در مؤسسهٔ سلطنتی جانشین فارادی شد، و با رامسی مکدونالد[4]، یکی از بنیان‌گذاران حزب کارگر بریتانیا و نخست‌وزیر سالهای ۱۹۲۰، ازدواج کرد.) توصیف زیبای او از «عمو ویلیام» و «عمه فانی» ساده‌لوحانه اما در عین حال هوشمندانه است:

> عمه فانی مجالست را بسیار دوست می‌دارد: و دربارهٔ عمو ویلیام به‌نظر نمی‌رسد آنچه اتفاق می‌افتد برای او تفاوت زیادی ایجاد کند؛ با وجود این او درکناری به کار ریاضیات مشغول است وگاه‌گاه با هرکسی که نزدیک او باشد گفتگوی جانانه‌ای می‌کند. هر دو آنها با من رفتار بسیار خوبی دارند و من زمانی راکه بیشتر از هر موقع دیگری دوست داشتم، روزی بود که اصلاً مهمان و بازدیدکننده‌ای نداشتند و ما در حدود سی ساعت کاملاً با هم بودیم.
>
> ریاضیات با حرارت و پرشور در «کتاب سبز» پیش می‌رفت. «کتاب سبز» خود منظومهٔ بزرگی است. یک‌سری «کتابهای» سبز وجود دارد ـ درواقع آنها دفترهای یادداشتی هستند

1. Silvanus P. Thompson 2. Margaret Gladstone 3. Netherall 4. Ramsay Macdonald

که اختصاصاً برای عمو ویلیام ساخته شده‌اند ـ و او در یک سال ۵ یا ۶ دفتر مصرف می‌کند که آنها همراهان جدایی‌ناپذیر او هستند، همه‌جا، در خانه، بیرون از خانه، طبقه‌های بالا، طبقه‌های پایین، هر جا که او می‌رود، آنها هم می‌روند؛ و او در هر شرایطی در «کتاب سبزش» چیزی می‌نویسد. نگاه کردن به مطالب آنها بسیار سرگرم‌کننده و مضحک است؛ یک مدخل در قطار، دیگری در باغ و سومی پیش از برخاستن از بستر و به‌همین ترتیب در همهٔ ساعات روز و شب ادامه می‌یابد. او همیشه مکان و زمان دقیق آغاز هر مدخل را ثبت می‌کند.

در سال ۱۸۹۶، جشن بزرگی با شرکت بیش از دو هزار مهمان به افتخار تامسن برای قدردانی از خدمت طولانی‌اش در دانشگاه گلاسکو برپا شد. این جمعیت عظیم نمی‌توانستند پیش‌بینی کنند که اظهارات واکنش تامسن چه خواهد بود. در آن لحظه او می‌باید به آنان می‌گفت که ژرفترین احساس او، احساس شکست و ناکامی است: «یک کلمه توان‌فرساترین تلاشهای مرا که به‌مدت پنجاه سال مصرّانه برای پیشرفت علم کرده‌ام، توصیف می‌کند و آن کلمه ناکامی است. من دربارهٔ نیروی الکتریکی و مغناطیسی، یا میل ترکیبی شیمیایی چیزی بیشتر از آنچه پنجاه سال پیش می‌دانستم و می‌کوشیدم تا آنها را در نخستین جلسه به‌عنوان استاد به شاگردان فلسفهٔ طبیعی بیاموزم، نمی‌دانم.»

مارگارت گلادستون در آنجا بود و بعضی از نکات معقول و متین را یادداشت می‌کرد.

به هنگام عصر کلمهٔ «شکست» که تامسن با آن نتایج بهترین تلاشهایش را توصیف کرده بود، در سالن دور می‌گشت، با نیمی اندوه و نیمی اشتیاق. بعضی از افراد سعی می‌کردند ناباورانه بخندند، اما او آن را بسیار جدّی می‌گرفت. با وجود این، در عین حال او بدبین نبود، زیرا آشکار بود که چه مسرت عمیقی در کارش داشته و هنوز هم دارد و چگونه با احساس صمیمیت به همکارانش یاری و محبت می‌کند.

همچنین دربارهٔ دانشجویان، من با دلیل موجهی، به هنگامی که او از تدریس ایده‌آل به‌صورت کنفرانس سخن می‌گفت، آنها خندیدند و من متأسف شدم، زیرا همیشه می‌شنیدم که وقتی برای آنان سخن می‌گوید به‌جای مرتفعی بالا می‌رود و اندیشه‌های تحقیقی را با اشتیاق فراوان از بالا بر سرشان فرو می‌ریزد.

وقتی دربارهٔ گفتارهای عمو ویلیام فکر می‌کنم طنین سخنانش، و نگاه موقر، جدی و احترام‌آمیز او به هنگامی که انبوه تحسین نثار او می‌شد، در خاطرم هست. در این مورد به‌طور کلی چیزی تأثرآور بود. نوعی شگفتی که مردم می‌باید چنین مهربان می‌شدند و آرزویی که کارهایی آن‌قدر زیاد انجام داده که شایستهٔ این همه محبّت است.

تامسن به‌ندرت فرصتی می‌یافت که متن مورد بحث خود را آماده کند و بنابه گفتهٔ گلادستون او از گفتن مطالبی دربارهٔ آخرین اکتشافاتش برای دانشجویان مخاطبی که استعداد ادراک آن مطالب را نداشتند، تردید نمی‌کرد. هلمهلتز که در سالن سخنرانی هم موفقیتی نداشت، در شگفت بود که

تامسن چگونه همواره با شاگردانش ارتباط برقرار می‌کند: «او گمان می‌کند. . . که با زنجیره‌ای طویل از پرسشهایی که مطرح می‌کند. . . کسی باید به‌سرعت اطلاعات لازم را به‌دست آورد. چگونه شاگردانش بدون آنکه او را دقیقاً بر یک موضوع متمرکز نگه دارند، حرفهای او را می‌فهمند، این برای من یک معمّاست.»

با وجود این یک پیوند محبت‌آمیز بین تامسن و «گروه» دانشجویانش وجود دارد که انحراف از موضوع در سخنرانی او را نادیده می‌گیرند و بزرگی او را به‌عنوان یک دانشمند و یک انسان بی‌تکلف قدردانی می‌کنند. در اینجا خاطره‌ای را نقل می‌کنیم از اندرو گری[1] یکی از «شاگردان شادابی» که در سالهای ۱۸۷۰ در درسهای تامسن حضور می‌یافت و سرانجام جانشین تامسن شد. این گزارش از آخرین جلسهٔ دورهٔ درسی اوست:

> جلسهٔ اختتامیهٔ دورهٔ درسی عادی معمولاً دربارهٔ نور بود، و این عموماً آخرین موضوعی بود که می‌باید مطرح می‌شد ـ چون روزها در بهار طولانیتر می‌شود، گاهی ممکن بود که برای آزمایشها از نور خورشید استفاده شود ـ و غالباً به آخرین روز یا دو جلسهٔ آخر موکول می‌شد. بنابراین، تامسن پس از یک ساعت تدریس می‌گفت: «چون این آخرین روز دورهٔ تحصیلی است، من پس از خروج آنان که باید برای رفتن به کلاسهایشان جلسه را ترک کنند، مدت کوتاهی بحث را ادامه خواهم داد» آنگاه دوباره پس از ساعت ده دنبالهٔ بحث تا ساعت یازده، وقتی که فرصتی دیگر برای دانشجویان پیش می‌آمد تا جلسه را ترک کنند، ادامه می‌یافت و بار دیگر درس شروع می‌شد. پیغامهایی از خانه‌اش در مورد انواع کارهای دیگرش می‌رسید و می‌خواستند که بدانند چه بر سر او آمده است، ساعت به ساعت پاسخ این بود: «هنوز در حال تدریس است.» عاقبت در حدود ساعت یک بعدازظهر کارش را تمام می‌کرد و به‌آرامی از اندک گروه علاقه‌مندی که تا پایان مانده بودند به جهت محبت و توجه طولانیشان تشکر می‌کرد.

1. Andrew Gray

۸

راهی به‌سوی انتروپی

رودولف کلازیوس

اخوتهای علمی

تاریخ ترمودینامیک داستانی از آدمها و مفهومهاست. شخصیتهای این داستان گروه بزرگی است. دست‌کم ده دانشمند نقش عمده‌ای در ایجاد علم ترمودینامیک داشته‌اند و کار آنان بیش از یک قرن به طول انجامیده است. از سوی دیگر فهرست مفاهیم آن به‌طور شگفت‌انگیزی اندک است؛ تنها سه مفهوم اصلی در ترمودینامیک وجود دارد: انرژی، انتروپی و دمای مطلق.

این سه مفهوم در طی یک دورهٔ چهل‌ساله کشف و برای نخستین‌بار به‌کار گرفته شدند و آغاز آن از سال ۱۸۲۴، زمانی بود که سادی کارنو کتاب خاطراتش را دربارهٔ نظریهٔ ماشینهای حرارتی منتشر کرد. کارنو پیشگام بود و لوازمی مفهومی که برای اصلاح استدلالهایش در دست داشت، ابتدایی بود. اما، با وجود این، او موفق شد مفاهیم و روشهای بسیار بدیعی را کشف کند که برای جانشینانش اجتناب‌ناپذیر بود.

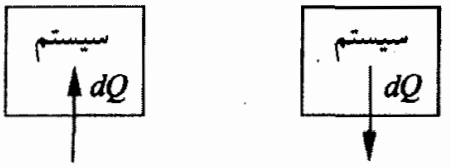
کارنو در سال ۱۸۳۲ درگذشت، و کار علمی‌اش تقریباً با خود او مُرد. کتاب خاطراتش ابتدا نادیده گرفته شد و سپس احیا شد، در آغاز به‌وسیلهٔ همکارش، امیل کلاپیرون و بعد به‌وسیلهٔ ترمودینامیکدانان نسل دوم، رودولف کلازیوس و ویلیام تامسن. این دو نفر تقریباً در همان زمان کتاب انقلابی «خاطرات» متولد شدند و گویی، فرزندان علمی کارنو بودند. درست با گذشت نسلی که کارنو را نادیده گرفته بود، کلازیوس و تامسن به عرصه رسیدند. با تهور به جهان اندیشه‌های علمی وارد شدند، و از پیام قدرتمند کارنو، اما فراموش‌شده، نهایت استفاده را کردند. اکنون در اینجا نوبت کلازیوس است، اما نخست من باید برای ذکر بعضی از مطالب ریاضی، از موضوع منحرف شوم.

فرمولها و قراردادها

برای توصیف یک سیستم به‌شیوهٔ ترمودینامیک، نخست باید حالت سیستم را با متغیرهای تعیین حالت

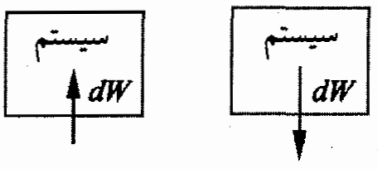
مناسب مانند حجم V و دمای t (در اینجا t نمایندهٔ دمای سلسیوس است) مشخص کنیم. اندک تغییراتی در V و t که سبب می‌شود سیستم در جریان فرایندی قرار گیرد، با dV و dt نشان داده می‌شود. این نمادها می‌تواند هم بر افزایش و هم بر کاهش دلالت داشته باشد، و این بدان معنی است که dV و dt ضمناً یا مثبت یا منفی است. مثلاً در یک عمل انبساط، حجم سیستم افزایش می‌یابد، بنابراین، تغییر dV مثبت است؛ در تراکم، حجم کاهش می‌یابد و dV منفی است. همچنین، dt مثبت بر یک افزایش دما و dt منفی بر یک کاهش دما دلالت دارد.

گرمایش و انجام کار، فرایندهای بنیادی ترمودینامیک‌اند. آنها، آن‌طورکه کلازیوس و تامسن دریافته‌اند شامل برهم‌کنشهایی میان یک سیستم و محیط آن سیستم‌اند. مثلاً، افزایش مقدار اندکی گرما dQ از محیط به سیستم، گام کوچکی در یک فرایند گرمایش است. گرمای افزوده‌شده به یک سیستم به‌صورت مثبت به حساب می‌آید و ضمناً dQ مثبت است. فرایند معکوس خارج شدن گرمای dQ از سیستم و dQ منفی است. این قراردادها در شکل ۸ـ۱ نشان داده شده‌اند.



شکل ۸ـ۱ نمایش علامت قرارداد برای dQ.

فرایند انجام کار ممکن است تراکم گاز در یک دستگاه پیستون‌ـسیلندرِ موجود در موتور یک اتوموبیل باشد. گام کوچکی در فرایند تراکم با مقدار اندکی از کار dW انجام شده بر سیستم (گاز) نشان داده می‌شود و مثبت به‌حساب می‌آید. در فرایند معکوس یعنی انبساط، سیستم بر محیطش کار انجام می‌دهد؛ این برونداد کار و dW منفی است. شکل ۸ـ۲ را ببینید.



شکل ۸ـ۲ نمایش علامت قرارداد برای dW.

هرگاه به‌طور آهسته مقدار اندکی گرما dQ به سیستم بیفزاییم، احتمالاً واکنش سیستم افزایش دمای اندک dt است، همراه با یک انبساط اندک که با افزایش حجم dV بیان می‌شود. گرما و دو اثر آن با یک معادله مربوط می‌شود که یک ابزار ریاضی ضروری برای کلازیوس بود،

$$dQ = MdV + Cdt \qquad (۱)$$

ضریب C در این معادله «ظرفیت گرمایی» نامیده می‌شود. ما می‌توانیم آن را با فرض اینکه حجم ثابت باشد جدا کنیم، بنابراین، چون تغییری در حجم نیست، $dV = ۰$، و از معادلهٔ (۱) خواهیم داشت

$$dQ = Cdt \text{ (ثابت } V) \qquad (۲)$$

فرض کنید واحد گرمایی $dQ = ۰/۱$ اضافه کنیم و تغییر دمای اندازه‌گیری‌شده $dt = ۰/۰۰۱^\circ\mathrm{C}$ باشد. در این صورت ظرفیت گرمایی محاسبه‌شده با معادلهٔ (۲) می‌شود

$$C = \frac{dQ}{dt} = \frac{۰/۱}{۰/۰۰۱} = ۱۰۰ \text{ واحد گرمایی}/^\circ\mathrm{C}$$

که نشان می‌دهد ظرفیت گرمایی، تعداد واحدهای گرمایی لازمی است که دمای سیستم را یک درجه بالا می‌برد.

اگر یک سیستم گازی را متراکم کنیم و حجم آن را dV تغییر دهیم، اندک مقدار کار انجام‌شده متناسب با تغییر حجم است

$$dW \propto -dV \qquad (۳)$$

(نماد $\propto$ را «متناسب با» بخوانید) علامت منهای پیش از dV بنابر حکم قراردادهایی است که برای dW و dV پذیرفته‌ایم. تراکم درونداد، کار فراهم می‌کند، بنابراین، dW مثبت است، اما dV منفی است زیرا تراکم، حجم را کاهش می‌دهد. ناجور بودن علامتها با جابجایی dV با $-dV$، که مثبت است، جبران می‌شود. همین دستور عمل برای انبساط، با dV مثبت و dV منفی به‌کار می‌آید، که با یک dW منفی برای برونداد کار جفت‌وجور می‌شود.

کار انجام‌شده در تراکم نیز، چنانکه انتظار می‌رود، متناسب با یک عامل فشار است، زیرا مطمئناً کار لازم برای متراکم کردن گازی با فشار پایین، کمتر از متراکم کردن همان گاز با فشار بالاست. هرگاه تراکم به‌آرامی انجام گیرد، آن عامل فشار فقط فشار P گاز است. با به‌حساب آوردن آن عامل، رابطهٔ متناسب بودن (۳) به‌صورت معادلهٔ زیر درمی‌آید

$$dW = -PdV \qquad (۴)$$

این معادله برای انبساط گاز، و حتی برای انبساط یا تراکم یک مایع یا جامد نیز معتبر است.

گرما، منتقل می‌شود و تبدیل می‌شود

در سال ۱۸۵۰ کلازیوس مقاله‌ای منتشر کرد که کارِ کارنو را با اکتشافاتی که طی بیست‌وپنج سال فاصلهٔ زمانی به‌عمل آمده بود آشتی می‌داد و نخستین قانون ترمودینامیک را تقریباً به‌صورت امروزی‌اش

فرمولبندی می‌کرد. کلازیوس مقالهٔ ۱۸۵۰ خود را با ارجاع به مقالهٔ امیل کلاپیرون که دو سال پس از مرگ کارنو نوشته شده بود آغاز کرد. این مقاله به زبان ریاضی و قابل فهم برای نظریه‌پردازان آن زمان (و حال) بود. کارنو به‌دلایلی که هرگز فرصت توضیح آن را نداشت، کتاب خاطراتش را به سبکی غالباً غیرریاضی نوشته بود که نکات بیشتر ظریف و دقیقش را مبهم و نامفهوم می‌کرد.

سنگر مستحکم نظریهٔ کالریک گرما، هم کارنو و هم کلاپیرون را گمراه کرده بود، نظریه‌ای که اصرار می‌ورزید گرما تخریب‌ناپذیر است و بنابراین، نمی‌تواند در یک ماشین حرارتی یا هر دستگاه دیگری به کار تبدیل شود. به‌نظر آنان، ماشین حرارتی گرما را از دمای بالاتر به دمای پایینتر ساقط می‌کند، بدون آنکه مقدار آن تغییر کند. موقعیتی برای کلازیوس و یک سال بعد برای تامسن پیش آمد تا کارکارنو-کلاپیرون را از بدفهمی‌های نظریهٔ کالریک رها کنند. کلازیوس ابتدا در مقالهٔ سال ۱۸۵۰ خود این فرض بنیادی را مطرح کرد که بخشی از درونداد گرما در هر ماشین حرارتی به کار تبدیل می‌شود. باقی‌ماندهٔ درونداد گرمایی، مانند مدل کارنو-کلاپیرون، به‌سادگی از دمای بالاتر به دمای پایینتر انتقال می‌یابد و برونداد ماشین حرارتی می‌شود. به‌گفتهٔ دیگر، گرما به دو نوع دچار دگرگونی می‌شود، انتقال و تبدیل. خلاصهٔ مطلب در یک معادله برای یک نوبت از چرخهٔ ماشین حرارتی به‌صورت زیر خواهد بود:

$$\text{گرمای منتقل‌شده} + \text{گرمای تبدیل‌شده} = \text{درونداد گرما} \qquad (۵)$$

یا

$$\text{گرمای تبدیل‌شده} = \text{گرمای منتقل‌شده} - \text{درونداد گرما} \qquad (۶)$$

کلازیوس با استمداد از یک استدلال مفصل، آخرین گزاره را به‌صورت یک معادلهٔ دیفرانسیلی پیچیده شامل دو ضریب C و M مطرح کرد.

قانون اول

اگر کلازیوس در تجزیه و تحلیل کارش پیشتر نرفته بود، مقالهٔ ۱۸۵۰ او، جای فهمی در این تاریخ نمی‌داشت. معادلهٔ دیفرانسیلی را که او به‌دست آورده بود از لحاظ ریاضی معتبر، و امتحان اعتبار فیزیکی آن امکان‌پذیر بود، اما از جهات دیگر در ماورای شرایط عاجلی که در آن شرایط این معادله به‌دست آمده بود، اهمیت اندکی داشت. کلازیوس از این کاستیها آگاه بود، و تلاش بعدی او این بود که خلاصهٔ بحث و استدلالش را به‌گونه‌ای پرمعنی‌تر تغییر شکل دهد.

کلازیوس با بعضی تمهیدات الهام‌گونهٔ ریاضی، معادلهٔ دومی را به‌دست آورد (معادلهٔ (۷) صفحهٔ بعد) که در عمل معلوم شد وسیلهٔ نظری بسیار بامعنی‌تری از معادلهٔ اولیهٔ اوست. این معادله را در هر متن ترمودینامیکی جدید به‌صورت نوع ریاضی استانداردی از قانون اول ترمودینامیک، می‌توان یافت. آن دو معادله که از لحاظ ریاضی بسیار به هم شبیهند، از لحاظ اهمیت فیزیکی با هم تفاوت زیادی دارند. یک معادله اندکی بیشتر از یک کنجکاوی تاریخی است و دیگری امروزه برای هر فیزیکدان، مهندس یا

شیمیدان شناخته شده است. این امر گواه آشکاری است که ریاضیات برای دانشمند نظریه‌پرداز، یک زبان است. پیام این زبان هم می‌تواند گویا و روان باشد و هم گنگ و کسل‌کننده، بستگی دارد به اینکه چگونه نوشته و تعبیر شده باشد.

کلازیوس می‌باید فقط از معادلهٔ دیفرانسیلی اولیه‌اش انتگرال می‌گرفت تا پیام فیزیکی آن آشکار می‌شد. او به تابعی از V و t، فقط به‌عنوان یک نتیجه‌گیری فرعی از انتگرال‌گیری متوسل شد که یادآور تابع حالت نادرست گرما $Q(V,t)$ بود. مگر آنکه این تابع واقعاً یک تابع حالت می‌بود. تابع جدیدی که کلازیوس با برچسب $U(V,t)$ توصیف می‌کرد، نخستین تابع از یک مجموعه تابعهای حالت ارزشمند بود که امروزه بر شیوهٔ کار ترمودینامیک حاکم است.

کمّیت U یک تابع حالتِ حقیقی بود، اما معنی آن از لحاظ فیزیکی چه بود؟ کلازیوس بار دیگر با استفاده از معادلهٔ (۱) پاسخ داد. او با چند عمل ریاضی بیشتر، معادلهٔ زیر را به‌دست آورد

$$dQ = dU + \frac{1}{J}PdV \qquad (۷)$$

که در آن P نمایندهٔ فشار بود و $\frac{1}{J}$ واحدهای مکانیکی وابسته به جملهٔ PdV را به واحدهای گرمایی برای dQ تبدیل می‌کرد.

کلازیوس در این مورد به معادله‌ای دست یافته بود که دانشجویان امروزی ترمودینامیک بدون اشکال آن را به‌عنوان یک گزارهٔ ریاضی قانون اول ترمودینامیک می‌پذیرند. در کاربرد امروزی این معادله، تمایزی بین واحدهای گرمایی و مکانیکی نیست. بنابراین، ضریب J ضرورتی ندارد. U به‌منزلهٔ انرژی درونی پذیرفته‌شده و معادله به‌طوری که تغییرات U را ارزیابی کند نوشته می‌شود

$$dU = dQ - PdV \qquad (۸)$$

اما در سال ۱۸۵۰ مفهوم انرژی هنوز روشن نبود، و نمی‌توانست بخشی از تعبیر و توضیح کلازیوس باشد. درعوض، او معادلهٔ (۷) را عمدتاً به‌منزلهٔ سهمی از نظریهٔ گرما می‌نگریست. او dQ را اندازهٔ مقدار گرمای اضافه‌شده به هنگام گام کوچکی در یک فرایند گرمایش می‌دانست. وقتی گرما وارد سیستم شود، ممکن است گرمای «آزاد» یا «محسوس» باشد که اثر آن را می‌توان با یک دماسنج اندازه‌گیری کرد، یا ممکن است به کار تبدیل شود. او دو نوع کار تشخیص داده بود. یکی کار درونی (در برابر نیروهای میان مولکولها، به‌تعبیر امروزی) و دیگر کار خارجی، در برابر فشار به‌کار گرفته‌شده در محیط. جملهٔ $\frac{1}{J}PdV$ در معادلهٔ (۷) دومی را ارزیابی می‌کند. بنابراین، کلازیوس نتیجه‌گیری کرد که dU دو چیز را محاسبه می‌کند: تغییرات گرمای محسوس (همیشه در حال افزایش اگر گرما اضافه شود) و مقدار کار انجام‌شدهٔ درونی، اگر انجام شده باشد.

کلازیوس در سال ۱۸۶۴ وقتی که مقالاتش را به‌صورت یک کتاب جمع‌آوری می‌کرد خلاصهٔ دیدگاهش را به اجمال در یک ضمیمه به مقالهٔ سال ۱۸۵۰ خود اضافه کرد: «تابع U که در اینجا ارائه می‌شود در نظریهٔ گرما اهمیت بسیاری دارد؛ این تابع به‌کرّات در گزارشات علمی بعدی مورد بحث قرار

می‌گیرد. به‌طوری که بیان شد این تابع دو کمیت از سه کمیت گرما را شامل می‌شود که وقتی جسم حالتش تغییر کند، مورد توجه و بررسی قرار می‌گیرد: این دو کمیت عبارت‌اند از فزونی به‌اصطلاح گرمای محسوس یا درواقع گرمای موجود و گرمای صرف‌شده در کار درونی.»

در حدود همان زمان که کلازیوس این تعبیر و توضیح از تابع حالتش $U(V,t)$ را بسط می‌داد، تامسن نظریه‌ای براساس یک تابع مشابه ابداع می‌کرد که برچسب آن به‌صورت $e(V,t)$ بود. تامسن تابعش را ـ«انرژی مکانیکی»ـ می‌نامید و آن را اندازه‌ای از اثر مکانیکی (سینتیک مولکولی و انرژی پتانسیل) می‌دانست که در یک سیستم پس از مبادلهٔ گرما و کار با محیطش ذخیره می‌شود. تامسن بعداً تابعش را «انرژی ذاتی» نامید و سپس هلمهلتز نام «انرژی درونی» را عرضه کرد که این نام ثابت مانده است.

این میزان ابهت، ظرافت و دقیق بودن مفهوم انرژی ـ و بینش و هوشمندی تامسن ـ است که کلازیوس به‌مدت پانزده سال نمی‌خواست نظریهٔ انرژی تامسن را بپذیرد. سرانجام در سال ۱۸۶۵ او تعبیر تامسن را پذیرفت و به‌تدریج تابع U خودش را «انرژی» نامید. او از واژگان تامسن یا هلمهلتز استفاده نمی‌کرد.

کلازیوس با وجود عدم اطمینانی که دربارهٔ معنی فیزیکی تابع U داشت، در مقالهٔ ۱۸۵۰ خود به فرمولبندی کامل قانون اول ترمودینامیک نزدیک شده بود، حتی علامت‌گذاری ریاضی مورد استفادهٔ او همان است که در متون درسی امروزی یافت می‌شود. کلیفورد تروسدِل[1] دستاوردهای کلازیوس در اثر ۱۸۵۰ او را چنین خلاصه می‌کند: «تردیدی نیست که کلازیوس با مقالهٔ (۱۸۵۰) خود ترمودینامیک کلاسیک را ایجاد کرد. . . . در اینجا کلازیوس ویژگی یک کاشف بزرگ را به نمایش می‌گذارد؛ تا موضعش را در برابر اسلاف بزرگ و کوچکش حفظ کند. . . چه خوب است، درحالی‌که بی‌پرده دیگران را کنار می‌گذارد، با نظریه‌های بسیار متفاوت قبلی متحد می‌شود و با یک تغییر ساده ولی بنیادی، نظریهٔ کاملی می‌سازد که جدید ولی براساس موفقیتهای پیشین استوار است.»

«یک تغییر ساده ولی بنیادی» که کلازیوس به‌عمل آورد این بود که پذیرفت گرما در ماشینهای حرارتی و جاهای دیگر، نه‌تنها می‌تواند از دمای بالاتر به دمای پایینتر سقوط کند (آن‌طور که کارنو می‌پنداشت)، بلکه می‌تواند به کار نیز تبدیل شود. دیگران، به‌ویژه جول امکان تبدیلهای گرما ـ به ـ کار را تشخیص داده بودند ـ بخش عمده‌ای از تحقیقات جول براساس مشاهدات عکس این تبدیل یعنی تبدیل کار به گرما بود ـ اما کلازیوس نخستین کسی بود که مفهوم چنین تبدیلهایی را در یک نظریهٔ عام گرما بنا کرد.

تغییر شکلهای گرما

کلازیوس نکات بسیار زیادتری داشت تا براساس «تغییر ساده ولی بنیادی» به بنای نظریه‌ای‌اش بیفزاید. او در سال ۱۸۵۴، مقالهٔ دومی دربارهٔ نظریهٔ گرما منتشر کرد، که کاملاً فراتر از قلمرو قانون اول ترمودینامیک و مفهوم انرژی می‌رفت و به‌خوبی در قلمرو جدید، قانون دوم ترمودینامیک و مفهوم

1. Clifford Truesdell

انتروپی جای می‌گرفت. فرض آغازین او بار دیگر این بود که گرما می‌تواند دستخوش دو نوع تغییر شکل شود. من می‌خواهم اصطلاحات کلازیوس برای دو تغییر شکل را بسط دهم و سقوط گرما از دمای بالا به دمای پایین را یک نمونه از «تغییر شکل انتقالی» و تبدیل گرما به کار را مثالی از «تغییر شکل تبدیلی» بنامم. کلازیوس بر این عقیده بود که دو نوع تغییر شکل، دو جهت ممکن دارد، یکی «طبیعی» و دیگری «غیرطبیعی». (بار دیگر، این اصطلاحات از کلازیوس نیست.) در جهت طبیعی، تغییر شکل می‌تواند بدون کمک و به‌طور خودبه‌خود پیشرفت کند، درحالی‌که در جهت غیرطبیعی این امر ممکن نیست مگر به اجبار.

جهت طبیعی برای تغییر شکل تبدیلی را می‌توان در آزمایشهای جول دید که از کار، گرما تولید می‌شود. کلازیوس جهت غیرطبیعی برای تغییر شکل تبدیلی را به‌صورت تولید کار از گرما می‌دید، تبدیلی که هرگز خودبه‌خود صورت نمی‌گیرد، بلکه همیشه باید به‌نحوی مثلاً در عمل ماشین حرارتی به‌اجبار انجام شود. جهت طبیعی برای تغییر شکل انتقالی رسانش آزاد گرما از دمای بالا به دمای پایین است. جهت غیرطبیعی انتقال مخالف از دمای پایین به دمای بالاست، که غیرممکن است به‌صورت یک فرایند خودبه‌خود باشد؛ این‌گونه انتقال گرما می‌باید تحت فشار در یک «پمپ گرمایی» صورت گیرد مانند آنها که در دستگاههای تهویهٔ مطبوع به‌کار می‌رود.

کلازیوس این استدلال را از یک گام مهم پیشتر برد. او ملاحظه کرد که در ماشینهای حرارتی دو نوع تغییر شکل گرما همزمان صورت می‌گیرد. در هر چرخهٔ عمل ماشین حرارتی، تغییر شکل انتقالی در جهت طبیعی‌اش صورت می‌گیرد (گرما از دمای بالا به دمای پایین می‌افتد)، درحالی‌که تغییر شکل تبدیلی در جهت غیرطبیعی‌اش پیش می‌رود (گرما به کار تبدیل می‌شود). به‌طوری که گویی تغییر شکل انتقالی، تغییر شکل تبدیلی را در جهت غیرطبیعی‌اش می‌راند.

علاوه‌بر این، کلازیوس به این نتیجه رسید که این دو تغییر شکل در اعمال بازگشت‌پذیر تقریباً چنان موازنه‌ای دارند که هر یک می‌تواند بر دیگری مسلط شود و به معنایی آنها هم‌ارزند. کلازیوس در نظر داشت یک «نظریهٔ تغییر شکل گرمایی» کمّی بسازد که بتواند این الگو را دنبال کند. هدف او برآورد «مقادیر هم‌ارز» برای هر دو تغییر شکل در فرایندهای چرخه‌ای بازگشت‌پذیر بود. او امیدوار بود که از آن پس بتواند با استفاده از مقادیر هم‌ارز، شرط توازن یا به‌گفتهٔ او شرط «جبران» را در یک قانون طبیعی بیان کند.

گرچه کلازیوس در آن‌موقع تقریباً هرگز نمی‌توانست از آن قانون آگاه باشد، اما با این امیدواری، در نظریه‌ای ساده، مسیر استدلالی را آغاز کرد که همچون هر مورد مشابه آن در تاریخ علم امیدبخش و خوش‌آتیه بود. برای او درک کامل اهمیت آنچه راکه می‌کرد آسان نبود، اما او اکنون همهٔ سررشته‌های نظریه‌ای لازم برای رسیدن به مفهوم انتروپی و اصل بزرگ آن، یعنی قانون دوم ترمودینامیک را در دست داشت.

کلازیوس نظریهٔ تغییر شکل گرما را با این اصل موضوعه که گرما به‌طور خودبه‌خود از دمای پایین به دمای بالا انتقال نمی‌یابد، آغاز کرد. (هرگاه قرص یخی را لمس کنیم، گرما از دست گرم ما به قرص یخ سرد می‌رود و قرص یخ را سرد احساس می‌کنیم؛ هرگز آن را گرم احساس نمی‌کنیم.) کلازیوس

در مقالهٔ سال ۱۸۵۴ خود، این فرض مسلم را بیان کرد که: «گرما هرگز نمی‌تواند از یک جسم سردتر به جسم گرمتر برود، بدون نوعی تغییر دیگرِ پیوسته با آن، که در همان زمان روی دهد.» او بعداً اصل موضوعه‌اش را ساده‌تر کرد: «گرما خودش نمی‌تواند از جسم سردتر به جسم گرمتر برود.»

بحثهایی که کلازیوس برای بسط نظریه‌اش به‌کار می‌بُرد، از این شروع ساده بسیار طولانیتر از آن می‌شود که در اینجا به آنها بپردازیم. توجه داشته باشید که مقادیر هم‌ارز و شرط جبران او، الگویی بنیادی از گرماها و دماها را آشکار می‌کند که هر فرایند چرخه‌ای بازگشت‌پذیر را شامل می‌شود. اگر t_i دمایی باشد که در آن دما، یک مرحله در چنین فرایندی به‌وقوع می‌پیوندد، و اگر Q_i برونداد یا درونداد در آن مرحله باشد، مقدار هم‌ارزی متناظری که کلازیوس برای آن مرحله می‌داند $f(t_i)Q_i$ است که در آن $f(t_i)$ نوعی تابع جهانی است. در این صورت مجموع‌یابی چنین جمله‌هایی برای همهٔ مراحل یک فرایند را که با نشانه‌گذاری $\sum f(t_i)Q_i$ می‌نویسیم، ($\sum$ نماد مجموع‌یابی است.) مقدار هم‌ارزی خالص برای فرایند کامل را برآورد می‌کند. در شرط جبران (توازن) کلازیوس برای عمل بازگشت‌پذیر، جمله‌ها در مجموع‌یابی یکدیگر را حذف می‌کنند و نتیجه به‌صورت زیر است

$$\sum f(t_i)Q_i = ۰ \qquad \text{(عمل چرخه‌ای بازگشت‌پذیر)}$$

برای فرایندی شامل بسیاری مراحل کوچک، که هر مرحله شامل انتقال گرمای کوچک dQ در دمای t است، معیار جبران کلازیوس به‌عنوان یک مجموع‌یابی از مراحل بسیار کوچک ـ یعنی به‌صورت یک انتگرال بیان می‌شود،

$$\int f(t)dQ = ۰ \qquad \text{(فرایند چرخه‌ای بازگشت‌پذیر)} \qquad (۹)$$

این امر برای کلازیوس نتیجه‌ای قاطع بود: برای او فاش می‌کرد که یک تابع حالت جدید یافته است. ما در اینجا برای دنبال کردن استدلال کلازیوس، موقتاً این تابع جدید را با نماد کلی F نشان می‌دهیم (البته نه همان نماد F که قبلاً برای تابع کارنو به‌کار می‌بردیم.) و یک تغییر کوچک F را به‌صورت زیر تعریف می‌کنیم،

$$dF = f(t)dQ \qquad \text{(فرایند بازگشت‌پذیر)} \qquad (۱۰)$$

بنابراین، معادلهٔ (۹) می‌شود

$$\int dF = ۰ \qquad \text{(فرایند چرخه‌ای بازگشت‌پذیر)} \qquad (۱۱)$$

اکنون کلازیوس می‌توانست با تکیه بر یک قضیهٔ ریاضی، این شرط را تضمین کند که F تابع حالت است. این تابع نظیر تابع حالت دیگر کلازیوس $U(V,t)$ می‌توانست به‌صورت تابع $F(V,t)$ مشخص شود.

در این مرحله، کلازیوس اجزای ریاضی زیربنای نظریه‌اش را داشت، اما تعبیر فیزیکی ریاضیات او روشن نبود. معنی فیزیکی تابع U هنوز مبهم بود، و تابع جدید حتی بیشتر رمزآلود می‌نمود. کلازیوس به‌عنوان یک نظریه‌پرداز ماهر، از متصل کردن معنی فیزیکی خیلی زیاد به کمیتهایی که ممکن بود بعداً معلوم شود اوهامی از استدلال ریاضی است، آگاه بود. او برای تابع حالت جدید در ۱۸۵۴ هیچ نام و نمادی ارائه نکرد.

اما، کلازیوس احساس کرد که می‌تواند به این استنتاجش اعتماد کند که شرط جبران (۱۱) او یک تابع حالت جدید را تعریف می‌کند، و از آن واقعیت ریاضی می‌تواند تابع جهانی $f(t)$ را معین کند. استدلال ریاضی، بیشتر او را به این استنتاج رسانید که

$$f(t) = \frac{1}{t + a'} \qquad (۱۲)$$

که در آن $t + a$ دمای مطلق را در مقیاس گاز ایده‌آل مشخص می‌کند. بار دیگر با به‌کار بردن T برای نشان دادن دمای مطلق، کلازیوس به این نتیجه‌گیری رسید که

$$f(t) = \frac{1}{T}$$

و اگر آن را در معادلهٔ (۱۰) جاگذاری کنیم، تعریف کلازیوس از تابع حالت جدید ترمودینامیکی را باز هم بدون نام، کامل می‌کند،

$$dF = \frac{dQ}{T} \qquad \text{(فرایند بازگشت‌پذیر)} \qquad (۱۳)$$

قانون دوم

وقتی کلازیوس به هم‌ارز ریاضی معادلهٔ (۱۳) رسید، می‌باید آگاه شده باشد که به‌سوی آغاز نویدبخش یک نظریهٔ وسیعتر دست یافته است. اما این نظریه هنوز به‌شدت محدود بود: از یک لحاظ، معادلهٔ (۱۳) فقط برای فرایندهای بازگشت‌پذیر به‌کار می‌آمد. شرط بازگشت‌پذیری را در اصل، کارنو ابداع کرده بود تا شیوهٔ ایده‌آل عمل ماشین حرارتی را مشخص کند، ایده‌آل به این معنی که بازده ماشین حرارتی به حداکثر برسد. بازگشت‌پذیری اساس بحث کلازیوس بود که به معادلهٔ (۱۳) منجر می‌شد، زیرا این امکان را به او می‌داد تا اظهار کند که دو نوع تغییر شکل گرما یکدیگر را جبران می‌کنند.

کلازیوس کارهای بزرگی با سبک نظریه‌ای کارنو انجام داد. می‌توان تصور کرد که اگر کارنو عمر طولانیتری داشت ـ او در سال ۱۸۵۰ پنجاه‌وچهارساله می‌شد ـ و اگر او تشخیص داده بود که گرما می‌تواند هم با انتقال و هم با تبدیل تغییر شکل دهد، بسیار ممکن بود همان استدلالی را بکند که کلازیوس در سال ۱۸۵۰ و ۱۸۵۴ کرد. کلازیوس در دو مقاله آنچه را که کارنو در طلبش بود، انجام داد، و سپس در مقالهٔ سال ۱۸۵۴ و مقالهٔ سال ۱۸۶۵ با جرئت از کارنو پیشی گرفت و به قلمرو واقعی

فرایندهای بازگشت‌ناپذیر وارد شد که از نوع ایده‌آل و بازگشت‌پذیر نبودند. استنتاج کلازیوس، آن‌طور که نویسندگان امروز اظهار می‌کنند، این است که معادلهٔ (۱۳) برای فرایندهای بازگشت‌ناپذیر معتبر نیست و در عوض با یک نابرابری جایگزین می‌شود،

$$dF > \frac{dQ}{T} \qquad \text{(فرایند بازگشت‌ناپذیر)} \qquad (۱۴)$$

(برای نماد $<$ بخوانید «بزرگتر از» و برای نماد $>$ «کوچکتر از».)

کلازیوس اکنون دو تابع حالت ارائه کرده بود، تابع U و تابع وابسته‌ـ $\frac{dQ}{T}$ که ما موقتاً آن را با برچسب F نشان می‌دهیم. او نظریه‌اش را به‌طوری عمومیت داد که از محدودیتهای پیشین فرایندهای بازگشت‌پذیر و چرخه‌ای، رهایی می‌یافت. مقاله‌ای که در آن، او نتیجهٔ کلی را کامل کرد در سال ۱۸۶۵ منتشر شد. زمانی که او آن مقاله را که نهمین و آخرین گزارش علمی او دربارهٔ ترمودینامیک بود می‌نوشت، درصدد برآمد که اصطلاح «انرژی» برای U را بپذیرد، و او معادلهٔ (۷) را با فرض اینکه تمایزی بین واحدهای مکانیکی و گرمایی نیست نوشت، به‌طوری که $J = ۱$ باشد،

$$dQ = dU + PdV \qquad (۱۵)$$

یا بنابر معادلهٔ (۴) که $dW = -PdV$،

$$dQ = dU - dW \qquad (۱۶)$$

بالاخره (آن‌طور که به‌نظر ما می‌رسد، با منفعت از واپس‌نگری)، کلازیوس به تابع حالت دومش اعتماد کافی داشت که به آن نام و نمادی بدهد. او، بدون هیچ دلیل خاصی حرف S را انتخاب کرد و معادلهٔ (۱۳) را به‌صورت

$$dS = \frac{dQ}{T} \qquad \text{(فرایند بازگشت‌پذیر)} \qquad (۱۷)$$

و معادلهٔ (۱۴) را به‌صورت زیر نوشت

$$dS > \frac{dQ}{T} \qquad \text{(فرایند بازگشت‌ناپذیر)} \qquad (۱۸)$$

(به‌نظر می‌رسد کلازیوس حروف نیمهٔ آخر الفبا را ترجیح می‌داده است؛ او همهٔ حروف از M تا Z به‌استثنای O، X و Y را در معادلاتش به‌کار برده است). چون تابع S مقادیر هم‌ارز تغییر شکل گرما را محاسبه می‌کند، او واژهٔ مربوط به‌نام آن را از واژهٔ "trope" یونانی به‌معنی تغییر شکل، گرفت. واژهٔ پیشنهادی او "entropy" با یک پیشوند "-en" و یک پسوند "-y" بود که همزاد جور و مناسبی برای "energy" می‌شد.

دانشجویان کنونی ترمودینامیک با همهٔ این مطلب آشنایی دارند، آنان می‌توانند به‌دنبال این بحث

با استخراج $dQ = TdS$ از معادلهٔ (۱۷)، و جانشین کردن آن به‌جای dQ در معادلهٔ (۱۵) و تجدید آرایش، معادلهٔ زیر را به‌دست آورند

$$dU = TdS - PdV \qquad (۱۹)$$

ما امروزه این معادله را به‌منزلهٔ معادلهٔ دیفرانسیلی اصلی برای توصیف ترمودینامیکی هر سیستمی که به‌طور شیمیایی تغییر نمی‌کند می‌شناسیم. دهها معادلهٔ اختصاصی بیشتر می‌توان از آن به‌دست آورد.

کلازیوس گرچه مطمئناً از معادلهٔ (۱۹) و توان ریاضی آن آگاه بود، اما از آن استفاده نکرد. او هنوز تردید کنجکاوانه‌ای دربارهٔ دو تابع حالت U و S خود داشت. او با یک استدلال ریاضی طولانی U و S را از معادله‌های (۱۵) و (۱۷) حذف کرد و به‌جای آنها گرما Q و کار W را گذاشت.

به‌نظر می‌رسد کلازیوس به این دلیل تردید داشت که امیدوار بود برای انرژی U و انتروپی S توضیح و تعبیرهای مولکولی ارائه کند، اما این برنامه را کامل نکرد. عوامل بنیادی این تصویر مولکولی، انرژی پتانسیل و سینتیکی بود که مولکولها در اختیار داشتند و در تعیین انتروپی یک خاصیت بزرگ مقیاس (ماکروسکوپی) بود که او آن را «disgregation، پراکندگی» می‌نامید. مثلاً پراکندگی برای یک گاز (با مولکولهایی که به‌طور وسیعی از هم جدا هستند) بسیار بیشتر از پراکندگی برای یک مایع یا جامد است (یا مولکولهایی که بسیار نزدیک به یکدیگرند).

در سالهای ۱۸۶۰ علم مولکولی در دوران کودکی خود بود، و این تعبیرات مولکولی چیزی بهتر از حدس و گمان نمی‌شد. کلازیوس از این امر آگاه بود و نمی‌خواست مابقی نظریه‌اش را با ساختن فرضیه‌های مولکولی به‌خطر اندازد. رانکین این کار را کرد و اکثر مخاطبانش را از دست داد. با وجود این کلازیوس نمی‌خواست مفاهیم انرژی و انتروپی را یک‌سره کنار بگذارد. او زمینهٔ میانهٔ ایمنی یافت که در آن انرژی و انتروپی، آن‌طور که مارتین کلین[1] تاریخ‌نویس علم اظهار می‌کند «مفاهیمی خلاصه شده بودند» و معادلات کارآمد نظریه کاملاً بر مفاهیم غیرنظری از گرما و کار برقرار شده بود. کلازیوس هرگز تعبیر و تفسیرهای مولکولی‌اش را به اتمام نرساند، اما تأملات و گمانه‌زنیهای او تا آنجا که پیش رفت سالم و صحیح بودند. حتی نظریهٔ پراکندگی‌اش در کار بعدی ماکسول، بولتزمن و گیبس تأیید شد.

آخرین گفتار کلازیوس دربارهٔ ترمودینامیک، دو خط آخر مقالهٔ ۱۸۶۵ او، خوانندگان را از اهمیت فوق‌العادهٔ دو مفهوم خلاصه‌شدهٔ انرژی و انتروپی آگاه می‌کند. او ملتفت شده بود، هیچ دلیلی وجود ندارد که این مفاهیم و اصول آنها باید محدود به مسائل فیزیک و مهندسی زمینی باشد: آنها می‌باید برای کل پدیده‌های بزرگ مقیاس جهان معنی داشته باشند. او با کشاندن تصور علمی خود به این حد، جهانی را تصویر کرد که ارتباطهای گرمایی، مکانیکی و ارتباطهای دیگر جایی ندارد. بنابراین، $dQ = ۰$ و $dW = ۰$ است. سپس او گزاره‌های (۱۶) و (۱۸) از قانونهای اول و دوم ترمودینامیک را برای این سیستم منزوی به‌کار گرفت. بنابر معادلهٔ (۱۶)، اگر $dQ = ۰$ و $dW = ۰$ باشد، $dU = ۰$ است. بنابراین، انرژیِ یک جهان منزوی تغییر نمی‌کند: یعنی انرژی جهان ثابت است. در نابرابری (۱۸) اگر

1. Martin Klein

$dQ = ۰$ باشد، $dS > ۰$ خواهد بود. یعنی همهٔ تغییرات انتروپی مثبت و بنابراین، در حال افزایش است. قاعدتاً، هیچ سیستمی حتی جهان هم نمی‌تواند به کلّی تغییر کند. وقتی هرگونه تغییر متوقف شود، افزایش انتروپی به یک مقدار ماکزیمم می‌رسد. کلازیوس از خوانندگان خود می‌خواهد که گزاره‌های کلامی نهایی‌اش را از دو قانون ترمودینامیک، به‌منزلهٔ «قانونهای بنیادی جهان» بپذیرند:

انرژی جهان ثابت است.
انتروپی جهان به‌سوی یک ماکزیمم میل می‌کند.

کلازیوس در مقابل تیت و دیگران

نظریه‌پردازان لزوماً کارشان را در دو مرحله انجام می‌دهند. نخست آنکه آنان می‌باید مطمئن باشند خودشان مفهوم نظریه‌شان را به‌خوبی فهمیده‌اند. دیگر آنکه می‌باید آن را برای دیگران قابل فهم کنند. کلازیوس در مرحلهٔ اول یعنی بسط و توسعهٔ نظریهٔ ترمودینامیکی‌اش موفق بود. شاید به‌ندرت او در تعبیر و کاربردهایی که تکیه‌گاه نظریهٔ او بودند دچار اشتباهی شده باشد. اما به‌دلایلی که بخشی از آن نقطه‌ضعف خود او بوده، وقتی زمان آن فرا می‌رسید که مفاهیم نظریه‌اش را به دنیای علمی ارائه کند مشکل فوق‌العاده‌ای داشته است.

منتقدان کلازیوس غالباً کمیت $\frac{dQ}{T}$ او، بخصوص علامت آن را به‌درستی نمی‌فهمیدند. این آشفتگی قابل فهم است، زیرا کلازیوس خودش در علامتی که به dQ می‌داد، از مقاله‌ای به مقالهٔ دیگر ثابت نبود. او معمولاً درونداد گرمایی را مثبت در نظر می‌گرفت، اما گاهی خلاف این قاعده را به‌کار می‌برد. قصور برای علامت‌گذاری صحیح، یکی از اشتباهاتی بود که پ.گ. تیت[1] (که در مشاجرهٔ جول ـ مایر با تندال جنگ لفظی کرده بود) سمج‌ترین و رک‌گوترین منتقد کلازیوس را گمراه کرده بود. سهم نوشته‌های تیت دربارهٔ ترمودینامیک محدود بود، اما او در جلو انداختن ایده‌های تامسن می‌کوشید. تیت کتابی به‌نام طرح کلی ترمودینامیک نوشت که مجموعه‌ای بود از خرده‌پاره‌های مفهومی و قطعه‌هایی وام‌گرفته از تامسن، کلازیوس و رانکین که بعضی از آنها هم بد فهمیده شده بود.

برجسته‌ترین بدفهمی تیت این بود که اصرار می‌ورزید انتروپی اندازه‌ای از «انرژی دسترس‌پذیر» است. دانستن اینکه او چگونه به چنین تعبیری رسیده، دشوار است. زیرا انتروپی حتی واحدهای انرژی را هم ندارد. شاید این اشتباه ناشی از دید کلازیوس دربارهٔ ارتباط مفهوم تغییر شکل یا انتروپی باشد. برای بریتانیایی‌ها، «تغییر شکل، transformation» (در فیزیک) به‌معنی تبدیل گرما به‌کار است. تیت که هرگز آثار کلازیوس را به‌دقت نخوانده بود، ممکن است به‌سادگی این استنباط از مفهوم تغییر شکل را جانشین تعریف انتروپی کلازیوس کرده باشد.

مدتی کوتاه پس از انتشار کتاب تیت، جیمز کلارک ماکسول یک کتاب درسی با عنوان نظریهٔ گرما منتشر کرد که در آن تعبیر اشتباه تیت از انتروپی به‌عنوان انرژی در دسترس تکرار شده بود. با نوعی تذکر

1. P.G. Tait

کلازیوس در نامه‌ای به مجلهٔ فلسفی، ماکسول به خطای خود پی برد و در ویرایش دوم کتابش ابراز کرد که درواقع ارتباطی میان انتروپی و دمای مطلق و انرژی دسترس‌ناپذیر وجود دارد.

ماکسول به‌عنوان مثال سیستمی را تصویر می‌کند که با دمای مطلق اولیهٔ T، هم به‌طور مکانیکی و هم از لحاظ دمایی با محیطش که در یک دمای ثابت پایینتر T_0 نگه داشته شده، برهم‌کنش دارد. او یک فرایند چرخه‌ای دو مرحله‌ای را مجسم می‌کند که در آن، سیستم مقدار گرمای Q را با محیط مبادله می‌کند. انرژی، انتروپی و دمای آن از U، S و T به U_0، S_0 و T_0 کاهش می‌یابد و در عین حال مقدار W کار بر محیط انجام می‌دهد.

نتیجه‌گیری ماکسول این بود که کل تغییر انرژی $U - U_0$ در این فرایند هرگز نمی‌تواند تماماً به برونداد کاری تبدیل شود. ماکزیمم کار قابل وصول، در عمل بازگشت‌پذیر، $(U - U_0) - T(S - S_0)$ است. ماکسول کمیت $T(S - S_0)$ وابسته به انتروپی را «دسترس‌ناپذیر» نامید که در هیچ مورد نمی‌تواند به کار تبدیل شود. اگر فرایند ماکسول بازگشت‌پذیر باشد، برونداد کار باز هم بیشتر کاهش می‌یابد، به چیزی کمتر از $(U - U_0) - T(S - S_0)$. این اُفت بیشتر، برابر با آنچه تامسن «انرژی تلف‌شده» می‌نامید با ماشین‌آلاتی که بهتر طراحی شده باشند، اجتناب‌پذیر است.

کلازیوس در تصحیح بدفهمی‌های ماکسول موفق شد، اما او با تیت و بعد با تامسن چندان توفیقی نداشت. تیت در کتابش می‌کوشید تا تحلیلی شبیه به طرح ماکسول که به‌اختصار بیان شد، انجام دهد. او در استنتاجش ترتیبی داد که نه‌تنها تمایز بین انرژی دسترس‌ناپذیر و انرژی تلف‌شده نادیده گرفته شود، بلکه در یک عبارت مشهور، هم قانون اول و هم قانون دوم ترمودینامیک را نقض می‌کرد. این اشتباهات فاحش موجب انتقاد تند و تیز کلازیوس در نامه‌های ارسالی به مجلهٔ فلسفی شد. سرانجام تیت در عقب‌نشینی، تامسن را به مشاجره کشانید؛ اما اظهارات تامسن دربارهٔ شرح کلازیوس از قانون دوم، چیزی آگاهانه‌تر از اظهارات تیت نبود.

تصویر گمشده

دانشمندان همیشه عاری از نظر شخصی نیستند، اما آتش مشاجرات یا اعتراضها، سرانجام خاموش می‌شود و سپس به اجماع نظر کارآمد و ارزشمندی می‌رسد. وقتی چنین امری روی می‌دهد (و این قاعده‌ای از تاریخ علم است که همیشه روی می‌دهد.) آنچه به‌جا می‌ماند یک کتاب درسی یا نوعی نوشتهٔ «استاندارد» از یک موضوع آموزشی است. معدودی نام مشخص وابسته به نظریه‌ها، معادلات، یا آحاد باقی می‌ماند، اما داستان آدمی و خود مردم، ادعاها و کشمکشهایشان رنگ می‌بازد. در این امر امتیازی وجود دارد. برای دانشجویان آسان نیست که برای فهمیدن ساختار رسمی علم، در هر مورد، لزوماً با بدفهمی‌های تاریخی نبرد کنند. بدون تردید بعضی از توسعه‌های تاریخی، وقتی گمراه‌کننده باشند ـ در اینجا می‌توان به تلاشهای تیت اشاره کرد ـ بحث آنها ضرورتی ندارد. اما از سوی دیگر، داستان انسانی را که جهت درست خلاقیت را تشخیص می‌دهد، می‌باید به‌خاطر سپرد.

این اظهارنظرها با اندیشه‌های کلازیوس و شأن او ـ یا عدم شأن او ـ موجب تأثیرگذاری کلی در تاریخ علم می‌شود. کار کلازیوس دربارهٔ قانونهای اول و دوم ترمودینامیک در اجماع نظر بر علم ترمودینامیکی که در اواخر قرن نوزدهم و اوایل قرن بیستم برقرار شد، تأثیر فوق‌العاده‌ای داشته است. معادلات کلازیوس در همهٔ کتابهای درسی ترمودینامیک و در مُتون دیگری با تنوع شگفت‌انگیز، نشان داده می‌شود که در آنها روشهای ترمودینامیک کاربرد دارد. بعضی از این معادلات تقریباً به‌طور دقیق با همان صورتی که او آنها را در حدود یک قرن پیش بیان کرده است، نوشته می‌شود. با وجود این خود کلازیوس، حتی نام او، تقریباً ناپدید شده است. در یک نمونه از متن ترمودینامیک جدید، نام او را همراه با یک معادلهٔ نسبتاً کوچکی می‌یابیم. دست‌کم نام او می‌باید در ارتباط با معادلهٔ (۸) قانون اول

$$dU = dQ - PdV$$

و معادلهٔ (۱۷)

$$dS = \frac{dQ}{T} \qquad \text{(فرایند بازگشت‌پذیر)}$$

ذکر می‌شد.

اما بسیار بدتر از این نوع بی‌توجهی، که عاقبت می‌توان آن را جبران کرد، محو شدن کلازیوس به‌عنوان یک موجود انسانی است. شاید بیشتر از هر یک از دانشمندان دیگر قرن نوزدهم، کلازیوس در مطالعات زندگینامه‌نویسی مهجور واقع شده است. ما می‌دانیم که او در کوسلین[1] زاده شده و در خانواده‌ای که هجده فرزند داشته‌اند، جوانترین آنها بوده است. پدرش مدیر یک مدرسهٔ خصوصی کوچک بود، جایی که کلازیوس تعلیمات اولیه‌اش را می‌دید. او تحصیلاتش را در گیمنازیم استتن[2] و سپس در دانشگاه برلین ادامه داد. او در سال ۱۸۴۷ از دانشگاه هاله[3] درجهٔ دکتری دریافت کرد، و پس از انتشار اولین مقاله‌اش دربارهٔ ترمودینامیک، به‌زودی نخستین دورهٔ تدریسش را در مدرسهٔ مهندسی و توپخانهٔ سلطنتی در برلین آغاز کرد. در سال ۱۸۵۵ او به پلی‌تکنیکوم در زوریخ رفت، و به‌مدت چهارده سال در آنجا ماند و بعضی از مهمترین کارهایش را انجام داد. در سال ۱۸۶۹ او به آلمان بازگشت، نخست به دانشگاه وورزبرگ[4] به‌مدت دو سال، و سرانجام به دانشگاه بُن رفت و تا آخر عمر در آنجا ماند. در جنگ فرانکو ـ پروس خارج از صف خدمت کرد و از ناحیهٔ زانو به‌شدت آسیب دید. او ازدواج کرد و دارای شش فرزند بود. همسر او در موقع زایمان به‌طور فجیعی فوت کرد. در کهن‌سالی، وقتی که شصتمین سالهای زندگی خود را می‌گذراند بار دیگر ازدواج کرد. این شرح مختصر بیشترین گزارشهایی است از آنچه دربارهٔ زندگی شخصی کلازیوس می‌توان از مطالب زندگینامه‌ای موجود او جمع‌آوری کرد.

تنها وجهی از شخصیت کلازیوس که می‌توان از اظهارات معاصران او استنباط کرد ستیزه‌جویی اوست. در نامه‌ها می‌خوانیم «کلازیوس پیر» یا «کلازیوس بدخلق غرغرو». او رقیب مادام‌العمر هلمهلتز

1. Köslin 2. Stettin Gymnasium 3. Halle 4. Würzburg

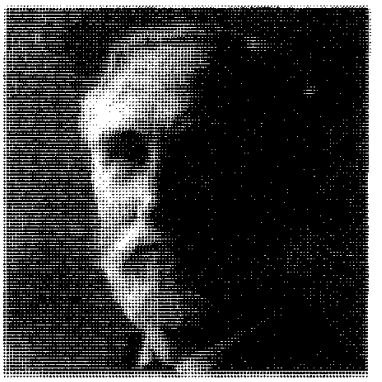
بود. ماکس پلانک نقل می‌کند که می‌کوشیده است تا با کلازیوس دربارهٔ مطالب مربوط به قانون دوم مکاتبه کند، اما کلازیوس به نامه‌های او پاسخ نداده است. در تصاویر کلازیوس، ما چهرهٔ جدی و بی‌گذشت را می‌بینیم. این تصور دشوار نیست که این مرد جملات مجادله‌آمیزی با تیت مبادله کرده باشد.

آنچه ما مؤکداً از کلازیوس داریم مجموعه مقالات دست‌نخوردهٔ اوست. ما می‌توانیم اندیشه‌های کلازیوس را بخوانیم و عمیقاً جایگاه او را که به زیبایی و در مسیر روشن توسعهٔ ترمودینامیک در پنجاه سال میانهٔ قرن نوزدهم طی شده برآورد و تقدیر کنیم ـ از کارنو تا کلازیوس و سرانجام تا بزرگترین جانشین کلازیوس، ویلارد گیبس. نقش کلازیوس محوری و اساسی بود. او می‌دانست چگونه پیام کارنو را بازسازی کند و سپس استنتاجات خود را به‌طوری بیان کند که آنها برای نابغهٔ دیگری چون گیبس مفید واقع شود. مقالات کلازیوس دربارهٔ انتروپی تأثیر عمیقی بر پلانک نیز داشت. پلانک از مفهوم انتروپی به‌عنوان پلی در قلمرو نظریهٔ کوانتوم استفاده کرد. بزرگترین نظریه‌ها، سهم‌های موفقیت‌آمیز خود را دارند و سپس الهام‌بخش ایجاد نظریه‌های بزرگ دیگر می‌شوند، موفقیت کلازیوس از این نوع نادر بود.

این داستانی چشمگیر و مؤثر است، اما به‌عنوان یک داستان ناامیدکننده است؛ فقط به‌علت اینکه ما هنوز شخصیت اصلی را نمی‌شناسیم. اغلب ما اگر دربارهٔ سزان، فلوبر، و واگنر اثری بیشتر از آنچه آنان بر بوم نقاشی یا متن موسیقی گذاشته‌اند، ندانیم، آن را بداقبالی می‌دانیم. کلازیوس، معاصر آنان و با نبوغ خلاقیتی برابر، به‌عنوان یک موجود انسانی، به این طریق از ما گرفته شده است، می‌باید برای این فقدان متأسف باشیم.

۹

بیشترین سادگی
ویلارد گیبس



یک نظریه‌پرداز طبیعی

گیبس مقامهای دانشگاهی یا شهرت علمی زیادی نداشت. طی سی و دو سال آموزش، جمعاً بیش از یک‌صد دانشجو در جلسات او حضور نداشتند. در ده سال اول استخدام در دانشگاه ییل[1] هیچ حقوقی دریافت نکرد. او به‌ندرت در همایشهای تخصصی حضور می‌یافت یا مسافرت می‌کرد. بجز یک سفر ضروری اروپایی به جهان علمی خارج و گشت‌وگذار سالانه به نیوانگلند و کوههای آدیروندک[2]، زندگی او محدود بود به نیوهِیون[3]، کانکتیکات[4]، و فاصلهٔ خانهٔ او در های‌استریت[5] تا محل کارش در آزمایشگاه اِسلوان[6] بیشتر از دو بلوک ساختمانی نبود.

ویلارد گیبس زندگی‌اش را در راههای دیگری بنا می‌کرد. دنیای او فیزیک نظری بود. او در آن دنیا بیشتر از اغلب معاصرانش، از جمله کلازیوس و بولتزمن سیر و سیاحت کرد. همچنان‌که دیگران نویسندهٔ فطری و موسیقیدان فطری هستند، او نظریه‌پرداز فطری بود. رأی و دلاوری او کاملاً با مطالب نظریه‌ای مورد مطالعه‌اش مأنوس شده بود. او نیازی نمی‌دید که با همکاران مطلع در تماس نزدیک باشد ـ درواقع در قرن نوزدهم برای امریکا چنین فرصتی بسیار دشوار بود. او می‌دانست و نمی‌بایست گفته می‌شد که فقط با تمرین و بهره‌مندی از واکنش شهودی و دانش کلی خود، درستی نظر او معلوم می‌شود. کمتر دانشمندان نظریه‌پرداز، این استعداد و اطمینان را داشتند که با چنین شیوهٔ منزوی کار خود را انجام دهند. تنها اینشتین ـ که بعضی از مهمترین مقالاتش را پیش از آنکه نظری به نظریه‌پردازان دیگر داشته باشد نوشته است ـ ممکن است در این جهت از او پیشی گرفته باشد.

---

1. Yale 2. Adirondack 3. New Haven 4. Connecticut 5. High Street 6. Sloane

گیبس و کلازیوس

نخستین اثر منتشرشدهٔ گیبس دربارهٔ ترمودینامیک بود. او در تمام مدت مطالعات ترمودینامیکی‌اش قویاً تحت نفوذ کلازیوس بود، و هیچ تردیدی دربارهٔ این دین باقی نگذاشت. دو مقالهٔ اول گیبس براساس معادلات کلازیوس دربارهٔ گرما

$$dQ = dU + PdV \qquad (۱)$$

و انتروپی بود

$$dS = \frac{dQ}{T} \qquad \text{(فرایند برگشت‌پذیر)} \qquad (۲)$$

گیبس با به‌دست آوردن dQ از معادلهٔ دوم و جانشین کردن آن در معادلهٔ اول، به‌سادگی dQ را حذف کرد و dU را به‌صورت زیر به‌دست آورد

$$dU = TdS - PdV \qquad (۳)$$

(می‌توان ثابت کرد که این معادله محدودیت بازگشت‌پذیری، لازم ندارد، اما این نکته مهم نیست زیرا این معادله تقریباً همیشه برای واکنشهای بازگشت‌پذیر به‌کار می‌رود.) گرچه ابتدا گیبس بود که به اهمیت بنیادی معادلهٔ (۳) پی برد، کلازیوس هم قطعاً دربارهٔ این معادله می‌اندیشید، بنابراین، منصفانه به‌نظر می‌رسد که آن را «معادلهٔ کلازیوس» بنامیم. (گیبس معادلهٔ جامعتر خود را داشت.) به‌نظر می‌رسد کلازیوس اظهارنظری دربارهٔ کار گیبس نکرده باشد. اگر کرده بود عبارتی از دین او به گیبس ممکن بود بی‌مناسبت نباشد. زیرا عمدتاً گیبس بود که تردید و آشفتگی را برطرف کرد و بر معادلهٔ (۳) ضمنی کلازیوس متمرکز شد.

گیبس در سال ۱۸۷۳ در مورد معادلهٔ کلازیوس دو مقاله منتشر کرد. خواندن این مقاله به سبکی که او نوشته است برای دانشجویان امروزی دشوار است، زیرا او بر نوعی استدلال هندسی تکیه می‌کند که دیگر مرسوم نیست. اما برای گیبس و بعضی از معاصرانش بخصوص ماکسول، ساختارهای هندسی به حقیقت فیزیکی نزدیکتر از بحث و استدلال تحلیلی بود که کلازیوس و تامسن به‌کار می‌بردند. نگرش تحلیلی پیشرفتهای بسیاری فراهم آورده بود، اما طولانی بودن و بحثهای انتزاعی نیز تا حدی تأثیر آشفتگی داشت.

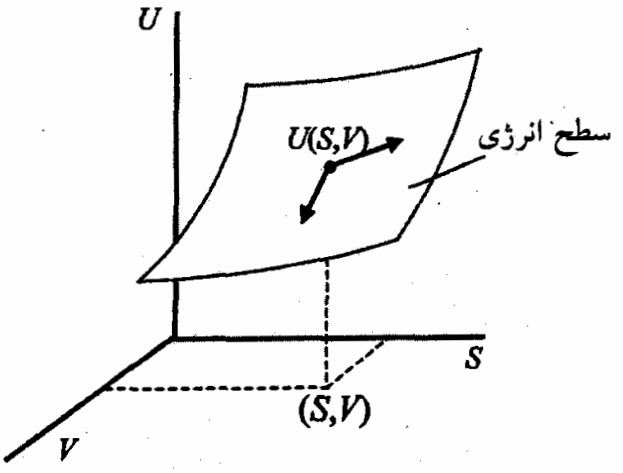
مفهوم انتروپی نمونهٔ خوبی بود از آنچه تفکر تحلیلی می‌توانست و نمی‌توانست در فیزیک به انجام رساند. کلازیوس مفهوم انتروپی را با منطق ریاضی تعریف کرده بود و هیچ‌یک از مشخصه‌های صوری آن را نه از دست داده و نه بد فهمیده بود. با وجود این، او نمی‌توانست اهمیت اساسی انتروپی در ترمودینامیک را به معاصرانش یا به خودش نشان دهد. دیگران به زحمت می‌توانستند مستقیماً به این مشخصات دست یابند. مجادلات تیت‌ـکلازیوس دربارهٔ انتروپی حتی وقتی به مرحلهٔ جنگ و جدال رسیده بود، به مطالبی مربوط می‌شد که از نظر فیزیکی، چیزی بیشتر از نکات ابتدایی نبودند.

گیبس توانست از معادلهٔ (۳) این پیام ریاضی را بخواند که تغییرات dU در انرژی درونی U با تغییرات dS و dV در انتروپی S و حجم V معین می‌شود. یا به‌گفتهٔ دیگر، انرژی درونی، یک تابع $U(S,V)$ از انتروپی و حجم است. او این بستگی U به S و V را در سطوح سه‌بعدی انرژی بیان می‌کرد. طرح بخشی از چنین سطحی در شکل ۹ـ۱ کشیده شده است. یک نقطه بر این سطح مشخص شده و پیکانهایی مماس بر این سطح کشیده شده است تا چگونگی شکل سطح در آن نقطه را نشان دهد. پیکان سمت چپ برای مقدار ثابتی از انتروپی و موازی جهت V کشیده شده است. در این حالت ثابت انتروپی، $dS = 0$، و معادلهٔ (۳) می‌شود

$$dU = -PdV \quad (S \text{ ثابت})$$

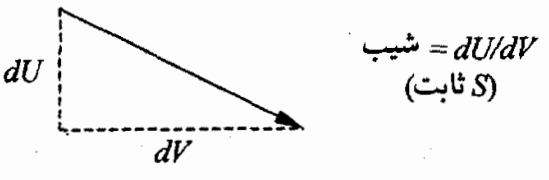
یا

$$\frac{dU}{dV} = -P \quad (S \text{ ثابت}) \qquad (۴)$$



شکل ۹ـ۱ یک سطح انرژی شامل نقاطی با انتروپی S، حجم V و انرژی درونی که با شیوهٔ گیبس به‌صورت تابع $U(S,V)$ از S و V تلقی شده است.

مشتق $\frac{dU}{dV}$ در آخرین معادلهٔ فوق، اندازه‌ای از سرازیری یا «شیب» سطح انرژی در جایی است که پیکان کشیده شده است (شکل ۹ـ۲). بنابر معادلهٔ (۴) همان مشتق برابر است با $-P$، منفی فشار. بنابراین، هرجا بر سطح انرژی، شیب برای مقدار ثابتی از انتروپی، موازی با جهت V باشد، فشار محاسبه می‌شود. این شیب‌ها معمولاً رو به پایین، یعنی منفی‌اند، زیرا فشارها معمولاً مثبت‌اند، و شیب‌ها که به‌صورت $\frac{dU}{dV} = -P$ محاسبه می‌شوند، منفی‌اند.



شکل ۹ـ۲ نمای جانبی پیکان سمت چپ که از شکل ۹ـ۱ استخراج و بزرگ شده است. مانند نسبت ارتفاع به پهنای یک پله، نسبت (ارتفاع) dU به (پهنا) dV، یعنی مشتق $\frac{dU}{dV}$، شیب پیکان و شیب سطح انرژی را در نقطه‌ای که پیکان کشیده شده است، محاسبه می‌کند.

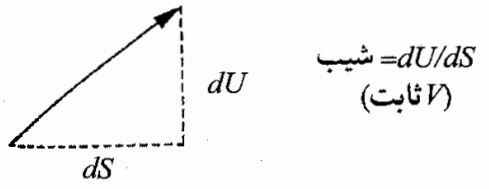
با استدلال مشابهی، پیکان سمت راست در شکل ۹ـ۱ اندازهٔ شیب سطح انرژی موازی با جهت S را برای مقدار ثابتی از V به‌دست می‌دهد. در این مورد چون مقدار V ثابت است، معادلهٔ (۳) به‌صورت زیر درمی‌آید

$$dU = TdS \text{ (ثابت } V)$$

یا

$$\frac{dU}{dS} = T \text{ (ثابت } V) \qquad (۵)$$

در اینجا شیب با مشتق $\frac{dU}{dS}$ محاسبه می‌شود (شکل ۹ـ۳) و آن مشتق نیز، بنابر معادلهٔ (۵)، برابر با دمای مطلق است. در اینجا پیام فیزیکی این است که شیبهای سطح انرژی اندازه‌گیری‌شدهٔ موازی با جهت S، دماهای مطلق را محاسبه می‌کنند و آن شیبها همیشه رو به بالا یعنی مثبت‌اند ـ زیرا دماهای مطلق همیشه مثبت‌اند.



شکل ۹ـ۳ نمای جانبی پیکان سمت راست که از شکل ۹ـ۱ استخراج و بزرگ شده است. مشتق $\frac{dU}{dS}$ شیب پیکان و شیب سطح انرژی را در جایی که پیکان کشیده شده است، محاسبه می‌کند.

گیبس در دو مقالهٔ نخستین خود در سال ۱۸۷۳، این مدل هندسی را با تفصیل هنرمندانه‌ای شرح و بسط داده است. او صفحه‌ای شامل دو بردار مماسی را مجسم می‌کرد و تصورش این بود که این صفحه بر سطح انرژی می‌غلتد: در هر نقطه‌ای از برخورد بین این صفحه و سطح، داستان کامل ترمودینامیک معین می‌شود: یک حجم، یک انتروپی، یک انرژی درونی، و از معادله‌های (۴) و (۵)، فشار و دما. او نشان داد که چگونه می‌توان این سطح را به دو بُعد (انتروپی و حجم) طرح کرد و منحنیهای تراز دما و فشار ثابت را (مانند منحنیهای با ارتفاع ثابت بر یک نقشهٔ توپوگرافی) ترسیم کرد. او ثابت کرد که برای شرایط معین فشار و دما صفحهٔ مماس غلتان نه‌تنها یک، بلکه دو یا حتی سه نقطهٔ تماس همزمان دارد. این نقاط تماس چندگانه نمایانگر وجود چند فاز متفاوت با همدیگر است (مثلاً، جامد، مایع و بخار).

پرینسیپیای ترمودینامیک

گیبس در دو مقالهٔ نخستین‌اش دربارهٔ ترمودینامیک به این نتایج ساده، اما گسترده رسید. گیبس تا این حد آنچه را قبلاً به‌طور رسمی، گرچه من باب آزمایش به‌وسیلهٔ کلازیوس انجام شده بود، تقویت کرد. در اثر بعدی او که در چند بخش بین سالهای ۱۸۷۵ و ۱۸۷۸ منتشر شد، گیبس بار دیگر اعلام کرد که کلازیوس الهام‌بخش او بوده است. او کار خود را با زوج قوانین کلازیوس آغاز کرد: «انرژی جهان ثابت است. انتروپی جهان به یک ماکزیمم میل می‌کند.» او قاعدهٔ انتروپی و سازگاری ساده‌ای از معادلهٔ

(۳) کلازیوس را به‌عنوان اساس کارش گرفت. اما او در این مورد بسیار فراتر از آثار و اشاراتی رفت که کلازیوس فراهم آورده بود.

«مقالهٔ» ۷۸-۱۸۷۵ گیبس ـ که درواقع حدود سیصد صفحه مطلب فشرده و دقیقاً هفتصد معادلهٔ ریاضی شماره‌دار بود ـ بدون اغراق «پرینسیپیای ترمودینامیک» نامیده شد. تعادل مواد ناهمگن گیبس مانند شاهکار نیوتون عملاً حوزهٔ نامحدودی دارد. ساختار آن از ابتدایی‌ترین شکل شروع می‌شود تا معادلات دیفرانسیلی بنیادی، و سپس از معادلات بنیادی تا کاربردهای دور و وسیع می‌رسد. گیبس نظریهٔ ترمودینامیکی بنیادی گازها، مخلوطها، سطوح، جامدات، ته‌نشستی و اسمز را به‌تفصیل توضیح می‌دهد. هر یک از این عنوانها اکنون به‌صورت یک موضوع عمدهٔ پژوهشی، عمدتاً به‌وسیلهٔ شیمی‌فیزیکدانان شناخته شده‌اند. در سالهای ۱۸۷۰ که رشتهٔ تحصیلی شیمی‌فیزیک هنوز متولد نشده بود، موضوعات مورد نظر گیبس ناآشنا و ناهمخوان به‌نظر می‌رسید. مقالهٔ گیبس آنها را زیر چتر بزرگی از یک نظریهٔ وحدت‌یافته گرد هم آورد.

اما این دهها سال پیش از آن بود که کتاب گیبس بیشتر یافت شود، ازاین‌رو خوانندگان علاقه‌مند معدودی داشت. مشابهت دیگری که کتاب گیبس با پرینسیپیای نیوتون داشت ـ و هنوز هم دارد ـ مخاطبان محدود آن است. یک دلیل برای این قصور، انزوای گیبس و دلیل دیگر تصمیم او برای انتشار در یک مجلهٔ گمنام به‌نام نشریهٔ آکادمی علوم و فنون کانکتیکات بود. اما مهمتر سبک نوشتن گیبس بود (و هنوز هم هست) چنانکه ای. تی. بل توصیف می‌کند، خواندن آثار گیبس چیزی شبیه به خواندن نوشته‌های پیرسیمون لاپلاس[1] (ریاضیدان مشهور و جانشین نیوتون در زمینهٔ مکانیک سماوی) است. لاپلاس از بی‌نظمی و به‌هم‌ریختگی در نوشته‌های مطالب ریاضی‌اش نفرت داشت. بنابراین، برای فشردن و تلخیص استدلالهایش «او به‌کرّات نکاتی را از قلم می‌انداخت، اما نتیجه‌گیری را با این اظهار خوشبینانه که "Il est aisé à voir" (فهمیدنش آسان است) به پایان می‌برد. خود او غالباً برای تجدید یا اصلاح استدلالی که با آن، این چیزهای آسان را «فهمیده بود» بدون ساعتها ـ گاهی روزها ـ سخت‌کوشی ناتوان بود. حتی خوانندگان مستعد به‌زودی عادت می‌کردند هر وقت آن عبارت مشهور (فهمیدنش آسان است) ظاهر شود شکوه‌کنان می‌دانستند که احتمالاً باید به‌مدت یک هفته درگیر کاری فروبسته باشند.»

گیبس آن «عبارت مشهور» را زیاد به‌کار نمی‌برد و تردیدی نبود که هرگز او زحمت یادآوری برهانهایش را نمی‌کشید، اما مطمئناً تعداد زیادی از آنها را جا می‌گذاشت. خوانندهٔ جسوری که کتاب تعادل گیبس را می‌گرفت، می‌توانست ماههای بسیاری در انتظار «کار فروبسته» بماند. مارتین کلین[2]، تاریخ‌نویس علم نقل می‌کند لرد ریلی[3]، که خودش فیزیکدان نظری کاملی بود، ضمن نامه‌ای به گیبس اظهار می‌کند که کتاب تعادل او «بسیار فشرده و برای اکثر، بلکه همهٔ خوانندگان بسیار مشکل است.»

1. Pierre Simon Laplace 2. Martin Klein 3. Lord Rayleigh

پاسخ گیبس، بی‌تردید صادقانه، این بود که در عوض کتاب «بسیار طولانی» است زیرا «وقتی من آن را می‌نوشتم احساس ارزش زمان خودم و دیگران را نمی‌کردم.»

نوشتهٔ گیبس به‌علت دشواری ممکن بود مورد ایراد و انتقاد قرار گیرد، اما در عین حال به‌علت جامعیت و صراحت بی‌پیرایه، تقدیر شد. گیبس به هنگامی که از آکادمی امریکایی علوم و فنون مدال رامفرد[1] را دریافت می‌کرد، ایده‌آل خود را چنین بیان کرد: «یکی از اهداف پژوهش نظریه‌پردازی، یافتن دیدگاهی است که از آن موضوع با بیشترین سادگی ظاهر شود.» او همواره یک دید ساده‌تر را در نظر داشت که غالباً به‌معنی کامل کردن زبان ریاضی بود. او به یکی از دانشجویانش، چارلز هیستینگز[2] می‌گفت، «اگر من موفقیتی در فیزیک ریاضی دارم فکر می‌کنم به این علت باشد که من توانسته‌ام از مشکلات ریاضی بگریزم.»

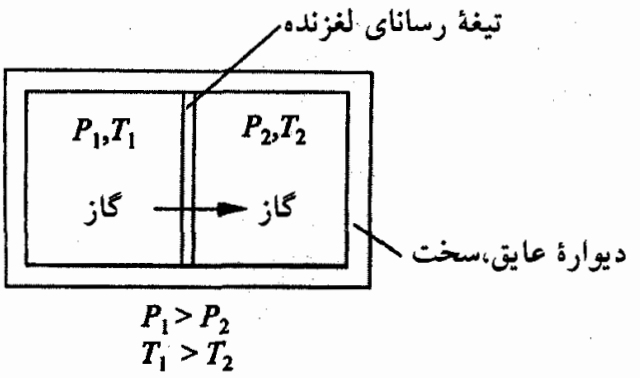
انتروپی ماکزیمم

قاعدهٔ انتروپی کلازیوس، الهام اصلی گیبس علاوه‌بر معادلهٔ (۳) کلازیوس، مؤید آن است که هر تغییری در یک سیستم منزوی (کاملاً بی‌ارتباط با محیط آن) به افزایش انتروپی می‌انجامد. این تغییرات ممکن است با هر نوع غیریکنواختی، مکانیکی، گرمایی، شیمیایی یا الکتریکی صورت پذیرد. مثلاً اگر سیستمی یک بخش سرد و یک بخش داغ داشته باشد، در صورت امکان، گرما از بخش داغ به بخش سرد منتقل می‌شود؛ روی هم‌رفته انتروپی زیاد می‌شود و آن‌قدر این امر ادامه می‌یابد تا سیستم از لحاظ گرمایی یکنواخت شود و به دمایی بین دماهای بالا و پایین برسد. در این صورت سیستم در تعادل گرمایی است، هرگونه تغییری متوقف می‌شود و مقدار انتروپی ماکزیمم است. انتقال مشابهی به‌سوی یکنواختی همراه با افزایش انتروپی به‌سوی یک مقدار ماکزیمم در حال تعادل، در سیستمهای منزوی غیریکنواخت دیگر یافت می‌شود، سیستمهای غیریکنواختی از فشار، ترکیب شیمیایی و پتانسیل الکتریکی. طبیعت از غیریکنواختی‌ها بیزار است و اگر بتواند آنها را تسطیح می‌کند.

به‌منظور استمزاجی از روش گیبس، مثال ساده‌ای است که نشان می‌دهد او چگونه بعضی از این تغییرات انتروپی را تحلیل می‌کرد. یک سیستم گازی با دو بخش را تصور کنید که یک تیغهٔ رسانای گرمایی لغزنده آن را به دو بخش جدا از هم تقسیم می‌کند (شکل ۹ـ۴). یک دیوارهٔ عایق سخت سیستم را احاطه و آن را از محیط اطرافش مجزا می‌کند. در یک بخش، فشار و دما P_1 و T_1 و در بخش دیگر P_2 و T_2 است. P_1 بیشتر از P_2 و T_1 بیشتر از T_2 است، به‌طوری که تیغهٔ لغزنده بر اثر تفاوت فشار از چپ به راست رانده، و گرما نیز در آن جهت منتقل می‌شود.

گیبس برای یافتن شرایط تعادل در این موقعیت متوجه شد که چون سیستم با دیواره‌های سخت و عایق منزوی شده است، انرژی و حجم آن ثابت است. او معادلهٔ (۳) کلازیوس را برای هر دو بخش

1. Rumford 2. Charles Hastings



شکل ۹ـ۴ یک سیستم منزوی در راه رسیدن به تعادل، که با غیریکنواختی‌های مکانیکی و گرمایی رانده می‌شود.

به‌کارگرفت و درنهایت دریافت که بدون هیچ شگفتی، در حالت تعادل فشار و دما مساوی می‌شوند.

$$P_۱ = P_۲ \quad و \quad T_۱ = T_۲ \text{ (تعادل)}$$

در مثالی دیگر، سیستم را دقیقتر و پیچیده‌تر می‌کنیم، به‌طوری که تیغهٔ واسط نه‌تنها متحرک و رسانا، بلکه نفوذپذیر نیز باشد. در این صورت گاز درون سیستم می‌تواند از آن بگذرد و پخش شود. اکنون سیستم به‌طور قابل ملاحظه‌ای پیچیده‌تر است. ما به‌زودی به راه‌حل کلی گیبس برای این مسئله خواهیم پرداخت، اما نخست جا دارد که توجهی به مطالب شیمی داشته باشیم.

درسهایی از شیمی

واکنشهای شیمیایی به زبان مأنوس که با آن آشنایی داریم نوشته می‌شوند. مثلاً

$$۲H_۲ + O_۲ \rightarrow ۲H_۲O$$

به این معنی است که هیدروژن ($H_۲$) با اکسیژن ($O_۲$) ترکیب و آب ($H_۲O$) تولید می‌شود، واکنش بسیار مشهوری که به‌طور وسیعی در ماشینهای موشک و سلولهای سوختی به‌کار می‌رود. مادهٔ تشکیل‌شده در واکنش، $H_۲O$، «محصولِ» واکنش، و مواد مصرف‌شده، $H_۲$ و $O_۲$، «واکنش‌دهنده»ها هستند. در کاربرد امروزی این گزارهٔ شیمیایی را می‌توان در هر مقیاسی از ریزمقیاس تا بزرگ‌مقیاس به‌کار برد. در تراز کوچکترین ریزمقیاس چنین توصیف می‌شود که از ترکیب دو مولکول هیدروژن با یک مولکول اکسیژن، دو مولکول آب تشکیل می‌شود. همین نسبتها بر تعداد واکنش صادق است، حتی تعداد بسیار زیادی که مقادیر $H_۲$، $O_۲$ و $H_۲O$ در اندازه‌های بزرگ‌مقیاس باشد. برای هر تعداد N،

$$۲N \text{ مولکول } H_۲O \rightarrow N \text{ مولکول } O_۲ + ۲N \text{ مولکول } H_۲$$

شیمیدانان، برای کارهای کمّی خود به مقدار N استانداردی نیاز دارند. یک انتخاب دلخواه اما آسان، تعداد مولکولهای موجود در حدود ۲ گرم (درواقع ۲٫۰۱۶ گرم) $H_۲$ است، که عدد آووگادرو نامیده می‌شود. (آمِدو آووگادرو[1] در سال ۱۸۱۱ـاوایل تاریخ فیزیک مولکولی‌ـپیشنهاد کرد که حجمهایی از

1. Amedeo Avogadro

گازها در فشار و دمای یکسان، دارای تعداد مولکولهای یکسانند.) عدد آووگادرو با N_A نشان داده می‌شود و مقدار آن

$$N_A = ۶/۰۲۲ \times ۱۰^{۲۳}$$

این عدد، بی‌نهایت بزرگ است. (تقریباً برابر با تعداد فنجانهای آب در اقیانوس آرام.) این تعداد از مولکولهای $H_۲$ یک «مولکول گرم»، یا یک «مول» هیدروژن است. یک مول از مولکولهای $O_۲$، نیز شامل N_A مولکول، با وزنی در حدود ۳۲ گرم و یک مول از مولکولهای $H_۲O$ در حدود ۱۸ گرم است. خلاصهٔ همهٔ این موارد برای واکنش آب، به‌صورت زیر است:

	$۲H_۲$	+	$O_۲$	→	$۲H_۲O$
	$۲N_A$ مولکول	+	N_A مولکول	→	$۲N_A$ مولکول
یا	۲ مول	+	۱ مول	→	۲ مول
یا	۴ گرم	+	۳۲ گرم	→	۳۶ گرم

توجه داشته باشید که در این واکنش شیمیایی ـ و واکنشهای دیگر ـ اتمها کم یا زیاد نمی‌شوند: در سطح مولکولی، شش اتم وارد واکنش می‌شود (چهار H در $۲H_۲$ و دو O در $O_۲$) و شش اتم واکنش را ترک می‌کنند (چهار H و دو O در $۲H_۲O$). درنتیجه، جرم در واکنش نه به‌دست می‌آید و نه از بین می‌رود: ۳۶ گرم $H_۲$ و $O_۲$ از ۳۶ گرم $H_۲O$.

پتانسیلها

معادلهٔ (۳) کلازیوس به ما می‌گوید که هرگاه حجم V و انتروپی S تغییر کند، انرژی درونی نیز تغییر می‌کند. اما این همهٔ داستان انرژی نیست. همهٔ مواد شیمیایی، یا آن‌طور که گیبس می‌نامد «اجزای سازندهٔ شیمیایی»، انرژی درونی خاصی دارند و اگر جزء سازنده به سیستم اضافه شود، مثلاً از طریق لوله‌ای از ناحیهٔ محیط، انرژی درونی کلی U به نسبت مقدار جزء اضافه‌شده تغییر می‌کند.

فرض کنید سیستم یکنواختی، فقط شامل یک جزء سازندهٔ شیمیایی (مثلاً آب)، و منزوی از محیط اطرافش است، بجز لوله‌ای که از آن مقدار اندکی از جزء سازنده اندازه‌گیری‌شده به‌قدر dn مول به سیستم افزوده می‌شود. در این صورت انرژی درونی سیستم متناسب با dn تغییر می‌کند،

$$dU \propto dn \quad \text{(سیستم منزوی بجز لوله)}$$

گیبس این رابطه را با گنجاندن یک ضریب تناسب به‌صورت معادلهٔ زیر نوشت

$$dU = \mu dn \quad \text{(سیستم منزوی بجز لوله)} \qquad (۶)$$

ضریب μ یک تابع حالت است که گیبس آن را یک «پتانسیل» نامید. ماکسول نام بهتری به آن داد و آن «پتانسیل شیمیایی» بود. پتانسیل شیمیایی برای تغییرات شیمیایی همچون فشار و دما برای تغییرات

مکانیکی و گرمایی است. اگر سیستمی برای یک جزء سازنده غیریکنواختی‌های شیمیایی داشته باشد، آن جزء از نواحی پتانسیل شیمیایی بالا به نواحی پایین مهاجرت می‌کند تا در حال تعادل، همهٔ غیریکنواختی‌ها هموار و تسطیح شود.

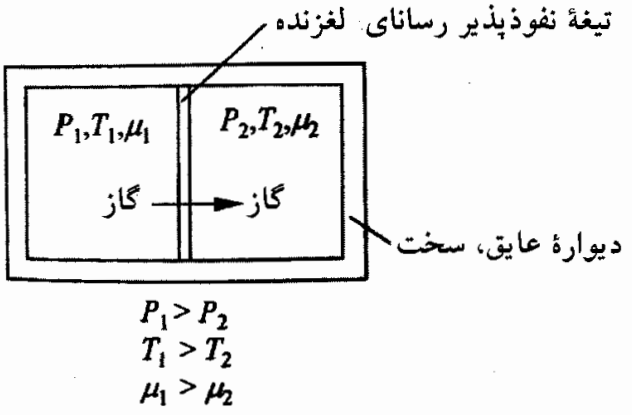
گیبس معادلهٔ (۶) را با این فرض بسط و عمومیت داد که اگر انزوای سیستم بیشتر شکسته شود، و سیستم با یک لوله، در فرایندهای گرمایش و انجام کار، امکان ارتباط با محیطش را داشته باشد، تنها دو جملهٔ اضافی، لازم است، جمله‌هایی که قبلاً در معادلهٔ (۳) کلازیوس دیدیم

$$dU = TdS - PdV + \mu dn \qquad (۷)$$

این شکل ساده‌ای است از آنچه ما آن را «معادلهٔ گیبس» می‌نامیم.

اکنون می‌توانیم به مثالی از سیستم دوبخشی منزوی‌شده، با یک تیغهٔ نفوذپذیر، لغزندهٔ رسانا (شکل ۹ـ۵) بازگردیم. گیبس این مورد را بار دیگر با وقوف به اینکه انرژی و حجم کل سیستم ثابت است، تحلیل می‌کرد. او همچنین فرض می‌کرد که مقدار کل گاز ثابت است، زیرا دیواره‌های منزوی‌کننده از کم یا زیاد شدن گاز از محیط ممانعت می‌کنند؛ بنابراین، گاز مجبور می‌شود که از میان دو بخش سیستم عبور کند. در این صورت دوگزاره از معادلهٔ (۷) هر یک برای یک بخش، حکم می‌کند که مانند قبل، تیغهٔ لغزنده تحت تفاوت فشار از چپ به راست حرکت کند و گرما به‌علت تفاوت دما در همان جهت منتقل شود. ضمناً گاز به‌علت تفاوت پتانسیل از تیغهٔ نفوذپذیر می‌گذرد. سرانجام در حال تعادل خواهیم داشت

$$P_۱ = P_۲, \quad T_۱ = T_۲ \quad \text{و} \quad \mu_۱ = \mu_۲ \quad \text{(تعادل)}$$



شکل ۹ـ۵ یک سیستم منزوی که با نایکنواختی‌های مکانیکی، گرمایی و شیمیایی، در جهت رسیدن به تعادل، رانده می‌شود.

در اینجا می‌توانیم نقشهای موازی فشار، دما و پتانسیل شیمیایی را در تعیین تعادل مکانیکی، گرمایی و شیمیایی ببینیم.

از لحاظ یک معادلهٔ دیفرانسیلی، معادلهٔ (۷) گیبس به‌طور غیرعادی قابل فهم و قابل استفاده است. برخلاف اکثر معادلات دیفرانسیلی عمدهٔ دیگر فیزیک، این معادله با منتهی‌درجهٔ سادگی (انتگرال‌گیری) حل می‌شود. ساختار ریاضی خاص این معادله به ما امکان می‌دهد تا dU را با U، dS را با S، dV را با V و dn را با n جانشین کنیم و معادله را به شکل انتگرالگیری‌شده درآوریم

$$U = TS - PV + n\mu \qquad (۸)$$

معادلهٔ (۷) و (۸) هنوز منحصر به سیستمی، فقط شامل یک جزء سازندهٔ شیمیایی است. ویژگی خوشایند دیگر معادلهٔ گیبس، این است که می‌تواند با چند تغییر ساده، با هر تعداد جزء سازندهٔ شیمیایی سازگاری داشته باشد. هرگاه دو جزء سازنده در سیستم باشد که آنها را A و B بنامیم معادله‌های (۷) و (۸) دو جملهٔ پتانسیل شیمیایی، هر جمله برای یک جزء، خواهند داشت.

$$dU = TdS - PdV + \mu_A dn_A + \mu_B dn_A \qquad (۹)$$

و

$$U = TS - PV + n_A\mu_A + n_B\,\mu_B \qquad (۱۰)$$

اجتناب از مولکولها

گرچه گیبس ترجیحاً می‌توانست از کمیتهای مولی استفاده کند (آن‌طور که ما از nS و dnS در معادلات (۷) تا (۱۰) به‌کار گرفتیم)، اما او نه از کمیتهای مولی استفاده کرد و نه معادلات شیمیایی را با نوعی تعبیر مولکولی نوشت. بلکه او واحدهای جرمی (مثلاً گرم) را برای اندازه‌گیری کمیتهای اجزای سازندهٔ شیمیایی به‌کار گرفت. شیوهٔ او برای نوشتن واکنش آب، که برای ما جالب به‌نظر می‌رسد، چنین بود

۹ گرم آب = ۸ گرم اکسیژن + ۱ گرم هیدروژن

و پتانسیلهای شیمیایی را با توجه به جرم m به‌جای مولهای n، تعریف می‌کرد، بنابراین، نوشتن معادلهٔ (۸) او چنین بود

$$U = TS - PV + m\mu$$

در سالهای ۱۸۷۰، شواهد آزمایشی مستقیمی برای وجود مولکولها پیشنهاد نشده بود، و بسیاری (نه همه) از فیزیکدانان ترجیح می‌دادند که مطالب فیزیکی‌شان را بدون فرضیهٔ مولکولی بنویسند. گیبس در کتاب تعادلش در اغلب موارد این سلیقه را دنبال کرد. (چنانکه گفته شد، کلازیوس در سالهای ۱۸۶۰ به این طریق عمل می‌کرد.)

اما وقتی پای نکته‌ای بنیادی در میان بود، گیبس بدون تردید از مولکولها یاری می‌گرفت. او یک محاسبهٔ مشروح برای واکنشی به‌عمل آورد که در آن دو مولکول NO_2 با هم ترکیب می‌شوند و یک مولکول N_2O_4 تنها تشکیل می‌دهند. و در میان یک بحث تغییرات انتروپی برای فرایندهای مخلوط شدن، او اظهارنظر پیشگویانه‌ای کرد که آغازگر رشتهٔ علمی مهمی شد و او بعداً آن را «مکانیک آماری» نامید.

این فکر در خاطر او خطور می‌کرد که اختلاط خودبه‌خود دوگاز خالص، مثلاً A و B، برای تشکیل یک مخلوط یکنواخت،

A خالص + B خالص $\rightarrow$ مخلوط A و B

همواره به افزایش انتروپی می‌انجامد. (این نمونهٔ دیگری است از افزایش انتروپی همراه با تمایل طبیعت برای تحول یافتن نایکنواختی‌ها به یکنواختی.) گیبس چنین اختلاطی را در مقیاس مولکولی، به‌صورت حرکت بی‌نظم و کاتوره‌ای مولکولهای A و B تصور می‌کرد که سبب می‌شود آنها در یکدیگر پخش شوند و دیر یا زود مخلوطی یکنواخت شوند. او همچنین تصور می‌کرد که فرایند خالص شدن اجزای مخلوط با کاهش انتروپی همراه است،

$$B \text{ خالص} + A \text{ خالص} \longrightarrow A \text{ و } B \text{ مخلوط}$$

که در آن باید مولکولهای A در یک جهت و مولکولهای B در جهت دیگر حرکت کنند تا مخلوط به‌طور خودبه‌خود به فازهای A خالص و B خالص جدا شود. اما این امر هرگز مشاهده نشده است، چون وقتی مولکولهای A و B مخلوط شوند، تعداد نجومی مولکولها و حرکت کاتوره‌ای آنها سبب می‌شود که جدا شدن آنها بسیار نامحتمل باشد.

با وجود این گیبس متوجه شده بود که خالص شدن و کاهش انتروپیِ وابسته به آن، غیرممکن‌هایی کاملاً مطلق نیستند، فقط فوق‌العاده نامحتمل‌اند. او می‌نویسد «به‌گفتهٔ دیگر، غیرممکن بودن یک کاهش جبران‌نشدنی انتروپی باید به نامحتمل بودن تبدیل شود.» خلاصه‌تر بگوییم، استنتاج گیبس این بود که انتروپی حالت ترمودینامیکی به محتمل بودن آن حالت بستگی دارد؛ حالت مخلوط بسیار محتملتر از حالت خالص است.

گیبس در کتاب تعادلش این استدلال را بیشتر دنبال نمی‌کند، اما در حدود همان زمان، بولتزمن مستقلاً تعبیر احتمالی بودن انتروپی را با جملات کمّی بسط می‌داد و بعدها در سال ۱۹۰۲ گیبس انتروپی-احتمال را به هستهٔ مرکزی تعبیر مولکولی ترمودینامیکش مربوط کرد.

انرژی گیبس

هرگاه پتانسیلهای شیمیایی برای همهٔ اجزای سازندهٔ شیمیایی در یک سیستم اضافه شود، نوع خاصی انرژی به‌نام «انرژی گیبس» حاصل می‌شود. فرض کنیم دو جزء سازندهٔ A و B در یک سیستم وجود دارد و مقادیر مولی آنها n_A و n_B است؛ حاصل‌جمع پتانسیلهای مورد نظر $n_A\mu_A + n_B\mu_B$ است که ما با معادلهٔ (۱۰) و تغییر آرایش، آن را ارزیابی می‌کنیم

$$U + PV - TS = n_A\mu_A + n_B\mu_B \qquad (۱۱)$$

کمیت سمت چپ این معادله تابع حالتی را معین می‌کند که امروزه آن را انرژی گیبس می‌نامیم و با نماد G نشان داده می‌شود. (گیبس آن را تابع ζ می‌نامید)،

$$G = U + PV - TS \qquad (۱۲)$$

که معادلهٔ (۱۱) را ساده می‌کند

$$G = n_A\mu_A + n_B\mu_B \qquad (۱۳)$$

ما از این معادله می‌توانیم بفهمیم که $n_A\mu_A$ سهمی از انرژی گیبس برای n_A مول از A در سیستم است، و بنابراین، μ_A انرژی گیبس برای یک مول A است. به‌همین نحو $n_B\mu_B$ انرژیهای گیبس برای n_B و یک مول از B است.

یک دلیل برای تعیین انرژی گیبس موضوع سادهٔ صرفه‌جویی است: یعنی در یک تابع حالت تنها، همهٔ تابعهای حالت مهم دیگر ترمودینامیک (U، S و V) و همچنین متغیرهای اصلی تعیین حالت (P و T) را فشرده می‌کند. این امر غریزهٔ اولیهٔ فیزیکدانان را ارضاء می‌کند که مطالب ریاضی خود را تا حد ممکن متراکم کنند. اما انرژی گیبس و پتانسیلهای شیمیایی پیش‌درآمد آن، کارهای بسیار بیشتری انجام می‌دهند.

تغییر شکل قانون دوم

کلازیوس قانون دوم ترمودینامیک را به‌صورت اصلی می‌دانست که نشان می‌دهد چگونه انتروپی‌ها محاسبه می‌شوند. برای یک فرایند بازگشت‌پذیر، محاسبه عبارت است از

$$dS = \frac{dQ}{T}$$

و برای یک فرایند بازگشت‌ناپذیر

$$dS > \frac{dQ}{T}$$

در اینجا، این دو گزاره را در یک گزارهٔ مساوی‌ـنامساوی ترکیب می‌کنیم،

$$dS \geq \frac{dQ}{T}$$

(برای نماد $\geq$، بخوانید «بزرگتر یا مساوی»)، از معادلهٔ (۱) معادل مقدار Q را در این معادله جانشین می‌کنیم،

$$dS \geq \frac{dU + PdV}{T}$$

و با تغییر آرایش می‌توانیم آن را به‌صورت زیر بنویسیم

$$dU + PdV - TdS \leq 0 \qquad (۱۴)$$

اگر فشار P و دمای T ثابت باشند،

$$PdV = d(PV)$$

و

$$TdS = d(TS)$$

برای حاصلضرب ax اگر a ثابت باشد $adx = d(ax)$. بنابراین، برای ثابتهای P و T مساوی ـ نامساوی (۱۴) می‌شود

$$dU + d(PV) - d(TS) \leq 0$$

یا

$$d(U + PV - TS) \leq 0$$

یا با تعریف (۱۲) مشخص می‌شود،

$$dG \leq 0$$

بخش مساوی این گزاره برای یک فرایند یا تعادل بازگشت به‌کار می‌آید،

$$dG = 0 \quad \text{(فرایند یا تعادل بازگشت‌پذیر؛ } P \text{ و } T \text{ ثابت)} \qquad (۱۵)$$

و بخش نامساوی برای یک فرایند بازگشت‌ناپذیر،

$$dG < 0 \quad \text{(فرایند بازگشت‌ناپذیر؛ } P \text{ و } T \text{ ثابت)} \qquad (۱۶)$$

گرچه انتروپی (در یک سیستم منزوی) در تعادل به یک ماکزیمم افزایش می‌یابد، انرژی گیبس (در سیستمی با فشار و دمای ثابت) در جهت معکوس تغییر می‌کند، و به یک مینیمم کاهش می‌یابد.

ترمودینامیک شیمیایی

ما اجزای سازندهٔ شیمیایی در حال ورود و ترک یک سیستم از طریق لوله‌ها را تصویر کردیم. (غشاءها ظریفتر خواهند بود.) اجزای سازنده می‌توانند از طریق واکنشهای شیمیایی نیز پدیدار و ناپدید شوند. مثلاً با واکنش تشکیل آب که قبلاً متذکر شدیم، H_2 و O_2 برکنار می‌شوند و H_2O افزوده می‌شود.

$$2H_2 + O_2 \rightarrow 2H_2O$$

معادلهٔ (۹) گیبس، و ضمائم آن برای بیشتر از دو جزء، برای این سیستم و هر سیستم واکنش‌کنندهٔ دیگر به‌کار می‌آید. فرض کنیم مقدار اندکی، $2dx$ مول، از H_2O تولید شود (برای حفظ علامتهای درست، ما dx را مثبت می‌گیریم)، بنابراین، تغییرات مولی در واکنش‌دهنده‌های H_2 و O_2، که در واکنش برکنار می‌شوند، مقادیر منفی $-2dx$ و $-dx$ـاند، یعنی،

$$dn_{H_2O} = 2dx$$

$$dn_{H_2} = -2dx$$

$$dn_{O_2} = -dx$$

و معادلهٔ گیبس برای سه جزء H_2O، H_2 و O_2 عبارت است از

$$dU = TdS - PdV + 2\mu_{H_2O}dx - 2\mu_{H_2}dx - \mu_{O_2}dx$$
$$= TdS - PdV + (2\mu_{H_2O} - 2\mu_{H_2} - \mu_{O_2})dx$$

یا

$$dU + PdV - TdS = (2\mu_{H_2O} - 2\mu_{H_2} - \mu_{O_2})dx$$

مانند قبل، اگر فشار P و دمای T ثابت باشند، سمت چپ این معادله می‌شود $d(U+PV-TS) = dG$، بنابراین،

$$dG = (2\mu_{H_2O} - 2\mu_{H_2} - \mu_{O_2})dx \quad (P \text{ و } T \text{ ثابت})$$

قانون دوم به ما می‌گوید که برای فشار و دمای ثابت $dG \leq 0$. ازاین‌رو، بنابر آخرین معادله،

$$2\mu_{H_2O} - 2\mu_{H_2} - \mu_{O_2} \leq 0 \quad (P \text{ و } T \text{ ثابت}) \qquad (۱۷)$$

(به‌خاطر داشته باشید که dx را مثبت گرفتیم).

در اینجا می‌بینیم پتانسیلهای شیمیایی ترکیب می‌شوند تا ویژگی یک واکنش شیمیایی کامل را با محاسبهٔ «تغییر انرژی گیبسِ» واکنش، مشخص کنند. منظور از تغییر انرژی گیبس، تفاوت بین انرژی گیبس برای محصول واکنش $(2\mu_{H_2O})$ و انرژی گیبس برای دو واکنش‌دهنده است $(2\mu_{H_2} + \mu_{O_2})$ که امروزه به‌صورت زیر نشان داده می‌شود

$$\Delta_r G = 2\mu_{H_2O} - \mu_{O_2} - 2\mu_{H_2}$$

(نماد Δ دلالت بر تغییرات محدود و متناهی دارد، و قرینهٔ d است که نمایندهٔ تغییرات اندک و بی‌نهایت کوچک است.) همین دستورعمل، یعنی پتانسیلهای شیمیایی برای محصولها منهای پتانسیلهای شیمیایی برای واکنش‌دهنده‌ها، برای محاسبهٔ تغییر انرژی گیبس $\Delta_r G$ هر واکنشی به‌کار می‌آید. نتیجهٔ کلی که با مساوی‌ـنامساوی (۱۷) نشان داده می‌شود به‌صورت زیر است

$$\Delta_r G \leq 0 \quad (P \text{ و } T \text{ ثابت})$$

مساوی عمل بازگشت‌پذیر یا تعادل را توصیف می‌کند،

$$\Delta_r G = 0 \quad (P \text{ و } T \text{ ثابت؛ عمل بازگشت‌پذیر یا تعادل}) \qquad (۱۸)$$

و نامساوی عمل بازگشت‌ناپذیر را،

$$\Delta_r G < 0 \quad (P \text{ و } T \text{ ثابت؛ عمل بازگشت‌ناپذیر}) \qquad (۱۹)$$

در اینجا به‌خاطر سپردن تصویر فیزیکی آسان است. هر واکنش شیمیایی بر سطح انرژی گیبس در سراشیبی ($\Delta_r G < 0$ به‌معنی سراشیبی است) حرکت می‌کند، هرگاه بتواند با تفاوت پتانسیل شیمیایی بین محصولات و واکنش‌دهنده‌ها رانده شود. تغییر شیمیایی ادامه می‌یابد تا پتانسیلهای شیمیایی واکنش‌دهنده و محصول به تعادل برسند، در این صورت تغییر انرژی مساوی صفر می‌شود، و تعادل شیمیایی حاصل می‌شود.

یک واکنش شیمیایی که به‌طور خودبه‌خود با انرژی گیبس فرود می‌آید شبیه یک وزنهٔ در حال سقوط، و نیز شبیه سقوط گرما از دمای بالا به دمای پایین در یک ماشین حرارتی است. فرود واکنش شیمیایی مانند سقوط وزنه و گرما می‌تواند منبع مفیدی برای انجام کار باشد. کاری که غالباً با ایجاد واکنش در یک سلول الکتروشیمیایی مصرف می‌شود و برونداد کار الکتریکی فراهم می‌کند. نمونه‌هایی از آنها، باتریهای چراغ قوه و سلولهای سوختی است.

یادآور می‌شویم که مقدار کار حاصل از یک وزنهٔ در حال سقوط یا از سقوط گرما در یک ماشین حرارتی بستگی دارد به اینکه ماشین‌آلات مربوط تا چه حد خوب طراحی شده باشد؛ اگر دستگاه به‌طور بازگشت‌پذیر عمل کند بیشترین کارایی عملکرد را به‌دست می‌آوریم. مفهوم انرژی گیبس به‌طوری طراحی شده است که تغییر انرژی گیبس $\Delta_r G$ بهترین کار الکتریکی قابل حصول ممکن از یک سلول الکتروشیمیایی را محاسبه می‌کند؛ سلولی که واکنش آن به‌طور بازگشت‌پذیر در جریان باشد. برای واکنش آب، می‌توانیم از داده‌های انرژی فهرست‌شدهٔ گیبس ، محاسبه کنیم که یک سلول الکتروشیمیایی بازگشت‌پذیر هیدروژن، اکسیژن، برونداد الکتریکی ۱٫۲۳ ولت ایجاد می‌کند (هرگاه H_2O به‌جای گاز به‌صورت مایع تولید شده باشد). سلولهای الکتروشیمیایی عملی همیشه تا حدی بازگشت‌ناپذیرند. یک سلول سوختی که از واکنش آب استفاده می‌کند، احتمالاً برونداد در حدود ۰٫۸ ولت داشته باشد.

تغییر انرژی گیبس برای یک واکنش شیمیایی، ماکزیمم انرژی موجود «یا آزاد» را برای انجام کار محاسبه می‌کند. به این دلیل، انرژی گیبس غالباً «انرژی آزاد» نیز نامیده می‌شود.

گیبس و ماکسول

گیبس برای ارسال تجدید چاپهای مقالاتش فهرست پُستی طویلی داشت، احتمالاً برای هر دانشمند سرشناسی در جهان که ممکن بود علاقه‌ای به کارش داشته باشد. غالب این مطالب پُستی، حتی آنهایی که برای کلازیوس ارسال می‌شد، در بدو امر، مورد توجه قرار نمی‌گرفت. اما این مقاله‌ها به‌سرعت توجه ماکسول را جلب کرد. ماکسول بلندنظرتر و هوشیارتر از همکارانش بود و بخصوص استفادهٔ گسترده از استدلال هندسی گیبس را می‌ستود. دو مقالهٔ سال ۱۸۷۳ گیبس دربارهٔ تعبیر هندسی معادلهٔ کلازیوس، ماکسول را برانگیخت تا یک مدل گچی که نمایانگر سطح انرژی کاملی برای آب باشد، بسازد. او بر این «تندیسِ» آب ناحیه‌ای را قرار داد که در آنها فازهای مایع، بخار و جامد با هم وجود داشتند، ناحیه‌هایی

که ممکن بود دو فاز با هم وجود داشته باشند، و سه‌گوشه‌ای که وجود هر سه فاز را با هم نشان می‌داد. او بر سطح مدل، خط ترازهای فشار و دمای ثابت را آن‌طور که از معادلات کلازیوس برمی‌آمد، حک کرده بود. ماکسول یک نسخه از این تندیس آب را برای گیبس ارسال کرد که موجب خرسندی و خوشحالی او شد، اما به شاگردانی که دربارهٔ آن پُرس‌وجو می‌کردند با فروتنی معمول گفت که این مدل از «دوستی در انگلستان» به دستم رسیده است.

یکی از زندگینامه‌نویسان گیبس، کِرودر[1] می‌نویسد که ماکسول درواقع «عامل شهرت اندیشمندی» گیبس شده بود، اما طولی نکشید که در سال ۱۸۷۹، تنها یک سال پس از انتشار بخش نهایی کتاب تعادل گیبس، ماکسول نابه‌هنگام وفات یافت. کِرودر در ادامه می‌گوید اگر ماکسول زنده بود «عظمت اکتشافات گیبس ممکن بود ده سال زودتر فهمیده شود و شیمی‌فیزیک و شیمی صنعتی امروز [سالهای ۱۹۳۰] بیست سال پیش به توسعهٔ فعلی رسیده باشد.»

در حدود همان سال ۱۸۷۹ گیبس در مؤسسهٔ جدید آرمانی دانشگاه جان هاپکینز، در بالتیمور یک سلسله سخنرانی کرد. پیش از بازگشت گیبس به نیوهاون، مقامی در بخش فیزیک دانشگاه جان هاپکینز، از طرف گیلمن[2]، رئیس دانشگاه (که قبلاً کتابدار دانشگاه ییل بود)، به او پیشنهاد شد. این پیشنهاد جالب‌توجهی بود. گیلمن و مدیران بخش درصدد جذب نیروی پژوهشی مستعد و ممتازی در فیزیک و ریاضیات بودند. گیبس در دانشگاه ییل هنوز دستمزدی دریافت نمی‌کرد. نه سال پس از انتصاب به‌عنوان استاد فیزیک و ریاضی، گیلمن حقوق قابل‌ملاحظه‌ای برای او پیشنهاد کرد.

گیبس در نظر داشت که این پیشنهاد را بپذیرد. او امیدوار بود که مذاکرات او با گیلمن مخفی بماند، اما خبرها به بعضی از همکارانش درزکرد و آنان به‌سرعت اخبار را به گوش جیمز دانا[3] رئیس دانشگاه ییل رساندند. در نامه‌ای از دانا به گیبس از او تقاضا شده بود «با ما بمان» و اظهار امیدواری کرده بود که «به‌زودی از طریق اهدای امتیازاتی، کاری انجام خواهد گرفت که نشان می‌دهد خدمات شما واقعاً ارزشمند است.» تقاضا صریح و روشن بود: «جان هاپکینز بدون شما می‌تواند بسیار بیشتر از آنچه ما می‌توانیم به موفقیتهایی برسد. ما نمی‌توانیم.»

گیبس شگفت‌زده، متأثر و سرانجام متقاعد شد. او مراتب تأسف خود را برای گیلمن ارسال کرد «در چند روز گذشته مخالفت بسیار غیرمنتظره‌ای نسبت به کار جدید من، در میان همکارانم آشکار شده است ـ مخالفتی چنان شدید که برای من دیگر غیرممکن شده است پیشنهاد شما را بپذیرم... گفتهٔ شما را به‌خاطر دارم مبنی بر اینکه ... شما فکر می‌کردید گسستن از جایی که من با آن پیوندهایی دارم دشوار است. درست بود ـ من دریافتم که دشوارتر از آن است که انتظارش را داشتم.» از اینها گذشته ییل جایی متعلق به او بود.

1. J.G Crowther 2. D.C. Gilman 3. James Dana

فراسوی ترمودینامیک

طی سالهای ۱۸۸۰ و ۱۸۹۰ گیبس (که اکنون دو هزار دلار حقوق سالانه دریافت می‌کرد) دربارهٔ مسئلهٔ نظریه‌ای بزرگ دیگری می‌اندیشید و آن تعبیر مولکولی ترمودینامیک بود. گیبس در کتاب تعادل خود تا حد ممکن از فرضیه‌های مولکولی اجتناب می‌کرد. تمرکز او بر انرژی بزرگ مقیاس، مفاهیم انتروپی و کمیتهای مشتق‌شده از آنها مانند پتانسیل شیمیایی و تابعی بود که ما آن را انرژی گیبس می‌نامیم. گیبس با ایجاد این دید بزرگ مقیاس در سالهای ۱۸۷۰ متقاعد شد که وقت آن است تا پژوهش برای «مبانی عقلانی» ترمودینامیک را در خُرد مقیاس یا در سطح مولکولی، ادامه دهد. این نوعی مکانیک مولکولی بود که لزوماً به‌علت تعداد بسیار فراوان مولکولهای موجود در سیستمهای ترمودینامیکی، ایجاب می‌کرد آماری باشد، ازاین رو گیبس آن را «مکانیک آماری» نامید. مفاهیم انرژی و انتروپی بار دیگر اهمیت اساسی داشت. اما در این حال آنها به‌صورت مقادیر میانگین محاسبه می‌شدند، و انتروپی در ارتباط با احتمال که در کتاب تعادلش مدتها قبل به آن اشاره کرده بود تعبیر می‌شد. او آثار پیشینیانش، ماکسول و بولتزمن را یک کاسه کرد، و کوشید تا راه را برای یک آشوب مفهومی به‌نام نظریهٔ کوانتوم هموار کند. وقتی گیبس کتاب اصول مقدماتی در مکانیک آماری‌اش را در سال ۱۹۰۲ منتشر کرد، نظریهٔ کوانتوم تازه مطرح شده بود (و غالباً مورد توجه نبود).

گیبس ریاضیدان نبود، اما او مانند نظریه‌پردازان دیگری که نام آنان در این کتاب ذکر شده است (مثلاً ماکسول، اینشتین و فاینمن) می‌دانست چگونه روشهای ریاضی را به ساده‌ترین و سرراست‌ترین راه برای منظورهایش به‌کار گیرد. او هرگاه که به یک مسئلهٔ فیزیکی برخورد می‌کرد همان‌قدر دربارهٔ فیزیک می‌اندیشید که دربارهٔ زبان ریاضی.

در میان مسئولیتهای آموزشی گیبس یک دورهٔ درسی دربارهٔ نظریهٔ الکتریسیته و مغناطیس بود، براساس رسالهٔ ماکسول دربارهٔ الکتریسیته و مغناطیس. در این موضوع و موضوعهای دیگر، مشخصاً مکانیک، توصیف ریاضی به کمیتهای فیزیکی می‌پردازد که هم بزرگی و هم جهتی در فضا دارند. هر دو ویژگی در یک جزء ریاضی به‌نام «بُردار» نهادینه شده‌اند که می‌تواند سه مؤلفه، متناظر با سه بُعد فضایی داشته باشد. گیبس روشی ابداع کرد که زمینهٔ ریاضی آسانی برای به‌کارگرفتن بُردارها فراهم می‌کرد.

روش گیبس برای به‌کار گرفتن بردارها انحرافی بود از روش ماکسول و همکاران بریتانیایی‌اش که متکی به روش «چهارگانها، quaternions» بود. این روش به‌وسیلهٔ رُوان هامیلتون ریاضیدان و فیزیکدان ایرلندی فرمولبندی شده بود. (ویلیام رُوان هامیلتون[1] بزرگترین هدیهٔ ایرلند به ریاضی و فیزیک بود. او در بیست‌سالگی نظریهٔ وحدت‌یافته‌ای از اپتیک پرتو و دینامیک ذره ابداع کرد که تقریباً

1. William Rowan Hamilton

یک قرن بعد اروین شرودینگر[1] در بسط مکانیک موجی‌اش از آن نظریه تأثیر پذیرفت. هامیلتون پس از بیست و هفت‌سالگی که کارش با اپتیک و دینامیک کامل شد، نبوغ خلاقش تحلیل رفت، یا به‌بیان دقیقتر به‌طور شگفت‌انگیزی او را گمراه کرد. سالهای بسیاری کوشید تا فیزیک را با روش ریاضی جدید چهارگانش بازنویسی کند. هامیلتون باور داشت که پرینسیپیای جدیدی خواهد نوشت: چهارگانش می‌باید اهمیتی همچون فلوکسیون نیوتون داشته باشد. اما در این کار هرگز موفقیتی نداشت. هامیلتون در یک جهان رؤیایی زیست و در انزوا مُرد.) گیبس چهارگانها را، در کاربردهای فیزیکی یک زائدهٔ غیرضروری ریاضی می‌دانست، و مزایای روش خود را در پنج مقاله دربارهٔ نظریهٔ الکترومغناطیس نشان داد. او برای شاگردانش، جزوهٔ چاپ‌شده‌ای با عنوان تحلیل بُردار داشت.

هامیلتون شاگردان و حامیان خود را داشت. مشهورترین آنها تیت[2] بود که نقش مطلوب او مشاجرهٔ قلمی بود. وقتی اخبار تحلیل بُرداری گیبس به تیت رسید، او فوراً گیبس (ناراضی) را به یک مناظرهٔ طولانی در صفحات مجلهٔ بریتانیایی نیچر[3] کشانید. تیت گیبس را «یکی از کسانی که موجب عقب‌افتادگی پیشرفت چهارگان شده خواند و تحلیل برداری او را به‌صورت «نوعی غول نرموکی (دوجنسیتی) مرکب از نمادگذاری هامیلتون و گراسمان» نامید. (هرمان گراسمان[4] یک ریاضیدان و زبان‌شناس قرن نوزدهمی و یکی از نخستین کسانی بود که پیشنهاد کرد هندسه بیش از سه بُعد را شامل می‌شود.) گیبس در جدل و مشاجره همتای تیت نبود، اما می‌دانست چگونه بدون انگ زدن واکنش نشان دهد:

> به‌نظر می‌رسد، می‌باید فرض کنیم که دور شدن از کاربرد چهارگان در رفتار بردارها یک گناه کبیره است. اگر این فرض درست باشد، حقیقت مهمی است. اگر این فرض درست نباشد، مایهٔ تأسف خواهد بود اگر بدون هیچ چالشی باقی بماند، بخصوص وقتی از حمایت چنان مقام بلندپایه‌ای برخوردار می‌شود. این انتقاد، بخصوص به نمادگذاریها مربوط می‌شود، اما من معتقدم که مسئلهٔ عمیق‌تری در زیربنای آن تصورات وجود دارد. درواقع اگر خلاف من منحصراً در موضوع نمادگذاریها باشد، توصیف محصول کار من به‌صورت یک غول، از صحتی کمتر برخوردار خواهد بود تا ظاهر آن به‌صورتی زشت ترسیم شود.

گیبس مطمئن بود که روش او، زشت یا زیبا، برای «نخستین وظیفهٔ تحلیلگر بُردار. . . برای ارائهٔ موضوع به‌صورتی که به آسانترین وجه آموخته شود، و وقتی آموخته شد بسیار مفید باشد» به‌کار می‌آید. گیبس آشکارا در مناظره برنده بود. لیند فلپس ویلر[5] زندگینامه‌نویس گیبس می‌نویسد که «استفاده از روشهای بُرداری گیبس سال به سال تاکنون (سالهای ۱۹۵۰) در حال افزایش بود، و می‌توان گفت عملاً جهانی شده است.»

1. Erwin Schrödinger 2. P.G. Tait 3. Nature 4. Hermann Grassmann
5. Lynde Phelps Wheeler

مختصری از شرح زندگی گیبس

جوسیا ویلارد گیبس[1] در سال ۱۸۳۹ چشم به جهان گشود. پدرش هم با نام جوسیا ویلارد گیبس، لغت‌شناس برجسته و استاد ادبیات مذهبی در دانشگاه ییل بود. (برای فامیل و معاصرانش، پدر «جوسیا» و پسر «ویلارد» نامیده می‌شد.) پدر و پسر از لحاظ فکری راههای متفاوتی را دنبال کردند، اما مشترکات زیادی داشتند. موریل روکی‌سِر[2]، یکی از زندگینامه‌نویسان ویلارد گیبس، جوسیا گیبس را چنین توصیف می‌کند: «آماده‌ترین دانش‌پژوه کالج نسل خودش بود» و متذکر می‌شود «دو سلاح که بر آن تکیه داشت، شناخت صحیح و بیان دقیق بود، او [به کار لغت‌شناسی]، سوا کردن، ضمیمه کردن، مقایسه کردن کلمات، این کارِ کارآگاهانه در میان سررشته‌های به‌جامانده از کلمات آدمی، عشق می‌ورزید.»

روکی‌سر، ویلارد را چنین تصویر می‌کند: «کودکی آرام، نحیف در خانهٔ جوسیا گیبس با شیوه‌های ساده، کتابهای لاتینی کوچک‌ـکتابهای ابتدایی و داستانهای پدرش از کتاب مقدس و اصرار رئوفانهٔ مادرش دربارهٔ ملایمت و نزاکت رشد می‌کرد. او با چهار خواهرش «کودکی بود، پسر کوچکی بود در خانهٔ زنان. چهرهٔ طویل و مشفقانهٔ مادر و برنامهٔ آموزشی پدر عهده‌دار ادارهٔ خانواده بود.»

او در نوجوانی درسهایی از مرگ و مسئولیت را آموخت. او ده‌ساله بود که جوانترین خواهرش مُرد، و در پانزده‌سالگی، پس از مدتی کوتاه که وارد دانشگاه ییل شده بود، سلامت مادرش به‌کُندی رو به تحلیل می‌رفت. آنا، بزرگترین خواهر ویلارد، به نقل از روکی سر، «با ضعیفتر شدن مادر بیشتر و بیشتر جای او را می‌گرفت، و پسر با جابه‌جا شدن مناسبات افراد خانواده، به‌سرعت رشد می‌کرد. چهرهٔ کشیدهٔ او مثل عکسهایی بود که با دوربینهای اولیه گرفته می‌شد، با چشمانی تیز که گاه خصمانه و سپس ناگهان ملایم و هوشمندانه می‌شد. او آرامش را به‌همراه خود داشت.»

گیبس پس از فارغ‌التحصیل شدن از ییل در سال ۱۸۵۸ با دریافت جایزه‌هایی در لاتین و ریاضیات وارد دانشکدهٔ جدید بعد از لیسانس ییل شد و نخستین درجهٔ دکتری در مهندسی ایالات متحده را به‌دست آورد، و سپس به‌عنوان دستیار آموزشی سه سال در ییل خدمت کرد. در این هنگام (اواسط سال ۱۸۶۰) علاقهٔ او به دنیای علمی وسیعتری برانگیخته شد و به اروپا سفر کرد، مدت سه سال در مراکز علمی پاریس، برلین و هایدلبرگ به مطالعه پرداخت. (اما در این سفرها از رفتن به بُن جایی که پیش‌کسوت علمی او، کلازیوس در آنجا می‌زیست غافل ماند.) او در سال ۱۸۶۹ به نیوهیون بازگشت و در سال ۱۸۷۱ به‌عنوان استاد فیزیک ریاضیات در ییل منصوب شد (بدون حقوق).

گیبس بی‌تکلف، صمیمی، غالباً شوخ و بذله‌گو، خوش‌برخورد و مهربان بود. بنا به‌گفتهٔ کرودر، «هرگاه از او انجام وظایف کوچکی خواسته می‌شد، هر کار بزرگی را فوراً و بدون سؤال کنار می‌گذاشت، او هرگز از جزئی‌ترین وظایف دانشکده شانه خالی نمی‌کرد، یا از وقت ارزشمند خود برای دانشجویانی

1. Josiah Willard Gibbs 2. Muriel Rukeyser

که طالب تعلیمات او بودند، دریغ نمی‌کرد.» قدرت تمرکز حواس او به‌قدری غیرعادی بود که احتمالاً می‌توانست کارش را انجام دهد، حتی با دانشجو گفتگو کند، و رشتهٔ افکارش گسیخته نشود.

گیبس هرگز ازدواج نکرد، به‌نظر ویلر علتش این بود که «مسئولیتهای موروثی در اوایل زندگی، توأم با عدم اطمینان از سلامتی‌اش در سراسر دورانی بود که بیشترین مردان جوان فکر یافتن خانواده‌ای از آن خود بودند.» علاوه‌بر این ارتباط نزدیک با خواهر بزرگش آنا، که او نیز ازدواج‌نکرده مانده بود، ممکن است در این امر حائز اهمیت باشد. ویلر می‌نویسد: آنا «شخصیت انزواطلبانهٔ خاصی داشت، که با ضعف مزاج او تشدید می‌شد.» روکی‌سر به ما می‌گوید: «گفته می‌شود که آنا و ویلارد بهتر از هر کس دیگری می‌توانند ساکت باشند. به‌نظر می‌رسد تفاهم کاملی بین آنها برقرار است. بیشتر مردم سکوت آنا را به‌حق می‌دانند، اما اشخاص سرزنده هنوز روزهای طولانی را به‌خاطر دارند که صرف گفتگوی شگفت‌آوری با گیبس و خواهر او، در قطار یا در روستا کرده‌اند.»

گیبس با کودکان مهربان بود. عموزاده‌ای به‌نام مارگارت ویتنی[1]، رفتارهای خاصی را به‌یاد می‌آورد از وقتی که گیبس، ویتنی کودک را برای یک سورتمه‌سواری می‌برده است:

> وقتی او می‌خواست ما را دور هم جمع کند و سلامتی کامل ما را ببیند، با لبخندی آن‌قدر صمیمانه چنین کاری را انجام می‌داد که برای دختر کوچک کنار او اطمینان‌بخش بود و به یک‌باره آن دختر با او احساس آرامش و راحتی می‌کرد. بهترین خاطرهٔ من رانندگی با او در زمستان در یک سورتمه بود، که برای من لذت نادری داشت. تأثیر ایستادن در کنار سورتمه در برف، منتظر سوار شدن در آن، برفی که در هوای سرد همه‌جا را فرا گرفته بود، جلینگ‌جلینگ زنگهای سورتمه، گویی همهٔ جهان در حرکتی زودگذر است و من یکی از اجزای آن هستم، این احساس در من باقی مانده است و همواره به یاد می‌آورم. ستایش مرد مهربانی که چنین احساسی را در من ایجاد کرد بسیار ارزشمند است.

سلامتی گیبس در دوران کودکی بر اثر بیماری مخملک آسیب دید، و بیماریهای جزیی مشکلی در سراسر زندگی او بود. او اندامی لاغر، اما آراسته و توانایی قهرمانی داشت. مارگارت ویتنی برخوردی بین گیبس و یک اسب سرکش را به‌یاد می‌آورد: «او در بازگشت به هتل [تعطیلات در کین‌والی نیویورک] سوار اسب بود و اسب رفتار بسیار بدی داشت. اما او چنان عنان اسب را محکم به‌دست گرفته بود و چنان خوب در جایگاه خود مستقر بود، که گرچه دیگران می‌پنداشتند هر لحظه ممکن است اسب او را به زمین پرتاب کند، اما توانست اسب را کنترل و به‌آرامی متوقف کند.»

گیبس در ترمودینامیک، زمانی که به‌نظر می‌رسید دیگران بیشتر از پیشرفت در آشفتگی آن سهیم‌اند، چنان تبحر وافری یافت، که انسان دربارهٔ منابع الهام او دچار حیرت می‌شود. چرا گیبس می‌توانست با

1. Margaret Whitney

وضوح بسیار بیشتر از معاصرانش، اهمیت بنیادی معادلهٔ کلازیوس را بفهمد؟ چگونه او توانست مطمئن شود که افزودن اصطلاحات پتانسیل شیمیایی به معادلهٔ کلازیوس، از آن معادله‌ای اساسی می‌سازد، معادله‌ای که در ترمودینامیک امروزی متداول است؟ افزودن این اصطلاحات به‌طور ریاضی به‌آسانی انجام می‌شود، اما آسانی ریاضیاتی تضمین معنای فیزیکی آن نیست.

نگاهی به عادتهای کاری او که عادتهایی ذاتی بودند، جالب است. او بدون یادداشت سخنرانی می‌کرد و مقالاتش را می‌نوشت (به‌خلاف نیوتون که بدون در دست گرفتن قلم نمی‌توانست فکر کند). او هرگز به‌طور غیررسمی دربارهٔ تحقیقاتش با دانشجویان یا همکارانش بحث نمی‌کرد. حتی بدون تدابیر راهنمایی‌کننده و بازبینی، مقالاتش خطاهای قابل‌ملاحظه‌ای، اگر می‌داشت، بسیار اندک بود.

گیبس یک نظریه‌پرداز طبیعی بود و شاید تا حدی در سالنامه‌های علمی سرآمد نبود. این نکته نیز ممکن است حائز اهمیت باشد که او در جهان جدیدش منزوی و از فعالیت علمی معاصرش جدا شده بود. البته همیشه درست نیست که منزوی بودن عامل مؤثر خلاقیت مهمی در تلاش علمی باشد، اما در مواردی که کارگردانان علمی به دو اردوی متخاصم تقسیم شده باشند، ممکن است مستقل بودن و بی‌تعصب بودن، مانند روش گیبس، یک امتیاز به‌شمار آید.

روکی‌سر می‌نویسد، «او توقعی از هیچ‌چیز نداشت، هیچ‌چیز خارج از خودش، او به خودش اطمینان و اعتماد داشت.» حمایت ماکسول می‌باید به اتکای این اعتماد به نفس یاری کرده باشد. اما حتی با تشویق و تبلیغ فعالانهٔ علایق او، گیبس خارج از دنیای نظریه‌ای فیزیک چندان شناخته‌شده نبود. ج. ج. تامسن کاشف الکترون و یکی از جانشینان ماکسول در کمبریج، از گفتگویی سخن می‌گوید که با رئیس هیئت استخدام دانشکده‌ای از یک دانشگاه تازه تأسیس‌شدهٔ امریکایی داشته است. تامسن می‌نویسد، «او به کمبریج آمد و از من درخواست کرد که اگر می‌توانم شخصی را که بتواند استاد خوبی برای تدریس فیزیک مولکولی باشد به او معرفی کنم.» تامسن به او می‌گوید که یکی از بزرگترین فیزیکدانان مولکولی در جهان ویلارد گیبس است و او در امریکا زندگی می‌کند. واکنش رئیس این بود که شاید منظور تامسن، وولکات گیبس[1]، شیمیدانی در هاروارد است. تامسن تأکید می‌ورزید که منظورش ویلارد گیبس است و می‌کوشید تا بازدیدکننده‌اش را قانع کند که گیبس واقعاً دانشمند بزرگی است. تامسن ادامه می‌دهد که، «او یکی دو دقیقه به فکر فرو رفت و سپس گفت من میل دارم که نام دیگری را به من معرفی کنید. ویلارد گیبس نمی‌تواند جذابیت شخصی زیادی داشته باشد. یا من می‌باید چیزی دربارهٔ او شنیده باشم.»

راهنمایی اساسی دیگر دربارهٔ منبع الهام‌بخش گیبس در اظهارنظر ویلر آشکار می‌شود. ویلر در نظر داشت زندگینامهٔ گیبس را در دو مجلد بنویسد، یک مجلد مختص کارهای علمی گیبس و مجلد دیگر دربارهٔ رویدادهای زندگی غیرعلمی او. اما به‌زودی آشکار شد که دو مجلد می‌باید یکی باشد:

1. Wolcott Gibbs

«من به این دریافت رسیدم که تا حدی غیرعادی، کار علمی گیبس، خود گیبس بود، و اینکه برای شناختن واقعی او می‌باید دست‌کم تا حد معینی کار او را بفهمیم؛ چون زندگی و کار او عمدتاً یک‌کاسه بود، داستان او هم باید یکی باشد.»

برای بسیاری از مردم، از جمله مقامات دانشگاهی که با «جذابیت شخصی» تجارت می‌کنند، گیبس سرکوب‌شده به‌نظر می‌رسید. با وجود این دوستانش تحت تأثیر آرامش، متانت و بردباری او بودند. ویلارد از دختر هیوبرت نیوتون[1]، دوست نزدیک گیبس نقل‌قول می‌کند؛ ژوزفین نیوتون دریافته بود که گیبس «شادکام‌ترین مردی» است که او تاکنون شناخته است. «من گمان می‌کنم بخشی از این سرزندگی ناشی از احساس عالی او از تناسب بود که به او امکان می‌داد تا ارزش درست چیزها را برآورد کند، و بخشی دیگر ناشی از جذب خوب اندیشه‌هایی بود که او لذت می‌برد.» چرا چنین مردی نباید خوشحال باشد (و با جذب اندیشه‌های عالی سعادتمند نباشد)؟ او کار خلاق عمیقاً مهمی را انجام داد ـ و خود او این را می‌دانست.

1. Hubert Newton

۱۰

آخرین قانون والتر نرنست

شیطان و والتر نرنست

بنابر قصه‌ای که در برلین اوایل سالهای ۱۹۰۰ شایع بود، روزی خداوند تصمیم می‌گیرد یک اَبَرمرد خلق کند. او ابتدا روی مغزش کار کرد، و هوشمندانه‌ترین و کاملترین ذهن را ساخت. اما چون اشتغالات دیگری داشت، می‌باید کارش را کنار می‌گذاشت. جبرئیل، فرشتهٔ مقرب که این مغز عجیب را دید نتوانست در برابر وسوسه‌ای که دچارش شده بود مقاومت کند و کوشید تا انسان کاملی خلق کند. اما او توانایی‌اش را بیش از حد برآورد کرده بود و فقط موفق شد «مرد کوچک‌اندامی با چهره‌ای فاقد جاذبه و گیرایی خلق کند.» او مأیوس و سرخورده از عدم موفقیت خود، موجود ساخته‌شده‌اش را بی‌جان رها کرد. شیطان از راه رسید، نگاه رضایت‌آمیزی به این موجود بی‌همتا، اما بی‌جان انداخت و به آن روح دمید. «این موجود والتر نرنست بود.»

این قصه را کورت مندلسون[1] در زندگینامهٔ ظریفی از نرنست آورده است. مندلسون تصویر اصیل‌تری از نرنست در دسترس می‌گذارد: «هیچ اثر ثبت‌شده‌ای از نبوغ ارثی [در خانوادهٔ نرنست] یا حتی اقدام برجسته و بزرگی وجود ندارد. به‌نظر می‌رسد والتر درخشندگی استعدادش را مدیون خوش‌شانسی در تاس‌اندازی ژنتیکی باشد.» زمانی نرنست در نظر داشت هنرپیشه شود و «او این آرزو را تا حدی با پوشش نقابی از یک مرد کوچک خوش‌باور و ساده‌دل در سراسر زندگی تحقق بخشید. طرز بیان مخصوصش از حیرت زندگی معصومانه، با انقباض بینی‌اش که عینک رودماغی او را جابه‌جا می‌کرد، تأیید می‌شد. همیشه نشانی از حیرت در صدای او وجود داشت و در اظهارنظرهای کنایه‌دار و اهانت‌آمیز که مهارت داشت، هرگز تغییری در صدا و لبخندش ایجاد نمی‌شد. او ذاتاً جدی و به‌طور ملایمی شگفت‌زده بود.»

1. Kurt Mendelssohn

لایپزیک، گوتینگن، و برلین

نرنست به‌عنوان یک دانشجو، بنابر رسم قرن نوزدهم عازم سفر به دانشگاههایی شد که بزرگ‌مردان علم در آنجا می‌زیستند و می‌آموختند. مسیر سفر آموزشی او به زوریخ، برلین (جایی که هلمهلتز ترمودینامیک تدریس می‌کرد)، بازگشت به زوریخ، سپس به گراتز[1] (برای تحصیل زیر نظر لودویک بولتزمن) و سرانجام به وورتزبرگ[2] بود. (جایی که کار با فریدریک کهلروش[3] الهام‌بخش مادام‌العمر او به الکتروشیمی شد.) او در گراتز توقف طولانیتری کرد تا پایان‌نامهٔ دکتری‌اش را بنویسد و درسهایی در «فیزیک تحریک اعضا» از آلبرت فُن اتینگ‌هاوزن[4] آموخت. اتینگ هاوزن دانشجوی پیشین بولتزمن و همکار نرنست در رسالهٔ تحقیقاتی‌اش بود. نرنست که هرگز نمی‌توانست بر بی‌حوصلگی خود غلبه کند، اتینگ هاوزن را به‌خاطر سهل‌گیری در پذیرفتن ناکامی‌های آزمایشی‌اش، بی‌نهایت تحسین می‌کرد. پس از یک ناکامی در یک آزمایش، اتینگ هاوزن به‌راحتی می‌توانست بگوید، «خوب، آزمایش موفقیت‌آمیز نبود، دست‌کم نه به‌طور کلی.»

دوران حرفه‌ای نرنست داستانی بود تقریباً با موفقیت تمام‌عیار. او در اواخر سال ۱۸۸۰ وقتی در وورتزبرگ بود، با ویلهلم استوالد ملاقات کرد و وقتی استوالد کرسی استادی لایپزیک را پذیرفت، دستیار او شد. نرنست در جریان جد و جهدهای استوالد هیچ وقتی را برای یافتن شغلی که در خور استعدادهایش باشد از دست نداد، همهٔ فعالیتهایش با ساختن مبانی رشتهٔ تحصیلی جدید شیمی‌فیزیک مربوط می‌شد. نخستین اثر منتشرشدهٔ نرنست از لایپزیک، یکی از کلاسیکهای ادبیات الکتروشیمی شد؛ در این اثر معادله‌ای به جهان ارائه می‌شد که در نسلهای دانشجویان شیمی‌فیزیک به «معادلهٔ نرنست» شهرت یافت.

در سال ۱۸۹۱، نرنست به‌عنوان استادیار شیمی‌فیزیک در دانشگاه گوتینگن منصوب شد. دو سال بعد او یکی از نخستین کتابهای درسی شیمی‌فیزیک را منتشر کرد که دومین کتاب درسی در این زمینه پس از کتاب درسی شیمی عمومی (*Lehrbuch der allgemeinen Chemie*) استوالد بود. عنوان متن کتاب نرنست، شیمی نظریه‌ای (*Theoretische Chemie*) بود، و به اتینگ‌هاوزن اهدا شده بود. نرنست دید شیمی‌فیزیکش را بر ترمودینامیکی که مبانی آن را هلمهلتز گذاشته بود، بر فرضیهٔ مولکولی («فرضیهٔ آووگادرو») بنا نهاد. در آن زمان بولتزمن از این فرضیه حمایت می‌کرد (و استوالد سخت با آن مخالفت می‌ورزید.) کتاب درسی نرنست سی سال بعد، هنوز به‌کار می‌آمد و ویرایش پانزدهم آن بسیار مؤثر و نافذ بود.

در طی سه سال دیگر، نرنست وزرای آموزش را، نه‌تنها در پروس (که گوتینگن در آن جای دارد)، بلکه در باواریا نیز چنان تحت تأثیر قرار داده بود که کرسی استادی فیزیک نظریه‌ای در دانشگاه مونیخ،

1. Graz 2. Würzburg 3. Friedrich Kohlrausch 4. Albert von Ettinghausen

به‌عنوان جانشین بولتزمن به او عرضه شد. اما فریدریک آلتوف وزیر آموزش پروس کنار نمی‌کشید. مندلسون دربارهٔ معاملهٔ کاغذبازی اداریِ بیشتر که نرنست با مهارت و رئیس‌مآبانه عمل کرد، می‌گوید:

> اگر آلتوف می‌خواست نرنست را در پروس نگه دارد، مجبور بود کوششی کند که اندکی فراتر از مسئولیت حوزهٔ وزارتی او می‌رفت. بهای نگهداری نرنست ایجاد یک کرسی شیمی‌فیزیک در گوتینگن، و همراه با آن یک آزمایشگاه الکتروشیمیایی بود. آلتوف می‌توانست کرسی جدید را از مبالغی که در اختیار داشت ایجاد کند، اما برای آزمایشگاه، او می‌باید از وزیر دارایی درخواست پول کند، این کار زمان می‌گرفت. نرنست که مطمئن بود موضع برتری دارد و همیشه می‌دانست چگونه معاملهٔ دشواری را پیش ببرد، آلتوف را مجبور به یک عمل نامعقولی کرد، و آن تعهدی کتبی بود که آزمایشگاه در گوتینگن تحقق‌ناپذیر خواهد بود. در این صورت نرنست یک کرسی فیزیک در برلین به‌دست می‌آورد. آلتوف تسلیم شد، زیرا به هر دلیلی باور داشت که وزیر دارایی اقدام خواهد کرد و درواقع اقدام هم کرد. این سال ۱۸۹۴ بود و برلین می‌باید یازده سال دیگر در انتظار بماند.

استعداد علمی نرنست به مسایل کاربردی کشیده شد. به‌ویژه در مواردی که امکانات اقتصادی داشتند. وقتی که او در گوتینگن بود، یک لامپ الکتریکی اختراع کرد که امیدوار بود با لامپ ادیسون رقابت کند اما توسعهٔ چندانی نیافت. طرح نرنست کاربردی از مطالعات او دربارهٔ رسانایی یونی بود. ابتدا او کوشید تا زیمنس را که یک مؤسسهٔ تجاری ریشه‌دار بود، ترغیب کند که حق انحصاری اختراع او را بخرد. زیمنس نه به امکانات فنی لامپ علاقه‌مند بود و نه به درخواست مالی نرنست.

نرنست سپس حق انحصاری را به A.E.G (Allgemeine Elektrizitäts Gesellschaft)، یک شرکت جدید ماجراجوتر، پیشنهاد کرد. پس از چانه‌زنیهای ممتد، که نرنست از حق امتیاز امتناع و مبلغی را یک‌جا درخواست می‌کرد، آنچه می‌خواست به‌دست آورد: یک میلیون مارک، مبلغی که با آن مردی ثروتمند می‌شد. گرچه اختراع او به‌طور ماهرانه‌ای به‌وسیلهٔ A.E.G با کار فنی بسیاری که به‌وسیلهٔ دو نفر از شاگردان نرنست انجام شد، توسعه یافت، اما سرانجام لامپ نرنست از رقابت با دیگر طرحها بازماند. به‌نظر می‌رسد که این شکست مالی A.E.G را از اعتماد به قابلیتهای فنی نرنست مأیوس نکرد. امیل راتنو[1] رئیس A.E.G دوستی خود را تا پایان زندگی نرنست با او حفظ کرد.

نرنست گرچه ثروتی به‌دست آورده بود، در جرگهٔ رفیع عوالم سیاسی و تجاری بانفوذ شده بود، و در علم جدید شیمی‌فیزیک مقام والایی داشت، اما هنوز به اوج موفقیت خود نرسیده بود و آن تسخیر مقام دانشگاهی بالاتری بود. به گفتهٔ مندلسون حرکت بعدی او رفتن از گوتینگن «به موقعیتی بهتر» و رسیدن به «قلهٔ» علمی و دانشگاهی در دانشگاه برلین بود. در همان سال نرنست کلید راهنمای لازم برای فرمولبندی گزاره‌ای را یافت که امروزه قانون سوم ترمودینامیک نامیده می‌شود.

1. Emil Rathenau

تعادل شیمیایی

در اینجا باید با نرنست و شرح اکتشافات بزرگ او توقفی بکنیم و دقیقتر به یکی از علایق مورد تحقیق او نگاهی بکنیم و آن واکنشهای شیمیایی دمای بالا، شامل اجزای سازندهٔ گازی است. در اوایل سالهای ۱۹۰۰، چنین واکنشهایی حائز اهمیت صنعتی وافری بود. فرانتز سیمون[1]، یکی از همکاران نرنست در سالهای ۱۹۲۰، دربارهٔ توجه عمومی به واکنشهای گازی که الهام‌بخش کار نرنست بود می‌نویسد: «پنجاه سال پیش [اظهارات سیمون در سال ۱۹۵۶ نوشته شده است.] علاقهٔ شدیدی به واکنشهای شیمیایی گازی وجود داشت، تا حدی به‌علت سهولت نسبی مسئله‌ای که با آن درگیر بود و به‌نظر می‌رسید که بهبود آن به روشهای فیزیکی سپرده شده است و تا حدی هم به‌علت امکانات اقتصادی. واکنشهای گازی پیش از این نقش مهمی در رشد صنعت سنگین شیمیایی داشته است و معلوم شده بود که بخصوص سنتز آمونیاک درواقع برای اقتصاد آلمان در صلح و جنگ اهمیت زیادی پیدا کرده بود.»

واکنش سنتز آمونیاک، مانند واکنش آب است که در فصل پیشین ذکر آن به‌میان آمد، با این تفاوت که به‌جای اکسیژن، نیتروژن (N_2) می‌نشیند و آمونیاک (NH_3) ایجاد می‌شود،

$$N_2 + 3H_2 \rightarrow 2NH_3$$

آمونیاک برای تهیهٔ کود شیمیایی یا با تبدیل به نیترات برای ایجاد مواد منفجره به‌کار می‌آید. در فرایند صنعتی نیتروژن از هوا و هیدروژن از واکنش بین زغال‌سنگ و بخار آب، در دما و فشار زیاد با استفاده از کاتالیزور به‌دست می‌آید. یک مهندس شیمی فرایند واکنش را طراحی می‌کند، به‌طوری که واکنش با نیتروژن و هیدروژن شروع و اگر دما به‌قدر کافی زیاد و کاتالیزور فعال باشد، واکنش به‌سرعت آمونیاک تولید می‌کند. اما تبدیل کامل واکنش‌دهنده‌های نیتروژن و هیدروژن به آمونیاک ممکن نیست، زیرا سیستم واکنش نهایتاً فقط با تبدیل واکنشگرها به‌سوی یک حالت تعادل پیش می‌رود؛ در حالت تعادل واکنش پیشتر نمی‌رود و هرگونه تغییر متوقف می‌شود. بهرهٔ آمونیاکِ در حالت تعادل حداکثر مقدار قابل حصول است.

یک مهندس شیمی می‌خواهد بداند برای طراحی فرایند، به‌گونه‌ای که عملکرد بهینه داشته باشد، چه بهرهٔ تعادلی در فشارها و دماهای متفاوت می‌توان انتظار داشت. ترمودینامیک پارامتر مؤثری برای آن هدف مهندسی فراهم می‌کند. این پارامتر را که «ثابت تعادل» می‌نامیم، همیشه با نماد K نشان داده می‌شود و برای سنتز واکنش آمونیاک به‌صورت زیر معین می‌شود

$$K = \frac{P_{NH_3} \times P_{NH_3}}{P_{N_2} \times P_{H_2} \times P_{H_2} \times P_{H_2}}$$

که در آن Pها دلالت بر فشارهای اجزای شیمیایی نشان داده‌شده دارد. طرحهای مهندسی برای یافتن

1. Franz Simon

بیشترین فشار آمونیاک P_{NH_3} و بنابراین، بهره‌گیری از مقادیر بزرگ ثابت K است. این دستورعمل برای تعیین ثابت K را با گزارهٔ واکنش مقایسه کنید: متناظر با دو مولکول محصول NH_3 حاصلضرب دو عامل $(P_{NH_3} \times P_{NH_3})$ در صورت کسر، و در مخرج کسر یک عامل P_{N_2} متناظر با یک مولکول واکنش‌دهندهٔ N_2 و سه عامل P_{H_2} برای سه مولکول واکنش‌دهنده H_2 است. ثابتهای تعادل برای واکنشهای گازی دیگر به‌طریق مشابهی معین می‌شوند ـ یک عامل ضرب P برای هر جزء دخیل در واکنش، با جمله‌های مربوط به محصول شیمیایی در صورت کسر و جمله‌های واکنش‌دهنده در مخرج کسر.

هدف عملی نرنست بسط و توسعهٔ روشهایی بود برای محاسبهٔ ثابتهای تعادل واکنشهای گازی در هر دما و فشار کلی که به‌وسیلهٔ مهندسان انتخاب می‌شود. در حوالی آغاز قرن، وسیلهٔ اصلی آزمایش برای مطالعات علم ترمودینامیک گرماسنج بود. گرماسنج محفظه‌ای کاملاً عایق‌شده شبیه یک فلاسک است که نوشابه‌ای مانند قهوه را در زمستان داغ و لیموناد را در تابستان خنک نگه می‌دارد. (شخص شوخ‌طبعی می‌گفت فلاسک چگونه می‌داند که باید لیموناد را سرد و قهوه را داغ نگه دارد و قهوه را سرد و لیموناد را گرم نگه نمی‌دارد.) در آزمایشگاه، گرماسنج مجهز به یک همزن مؤثر برای ایجاد یکنواختی و یک دماسنج حساس برای تشخیص تغییرات دماست. (گرماسنجهای جول و دماسنجهای جالب توجه او را به‌خاطر آورید.)

زمانی که نرنست تحقیقاتش را آغاز کرد از بررسیهای گرماسنجی واکنشهای شیمیایی ـ انجام‌شده به‌وسیلهٔ دست‌اندرکاران «گرماشیمی» ـ معلوم شده بود که اکثر واکنشها «گرمازا» هستند. چنین واکنشی در جریان پیشرفت انرژی گرمایی آزاد می‌کند و سبب ازدیاد دما در گرماسنج می‌شود و این امکان را به‌وجود می‌آورد که «گرمای واکنش» را اندازه‌گیری کنیم. اما نرنست به‌زودی دریافت که گرماهای واکنش و نظریهٔ عادی عمل گرماشیمی همهٔ وسایلی را که او برای مطالعات واکنشهای گازی لازم دارد، فراهم نمی‌کند. برای این مسائل نخست او می‌باید مسئلهٔ بسیار وسیعتری را حل کند.

میل ترکیب شیمیایی

چنانکه نرنست در کتاب درسی‌اش متذکر می‌شود، این مطلب، مطلب دیرپایی است:

> مسئلهٔ ماهیت نیروهایی که در اتحاد و پیوستگی شیمیایی یا تجزیهٔ مواد نقش‌آفرینی می‌کنند مدتها پیش از آنکه شیمیِ علمی وجود داشته باشد، مورد بحث بوده است. فیلسوفان یونانی از «عشق و نفرت» اتمهای ماده سخن گفته‌اند. . . . ما این آرایی را که از ویژگیهای انسان است و به اشیاء نسبت داده می‌شود، مانند مردم باستان می‌پذیریم و فقط وقتی علت تغییرات شیمیایی را پی‌گیری می‌کنیم نام آنها را تغییر می‌دهیم و میل ترکیبی می‌نامیم.
>
> مطمئناً، کوششهایی که برای ایجاد ایده‌های صریحتر و قطعی‌تر به‌عمل آمده هرگز ناقص

نبوده است. همهٔ تغییرات تدریجی عقاید، از تصورات خام بورلی[1] و لِمری[2] که تمایل اتمها برای محکم پیوستن به یکدیگر را ناشی از ساختار قلاب‌شکل آنها می‌دانستند. . . تا ایده‌های خوب طراحی‌شده‌ای از نیوتون، برگمان و برتوله که پدیده‌های فرایندهای شیمیایی را از جاذبه‌ای قابل مقایسه با سقوط یک سنگ به زمین می‌دیدند بنا شده است. گزافه نیست بگوییم که هیچ اکتشافی ازکنش فیزیکی بین مواد وجود ندارد که با نوعی گمانه‌زنی ذهنی برای توضیح فرایند شیمیایی به‌کارگرفته نشده باشد: اما تاکنون نتایج حاصل، ابداً با ابتکار ابرازشده برابری ندارد.

دو تن از نزدیکترین اسلاف نرنست در مطالعهٔ میل ترکیبی، گرما شیمیدانان پیشگام جولیوس تامسن[3] و مارسِلَن برتلو[4] بودند، که باور داشتند میل ترکیبهای شیمیایی با گرماهای واکنشها اندازه‌گیری می‌شوند. مثلاً تامسن در باب اصل میل ترکیبی مدعی بود که، «هر واکنش ساده یا پیچیده از ماهیت صرفاً شیمیایی با ایجاد گرما همراه است.» به‌گفتهٔ دیگر همهٔ واکنشهای شیمیایی خودبه‌خود، می‌باید از نوع گرمازا باشند. گیبس، هلمهلتز و بولتزمن اصل تامسن‌ـ‌برتلو را با استناد به مواردی از واکنشهای «گرماگیر» خودبه‌خود، که درگرماسنج به‌جای آثارگرمایش، آثار سرمایش نشان می‌دهند، به نقد کشیدند.

اصل تامسن‌ـ‌برتلو کاملاً بی‌ارزش نبود. این اصل در موارد بسیار متعددی با مشاهدات آزمایشی توافق داشت و نرنست این موفقیتها را ارزشمند دانست و می‌پنداشت که آنها ممکن است به‌همان قدر اهمیت داشته باشند: «بی‌توجهی کامل [به اصل تامسن‌ـ‌برتلو] همان‌قدر نامعقول خواهد بود که بازشناسی و به‌رسمیت شناختن آن. . . در وارسی طبیعت هرگز نباید تردید کرد قاعده‌ای که در بسیاری موارد خوب تلقی می‌شود، اما در مواردی نارسایی دارد، شامل هسته‌ای از حقیقت است‌ـ‌هسته‌ای که هنوز از پوسته‌ای که آن را محصور کرده جدا نشده است.» نرنست مخصوصاً آگاه بود که اصل تامسن‌ـ‌برتلو به احتمال زیاد، وقتی در مورد واکنشهایی شامل اجزای ترکیب‌شوندهٔ جامد به‌کار گرفته شود موفقیت‌آمیز خواهد بود.

راه‌حل نرنست برای مسئلهٔ میل ترکیبی شیمیایی، آن‌طورکه امروز عمل می‌شود، به انرژی گیبس بازمی‌گردد که به‌صورت زیر توصیف می‌شود

$$G = U + PV - TS \qquad (۱)$$

این معادله با معرفی یک انرژی درونی‌ـ‌بیرونی به‌نام «انتالپی» که با نماد H نشان داده می‌شود، تعریف می‌شود

$$H = U + PV \qquad (۲)$$

1. Borelli 2. Lemery 3. Julius Thomsen 4. Marcellin Berthelot

این معادله ترکیبی است از انرژی درونی U با انرژی پتانسیلی PV، سیستمی از حجم V که به‌واسطهٔ وجودش در فشار P دارد. با جانشین کردن H به‌جای $U + PV$ در معادلهٔ (۱)، معادلهٔ انرژی گیبس می‌شود

$$G = H - TS \qquad (۳)$$

واکنشهای شیمیایی با تغییرات انرژی گیبس $\Delta_r G$ توصیف می‌شوند. به‌عنوان مثال بار دیگر واکنش سنتز آمونیاک را در نظر بگیریم،

$$N_۲ + ۳H_۲ \rightarrow ۲NH_۳$$

تغییر انرژی گیبس به ما می‌گوید واکنش سنتز پیش می‌رود هرگاه $\Delta_r G < ۰$ باشد. از سوی دیگر، هرگاه $\Delta_r G > ۰$ باشد، واکنش سنتز غیرممکن است، اما تجزیهٔ آمونیاک، یعنی واکنش معکوس، ممکن می‌شود،

$$۲NH_۳ \rightarrow N_۲ + ۳H_۲$$

بنابراین، بسته به اینکه $\Delta_r G$ مثبت یا منفی باشد، واکنش به یکی از دو راه پیش می‌رود. قطع نظر از اینکه واکنش چه جهتی را انتخاب کند، سنتز یا تجزیه، نتیجهٔ نهایی حالت تعادلی است که با $\Delta_r G = ۰$ معین می‌شود و در آن همهٔ تغییرات شیمیایی متوقف می‌گردد. به‌گفتهٔ دیگر تغییر انرژی گیبس اندازهٔ قابل اعتمادی است از میل ترکیبی، نیرویی که واکنش را به‌سوی سنتز آمونیاک یا تجزیهٔ آن می‌راند، یا پس از رسیدن واکنش به حالت تعادل، اصلاً حالتی ندارد. تغییرات انرژی گیبس میل ترکیبهای شیمیایی برای واکنشهای دیگر را نیز توجیه می‌کند.

واکنشهای شیمیایی با تغییرات انتالپی $\Delta_r H$ و تغییرات انتروپی $\Delta_r S$ نیز توصیف می‌شوند، تغییراتی که بنابر معادلهٔ (۳) با تغییرات انرژی $\Delta_r G$ واکنش مربوط است،

$$\Delta_r G = \Delta_r H - T\Delta_r S \qquad (۴)$$

در اینجا یک راه گرماسنجی برای اندازه‌گیری میل ترکیب شیمیایی به‌وسیلهٔ $\Delta_r G$ داریم، اگر $\Delta_r H$ و $\Delta_r S$ را بتوان با گرماسنجی اندازه‌گیری کرد. این کار برای انتالپی واکنش $\Delta_r H$ آسان است. اگر واکنش در فشار ثابت پیش رود، کل تغییر انتالپی $\Delta_r H$ به انرژی گرمایی تبدیل و به‌صورت گرمای واکنش در گرماسنج آشکارسازی می‌شود.

متأسفانه تغییرات انتروپی $\Delta_r S$ را به‌خلاف تغییرات انتالپی، مستقیماً نمی‌توان با گرماسنج اندازه‌گیری کرد و این مسئلهٔ اصلی نرنست بود. ولی ما می‌توانیم با استفاده از داده‌های گرماسنجی $\Delta_r S$ را در هر دمای خاصی که انتخاب می‌کنیم، محاسبه کنیم. نرنست این بصیرت را داشت تا بفهمد که آن دمای

خاص چه دمایی می‌تواند باشد. به‌گفتهٔ سیمون، «نرنست سخت گمان داشت که [طبیعت] می‌تواند مقاصدش را فقط در صفر مطلق، در نقطه‌ای با اهمیت خاص در کل گسترهٔ دمایی آشکار کند.» نرنست از داده‌های دما-پایین برای واکنشهای شامل جامدات حدس زد که، در واقع برای تمام چنین واکنشهایی تغییر انتروپی برابر صفر در صفر مطلق است:

$$\Delta_r S = ۰ \quad \text{وقتی } T = \text{صفر مطلق} \qquad (۵)$$

می‌گوییم «در واقع» زیرا نرنست به مفهوم انتروپی باور نداشت (درسهای گیبس هنوز آموخته نشده بود) معادلات کارآمد نرنست شامل انتروپی S نبود، اما در عوض هم‌ارزی ریاضی انرژی گیبس G را شامل می‌شد. (نرنست اصطلاح «انرژی آزاد» هلمهلتز را به‌کار می‌برد.) ابتدا نرنست معادلهٔ (۵) خود را «قضیهٔ گرما» می‌نامید. این قضیه مسئلهٔ میل ترکیبی شیمیایی نرنست را برای واکنشهای شامل جامدات، با امکان‌پذیر ساختن آن برای محاسبهٔ $\Delta_r S$ با داده‌های گرماسنجی، ترکیب این انتروپیهای واکنش با انتالپیهای واکنش و سرانجام تعیین میل ترکیبهای شیمیایی را به‌صورت $\Delta_r G$ اندازه‌گیری می‌کرد.

ثابتهای شیمیایی

قضیهٔ گرمای نرنست که در سال ۱۹۰۶ منتشر شد، دستاورد موفقیت‌آمیز بزرگی بود. این دستاورد همراه با کار بعدی او در گرماشیمی جایزهٔ نوبل شیمی ۱۹۲۰ را برای او به‌ارمغان آورد. اما قضیهٔ گرما دربارهٔ مسئلهٔ اصلی نرنست، یعنی محاسبهٔ ثابتهای تعادل برای واکنشهای گازی تأثیر اندکی داشت. اکنون او می‌بایست راه بازگشت به ثابتهای تعادل را بیابد.

او معادله‌ای را در اختیار داشت که تا حدی نیازهایش را ارضا می‌کرد، و آن معادله‌ای دیفرانسیلی بود که ی. ه. وانت هوف[1] در سالهای ۱۸۸۰ ارائه کرده بود. (یاکوبوس هنریکوس وانت هوف مردی متواضع، آرام، سخت‌کوش هلندی، یکی از پایه‌گذاران شیمی‌فیزیک بود. او نخستین برندهٔ جایزهٔ نوبل سال ۱۹۰۱ شد. زمانی که نرنست قضیهٔ گرما را منتشر کرد، او و وانت هوف در دانشگاه برلین همکار بودند.) شکل ریاضی معادلهٔ وانت هوف به‌صورت زیر است:

$$\frac{۱dK}{KdT} = f(T)$$

که در آن K ثابت تعادل و $f(T)$ تابعی از دمای قابل حصول در آزمایشهای گرماسنجی است. نرنست یک معادله برای K لازم داشت. او می‌توانست آن را با انتگرال‌گیری از معادلهٔ دیفرانسیلی وانت هوف به‌دست آورد، اما این امر یک ثابت مجهولی را ارائه می‌کرد. عبور از یک معادلهٔ دیفرانسیلی به یک معادلهٔ انتگرال‌گیری‌شده، همیشه مستلزم یک «ثابت انتگرال‌گیری» است. در معادلهٔ دیفرانسیلی، مقدار

1. J.H. Van't Hoff

ثابت ناپدید می‌شود زیرا مشتق یک ثابت برابر صفر است، اما نمی‌توان آن را در معادلهٔ انتگرال‌گیری‌شده نادیده گرفت.

موضوع ثابت انتگرال‌گیری که از لحاظ ریاضی به‌قدرکافی ساده است، از لحاظ مضمون فیزیکی سرسختی نشان می‌داد. نرنست کشف کرد که می‌تواند ثابت انتگرال‌گیری موردنیازش را با نماد I به‌صورت ثابتهای جدا از هم برای اجزای تشکیل‌دهندهٔ درگیر در واکنش تقطیع کند. «واکنش گاز آب» را در نظر بگیرید که از کربن‌دیوکسید (CO_2) و هیدروژن (H_2)، کربن‌مونوکسید (CO) و بخار آب (H_2O) ایجاد می‌کند،

$$CO_2 + H_2 \rightarrow CO + H_2O$$

با فرمول نرنست، ثابت انتگرال‌گیری I برای این واکنش به چهار جملهٔ جدا از هم تقسیم می‌شود، یک جمله برای هر جزء تشکیل‌دهنده، با تفریق جملات واکنش‌دهنده از جملات محصول،

$$I = i_{CO} + i_{H_2O} - i_{CO_2} - i_{H_2}$$

نرنست جملات i را «ثابتهای شیمیایی» نامید که هر یک از آنها فقط به خواص فیزیکی جزء تشکیل‌دهندهٔ مشخص‌شده بستگی دارد و نه تنها برای یک واکنش بلکه برای همهٔ واکنشهایی که جزء تشکیل‌دهنده در آنها شرکت می‌کند معتبر است. برای هر جزء تشکیل‌دهنده، ثابت جداگانه‌ای می‌توان محاسبه و یک‌بار برای همیشه آنها را جدول‌بندی کرد.

بررسی نرنست از تعادلهای شیمیایی گازی، اگر هر یک لازم باشد، گواهی است بر اینکه مسیرهای تحقیق نظریه‌ای می‌تواند پرپیچ‌وخم باشد. در آغاز، نرنست به مسئلهٔ کلی میل ترکیب شیمیایی کشیده شد، و دریافت که بازگشت به ترمودینامیکِ اندک شناخته‌شدهٔ واکنشهای شامل جامدات در دماهای پایین امتیازاتی دارد. در این رهگذر که او مبنایی آزمایشی برای قضیهٔ گرمای موردنظر خود کشف کرده بود، با مفاهیمی ضمنی به ماورای قلمرو تعادلهای گازی می‌رسید. او در بازگشت به واکنشهای گازی و فرمولبندی مسئله برحسب انتگرال‌گیری معادلهٔ دیفرانسیلی وانت‌هوف، دریافته بود که می‌تواند لزوم انتگرال‌گیری ثابتها را به‌صورت جمع‌بندی‌هایی از ثابتهای شیمیایی جدا از هم، به صورت یک ثابت برای هر جزء تشکیل‌دهنده، اظهار کند.

اما هنوز کار نرنست کامل نبود. داده‌های لازم برای محاسبهٔ صحیح ثابتهای شیمیایی، زمانی که نرنست در سال ۱۹۰۶ نظریه‌اش را فرمولبندی می‌کرد، در دسترس نبود. او فوراً به یکی از برنامه‌های آزمایشی، با هدف به‌دست آوردن داده‌های دما ـ پایین لازم مبادرت ورزید. او، به‌عنوان یک اندازهٔ موقتی فرمولهایی را برای تخمین ثابتهای شیمیایی، توسعه داد.

نرنست جدولی از مقادیر ثابتهای شیمیایی تخمینی‌اش تهیه کرد و آن را برای محاسبهٔ تقریبی ثابتهای تعادل به‌کار گرفت. سیمون می‌نویسد: «او با ارزیابی کل اطلاعات موجود در آن زمان نشان

داد که نتایج محاسباتش با واقعیتهای آزمایشی در محدودهٔ خطای نسبتاً وسیعی توافق دارد.» در یک کاربرد عادی، با روش تجربی، برای واکنش گاز آب در دمای $۸۰۰^{\circ}C$، $K = ۱/۸۲$ محاسبه شد؛ مقدار مشاهده‌شده برای ثابت تعادل در این دما $K = ۰/۹۳$ بود.

برای بعضی از منتقدان نرنست این نوع توافق مؤثر نبود. گیلبرت لویس[1]، شاگرد پیشین نرنست، و یکی از مهمترین جانشینان او در توسعهٔ روشهای ترمودینامیک شیمیایی، تلاشهای نرنست را از لحاظ به‌دست آوردن داده‌های دما-پایین برای محاسبات صحیح تأیید و تمجید می‌کند، اما از «رشد سریع استفاده از ثابتهای شیمیایی تخمینی» اظهار تأسف می‌کند. لویس بنا را بر نگرانی و یأس می‌گذارد. «تلاشهای گوناگون که برای تسویه و تطبیق محاسبات بر مبنای این ثابتها با نتایج اندازه‌گیریها به‌عمل آمده است. . . بخش اسف‌انگیزی در تاریخ شیمی به‌وجود می‌آورد.»

لویس با تأکید خاطرنشان می‌کند که ثابتهای شیمیایی، هیچ‌جا در ادبیات امروزی ترمودینامیک شیمیایی یافت نمی‌شود. اما سیمون یادآور می‌شود که «محدودهٔ زیاد خطا» که نرنست با آن موفقیتش را می‌سنجید «بی‌اندازه مرجح بود بر جهل کاملی که پیش از آن وجود داشت. . . برآوردهای تقریبی [نرنست] برای صنعت شیمی بسیار مفید بود و به‌دست آوردن بسیار سریع یک ایدهٔ اجمالی را که واکنشها در الگوهای واکنش پیچیده از لحاظ ترمودینامیکی عملی باشند، امکان‌پذیر می‌کرد.»

قضیهٔ گرما یک قانون است

نرنست آشکار ساخت که قضیهٔ گرمای او اساساً یک «قانون» است نه فقط یک فرمول دیگر یا یک دستورعمل ریاضی. او اصرار می‌ورزید که نه‌تنها قضیهٔ گرمای او متعلق به دو قانون تثبیت‌شدهٔ ترمودینامیک-به‌عنوان «قانون سوم» است-بلکه هرگز قانون دیگری نمی‌تواند باشد. این استنتاج از یک برونیابی پیروی می‌کند: کاشفان قانون اول سه نفر بودند (مایر، کلازیوس و هلمهلتز)، قانون دوم دو نفر (کارنو و کلازیوس) و برای قانون سوم فقط یک نفر (نرنست) بود. قانون چهارمی برای ترمودینامیک نمی‌تواند وجود داشته باشد و کسی آن را کشف نکرده است. قانون سوم آخرین قانون بوده است.

نرنست با همهٔ جسارت، خودبزرگ‌بینی و بذله‌گویی نیش‌زننده‌اش نه‌تنها به بسط نفوذش در میان نخبگان بلکه در حلقهٔ دوستانهٔ دانشجویان فارغ‌التحصیلش نیز ادامه می‌داد. جیمز پارتینگتون[2] یک مرد انگلیسی که در آزمایشگاه نرنست در برلین کار می‌کرد از توجه محبت‌آمیز نرنست به یک «مرد بسیار جوان کم‌تجربه» می‌نویسد، برخلاف اشخاص قدرتمند علمی آن زمان (و اکنون)، نرنست زحمات روزانهٔ دانشجویان محقق‌اش را نادیده نمی‌گیرد، که آنها را رها کند تا غرق شوند یا شنا کنند. پارتینگتون کار تحقیقی‌اش را دشوار می‌دید، اما حضور نرنست برای او مایهٔ دلگرمی بود: «شخص احساس می‌کند که

1. Gilbert Lewis 2. James Partington

خودش می‌تواند کاری را به‌آسانی انجام دهد و این ثبات قدم کمبود مهارت را برطرف می‌کند، خطایی که با سعی و کوشش جبران می‌شود... مهربانی حقیقی او چیزی است که من با سپاسگزاری به‌یاد می‌آورم.»

دست‌کم یک بازدیدکنندهٔ برلین در سالهای ۱۹۳۰ از داوری اولیه دربارهٔ نرنست و رفتار غیرعادی او خودداری کرد. هندریک کازیمیر[1] (که به‌خاطر مطالعاتش دربارهٔ پدیده‌های اَبررسانایی دمای پایین شهرت یافته بود) احساسها و تأثراتش را از نرنست و انجمن تحقیقی او چنین اظهار می‌کند:

> مندلسون این انجمن (لاتینی Colloquium) را با جملاتی پرشوروشوق به‌صورت جایی توصیف کرده است که در آنجا برجسته‌ترین فیزیکدانان روز دربارهٔ تازه‌ترین پیشرفتها اظهارنظر می‌کردند. این امر ابداً تأثیری بر من نداشت...بحثها هم رسمی و هم ظاهری بود. نرنست با صدایی نسبتاً بلند، اما نافذ و آرام مدعی شد که او قبلاً بعضی از چیزهایی را که در انجمن ارائه می‌شود درکتابش بیان کرده است و اظهارگله می‌کرد که مردم کتاب او را به‌عنوان یک اثر منتشرشده به‌رسمیت نمی‌شناسند. در آن زمان او به نظرم چهرهٔ مسخره‌ای آمد... بعدها فهمیدم که بعضی از اظهارات او شامل نکات نسبتاً ظریفی است. در سال ۱۹۶۴ به مناسبت صدمین سال تولد او جشنی درگوتینگن برپا شد و از من به‌عنوان سخنران اصلی دعوت به‌عمل آمد. در آن موقع من اثر منتشرشدهٔ او را با دقت بیشتری خواندم و تحت تأثیر قرارگرفتم. درست است که شیوهٔ بیان او تا حدی آزاردهنده و ریاضیاتش لرزان و ضعیف بود، اما کارش نشان می‌داد که سراسر روشن و غالباً دیدی پیامبرگونه دارد و بنابراین، من فرصتی داشتم که در ملأ عام برای خطای قضاوتی که هرگز آن را به زبان نیاورده بودم، تاوان بدهم.

شادی و غم

زندگی خصوصی نرنست، همچون دوران کار حرفه‌ای‌اش، تقریباً به‌صورتی غیرعادی با خوش‌اقبالی همراه بود. همسر او اِما در میان بسیاری موارد دیگر، مظهر کارایی خانه‌داری و کار سخت بود. او معمولاً ساعت ۶ صبح از خواب برمی‌خاست و امور خانوادهٔ نرنست را که هرگز ساده و آرام نبود مرتب می‌کرد. مدت کوتاهی پس از ورودشان به برلین، خانوادهٔ نرنست به مهمان‌نوازترین خانواده در برلین شهرت یافت. آنان سه دختر و دو پسر داشتند و زندگی خانوادگی، بخش مهمی از وجود نرنست بود.

اما حتی نرنست نتوانست از فجایع دو جنگ جهانی در امان بماند. در جنگ جهانی اول دو پسر نرنست کشته شدند. مدتها پیش از پایان جنگ، نرنست می‌توانست ببیند که آلمان شکست خورده

1. Hendrik Casimir

و تقریباً ویران شده است. او بیهوده می‌کوشید با استفاده از ارتباطهایی ـ که در میان دیگران با قیصر داشت ـ از نابودی بیشتر ممانعت کند. در سال ۱۹۱۷ با جمع‌آوری کارهایش دربارهٔ قضیهٔ گرما در یک تک‌نگاره راه رهایی را در قلمرو صلح‌آمیز علم یافت. در جملات آغازین کتابش از تسکینی که در علم یافته سخن می‌گوید: «بسیاری از یونانیان و رومیان باستان به هنگام اندوه، زحمت و ناراحتی، تسلی‌خاطر را در فلسفه جستجو می‌کردند و آن را یافتند. امروزه ما هم می‌توانیم بگوییم به‌ندرت علمی مانند فیزیک نظریه‌ای وجود دارد که برای منحرف کردن ذهن ما از وضع غم‌انگیز و رقت‌بار کنونی سازگاری داشته باشد.»

سرانجام صلح فرا رسید و آلمان معجزه‌آسا رو به بهبودی نهاد. برای مدتی، اوضاع سیاسی و اقتصادی آشفته و هرج‌ومرج بود، اما علم آلمان به‌صورتی قوی و فعال همچون همیشه ظهور کرد. نرنست و همکاران برلینی‌اش خود را از لحاظ علمی بازسازی کردند. اکنون می‌بایست با انقلابهای ذهنی و مفهومی دست‌وپنجه نرم می‌کردند. هم نظریهٔ کوانتومی و هم نظریهٔ نسبیت در افق علم پدیدار می‌شد. نرنست در این تلاشها شرکت نداشت، گرچه او می‌فهمید و از آنچه روی می‌داد تحسین و تمجید می‌کرد، راه او بازشناسی بیشتری می‌طلبید؛ مقام سفارت در ایالات متحده به او پیشنهاد شد. (که او امتناع کرد.) او به ریاست دانشگاه برلین انتخاب و جانشین هلمهلتز به‌عنوان استاد فیزیک شد و در سال ۱۹۲۰ جایزهٔ نوبل را دریافت کرد.

اما آلمان از تباهی سیاسی ایجادشده در جنگ اول به‌طورکامل بهبود نیافت. در سالهای ۱۹۳۰ توسعهٔ نفوذ نازی آغاز شد. سپس نازی ناگهان و به‌طور قطع و تغییرناپذیر به قدرت رسید. نرنست مخالف سیاستهای نازی بود، اما انرژی و نفوذ کافی برای عمل نداشت. او با ترحم بازنشسته شد و در خانهٔ ییلاقی‌اش آخرین هفت سال عمرش را تا اندازه‌ای با آرامش گذراند.

iii

الکترومغناطیس

خلاصهٔ تاریخی

اکنون داستان ما می‌باید وقایع‌نگاری زیگزاگی بیشتری را دنبال کند. (بررسی خطی وقایع برحسب زمان در پایان کتاب آمده است.) بخش ۲، توسعه و پیشرفت ترمودینامیک را از کارنو در سالهای ۱۸۲۰ تا نرنست در سالهای ۱۹۳۰ می‌نمایاند. اکنون تاریخ به سالهای ۱۸۲۰ و ۱۸۳۰ بازمی‌گردد، با همان چشم‌انداز علمی که الهام‌بخش علم ترمودینامیک بود و موضوع روز آن، مبحث مرموز و کنجکاوانهٔ فرایندهای تبدیل است. برای دانشمندان اوایل قرن نوزدهم آشکار بود که بسیاری از آثار تبدیل‌پذیر مانند آثار گرمایی، مکانیکی، شیمیایی، الکتریکی و مغناطیسی، مستلزم اصولی وحدت‌بخش و یگانه‌اند. ترمودینامیک ابتدا بر آثار گرمایی و مکانیکی متمرکز شد، و از آنها مفاهیم انرژی، انتروپی و سه قانون بزرگ فیزیکی را استخراج کرد. سرانجام، در پایان قرن نوزدهم، ترمودینامیکدانان به این کشف دست یافتند که زبان علم آنان همهٔ آثار بزرگ مقیاس، یا درواقع کل جهان را دربر می‌گیرد.

در همان زمان وحدتهای دیگری در حال اکتشاف بود. در سال ۱۸۲۰، اورستد[1] مشاهده کرد که یک سیم حامل جریان الکتریکی عقربهٔ مغناطیسی یک قطب‌نمای نزدیک به آن را به حرکت درمی‌آورد. یعنی یک اثر الکتریکی، یک اثر مغناطیسی ایجاد می‌کند. همکاران اورستد به این رویداد توجهی نداشتند، اما یک جوان بلندهمت، یک دستیار آزمایشگاهی، در مؤسسهٔ سلطنتی لندن، به‌نام مایکل فارادی تحت تأثیر این رویداد قرار گرفت. فارادی در یک رشته آزمایشهایی که به‌طور درخشانی طراحی شده بود، آثار مغناطیسی بسیار بیشتری را کشف کرد، از جملهٔ آنها اکتشافاتی است که موتورها و مولّدهای الکتریکی امروزی را امکان‌پذیر کرده است. در یکی از آخرین و مشکلترین این آزمایشها، فارادی کشف حیرت‌انگیزی کرد که نور قطبیده تحت تأثیر میدان مغناطیسی قرار می‌گیرد. او با این مشاهده، نور را در حوزهٔ پدیده‌های الکترومغناطیسی آورد.

فارادی بزرگترین آزمایشگر قرن نوزدهم بود، او با مهارت عالی‌اش در آزمایشگاه و همچنین با نظریهٔ انقلابی‌اش دلیل راه و الگو شده بود. او باور داشت که آثار مغناطیسی، الکتریکی و الکترومغناطیسی در فضا، در امتداد «خطوط نیرو» یی که جمعاً به‌عنوان یک «میدان» تعریف می‌شوند، می‌گذرند. وقتی چنین میدانی ایجاد شود، می‌تواند در همه‌جا حتی در فضای خالی وجود داشته باشد. معاشران فارادی

1. Oersted

به آزمایشهای او باور داشتند، اما نظریهٔ او را که اساساً مخالف نوعی نیوتونیسم شایع در آن زمان بود، نمی‌پذیرفتند.

اما دو جوان مخالف نظر عامه، که مشتاقانه معتقد به مفهوم میدان بودند به او پیوستند. یکی از آن دو، ویلیام تامسن و دیگری جوانی اسکاتلندی، به نام جیمز کلرک ماکسول بود که بعداً بزرگترین نظریه‌پرداز قرن نوزدهم شد. تامسن یک نظریهٔ ریاضی محدود از خطوط نیروی الکتریکی فارادی را باب کرد. ماکسول بسیار پیشتر رفت. در طی یک دورهٔ تقریباً دو دهه، او بنای نظریه‌ای عظیمی را ایجاد کرد که آغاز آن با مفهوم میدان فارادی بود. این نظریه شامل مجموعه‌ای از معادلات دیفرانسیلی برای مؤلفه‌های الکتریکی و مغناطیسی میدان و منابع آنها بود، که در چند خط این نظریه از همهٔ پدیده‌های الکتریکی، مغناطیسی و الکترومغناطیسی مطالبی به‌طور متراکم، از جمله اثبات آزمایشی ماهیت الکترومغناطیسی نور به‌وسیلهٔ فارادی، آورده شده بود.

حوزه و سودمندی معادلات ماکسول بسیار وسیع است. تعبیر فیزیکی این معادلات طی سالها تغییر کرده است. امروزه ما منشأ میدان الکتریکی را در بارهای الکتریکی و میدان مغناطیسی را در جریانهای الکتریکی می‌دانیم. ماکسول بار الکتریکی را به‌عنوان محصولی از میدان در نظر می‌گرفت، و فقط می‌توانست یک ارتباط غیرمستقیم بین میدان مغناطیسی و جریانهای الکتریکی ببیند. اما خود معادلات در یک مقیاس کیهانی معتبر است. معادلات ترمودینامیک ماکسول، مانند قانونهای دینامیک و گرانش جهانی نیوتون، وسعتی دارد که تا زوایای جهان امتداد می‌یابد.

۱۱

نیرویی از طبیعت

مایکل فارادی

با نبودن ساختن

دانشمندان این فصل یک گروه ناهمسانند. یافتن وجوه خاصی از سوابق یا ویژگیهایی که متضمن موفقیت آنان در علم باشد بی‌ثمر به‌نظر می‌رسد. بعضی درونگرا و منزوی و بعضی دیگر برونگرا و معاشرتی، بعضی عصبی‌مزاج و بعضی به‌خوبی متعادل بوده‌اند. رفتار آنان گاه دوستانه و سازش‌پذیر و گاه خصمانه و ستیزه‌جویانه بوده است. ازدواج آنان معمولاً کامیاب، اما بعضی ناکام و تحصیلات آنان هم رسمی و هم غیررسمی بوده است. بعضی مربی داشته و بعضی نداشته‌اند. بعضی مکتبهایی را برای پیشبرد کارشان بنیان نهادند و بعضی دیگر به تنهایی کار می‌کرده‌اند.

اما این دانشمندان برجسته دست‌کم در دو مورد اشتراک داشته‌اند: همهٔ آنان، بعضاً به‌طوری وسوسه‌انگیز، سخت‌کوش بودند و تنها با چند مورد استثنا، پیشینه‌هایی از طبقهٔ متوسط داشتند. خصلت بارز تمایل به کار مستمر در اکثر مردمی یافت می‌شود که به موقعیت چشمگیری دست می‌یابند. جالبتر سلطهٔ خاستگاههای طبقهٔ متوسط است. زندگیهای فیزیکدانان ما به عواملی اجتماعی سوق می‌یابد که گسترهٔ وسیعی از طبقهٔ متوسط را شامل می‌شود. از سطوح پایینتر تا بالاتر، اما به‌ندرت در بالا یا پایین این جایگاهها یافت می‌شوند. برجسته‌ترین استثنا در این فصل مایکل فارادی است که در محلهٔ فقیرنشین لندن زاده شد. جیمز، پدر فارادی آهنگری بود بیمار و رنجور که به‌زحمت می‌توانست خانواده‌اش را اداره کند. فارادی در اواخر عمر به‌یاد می‌آورد که در سال ۱۸۰۱ زمانی که اوضاع اقتصادی خراب بود، سهمیهٔ غذایی او یک قرص نان بود. در مورد تحصیلاتش، آن‌طور که به دوست و زندگینامه‌نویسش، هنری بنس جونز[1] گفته است: «عادی‌ترین نوع تحصیلات من، شامل اندکی بیشتر از مبادی خواندن، نوشتن و حساب، در یک مدرسهٔ معمولی روزانه بود. ساعات خارج از مدرسهٔ من در خانه و در خیابانها می‌گذشت.»

1. Henry Bence Jones

اما فقر و بدبختی‌های او با ایمنی و پشت‌گرمی زندگی خانوادگی‌اش متوازن بود. پیرس ویلیامز[1] جدیدترین زندگینامه‌نویس او می‌نویسد: «مارگارت، مادر مایکل، تکیه‌گاه خانواده بود. او آنچه در توان داشت برای رفع نیازهای مادی انجام می‌داد، اما به پسرکوچکترش توصیه می‌کرد با احساس امنیتی که در زندگی بعدی به او توانایی می‌دهد، همهٔ امتیازات اجتماعی و سیاسی را که با احساس قدر و منزلت خود او نامربوط است طرد کند.» بدون تردید این مادر سزاوار تمجید و مایهٔ افتخار و صمیمیت نزدیک با سه فرزندش، مایکل، خواهر جوانترش مارگارت و رابرت، برادر بزرگترش بود.

فارادی از پرسه‌زنی در خیابانهای لندن تا ارتقا به مقام والای نهایی‌اش به‌عنوان یکی از بزرگترین دانشمندان زمان خود، راهی طولانی را پیمود. حمایت خانواده به او یاری کرد که نخستین گامها را در راه صعود بردارد و همچنین ایمان مذهبی‌اش به کلیسای ساندمانی او را در این راه یاری می‌کرد. ساندمانیها فرقهٔ مسیحی پروتستان اصول‌گرایی هستند که اهمیت اساسی عشق، انضباط و اشتراک جامعه را بدون تبلیغ یا موعظهٔ آتشین می‌آموزند. فارادی در سراسر زندگی قدرت روزانه‌اش را از ایمان مذهبی‌اش می‌گرفت. جان تندال[2] یکی از همکارانش، در دفتر خاطراتش نوشته است: «من فکر می‌کنم که مقدار زیادی از قدرت و استقامت روزهای کاری فارادی ناشی از مراسم روز یک‌شنبهٔ او باشد. او در روز یک‌شنبه از چشمه‌ای سیراب می‌شود که مایهٔ سرزندگی و شادابی اوست.»

اما، با همهٔ سماجت و عزمی که با فلاکت در خصلت فارادی نهادینه شده بود، حتی با حمایت خانواده و ایمان مذهبی، بدون دو امتیاز دیگر، او جایی در تاریخ نمی‌داشت: خوش‌اقبالی فوق‌العاده در چند نقطهٔ کلیدی زندگی، و شخصیتی با جدیت مفرط. نخستین خوش‌اقبالی او شاگردی صحاف و کتابفروشی بود به‌نام ژرژ ریبو[3]. ریبو پناهنده‌ای فرانسوی بود که شاگرد سرزنده‌اش را دوست می‌داشت و او را تشویق می‌کرد تا از کتابهای بسیاری که از دکان می‌گذرد، بهره‌برداری کند. فارادی به بنس جانز گفته بود، به هنگام شاگردی «من عاشق خواندن کتابهای علمی بودم که از زیر دستم می‌گذشت، و در میان آنها از گفتگوهایی دربارهٔ شیمی اثر [جین] مارست[4] و مقالات الکتریکی در دایرةالمعارف بریتانیکا شادمان می‌شدم.» چنین بود آغاز تصادفی آموزش فارادی در علم.

دسترسی به کتاب امری حیاتی بود، اما کافی نبود. فارادی شرکت در سخنرانیهای آموزشی شبانه، از جمله سخنرانیهای چهارگانهٔ دیوی را که در مؤسسهٔ سلطنتی در لندن ایراد می‌شد، آغاز کرد. دیوی یکی از مشهورترین دانشمندان عصر خود، و یک مدرس بسیار محبوب بود. وقتی فارادی با یکی از زندگینامه‌نویسان دیوی ارتباط پیدا کرد، کار خرید و فروش کتاب را «بی‌رحمانه و خودخواهانه» یافت و به این فکر افتاد که وارد خدمت علم (مسیحی) شود که «تصور می‌کردم پیروان آن را خوش‌خلق و آزادمنش می‌سازد». او از روی سادگی نامه‌ای مبنی بر تقاضای شغل به دیوی نوشت، این امر بزرگترین مورد خوش‌اقبالی فارادی بود.

1. Pearce Williams 2. John Tyndall 3. George Riebau 4. Jane Marcet

دیوی نخست او را به‌عنوان کاتب و بعد به‌عنوان استادیار در آزمایشگاه مؤسسهٔ سلطنتی به خدمت گرفت. فارادی برای تمام مدت کاری خود در مؤسسه ماند و سرانجام با جذابیت عمده‌ای در آزمایشگاه و سالن سخنرانی مؤسسه جانشین دیوی شد.

کلیسا، خانواده، روابط دوستانه در دوران شاگرد صحافی و حمایت دیوی قدرتهای بیرونی بودند که فرصتهای مناسبی را برای فارادی ایجاد می‌کردند. اما قدرت درونی فوق‌العادهٔ فارادی اهمیت کمتری از آن فرصتها نداشت. تندال می‌نویسد: «در لوای خوی دلنشین و مهربان او حرارتی آتشفشانی نهفته بود. او مردی بود تحریک‌پذیر و آتشین‌مزاج، اما به‌جای آنکه وجود خود را با عشق شهوانی تخریب کند، با کفّ نفس و انضباط فوق‌العاده‌اش، این آتش را به‌نوعی برافروزش مرکزی و نیروی محرکهٔ زندگی تبدیل کرد.» انرژی فارادی برای پیشرفت و ارتقای طولانی، سرسختانه و پرمخاطره، کمتر از انرژی یک آتشفشان کنترل‌شده نبود. او برای کار پژوهشی‌اش مطالعهٔ نیروهای طبیعت را انتخاب کرده بود. خود او یک نیروی طبیعت بود.

فارادی و دیوی

در میان دانشمندان بزرگ احتمالاً هرگز کسی به زیبایی، خوش‌قیافگی و شهرت مردم‌پسندانهٔ همفری دیوی نبوده است. در زمان استخدام فارادی، او در اوج اشتهار بود. دیوی مرکز کارش را در مؤسسهٔ سلطنتی، که جدیداً به‌وسیلهٔ کنت رامفرد (بنیامین تامسن) تأسیس شده بود، قرار داد. مؤسسهٔ سلطنتی به‌منظور «آموزش، به‌وسیلهٔ دوره‌های منظم و سخنرانیهای فلسفی و آزمایشها، کاربردهای اکتشافات جدید در علم برای بهبود هنرها و صنایع و تسهیل امکانات فراهم‌آوری آسودگیها و وسایل زندگی» تأسیس شده بود. به هنگام تصدی دیوی به‌عنوان استاد شیمی در مؤسسه، این هدف اجتماعی برای پژوهش شیمی استاد، و سخنرانیهای مشهور علمی، در درجهٔ دوم اهمیت قرار گرفته بود.

پیشینهٔ طبقهٔ متوسط پایین دیوی خیلی جدا از خاستگاه طبقهٔ پایین فارادی نبود. کار پدر دیوی کنده‌کاری روی چوب بود و مزرعهٔ کوچکی در پنزانس کورنوال داشت. او به مدرسهٔ خوبی رفت، اما آموزش رسمی‌اش ادامه نیافت. دیوی به‌عنوان شاگرد یک دواساز پنزانسی به شیمی علاقه‌مند شد. توماس بدوز[1]، دکتری در کلیفتون بریستول، نخستین فرصت علمی را برای دیوی فراهم آورد. بدوز دیوی را به‌عنوان سرپرست آزمایشها، در مؤسسهٔ پزشکی تنفسی منصوب کرد. آزمایشهای دیوی با گازها، به‌ویژه آثار تنفسی «گاز خنده» (نیتروکسید) بود. او با توصیف اثر گاز خنده به این مضمون که «احساسی شبیه به فشار ملایمی است بر تمام ماهیچه، همراه با لرزش بسیار لذت‌بخش و شادی‌آور، به‌ویژه در سینه و اندامهای انتهای بدن (دست و پا)» به‌سرعت مشهور شد.

آزمایشها و تأملات متهورانهٔ دیوی توجه رامفرد را جلب کرد و در سال ۱۷۹۹ رامفرد، دیوی را به نخستین مقامش در مؤسسهٔ سلطنتی منصوب کرد، که سکویی برای برآورده شدن آرزوهای او، هم در زمینهٔ علم و هم در زمینهٔ موفقیتهای اجتماعی شد. دیوی در سال ۱۸۱۲ با بیوه‌ای جذاب و ثروتمند به‌نام جین آپریس[2] ازدواج کرد. ج.گ. کرودر، زندگینامه‌نویس دیوی می‌نویسد: «این بانو به‌همان شدت

1. Thomas Beddoes 2. Jane Apreece

اشتیاق به کسب مقام داشت که خود دیوی. این دو شکارچی اجتماعی متفقاً به سد اشرافیت حمله بردند. برای دیوی پی‌گیری علم به‌سرعت تابع برتری‌جویی می‌شد.»

فارادی مدت کوتاهی پس از شروع شاگردی علمی‌اش با دیوی در سال ۱۸۱۳، فرصت خوش‌اقبالی دیگری به‌دست آورد. دیویها که اکنون سِر دیوی و لیدی دیوی بودند، همراه با فارادی به‌عنوان «دستیار دیویها در آزمایشها و یادداشت‌برداری» عازم یک سیر و سفر اروپایی شدند. گردش و بازدید اروپا بخش اساسی دیگری از آموزش فارادی در زمینهٔ علم و موارد دیگر شد. شهرت دیویها درها را در هر جا، در فرانسه و ایتالیا می‌گشود و فارادی با بسیاری از دانشمندان پیشروِ آن زمان دیدار کرد. خود دیوی نقش آموزنده داشت، او و دستیار مشتاقش دربارهٔ عنوانهایی که طرح علمی و ماورای آن را دربر می‌گرفت آزادانه مباحثه می‌کردند. لیدی دیوی رفتار متفاوتی داشت. او زیاد حرف می‌زد و اصرار می‌ورزید که با فارادی به‌صورت یک خدمتکار رفتار کند. فارادی به دوستش بنجامین ابوت نوشت: «لیدی فوق‌العاده مغرور و متکبر است و خوشحال می‌شد که زیردستانش قدرت او را احساس کنند.» تجربهٔ سفر اروپایی فارادی همچون هر تجربهٔ دیگر در زندگی فارادی حائز اهمیت بود. ویلیامز به ما می‌گوید: «مرد جوانی که در بهار سال ۱۸۱۵ قدم بر خاک انگلیس نهاد، کاملاً با جوانی که در سال ۱۸۱۳ آنجا را ترک کرده بود، تفاوت داشت. او بخش جالبی از جهان را دیده بود، به پیچیدگی و تنوع آن پی برده بود، و از شیوه و چم‌وخم افراد، بصیرت بسیار خوبی کسب کرده بود.»

کاشف

اکثر زندگینامه‌نویسان متعدد، فارادی را به‌صورت کاشف بی‌همتایی از واقعیتهای آزمایشی تصویر می‌کنند. این تصویر تا آنجا که پیش می‌رود مطمئناً دقیق است، اما وجه دیگری از نبوغ او با همان اهمیت را نادیده می‌گیرد و آن دستاوردهای برجستهٔ او به‌عنوان یک نظریه‌پرداز، یا (آن‌طور که خودش ترجیح می‌داد) یک فیلسوف است. نخست او را در نقش آشنای آزمایشگر می‌بینیم.

کار اولیهٔ فارادی در مؤسسهٔ سلطنتی، به هنگامی که دیوی هنوز در امور مؤسسه فعالیت داشت، عمدتاً کار یک شیمیدان بود. نخستین مقالهٔ علمی او «تجزیهٔ آهک سوزان بومی توسکانی Native Caustic Lime of Tuscany» در سال ۱۸۱۶ وقتی که او بیست‌وپنج‌ساله بود، منتشر شد. در سال ۱۸۲۰ او از لحاظ نیاز برای انجام خدماتش به‌عنوان یک متخصص شیمی تجزیه، شیمیدانی کارآزموده شده بود. طی سالهای ۱۸۲۰ او با انجام صدها تجزیهٔ شیمیایی به سر پا ماندن مؤسسه، از لحاظ مالی، کمک کرد. همچنین در سالهای ۱۸۲۰ فارادی به موضوعات پژوهش عمده و اصلی‌اش، یعنی الکتریسیته و الکترومغناطیس، بازگشت. در این مورد ما او را آزمایشگر برجستهٔ قرن نوزدهم می‌یابیم.

رویدادی که الهام‌بخش علاقهٔ فارادی به الکتریسیته و مغناطیس شد اکتشاف هانس کریستین اورستد[1]، دانشمند دانمارکی در سال ۱۸۲۰ بود. آزمایش این کشف، ابتدا به‌صورت نمایش در حضور

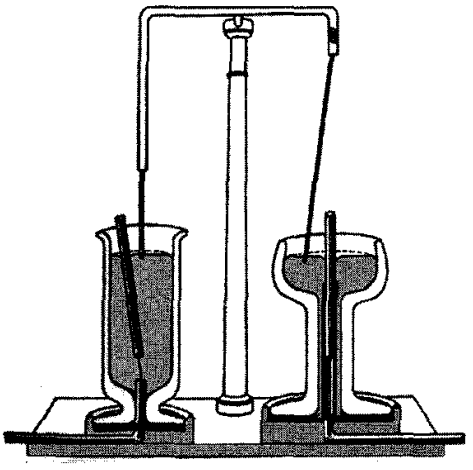
1. Hans Christian Oersted

جمعی از دانشمندان انجام شد. خود اورستد بعداً آزمایش را چنین توصیف می‌کند: (برای ارجاع به خودش سوم شخص را به‌کار می‌برد.)

> طرح نخستین آزمایش این بود که جریانی [الکتریکی] از یک اسباب شیمیایی [یک باتری] که معمولاً در سخنرانیهایش به‌کار گرفته می‌شد، ایجاد کند و آن را از سیم بسیار نازک پلاتینی بگذراند، این سیم روی یک قطبنما که با شیشه پوشانیده شده بود گذاشته می‌شد. مقدمات آزمایش آماده شد، اما حادثه‌ای پیش‌بینی‌نشده، مانع شد که آن را پیش از سخنرانی امتحان کند. او تصمیم گرفت آزمایش را به وقت دیگری موکول کند؛ اما در حین سخنرانی، احتمال موفقیت آن قویتر به نظرش می‌رسید، به‌طوری که او نخستین آزمایش را در حضور مخاطبان انجام داد. عقربهٔ مغناطیسی (قطبنما)، گرچه در جعبه‌ای گنجانده نشده بود، تکانی خورد، اما چون اثر آن بسیار ضعیف بود. . . آزمایش اثر قاطعی بر حاضران نداشت.

فارادی و بعضی از دیگران بیشتر تحت تأثیر قرار گرفتند. آزمایش اورستد رویداد بزرگی در افتتاح علم الکترومغناطیس داشت که نهایتاً به بعضی تکنولوژیهایی که امروزه آشنایی بسیاری با آنها داریم راه یافت. در اواخر سال ۱۸۲۰، نمایش اورستد مورد توجه خاص فارادی قرار گرفت، از این لحاظ که سیمی حامل جریان با یک اثر مغناطیسی احاطه می‌شود و عقربهٔ قطبنما را در جهتی عمود بر سیم می‌راند.

فارادی حدس زد که یک سیم حامل جریان می‌تواند یک آهنربا را با حرکت چرخشی دائمی حول محور سیم در حال دوران نگهدارد. او آزمایشی را که تصویر آن در شکل ۱۱ـ۱ ملاحظه می‌شود طراحی کرد تا این چرخش الکترومغناطیسی را نشان دهد. سمت چپ این تصویر جامی پر از جیوه با یک سیم ثابت حامل جریان الکتریکی را که در جیوه فرو رفته است، نشان می‌دهد. یک میلهٔ مغناطیسی کوچک پرقدرت کنار سیم جای گرفته و با یک تکه نخ به تَهِ جام بسته شده است. وقتی جریان الکتریکی از سیم (و جیوهٔ درون جام) عبور کند، قطب بالایی آهنربا گرداگرد سیم می‌چرخد. سمت راست شکل، آزمایش مشابهی را نشان می‌دهد که در آن آهنربا ثابت است و سیم حامل جریان می‌چرخد.



شکل ۱۱ـ۱ آزمایشهای فارادی چرخش الکترومغناطیسی را نشان می‌دهد. از لوحهٔ IV مایکل فارادی، پژوهشهای آزمایشی در الکتریسیته (لندن، تیلور و فرانسیس، ۱۸۳۹)، مجلّد ۲.

این آزمایشها در اکتبر سال ۱۸۲۱ گزارش شد و مقالهٔ آن به نقل از ویلیامز «فارادی را در زمرهٔ دانشمندان درجهٔ اول اروپا جای داد. در سراسر اروپا در هر آزمایشگاهی دستگاهی مانند دستگاه چرخش فارادی ساخته شد و دربارهٔ ماهیت عجیب نیروی محرکهٔ این دستگاه به تعمق پرداختند.» دستگاه فارادی آشکارا امکانات عملی داشت: او موتور الکتریکی را اختراع کرده بود. او این گونه کاربردها و موارد استعمال دیگری را که با اختراع او امکان‌پذیر می‌شد دنبال نکرد. اما دیگران کردند. در سالهای ۱۸۳۰، از میان دیگران اجرای عملی «ماشینهای الکترومغناطیسی» مورد مطالعهٔ جیمز جول قرارگرفت.

مقالهٔ ۱۸۲۱ و پذیرفته شدن فوری آن موجبی برای تجلیل ـ و چنانکه معلوم شد، برای نوعی اتهام سرقت علیه فارادی بود. مشاجره مربوط می‌شد به تلاشهای اولیهٔ ناموفق و منتشرنشدهٔ ویلیام ولاستون[1] و دیوی برای ساختن سیمی حامل جریان که وقتی تحت تأثیر یک آهنربا قرارگیرد به دور محورش می‌چرخد. این همان آزمایش فارادی نبود، اما تا حدی شبیه بود که فارادی، کسی که با کوشش ولاستون ـ دیوی آشنا بود، می‌باید آن را اعلام کرده باشد. او به‌علت عجله برای انتشار، این کار را نکرده بود و سوءظن آغاز شد. سرانجام ولاستون به خاتمهٔ طوفان رضایت داد، اما دیوی این بزرگواری را نداشت. سه سال بعد وقتی فارادی برای انتخاب به‌عنوان عضو انجمن سلطنتی پیشنهاد شد، ولاستون از او حمایت کرد، اما دیوی نکرد. فارادی با یک رأی مخالف انتخاب شد، و بی‌تردید آن رأی، رأی دیوی بود. استاد با شاگرد قطع رابطه کرده بود که آشکارا تا حدی انگیزهٔ حسادت و تکبر دخالت داشته است.

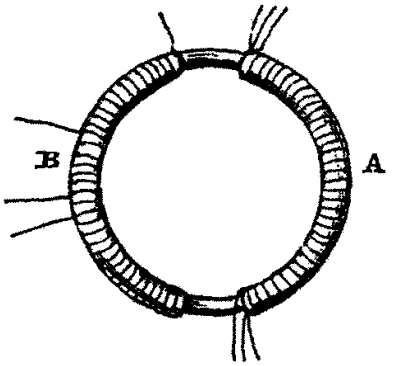
آزمایش اورستد نخستین نمایش پدیدهٔ الکترومغناطیس نبود. پیش از آن فرانسوا آراگو[2] و آندره ماری آمپر نشان داده بودند که یک پیچک مارپیچی از سیم که حامل جریان الکتریکی باشد، یک مغناطیس، یا درواقع یک الکترومغناطیس می‌شود. در یک سری آزمایشهایی که در سال ۱۸۳۱ گزارش شده، فارادی این ارتباط بین الکتریسیته و مغناطیس را با واسطهٔ یک پیچک سیمی تحقیق می‌کرده است. او اثری را کشف کرد که سرانجام آن را «الکترومغناطیس (یا مگنتو ـ الکتریک) القایی» نامید. القا بین دو پیچک از سیم پیچیده‌شده به دور یک حلقهٔ آهنی روی داد. یک پیچک حامل جریان الکتریکی و به‌عنوان یک الکترومغناطیس و دیگری متصل به یک سیم مسی بود که از روی یک عقربهٔ قطبنما می‌گذشت. در این‌جا به‌طور نمونه توصیف بسیار دقیق آزمایش فارادی را، آن‌طور که در دفتر یادداشتهای آزمایشگاه او ثبت شده است ملاحظه می‌کنید:

> من حلقه‌ای ساخته‌شدهٔ آهنی (آهن نرم) داشتم، ضخامت گردی آهن $\frac{۷}{۸}$ اینچ و قطر بیرونی حلقه شش اینچ بود. پیچکهای بسیاری به دور آن پیچیدم، نصف پیچکها با نخ چندلا و نوار پارچهٔ پنبه‌ای از نیمهٔ دیگر آن جدا بود. سه رشته سیم بود، هر یک به طول تقریبی بیست‌وچهار فوت که ممکن بود آنها را به‌صورت یک رشته به هم متصل کرد، یا به‌صورت رشته‌های جدا از هم به‌کارگرفت. امتحان با یک مخزن (یک باتری ولتایی)

1. William Wollaston 2. François Arago

عایق بودن آنها را از یکدیگر نشان می‌داد. این طرف حلقه را A [شکل ۱۱ـ۲ را ببینید] می‌نامیم. در طرف دیگر، اما با فاصله‌ای جداشده، دو قطعه سیم پیچیده شده بود که طول آنها با هم به حدود شصت فوت می‌رسید و جهت آن همچون پیچکهای قبلی بود. این طرف را B می‌نامیم.

یک باتری با ده جفت صفحهٔ چهاراینچ مربعی را شارژکردم. پیچک‌های طرف B را به‌صورت یک پیچک درآوردم، و دو انتهای آن را به یک سیم مسی متصل کردم، این سیم پس از عبور از فاصله‌ای، درست روی یک عقربهٔ مغناطیسی (در فاصلهٔ ۳ فوتی از حلقهٔ سیمی) قرار داشت. سپس دو سر یکی از رشته‌های طرف A را به باتری وصل کردم؛ ناگهان اثر حرکتی محسوسی روی عقربه ظاهر شد. عقربه نوسان کرد و سرانجام در موقعیت اولیه خود آرام گرفت. با قطع ارتباط طرف A با باتری، بار دیگر عقربه دچار اختلال شد.



شکل ۱۱ـ۲ *آزمایش القای الکترومغناطیسی فارادی، برگرفته از زندگی و نامه‌های فارادی اثر هنری بنس جونز* (London: Longmans, Green, ۱۸۷۰)، ۲:۲.

وقتی اتصال به باتری برقرار شد، پیچک A یک الکترومغناطیس شد که اثر مغناطیسی آن در پیچک B جریان الکتریکی ایجاد کرد، و این جریان با عقربهٔ مغناطیسی (قطبنما) مشخص شد. کشف کلیدی فارادی، که سالها خود فارادی و دیگران آن را فراموش کرده بودند، این بود که جریان الکتریکی القایی گذرا ($transient$) یعنی فقط برای مدت کوتاهی پس از برقراری اتصال پیچک A دوام داشت. به گفتهٔ دیگر القا فقط تا وقتی اثر مغناطیسی در حال تغییر بود، ظاهر می‌شد. جریان گذرای دیگر وقتی در پیچک B القا می‌شد که اتصال پیچک A از باتری قطع شود.

آزمایش اورستد اثر مغناطیسی ایجادشده به‌وسیلهٔ اثر الکتریکی را نشان داد. نخستین آزمایش القای فارادی نمایش معکوس این عمل بود. یعنی با اثر مغناطیسی، یک اثر الکتریکی ایجاد می‌شود، با توجه به اینکه اثر مغناطیسی ناشی از الکترومغناطیس یا مغناطیس الکتریکی است. فارادی نتیجهٔ مشابهی را با جانشین کردن مغناطیس دائمی به‌جای الکترومغناطیس به‌دست آورد. او سیمی را به‌طور پیچک مارپیچ به دور یک استوانهٔ مقوایی مجوف پیچید، پیچک را به گالوانومتر متصل کرد (برای اندازه‌گیری جریانهای الکتریکی)، و به‌سرعت یک مغناطیس دائمی استوانه‌ای را به درون استوانه‌ای

مقوایی فرو برد. وقتی آهنربا در حرکت بود ـ اما تنها وقتی در حرکت بود ـ گالوانومتر نشان می‌داد که جریان الکتریکی در پیچک القا می‌شود.

آزمایشهای القای الکترومغناطیسی سال ۱۸۳۱ فارادی مانند آزمایشهای چرخش الکترومغناطیسی سال ۱۸۲۱ او نوعی مفاهیم عملی آشکاری داشت که به‌طور معمول فارادی از آنها بهره‌برداری نمی‌کرد. آزمایشهای القایی نشان داد که همهٔ آنچه برای تولید الکتریسیته لازم است یک آهنربا و یک پیچک سیمی است. ماشینهایی که امروزه آنها را دینام یا مولد الکتریسیته می‌نامیم بر مبنای این اصل است.

سالهای ۱۸۳۰ برای فارادی سالهای پرمشغله‌ای بود. او مدت کوتاهی پس از کامل کردن آزمایشهای القای الکترومغناطیسی، به سلسله آزمایشهای فوق‌العاده مهم دیگری مبادرت ورزید. این آزمایشها متمرکز بر تجزیهٔ الکتروشیمیایی و علاقه‌ای بود که از دیوی به‌ارث برده بود. در نخستین الگوی این آزمایشها، جریانی الکتریکی از یک باتری ولتایی از ظرف محتوی آب می‌گذشت، و گازهای اکسیژن و هیدروژن در دو سر سیمهایی که در آب اتصال الکتریکی ایجاد می‌کردند، تشکیل می‌شد. واکنش شیمیایی متداول تجزیهٔ آب (H_2O) بر اثر جریان الکتریکی به هیدروژن (H_2) و اکسیژن (O_2) به‌صورت زیر است،

$$2H_2O \rightarrow 2H_2 + O_2$$

این اثر ابتدا در سال ۱۸۰۰ مشاهده شد و در طی زمان که فارادی در سالهای ۱۸۳۰ به الکتروشیمی روی آورد، تجزیه‌های الکتروشیمیایی بسیار زیادی مشاهده شده بود.

فارادی نخست نتیجه‌گیری کرد که در تمام موارد مقدار تجزیهٔ شیمیایی تولید شده متناسب با مقدار الکتریسیتهٔ تولیدکنندهٔ اثر است. همچنین او مشاهده کرد که جرمهای عناصر آزادشده به‌وسیلهٔ کمیت معینی از الکتریسیته، متناسب با وزنهای هم‌ارز شیمیایی آنهاست. (وزن هم‌ارز یک عنصر تقریباً معادل با جرمی از آن عنصر است که با یک گرم هیدروژن ترکیب می‌شود. مثلاً، وزن هم‌ارز اکسیژن در H_2O هشت گرم است.)

فارادی از دومین مشاهده‌اش، نتیجه‌گیری کرد که «وزنهای هم‌ارز اجسام صرفاً کمیتهایی از آنهاست که شامل مقدار الکتریسیتهٔ یکسانی باشند، یا به‌طور طبیعی توانهای الکتریکی مساوی داشته باشند؛ این الکتریسیته است که [وزن] هم‌ارز را معین می‌کند، زیرا الکتریسیتهٔ نیروی ترکیب شدن را معین می‌کند.» این اظهارات مکتوب در سال ۱۸۳۴، به‌طور شگفت‌انگیزی پیشگویی‌کنندهٔ آینده بود. آنها بیش از پنجاه سال زودتر از آنکه شیمی‌فیزیکدانان این نظریه‌ها را توسعه دهند پیش‌بینی شدند. در اواخر قرن نوزدهم بود که شیمی‌فیزیکدانان به این تصور رسیدند که بسیاری از مواد شیمیایی ممکن است در حالت محلول به‌صورت اجزای باردار الکتریکی، هر یک با وزن هم‌ارز خود، تفکیک شوند.

فارادی حتی با پیشگویی گسترده‌تر ادامه می‌دهد: «یا، اگر ما نظریهٔ اتمی یا عبارت‌پردازی آن را بپذیریم، در آن صورت اتمهای اجسامی که در واکنشهای شیمیایی عادیشان با یکدیگر هم‌ارزند، مقادیری مساوی از الکتریسیته دارند که به‌طور طبیعی با آنها پیوسته است.» او در این مورد مفهوم ذرات

باردار در محلولهای آبی را فرمولبندی کرد که در نظریهٔ جدید محلولها «یون» نامیده می‌شود. اما او مانند بسیاری از معاصرانش از پذیرفتن اتمیسم خودداری کرد: «باید اعتراف کنم که من نسبت به اصطلاح اتم احساس حسادت می‌کنم، زیرا گرچه بحث دربارهٔ اتمها بسیار آسان است، اما، ایجاد یک اندیشهٔ روشن از ماهیت آنها، به‌ویژه وقتی مواد مرکب موردنظر باشد، بسیار دشوار است.» با ذوق گذشته‌نگری، ما در شگفت می‌مانیم که چرا فارادی جسارت کافی نداشت که به اتمهای باردار حتی به اتم الکتریسیته (الکترون) باور داشته باشد. این گامی بود که او نمی‌توانست بردارد، زیرا این امر تجاوز به اظهارنظرش بود مبنی بر اینکه یک اصل مفروض حقیقت نیست، مگر آنکه واقعیتهای آزمایشی (بسیاری) مؤید آن باشد. برای فارادی هیچ‌چیز مهمتر از آن نبود.

ما می‌توانیم اعتبار و امتیاز بنیانگذاری علم الکتروشیمی را از آنِ فارادی بدانیم. او نه‌تنها دو قانون اساسی الکتروشیمی مذکور در فوق را پیشنهاد کرد، بلکه زبان الکتروشیمی، از قبیل اصطلاحات «الکترولیت»، «الکترود»، «کاتود»، «آنود»، «کاتیون»، «آنیون» و «یون» را نیز ارائه کرد. فارادی برای ابداع این اصطلاحات از ویلیام هیوول[1] در کالج ترینیتی، کمبریج، کمک گرفته بود. بنا به اظهارات کرودر، «اصطلاحات مشهور [الکتروشیمی] عمدتاً ناشی از ذوق عالی ریشه‌یابی هیوول بود.»

فارادی در سال ۱۸۳۷ از الکتروشیمی به الکتریسیتهٔ ساکن (الکترواستاتیک) روی آورد. او ایده‌ای در نظر داشت که می‌توانست تأیید آن را با شواهد الکتروشیمی ببیند. ایدهٔ او این بود که وقتی دو جسم باردار الکتریکی بر هم تأثیر کنند، این اثر نه‌تنها به خود بار بلکه به ملأ بین دو جسم نیز بستگی دارد. او دستگاهی طراحی کرد به‌اصطلاح امروزی به‌نام خازن (Capacitor). این دستگاه مرکب از دو کرهٔ برنجی هم‌مرکز بود که با پوستهٔ لاکی عایق از لحاظ الکتریکی از هم جدا می‌شدند. این دستگاه را ممکن بود گشود و فضای بین دو کره را با مواد عایق متفاوت، گازها، مایعات و جامدات پر کرد.

فارادی با این طرح دو خازن دقیقاً یکسان ساخت. در یک آزمایش نمونه‌ای، او یک خازن را با هوا و دیگری را با مادهٔ دیگری، مانند شیشه، گوگرد یا تربانتین، پر کرد. سپس یک خازن را با الکتریسیتهٔ باردار و آن را به خازن دیگری متصل کرد؛ بنابراین، بار الکتریکی بین دو خازن تقسیم شد. سرانجام، با یک الکتریسیته‌سنج بارهای روی خازنها را اندازه‌گیری کرد. او دریافت خازنی که با جسم جامدی پر شده همیشه بار الکتریکی بیشتری از آنکه با هوا پر شده دارد. این شاهدی آشکار بود که برهمکنش الکتریکی بین دو جسم باردار نه‌تنها به بار و فاصلهٔ بین دو جسم، بلکه به محیط یا ملأای که فضای بین دو جسم را اشغال کرده است نیز بستگی دارد، فارادی این ملأ را «دی‌الکتریک» نامید. اگر دی‌الکتریک جامد باشد، مقداری از بار در خود دی‌الکتریک القا می‌شود. به‌نظر فارادی، این آزمایشهای «القای الکترواستاتیکی» یک ارتباط متقابل نزدیک بین نیروهای الکتریکی و ملأای را که آن نیروها در آن ملأ مؤثر واقع می‌شوند، نشان می‌دهند: نیروها محیط یا ملأ را تغییر می‌دهند، و ملأ نیروها را منتشر می‌کند.

فارادی از لحاظ بدنی مردی قوی بود. او می‌توانست در یک روز مسافتی در حدود سی مایل را در ناحیهٔ کوهستانی پیاده‌روی کند. او مدام در مؤسسهٔ سلطنتی مشغول به کار بود. ضعف مصیبت‌بار او

1. William Whewell

گهگاه عود می‌کرد. به‌گفتهٔ خود او «ناخوشی من به سرم مربوط می‌شود.» حتی در جوانی مشکل حافظه داشت و با افزایش سن از حمله‌های افسردگی و سردرد رنج می‌برد. کنستانس رید[1] خواهرزاده‌اش یادآور می‌شود، بعضی اوقات که او به منتها درجه مأیوس و گرفته می‌شود «زن‌دایی من معمولاً او را چند روزی به برایتون[2] یا جای دیگر می‌برد و آنها معمولاً پس از بازگشت سرحال و سرزنده بودند.»

این نشانه‌های بیماری از لحاظ شدت و تکرار افزایش یافت، تا آنکه در سال ۱۸۴۰، در سن چهل‌ونه‌سالگی، فارادی دچار فروپاشی عصبی شدیدی شد. تعطیلات برایتون دیگر شفابخش نبود، و به‌مدت چهار سال او از اکثر فعالیتهای پژوهشی‌اش دوری گزید. حالت استیصال او را در نامه‌ای به دوستش کریستیان شوین‌بین[3]، در سال ۱۸۴۳، می‌توان تصور کرد: «من باید دست به کار نوشتن نامه‌ای برای تو باشم، گرچه آن‌طور که احساس می‌کنم، در اواسط یکی از حمله‌های عصبی ملایمتری هستم. با حافظه‌ای بسیار غیرقابل اطمینان، که نمی‌توانم آغاز یک جمله را تا پایان به‌یاد آورم ـ دستم به فرمان اراده‌ام نیست، با نوعی انقباض ماهیچه‌ای نمی‌توانم حروف را مرتب بنویسم، بنابراین، مشکل می‌دانم که آیا کاری را با استواری به پایان خواهم رساند یا نه.»

با وجود این، او در سال ۱۸۴۵ بازگشت. او بار دیگر در آزمایشگاهش بود و اقدام به کاری کرد که یکی از عالیترین دستاوردهای او بود. این کار با اظهارنظری در یک نامه از ویلیام تامسن که در آن زمان دانشجوی دورهٔ کارشناسی درکمبریج بود، آغاز شد. تامسن آثار الکتریسیته بر دی‌الکتریکها را که فارادی با آنها آشنایی داشته است، متذکر می‌شود و سپس این نظر را ارائه می‌کند که قید الکتریکی یک دی‌الکتریک شفاف ممکن است اثری بر نور قطبیده‌ای که از دی‌الکتریک می‌گذرد، داشته باشد.

پدیدهٔ قطبش نور سالها پیش شناخته شده بود. این پدیده، به‌ویژه در نور بازتابیده مشاهده، و به‌عنوان فرایندی که ارتعاشات تشکیل‌شدهٔ امواج نور را در یک صفحهٔ معین محدود می‌کند، فهمیده شده بود. دهها سال پیش از نامهٔ تامسن، فارادی کوشیده بود تا تغییر در صفحهٔ قطبش باریکهٔ نورِ در حال عبور از دی‌الکتریکی را که در قید بار الکتریکی است، آشکارسازی کند. در آن موقع او فقط به نتایج منفی رسید. فارادی به تامسن پاسخ داد: «هنوز من قاطعانه باور دارم که این دی‌الکتریک در یک حالت خاصی است، درحالی‌که القا در آن صورت می‌گیرد.» او بار دیگر تحریک شد تا این اثر گریزپا را جستجو کند، اما اصلاحات جستجوی قبلی برای آثار الکتریکی بر نور قطبیده چندان موفقیت‌آمیز نبود. ناگهان به خاطرش رسید که یک مغناطیس قوی ممکن است یک دی‌الکتریک جامد را به‌قدر کافی مجبور کند تا بر گذرگاه یک باریکهٔ نور قطبیده اثرگذار باشد.

در سال ۱۸۴۵، فارادی سلسله آزمایشهایی را بر این حدس و گمان آغاز کرد. برای مواد جامد گذرگاه نور قطبیده، او شیشهٔ فلینت، نوعی بلور کوارتز و بلور شامل کلسیم کربنات را امتحان کرد، مقدار جریان الکتریسیتهٔ لازم برای الکترومغناطیسش و جایگاه قطبها را تغییر داد، باز هم موفقیتی حاصل

1. Constance Reid 2. Brighton 3. Christian Schönbein

نشد. سرانجام او قطعه‌ای از شیشهٔ سربی را که پانزده سال پیش تهیه کرده بود امتحان کرد ـ و بالأخره لحظهٔ یافتم یافتم فرا رسید:

> یک قطعه شیشهٔ سخت. . . به طول دو اینچ، به عرض ۱٫۸ اینچ و به ضخامت ۰٫۵ اینچ، مرکب از سیلیکو بورات سرب، که کوتاهترین دو لبهٔ آن صیقلی شده بود مورد آزمایش قرارگرفت. وقتی قطبهای مغناطیسی یکسان یا قطبهای مخالف بر وجوه مقابل (با توجه به مسیر پرتو قطبیده) بودند نتیجه‌ای حاصل نمی‌شد ـ همچنین بود وقتی که قطبهای یکسان بر وجه یکسان بودند، خواه با جریان ثابت باشد، خواه با جریان نوبتی ـ اما، وقتی قطبهای مغناطیسی مخالف بر یک وجه بودند اثری بر پرتو قطبیده ایجاد شد، و ازاین رو ثابت شد که نیروی مغناطیسی و نور ارتباطی با یکدیگر دارند. این واقعیت با بیشترین احتمال، باروری فوق‌العاده و ارزش بسیار در پژوهشهای هر دو حالت نیروهای طبیعی را ثابت خواهد کرد.

درواقع، فارادی نشان داده بود، رابطهٔ بین نور و مغناطیس، نخستین گام در امتداد راهی است که به یکی از بزرگترین دستاوردهای نظریه‌ایِ قرن نوزدهم می‌رسد و آن نظریهٔ الکترومغناطیسی نور است که سرانجام ماکسول بنای آن را بر مبانی دستاوردهای فارادی به انجام رساند.

فارادی از گفتن اهمیت تحویل‌ناپذیر بودن واقعیتهای آزمایشی ملموس و عینی به خوانندگان، گزارشگران، و مخاطبانش هرگز خسته نمی‌شد. او در اواخر دورهٔ کاری خود به یکی از دوستانش نوشت، «من هرگز نمی‌توانستم بدون دیدن از خود واقعیتی بسازم.» او در نامه‌ای به یکی از همکارانش به‌نام اگوست دِلاریو[1] یادآور شد که، «در اوایل زندگی، من آدم تخیلی بسیار سرزنده‌ای بودم، قصه‌های هزار و یک شب را به‌همان سهولت می‌پذیرفتم که مطالب دایرةالمعارف را، اما واقعیتها برای من اهمیت داشتند و رهایی‌بخش من بودند. من می‌توانستم به واقعیت اطمینان داشته باشم.» واقعیتها هدیه‌های آزمایشها بودند. او می‌گفت: «بدون آزمایش من چیزی نیستم» و آزمایشها پایانی ندارند: «اما باز هم می‌کوشم، زیرا چه کسی می‌داند چه چیز امکان‌پذیر است؟» او در یک سخنرانی برای حضار گفت: «من شاعر نیستم، اما اگر شما برای خودتان، چنین می‌پندارید، آن‌طورکه من پیش می‌روم واقعیتها، شعری را در ذهن شما ایجاد خواهند کرد.» ما، در شعر، وجه دیگری از نبوغ فارادی را می‌یابیم.

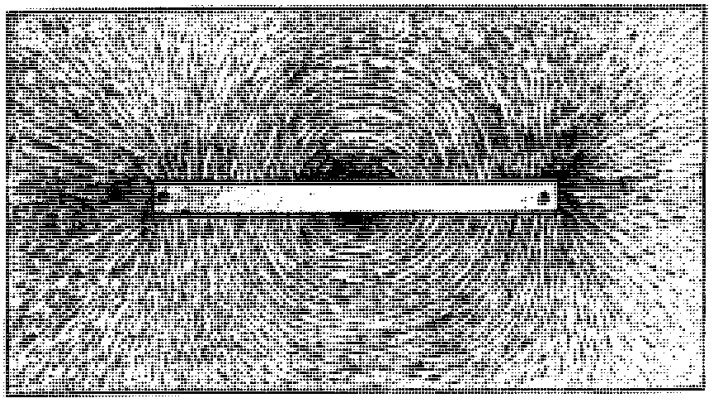
فیلسوف

آیزایا برلین[2] فیلسوف و تاریخ‌نگار مشهور قرن بیستم مقاله‌ای با عنوان «خارپشت و روباه» نوشته است که در آن او متفکران را به‌عنوان روباهها و خارپشتها طبقه‌بندی کرده است: روباهها چیزهای بسیاری می‌دانند، درحالی‌که خارپشتها یک‌چیز بزرگ می‌دانند. فارادی هر دوی آنها بود. او به‌عنوان یک آزمایشگر همهٔ آنچه راکه ذکر شد و مقدار بسیار زیادتری را هم می‌دانست. (بنس جونز بیست و دو عنوانی

1. Auguste de la Rive 2. Isaiah Berlin

را که فارادی تنها در پژوهشهای الکتریکی انجام داده فهرست کرده است.) اما به‌عنوان یک نظریه‌پرداز، او یک چیز بزرگ آموخته و آموزش می‌داد: که نیروهای طبیعی همگی به هم مربوط‌اند. او در سال ۱۸۳۴ طی یک سخنرانی در مؤسسهٔ سلطنتی اظهار داشت: «ما نمی‌توانیم بگوییم که هر یک از نیروها علت دیگری است، اما تنها می‌توان گفت که همهٔ آنها ناشی از یک علت مشترک به هم مربوط‌اند.» او در سال ۱۸۴۵ در مقاله‌ای که اکتشاف خود دربارهٔ اثر مغناطیس بر نور را گزارش می‌کرد، نوشت: «من مدتها عقیده‌ای تقریباً نزدیک به یقین داشتم. . . شکلهای گوناگونی که بنابر آنها نیروهای ماده آشکار می‌شوند یک منشأ مشترک دارند؛ یا به گفتهٔ دیگر چنان مستقیماً مربوط و متقابلاً وابسته‌اند، که اگر چنین باشد، آنها به یکدیگر تبدیل‌پذیرند، و در کار و عملشان توانهای هم‌ارز دارند.» و در سال ۱۸۴۹ او گفت: «تلاشها، در علم فیزیکی سالهای اخیر، نه‌تنها متوجه تحقق نیروهای طبیعی، بلکه متوجه شیوه‌های ارتباط آنها به یکدیگر، کلّیت هر یک در عملشان و وحدت احتمالی در یگانگی‌شان نیز بوده است.»

اینها کلی‌گوییهای مبهمی نبوده‌اند. آزمایشهای فارادی تصویر روشنی از نیروهای طبیعی به او داده است. نیروهای مغناطیسی را واقعاً می‌توان در فضای پیرامون یک آهنربا، با پاشیدن برادهٔ آهن بر قطعه کاغذی که روی آهنربا گذاشته شده باشد، نقشه‌برداری کرد. براده‌های آهن خودشان در امتداد «خطوط نیرو» ردیف می‌شوند (شکل ۱۱ـ۳). فارادی پذیرفته بود که نیروی بین قطبهای مغناطیسی در امتداد این خطوط منتشر می‌شوند. تامسن اصطلاح جدید و ضروری «میدان نیروها» یا فقط «میدان» را برای کل شبکهٔ خطوط نیروی فارادی معرفی کرد.



شکل ۱۱ـ۳ خطوط نیروی مغناطیسی با براده‌های ریز آهن ردیابی می‌شوند. از لوحهٔ IV مایکل فارادی، پژوهشهای آزمایشی در الکتریسیته (لندن: تیلور و فرانسیس، ۱۸۵۵)، مجلّد ۳.

براده‌های آهن نشان می‌داد که خطوط نیرو ممکن است خمیده باشند. در آزمایش اورستد براده‌های آهن با سیم حاملِ جریانی که در مرکز جای داشت، دایره‌هایی ایجاد می‌کردند. خطوط نیرو قوانین القای الکترومغناطیسی را نیز معین می‌کنند. این قاعده برقرار بود که اگر سیمی خطوط نیروی مغناطیسی را قطع کند، یک جریان الکتریکی در سیم القا می‌شود و بزرگی جریان بستگی به آهنگ بُرش خطوط نیرو دارد. القا با این شیوه، مخصوصاً در آزمایش فارادی با پیچک سیمی مارپیچ و فرو بردن آهنربا در آن، آشکار می‌شد: وقتی آهنربا حرکت می‌کرد سیم در پیچک، خطوط نیروی حامل آهنربا را قطع می‌کرد و جریانی در سیم القا می‌شد.

فارادی آنچه را که در واکنش براده‌های آهن به یک میدان مغناطیسی می‌دید، به میدان الکتریکی و گرانشی نیز تعمیم می‌داد. او وسیله‌ای مانند برادهٔ آهن برای آشکارکردن تصاویر خطوط نیروی آنها نداشت، اما مسلم می‌دانست که آنها آنجا وجود دارند، فضا اشغال می‌کنند ـ حتی غیر از فضای خالی ـ بین اجسام برهمکنش‌کننده.

همهٔ اینها، عزیمت حرکتی اساسی از فیزیک نظری بود که فارادی در اوایل قرن نوزدهم بنیاد نهاد، و عمدتاً بر مبنای صورتی از فیزیک نیوتونی بود. در آغاز این قرن نیوتونیسم بی‌رقیب بود. جهان به‌صورت سیستمی از ذرات دیده می‌شد که بر اثر نیروهایی عمل می‌کند، نیروهایی که در پدیده‌هایی از الکتریسیته، مغناطیس و گرانش ظاهر می‌شوند. هر نیرو بدون وساطت عامل مؤثری، بی‌درنگ از جسمی به جسم دیگر منتقل می‌شود و به‌طور ریاضی با سه قانون نیوتون معین می‌شد ـ نظریه‌های نور در مقولهٔ متفاوتی بود، و آنها نیز بر مدلهای ذره‌ای تکیه داشتند.

نخستین ضربه به دیدگاه رایج و غالب نیوتونی به‌وسیلهٔ توماس یانگ[1] و اگوستین فرنل[2] نواخته شد، که در سالهای ۱۸۳۰ نظریهٔ ذره‌ای نور را تخریب و به‌جای آن نظریهٔ موجی را مطرح کردند ـ بحث امواج مشکل دیگری ایجاد کرد. امواج به‌صورت ارتعاشهایی تصور می‌شدند، اما ارتعاشات چه چیز؟ نظریه‌پردازان برای پاسخ به این پرسش نوعی مادهٔ بی‌وزن ناآشنایی با بعضی خواص عجیب به‌نام «اتر» اختراع کردند: اتر می‌توانست از مادهٔ معمولی، بدون اصطکاک، به‌طورکامل بگذرد، اما وقتی پای آن به میان کشیده می‌شد، می‌توانست تکیه‌گاهی برای ارتعاشاتی با بسامدهای فوق‌العاده زیاد، مانند امواج نور باشد.

فرضیهٔ اتر تنها وسیلهٔ نظریه‌ای زمان برای تکیه بر مادهٔ بی‌وزن نبود. سیال بی‌وزنی به‌نام «کالریک» در نظریه‌های گرما رایج بود، الکتریسیته و مغناطیس نیز به‌عنوان سیالهای بی‌وزن تلقی می‌شدند.

فارادی برای هر یک از این تدابیر نظری همنوایی اندکی داشت. او مفهوم اتر و همهٔ سیالهای بی‌وزن را رد می‌کرد و از پذیرفتن اصل «کنش از دور action-at-distance» نیوتونی امتناع می‌کرد. بنابراین، اصل اثر یک نیرو، الکتریکی، مغناطیسی، یا گرانشی می‌تواند از میان فضای خالی از یک جسم به جسم دیگر برسد. در جهان‌بینی فارادی، فضا با میدانهایی شامل خطوط نیرو اشغال شده است. یک میدان الکتریکی با یک بار الکتریکی، یک میدان مغناطیسی با قطبهای یک آهنربا، و یک میدان گرانشی با یک شیء پُرجرم تولید شده است. جسم دیگر می‌تواند به یکی از این میدانها واکنش نشان دهد، اما نه در یک مسافت دور. این واکنش موضعی است، مشروط است به اینکه موضع جسم دوم نسبت به میدان کجاست. جان ویلر، فیزیکدان نظریه‌ای معاصر، تصویری از یک میدان گرانشی به ما می‌دهد که مؤید نظر فارادی است:

1. Thomas Young 2. Augustin Fresnel

مثلاً، می‌توان گفت خورشید یک میدان گرانشی ایجاد می‌کند، که خارج از آن در فضا گسترده می‌شود، و شدت آن به‌صورت عکس مجذور مسافت از خورشید نقصان می‌پذیرد. زمین این میدان گرانشی را به‌طور موضعی «احساس» می‌کند، یعنی بستگی دارد به اینکه زمین کجا باشد، در این صورت زمین با شتاب گرفتن به‌سوی خورشید واکنش نشان می‌دهد. بنابراین توصیف، خورشید پیام جاذبه‌اش را از طریق میدان به زمین می‌رساند، نه آنکه دست درازکند تا از مسافت دوری در فضای خالی بر زمین اثر بگذارد. زمین نباید «بداند» که خورشیدی در مسافت ۹۳ میلیون مایلی خارج از آن وجود دارد. زمین فقط «می‌داند» که یک میدان گرانشی در جایگاهش وجود دارد. این میدان، گرچه تقریباً مانند خود اِتر، اِتری است، اما می‌توان گفت که واقعیت فیزیکی دارد، فضا اشغال می‌کند و شامل انرژی است. وجود آن یک خلأ حقیقی را از بین می‌برد. در این صورت باید قانع شویم خلأای را که در گفتگوی روزمره به‌کار می‌بریم به‌صورت ناحیه‌ای عاری از ماده بدانیم، اما نه عاری از میدان.

نظریه‌های فارادی بدعت‌آمیز و برای معاصرانش ناپسند بود. ویلیام می‌نویسد: «واکنش نسبت به مفهوم خط نیرو صرفاً یک دانش بی‌طرفانه و معمولی نبود، بلکه کاملاً خصمانه بود، بخصوص وقتی فارادی می‌کوشید ادامهٔ آن را به گرانش بکشاند. . . انجمن دانش (*Athenaeum*) پیشنهاد کرد که او به مؤسسهٔ سلطنتی بازگردد و ریاضیات کلاس ششم را توسعه دهد، پیش از آنکه بار دیگر جرئت عمل در دریاهای ژرف فیزیک لاپلاسی داشته باشد.» در سال ۱۸۵۵، وقتی که فارادی شصت‌وچهارساله بود به خواهرزاده‌اش، کنستانس رید گفت: «چگونه است که افراد معدودی خط نیروی فیزیکی را می‌فهمند! آنان این خطوط را نخواهند دید، با وجود این پژوهشگران این موضوع مایلند نظریه‌هایی را که من از بسیاری سالها پیش تاکنون مطرح کرده‌ام تأیید کنند. به‌نظر می‌رسد فقط تامسن گلاسکویی تقریباً تنها کسی است که آنها را می‌فهمد. احتمالاً او به فهم منظور من از همه نزدیکتر است. من قانع‌ام منتظر بمانم تا نسبت به درستی نظرات من، مثل خودم متقاعد شود.»

نظریه‌های فارادی مخالفانی هم داشت، زیرا نظریه‌های انقلابی بودند که همیشه دلیل کافی برای تحریک داشتند. علاوه‌بر این فارادی با زبان ریاضیات پیشرفته‌ای که مورد انتظار نظریه‌پردازان دیگر بود، بحث نمی‌کرد. ریاضیات فارادی فراتر از محاسبات مقدماتی نبود. روشهای ریاضی او در حدود ریاضیات گالیله بود. احتمالاً در زمان فارادی ریاضیات امتیازی برای خلاقیت بوده است. بنا به گفتهٔ نظریه‌پرداز بزرگ میدان در قرن بیستم آلبرت اینشتین، مفهوم میدان محصول «یک ذهن فوق‌العاده مبتکر و بدیع است، ذهنی که هرگز چسبیده به فرمولها نیست.» اما برای مخاطبان فارادی فیزیک نظریه‌ای الزاماً فیزیک ریاضی بوده است.

خوش‌اقبالی فارادی این بود که دو جوان پیرو او ـ ظاهراً هر یک به‌تنهایی ـ به مفاهیم خطوط نیرو و میدان معتقد بودند، و همهٔ تجهیزات ضروری برای ایجاد نظریه‌های میدان به زبان ریاضی لازم را

داشتند. یکی از این فیزیکدانان ریاضی، آن‌طور که فارادی به خواهرزاده‌اش گفته است، ویلیام تامسن بود. فارادی بسیار خرسند بود که ویلیام تامسن در سال ۱۸۴۵، به هنگامی که فقط بیست‌ویک‌ساله بود، نظریهٔ ریاضی خطوط نیروی الکتریکی را فرمولبندی کرد. ریاضی‌فیزیکدان دیگری که چشم به نظریهٔ میدان داشت، جیمز کلارک ماکسول[1] بود. او بعدها، مدت کوتاهی پیش از مرگ فارادی نظریهٔ بزرگ الکترومغناطیسی نور را ایجاد کرد. ماکسول منشأ نظریه‌اش را توضیح می‌دهد و از دین خود نسبت به فارادی و تامسن، در مقدمهٔ کتابش با عنوان رساله‌ای در باب الکتریسیته و مغناطیس سپاسگزاری می‌کند:

> من آگاه بودم که ظاهراً بین فارادی و ریاضیدانان در مورد راه و روش درک و بیان پدیده‌ها تفاوتی وجود دارد، به‌طوری که نه فارادی و نه ریاضیدانان از زبان یکدیگر رضایت خاطر ندارند. من عقیده‌ای راسخ داشتم که این اختلاف از نادرست بودن نظر یکی از دو طرف نیست. در این مورد ابتدا به‌وسیلهٔ سِر ویلیام تامسن و با توصیه و یاری او متقاعد شدم و عمدهٔ آنچه را که دربارهٔ این موضوع آموخته‌ام مدیون مقالات منتشرشدهٔ او می‌دانم.
>
> همچنان‌که در مطالعهٔ آثار فارادی پیش می‌رفتم، متوجه می‌شدم که روش بیان خود او از پدیده‌ها روشی ریاضی نیز هست، گرچه به‌شکل نمادهای مرسوم نیست. همچنین دریافتم که این روشها را به‌صورتهای ریاضیات عادی می‌توان بیان کرد و درنتیجه با بیانات ریاضیدانان حرفه‌ای قابل قیاس است.

ماکسول اضافه می‌کند که او عمداً اثر فارادی با عنوان پژوهشهای آزمایشی در الکتریسیته را پیش از تعبیر «هرگونه ریاضی دربارهٔ موضوع آن» خوانده است.

بحث ما ممکن است این برداشت را ایجاد کند که فارادی دو زندگی جداگانه داشته، ابتدا یک آزمایشگر و سپس یک نظریه‌پرداز بوده است. اما فقط یک زندگی علمی وجود داشت، یک کنش متقابل فوق‌العاده خلاق بین آزمایشها و تحقیقات نظری. هیچ تلاشی بدون دیگری موفقیت‌آمیز نبود. این توانایی کارکردن در قلمروهای نظریه‌ای و آزمایشی به‌طور همزمان و خلاق موهبتی نادر بود. تنها معدودی از فیزیکدانان این کتاب، احتمالاً فقط نیوتون و فرمی، علاوه‌بر فارادی از چنین موهبتی برخوردار بودند. اینشتین، گیبس، ماکسول، بولتزمان و فاینمن نظریه‌پردازان درجهٔ اول بودند، اما آزمایشگران خلاقی نبودند.

در خانه

سارا، همسر فارادی، از جهاتی همچون شوهرش برجسته و قابل ملاحظه بود. او بیش از هر شخص دیگر عامل مؤثر استواری بود که انرژی آتشفشانی فارادی را تحت کنترل نگه می‌داشت. ویلیامز این تصویر از نقش چاره‌ناپذیر او در زندگی فارادی را برای ما می‌نمایاند: «سارا بارنارد[2] زوج کاملی برای

1. James Clerk Maxwell 2. Sarah Barnard

فارادی بود. از نظر او و از انظار دیگران، سارا به‌صورت چهره‌ای جذاب، زیبا و مهربان ظاهر می‌شود. او لبریز از احساسات مادرانه بود. و چون خودش فرزند نداشت آن احساسات را بی‌دریغ نثار خواهرزاده‌ها و خود فارادی می‌کرد. این دقیقاً همان چیزی بود که فارادی نیاز داشت. اغلب اوقات فارادی چنان در آزمایشگاه مجذوب کارش می‌شد که غذا خوردن را فراموش می‌کرد. خانم فارادی آرام و بی‌سروصدا با پذیرایی از او مراقب بود که سلامتی او آسیب نبیند.»

سارا عاقلانه نمی‌کوشید که کار همسرش را دنبال کند. او به خواهرزاده‌اش می‌گفت: «که علم اکنون برای او چنان جالب و هیجان‌انگیز شده است که غالباً او را از خوابیدن محروم می‌کند و من کاملاً راضی‌ام که آرامش ذهنی او را فراهم آورم.» در سال ۱۸۳۸ که فارادی در سن چهل‌وهفت‌سالگی بود از لیورپول به سارا نوشت: «هیچ‌چیز به‌قدر مصاحبت با تو مرا راحت نمی‌کند. حتی هم‌اکنون که مشغول نوشتن هستم آن را احساس می‌کنم، و اگر جلوی خود را نگیرم کلماتی را که می‌نویسم با صدای بلند می‌گویم، گویی تو اینجا در حال شنیدن هستی.» مدتها بعد در سال ۱۸۶۳ که سلامتی او روبه ضعف بود به سارا نوشت: «سرم و قلبم پر و پیمان است، اما حافظه‌ام به‌سرعت تحلیل می‌رود، حتی در مورد دوستانم که در یک اتاق هستیم. تو باید کار قدیمی خود را ادامه دهی، فراهم‌کنندهٔ آرامش ذهنی و راحتی من باشی، ای همسر شادی‌آور.»

فارادی فرزند نداشت، اما بی‌اندازه شیفتهٔ کودکان بود. دو خواهرزاده‌اش کنستانس رید و جین بارنارد غالباً این خلأ را پر می‌کردند. آنان از مجالست فارادی لذت می‌بردند، همان‌قدر که او لذت می‌برد. کنستانس رید در دفتر خاطراتش می‌نویسد: «دیدار از آزمایشگاه به‌هنگام اتمام جنب‌وجوش روزانه برای ما تفریحی لذت‌بخش بود. ما غالباً او را در آزمایشگاه به هنگامی می‌یافتیم که با پیش‌بند سوراخ‌سوراخ، مشغول انجام آزمایشهای تحقیقاتی‌اش بود. اگر خیلی مشغول بود فقط با سر اشاره می‌کرد، و زن‌دایی و من در فاصله‌ای آرام می‌نشستیم، تا آنکه او فوراً یادداشتی روی لوحش می‌نوشت و برای گفتن حرفی به طرف ما برمی‌گشت؛ یا احتمالاً موافقت می‌کرد به طبقهٔ بالا بیاید و عصر را با نوعی بازی بیلیارد بگذراند، با قید و شرط اینکه ابتدا با یک ساعت سکوت کار آزمایشش را به پایان برساند. او به همهٔ بازیهای ابتکاری علاقه‌مند، و همیشه برنده بود.» او با بعضی از دیدارکنندگان جوان با جیغ و داد در سالن سخنرانی مؤسسه قایم‌موشک‌بازی می‌کرد و سپس با دیاپازون و لیوانهای طنین‌انداز آنان را سرگرم می‌کرد. به گفتهٔ یک زندگینامه‌نویسش «او هنوز خودش یک بچه بود.»

خطابه‌ها

جئوفری کانتور[1]، زندگینامه‌نویس اخیر، می‌نویسد: «فارادی به‌خوبی مناسب مؤسسهٔ سلطنتی و مؤسسهٔ سلطنتی به‌خوبی مناسب فارادی بود؛ درواقع احتمالاً در حوزهٔ علمی بریتانیا جای دیگری نبود که فارادی بتواند در آنجا پیشرفت کند و به اوج شهرت برسد. در همان ساختمان او می‌توانست هم امور

1. Geoffrey Cantor

خصوصی و هم امور عمومی‌اش را انجام دهد.» فارادی در مؤسسه سه جا را اشغال کرده بود: طبقهٔ بالا، طبقهٔ پایین و زیرزمین. طبقهٔ بالا آپارتمان فارادی بود که تا بازنشستگی او در سال ۱۸۶۲ در اشغال او بود. طبقهٔ پایین اتاقهای عمومی، کتابخانه و سالن سخنرانی، و در زیرزمین آزمایشگاه بود. ما تاکنون فارادی را در آزمایشگاه، و در خانه‌اش در آپارتمان طبقهٔ بالا دیده‌ایم. اکنون می‌خواهیم او را در طبقهٔ پایین به‌عنوان یک سخنران و معلم ببینیم.

فارادی از سال ۱۸۲۶ تا بازنشستگی یک‌سری سخنرانیهایی برای عامهٔ مخاطبان ایراد می‌کرد که آنها را خطابه‌های عصر جمعه می‌نامید. او این سخنرانیها را خیلی جدی می‌گرفت: آنها را تمرین می‌کرد، دربارهٔ آنها نگران بود و زیاد فکر می‌کرد، و برای اصلاح زمانبندی و تنظیم کار خودش کارتهایی تهیه کرده بود. این سخنرانیها عامه‌پسند بودند، و درآمد حاصل از آنها مشکلات مالی دایمی مؤسسه را کاهش می‌داد. در این سخنرانیها و سخنرانیهای دیگر، فارادی قاعدهٔ خاص خودش را مبنی بر اینکه «سخنرانیهایی که واقعاً آموزشی باشند هرگز عامه‌پسند نخواهند بود؛ و سخنرانیهایی که عامه‌پسند باشند هرگز واقعاً آموزشی نخواهند بود،» شکست.

یک احسان بیشتر برای مؤسسهٔ سخنرانیهای کریسمس بود که فارادی برای کودکان ایراد می‌کرد. این سخنرانیها به‌سرعت مخاطبی از طبقات اجتماعی بالاتر ازجمله آلبرت ادوارد، شاهزاده ویلز را جلب کرد. مشهورترین سری سخنرانی کریسمس به‌نام «تاریخ شیمی یک شمع» بود که منتشر شد و به تعداد بی‌شمار به زبانهای متعدد انتشار یافت. این امر حاکی ازگفتگوی زیبای فارادی با مخاطب جوانش و همچنین با طبیعت است، او سخن را چنین آغاز می‌کند: «چیزی بهتر و دری گشوده‌تر از آن نیست که با بررسی پدیده‌های یک شمع بتوانید وارد مطالعهٔ فلسفهٔ طبیعی شوید.» او با جوانب پرشور و شوق فراوان، نشان می‌دهد که چگونه شمعها ساخته می‌شوند، چگونه آنها می‌سوزند، ساختار گرمایی و شیمیایی شعله را می‌نمایاند، واکنشهای شیمیایی احتراق را مشخص می‌کند و سرانجام مخاطبش را به رموز الکتروشیمی، تنفس و شیمی اتمسفر راهنمایی می‌نماید. او از شمع معمولی، جهانی از علم را برای خودش و به‌همان قدر برای مخاطبان جوانش برپا می‌کند.

ساندمانی[1]

در پاسخ به مکاتبه‌ای که دربارهٔ تأثیر دین او بر فلسفهٔ طبیعی‌اش پرسیده شده بود، فارادی می‌نویسد: «در دین من فلسفه‌ای وجود ندارد، من از یک فرقهٔ بسیارکوچک تحقیرشده از مسیحیان، اگر نگوییم ابداً، معروف به ساندمانیها هستم، و امید ما براساس ایمانی است که در مسیح است.»

منشأ ساندمانیها در اسکاتلند بود، جایی که آنها را گلاستیها[2] می‌نامیدند و بعدها در یورکشایر و بخشهای دیگر انگلستان پراکنده شدند. در زمان فارادی، اعضای آنها حدود صد نفر در لندن و به‌طور کلی در حدود ششصد نفر بودند. کانتور می‌نویسد: «ساندمانیسم مطالبات زیادی از اعضای خود دارد

1. Sandemanian 2. Glasites

و برای افراد بی‌خلوص و بی‌میل یا برای آنان که مایلند فقط روزهای یک‌شنبه اعمال مسیحیت را انجام دهند، نیست. درواقع ساندمانیسم یک طریق زندگی است. فارادی در سن بیست‌ونه‌سالگی در آماده شدن برای اعتراف و اقرار به ایمانش در سال ۱۸۲۱ جداً سوگند یاد کرد که بر طبق ادراکات مطرح‌شده در کتاب مقدس و تقلید از نمونهٔ کامل مسیح زندگی کند. ساندمانیها دقیقاً با قانونهای مطرح‌شده در کتاب مقدس زندگی می‌کنند و ضوابط انضباطی سخت فرقه مراقب آن است که هر مرتدی یا به گروه مؤمنان بازگردد یا اخراج شود ـ استفاده از حسن تعبیرهای مرسوم و متداول را 'کنار بگذارید'.»

اعتقادها و اعمال ساندمانیها از روند کلی دینی بریتانیایی دور است، و طبق انتظار موجب خصومت آنها با پیروان ادیان دیگر می‌شود. چنانکه فارادی به‌طرف مکاتبه‌کننده‌اش گفت: ساندمانیها خودشان را فرقهٔ تحقیرشده می‌بینند و این سرنوشت را می‌پذیرند زیرا خود مسیح منزوی بود و معاصرانش او را تحقیر می‌کردند.

فارادی در سال ۱۸۴۰ به‌عنوان عضو ارشد کلیسا انتخاب شد، رویدادی که اهمیت زیادی در زندگی او داشت. در حدود چهار سال بعد، به دلایلی که هنوز مبهم است، او برای مدتی کوتاه از کلیسا اخراج شد. بنابه گفتهٔ یکی از زندگینامه‌نویسان او به‌نام گلادستون (پدر مارگارت گلادستون، که در فصل ۷ تصویرهای زیبایی از ویلیام تامسن برای ما ارائه کرد)، فارادی دعوت ملکه را برای ملاقات در روز یک‌شنبه‌ای در اوایل سال ۱۸۴۴، پذیرفته بود و بنابراین، او در آن روز در عبادتگاه کلیسا حاضر نبود. وقتی از او پرسیده شد که علت غیبت خود را توجیه کند، مصراً گفت که او فرمان ملکه را مقدم می‌داند. این پاسخ ندامت مورد انتظار نبود.

کانتور در مورد این توجیه تردید می‌کند و خاطرنشان می‌سازد که در همان زمان فارادی و بسیاری دیگر، حدود ۲۰ درصد اعضا، از جمله برادر، زن برادر و پدرزن او اخراج می‌شوند. علاوه‌بر این کانتور گزارش می‌دهد که او نتوانسته است شواهدی بیابد که فارادی در روز مورد نظر واقعاً با ملکه ملاقات کرده باشد. در هر حال، فارادی از این اخراج رنج می‌برد و به شوین‌بین نوشت که این امر «روح و جسم او را آزرده کرده است.» او پس از مدت کوتاهی برگردانده شد، اما به‌مدت شانزده سال به‌عنوان ارشد انتخاب نشد.

ایمان فارادی مطمئناً ریشه‌های عمیقی داشت، و با وجود اعتراضش مبنی بر اینکه در فلسفهٔ او دین وجود ندارد، دین می‌بایست متافیزیک او و متافیزیک، فیزیکش را هدایت کرده باشد. او معتقد بود که جهان یک ساختمان عظیم خلق‌شدهٔ خدایی است. اگر جهان الگوهایی از وحدت و تقارن و تناسب را آشکار نمی‌کرد کمتر از آنچه هست می‌بود. او این الگوها را در نیروهای طبیعی جستجو می‌کرد و گاهی برای یک کاوش تنها سالها طول می‌کشید. وقتی او موفق شد، چنانکه بارها توفیق یافته بود، ایمان دینی او تحکیم و تعمیق می‌شد.

زندگی بعدی

فارادی در طول زندگی‌اش از یک جدایی عبور کرد و آن از سال ۱۸۴۱ تا ۱۸۴۵ به هنگامی بود که از آشفتگی روانی بهبود یافت. این جدایی یک دوران استراحت بود ـ درواقع «استراحت مغزی»، زیرا

در غیر این صورت مثل همیشه فعال بود. در سال ۱۸۴۱، او و سارا به سویس سفر کردند، جایی که فارادی در جاده‌ها و کوره‌راههای کوهستانی، گاهی با سرعتهای خارق‌العاده پیاده‌روی می‌کرد. در یک مورد او مسافت چهل‌وپنج مایل روی زمین ناهموار را در ده‌ونیم ساعت پیمود. او در پایان این گشت در دفتر خاطراتش یادداشت کرده است که، «من اندکی دشواری احساس کردم و فقط متوجه یک تاول کوچک شدم»، اما او اضافه می‌کند: «من شادمان خواهم بود که نیمی از این قدرت را به ازدیاد حافظه بدهم، اما با آن چه می‌توان کرد؟ سپاسگزار باش.»

او دور از آزمایشگاه بود، اما مراوده با طبیعت را ادامه می‌داد. در این مورد او در دفتر خاطراتش یکی از این رویدادهای طبیعی مطلوب، یک طوفان همراه با رعدوبرق را شرح می‌دهد: «صبحگاه آفتابی و زیبا، و بعدازظهر طوفانی و به‌همان قدر زیبا بود، به‌طوری زیبا که نظیرش را هرگز ندیده بودم. طوفانی ظاهر شد، یک بخش کوهها تاریکی عمیق، طرف دیگر آفتابی و روشن، انوار زمردین جنگلهای دوردست و فضای باز زیر لبهٔ ابرها، همگی عالی و باشکوه بودند. ناگهان برقی درخشید، و غرش رعد درکوههای آلپ به زیبایی پیچید و در پایان برقی به کلیسایی زد که کمی دورتر از ما بود. کلیسا آتش گرفت، اما خسارت چندانی ایجاد نکرد و زود خاموش شد.» شرح شگفتی او از صدا و شدت یک بهمن درکوه یون فرو[1] نیز جالب است:

> گاه و بیگاه رعد بهمن ایجاد می‌کند. صدای این بهمنها بسیار لطیف و پرابهت است. . . منظرهٔ بهمن از دور ترسناک نیست بلکه زیبا به‌نظر می‌رسد. به‌ندرت در آغاز دیده می‌شود، اما گوش ما ابتدا وقوع حادثه‌ای عجیب و ناآشنا را به ما می‌گوید، و سپس چشم سقوط ابری از برف را می‌بیند یا چیز دیگری را می‌بیند که لحظه‌ای پیش آبشاری از آب بوده و به یک یورش مواج سنگین پرهیاهو از برف، یخ و سیال تبدیل شده است که وقتی در هوا فرو می‌آید شبیه آب غلیظ‌شده‌ای می‌ماند، اما وقتی روی سطوح شیبداری از توده‌های زیرین جاری می‌شود، مانند خمیر حرکت می‌کند، و وقتی از عقب انباشته یا پراکنده می‌شود، متوقف یا پیشرفت می‌کند.

و در اینجا از یک نمایش کوهستانی دیگر، از جلوه‌های آسمان، که از دلخوشیهای اوست، لذت می‌برد: «رشته‌هایی از ابر با جلوه‌های بسیار زیبا پیش می‌آمدند، آسمان آبی در جاهایی ظاهر می‌شد که به‌طور بسیار عجیبی با قلل برفی و ابرها در هم آمیخته بودند. به نظر من هیچ منظره‌ای از لحاظ شکوه و عظمت با جلوه‌های آسمانی زیبای چنین شامگاهی برابری نمی‌کند. ما حتی برای مدتی کوتاه ته‌رنگ سرخی در بالاترین حد کمال بر قلل برفی داشتیم.»

او در سال ۱۸۴۵، که نسبتاً بهبود یافته بود، به آزمایشگاه بازگشت و بررسی مغناطیس بر نور را

1. Jungfrau کوهی در سلسله‌جبال آلپ. م.

دنبال کرد. در حدود همان زمان او یک‌سری پژوهشهایی را آغاز کرد که به ناکامی انجامید، اما این ناکامی همان‌قدر جالب بود که موفقیتهای کسان دیگر. با الهام از ارتباطی که او در میان نیروهای طبیعی دیگر یافته بود، امید داشت که گرانی را نیز در این ارتباطهای متقابل بگنجاند. او در یادداشتهای آزمایشگاهی‌اش می‌نویسد: «گرانی. مطمئناً این نیرو می‌باید مستعد یک رابطهٔ آزمایشگاهی با الکتریسیته و نیروهای دیگر باشد و با کنش متقابل و اثر هم‌ارزی به آنها بپیوندد.» او آزمایشهایی متوالی را طرح کرد و شبهه‌هایی آغاز شد، اما همهٔ آنها زایل شدند: [او در یادداشتهای آزمایشی‌اش می‌نویسد] «**همگی یک رؤیاست.** هنوز با چند آزمایش آن را امتحان می‌کنم. هیچ‌چیز خیلی عجیب نیست که درست باشد، هرگاه با قوانین طبیعت سازگار باشد؛ و در مورد چنین چیزهایی آزمایش بهترین امتحان سازگاری است.»

اما نیروی گرانش از «پیوستن» به نیروهای دیگر امتناع کرد. او در پایان مقالهٔ گزارش کارش می‌نویسد: «نتایج منفی بود. اما این نتایج احساس قوی مرا در مورد وجود رابطه‌ای بین گرانی و الکتریسیته متزلزل نمی‌کند.» ده سال بعد او بار دیگر دست به کار شد، و آخرین مقاله‌اش را تقریباً با همان کلمات پایان داد.

فارادی در صف طویل فیزیکدانان برجسته‌ای که برای یافتن نظریهٔ وحدت گرانی با نیروهای دیگر پژوهشهایی به‌عمل آورده‌اند، نفر اوّل است. اینشتین سالها کوشید و عاقبت برای ایجاد یک نظریهٔ میدان متحد که شامل گرانی و الکترومغناطیس باشد، ناموفق ماند. در این اواخر هدف، یافتن یک نظریهٔ کوانتومی از گرانی شده بود. این تلاش نیز تاکنون ناموفق بوده است. اما بنا به تأیید نظر فارادی نظریه‌پردازان هنوز هم رؤیاپردازی می‌کنند.

فارادی در مراحل بعدی زندگی با مرد جوانی که دهها سال پیش به استخدام دیوی درآمده بود، تفاوت چندانی نداشت. او اکنون پروفسور فارادی D.C.L[1] (اکسفورد)، عضو انجمن سلطنتی، با مدالها و دهها جوایز افتخار از آکادمیها و انجمنهای علمی بود؛ اما او هنوز بی‌تکلّف، بی‌ریا، و قانع به شیوهٔ زندگی ساده و معمولی بود. فارادی بجز کمک دستیارش، چارلز آندرسن ـ که به گفتهٔ بنس جانز، سهم او «اطاعت کورکورانه» بود ـ به‌تنهایی کار می‌کرد. او در اواخر عمرش می‌گفت: «من فکر نمی‌کنم می‌توانستم با مشارکت جمعی کار کنم یا با صدای بلند فکر کنم، یا افکارم را توضیح دهم. من هرگز نمی‌توانستم مانند بعضی از استادان به‌طور گسترده و طولانی با دانشجویان یا شاگردان کار کنم. همهٔ کارها می‌باید از آن خودم باشد.»

با فزونی یافتن سن، تمایل طبیعی اجتماعی بودن او کاهش می‌یافت، و به‌طور فزاینده‌ای منزوی و غیراجتماعی می‌شد. ویلیامز می‌نویسد: «دعوتها را بیشتر و بیشتر به‌طور گزینشی می‌پذیرفت. در اواسط سالهای ۱۸۳۰ دعوتها را تقریباً به‌طور کلی نمی‌پذیرفت. او در ضیافت شام سالانهٔ انجمن سلطنتی و چند رویداد محدود دیگر شرکت می‌کرد. آپارتمان او در مؤسسهٔ سلطنتی و آزمایشگاه در

1. D.C.L=Doctor of Civil Law

زیرزمین، هر چیزی را که برای خشنودی‌اش لازم بود فراهم می‌کرد.» او خود را «زاهدی گوشه‌نشین» می‌نامید. با وجود این، سخنرانی‌های او در مؤسسهٔ سلطنتی شهرت داشت و او چهرهٔ سرشناسی بود. رانندگی از دینش، عادات وسواس‌گونه در کار، و عود کردن بیماری، او را از جذابیت فعالیتهای اجتماعی باز می‌داشت. برخورد مردم با او در سالن سخنرانی، در نامه‌نگاری بود یا ابداً با او برخوردی نداشتند.

فارادی هرگز به‌طور کامل از فروپاشی سالهای ۱۸۴۰ بهبود نیافت، گرچه او در سال ۱۸۴۵ به کارهای پژوهشی بازگشت، اما هنوز به‌طور دوره‌ای دچار کاهش حافظه، سردرد، سرگیجه و افسردگی بود. او دربارهٔ مبارزه‌ای که علیه افزایش ضعف روانی داشت در نامه‌هایی که برای همکار و دوست نزدیکش کریستیان شوین‌بین نوشته، شرح داده است. در این نامه‌ها، نه در هیچ جای دیگر، فارادی غم و رنج خود را آشکار کرده است. در اینجا گزیده‌هایی که بین سالهای ۱۸۴۵ تا ۱۸۶۲ نوشته شده است به‌ترتیب تاریخی ملاحظه می‌کنید:

> چنان دچار سرگیجه‌ام که دکترها مطلقاً مرا از امتیاز و لذت کارکردن و فکرکردن ممنوع کرده‌اند، بنابراین، مجبورم به خارج شهر بروم، گوشه‌گیر باشم و مطلقاً استراحت کنم.
>
> دوست عزیز من، آیا به خاطر دارید که من فراموش می‌کنم، و بیش از این چاره‌ای ندارم که همچون آب‌کشی باشم که نمی‌تواند از در رفتن آب جلوگیری کند.
>
> به‌مدت یکی دو هفته کوشیده بودم اندکی فلسفی (هیپنوتیسمی) فکرکنم و این کار سردردم را آرامتر کرد، اما هم شب و هم روز خواب‌آلود شدم و عجالتاً به‌جای دلخوشی، حالت تهوع دارم.
>
> حتی اگر کمی از سلامتی عادی دور شوم، خشنودم که برای مصاحبت خواهرزاده و همسر عزیزم به خانه برگردم. . . روزگار من این است که ساکت و تماشاگر باشم، که می‌توانم با خرسندی و رضایت خاطر بسازم.

در آخرین نامه‌اش به شوین‌بین، در سال ۱۸۶۲، او خداحافظی می‌کند: «بارها و بارها من نامه‌هایم را پاره می‌کنم، زیرا آنچه می‌نویسم بی‌معنی است. من نمی‌توانم یک خط نامه را به‌طور پیوسته هجی کنم یا بنویسم. آیا از این آشفتگی بهبود خواهم یافت، نمی‌دانم. من بیشتر از این نخواهم نوشت. دوست‌دار تو.»

۱۲

دانشمندی همچون جادوگر

جیمز کِلِرک ماکسول

قلب، سر و انگشتان

«برای آموختن قضایا و موضوعات علمی سه راه وجود دارد ـ قلب، سر و انگشتان؛ از این سه، انگشتان وسیله‌ای برای معاینه و امتحان است، اما مستلزم فکر ثابت و پایدار است. با وجود این انگشتان، روشها را بسیار بهتر از قلب محافظت می‌کنند. روش سر، در حدود یک دانه خردل فکر لازم دارد که البته بسیار گران است، اما همهٔ نگرانیها و اضطرابها را دور می‌کند. روش قلب مملوّ از اضطراب است، اما با فکر تقسیم می‌شود، و روش انگشتی مستلزم زحمت زیاد و تمرین پایدار است، اما با فکر و اضطراب تواماً تقسیم می‌شود.» این پندی است مختصر، مرموز و عمیق که جیمز کلرک ماکسول به عموزادهٔ جوانش، چارلز کی[1]، هدیه می‌دهد. ما می‌توانیم برای مشخص کردن، انگشتان را به‌عنوان حافظه و فن، سر را به‌عنوان عقل و قلب را به‌عنوان شهود ترجمه کنیم.

ماکسول خودش در هر سه روش مهارت داشت. او شایستگی انگشتانش را به‌صورت یک دانشجوی برجسته در دانشگاه کمبریج نشان داد؛ و نظریه‌هایش را با استدلالهای پیچیده‌ای از مدلهای فیزیکی و ریاضی ایجاد کرد. اما منشأ اصلی نبوغ او استادی‌اش در روش قلبی بود. درخشش مشهود و بینش علمی‌اش، او را در ردیف نیوتون و اینشتین قرار داد.

در ساختار نظریهٔ الکترومغناطیس‌اش، که مسئلهٔ مورد توجه این فصل است، ابزار عقلانی ماکسول قیاس [شباهت‌یابی] بود. او در مقدمهٔ نخستین مقاله‌اش دربارهٔ الکترومغناطیس می‌نویسد: «برای به‌دست آوردن ایده‌های فیزیکی، بدون پذیرفتن یک نظریهٔ فیزیکی، ما باید خودمان را با وجود قیاسهای فیزیکی آشنا کنیم. منظور من از قیاس فیزیکی شباهت جزیی بین قوانین یک علم و قوانین علم دیگری است که هر یک از آنها دیگری را روشن می‌کند.» ماکسول در مسیر نظریهٔ الکترومغناطیس‌اش

1. Charles Cay

دو قیاس مکانیکی متوالی ابداع کرد. هیچ‌کدام یک نظریه نبودند: او دربارهٔ اولی می‌نویسد: «من فکر نمی‌کنم که آن حتی شامل سایه‌ای از یک نظریهٔ حقیقی باشد.» اما در هر یک او به‌طور شهودی عناصری از حقیقت تشخیص داد، که در ساخت نظریهٔ تکامل‌یافته‌اش به‌کار گرفت. در پایان، او مدلهای مکانیکی را کنار گذاشت، مانند کنار گذاشتن یک چوب‌بست و آنچه به‌جا ماند گزاره‌های ریاضی بودند که اکنون به «معادلات ماکسول» معروف‌اند.

برای همکاران ماکسول، این اتکا به یک‌سری استدلالهای مقدماتی و رها کردن حدّ نهایی آنها به انتزاعهای معادلات دیفرانسیلی، شبیه به حیلهٔ شعبده‌بازیِ یک جادوگر به‌نظر می‌رسید. یکی از همکاران او اظهار می‌کند که جهان نظریهٔ الکترومغناطیسی ماکسول شبیه سرزمین سحرآمیز پریان به‌نظر می‌رسد؛ او هرگز نمی‌داند آنچه بعد می‌آید چیست. و این کمکی نمی‌کرد که نظریهٔ ماکسول در زمان حیاتش از حمایت آزمایشی اندکی برخوردار شده باشد. برای ماکسولی شدن، می‌باید با بینشهای ماکسول اشتراک داشته باشیم، که مسلماً عجیب و غیرعادی به‌نظر می‌رسد، با معدودی آزمایشهای تأییدکننده.

اِوریت[1]، یکی از زندگینامه‌نویسان ماکسول، با مقایسهٔ او با دو مشاورش، مایکل فارادی و ویلیام تامسن به جنبهٔ مهم دیگری از نبوغ ماکسول اشاره می‌کند. اوریت، فارادی را به‌عنوان یک «متفکر واقعیت‌اندوز»، تامسن را به‌عنوان یک «متفکر الهامی» و ماکسول را به‌عنوان یک «متفکر معمار» توصیف می‌کند. فارادی واقعیتهای الکتریسیته و مغناطیس را با طراحی و اجرای آزمایشها جمع‌آوری می‌کرد. عادت او «کارکردن، به‌پایان رساندن و منتشرکردن» و پیش رفتن بود. تامسن با ذوق هنری برای همهٔ مسائل پاسخهای الهام‌گونه داشت، اما به‌ندرت آنها را به‌سوی یک نظریهٔ پایان‌یافته پیش می‌برد. ماکسول حوصله و سماجتی داشت که تامسن فاقد آن بود. اوریت می‌نویسد: «مقالات بزرگ ماکسول به‌طورکلی با مقالات تامسن فرق دارد. هفتاد یا هشتاد صفحهٔ طولانی (که در آن به‌اختصار نوشته شده) هر یک آشکارا نتیجهٔ تفکر طولانی، و در هر یک به طریق خاص خودش دید کاملی از موضوعی ارائه می‌شود.» ماکسول مانند نیوتون، متفکر معمار بزرگ دیگر، ایده‌های بزرگش را به‌تدریج توسعه می‌داد؛ او نظریهٔ الکترومغناطیسش را در سال ۱۸۵۵ آغاز کرد و تقریباً در بیست سال بعد، در سال ۱۸۷۳، با توقفهای طولانی بین مقالات، به اتمام رساند. او احساس می‌کرد که بخش تکاملی کُند نظریه‌هایش نیمه‌هشیارانه بوده است. او در نامه‌ای به دوستش نوشت: «من معتقدم بخشی از ذهن وجود دارد که مستقل از شعور یا آگاهی هدایت می‌شود، جایی که مطالب تخمیر و پخته می‌شوند، به‌طوری که وقتی آنها نقش خود را اجرا می‌کنند آشکار می‌شوند.»

آنچه این معمار بر پا کرد یکی از بزرگترین بناهای عقلانی قرن نوزدهم بود. این بنا همهٔ پدیده‌های الکتریکی و مغناطیسی را متحد کرد، ماهیت موج الکترومغناطیسی نور را آشکار کرد و دری به‌سوی شیوه و ذات فیزیک قرن بیستم گشود. ماکسول این عمل را با سر و قلب، فکر و دلواپسی، و با جزیی از ذهن که می‌توان آن را جادویی نامید، انجام داد.

1. C.W.F. Everitt

آدم عوضی

جیمز کلرک ماکسول در سال ۱۸۳۱ در ادینبورو[1]، مرکز اسکاتلند، زاده شد. پدرش جان کلرک با افزودن نام ماکسول، بعضی شرایط قانونی برای امکان به ارث بردن ملک روستایی کوچکی در میدلبی[2] واقع در گالووی[3] (جنوب غربی اسکاتلند) را برآورده کرد. جان کلرک ماکسول مردی حساس، محتاط و سنتی بود. او با فرانسس کی[4] ازدواج کرد. فرانسس مانند شوهرش اهل عمل، اما قاطع‌تر و رک‌گو بود. شخصیت آنان مکمل یکدیگر بود و تنها پسرشان شانس خوبی داشت تا وارث بعضی از ویژگیهای ظریفتر والدینش باشد.

وقتی کلرک ماکسولها مالکیت ملک میدلبی را به‌دست آوردند، این ملک عمدتاً بایر بود، حتی دارای یک خانه هم نبود. جان کلرک ماکسول با مهارت و اشتیاق، جزء جزء ساختن یک خانه را نظارت کرد، و آن را «گلن‌لایر[5]» نامید. پسر همچون پدرش به‌شدت علاقه‌مند گلن‌لایر بود، به‌طوری که در کودکی، نوجوانی و بلوغ گلن‌لایر پناهگاه او شده بود.

وقتی او هشت‌ساله بود، زندگی خانوادگی بسیار مطبوع و آرام جیمز در گلن‌لایر با مرگ دردناک مادرش به‌طور مصیبت‌باری از هم پاشید، مادرش بر اثر سرطان شکمی در سن چهل و هشت‌سالگی درگذشت. ظاهراً همان نوع سرطان خود ماکسول را تقریباً در همان سن کشت. واکنش پسر نسبت به این مصیبت به‌طور چشمگیری دوری جستن از لطمهٔ شخصی بود: «آه، چقدر خوشحالم! اکنون مادرم دیگر رنج نمی‌کشد.» جان کلرک ماکسول پدر مهربان و فداکاری بود، و پس از مرگ همسرش این احساس او بیشتر شده بود، اما او بعضی از اضطراریترین نیازهای پسرش را نادیده می‌گرفت. او آموزش رسمی جیمز را به یک معلم خصوصی سپرد که روش آموزش او، دست‌کم بی‌روح و کسل‌کننده بود. وقتی شاگرد او لجوجانه به تمرین کردن دستور زبان لاتین اعتراض می‌کرد، معلم او راکتک می‌زد. به‌گمان لویس کمبل، زندگینامه‌نویس اصلی ماکسول، این رفتار خشن آثار روانشناسی طولانی‌مدتی داشت. او می‌نویسد: «گرچه با خطکش بر سرش زده می‌شد و گوشهایش چنان کشیده می‌شد که خون می‌افتاد، بدون هیچ‌گونه تندی اما با نوعی شیوهٔ تردیدآمیز و پاسخ غیرمستقیم بود که ماکسول در طولانی‌مدت بر این مشکل فائق آمد، اگر واقعاً، او هرگز کاملاً فائق آمده باشد.» پسر صبور و شکیبا و پدر بی‌اعتنا و بدون توجه بود، و معلم به‌شیوهٔ خود باقی ماند، تا آنکه چهرهٔ مهم دیگری در اوایل زندگی ماکسول پدیدار شد و آن خاله‌اش جین کی بود. او با سنجیدن قابلیت کار معلم، پدرش را ترغیب کرد تا پسر را به ادینبورو بفرستد، جایی که او می‌توانست به خانوادهٔ ایزابلا وِدِربورن[6]، عمه‌اش ملحق شود و به مدرسهٔ ادینبورو برود.

تجارب اولیهٔ جیمز در مدرسه بهتر از تجاربی نبود که از درد و رنج معلم خصوصی داشت. روز اول با لباسهای مناسبی که در گلن‌لایر می‌پوشید ظاهر شد، لباسهایی که پدرش با اندکی ملاحظه ظاهر یا مد طراحی کرده بود. لباسهای روستایی همراه با لهجهٔ گلن‌لایری او، هدف ساده‌ای برای آزار و اذیت

1. Edinburgh 2. Middlebie 3. Galloway 4. Frances Cay 5. Glenlair
6. Isabella Wedderburn

دارودسته‌ای از همشاگردیهایش شده بود. اما او در جنگ و جدال معامله به مثل می‌کرد، و آن روز با لباسهای پاره‌پوره‌ای که پیش از آن تروتمیز و آراسته بود به خانهٔ وِدِربورنها بازگشت. به‌گفتهٔ کمبل به‌نظر می‌رسید «او بی‌اندازه سرگرم تجاربش بود، و کوچکترین علایم ناراحتی از خود نشان نمی‌داد، اما این سؤال باقی ماند که آیا در درون او هم چیزی نمی‌گذشت، و این را هرگز نه اطرافیانش در خانه دانستند و نه همشاگردیهایش در مدرسه». مهاجمان او را «دافتی Dafty» می‌نامیدند که به‌معنی عجیب نسبتاً احمق یا به‌گفتهٔ اِوریت نزدیکترین معنی امروزی آن پَپه یا آدم عوضی است.

مدرسه برای آرام کردن روح این پسر یا تضعیف رفتار غیرعادی او اثر اندکی داشت. او روابط دوستیهای بادوامی ایجاد کرد، در میان آنها لویس کمبل، که زندگینامه‌نویس او شد، و پیتر گوتری تیت[1] بود که بعداً استاد فلسفهٔ طبیعی در دانشگاه ادینبورو و اهل بحث و مجادلهٔ ممتازی شد. نامه‌های نشاط‌آور «بابا دوستی‌اش» که خبرهایی از ادینبورو به گلن‌لایر ارسال می‌کرد، سبک مغلقی داشت، با سر به سر گذاشتن، معکوس نوشتن کلمات، غلطهای املایی، معما و ایهام همراه بود.

ماکسول یک نادرهٔ زمان نبود، برخلاف تامسن، او نشانه‌های اولیهٔ نبوغ ریاضی را از خود نشان نداد. بی‌تردید پدر دلسوز او، یک آماتور مشتاق در همهٔ مطالب علم و تکنولوژی، شایستگی و اعتبار بزرگی برای پرورش استعدادهای پسرش داشت. پدر و پسر غالباً در جلسات انجمن هنرهای ادینبورو و انجمن سلطنتی ادینبورو حضور می‌یافتند. در سن چهارده‌سالگی، او تصوری هندسی ابراز داشت که در تمام دورهٔ زندگی کاری‌اش برای او سودمند بود. ماکسول مقاله‌ای دربارهٔ روش تازه‌ای برای ترسیم بیضی‌ها نوشت. جان کلرک ماکسول همراهی کرد تا جیمز فوربز[2]، استاد فلسفهٔ طبیعی در ادینبورو آن را بخواند. فوربز آن را «برای سن نویسنده بسیار چشمگیر» یافت و مقاله را به انجمن سلطنتی ادینبورو منتقل کرد.

با مقالهٔ بیضیها دورهٔ کامل علمی ماکسول به‌راه افتاد. پس از مدرسهٔ ادینبورو، مطالعات خود را با فوربز و ویلیام هامیلتون (با ویلیام روان هامیلتون، ریاضیدان و فیزیکدان بزرگ ایرلند اشتباه نشود) در دانشگاه ادینبورو آغاز کرد. فوربز و هامیلتون در همهٔ موضوعات دانشگاهی قطبهای مخالف هم و دشمنان قسم‌خورده بودند. فوربز یک آزمایشگر ماهر بود و دسترسی آزاد و مجانی به آزمایشگاهش را در اختیار ماکسول قرار داد. هامیلتون فیلسوفی بود که قویاً می‌پنداشت دانش مطلق نیست، بلکه نسبی است و با محدودیتهای حواس انسان شکل می‌گیرد: برای رسیدن به حقیقت، وسایل منطقی ناکامل از قبیل مدلها و قیاسها ضروری است. هر دو رقیب در یک امر موافقت داشتند که کلرک ماکسول جوان شایستهٔ توجه خاص است. فوربز در آزمایشگاه و هامیلتون در متافیزیک درسهایی به او می‌دادند که تأثیرشان تداوم داشت.

اما برای شاگردی با استعداد ریاضی ماکسول، ادینبورو کافی نبود. مرحلهٔ دیگر کمبریج بود، مرکزی معروف برای تربیت «سر و انگشتان» در روشهای ریاضی و فیزیک. هستهٔ مرکزی در کمبریج برنامهٔ تفصیلی امتحانات 'تریپوز*' برای دریافت درجهٔ لیسانس و به‌ویژه درجهٔ ممتاز در ریاضیات بود که

1. Peter Guthrie Tait 2. James Forbes

*. تریپوز tripos مشتق از tripod به‌معنی سه‌پایه است. در گذشته، موقع امتحان، شاگرد روی سه‌پایه می‌نشست و به پرسشها پاسخ می‌گفت. م.

شاگردان را برای یک‌سری امتحانات بسیار سخت آماده می‌کرد. تعلیم داوطلبان امتحان به‌عهدهٔ معلمان خصوصی بود. مشهورترین این معلمان ویلیام هاپکینز بود. او داوطلبان موفق بسیاری را که به دلایلی رانگلر[1] (مشاجره‌کننده) می‌نامیدند، تدریس کرده و پرورش داده بود. ماکسول به تیم هاپکینز پیوست و به‌عنوان رانگلر پیروز شد. اما به‌طوری که تیت، رانگلر دیگر در خاطرهٔ زیر به ما می‌گوید، زحمتی که ماکسول برای این کار کشیده بود، کمتر از مقدار عادی آن بود:

> او در پائیز سال ۱۸۵۰ با کوله‌باری از دانش که واقعاً برای چنین جوانی بسیار زیاد بود به کمبریج آمد، اما با حالتی فوق‌العاده بی‌نظم با روش منظم معلمش. هرچند معلم او ویلیام هاپکینز بود، اما این شاگرد به راه خود می‌رفت و با اطمینان می‌توان گفت که تا سالهای اخیر هیچ رانگلر برجسته‌ای هرگز به مجلس شورای عالی دانشگاه [جایی که امتحانات ویژه برگزار می‌شد] وارد نشده بود که با آموزش ناقصتر «کار سودمندتری» از کلرک ماکسول انجام داده باشد. اما با قدرت محض عقل، هرچند با حداقل شناخت چگونگی استفاده از آن برای کسب امتیاز تحت شرایط امتحان، او مقام رانگلر دوم را به‌دست آورد و در امتحان بسیار دشوارتر جایزه‌های اسمیت[2] (رقابت دیگر) همتراز رانگلر ارشد بود.

«رانگلر دوم» مقام دوم در رقابت بود، اما از لحاظ کسی که برای «پردازش» کار آمادگی نداشته عملکرد بسیار مؤثری بوده است. هاپکینز می‌گوید ماکسول «بی‌چون‌وچرا فوق‌العاده‌ترین مردی بود که من در طول تجربه‌ام به او برخورد کرده‌ام. غیرممکن به‌نظر می‌رسد که ماکسول دربارهٔ موضوعات فیزیک نادرست اندیشیده باشد.»

او باز هم در رفتارهای غیرمتعارفش اصرار می‌ورزید، اما رفتارهای عجیب و غریب سرگرم‌کننده و خوشایند در کمبریج یک امتیاز بود. کمبل می‌نویسد: «او آزمایشهای عجیبی در ترتیب ساعات کار و خوابش می‌کرد. از ساعت ۲ تا ۲:۳۰ صبح با دویدن در امتداد راهرو، پایین آمدن از پله‌ها، دویدن در راهرو پایین و سپس بالا رفتن بر همین منوال ادامه می‌داد، تا ساکنان اتاقهای مسیر او از خواب بیدار می‌شدند و با پنهان شدن در پشت درها به هنگام عبور او پوتین و بُرس مو و چیزهای دیگری از این قبیل به‌سوی او پرتاب می‌کردند.» تیت یکی از اعمال غیرعادی دیگر ماکسولی را چنین بیان می‌کند: «او عادت داشت که از تنهٔ درختی در کنار استخر بالا برود و از آنجا خود را از جلو در آب پرتاب کند، در آب غوطه‌ور شود، عبور کند، سپس از تنهٔ درختی در طرف دیگر بالا رود و خود را از پشت در آب بیندازد. او می‌گفت این کار گردش خون را تحریک می‌کند!»

حاصل انجام امتحان ویژه برای او یک بورس تحصیلی و سپس دستیاری آموزشی در کالج ترینیتی بود. در طی این زمان آرام و آسوده او تحقیق دربارهٔ الکترومغناطیس را آغاز کرد و ضمناً عاشق دخترعموی نوجوانش، الیزابت کی شد که به‌گفتهٔ اوریت «دختری بسیار زیبا و باهوش بود.» اما این

1. Wrangler 2. Smith's Prizes

ماجرای عشقی به‌علت نگرانی خانواده از «مخاطرات همخونی در خانواده که قبلاً خویشاوندی فطری داشتند» فرجامی نداشت.

دو سال به‌عنوان عضو هیئت علمی کمبریج به‌علت زندگی اندکی گوشه‌گیرانه، ناآرام و بی‌قرار بود. او به پدرش نوشت: «من به‌زودی کار منظم بهتری به‌دست می‌آورم.» فوربز خبر داد که یک کرسی استادی فلسفهٔ طبیعی درکالج ماریشال[1] در ابردین[2]، اسکاتلند در دسترس است. ماکسول درحالی‌که از روند معرفی‌نامه‌ها و رضایت‌نامه‌های لازم گله‌مند بود، تقاضای به‌دست آوردن این مقام را کرد. یک دلیل برای توجه او به ابردین، نزدیکتر شدن به پدرش بود که سلامت او تحلیل می‌رفت. در بهار سال ۱۸۵۶ جان کلرک ماکسول دیده از جهان فرو بست، و چند هفته بعد فوربز به او اطلاع داد که او به پُست موردنظر در ابردین منصوب شده است.

ابردین، لندن، گلن لایر

ماکسول مانند بسیاری از دانشمندان خلاق، معلم موفقی نبود. به هنگام تدریس، افکارش به‌قدری پیچیده و سریع بود که او نمی‌توانست بیانش را آهسته کند تا به آهنگ ذهنی شاگردانش برسد. او گاهی در برابر مخاطب دانشجویش دچار نوعی ترس و دلهره می‌شد، به‌طوری که کمبل نقل می‌کند:

> نوعی مانع، در تخیل بسیار غنی او و سرعت فهم و درایتش قرار می‌گرفت. ایده‌هایی که در ذهن او انباشته شده بود بی‌وقفه یکدیگر را قطع می‌کردند و تداخلهایشان مانند تداخلهای نور «نوارهای تاریک» ایجاد می‌کرد... تصاویری ناشناخته از ناشناخته‌تر [*ignotum per ignotius*]، یا تصاویری از ابهام و پیچیدگیِ نوعیِ خاصیت مشاهده‌نشدهٔ آشنا، به سرعت خیره‌کننده‌ای (در ذهن او) تکثیر می‌شدند. در این صورت روح مغشوش و تناقض‌آمیز او، گرچه از مخاطراتش آگاه بود، غالباً او را در برابر اراده‌اش تسخیر می‌کرد، و یا از روی حجب یا هیجانِ لحظه‌ای، با ناامیدی از خودفهمی، در «اظهاراتی آشفته» گرفتار می‌شد، و با نوعی خُلق طعنه‌آمیز عجیب از توان می‌افتاد.

با وجود این، سبک نگارش او ـ مقاله‌هایش، سخنرانیهای رسمی و کتابهایش ـ مدلهایی از وضوح و شفافیت بودند. این اختلاف شگرف بین بیان نوشتاری وگفتاری ماکسول، یکی از دانشجویان ابردینی‌اش را که اخترشناسی ماهر شد، تحت تأثیر قرار داد:

> سخنرانیهای ماکسول، قاعدتاً بسیار دقیق تنظیم و نوشته می‌شد ـ عملاً به‌صورتی که آمادهٔ چاپ بود ـ و ما مجاز به نسخه‌برداری از آنها بودیم. به هنگام سخنرانی، او ابتدا دست‌نوشته‌اش را می‌خواند، اما تقریباً پیش از پایان سخنرانی‌اش متوقف می‌شد و

1. Marischal 2. Aberdeen

می‌گفت: «احتمالاً می‌باید مطلبی را توضیح دهم» و سپس گریزی می‌زد به ایده‌ای که ناگهان در ذهنش جرقه زده بود. او همچنان‌که تخته‌سیاه را با شکلها و نمادهای گوناگون می‌پوشاند، با صدای بلند فکر می‌کرد، که عموماً از حوزهٔ فهم بهترین ما فراتر می‌رفت. سپس او به دست‌نوشته‌اش بازمی‌گشت، اما این‌بار وقت سخنرانی‌اش تقریباً به اتمام رسیده بود، باقیماندهٔ موضوع قطع یا به روز دیگر موکول می‌شد. احتمالاً آنها شرح معدودی نمونه‌های آزمایشی غالباً ناموفق بودند ـ و ازاین رو به‌نظر بسیاری از شاگردان ماکسول، او استاد بسیار خوبی نبود. اما برای تعداد اندکی از آنان که می‌توانستند جرقه‌هایی از درخشش بلند فکر کردن ماکسول در سخنرانی مقابل تخته‌سیاهش را دریافت کنند یا وقتی از شوخ‌طبعی چشمکی می‌زد و پیشنهاد مباحثه پس از سخنرانی را می‌کرد، ماکسول استادی عالی و منبع الهام بود.

ماکسول طی چهارسالی که در ابردین بود نخستین مقاله‌اش دربارهٔ الکترومغناطیس را کامل کرد. او در این زمان درگیر جلب محبت کاترین دِوار[1]، دختر مدیر کالج ماریشال نیز بود، و آنان در سال ۱۸۵۸ ازدواج کردند. کمبل عمدتاً دربارهٔ این ازدواج سکوت می‌کند و می‌خواهد آن را به‌صورت ازقلم‌افتادگی وانمود کند. کاترین هفت سال از ماکسول بزرگتر بود. مدام بیمار و دست‌کم در زندگی بعدی دچار بیماری عصبی شد. اگر شایعات دوستان ماکسول را باور کنیم، او از فعالیتهای علمی شوهرش منزجر بود. شاید هم چنین باشد، اما کاترین در چند سری از آزمایشها با مهارت، شوهرش را یاری می‌کرد. نه زن و نه شوهر برای ازدواج شدت و حِدّتی بروز ندادند، اما از مکاتباتشان آشکار می‌شود که آنان عمیقاً نسبت به یکدیگر فداکار و صمیمی بودند.

با ادغام دو کالج ماریشال و کینگز در سال ۱۸۶۰ ماکسول مازاد بر احتیاج شد و بدون شغل ماند. احتمالاً او تأسف چندانی نداشت؛ ابردین محیط اجتماعی دلخواهش نبود. او پیش از آن به کمبل نوشته بود: «جامعه در این عرض جغرافیایی بسیار یکنواخت و ثابت است ـ گوناگونی فراوان، اما شایستگی یا ناشایستگی بزرگ اندک است ـ به‌طور کلی مردمی شریف‌اند و بی‌نزاکت و جلف نیستند. در اینجا هیچ شوخی یا جوکی مشخص نمی‌شود... من دو ماه است که پذیرای کسی نبوده‌ام، و اگر احساس کنم کسی می‌آید زبانم را گاز خواهم گرفت.»

حرکت بعدی ماکسول کینگز کالج لندن بود، جایی که او به‌عنوان استاد فلسفهٔ طبیعی منصوب شد. پنج سال در لندن، خلاقترین دوران زندگی ماکسول بود. او نظریهٔ دینامیکی میدان الکترومغناطیسی‌اش را در آن زمان به مرحلهٔ کمال رساند. علاوه‌بر آن، نظریهٔ رفتار گاز و نظریهٔ بینش رنگ را پیشتر برد و نخستین عکاسی رنگی جهان را تولید کرد. این دستاوردها و موفقیتها، به‌ویژه نظریهٔ الکترومغناطیسی اساساً حائز اهمیت خاصی بودند، و او می‌دانست. گرچه او چنین مطلبی را به‌ندرت در نامه‌هایش اظهار می‌کرد، این کار می‌باید رضایت خاطر فراوانی برای او ایجاد کرده باشد. بار سنگین آموزش چندان

1. Katherine Dewar

مطلوب او نبود. او در نامه‌ای برای کمبل به اجمال اشاره می‌کند که: «امیدوارم غیبت شاگردان برای شما لذت‌بخش باشد. من دریافتم که تقسیم‌بندی آنان به گروههای کوچکتر هم برای من و هم برای ایشان کمک بزرگی است، اما نظارت کلی آنها برای فاصلهٔ زمانی معینی شرط لازم برای اجرای عدالت در موقع مناسب است.»

سرانجام او به این نتیجه رسید که به پست دانشگاهی نیازی ندارد، و نمی‌تواند با همهٔ وظایف همراهش که او به‌خوبی مناسب آنها نیست، به پژوهشهایش ادامه دهد. او وسایل مستقل مکفی و آسوده و هرگونه تماسهای حرفه‌ای لازم برای اطلاع‌رسانی را داشت که یافته‌های خود را به جهان علمی برساند. آنچه واقعاً می‌خواست وقت بیشتر در گلن‌لایر بود «تا با گشت زدن در مزارع با قورباغه‌های جوان و موشهای آبی پیر رابطهٔ دوستی برقرار کند.» همچنان‌که قبلاً می‌کرده است. بنابراین، در سال ۱۸۶۵ از کالج کینگز استعفا کرد و در گلن‌لایر به‌طور دائم اقامت گزید.

کمبل فعالیتها و سرگرمیهای ماکسول در گلن‌لایر را به‌اختصار چنین بیان می‌کند:

> هم در آن موقع و هم بعدها، ورزش مطلوب او که همسرش نیز می‌توانست با اشتیاق تمام در آن شرکت کند، سوارکاری بود که در آن مهارت بسیار نشان می‌داد. همسایه‌ای او را در سال ۱۸۷۴ به‌یاد می‌آورد، سوار بر اسب جدید سیاهش «دیزی» که مایهٔ ناامیدی صاحبان قبلی آن بوده است، برای بچه‌ها «پیست را دور می‌زد» شلاقش را به هوا پرتاب می‌کرد و سپس آن را به چنگ می‌آورد، و از روی میله‌ها می‌جهید و اعمالی از این قبیل. بخش قابل توجهی از وقت شامگاهی آنان غالباً وقف خواندن آثار جاسر، اسپنسر، میلتون یا نمایشنامه‌ای از شکسپیر می‌شد که او با صدای بلند برای بانو ماکسول می‌خواند.
>
> در روزهای یک‌شنبه، پس از بازگشت از کلیسا، او خودش را در آثار مقدسات قدیمی غرق می‌کرد. زیرا در الهیات، همچون ادبیات، عمدتاً همدلیهایی با آثار گذشته داشت.
>
> او روابط محبت‌آمیزی با همسایگان و فرزندانش داشت. . . او عادت داشت گهگاه از هر شخص بیمار در روستا دیدار کند، و با آنان در مواردی که از خدمات مذهبی استقبال می‌شود، دعا بخواند.
>
> کسی که در سالهای ۱۸۶۵ و ۱۸۶۹ گلن‌لایر را دیده باشد، مخصوصاً با این شیوه برخورد کرده است که مراسم دعای روزانه با آقای خانواده هدایت می‌شده است. این مراسم که بدون طرح قبلی و فی‌المجلس به‌نظر می‌رسید، بسیار مؤثر و پرمعنی بوده است.

ماکسول به‌منزلهٔ ملّاک: نقشی که او به‌وضوح لذت می‌برد.

اکنون ما از زندگینامهٔ شخصی به سرگذشت علمی او بازمی‌گردیم و این ابتدا به‌معنی درسهایی آسان دربارهٔ زبان ریاضی الکترومغناطیس است.

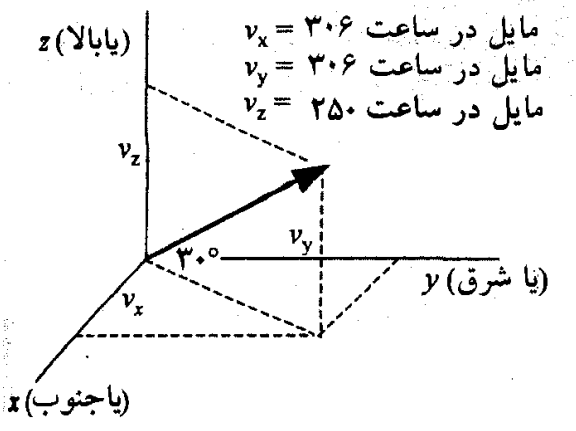
درسهایی از بردارها

نظریهٔ الکترومغناطیسی ماکسول داستانی از میدانهای الکتریکی و مغناطیسی نیروهاست. این نیروها، مانند همهٔ نیروهای دیگر، نه‌تنها بزرگی معین، بلکه جهت نیز دارند. علاوه‌بر نیرو، سرعت، اندازه‌حرکت و شتاب نیز جهت دارند. کمیتهای بدون جهت مانند انرژی، دما، حجم که در فیزیک همان اهمیت را دارند، کمیتهای «اسکالر یا نرده‌ای» می‌نامند. همهٔ کمیتهای فیزیکی جهت‌دار از لحاظ ریاضی به‌صورت بردار نشان داده می‌شوند و برای تمیز آنها ازکمیتهای نرده‌ای، آنها را با حروف سیاه مشخص می‌کنند. مثلاً بردار نیرو با $\mathbf{F}$، بردار سرعت با $\mathbf{v}$ و بردار اندازهٔ حرکت با $\mathbf{p}$ نشان داده می‌شوند.

جهت هر بردار به‌راحتی با تجزیه و تفکیک مؤلفه‌های آن در سه جهت دوبه دو عمود بر هم مشخص می‌شود. این سه جهت را می‌توان به‌راحتی به‌صورت محورهای شرقی-غربی، شمالی-جنوبی و بالا-پایین تصور کرد. نمادهای مجرد x، y و z برحسب قرارداد برچسب این محورها هستند و مؤلفه‌های هر بردار در امتداد محورهای متناظر برچسبهای معین اندازه‌گیری می‌شوند. مثلاً بردار سرعت $\mathbf{v}$ مؤلفه‌های معرفی‌شدهٔ v_x، v_y و v_z را در طول محورهای x، y و z دارد. هواپیمایی با سرعت ۵۰۰ مایل در ساعت که با زاویهٔ 30° بالا می‌رود، مؤلفه‌های بردار سرعت آن در جهت جنوب شرقی $\mathrm{v}_x = \mathrm{v}_y = 306$ مایل در ساعت (جنوب شرقی) و $\mathrm{v}_z = 250$ مایل در ساعت (بالا) است. برای تجسّم این بردار شکل ۱۲-۱ را ببینید. کلیهٔ معادلات را می‌توان با این زبان ریاضی بیان کرد. مثلاً قانون دوم حرکت نیوتون، بردار نیروی $\mathbf{F}$ را با آهنگ تغییر در بردار اندازه‌حرکت $\mathbf{p}$ مربوط می‌کند،

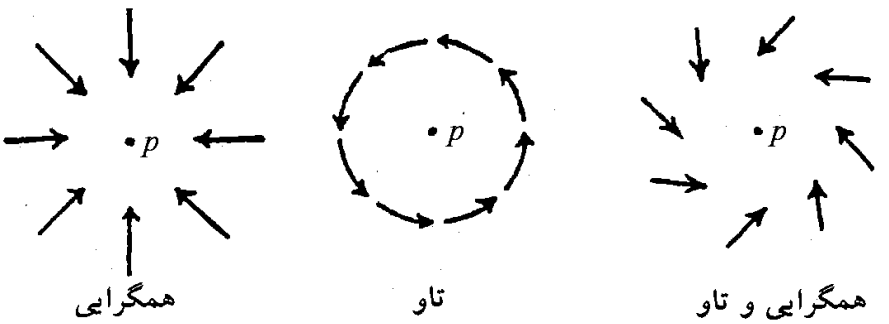
$$\mathbf{F} = \frac{d\mathbf{p}}{dt}$$

ماکسول سرانجام همهٔ معادلات میدان الکترومغناطیسی‌اش را در قالب بردار بیان کرد و هنوز هم آنها به‌همان طریق دیده می‌شوند. میدانهای الکتریکی و مغناطیسی با بردارهای $\mathbf{E}$ و $\mathbf{B}$ نشان داده می‌شوند، و معادلات ماکسول این بردارها را به بارها و جریانهای الکتریکی مربوط می‌کند که همواره با یک میدان الکترومغناطیسی پیوسته‌اند.



شکل ۱۲-۱ تصویر یک بردار سرعت $\mathbf{v}$ (با پیکان نشان داده شده) برای هواپیمایی که به‌سوی جنوب شرقی ۵۰۰ مایل در ساعت با زاویهٔ 30° صعود می‌کند.

ماکسول برای تحلیل یک میدان با آشکارسازی ساختار بار و جریانش به دو عمل کلیدی ریاضی تکیه می‌کند. هر دو عمل به معادلات دیفرانسیلی منجر می‌شوند و از علم دینامیک حرکت سیالات وام می‌گیرند. یک عمل در نقطه‌ای از میدان به‌کار گرفته می‌شود تا آنچه را که ماکسول «همگرایی» می‌نامید اندازه‌گیری کند، و منظور از همگرایی دامنه‌ای است که میدان به‌سوی آن نقطه هدف‌گیری می‌کند. عمل دوم خصلت چرخشی میدان در آن نقطه را اندازه می‌گیرد، که ماکسول برای نام آن پس از کنار گذاشتن واژه‌هایی مانند چرخش، پیچش، دور زدن، حلقه‌زدن و مانند آنها سرانجام با واژهٔ Curl به توافق رسید [معادل آن در واژه‌نامهٔ فیزیک و ریاضی تاو آمده است.] برای توضیح دو عمل همگرایی و تاو شکل ۱۲ـ۲ را ببینید. در نحوهٔ کاربرد بعدی معلوم شد آسانتر آن است که علامت و جهت عمل همگرایی ماکسول را به‌صورت «واگرا» عوض کنیم.



شکل ۱۲ـ۲ بازنماییهای ماکسول از اعمال همگرایی و تاو در یک نقطه از میدان. از مقالات علمی جیمز کلرک ماکسول، ویرایش نیون (نیویورک: داور، ۱۹۵۲)، ۲:۲۶۵.

پیشرفت سریع (*Great Guns*)

نخستین مقالهٔ الکترومغناطیس ماکسول با عنوان دربارهٔ خطوط نیروی فارادی در زمانی منتشر شد که او بیست‌وچهارساله و در ابردین بود. هدف مقاله شکل دادن ریاضی به مفهوم میدان فارادی بود. ماکسول از تامسن که قبلاً یک نظریهٔ ریاضی از مفهوم خطوط نیروی الکتریکی ساخته بود، پیروی می‌کرد. برای شروع کار، ماکسول به تامسن نامه‌ای نوشت و به او خبر داد که منتظر نوعی «شکار قاچاقی» باشد: «من قوانین بازی و قوانین ثبت حقوق اکتشاف علمی را نمی‌دانم. شاید انجمن بریتانیایی آنها را تثبیت کند، اما من مطمئناً قصد دارم به تصویرهای شما دستبرد بزنم، اما اشاراتی را که دربارهٔ الکتریسیتهٔ «برتر» ('higher' electricity) کنار زده‌اید، من می‌خواهم از آنها استفاده کنم.»

تامسن با اشتیاق درها را به‌سوی «محفوظات الکتریکی»اش گشود و آرزو کرد که برای ماکسول شکار خوبی باشد.

ماکسول منظور خود را یافته بود. کندوکاو نظریهٔ او از نظریهٔ تامسن عمیقتر بود؛ نظریهٔ ماکسول به میدانهای مغناطیسی همان‌قدر توجه داشت که به میدانهای الکتریکی، و به‌طور ریاضی نشان می‌داد که آنها تا چه حد به هم مربوط‌اند. او ایده‌های ریاضی‌اش را در مقایسه‌ای بین خطوط نیروی فارادی

و خطوط شاره در یک سیال خیالی، بی‌وزن، غیرقابل تراکم، یافت. هدیهٔ این قیاس فهرست کوتاهی از معادلاتی بود که برای بسیاری از پدیده‌های مشاهده شدهٔ الکتریسیته، مغناطیس و الکترومغناطیس محاسبه می‌شد. اجزای سازندهٔ این معادلات پنج بُردار بود، که امروزه آنها را به‌صورت **A**، **B**، **E**، **H** و **J** می‌نویسیم. (نشانه‌گذاری بردار به‌طور کامل شکل نگرفت تا بعدها که به‌وسیلهٔ اولیور هویساید[1] و ویلارد گیبس بسط یافت اما سهو تاریخی موجب تخطّی حروف می‌شد، نه روح معادلات ماکسول) میدان الکتریکی با بردار **E** نشان داده شد و **J** جریان الکتریکی را توصیف می‌کرد. برای میدان مغناطیسی دو بردار لازم بود، **B** و **H**. **H** با جریانهای **J** تولید می‌شد، چنانکه در آزمایش اورستد مشاهده شد. بردار مغناطیسی دوم **B** در خلأ برابر با **H** بود، اما از لحاظ یک محیط مادی با آن تفاوت داشت.

چهار بردار **B**، **E**، **H** و **J** معادلاتشان با پدیده‌های مشاهده‌شده به‌وسیلهٔ فارادی، آمپر و اورستد، در شکل ریاضی مختصری وحدت یافت. بردار پنجم، **A**، حاصل تعمق و گمانه‌زنی محض ماکسولی بود. این بردار نمایندهٔ آن چیزی است که فارادی در اصل آن را «حالت الکترونیکی» می‌نامید و آن حالت خاصی است که بر اثر یک مغناطیس در سیم به‌وجود می‌آید، چنانکه وقتی سیم حرکت می‌کرد یک جریان الکتریکی القا می‌شد. اما فارادی تغییر رأی داد و سرانجام ایدهٔ حالت الکترونیک را کنار گذاشت. ماکسول این مفهوم را با معرفی بردار **A** که آن را «شدت الکترونیک» می‌نامید، احیا کرد و در یکی از معادلاتش نشان داد که بردار میدان الکتریکی **E** برابر با آهنگ تغییر **A** است؛ و آن معادله بیان سرراستی از قانون القای مغناطیسی فارادی است.

تاریخ جلوتر بردار ظاهراً سادهٔ **A** ماکسول جالب توجه است. ماکسول نام اصلی آن را از «شدت الکترونیک» به «اندازه‌حرکت مغناطیسی» و سپس به «پتانسیل بردار» تغییر داد. جانشینان بلافصل ماکسول **A** را زننده و موهن دانستند و آن را خارج از معادلات می‌نوشتند. نسل بعد آن را بازگرداند، و در سال ۱۹۵۹ دیوید بوم[2] و یاکیر آهارانف[3] به **A** مرموز، با نشان دادن اینکه بدون آن میدان به‌طور کامل مشخص نمی‌شود، جایگاه استواری به نظریهٔ الکترومغناطیس داد.

فارادی پس از خواندن مقالهٔ جدید ماکسول، در نامه‌ای پس از تکریم و تحسین نویسنده پاسخی ارسال کرد، که شایسته است در هرکلکسیون مکاتبه‌های بزرگ علمی جای داشته باشد. فارادی قدردانی و سپاسش را بیان می‌کند، از سادگی ریاضیات خودش پوزش می‌طلبد، و سپس پیشنهاد شگفت‌انگیزی ارائه می‌کند.

> **دوست عزیزم**ـ مقالهٔ شما را دریافت کردم و از این لحاظ تشکر می‌کنم ـ اما جسارتاً نمی‌توانم برای آنچه دربارهٔ «خطوط نیرو» گفته‌اید سپاسگزاری کنم. زیرا می‌دانم شما این کار را به جهت علایق حقیقت فلسفی کرده‌اید، ولی باید بپذیرید خطوط نیرو کار دل‌انگیز

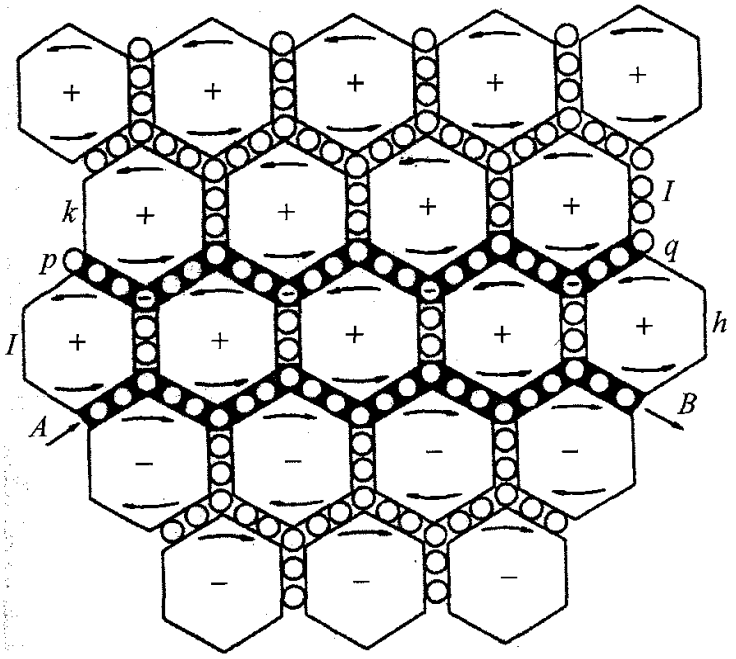
1. Oliver Heaviside 2. David Bohm 3. Yakir Aharanov

من است و مرا بسیار ترغیب می‌کند که دربارهٔ آن فکر کنم. ابتدا وقتی دیدم چنان نیروی ریاضی در خور موضوع ساخته شده، تقریباً وحشت کردم و سپس وقتی دیدم که موضوع به‌خوبی تاب و تحمل آن را دارد شگفت‌زده شدم، با این پُست مقالهٔ دیگری برای شما می‌فرستم: از خود می‌پرسم دربارهٔ آن چه خواهید گفت. هرچند امیدوارم جسارت ورزیدن در این مورد به‌صورت تفکراتی احتمالی باشد، شاید شما احتمالاً دلیلی برای تحمل آنها بیابید. امیدوارم این تابستان آزمایشهایی دربارهٔ زمان [سرعت] کنش مغناطیسی یا ترجیحاً زمان لازم برای فرض حالت اطراف یک سیم حامل جریان انجام دهم که ممکن است به موضوع کمک کند. این زمان احتمالاً می‌باید کوتاه، همچون زمان سرعت نور باشد، اما بزرگی نتیجه، هرگاه مثبت باشد، مرا نومید نمی‌کند. شاید بهتر بود در این مورد چیزی نمی‌گفتم، زیرا غالباً تحقق مقاصدم بسیار طول می‌کشد، و حافظهٔ ضعیف من بر علیه من عمل می‌کند. ارادتمند شما، م. فارادی.

این فارادی بود که نزدیک پایان دورهٔ کاری‌اش، با ماکسول بیست‌وشش‌ساله که دومین سال سکونتش در ابردین بود، مکاتبه می‌کرد. مقالهٔ ماکسول طولانی و مملو از معادلات بود، و فارادی اندکی از زبان ریاضی را فهمید. با وجود این او پیام ماکسول را به‌طور شهودی دریافت و حدس و گمان خودش را به‌یادش آورد، که آثار مغناطیسی (و احتمالاً الکتریکی) در زمانی معین منتقل می‌شوند، نه به‌طور آنی و بی‌فاصلهٔ زمانی. چنان زمانی، درواقع بسیار کوتاه و آزمایشهای فارادی ناموفق بود. اما برای ماکسولِ نظریه‌پرداز، مکاشفهٔ بزرگی بود. مارتین گلدمن[1]، زندگینامه‌نویس ماکسول می‌نویسد: «به‌نظر می‌رسید ایدهٔ زمان کنش مغناطیسی. . . همچون صاعقه بر سر ماکسول فرود آمده باشد، اگر آثار الکترومغناطیسی آنی نباشد، مسلماً دفاع بسیار خوبی برای خطوط نیرو خواهد بود، زیرا یک نیروی گذرا چه می‌تواند باشد، اگر نوعی سیر افت‌وخیز در امتداد نیرو نباشد، منبع خود را ترک می‌کند و درعین حال به هدفش نمی‌رسد؟»

مقالهٔ بعدی ماکسول دربارهٔ الکترومغناطیس با گمانهٔ فارادی جفت‌وجور بود. این مقاله در سالهای ۱۸۶۱ و ۱۸۶۲ با عنوان خطوط فیزیکی نیرو در لندن ارائه شد. این اثر کاری بود از نبوغ ماکسولی با یک قیاس جدید، این‌بار قیاس بین ملأای بود که نیروهای مغناطیسی و الکتریکی در آن منتقل می‌شوند (دانشمندان زمان ویکتوریا آن را 'اتر' می‌نامیدند) و سیستم پیچیدهٔ شانه‌زنبوری از حرکت گردابی نشان داده‌شده در شکل ۱۲ـ۳. هر سلول در سیستم شانه‌زنبوری، نشانهٔ گردابی است که محور آن موازی با خطوط نیروی مغناطیسی است. دایره‌های بین سلولها ترسیم ذرات کوچک الکتریسیته است که بین گردابها مانند بُلبرینگها می‌غلتند و جریانهای الکتریکی را حمل می‌کنند. ماکسول هشدار می‌دهد که

1. Martin Goldman



شکل ۱۲ـ۳ مدل گردابی ماکسول از اتر. از مقالات علمی جیمز کلرک ماکسول، ویرایش نیون (نیویورک: داور، ۱۹۵۲)، جلد ۱، لوح VIII، شکل ۲.

این مدل مکانیکی اتر، مانند قیاسی که در مقالهٔ قبلی‌اش به‌کار گرفته بود، باید با دقت و احتیاط مورد استفاده قرار گیرد: «من آن را به‌صورت شیوه‌ای از ارتباط موجود در طبیعت، یا حتی به صورتی که با طیب خاطر پذیرفته باشم یک فرضیهٔ الکتریکی است، مطرح نکردم. اما آن شیوه‌ای از ارتباط است که به‌طور مکانیکی قابل تصور و به‌سهولت تحقق‌پذیر است و برای توضیح ارتباطهای مکانیکی واقعی بین پدیده‌های الکترومغناطیسی شناخته‌شده به‌کار می‌آید؛ به‌طوری که به جرئت می‌توانم بگویم که هر کس خصلت تدارک مشروط و موقتی این فرضیه را بفهمد درمی‌یابد که در جریان کار پژوهشی‌اش، پس از تعبیر و تفسیر درست پدیده‌ها، به او کمک شده و ممانعتی به‌عمل نیامده است.»

ماکسول گردابهای شانه‌زنبوری‌اش ـ و اتر واقعی ـ را وقف مایملک فیزیکی کرد که در تکامل بیشتر نظریه‌اش، نقش قاطع داشت: آنها کشسان بودند. او می‌دانست که همهٔ انواع ملأهای کشسان حرکت موجی متقاطع («متقاطع» در اینجا به‌معنی عمود بر جهت انتشار است) را تأمین می‌کند، و می‌دانست که سرعت موج به نوعی عامل یا پارامتر کشسانی ملأ بستگی دارد. ماکسول تصادفاً توانست از مدل اتری خودش یک مقدار برای آن پارامتر به‌دست آورد و از آن مقدار سرعت امواج الکترومغناطیسی را که به تصور او از میان ملأ کشسان منتشر می‌شوند محاسبه کند. او با انجام این محاسبه، با شگفتی دریافت که نتیجهٔ آن تقریباً همانند سرعت نور است. سرعت نور را ویلهلم وِبِر[1] و رودولف کهلروش[2] در آلمان اندازه‌گیری کرده بودند. ماکسول به‌طور غیرمنتظره‌ای استنتاج خود را با حروف ایتالیک اعلام کرد: «به زحمت می‌توانیم از این استنتاج اجتناب کنیم که نور مرکب از حرکات موجی متقاطع از ملأای است که موجب پدیده‌های الکترومغناطیسی می‌شود.»

1. Wilhelm Weber 2. Rudolph Kohlrausch

نور به‌صورت سیر امواج الکترومغناطیسی: این ایدهٔ ساده‌ای بود، با وجود این مفهوم آن برای علم و تکنولوژی یک‌صد سال بعد تحقق یافت. ماکسول معادلاتش را زیر چتر عظیم تماس دو علم بزرگ الکترومغناطیس و اپتیک برقرار کرد، دو علمی که قبلاً آنها را نامربوط به هم می‌پنداشتند، و اکنون ماکسول مدعی بود که آن دو منسوبین نزدیک یکدیگرند.

مانند اکثر پیشرفتهای انقلابی در علم، مفهوم امواج الکترومغناطیسی ماکسول به‌کُندی رواج می‌یافت. سرانجام دو دهه پس از مقالهٔ خطوط فیزیکی نیرو، آزمایشگران، فکرکردن دربارهٔ چگونگی تولید، تشخیص و استفاده از امواج الکترومغناطیسی را آغاز کردند. ابتدا آنان کوشیدند تا «نور الکترومغناطیسی» بسازند و این تلاش ناموفق ماند. سپس آنان در جستجوی امواج الکترومغناطیسی از نوع بسیار متفاوتی برآمدند و به‌طور چشمگیری موفق شدند. قهرمان این عمل هاینریش هرتز[1]، موزارت فیزیک، مردی بااستعداد فوق‌العاده و عمری کوتاه بود. ما بعداً به داستان او خواهیم پرداخت.

امواج هرتز، امواجی بودند که امروزه آنها را امواج رادیویی و میکروموجها می‌نامیم. در یک شکل ابتدایی، ارتباط رادیویی و خلف آن تلویزیون، در آزمایشگاه هرتز متولد شد. به‌طوری که می‌دانیم، امواج رادیویی، میکروموجها و امواج نور «رنگهایی» در طیف الکترومغناطیسی پیوستهٔ وسیعی هستند. آنها را با طول موجشان تمیز می‌دهیم، امواج رادیویی و میکروموجها طویل و امواج نور کوتاه‌اند. بین آنها «رنگهایی» الکترومغناطیسی هستند که آنها را تابش فروسرخ می‌نامیم. در سمت طول موج ـ کوتاه، نور مرئی، تابش فرابنفش، پرتوهای x و پرتوهای گاما جای دارند. طول موجهای امواج رادیویی و پرتوهای گاما، ده مرتبه قدر نجومی تفاوت دارند. این اکتشافها در طی آخرین دههٔ قرن نوزدهم و دو دههٔ قرن بیستم به‌عمل آمد. متأسفانه بسیار دیر بود که ماکسول و هرتز شاهد آنها باشند.

ماکسول، استنتاج هوشمندانه‌تری از خاصیت کشسانی مُدلِ اِتری‌اش استخراج کرد، وقتی سلولهای گردابی در یک میدان الکتریکی متغیر، کشیده یا متراکم می‌شدند، ذرات الکتریسیته بین گردابیها جابه‌جا می‌شدند، و حرکت آنها چیزی را ایجاد می‌کرد که ماکسول آن را «جریان جابه‌جایی» می‌نامید. این جریان مانند هر جریان دیگر می‌توانست یک میدان مغناطیسی به‌شیوهٔ اورستد تولید کند، و ماکسول این امکان بالقوه را در معادلاتش ادغام کرد. با این افزایش، فهرست معادلات ماکسول، گرچه از لحاظ شکل متفاوت بودند، داستان ریاضی یکسانی را نقل می‌کنند، آنچنان‌که «معادلات ماکسول» درکتابهای درسی جدید یافت می‌شوند.

در اوایل ۱۸۶۵، ماکسول به عموزاده‌اش چارلزکی (که در همان سال دریافت‌کنندهٔ توصیهٔ «قلب، سر و انگشتان» بود) نوشت: «من مقاله‌ای نیز در جریان با یک نظریهٔ الکترومغناطیسی نور دارم، که تا با مخالف آن متقاعد نشده باشم، با قوت و شدت آن را حفظ خواهم کرد.» این سومین پیشنهاد او دربارهٔ الکترومغناطیس با عنوان نظریهٔ دینامیکی میدان الکترومغناطیسی بود که مفسران آن را برترین دستاورد او قلمداد می‌کردند. او این عنوان را به این طریق توضیح می‌دهد: «نظریه‌ای را که من مطرح می‌کنم

1. Heinrich Hertz

ممکن است. . . یک نظریهٔ میدان الکترومغناطیسی نامید، زیرا با فضای هم‌جوار اجرام مغناطیسی یا الکتریکی سروکار دارد، و می‌توان آن را یک نظریهٔ دینامیکی نامید، زیرا فرض می‌شود که در آن فضا مادهٔ در حال حرکت وجود دارد، که با آن پدیده‌های الکترومغناطیسی مشاهده‌شده، تولید می‌شوند.

«مادهٔ در حال حرکت» همچون گذشته در مقالات خطوط نیروی اِتر او بود، اما اکنون او بدون زرق‌وبرقهای مکانیکی با آن برخورد می‌کند. در گذشته «مادهٔ در حال حرکت» سیالات، گردابها، و ذرات الکتریسیته بودند. در قرن هجدهم، به‌جای آنها یک روش تحلیلی مجرد به‌وسیلهٔ ژوزف لاگرانژ[1] به‌صورت تعمیم یا نتیجه‌گیری کلی از سیستم مکانیکی نیوتون معرفی شد. امتیاز بزرگ نگرش لاگرانژ این بود که کارش بالاتر و فراسوی جهان مکانیسمهای پنهان انجام می‌شد. مکانیسمها می‌باید واقعاً وجود داشته باشند (مثلاً در اتر) اما نظریه‌پرداز لاگرانژی اجباری ندارد که دربارهٔ آنها نگران باشد.

تامسن و پ.گ. تیت، در رسالهٔ فلسفهٔ طبیعی جامعشان به فراوانی از مکانیک تحلیلی لاگرانژ استفاده کرده‌اند و با مروری از رسالهٔ ماکسول توضیح داده‌اند که روش لاگرانژ «نمونه‌ای ریاضی از این اصل علمی است که در مطالعهٔ هر موضوع پیچیده، ما باید توجه خود را بر آن عناصری که می‌توانیم مشاهده کنیم و باعث تغییر می‌شوند، متمرکز کنیم و به مواردی که ما نه می‌توانیم مشاهده کنیم و نه موجب تغییر می‌شوند، توجهی نداشته باشیم». او برای این پیچیدگی استعاره‌ای ارائه کرد: «در یک برج ناقوس عادی، هر زنگ یک طناب دارد که پایین می‌آید و از سوراخی در کف محوطه به اتاق زنگ‌نوازان می‌رسد. اما فرض کنید که هر طناب به‌جای آنکه با یک زنگ عمل کند، در حرکت قطعات بسیاری از ماشین‌آلات خاصی سهیم باشد، و حرکت هر قطعه با حرکت یک طناب تنها معین نمی‌شود، بلکه به چند قطعه مربوط می‌شود، و باز هم بیشتر فرض کنید، که همهٔ این ماشین‌آلات ساکت و کاملاً برای انسانها در طنابها ناشناخته باشند، انسانهایی که تنها می‌توانند طنابها را تا آنجا که به سوراخهای کف مربوط می‌شوند ببینند.» هر یک از طنابهای زنگ‌نوازان، اطلاعات خودشان را عرضه می‌کنند و طنابها را می‌توان دستکاری کرد تا انرژی پتانسیل و انرژی جنبشی سیستم پیچیده و بغرنج زنگها به‌دست آید. با به‌کاربستن روشهای لاگرانژ، «این داده‌ها برای تعیین حرکت هر یک از طنابها کافی است وقتی که آن طناب و همهٔ دیگر طنابها تحت تأثیر هر نیروی مفروضی باشند. این همهٔ آن چیزهایی است که انسانها دربارهٔ طنابها اصلاً می‌توانند بدانند. هرگاه ماشین‌آلات مذکور درجهٔ آزادی بیشتر از آنچه در طنابها وجود دارد، داشته باشند مختصاتی که این درجات آزادی را بیان می‌کنند باید نادیده گرفت. هیچ کمکی برای آنها وجود ندارد.»

ما برداشت متفاوتی از این فلسفهٔ هوشمندانه را در فصل ۱۹ مورد مداقه قرار خواهیم داد، در جایی که این فلسفه راه رهایی از بعضی پیشگوییهای عجیب و غریب نظریهٔ کوانتوم را فراهم می‌کند. نظریه‌پردازان کوانتوم با مکانیک لاگرانژی عمل نمی‌کنند، اما به دلایل متفاوت خودشان را به‌صورت زنگ‌نوازان ماکسولی می‌بینند. اگر جهان پنهانی اساساً زیر توصیف آماری آنان باشد، مجبور خواهند بود که آن را از حوزهٔ تأملات و بررسیهای خود حذف کنند و «هیچ کمکی برای آنها وجود ندارد.»

1. Joseph Lagrange

ماکسول با استفاده از روش لاگرانژی توانست همهٔ تجهیزات و لوازم ریاضی را که قبلاً در مقالات خطوط نیرویش به‌دست آورده بود، استخراج کند و سپس پیشتر رفته، بردار A خود را به‌صورت میزانی از «اندازه‌حرکت الکترومغناطیسی» مشخص، و انرژی میدان الکترومغناطیسی محاسبه کند. با این عناصر اضافی، نظریهٔ الکترومغناطیس او کامل بود. در حدود یک دههٔ بعد، در سال ۱۸۷۳ ماکسول نظریه‌اش و بسیاری از وجوه دیگر الکترومغناطیس را در یک اثر دشوار دوجلدی به‌نام رساله‌ای دربارهٔ الکترومغناطیس، جمعبندی و خلاصه کرد، که (نه کلاً برحسب تعارف) پرینسیپیای الکترومغناطیس نامیده شد. در این رساله معادلات ماکسول تقریباً به‌شکل برداری امروزی دیده می‌شوند.

ماکسول در جریان تحقیقاتش، علاوه‌بر الکترومغناطیس، موضوعات دیگری از جمله نظریهٔ گاز، ترمودینامیک، حلقه‌های زحل و دید رنگ را دنبال کرده است. نظریهٔ مولکولی گازها، نظریهٔ «دینامیکی» دیگری است که از لحاظ اهمیت نسبت به نظریهٔ میدان الکترومغناطیس نزدیک به مرتبهٔ دوم است. این نظریه توسعهٔ انقلابی دیگری برای علم فیزیک فراهم آورد که نخستین استفادهٔ آن روشهای آماری برای توصیف سیستمهای بزرگ مقیاس از مولکولها بود. نگرش آماری نخست در دست بولتزمن و سپس گیبس و ماکسول ابزار نظریهٔ ظریفی شد که امروزه «مکانیک آماری نامیده می‌شود.»

نمادهایی برای اشیاء

آخرین فصل داستان ماکسول، اواخر سال ۱۸۷۰ آغاز شد، هنگامی که او در گلن‌لایر شنید قرار است کرسی استادی جدیدی در کمبریج برقرار شود. این دانشگاه با تأخیر دریافت که آموزش علم در دانشگاههای اسکاتلند، آلمان و حتی اکسفورد روبه عقب‌ماندگی دارد. بخصوص نیاز مبرمی برای دانشجو، امکانات آزمایشگاه تحقیقاتی بود. کمیسیون معمول تشکیل شد، که هزینهٔ قابل ملاحظه‌ای را توصیه کرد، و با مخالفت دانشکدهٔ غیرعلمی مواجه شد. اما با گشاده‌دستی رئیس دانشگاه، هفتمین دوک دونشایر[1]، با امضای چک اعانه برای ایجاد یک آزمایشگاه جدید، موضوع پایان یافت. نام خانوادگی دوک دونشایر، کاوندیش بود، و او منسوب به هنری کاوندیش، یک فیزیکدان و شیمیدان اشرافی گوشه‌گیر قرن هجدهم بود که آزمایشهای پیشگام در الکتریسیته را اجرا و هدایت می‌کرد. تصادفاً دوک دونشایر نیز مانند ماکسول رانگلر دوم و برندهٔ جایزهٔ اسمیت در کمبریج بود.

پیشکشی دوک پذیرفته شد، و یک کرسی فیزیک آزمایشگاهی برای مدیریت تسهیلات جدید به‌نام آزمایشگاه کاوندیش تأسیس شد. ابتدا پست این کرسی به تامسن عرضه شد، اما او در گلاسکو کاملاً مستقر بود و نمی‌توانست خیال ترک آنجا را داشته باشد. سپس از تامسن خواسته شد که نظر هلمهلتز را استمزاج کند و آن تلاش هم ناموفق بود. هلمهلتز در آن‌موقع به‌عنوان استاد فیزیک در برلین و مدیریت یک مؤسسهٔ فیزیک جدید منصوب شده بود. انتخاب سوم ماکسول بود، که در گلن‌لایر هنوز سرزنده و خلاق بود و تعلق خاطری نداشت. اما او نمی‌توانست احساس وظیفه را انکار کند، ازاین رو، او پیشنهاد

1. Devonshire

کرد که این پست را بپذیرد، با این شرط که ممکن است در پایان نخستین سال تصمیمش را عوض کند. مخالفتی نبود، او انتخاب شد و کمبریج بدون آنکه بداند، بهترین آن سه نفر را به‌دست آورده بود.

ماکسول در آن پست باقی ماند و ساختمان آزمایشگاه جدید تحت نظارت استادانه و دلسوزی ناشی از وظیفه‌شناسی او پیش رفت. نبوغ او برای امور نظریه‌پردازی بود، اما او یک آزمایشگر ماهر و شایسته‌ای نیز بود. طرح آزمایشگاه کاوندیش عملی و هوشمندانه و نیازهای علم فیزیک در کمبریج را به‌مدتی بیش از یک قرن برآورده می‌کرد. اما به‌مدت دو سال که طراحی، برنامه‌ریزی، و تبادل‌نظر و بناسازی به‌کندی پیشرفت می‌کرد، ماکسول بدون یک زندگی حرفه‌ای مانده بود: او در نامه‌ای به کمبل نوشت: «من جایی ندارم که کرسی استادی خود را برپا کنم، بلکه جابه‌جا می‌شوم و چون فاخته تخم اندیشه‌ها و دانسته‌های خود را در اتاق درسی شیمی ترم اول، در اتاق درس گیاه‌شناسی، در ایام روزه، و در اتاق تشریح تطبیقی در عید پاک می‌گذارم.»

به‌عنوان یک استاد تازه‌منصوب‌شده، از ماکسول انتظار می‌رفت یک سخنرانی معارفه ایراد کند. و ملزم بود که بدون سروصدا باشد. درواقع، این امر به‌قدری پیش‌بینی‌نشده بود که اکثر هیئت علمی کمبریج امکان شرکت در آن جلسه را نیافتند. سپس در حرکتی که ظاهراً به‌طور کامل بی‌غرضانه نبود، ماکسول یک اطلاعیهٔ رسمی از نخستین سخنرانی علمی دانشگاهی‌اش را منتشر کرد. ظاهراً دانشمندان و ریاضیدانان محترمی که در آن‌وقت حضور داشتند، از یک توضیح مشروح و مفصل از مقیاسهای دمای سلسیوس و فارنهایت برخوردار شدند.

با وجود این، سخنرانی معارفهٔ او جان گرفت و زنده ماند. ماکسول آن را چاپ کرده بود، و این یک مدرک عالی از فرزانگی ماکسولی است. این سخنرانی درسهایی دربارهٔ کنش متقابل بین علم آزمایشی و علم نظریه‌ای را می‌آموخت که هنوز هم آموخته می‌شود. او به مخاطبان (احتمالاً به‌طور پراکنده) می‌گفت: «ابتدا ما باید حواس خودمان را با پدیده‌ای آشنا کنیم. اما نباید در اینجا متوقف شویم، باید بیابیم که کدام ویژگیهای آن قابل اندازه‌گیری است و چه اندازه‌گیریهایی برای تکمیل مشخصات آن پدیده لازم است. ما باید این اندازه‌گیریها را انجام دهیم، و از آنها نتیجه‌ای را که می‌خواهیم استنتاج کنیم.»

او تأکید می‌کرد که فرایندهای اندازه‌گیری و اصلاح، فرایندهایی ظریف و پیچیده‌اند. او می‌گفت: «متأسفانه به‌نظر می‌رسد این عقیده شایع است که طی چند سال همهٔ ثابتهای بزرگ فیزیک به‌طور تقریبی برآورد و ارزیابی خواهد شد و تنها کاری که از آن پس برای دست‌اندرکاران باقی می‌ماند، جابه‌جا کردن رقم اعشاری این اندازه‌گیریها خواهد بود.»

اما اکتشافات بزرگ علمی با چنین عواقب مرگبار و اسف‌انگیزی مواجه نمی‌شوند: «ما حق نداریم دربارهٔ ذخایر ناشناخته‌های خلقت یا دربارهٔ باروری ناآزمودهٔ ذهنهای تازه و شاداب که این ذخایر در آنها جاری خواهد شد، این‌گونه بیندیشیم.» برعکس:

> تاریخ علم نشان می‌دهد که علم حتی در مرحلهٔ پیشرفتی که خودش را وقف اصلاح صحت اندازه‌گیریهای عددی کمیتها می‌کند، کمیتهایی که مدتها با آنها آشنایی دارد،

> موادی برای انقیاد نواحی جدید آماده می‌کند که اگر با روشهای خام پیشگامان اولیه‌اش قانع می‌بود ناشناخته می‌ماند. من می‌توانم نمونه‌هایی از هر شاخهٔ علمی مطرح کنم، تا نشان دهم چگونه زحمت اندازه‌گیری دقیق، نتیجه‌اش کشف میدانهای جدید پژوهش و توسعهٔ ایده‌های جدید علمی بوده است.

(بحث فصل ۲۵ دربارهٔ الکترومغناطیس کوانتومی را ببینید؛ موفقیت عظیم آن وابسته به اندازه‌گیریهای بسیار دقیق و موشکافانه بوده است.)

ماکسول برنامه‌ای از فیزیک آزمایشی را طراحی کرد که به‌کلی متفاوت از سنت سه‌پایه‌ای (tripos) کمبریج به‌نظر می‌رسید و براساس آموزش عمیق استدلال و تعقل نظریه‌ای بود. اما نباید تعارضی در آن وجود داشته باشد، ماکسول می‌گوید: «برای گنجاندن معلومات در ذهن هیچ روشی قدرتمندتر از آن وجود ندارد که آن را حتی‌المقدور از راههای بسیار متفاوت ارائه کنیم. وقتی ایده‌ها، پس از ورود از راههای متفاوت در مأمن ذهن ارتباط برقرارکردند، موضعی راکه اشغال می‌کنند، تسخیرناپذیر می‌شود.»

مسئلهٔ مهم هم برای معلم و هم برای شاگرد این است که «بخش نظریه‌ای آموزش را در تماس با بخش عملی قرار دهیم، و اثرکامل آنچه راکه فارادی 'اینرسی ذهنی' می‌نامید، تسخیر کنیم. دشواری، نه‌تنها تشخیص میان اشیاء عینی پیش روی ما، یا رابطهٔ انتزاعی که ما ازکتابها آموخته‌ایم، و از اشیاء پشت نمادها نیست، بلکه دردگیج‌کنندهٔ دوری از جاکندن ذهن از دادن نمادهایی به اشیاء و بازگشت از اشیاء به نمادها است. این... بهایی است که باید بپردازیم. اما وقتی بر مشکلات فائق آمدیم و به‌طور موفقیت‌آمیزی بین شکاف انتزاع و عینیت پل زدیم، این بخشی از دانشی نیست که به‌دست آورده باشیم: ما اصول و مقدماتی از یک موهبت دایمی ذهنی راکسب کرده‌ایم.»

ماکسول به‌عنوان استاد آزمایشگاه کاوندیش در سالهای ۱۸۷۰ به‌طور چشمگیری همچون ماکسول دانشجو در سالهای ۱۸۵۰ بود. یکی از دوستان کمبریجی‌اش که با هر دو مرحلهٔ او آشنایی داشت، شرح مختصر زیر را به اطلاع کمبل رساند:

> معاشرت من با ماکسول به هنگامی که کمبریج را ترک کردیم قطع شد. پس از پانزده سال غیبت به هنگام بازگشت من در سال ۱۸۷۲، او به‌تازگی در آزمایشگاه جدید کاوندیش مستقر شده بود، و من با خوشحالی و اشتیاق منتظر دوستی مجدد او بودم. من او را مردی آرامتر و جدّیتر از سنش یافتم و این امری طبیعی بود؛ اما مانند همیشه خونگرم با ذهنی تازه و سرحال... ویژگیهای قدیمی شیوهٔ سخن گفتن او اصلاً تغییر نکرده بود. هنوز هم خواندن جریان فکری او از زیر نقاب خوش‌خلقی و بذله‌گویی‌اش، که به هم بافته شده بود، کار آسانی نبود؛ و هنوز هم این ابهام، گاه‌وبیگاه، با نوعی انفجار درخشان روشن می‌شود.

ماکسول دانشجویان پژوهشگر داشت، اما شیوهٔ او این نبود که آنها را به‌صورت یک گروه به مقصد مشترکی بکشاند. آرتور شوستر[1] یکی از نخستین شاگردان کاوندیش به‌خاطر می‌آورد که به‌نظر ماکسول

1. Arthur Schuster

«بهترین راه هم برای پیشرفت علم و هم برای تربیت ذهن دانشجویان این بود که هر یک راه خودش را دنبال کند. دلسوزی ماکسول با همهٔ کاوشگران علمی خواه آنان‌که با نکات مهم بنیادی در تماس‌اند یا آنان‌که به جزئیات کمتری می‌پردازند خستگی‌ناپذیر به‌نظر می‌رسید؛ او همیشه مشوق بود، حتی وقتی می‌پنداشت شاگرد راه خطا می‌رود. او روزی به من گفت: «من هرگز کسی را از انجام آزمایش منع نمی‌کنم، اگر او آنچه را می‌خواهد، نمی‌یابد، ممکن است به چیز دیگری دست یابد.»

درس ماکسول مخاطبان اندکی داشت. دانشجویان بلندپرواز را معلمان خصوصی برای امتحانات سه‌پایه‌ای (tripos) آماده می‌کردند؛ نه‌تنها درسهای ماکسول، بلکه درسهای استادان دانشگاهی دیگر نیز برای خواستهای بلندپروازانهٔ رانگلرها ارزش «پرداخت» اندکی داشت. جان فلمینگ یکی دیگر از دانشجویان اولیهٔ کاوندیش، نقل می‌کند که «در درسهای ماکسول به‌ندرت بیش از پنج یا شش نفر حاضر می‌شدند، اما برای آنان‌که می‌توانستند روال اصلی ارائهٔ حقایق و غالباً متناقض‌نمای او را دنبال کنند، آموزش او رفتار عقلانی نادری بود.» گفته می‌شود که نیوتون به هنگامی که استاد لوکاسین در کمبریج بود، غالباً «برای دیوار سخنرانی می‌کرد.»

استاد آزمایشگاه کاوندیش، ابتدا با بی‌میلی و از روی اکراه وظیفهٔ عظیم ویرایش مقالات هنری کاوندیش را، که در قرن هجدهم تحقیقات الکتریکی چشمگیری انجام داده بود، به‌دوش می‌کشید. ماکسول زود مشتاق این طرح شد، همان‌قدر به کاوندیش به‌عنوان یک انسان علاقه‌مند شد که به کار او. ماکسول در مقدمهٔ مقاله‌ای با عنوان پژوهشهای الکتریکی هنری کاوندیش ارجمند، نوشت: «کاوندیش به تحقیق بیشتر توجه دارد تا به انتشار دستنوشته‌هایش. او بیشترین پژوهشهای پرزحمت را به این جهت بر عهده می‌گرفت تا مشکلی را برطرف کند که هیچ‌کس بجز خود او قدر آن را نمی‌دانست، یا حتی از آن آگاهی نداشت.» این یک خلوص نیّت و بی‌تفاوتی نسبت به قدرشناسی و شهرت بود که ماکسول آن را می‌ستود.

ماکسول به‌عنوان ویراستار مقالات کاوندیش، شیفتگی عمیق خود به تاریخ علم را برآورده می‌کرد. او در سخنرانی معارفه‌اش گفته بود:

> درست است که تاریخ علم بسیار متفاوت از علم تاریخ است، ما درصدد مطالعه یا کوششی برای مطالعهٔ تأثیر نیروهای کوری که به ما گفته می‌شود بر توده‌های مردم گمنامی اثر می‌گذارند، سلطان‌نشینها و قدرتها را به‌لرزه درمی‌آورند، و افراد عاقلی را وادار می‌کنند تا به ترتیبی که فلاسفه وضع کرده‌اند باعث بروز رویدادهایی شوند، نیستیم.
>
> افرادی که نامشان در تاریخ علم یافت می‌شود، صرفاً اجزای سازندهٔ یک جماعت نیستند که فقط بتوان دربارهٔ جماعتهایی از آنها اندیشید یا استدلال کرد. ما آنان را شبیه خودمان می‌شناسیم و افکار آنان عاری از نفوذ هیجان است. سوابق آنان صحیحتر از سوابق دیگران ثبت شده است و همهٔ اینها مطالب بهتری برای مطالعهٔ بخشهای آرامتر طبیعت آدمی است.

اما تاریخ علم محدود به شمارش پژوهشهای موفق نمی‌شود، بلکه می‌باید دربارهٔ جستجوهای ناموفق نیز سخنی داشته باشد، و توضیح دهد که چرا بعضی از تواناترین افراد برای یافتن کلید معرفت و دانش ناکام مانده‌اند و چگونه شهرت و اعتبار دیگران فقط جاپای محکمتری به خطاهایی داده است که آنان در آن افتاده‌اند.

هاینریش هرتز

وقتی ماکسول در سال ۱۸۷۹ وفات یافت، نظریهٔ میدان الکترومغناطیسی او و سلالهٔ حیرت‌انگیزش، امواج الکترومغناطیسی، حمایت آزمایشی اندکی داشت، تنها مدرک غیرمستقیمِ محاسبهٔ سرعت امواج الکترومغناطیسی به‌وسیلهٔ ماکسول و برابری آن با سرعت نور بود.

جانشینان بلافصل ماکسول دربارهٔ امواج الکترومغناطیسی می‌اندیشیدند، اما ابتدا نتوانستند راهی عملی برای مطالعهٔ آن در آزمایشگاه بیابند. نقطهٔ عطف مطالعهٔ امواج الکترومغناطیسی و توفیقهای نظریهٔ ماکسول، یک نیروی زلزله‌آسای عقلانی، در یک‌سری آزمایشهای درخشانی بود که به‌وسیلهٔ هاینریش هرتز انجام شد.

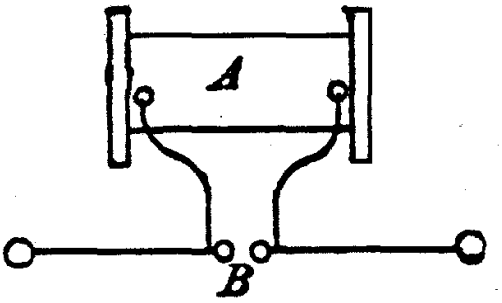
سال ۱۸۸۷ بود که هرتز وارد دانشکدهٔ فنی کارلزروهه، واقع در بادن، آلمان شد. او جوانی سی‌ساله بود، اما قبلاً معروف و در دنیای دانشگاهی به‌سرعت مسیری صعودی را پیموده بود. او دانشجوی ارشد تحقیقاتی هلمهلتز در برلین، سپس مدتی کوتاه مربی دانشگاه کیل[1] و اکنون استاد ارشد درکارلزروهه بود.

وقتی هرتز کار در آزمایشگاه کارلزروهه را آغاز کرد، با نظریهٔ ماکسول آشنا بود، اما خود را درگیر آن نکرد. قبلاً، هلمهلتز سعی کرده بود تا علاقهٔ او را به‌وسیلهٔ ابداع آزمایشهایی برای امتحان مفروضات ماکسول (به ضمیمهٔ یک جایزهٔ معتبر) جلب کند، اما هرتز عاقلانه و با تدبیر امتناع کرد.

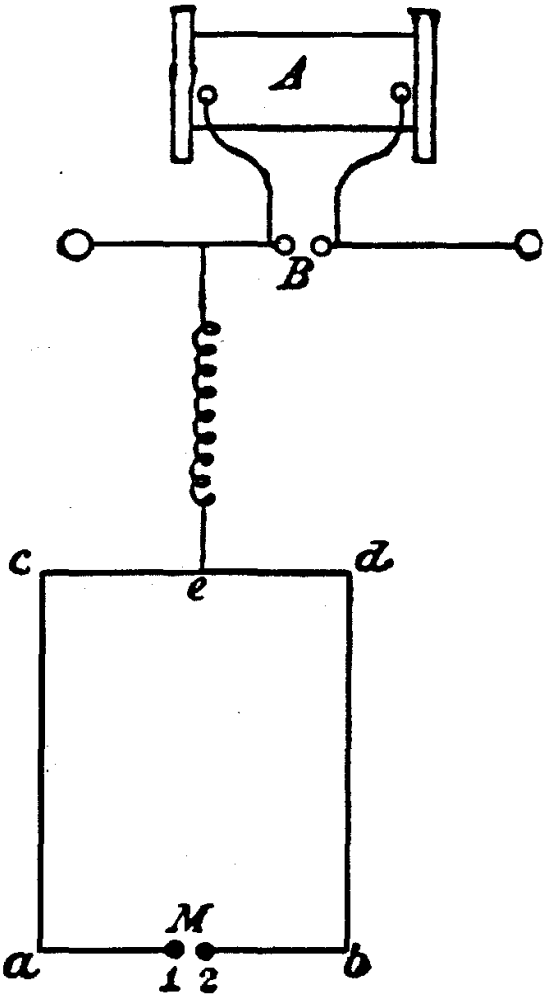
در آن زمان هدف او سوارکردن وسایلی برای مطالعهٔ تخلیه‌های الکتریکی درگازها بود. یک قلم از تجهیزات آزمایشگاه کارلزروهه، یک مولّد جرقه به‌نام پیچک رامکورف[2] بود (که شباهت اندکی داشت با پیچک احتراق که جرقه‌هایی در موتور ماشین بنزینی ایجاد می‌کند). او پیچک را وارسی و تعمیر کرد و شیفتهٔ عملکردی از پیکربندی آن شد به‌صورتی که در شکل ۱۲ـ۴ ترسیم شده است. پیچک A به دو کرهٔ برنجی B جدا از هم با فاصلهٔ $\frac{۳}{۴}$ سانتیمتر و همچنین دو سیم مسی ضخیم مستقیم به‌طول ۳ متر، منتهی به دو کرهٔ فلزی به قطر ۳۰ سانتیمتر متصل بود. با فعال شدن پیچک [به‌وسیلهٔ جریان الکتریسیته] در شکاف B به‌طور مکرر جرقه‌هایی تولید می‌شد.

هرتز دریافت که می‌تواند مدار پیچک الکتریکی را، آن‌طورکه در شکل ۱۲ـ۵ نشان داده شده، به یک حلقهٔ سیمی متصل کند و با تنظیم دقیق اندازهٔ حلقه، در شکاف M جرقه‌های مشاهده‌پذیر به‌دست آورد. سپس او کشف کرد که با حذف سیم اتصال نیز (مطابق شکل ۱۲ـ۶) جرقه‌هایی در حلقهٔ سیمی مشاهده می‌شود.

1. Kiel 2. Rühmkorff coil



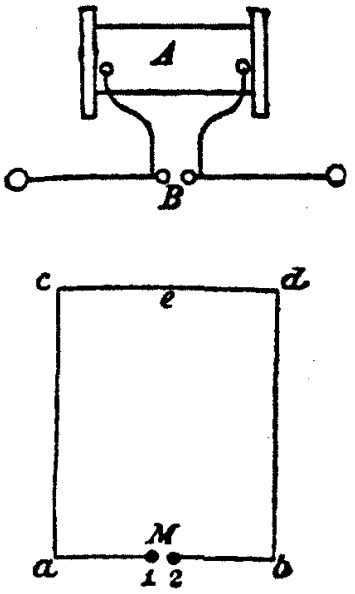
شکل ۱۲ـ۴ مدار پیچک هرتز. این شکل و دو شکل بعدی آن تعدیل‌شده از مقاله‌ای با عنوان «دربارهٔ نوسانهای الکتریکیِ بسیار سریع» در Wiedemann's Annalen der Physik und Chemie 31 (1887): 431 است.



شکل ۱۲ـ۵ مدار پیچک هرتز متصل به حلقهٔ سیمی با یک شکاف برای جرقه.

اگر بین دو مدار الکتریکی سیم اتصالی وجود نداشته باشد، چگونه آنها با یکدیگر ارتباط برقرار می‌کنند؟ در این مورد، هرتز کم‌کم به این دریافت می‌رسید که وسایل آزمایش او امواج الکترومغناطیسی را تولید و آشکارسازی می‌کنند. منشأ امواج یک سلسله از نوسانهای الکتریکی بود که با هر جرقه در مدار پیچک شروع می‌شد. این امواج در امتداد یک سیم ـ یا حتی در فضای آزاد ـ منتشر می‌شد، به حلقهٔ سیمی می‌رسید و حضور آنها با جرقه‌های مشاهده‌شده در شکاف حلقه، آشکار می‌شد.

امواج از هر نوع که باشند، سه ویژگی بنیادی دارند: طول موج، فرکانس و سرعت انتشار. طول موج فاصلهٔ یک قلّهٔ موج تا قلّهٔ موج بعدی، فرکانس یا بسامد تعداد چرخه‌های موج که در واحد زمان از نقطهٔ



شکل ۱۲ـ۶ مدار پیچک هرتز و حلقه سیمی که جدا از آن است. باز هم جرقه‌ها در شکاف حلقه ایجاد می‌شوند.

معینی می‌گذرند؛ و سرعت انتشار فاصله‌ای است که یک قلهٔ موج در واحد زمان سیر می‌کند. هرتز بیش از همه، به سرعت امواج موردنظر خودش توجه داشت. آیا آن سرعت محدود است؟ اگر چنین باشد، نظر ماکسول علیه نظر رقبایش که براساس مفهوم کنش از دور و نامحدود بودن سرعت انتشار بود، قویاً تقویت می‌شد. هرتز به‌زودی راهی برای تعیین قطعی آن یافت. او بر یک معادلهٔ ساده که برای هر نوع موجی معتبر است، و سرعت s، فرکانس v، و طول موج λ را به هم متصل می‌کند، تکیه کرد،

$$s = \lambda v \qquad (۱)$$

فرکانس v در این معادله را می‌توان از طول سیم و قطر کره‌های فلزی در مدار پیچک، با استفاده از فرمولی که قبلاً تامسن آن را استخراج کرده بود، محاسبه کرد. هرتز دریافت که فرکانسهای محاسبه‌شده، به‌طور استثنایی بسیار زیاد، در حدود یک‌صد میلیون چرخه (سیکل) در ثانیه است. برای اندازه‌گیری طول موج، هرتز مبتکرانه پیکربندی دستگاهش را به‌طوری بازسازی کرد که «امواج ایستاده» تولید کند (مانند آنچه در رشته‌سیمهای ویولون روی می‌دهد) خواه در طول یک سیم مستقیم باشد، یا در فضای آزاد. سپس او با استفاده از آشکارسازهای حلقهٔ سیمیِ جای قله‌ها و پستیهای امواج را مشخص کرد. فاصلهٔ اندازه‌گیری‌شده از یک قله به قلهٔ بعدی طول موج بود. مسائل دشوار و سرسختانه‌ای درکار بود: او دچار اشتباه محاسباتی سردرگمی می‌شد، و کورهٔ آهنی و دیگر اشیای موجود در آزمایشگاه امواج را پیچیده می‌کردند. اما سرانجام معادلهٔ (۱) داستانی را بیان کرد که هرتز انتظار آن را داشت: امواج الکترومغناطیسی او سرعتی محدود و متناهی داشتند، درواقع همان سرعت نور بود که معلوم شده بود سیصد میلیون متر در ثانیه است.

گرچه هرتز، تا آن زمان دفاع جانانه‌ای از نظریهٔ ماکسول کرده بود، اما او بسیار پیشتر رفت، تمامیت و ابتکاری از کار خود نشان داد که فارادی را تحت تأثیر قرار می‌داد. او ثابت کرد که امواج الکترومغناطیسی‌اش می‌توانند بازتابیده، متمرکز، شکسته، پراشیده و قطبیده شوند ـ که به هر معنایی آنها بجز فرکانس و طول موج همانند نور بودند.

در حدود «یک سال اعجاب‌آور» آزمایشهای هرتز به مشاجرهٔ بزرگ میان ماکسولیها و طرفداران کنش از دور پایان بخشید. عجیب نیست که کار هرتز به‌سرعت در بریتانیا و به‌کندی در آلمان شناخته شد، جایی که گرایش کنش از دور در آنجا بسیار قویتر بود. به‌شوخی گفته می‌شد که آلمانیها کار هرتز را از طریق بریتانیاییها آموختند. اما در تابستان سال ۱۸۸۹ پیروزی هرتز کامل بود؛ در یک گردهمایی در هایدلبرگ، بزرگان علم از او تجلیل کردند و در همان سال او جانشین کلازیوس در بُن شد.

هرتز به‌طور اسف‌انگیزی، همان‌قدر از لحاظ سلامتی بداقبال بود که از لحاظ استعداد توفیق داشت. نخستین نشانهٔ ناراحتی او دندان‌دردهای پیاپی در سال ۱۸۸۸ بود که منجر به کشیدن همهٔ دندانهای او در سال ۱۸۸۹ شد. در سال ۱۸۹۲ او از دردهای بینی و حلق رنج می‌برد و غالباً افسرده بود. پزشکهای او نتوانستند به‌طور رضایت‌بخشی، بیماری او را تشخیص دهند. چند عمل جراحی برای فراهم آوردن راحتی پایدار برای او ناموفق بود. در دسامبر سال ۱۸۹۳ او دانست که بهبود نخواهد یافت، و در نامه‌ای از والدین خود خواست «برای من سوگواری نکنید. . . بلکه شما می‌باید مفتخر باشید و در نظر بگیرید که من برگزیدهٔ خاص تقدیری هستم که فقط برای مدت کوتاهی زندگی کنم و هنوز هم به‌قدر کافی زندگی می‌کنم. من این سرنوشت را انتخاب نکرده‌ام، اما چون به این فرجام دچار شده‌ام می‌باید راضی باشم؛ و اگر این انتخاب به من واگذار می‌شد، شاید بهتر بود خودم هم همان را انتخاب می‌کردم.»

هرتز به‌علت مسمومیت خون در روز سال نو ۱۸۹۴ در سی‌وشش‌سالگی چشم از جهان فرو بست.

معادلات ماکسول

وقتی یک نظریهٔ علمی ایجاد شود، جزئی از مایملک عام می‌شود. دوستان و دشمنان نظریه (و نظریه‌پرداز) مجازند برای تغییراتی، هم در محتوا و هم در شکل، آن‌طور که مصلحت و مناسب می‌دانند، جرّوبحث کنند. اگر نظریه موفقیت‌آمیز باشد، محتوای آن، احتمالاً کم‌وبیش دایمی و ثابت می‌ماند. اما شکل آن ـ شکل یک نظریهٔ فیزیکی ـ ممکن است چندان پایدار نماند. مثلاً زبان ریاضی‌هندسی نیوتون در پرینسیپیا، دوام نیاورد، همچنین بود شکل مشروح ریاضی کلازیوس دربارهٔ نظریهٔ انتروپی، اما محتوای فیزیکی قوانین حرکت نیوتون و مفهوم انتروپی برای ما محفوظ‌اند.

نظریهٔ ماکسول با فرجام مشابهی مواجه بود. اکثر اظهارات مؤکّد ماکسول در رساله‌ای در باب الکتریسیته و مغناطیس، اثاثیهٔ ثابت علم فیزیک شده‌اند. از سوی دیگر معادلات او به‌دست دیگران تغییر شکل یافته است. تعداد آنها، آن‌طور که ما در این رساله می‌یابیم دوازده معادله بوده است. جانشینان ماکسول، بخصوص هرتز و خوش‌ذوقترین ماکسولیهای بریتانیایی، اولیور هیویساید خواستار «خلوص» بیشتری در این معادلات بودند. آنان معادلات امدادی را کنار گذاشته‌اند، بردار پتانسیل $\mathbf{A}$ و یک پتانسیل نرده‌ای همراه Ψ را حذف کرده و سرانجام دوازده معادلهٔ اصلی را فقط به‌صورت چهار معادلهٔ دیفرانسیلی در هم ادغام کرده‌اند.

این «معادلات ماکسول» همچون اجزای ریاضی آن دارای بردار میدان الکتریکی $\mathbf{E}$، بردار میدان مغناطیسی $\mathbf{B}$، بردار جریان الکتریکی $\mathbf{J}$، و چگالی بار الکتریکی ρ است. دو معادلهٔ واگرایی و دو معادلهٔ تاو (Curl) وجود دارد، در هر دو معادله یکی برای $\mathbf{E}$ و دیگری برای $\mathbf{B}$ است:

$$\text{div } \mathbf{E} = \rho \qquad (۲)$$

$$\text{تاو } \mathbf{E} = -\frac{۱}{c}\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \qquad (۳)$$

$$\text{div } \mathbf{B} = ۰ \qquad (۴)$$

$$\text{تاو } \mathbf{B} = \frac{\mathbf{J}}{c} + \frac{۱}{c}\frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \qquad (۵)$$

کوته‌نوشت "div" نمایندهٔ واگرایی (divergence)، c سرعت نور، و مشتقها که با نماد "∂" نوشته می‌شوند فقط برای تغییرات در زمان t محاسبه می‌شود، درحالی‌که همهٔ متغیرهای دیگر ثابت نگه داشته می‌شوند. (ریاضیدانان اینها را مشتقات «جزئی» و معادلات را معادلات دیفرانسیلی جزئی می‌نامند.) برای عرضه کردن این معادلات در متقارنترین شکل ـ و از لحاظ ریاضی کمترین شکل عذاب‌آور ـ من فرض کرده‌ام که میدان الکترومغناطیسی در خلأ منتشر می‌شود.

معادلهٔ واگرای (۲)، در جدیدترین تعبیرش، به‌سادگی بیان می‌کند که با بارهای الکتریکی (ازجمله چگالی بار الکتریکی ρ) یک میدان الکتریکی $\mathbf{E}$ تولید می‌شود. معادلهٔ تاو همراه آن (۳) برای $\mathbf{E}$ آنچه را فارادی مشاهده کرده بود به ما می‌گوید: که در یک میدان مغناطیسی متغیر $\mathbf{B}$ یک میدان الکتریکی چرخشی تولید می‌شود.

معادلهٔ واگرای (۴) برای میدان مغناطیسی، شبیه می‌شود با معادلهٔ (۲) برای میدان الکتریکی، بجز آنکه همتای مغناطیسی چگالی بار الکتریکی ρ وجود ندارد. در اینجا یک تفاوت بنیادی بین الکتریسیته و مغناطیس می‌بینیم. یکی از دو نوع الکتریسیته، مثبت یا منفی می‌تواند توفق پیدا کند، و بار خالص چگالی ρ را مثبت یا منفی کند، اما میدان مغناطیسی نمی‌تواند به این طریق تقسیم شود: در میدان مغناطیسی هر قطب شمالی با یک قطب جنوبی دقیقاً در حال تعادل است، و «چگالی بار مغناطیسی» مشاهده‌پذیر وجود ندارد، بنابراین، یک صفر در طرف راست معادلهٔ واگرای (۴) ضروری است.

معادلهٔ تاو دوم (۵) در نخستین دو جملهٔ ($\text{تاو } \mathbf{B} = \frac{\mathbf{J}}{c}$) آنچه را که اورستد مشاهده کرده بود بیان می‌کند: که با جریان الکتریکی $\mathbf{J}$ یک میدان مغناطیسی چرخشی $\mathbf{B}$ تولید می‌شود. سومین جملهٔ معادلهٔ (۵)، $\left(\frac{۱}{c}\frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}\right)$، معنی خاصی دارد. ماکسول ثابت کرد که بدون آن، این معادله از قانون بنیادی الکتریسیته، مبنی‌بر اینکه بار الکتریکی مانند انرژی پایسته است تبعیت نمی‌کند، جملهٔ سوم در معادلهٔ (۵) پایستگی بار را حفظ می‌کند. یعنی بار الکتریکی نه خلق و نه معدوم می‌شود. و این نوعی فراگیر از جریان الکتریکی («جریان جابه‌جایی» ماکسول) را نشان می‌دهد که حتی در فضای آزاد یافت می‌شود.

نظریهٔ میدان ماکسول، که در معادلات او مجسم می‌شود، دفتر قرن نوزدهم یا نظریهٔ «کلاسیک»

الکترومغناطیس را می‌بندد. این نظریه دامنهٔ طویلی در قرن بیستم دارد. اینشتین ابتدا در معادلات ماکسول سررشته‌ای را یافت که به‌طور چشمگیری برای جرح و تعدیل مفاهیم فضا و زمان در نظریهٔ نسبیت خاص (فصل ۱۴) بدان نیاز داشت، و سپس نظریهٔ میدان الکترومغناطیسی ماکسول را با نظریهٔ میدان گرانش خودش دنبال کرد. به‌تازگی نظریهٔ میدان کوانتومی هستهٔ اصلی فیزیک ذرات شده است.

اینشتین در قدردانی از ماکسول می‌نویسد: «پیش از ماکسول مردم واقعیت فیزیکی را ـ تا آنجا که رویدادها را در طبیعت نشان می‌داد ـ به‌صورت نقاط مادی می‌پنداشتند که تغییرات آنها فقط منوط به حرکاتی بود که تابع معادلات دیفرانسیلی کلی [یعنی بدون مشتقات جزیی] بودند. پس از ماکسول تصور آنان از واقعیت فیزیکی به‌صورت میدانهای پیوسته نشان داده می‌شد که به‌طور مکانیکی تبیین‌پذیر نیستند و تابع معادلات دیفرانسیلی جزئی‌اند. [مشتقات جزیی را شامل می‌شود.] این تغییر در مفهوم واقعیت ژرفترین و پربارترین رویدادی است که علم فیزیک از زمان نیوتون به بعد تجربه کرده است.

آنکه بهره‌ای از نامتناهی دارد

شاید معاصران ماکسول فهمیدن ذهنیات او را دشوار می‌دانستند، اما در پس رفتارهای عجیب‌وغریب او همیشه نوعی بلندنظری و گشاده‌دستی، فقدان کامل خودپسندی و احساس عمیق وظیفه‌شناسی می‌دیدند. از همهٔ دانشمندانی که شرح حال آنها در این فصول آمده است، شاید خودخواهی و خودبینی ماکسول و گیبس کمتر از همه بوده است.

دلبستگی فداکارانهٔ ماکسول به همسرش کاترین استحکام خاصی داشت. سلامت همسرش همیشه متزلزل و ناپایدار بود ـ به‌گفتهٔ کمبل در یک مورد ماکسول به‌مدت سه‌هفته شبها درکنار تخت‌خواب کاترین می‌نشست، و روزها امور آزمایشگاه کاوندیش را اداره می‌کرد. او همواره نسبت به همکارانش ملاحظه‌کار بود، بخصوص آن‌که چندان مورد توجه نبودند. او نخستین کسی بود که اهمیت کار گیبس در علم ترمودینامیک را ارج نهاد. (ترفیع بخشید.) اظهارنظر سخاوتمندانهٔ او دربارهٔ پایان‌نامهٔ دکتری جوان هلندی، یوهانس وان دروالس[1]، نمونهٔ بارزی از خصوصیت اوست: «نظریهٔ مولکولی پیوستگی حالتهای مایع و گازی، موضوع پایان‌نامهٔ فوق‌العاده بدیع و مبتکرانهٔ آقای یوهانس دیدریک وان دروالس فارغ‌التحصیل لیدن است. ... پرداختن به این مسئلهٔ دشوار به‌قدری توانمندانه و شجاعانه است، که برای دادن یک تکانهٔ چشمگیر به علم مولکولی ناکام نمی‌ماند. این پایان‌نامه که به زبان هلندی سطح پایین نوشته شده است مطمئناً توجه بیش از یک محقق را جلب می‌کند.»

گزارشهای داوری ماکسول دربارهٔ مقالات همکاران جوان، بعضی اوقات بصیرتهایی بیشتر از خود مقالات ابراز می‌داشت. گزارش او به ویلیام کروکس دربارهٔ تحقیق تخلیه‌های الکتریکی در گازها، به کنایه اشاراتی داشت که اگر دنبال می‌شد (اما نشد) به کشف الکترون می‌انجامید. بنا به اظهارات بروس هانت[2]، گزارش داوری ماکسول در سال ۱۸۷۹ به جرج فیتزجرالد[3] «احتمالاً به‌صورت آشکارترین

1. Johannes van der Waals 2. Bruce Hunt 3. George Fitzgerald

نشانهٔ مشخصه‌ای پابرجا می‌ماند که با آن نظریهٔ ماکسول از دست خودش به‌دست نسل جدید منتقل شد.» فیتزجرالد، که پیشتاز ماکسولی شد، از آن‌پس یک تازه‌وارد الکترومغناطیس بود، و او با حق‌شناسی توصیه‌های ماکسول را پذیرفت.

در سالهای ۱۸۵۰ به هنگامی که ماکسول در ابردین بود، در نامه‌ای نوشت، «مایلم بگویم این یک وفاق شخصی با دوستان من است که امیدوارم از یأسی که ناشی از تعمق و باریک‌بینی وجه ظاهری و بیرونی اشیاء با چشم انسانی است، رهایی یابیم. یا باید یک ماشین باشیم و چیزی جز پدیده‌ها نبینیم، یا بکوشیم انسان باشیم. احساس کنیم زندگی ما، آن‌طور که هست، درهم‌تنیده با زندگی دیگران است و با آنان خواه در زندگی یا مرگ تقویت می‌شود.»

مدتها بعد، او به یکی از دوستانش اظهار داشت: «یک فکر مطلوب» باور عرفانی، «در رابطهٔ جزءها به کل‌ها در جهان نامرئی همچون جهان مرئی نفوذ می‌کند، و در پس فردیّت که همراه زندگی شخصی ماست، اشتراک ژرفتری از هستی همچون احساس و عمل پنهان است»، کمبل حیرت می‌کند که ماکسول درحالی‌که «مدام می‌کوشد تا تصور و دریافتهای انسانی از قوانین پیشتاز فیزیک را به قطعیت بیشتری بکشاند، به‌نظر می‌رسد بنابر عادت در نوعی فرقهٔ عرفانی با ذات لایتناهی زندگی می‌کند.»

در سالهای ۱۸۵۰ و ۱۸۶۰ ماکسول کلاسهای شبانه برای طبقهٔ کارگر، ابتدا در کمبریج و سپس در ابردین و لندن دایر کرد. بعضی از زندگینامه‌نویسان اظهار کرده‌اند که رفتار ماکسول با صنعتگران، خدمتکاران و مستأجران در گلن‌لایر پدرسالارانه «فئودالی» بوده است. ج.گ. کرودر می‌گوید که این زندگینامه‌نویسان «با نقش او به‌عنوان ارباب یا مالک زمین در اواسط قرن نوزدهم متقاعد نمی‌شوند. نوگرایی علمی ماکسول، کهنگی جامعه‌شناسی و دین او ناهماهنگ به‌نظر می‌رسید. اما می‌توان متذکر شد که گرچه دیدگاه او دربارهٔ جامعه‌شناسی کهنه بود، اما تقریباً برتر از همهٔ معاصران علمی او بود. او دست‌کم دربارهٔ این مسائل فکر می‌کرد.»

دیدگاههای مذهبی ماکسول، دست‌کم تا حدی مرسوم و متعارف بود. مادر او پرسبیتری[1] و پدرش پیرو کلیسای اسقفی بود. او در کودکی در ادینبورو در مراسم هر دو کلیسا شرکت می‌کرد. او می‌توانست عبارات طویلی در کتاب مقدس را به‌خاطر آورد و نامه‌های او به کاترین مملو از ارجاعات و نقل‌قولهای مذهبی از کتاب مقدس بود ـ او به دعوتی برای پیوستن به سازمانی که مشتاق آشتی‌پذیری علم با دین بود، پاسخ رد داد با این توضیح: «من فکر می‌کنم نتایجی که هر فرد ضمن کوششهایی برای هماهنگی علمش و دینش به آن می‌رسد نباید به‌صورتی در نظر گرفته شود که مفهوم و اعتباری دارد مگر برای خود آن فرد و آن هم فقط مدتی، و نباید مهر جامعه بر آن زده شود.»

با وجود این، گاهگاه در نوشته‌های ماکسول چیزهایی دربارهٔ مذهب و بنیانهای متافیزیکی دیگر علمش آشکار می‌شود. او در سخنرانی معارفهٔ خود در ابردین می‌گوید:

1. Presbyterian

اما همچنان‌که علم فیزیکی پیشرفت می‌کند، ما بیشتر و بیشتر می‌بینیم که قوانین طبیعت صرفاً دلبخواهی، من‌عندی و نامربوط به قادر مطلق نیست، بلکه آن قوانین بخشهایی از سیستم جهانی است که در آن قدرت لایتناهی فقط برای آشکار کردن عقل کل پژوهش‌ناپذیر و حقیقت جاودانی به‌کار می‌آید. وقتی ما حقایق علم را امتحان می‌کنیم و درمی‌یابیم که ما فقط نمی‌توانیم بگوییم: «این‌چنین است» اما «این باید چنان باشد، زیرا در غیر این صورت با نخستین اصول حقیقت سازگار نخواهد بود»ـیا حتی وقتی فقط می‌توانیم بگوییم: «این باید بر طبق قیاس با طبیعت چنین باشد» باید فکر کنیم داریم چه چیز بزرگی می‌گوییم. وقتی جمله‌ای را بنابر قوانین خلقت ادا می‌کنیم، و می‌گوییم آنها حقیقی یا درست‌اند، در آن موقع با اصول عقل داوری کرده‌ایم. تعجبی ندارد که عقل آدمی در امور خداوند داوری کند، اندازه‌گیری، توزین و محاسبه کند و سرانجام بگوید: «من ادراک می‌کنم و من کشف کرده‌امـاین درست و حقیقی است.»

وقتی او هنوز در کمبریج بود، در مقاله‌ای نوشت: «خوشبخت کسی است که بتواند در کار امروز بخش مرتبطی از کار زندگی و تجسمی از کار ابدیت را تشخیص دهد. مبانی اعتمادش تغییرناپذیر باشد، زیرا به‌صورت بهره‌ای از نامتناهی ساخته شده است.» مدتها بعد، وقتی او در حال ارتحال بود به یکی از دوستانش گفت: «علاقهٔ من همیشه به اشیاء بیشتر از اشخاص است. من نمی‌توانم دربارهٔ شرایط عاجلی که چیزی را به منصهٔ ظهور رسانده است و بیشتر از آن دربارهٔ هر اراده‌ای که آنها را به حرکت درمی‌آورد فکر نکنم. احساس می‌کنم آنچه در من پدید آمده به‌وسیلهٔ آنچه خودم نامیده می‌شود، به‌وسیلهٔ چیزی بزرگتر از خودم، در من پدید آمده است. علاقهٔ من به اشیاء همواره مرا وادار می‌کند که به الهیات بیشتر از مردم‌شناسی توجه داشته باشم؛ حالات این خواست و اراده مرا گیج و سردرگم می‌کند.»

iv

مکانیک آماری

خلاصهٔ تاریخی

در سه بخش نخستین این کتاب، موضوع مطالب مکانیک، ترمودینامیک و الکترومغناطیس بود، که می‌توان آنها را با عنوان وسیعتر «ماکرو فیزیک»ـ یعنی فیزیک اجسام با اندازهٔ معمولی یا بزرگتر، گروه‌بندی کرد. بخش چهارم این کتاب برای نخستین‌بار موضوع بحث در قلمرو بسیار متفاوت «میکروفیزیک» است، که در اینجا به‌معنی فیزیک مولکولها، اتمها و ذرات زیراتمی به‌کار برده می‌شود. میکروفیزیک از هم‌اکنون موضوع عمدهٔ بحث این کتاب به‌ویژه در بخش ۴ و سپس در بخشهای ۶ (کوانتوم مکانیک)، ۷ (فیزیک هسته‌ای)، و ۸ (فیزیک ذرات) خواهد بود.

مولکولها (و اتمهایی که آنها دربر دارند) بسیار کوچک‌اند، از لحاظ تعداد، اتمها به‌طور باورنکردنی زیاد و حرکت آنها آشفته و بی‌نظم است، جدا کردن و مطالعهٔ انفرادی آنها بسیار دشوار است. اما جمعیت آنها را مانند جمعیت انسانها، می‌توان با روشهای آماری توصیف کرد. طرح کلی این روشها تمرکز بر میانگین است نه بر رفتار فردی. شرکت بیمه، میانگین مدت زندگی برای یک جمعیت مذکر شهری با درآمد معین را محاسبه می‌کند. فیزیکدان نیز میانگین انرژی برای جمعی از مولکولهای گاز، که حجم معینی در فشار معین را اشغال کرده است جستجو می‌کند. این روش برای امور شرکت بیمه به‌قدر کافی مفید و سودآور است، اما بهتر از آن برای فیزیکدانان مفید است، زیرا کثرت مولکولها بسیار بیشتر و پیشگویی دربارهٔ ویژگیهای میانگین آنها دقیقتر از پیشگویی دربارهٔ نفوس انسانی است. با تعیین مقدار انرژی، یا مقدار میانگینی از بعضی خواص مکانیکی دیگر مولکولها، فیزیکدانان آنچه را که گیبس «مکانیک آماری» می‌نامید، به‌کار می‌گیرند.

یگانه فصل در این بخش از کتاب، مردی را معرفی می‌کند که بهترین تعریف، و بیشترین سعی برای توسعه و دفاع از مکانیک آماری را کرده است. او لودویک بولتزمن بود، که مهمترین مقالات دربارهٔ مکانیک آماری را در سالهای ۱۸۷۰ نوشت. برای بولتزمن، مفهوم انتروپی مفیدترین بحثها در مکانیک آماری بود. او یک مبنای مولکولی برای قانون دوم ترمودینامیک یافت، و با الحاق انتروپی به بی‌نظمی مفهوم انتروپی را دست‌یافتنی کرد.

بولتزمن اساس کار خود را بر مبانی کارهای ماکسول، که او به‌نوبهٔ خود از کلازیوس الهام گرفته بود، بنا نهاد. در اواخر سالهای ۱۸۵۰ کلازیوس نشان داد چگونه مقادیر میانگین برای سرعتهای مولکولی و مسافتهای طی‌شدهٔ مولکولها بین برخورد با مولکولهای دیگر، محاسبه می‌شود. او تشخیص داده بود

که مولکولهای کثیری از آنها سرعتهای متفاوتی دارند که توزیع آنها بیشتر یا کمتر از میانگینشان است، اما دانش آمار فیزیکی او راهی برای تعیین این توزیع نیافت. ماکسول در دو مقاله‌ای که در سالهای ۱۸۵۸ و ۱۸۶۶ نوشت، قانون توزیع مولکولی نامعلوم را معین کرد و آن را به راههای متفاوت برای نظریهٔ رفتار گازها به‌کار گرفت. امتداد توسعهٔ مکانیک آماری از کلازیوس به ماکسول و سپس به بولتزمن و سرانجام تا گیبس ادامه یافت. رسالهٔ استادانه‌ای که گیبس در سال ۱۹۰۱ منتشر کرد، ساختاری رسمی به مکانیک آماری داد که امروزه هنوز همان ساختار را دارد، حتی پس از مداخلهٔ آشوبناکی که نظریهٔ کوانتوم فراهم آورد.

برای اعتقاد به مکانیک آماری، شخص باید به وجود مولکولها باور داشته باشد. در آغاز قرن بیست‌ویکم ترغیب به این باور لزومی نداشت، اما در قرن نوزدهم بولتزمن مخالفان متنفذ و سرسختی داشت که نمی‌توانستند واقعیت مولکولها را بپذیرند. بولتزمن مشتاقانه رقبایش را، دوستانه، یا غیردوستانه به مناظره می‌کشید اما آنها پایدارتر ماندند. سپس آلبرت اینشتین مناظره را پذیرفت و نشان داد که چگونه مولکولها واقعی و رؤیت‌پذیرند.

۱۳

مولکولها و انتروپی

لودویک بولتزمن

گشت و گذارها

ناآرامی داستان زندگی و کار او بود. لودویک بولتزمن جهان فیزیکی را به‌صورت آشفتگی مولکولی که دائماً در حال آشوب است، می‌دید، و خودش مانند مولکولها هرگز آرام و قرار نداشت. او در طی تقریباً چهل سال دورهٔ کاری‌اش، هفت بار از یک پست دانشگاهی به پست دیگر رفت. وقایع‌نگاری آنها به‌ترتیب تاریخی چنین است: دو سال (۶۹ـ۱۸۶۷) در دانشگاه وین به‌عنوان استادیار؛ چهار سال (۷۳ـ۱۸۶۹) استادیار فیزیک ریاضی دانشگاه گراتز[1]؛ بازگشت به وین به مدت سه سال (۷۶ـ۱۸۷۳) به‌عنوان استاد ریاضیات، بازگشت به گراتز به‌مدت چهارده سال (۹۰ـ۱۸۷۶) استاد فیزیک آزمایشگاهی، چهار سال (۹۴ـ۱۸۹۰) استاد فیزیک نظریه‌ای، در دانشگاه مونیخ؛ بازگشت مجدد به وین به مدت شش سال (۱۹۰۰ـ۱۸۹۴) این‌بار به‌عنوان استاد فیزیک نظریه‌ای؛ دو سال در لایپزیک (۱۹۰۲ـ۱۹۰۰) استاد فیزیک نظریه‌ای؛ و سومین و آخرین بازگشت به وین درکرسی استادی خودش که پس از دو سال هنوز اشغال نشده بود.

عزیمتهای او اجباری نبود. از اوایل سالهای ۱۸۷۰، بولتزمن در جهان علم مشهور بود و خواستاران بسیاری داشت. وزیر فرهنگ اتریش برای ترغیب بازگشت او از مونیخ به وین بیشترین حقوق هر استاد دانشگاه اتریشی در آن زمان را به او پیشنهاد کرد. دانشکده‌های رقابت‌کننده او را «نخستین نمایندهٔ بلامنازع» فیزیک نظریه‌ای توصیف می‌کردند که «در میان همهٔ ملتها شناخته شده» و «مهمترین فیزیکدان در آلمان و فراسوی آن است». در چنین بازارکاری، بولتزمن با وزارتخانه‌هایی که مناسب کارش بود، چانه‌زنی حادّی نداشت. در اواخر عمر، او پس از اتمام آخرین کارش، بلافاصله به مذاکره دربارهٔ

1. Graz

کار بعدی می‌پرداخت. مقامات وین تصمیم گرفتند که دیگر بس است: آنان درصدد برآمدند که برای سومین‌بار او را به وین بازگردانند به این شرط که او قول دهد هرگز به کار دیگری در خارج از اتریش نپردازد.

اما ناآرامیهای بولتزمن بیشتر از حقوق به چیزهای دیگر کشیده می‌شد، مثلاً او در مکاتباتش از کمّ‌وکیف شاگردان و آشپزی آلمانی شکایت می‌کرد. او مدام در جنب‌وجوش بود، زیرا قطبهای متضاد شخصیتش او را آرام نمی‌گذاشتند. او به مزاح می‌گفت این قطبیتها در شب تولدش بین سه‌شنبهٔ اعتراف و چهارشنبهٔ اوّل چلّهٔ روزه‌گیری معین شده است. تشخیص پزشکی امروزی این امر بی‌نظمی دو قطبی یا افسردگی جنون‌آساست. سلامتی او از راههای دیگری آسیب دیده بود ـ او دچار آسم، سردردهای میگرنی، ضعف بینایی و دردهای آنژینی بود ـ اما دوره‌های افسردگی او بسیار بدتر و سرانجام غیرقابل تحمل بود. سفر و جابه‌جا شدن تا حدی او را از یک افسردگی رهایی می‌بخشید، اما مانع دورهٔ افسردگی بعدی او نمی‌شد. مثلاً رفتن به لایپزیک، مدت کوتاهی برای او راحتی ایجاد کرد، اما کمتر از یک سال بار دیگر رنج بردن او آغاز شد و او را تا سر حد یک خودکشی ناموفق کشانید. وقتی بولتزمن درگیر مالیخولیای عمیق ناشی از افسردگیهایش نبود، در یک کلام گوهر درخشانی بود. او می‌گفت: «از سر تا پا نظریه‌پردازم، ایده‌ای که اندیشه‌ها و اعمال را اشغال کرده ایجاد و توسعهٔ نظریه است. برای بزرگ‌نمایی این ایده هرگونه فداکاری برای من خیلی مهم نیست، زیرا نظریه محتوای کل زندگی من است»، در میان نظریه‌پردازان قرن بیستم، او همتراز گیبس بود. تنها ماکسول در مرتبهٔ بالاتری جای داشت.

بولتزمن نه تنها از لحاظ نظریه‌هایش، بلکه احتمالاً به‌خاطر توانایی فوق‌العاده‌اش به‌عنوان یک معلم و سخنران شهرت داشت. لیز میتنر[1] که در جرگهٔ درسهای فیزیک نظری بولتزمن در وین شرکت کرده بود، درست پس از تغییر قرن (و بعدها که در اکتشاف شکاف اورانیم همکاری داشت) دربارهٔ بولتزمن چنین ارزیابی می‌کند:

> او یک دورهٔ درسی را می‌داد که چهار سال طول می‌کشید. این دورهٔ درسی شامل مکانیک، هیدرودینامیک، نظریهٔ کشسانی، الکترودینامیک و نظریهٔ مولکولی گازها بود. او معمولاً معادلات عمده را روی یک تخته‌سیاه بسیار بزرگ و درکنار آن روی دو تخته‌سیاه کوچکتر مراحل بینابینی را می‌نوشت. همه‌چیز به‌صورتی کاملاً سازمان‌یافته و روشن نوشته شده بود ـ غالباً برداشت من این بود که هرکسی می‌تواند همهٔ درس را از آنچه روی تخته‌سیاه نوشته شده بود بازسازی کند. پس از هر درس به نظرمان می‌رسید که گویی دنیای جدیدی در برابر چشمانمان گشوده شده است، چنین بود اشتیاقی که او به هنگام تدریس ابراز می‌کرد.

بولتزمن، با وجود تنشهای روانی، با شاگردانش گشاده‌رو و خودمانی بود و نسبت به نیازهای آنان احساس دلسوزی می‌کرد. فریتز هیزن اورل[2] که در دانشگاه وین جانشین او شد، می‌نویسد: «او هرگز اظهار برتری نمی‌کرد. هرکس آزادانه پرسشهایی را مطرح و حتی از او انتقاد می‌کرد. تنها بعداً شخص

1. Lise Meitner 2. Fritz Hasenörhl

درمی‌یافت که چقدر از او چیزهایی یاد گرفته است. او دیگران را با معیار بزرگی خودش نمی‌سنجید. او دربارهٔ دستاوردهای معمولیتر نیز تا آنجا که شواهدی از تلاش جدی و صادقانه داشت، با حسن نیت داوری می‌کرد.

ارنست ماخ، رقیب دائمی بولتزمن در مناظره بر سر اتم‌گرایی، به‌نظر می‌رسید که با همهٔ این بی‌پیرایگی از او رنجیده‌خاطر شده بود. ماخ در نامه‌ای می‌نویسد: «بولتزمن بدخواه و مغرض نیست، اما به‌طور باورنکردنی ساده و سطحی است. . . . او به‌سادگی نمی‌داند کجا باید استنکاف کند و جواب رد بدهد.» بولتزمن در دومین دورهٔ تصدی استادی‌اش در گراتز، انتصاب به جانشینی گوستاو کیرشهف در دانشگاه برلین را پذیرفت، اما بلافاصله آن را رد کرد. گفته می‌شود که یک عامل در این تصمیم‌گیری بیان تفرعن‌آمیز فرا هلمهلتز[1] بود: «استاد بولتزمن، من نگرانم که شما در اینجا در برلین احساس آسایش نخواهید کرد.»

بولتزمن با هنریت فن آیگنتلر[2]، بانوی جوان زیبا، با موهای بور و چشمان آبی، ازدواج کرد. گرچه این ازدواج در آن زمان کاملاً نامناسب به‌نظر می‌رسید، اما او نسبت به کار شوهرش قویاً علاقه‌مند شد و او را حمایت و تشویق می‌کرد. بولتزمن در نامهٔ پیشنهاد ازدواجش می‌نویسد: «به نظر من یک عشق راسخ، پایدار نمی‌ماند هرگاه همسر، شوهرش را درک نکند و به سعی و مجاهدتهای او علاقه‌مند نباشد، در این صورت به‌جای آنکه در کشاکش زندگی همراه او باشد، فقط خانه‌دارش خواهد بود.» این زوج پنج فرزند، سه دختر و دو پسر داشتند که تا حد پرستش آنها را دوست می‌داشتند. گویا بولتزمن با وجود اعتراضهای هنریت دو توله‌خرگوش برای الیزا جوانترین دخترش خرید. این حیوانات در اتاق مطالعهٔ بولتزمن، خارج از قلمرو هنریت می‌زیستند. زندگینامه‌نویسان بولتزمن بحث زیادی دربارهٔ هنریت نمی‌کنند، ولی ما می‌توانیم مطمئن باشیم که او زنی قوی و باتدبیر بود، صرف‌نظر از دلایل دیگر او با همسرش زیست و اختلال عصبی او را تحمل کرد.

اگر بولتزمن یک فیزیکدان موفق نمی‌شد، ممکن بود یک طنزنویس شود. او برعکس مارک تواین یک اروپایی بود که به امریکا سفر کرد. در طی تابستان ۱۹۰۵، او یک سلسله سخنرانیهایی در «دانشگاه برکلی» ایراد کرد و در بازگشت به وین در قطعه‌ای با عنوان «مسافرت یک استاد آلمانی به الدرادو» گزارشی نوشت دربارهٔ راه و رسم باورنکردنی کالیفرنیاییها. او می‌نویسد: «دانشگاه برکلی زیباترین جایی است که می‌توان تصور کرد. پارکی با وسعت یک کیلومتر مربع، با درختانی که می‌باید صدساله باشند. چه کسی می‌تواند با یک نگاه بگوید، شاید هم هزاران‌ساله باشند؟ در پارک بناهای جدید عالی وجود دارد که آشکارا هنوز بسیار کوچک‌اند، و بناهای جدیدی در دست ساختمان است، چون هم فضا و هم پول در دسترس است.»

اما این پارک، بهشت ضایع‌شده است: «برکلی ضد مشروب است: خریدن اندکی آبجو یا شراب اکیداً ممنوع است.» آب برکلی هم جایگزین خوبی نبود: «معدهٔ من عصیان می‌کرد» و چیز مؤثرتری می‌طلبید. . .*

1. Frau Helmholtz 2. Henriette von Aigentler

*. در اینجا دو پاراگراف که نامطلوب و زاید به‌نظر می‌رسید، ترجمه نشده است. م.

درسهایی از لگاریتم

پیش از آنکه به کار بولتزمن و همعصران بزرگش، کلازیوس، ماکسول و گیبس دربارهٔ مکانیک آماری بپردازیم، لازم می‌دانیم گریزی مختصر به قلمرو ریاضی دربارهٔ لگاریتمها و توابع نمایی بزنیم.

در $۱۰^{۲}(=۱۰۰)$ عدد ۲ را نما، یا توان می‌نامیم. این نشانه‌گذاری برای بیان اعداد بزرگ پرارزش است: نوشتن $۱۰^{۲۳}$ بسیار آسانتر از نوشتن ۱ و به دنبال آن ۲۳ صفر است. لازم نیست «نما» عدد ثابتی باشد؛ بلکه ممکن است متغیر باشد از جمله x در ۱۰^{x}. سهولت نماها از این لحاظ است که در عمل ضرب با هم جمع و در عمل تقسیم از هم تفریق می‌شوند، مثلاً،

$$۱۰^{۳} \times ۱۰^{۲} = ۱۰^{۳+۲} = ۱۰۰۰۰۰$$

و

$$\frac{۱۰^{۳}}{۱۰^{۲}} = ۱۰^{۳-۲} = ۱۰$$

گزاره‌های متناظر، با نماهای متغیر عبارت‌اند از

$$۱۰^{x} \times ۱۰^{y} = ۱۰^{x+y}$$

و

$$\frac{۱۰^{x}}{۱۰^{y}} = ۱۰^{x-y}$$

این ویژگیهای جبری، تبدیل عمل ضرب به جمع و عمل تقسیم به تفریق را ممکن می‌سازد. برای ضرب دو عدد به این طریق، ابتدا آنها را به توانهای ۱۰ تبدیل می‌کنیم ـ یعنی، مقادیر نماهای x و y در معادله‌های بالا را می‌یابیم؛ سپس با جمع x و y، به‌صورت $x+y$ حاصلضرب ۱۰^{x+y} یا با تفریق $x-y$ خارج قسمت ۱۰^{x-y} را به‌دست می‌آوریم.

توانهای ده (x و y) در این اعمال را «لگاریتمها (logs)یی بر مبنای ۱۰ می‌نامیم.» جدولهایی تهیه شده است که به‌آسانی می‌توانیم هر عددی را به توان ده و عمل معکوس آن تبدیل کنیم. تا پیش از ظهور ماشین‌حسابهای دستی، «جدولهای لگاریتم» وسیلهٔ اجتناب‌ناپذیر محاسبه بود. توابع لگاریتمی هنوز لوازم استانداردی در محاسبه‌های جبری است. نشانهٔ «log» دلالت بر توان ده دارد، مثلاً

$$\log ۱۰^{x} = x, \qquad \log ۱۰^{y} = y, \qquad \log ۱۰^{x+y} = x+y$$

مفهوم کلی لگاریتمها در اوایل قرن هفدهم به‌وسیلهٔ جان نپر[1] اسکاتلندی و مستقل از او به‌وسیلهٔ ژوست بورگی[2] سویسی اختراع شد. نپر و هنری بریگز[3] طرح محاسباتی را ابداع کردند که من آنها را دربارهٔ توانهای ده توصیف کردم.

عدد ده به‌عنوان یک «مبنا» (یا پایه) در محاسبات لگاریتمی آسان است، اما هر عدد دیگری را

1. John Napier 2. Joost Bürgi 3. Henry Briggs

به‌همان منظور می‌توان به‌کار گرفت. وقتی نیوتون هنوز دانشجوی دورهٔ لیسانس در کمبریج بود، کشف کرد که لگاریتمهای «طبیعی» بر یک مبنای خاص را که امروزه با نماد e نشان داده می‌شود، می‌توان با انباشتن جمله‌های اضافی در یک‌سری محاسبه کرد. فرمول نیوتون برای $\ln(1+x)$ با در نظر گرفتن اینکه "ln" یک لگاریتم طبیعی بر مبنای e را نشان می‌دهد، به‌صورت زیر است

$$\ln(1+x) = x - \frac{x^2}{2} + \frac{x^3}{3} - \frac{x^4}{4} + \cdots$$

که در آن "..." به این معنی است که این سری برای همیشه ادامه دارد (دو جملهٔ بعد $+\frac{x^5}{5}$ و $-\frac{x^6}{6}$ است.) اما هرگاه x کمتر از یک باشد، فقط چند جملهٔ اوّل ممکن است مورد نیاز باشد، زیرا جملات به‌قدری کوچک‌اند که می‌توان آنها را نادیده گرفت.

صرف‌نظر از مبنا ـ ۱۰، e، یا هر عدد دیگر ـ لگاریتمها ممکن است مثبت، منفی یا برابر با صفر باشند. قواعد زیر از لحاظ توجه داشتن (و تصریح کردن) شایان ارزش است. برای تابع لگاریتمی $\ln x$،

$$x > 1 \text{ هرگاه } \ln x > 0$$

$$x = 1 \text{ هرگاه } \ln x = 0$$

$$x < 1 \text{ هرگاه } \ln x < 0$$

داستان e

تابعهای شامل e در معادلات فیزیک فراگیر است. نمونه‌های اصلی آنها «تابعهای نمایی» e^x و e^{-x} است. هر دو آنها که در شکل ۱۳ـ۱ ترسیم شده‌اند نشان می‌دهد که e^x با افزایش x به‌سرعت افزایش می‌یابد و e^{-x} به‌سرعت کاهش می‌یابد («فزونی‌نمایی» عبارت رایجی است.) ثابت e غامض و گیج‌کننده به‌نظر می‌رسد، از کجا آمده است؟ چرا اهمیت دارد؟

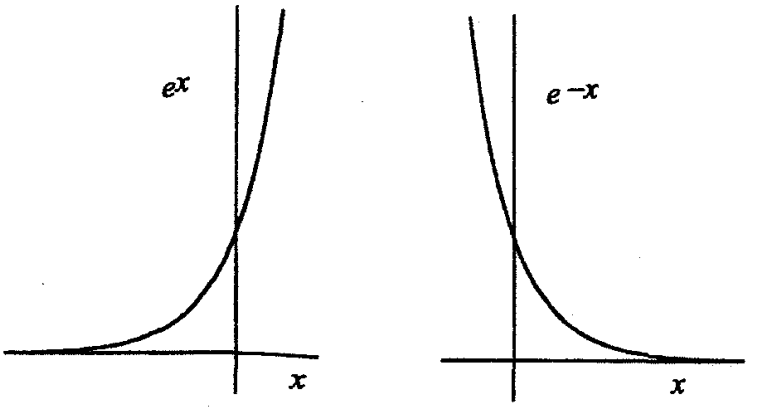
ریاضیدانان e را در پانتئون اعداد اصلی‌شان، همراه با ۰، ۱، π و i منظور می‌کنند. به‌کار گرفتن e به‌عنوان یک مبنا برای لگاریتمهای طبیعی به قرن هفدهم بازمی‌گردد. الی ماثور[1] گمان می‌برد که تعریف e تا حدی از قدیم، از فرمولهایی که رباخواران هزاران سال به‌کار می‌برده‌اند، توسعه و تکامل یافته است. یکی از اینها محاسبهٔ تراز B از سرمایهٔ P با نرخ بهرهٔ r برای یک دورهٔ t سال مرکب از nبار در یک سال است،

$$B = P\left(1 + \frac{r}{100n}\right)^{nt} \qquad (1)$$

مثلاً، اگر سرمایه‌گذاری ما دلار$P = 1000$ با نرخ بهرهٔ $r = 5\%$ با بهرهٔ مرکب چهاربار در سال ($n = 4$) باشد تراز ما پس از سال $t = 20$ عبارت خواهد بود از

$$B = (\text{دلار } 1000)\left(1 + \frac{5}{(100)(4)}\right)^{(4)(20)} = \text{دلار } 2701{,}48$$

1. Eli Maor



شکل ۱۳ـ۱ نمونهٔ تابعهای نمایی: زیاد شدن e^x و کاهش یافتن e^{-x}

معادلهٔ (۱) بعضی ویژگیهای شگفت‌انگیزی دارد که ممکن است به‌خوبی مورد توجه ریاضیدانان اوایل قرن هفدهم بوده باشد. فرض کنید برای ساده کردن این فرمول سرمایه را یک دلار $p = ۱$، دورهٔ زمان را یک سال $t = ۱$، و نرخ بهره را $r = ٪۱۰۰$ بگیریم (در اینجا از واقعیت دور می‌شویم)، فرمول به‌صورت $\left(۱ + \frac{۱}{n}\right)^n$ ساده می‌شود. ریاضیدان قرن هفدهم می‌باید بر طبق این دستورعمل به‌ویژه وقتی مقدار n بزرگتر و بزرگتر شود، خود را با محاسبهٔ پرزحمتی درگیر می‌کرده است. (امروزه با استفاده از کلید y^x یک ماشین‌حساب توانها به‌آسانی محاسبه می‌شود.) در جدول ۱۳ـ۱ فهرست تعدادی از نتایج ملاحظه می‌شود. روند نتایج آشکار است: اثر ازدیاد n، کوچکتر می‌شود وقتی n بزرگتر شود، و وقتی $\left(۱ + \frac{۱}{n}\right)^n$ به مقدار معینی نزدیک شود، اگر شش رقم کافی باشد ۲٫۷۱۸۲۸، است. (برای دقت بیشتر n را بزرگتر کنید.) وقتی مقدار n به‌سوی بی‌نهایت میل کند به «حدّی» می‌رسد که تعریف ریاضی عدد e است. ریاضیدانان این تعریف را به‌صورت زیر می‌نویسند،

$$e = \lim_{n\to\infty} \left(۱ + \frac{۱}{n}\right)^n \qquad (۲)$$

فیزیکدانان، شیمیدانان، مهندسان و اقتصاددانان کاربردهای بسیاری برای تابعهای نمایی انواع e^x و e^{-x} یافته‌اند. معدودی از آنها عبارت‌اند از:

۱. وقتی مادهٔ رادیواکتیوی واپاشیده می‌شود، جرم آن بنابر رابطهٔ زیر به‌طور نمایی کاهش می‌یابد

$$m = m_۰ e^{-at}$$

که در آن m جرم در زمان t، $m_۰$ جرم اولیه در زمان $t = ۰$، و a ثابتی است که به نرخ واپاشی مادهٔ رادیواکتیو بستگی دارد. عامل نمایی e^{-at} به‌سرعت کاهش می‌یابد (a بزرگ است) برای مواد رادیواکتیوی با عمر کوتاه، و به‌آهستگی کاهش می‌یابد (a کوچک است) برای موادی با عمر طولانی.

۲. یک شیء داغ با دمای اولیهٔ $T_۰$ در محیطی نگه داشته می‌شود که در دمای ثابت پایینتر $T_۱$ با

جدول ۱۳ـ۱

n	$(۱+\frac{۱}{n})^n$
۱	۲
۲	۲٫۲۵
۵	۲٫۴۸۸۳۲
۱۰	۲٫۵۹۳۷۴
۱۰۰	۲٫۷۰۴۸۱
۱۰۰۰۰	۲٫۷۱۸۱۵
۱۰۰۰۰۰۰	۲٫۷۱۸۲۸
۱۰۰۰۰۰۰۰	۲٫۷۱۸۲۸

آهنگ حاصل از رابطهٔ زیر سرد می‌شود،

$$T = T_۱ + (T_۰ - T_۱)e^{-at}$$

۳. وقتی باریکهٔ نوری از یک ملأ مادی می‌گذرد، شدت آن به‌طور نمایی بر طبق رابطهٔ زیر کاهش می‌یابد

$$I = I_۰ e^{-ax}$$

که در آن I شدت باریکهٔ نور پس از عبور از ضخامت x ملأ، $I_۰$ شدت باریکهٔ فرودی، و a ثابتی است که به شفافیت ملأ بستگی دارد.

۴. انفجارها معمولاً با سرعتهای افزایشی نمایی به‌وقوع می‌پیوندند که با عاملی به‌صورت e^{at} بیان می‌شود که در آن a ثابت مثبتی است وابسته به مکانیسمهای فیزیکی و شیمیایی انفجار.

۵. اگر بانکی متقاعد شده باشد که بهرهٔ مرکب را به‌طور سالانه، شش ماه یک‌بار یا سه ماه یک‌بار بلکه لحظه به لحظه بپردازد، تراز B یک فرد به‌طور نمایی بر طبق رابطهٔ زیر افزایش می‌یابد

$$B = Pe^{rt/۱۰۰}$$

که در آن P سرمایه، r نرخ بهرهٔ سالانه، و t زمان برحسب سال است.

پاره‌سنگها و مولکولها

داستان مکانیک آماری آغازی دور از ذهن دارد با عنوانی که دانشمندان از زمان گالیله به بعد شیفتهٔ آن شده‌اند و آن حلقه‌های زحل است. در قرن هجدهم، پیر سیمون لاپلاس نظریهٔ مکانیکی حلقه را بسط

داد و حدس زد که این حلقه‌ها پایداریشان را مدیون بی‌نظمی‌های توزیع جرمی‌اند. در سال ۱۸۵۵ موضوع جایزهٔ ریاضی دوسالانهٔ کمبریج «حرکات حلقه‌های زحل» بود. ممتحنان جایزه، از داوطلبان می‌خواستند تا کار لاپلاس را ارزیابی و پایداری دینامیکی مدل حلقه‌ها را به‌صورت جامد، سیال، یا «توده‌هایی از ماده» که با هم انسجام متقابل ندارند، معین کنند. ماکسول وارد رقابت شد، و وقتی در ابردین بود، بسیاری از اوقاتش مصروف این کار می‌شد.

او ابتدا مدلهای جامد و سیال را کنارگذاشت و نشان داد که آنها پایدار یا آن‌طورکه مشاهده می‌شود مسطح نیستند. سپس او به مدل باقی‌مانده روی آورد و آن را به‌شکل «پاره‌سنگهایی در حال پرواز» در مدارهایی دور این سیاره تصورکرد. او در نامه‌ای به تامسن نوشت که او آن مدل را به‌صورتی می‌بیند که «چینهٔ بزرگی از خاکروبهٔ از اجزای متفاوت و درهم‌وبرهم، در حال جنب‌وجوش حول زحل با هم برخورد می‌کنند. بدون آنکه خود به خود سازش و آرامشی داشته باشند، تا آنکه آن چینه به‌تدریج فرو می‌ریزد و با یک حلقهٔ آتشین حول استوای زحل را می‌سابد، و ناحیهٔ وسیعی از گدازه، غبار و تخته‌سنگهایی در هر طرف به‌جا می‌گذارد و در طرف غربی هر تپه با صخره‌های داغ، خمیری می‌شود... به‌طوری که من می‌باید به اهالی زحلی توصیه کنم که وقتی می‌خواهند از این «خط» بگذرند از تونل عبورکنند.»

در این آشفتگی «خاکروبهٔ درهم‌وبرهم و در حال جنب‌وجوش» ماکسول راه‌حلی برای مسئله یافت که سزاوار دریافت جایزه شد.

این موفقیت در آشفتگی مداری و تصادم صخره‌ها الهام‌بخش ماکسول شد، تا دربارهٔ آشوب و بی‌نظمی سرعت و تصادم مولکولها در حالت گازی بیندیشد. در آغاز، این مسئله از لحاظ تحلیل نظریه‌ای بسیار پیچیده به‌نظر می‌رسید. اما در سال ۱۸۵۹ درست در زمانی که او مقالهٔ مربوط به حلقه‌ها را کامل می‌کرد، خواندن دو مقاله از کلازیوس موجب امیدواری او شد. کلازیوس با ایجاد محاسباتی برای خاصیت دینامیکی میانگین به‌ویژه مقدار میانگین v^2 یعنی مربع سرعت مولکولی، نظمی برای بی‌نظمی مولکولی پدید آورده بود. کلازیوس این کمیت میانگین را به‌صورت $\overline{v^2}$ می‌نوشت و آن را در معادلهٔ

$$PV = \frac{1}{3}Nm\overline{v^2} \qquad (3)$$

برای محاسبهٔ فشار P، تولید شده از N مولکول با جرم m که به‌طورکاتوره‌ای دیواره‌های ظرفی با حجم V را بمباران می‌کنند به‌کار می‌گرفت.

تلقی کلازیوس این بود که مولکولها با سرعتهای بسیار زیاد حرکت می‌کنند، اما به‌علت برخوردهای لاینقطع آنها با یکدیگر مسیرهای فوق‌العاده پُرپیچ وخمی را طی می‌کنند. با توجه به همهٔ این انحرافات مدت زیادی طول می‌کشد تا مولکولهای گاز حتی چند متری را طی کنند. ماکسول آن را به‌صورت پرسشی این‌گونه مطرح می‌کند: «اگر شما ۱۷ مایل در دقیقه بروید و کلاً مسیر جدیدی را [پس از هر برخورد] ۱,۷۰۰,۰۰۰,۰۰۰ بار در ثانیه اتخاذ کنید، پس از یک ساعت کجا خواهید بود؟

نخستین مقالهٔ ماکسول دربارهٔ دینامیک مولکولها در گازها، در سال ۱۸۶۰ گام بزرگی فراتر از روش کلازیوس بود. ماکسول نشان داد که کلازیوس تشخیص داده بود، ولی در نظریه‌اش نگنجانده بود که مولکولهای گاز در دمای معینی سرعتهای بسیار متفاوتی دارند که گسترهٔ وسیعی از بالا و پایین مقدار میانگین را شامل می‌شود. استدلال او به‌شدت انتزاعی بود و معاصرانش را که بیشتر در جستجوی جزئیات مکانیکی بودند گیج می‌کرد. ماکسول بعداً در زمینهٔ متفاوتی می‌گفت او درصدد «پرس‌وجوهای شخصی دربارهٔ مولکولها که برای من فقط زحمت‌آفرینند» نیست.

ماکسول از خوانندگانش می‌خواست که به تعداد مولکولهای dN با مؤلفه‌های سرعتی توجه کنند که درگستره‌های باریک خاص، بین v_x و $v_x + dv_x$، v_y و $v_y + dv_y$، v_z و $v_z + dv_z$ جای دارند. شمارش آن بستگی دارد به N تعداد کل مولکولها؛ به dv_x، dv_y و dv_z؛ و به سه تابع v_x، v_y و v_z که آنها را $f(v_x)$، $f(v_y)$ و $f(v_z)$ می‌نامیم. این توابع بیان می‌کنند که کدام مؤلفه‌های سرعت مهم و کدام مهم نیست. مثلاً اگر $v_x = ۱۰$ متر بر ثانیه محتمل نباشد درحالی‌که $v_x = ۵۰۰$ متر بر ثانیه محتمل باشد، در این صورت $f(v_x)$ برای مقدار دوم v_x بزرگتر از $f(v_x)$ برای مقدار اول است. معادلهٔ ماکسول برای dN به‌صورت زیر بود

$$dN = Nf(v_x)f(v_y)f(v_z)dv_xdv_ydv_z \qquad (۴)$$

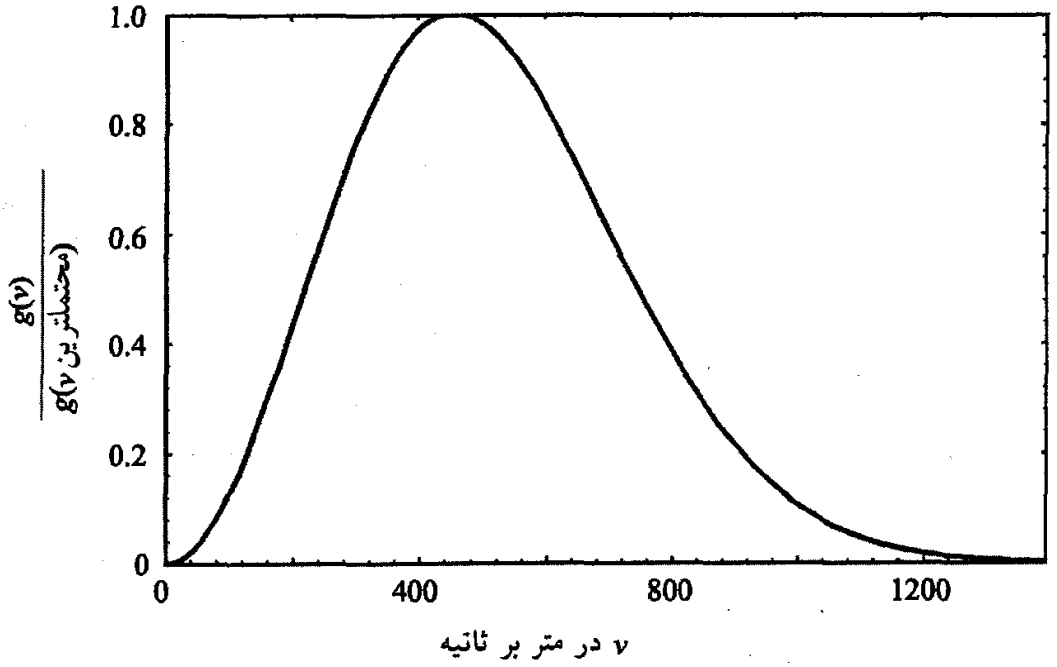
ماکسول استدلال می‌کرد که سه جهت x، y و z که برای ایجاد مؤلفه‌های سرعت v_x، v_y و v_z در یک گاز ایده‌آل به‌کار گرفته می‌شوند، باید همگی ارزش و اعتبار یکسان داشته باشند، دلیلی وجود ندارد که یک جهت نسبت به جهات دیگر ارجحیت داشته باشد. بنابراین سه تابع $f(v_x)$، $f(v_y)$ و $f(v_z)$ می‌باید همگی شکل ریاضی یکسان داشته باشند. او از این استنتاج و شرط بیشتری که تعداد کل مولکولهای N محدود است، رابطهٔ زیر را استخراج کرد

$$f(v_x) = \frac{N}{\alpha\sqrt{\pi}}e^{-v_x^2/\alpha^2} \qquad (۵)$$

که در آن پارامتر α به دما و جرم مولکولها بستگی دارد. این یک نوع برداشت از «تابع توزیع» ماکسول است. یک نتیجهٔ مفیدتر بیان توزیع سرعت v، صرف‌نظر از جهت، از این رابطه حاصل می‌شود

$$g(v) = \frac{۴N}{\alpha^3\sqrt{\pi}}v^2e^{-v^2/\alpha^2} \qquad (۶)$$

تابع، $g(v)$، تابع توزیع دیگر، اهمیت نسبی سرعت v را ارزیابی می‌کند. معنی فیزیکی آن در شکل ۱۳ـ۲ بیان می‌شود. در این شکل نمودار $g(v)$ برای سرعتهای مولکولهای کربن دیوکسید از ۰ تا ۱۴۰۰ متر بر ثانیه، در دمای مقیاس مطلق ۵۰۰(۲۲۷°C) ترسیم شده است. به‌طوری که از این نمودار معلوم می‌شود، سرعتهای بسیار زیاد و بسیار کم، نامحتمل و بیشترین سرعت محتمل در نقطهٔ ماکزیمم منحنی در ۴۳۰ متر بر ثانیه (= ۱۶ مایل در دقیقه) است.



شکل ۱۳ـ۲ تابع توزیع $g(v)$ ماکسول. این نمودار با تقسیم هر مقدار از $g(v)$ بر مقدار به‌دست آمده v با محتملترین مقدار مفروض، «نرمال» شده است.

ماکسول در مقالهٔ ۱۸۶۰ خود فقط یک صفحه لازم داشت تا معادله‌های بنیادی (۵) و (۶) را به‌صورت راه‌حلهایی استخراج کند، برای قضیهٔ «یافتن تعداد میانگین ذراتی (مولکولهایی) که سرعتهایشان پس از تعداد برخوردهای بسیار زیاد میان تعداد بسیار زیاد ذرات همانند، بین حدود معینی جای داشته باشند.» شیوهٔ بیان ـ محاسبهٔ یک «میانگین» برای «تعداد زیادی» از مولکولها و برخوردها ـ یک توصیف صرفاً آماری را تجویز می‌کند، و این همان چیزی است که ماکسول در تابعهای توزیع خود عرضه می‌کند.

بنابراین، ماکسول بدون «کاوشهای شخصی» دربارهٔ پیشینه‌های انفرادی مولکولها، در عوض رفتار آماری آنها را توصیف می‌کرد، و او در مقالهٔ ۱۸۶۰ خود نشان داد که این موضوع کاربردهای فراوانی دارد. از لحاظ آماری بگوییم، او توانست محاسباتی برای ویسکوزیته، توانایی رسانایی گرمایی، آهنگ برخورد مولکولی، و آهنگ پخشیدگی یک گاز، به‌عمل آورد. ف. اوریت می‌نویسد: «این آغاز عصر جدیدی در علم فیزیک بود. روشهای آماری مدتهای طولانی برای تحلیل مشاهدات هم در علم فیزیک و هم در علوم اجتماعی به‌کار گرفته می‌شد، اما اندیشه‌های ماکسول دربارهٔ توصیف فرایندهای فیزیکی واقعی، با یک تابع آماری [مثلاً $g(v)$ در معادلهٔ (۶)] امری فوق‌العاده بدیع بود.»

نظریهٔ ماکسول به‌طور شگفت‌انگیزی پیشگویی می‌کرد که پارامتر ویسکوزیته برای گازها می‌باید مستقل از فشار گاز باشد. ماکسول می‌نویسد: «چنین نظریه‌ای از یک نظریهٔ ریاضی بسیار تکان‌دهنده‌تر است و تنها آزمایشی که در این‌باره با آن مواجه بودم، به‌نظر نمی‌رسید که مؤید آن موضوع باشد.» اما اعتقادات راسخ او به نظریه بود. چند سال بعد، با مساعدت همسرش کاترین موفقیت حاصل شد و ماکسول عدم وابستگی به فشار را با آزمایش نشان داد، و بار دیگر جامعهٔ علمی تحت تأثیر اعجاز ماکسول قرار گرفت.

اما این نظریه نتوانست بعضی از داده‌های معماگونه دربارهٔ گرماهای ویژه را نیز توضیح دهد. گرمای ویژهٔ مقدار گرمای لازمی است که دمای یک واحد، مثلاً یک کیلوگرم، از ماده‌ای را یک درجه بالا برد. اندازه‌گیریهای گرماهای ویژه را می‌توان در شرایط فشار-ثابت و حجم-ثابت انجام داد که همواره اولی بیشتر از دومی است.

ماکسول همچون بسیاری از معاصرانش، باور داشت که گرما در اختیار حرکت مولکولی است، و بنابراین گرمای ویژه بازتاب شیوه‌های حرکت مولکولی است که با گرم شدن فعال می‌شوند. نظریهٔ ماکسول مؤید اصلی به‌نام «قضیهٔ همپارشی (equipartition theorem)» بود که تأکید می‌کند انرژی گرمایی یک ماده در میان همهٔ شیوه‌های حرکت متعلق به مولکولها به‌طور مساوی تقسیم می‌شود. با در نظر گرفتن تعداد شیوه‌ها در مولکول، نظریه می‌توانست گرمای ویژهٔ فشار-ثابت و حجم-ثابت و نسبت بین آن‌دو را محاسبه کند. اگر مولکولها کروی باشند، می‌توانند در خطوط مستقیم و همچنین به‌طور چرخشی حرکت کنند. با فرض سه مؤلفهٔ (x، y و z) برای هر دو حرکت مستقیم خط و چرخشی، حساب قضیهٔ همپارشی به شش می‌رسد و پیشگویی برای نسبت گرما-ویژگی ۱٫۳۳۳ می‌شود. میانگین مشاهده‌شده برای چند گاز ۱٫۴۰۸ است.

ماکسول هرگز این مسئله را حل نکرد، و در سراسر سالهای ۱۸۷۰ او را آزار می‌داد. سرانجام توصیهٔ او این بود که این مسئله «دقیقاً ناآگاهی آگاهانه» در نظر گرفته شود. پیش‌بینی می‌کرد که این «مقدمهٔ پیشرفت واقعی در شناخت و دانش ماست.» واقعاً چنین بود. نظریهٔ گرما-ویژگی به‌صورت یک معمّا به مدت بیست سال دیگر باقی ماند، تا سرانجام نظریهٔ کوانتوم نقاط ضعف مرموز قضیهٔ همپارشی را توضیح داد.

شیطانک(های) ماکسول

روش آماری درِ دیگری را برای ماکسول، دربارهٔ قلمرو قانون دوّم ترمودینامیک، گشود. او به راه و رسم رایج خودش، با تصورکردن طرح عجیب و غریبی برای نقض کردن اصل متعارف قانون دوم که همیشه گرما از داغی به سردی می‌رود، خودش را سرگرم می‌کرد. او در نامه‌ای که به پ.گ. تیت نوشت: «فرض کنیم A و B دو ظرفی باشند که با یک دیافراگم تقسیم شده‌اند و فرض کنیم آنها شامل مولکولهای کشسانی در حالت آشفتگی باشند که با یکدیگر و دیوارهٔ ظرف برخورد می‌کنند. باز هم فرض کنیم تعداد ذرات در A و B برابر باشند، اما ذرات موجود در A بیشترین انرژی حرکتی را داشته باشند [یعنی، A در دمایی بالاتر از دمای B باشد].» اگر سوراخ کوچکی در دیافراگم باشد، مولکولها از آن می‌گذرند و انرژی‌شان را از ظرفی به ظرف دیگر منتقل می‌کنند.

«اکنون تصورکنیم موجود خاصی با وارسی ساده‌ای مسیرها و سرعتهای همهٔ مولکولها را به‌آسانی تشخیص می‌دهد، اما هیچ کاری نمی‌تواند بکند مگر آنکه با تیغهٔ بدون جرمی سوراخ دیافراگم را باز و بسته کند. وظیفهٔ این «موجود» این است که سوراخ را برای عبور مولکولها از B به A باز کند، هرگاه

سرعت مولکولهای B بیشتر از سرعت میانگین A باشد، و از A به B هرگاه سرعت مولکولهای A کمتر از سرعت میانگین B باشد، این «موجود» عبور و مرور مولکولی دو جانبه را متعادل نگه می‌دارد، به‌طوری که تعداد مولکولها در A و B تغییر نمی‌کند. نتیجهٔ این ترفند این است که مولکولها در A دارای انرژی بیشتر از مقدار اولیهٔ آنها و مولکولها در B انرژی کمتری خواهند داشت. این امر منجر به جهت نادرست جریان گرما، و نقض قانون دوم می‌شود: «سیستم داغ، داغتر و سیستم سرد، سردتر خواهد شد و با وجود این هیچ کاری انجام نشده است، تنها عقل یک موجود بسیار دقیق و پنجهٔ طلایی او به‌کارگرفته شده است.» وقتی تیت دربارهٔ «موجود» مستعد ماکسول با تامسن گفتگو کرد، تامسن آن را به‌منزلهٔ «نوعی شیطانک» دانست.

آیا ماکسول واقعاً قانون دوم را نقض کرده بود؟ او مدعی چنین فتحی نبود: ماکسول استدلال می‌کند که اگر می‌توانستیم شیطانکی طراحی کنیم که عبور و مرور مولکولی را بدون انجام کار کنترل کند، در این صورت واقعاً می‌توانستیم قانون دوم را نقض کنیم. نتیجه‌گیری او این است که «فقط باید نگوییم نمی‌توانیم، تبحر و هوشمندی کافی نداریم.» شیطانک درکارش موفق نمی‌شود، و به‌طور میانگین‌ـآماری سخن بگوییم‌ـمولکولهای داغی که از سوراخ می‌گذرند از A (جایی که دما بیشتر است) به B بیشتر از مولکولهای داغی است که از B به A می‌رود. این جهت نرمال جریان گرماست که با قانون دوم مجاز شمرده می‌شود. پیام ماکسول این است که اساس قانون دوم رفتار آماری تعداد عظیمی از مولکولهاست و هیچ نوع ابتکار فنی نمی‌تواند این الگوهای آماری را معکوس کند. در سال ۱۸۷۰ او این موضوع را برای جان استروت (بعدها لرد رایلی[1]) چنین مطرح می‌کند: «قانون دوم ترمودینامیک به‌همان قدر درست و معتبر است که بگوییم اگر یک لیوان از آب را در دریا بریزیم، ممکن نیست بتوانیم آب همان لیوان را بار دیگر به‌دست آوریم.»

شرح و تفسیر شیطانک ماکسول تا حدی موجب اشتغال ذهنی در میان فیزیکدانان شده است. شیطانک موضوع مقالات بی‌شمار و حتی چند کتاب بوده است. بعضی از این نویسندگان ظاهراً به هوشمندی ماکسول اعتماد نکرده‌اند و کوشیده‌اند تا شیطانک بهتری اختراع کنند. آنان هوشمند بوده‌اند اما نه به‌قدر کافی: ماکسول و قانون دوم مورد تأیید و پشتیبانی قرارگرفته‌اند.

انتروپی و بی‌نظمی

اکنون به نقش بولتزمن در توسعهٔ مکانیک آماری، به حمایت و تمدید فراوان او از کارهایی می‌رسیم که قبلاً به‌وسیلهٔ کلازیوس و ماکسول انجام شده بود. نخستین سهم عمدهٔ بولتزمن، در اواخر سالهای ۱۸۶۰، تعریض مفهوم تابع توزیع مولکولی ماکسول بود. او اثبات کرد عامل تعیین احتمال سیستمی از مولکولها که جمع کل معینی از انرژی E (جنبشی‌ـپتانسیل) دارد، متناسب با e^{-hE} است، که در آن h پارامتری است که فقط به دما بستگی دارد. این «عامل بولتزمن» جزئی ثابت در همه نوع

1. John Strutt (Lord Rayleigh)

محاسبه‌هایی شده است که به توزیعهای مولکولی بستگی دارند، نه‌تنها برای فیزیکدانان، بلکه برای شیمیدانان، زیست‌شناسان، زمین‌شناسان و هواشناسان نیز صادق است.

بولتزمن می‌پنداشت که عامل آماری‌اش در «فضای فاز» وسیعی، همهٔ مختصه‌ها و همهٔ مؤلفه‌های سرعتهای موجود در سیستم را شامل می‌شود. هر نقطه در فضای فاز، حالت ممکنی از سیستم را برحسب مکانهای مولکولها و سرعتهای آنها، نشان می‌دهد. وقتی سیستم به‌تدریج متکامل می‌شود، مسیری از یکی از این نقاط به نقطهٔ دیگر را دنبال می‌کند.

بولتزمن نظریهٔ آماری‌اش را با این تصور ساخت که عنصر کوچکی، به‌نام dw، بر یک نقطه در فضای فاز متمرکز است، و سپس فرض کرد که احتمال dP برای سیستم در حالتی که با نقاط درون یک عنصر ارائه شود، متناسب با عامل آماری e^{-hE} ضرب در عنصر dw باشد:

$$dP \propto e^{-hE\,dw}$$

یا

$$dP = Ae^{-hE\,dw} \qquad (۷)$$

که در آن A یک ثابت تناسب است. احتمالات همیشه به‌طوری تعریف می‌شوند که وقتی آنها برای تمام رویدادهای ممکن جمع شوند بالغ بر یک می‌شود. با جمع کردن dPهای فوق به‌وسیلهٔ انتگرال‌گیری، خواهیم داشت

$$\int dP = ۱$$

بنابراین انتگرال‌گیری دو طرف معادلهٔ (۷)،

$$\int dP = \int Ae^{-hE}dw = A\int e^{-hE}dw$$

منجر می‌شود به

$$۱ = A\int e^{-hE}dw$$

که با آن ثابت تناسب A معین می‌شود،

$$A = \frac{۱}{\int e^{-hE}dw} \qquad (۸)$$

با جانشین کردن آن در معادلهٔ (۷) خواهیم داشت

$$dP = \frac{e^{-hE}dw}{\int e^{-hE}dw} \qquad (۹)$$

این یک توصیف تجریدی است، اما مفید نیز هست. اگر ما بتوانیم هرکمیت فیزیکی، مثلاً انتروپی S را به‌صورت تابعی از مختصه‌های مولکولی و سرعتها بیان کنیم، در این صورت می‌توانیم به‌طور آماری انتروپی میانگین $\overline{S}$ را فقط با ضرب کردن هر مقدار ممکن از S در احتمال متناظر dP آن و جمع کردن به‌وسیلهٔ یک انتگرال‌گیری، محاسبه کنیم،

$$\overline{S} = \int S dP = \frac{\int S e^{-hE} dw}{\int e^{-hE} dw} \qquad (۱۰)$$

تا اینجا، برداشت آماری بولتزمن تنها با توجه به فرایندهای بازگشت‌پذیر محدود می‌شد. در مقالهٔ طولانی و دشواری که در سال ۱۸۷۲ منتشر شد، بولتزمن با ایجاد نظریهٔ مولکولی فرایندهای بازگشت‌ناپذیر، پیشتر رفت. او در آغاز به ارائهٔ یک تابع توزیع سرعت مولکولی f پرداخت که شبیه به تابع ماکسول با همان نام و نماد بود، اما از جنبهٔ مهمی متفاوت بود که تابع f بولتزمن می‌توانست توسعه و تکامل یابد: می‌توانست با زمان تغییر کند.

بولتزمن قویاً معتقد بود که برخوردهای آشفته و بی‌نظم میان مولکولها پاسخگوی تغییرات بازگشت‌ناپذیر در سیستمهای گازی‌اند. او با استفاده از یک شیوهٔ ریاضی که قبلاً ماکسول ایجاد کرده بود، معادلهٔ پیچیده‌ای استخراج کرد که مبیّن آهنگ تغییر در f حاصل از برخوردهای مولکولی است. معادله‌ای که امروزه به‌عنوان معادلهٔ بولتزمن معروف است، دو گزارهٔ بزرگ را توجیه می‌کند. نخست آنکه، این معادله نشان می‌دهد وقتی f شکل ماکسولی موجود در معادلهٔ (۵) را دارد آهنگ تغییر آن برابر صفر است. در این مورد، تابع ماکسولی یک توزیع ایستا یا تعادلی را بیان می‌کند.

دوم آنکه معادلهٔ بولتزمن این استنتاج را توجیه می‌کند که تابع توزیع ماکسول فقط یک تابع ممکن در تعادل است. برای نشان دادن این نکته، او یک تابع وابسته به زمان را ارائه کرد، که بعداً آن را با علامت H مشخص می‌کرد.

$$H = \int (f \ln f) d\delta \qquad (۱۱)$$

که در آن $d\delta = dv_x dv_y dv_z$. تابع H، در مشارکت با معادلهٔ بولتزمن، منجر به «قضیهٔ H» بولتزمن شد که بر طبق آن H هرگز نمی‌تواند در جهت افزایش بسط یابد: آهنگ تغییر در H، یعنی مشتق $\frac{dH}{dt}$، یا منفی (کاهش H) یا صفر (در تعادل) است.

$$\frac{dH}{dt} \leq ۰ \qquad (۱۲)$$

بنابراین تابع H که سیر تکاملی بازگشت‌ناپذیری یک سیستم گازی را دنبال می‌کند، همواره کاهش می‌یابد تا تغییر سیستم در تعادل متوقف شود، و در این حال بولتزمن می‌تواند اثبات کند که f لزوماً شکل ماکسولی دارد.

وقتی تابع H بولتزمن به‌کار می‌افتد، آنتروپی یک سیستم منزوی نیز بر طبق قانون دوم به‌کار می‌افتد، با این تفاوت که H همیشه کاهش می‌یابد، درحالی‌که آنتروپی S همیشه افزایش می‌یابد. ما می‌توانیم برای این تفاوت با اتصال یک علامت منفی به H به این نتیجه برسیم که

$$S \propto -H \qquad (۱۳)$$

به این طریق، استدلال استادانهٔ بولتزمن یک همانندی مولکولی هم برای مفهوم انتروپی و هم برای قانون دوم فراهم می‌کند.

ولی یک مشکل ظاهری وجود داشت. چنین به‌نظر می‌رسید که استدلال بولتزمن کلاً ماهیت مکانیکی دارد و درنهایت دقیقاً متکی بر معادلات نیوتون یا معادل آنهاست. یکی از همکاران وینی او به‌نام ژوزف لوشمیت[1] (با انتقادی دوستانه) متذکر شد که معادلات علم مکانیک این خصوصیت را دارند که وقتی زمان معکوس شود، آنها تغییر نمی‌کنند: هرگاه متغیر t را با $-t$ جابه‌جا کنید معادلات تغییر نمی‌کنند. در نظر لوشمیت، این بدان معنی بود که فرایندهای فیزیکی می‌توانند با احتمال برابر، در هر سیستم مکانیکی جلو و عقب بروند، ازجمله درگردهم‌آیی مولکولهای در حال تصادم بولتزمن. مثلاً، می‌توان پذیرفت که مولکولهای عطر موجود در یک بطری به فضای اتاق بگریزند، و سپس منتظر باشیم ببینیم که همهٔ مولکولها پس از دور زدن در فضا، بازمی‌گردند و خود به خود در بطری جمع می‌شوند. و این کاملاً مخالف تجربه و قانون دوم است. لوشمیت نتیجه‌گیری کرد که تعبیر مولکولی بولتزمن از قانون دوم، با مبانی مکانی‌اش، مورد تردید است.

بولتزمن در سال ۱۸۷۷ پاسخ داد که استدلالش کلاً براساس مکانیک نیست: قانونهای احتمال در آن اهمیت برابر دارند. مولکولهای عطر می‌توانند به بطری بازگردند، اما در برابر احتمالی که موفقیت آن به‌طور بسیار عظیم و حیرت‌آوری نامساعد است. او این نکته را با استدلالی بیان کرد که معلوم شد زیرکانه‌تر از آن است که اصلاً او فرصتی برای از قوه به فعل در آوردن آن داشته باشد. او پیشنهاد کرد که احتمال برای حالت فیزیکی معینی از یک سیستم متناسب با شماری از «تعداد راههایی است که درون سیستم می‌تواند منظم شود به‌طوری که از بیرون یکسان به‌نظر می‌رسد»، آن‌طورکه ریچارد فاینمن مطرح می‌کند. با مثالی برای توضیح معنی این مطلب، دو ظرف را تصورکنید مانند دو ظرفی که با شیطانک ماکسول محافظت می‌شود. کل سیستم، ازجمله هر دو ظرف، شامل دو نوع مولکولهای گازی A و B است. ما با شمردن منظم تعداد آرایشهای ممکن مولکولهای بین ظرفها، به شمارش موردنظر بولتزمن پی می‌بریم. مشروط بر آنکه تعداد کل مولکولها تغییر نکند و تعداد مولکولها در دو ظرف همواره یکسان باشد.

دیدن الگوی محاسبه آسان است به‌شرط آنکه ابتدا محاسبه را به‌طور مضحکی با تعداد اندکی از مولکولها انجام دهیم و سپس با قواعد ریاضیات «ترکیبیاتی» برای سیستم‌های با اندازهٔ واقعی برون‌یابی کنیم. در این صورت فرض کنید ما فقط هشت مولکول که با هم برهمکنشی ندارند، داشته باشیم، چهار

1. Joseph Loschmidt

A و چهار B، با چهار مولکول (A یا B) در هر ظرف. یک امکان این است همهٔ Aها در ظرف ۱ و همهٔ Bها در ظرف ۲ باشند. این تسهیم می‌تواند معکوس نیز باشد: چهار Aها در ظرف ۲ و چهار Bها در ظرف ۱ باشند. دو امکان بیشتر این است که سه A و یک B در ظرف ۱ و یک A و سه B در ظرف ۲ باشند و سپس معکوس این تسهیم. پنجمین و آخرین تسهیم این است که دو Aها و دو Bها در هر دو ظرف باشند که از معکوس این تسهیم چیز جدیدی حاصل نمی‌شود. این پنج تسهیم در دو ستون اول جدول ۱۳ـ۲ فهرست شده‌اند.

جدول ۱۳ـ۲

ظرف ۱	ظرف ۲	تعداد آرایشها
$۴A$	$۴B$	۱
$۴B$	$۴A$	۱
$۳A+B$	$A+۳B$	۱۶
$A+۳B$	$۳A+B$	۱۶
$۲A+۲B$	$۲A+۲B$	۳۶
		۷۰

بولتزمن از ما می‌خواهد که تعداد آرایشهای مولکولی ممکن با هر یک از این تسهیم‌ها را محاسبه کنیم. اگر ما بازآراییهای درون ظرفها را نادیده بگیریم، دو تسهیم اول، هر کدام به‌صورت یک آرایش شمرده می‌شود. تسهیم سوم آرایشهای بیشتری دارد زیرا تک مولکول B در ظرف ۱ می‌تواند هر یک از چهار Bها باشد و تک‌مولکول A در ظرف ۲ می‌تواند هر یک از چهار Aها باشد. تعداد کل آرایشها برای این تسهیم $۱۶ = ۴ \times ۴$ است. آرایشهای تسهیم چهارم نیز به همان طریق شمرده می‌شود. جمع کل آرایشهای تسهیم پنجم (با حذف جزئیات) ۳۶ می‌شود. بنابراین برای سیستم کوچک ما کل «تعداد راههای درون سیستم که می‌تواند منظم شود به‌طوری که از بیرون یکسان باشد» کمیتی که ما آن را W خواهیم نامید، به‌صورت زیر است

$$W = ۱ + ۱ + ۱۶ + ۱۶ + ۳۶ = ۷۰$$

این نتیجه را می‌توانیم به‌صورت بیشتر تجریدی، اما با زحمت بسیار کمتر، با استفاده از فرمولی از ریاضیات ترکیبی به‌دست آوریم،

$$W = \frac{N!}{N_A!N_B!} \qquad (۱۴)$$

که در آن $N = N_A + N_B$ و علامت! «فاکتوریل» دنباله‌ای از حاصلضربها را نشان می‌دهد، مثلاً $۴! = ۱ \times ۲ \times ۳ \times ۴$. بنابراین چون $N_A = ۴$، $N_B = ۴$ و $N = N_A + N_B = ۸$ خواهیم داشت

$$W = \frac{۸!}{۴!۴!} = \frac{(۱ \times ۲ \times ۳ \times ۴ \times ۵ \times ۶ \times ۷ \times ۸)}{(۱ \times ۲ \times ۳ \times ۴)(۱ \times ۲ \times ۳ \times ۴)} = ۷۰$$

در تصویر آماری بولتزمن، سیستم بسیار کوچک ما از یکی از هفتاد آرایش به آرایش دیگر، با هر آرایش احتمالی برابر، منحرف می‌شود. در حدود نصف زمان سیستم تسهیم پنجم را انتخاب می‌کند، که در آن Aها و Bها کاملاً آمیخته‌اند، اما فقط دو شانس در هفتاد شانس وجود دارد که سیستم با انتخاب تسهیم اول و دوم هیچ آمیختگی ندارد.

اگر اندازهٔ سیستم را زیاد کنیم، وضع شگفت‌انگیزی روی می‌دهد. فرض کنیم سیستم را دو برابر کنیم، در این صورت $N_A = ۸$، $N_B = ۸$، $N = N_A + N_B = ۱۶$ و

$$W = \frac{۱۶!}{۸!۸!} = ۱۲۸۷۰$$

در این حال امکان آرایشهای بسیار بیشتری وجود دارد. می‌توانیم بگوییم که سیستم بسیار زیادتر «بی‌نظم» شده است. آن‌طورکه امروزه معمول است، ما می‌خواهیم واژهٔ «بی‌نظمی» را برای W بولتزمن به‌کار بریم.

زیبایی فرمول ترکیبیاتی (۱۴) این است‌که برای سیستمی به هراندازه، ازمیکروسکوپی تا ماکروسکوپی، به‌کار می‌آید. ما می‌توانیم جهش شگفت‌انگیزی بکنیم از یک N به‌طور مضحکی کوچک به یک N به‌طور واقعی بزرگ، و باز هم به محاسبهٔ ترکیبیاتی ساده اعتماد داشته باشیم. فرض کنید مقدار مولی یک گاز موردنظر باشد، به‌طوری که $N = ۶ \times ۱۰^{۲۳}$، $N_A = ۳ \times ۱۰^{۲۳}$، $N_B = ۳ \times ۱۰^{۲۳}$ و

$$W = \frac{(۶ \times ۱۰^{۲۳})!}{(۳ \times ۱۰^{۲۳})!(۳ \times ۱۰^{۲۳})!}$$

اکنون فاکتوریلها اعداد عظیمی هستند، و محاسبهٔ مستقیم آنها غیرممکن است. اما به‌طور فوق‌العاده استثنایی جیمز استیرلینگ[1] در قرن هجدهم محاسبهٔ تقریبی مفیدی اختراع کرد که رهایی‌بخش محاسبه شد: هرگاه N بسیار بزرگ باشد (که در مورد کاربرد ما قطعاً چنین است) در این صورت

$$\ln N! = N \ln N - N$$

با استفاده از این راه میانبُر برای محاسبهٔ فوق از بی‌نظمی W خواهیم داشت

$$\ln W = ۴ \times ۱۰^{۲۳}$$

یا

$$W = e^{۴ \times ۱۰^{۲۳}}$$

این یک عدد بزرگ خارق‌العاده‌ای است؛ نمای آن ۴×۱۰^{۲۳} است. ما برای توصیهٔ آن حتی نمی‌توانیم آن را عدد نجومی بنامیم. این بی‌نظمی است ـ یعنی، تعداد کل آرایشها ـ در سیستمی شامل $\frac{۱}{۲}$ مول از یک

1. James Stirling

گاز که به‌طور کامل با $\frac{۱}{۲}$ مول از گاز دیگر آمیخته است. فقط در یک آرایش از این تعداد عظیم غیرقابل درک، گازها به‌طور کامل آمیخته نیستند. به گفتهٔ دیگر، ما یک شانس در $e^{۴\times ۱۰^{۲۳}}$ داریم که شاهد عدم آمیختگی باشیم. بنابراین معنی ندارد که منتظر وقوع آن باشیم. اکنون آشکار است که چرا، بنابه نظر بولتزمن، مولکولهای عطر نمی‌توانند داوطلبانه از اختلاط با هوای اتاق جدا شوند و به بطری بازگردند.

بولتزمن راهی یافت تا روش شمارش آماری‌اش را برای توزیع انرژی به مولکولهای گازی، به‌کارگیرد. او در این مورد با مسئلهٔ خاصی مواجه بود: او می‌توانست خود مولکولها را نسبتاً به‌آسانی بشمرد، اما به‌نظر می‌رسید راهی طبیعی برای شمارش «مولکولها»ی انرژی نباشد. راه‌حل او این بود که به‌صورت یک داستان خیالی مناسب فرض کند، انرژی در بسته‌های مجزا از هم قسمت‌قسمت می‌شود. این بسته‌های انرژی که بعداً «کوانتومهای» انرژی نامیده شد، همگی مقادیر بسیار اندک یکسانی از انرژی را منتقل می‌کنند. بنابراین، بار دیگر او با دنبال کردن مسیر ترکیبیاتی، آمار تعداد معینی از مولکولها را که برای تعداد معینی ازکوانتومهای انرژی رقابت می‌کنند، تحلیل کرد. او دریافت که یک توزیع انرژی خاص، توزیعی که به‌وسیلهٔ عامل نمایی e^{-hE} خودش معین شده بود، قویاً بر همهٔ توزیعهای دیگر ارجحیت دارد. این توزیع با تفاوت بسیار، محتملترین توزیع است، گرچه توزیعهای دیگر هم محتمل است.

بولتزمن این اکتشاف ژرف را نیز انجام داد که وقتی او مجاز می‌داند انرژی کوانتومهایش به‌اندازهٔ صفر کاهش یابد، لگاریتم بی‌نظمی‌شمار W او متناسب با تابع H او معکوس شده با علامت منفی می‌شود، یعنی

$$\ln W \propto -H \qquad (۱۵)$$

در این صورت، با در نظر گرفتن رابطهٔ بین تابع H و انتروپی (رابطهٔ ۱۳)، او وارد یک ارتباط ساده بین انتروپی و بی‌نظمی شد،

$$S \propto \ln W \qquad (۱۶)$$

دنبال کردن استدلال نظریه‌ای بولتزمن تجریدی و دشوار به‌نظر می‌رسد، اما فهم استنتاج اصلی او، یعنی ارتباط انتروپی-بی‌نظمی، دست‌کم به‌معنی کیفی آن آسان است. نظم و بی‌نظمی اجزای ملموس زندگی ماست و درنتیجه انتروپی نیز چنین است. مولکولهای آب در بخار بی‌نظمتر از مولکولهای موجود در آب مایع است (در دمای یکسان)، و مولکولهای آب در حالت مایع، به‌نوبهٔ خود، بی‌نظمتر از مولکولهای موجود در یخ است. درنتیجه، بخار، انتروپی بیشتری از آب مایع دارد، که انتروپی آن بیشتر از یخ است. (هرگاه همگی در دمای یکسان باشند.) وقتی بنزین می‌سوزد، نظم و انتروپی کم مولکولهایی مانند اکتان به بی‌نظمی و انتروپی بیشترِ مولکولهای کوچکتری، از قبیل کربن دی‌اکسید و آب، در دماهای بالاتر، تبدیل می‌شوند. یک دسته ورق، هرگاه جور شده باشند، نظم و انتروپی کمی دارند و هرگاه بُر زده شوند بی‌نظمتر و انتروپی آنها بیشتر می‌شود. خانه‌های ما، میزهای کارها، حتی افکار و اندیشه‌های ما نظم و بی‌نظمی دارند. و انتروپی در آن‌جاها نیز، با بی‌نظمی بیشتر و با نظم کمتر می‌شود.

انتروپی و احتمال

می‌توانیم حدس بزنیم که گیبس اندیشه‌هایش در باب مکانیک آماری را کم یا بیش به موازات بولتزمن بسط داده است، گرچه تا سال ۱۹۰۱ که شاهکار او با عنوان اصول مقدماتی در مکانیک آماری، منتشر شد گیبس عمداً کمتر دربارهٔ موضوع موردنظرش حرفی زده است. اینکه او خیلی پیش از این تاریخ دربارهٔ تعبیر آماری انتروپی فکر می‌کرده است از این اظهار تصادفی‌اش آشکار می‌شود که «یک کاهش تعدیل‌نشدهٔ انتروپی به‌نظر می‌رسد به امر غیرمحتمل تقلیل یابد.» یادآور می‌شود که گیبس این مطلب را در سال ۱۸۷۵ در ارتباط با بحث اختلاط و عدم اختلاط گازها نوشته است. تعمق و گمانه‌زنی گیبس ممکن است بولتزمن را در ارائهٔ راهی که او را به دیدگاه آماری انتروپی‌اش برساند، یاری کرده باشد؛ به هر حال، بولتزمن این نقل‌قول از گیبس را در سرلوحهٔ بخش ۲ کتاب درسهایی دربارهٔ نظریهٔ گازی‌اش که در اواخر سالهای ۱۸۹۰ نوشته، آورده است.

اصول مقدماتی گیبس برای «نظریهٔ گاز» که به‌وسیلهٔ بولتزمن، ماکسول و کلازیوس توسعه یافته بود وحدتی فراهم آورد، با نام برازنده و ظریفتر «مکانیک آماری» و یک شیوهٔ ریاضی که نظریه‌پردازان امروزی ترجیح می‌دهند به آن داد. نقطهٔ شروع کارش مفهوم «هنگرد (ensemble)» بود که ماکسول در یکی از آخرین مقالاتش در سال ۱۸۷۹ به آن اشاره کرده بود. ایدهٔ کلی این است که میانگین‌گیری میان حالات بسیاری از یک سیستم مولکولی را می‌توان به‌آسانی با تصور کردن مجموعهٔ بزرگی ـ یک هنگرد ـ از کپیه‌های سیستم انجام داد. با کپیه‌هایی که همگی دقیقاً یکسان باشند، به‌استثنای بعضی از خواص کلیدی فیزیکی. گیبس هنگردهای گوناگونی از چند نوع متفاوت پیشنهاد کرد: یکی از آنها را که من بر آن تأکید دارم، او «بنادی (canonical)» می‌نامید. همهٔ کپیه‌های یک هنگرد بنادی حجم و دمای یکسان دارند و شامل تعداد مولکولهای یکسانند، اما ممکن است انرژی‌های متفاوت داشته باشند.

میانگین‌گیری دربارهٔ یک هنگرد بنادی شبیه به روال میانگین‌گیری بولتزمن است. گیبس یک احتمال P برای یافتن یک کپیه در یک حالت معین معرفی کرد و سپس، همچون معادلهٔ (۷) بولتزمن، احتمال dP را که سیستم در یک جزء فضای فاز جای دارد محاسبه کرد،

$$dP = P dw \qquad (۱۷)$$

این احتمالها می‌باید وقتی با انتگرال‌گیری جمع می‌شوند بالغ بر یک باشند،

$$\int dP = ۱ \qquad (۱۸)$$

گیبس مانند بولتزمن، با این اشتیاق تهییج شده بود که یک شِبهِ مولکولی آماری را با ترمودینامیک ترکیب کند. مهمتر از همه، او در جستجوی یک نظیر انتروپی آماری بود. او دریافت که آسانترین راه برای به‌دست آوردن آنچه او از یک هنگرد بنادی می‌خواهد تمرکز بر لگاریتم احتمال است، و او رابطهٔ

$$S = -k \ln P \qquad (۱۹)$$

را برای انتروپی یکی از کپیه‌های متعلق به یک هنگرد بنادی معرفی کرد. ثابت k (گیبس آن را $1/K$ می‌نوشت) یک عدد بسیار کوچک با قدر $1/3807 \times 10^{-23}$ است، هرگاه واحد انرژی به‌کار گرفته شده همان واحدی باشد که به‌نام ژول (جول)* نامیده شده است. (امروزه آن مقدار به‌عنوان «ثابت بولتزمن» مشهور است، گرچه بولتزمن از آن استفاده نکرد، و ماکس پلانک نخستین کسی بود که اهمیت آن را شناخت.)

در طرح گیبس مانند طرح بولتزمن، احتمال P یک ابزار ریاضی برای میانگین‌گیری است. برای محاسبهٔ یک انرژی میانگین $\overline{E}$، ما به‌سادگی هر انرژی E یافت شده در یک کپیه را در احتمال متناظر آن $dP = Pdw$ ضرب و با انتگرال‌گیری جمع می‌کنیم.

$$\overline{E} = \int PEdw \qquad (۲۰)$$

محاسبهٔ انتروپی متناظر، انتروپیها را برای کپیه‌هایی که به‌وسیلهٔ معادلهٔ (۱۹) معین شده، میانگین می‌کند.

$$\overline{S} = \int P(-k \ln P)dw = -k \int P \ln P dw \qquad (۲۱)$$

ثابت k در مکانیک آماری همه‌جا نافذ و فراگیر است. این ثابت نه‌تنها در معادلات بنیادی انتروپی گیبس به‌کار می‌آید، بلکه ثابتی نیز هست که رابطهٔ متناسب (۱۶) انتروپی بولتزمن را به‌صورت یکی از مشهورترین معادلات فیزیک درمی‌آورد.

$$S = k \ln W \qquad (۲۲)$$

این معادله بر سنگ قبر بولتزمن درگورستان مرکزی وین حکاکی شده است. (با وجود اینکه k آن کهنه شده است.)

اکنون ما دو انتروپی آماری، از گیبس و بولتزمن داریم که در معادله‌های (۲۱) و (۲۲) بیان می‌شوند. این دو معادله آشکارا از لحاظ ریاضی یکسان نیستند. با وجود این ظاهراً چیز یکسانی، یعنی انتروپی را محاسبه می‌کنند. یک تفاوت این است که گیبس احتمالهای P را به‌کار می‌گیرد، کمیتهایی که همیشه کمتر از یک‌اند، درحالی‌که بولتزمن محاسباتش براساس بی‌نظمی W است که بزرگتر از یک است (معمولاً بسیار بزرگتر). می‌توان ثابت کرد (در فضایی بیشتر از آنچه در اینجا داریم) که دو معادله هم‌ارزند هرگاه سیستم موردنظر انرژی ثابتی داشته باشد.

گیبس ثابت کرد که یک سیستم ارائه‌شده بنا به هنگرد بنادی‌اش، به تقریب بسیار خوبی یک انرژی ثابت دارد. او دامنهٔ اُفت‌وخیز انرژی از مقدار میانگینش را محاسبه کرد. او برای میانگین مربع اُفت‌وخیز این انرژی عبارت kT^2C_v را یافت، که در آن k بار دیگر ثابت بولتزمن، T دمای مطلق، و C_v ظرفیت گرمایی (انرژی لازم برای صعود یک درجه از دمای یک مول مادهٔ موجود در سیستم)

*. جول تلفظ انگلیسی و ژول تلفظ فرانسوی است که در محاسبات فیزیکی ما معمول است.

اندازه‌گیری شده در حجم ثابت است. T و C_v خیلی بزرگ نیستند، اما k بسیار کوچک است، بنابراین اُفت‌وخیز انرژی نیز بسیار کوچک است. محاسبهٔ مشابهی از افت‌وخیز انتروپی kC_v را به‌دست می‌دهد که آن نیز بسیار کوچک است.

بنابراین، تحلیل آماری گیبس یا بولتزمن به یک انرژی و انتروپی‌ای می‌رسد که درواقع ثابت باشند. چنانکه گیبس می‌گوید، آنها «مبانی عقلانی» برای مفاهیم انرژی و انتروپی از قانونهای اول و دوم ترمودینامیک‌اند.

به یک کاربرد مهمتر ثابت k همه‌جا حاضر بولتزمن توجه کنید. گیبس ثابت کرد عامل h که در عامل آماری بولتزمن به‌صورت e^{-hE} ظاهر می‌شود با رابطهٔ $h = \frac{1}{kT'}$ به دمای مطلق مربوط است، بنابراین عامل بولتزمن که شامل دما باشد به‌صورت $e^{-\frac{E}{kT}}$ می‌شود.

اندیشه‌های روزآمدشدهٔ بولتزمن و گیبس

آنچه را که بولتزمن و گیبس به ما داده‌اند، امروزه نوع «کلاسیک» مکانیک آماری نامیده می‌شود. با ظهور نظریهٔ کوانتوم در اوایل سالهای ۱۹۰۰، بعضی تغییرات الزام‌آور می‌شد. مسئلهٔ مهم این بود که از دیدگاه فیزیک قرن نوزدهم، وجود مولکولها در یک زنجیره یا پیوستاری از حالات مکانیکی بود، درحالی‌که نظریهٔ کوانتومی بر این اصل بنا شده بود که وجود مولکولها فقط در حالتهای گسستهٔ معینی مجاز است، نه در حالت دیگر. این بدان معنی است که متغیر انرژی E، که می‌توانست مقادیر پیوسته‌ای در معادله‌های بولتزمن و گیبس داشته باشد، می‌باید با مقادیر خاص E_1، E_2 و غیره جابه‌جا می‌شد، به‌طوری که یک مقدار برای هر حالت کوانتومی سیستم مولکولی مجاز باشد.

اجرای اصلاحات لازم در معادلات کلاسیک به‌طور چشمگیری آسان است. عامل کلاسیکی بولتزمن $e^{-\frac{E}{kT}}$ در نظریهٔ کوانتومی می‌شود $e^{-\frac{E_i}{kT}}$، که در آن $i = 1, 2, \ldots$. انتگرال عاملهای بولتزمن، $\int e^{-\frac{E}{kT}} dw$ در معادلهٔ (۹) (یادآور می‌شود که $h = \frac{1}{kT}$)، می‌شود مجموعی از عاملهای بولتزمن $\Sigma e^{-\frac{E_i}{kT}}$ شامل همهٔ سیستمهای حالات کوانتومی قابل حصول. این جمع‌زنی نقش راهبردی در مکانیک آماری جدید باز می‌کند، که «تابع پارش[1]» نامیده می‌شود، و با نماد Z نشان داده می‌شود.

$$Z = \Sigma e^{-\frac{E_i}{kT}} \qquad (۲۳)$$

بر این اساس معادلهٔ احتمال کلاسیک بولتزمن (۹) با نظریهٔ کوانتومی سازگاری دارد و احتمال P_i چندمین حالت کوانتومی را به‌صورت زیر محاسبه می‌کند

$$P_i = \frac{e^{-\frac{E_i}{kT}}}{Z} \qquad (۲۴)$$

1. Partition function

انتروپی S_i برای چندمین حالت کوانتومی سازش‌یافته با معادلهٔ کلاسیک (۱۹) به‌صورت زیر است

$$S_i = -k \ln P_i \qquad (۲۵)$$

و انتروپی میانگین برای یک هنگرد بنداد با سازگاری معادلهٔ (۲۱) به‌صورت زیر محاسبه می‌شود

$$\overline{S} = -k\Sigma P_i \ln P_i \qquad (۲۶)$$

محاسبهٔ انرژی میانگین، در سازگاری با معادلهٔ (۲۰) به‌صورت زیر است

$$\overline{E} = \Sigma P_i E_i \qquad (۲۷)$$

کلیدهای این نوع ترمودینامیک، معادلات (۲۴) و (۲۵)اند، و آنها به‌نوبهٔ خود به انرژیهای E_i نیازمندند. هر سیستم مجموعهٔ سلسله مراتب خاص خود را دارد که با معادلات انرژیِ نظریهٔ کوانتومی، و داده‌های عددی دقیق از طیف نمایی مولکولی مشخص می‌شود.

ستیزه‌جویان

وقتی بولتزمن در سال ۱۸۹۸ جلد دوم کتابش با عنوان درسهایی دربارهٔ نظریهٔ گاز را منتشر کرد در مورد پذیرش آن خوشبین نبود. منتقدان برجسته و نه‌چندان برجسته به اساس مولکولی نظریهٔ او حمله بردند. بولتزمن در پیشگفتار کتابش می‌نویسد: «من متقاعد شده‌ام که این حمله‌ها صرفاً براساس سوءتفاهم است و اینکه نقش نظریهٔ مولکولی گاز هنوز معلوم نشده است. . . . به عقیدهٔ من تراژدی بزرگی برای علم خواهد بود اگر به‌علت برخورد خصمانه با آن، موقتاً هم که شده در وادی فراموشی بیفتد، آن‌طور که مثلاً در مورد نظریهٔ موجی نور به‌علت اقتدار و نفوذ نیوتون اتفاق افتاد.»

مشهورترین مخالفان او ارنست ماخ، ویلهلم استوالد و گئورگ هلم[1] بودند. استوالد معتقد بود یک طرح بزرگ می‌تواند چنان فرمولبندی شود که همهٔ زمینه‌های علم را دربرگیرد و آغاز آن با مفهوم انرژی به‌عنوان یک اصل وحدت‌آفرین باشد. او معتقد شده بود که شارهای انرژی و تبدیلات آنها قانونهای شیمی و فیزیک را معین می‌کنند. مولکولها و اتمها تصورات ریاضی‌اند؛ انرژی در همهٔ صور خود واقعیت جهانی است. هلم نیز پیرو مکتب «انرژتیک*» استوالد بود.

ماخ، تواناترین و سرسخت‌ترین مخالفان بولتزمن بود، انرژتیک را تأیید نمی‌کرد، اما ضد اتمی پرشور شدیدی بود. او وجود اتمها و مولکولها را نمی‌پذیرفت، زیرا نتوانست شواهد مستقیمی برای وجود آنها بیابد. ماخ استدلال می‌کرد: «ما همان اندک حقی را از اتمها انتظار داریم که از نمادهای جبری، هرچه بیشتر همّ خود را مصروف آنها کنیم، مطئمناً توضیح و روشن‌نگری بیشتر از آنکه خودش را تجربه کنیم، نداریم. توضیح بولتزمن از قانون دوم به‌عنوان نتیجه‌ای از آشفتگی مولکولی، سطحی و کم‌اهمیت

1. Georg Helm

*. انرژتیک، مطالعهٔ انرژی و تبدیل صور گوناگون آن به یکدیگر.

است.» ماخ می‌نویسد: «به عقیدهٔ من ریشه‌های قانون انتروپی بسیار عمیقتر است، و اگر در ایجاد توافقی بین فرضیهٔ مولکولی و قانون دوم موفقیتی حاصل شده باشد، این توفیقی برای فرضیه است نه برای قانون انتروپی.» در حدود همین اوقات که ماخ این اظهارات می‌کرد، بولتزمن کتاب اصول مکانیک خود را که با این سرلوحه آغاز می‌شد، منتشر کرد،

آنچه را که درست و حقیقی است ارائه
کن، آن را چنان بنویس که وضوح آن
تا واپسین نفس تو، مدافع آن باشد!

گویی این بانگ پیکار بولتزمن در جنگ با کسانی بود که پرچم ضدیت با اتم‌گرایی را در دست داشتند. آرنولد سامرفلد[1]، دانشجویی در آن زمان، و بعداً یک کوانتوم‌فیزیکدان مشهور، که شاهد جروبحثهایی در پیکار دانشمندان علوم طبیعی در کنفرانس سال ۱۸۹۵ در لوبک[2] بوده است، تصویر نبرد بولتزمن را چنین ثبت کرده است: «مقاله‌ای دربارهٔ [انرژتیکها] $Energetik$ به‌وسیلهٔ گئورگ هلم از درسدن[3] ارائه شد: پشت سر او ویلهلم استوالد ایستاده بود، پشت سر هر دو آنها فلسفهٔ ارنست ماخ بود، که خودش در آنجا حاضر نبود. حریف، بولتزمن بود که با فلیکس کلین[4] حمایت می‌شد. هم از لحاظ ظاهر و هم از لحاظ باطن، نبرد میان بولتزمن و استوالد شبیه به گاو و جنگنده‌ای ملایم و قابل انعطاف بود. با آنکه گاوباز مبارز ماهری بود، این بار گاو حالتی پیروزمندانه داشت. اما سرانجام مباحثه و استدلال بولتزمن پیروز شد. ما ریاضیدانان جوان در آن موقع، همگی طرفدار بولتزمن بودیم.»

بولتزمن همدلی‌ها و حمایتهایی از «ریاضیدانان جوان» می‌کرد. اما نیروهای ماخ‌ـاستوالد تا اواخر قرن حکمفرما بود. بعداً، در سال ۱۹۰۵، درحالی‌که بولتزمن با بانو هیرست[5] در کالیفرنیا مشغول صرف شام و فریفتهٔ نواختن پیانوی او بود، آلبرت اینشتین بیست‌وشش‌ساله مقاله‌ای نظریه‌ای نوشت که پایان جنگ علیه مولکولها را اعلام می‌کرد. اینشتین استدلال می‌کرد که نوع معینی از مولکولها را درواقع می‌توان دید، شمرد و ردیابی کرد. او ذرات «کلوئیدی» را در ذهن داشت، که ممکن است در محیط آب یا مایع دیگر پراکنده شوند و در آنجا به‌طور دائم معلق بمانند، مانند مولکولهای اکسیژن و نیتروژن در اتمسفر و زمین. اندازهٔ آن ذرات ممکن است پنج مرتبهٔ بزرگی بیشتر از مولکولهای معمولی باشند. اما اینشتین با روش بولتزمن ثابت کرد که همهٔ مولکولها، بزرگ و کوچک، یک نوع رفتار آماری نشان می‌دهند. او معادله‌ای استخراج کرد برای مسافت میانگین λ که یک ذرهٔ کلوئید به خط مستقیم با حرکت تصادفی، در مدت زمان t، سیر می‌کند. اینشتین با فرض اینکه ذرات همگی کروی‌اند و با شعاع یکسان r تهیه شده‌اند معادلهٔ زیر را به‌دست آورد

$$\lambda^2 = \frac{RT}{3\pi N_A r \eta} t$$

1. Arnold Sommerfeld 2. Lübeck 3. Dresden 4. Felix Klein 5. Hearst

که در آن R ثابتی است که در معادلهٔ مربوط به فشار، حجم و دمای یک گاز ایده‌آل ظاهر می‌شود، «ثابت گاز»، T دمای مطلق، N_A عدد آووگادرو و η ضریبی است که ویسکوزیتهٔ محیط مایعی را که ذرات در آن حرکت می‌کنند اندازه‌گیری می‌کند.

اینشتین برآورد می‌کرد که ذرات کلوئید به‌قدر کافی بزرگ‌اند که با میکروسکوپ (دست‌کم با نور پراکنده در یک «اولترا میکروسکوپ») دیده می‌شوند. او حدس می‌زد که معادلهٔ او می‌تواند در معرض یک امتحان آزمایشی مستقیم قرار گیرد تا موضوع جنجالی واقعیت اتمها و مولکولها را مشخص کند. شخصی که حوصله و مهارت انجام این امتحان آزمایشی بسیار مهم و حیاتی را داشت، ژان پِرَن[1] بود. او ابتدا از نظریهٔ اینشتین آگاهی نداشت. اما، مانند اینشتین باور داشت که ذرات کلوئیدی رفتاری شبیه بزرگ‌مولکولها دارند. در یک سری از آزمایشها که در سال ۱۹۰۶ آغاز کرد، او دقیقاً شباهت میان توزیع تعادلی ذرات کلوئیدی در تعلیقهای رزینی و توزیع مولکولهای گازی در اتمسفر را نشان داد. سرانجام معادلهٔ اینشتین در سال ۱۹۰۹ مورد توجه پِرَن قرار گرفت. او با محاسبهٔ عدد آووگادرو N_A، اعتبار معادلهٔ اینشتین را ثابت کرد، که آغاز آن با مقادیر اندازه‌گیری‌شدهٔ پارامترهای دیگر در معادله بود. نتیجهٔ کار او، $N_A = ۷ \times ۱۰^{۲۳}$ بود که با موارد دیگر تعیین N_A، به‌طور معقولی توافق داشت. ازجمله موردی که ماکس پلانک در سال ۱۹۰۰ با مبانی کاملاً متفاوت نظریه‌ای و آزمایشی ($N_A = ۶ \times ۱۰^{۲۳}$) به‌دست آورده بود.

نظریهٔ اینشتین، آزمایشهای دقیق و موشکافانهٔ پِرَن و آزمایشهای دیگر مانند کشف الکترون به‌وسیلهٔ ج.ج. تامسن و تحقیقات ارنست رادرفورد دربارهٔ رادیواکتیویته، سرانجام جای هیچ‌گونه تردیدی دربارهٔ واقعیت مولکولها باقی نگذاشت. در سال ۱۹۰۹ استوالد دست از مقاومت کشید و تسلیم شد: او در پیشگفتار کتابش با عنوان «چکیده‌هایی از شیمی عمومی» نوشت: «من اکنون متقاعد شده‌ام که ما اخیراً دارای شواهدی آزمایشی از ماهیت منفصل یا دانه‌دانه بودن ماده شده‌ایم، که فرضیهٔ اتمی صدها بلکه هزاران سال بیهوده در جستجوی آن بوده است.» ظاهراً ماخ هرگز متقاعد نشده بود.

وقتی بولتزمن در سال ۱۹۰۵ از کالیفرنیا به وین بازگشت، از مقالهٔ اینشتین آگاهی نداشت و آزمایشهای پِرَن چند سال بعد انجام می‌شد. بدون تردید او بار دیگر به درگیری با دشمن می‌اندیشید. اما چنین پیش‌آمدی نشد. در اوایل سال ۱۹۰۶ او با افسردگی گریزناپذیر نهایی‌اش مواجه شد. طی بهار و تابستان ۱۹۰۶، حالت روانی او مدام بدتر می‌شد. ماخ بعداً نوشت: «بولتزمن درسهایی را برای نیم‌سال تحصیلی تابستان اعلام کرده بود، اما او می‌باید آنها را به‌سبب ناراحتی عصبی‌اش لغو می‌کرد. در محافل آگاه هرکس می‌دانست که بولتزمن به احتمال زیاد هرگز نمی‌تواند کار استادیش را بار دیگر ادامه دهد. گفته می‌شد که او باید تحت مراقبت قرار گیرد، زیرا قبلاً چند بار اقدام به خودکشی کرده است.»

بولتزمن، هنریت و الیزا برای گذراندن تعطیلات تابستانی به شهرک دوینو[2] در نزدیکی تریست[3] رفتند. چند روز پیش از بازگشت به وین، بولتزمن با دار زدن خودکشی کرد.

1. Jean Perrin 2. Duino 3. Trieste

۷

نسبیت

خلاصهٔ تاریخی

نسبیت با یک پرسش معمولی آغاز می‌شود: هرگاه ما نسبت به یکدیگر در حال حرکت باشیم، فیزیک شما به فیزیک من چگونه مربوط می‌شود؟ گالیله پاسخ می‌دهد: اگر سرعت نسبی ما یکسان باشد، دقیقاً قوانین مکانیک یکسانی را می‌یابیم. نیوتون همان چیز را می‌گوید امّا به تفصیل بیشتر با ارجاع همهٔ حرکتهای ـ شما، من و هر کس دیگر ـ به چارچوب مرجع مطلق در فضا و زمان. نظریه‌پردازان قرن نوزدهم چارچوب مطلق نیوتون را جایگاه مناسبی یافتند برای برقراری یک ملأ فرضی که آن را اِتِر می‌نامیدند، ملأی که نور و دیگر امواج الکترومغناطیسی را منتشر می‌کند.

فیزیک اِتِر در میان دانشمندان دورهٔ ویکتوریا مجاهدت برجسته‌ای بود، امّا نقصهای مهلکی داشت ـ از یک لحاظ، فیزیکدانانی که اِتِر را پذیرفته بودند، هرگز نتوانستند با یک مدل استاندارد برای ساختار مکانیکی اِتِر توافق داشته باشند. همچنین مفهوم حرکت در یک اِتِر با تکیه بر چارچوب مرجع مطلق نیوتون سؤال‌انگیز و قابل تردید بود. در سالهای ۱۸۸۰ یک سری آزمایشهایی به منظور تشخیص حرکت زمین نسبت به یک «دریای اِتِر» به وسیلهٔ آلبرت مایکلسون و ادوارد مورلی انجام شد که به ناکامی چشمگیری انجامید. واقعیت سرسختانه‌ای که همیشه مشاهده می‌شد، این بود که سرعت نور در فضای خالی، صرف‌نظر از سرعت و جهت چشمهٔ نور، یکسان است.

یک مأمور تحقیق ادارهٔ ثبت اختراع در شهر بِرن سویس به نام آلبرت اینشتین در سال ۱۹۰۵ مقاله‌ای منتشر کرد که مسئلهٔ اِتِر را به سادگی با نادیده گرفتن آن، حل می‌کرد. اینشتین دو اصل تجربی غیرقابل انکار را مسلّم فرض کرد: ثابت بودن سرعت نور و تعمیمی از اصل نسبیت گالیله برای شمول پدیده‌های الکترومغناطیسی و اپتیکی. با شروع این دو اصل، و بدون توسل به مفهوم اِتِر، او ثابت کرد برای ناظرانی که با سرعتهای ثابت (متفاوتی) نسبت به یکدیگر حرکت می‌کنند، اندازه‌های طول و زمان متفاوت است، و شاید هرچه سرعت به سرعت نور نزدیکتر باشد، این تفاوت شدیدتر خواهد بود. مثلاً اگر ناظر ساکنی مراقب ساعتی باشد که با سرعت زیاد حرکت می‌کند می‌بیند که این ساعت کُندتر از وقتی تیک‌تیک می‌کند که ناظری با ساعت در حرکت باشد. علاوه بر این «تأخیر یا اتساع زمان»، اینشتین در مقالهٔ سال ۱۹۰۵ خود اصرار می‌ورزد که بُعد طول ساعت، یا هر چیز دیگر در جهت حرکت برای ناظر ساکن، منقبض می‌شود.

اینشتین در سال ۱۹۰۵ نظریهٔ نسبیت «خاص» خود را با دو محدودیت مطرح کرد: این نظریه بر سیستمهای لَختی (inertial) متمرکز بود، سیستمهایی که با سرعتهای نسبی ثابت در حرکت بودند، و گرچه این نظریه با معادلات ماکسول برای میدان الکترومغناطیسی سازگار بود، حوزهٔ آن نظریهٔ بزرگ دیگری از گذشته، یعنی نظریهٔ نیوتونی را شامل نمی‌شد. اینشتین به زودی دریافت که یک نظریهٔ «عام» نسبیت می‌باید هم آثار گرانشی و هم سیستمهای غیرلخت، یعنی سیستمهایی را که نسبت به یکدیگر شتاب دارند، مشخص کند. نخستین مرحله در آن جهت که بعداً «اصل هم‌ارزی» نامیده شد، تأکیدی بود بر «بهترین اندیشه» اینشتین که شتاب و گرانش عمیقاً به یکدیگر مربوطند: جایی که شتاب وجود دارد آثار گرانشی مصنوعی که از واقعی آن غیرقابل تمیز است، وجود دارد.

اینشتین همچنان‌که با اصل هم‌ارزی به عنوان رهنمون کارش پیش می‌رفت، به این آگاهی دست یافت که فضا و زمان به‌طور خاصی در سیستمهای شتابدار پیچیده شده‌اند؛ فرمولهای اقلیدسی از جمله محاسبهٔ نسبت محیط-به-قطر در دایره به عنوان π اندکی با خطا همراه است. این موضوع سررشته‌ای حیاتی به او داد که نظریهٔ عام نسبیت می‌باید براساس هندسهٔ غیراقلیدسی باشد. اتفاقاً، یک نظریهٔ کاملِ فضاهای غیراقلیدسی، که در سالهای ۱۸۵۰ به وسیلهٔ برنهارد ریمان[1] بسط یافته بود، دُرست ابزارهایی ریاضی برای اینشتین فراهم آورد تا یک بنای نظریه‌ای که هندسه و گرانش را به هم متصل می‌کرد، بسازد. در همان زمان، او یک معادلهٔ عامّی از حرکت را یافت که آن نیز به شیوهٔ ریمانی با هندسه مشخص می‌شد. شعار او، فیزیک به صورت هندسه، را بسیاری از جانشینانش ادامه دادند.

1. Bernhard Riemann

۱۴

ماجرای جسورانه در تفکر

آلبرت اینشتین

همانند (کریستوف) کلمب

فیزیکدانان نظریه‌ایِ جدید مایلند خودشان را به عنوان کاوشگران فکری و عقلانی بدانند، و بزرگترین آنها در واقع جهانهای فیزیکی جدید و اسرارآمیز را در مقیاسهای میکروسکوپی و ماکروسکوپی کشف کرده است. سیر در این قلمروهای دوردست نظری و فکری صحت تصادفی و پُرمخاطره بودن آن را تأیید می‌کرد. زیرا این امر کاوشگر را از دنیای تجارب عادی دور می‌کند. وِرنر هایزنبرگ[1]، یکی از نظریه‌پردازان نسلی که به قلمرو کوانتوم، بیگانه‌ترین قلمرو همهٔ دنیاهای فیزیکی راه یافت همانند گروه اعزامی فکری فیزیک جدید به سفر کلمب بود. هایزنبرگ سفر کلمب را شاهکار می‌دانست، نه به این علت که کلمب می‌کوشید به شرق برود امّا به سوی غرب بادبان کشید، نه به این علت که او استادانه کشتی‌هایش را می‌راند، بلکه به این علت بود که عزم جزم کرد تا «نواحی شناخته شدهٔ جهان را ترک کند و با سفر دریایی به سوی غرب، بسیار دورتر از نقطه‌ای که تدارکاتش امکان بازگشت او را به وطن داشته باشد»، اقدام کرد. کسی که به عنوان یک کلمب فکری و عقلانی فراتر از دیگران جای دارد، آلبرت اینشتین است. او چنین سیروسفرهایی را بسیار دورتر از «تکیه‌گاه اَمن دکترین اثبات شده» به دریاهای ناشناختهٔ خطرناک پیمود. او نه‌تنها پیشتاز قلمرو کوانتوم بود، بلکه بسیاری از حوزهٔ فیزیک جدید را کشف و کندوکاو کرد.

این سیاحتهای بزرگ پژوهشی او وقتی آغاز، و تا حد زیادی کامل شد، که اینشتین در سالهای بیست‌وچند سالگی بود و درگوشهٔ آرام دنیای علمی، یعنی در ادارهٔ ثبت اختراعات سویس در برن، کار می‌کرد. اینشتین زندگی در ادارهٔ ثبت اختراعات را نوعی «راه نجات» یافته بود. کارش برای او جالب بود و زحمتی نداشت؛ بدون فشارهای یک شغل دانشگاهی، او از توانایی شگفت‌انگیز خود بهره‌برداری

1. Werner Heisenberg

می‌کرد، «تا استشمام کند که چه راهی می‌تواند به بنیادها برسد و از هر چیز دیگر، از چیزهای متعددی که ذهن را مغشوش و از موضوعات اساسی منحرف می‌کند، دوری گزیند.»

اینشتین کوشیده بود تا از لحاظ حرفه‌ای در مرتبهٔ بالاتری باشد، امّا پس از فارغ‌التحصیل شدن از مؤسسهٔ پلی‌تکنیک زوریخ (که از سال ۱۹۱۱ به عنوان دانشگاه فنی سویس یا ETH شهرت یافت) چشم‌انداز و آیندهٔ درخشانی نداشت. او نسبت به اکثر تحصیلاتش بی‌علاقه و مخالف بود. معلمان او در دبیرستان (gymnasium) زوریخ می‌گفتند که او هرگز چیزی نمی‌شود و برای وضع و حالت اهانت‌آمیز او اظهار تأسف می‌کردند. تجربهٔ دبیرستان برای او بی‌اعتمادی عمیقی نسبت به صلاحیت مربیان ایجاد کرد، به‌ویژه آن نوعی که مربیان پروسی اعمال می‌کردند. رونالد کلارک[1]، یکی از زندگینامه‌نویسان اینشتین، گیمنازیم لویتپولد[2] را که اینشتین در مونیخ به آنجا می‌رفت چنین توصیف می‌کند که احتمالاً «نه بهتر و نه بدتر از بیشترین تشکیلاتی از نوع خود بود: درست است که در آنجا مانند هر مدرسهٔ دولتی انگلیسی سختگیری شدید از اهمیت ویژه‌ای برخوردار بود، امّا دلیلی ندارد آن را به صورت غول‌آسای خاصی تصور کنیم. باید در نظر داشت که رعایت انضباط این مدرسه از حد عادی تجاوز نمی‌کرد، امّا آنچه در پس آن در ذخیره داشت سلاح نهایی التجا به قدرت خداگونهٔ بی‌چون‌وچرای پروسی بود. با وجود این پسران، حتی پسران حساس به گونه‌ای جان سالم به در می‌بردند.»

هرمان، پدر اینشتین مردی سرزنده و خوش‌بین بود. آنچنان‌که اینشتین از او یاد می‌کند ـ «فوق‌العاده "صمیمی" ملایم و عاقل بود» ـ امّا دچار ورشکستگی‌های شغلی می‌شد. یکی از این ورشکستگی‌ها خانوادهٔ او را از مونیخ به میلان کشانید و اینشتین برای کامل کردن دورهٔ دبیرستان ناچار بود در مونیخ بماند. او در میان همکلاسان خود دوستان معدودی داشت، و در این حال با رفتن خانواده‌اش نمی‌توانست زندگی در مونیخ یا هر جای دیگر آلمان را تحمل کند. از این‌رو به‌طوری غیرمنتظره به اعضای خانواده‌اش در ایتالیا پیوست و آنان را آگاه کرد که درصدد ترک تابعیت از آلمان است. این بدان معنی بود که از دیپلم گیمنازیم صرف‌نظر کرده است، امّا قصد اینشتین این بود که مطالعات لازم را به عمل آورد و خودش را برای امتحان ورودی پلی‌تکنیک زوریخ آماده کند. زندگی در ایتالیا و سپس در سویس آزاد، بی‌قیدوبند و بار دیگر امیدبخش شد و به‌طوری که آبراهام پایس[3]، زندگینامه‌نویس اخیر اینشتین می‌نویسد: «زندگی تازه، این پسر ساکت را به مرد جوان خوش‌صحبتی تبدیل کرده بود.» اینشتین، به مدت چند ماه رهایی از یک آیندهٔ تاریک و ملال‌آور را با پرسه‌زدن در شمال ایتالیا جشن گرفت.

کمبود نمره در امتحان ورودی پلی‌تکنیک عقب‌نشینی موقتی بود که ثابت شد برای او میمون و مبارک است. اینشتین برای آمادگی امتحان مجدد به یک مدرسهٔ محلی سویس در آراو[4] رفت، جایی که فرایند آموزشی آن متنوع و شادی‌آور بود. در آراو، اینشتین با خانوادهٔ وینتلر زندگی می‌کرد. جاست وینتلر[5] مدیر مدرسه و به‌طوری که کلارک می‌نویسد: «تا حدی معلمی غیررسمی بود که آمادگی داشت

1. Ronald Clark 2. Luitpold Gymnasium 3. Abraham Pais 4. Aarau 5. Jost Winteler

تا با شاگردانش همچون با معلمان همقطارش دربارهٔ کار و سیاست گفتگو کند. او ذهنیتی صمیمانه و آزادمنش داشت، پرنده‌شناسی بود که وقتی شاگردان و فرزندانش را برای راه‌پیمایی به کوههای اطراف می‌برد، غرق شادمانی می‌شد.» اینشتین حتی در دورهٔ سالمندی، سالی را که در آرلو بود به‌خوبی به یاد می‌آورد: «این مدرسه تأثیری ماندگار بر من گذاشت و علت آن روح آزادمنشی مدرسه و توجه محبت‌آمیز بی‌پیرایهٔ معلمان آن بود، که به هیچ وجه به صاحبان قدرت خارجی متکی نبودند.»

در اوایل سال ۱۸۹۶، اینشتین با پرداخت سه مارک، مدرکی برای او صادر شد که دیگر تبعهٔ آلمان نیست، از این‌رو به مدت پنج سال بعد شخصی فاقد تابعیت بود. سال بعد او امتحان پلی‌تکنیک زوریخ را با نمرات خوب گذراند و آمادگی آموزش یک دورهٔ چهارسالهٔ *fachlehrer*، دبیری یک رشتهٔ خاص را آغاز کرد. هرمان متحمل ورشکستگی دیگری شد و بنابراین درآمد اینشتین کاهش یافته بود. از مستمری ماهانهٔ صد فرانک سویسی، بیست فرانک ذخیره کرده بود تا برای مدارک تابعیت سویسی‌اش بپردازد. امّا دربارهٔ رؤیای آیندهٔ او هیچ چیز حقیری وجود نداشت. او در نامه‌ای به فرا وینتلر نوشت: «کار سخت و تعمق و انتظار از ذات الهی فرشتگانی هستند که در آشوب زندگی، با وجود سرسختی بی‌وقفه ضمن تقویت و سازگارکردن، مرا راهنمایی می‌کنند.»

روی هم رفته، اینشتین به دورهٔ کاری‌اش در پلی‌تکنیک زوریخ اشتیاق زیاد نشان نمی‌داد. او اذعان داشت که بعضی از دوره‌های ریاضیات آن بسیار عالی است ـ یکی از استادان ریاضی‌اش، هرمان مینکوفسکی[1]، بعداً مشارکتهای مهمی برای مبانی نظریهٔ نسبیت به عمل آورد ـ امّا دوره‌هایی دربارهٔ فیزیک نظری و آزمایشگاهی برای او بی‌روح و کسالت‌بار بود. ابتدا او مجذوب کار آزمایشگاهی بود، امّا طرحهای آزمایشی‌اش به‌ندرت مورد قبول استادش، هنریش وِبِر[2] قرار می‌گرفت. سرانجام وبر به شاگردش گفت: «اینشتین شما پسر زیرکی هستید، یک پسر بسیار زیرک، امّا یک عیب بزرگ دارید: شما به خودتان اجازه نمی‌دهید چیزی به شما گفته شود.»

واکنش اینشتین فقط این بود که از کلاسهای درس دور بماند و در این فرصتها آثار نظریه‌پردازان بزرگ قرن نوزدهم، کیرشهف، هلمهلتز، هرتز، ماکسول، هندریک لورنتس و بولتزمن را بخواند. خوشبختانه، برنامهٔ آزادمنشانهٔ زوریخ چنین استقلالی را مجاز می‌دانست. اینشتین در یادداشتهای زندگینامهٔ شخصی‌اش می‌نویسد: «به‌طور کلی فقط دو امتحان بود، گذشته از این، شخص می‌توانست تنها به یکی از آنها که مایل است بپردازد . . . این امر آزادی انتخاب دنبال‌کردن فعالیتها را تا چند ماه پیش از امتحان می‌داد. این آزادی برای من لذت‌بخش بود و با خرسندی ناآگاهی بدوخوب وابسته به آن را که به مراتب مصیبت کمتری داشت، پذیرفتم.»

امّا عاقبت کار نشان می‌دهد که کیفر آن بیش از یک ناآگاهی بد و خوب بوده است. آمادگی برای امتحان نهایی یک کابوس بود و حاصل موفقیت‌آمیز آن ناشی از کمک دوست او مارسل گروسمان[3]

1. Hermann Minkowski 2. Heinrich Weber 3. Marcel Grossmann

بود که مطالب درس را بی‌نقص نسخه‌برداری می‌کرد. اینشتین باردیگر در یادداشتهای زندگینامهٔ شخصی‌اش به ما می‌گوید که فشار آن امتحان «چنان اثر چشم‌ترسی برای من داشت، که پس از گذراندن آن ... متوجه شدم که به مدت یک سال از هر مسئلهٔ علمی بیزارم.» و بعد دربارهٔ سخت‌گیری که سیستم آموزشی بر پرورش علاقه‌مندیهای فکری شاگرد می‌گذارد، اضافه می‌کند که: «در واقع چیزی کمتر از یک معجزه نیست که روشهای جدید تعلیم هنوز به‌طور کلی پرسش کنجکاوانهٔ مقدس را خفه نکرده است؛ زیرا این نهال ظریف، صرف‌نظر از انگیزش، عمدتاً در نیاز به آزادی پایداری می‌کند.»

اینشتین در پاییز سال ۱۹۰۰ از پلی‌تکنیک فارغ‌التحصیل شد، و طی چند ماه بعد دو رویداد مهم زندگی‌اش را از سرگذراند: او نخستین مقاله‌اش را منتشر کرد ـ در مجلد ۴ سالنامهٔ فیزیک (*Annalen der Physik*) جایی که درست چهل صفحه بعد، شامل مقالهٔ آغازین ماکس پلانک دربارهٔ نظریهٔ کوانتومی بود ـ رویداد دیگر آنکه پس از مدتهای طولانی تابعیت سویس را دریافت کرد. گرچه نُه سال بعد او مجبور شد که کشور سویس را ترک کند، و برای سکونت به آنجا بازنگشت، اما هرگز دلبستگی به رأفت انسانی و دموکراسی سویسی کشور عالی و بی‌نظیرشان را فراموش نکرده و می‌گفت، سویس «زیباترین گوشه‌ای از زمین است که من می‌شناسم.»

اکنون، او درصدد یافتن شغلی بود. دستیاری مورد انتظار او زیرنظر وبر هرگز تحقق نیافت. (اینشتین به یکی از دوستانش نوشت: «وبر بازی ریاکارانه‌ای با من کرد.») پس از دو موفقیت آموزشیِ موقتی، اینشتین به یاری پدر مارسل گروسمان، در سال ۱۹۰۲ در ادارهٔ ثبت اختراعات برن به عنوان کارشناس درجه سه منصوب شد.

حال که اینشتین کار ثابتی به‌دست آورده بود، به فکر ازدواج افتاد، و سال بعد با میلوا ماریک[1]، همکلاسی او در پلی‌تکنیک زوریخ ازدواج کرد. پیشینهٔ میلوا به یک اسلاوی اهل صربستان می‌رسید. او باریک اندام و زیبا بود و اندکی از بیماری سل دوران کودکی رنج می‌برد. میلوا امیدوار بود که یک دورهٔ علمی را دنبال کند، و به زوریخ رفت زیرا سویس در آن زمان تنها کشور آلمانی‌زبانی بود که تحصیل علم برای زنان در دانشگاه مجاز بود ـ این زوج پس از ورود به پلی‌تکنیک زوریخ به زودی به هم علاقه‌مند شدند. در سال ۱۹۰۱ روابط آنان عمیقتر شد و در سال ۱۹۰۳ اینشتین و میلوا ازدواج کردند.

این ازدواج هرگز موفقیتی نداشت. میلوا پس از ناراحتیهای بارداری، مشکل زایمان، و از دست دادن فرزند، طرحهای سیر زندگی‌اش فروریخت. او نسبت به دوستان بی‌قید اینشتین بخل می‌ورزید، و مستعد دوره‌هایی از افسردگی بود. از سوی دیگر، اینشتین شوهر پراحساسی نبود، توان عقلانی، عاطفی و هیجانی بسیار زیادی صرف کارش می‌شد تا یک ازدواج دشوار را به سرانجام برساند. اینشتین در سالخوردگی، اظهار می‌کرد که «با احساس وظیفه» وارد امر ازدواج شده است. او می‌گفت، که من «با یک مقاومت درونی، مبادرت به کاری کرده‌ام که فراتر از توانم بوده است.»

1. Mileva Maric

پیشگامان

در سال ۱۹۰۵، به هنگامی که اینشتین در سن بیست‌وشش سالگی بود، شادمانه در ادارهٔ ثبت اختراع برن کار می‌کرد، با وجود این برای برقراری آشنایی با فیزیکدان نظریه‌ای (دیگر)، او سه مقاله در سالنامهٔ فیزیک منتشر کرد. این سالنامه مُجلد ۱۷ از مجلّه بود، و چنانکه ماکس بورن اظهار می‌کند «این، یکی از برجسته‌ترین مجلّدها در کل ادبیات علمی است. این سالنامه شامل سه مقاله از اینشتین، هر یک دربارهٔ موضوع متفاوتی بود، که امروزه هرکدام یک شاهکار به شمار می‌آید.»

نخستین مقالهٔ او در سال ۱۹۰۵ سهمی از نظریهٔ کوانتوم داشت، که با تصور و توصیف باریکه‌های نور به صورت بارشهایی از ذرات، «یا کوانتومها»، نظریهٔ اثر فوتوالکتریک را شکوفا کرد. من دربارهٔ این مقالهٔ انقلابی در فصل ۱۵ بحث بیشتری خواهم کرد. مقالهٔ دوم، دربارهٔ واقعیت مولکولهای مشاهده‌پذیر به صورت ذرات کلوئیدی بود که در فصل ۱۳ ذکری از آن به میان آمد. اکنون توجه ما به سومین مقاله است که در واقع برداشت اینشتین از نظریهٔ نسبیت را ارائه می‌کند.

در زمانی که اینشتین وارد این میدان شد، نظریهٔ نسبیت تاریخی طویل و برجسته‌ای داشت. اینشتین در زمرهٔ پیشگامانی که بعضی از آنها غولهایی همچون گالیله، نیوتون، ماکسول و لورنتس بودند، محسوب می‌شود. گالیله می‌گوید اصل نسبیت برای علم مکانیک در شیوهٔ معمولی او که آشکارا مشاهده‌پذیر است، به کار می‌آید:

> با دوست خود در کابین زیرعرشهٔ کشتی بزرگی بروید و تعدادی مگس، پروانه و جانداران پرندهٔ دیگر همراه ببرید. کاسهٔ بزرگی محتوی آب که چند ماهی در آن باشد فراهم کنید؛ بطری محتوی آبی را در جایی آویزان کنید، به‌طوری که آب درون آن قطره قطره روی ظرف پهنی که زیر آن باشد، بریزد. درِ کابین را ببندید. وقتی کشتی آرام و بی‌حرکت است، به دقت مشاهده کنید که چگونه پرندگان کوچک با سرعتهای مساوی به همهٔ اطراف کابین پرواز می‌کنند. ماهی بی‌تفاوت در همهٔ جهات شنا می‌کند؛ قطرهٔ آب در ظرفِ زیر آن می‌افتد، و در پرتاب چیزی به طرف دوست خود، لازم نیست قوت پرتاب شما در یک جهت بیشتر از جهت دیگر باشد، البته در صورتی که فاصله‌ها مساوی باشند. با پاهایتان به‌طور هماهنگ، به بالا بجهید، در هر جهت از فضاهای مساوی می‌گذرید. وقتی همهٔ این موارد را به دقت مشاهده کردید (گرچه شکی نیست که وقتی کشتی آرام و بی‌حرکت است هر چیزی می‌باید به همین طریق صورت گیرد)، اگر کشتی با هر سرعتی که شما می‌خواهید پیش برود، مادامی که حرکت یکنواخت است، افت‌وخیزی ندارد و شتاب نمی‌گیرد، در می‌یابید که در تمام موارد مذکور کمترین تغییری حاصل نمی‌شود، به‌طوری که در هر یک از آن موارد نمی‌توانید بگویید کشتی در حال حرکت است یا در حال سکون.

کشتی گالیله، یا هر سیستم دیگری که با سرعت ثابت حرکت می‌کند، در واژگان جدید یک «چارچوب مرجع لَخت "اینرسیال"»، یا فقط «چارچوب لخت» نامیده می‌شود، زیرا در آن قانون لختی گالیله محفوظ می‌ماند. تعمیم اصل نسبیت گالیله به ما می‌گوید که قانونهای مکانیک در هر چارچوب لختی دقیقاً یکسان است («شما نمی‌توانید از هر یک از آثار مشاهده‌شده در کشتی، بگویید که کشتی در حال حرکت است یا در حال سکون»).

گزارهٔ اصل نسبیت نیوتون، که او از سه قانون حرکتش استخراج کرد، بیان مشابهی بود، بجز آنکه موضوع بحث‌انگیزِ «فضای ساکن» را مطرح می‌کرد: «حرکتهای اجسامی که در فضای معینی گُنجیده‌اند، در میان خودشان به یک منوال است، خواه آن فضا در حال سکون باشد، یا به‌طور یکنواخت حرکت کند، به جلو در یک خط مستقیم، بدون هرگونه حرکت دورانی.» امّا در حال سکون نسبت به چه؟

نیوتون به مفهوم فضای مطلق باور داشت، فضای مطلقی که هرگونه حرکت یا فقدان حرکتی را می‌توان به آن ارجاع کرد. او به همین منوال یک چارچوب زمان مطلق را اتخاذ کرد که در آن اندازه‌گیری هرگونه حرکتی امکان‌پذیر می‌شد؛ یک چارچوب زمان برای همهٔ ناظران به کار می‌آید.

ماکسول و معاصران او مفهوم فضای مطلق نیوتون را پذیرفتند، و آن را با ملأ فراگیری به نام اِتِر پُر کردند. نقش اصلی اِتِر برای نظریه‌پردازان قرن نوزدهم این بود که مکانیسمی برای انتشار نور و میدانهای مغناطیسی دیگر فراهم آورد، قطع‌نظر از فضای خالی. معلوم شده بود که اِتِر ابزار نظریه‌ایِ چندکاره است ـ بسیار چندکاره ـ نظریه‌پردازان بریتانیا و دیگر کشورهای اروپایی هرگز نتوانستند به این اجماع‌نظر برسند که کدام یک از بسیاری مدلهای اِتِر، یک مدل استاندارد است.

کسی که فیزیک اِتِر و ارتباطهای آن را با نظریهٔ میدان با وضوح بسیار می‌دانست، و در عین حال به اینشتین یاری رساند تا راه خود را بیابد، هندریک لورنتس[1] بود؛ او از سالهای ۱۸۷۷ تا ۱۹۱۲ استاد فیزیک نظریه‌ای در دانشگاه لیدن بود. نسلهایی از فیزیکدانان جوان توانایی فوق‌العادهٔ او برای ایفای نقش دوگانه‌ای را که به عنوان نظریه‌پرداز خلاق و منتقد مشفق داشت، می‌ستودند. شیوهٔ کار او مانند ماکسول و گیبس جمع‌آوری مکتبی از دانشجویان محقق نبود، با وجود این فیزیکدانانی از همهٔ جهان در جلسات سخنرانیهایی که دربارهٔ الکترودینامیک داشت، حاضر می‌شدند. در ابتدای قرن همگی او را به عنوان رهبر جامعهٔ بین‌المللی فیزیک می‌شناختند. در آغاز سال ۱۹۱۱، لورنتس به عنوان رئیس کنفرانسهای سلوی در بروکسل عمل می‌کرد. اِرنست سلوی[2] یک شیمیدان صنعتی با ثروت فوق‌العاده بود و علاقهٔ غیرحرفه‌ای به فیزیک داشت. او صورت‌حساب هزینهٔ جا و پذیرایی برازندهٔ شرکت‌کنندگان کنفرانس را می‌پرداخت. لورنتس تنها کسی بود که می‌توانست این جماعتهای بین‌المللی را که اینشتین میل داشت آنها را «ساحره‌های یک‌شنبه‌ها» (Witches Sabbaths) بنامد، هماهنگی ایجاد کند. یکی از زندگینامه‌نویسان لورنتس، راسل مَک کورمَک،[3] می‌نویسد: «اظهارنظر دیگران دربارهٔ لورنتس

1. Hendrik Lorentz 2. Ernest Solvay 3. Russell McCormmach

دانش بی‌همتای او، حُسن‌تدبیر، توانایی تلخیص بغرنجترین مباحث و استدلالها به‌طور واضح، و برتر از همه، مهارت زبان‌شناختی بی‌رقیب او بود.» اینشتین پس از نخستین حضور در کنفرانس سلوی، به یکی از دوستانش نوشت: «لورنتس اعجوبه‌ای از تیزهوشی، ذکاوت و تدبیر استادانه است. یک اثر هنری زنده است! به عقیدهٔ من او هوشمندترین نظریه‌پرداز عصر حاضر است.»

هدف اصلی لورنتس، به عنوان یک نظریه‌پرداز، ایجاد وحدت فیزیک ماده در سطح مولکولی با فیزیک میدانهای الکترومغناطیسی ماکسول بود. یکی از مبانی نظریهٔ لورنتس این مفهوم بود که جایگاه میدانهای الکتریکی و مغناطیسی یک اِتِر مطلقاً ساکن است، که بدون مقاومت قابل اندازه‌گیری در کل ماده نفوذ می‌کند. سنگ بنای دیگر (تا حدّی) با این فرض فراهم آمد که ماده مرکب از ذرات باردار بسیار کوچکی است، و لورنتس سرانجام تشخیص داد آنها همان ذراتی به نام «الکترونها» هستند که ج.ج. تامسن در سال ۱۸۹۷ در پرتوهای کاتودی کشف کرده است. الکترونها میدانهای الکتریکی و مغناطیسی تولید می‌کنند، و این میدانها به نوبهٔ خود، راهنمای الکترونها در اِتِر ساکن می‌شوند. لورنتس معادلات ماکسول را برای چارچوب مرجع اِتِر ساکن نوشت تا میدانها را توصیف کند، و پیام این معادلات را پذیرفت که در آن چارچوب، سرعت نور صرف‌نظر از سرعت و جهت منبع نور همواره یکسان است.

برای تلخیص و نقل داستان پیرامون نقطه‌نظر اینشتین، دو ناظر را تصور کنید که یکی در اِتِر ساکن است، و دیگری در اتاقی ساکن است که با سرعت ثابتی نسبت به اِتِر حرکت می‌کند. این اتاق حامل یک منبع نور ثابت است، و دو ناظر نکاتی دربارهٔ پیامهای نوری تولیدشده از منبع را مقایسه می‌کنند. بر طبق نظریهٔ لورنتس، ناظر اوّل متوجه می‌شود که سرعت یک باریکهٔ نور مستقل از جهت آن است. امّا ناظر دوم چنین چیزی را متفاوت می‌بیند: فرض کنید یکی از دیوارهای اتاق او از باریکهٔ نور، پس از تولیدشدن، دور می‌شود، درحالی‌که دیوار مقابل به طرف باریکهٔ نور نزدیک می‌شود. اگر منبع نور در مرکز اتاق ثابت باشد، باریکهٔ نورگسیل یافته به طرف دیواره‌ای که از باریکهٔ نور پس کشیده می‌شود کندتر از باریکهٔ نوری به نظر می‌رسد که به طرف دیوارهٔ دیگر گسیل می‌یابد، دیواره‌ای که به باریکه نزدیک می‌شود. بنابراین برای ناظر دوم سرعت نور در همهٔ جهات یکسان نخواهد بود.

برای اینکه این بحث را به ماورای یک آزمایش ببریم، می‌توانیم زمین را به منزلهٔ یک اتاق تصور کنیم که در اِتِر حرکت می‌کند و نتیجه‌گیری کنیم که برای ما، یعنی ساکنان اتاق، سرعت نور باید، به هنگامی که نور در جهات گوناگون منتشر می‌شود، متفاوت باشد. در اواخر قرن نوزدهم چند آزمایش برای این انگیزه، طراحی و اجرا شد. ظریفترین این آزمایشها را آلبرت مایکلسن[1] و ادوارد مورلی[2]، در سال ۱۸۸۷ به انجام رساندند. نتیجه‌گیری آنها، احتمالاً مشهورترین نتیجهٔ منفی در تاریخ فیزیک، این بود که سرعت نور (در فضای خالی) اصلاً به حرکت، جهت، یا محل منبع نور بستگی ندارد.

این امر ضربهٔ زیان‌آوری برای نظریهٔ الکترونی لورنتس بود، امّا کاملاً مهلک نبود. او دریافت که می‌تواند نتیجه‌گیری مایکلسون ـ مورلی را با این فرض توضیح دهد که اشیای مادی در جهت حرکتشان

1. Albert Michelson 2. Edward Morley

اندکی منقبض می‌شوند، و فقط همین کافی است تا آزمایش مایکلسون ـ مورلی و تلاشهای دیگر، برای مشخص‌کردن حرکت زمین در اِتِر به وسیلهٔ تغییرات اندازه‌گیری در سرعت نور را عقیم سازد. به نظر لورنتس این انقباض، تغییر بسیار جزئی نیروهای مولکولی در جهت حرکت بود.

اکنون وقت آن است که اینشتین، کارشناس فنی درجه سه را به صحنه آوریم و ردّ آفرینش آنچه را که با نام نظریهٔ نسبیت خاص به ذهن او رسیده بود، دنبال کنیم. او با اصل نسبیت گالیله آشنا شد، از مفهوم فضا و زمان مطلق نیوتون آگاهی یافت. آثار لورنتس را با دقت تمام خواند و تحت‌تأثیر این امر قرار گرفت که آزمایشگران نمی‌توانند به وسیلهٔ اندازه‌گیری تغییرات در سرعت نور، راهی برای تشخیص حرکت زمین نسبت به اِتِر بیابند.

دکترین فضا و زمان

دو نوع نظریهٔ مهم برای اینشتین وجود داشت. او می‌نویسد: «آنها اکثراً سازنده‌اند و می‌کوشند تا با شروع از مطالب طرح رسمی نسبتاً ساده‌ای، تصویری از پدیده‌های پیچیده‌تری را بسازند.» او به عنوان مثال نظریهٔ مولکولی گازها را ذکر می‌کند. این نظریه با فرضیهٔ حرکت مولکولی آغاز می‌شود و از آن توجیهی برای تنوع وسیعی از خواص مکانیکی، گرمایی و پخشندگی گازها ساخته می‌شود. اینشتین ادامه می‌دهد که، «وقتی ما می‌گوییم در فهمیدن گروهی از فرایندهای طبیعی موفق بوده‌ایم، همواره منظور ما این است که یک نظریهٔ سازنده یافت شده است که فرایندهای مورد بحث را دربر می‌گیرد.»

ازگالیله و نیوتون به بعد نظریه‌پردازان نیز آنچه راکه اینشتین «نظریه‌های اصلی» می‌نامد آفریده‌اند. اینها نظریه‌هایی هستند که «روشهای تحلیلی را به کار می‌گیرند نه روشهای ترکیبی (سنتزی). عناصری که اساس و نقطهٔ شروع آنها را تشکیل می‌دهند به‌طور فرضی ساخته نشده‌اند بلکه آنها به‌طور تجربی کشف شده‌اند، ویژگیهای عمومی فرایندهای طبیعی را دارند، اصولی که به ضوابط فرمولبندی شدهٔ ریاضیاتی آنها رونق می‌بخشد، ضوابطی که فرایندهای جداگانه یا بازنماییهای نظریه‌ای آنها را ارضا می‌کند.» اینشتین برای ارائهٔ نمونهٔ عالی یک نظریهٔ اصلی به علم ترمودینامیک اشاره می‌کند، که بر اصول انرژی و انتروپی بنا شده است و امروزه قانونهای اوّل و دوم ترمودینامیک نامیده می‌شوند.

اینشتین نسبیت را به عنوان یک نظریهٔ اصلی می‌نگریست. او مقالهٔ سال ۱۹۰۵ خود، دربارهٔ نسبیت را با مسلّم دانستن دو اصل تجربی آغاز کرد، دو اصلی که نظریه‌اش، با همهٔ استنتاجات شگفت‌انگیزش، بر پایهٔ آنها قرار گرفته است. اصل نخست، اصل نسبیت تعمیم‌یافتهٔ گالیله بود با این بیان که (آن‌طورکه اینشتین چند سال بعد آن را مطرح کرد):

> قانونهای طبیعت مستقل از حالت حرکت چارچوب مرجع است،
> مادامی که این چارچوب بدون شتاب باشد [چارچوب لخت باشد].

عبارت «قانونهای طبیعت» همه‌چیز را شامل می‌شود منشأ قانونهای الکتریکی، اُپتیکی و مکانیکی را دربر می‌گیرد. این اصل دموکراتیک باشکوهی است: همهٔ چارچوبهای مرجع لَخت برابرند؛ هیچ تفاوت و ارجحیتی وجود ندارد.

اصل دوم اینشتین بازشناسی رسمی ثابت بودن نور را به‌دست می‌دهد:

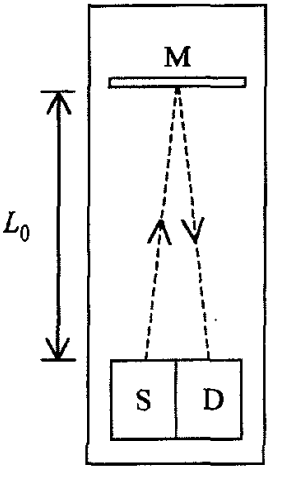
نور در فضای خالی همواره با سرعت معینی منتشر می‌شود، و این امر مستقل از حالت حرکت جسم گسیلنده است.

درحالی‌که لورنتس برای توضیح تغییرناپذیری سرعت نور با یک نظریهٔ سازنده، نظریه‌ای که حرکت نور را وابسته به نیروهای مولکولی فرض می‌کرد در کشمکش بود، اینشتین همهٔ این پیچیدگی‌ها را کنار گذاشت و به سادگی ثابت بودن سرعت نور را به صورت یک اصل مسلم ارتقا بخشید. برای لورنتس و معاصران او این امر یک مسئله و برای اینشتین یک اصل بود.

دو اصل اینشتین او را به این نتیجه‌گیری هدایت کرد که سرعت نور در فضای آزاد تنها اندازهٔ فضا و زمان است که به‌طور موثقی از یک ناظر به ناظر دیگر ثابت است. همهٔ چیزهای دیگر نسبی است. ناظران متفاوت نمی‌توانند قانونهای فیزیکی خود را در یک چارچوب مرجع مطلق مشترک، آنچنان‌که نیوتون تعلیم می‌داد، بیان کنند. ناظران در چارچوبهای لخت متفاوت پی می‌برند به اینکه دنیاهای فیزیکی‌شان، بنابر «دکترین فضا و زمان» متفاوت است، آنچنان‌که اینشتین مطرح می‌کند.

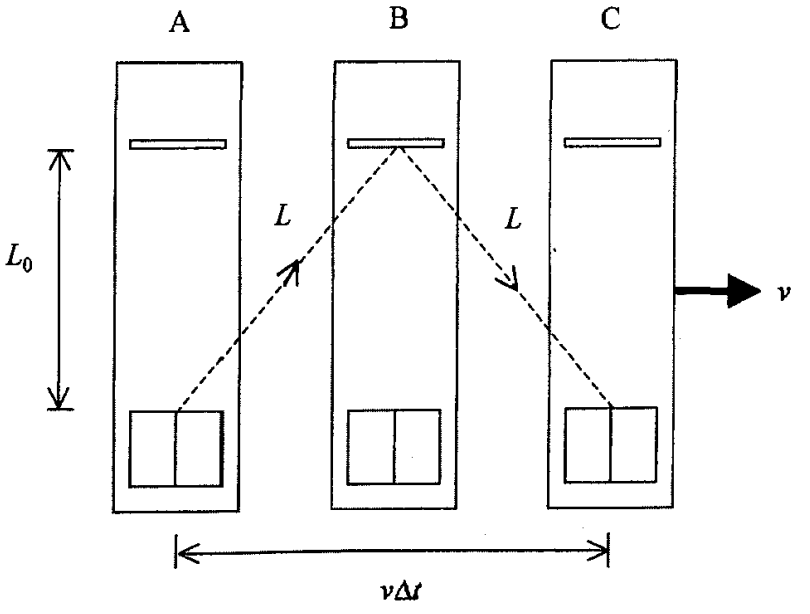
ما می‌توانیم مبانی استدلال اینشتین را نخست با توجه به مسئلهٔ مقدماتی اندازه‌گیریهای زمان دنبال کنیم. وسیلهٔ زمان‌گیری را تصور کنید که اینشتین آن را «ساعت نوری» می‌نامید؛ شکل ۱۴ـ۱ ساعت نوری را از دید ناظری که همراه با آن سیر می‌کند، نشان می‌دهد. درخشهای نور از منبع نور S تولید می‌شوند؛ در مسیرشان به آینهٔ M می‌رسند و به آشکارساز D بازتابیده می‌شوند. زمان کوتاه برای رفت و برگشت یک درخش از S به M و به D یک «تیک» از این ساعت را نشان می‌دهد. اگر c سرعت نور، و L_0 فاصله از S و D به M باشد، این زمان را، که می‌توانیم Δt_0 بنامیم، برابر با $\frac{L_0}{c}$ برای سیر از S به M و همچنین از بازگشت از M به D است. بنابراین

$$\Delta t_0 = \frac{2L_0}{c} \qquad (1)$$



شکل ۱۴ـ۱ ساعت نوری اینشتین، آنطور که ناظری که با این ساعت سیر می‌کند، می‌بیند. در این شکل فاصلهٔ بین منبع و آشکارساز اغراق شده است. این شکل، شکل بعدی و شکل ۱۴ـ۴ با اجازه از کتاب فیزیک هالیدی اقتباس شده است.

اکنون با درنظرداشتن اصل ثبات سرعت نور اینشتین، ما ساعت نوری را از دیدگاه ناظر دومی می‌نگریم که ساعت را در چارچوب لختی می‌بیند که با سرعت ثابت v حرکت می‌کند. شکل ۱۴ـ۲ مسیر درخش نور را آن‌طور که این ناظر می‌بیند، نشان می‌دهد. ساعت در سه موضع نشان داده شده است: در A وقتی درخش نور منبع را ترک می‌کند، در B وقتی آن درخش به وسیلهٔ آینه بازتابیده می‌شود، و در C وقتی که به آشکارساز می‌رسد. (چارچوب لَختِ شاملِ ساعت نوری بسیار سریع حرکت می‌کند: کشتی گالیله یک کشتی فضایی می‌شود.) زمان نمایندهٔ یک تیک این ساعت، اکنون Δt است، و ساعتِ مسافت $v\Delta t$ را در آن زمان طی می‌کند. مسافت متناظر طی‌شده با این درخش نوری $2L$، و به وضوح بزرگتر از مسافت $2L_0$ است که درخش نوری برای ناظر اوّلی در طی یک تیک از ساعت نوری سیر می‌کند. اصل اینشتین اصرار می‌ورزد که سرعت نور برای هر دو ناظر دقیقاً یکسان است، بنابراین زمان Δt برای یک تیک به زعم ناظر دوم بزرگتر از زمان Δt_0 برای یک تیک به زعم ناظر اوّل است. به گفتهٔ دیگر، دو ناظر پی می‌برند به اینکه ساعت نوری با آهنگهای متفاوت تیک می‌زند. این آهنگ برای ناظری که حرکت کردن ساعت را می‌بیند کُندتر است.



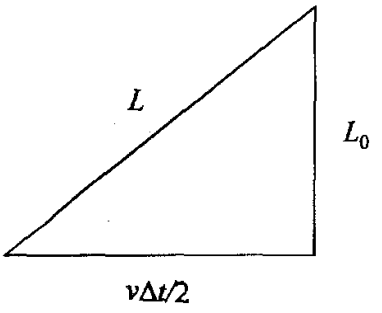
شکل ۱۴ـ۲ ساعت نوری اینشتین، آنطور که ناظری آن را می‌بیند، ناظری که حرکت کردن ساعت با سرعت ثابت v را نظاره می‌کند.

ارتباط ریاضی بین Δt و Δt_0 از هندسهٔ شکل ۱۴ـ۲ نتیجه می‌شود. فاصلهٔ زمانی برای نور که مسافت $2L$ را سیر می‌کند به صورت زیر است

$$\Delta t = \frac{2L}{c} \qquad (2)$$

و به‌طوری که در نمودار ۱۴ـ۳ نشان داده شده است، این نتیجه از شکل ۱۴ـ۲ حاصل می‌شود که

$$2L = 2\sqrt{L_0^2 + (v\Delta t/2)^2}$$



شکل ۱۴ـ۳ از مسافتهایی که در شکل ۱۴ـ۲ نشان داده شده، مثلث راست‌گوشه‌ای ایجاد می‌شود که بنابر قضیهٔ فیثاغورس $L^2 = L_0^2 + (v\Delta t/2)^2$ یا $L = \sqrt{L_0^2 + (v\Delta t/2)^2}$.

بنابراین

$$\Delta t = \frac{2\sqrt{L_0^2 + (v\Delta t/2)^2}}{c}$$

با جایگزین‌کردن L_0 از معادلهٔ (۱) و حل معادله برای Δt، خواهیم داشت

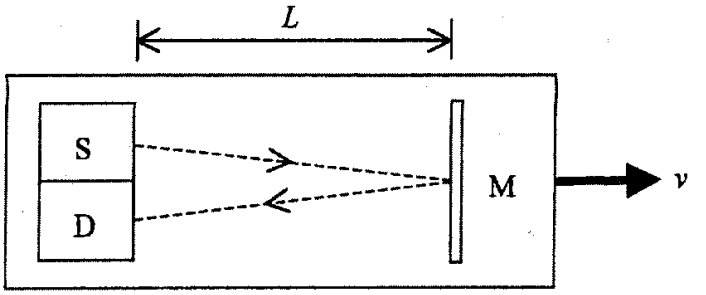
$$\Delta t = \frac{\Delta t_0}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \qquad (۳)$$

اگر سرعت v هر مقدار عادی، یعنی، بسیار کمتر از سرعت نور c باشد، نسبت v/c بسیار کوچک می‌شود، مخرج کسر در معادلهٔ (۳) تقریباً برابر با یک، $\Delta t = \Delta t_0$، و اندازه‌گیریهای زمان به‌طور محسوس مؤثر نخواهد بود. امّا اگر v به c نزدیک شود، مخرج کسر کمتر از یک، Δt بزرگتر از Δt_0 و اندازه‌گیری زمان برای دو ناظر متفاوت می‌شود.

معادلهٔ (۳) برای سرعت v محدودیتهایی به‌جا می‌گذارد: با $v = c$ این معادله برای Δt از لحاظ فیزیکی مقدار بی‌نهایت تردید برانگیزی ایجاد می‌کند، و یا $v > c$ ریشهٔ دوم آن، به اصطلاح ریاضی، عدد موهومی، و از لحاظ فیزیکی توجیه‌ناپذیرتر می‌شود. ما این ممانعت، برای هر سرعتی برابر، یا بزرگتر از سرعت نور را به صورت یک ویژگی عمومی از نظریهٔ اینشتین می‌یابیم.

محاسبات نسبیتی فواصل زمانی که با معادلهٔ (۳) بیان می‌شود، اظهار آثار واقعی فیزیکی است نه فقط ساخته‌های تصنعی ریاضی. ساعتهای نوری و همهٔ جنبه‌های دیگر زمان، از جمله پیرشدن واقعاً به‌طور متفاوت با ناظران گوناگون که (با سرعت زیاد) نسبت به یکدیگر حرکت می‌کند دیده شده است. در واقع اگر بتوانیم قدرت و موفقیتمان را به سرعتی قابل مقایسه با c نسبت به زمین برسانیم ـ که امکان‌پذیر است و اگر برای رسیدن به سرعت زیاد به‌طور آهسته شتاب بگیریم خطرناک هم نیست، همچون در یک سفینهٔ فضایی که با آهنگ شتاب گرانشی زمین g شتاب می‌گیرد ـ ما می‌توانیم وارد یک ماشین زمان شویم و دهها سال پیر شویم، درحالی‌که زمین و ساکنان آن هزاران سال پیر می‌شوند.

همراه با کُند شدن یا اتساع زمان در یک چارچوب لَخت متحرک، اصول اینشتین نیازمند انقباض اندازه‌های طولی نیز می‌شود. این مورد را نیز می‌توان با ساعت نوری مناسبی نشان داد. مانند شکل



شکل ۱۴ـ۴ بار دیگر ساعت نوری اینشتین، آنطور که ناظر مشاهده می‌کند، او می‌بیند که حرکت ساعت موازی با طول ساعت در سرعت ثابت v حرکت می‌کند.

۱۴ـ۲، ما این ساعت را می‌بینیم که با سرعت ثابت v حرکت می‌کند، امّا این‌بار، آنطور که در شکل ۱۴ـ۴ ملاحظه می‌شود، حرکت آن موازی با طول ساعت است.

بار دیگر فرض می‌کنیم که یک درخش نور از منبع S تولید می‌شود. به وسیلهٔ آینهٔ M باز می‌تابد و به آشکارساز D می‌رسد. اگر فاصلهٔ زمانیِ سیر نور از منبع به آینه را Δt_1 بگیریم، طی این زمان، آینه مسافت $v\Delta t_1$ را می‌پیماید، بنابراین درخش نور باید $L + v\Delta t_1$ را طی کند تا به آینه برسد. با توجه به اینکه سرعت نور، مثل همیشه، c است، ما می‌توانیم همان مسافت را به صورت $c\Delta t_1$ محاسبه کنیم، و معادلهٔ زیر را بنویسیم

$$c\Delta t_1 = L + v\Delta t_1$$

یا

$$\Delta t_1 = \frac{L}{c - v} \qquad (۴)$$

اکنون درخش نور در بازگشتش از آینه تا آشکارساز را دنبال می‌کنیم، با فرض اینکه این سیر مستلزم فاصلهٔ زمانی Δt_2 است. نور از آینه شروع، در $L + \Delta t_1$ جاگیر می‌شود و در آشکارساز به پایان می‌رسد، که مسافت $v\Delta t_2$ را در نخستین فاصله و $v\Delta t_2$ را در دومین فاصلهٔ زمانی سیر کرده است. بنابراین مسافت طی‌شده به وسیلهٔ نور در سیر بازگشت به عقب می‌شود

$$(L + v\Delta t_1) \; -(v\Delta t_1 + v\Delta t_2) = L - V\Delta t_2$$

↑ نور اینجا در آینه شروع می‌شود

↑ و در اینجا . . . در آشکارساز پایان می‌یابد

نور هنوز سرعت c دارد، بنابراین می‌توانیم این مسافت را نیز به صورت $c\Delta t_2$ محاسبه و رابطهٔ زیر را به‌دست آوریم

$$c\Delta t_2 = L - v\Delta t_2$$

یا

$$\Delta t_2 = \frac{L}{c + v} \qquad (۵)$$

فاصلهٔ زمانی کل Δt، یعنی زمان یک تیک ساعت، حاصل‌جمع Δt_1 و Δt_2 که در معادله‌های (۴) و (۵) محاسبه شده است، می‌شود.

$$\Delta t = \Delta t_1 + \Delta t_2 = \frac{L}{c-v} + \frac{L}{c+v}$$

با دوشِگرد جبری (ایجاد یک مخرج مشترک و سپس تقسیم صورت و مخرج کسر بر c^2) رابطهٔ فوق به صورت زیر تبدیل می‌شود

$$\Delta t = \frac{2L}{c}\frac{1}{1-v^2/c^2} \qquad (۶)$$

این معادله، انقباض طول را آشکار می‌کند، هرگاه با معادلهٔ (۳) توأم با معادلهٔ (۱) مقایسه شود،

$$\Delta t = \frac{2L_0}{c}\frac{1}{\sqrt{1-v^2/c^2}}$$

اگر دو محاسبهٔ Δt سازگار باشند، می‌باید داشته باشیم

$$L = L_0\sqrt{1-v^2/c^2} \qquad (۷)$$

که به ما می‌گوید طول L_0 یافت‌شده به وسیلهٔ ناظری که با ساعت سیر می‌کند، $L_0\sqrt{1-v^2/c^2}$ برای ناظری که مراقب حرکت ساعت با سرعت ثابت v است تا منقبض می‌شود. این همان معادله‌ای است که لورنتس قبلاً نتیجه‌گیری کرده بود و برای توجیه تلاشهای عقیم‌شدهٔ مایکلسون و مورلی دربارهٔ آشکارسازی حرکت زمین در اِتر لازم داشت.

معادله‌های (۳) و (۷)، بیان‌کنندهٔ نسبیت زمان و طول است که دکترین جدید فضا و زمان اینشتین را مجسم می‌کند، این معادله‌ها آنچه را که فیزیکدانان «سینماتیک»ـ یعنی، فیزیک بدون مفهوم انرژی می‌نامندـ دربرمی‌گیرد. گام بعدی اینشتین توسعهٔ نظریه‌اش در «علم دینامیک» بود که انرژی را نیز شامل می‌شد. او در مقالهٔ درخشان دیگر سال ۱۹۰۵ خود ساختن علم دینامیکی را آغاز کرد که به «نتیجهٔ بسیار جالبی» انجامید: «جرم یک جسم اندازه‌ای از محتوای انرژی آن است.» این قضیه به مدت چند سال مشغلهٔ فکری او بود. در سال ۱۹۰۶، این فکر به خاطر او خطور کرد که «پایستگی جرم حالت خاصی از قانون پایستگی انرژی است.» یک سال بعد او به این نتیجه رسید که، «با توجه به لختی (اینرسی)، جرم m، هم‌ارز با محتوای انرژی، به بزرگی mc^2 است.» این مطلب بیان کلامی معادله‌ای است که امروزه شهرت جهانی دارد: $E = mc^2$.

زیربنای این معادلهٔ انرژی، این مفهوم است که جرم، مانند زمان و طول، نسبی است. زمان و طول هر دو، به سرعت نسبی جسم مشاهده‌شده بستگی دارند، و بنابراین در مورد جرم هم چنین است.

معادلهٔ مربوطه‌ای که جرم m یک جسم متحرک با سرعت ثابت v را محاسبه می‌کند (این بار بدون اثبات) به صورت زیر است

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \qquad (۸)$$

که شبیه معادلهٔ (۳) برای فاصله‌های زمانی است. در حال سکون ($v = 0$)، جسم کمترین جرمش را دارد؛ در حرکت، جرم جسم افزایش می‌یابد، امّا در سرعتهای عادیِ بسیار کمتر از c، این افزایش جزئی است.

معادلهٔ (۸) سررشته‌هایی دربارهٔ mc^2 مشهور اینشتین به‌دست می‌دهد. از ضرب c^2 در دو طرف معادلهٔ (۸)، mc^2 محاسبه می‌شود،

$$mc^2 = \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \qquad (۹)$$

در فیزیک عادی جهانی، v/c در این معادله بسیار کوچک است و v^2/c^2 کوچکتر از آن. ما می‌توانیم از این واقعیت ریاضی که

$$\frac{1}{\sqrt{1-x}} = 1 + \frac{x}{2}$$

هرگاه x بسیار کوچک باشد، استفاده کنیم. ما این تقریب را برای معادلهٔ (۹) با $x = v^2/c^2$ به‌کار می‌بریم و به رابطهٔ زیر می‌رسیم

$$mc^2 = m_0 c^2 + \frac{m_0 v^2}{2}$$

با تصدیق و بازشناسی رابطهٔ $E = mc^2$ اینشتین، خواهیم داشت

$$E = m_0 c^2 + \frac{m_0 v^2}{2} \qquad (۱۰)$$

این معادله انرژی E را به دو بخش تقسیم می‌کند. جملهٔ $\frac{m_0 v^2}{2}$ انرژی جنبشی (سینتیک) آشنایی است که جسمی با جرم m_0 حامل آن است. جملهٔ دوم، $m_0 c^2$، رمزگشاست. اینشتین دریافت این کمیت، همچنان‌که ما امروزه می‌دانیم، نوعی انرژی پتانسیل است که احتمالاً از «جرم سکون» m_0 قابل وصول باشد. چون c^2 بزرگی عظیمی دارد، این انرژی هم‌ارز-جرم نیز بسیار زیاد است. انرژی تولید شده از تبدیل کامل جرم یک کیلوگرمی به انرژی، هم‌ارز انرژی مصرف نفت روزانهٔ کل ایالت متحدهٔ امریکا (پانزده میلیون بشکه در روز) خواهد بود.

واکنشهای معمولی شیمیایی جرم را به انرژی تبدیل می‌کنند، امّا در یک مقیاس اندک است؛ در تشکیل یک کیلوگرم H_2O در واکنش

$$2H_2 + O_2 \rightarrow 2H_2O$$

در حدود $۱/۵ \times ۱۰^{-۱۰}$ کیلوگرم جرم به انرژی تبدیل می‌شود. واکنشهای هسته‌ای مؤثرترند، آنها چند دهم از یک درصد جرمی را که وارد واکنش می‌شود به انرژی تبدیل می‌کنند. وقتی ماده با پادماده برخورد می‌کند، تبدیل کامل است. اینشتین در مقالهٔ ۱۹۰۵ خود اظهارنظر کرد که مواد رادیواکتیو، مانند رادیم، در جریان واپاشی مقداری جرم قابل اندازه‌گیری از دست می‌دهند، امّا سالهای زیادی او نتوانست پیامدهای عملی هم‌ارز جرم–انرژی را ببیند. (در سال ۱۹۳۴، روزنامهٔ پیتزبرگ گازت[1] داستان یک سخنرانی اینشتین را با تیتر درشت چنین گزارش کرد: «اینشتین امید انرژی اتمی را خاردار کرد. تلاشهای آزادشدن نیروی عظیم بی‌ثمری نامیده می‌شود.») درس کامل $E = mc^2$ در سالهای ۱۹۴۰ و ۱۹۴۵ با ظهور فیزیک هسته‌ای، سلاحهای هسته‌ای، راکتورهای هسته‌ای و اضطراب هسته‌ای، آموخته می‌شد.

توفیق بیشتری از نظریهٔ نسبیت این بود که نقطهٔ پایان اَبدی بر مفهوم اِتر گذاشت تنها به این وسیله که برای وجود اِتر هیچ‌گونه دلیل موجهی باقی نگذاشت. اگر اِتری وجود می‌داشت، یک چارچوب مرجع مطلق و برتری، مخالف با اصل اول اینشتین، فراهم می‌آورد، و اگر حرکت در اِتر با تغییراتی در سرعت نور آشکار می‌شد اصل دوم او را نقض می‌کرد. آگهی درگذشت اِتر را که اینشتین و لئوپولد اینفلد[2] در کتاب ارزنده‌ای برای خوانندهٔ عام با عنوان تکامل فیزیک، چنین می‌خوانیم: «اِتر نه ساختار مکانیکی و نه حرکت مطلق‌اش را آشکار می‌کند. چیزی از خواص آن باقی نمی‌ماند مگر آنکه برای منظوری اختراع شده باشد، یعنی توانایی‌اش برای انتقال امواج الکترومغناطیسی.»

برلین

اکنون گفتار ما، به زندگی اینشتین و دنبال‌کردن سیروسلوک او در جهان علمی و ماورای آن بازمی‌گردد. دستاوردها و موفقیت‌های اینشتین در طی هفت سال در ادارهٔ ثبت اختراع از لحاظ درخشندگی خلاقیت بی‌نظیر بودند. شناسایی و تأیید آنها به‌طور اجتناب‌ناپذیری، فرا رسید، و ناگهان، فقط طی پنج سال، او به اوج جهان علمی و دانشگاهی رسید.

در سال ۱۹۰۹، هنگامی که او سی ساله بود، و هنوز با یک «فیزیکدان واقعی» آشنایی نداشت ادارهٔ ثبت اختراعات را ترک کرد و موضعی با عنوان دانشیار در دانشگاه زوریخ را به‌دست آورد. او جانشین کلازیوس بود. آبراهام پایس[3]، زندگینامه‌نویس اینشتین می‌نویسد: «در آنجا استاد فیزیک نظریه‌ای یا فیزیک ریاضی وجود نداشت، چون کلازیوس در سال ۱۸۶۷ دانشگاه را ترک کرده بود.» پایس، همچنین اینشتین را تا حدی به عنوان یک معلم بی‌علاقه توصیف می‌کند: «او در کلاس با کُت نسبتاً ژنده و شلوار کوتاه کُهنه ظاهر می‌شود، برگه کاغذی به‌قدر یک کارت ویزیت که روی آن طرح کلی مطالب درس را یادداشت کرده است در دست دارد.» ارنست اشتروس[4] یکی از دستیاران اینشتین

1. Pittsburgh Gazette 2. Leopold Infeld 3. Abraham Pais 4. Ernst Straus

می‌گوید: «او از توضیح ایده‌هایش لذت می‌بُرد، و در این امر به‌طور استثنایی به‌خوبی از عهده برمی‌آمد، زیرا طریق فکر خودش با اصطلاحات شهودی و غیررسمی همراه بود. آنچه احتمالاً برای او آزاردهنده بود، لزوم آماده کردن و ارائهٔ مطلبی بود که درآن لحظه محور مورد علاقهٔ او نبود. ازاین‌رو آماده‌سازی سخنرانیهایش با اندیشه‌های او اختلال ایجاد می‌کرد.»

اینشتین در زوریخ، از پیش نشان‌دادن علامتهایی از ناراحتی را آغاز کرده بود که فهم آن دربارهٔ چنین مردی دشوار بود، زیرا همواره می‌گفت او هیچ کاری نمی‌خواهد بکند، مگر آنکه دربارهٔ فیزیک نظریه‌ای بیندیشد. طی پنج سال، او در سه کشور می‌زیست و مقامهای دانشگاهی در چهار دانشگاه را داشت. در پنج سال دیگر می‌توانست در موضوعات سیاسی گوناگون غرق شود، از جمله صلح‌طلبی، صهیونیسم، و حکومت بین‌المللی. پایس توضیح می‌دهد که، «اینشتین در شصت سالگی، یک‌بار مورد نقد قرار گرفت که او روح و جسم خود را به علم فروخته است، از "من" و "ما" به "آن" می‌گریزد. با وجود این جویای فاصلهٔ بین خودش و مردم دیگر نیست. جدایی در درون او جای دارد و به او امکان می‌دهد که در زندگی میان مردم راه برود و غرق اندیشه‌های خودش باشد. آنچه دربارهٔ این مرد غیرعادی بود این است که او در عین حال نه بی‌تماس و بدون خبر از دنیا بود، نه گوشه‌گیر و عزلت‌گزین.»

حرکت بعدی اینشتین در سال ۱۹۱۱، از زوریخ به پراگ بود، که در آنجا به عنوان استاد ممتاز در دانشگاه کارل فردیناند (یا آلمان) منصوب شد. او در پراگ از لحاظ عقلانی و فرهنگی احساس انزوا می‌کرد. همکاران علمی معدودی بودند که او می‌توانست با آنان در مورد کارش گفتگو کند، و او اشتراک اندکی با جامعهٔ آلمانی یا چک داشت. شانزده ماه بعد بار دیگر او عازم بازگشت به زوریخ شد، این‌بار به دانشگاه فنی سویس (ETH، قبلاً پُلی‌تکنیک زوریخ).

اندکی بیشتر از یک سال بعد، در بهار سال ۱۹۱۳، ماکس پلانک و والتر نرنست با همسرانشان برای گردش و تفریح ـ و ترغیب اینشتین برای رفتن به برلین ـ وارد زوریخ شدند. پیشنهاد آنان شامل عضویت در آکادمی علمی پروس با حقوق قابل‌ملاحظه، یک کُرسی در دانشگاه برلین (بدون اجبار تدریس)، و مدیریت یک مؤسسهٔ فیزیک که در جریان تأسیس بود. این فرصت فوق‌العاده‌ای بود، امّا اینشتین تردید داشت. او هفده سال قبل به آلمان پُشت کرده بود، و بدگمانی او از خصوصیت پروسی او در حال، کمتر از آن زمان نشده بود. امّا برای اینشتین یک مسئله بالاتر از همهٔ مسائل دیگر بود. او به قدر کافی از آموزش رنجیده و خسته شده بود. پایس می‌گوید: «همهٔ آنچه می‌خواست انجام دهد فکرکردن بود.» احتمالاً او به سرعت تصمیم گرفت، امّا او به پلانک و نرنست نمادهای تشکیلات علمی پروسی، گفت برای بررسی پیشنهادشان نیاز به زمان دارد. او به آنان گفت در ملاقات بعدی از تصمیم من آگاه خواهید شد: من یک شاخه گل رُز با خودم می‌آورم، اگر گل به رنگ سرخ بود پاسخ من آری و اگر سفید بود پاسخ من منفی خواهد بود.

در نامه‌ای که پلانک و نرنست برای حمایت از انتصاب اینشتین به وزیر آموزش پروس نوشتند مقداری دربارهٔ مراتب اعتبار و شهرت اینشتین در سال ۱۹۱۳ بود که شامل ناکامیهای ادعاشده نیز می‌شد:

تعبیر اینشتین از مفهوم زمان، نتایج و پیامدهای کل فیزیک به ویژه مکانیک و حتی معرفت‌شناسی را رُفت‌وروب کرده است . . . گرچه این ایدهٔ اینشتین برای توسعهٔ اصول فیزیکی محقق شده و بنیادی می‌نمایاند، امّا اکنون هنوزکاربرد آن در مرز سنجش‌پذیری است. . . . اهمیت بسیار بیشتر برای فیزیک عملی نفوذ مسائل دیگر اوست که اکنون کانون توجه است. بنابراین او نخستین کسی بود که اهمیت نظریهٔ کوانتومی برای انرژی اتمی و جنبشهای مولکولی را نشان داد و از آن فرمولهایی برای گرماهای ویژهٔ جامدات ارائه کرد. . . . روی‌هم‌رفته، می‌توان گفت که در میان مسائل بزرگ فراوان در فیزیک جدید، به دشواری مسئله‌ای را می‌توان یافت که اینشتین در آن سهم قابل‌ملاحظه‌ای نداشته باشد. اینکه گاهی در تأملاتش به هدفی نرسیده باشد، مثلاً در نظریهٔ کوانتومهای نور او [که امروزه «فوتون» نامیده می‌شود و به‌طور اجتناب‌ناپذیری به عنوان عضوی از خانوادهٔ ذرات بنیادی است]، نمی‌تواند بیانگر تضادی برای او باشد. زیرا در دقیقترین علوم طبیعی هرگونه نوآوری مستلزم مخاطره‌ای است. در حال حاضر او دربارهٔ نظریهٔ جدید گرانش کار می‌کند، تنها آینده خواهد گفت که چه موفقیتی حاصل خواهد شد.

رُز به رنگ سرخ بود، و اینشتین عازم برلین شد. خوشحال از اینکه تدریس در کار نیست، امّا نسبت به پایان این معامله بدگمان بود. او پیش از ترک زوریخ به یکی از دوستانش گفت: «آقایان در برلین بر سر من قمار می‌کنند، گویی که من مرغی هستم که تخم طلایی می‌گذارد، آنچه مربوط به خود من است، من حتی نمی‌دانم که آیا درصدد گذاشتن تخم دیگری هستم یا نه.»

میزان اُبهتی از سلطهٔ علم این است که دو شخص کاملاً نامتجانس همچون اینشتین و پلانک را با زبان و مناسبات دوستانه به هم می‌پیوندد. اینشتین از هرگونه تکلف و تشریفات اجتناب می‌کند، از میلیتارسیم، ناسیونالیسم، انضباط خُشک و سنتهای پروسی نفرت دارد و همهٔ عمر صلح‌طلب است. امّا با وجود این بی‌قیدی، بی‌نظمی و صلح‌دوستی ضدپروسی، احترام عمیقی برای ماکس پلانک قائل است. شخصی که با لباسی آراسته و رسمی در خدمت نظام پروس است. آنچه اینشتین در پلانک می‌دید و قدردانی می‌کرد صداقت، جامعیت و عمق تعهد و پایبندی او به علم بود. اینشتین همواره کسی را که بتواند با شدت دلبستگی خودش به فیزیک رقابت کند تحسین و بعضاً با او دوستی برقرار می‌کرد.

رفتن به برلین ضربه‌ای نهایی به ازدواج لغزندهٔ قبلی او بود. میلوا پس از ورود به برلین به زودی با دو پسرش به زوریخ بازگشت و در آنجا ماند. او در زندگی بعدی خوشبخت نبود. میلوا نمی‌توانست جدایی یا طلاق را که سرانجام در سال ۱۹۱۹ صورت گرفت، بپذیرد. امکانات مالی او معمولی بود، حتی پس از آنکه اینشتین پول جایزهٔ نوبل را که در سال ۱۹۲۱ دریافت کرده بود، به او منتقل کرد. پسر جوانتر او، اِدوارد، بیشتر عمرش از لحاظ ذهنی ناپایدار بود و در اثر ابتلا به اسکیزوفرنی در یک بیمارستان روانی درگذشت.

اکنون اینشتین مردی مجرّد و تحت «مراقبت صمیمانهٔ دختر خاله‌اش» بود، کسی که او مدعی بود «مرا به برلین کشانید». این دختر الزا اینشتین لوونتال[1] بود، که با اینشتین خویشاوندی دوجانبه داشت (مادرهایشان با هم خواهر و پدربزرگهایشان با هم برادر بودند)، و از دوران کودکی با هم دوست بودند. اِلزا در جوانی ازدواج کرده بود، امّا اکنون مطلقه بود، و با دو دخترش، مارگو[2] و ایلزه[3] در برلین، هنگامی که اینشتین وارد شد، زندگی می‌کرد. در سال ۱۹۱۷ اینشتین از یک بیماری جدی که سلامت او را تهدید می‌کرد، رنج می‌برد، و الزا مراقب پرستاری و تغذیهٔ او بود. بیماری اینشتین بهبود یافت و دو سال بعد او با پرستارش ازدواج کرد. گرچه اینشتین به ندرت قدرشناسی‌اش را اظهار می‌کرد، امّا می‌باید پی برده باشد که وجود الزا برای او ضروری و اجتناب‌ناپذیر بود. الزا مانند بعضی از زنان دیگری که در این تاریخچه‌ها ذکری از آنان به میان آمده است، مدیر لایق و باکفایتی برای امور غیرعلمی شوهرش شد، و به او امکان می‌داد تا به کار اصلی‌اش که تفکر دربارهٔ فیزیک نظریه‌ای بود، بپردازد.

پایس خصوصیات کلی الزا را این‌گونه توصیف می‌کند: «نجیب، خون‌گرم، مادرانه و نمونهٔ اصلی بورژوازی بود، او مراقبت از آلبرتش را دوست می‌داشت و از شهرت او افتخار می‌کرد.» چارلی چاپلین، که در کالیفرنیا از اینشتین و همسرش پذیرایی کرده بود، الزا را این‌گونه توصیف می‌کند: «او زنی بود با اندام متناسب و شور و نشاط فراوان؛ آشکارا از اینکه همسر مرد بزرگی بود لذت می‌برد و سعی نمی‌کرد که این واقعیت را پنهان کند؛ اشتیاق او دلنشین بود.»

به سختی هر فصلی از داستان اینشتین مرسوم یا قابل پیشگویی است، امّا از هر نظر که بگویی عجیبترین بخش آن واکنش عموم از شرح و بسط نظریهٔ «خاص» ۱۹۰۵ او به یک نظریهٔ «عام» در سال ۱۹۱۵ بود. این خودِ نظریه نبود، که مردم معدودی آن را می‌فهمیدند، بلکه اعلام تأیید یکی از پیشگویی‌هایی بود که جلب توجه انبوهی را فراهم آورد.

اینشتین نظریهٔ عامّش را به کار گرفت تا نشان دهد که یک میدان گرانشی اثر خَم‌کردن پرتوهای نور را دارد، و او اثر گرانی خورشید بر نوری را محاسبه کرد که از ستارگان نشأت می‌گرفت و پیش از آنکه به تلسکوپهای روی زمین برسد از نزدیکی خورشید عبور می‌کرد. این اثر کوچک امّا قابل اندازه‌گیری بود، اگر مشاهده‌ها در طی یک گرفت خورشیدی صورت می‌گرفت. پس از ناکامیها، وقفه‌ها و دخالتهای سیاسی فراوان ـ در آن زمان جنگ جهانی اول در جریان بود ـ دو گروه اعزامی انگلیسی، یکی زیر نظر ارتور ادینگتون[4] به جزیرهٔ پرینسیپه[5] در ساحل غربی افریقا و دیگری با راهنمایی اندریو کرّملین[6] به سوبرال[7] در شمال برزیل، خورشیدگرفتگی سال ۱۹۱۹ را مشاهده، و پیشگویی‌های اینشتین را تأیید کردند.

1. Elsa Einstein Löwenthal 2. Margot 3. Ilse 4. Arthur Eddington 5. Principe
6. Andrew Crommelin 7. Sobral

یک‌شبه، اینشتین مشهورترین دانشمند جهان شد. او با همکاران سرشناس و نه‌چندان سرشناس، جوامع علمی، خبرنگاران و مردم عادی محاصره شد. او به یکی از دوستانش نوشت: «از زمانی که سیل مقالات روزنامه‌ها سرازیر شده، چنان در پرسشها، دعوتها، به چالش کشیدنها غرق شده‌ام، که در عالم رؤیا تصور می‌کنم در جهنم می‌سوزم و پستچی شیطانی است که دائم بر من می‌غرّد، بسته‌های جدید نامه‌ها را بر سرم می‌کوبد، زیرا نامه‌های قبلی را پاسخ نداده‌ام.» این کل ماجراست، اما درک این مطلب ناممکن است که چه چیز این واکنش را به آنچه روی‌هم‌رفته یک تلاش نظریه‌ای و مرموز است، تسریع کرد. آلفرد وایتهد[1] احساس عمومی دربارهٔ جنبهٔ بیشتر عقلانی این موضوع چنین اظهار می‌کند: «یک ماجرای بزرگ در تفکر، سرانجام به ساحل ایمن رسید.»

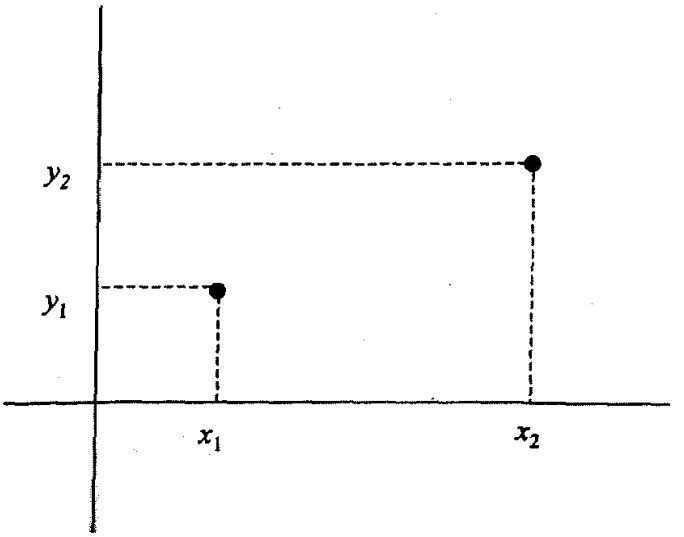
فضا زمان

دکترین جدید فضا و زمان که با نظریهٔ خاص اینشتین در سال ۱۹۰۵ به بار آمد مستلزم نسبیت زمان همچنین نسبیت طول و فضاست. اگر ناظری در یک چارچوب لخت، رویدادی را با مختصات x، y، z و زمان t توصیف می‌کند، ناظر دیگر در چارچوب لخت متفاوتی، برای بیان مختصات فیزیکی آن رویداد مختصات متفاوت x'، y'، z'، و زمان متفاوت t' را به کار می‌گیرد. متغیّر زمان جدا از متغیرهای فضایی نیست، در صورتی که در فیزیک نیوتونی جدا از هم است. این موضوع ظاهراً بر همان اساس و روابط متغیّرهای فضایی به ذهن اینشتین راه یافت. هرمان مینکوفسکی[2] یکی از استادان ریاضی پیشین اینشتین این نکته را گرفت و آن را به صورت یک ساختار ریاضی بسط داد به‌طوری که سرانجام استفاده از آن برای اینشتین ضروری بود تا با جرئت به ماورای نسبیت خاص یعنی نسبیت عام برسد. مینکوفسکی برنامه‌اش را در آغاز با خطابه‌ای که در سال ۱۹۰۸ ایراد کرده بود، مطرح کرد: «نظرهایی از فضا و زمان را که من می‌خواهم برای شما مطرح کنم از بطن فیزیک آزمایشی نشأت می‌یابد و نقطهٔ قوت آنها ناشی از آن است. آنها ریشه‌ای و بنیادین‌اند. اما از این پس فضا به تنهایی و زمان به تنهایی محکوم به زوال در سایه‌هایی محض‌اند، و فقط نوعی وحدت آن دو به صورت یک واقعیت مستقل به جا می‌ماند.»

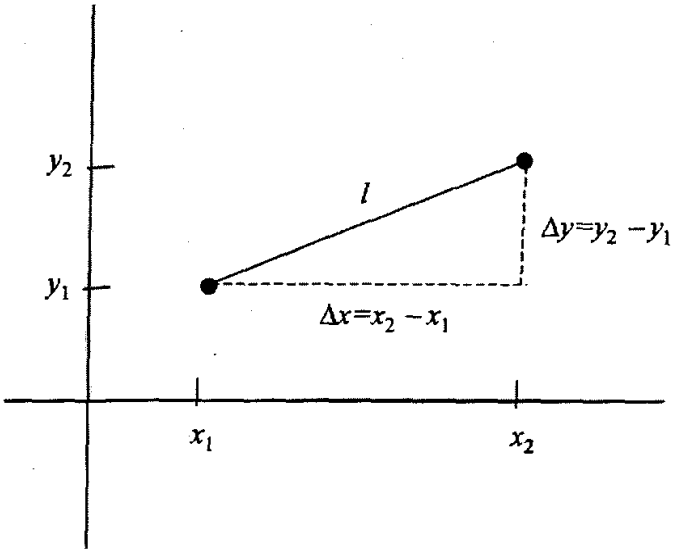
فیزیک دربارهٔ رویدادهایی در فضا و زمان است. ما هر رویداد را در فضا، در چارچوب مرجعی مجهز با یک دستگاه مختصات، جای می‌دهیم. مثلاً، دو رویداد در دو بُعد فضایی با زوج مختصات x_1، y_1 و x_2، y_2 (شکل ۱۴ـ۵) جای دارند، و فاصلهٔ فضایی l بین آنها با ایجاد یک مثلث راست‌گوشه (شکل ۱۴ـ۶) و به کار بردن قضیهٔ فیثاغورس محاسبه می‌شود:

$$l^2 = \Delta x^2 + \Delta y^2 \quad \text{یا} \quad l = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2}$$

1. Alfred Whitehead 2. Hermann Minkowski



شکل ۱۴ـ۵ مکان دو رویداد در دو بُعد فضایی در دو نقطهٔ x_1، y_1 و x_2، y_2.



شکل ۱۴ـ۶ محاسبهٔ فاصلهٔ فضایی l بین دو رویداد از شکل ۱۴ـ۵.

در سه بُعد فضایی به این معادله‌ها یک جملهٔ Δz^2 برای سومین بُعد اضافه می‌شود:

$$l^2 = \Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2 \quad \text{یا} \quad l = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2} \qquad (۱۱)$$

با توجه به نظریهٔ میدان، ما با فضا به صورت یک پیوستار برخورد می‌کنیم و محاسباتی به عمل می‌آوریم برای دو رویداد مجاور که با فاصلهٔ بسیار کوچک dl از هم جدا هستند ـ آن محاسبه همان دستورعمل معادلهٔ (۱۱) را دنبال می‌کند با تعویض dl بسیار کوچکتر به جای l، و تعویض Δx، Δy، Δz با dx، dy، dz بسیار کوچکتر

$$dl^2 = dx^2 + dy^2 + dz^2 \quad \text{یا} \quad dl = \sqrt{dx^2 + dy^2 + dz^2} \qquad (۱۲)$$

مینکوفسکی از ما می‌خواهد که این تصویر سه بعدی را با یک تصویر چهار بعدی تعویض کنیم، در این صورت هر رویداد فیزیکی در یک «نقطهٔ جهانی» با چهار مختصه قرار می‌گیرد، سه مختصهٔ

فضایی z، y، x و مختصهٔ زمانی t. چگونه ما می‌توانیم یک فاصله در این تصویر چهاربعدی از فضا و زمان ـ یا بهتر بگوییم «فضا زمان» ـ را قابل مقایسه با dl در سه بُعدی، محاسبه کنیم. قواعد فیزیک ریاضی جمع سادهٔ جمله‌های فضایی و زمانی به صورت $dt^2 + dx^2 + dy^2 + dz^2$ مجاز نیست، زیرا dz و dy، dx اندازهٔ یک چیز (طول) و dt چیز دیگری (زمان) است. در یک معادلهٔ فیزیکی اگر دو جمله با هم جمع شود آنها باید اندازهٔ یک چیز و واحدهای یکسان داشته باشند.

ساده‌ترین راه برای رهیافت ارتباطها و فاصله‌ها در فضا زمان تصور دو رویداد است که با مطمئن‌ترین وسایل اندازه‌گیری، یعنی یک پرتو نور، به هم متصل می‌شوند. فرض کنید یک درخش نور در یک نقطهٔ جهانی t_1، z_1، y_1، x_1 تولید و سپس در نقطهٔ‌جهانی t_2، z_2، y_2، x_2 آشکارسازی شده باشد. مسافت طی‌شده به وسیلهٔ درخش نور $\sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2}$ است که مانند قبل $\Delta x = x_2 - x_1$، $\Delta y = y_2 - y_1$ و $\Delta z = z_2 - z_1$ است. همین مسافت با ضرب کردن سرعت نور c در Δt، زمان منقضی‌شده بین دو رویداد، محاسبه می‌شود، یعنی

$$\sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2} = c\Delta t$$

هرگاه این معادله اندکی بازآرایی شود، با مباحث بعدی بهتر سازگاری دارد. اکنون دو طرف معادله را به توان دو می‌رسانیم و همهٔ جملات را به یک طرف می‌بریم

$$c^2\Delta t^2 - \Delta x^2 - \Delta y^2 - \Delta z^2 = 0$$

برای رویدادهای مجاور هم در پیوستار فضا زمان Δt، Δz، Δy، Δx می‌شود dt، dz، dy، dx و معادلهٔ آن به صورت زیر است

$$c^2dt^2 - dx^2 - dy^2 - dz^2 = 0 \qquad (۱۳)$$

کمیت محاسبه‌شدهٔ مربع یک فاصلهٔ فضا زمان است، و در نظریهٔ نسبیت با ds^2 نشان داده می‌شود،

$$ds^2 = c^2dt^2 - dx^2 - dy^2 - dz^2 \qquad (۱۴)$$

فیزیکدانان ds را یک «عنصر جهان ـ خط (world line element)» می‌نامند، که یک موجود بنیادی در نظریهٔ نسبیت است.

معادلهٔ (۱۴)، هر چند محاسبه شده است، اما فقط یکی از بسیار امکانهای محتمل است. عنصر جهان ـ خط ds نشان می‌دهد که چگونه، در جهان چهار بُعدیِ فضا زمان، رویدادهای فیزیکی به هم مربوط‌اند. برای درخش نور مورد بحث ما، $ds^2 = 0$، بنابر معادله‌های (۱۳) و (۱۴) و رویدادهایی که با ds به هم متصل می‌شوند، «شبه نور light like» گفته می‌شود. مربع ds^2 می‌تواند مثبت یا منفی نیز باشد: اگر مثبت باشد، رویدادها متصل شده «شبه‌زمان» و اگر منفی باشد رویدادها «شبه‌فضا» است.

مینکوفسکی تأکید می‌ورزد که رویدادهای فضازمان جهان اینشتین یک تقارن بنیادی دارد، که عنصر جهان‌ـخط ds را در همهٔ چارچوبهای لخت ناوردا (invariant) می‌سازد. اگر ds را در چارچوبی با مختصات t، z، y، x و سپس ds' را در چارچوب دیگری با t'، z'، y'، x' اندازه‌گیری کنیم، این دو اندازه‌گیری باید با هم برابر باشند، $ds = ds'$، اهمیتی ندارد چه انواعی از رویدادها با عنصر خط به هم مربوط شده‌اند ـ شِبه‌نور، شِبه‌زمان، یا شِبه‌فضا. مینکوفسکی از حالت سادهٔ $ds = ds'$، چهار معادله که نسبیت دو مجموعه از مختصات t، z، y، x و t'، z'، y'، x' را بیان می‌کند استخراج کرد. این معادلات، که لورنتس قبلاً در متن متفاوتی از نظریهٔ خودش به‌دست آورده بود، امروزه «تبدیل لورنتس» نامیده می‌شود.

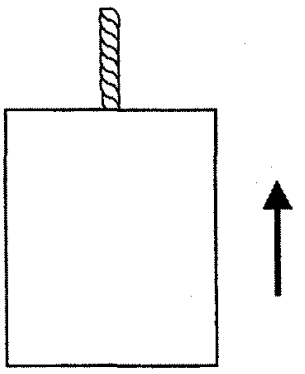
اینشتین ابتدا تحت‌تأثیر تغییر شکل ریاضی نظریهٔ نسبیت خاص مینکوفسکی قرار نگرفت. او آن را «پیش‌پاافتاده» دانست و «فضل‌فروشی زائد» نامید. اما بعد، وقتی دنیای پیچیده‌تر نسبیت عام را از لحاظ ریاضی کاوش می‌کرد، دریافت که مفاهیم موردنظر مینکوفسکی غیرقابل اجتناب است. او ناچار شد بپذیرد که بدون مینکوفسکی، نظریهٔ نسبیت «ممکن بود فرورفته در پوششهایش باقی بماند.»

فیزیک در حُکم هندسه

نظریهٔ ۱۹۰۵ اینشتین «در طرحهایش» گزارهٔ توانمندی دربارهٔ جهان فیزیکی ایجاد کرده بود، امّا اینشتین بلافاصله دانست که جا برای اصلاح آن وجود دارد. از یک‌سو به نظر می‌رسید که این نظریه به سیستمهای لَخت محدود باشد ـ از سوی دیگر با نظریهٔ الکترومغناطیسی ماکسول سازگار بود امّا با نظریهٔ بزرگ دیگر که اینشتین به ارث برده بود، یعنی نظریهٔ گرانش نیوتون سازگاری نداشت. برای تحقق‌یافتن پتانسیل آن، نظریه باید سیستمهای غیرلَخت (noninertial) یعنی سیستمهایی را که نسبت به یکدیگر شتاب می‌گیرند بازشناسی کند و در عین حال حوزه‌اش را تا گرانش گسترش دهد.

نخستین مرحله‌ای که اینشتین در این راه پیمود، با یک تیر دو نشان زد. چنانکه او بعداً شرح داد: «من در ادارهٔ ثبت اختراعات در برن روی یک صندلی نشسته بودم، ناگهان فکری به خاطرم خطورکرد: " اگر شخصی به‌طور آزاد سقوط کند وزن خودش را احساس نخواهد کرد." من بُهت‌زده شده بودم. این فکر ساده، تأثیر عمیقی بر من داشت و مرا به سوی نظریه‌ای از گرانش سوق داد.» این نخستین تصویر ذهنی اینشتین بود از آنچه بعداً او آن را «اصل هم‌ارزی» نامید. ایدهٔ اصلی این است که گرانش امری نسبی است. مثلاً، شخصی که درون یک آسانسور دربستهٔ در حال سقوط، به آزادی ساقط می‌شود، متوجه هیچ‌گونه شاهدی از گرانی نمی‌شود: همه چیز در آسانسور بدون وزن و در حال سکون به نظر می‌رسد. از سوی دیگر، ناظر بیرونی، آسانسور را در حال شتاب چسبیده به یک میدان گرانشی می‌بیند.

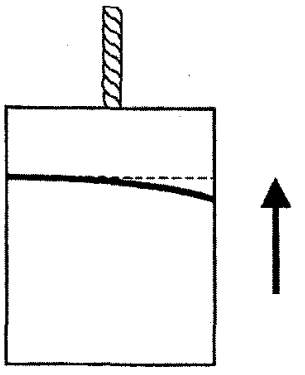
ساکنان آسانسور تجربهٔ مخالفی دارند، هرگاه آسانسور از میدان گرانشی جدا شود و به وسیلهٔ طنابِ پیوسته به آسانسور، با آهنگ ثابتی به سوی بالا شتاب گیرد (شکل ۱۴ـ۷). در این حال ناظر بیرونی متوجه میدان گرانشی نمی‌شود، درحالی‌که ناظر درونی و همهٔ متعلقات او چنان به کف آسانسور ثابت



شکل ۱۴ـ۷ یک آسانسور متصل به طناب که با آهنگ ثابتی به طرف بالا شتاب می‌گیرد، آن‌طور که ناظر بیرونی می‌بیند.

نگه داشته می‌شوند که گویی آنان، دقیقاً در یک میدان گرانشی‌اند. در اینجا «هم‌ارزی» بین یک سیستم شتابدار در فضای بدون میدان و یک سیستم لَخت در میدان گرانشی است. اینشتین با این طریق استدلال به آغاز این ادراک رسید که چگونه می‌توان هم گرانش و هم شتاب را در نظریهٔ نسبیت مطرح کرد.

این تصویر آسانسور بر یک طناب (که بعداً به وسیلهٔ اینشتین و اینفلد توسعه یافت) نشان می‌دهد که چگونه اصل هم‌ارزی شکل اولیهٔ پیشگویی اینشتین دربارهٔ خمش پرتوهای نور بر اثر گرانش را، که ده سال بعد جنجال جهانی را برای او به بار آورد، توجیه می‌کرد. آسانسوری بر یک طناب را با پرتو نوری تصور کنید که در عرض آسانسور از چپ به راست سیر می‌کند. ناظر بیرونی آسانسور و پرتو نور را آن‌طور که در شکل ۱۴ـ۸ نشان داده شده است، می‌بیند. چون پرتو نور زمان معینی برای سیر از یک دیواره به دیوارهٔ دیگر می‌گیرد، و آسانسور در طی آن زمان با شتاب بالا می‌رود، ناظر بیرونی مسیر پرتو نور را آن‌طور که نشان داده شده است اندکی خمیده می‌بیند. ناظر درونی نیز پرتو نور را خمیده می‌بیند، امّا آگاهی از شتاب ندارد و این اثر را به میدان گرانشی هم‌ارز آن که ناظر را به کف آسانسور نگه داشته است، نسبت می‌دهد. ناظر درونی باور دارد که پرتو نور می‌باید به میدان گرانشی واکنش نشان دهد زیرا میدان انرژی دارد، و بنابراین، با تجویز $E = mc^2$، جرم نیز دارد. از این‌رو پرتو نور مانند هر جسم جرم‌دار دیگر، به یک میدان گرانشی واکنش نشان می‌دهد.



شکل ۱۴ـ۸ آسانسوری متصل به یک طناب با آهنگ ثابتی به طرف بالا شتاب می‌گیرد و پرتو نوری از چپ به راست در آن می‌گذرد، آن‌طور که ناظر بیرونی می‌بیند.

اینشتین با اصل هم‌ارزی به عنوان راهنما، در سال ۱۹۰۷ عمومیت دادن نظریهٔ نسبیت‌اش را به‌طوری آغاز کرد که گرانی و شتاب را دربرگیرد. همچنان‌که او پیش می‌رفت، به‌طور فزاینده‌ای متقاعد می‌شد که با مسئله‌ای در نوع عجیبی از هندسه سروکار دارد. حتی در نسبیت خاص نشانه‌هایی وجود

دارد که شتاب و گرانش هم‌ارز، تخطّیهایی از بعضی قضیه‌های اقلیدسی تشکیل می‌دهند، قضیه‌هایی مانند این قاعده که نسبت محیط دایره به قطر آن برابر با عدد π است. مثلاً اینشتین توانست با استفاده از نسبیت خاص استدلال کند که نسبت اندازه‌گیری‌شدهٔ محیط به قطر برای دیسکی که به سرعت می‌چرخد می‌باید اندکی بزرگتر از π باشد.

در سال ۱۹۱۲، وقتی که اینشتین از پراگ به زوریخ بازگشت امیدوار بود راه نجات را در ریاضیات از هندسهٔ غیراقلیدسی بیابد. او کمکهای مهمّی از دوست ارجمندش مارسل گروسمان استاد ریاضیات در ETH زوریخ، دریافت کرد. او به اینشتین توصیه کرد که اثر برنهارد ریمان دربارهٔ هندسهٔ دیفرانسیلی را بخواند. در سالهای ۱۸۵۰، ریمان مطالعهٔ جامعی از فضاهای غیراقلیدسی با مشخص‌کردن «انحنای» خطوط کشیده شده در آن فضاها، به عمل آورده بود.

ریمان برای محاسبهٔ انحناها از ابزاری ریاضی استفاده کرد که مینکوفسکی شصت سال بعد، آن را به صورت عنصر خط مربع‌شده ds^2 وام گرفت. آن‌طور که ریاضیدانان می‌خواهند، ریمان شکل عمومی کاملی از معادلهٔ عنصر خط را تصور می‌کرد، شامل هر تعداد بُعد و دربرگیرندهٔ همهٔ جملات مجذور ممکن. مثلاً، هندسهٔ دوبعدی اُقلیدسی با عنصر خط را در نظر بگیرید

$$ds^2 = dx^2 + dy^2 \qquad (۱۵)$$

در طرح ریمان، ما این معادله را بسط می‌دهیم تا شامل جمله‌هایی شود غیر از دو عامل درجهٔ دوم ممکن از لحاظ ریاضی، یعنی $dxdy$ و $dydx$،

$$ds^2 = (۱)dx^2 + (۰)dxdy$$
$$+ (۰)dydx + (۱)dy^2$$

جملات اضافی در ضرایب صفر ضرب می‌شود، زیرا آنها واقعاً در معادلهٔ ds^2 ظاهر نمی‌شوند؛ دو جملهٔ دیگر ضرایب یک دارند، مانند معادلهٔ (۱۵). همهٔ آنچه لازم است ما دربارهٔ هندسهٔ اقلیدسی دوبُعدی در آنالیز ریمانی بدانیم چهار ضریب در پرانتزها در آخرین معادله است. ما آنها را در یک جدول ۲ × ۲ که با g نشان داده می‌شود،

$$g = \begin{pmatrix} ۱ & ۰ \\ ۰ & ۱ \end{pmatrix}$$

به نام «تانسور متریک» جمع‌آوری می‌کنیم.

در فضای اقلیدسی سه بُعدی عنصر خط عبارت است از

$$ds^2 = dx^2 + dy^2 + dz^2$$

و با همان قراردادها تانسور متریک آن، جدول ۳ × ۳ است،

$$g = \begin{pmatrix} ۱ & ۰ & ۰ \\ ۰ & ۱ & ۰ \\ ۰ & ۰ & ۱ \end{pmatrix}$$

در فضا زمان چهار بُعدی مینکوفسکی، با عنصر خط از معادلهٔ (۱۴)، تانسور متریک با جدول ۴ × ۴ نشان داده می‌شود

$$g = \begin{pmatrix} c^۲ & ۰ & ۰ & ۰ \\ ۰ & -۱ & ۰ & ۰ \\ ۰ & ۰ & -۱ & ۰ \\ ۰ & ۰ & ۰ & -۱ \end{pmatrix}$$

مادهٔ خام ریاضیاتی برای محاسبهٔ انحنای ریمانی در تانسور متریک g برای هندسهٔ موردنظر محصور شده است: فرض کنید هندسه‌ای با تانسور متریکش مشخص و تعریف شده است، ریمان نشان می‌دهد که چگونه انحنای آن را محاسبه کنیم. سه تانسور متریک مذکور اتفاقاً انحنای صفر به‌دست می‌دهد: آنها هندسه‌های «تخت» را مشخص می‌کنند. امّا بسیاری هندسه‌های دیگر انحنا دارند و بنابراین غیراقلیدسی‌اند، به‌طوری که تانسورهای متریکشان در آنالیز ریمانی آشکار می‌شود.

پس از چند سال اشتباه‌کاری و شروع‌کردنهای نادرست (که خوشبختانه بخشی از داستان ما نیست) سرانجام اینشتین در سال ۱۹۱۵ دریافت که با ابزارهای ریاضیاتی ریمانی می‌تواند یک معادلهٔ میدان به‌دست آورد که گرانی و هندسه را به‌طور کامل به هم متصل کند. معادلهٔ او، تقلیل‌یافته به ساده‌ترین شکل آن به صورت زیر است

$$\mathbf{G} = \frac{۸\pi G}{c^۴}\mathbf{T} \qquad (۱۶)$$

که در آن G ثابت گرانشی نیوتونی، و $\mathbf{G}$ و $\mathbf{T}$ «تانسورها» هستند، به این معنی که آنها مخصوصاً به‌طوری مشخص شده‌اند که این معادله دقیقاً یک شکل ریاضی در همهٔ چارچوبهای مرجع، چه لَخت و چه غیرلَخت را داشته باشد. (توجه داشته باشید که G و $\boldsymbol{G}$ معانی متفاوت دارند.)

تانسور $\mathbf{G}$ اقتباس اینشتین از محاسبهٔ انحنای ریمان است؛ این امر به‌طور کلی بستگی دارد به ارتباط تانسور متریک فضا زمان و مشتقات آن. تانسور $\mathbf{T}$ همهٔ اطلاعات لازم دربارهٔ منبع گرانش را به وسیلهٔ مشخص‌کردن توزیع انرژی و ماده، تأمین می‌کند. بنابراین، معادلهٔ میدان (۱۶) هندسه را در طرف چپ وگرانی را در طرف راست نشان می‌دهد. در نظرگرفتن یک منبع گرانش $(\mathbf{T})$ و این معادله، تانسور $\mathbf{G}$ و در نهایت هندسه را برحسب تانسور متریک فضا و زمان g به اینشتین می‌دهد.

در معادلات میدان اینشتین، گرانی هندسه را معین می‌کند و بدون شگفتی، هندسهٔ حرکت را معین می‌کند. اینشتین با ادامهٔ استدلال فیزیکی‌اش، معادلهٔ تعمیم‌یافته‌ای از حرکت استخراج کرد که جزءِ ریاضی اصلی‌اش ضرورت تانسور متریک فضا زمان g است. بنابراین توالی کل محاسبه به صورت زیر است،

معادلهٔ حرکت ← تانسور متریک g ← انحنا ← منبع گرانش

منبع گرانش با $\mathbf{T}$، انحنا با $\mathbf{G}$ بیان می‌شود، تانسور متریک از $\mathbf{G}$ استخراج و معادلهٔ حرکت با g معین می‌شود. به‌طور صریح و مجمل این یک راه نقل داستان نسبیت عام اینشتین است. توجه داشته باشید که در این مورد ذکری از نیروها به میان نیامده است: هندسه رابطه بین گرانش و حرکت است. عنوان داستان هم «فیزیک در حکم هندسه» است.

هندسه آن‌طور که از معادلهٔ میدان اینشتین (۱۶) آشکار می‌شود، همیشه به معنی انحنای فضایی یا هندسهٔ غیراقلیدسی است، اگر گرانش موجود باشد. امّا بجز در موارد حاد (مثلاً، سیاهچاله‌ها) دامنهٔ انحنا فوق‌العاده کوچک است. ریچارد فاینمن با استفاده از نظریهٔ اینشتین برآورد می‌کند که فرمول اقلیدسی $4\pi r^2$ برای محاسبهٔ مساحت سطح کره‌ای با شعاع r به‌قدر ۱/۳ قسمت در میلیون، در میدان گرانشی شدید در سطح خورشید، اشتباه است.

اینشتین دو کاربُرد به عنوان امتحانهایی برای اعتبار نظریهٔ عامش پیشنهاد کرد. یکی محاسبهٔ خمیدگی پرتوهای نور نزدیک به خورشید، که بعد به وسیلهٔ هیئتهای اعزامی مشهور ادینگتون و کرومِلین تأیید شد. دیگری محاسبهٔ مدار عطارد بود که نشان می‌داد، بنا به اقتضای نظریهٔ نیوتون ثابت نیست، امّا جهت‌گیری آن به کُندی با آهنگ ۴۲/۹ ثانیهٔ قوسی در یک قرن تغییر می‌کند. این اثر رصد شده بود و اندازهٔ ۴۳/۵ ثانیه را نشان می‌داد. وقتی اینشتین موفقیت نظریه‌اش را دید به وجد آمد. او به یکی از دوستانش نوشت: «مدت چند روز از شدت هیجان از خود بی‌خود بودم.» پایس متذکر می‌شود، «از آن زمان او می‌دانست: "طبیعت سخن گفته است؛ او باید دقیق باشد."»

سرنوشت، یا طبیعت

این یک وجه گریزناپذیر و غالباً غیرقابل درک خلاقیت علمی است که به سادگی ادامه نمی‌یابد. اینشتین یک‌بار به دوستی نوشت: «هر چیزِ واقعاً جدیدی تنها در دوران جوانی شخص ابداع می‌شود. بعداً شخص مُجرّبتر، مشهورتر ـ و کودنتر می‌شود.» اکثر دانشمندانی که دوستان آنان در این کتاب آمده است، مهمترین کارشان را در جوانی، در سالهای بیست یا سی سالگی انجام داده‌اند. امّا به استثنای گیبس، فاینمن و چاندراسخار، هیچ یک در حوالی پایان زندگی کار برجسته‌ای انجام نداده‌اند.

اینشتین گرچه از بیشترین جهات دیگر بی‌همتا بود، امّا نبوغ خلاق او فقط اندکی کمتر زودگذر بود. به گفتهٔ پایس، اُفول خلاقیت اینشتین پس از سال ۱۹۲۴، به هنگامی که او چهل‌وپنج ساله بود، آغاز شد. پایس نمای کلی زندگی حرفه‌ای اینشتین را پس از سال ۱۹۱۳، سالی که وارد برلین شد

چنین ترسیم می‌کند: «با فرمولبندی معادلات میدانهای گرانش در سال ۱۹۱۵، فیزیک کلاسیک (یعنی فیزیک غیرکوانتومی) به کمال رسید، و دورهٔ زندگی علمی اینشتین در نقطهٔ اوجش بود. . . .» با وجود بیماری زیاد از ۱۹۱۶ تا ۱۹۲۰ سالهای حاصلخیز و پُرثمر او هم در نظریهٔ نسبیت و هم در نظریهٔ کوانتوم بود. یک نزول آرام پس از سال ۱۹۲۰ آغاز می‌شود. یک احیا یا رواج مجدد نیز تا انتهای سال ۱۹۲۴ وجود دارد. . . . پس از آن به‌طور ناگهانی دوران خلاقیت او متوقف می‌شود، گرچه تلاشهای علمی‌اش به مدت سی‌سال دیگر بی‌وقفه ادامه می‌یابد.

پس از حدود سال ۱۹۲۰، اینشتین بیشتر بخشی از جهان سیاست شد، و شکی نیست که این امر وقت و انرژی او را می‌گرفت. او سفرهای زیادی کرد و در مجامع بسیاری حضور یافت. او از شهرت متنفر بود، امّا در عین حال نمی‌توان انکار کرد که از اجرای برنامه‌ای در برابر حُضار لذت می‌برد. پسر بزرگش هانس البرت به ما می‌گوید که او «هنرپیشهٔ غیرحرفه‌ای بزرگی» بود. زندگی اجتماعی در برلین جالب و گیرا بود؛ اینشتین‌ها در میان آشنایانشان روشنفکران، اندیشمندان، دولتمردان و فرهنگیان مشهور شمرده می‌شدند. و اینشتین طی سالهای ۱۹۲۰ و ۱۹۳۰ دست‌کم چند دوست صمیمی داشت.

از این‌رو، روح خلاقی که متعلق به اینشتین درونگرا بود با برونگرایی او تا حدّی تضعیف شد. دو عامل دیگر ممکن است اهمیت بیشتری در این مورد داشته باشند. در سال ۱۹۲۵ و ۱۹۲۶، روشهای مکانیک کوانتومی در صحنه ظاهر شدند و توسعهٔ آنها در فیزیک نظریه‌ای برای سالیان طولانی تسلط یافت. اینشتین به سرعت مفیدبودن مکانیک کوانتومی را پذیرفت، اما در نهایت با تعبیر و تفسیر آن مخالفت کرد. اکثر فیزیکدانان به عدم جبریت یا عدم قطعیت که به نظر می‌رسید لازمهٔ مکانیک کوانتومی باشد توافق کردند، امّا اینشتین آن را نپذیرفت. هنگامی‌که نسل دوم فیزیکدانان کوانتومی روشهای جدید انقلابی را معرفی و از آن بهره‌برداری می‌کردند، اینشتین محافظه‌کار شد. او اُمیدوار بود فراتر از آنچه او احساس می‌کرد ناکامل‌بودن نظریهٔ کوانتومی را ببینند؛ بدون شکستن بعضی از سُنتهای بزرگ فیزیک که به نظر او مهمتر از موفقیتهای موقتی بود. او گرچه سالها تجسس کرد، اما هرگز آنچه را در جستجویش بود، نیافت. او در نامه‌ای نوشت: «هرچه بیشتر کوانتومها را تعقیب می‌کند، آنها بیشتر خودشان را پنهان می‌کنند.» سرسختی، در این مورد موجب منزوی‌شدن او از اکثر همکاران جوانترش شد.

سماجت اینشتین ـ مطمئناً یکی از قویترین خصلتهای شخصیتی او ـ ناکامی بزرگ دیگری برای او به بار آورد. او در اواخر سالهای ۱۹۲۰، کار پژوهشی دربارهٔ «نظریهٔ وحدت میدانها» را آغاز کرد، کوششی برای متحدکردن نظریه‌های گرانش، الکترومغناطیس و احتمالاً کوانتومها. او برای باقی عمرش مجذوب و شیفته ـ شاید هم بگوییم دلمشغولی ـ این تلاش بود. ماجرای تلاش شدید اینشتین برای این مسئلهٔ نظریه‌ای می‌باید پاسخی باشد برای این مدعا که دانشمندان بزرگ کارشان را مانند ماشینهای متفکر، بدون الزام شوروهیجان، انجام می‌دهند. او در سال ۱۹۳۹ به ملکه الیزابت بلژیک، که سالیان بسیار با او مکاتبه می‌کرد، نوشت: «من به کوره‌راه امیدبخشی برخورد کرده‌ام، که به‌طوری دردناک اما با

ثبات قدم و عزمی راسخ با شرکت معدودی کارکنان دوست جوان آن را دنبال می‌کنم. خواه این امر مرا به مقصدی درست یا نادرست هدایت خواهد کرد، من نمی‌توانم آن را با هرگونه قطعیتی در مختصر زمانی که برایم باقی مانده اثبات کنم. اما از سرنوشتی سپاسگزار و خوشنودم که زندگی مرا به صورت یک تجربهٔ مهیج ساخته است.»

و چند سال بعد، در نامه‌ای به یکی از دوستانش نوشت: «من پیرمردی به صورت مردی عوضی و عجیب که جوراب نمی‌پوشد، شناخته شده‌ام. اما من با آهنگی خارق‌العاده‌تر از همیشه کار می‌کنم، و هنوز امیدوارم مسئلهٔ میدان فیزیکی وحدت‌یافته را که در پیش دارم حل کنم. . . . این چیزی بیشتر از یک امید نیست، چون هر نوع آن مستلزم مشکلات ریاضی عظیمی است. . . . من در پیچ‌وتاب درد و عذاب ریاضیاتی هستم که نمی‌توانم خلاص شوم.»

او می‌باید خسته و گاهگاه مأیوس شده باشد. پس از یک رهیافت که باز هم به بُن‌بست دیگری می‌رسید، به یکی از دستیارانش می‌گفت که می‌خواهم آن را منتشر کنم و به اطلاع مردم برسانم، «تا احمق دیگری را از اتلاف شش ماه تلاش دربارهٔ همان ایده نجات دهم.» اینشتین جمله‌ای را به این مضمون تکرار می‌کرد که «طبیعت با عظمت و شکوه ذاتی‌اش ابهامی را مخفی می‌کند، نه با حیله‌گری.» پس از سالهای بی‌حاصل که وقف پژوهش دربارهٔ نظریهٔ وحدت میدانها شد او به هرمان ویل[1] گفت: «کسی چه می‌داند شاید طبیعت هم اندکی مغرض باشد.»

با وجود این اعجاز روح خلاق اینشتین بود که هرگاه ناامیدی احساس می‌کرد، هرگز این احساس پُردوام نبود. یکی از زندگینامه‌نویسان اخیر اینشتین، البرشت فولسینگ[2] به ما می‌گوید که «او توانایی آن را داشت که یک مفهوم نظریه‌ای را، با اشتیاق فراوان ماهها و حتی سالها بی‌وقفه دنبال کند؛ اما هرگاه عیب و ایرادهایی وخیم و جدی ظاهر می‌شد ـ که همواره در پایان کار روی می‌دهد ـ او فوراً آن کار را در لحظه درست، بدون احساساتی‌شدن و سرخوردگی و یأس از زمان و کوشش تلف‌شده، کنار می‌گذاشت. صبح آینده یا حداکثر چند روز بعد، او ایدهٔ جدیدی را می‌گرفت و با همان اشتیاق آن را دنبال می‌کرد.» اینشتین در نامه به دوستی نوشت: «مأیوس‌شدن بی‌معنی‌تر از تلاش‌کردن برای یک هدف غیرقابل حصول است.»

نامه‌ها

اینشتین حجم عظیمی نامه‌های پستی، از همه نوع مردم دربارهٔ همهٔ موضوعهای گوناگون، دریافت می‌کرد. وقتی هنوز حجم این نامه‌ها او را از توان نینداخته بود، او از دریافت این نامه‌ها خوشحال می‌شد و به آنها پاسخ می‌داد. منتخبی از این پاسخها قطعه‌هایی از زندگینامهٔ شخصی او را که هرگز ننوشت، به‌دست ما می‌دهد. برای اعضای «انجمن کلاس ششم» یک دبیرستان انگلیسی که اینشتین را به عنوان رئیسشان انتخاب کرده بودند، او می‌نویسد: «به عنوان یک مدیر مدرسهٔ پیر، من با خوشنودی و افتخار

1. Hermann Weyl 2. Albrecht Fölsing

نامزدی ادارهٔ مدیریت انجمن شما را دریافت کردم. این تمایلی به احترام برای کسی در سن پیری است و چنین است برای من. اما باید به شما بگویم که من اندکی (اما، نه خیلی‌زیاد) گیج و متحیر شدم که این نامزدی مستقل از رضایت و توافق من انجام شده است.»

به دفعات بسیار از اینشتین در مورد مذهبش پرسیده می‌شد. او «اعتقاد عمیقی به مذهب نداشت.» او به یکی از دوستانش نوشت و برای شاگرد کلاس ششمی توضیح می‌داد: «هرکسی که به شدت درگیر طلب علم است متقاعد می‌شود که یک روح در قوانین عالم آشکار است ـ روحی بی‌کران و فوق‌العاده وسیعتر از روح انسان، روحی که ما در برابر آن، باید متواضعانه با همهٔ قدرتهای روانی و جسمانی‌مان احساس حقارت کنیم. این طریق طلب علم به یک احساس مذهبی از نوعی خاص منجر می‌شود، که در واقع با مذهب‌نمایی فرد بی‌تجربه کاملاً متفاوت است.» او به یکی از طرفدارانش نوشت: «من به خدای شخصی باور ندارم و هرگز آن را انکار نکرده‌ام، بلکه به وضوح آن را بیان کرده‌ام. اما اگر چیزی در من است که می‌توان آن را مذهب نامید، در این صورت ستایش بی‌حدّ و مرز برای ساختار این جهان است تا آنجا که علم می‌تواند آن را آشکار کند.» مذهب او اخلاقیات را دربر نمی‌گیرد: «اصول اخلاقی حائز والاترین اهمیت است ـ اما برای ما نه برای خدا.»

اینشتین از میلیتاریسم و ناسیونالیسم متنفر بود. او نوشت: «ازکسی که با فرمان قدم‌رو و به‌ستوه آوردن یک گروه لذت می‌برد، بدم می‌آید.» او باور داشت که استراتژی گاندی یعنی تمرّد و عدم اطاعت اجتماعی امیدوارکننده بود: «باور من این است که پیشرفت جدی فقط وقتی حاصل می‌شود که مردم با یک مقیاس بین‌المللی سازماندهی شوند و به صورت یک تنه، ورود به نظامی‌گری و خدمت جنگی را طرد کنند.» تعهد او به صلح‌طلبی تمام‌عیار بود؛ در مصاحبه‌ای او گفت: «من نه تنها یک صلح‌طلبم بلکه یک صلح‌طلب مبارزم. من می‌خواهم برای صلح بجنگم. . . . آیا اگر شخص برای آرمانی، همچون صلح که به آن معتقد است بمیرد بهتر است یا برای هدفی مانند جنگ که به آن باور ندارد آسیب ببیند؟

اما وحشتهای نازی، ضدیهودگرایی، اینشتین را از یک صلح‌طلب «مطلق» به یک صلح‌طلب «متعهد» تبدیل کرد: «این بدان معنی است که من مخالف با استفادهٔ نیرو تحت هر شرایطی هستم. بجز وقتی که این نیرو با دشمنی مواجه می‌شود که تخریب زندگی را به صورت پایانی در ذات خودش، دنبال می‌کند.»

بسیاری از مکاتبه‌کنندگان می‌خواستند بدانند زندگی‌کردن در یک حیات فیزیکی چگونه است. او توضیح می‌داد که برای من یک تفکیک وجود دارد: «کار علمی من برانگیخته از آرزوی شدید و مقاومت‌ناپذیری برای ادراک رموز طبیعت است بدون دخالت احساسهای دیگر. عشق عدالت‌خواهی و کوشش برای شرکت در جهت اصلاح و بهبودسازی شرایط زندگی انسانی‌اَم کاملاً مستقل از علایق علمی من است.» و او در جدایی و کناره‌گیری، بخش دیگری از برانگیخته شدن را می‌یافت: با سِنجش عینی و بی‌طرفانه، آنچه را که یک فرد می‌تواند با تلاشِ پرشور و گداز از حقیقت بیرون بِکشد بسیار خُرد و ناچیز است. امّا کوشش و تلاش ما را از بندهای خود، آزاد می‌کند و دوستی بهترین و عالیترین افراد را برای ما فراهم می‌کند.

پرندهٔ مسافر

تقدیر اینشتین خانه‌به‌دوشی بود، او هرگز نتوانست در جایی ساکن شود که به راحتی آن را وطن خود بداند. مکان دلخواه‌اش سویس بود، اما مدتها پس از ترک ادارهٔ ثبت اختراعات در آنجا نماند. برلین تقریباً به مدت بیست سال پذیرای او شد، و چند صباحی او را به حال خود گذاشت. اما در سالهای ۱۹۲۰ نازیها قدرتمند شدند و با خود سه مُصیبت ناسیونالیسم، میلیتاریسم و ضدیهودیت را به همراه آوردند. ما قبلاً آثار خانمان‌برانداز پُلیسها در زمان نرنست را متذکر شدیم و موضوع مخوف تخریب تشکیلات علمی آلمان را در فصلهای بعد ادامه خواهیم داد. ضدیهودیت در سراسر سالهای ۱۹۲۰ آشکار شده بود، اما دست‌کم برای اینشتین تهدیدی نداشت. این مورد چندان طولی نکشید تا اوایل سالهای ۱۹۳۰ که نازیها بر مسند قدرت نشستند.

اینشتین پس از چند توقف کوتاه در بلژیک، انگلستان، وکالیفرنیا، به پرینستون نقل‌مکان کرد، جایی که او به مؤسسهٔ تازه تأسیس، برای مطالعات پیشرفته، پیوست. جوّ عقلانی و روشنفکرانهٔ پرینستون در مقایسه با جوّ برلین کمتر مهیج بود. اینشتین در نامه‌ای به ملکه الیزابت نوشت: «پرینستون یک محلّ کوچک عجیب و یک دهکدهٔ تشریفاتی جالب توجه . . . است.» اما برای منظور اصلی اینشتین به کار می‌آمد، او می‌نویسد: «با نادیده‌گرفتن بعضی از رسوم و قراردادهای خاص، من توانستم جوّی برای خودم ایجاد کنم که مساعد مطالعه و عاری از پریشانی و آشفتگی‌خاطر باشد.»

اینشتین در پرینستون به پروازش پایان داد و به امور روزمرّه‌اش بازگشت. مانند همیشه با مسائل و پیشامدهای جهان در تماس بود. در سال ۱۹۴۰، پروژهٔ مانهاتان به منظور توسعهٔ بمب اتمی، سازمان‌دهی شد و نفوذ اینشتین در مراحل اولیه به آن یاری رساند. اما «پروژهٔ مطلوب» او یعنی نظریهٔ وحدت میدانها مسئلهٔ مورد علاقهٔ او در پرینستون بود. بیش از همیشه، او «در علم هنرمند» شد، پژوهش بی‌پایان برای نظریهٔ وحدت میدانها با سهولت و زیبایی ریاضیاتی حس شهود و زیباشناختی او را ارضا می‌کرد.

آبراهام پایس، که زندگینامهٔ اینشتین را بهتر از زندگینامه‌نویسان دیگر نوشته است، با یک نگاه اجمالی به زندگی اینشتین، در حدود سه ماه پیش از مرگ در سال ۱۹۵۵، که در پی می‌آید ما را ترک می‌کند. او بیمار بود و توانایی کار در دفتر مؤسسه را نداشت. پایس در خانه از او عیادت می‌کند.

> و. . . از پله‌ها بالا رفتم، آهسته ضربه‌ای به در اتاق مطالعه‌اش زدم. صدای آرامی شنیدم «بفرمایید». وقتی من وارد شدم، او در صندلی دسته‌دارش نشسته، پتویی روی زانوهایش و بستهٔ کاغذی روی پتو بود. او در حال کارکردن بود. با دیدن من بستهٔ کاغذ را کناری گذاشت و به من خوشامد گفت. ما نیم ساعتی را به خوشی با هم گذراندیم. به یاد نمی‌آورم موضوع بحث ما چه بود. سپس به او گفتم من نمی‌توانم بیشتر بمانم. با هم دست دادیم و من خداحافظی کردم. به طرف در اتاق رفتم، هنوز چهار یا پنج قدم دور نشده بودم، وقتی در را بازکردم سرم را برگرداندم، او را روی صندلی‌اش دیدم. بستهٔ کاغذ روی دامنش، مدادی در دستش، بی‌اعتنا به دور و برش، او به کارش بازگشته بود.

وقایع‌نگاری رویدادهای عمده

۱۵۶۴ گالیله در شهر پیزا در ایتالیا چشم به جهان گشود.
۱۵۹۱ افسانهٔ نمایش گالیله در برج پیزا.
۱۶۱۶ فرمان کاردینال بلارمین دربارهٔ گالیله.
۱۶۲۲ گالیله بیانیهٔ تحلیلگر (The Assayer) را منتشر کرد.
۱۶۳۲ گالیله مناظره دربارهٔ دو سیستم عمدهٔ جهانی را منتشر کرد.
دادگاه تفتیش عقاید به ناشر گالیله فرمان می‌دهد که انتشار مناظره را متوقف کند.
۱۶۳۳ گالیله در برابر دادگاه تفتیش عقاید ظاهر می‌شود.
گالیله در آرچتری.
۱۶۳۸ گالیله گفتارهایی دربارهٔ دو علم جدید را منتشر کرد.
۱۶۴۲ مرگ گالیله در آرچتری.
آیساک نیوتون در وول‌استروپ، انگلستان به دنیا می‌آید.
۱۶۶۱ نیوتون وارد کالج ترینیتی در دانشگاه کمبریج می‌شود.
۱۶۶۵ طاعون در انگلستان.
نیوتون در وول‌استروپ، تفکر دربارهٔ حسابان، گرانی، و نورشناسی را آغاز می‌کند.
۱۶۶۸ نیوتون به‌عنوان استاد لوکاسین ریاضیات در کمبریج منصوب می‌شود.
۱۶۷۱ تلسکوپ بازتابی نیوتون در انجمن سلطنتی به‌نمایش گذاشته می‌شود.
۱۶۸۴ نیوتون مقالهٔ «دربارهٔ حرکت اجرام در مدار» را منتشر کرد.
۱۶۸۷ نیوتون کتاب پرینسیپیا (اصول) را منتشر کرد.
۱۶۹۶ نیوتون از کمبریج به لندن می‌رود.
۱۷۰۴ نیوتون کتاب اپتیک (نورشناسی) را منتشر کرد.
۱۷۲۷ وفات نیوتون در لندن.
۱۷۹۱ مایکل فارادی در Newington, Surrey که اکنون بخشی از لندن است متولد می‌شود.
۱۷۹۶ تولد سادی کارنو در پاریس.

۱۸۰۱ توماس یانگ اصل تداخل بر مبنای مدل موجی نور را کشف می‌کند.
۱۸۱۴ تولد رابرت مایر در هیلبورن آلمان.
۱۸۱۸ تولد جیمز جول در منچستر انگلستان.
۱۸۲۰ هانس کریستین اورستد با آزمایش نشان داد که با یک اثر الکتریکی، یک اثر مغناطیسی تولید می‌شود.
۱۸۲۱ هرمان هلمهلتز در پوتسدام آلمان متولد شد.
آزمایش فارادی چرخش الکترومغناطیسی را نشان می‌داد.
اگوستین فِرنِل نور را به‌صورت امواجی مشخص کرد که به‌طور عمود بر جهت حرکتشان مرتعش می‌شوند.
۱۸۲۲ رودولف کلازیوس در کوسلین، پروس متولد شد.
۱۸۲۴ کارنو تأملاتی دربارهٔ توان محرکهٔ آتش را، منتشر کرد.
تولد ویلیام تامسن در بلفاست، ایرلند شمالی.
۱۸۳۱ فارادی القای الکترومغناطیسی را کشف کرد.
تولد جیمز کلرک ماکسول در ادینبورو، اسکاتلند.
۱۸۳۲ وفات کارنو در پاریس.
فارادی قانونهای الکترومغناطیس را فرمولبندی کرد.
۱۸۳۴ امیل کلاپیرون شکل ریاضی نظریهٔ کارنو را منتشر کرد.
۱۸۳۷ فارادی القای الکتریسیتهٔ ساکن را بررسی می‌کند.
۱۸۳۹ تولد ویلارد گیبس در نیوهاون، کُنکتیکات.
۱۸۴۲ مایر نخستین مقاله‌اش را منتشر کرد.
۱۸۴۳ جول نخستین موارد تعیین هم‌ارزی مکانیکی گرما را منتشر کرد.
۱۸۴۴ لودویگ بولتزمن در وین متولد شد.
۱۸۴۵ مایر مقالهٔ دومش، شامل محاسبه‌ای از هم‌ارزی مکانیکی گرما را منتشر کرد.
تامسن نظریهٔ ریاضی خطوط نیروی الکتریسیتهٔ ساکن را بسط داد.
فارادی اثر میدان مغناطیسی بر نور قطبیده را مشاهده کرد.
۱۸۴۷ جول نتایج آزمایشهای چرخ‌ـپرّه‌دارش برای تعیین هم‌ارزی مکانیکی گرما را، منتشر کرد.
هلمهلتز مقاله‌ای با عنوان «دربارهٔ پایستاری نیرو» را منتشر کرد.
۱۸۴۸ تامسن اصل دماسنجی‌اش را منتشر کرد.
۱۸۵۰ کلازیوس نخستین مقاله‌اش دربارهٔ نظریهٔ گرما را که در آن تابع U را معرفی و معادلهٔ $dQ = dU + PdV$ را استخراج می‌کند، منتشر کرد.
۱۸۵۱ تامسن مقالهٔ «دربارهٔ نظریهٔ دینامیک گرما» را منتشر کرد.
۱۸۵۲ فارادی از واقعیت خطوط نیرو دفاع کرد.

۱۸۵۴ تامسن دمای مطلق را برحسب تابع کارنو تعریف کرد.
کلازیوس مقالهٔ دومش دربارهٔ نظریهٔ گرما و استخراج یک تابع حالت را که بعداً نمایندهٔ انتروپی شد، منتشر کرد.
ماکسول نخستین مقاله‌اش دربارهٔ الکترومغناطیس را با عنوان «دربارهٔ خطوط نیروی فارادی» منتشر کرد.
۱۸۵۵ تامسن به شرکت تلگراف آتلانتیک می‌پیوندد.
۱۸۵۷ کلازیوس نخستین مقاله‌اش دربارهٔ نظریهٔ مولکولی گازها را منتشر کرد.
۱۸۵۸ ماکس پلانک در کیل (Kiel)، آلمان متولد شد.
۱۸۶۰ ماکسول نخستین مقاله‌اش دربارهٔ نظریهٔ مولکولی گازها را منتشر کرد.
۱۸۶۱ ماکسول مقالهٔ دومش دربارهٔ الکترومغناطیس را با عنوان «دربارهٔ خطوط فیزیکی نیرو» منتشر کرد.
۱۸۶۴ والتر نرنست در بریسن (Briesen)، پروس شرقی، متولد شد.
۱۸۶۵ انتشار آخرین مقالهٔ کلازیوس دربارهٔ نظریهٔ گرما که در آن نظریه‌های انرژی و انتروپی‌اش کامل و دو قانون ترمودینامیک بیان می‌شد.
ماکسول سومین مقاله‌اش دربارهٔ الکترومغناطیس را، با عنوان «نظریهٔ دینامیکی میدان الکترومغناطیسی» منتشر کرد.
۱۸۶۷ فارادی در هامپتون کورت، میدل سکس، انگلستان وفات یافت.
تولد ماریا اسکلودوسکا در ورشو، لهستان.
۱۸۷۱ ماکسول به کرسی استادی فیزیک آزمایشی در کمبریج منصوب شد.
هلمهلتز به برلین رفت.
تولد ارنست رادرفورد نزدیک نلسون، نیوزلند.
۱۸۷۳ ماکسول رساله‌ای دربارهٔ الکترومغناطیس منتشر کرد.
گیبس تعبیری هندسی از الکترودینامیک با تأکیدی بر مفاهیم انرژی و انتروپی را منتشر کرد.
۱۸۷۵ـ۷۸ گیبس مطالبی دربارهٔ تعادل مواد ناهمگن منتشر کرد.
۱۸۷۸ وفات مایر در هیلبرون، آلمان.
تولد لیز میتنر در وین.
۱۸۷۹ وفات ماکسول در کمبریج، انگلستان.
تولد آلبرت اینشتین در اُلم، آلمان.
۱۸۸۵ تولد نیلز بور در کپنهاک، دانمارک.
۱۸۸۷ تولد اروین شرودینگر در وین.
۱۸۸۸ وفات کلازیوس در بُن، آلمان.

۱۸۸۹ وفات جول در سیل، انگلستان.
تولد ادوین هابل در مارشفیلد، میسوری.
۱۸۹۲ تولد لویی دوبروی در دیپ، فرانسه.
۱۸۹۳ نرنست کتاب درسی‌اش با عنوان Theoretische Chemie را منتشر کرد.
۱۸۹۴ وفات هلمهلتز در برلین.
۱۸۹۶ بولتزمن نخستین مجلد کتابش با عنوان گفتارهایی دربارهٔ نظریهٔ گازی را منتشر کرد.
هنری بکرل خاصیت رادیواکتیوی اورانیم را کشف کرد.
۱۸۹۸ بولتزمن دومین مجلد کتابش با عنوان گفتارهایی دربارهٔ نظریهٔ گازی را منتشر کرد.
ماری و پیر کوری کشف پولونیم و رادیم را اعلام کردند.
۱۹۰۰ پلانک مقاله‌اش دربارهٔ تابش جسم سیاه را، که در آن به‌طور محدود، مفهوم انرژی کوانتش ارائه می‌شود، منتشر کرد.
ولفگانگ پائولی در وین متولد شد.
۱۹۰۱ گیبس اصول مقدماتی در مکانیک آماری را منتشر کرد.
ورنر هایزنبرگ در وورتزبرگ، آلمان متولد شد.
انریکو فرمی در رم متولد شد.
۱۹۰۲ رادرفورد و فردریک سادی یک‌سری مقالات، که در آنها نظریهٔ استحالهٔ رادیواکتیوی بسط یافته بود، منتشر کردند.
اینشتین به‌عنوان کارشناس فنی درجهٔ سه در ادارهٔ حق ثبت اختراعات در برن، سویس منصوب شد.
پال دیراک در بریستول انگلستان متولد شد.
۱۹۰۳ وفات گیبس در نیوهیون، کنکتیکات.
۱۹۰۵ نرنست به برلین رفت.
اینشتین مقالاتش دربارهٔ نسبیت، اثر فوتوالکتریک، و ذرات کلوئیدی به‌صورت مولکولها را منتشر کرد.
۱۹۰۶ نرنست قضیهٔ گرما را منتشر کرد.
رادرفورد پراکندگی ذره‌ـα را منتشر کرد.
وفات بولتزمن در دوینو، دهکده‌ای نزدیک تری‌یست، ایتالیا.
وفات پیر کوری در پاریس.
۱۹۰۷ وفات تامسن نزدیک لارجز، اسکاتلند.
رادرفورد به منچستر می‌رود.
۱۹۰۹ هانس گایگر و ارنست مارسدن مقاله‌ای دربارهٔ پراکندگی ذرات‌ـα به‌وسیلهٔ ورقه‌های فلزی را منتشر کردند.

۱۹۱۰ سوبراهمانیان چاندراسخار در لاهور متولد شد، سپس به هند رفت و اکنون در پاکستان است.

۱۹۱۱ رادرفورد مدل هسته‌ای اتم را مطرح کرد.

۱۹۱۳ اینشتین به برلین رفت.

بور نخستین مقاله‌اش دربارهٔ ساختار اتم و مولکولها را منتشر کرد.

۱۹۱۳ـ۱۴ هنری موزلی مقاله‌اش دربارهٔ طیف پرتو ـ x عناصر را منتشر کرد.

۱۹۱۵ اینشتین مقاله‌اش دربارهٔ نسبیت عام را منتشر کرد.

۱۹۱۸ ریچارد فاینمن در راک اَوی، نیویورک متولد شد.

۱۹۱۹ رادرفورد مدیر آزمایشگاه کاوندیش در کمبریج شد.

۱۹۲۱ مؤسسهٔ بور طی مراسمی در کپنهاگ افتتاح شد.

۱۹۲۳ دوبروی نظریهٔ دوگانگی موج ـ ذره برای ماده را ارائه کرد.

۱۹۲۴ هابل اندازه‌گیریهای فاصلهٔ کیهانی فراسوی کهکشان ما را گزارش کرد.

۱۹۲۵ هایزنبرگ نخستین مقاله‌اش دربارهٔ مکانیک ماتریکس را منتشر کرد.

ماکس بورن، هایزنبرگ و پاسکوال جُردن مقالهٔ جامعشان دربارهٔ مکانیک ماتریس را منتشر کردند.

پائولی اصل طرحش را ارائه کرد.

۱۹۲۶ شرودینگر نخستین مقاله‌اش دربارهٔ مکانیک موجی را منتشر کرد.

بورن نخستین مقاله‌اش دربارهٔ تعبیر احتمال مکانیک کوانتومی را منتشر کرد. فرمی نخستین مقاله‌اش دربارهٔ آمار کوانتومی را منتشر کرد.

۱۹۲۷ هایزنبرگ اصل عدم قطعیت را ارائه کرد.

شرح واژه‌ها

MeV: یک واحد انرژی مورد علاقهٔ فیزیکدانان ذره‌ای؛ برابر با یک میلیون الکتروولت است.

آنود: در الکتروشیمی، الکترود مثبت یک سلول الکترولیز، که یونهای منفی (آنیونها) به‌طرف آن جذب می‌شوند.

آنیون: یونی که بار منفی دارد.

اختر فیزیک: مطالعهٔ نظریه‌ای **ماهیت فیزیکی** ستارگان، کهکشانها و دیگر اجرام سماوی.

اخترشناسی: مطالعهٔ ستارگان، کهکشانها و دیگر اجرام سماوی، از طریق مشاهده با تلسکوپ و وسایل وابسته.

اصل طرد (یا اصل پائولی): اصلی که دو فرمیون (مثلاً، الکترونها، نوترونها، پروتونها و کوارکها) نمی‌توانند حالت یکسانی را اشغال کنند.

القاء: اثر الکتریکی یا مغناطیسی که به‌وسیلهٔ میدان تولید می‌شود.

الکترودینامیک: بررسی بارهای الکتریکی متحرک و میدانهای آنها.

انتروپی: اندازهٔ بی‌نظمی. تغییرات اندک ds در انتروپی همراه عبور گرمای dQ ورود یا خروج از یک سیستم در دمای T است، که با رابطهٔ $ds = \frac{dQ}{T}$ محاسبه می‌شود.

اندازه‌حرکت: جرم یک جسم ضرب در سرعت آن.

انرژی: توانایی انجام کار؛ که برحسب ژول، کالری و غیره اندازه‌گیری می‌شود.

انرژی آزاد: انرژی‌ای که می‌تواند به کار تبدیل شود؛ انرژی گیبس نیز نامیده می‌شود.

انرژی درونی: انرژی جسمی که در تصرف مولکولهای سازندهٔ آن است.

انگستروم: یک واحد بسیار کوچک مسافت، برابر با $۱۰^{-۸}$ سانتیمتر.

بردار: هر کمیتی که هم جهت و هم بزرگی دارد.

بی‌نظمی: به‌طور کلی، حدّی که سیستم قاطی یا آشفته می‌شود، و با استفاده از روشهای ترکیبی بولتزمن محاسبه می‌شود.

پاد الکترون: الکترون مثبت یا پوزیترون.

پاد ذره: ذره‌ای که همانند ذره متناظر آن است، جز آنکه بار و بعضی از خواص دیگر آن متضاد آن

است. هرگاه یک ذره و پاد ذرهٔ متناظر آن با هم برخورد کنند، یکدیگر را نابود می‌کنند و تنها انرژی به‌جای می‌گذارند. همهٔ ذرات ماده ضد همتاهای خود را دارند.

پتانسیل شیمیایی: یک انرژی نسبی که اختصاص به یک جزء شیمیایی، برای میل ترکیبی، یا میل به مشارکت با اجزای دیگر در واکنش شیمیایی دارد. واکنشهای شیمیایی در دما و فشار ثابت از پتانسیل بالاتر به پتانسیل پایینتر شیمیایی پیش می‌رود.

پخشیدن (diffusion): جاری شدن خودبه‌خود ماده‌ای از ناحیه‌ای با غلظت زیاد به ناحیه‌ای با غلظت کم.

پراش (diffraction): پراکندگی امواج (مثلاً نور) پس از عبور از یک شکاف باریک.

تابع حالت: تابعی که خاصیتی از یک سیستم را دقیقاً برحسب حالت سیستم بیان می‌کند، مثلاً با فشار و دما معین می‌شود.

تابع نمایی: هر تابعی که شامل متغیری در یک نما (توان) است، مثلاً e^x و 10^r.

ترمودینامیک: ابتدا، علم گرما بود، اما سرانجام وسعت یافت، به‌طوری که مواردی از قبیل نیروهای محرکهٔ شیمیایی را شامل می‌شد.

تلسکوپ شکستی: تلسکوپی که با عدسی کوژ نور را جمع‌آوری و کانونی می‌کند.

ثابت بولتزمن: عدد بسیار کوچکی که به‌صورت k در اکثر معادلات مکانیک آماری نشان داده می‌شود.

ثابت گرانشی: عددی که با نماد G در اکثر معادلات نظریهٔ گرانی ظاهر می‌شود.

ثابت هابل: ثابت تناسب در قانون هابل؛ که با H نشان داده می‌شود. معکوس H تخمینی از عمر جهان است.

جبر: شاخه‌ای از ریاضیات که با نشان دادن اعداد به‌صورت نمادها، حساب را کلی‌تر می‌کند.

جرم: خاصیتی از یک جسم که مقاومت آن در برابر تغییر حرکتش را اندازه‌گیری می‌کند؛ همچنین خاصیتی است که در جاذبهٔ گرانشی حاصل می‌شود. اندازه‌گیری جرم برحسب گرم، کیلوگرم و غیره است.

جسم سیاه: جسمی که بر اثر گرم شدن تابش می‌کند، اما تابش فرودی را باز نمی‌تابد.

حرکت دایمی: این مفهوم که بتوان ماشینی طراحی کرد تا برونداد مفید مداوم همیشگی فراهم کند، بدون آنکه درونداد انرژی لازم داشته باشد.

حسابان (calculus): شاخه‌ای از ریاضیات که تغییر مداوم را بیان می‌کند. ابزارهای حسابان، دیفرانسیل‌گیری، انتگرال‌گیری، و معادلات شامل مشتقها و انتگرالها است.

خازن: وسیله‌ای که بار الکتریکی را بین دو صفحهٔ فلزی جدا از هم با مادهٔ عایقی بین آنها، ذخیره می‌کند.

خطوط نیرو: نمایش فارادی از نیروهایی که ذاتاً در میدان الکتریکی یا مغناطیسی وجود دارند.

دمای مطلق: مقیاس محاسبه‌ای که صفر آن بنابر مقیاس سلسیوس در حدود ۲۷۳− درجه است.

دی‌الکتریک: یک مادهٔ عایق الکتریکی.

دیفرانسیل: تغییری بسیار کوچک در یک کمیت.

دینامیک: علم حرکت با توجه به نیروها و انرژی.

ذرهٔ بنیادی: ذره‌ای که ساختاری ندارد، و از لحاظ ریاضی به‌صورت نقطه‌ای تلقی می‌شود، مانند الکترونها، کوارکها و نوترونها.

سلول الکتریکی: دستگاهی که ورودی الکتریکی مصرف می‌کند و موجب واکنش شیمیایی می‌شود.

سیستم آدیاباتیک: سیستمی عایق‌شده از گرمای محیط پیرامونش است.

سیستم منزوی: سیستمی که کاملاً از محیط اطرافش جدا شده است.

سیستم هم‌دما: سیستمی که در دمای ثابت نگه داشته شده باشد.

شتاب: آهنگ تغییر سرعت با زمان؛ که برحسب متر بر ثانیه بر ثانیه اندازه‌گیری می‌شود.

شتاب گرانی: آهنگ تغییر سرعت با زمان کم ناشی از جاذبهٔ گرانشی است؛ که روی زمین در حدود ۹٫۸ متر بر ثانیه بر ثانیه است.

ظرفیت گرمایی: گرمای لازم برای بالا بردن یک درجه دمای مقدار معینی از یک ماده است.

عدد آووگادرو: تعداد مولکولهای موجود تقریباً دوگرم هیدروژن (درواقع ۲٫۰۱۶ گرم).

عدد اتمی: عددی که به هر عنصر شیمیایی اختصاص داده می‌شود که جای آن عنصر را در جدول تناوبی مشخص کند. این عدد برابر با بار هستهٔ اتمی عنصر برحسب واحدهای بار پروتون نیز هست.

فاکتوریل: فاکتوریل یک عدد صحیح n عبارت است $n! = (۱ \times ۲ \times ۳ \cdots)$؛ یک مثال $۶! = ۱ \times ۲ \times ۳ \times ۴ \times ۵ \times ۶ = ۷۲۰$.

فرایند گرماده: فرایندی که با آزاد شدن انرژی گرمایی پیش می‌رود، مثلاً واکنش احتراق.

فرایند گرماگیر: فرایندی که با جذب انرژی گرمایی پیش می‌رود؛ یک نمونهٔ ذوب شدن یخ است.

فلوکسیون: واژهٔ نیوتون برای آهنگ تغییر یک کمیت برحسب زمان است.

فیزیک کلاسیک: فیزیک پیش از ظهور فیزیک کوانتوم، در قرن نوزدهم.

قانون پایستگی: قانونی که می‌گوید در فرایندهای فیزیکی و شیمیایی کمیت معینی تغییر نمی‌کند، مثلاً پایستگی اندازه‌حرکت و پایستگی انرژی.

قانون هابل: قانونی که رابطهٔ خطی بین سرعت پس‌رفت یک کهکشان از زمین و فاصلهٔ کهکشان از زمین را بیان می‌کند.

قضیهٔ H: قضیه‌ای که به‌وسیلهٔ بولتزمن بسط یافت، که ثابت می‌کند خاصیت H یک سیستم بزرگ مقیاس (ماکروسکوپی) افزایش نمی‌یابد. در ارتباط با قانون دوم ترمودینامیک.

قضیهٔ همپاری: قضیه‌ای که ثابت می‌کند (نه همیشه به‌طور درست) انرژی افزوده‌شده به یک سیستم به‌طور مساوی میان وجوه حرکت سیستم تقسیم می‌شود.

کاتود: در الکتروشیمی، الکترود منفی، که یونهای مثبت (کاتیونها) به‌طرف آن جذب می‌شوند.

کاتیون: یک یون باردار مثبت.

کار: در فیزیک، آنچه انجام می‌شود وقتی که نیرویی بر جسمی وارد می‌شود تا آن را در مسافتی به‌حرکت درآورد، مانند بلند کردن، هل دادن یا کشیدن یک جسم؛ اندازه‌گیری آن برحسب ژول، کالری و غیره است.

کالری: واحدی از انرژی، معادل گرمای لازمی که دمای یک گرم آب را یک درجهٔ سلسیوس بالا می‌برد.

کیهان‌شناسی: مطالعهٔ ساختار، منشأ، و تاریخ جهان.

گرما: به‌طور کلی انرژی گرمایی، در ترمودینامیک، گرما انرژی گرمایی است که از مرز یک سیستم به درون یا بیرون آن عبور می‌کند.

گرماسنج: وسیله‌ای برای اندازه‌گیری گرما.

لختی (اینرسی): تمایل یک جسم به اینکه در حالت سکون یا در حرکت یکنواخت بماند، مگر آنکه تحت تأثیر نیرویی قرار گیرد.

لگاریتم طبیعی: لگاریتمی که مبنای آن عدد e است.

ماشین حرارتی: وسیله‌ای است که از گرما کار ایجاد می‌کند.

متافیزیک: بررسی طبیعت ماورای فیزیک.

مشتق: یک مبحث ریاضی که آهنگ تغییر یک کمیت را با توجه به کمیت دیگر معین می‌کند. مثلاً، سرعت مشتق مسافت نسبت به زمان و شتاب مشتق سرعت نسبت به زمان است.

مشتق‌گیری (differentiation): رویه‌ای ریاضی برای تعیین مشتق.

مشدّدها: اصطلاح پلانک برای مولکولهای در حال ارتعاش در دیواره‌های کورهٔ یک جسم سیاه.

مکانیک: علم حرکت.

مکانیک آماری: بررسی سیستمهای ماکروسکوپی (بزرگ مقیاس) از نقطه‌نظر رفتار میانگین مولکولهای سازندهٔ سیستم.

مکانیک ماتریسی: نوعی مکانیک کوانتومی که به‌وسیلهٔ هایزنبرگ، بورن و جردن ابداع شد.

میل ترکیبی: واژهٔ اولیه‌ای برای نیرویی که واکنشهای شیمیایی را پیش می‌راند.

نسبیت: بررسی مکانیک اجسام در حرکت نسبی به یکدیگر.

نظریهٔ کالریک: یک نظریهٔ منسوخ قدیمی است که گرما را به‌صورت سیالی تخریب‌ناپذیر و ایجادناپذیر در نظر می‌گرفت.

نیروی مرکزگرا: واژهٔ نیوتون برای نیروی گرانشی که سیاره‌ای را در مدارش نگه می‌دارد.

وزن: اعمال نیروی گرانشی بر یک جسم.

وزن اتمی: جرم یک اتم نسبت به جرم یک اتم هیدروژن که در حدود ۱ گرفته می‌شود (درواقع، ۱٫۰۰۸).

وزن هم‌ارز: از یک عنصر شیمیایی، وزنی تقریباً برابر با جرم آن عنصر است که با یک گرم هیدروژن ترکیب می‌شود.

هم‌ارزی مکانیکی گرما: اثر مکانیکی (سقوط وزنه‌ها در آزمایشهای جول) هم‌ارز با یک واحد گرما، که با J نشان داده می‌شود. اندازه‌گیری جول برحسب فوت‌ـپوند بر واحد گرمایی بریتانیایی بود.

هنگرد (ensemble): در مکانیک آماری، مجموعه‌ای مفهومی از نسخه‌های بسیاری از یک سیستم موردنظر.

Acknowledgments

It is a pleasure to acknowledge the help of Kirk Jensen, Helen Mules, and Jane Lincoln Taylor at Oxford University Press, who made an arduous task much more pleasant than it might have been. I am indebted to my daughters, Hazel and Betsy, for many things, this time for their artistry with computer software and hardware.

I am also grateful for permission to reprint excerpts from the following publications:

Subtle is the Lord: The Science and Life of Albert Einstein, by Abraham Pais, copyright © 1983 by Abraham Pais. Used by permission of Oxford University press, Inc.; *The Quantum Physicists*, by William H. Cropper, copyright ©1970 by Oxford University Press, Inc. Used by permission of Oxford University Press, Inc.; *Ludwig Boltzmann: The Man Who Trusted Atoms*, by Carlo Cercignani, copyright ©1998 by Carlo Cercignani. Used by permission of Oxford University press, Inc.; *Lise Meitner: A Life in Physics*, by Ruth Lewin Sime, copyright ©1996 by the Regents of the University of California. Used by permission of the University of California Press; *Marie Curie: A Life*, by Susan Quinn, copyright ©1996, by Susan Quinn. Used by permission of the Perseus Books Group; *Atoms in the Family: My Life with Enrico Fermi*, by Laura Fermi, copyright © 1954 by The University of Chicago. Used by permission of The University of Chicago Press; *Enrico Fermi, Physicist*, by Emilio Segrè, Copyright ©1970 by The University of Chicago. Used by Permission of The University of Chicago Press; *Strange Beauty: Murray Gell-Mann and the Revolution in Twentieth-Century Physics*, by George Johnson, copyright ©1999 by George Johnson. Used by Permission of Alfred A. Knopf, a division of Random House, Inc. Also published in the United Kingdom by Jonathan Cape, and used by permission from the Random House Group, Limited; *QED and the Men Who Made It*, by Silvan S. Schweber, copyright ©1994 by Princeton University Press. Used by permission of Princeton University Press; *Surely You're Joking, Mr. Feynman* by Richard Feynman as told to Ralph Leighton, copyright ©1985 by Richard Feynman and Ralph Leighton. Used by permission of W.W. Norton Company, Inc. Also published in the United Kingdom by Century, and used by permission form the Random House Group, Limited; *What Do You Care What Other People Think?*, by Richard Feynman as told to Ralph Leighton, copyright ©1988 by Gweneth Feynman and Ralph Leighton. Used

by permission of W.W. Norton Company, Inc.; *The Feynman Lectures on Physics*, by Richard Feynman, Robert Leighton, and Matthew Sands, copyright © 1988 by Michelle Feynman and Carl Feynman. Used by permission of the Perseus Books Group; *Chandra: A Biography of S. Chandrasekhar*, by Kameshwar Wali, copyright © 1991 by The University of Chicago. Used by permission of The University of Chicago Press; *Edwin Hubble: Mariner of the Nebulae*, by Gale E. Christianson, copyright © 1995 by Gale E. Christianson. Used by Permission of Farrar, Straus and Giroux, L.L.C. Published in the United Kingdom by the Institute of Physics Publishing. Used by Permission of the Institute of Physics Publishing; "Rudolf Clausius and the Road to Entropy," by William H. Cropper, *American Journal of Physics* **54**, 1986, pp. 1068-1074, copyright © 1986 by the American Association of Physics Teachers. Used by Permission of the American Institute of Physics; "Walther Nernst and the Last Law," by William H. Cropper, *Journal of Chemical Education* **64**, 1987, pp. 3-8, copyright © 1987 by the Division of Chemical Education, American Chemical Society. Used by permission of the *Journal of Chemical Education*; "Carnot's Function, Origins of the Thermodynamic Concept of Temperature," by William H. Cropper, *American Journal of Physics* **55**, 1987, pp. 120-129, Copyright © 1987 by the American Association of Physics Teachers. Used by permission of the American Institute of Physics; "James Joule's Work in Electrochemistry and the Emergence of the First Law of Thermodynamics," by William H. Cropper, *Historical Studies in the Physical and Biological Sciences* **19**. 1986, pp. 1-16, copyright © 1988 by the Regents of the University of California. Used by permission of the University of California Press.

All of the portrait photographs placed below the chapter headings were supplied by the American Institute of Physics Emilio Segrè Visual Archives, and are used by permission of the American Institute of Physics. Further credits are: Chapter 2 (Newton), Massachusetts Institute of Technology Burndy Library; Chapter 4 (Mayer), Massachusetts Institute of Technology Burndy Library; Chapter 5 (Joule), *Physics Today* Collection; Chapter 7 (Thomson), Zeleny Collection; Chapter 8 (Clausius), *Physics Today* Collection; Chapter 10 (Nernst), Photograph by Francis Simon; Chapter 11 (Faraday), E. Scott Barr Collection; Chapter 13 (Boltzmann), *Physics Today* Collection; Chapter 14 (Einstein), National Archives and Records Administration; Chapter 16 (Bohr), Segrè Collection; Chapter 19 (Schrödinger), W.F. Meggers Collection; Chapter 20 (Curie), W. F. Meggers Collection; Chapter 21 (Rutherford), *Nature*; Chapter 22 (Meitner), Herzfeld Collection; Chapter 23 (Fermi), Fermi Film Collection; Chapter 24 (Dirac), photo by A. Börtzells Tryckeri; Chapter 25 (Feynman), WGBH-Boston; Chapter 26 (Gell Mann), W.F. Meggers Collection; Chapter 27 (Hubble), Hale Observatories; Chapter 28 (Chandrasekhar), K.G. Somsekhar, *Physics Today* Collection; Chapter 29 (Hawking), *Physics Today* Collection.

مکانیک

گالیلئو گالیلی

آیساک نیوتون

ترمودینامیک

سادی کارنو

رابرت مایر

جیمز جول

هرمان هلمهلتز

ویلیام تامسن

رودولف کلازیوس

ویلارد گیبس

والتر نرنست

الکترومغناطیس

مایکل فارادی

جیمز کلرک ماکسول

مکانیک آماری

لودویک بولتزمن

نسبیت

آلبرت اینشتین