تکامل فیزیک

نوشتهٔ آلبرت آینشتاین ـ لئوپولد اینفلد

ترجمهٔ
احمد آرام

۲

دورهٔ آثار آلبرت آینشتاین

در ترجمهٔ کتابهای علمی به زبان فارسی، چندان عنایتی به آثار کلاسیك علم جدید نشده است. از این‌رو آشنائی فارسی‌زبانان با دگرگونیهای علم جدید یا به یاری متون درسی بوده است و یا از راه نوشته‌های ساده شده و عامه فهم. درست است که ترجمهٔ این متون از نظر دقت علمی و توجه به‌اصطلاحات، نیاز به‌تلاش و پژوهش بیشتری از جانب مترجم دارد، ولی این نکته نباید مانع آن شود که در زبان ما کتابهایی که باید مرجع تحقیق و مطالعهٔ صاحبنظران باشد، منتشر نگردد.

با توجه به اهمیت این‌گونه آثار، انتشارات خوارزمی از مدتها پیش در این اندیشه بوده است که در حد توان خود به رفع این نقیصه بکوشد. مجموعه‌هایی از آثار بنیادی پایه‌گذاران علم جدید به‌این منظور مورد توجه بوده است. این برنامه با «دورهٔ آثار آلبرت آینشتاین» آغاز می‌شود تا اگر اقبال خوانندگان دلگرممان کند و امکانات مادی فراهم شود، با دوره‌هایی از آثار بور، هیلبرت، هایزنبرگ و دیگر بزرگان علم این راه ادامه یابد.

«دورهٔ آثار آلبرت آینشتاین» که زیر نظر دکتر محمدرضا خواجه‌پور، استاد دانشگاه ویراسته و ترجمه می‌شود به‌ترتیب زیر منتشر می‌گردد: ۱. نسبیت؛ ۲. تکامل فیزیك؛ ۳. فیزیك و واقعیت و مقالات دیگر؛ ۴. ترمودینامیك، مکانیك آماری و نظریهٔ کوانتومی؛ ۵. نسبیت، گرانشی و کیهانشناسی.

تکامل فیزیک

نوشتهٔ آلبرت آینشتاین ـ لئوپولد اینفلد

ترجمهٔ احمد آرام

شرکت سهامی انتشارات خوارزمی

فهرست

یادداشت مترجم ۶
مقدمهٔ چاپ جدید ۷
مقدمهٔ مؤلفان ۹

۱. پیدایش نگرش مکانیکی
داستان اسرارآمیز بزرگ ۱۱
نخستین برگه ۱۳
بردارها ۱۸
معمای حرکت ۲۵
برگهٔ دیگری باقی است ۳۶
آیا گرما جوهری مادی است؟ ۳۹
گردونهٔ تفریحی ۴۷
نرخ تبدیل ۵۰
زمینهٔ فلسفی ۵۳
نظریهٔ جنبشی ماده ۵۶

۲. انقراض نگرش مکانیکی
دو شارهٔ الکتریکی ۶۵
شاره‌های مغناطیسی ۷۵
نخستین اشکال جدی ۷۸
سرعت نور ۸۳

نور به مثابهٔ جوهری مادی ۸۶
معمای رنگ ۸۹
موج چیست؟ ۹۲
نظریهٔ موجی نور ۹۶
امواج نور طولی هستند یا عرضی؟ ۱۰۴
اثیر و نگرش مکانیکی ۱۰۸

۳. میدان و نسبیت

نمایش میدان ۱۱۱
دو رکن نظریهٔ میدان ۱۲۲
واقعیت میدان ۱۲۶
میدان و اثیر ۱۳۲
چوب بست مکانیکی ۱۳۵
اثیر و حرکت ۱۴۵
زمان، فاصله، نسبیت ۱۵۶
نسبیت و مکانیک ۱۶۹
پیوستار فضا-زمان ۱۷۴
نسبیت عمومی ۱۸۳
بیرون آسانسور و درون آن ۱۸۷
هندسه و آزمایش ۱۹۴
نسبیت عمومی و اثبات آن ۲۰۵
میدان و ماده ۲۱۰

۴. کوانتوم

پیوستگی-ناپیوستگی ۲۱۴
کوانتومهای بنیادی ماده و الکتریسیته ۲۱۶
کوانتومهای نور ۲۲۱
طیف نور ۲۲۷
امواج ماده ۲۳۳

امواج احتمال ۲۳۹
فیزیك و واقعیت ۲۵۰
واژنامهٔ فارسی-انگلیسی ۲۵۵
واژه‌نامه انگلیسی-فارسی
فهرست راهنما

بسم‌الله‌الرحمن‌الرحیم

یادداشت مترجم

دوست عزیزم آقای علیرضا حیدری مدیر عامل شرکت انتشارات خوارزمی با چاپ کردن مجموعهٔ آثار افلاطون سنت خوبی در کار چاپ آثار علمی بر جای گذاشتند و اینك به پیروی از همان سنت در صدد چاپ کردن و انتشار دادن مجموعهٔ آثار آینشتاین برآمده‌اند.

یکی از آثار آینشتاین را پیش از این به نام «تکامل علم فیزیك» ترجمه کرده بودم و اینك مایهٔ کمال خوشوقتی است که ویراستار این مجموعه، آقای دکتر محمدرضا خواجه پور، با کمال دقت و دلسوزی به حال بندهٔ مترجم و خوانندگان محترم، آن ترجمهٔ سابق مرا از این کتاب، سراسر خوانده و اصلاحاتی را که، با در نظر گرفتن چاپ تازهٔ متن اصلی کتاب لازم بوده است در آن بعمل بیاید، چه از لحاظ وارد کردن لغات تازه قبول شده در زبان فارسی و جانشین کردن آنها به جای لغات متروك قدیمی و چه احیاناً از لحاظ نارسائیهائی که در ترجمهٔ قدیمی وجود داشته، بعمل آورده‌اند که مایهٔ کمال تشکر بنده است و مزید توفیق ایشان را از خدای متعال مسئلت دارم. برای آنکه یادگار تازه‌ای از من در این چاپ بوده باشد، مقدمه‌ای را که لئوپولد اینفلد بر چاپ تازهٔ همین کتاب نوشته است و حاوی فوایدی است، ترجمه و تقدیم خوانندگان می‌کنم.

تهران، خرداد ماه ۱۳۶۱

احمد آرام

مقدمه بر چاپ جدید

نخستین چاپ این کتاب بیش از بیست سال پیش انتشار یافت. از آن پس مرگ آینشتاین، مؤلف اصلی این کتاب و شاید بزرگترین دانشمند و مهربانترین مردی که در جهان می‌زیست، فرا رسید. پس از آن پیشرفت بی‌همتای دانش فیزیك همچنان ادامه یافت. برای نمونه کافی است به پیشرفت علم هسته‌ای و نظریهٔ ذرات بنیادی و اکتشاف فضای کیهانی اشاره کنیم. با این همه آنچه باید در این کتاب تغییر داده شود بسیار اندك است، چه در آن تنها از اندیشه‌های اساسی فیزیك بحث می‌شود که اصولاً تغییری نکرده است. به نظر من تنها اصلاحاتی جزئی باید صورت بگیرد.

نخست: این کتاب با تکامل اندیشه‌ها سروکار دارد و یك گزارش تاریخی نیست. بنا بر این، تاریخهائی که داده شده تقریباً و به صورت «چندین سال پیش» بیان شده است. مثلاً، در فصل چهارم، «کوانتا»، بخش «طیف نور» (ص ۲۲۹)، دربارهٔ بور چنین نوشته‌ایم: «نظریهٔ او که بیست وپنج سال پیش تدوین شد...» چون کتاب حاضر نخستین‌بار در ۱۹۳۸ چاپ شد، «بیست و پنج سال پیش» به معنی سال ۱۹۱۳ است که مقالهٔ بور در آن سال انتشار یافت. و خواننده باید در خاطر داشته باشد که همهٔ تعبیرات مشابه به سال ۱۹۳۸ باز می‌گردد.

دوم: در فصل سوم، «میدان، نسبیت»، بخش «اثیر و حرکت» (ص ۱۴۶)، نوشته‌ایم: «در این مثالها چیزی که با عقل سازگار نباشد وجود ندارد، جز اینکه در هر دو حالت باید با سرعتی در حدود ۳۶۰ متر در ثانیه دوید، و می‌توان تصور کرد که پیشرفتهای فنی آینده چنین سرعتهائی را میسر گرداند.» اکنون هرکس می‌داند که هواپیماهای جت سرعت ماورای

صوت پیدا کرده‌اند.

سوم: درهمین فصل، بخش «نسبیت و مکانیك» (ص ۱۷۱) نوشته‌ایم: «... از ئیدروژن، سبکترین، تا اورانیوم، سنگینترین...» و این اکنون دیگر طبقه بندئی صحیح نیست، چه اورانیوم دیگر سنگینترین عنصر نیست.

چهارم: نیز در فصل سوم، بخش «نسبیت عمومی و اثبات آن» (ص ۲۰۹)، در بارهٔ حرکت حضیض خورشیدی عطارد چنین نوشته‌ایم: «ملاحظه می‌کنید که این اثر چه قدر کوچك و ناچیز است، و اگر در مورد سیارات دورتر به جستجوی آن برمی‌خاستیم هیچ امیدی به اخذ نتیجه نمی‌رفت.» اندازه‌گیریهای تازه معلوم کرده است که این اثر نه تنها برای عطارد بلکه برای سیارات دیگر نیز صادق است. اثری است بسیار کوچك ولی چنان می‌نماید که با نظریه نسبیت عمومی توافق دارد.

در فصل چهارم، «کوانتا»، بخش «امواج احتمال» (ص ۲۴۰)، در بارهٔ پراش الکترونهای منفرد نوشته‌ایم: «لازم به ذکر نیست که این یك آزمایش، آزمایشی خیالی است که هرگز آن را نمی‌توان در عمل انجام داد، ولی تصور آن اشکالی ندارد.» شایستهٔ ذکر است که در ۱۹۴۹ یکی از دانشمندان شوروی، پروفسور و. فابریکانت، و همکارانش تجربه‌ای را عملی کردند که در آن توانستند پراش الکترونهای تنها را مشاهده کنند.

با این چند تغییر، کتاب متناسب روز می‌شود. نمی‌خواهم این اصلاحات کوچك را وارد متن کتاب کنم، زیرا چنان احساس می‌کنم که کتابی که با همکاری آینشتاین نوشته شده، باید همانگونه که با هم کار کرده‌ایم باقی بماند. بسیار خوشوقتم که این کتاب هنوز هم پس از مرگ او، همچون آثار دیگرش، زنده است.

ورشو، اکتبر ۱۹۶۰

لئوپولد اینفلد

مقدمهٔ مؤلفان

پیش از شروع به خواندن کتاب حق دارید متوقع باشید که به چند پرسش سادهٔ شما جواب گفته شود. این کتاب به چه منظور نوشته شده؟ یا خوانندهٔ خیالی که این کتاب برای او نوشته شده کیست؟

در ابتدای کتاب، پاسخی روشن و قانع‌کننده به این سؤالها دادن کاری دشوار است. اگر این پرسش و پاسخ به آخر کتاب محول می‌شد کار خیلی سهل و در عوض عملی کاملاً زائد می‌بود. ساده‌تر آن است که فقط بگوئیم در این کتاب چه چیزها منظور نظر نبوده است. ما کتاب درسی فیزیک ننوشته‌ایم. در اینجا درس منظمی در حقایق و نظریه‌های مقدماتی فیزیک ارائه نمی‌شود. مقصود ما ترسیم خطوط اصلی تلاشهای فکر بشر است برای یافتن رابطه‌ای میان دنیای افکار و دنیای پدیده‌ها. سعی کرده‌ایم نیروهای فعالی را نشان دهیم که علم را به ابداع افکاری دربارهٔ واقعیت جهان وا می‌دارند. از خلال آمیزهٔ مه‌آلود واقعیات و مفاهیم باید شاهراهی را انتخاب می‌کردیم که به نظر ما متمایزتر و با اهمیت‌تر بوده است. به ناچار از حقایق و نظریه‌هائی که در مسیر این شاهراه نبوده‌اند چشم پوشیده‌ایم. برای پیروی از قصد کلی خود ناگزیر بوده‌ایم که انتخابی از میان حقایق و افکار بعمل آوریم. اهمیت یك مسأله را نباید با تعداد صفحاتی که صرف بیان آن شده است سنجید. بعضی از خطسیرهای اصلی فکر را کنار گذاشته‌ایم، نه به این جهت که آنها را بی‌اهمیت شمرده‌ایم، بلکه از آن رو که در مسیر راهی که انتخاب کرده‌ایم، نبوده‌اند.

هنگام نوشتن کتاب بحثهای مفصلی دربارهٔ خوانندهٔ خیالی کتاب داشته و مدتی در خصوص او فکر کرده‌ایم. چنین فرض کرده‌ایم که او

بی‌اطلاعی کامل خود را از فیزیک و ریاضی با صفاتی که دارد جبران می کند. او را علاقه‌مند به افکار فیزیکی و فلسفی شمرده‌ایم، و به همین جهت حوصله‌ای را که برای فهم قسمتهای دشوارتر و غیرجالب بخرج می‌دهد می‌ستائیم. او پی برده است که برای فهم مطالب هر صفحه لازم است که صفحه‌های قبل را بدقت خوانده باشد. او می‌داند که یك کتاب علمی را، هر اندازه هم که ساده نوشته شده باشد، نباید مثل یك داستان خواند.

این کتاب گفتگوئی دوستانه میان ما و شماست. ممکن است به‌نظر شما ملالت‌انگیز یا جالب توجه، خشك یا جذاب جلوه کند؛ به هر صورت هدف ما زمانی تحقق پذیرفته است که با مطالعهٔ صفحات آن از تلاش پایان ناپذیر فکر نوآور بشر برای درك کاملتر قوانینی که بر پدیده‌های فیزیکی ناظرند، آگاهی پیدا کنید.

آلبرت آینشتاین ـ لئوپولد اینفلد

۱

پیدایش نگرش مکانیکی

داستان اسرارآمیز بزرگ ـ نخستین برگه ـ بردارها ـ معمای حرکت ـ برگهٔ دیگری باقی است ـ آیا گرما جوهری مادی است؟ ـ گردونهٔ تفریحی ـ نرخ تبدیل ـ زمینهٔ فلسفی ـ نظریهٔ جنبشی ماده.

داستان اسرارآمیز بزرگ

آری درخیال، داستان اسرارآمیز کامل وجود دارد. چنین داستانی همهٔ برگه‌های لازم را در اختیار ما می‌گذارد و ما را وادار می‌کند که نظریه‌ای دربارهٔ معمای داستان بپردازیم. اگر نقشهٔ داستان را بدقت دنبال کنیم، درست پیش از آنکه نویسنده در آخر کتاب معما را بگشاید، به حل کامل آن موفق می‌شویم. حل این معما بر خلاف حل معماهای حقیرتر، ما را بی‌اجر نمی‌گذارد. بعلاوه درست در موقعی‌که انتظار داریم، پدیدار می‌شود.

آیا حق داریم خوانندهٔ این کتاب را به دانشمندانی تشبیه کنیم که نسلهای متوالی در صدد حل اسرار کتاب طبیعت بوده‌اند؟ البته چنین قیاسی غلط است، و ما بعداً ازآن دست خواهیم شست. با این حال آن قدر موجه است که بتوان با بسط و تعدیل، آن را در مورد تلاشهای علم برای حل معمای جهان بکار بست.

این داستان اسرارآمیز بزرگ هنوز حل نشده است. حتی نمی‌توان مطمئن بود که راز آن در آخر کار هم گشودنی باشد. آنچه تاکنون از آن خوانده‌ایم بسیار چیزها به ما آموخته است. با اصول زبان طبیعت آشنا شده‌ایم؛ توانسته‌ایم که بسیاری از اشارات آن را بفهمیم. این کتاب در تلاش آمیخته به رنج ما برای پیشرفت علم چشمهٔ نشاط و خوشحالی بوده

است. ولی با این همه می‌دانیم که علی‌رغم مجلداتی که خوانده و فهمیده‌ایم، هنوز از جواب کامل، برفرض آنکه چنین جوابی وجود داشته باشد، بسیار دوریم! در هر مرحله سعی ما این است که توضیحی سازگار با برگه‌هائی که قبلاً کشف شده‌اند، پیدا کنیم. نظریه‌هائی که به تجربه پذیرفته شده‌اند، بسیاری از حقایق را توضیح می‌دهند؛ ولی هنوز جواب کلی، که با تمام برگه‌های شناخته شده سازگار باشد، بدست نیامده است. چه بسا نظریه‌های ظاهراً کاملی که در روشنی صفحات بعدی کتاب از حالت کمال می‌افتند. حقایق جدیدی ظاهر می‌شوند که یا نظریه‌های موجود را نقض می‌کنند، و یا به وسیلهٔ آنها قابل توضیح نیستند. هرچه بیشتر می خوانیم به کمال تألیف کتاب بهتر واقف می‌شویم، هرچند که با پیشرفت ما جواب کامل نیز از ما دورتر می‌شود.

از زمان داستانهای تحسین‌برانگیز کونان دویل به این طرف، تقریباً در همهٔ این قبیل داستانهای کارآگاهی موقعی می‌رسد که بازرس حادثه تمام معلوماتی را، که اقلاً برای حل یك قسمت از داستان لازم است در اختیار دارد. این معلومات غالباً نسبت به یکدیگر غریبه و ناچسب و بی ارتباط بنظر می‌رسند. با وجود این کارآگاه زبردست می‌داند که دیگر به تجسس بیشتر نیازی نیست و تنها فکر ثاقب است که باید حقایق گردآمده را به یکدیگر پیوند دهد. او در حالی که ساز خود را می‌نوازد یا در صندلی راحتی لم داده پیپ خود را می‌کشد ناگهان سرنخ را پیدا می‌کند. نه تنها پیوستگی برگه‌های موجود را کشف می‌کند، بلکه می‌داند که حوادث دیگری باید اتفاق افتاده باشد. چون در این موقع می‌داند که دقیقاً در جست و جوی چیست، در صورتی که لازم بداند می‌تواند برای تأیید نظریهٔ خود به جمع‌آوری اطلاعات بیشتر بپردازد.

دانشمندی که کتاب طبیعت را می‌خواند ـ اگر اجازه داشته باشیم که این تعبیر کهن را تکرار کنیم ـ باید خود حل معما را پیدا کند. زیرا او نمی‌تواند مانند خوانندگان بی‌حوصلهٔ داستانهای دیگر به آخر کتاب برود. نسبت به کتاب ما هم خواننده همین حالت را دارد. او بازرسی است که می‌خواهد دست‌کم بخشی از رابطهٔ میان حوادث و زمینهٔ پربار آنها را توضیح دهد. برای یافتن راه حلی، هرچند جزئی هم که باشد، دانشمند باید

حقایق ناپیوستهٔ موجود را جمع‌آوری کند، آنگاه به مدد تفکر خلاق آنها را به یکدیگر پیوند دهد و قابل فهم سازد.

قصد ما آن است که در صفحات آینده به اجمال آن قسمت از کار فیزیکدانان را که شباهت با کار فکری بازرسان دارد شرح دهیم. سرو کار ما به طور عمده با نقش افکار و اندیشه‌ها در تجسس متهورانه‌ای است که برای کسب معرفت نسبت به جهان فیزیکی انجام شده است.

نخستین برگه

کوششهائی که برای خواندن داستان اسرارآمیز بزرگ انجام شده است به اندازهٔ فکر بشر قدمت دارد. مع‌ذلك فقط سیصد و اندی سال است که دانشمندان خواندن خط این کتاب را شروع کرده‌اند. از آن زمان، یعنی از زمان گالیله و نیوتن به این طرف قرائت داستان به سرعت پیش رفته است. شیوه‌های تحقیق و روشهای منظم جست‌وجو و تعقیب نشانه‌ها تکامل یافته است. بسیاری از معماهای طبیعت کشف شده‌اند، گو این که بعضی از راه حلها در پرتو تحقیقات بعدی موقتی و سطحی بوده‌اند.

یکی از مسائل اساسی که، در نتیجهٔ پیچیدگی، هزاران سال در تاریکی کامل مانده بود، مسألهٔ حرکت است. تمام حرکاتی که ما در طبیعت مشاهده می‌کنیم ـ از حرکت سنگی که به هوا پرتاب می‌شود، تا قایقی که در دریا شراع می‌کشد و درشکه‌ای که خیابان را می‌پیماید ـ در واقع بسیار پیچیده هستند. برای درك این پدیده‌ها عاقلانه آن است که مسأله را از ساده‌ترین حالتها شروع کنیم و بتدریج به سمت حالتهای پیچیده‌تر پیش برویم. جسم ساکنی را در جائی که در آن هیچ حرکتی نیست، در نظر می‌گیریم. برای آن که تغییری در مکان چنین جسمی بوجود آوریم لازم است اثری خارجی بر آن وارد آید و آن را به جلو براند یا بلند کند، یا اجسامی دیگر ـ مثلاً اسب یا موتور ـ بر آن عمل کنند. دریافت شهودی ما حرکت را وابسته به اعمالی چون هل دادن و بلند کردن و کشیدن می داند. تکرار تجربه ما را به این اشتباه می‌اندازد که فکر کنیم برای آن که جسمی تندتر حرکت کند باید آن را سخت‌تر هل داد. طبیعتاً چنین بنظر می‌رسد که هرچه اثر وارد برجسم شدیدتر باشد، سرعت جسم بیشتر خواهد

بود. درشکه‌ای که با چهار اسب کشیده شود تندتر از درشکهٔ دیگری که دو اسب آن را می‌کشند حرکت می‌کند. دریافت شهودی به ما می‌گوید که سرعت اساساً باکنش ارتباط دارد.

خوانندگان داستانهای پلیسی خوب می‌دانند که یک برگهٔ جعلی داستان را آشفته می‌سازد و حل مسأله را به تأخیر می‌افکند. شیوهٔ استدلالی که بر شهود و حدس مبتنی بود باطل بود و به افکار نادرستی دربارهٔ حرکت منجر شد که قرنهای متمادی دوام یافتند. شاید قدرت و اعتبار ارسطو در سراسر اروپا، علت اساسی دوام این تصور شهودی بوده باشد. در کتاب مکانیک که دوهزار سال است به او منسوب می‌شود چنین می‌خوانیم.

جسم متحرک موقعی به حالت سکون در می‌آید که نیروئی که آن را می‌راند دیگر نتواند تأثیر کند و آن را براند.

کشف استدلال علمی و استفادهٔ از آن به وسیلهٔ گالیله یکی از بزرگترین دستاوردهای تاریخ تفکر بشر است؛ و آغاز حقیقی علم فیزیک را باید از همان زمان دانست. این اکتشاف به ما آموخت که استنتاجات شهودی، که نتیجهٔ بلاواسطهٔ مشاهده هستند، همیشه شایستهٔ اعتماد نیستند، زیرا که بعضی اوقات برگه‌هائی دروغین می‌سازند.

حال ببینیم که شهود ما در کجا به راه خطا می‌رود؟ آیا گفتن این‌که گاری چهاراسبه تندتر از گاری دواسبه می‌رود ممکن است نادرست باشد؟

بهتر است در واقعیتهای حرکت دقیق شویم و از تجربهٔ سادهٔ روزانه‌ای که بشر از آغاز تمدن به بعد و در تنازع دشوار خود برای بقا کسب کرده است، شروع کنیم.

فرض کنیم کسی که در امتداد جاده‌ای هموار ارابهٔ دستی را به‌جلو می‌راند، ناگهان از راندن آن دست بکشد. ارابه پیش از آن که بایستد مسافتی را طی می‌کند. می‌پرسیم: چگونه ممکن است این مسافت را زیادتر کرد؟ این کار چند راه دارد، که از جمله روغن زدن به چرخها و هموارتر کردن جاده است. هرچه چرخها راحت‌تر بچرخند و جاده هموارتر باشد، ارابه مسافت بیشتری را خواهد پیمود. بسیار خوب، ببینیم با روغن زدن

چرخها و هموارتر کردن جاده چه کرده‌ایم؟ فقط اینکه تأثیرات خارجی کمتر و کوچکتر شده‌اند. اثر عاملی که اصطکاك نام دارد، هم در چرخها و هم میان چرخها و جاده نقصان پذیرفته است. این گفته خود تعبیری نظری از یك رویداد قابل مشاهده است، تعبیری که خود براستی من عندی و بدون دلیل است. یك قدم مهم دیگر که برداریم برگهٔ درست را بدست می آوریم. فرض کنیم راهی باشد کاملاً هموار، و چرخهائی بدون اصطکاك. در این صورت هیچ چیز باعث ایستادن ارابه نمی‌شود و ارابه برای همیشه به سیر خود ادامه خواهد داد. این نتیجه فقط از تفکر در بارهٔ آزمایشی خیالی (ایدئال) بدست آمد که هرگز نمی‌تواند جامهٔ عمل بپوشد، زیراکه حذف همهٔ اثرهای خارجی غیر ممکن است. این آزمایش خیالی همان برگه‌ای است که شالودهٔ مکانیك حرکت را بنیان نهاد.

از مقایسهٔ این دو روش بررسی مسأله می‌توان گفت: بنابر دریافت شهودی هرچه کنش بزرگتر باشد، سرعت زیادتر می‌شود. بنا براین از روی سرعت می‌توان دریافت که آیا نیروهای خارجی برجسم وارد می‌شوند یا نه. برگهٔ جدیدی که گالیله پیدا کرد این است: اگر جسم رانده یا برداشته یا کشیده نشود و از هیچ راه دیگری هم تحت تأثیر واقع نگردد یا به عبارت ساده‌تر، اگر بر آن هیچ نیروی خارجی وارد نیاید، به طور یکنواخت حرکت خواهد کرد، یعنی سرعتی ثابت در امتداد خط مستقیم خواهد داشت. پس سرعت نشان نمی‌دهد که آیا نیروهائی خارجی برجسم وارد آمده‌اند یا نیامده‌اند. نتیجهٔ گالیله، که نتیجهٔ صحیح است، یك نسل بعد به وسیلهٔ نیوتن به شکل قانون ماند مدون شد. این قانون اولین چیزی است که ما از درس فیزیك در مدرسه از بر می‌کنیم، و شاید بعضی از ما آن را به صورت زیر به‌خاطر داشته باشند:

هرجسمی حالت سکون یا حرکت یکنواخت خود در خط مستقیم را حفظ می‌کند، مگر این که نیروهائی که بر آن کارگر می‌افتند مجبورش کنند که حالت خود را تغییر دهد.

دیدیم که این قانون ماند نمی‌تواند نتیجهٔ مستقیم آزمایش باشد،

بلکه از تفکر نظری سازگار با مشاهده حاصل شده است. آزمایش خیالی را هرگز نمی‌توان عملاً انجام داد، هرچند که وسیلهٔ فهم کامل آزمایشهای واقعی می‌گردد.

از میان انواع مختلف حرکاتی که در دنیای حول و حوش ما وجود دارد، حرکت یکنواخت را به عنوان مثال اول خود انتخاب می‌کنیم. این حرکت ساده‌ترین حرکات است، زیرا در آن هیچ نیروی خارجی وجود ندارد. اما حرکت یکنواخت هرگز صورت خارجی پیدا نمی‌کند. سنگی که از بالای برجی رها گردد، ارابه‌ای که در امتداد جاده به‌جلو رانده شود، هرگز مطلقاً یکنواخت حرکت نمی‌کنند، زیرا نمی‌توان اثر نیروهای خارجی را از بین برد.

در یك داستان اسرارآمیز خوب چه بسا که آشکارترین برگه‌ها به ظنهای باطل بینجامد. در تلاش برای درك قوانین طبیعت نیز واضحترین توضیح شهودی اغلب اوقات توضیحی نادرست است.

فکر انسان تصویری از جهان خلق می‌کند که پیوستهٔ در حال تغییر است. کار گالیله این بود که بینش شهودی را باطل شمرد، و نگرش جدیدی را به جای آن گذاشت: اهمیت کشف گالیله در همین است.

اما بیدرنگ پرسش دیگری در بارهٔ حرکت پیش می‌آید: اگر سرعت نشانهٔ نیروهای خارجی مؤثر درجسم نیست، پس چیست؟ جواب این سؤال اساسی را گالیله یافت، و نیوتن با ایجاز بیشتر آن را بیان کرد، و این جواب برگهٔ دیگری برای تجسسات ما بشمار می‌رود.

برای یافتن جواب صحیح، بایستی در مثال ارابه‌ای که بر جادهٔ کاملاً هموار حرکت می‌کند کمی عمیقانه‌تر فکر کرد. در آزمایش خیالی ما یکنواختی حرکت نتیجهٔ فقدان نیروهای خارجی بود. حال فرض می‌کنیم که بر ارابه‌ای که حرکت یکنواخت دارد فشاری در امتداد حرکت وارد شود. چه روی خواهد داد؟ پرواضح است که سرعت آن زیادتر خواهد شد، همان گونه که نیروئی در جهت مخالف از سرعت آن خواهد کاست. در حالت اول ارابه شتاب یافته است و در حالت دوم کند شده است. از همین جا فوراً نتیجه‌ای بدست می‌آید: اعمال نیروی خارجی سرعت را تغییر می دهد. از این قرار نتیجهٔ هل دادن یا کشیدن ارابه تغییر سرعت است نه خود

سرعت. برحسب این که نیرو در امتداد حرکت جسم وارد شود یا در خلاف آن، برسرعت می‌افزاید یا از آن می‌کاهد. گالیله این نکته را بخوبی دریافت و در کتاب «دو علم جدید» خود چنین نوشت:

... سرعتی که به جسم متحرکی داده شود، تا موقعی که علل خارجی کند یا تند کننده دور نگاه‌داشته شوند، ثابت می‌ماند، و این شرط فقط به سطوح افقی اختصاص دارد. زیرا در سطوحی که به طرف پایین شیب دارند، علتی برای ایجاد شتاب موجود است، و در سطوحی که شیبشان به طرف بالاست حرکت کند می‌شود. از همین جا نتیجه می شود که حرکت در امتداد سطح افقی دائمی خواهد بود، چه هنگامی که سرعت یکنواخت باشد نمی‌تواند کم شود و بنا بر آن از بین برود.

چون برگهٔ صحیح را دنبال کنیم به فهم عمیق‌تری از مسألهٔ حرکت نایل می‌شویم. ارتباط میان نیرو و تغییر سرعت ـ و نه مطابق دریافت شهودی ما ارتباط میان نیرو و خود سرعت ـ پایهٔ مکانیك کلاسیك است که نیوتن آن را تدوین کرده است.

ما تا کنون دو مفهوم را بکار گرفته‌ایم که در مکانیك کلاسیك اهمیت اساسی دارند، و این دو مفهوم عبارتند از نیرو و تغییر سرعت. در تحولات بعدی علم، این مفاهیم معانی وسیعتر و عمومی‌تری پیدا کرده‌اند. به همین جهت لازم است آنها را به‌دقت بیشتر مورد مطالعه قرار دهیم. نیرو چیست؟ به طور شهودی معنی این واژه را می‌دانیم. این مفهوم از کوششی که هنگام هل دادن یا بلند کردن یا کشیدن بکار می‌بریم یعنی از احساس عضلانیی که همراه هر یك از این اعمال است، نشأت گرفته است. ولی تعمیم آن از حدود این مثالها بسیار فراتر می‌رود. ممکن است نیروئی را تصور کرد بدون اینکه قضیهٔ اسب و کشیدن گاری در میان باشد! ما از نیروی جاذبهٔ میان خورشید و زمین یا میان زمین و ماه یا از نیروهائی که سبب جزر و مد می‌شوند گفتگو می‌کنیم. از نیروئی از زمین سخن می‌رانیم که ما و تمام اشیاء اطراف ما را مجبور می‌سازد که در حوزهٔ نفوذ آن بمانیم، یا از نیروی باد صحبت می‌کنیم که امواج دریا را ایجاد می‌کند و

برگهای درختان را به جنبش در می‌آورد. هروقت و هر جا که تغییری در سرعت مشاهده شود، نیروئی خارجی به معنی عام کلمه، مسؤول آن شناخته می‌شود. نیوتن در کتاب «اصول» خود چنین نوشت:

نیروی مؤثر عبارت از عاملی است که برجسمی وارد می‌آید و حالت آن را یا از وضع سکون و یا از حرکت یکنواخت در امتداد خط راست تغییر می‌دهد.
این نیرو فقط همان کنش است؛ هروقت کنش از بین برود، نیروئی باقی نمی‌ماند، زیرا هرجسم به واسطهٔ خاصیت ماند خود هر حالت جدیدی را که پیدا کند نگاه می‌دارد. نیروهای مؤثر منشأهای مختلف دارند، از کوبیدن، از فشار، و از نیروی جذب به مرکز ناشی می‌شوند.

اگر سنگی از بالای برجی رها شود، حرکت آن به‌هیچ‌روی یکنواخت نخواهد بود. هرچه سنگ بیشتر بیفتد، سرعت آن زیادتر می‌شود. از اینجا نتیجه می‌گیریم که نیروئی خارجی در امتداد حرکت سنگ بر آن وارد می شود. به عبارت دیگر زمین سنگ را به طرف خود می‌کشد. مثال دیگری می‌زنیم: هنگامی که سنگی در امتداد قائم به طرف بالا پرتاب می‌شود چه اتفاقی می‌افتد؟ سرعت بتدریج کم می‌شود تا سنگ به بالاترین نقطهٔ مسیر خود می‌رسد و از آنجا شروع به افتادن می‌کند. این کاهش سرعت نتیجهٔ همان نیروئی است که سبب شتاب سنگ ساقط شونده می‌شود. در یك حالت نیرو در جهت حرکت عمل می‌کند، و در حالت دیگر در خلاف جهت آن. نیرو همان نیرو است، ولی برحسب آنکه سنگ به پایین رها شده یا به بالا پرتاب شده باشد، سبب شتاب یا تأنی آن می‌گردد.

بردارها

همهٔ حرکتهائی که تا کنون مورد بحث ما قرار گرفتند مستقیم‌الخط یعنی برامتداد خط راست بودند. اکنون باید یك قدم پیشتر برویم. برای دریافت قوانین طبیعت باید ساده‌ترین حالتها را مورد تحلیل قرار داد و در کوششهای نخست از توجه به پیچیدگیها خود داری کرد. خط راست ساده‌تر

از خط منحنی است. مع‌ذلك نمی‌توان به فهم حرکت مستقیم‌الخط قانع شد، زیرا حرکات ماه و زمین و سیارات، یعنی درست همان حرکاتی که قوانین مکانیك با توفیقی بسیار درخشان بر آنها تطبیق داده شده است، همه حرکاتی هستند که در مسیرهای منحنی انجام می‌گیرند. انتقال از حرکت مستقیم‌الخط به حرکت در مسیر منحنی دشواریهای تازه‌ای را ایجاد می‌کند. باید شجاعت داشت و بر این دشواریها فایق شد، تا بتوان براصول مکانیك که نخستین برگه‌ها را در اختیار ما گذاشتند و در نتیجه نقطهٔ شروع تحول علم بودند وقوف کامل پیدا کرد.

آزمایش خیالی دیگری را در نظر می‌گیریم که در آن کرهٔ کاملی به طور یکنواخت بر سطح هموار میزی می‌غلتد. می‌دانیم که اگر این کره هل داده شود، یعنی نیروی خارجی بر آن تأثیر کند، سرعت آن تغییر خواهد کرد. حال چون فرض شود که برخلاف مثال ارابه، امتداد نیرو در امتداد حرکت کره نباشد، بلکه در امتدادی دیگر مثلاً عمود بر این حرکت باشد، چه برسر کره خواهد آمد؟ در حرکت کره سه مرحله را می‌توان تشخیص داد: حرکت اولی، عمل نیرو و حرکت نهائی پس از آنکه نیرو از کار افتاده است. بر طبق اصل ماند، سرعتهای کره پیش از وارد آمدن نیرو و پس از آن هر دو کاملاً یکنواختند. ولی میان حرکت یکنواخت اولی با حرکت یکنواخت دومی اختلافی موجود است: امتداد حرکت عوض شده است. مسیر اولی کره و امتداد نیرو بر یکدیگر عمودند. حرکت نهائی در امتداد هیچ یك ازاین دو خط نیست، بلکه در امتدادی بین آن دو قرار دارد. اگر نیرو بزرگ و سرعت اولی کوچك باشد، امتداد آن به امتداد نیرو نزدیکتر است، و اگر نیرو کوچك و سرعت اولی بزرگ باشد به امتداد اولیهٔ حرکت نزدیکتر است. نتیجهٔ تازه‌ای که از قانون ماند می گیریم این است که به طور کلی نیروی خارجی نه فقط تندی را تغییر می دهد، بلکه امتداد حرکت را نیز عوض می‌کند. با فهم این مطلب ذهن ما آمادهٔ قبول تعمیمی می‌شود که با مفهوم بردار در فیزیك وارد شده است.

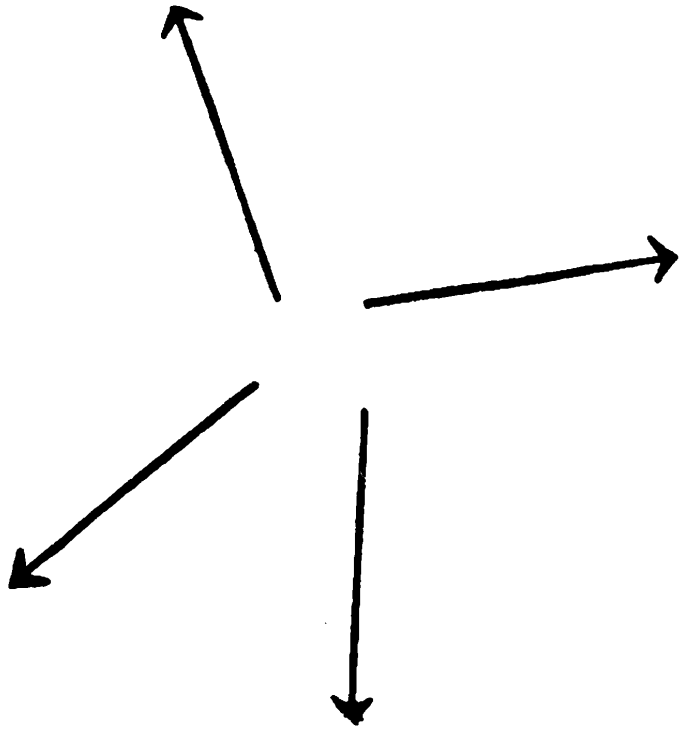
ما همان روش استدلال مستقیم خود را دنبال می‌کنیم. نقطهٔ شروع باز هم همان قانون ماند گالیله است. هنوز خیلی مانده است که نتایج این برگهٔ با ارزش در مسألهٔ حرکت به طور کامل بدست آید.

دو کره را در نظر گیرید که روی میز صافی در حرکت باشند. برای آنکه تصور مشخصی در ذهن داشته باشیم دو امتداد را بر یکدیگر عمود فرض می‌کنیم. تا موقعی که نیروی خارجی کارگر نیفتد، حرکت دو کره کاملاً یکنواخت می‌نماید. بعلاوه فرض می‌کنیم که تندی کره‌ها با یکدیگر برابرند، یعنی در زمانهای مساوی فواصل مساوی را طی می‌کنند. اما آیا درست است که بگوئیم سرعت دو کره یکی است؟ جواب این پرسش ممکن است آری باشد یا نه؟ اگر کیلومتر شمارهای دو اتومبیل هر دو چهل کیلومتر در ساعت را نشان بدهند، معمولاً می‌گویند تندی یا سرعت آن دو برابر یکدیگر است و به این مسأله کاری ندارند که هرکدام از آنها درچه امتدادی حرکت می‌کند. ولی علم اصطلاحات خاص خود را دارد و مفاهیم خاص خود را می‌سازد. مفاهیم علمی از زبان عادی زندگانی روزانه به عاریت گرفته می‌شوند، ولی به شیوهٔ متفاوتی بسط و تکامل می‌یابند و دگرگون می‌شوند و ابهامی را که در محاورهٔ عادی دارند از کف می‌دهند؛ دقت پیدا می‌کنند تا شایستهٔ تفکر علمی شوند.

از دیدگاه فیزیکدانان بهتر آن است که بگوئیم سرعت دو کره که در امتدادهای مختلف حرکت می‌کنند، متفاوت است. چهار اتومبیل از یك میدان در خیابانهای مختلف براه می‌افتند، و کیلومتر شمار هر چهار اتومبیل چهل کیلومتر در ساعت را نشان می‌دهد، مع‌ذلك مناسبتر آن است گفته شود که سرعتشان با یکدیگر مساوی نیست، هرچند که این بیان صرفاً قراردادی است. این تفکیك «تندی» از «سرعت» نشان می‌دهد که فیزیك چگونه مفهومی را از زندگانی روزانه می‌گیرد و آن را چنان تغییر می‌دهد که برای پیشرفت بعدی علم مفید واقع شود.

اگر طولی را اندازه بگیریم، نتیجه با عده‌ای از آحاد بیان می‌شود. طول عصا یك متر و پنج سانتیمتر است، وزن فلان جسم یك کیلو و بیست گرم است، فاصلهٔ زمانی اندازه‌گیری شده چند دقیقه و چندین ثانیه است. در هر یك از این حالات نتیجهٔ اندازه‌گیری با عددی بیان شده است. مع‌ذلك در توصیف مفاهیم فیزیکی عدد بتنهائی کفایت نمی‌کند. تشخیص این نکته خود پیشرفت مهمی در تحقیقات علمی بود. مثلاً برای مشخص کردن سرعت علاوه بر یك عدد، امتداد نیز لازم است. چنین کمیتی که هم

دارای اندازه و هم دارای امتداد است بردار نامیده می‌شود. علامت مناسبی برای نمایش دادن بردار شکل پیکان است. سرعت را ممکن است با پیکان

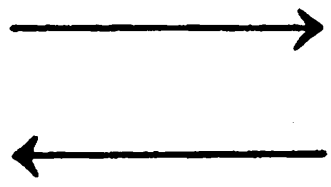


یا به‌طور خلاصه با برداری نمایش داد که طول آن برحسب مقیاس آحاد انتخاب شده اندازهٔ تندی را نشان دهد، و امتداد آن همان امتداد حرکت باشد.

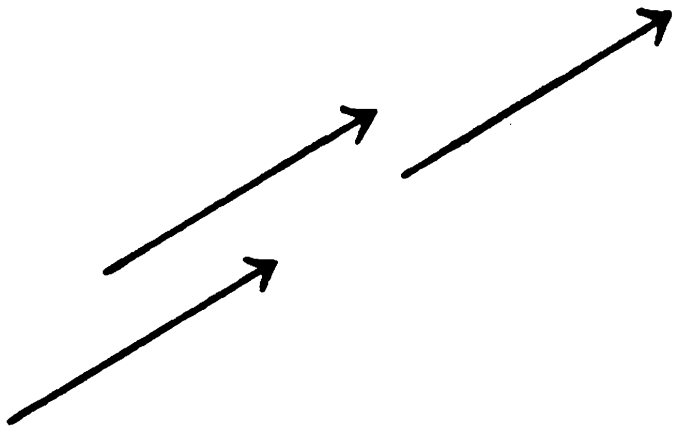
اگر چهار اتومبیل از یك میدان در چهار جادهٔ مختلف با تندی برابر حرکت کنند، سرعتهای آنها، همان‌گونه که در شکل می‌بینید، با چهار بردار متساوی‌الطول نمایش داده می‌شود. با مقیاس بکار رفته هر دو و نیم سانتیمتر نمایندهٔ چهل کیلومتر در ساعت است. به این ترتیب هر سرعتی را با برداری می‌توان نمایش داد، و بر عکس اگر مقیاس معلوم باشد از یك نمودار برداری می‌توان سرعت را بدست آورد.

اگر دو اتومبیل در جاده‌ای از مقابل هم بگذرند و کیلومتر شمار هر دو چهل کیلومتر در ساعت را نشان دهد، سرعتهای آن دو را با دو بردار متفاوت که پیکانهائی در خلاف جهت هم دارند نمایش می‌دهیم. به همین ترتیب پیکان مربوط به قطارهائی که به شمال «شهر» می‌روند باید در جهت مخالف پیکان مربوط به قطارهائی باشد که به سمت جنوب شهر

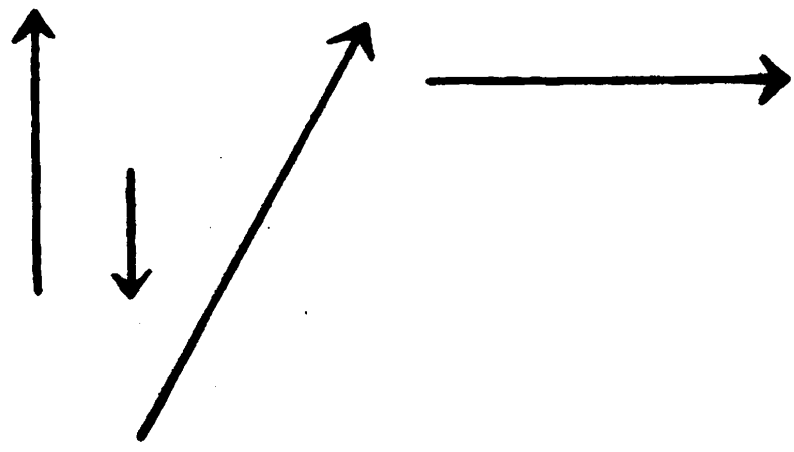
می‌روند. ولی تمام قطارهائی که از ایستگاههای مختلف یا از خیابانهای متفاوت با یك تندی به سمت شمال می‌روند، سرعت واحدی دارند که با



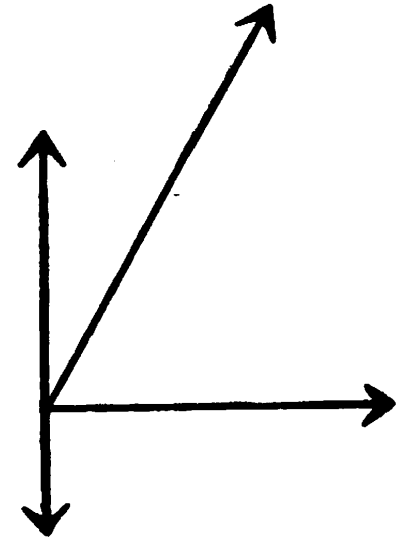
یك بردار نمایش داده می‌شود. از بردار نمی‌توان دریافت که قطار از کدام ایستگاه می‌گذرد یا بر کدام یك از خطوط موازی هم حرکت می‌کند. به‌عبارت دیگر، مطابق قرارداد، تمام این قبیل بردارها را، که در شکل کشیده شده‌اند، می‌توان مساوی یکدیگر شمرد. چنین بردارهائی یا بر روی یك خط هستند و یا بر خطوط موازی هم قرار دارند و طولشان برابر یکدیگر است و بالاخره پیکانهائی دارند که به یك امتداد متوجه می‌باشد.



شکل بعدی بردارهائی را نشان می‌دهد که با هم فرق دارند، زیرا یا در طول متفاوتند یا در امتداد و یا در هر دو. همین چهار بردار را به شکل دیگری نیز می‌توان کشید و آنها را از نقطهٔ واحدی رسم کرد. چون نقطهٔ مبدأ اهمیتی ندارد، این بردارها می‌توانند نمایندهٔ سرعتهای چهار اتومبیل باشند که از یك میدان در جهات مختلف به راه افتاده‌اند، یا نمایندهٔ سرعتهای چهار اتومبیل باشند که در نقاط مختلف کشور با تندیهای مشخص

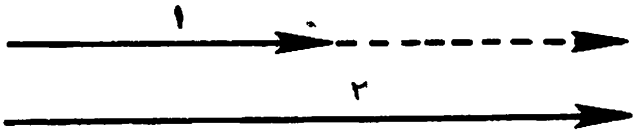


شده و امتدادهای مشخص شده در حرکت هستند.

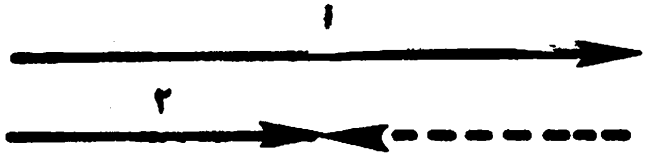


واقعیتهائی را که پیشتر در بارهٔ حرکت مستقیم‌الخط از آنها آگاه شدیم، می‌توان با استفاده از نمایش برداری بیان کرد. از ارابه‌ای صحبت شد که در امتداد خط راستی به شکل یکنواخت حرکت می‌کند و در امتداد حرکت به صورتی هل داده می‌شود که سرعتش افزایش می‌یابد. این کیفیت

را می‌توان با رسم کردن دو بردار نمایش داد که یکی کوتاهتر و نمایندهٔ سرعت پیش از هل دادن است، و دیگری بلندتر و نمایندهٔ سرعت پس از هل دادن. مقصود از بردار نقطه چین واضح است. این بردار نمایندهٔ تغییر سرعت است، که چنانکه می‌دانیم مسبب آن همان هل دادن بوده است.



در حالتی که نیرو درخلاف جهت حرکت وارد شود و سرعت را کم کند، نمودار کم و بیش متفاوت است. در اینجا نیز بردار نقطه‌چین مربوط به تغییر سرعت است، منتها امتداد آن با حالت قبل تفاوت دارد. واضح است



که نه فقط سرعتها، بلکه تغییرات سرعت نیز از جنس بردارند. ولی هر تغییر سرعتی ناشی از عمل یك نیروی خارجی است. بنابراین نیرو را نیز باید با بردار نمایش داد. برای مشخص کردن نیرو تنها کافی نیست بگوئیم که ارابه را با چه شدتی هل داده‌ایم، بلکه باید معین کنیم که این هل دادن درچه امتدادی بوده است. پس نیرو نیز مانند سرعت و تغییر سرعت باید با بردار نمایش داده شود نه با عدد تنها. بنابراین نیروی خارجی نیز برداری است و امتداد آن باید همان امتداد تغییر سرعت باشد. در دوشکل پیشتر، بردارهای نقطه‌چین هم امتداد تغییر سرعت را نشان می‌دهند و هم معرف امتداد نیرو هستند.

ممکن است شخص دیرباور و شکاك بگوید که وارد کردن بردارها را متضمن امتیازی نمی‌بیند، و کاری که شده این است که حقایق معلوم و آشنا را به زبان نامأنوس و مشکلتری بیان کرده‌ایم. در این مرحله براستی مشکل بتوان او را قانع کرد. پس می‌گوئیم که حق با اوست، ولی بعدها خواهیم دید که این زبان عجیب به تعمیمهای مهمی منجر می‌شود که اساس همهٔ آنها مفهوم بردار است.

معمای حرکت

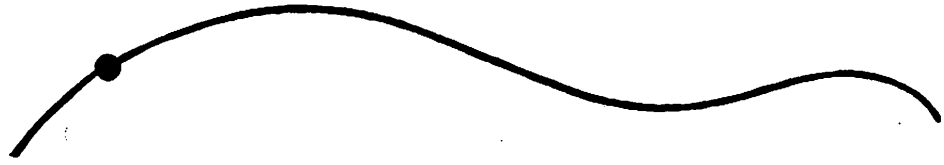
تا موقعی که بحث ما منحصر به حرکت در امتداد خط مستقیم باشد، از فهم حرکتهائی که در طبیعت وجود دارند خیلی فاصله داریم. باید به حرکت در مسیرهای منحنی بپردازیم و قدم بعدی ما تعیین قوانین چنین حرکتهائی است، واین خود کارآسانی نیست. درمورد حرکت مستقیم‌الخط، مفاهیم سرعت و تغییر سرعت و نیرو بسیار مفید واقع شدند، ولی فوراً نمی‌توان دریافت که چگونه می‌توان آنها را در مورد حرکت بر مسیر منحنی بکار برد. ممکن است تصور کرد که این مفاهیم قدیمی برای توصیف حرکت به صورت کلی مناسب نباشد، و ضرورت چنین اقتضا کند که مفاهیم دیگری اختراع شود. آیا باید راه قدیم را آزمود، یا اینکه به جست و جوی راه جدیدتر برآمد؟

تعمیم و کلیت دادن یك مفهوم جریانی است که در علوم مورد استعمال زیاد دارد. روش تعمیم، روش منحصر بفردی نیست، و از راههای مختلف می‌توان به آن پرداخت. ولی همواره یك شرط باید اکیداً رعایت شود، و آن اینکه: هر مفهوم تعمیم یافته، در صورتی که شرایط اصلی که تعمیم از آنجا آغاز شده تحقق پیدا کند، بایستی به همان صورت اولی خود تحویل پیدا کند.

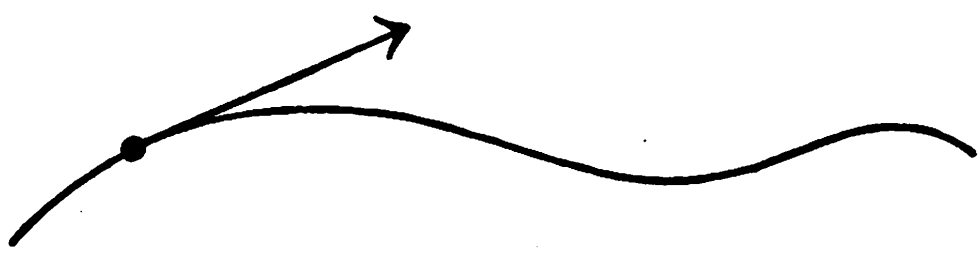
این نکته را به وسیلهٔ مثالی که تاکنون مورد استعمال ما بوده است روشنتر می‌سازیم. می‌توان سعی کرد که مفاهیم قدیمی سرعت و تغییر سرعت و نیرو را به حالتی که حرکت در امتداد مسیر منحنی است تعمیم داد. از لحاظ فنی منحنیها شامل خط مستقیم نیز می‌شوند. خط مستقیم حالت خاص و پیش پا افتاده‌ای از خط منحنی است. بنابراین اگر سرعت و تغییر سرعت و نیرو را در مورد حرکت بر خط منحنی تعریف کنیم، خود به خود بر حرکت در امتداد خط راست قابل اطلاق خواهند بود. اما نتیجه نباید با آنچه که قبلاً بدست آمد متناقض باشد. اگر منحنی خط مستقیم شود، تمام مفاهیم تعمیم‌یافته باید به‌صورت مأنوسی که حرکت مستقیم‌الخط را توصیف می‌کنند درآیند. ولی این شرط به تنهائی کافی نیست که تعمیم را به صورت منحصر به فرد معین سازد. زیرا معمولاً امکانات بسیاری با آن سازگار است. تاریخ علم نشان می‌دهد که ساده‌ترین تعمیمها گاهی قرین

موفقیت بوده‌اند و گاهی نتیجه‌ای نبخشیده‌اند. نخست باید حدسی زد. در حالت مورد بحث می‌توان روش درست تعمیم را حدس زد. مفهومهای جدید بسیار موفق خواهند بود، و ما را در فهم حرکت سنگی که پرتاب می‌شود و نیز در تعلیل حرکت سیارات یاری خواهند کرد.

حال ببینیم اصطلاحات سرعت و تغییر سرعت و نیرو در حالت عمومی حرکت بر مسیر منحنی چه معانیی پیدا می‌کنند؟ از سرعت شروع می‌کنیم. جسم کوچکی بر یك منحنی از راست به چپ درحال حرکت است.



چنین جسم کوچکی را معمولاً «ذره» می‌نامند. نقطه‌ای که در شکل به روی منحنی دیده می‌شود، مکان ذرهٔ متحرك را در لحظه‌ای از زمان نشان می‌دهد. سرعت ذره در این مکان و در این لحظه از زمان چه اندازه است؟ در اینجا نیز برگهٔ گالیله راهی را برای تعریف سرعت نشان می دهد. بار دیگر باید قوهٔ تخیل خود را بکار انداخت و آزمایشی ایده‌آلی را پیش خود طرح ریزی کرد. ذره در امتداد خط منحنی از چپ به راست تحت تأثیر نیروهای خارجی حرکت می‌کند. تصور کنید که در یك لحظهٔ خاص و در محلی که با نقطهٔ روی شکل مشخص شده است، تمام نیروهای خارجی ناگهان از وارد آمدن باز ایستند. مطابق قانون ماند از آن لحظه به بعد حرکت باید یکنواخت شود. در عمل هرگز نمی‌توان جسمی را کاملاً از تأثیر تمام نیروهای خارجی برکنار داشت. تنها می‌توان تصور کرد که: «اگر چنین شود چه اتفاقی خواهد افتاد؟»، و صحت و سقم حدس

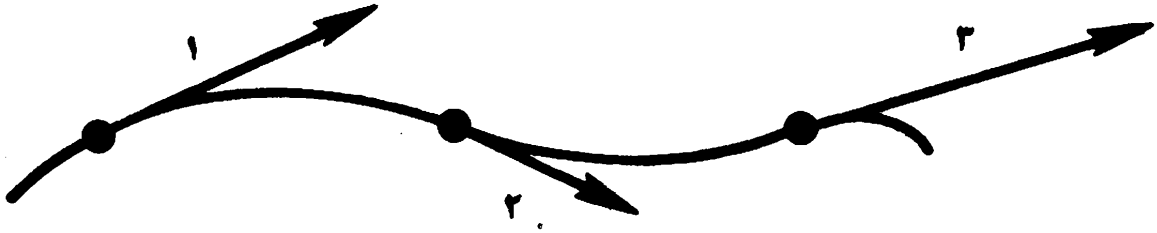


خود را، از روی نتایجی که بدست می‌آید و تطبیق آنها با آزمایش، سنجید.

برداری که در شکل بعدی نشان داده شده، امتداد حدسی حرکت یکنواخت را پس ازنابودی تمام نیروهای خارجی نشان می‌دهد. این امتداد، امتداد خط مماس است. چون به ذرهٔ متحرك از پشت میکرسکپ نگاه شود، فقط تکهٔ کوچکی از منحنی دیده می‌شود که به شکل قطعه خط کوتاهی به نظر می‌رسد. خط مماس امتداد همین قطعه خط کوچك است. بدین ترتیب برداری که رسم شده سرعت را در یك لحظهٔ معین نمایش می‌دهد. بردار سرعت بر روی خط مماس قرار دارد و طول آن نمایندهٔ اندازهٔ سرعت، یا تندی است که مثلاً کیلومترشمار اتومبیلی آن را نشان می‌دهد.

آزمایش خیالی ما که در آن برای یافتن بردار سرعت، حرکت از میان برداشته می‌شود، نباید خیلی جدی و واقعی تلقی گردد. این تجربه فقط به ما کمك می‌کند که بردار سرعت را تشخیص بدهیم، و این امکان را برای ما فراهم می‌آورد که آن را در لحظهٔ معین و در مکان معین تعیین کنیم.

در شکل زیر بردارهای سرعت در سه مکان مختلف ذرهٔ متحرك بر

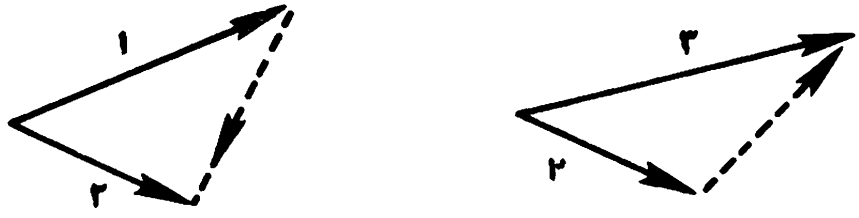


امتداد منحنی دیده می‌شود. در این حالت نه فقط امتداد سرعت، بلکه اندازهٔ آن نیز که با طول بردار مشخص می‌شود در ضمن حرکت تغییر می‌کند.

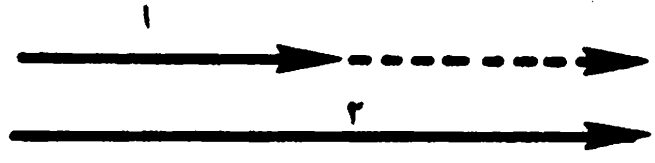
آیا مفهوم جدید سرعت با شرطی که برای همهٔ تعمیمها ذکر کردیم سازگار است یا نه؟ یعنی: اگر منحنی، خطی مستقیم شود آیا این مفهوم به مفهوم مأنوس سرعت تبدیل خواهد شد؟ پر واضح است که چنین خواهد بود: مماس بر هر خط مستقیم خود آن خط است، و بردار سرعت بر خط حرکت قرار دارد، درست مانند مثالهای ارابهٔ متحرك و کره‌های غلتان.

قدم بعدی پرداختن به مسألهٔ تغییر سرعت ذره‌ای است که بر خط

منحنی حرکت می‌کند. این کار را نیز می‌توان به راههای گوناگون انجام داد و ما از میان آنها ساده‌ترین و مناسبترین راه را انتخاب می‌کنیم. شکل قبلی چندین بردار سرعت را که نمایندهٔ حرکت در نقاط مختلف مسیر بودند نشان می‌داد. دو بردار اول را می‌توان طوری رسم کرد که نقطهٔ مبدأ مشترکی داشته باشند، و این عملی است که، چنانکه دیدیم، در مورد



بردارها می‌توان انجام داد. بردار نقطه‌چین را بردار تغییر سرعت نام می دهیم. مبدأ آن منتهای بردار اول و منتهای آن منتهای بردار دوم است. این تعریف از بردارِ تغییر سرعت ممکن‌است در بدو امر مصنوعی و بی‌معنی بنظر برسد. اگر حالت خاصی را در نظر بگیریم که بردارهای (۱) و (۲) بر یك امتداد باشند، مقصود از این تعریف بسی روشنتر خواهد شد، و این خود بازگشت به حالت حرکت در امتداد خط مستقیم است. اگر مبدأ هر دو بردار در یك نقطه باشد، بردار نقطه‌چین باز هم دو انتهای آنها را به یکدیگر وصل می‌کند. شکلی که بدست می‌آید شبیه به شکل صفحهٔ (۲۴) است و مفهوم قبلی به صورت حالت خاصی از مفهوم جدید بدست می‌آید.



باید در نظر داشت که دو بردار (۱) و (۲) را از آن جهت جدا از یکدیگر کشیده‌ایم که شکل مغشوش نشود، و بردارها قابل تشخیص باشند.

اکنون باید آخرین قدم در عمل تعمیم را برداشت، و آن مهمتر از همهٔ حدسهائی است که تاکنون زده‌ایم. باید رابطهٔ میان نیرو و تغییر سرعت بدان‌سان برقرار شود که به وسیلهٔ آن بتوان به برگه‌ای دست یافت که مسألهٔ عمومی و کلی حرکت را قابل فهم سازد.

برگهٔ مربوط به تبیین حرکت مستقیم‌الخط، خیلی ساده بود: نیروی

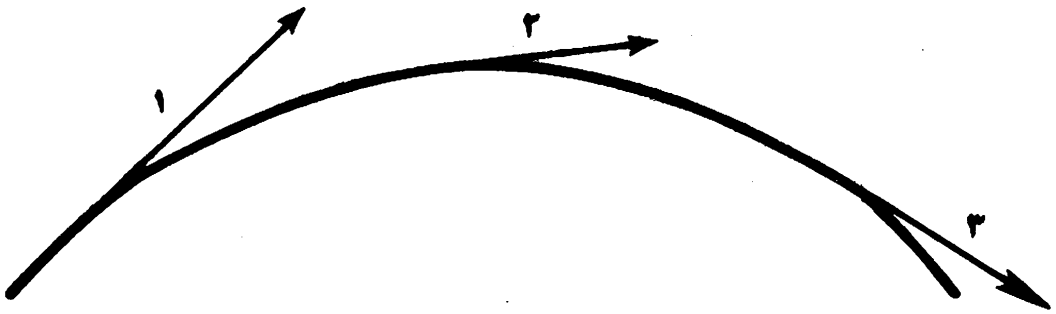
خارجی موجب تغییر سرعت می‌شود، و بردار نیرو همان امتداد بردار تغییر سرعت را دارد. حال برگهٔ مربوط به حرکت منحنی‌الخط کدام است؟ برگه همان برگهٔ سابق است! تنها اختلافی که هست این است که در اینجا معنی وسیعتری از معنی سابق آن دارد. نگاهی به بردارهای نقطه‌چین دو شکل اخیر این نکته را بخوبی آشکار می‌سازد. اگر سرعت در تمام نقاط منحنی معلوم باشد، امتداد نیرو را در هر نقطه بلافاصله می‌توان بدست آورد. برای این کار باید بردارهای سرعت مربوط به دو نقطه‌که به فاصلهٔ زمانی بسیار کوتاهی از یکدیگر هستند، یعنی دو نقطهٔ خیلی نزدیك به هم، رسم شوند. برداری که منتهای بردار اول را به منتهای بردار دوم وصل کند، امتداد نیروی کارگر را نشان می‌دهد. اما در این کار لازم است که دو بردار سرعت را فاصلهٔ زمانی «خیلی کوتاهی» از یکدیگر جدا کرده باشد. تحلیل دقیق مفهوم اصطلاحاتی چون «خیلی نزدیك» و «خیلی کوتاه» کار چندان ساده‌ای نیست. تحقیق در همین مسأله بود که نیوتن و لایب‌نیتس را به اکتشاف حساب دیفرانسیل رهنمون شد.

راهی که به تعمیم برگهٔ گالیله می‌انجامد، راهی ملالت‌آور و پر زحمت است. در اینجا نمی‌توان نشان داد که نتایج این تعمیم تا چه اندازه فراوان و بارور بوده‌اند. با به‌کار بردن آن بسیاری از حقایقی که پیشتر نامرتبط و نامفهوم بودند تفسیر سادهٔ قانع‌کننده‌ای پیدا کردند.

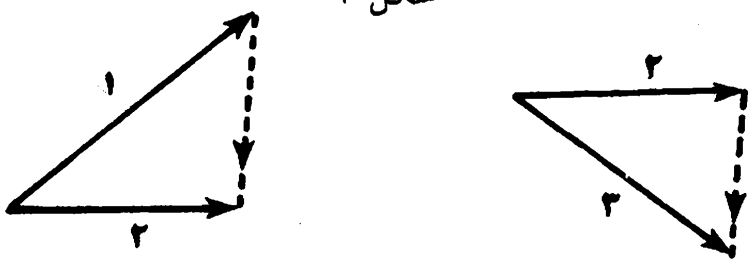
از میان اقسام بی‌اندازه زیاد حرکات، ساده‌ترین آنها را انتخاب می کنیم و قانونی را که تدوین کردیم در توضیح آن بکار می‌بندیم.

گلوله‌ای که از تفنگ بیرون آید، سنگی که به زاویهٔ خاصی پرتاب شود، و جریان آبی که از لوله‌ای جستن کند، همه مسیر متعارف خاصّی را می‌پیمایند که «سهمی» نامیده می‌شود. فرض کنیم که سرعت‌سنجی را به سنگ بسته باشیم. به این ترتیب می‌توان بردار سرعت آن را در هر لحظه رسم کرد. نتیجه را ممکن است به صورت شکل آ صفحهٔ بعد نمایش داد. امتداد نیروی وارد بر سنگ همان امتداد تغییر سرعت است و دیده‌ایم که چگونه می‌توان آن را تعیین کرد. نتیجه که در شکل ب صفحهٔ بعد آمده است نشان می‌دهد که نیرو در امتداد قائم و رو به‌پایین است، یعنی امتداد نیرو همان امتداد نیروئی است که بر سنگ رهاشدهٔ از بالای برج کارگر می

افت. مسیرها کاملاً با یکدیگر متفاوتند، و سرعتها نیز با هم فرق دارند. ولی



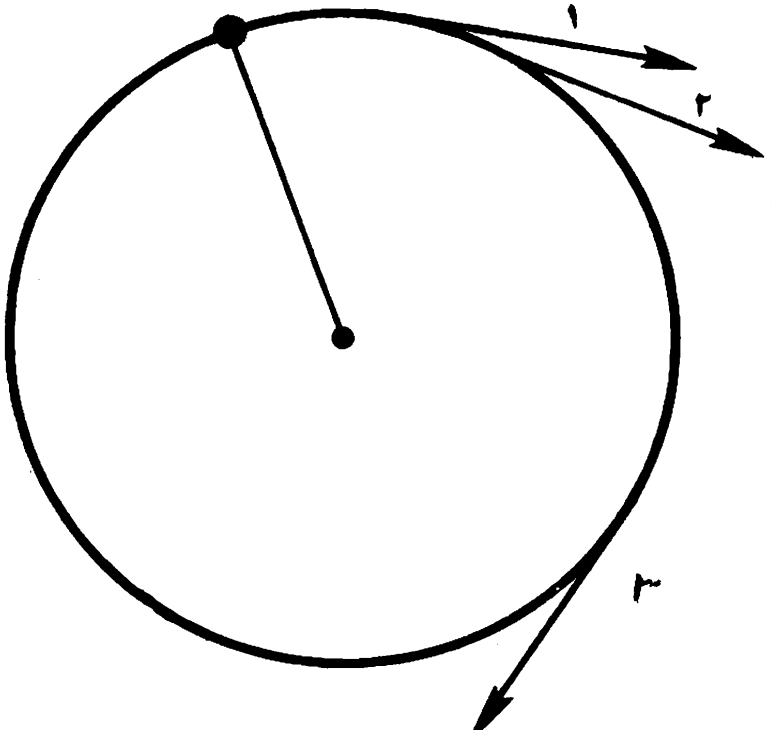
شکل آ



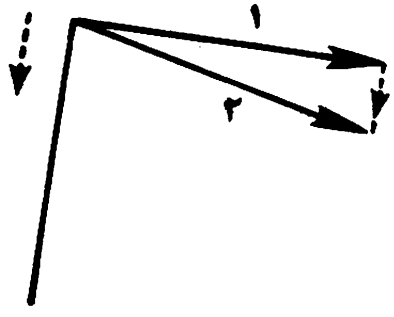
شکل ب

امتداد تغییر سرعت یکی‌است، وآن امتداد متوجه به طرف مرکز زمین‌است.

سنگی که به ریسمانی بسته‌ایم و در صفحه‌ای افقی به آن حرکت دورانی می‌دهیم مسیر مستدیری را می‌پیماید. اگر تندی حرکت یکسان باشد، طول تمام بردارهائی که در شکل زیر نمایش‌دهندهٔ این حرکت



هستند یکی خواهد بود. مع‌ذلك سرعت یکنواخت نخواهد بود، زیرا مسیر خط مستقیم نیست. فقط در حرکت مستقیم‌الخط یکنواخت است که نیروئی عمل نمی‌کند. اما در اینجا نیروئی موجود است، و سرعت، نه از حیث بزرگی، بلکه از حیث امتداد تغییر می‌کند. بنا بر قانون حرکت باید نیروئی این تغییر را بوجود آورد که در این مورد نیروئی است میان سنگ و دستی که ریسمان را نگاه‌داشته است. مسألهٔ دیگری که پیش می‌آید این است که: این نیرو در چه امتدادی اثر می‌کند؟ بار دیگر نمودار برداری جواب سئوال را می‌دهد. بردارهای سرعت مربوط به دو نقطهٔ بسیار نزدیك به یکدیگر را رسم می‌کنیم، و از آنجا تغییر سرعت را بدست می‌آوریم.



دیده می‌شود که بردار اخیر درامتداد ریسمان به طرف مرکز دایره وهمیشه بر بردار سرعت یا خط مماس بر دایره عمود است. به عبارت دیگر، دست به وسیلهٔ ریسمان نیروئی بر سنگ وارد می‌کند.

مثال مهمتری که بسیار مشابه است حرکت انتقالی ماه به دور زمین است. تقریباً می‌توان گفت که این حرکت یك حرکت دورانی یکنواخت است. به همان دلیل که در مثال پیش نیرو متوجه دست بود، در حرکت ماه به دور زمین نیز نیرو به طرف زمین متوجه است. میان ماه و زمین ریسمانی وجود ندارد، ولی می‌توان میان مرکزهای این دو جسم خطی را تصور کرد. نیرو در امتداد این خط قرار دارد ومتوجه به مرکز زمین است، درست مانند نیروئی که بر سنگ پرتاب‌شده به هوا یا رهاشده از بالای برج وارد می‌آید.

تمام آنچه دربارهٔ حرکت گفتیم، در یك جمله خلاصه می‌شود: «نیرو و تغییر سرعت بردارهائی هستند که امتداد واحدی دارند.» این اولین برگهٔ مسألهٔ حرکت است، ولی مسلماً بتنهائی برای توضیح کامل همهٔ

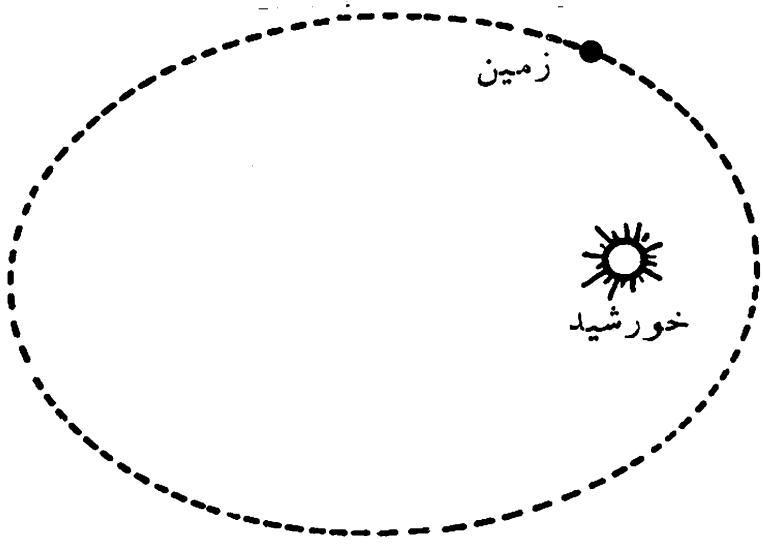
حرکتهایی که مشاهده می‌کنیم کافی نیست. گذار از طرز فکر ارسطو به طرز فکر گالیله مهمترین سنگ شالودهٔ بنای دانش را تشکیل می‌دهد. به محض آنکه این سد شکافته شد دورنمای تحولات بعدی ظاهر گشت. توجه ما در اینجا به جانب نخستین مراحل این تحولات است و می‌خواهیم برگه‌های اولیه را دنبال کنیم و نشان دهیم که چگونه مفاهیم جدید درضمن مبارزه‌ای سهمگین با افکار قدیمی زاده شدند. ما تنها به کارهائی که پیشتازان دانش انجام داده‌اند و راههای تازه و غیرمنتظری را برای پیشرفت بازکرده‌اند، توجه داریم. در تفکر علمی به ماجراهائی علاقه داریم که تصویر دائم‌التغییری ازجهان را می‌آفرینند. قدمهای اولی و اساسی همیشه سرشتی انقلابی دارند. تخیل علمی همیشه مفاهیم قدیمی‌را تنگ ومحدود می‌شمرد، و معانی جدیدی را جانشین آنها می‌کند. پیشرفت ما در راهی که آغاز شده بیشتر ماهیتی تکاملی دارد تا اینکه به نقطهٔ تحول بعدی برسیم که باید میدان تازه‌تری تسخیر شود. ولی برای اینکه بدانیم چه دلایل و چه اشکالاتی سبب می‌شوندکه تغییری در مفاهیم اساسی پدید آید، تنها آشنائی با برگه‌های نخستین کافی نیست، بلکه باید دانست که از آنها چه نتایجی می‌توان بدست آورد.

یکی از ویژگیهای بسیار مهم فیزیک جدید آن است که نتایج حاصل از برگه‌های اصلی تنها کیفی نیستند، بلکه کمّی نیز هستند. بار دیگر مثال سنگ رها شدهٔ از بالای برج را در نظر می‌گیریم. دیدیم که این سنگ هرچه پایینتر می‌آید سرعتش فزونتر می‌گردد؛ می‌خواهیم اطلاع بیشتری پیدا کنیم؛ این تغییر سرعت چه اندازه‌ای دارد و مکان سنگ در هر لحظهٔ معین کجاست و سرعت آن چیست؟ قصد آن است که بتوان حوادث را پیش‌بینی کرد و از راه آزمایش دید که آیا مشاهدهٔ پیش‌بینیها و فرضهای اولی ما را تأیید می‌کند.

برای به دست آوردن نتایج باید از زبان ریاضیات استفاده کرد. بیشتر اندیشه‌های اساسی علم خیلی ساده هستند، و قاعدتاً می‌توان آنها را به زبانی قابل فهم همگان بیان کرد. دنبالهٔ این اندیشه را گرفتن احتیاج به آشنائی با فن بسیار ظریف پژوهش دارد. برای استخراج نتایجی که با تجربه مورد مقایسه قرارگیرد، ریاضیات به عنوان ابزار استدلال، ضروری

است. تا موقعی که سروکارمان با اندیشه‌های بنیادی فیزیك است، می‌توان نسبت به زبان ریاضیات بی‌نیازی نشان داد. چون در این صفحات کار ما بر این روال است، گهگاه ناچاریم بعضی از نتایجی را که برای فهم برگه‌های اصلی تحولات بعدی لازم است، فقط ذکر کنیم و به اثبات آنها بپردازیم. جریمه‌ای که برای کنار نهادن زبان ریاضی می‌پردازیم، فقط فقدان دقت و گهگاه ضرورت اشاره به نتایج است بی‌آنکه نشان دهیم چگونه بدست آمده‌اند.

یکی از نمونه‌های مهم حرکت، حرکت زمین به دور خورشید است و معلوم شده است که مسیر این حرکت، منحنی بسته‌ای است که بیضی نام دارد. رسم نمودار برداری تغییر سرعت نشان می‌دهد که نیروی کارگر



بر زمین در امتداد خورشید است. این اندازه اطلاع کافی بنظر نمی‌رسد. ما دوست داریم بتوانیم مکان زمین و سیارات دیگر را در هر لحظه از زمان پیش‌بینی کنیم؛ می‌خواهیم تاریخ و مدت کسوف آیندهٔ خورشید یا رویدادهای نجومی دیگر را از پیش بدانیم. به همهٔ این چیزها دست یافتن ممکن است، ولی نه تنها با آن برگه‌ای که تا کنون کشف کرده‌ایم. زیرا لازم است که نه فقط امتداد نیرو را بدانیم، بلکه قدر مطلق، یعنی اندازهٔ آن را هم باید بشناسیم. کسی که در این مورد حدس درست را زد، نیوتن بود. بنا بر قانون گرانش او، نیروی جاذبهٔ میان دو جسم بستگی ساده‌ای به فاصلهٔ آنها از یکدیگر دارد. فاصله که بیشتر شود نیروی جاذبه کمتر می‌گردد. به عنوان مثال اگر فاصله دو برابر شود، این نیرو ۴ = ۲ × ۲

برابر کمتر می‌شود، و اگر فاصله سه برابر شود، ۹ = ۳ × ۳ دفعه کمتر می گردد.

پس می‌بینیم که در مورد نیروی گرانش بستگی نیرو به فاصلهٔ میان اجسام متحرك به طریق بسیار ساده‌ای بیان شده است. در موارد دیگر که انواع نیروهای دیگر چون الکتریکی و مغناطیسی و نظایر آن در کارند نیز طرز عمل بر همین گونه است. سعی ما در آن است که رابطهٔ ساده‌ای را برای نیرو بکار بریم. این رابطه در صورتی درست است که نتایج حاصل از آن را آزمایش تأیید کند.

ولی این مقدار اطلاع از نیروی گرانش بتنهائی برای توضیح حرکت سیارات کافی نیست. قبلاً دیدیم که بردارهای نمایندهٔ نیرو و تغییر سرعت در فواصل زمانی خیلی کوچك، دارای امتداد واحدی هستند، ولی باید یك قدم دیگر به دنبال نیوتن برداشت. و رابطهٔ ساده‌ای را میان طول این دو بردار فرض کرد. اگر تمام شرایط یکسان باشد، یعنی اگر جسم متحرك همان باشد که بود و تغییر سرعت در فاصله‌های زمانی مساوی مورد نظر باشد، آنگاه بنا به قانون نیوتن تغییر سرعت متناسب با نیرو خواهد بود.

به این ترتیب دو حدس مکمل هم لازم است تا بتوان نتایجی کمی در مورد حرکت سیارات بدست آورد: یکی از آن دو سرشتی عام دارد، و ارتباط میان نیرو و تغییر سرعت را بیان می‌کند؛ دیگری حالت خاص دارد و رابطهٔ دقیق میان نیروی خاص مؤثر بین دو جسم را با فاصلهٔ بین آن دو شرح می‌دهد. اولی همان قانون عمومی حرکت نیوتن است، و دومی قانون گرانش اوست. این دو قانون با هم حرکت را تعیین می‌کنند. این نکته را با استدلال ظاهراً خام زیر می‌توان روشنتر ساخت. فرض کنیم که در لحظهٔ معین مکان و سرعت سیاره‌ای را بتوان معین کرد، و نیز فرض کنیم که نیروی مؤثر معلوم است. از روی قوانین نیوتن تغییر سرعت در یك فاصلهٔ زمانی کوتاه را می‌توان بدست آورد. چون سرعت اولیه و تغییر آن را می‌دانیم، می‌توانیم مکان و سرعت سیاره را در آخر این فاصلهٔ زمانی حساب کنیم. با تکرار این عمل، بدون احتیاج به معلوماتی که از راه مشاهده بدست آید، می‌توان مسیر حرکت سیاره را کاملاً بدست آورد.

اساس راهی که به وسیلهٔ آن مکانیك مسیر جسم متحرکی را پیش‌بینی می کند همین است، اما این روش به هیچ روی عملی نیست. در عمل چنین طرز کار گام به گامی فوق‌العاده خسته کننده و غیر دقیق است. خوشبختانه این طرز عمل هیچ گاه ضرورت پیدا نمی‌کند. ریاضیات راه کوتاهی در اختیار قرار می‌دهد، و با مرکبی کمتر از آنچه برای نوشتن یك جملهٔ لازم است، توصیف دقیق حرکت را ممکن می‌سازد. نتایجی را که از این راه بدست می‌آید می‌توان از راه مشاهده ثابت یا رد کرد.

در حرکت سنگی که در هوا سقوط می‌کند، و در حرکت ماه بر روی مدارش، یك نوع نیروی خارجی کار می‌کند، که همان جاذبهٔ زمین بر اجسام مادی است. نیوتن دریافت که حرکت اجسام ساقط شونده، حرکت ماه و حرکت سیارات همگی تجلیات خاص یك نیروی گرانش عام هستند که میان هر دو جسم عمل می‌کند. در حالتهای ساده حرکت را می‌توان به کمك ریاضیات شرح داد و پیش‌بینی کرد. در موارد نامأنوس و فوق‌العاده پیچیده که اثر اجسام بسیاری بر یکدیگر در کار است، بیان ریاضی چندان ساده نیست، ولی اصول بنیادی همانهاست که بود.

نتایجی که از دنبال کردن برگه‌های نخستین بدست آوردیم، اینك در حرکت سنگی که پرتاب می‌شود، در حرکت انتقالی ماه و در حرکت زمین و سیارات صورت تحقق پیدا کرده‌اند.

در واقع مجموعهٔ حدسها و تخمینهای ماست که باید به وسیلهٔ آزمایش تأیید شود یا رد گردد. هیچ یك از فرضها را نمی‌توان مجزا کرد و جداگانه آزمود. در مورد حرکت سیارات به دور خورشید، معلوم شده است که دستگاه مکانیك خیلی خوب کار می‌کند، مع‌ذلك می‌توان تصور کرد که دستگاه دیگری که بر شالودهٔ فرضیات متفاوتی باشد نیز به همان خوبی کار کند.

مفاهیم فیزیکی آفریده‌های آزاد فکر بشر هستند، و ظاهراً دنیای خارج آنها را به‌طور منحصر به فرد تعیین نمی‌کند. در تلاشی که برای فهم واقعیت داریم، به کسی می‌مانیم که می‌کوشد به طرز کار ساعتی بسته پی ببرد. او صفحهٔ ساعت و عقربه‌های متحرك آن را می‌بیند و صدای آن را هم می‌شنود، ولی نمی‌تواند آن را باز کند. اگر باهوش باشد ممکن است

سازوکاری تصور کند که آنچه را مشاهده می‌کند توضیح دهد. اما هرگز نمی‌تواند یقین حاصل کند که سازوکار تصوری او تنها سازوکاری است که مشاهداتش را توضیح می‌دهد. او هرگز نمی‌تواند تصور خود را با دستگاه حقیقی مورد مقایسه قرار دهد، و حتی بر خیالش هم نمی‌گذرد که در معنی چنین مقایسه یا امکان آن اندیشه کند. ولی او یقیناً معتقد است که هر اندازه معرفتش بیشتر شود، تصویری که از واقعیت می‌سازد ساده‌تر می‌گردد و این تصویر حوزهٔ وسیعتری از تأثرات حسی او را تبیین می‌کند. او به این نکته نیز ممکن است معتقد شود که حد اعلائی از معرفت وجود دارد که عقل انسان بتدریج به آن نزدیکتر می‌شود. او حق دارد چنین حد کمالی را حقیقت عینی نام دهد.

برگهٔ دیگری باقی است

کسی که تازه به تحصیل مکانیك مشغول می‌شود، این طور احساس می‌کند که هرچه در این شاخهٔ علم وجود دارد ساده و بنیادی و جاودانی است. او بسختی ممکن است به وجود برگهٔ مهمی گمان برد که در ظرف مدت سیصد سال بر خاطر کسی خطور نکرد. این برگهٔ غفلت شده با یکی از مفهومهای بنیادی مکانیك به نام جرم ارتباط دارد.

بار دیگر به آزمایش خیالی سادهٔ ارابه بر روی جادهٔ بسیار هموار باز می‌گردیم. اگر ارابه در ابتدا ساکن باشد سپس نیروئی بر آن وارد شود، پس از قطع نیرو با سرعت معین به شکل یکنواخت حرکت می‌کند. اگر فرض شود که وارد آوردن نیرو را بتوان هرچند نوبت که بخواهیم تکرار کرد و سازوکار هل دادن همیشه به یك شکل باشد و هردفعه نیروی واحدی وارد آید، هرچند مرتبه که آزمایش تکرار شود همیشه سرعت نهائی یکی خواهد بود. حال ببینیم اگر آزمایش تغییر پیدا کند، و به جای ارابهٔ خالی، ارابهٔ پر از بار قرار داده شود چه اتفاقی خواهد افتاد؟ سرعت زمانی ارابهٔ پر از بار کمتر از سرعت ارابهٔ خالی می‌شود. نتیجه آنکه: اگر نیروی واحدی بر دو جسم ساکن متفاوت وارد شود، سرعتهائی که به آن اجسام می‌دهد یکسان نخواهد بود. یعنی سرعت به جرم جسم بستگی دارد، و هرچه جرم بزرگتر باشد سرعت کمتر است.

بنابراین، دست‌کم به صورت نظری می‌دانیم که چگونه جرم یك جسم، یا به تعبیر صحیحتر نسبت میان دو جرم، را می‌توان بدست آورد. دو نیروی مشابه داریم که بر دو جسم ساکن وارد می‌آیند. اگر سرعت جسم اولی سه برابر جسم دیگر شود، نتیجه می‌گیریم که جرم جسم اولی سه بار کوچکتر از جرم جسم دوم است. البته این ترتیب راه عملی اندازه‌گیری نسبت دو جرم نیست. مع‌ذلك می‌توان تصور کرد که بدین وسیله یا وسیلهٔ مشابه دیگری که مبتنی بر قانون ماند باشد می‌شود این کار را انجام داد.

مگر عملاً راه اندازه‌گیری جرم چیست؟ البته به آن طریقی نیست که شرح دادیم. هرکس جواب درست این سؤال را می‌داند. جرم را با ترازو اندازه می‌گیرند.

حال در این دو طریق تعیین جرم به تفصیل بحث می‌کنیم.

آزمایش اول کاری با گرانش و جاذبهٔ زمین نداشت. ارابه، پس از وارد آمدن نیرو، بر سطح افقی کاملاً صافی مشغول حرکت می‌شود. نیروی گرانش که ارابه را بر روی سطح نگه می‌دارد تغییری پیدا نمی‌کند، و نقشی در تعیین جرم ندارد. توزین با ترازو کاملاً فرق می‌کند. اگر زمین اجسام را جذب نمی‌کرد و اگر نیروی گرانش وجود نمی‌داشت ترازو به هیچ کار نمی‌آمد. اختلاف بین دو طریقهٔ تعیین جرم در آن است که یکی کاری با نیروی گرانش ندارد، در صورتی که طریقهٔ دوم اساساً بر پایهٔ وجود چنین نیروئی است.

حالا می‌پرسیم: اگر نسبت دو جرم را از دو راهی که در بالا شرح دادیم پیدا کنیم، آیا به یك نتیجه می‌رسیم؟ پاسخی که آزمایش به این پرسش می‌دهد بسیار روشن است. نتیجه‌ها دقیقاً یکی است. این نتیجه با پیش‌بینی بدست نمی‌آید، و بر مشاهده مبتنی است نه بر استدلال. برای سهولت بیان، جرمی را که از راه اول بدست می‌آید جرم ماندی و جرمی را که از راه دوم بدست می‌آید جرم گرانشی می‌خوانیم. در دنیای ما چنین است که این دوجرم یا یکدیگر برابرند، ولی می‌توان حالتی را هم تصور کرد که اصلاً چنین نباشد. سؤال دیگری بلافاصله پیش می‌آید: آیا تساوی این دو جرم نتیجهٔ تصادف محض است، یا معلول علّتی است؟ جوابی که

فیزیك کلاسیك به این پرسش می‌دهد این است که: برابر بودن دوجرم ماندی و گرانشی صرفاً امری اتفاقی است، و هیچ اهمیتی برای آن نباید قائل شد. پاسخ فیزیك جدید کاملاً مخالف این نظر است؛ تساوی این دو جرم مسأله‌ای بنیادی است و برگهٔ اساسی و جدیدی بشمار می‌رود که به درکی عمیقتر منجر می‌گردد. در حقیقت این یکی از مهمترین برگه‌هائی است که نظریهٔ نسبیت عمومی از آن نشأت گرفته است.

داستان اسرارآمیزی که حوادث عجیب و غیر مأنوس را نتیجهٔ اتفاق می‌شمرد، داستانی بی‌مغز جلوه می‌کند. در صورتی که داستان طرحی منطقی را دنبال کند، رضایت خاطر خواننده بیشتر جلب می‌شود. همین طور نظریه‌ای که برای تساوی دو جرم ماندی و گرانشی توضیحی عرضه می‌دارد برتر از نظریه‌ای است که این تساوی را زائیدهٔ اتفاق می داند، البته به این شرط که هر دو نظریه با واقعیات مشهود به یك اندازه سازگار باشند.

چون تساوی دو جرم ماندی و گرانشی پایهٔ تأسیس نظریهٔ نسبیت می‌باشد، حق این است که در اینجا بحث بیشتری در این باره بشود. چه آزمایشهائی به شکل قانع کننده برابری این دو جرم را ثابت کرده‌اند؟ جواب آن است که راه اثبات تجربی این مسأله آزمایش قدیمی گالیله است که در آن جرمهای مختلف را از بالای برجی رها کرد. او مشاهده کرد که زمان لازم برای سقوط همهٔ آنها یکی است و حرکت جسم ساقط شونده به جرم آن بستگی ندارد. ارتباط دادن این نتیجهٔ تجربی ساده و در عین حال بسیار مهم با مسألهٔ برابری دو جرم، محتاج استدلال ظریفتری است.

جسم ساکن در مقابل نیروی خارجی تسلیم می‌شود، به حرکت در می‌آید، سرعتی پیدا می‌کند. حالت تسلیم جسم در مقابل نیرو برحسب آنکه جرم ماندی آن چه اندازه باشد متفاوت است، و هرچه این جرم بزرگتر باشد مقاومت در برابر حرکت بیشتر است. بی‌آنکه تظاهر به دقیق بودن کنیم، می‌توانیم بگوئیم که: آمادگی جسم در مقابل ندای نیروی خارجی به جرم ماندی آن بستگی دارد. اگر حقیقت داشته باشد که زمین همهٔ اجسام را با یك نیرو به خود جذب می‌کند، آن وقت اجسامی که جرم

ماندی بیشتری دارند سقوطشان باید کندتر باشد؛ ولی چنین نیست. همهٔ اجسام به یك نهج ساقط می‌شوند. و از اینجا نتیجه می‌شود که زمین اجرام مختلف را با نیروهای متفاوت به خود می‌کشد. زمین سنگ را به واسطهٔ نیروی گرانش جذب می‌کند و اطلاعی از جرم ماندی آن ندارد. نیروی «دعوت کننده» زمین به جرم گرانشی بستگی دارد و «پاسخ» این دعوت که حرکت سنگ است تابع جرم ماندی جسم می‌باشد. چون حرکت «پاسخی» همیشه بر یك حال است یعنی همهٔ اجسامی که از یك ارتفاع رها می‌شوند به یك نحو سقوط می‌کنند، باید نتیجه گرفت که جرم گرانشی و جرم ماندی با هم برابرند.

فیزیکدانان همین نتیجه را به شکل کتابی‌تری بیان می‌کنند: شتاب جسم ساقط شونده متناسب با جرم گرانشی زیاد می‌شود و متناسب با جرم ماندی کاهش می‌پذیرد. چون همهٔ اجسام ساقط شونده دارای یك شتاب هستند، این دو جرم باید با یکدیگر برابر باشند.

در داستان اسرارآمیز بزرگ ما مسأله‌ای وجود ندارد که کاملاً حل و برای همیشه مستقر شده باشد. پس از سیصد سال ناچار شدیم که به مسألهٔ اصلی حرکت بازگردیم و در طرز تحقیق تجدید نظر کنیم، برگه‌های پنهان مانده را پیدا کنیم و از این راه به تصویر دیگری از جهان حول و حوش خود دست یابیم.

آیا گرما جوهری مادی است؟

پیگیری برگه‌ای جدید را شروع می‌کنیم، برگه‌ای که منشأ آن در حوزهٔ پدیده‌های گرمائی است. ولی نمی‌توان علم را به شاخه‌های مجزا از هم و نامربوط به یکدیگر تقسیم کرد. بزودی خواهیم دید که مفاهیم جدیدی که در اینجا وارد می‌شود با مفاهیمی که می‌شناسیم و با معانی دیگری نیز که بعداً خواهیم شناخت پیوستگی نزدیك دارند. طرز فکری را که در یك شاخهٔ علم بسط پیدا می‌کند، غالباً می‌توان در توضیح حوادثی به کار بست که سرشت کاملاً متفاوتی دارند. در این جریان معمولاً معانی اصلی به گونه‌ای تغییر می‌کنند که هم وسیلهٔ فهم پدیده‌هائی شوند که ریشهٔ پیدایش آن معانی بوده‌اند، و هم وسیلهٔ درك پدیده‌های جدید گردند.

دو مفهوم بنیادی توصیف پدیده‌های گرمائی عبارتند از دما و گرما در تاریخ علم زمان بسیار درازی طول کشید تا این دو مفهوم از یکدیگر تمیز داده شوند، اما همین که این تمایز صورت گرفت پیشرفت سریعی در این رشته نمودار شد. با اینکه اکنون همه با این دو مفهوم آشنائی دارند، ولی ما نیز به دقت آنها را بررسی می‌کنیم و بر اختلاف میان آنها تأکید می‌ورزیم.

ما به وسیلهٔ حس لامسهٔ خود به درستی جسم سرد را از جسم گرم تشخیص می‌دهیم. ولی این قضاوتی کیفی است و برای توضیح کمّی پدیده کافی نیست؛ گذشته از آن در بعضی اوقات مبهم نیز هست. آزمایشی معروف این نکته را روشن می‌کند: سه ظرف داریم که در یکی آب سرد و در دیگری آب نیم‌گرم و در سومی آب گرم وجود دارد. چون یك دست را در آب سرد و دست دیگر را در آب گرم داخل کنیم، دست اول خبر سرما را می‌رساند و دست دیگر از گرمی آب خبر می‌دهد، حال اگر هر دو دست را داخل ظرف آب نیم گرم کنیم، دو پیغام متناقض به ما می‌رسانند، یعنی دستی که در آب سرد بود احساس گرما می‌کند و دست دیگر احساس سرما. به همین جهت است که اگر یك نفر اسکیمو و یك نفر ساکن نواحی استوائی در یك روز بهاری یکدیگر را در نیویورك ملاقات کنند، نسبت به سردی و گرمی هوا دو عقیدهٔ مختلف ابراز می‌کنند. به این مسائل و نظایر آن با استفادهٔ از دماسنج خاتمه می‌دهیم، و آن اسبابی است که شکل ابتدائی و سادهٔ آن را گالیله، همان مرد بزرگی که بارها نام او را بردیم، اختراع کرد. اساس استعمال دماسنج چند فرض فیزیکی آشکار است. ما با نقل عبارتهائی از بلك[1]، که حدود صدو پنجاه سال پیش از این نوشته شده است و شخص او در رفع اشکالاتی که به این دو مفهوم مربوط می شود زحمات بسیار کشیده است، این فرضها را یادآور می‌شویم:

ما با استعمال دماسنج دریافته‌ایم که اگر هزارنوع ماده یا بیشتر، ازقبیل فلزات و سنگها و نمکها و چوبها و پرها و پشم و آب و انواع مایعات

1. Black

دیگر را که **گرماهای** متفاوت دارند انتخاب کنیم و همه را با هم در یك اتاق بدون بخاری که آفتاب هم به درون آن نتابد جای دهیم، در مدت چند ساعت یا یك روز گرما از جسمهای گرمتر به جسمهای سردتر انتقال پیدا می‌کند، و چون در آخر این مدت دماسنجی را متوالیاً پهلوی هر یك از این مواد قرار دهیم، در همه یك درجه را نشان می دهد.

کلمهٔ گرماها که با حروف کج چاپ شده، همان‌است‌که در اصطلاح امروز، دماها نامیده می‌شود.

پزشکی که درجهٔ تب (دماسنج)[۲] را از دهان مریض بیرون می‌آورد، ممکن است چنین استدلال کند: «دماسنج دمای خود را به وسیلهٔ طول ستون جیوه نشان می‌دهد. فرض ما این است که طول ستون جیوه به تناسب دما زیاد می‌شود. از طرف دیگر چون این دماسنج مدت چند دقیقه در تماس با بیمار من بوده است، دماسنج و بیمار هر دو دمای واحدی پیدا کرده‌اند.» بنابراین نتیجه می‌گیریم که دمای بدن بیمار همان است که دماسنج نشان می‌دهد. پزشك البته عمل خود را به شکل مکانیکی انجام می‌دهد؛ ولی بی‌آنکه بیندیشد، اصول فیزیکی را بکار می‌بندد.

آیا دماسنج همان اندازه گرما دارد که بدن شخص بیمار دارد؟ البته چنین نیست. اگر فرض کنیم که چون دو جسم دارای یك دما هستند یك مقدار هم گرما دارند، همان گونه که بلك نوشته است:

تصمیم شتاب‌آمیزی گرفته‌ایم. با این کار مقدار گرمای اجسام مختلف را با شدت گرمی آنها در آمیخته‌ایم، در صورتی که آشکار است که این دو چیز با یکدیگر فرق دارند، و وقتی موضوع توزیع حرارت مطرح است باید میان این دو تمیز گذاشت.

آزمایش بسیار ساده‌ای فهم این اختلاف را ممکن می‌سازد؛ مدتی زمان لازم است تا دمای یك رطل آب که روی شعلهٔ چراغ گاز گذاشته شده است، از دمای اتاق به نقطهٔ جوش برسد؛ گرم کردن دوازده رطل

آب در همان اتاق و با همان ظرف و همان شعله، مدت درازتری وقت لازم دارد. این واقعیت را چنین تعبیر می‌کنیم که در دفعهٔ دوم مقدار بیشتری از «چیزی» لازم است و ما همین «چیز» را گرما می‌نامیم.

به مفهوم مهم دیگر، گرمای ویژه، از راه آزمایش زیر پی می‌بریم: در یك ظرف رطلی آب و در ظرف مشابه آن رطلی جیوه می‌ریزیم. هر دو را به یك طریق گرم می‌کنیم، جیوه خیلی زودتر از آب داغ می‌شود، و از اینجا معلوم می‌گردد که جیوه برای این که دمایش یك درجه بالا رود گرمائی کمتر از آب لازم دارد. به طور کلی برای اینکه دمای جرمهای مساوی از اجسام مختلف، مانند آب و جیوه و آهن و مس و چوب و جز آنها، یك درجه تغییر کند و مثلاً از ۴۰ درجهٔ فارنهایت به ۴۱ درجه برسد، مقادیر متفاوت «گرما» لازم است. می‌گوئیم هر جسم ظرفیت گرمائی یا گرمای ویژهٔ خاص خود را دارد.

اکنون که به مفهوم گرما پی بردیم، می‌توان به دقت بیشتر در ماهیت آن تحقیق کرد. دو جسم داریم که یکی گرم و دیگری سرد ـ یا به تعبیر صحیحتر یکی دمایش بیش از دیگری است. این دو جسم را در مجاورت یکدیگر قرار می‌دهیم و آنها را از تأثیر عوامل خارجی محفوظ می‌داریم. می‌دانیم که بالاخره دمای هر دو یکی می‌شود. این عمل چگونه اتفاق می افتد؟ میان لحظه‌ای که دو جسم را در مجاورت یکدیگر گذارده‌ایم، و لحظه‌ای که دمایشان یکی شده، چه روی داده است؟ منظرهٔ «جریان» گرما از یك جسم به جسم دیگر یادآور جریان آب از سطح بلندتر به سطح پست‌تر است. این طرز تصویر، گرچه خیلی ابتدائی است، با بسیاری از حقایق مطابقت دارد و منجر به مقایسهٔ زیر می‌شود:

آب ـ گرما
سطح بلندتر ـ دمای بیشتر
سطح پست‌تر ـ دمای کمتر

جریان تا موقعی ادامه پیدا می‌کند که دو سطح یعنی دو دما برابر شوند. این تصور ساده نگرانه را می‌توان به کمك ملاحظات کمّی، مفیدتر

کرد. چون جرمهای معینی از آب و الکل را، که هرکدام در دمای معینی باشند، با یکدیگر مخلوط کنیم، با دانستن گرمای ویژهٔ این دو جسم می توانیم دمای نهائی مخلوط را بدست آوریم. بر عکس از روی دمای مخلوط، با اندکی محاسبهٔ جبری، می‌توان نسبت گرماهای ویژه را پیدا کرد.

دیده می‌شود که مفهوم گرما شباهتی به مفهومهای فیزیکی دیگر دارد. مطابق نظر ما، گرما جوهری مادی همچون جرم در مکانیك است. مقدار آن درست مانند مقدار پولی که خرج شود یا در غلکی ذخیره شود ممکن است تغییر کند یا ثابت بماند. پول درون غلك تا موقعی که در آن بسته است تغییر نمی‌کند. مقدار جرم و مقدار گرمای یك جسم مجزا نیز چنین است. بطری ترموس کامل هم شبیه غلك است. بعلاوه همان طور که جرم جسم مجزا شدهٔ از اجسام دیگر حتی در صورتی که فعل و انفعالات شیمیائی در آن انجام گیرد تغییر نمی‌کند، مقدار حرارت نیز، حتی اگر از جسمی به جسم دیگر جاری شود، کم و زیاد نمی‌شود. حتی در صورتی که گرما صرف بالا بردن دما نشود بلکه فرضاً یخ را آب یا آب را بخار کند، بازهم در تصور ما نسبت به این که گرما یك جوهر مادی است خللی وارد نمی‌شود، چه می‌توان با یخ بستن آب یا مایع کردن بخار مجدداً آن را بدست آورد. اصطلاحات قدیمی گرمای نهان گذار و گرمای نهان تبخیر خود نشان می‌دهند که این مفاهیم از تصویر گرما به صورت یك جوهر مادی اخذ شده‌اند. گرمای نهان گرمائی است که به طور موقتی پنهان شده است، درست مثل پولی که در غلکی ریخته شود، ولی هرکس کلید قفل غلك را داشته باشد، هر آن می‌تواند از آن پول استفاده کند.

ولی این نکته مسلم است که گرما جوهری مادی مانند جرم نیست. جرم را می‌توان با ترازو اندازه گرفت؛ گرما را چطور؟ آیا قطعهٔ آهنی که بر اثر گرما گداخته شده باشد سنگینتر از موقعی است که سرد است؟ آزمایش نشان می‌دهد که چنین نیست. اگر گرما جوهری مادی باشد، جوهری بی‌وزن است. «جوهر مادی گرما» را معمولاً «کالریك» می‌نامیدند، و با شناختن آن با اولین فرد خانوادهٔ جوهرهای مادی بی‌وزن آشنا می شویم. بعدها سرگذشت این خانواده و ظهور و انقراض آن را دنبال

خواهیم کرد. اکنون همین اشاره به تولد یکی از افراد این خانواده را کافی می‌دانیم.

غرض از هر نظریهٔ فیزیکی آن است که حوزهٔ هرچه وسیعتری از پدیده‌ها را تعلیل کند؛ و تا موقعی که حوادث را توضیح می‌کند، قابل قبول است. چنانکه دیدیم نظریهٔ مادی بودن گرما بسیاری از پدیده‌های گرمائی را توضیح می‌کند، ولی مدتی بعد آشکار شد که این نیز برگه‌ای دروغین است و گرما را نمی‌توان جوهری مادی، ولو بی‌وزن، شمرد. اگر به آزمایشهای ساده‌ای که آغاز پیدایش تمدن را مشخص می‌کنند توجه کنیم، این نکته روشن می‌شود.

تصور ما از جوهر مادی چیزی است که نه ایجاد و نه نابود می‌شود. با وجود این انسانهای اولیه به کمك اصطکاك توانستند گرمای کافی برای آتش‌زدن چوب ایجاد کنند. نمونه‌های تولید گرما به وسیلهٔ اصطکاك به اندازه‌ای فراوان و معروف است که احتیاجی به برشمردن آنها نیست. در همهٔ این موارد مقداری گرما ایجاد می‌شود، و این واقعیتی است که با نظریهٔ جوهر مادی سازگار در نمی‌آید. درست است که طرفداران این نظریه می‌توانستند دلایلی برصحت دعوی خود جعل کنند. استدلال آنان چیزی از این قبیل بود: «نظریهٔ جوهر مادی گرما می‌تواند ایجاد گرما را توضیح دهد. به مثال دو قطعه چوب که به یکدیگر مالیده می‌شوند توجه کنید. مالش خود چیزی است که برچوب تأثیر می‌کند و خواص آن را تغییر می‌دهد. بسیار محتمل است که خواص چوب چنان تغییر کند که مقدار ثابت و معینی گرما، موجب پیدا شدن دمائی بیش از پیش در آن شود. به هر صورت تنها چیزی که می‌بینیم بالا رفتن دماست. ممکن است مالش گرمای ویژهٔ چوب را تغییر دهد نه مقدار کل گرما را.»

وقتی که بحث به این مرحله برسد، دیگر گفتگو با طرفدار نظریهٔ جوهر مادی بی‌فایده است، زیرا تنها آزمایش می‌تواند مسأله را حل و فصل کند. دو قطعه چوب مشابه یکدیگر را تصور کنید که تغییر دمای آنها به روشهای متفاوت ایجاد شده باشد. یکی را با اصطکاك گرم کرده باشیم و دیگری را با قراردادن در کنار بخاری. اگر در دمای جدید، این دوقطعه چوب گرمای ویژهٔ واحدی داشته باشند، نظریهٔ جوهر مادی فرومی‌ریزد.

برای اندازه‌گیری گرمای ویژه روشهای ساده‌ای وجود دارد، و سرنوشت این نظریه در گرو نتیجهٔ این اندازه‌گیریهاست. آزمونهائی که حیات و ممات نظریه‌ای به آنها بسته است، در تاریخ فیزیك فراوان دیده می‌شوند، و آنها را آزمایشهای قطعی می‌نامند. قطعی بودن یك آزمایش در شیوه‌ای است که مسأله را طرح می‌کند و اینکه فقط یکی از نظریه‌های مورد بحث را به آزمون می‌کشاند. تعیین گرمای ویژهٔ دو جسم مشابه که یکی به وسیلهٔ اصطکاك گرم شده باشد و دیگری با جریان گرما، یکی از این آزمایشهای قطعی است. آزمایش در حدود یکصدو پنجاه سال پیش از این به‌وسیلهٔ رومفورد[1] انجام گرفت ومرگ نظریهٔ جوهری گرما را اعلام داشت. گزیده‌ای از نوشتهٔ رومفورد خودگویای داستان است:

بسیار اتفاق می‌افتد که در کارها و اشتغالات عادی زندگی، فرصتهائی برای تفکر در برخی از عجیبترین اعمال طبیعت دست می‌دهد؛ و چه بسیار آزمایشهای جالب توجه فلسفی که ممکن است بدون زحمت و صرف هزینه به کمك ماشینهائی که فقط برای کارهای فنی و مقاصد پیشه و هنری ساخته شده‌اند انجام پذیرد.

برای من چنین موقعیتها فراوان فراهم آمده است، و اطمینان حاصل کرده‌ام که اگر آدمی عادت کند که در جریانهای معمولی زندگی، که برحسب تصادف پیشامد می‌کند، چشم خود را باز نگاه دارد، یا در سیر و سیاحتی که از ملاحظهٔ عادیترین ظواهر دست می‌دهد، تعمق کند، به تردیدهائی مفید دچار می‌شود و طرحهائی معقول برای تحقیق و پیشرفت پیدا می‌کند که بسیار بیش از تفکرات فیلسوفان در ساعتهای خاص مطالعه و تحقیق حاصل می‌دهند.

این اواخر که در قورخانهٔ مونیخ ناظر بر سوراخ کردن لوله‌های توپ بودم، متوجه شدم که هنگام سوراخ کردن لوله‌های مفرغی در مدتی کوتاه گرمائی زیاد ایجاد می‌شود، و شدت این گرما در براده‌هائی که مته تولید می‌کند خیلی زیادتر است (و من به تجربه دریافتم که این

1.Rumford

گرما از گرمای آب جوش بیشتر است).
گرمائی که در این عملیات مکانیکی تولید می‌شود سرچشمه‌اش از کجاست؟
آیا مولد آن براده‌هائی است که با نوك مته از تودهٔ فلز جدا می‌شوند؟ اگر چنین باشد، بنابر عقیده‌های جدید گرمای نهان و کالریك، نه تنها لازم است که ظرفیت گرمائی تغییر کند، بلکه این تغییر باید آن قدر زیاد باشد که پاسخگوی همهٔ حرارتهای تولید شده نیز باشد.
ولی چنین تغییری روی نمی‌دهد. زیرا مقداری از این براده‌ها و مقداری به همان وزن از نوارهای نازك همین فلز را که با اره جدا کرده بودم و در یك دما (دمای آب جوش) بودند، در دو مقدار مساوی آب سرد (یعنی آب به دمای ۴۹/۵ فارنهایت) قرار دادم. آبی که براده‌ها در آن بودند از آبی که نوار فلزی در آن گذاشته بود نه سردتر بود و نه گرمتر.

و در آخر کار چنین نتیجه می‌گیرد:

هنگام استدلال در بارهٔ این موضوع نباید این رویداد بسیار مهم را فراموش کرد که چشمهٔ گرمائی که در این آزمایشها از اصطکاك ایجاد می‌شد، به وضوح تمام نشدنی می‌نمود.
و نیز باید اضافه کرد که آنچه که یك جسم یا دستگاهی از اجسام عایق شده بتوانند به طور نامحدود تولید کنند، ممکن نیست جوهری مادی باشد. برای من اگر محال نباشد، بسیار مشکل است تصور کنم که چیزی بتواند به صورت گرمائی که در این آزمایشها دیده‌ام تولید شود و منتقل گردد، و آن چیز جز «حرکت» باشد.

به این ترتیب نظریهٔ کهنه سقوط می‌کند، یا اگر بخواهیم دقیقتر باشیم، نظریهٔ جوهر مادی فقط به مسائل جریان حرارت محدود می‌شود. باز همان طور که رومفورد اشاره کرده است، باید در جست وجوی برگهٔ جدیدی برآئیم. برای این کار بهتر است موقتاً مسألهٔ گرما را به کناری

نهاده به مکانیك باز گردیم.

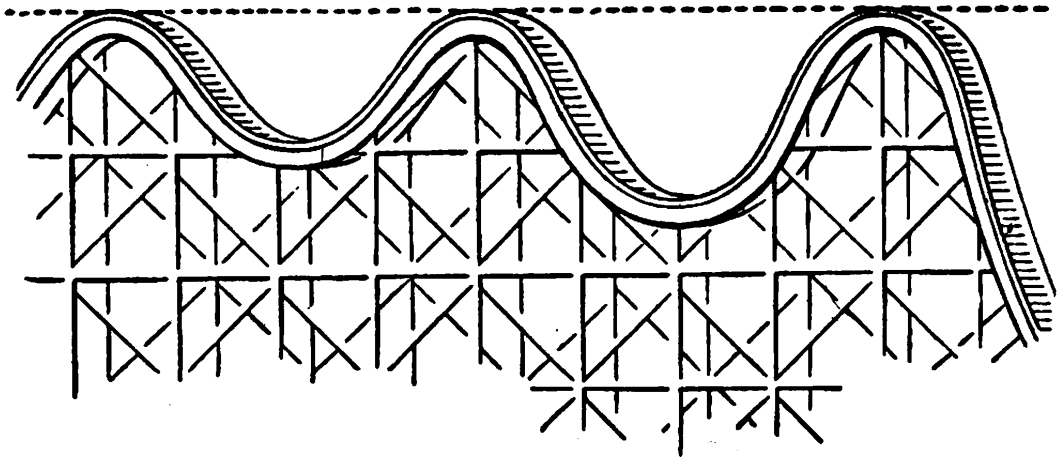
گردونهٔ تفریحی

اکنون به بحث در حرکت گردونهٔ دلهره‌آور تفریحی می‌پردازیم. گردونهٔ کوچکی را به بالاترین نقطهٔ مسیر برده به حال آزاد رها می‌کنند. تحت اثر نیروی گرانش به راه می‌افتد و روی ریلهای پرپیچ و خم بالا و پایین می‌رود، و کسانی که داخل گردونه نشسته‌اند با تغییرات ناگهانی سرعت احساس ریزش دل خاصی می‌کنند. ریل هر گردونه بلندترین نقطه‌ای دارد که حرکت از آن نقطه شروع می‌شود. در ضمن حرکت، گردونه هرگز دوباره به این ارتفاع نخواهد رسید. شرح کامل حرکت این دستگاه بسیار پیچیده است. از یك طرف جنبهٔ مکانیکی مسأله است که تغییرات سرعت و مکان باشد، و از طرف دیگر اصطکاك است که در چرخها و ریل ایجاد گرما می‌کند. از آن جهت جریان فیزیکی این مسأله را به دو قسمت تقسیم کردیم که بتوانیم مفاهیمی را که قبلاً مورد بحث قرار دادیم در اینجا به کار بریم. این تقسیم به آزمایشی خیالی نیز می‌انجامد زیرا جریانی فیزیکی که در آن فقط جنبهٔ مکانیکی مسأله ظاهر شود، منحصر به عالم خیال است، و هرگز نمی‌تواند تحقق یابد.

در مورد آزمایش خیالی ممکن است در مخیلهٔ خود تصور کنیم که کسی توانسته باشد اصطکاك را، که همیشه با حرکت همراه است، کاملاً از میان بردارد. چنین شخصی می‌خواهد گردونه‌ای تفریحی برای خود بسازد و کشفی را که کرده است در آن به موقع عمل گذارد. گردونه باید بالا و پائین برود و نقطهٔ عزیمت آن مثلاً در ارتفاع ۳۰ متری از سطح زمین است. از راه آزمون و خطا به این نتیجه می‌رسد که باید از قاعدهٔ ساده‌ای پیروی کند: او می‌تواند جاده را به هر صورتی که بخواهد بسازد جز آنکه هیچ یك از نقاط آن ارتفاعی بیش از نقطهٔ عزیمت نداشته باشد. اگر گردونه آزادانه مسیر را بپیماید، هرچند مرتبه که شخص بخواهد، می‌تواند ارتفاع را به سی متر برساند، ولی هرگز از این حد نمی‌تواند تجاوز کند. البته در عمل ارتفاع گردونه هرگز نمی‌تواند به سی متر برسد، زیرا اصطکاك وجود دارد، ولی مهندس فرضی ما از این بابت اندیشه‌ای

ندارد.

اکنون حرکت گردونهٔ خیالی را بر ریل خیالی از نقطهٔ عزیمت خود به پائین دنبال می‌کنیم. هرچه پیشتر می‌رود، فاصله‌اش از زمین کمتر می شود و در عوض سرعت آن فزونتر می‌گردد. این جمله ممکن است یادآور

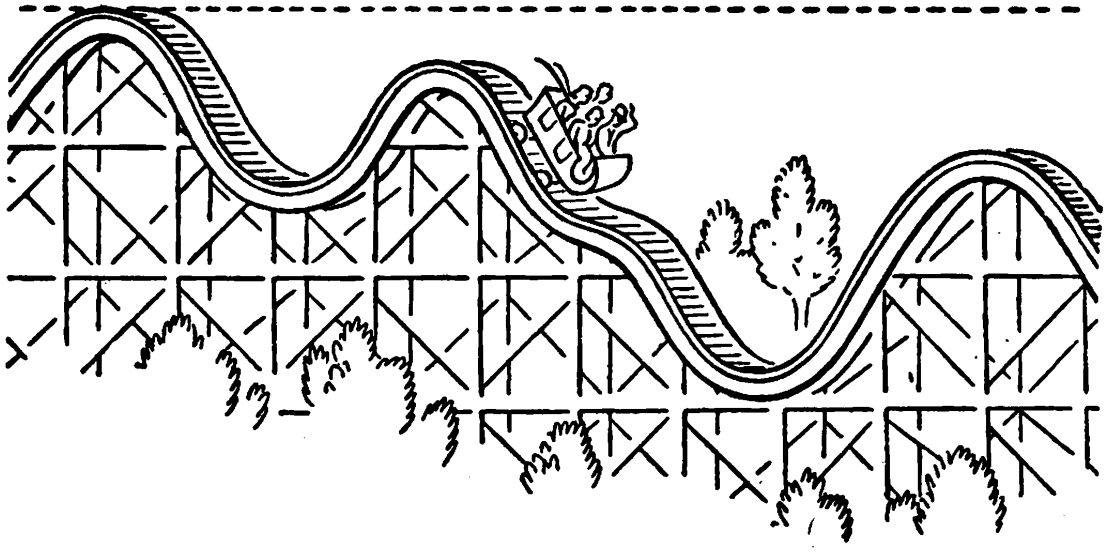


جمله‌ای در درس زبان باشد: «من مداد ندارم، اما شما شش نارنج دارید.» ولی به این بی‌مغزی هم نیست. میان مداد نداشتن من و شش نارنج داشتن شما هیچ گونه ارتباطی نیست، در صورتی که میان فاصلهٔ گردونه تا زمین و تندی آن رابطه‌ای واقعی وجود دارد. اگر فاصلهٔ گردونه را تا زمین داشته باشیم، می‌توانیم تندی آن را در هر لحظه حساب کنیم، ولی در اینجا از ذکر این نکته چشم می‌پوشیم، چون ماهیتی کمّی دارد و بهترین وجه بیان آن در قالب فرمولهای ریاضی است.

سرعت گردونه در بلندترین نقطه صفر است، و در این نقطه ارتفاعش از زمین سی‌متر است. در پائینترین نقطهٔ ممکن، ارتفاع گردونه از زمین صفر می‌شود و سرعت آن بزرگترین مقدار را دارد. این حقایق را می‌توان به صورت دیگری بیان کرد: گردونه در بالاترین نقطه دارای «انرژی پتانسیل» است، ولی هیچ «انرژی جنبشی» یا انرژی حرکت ندارد. در پائینترین نقطه انرژی پتانسیل ندارد و انرژی جنبشی آن به بزرگترین مقدار ممکن می‌رسد. در نقاط بینابین که گردونه هم دارای سرعت و هم دارای ارتفاع است انرژی پتانسیل و انرژی جنبشی هر دو وجود دارند. انرژی پتانسیل با زیاد شدن ارتفاع زیاد می‌شود و افزایش انرژی جنبشی به زیاد شدن سرعت بستگی دارد. اصول مکانیک برای توضیح این حرکت

کفایت می‌کنند. در بیان ریاضی، انرژی با دو عبارت داده می‌شود، که هر دو آنها تغییر می‌کنند ولی مجموعشان ثابت می‌ماند. بنابراین می‌توان به زبان ریاضی و به طور دقیق مفاهیم انرژی پتانسیل را که تابع مکان است، و انرژی جنبشی را، که بسرعت بستگی دارد، مطرح ساخت. ارائهٔ دو اصطلاح کاری است اختیاری و تنها سهولت عمل آن را توجیه می‌کند. مجموع این دو کمیت که تغییر نمی‌کند، «ثابت حرکت» نامیده می‌شود. انرژی کل، یعنی انرژی پتانسیل به اضافهٔ انرژی جنبشی را می‌توان با مقدار پولی تشبیه کرد که مبلغ آن دست نخورده نگاه داشته می‌شود ولی مرتباً آن را بر طبق قاعدهٔ معینی از یك ارز به ارز دیگر مثلاً از دلار به لیره و به عکس تبدیل می‌کنند.

در گردونه‌های تفریحی حقیقی نیز، که اصطکاك نمی‌گذارد گردونه مجدداً به ارتفاع نقطهٔ عزیمت خود برسد، تبدیل دائمی انرژی پتانسیل و انرژی جنبشی به یکدیگر صورت می‌پذیرد. منتها در اینجا مجموع ثابت نمی‌ماند بلکه رفته رفته کوچکتر می‌شود. اکنون یك گام مهم و شجاعانهٔ دیگر باید برداشت تا جنبه‌های مکانیکی و گرمائی حرکت به هم مربوط



گردند. نتایج و تعمیمهای متعددی که از این گام نتیجه می‌شود بعدها دیده خواهند شد.

در این جا علاوه بر انرژیهای جنبشی و پتانسیل چیز دیگری هم دخالت دارد و آن گرمائی است که از اصطکاك حاصل شده است. آیا این

گرما ربطی به کاهش انرژی مکانیکی یعنی انرژیهای پتانسیل و جنبشی دارد؟ حدس جدیدی لازم است. اگر گرما را بتوان شکلی از انرژی بشمار آورد، شاید حاصل جمع هرسه ـ گرما وانرژی پتانسیل و انرژی جنبشی ـ ثابت بماند. نه تنها گرما، بلکه گرما همراه با سایراشکال انرژی رویهمرفته باید به‌عنوان جوهر مادی فناناپذیری تلقی شوند. چنانکه گوئی مردی برای تبدیل دلار به لیره به خودش حق‌العملی به فرانك بدهد، و مبلغ حق‌العمل نیز پس‌انداز شود؛ درنتیجه مجموع مبالغ فرانك و دلار و لیره مطابق نرخ تبدیل معینی ثابت می‌مانند.

ترقی علم این تصور قدیمی را که گرما جوهری مادی است باطل کرد. سعی ما بر این است که جوهر مادی جدیدی به نام انرژی وضع کنیم که گرما یکی از اشکال آن باشد.

نرخ تبدیل

کمتر از یك قرن پیش مایر[1] برگهٔ جدید را، که گرما نوعی از انرژی است، حدس زد، و ژول با آزمایش آن را تأیید کرد. تصادف عجیبی است که تقریباً تمام کارهای اساسی مربوط به ماهیت گرما به دست فیزیکدانان غیر حرفه‌ای، که فیزیك را صرفاً سرگرمی بزرگی می‌شمردند، انجام شده است. از آن جمله‌اند: بلك اسکاتلندی با ذوق و همه کاره، مایر طبیب آلمانی، و کونت رومفورد جهانگرد حادثه‌جوی امریکائی که بعدها در اروپا سکنی گزید و از فعالیتهایش آنکه مدتی وزیر جنگ باواریا بود. ژول آبجوساز انگلیسی نیز در ساعات فراغت آزمایشهای بسیار مهمی در خصوص بقای انرژی انجام داد.

ژول از راه آزمایش به این حدس، که گرما نوعی انرژی است، لباس حقیقت پوشانید و نرخ تبدیل را معین کرد. به همین جهت شایسته است به شرح نتایج کار وی پرداخته شود.

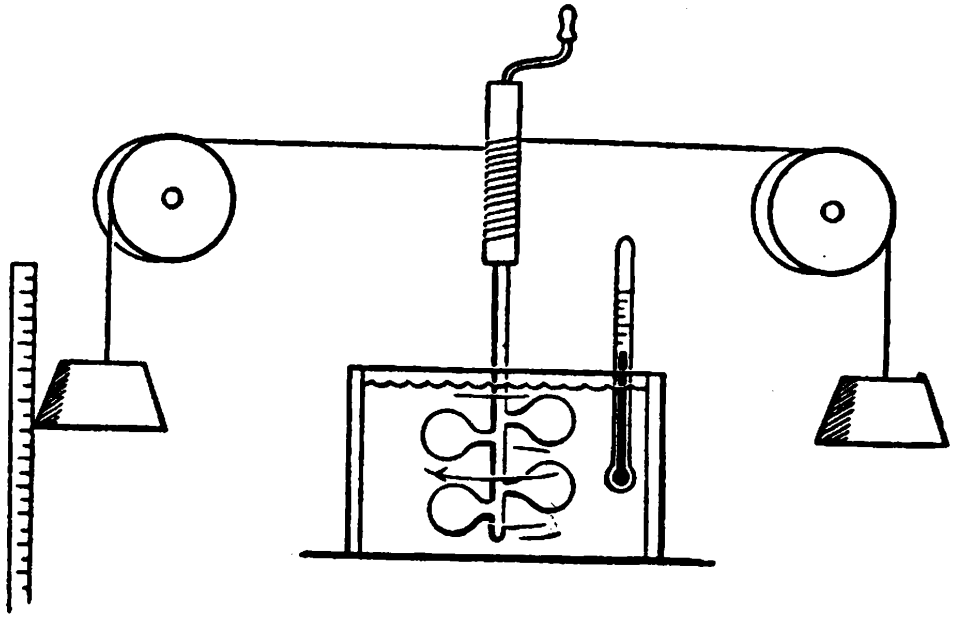
انرژی جنبشی و انرژی پتانسیل یك دستگاه را رویهمرفته انرژی مکانیکی آن می‌نامند. در مورد مثال گردونهٔ تفریحی حدس‌زدیم که باید

1. Mayer

مقداری از انرژی مکانیکی به گرما تبدیل شده باشد. اگر چنین حدسی درست باشد، باید چه در آن آزمایش و چه در فرایندهای فیزیکی مشابه نرخ تبدیل معینی میان این دو موجود باشد. این مسأله به معنای دقیق مسأله‌ای کمّی است، ولی این واقعیت که مقدار معینی انرژی مکانیکی را می‌توان به مقدار معینی گرما تبدیل کرد، مطلب بسیار مهمی است. می خواهیم بدانیم که این نرخ تبدیل با چه عددی بیان می‌شود، یعنی از مقدار معینی انرژی مکانیکی چه مقدار گرما بدست می‌آید.

قصد از تحقیقات ژول تعیین این عدد بود. سازوکار یکی از آزمایشهایش، شباهت زیادی به ساعتهای لنگری دارد. کوك کردن این ساعت به این طریق است که دو وزنهٔ لنگر را بالا می‌برند تا بر انرژی پتانسیل آنها افزوده شود. اگر دیگر ساعت را دستکاری نکنیم آن را می توان یك دستگاه بسته شمرد. بتدریج وزنه‌ها پایین می‌افتند و ساعت کار می‌کند. پس از مدت زمان معینی لنگرها به پایینترین نقطهٔ خود می‌رسند و ساعت از کار کردن بازمی‌ایستد. بر انرژی دستگاه چه روی داده است؟ انرژی پتانسیل لنگرها به انرژی جنبشی سازوکار ساعت تبدیل می‌شود و سپس بتدریج به صورت گرما از بین می‌رود.

دستگاه ژول سازوکاری مشابه داشت منتها در آن تغییراتی داده



بود تا بتواند گرمای از دست رفته را اندازه بگیرد و نرخ تبدیل را پیدا

کند. در دستگاه ژول سقوط دو وزنه چرخ پره‌داری را که در ظرف آبی قرار دارد می‌چرخاند. انرژی پتانسیل وزنه‌ها به انرژی جنبشی قسمتهای متحرك تبدیل می‌شود، و این انرژی جنبشی ایجاد گرما می‌کند و دمای آب را بالا می‌برد. ژول تغییر دمای آب را اندازه گرفت و با ملاحظهٔ گرمای ویژهٔ معلوم آب، مقدار گرمای جذب شده را محاسبه کرد. او نتیجهٔ آزمایشهای متعدد خویش را به صورت زیر خلاصه کرده است.

اولاً مقدار گرمائی که از راه اصطکاك اجسام، خواه جامد یا مایع، ایجاد می‌شود، همیشه متناسب است با مقدار نیروی مصرف شده [مقصود وی از نیرو همان انرژی است]، و ثانیاً برای اینکه دمای یك رطل آب را (که در خلأ وزن شده و دمایش بین ۵۰° و ۶۰° فارنهایت است) یك درجه فارنهایت بالا ببریم باید آن مقدار نیروی [انرژی] مکانیکی مصرف کنیم که از سقوط وزنهٔ ۷۷۲ رطلی از ارتفاع یك پا بدست می‌آید.

به عبارت دیگر انرژی پتانسیل وزنهٔ ۷۷۲ رطلی (۳۴۵ کیلوگرمی) در ارتفاع یك پا(۳۰/۵ سانتیمتر) ازسطح زمین، برابر است با مقدارگرمائی که برای بالا بردن دمای یك رطل آب از ۵۵° به ۵۶° فارنهایت لازم است. آزمایشگران بعدی با دقت بیشتری این عمل را انجام داده‌اند، ولی هم‌ارز مکانیکی گرما اساساً همان است که ژول در تحقیق پیشتازانهٔ خود بدست آورده است.

پس از این کار بزرگ، پیشرفت سریع بود. دیری نگذشت که پی‌بردند انرژی مکانیکی و گرما فقط دو نوع از انواع مختلف انرژی هستند. هرچیز که به یکی از این دو قابل تبدیل باشد نیز انرژی است. اشعهٔ آفتاب نیز انرژی است، زیرا قسمتی از آن در سطح زمین تبدیل به گرما می‌شود. جریان الکتریکی دارای انرژی است، زیرا سیم را گرم می‌کند، و موتور را بکار می‌اندازد. زغال منبع انرژی شیمیائی است که با سوختن گرما تولید می‌کند. در هر رویداد نوعی از انرژی به نوع دیگر تبدیل می‌شود و همیشه نرخ تبدیل کاملاً مشخص است. در هر دستگاه بسته یعنی دستگاهی

که از تأثیرات خارجی برکنار باشد، انرژی باقی می‌ماند و در نتیجه می توان آن را چون جوهری مادی شمرد. در چنین دستگاهی مجموع اقسام مختلف انرژی ثابت است، ولو اینکه ممکن است مقدار هریك از آنها تغییر کند. اگر تمام جهان را دستگاهی بسته بشماریم، با کمال اطمینان همراه با فیزیکدانان قرن نوزدهم می‌توانیم بگوئیم که انرژی جهان نامتغیر است، نه می‌توان چیزی بر آن افزود و نه می‌توان چیزی از آن کاست.

به این ترتیب دو مفهوم ما از جوهر مادی عبارتند از ماده و انرژی؛ و هر دو جوهر تابع قانون بقا هستند. در هر دستگاه بسته نه مقدار ماده تغییر می‌کند و نه مقدار انرژی کل. ماده وزن دارد و انرژی بی وزن است. به این ترتیب دو مفهوم متفاوت و دو قانون بقای متفاوت داریم. آیا این افکار هنوز هم به قوت خود باقی هستند؟ یا اینکه در پرتو تحولات جدیدتر در این تصویر ظاهراً استوار تغییری پیدا شده است؟ آری تغییراتی که در این دو مفهوم بعداً پیدا شده‌اند به نظریهٔ نسبیت مربوط می‌شوند. ما باز هم به این نکته باز خواهیم گشت.

زمینهٔ فلسفی

نتایج پژوهش علمی غالباً سبب می‌شود که در نگرش فلسفی مربوط به مسائلی که فراسوی میدان محدود علم قرار دارند، تغییراتی داده شود. هدف علم چیست؟ از نظریه‌ای که سعی در توضیح طبیعت دارد چه باید خواست؟ این سؤالات اگرچه از حدود علم فیزیك تجاوز می‌کند، ولی چون این علم مادهٔ اولیه‌ای بوده که موجب طرح آنها شده است، رابطه‌ای نزدیك با فیزیك دارند. تعمیمهای فلسفی باید بر پایهٔ نتایج علمی گذاشته شوند. مع‌ذلك پس از آنکه تعمیمی شکل گرفت و قبول عام یافت با شاخص کردن یکی از راههای بیشمار پیشرفت در تحول بعدی تفکر علمی تأثیر می‌کند. طغیان پیروزمند علیه نگرش مورد قبول به پیشرفتهای غیر منتظره و تحولات کاملاً متفاوتی می‌انجامد و منشأ نظرهای فلسفی جدید می‌شود. این ملاحظات اکنون مبهم و بی‌هدف بنظر می‌رسند مگر آنکه با مثالهائی، که از تاریخ فیزیك آورده می‌شود روشن گردند.

در اینجا سعی خواهیم کرد که نخستین افکار فلسفی را، که به هدف

علم مربوط می‌شوند، بیان کنیم. این افکار بودند که در پیشرفت فیزیک تا حدود یکصد سال پیش تأثیر داشتند، و آن وقت در نتیجهٔ قرائن تازه و نظریات نو، که زمینهٔ جدیدی برای علم پدید آوردند، از بین رفتند.

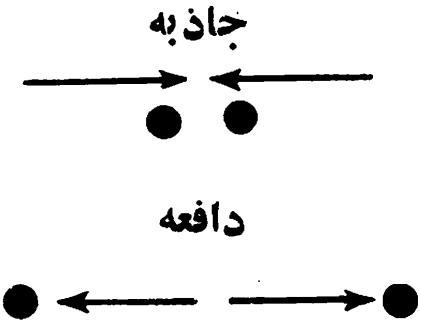
در طول تاریخ علم، از زمان فیلسوفان یونان تا پیدایش فیزیک جدید، همواره سعی بر آن بوده است که پیچیدگی ظاهری پدیده‌های طبیعت را ساده کنند و به کمک افکار و روابط بنیادی ساده‌ای آنها را توضیح دهند. این نکته اصل بنیادی حکمت طبیعی است و حتی در آثار اتمگرایان هم دیده می‌شود. ذیمقراطیس بیست و سه قرن پیش چنین نوشت:

> برحسب قرارداد شیرین، شیرین است. برحسب قرارداد تلخ، تلخ است. برحسب قرارداد گرم، گرم است. برحسب قرارداد سرد، سرد است. برحسب قرارداد رنگ، رنگ است. ولی در حقیقت فقط اتمها وجود دارند و فضای تهی. آنچه حس می‌شود واقعی شمرده می‌شود و عادت بر آن است که چنینش بشمارند. ولی حقیقت غیر از این است. تنها اتمها و فضای تهی حقیقت دارد.

این اندیشه از فلسفهٔ باستان، جز به صورت یک آفریدهٔ داهیانهٔ خیال برجا نماند. یونانیان قوانینی را که رویدادهای متوالی را به هم ربط دهد، نمی‌شناختند. علمی که در آن نظریه و آزمایش در ارتباط با یکدیگر باشند، از زمان گالیله آغاز شده است. برگه‌هائی را دنبال کرده‌ایم که به قوانین حرکت منجر شدند. به مدت دویست سال پایهٔ هر تلاشی که برای فهم طبیعت می‌شد این بود که ماده و نیرو را مفاهیم بنیادی بشمارند. تصور یکی از این دو بدون دیگری محال است. زیرا ماده وجود خود را به صورت منبع نیروئی آشکار می‌سازد که با آن بر مادهٔ دیگر تأثیر می‌کند.

به ساده‌ترین مثال توجه کنیم: و آن مثال دو ذره است که نیروهائی بر یکدیگر وارد می‌آورند. ساده‌ترین نیروهای قابل تصور، نیروهای جاذبه و دافعه‌اند. در هر دو مورد بردارهای نیرو بر خطی قرار دارند که دو نقطهٔ مادی را به یکدیگر متصل می‌کند. احتیاج به سادگی ما را به این فکر می اندازد که ذرات را در حال جذب و دفع یکدیگر تصور کنیم. هر فرض

دیگری در مورد امتداد نیروهای عامل به تصویر بسیار پیچیده‌تری منجر



می‌شود. آیا نسبت به طول بردارهای نیرو هم می‌توان فرضی کرد که به همین اندازه ساده باشد؟ اگر از فرضهای خاص صرف نظر کنیم باز هم یك چیز را می‌توانیم بگوئیم: نیروی میان دو ذره، مانند نیروی گرانش، فقط به فاصلهٔ آن دو بستگی دارد. این تصویر به اندازهٔ کافی ساده است. نیروهای بسیار پیچیده‌تری را هم می‌توان تصور کرد، مثل نیروهائی که تنها تابع فاصلهٔ دو ذره نیستند بلکه به سرعت آنها نیز بستگی دارند. چون ماده و نیرو را مفاهیم اصلی خود قرارداده‌ایم، ساده‌ترین فرض آن است که نیروها در امتداد خط واصل ذرات و تنها تابع فاصله باشند. ولی آیا می شود تمام پدیده‌های فیزیکی را تنها با نیروهائی از این قبیل توصیف کرد؟

دستاوردهای عظیم مکانیك در تمام شاخه‌های آن، توفیق حیرت‌آور آن در پیشرفت نجوم، و کاربرد مفاهیم آن در مسائلی ظاهراً مختلف و ماهیتاً غیر مکانیکی، همه و همه این باور را اعتبار دادند که ممکن است تمام پدیده‌های طبیعی را بتوان برحسب نیروهائی ساده، میان اشیائی تغییر ناپذیر، تشریح کرد. تا دویست سال بعد از گالیله این سعی، دانسته و ندانسته، تقریباً در تمام تلاشهای علمی بچشم می‌خورد. هلمهلتز[1] در اواسط قرن نوزدهم این نکته را به روشنی بیان کرده است:

> بنابراین در آخر کار ما به این اکتشاف نهائی می‌رسیم که مسألهٔ علم مادی طبیعی آن است که پدیده‌های طبیعت را به نیروهای جذبی و دفعی تغییر ناپذیری وابسته بداند. که شدت آنها کاملاً تابع فاصله باشد.

1. Helmholtz

شرط قابل فهم بودن طبیعت آن است که این مسأله قابل حل باشد.

به این ترتیب بنا بـه عقیدهٔ هلمهلتز خـط تکامل علـم معین است و دقیقاً مسیر ثابتی را دنبال می‌کند:

به محض آنکه قضیهٔ تحویل پدیده‌هـای طبیعی بـه نیروهـای ساده کامل شود، و محقق گردد که این تنها صورت تحویل پدیده‌هاست، علـم کار خود را بپایان رسانیده است.

این نگرش در نظر فیزیکدان قـرن بیستم بـی‌تحرك و ساده نگرانـه جلوه می‌کند. او از این که ماجرای بزرگ پژوهش به ایـن زودی خـاتمه پذیرد و برای همیشه تصویری چنین غیرجذاب، ولو خطا ناپذیر، از طبیعت برای همیشه ساخته شود، هراسان می‌گردد.

اگرچه این طرز تفکر سررشتهٔ همهٔ حـوادث را بـه نیروهـای ساده مربوط می‌داند ولی راه این پرسش را باز می‌گذارد که بستگی این نیروهـا به فاصله چیست. یحتمل شکل این بستگی برای پدیده‌های مختلف متفاوت باشد. اگر ضرورت ایجاب کند که برای حوادث مختلف به انواع گوناگون نیرو قائل شویم، محققاً قبول این ضرورت از دیدگاه فلسفـی پسند خاطـر نخواهد بود. با همهٔ این احوال این نگرش که نگـرش مکانیکی نـامیده می شود و هلمهلتز آن را به صورت روشنی بیان کرده است، به موقـع خـود نقش مهمی ایفا کرده است. ظهور نظریـهٔ جنبشی مـاده یکی از بـزرگترین دستاوردهائی است که مستقیماً از نگرش مکانیکی متأثر بوده است.

پیش از آنکه ناظر انحطاط نگـرش مکانیکـی شویـم، خـوب است با قبول نظرگاه فیزیکدانان قرن گذشته ببینیم از تصویری که آنـان از عالم خارجی داشتند چه نتایجی را می‌توان استنباط کرد.

نظریهٔ جنبشی ماده

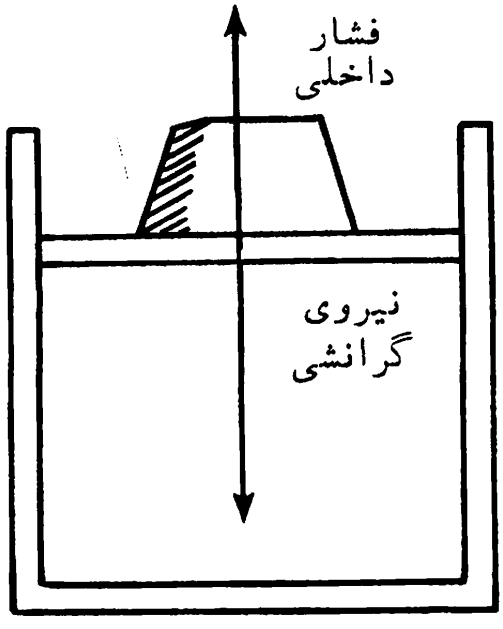
آیا می‌توان پدیده‌های گرمائی را براساس حرکت ذراتی توضیح داد که از طریق نیروهای ساده به کنش متقابل می‌پردازنـد؟ ظـرف سربسته‌ای

محتوی مقدار معینی گاز ـ مثلاً هوا ـ در دمای معین است. ظرف را گرم می‌کنیم، دما بالا می‌رود، پس انرژی گاز زیادتر شده است. چه رابطه‌ای میان این گرما و حرکت وجود دارد؟ این ارتباط را هم دیدگاه فلسفی مورد قبول ممکن می‌شمارد و هم طریقه‌ای که بدان گرما از حرکت بدست می آید. اگر هر مسأله‌ای را مسأله‌ای مکانیکی بدانیم، گرما نیز انرژی مکانیکی خواهد بود. موضوع بحث نظریهٔ جنبشی آن است که مفهوم ماده را از این راه مورد مطالعه قرار دهد. بنابراین نظریه هر گاز مجموعه‌ای بیشمار از ذرات یا ملکولهاست که در تمام جهات متحرکند، با یکدیگر برخورد می‌کنند، و در نتیجهٔ هر برخورد امتداد حرکت آنها عوض می‌شود. همان گونه که در اجتماع بشری متوسط عمر یا متوسط ثروت وجود دارد، ملکولها نیز تندی متوسطی دارند. بنابراین به ازای هر ملکول انرژی جنبشی متوسطی وجود خواهد داشت. گرمای بیشتر در ظرف تعبیری از آن است که انرژی جنبشی متوسط بیشتر شده است. مطابق این تصویر گرما نوع خاصی از انرژی، متفاوت با نوع مکانیکی آن، نیست، بلکه عبارت از همان انرژی جنبشی حرکت ملکولی است. هر دمای معین متناظر با انرژی جنبشی متوسط معینی به ازای هر ملکول است. این فرض در واقع، فرضی دلبخواه نیست. اگر بخواهیم تصویر مکانیکی نامتناقضی از ماده داشته باشیم ناچاریم انرژی جنبشی یك مولکول را معرف دمای گاز بدانیم.

این نظریه را نباید زاییدهٔ تخیل دانست. می‌توان نشان داد که نظریهٔ جنبشی گازها نه تنها با آزمایش سازگاری دارد، بلکه عملاً به دریافت عمیقتری از واقعیات می‌انجامد. این نکته را با چندین مثال می‌توان روشن ساخت.

ظرفی داریم که دهانهٔ آن را با پیستونی که آزادانه می‌تواند حرکت کند بسته‌ایم. این ظرف محتوی مقداری گاز است که در دمای ثابت نگاه داشته شده است. اگر در ابتدا پیستون در محل معینی قرار گرفته باشد، چون از وزنه‌های روی آن مقداری بر داریم یا وزنه‌های جدیدی بر آن بیفزائیم، بالاتر یا پایینتر می‌رود. برای پایین بردن پیستون باید در مقابل فشار درونی گاز بر آن نیرو وارد کرد. سازوکار این فشار درونی بنا بر

نظریهٔ جنبشی ازچه قرار است؟ ذرات بیشماری که گاز را تشکیل می‌دهند در تمام جهات حرکت می‌کنند و دیواره‌های ظرف و سطح پیستون را بمباران می‌کنند، و مانند توپ لاستیکی که به دیوار می‌خورد، پس از برخورد به داخل گاز برمی‌گردند. همین بمباران دائمی عدهٔ بیشماری ذره است که پیستون را علیه نیروی گرانش وارد بر پیستون و وزنه‌ها در ارتفاع معینی نگه می‌دارد. از یك سو نیروی ثابت گرانش وارد می‌آید و از طرف دیگر ضربه‌های نامنظم و بیشمار ملکولها. اگر قرار است که تعادل برقرار شود، اثر جمعی این نیروهای نامنظم کوچك بر پیستون باید با نیروی گرانش برابر باشد. فرض کنیم که پیستون را به طرف پایین فشار دهیم تا بدون



تغییر دما حجم گاز مثلاً به اندازهٔ نصف حجم اول آن شود. مطابق نظریهٔ جنبشی چه انتظاری می‌توان داشت؟ اثر نیروی ناشی از بمباران بیشتر از پیش است یا کمتر؟ فاصلهٔ ذرات از یکدیگر کمتر شده است. با آنکه انرژی جنبشی متوسط تغییر نکرده است، برخورد ملکولها با پیستون فراوانتر و بالنتیجه نیروی کل بزرگتر شده است. بدیهی است که بنا بر نظریهٔ جنبشی، برای آنکه پیستون را در وضع جدید خود نگاه داریم، باید وزنه‌های بیشتری بر روی آن قرار دهیم. این واقعیت تجربی ساده، بسیار معروف است، ولی پیش‌بینی آن نتیجهٔ منطقی نگرش جنبشی ماده است.

آزمایش دیگری را در نظر می‌گیریم. دو ظرف را انتخاب می‌کنیم

که در آنها دو گاز مختلف، مثلاً نیدرژن و نیترژن، به حجم مساوی ریخته باشیم و دمای هر دو یکسان باشد. فرض می‌کنیم که دهانه‌های این دو ظرف را با پیستونهای مشابه و وزنه‌های مساوی بسته باشیم. نتیجه این که هر دو گاز حجم و دما و فشار مشابهی دارند. چون دمای هر دو ظرف یکی است، بر طبق نظریهٔ جنبشی انرژی متوسط هر ذره در دو گاز مقدار واحدی دارد. چون فشار دو گاز برابر یکدیگر است، دو پیستون با نیروی کل واحدی بمباران می‌شوند. انرژی متوسط هر ذره در دو ظرف یکی است، و هر دو ظرف دارای حجم مساوی می‌باشند. بنابراین تعداد ملکولهای دو ظرف برابر یکدیگرند، هرچند که گازها از لحاظ شیمیائی متفاوت هستند. این نتیجه در فهم بسیاری از پدیده‌های شیمیائی کمال اهمیت را دارد؛ مفهوم این نتیجه آن است که عدهٔ ملکولها در یك حجم معین و در دما و فشار مشخص، چیزی است که معرف یك گاز بخصوص نبوده بلکه معرف همهٔ گازهاست. بسیار شگفت‌انگیز است که نظریهٔ جنبشی نه تنها وجود چنین عدد عامی را پیش‌بینی می‌کند، امکان تعیین آن را نیز فراهم می‌آورد. ما قریباً به‌این مسأله باز خواهیم گشت.

نظریهٔ جنبشی ماده، هم به طور نسبی و هم به طور کیفی، قوانین گازها را که نتیجهٔ آزمایشند توضیح می‌کند. بعلاوه این نظریه منحصر به گازها نیست، هرچند که بزرگترین موفقیتهای آن در این مورد بوده است.

گاز را می‌توان با کم کردن دما به مایع تبدیل کرد. کاهش دمای ماده به معنی نقصان انرژی جنبشی متوسط ذرات آن است. بنابراین پرواضح است که انرژی جنبشی متوسط یك ذره از مایع کمتر از انرژی جنبشی متوسط یك ذره از گاز است.

نمود بارزی از حرکت ذرات در مایعات، اولین‌بار در حرکت براونی مشاهده شد. حرکت براونی پدیدهٔ جالب توجهی است که بدون نظریهٔ جنبشی ماده کاملاً اسرارآمیز و غیر قابل فهم بجا می‌ماند. این حرکت نخستین‌بار به وسیلهٔ گیاه‌شناسی بنام براون[1] مشاهده شد و هشتاد سال بعد

1. Brown

یعنی در ابتدای قرن حاضر توضیح داده شد. تنها اسبابی که بـرای مشاهدهٔ حرکت براونی لازم است میکرسکپـی است که البته لزومـی هم نـدارد که دستگاه خیلی خوبی باشد.

براون روی دانه‌های گردهٔ گیاهان بخصوصی کار می‌کرد که:

ذرات یا دانه‌هائی بودند که اندازهٔ آنها به طور نامعمول بزرگ بود و از یك چهارهزارم تا یك پنج هزارم اینچ تغییر می‌کرد.

و کمی بعد چنین می‌گوید:

در حالی که مشغول مطالعهٔ شکـل ایـن ذراتِ غوطه‌ور در آب بـودم، مشاهده کـردم که بسیـاری از آنها بوضوح در حال حـرکتند... این حرکتها به قسمی بود که پس از چندین بار مشاهده دانستم که نه نتیجهٔ وجود جریانی در مایع است و نه نتیجهٔ تبخیر تدریجی، بلکه حرکتی است متعلق به خود ذرات.

آنچه براون مشاهده کرده بود حرکت بی‌انقطاع ذراتی بود معلق در آب که با میکرسکپ قابل مشاهده است. منظره‌ای است بسیار گیرنده.

آیا انتخاب گیاهان خاص برای وقوع ایـن پدیـده شرط لازم است؟ براون برای یافتن جواب این سؤال آزمایش را با نباتات مختلف تکرار کرد و به این نتیجه رسید که همهٔ دانه‌ها در صورتی که به اندازهٔ کافـی کوچك باشند، چنین حرکتی را، چـون در آب معلق شوند، نشان می‌دهند. بعلاوه او همین حرکت بی‌آرام و نـامنظم را در مـورد ذرات بسیار کـوچك مواد آلی و غیرآلی مشاهده کرد. حتی با گرد پـروانهٔ خشکیده‌ای نیز آزمـایش کرد و همین پدیده را دید.

این حرکت را چگونه باید تعلیل کرد؟ این حرکت با همهٔ آزمایشهای قبلی متناقض است. مطالعهٔ مکان یك ذرهٔ معلق، مثلاً هر سی ثـانیه یکبار، شکل عجیب مسیر آن را آشکار می‌سازد. آنچه بیش از هرچیز باعث شگفتی می‌شود حالت ظاهراً دائمی این حرکت است. هرگاه آونگی در مایعی نوسان

کند، اگر نیروئی خارجی بر آن وارد نشود، پس از مدتی از حرکت باز می‌ایستد. وجود حرکتی تمام نشدنی با تجربه متناقض بنظر می‌رسد. نظریهٔ جنبشی ماده این معما را با کمال وضوح حل کرد.

اگر آب را در قویترین میکرسکپ موجود نگاه کنیم، ملکولها و حرکت آنها را به صورتی که نظریهٔ جنبشی تصویر می‌کند نمی‌توانیم ببینیم. پس باید نتیجه گرفت که اگر این نظریه، که آب اجتماعی از ذرات است، صحیح باشد، لازم است که اندازهٔ این ذرات از حد قابلیت رؤیت با نیرومندترین میکرسکپها هم کوچکتر باشد. با این حال فرض کنیم که این نظریه صحیح و نمایش دهندهٔ تصویر نامتناقضی از واقعیت باشد. ذرات براونی که با میکرسکپ دیده می‌شوند به‌وسیلهٔ ذرات‌کوچکتری، که آب را تشکیل می‌دهند، بمباران می‌شوند. حرکت براونی در صورتی وجود پیدا می‌کند که ذرات بمباران شده به اندازهٔ کافی کوچك باشند. دلیل وجود این حرکت آن است که به علت ماهیت نامنظم و تصادفی برخوردها، بمباران به طور یکنواخت از همه طرف صورت نمی‌گیرد. به این ترتیب حرکتی که مشاهده می‌شود نتیجهٔ حرکتی غیرقابل رؤیت است. در واقع نوع رفتار ذره‌های درشت بازتابی از حرکت ملکولهاست که گوئی بزرگ و با میکرسکپ قابل رؤیت شده است. مسیر نامنظم و تصادفی ذرات براونی بازگو کنندهٔ بی‌نظمی مشابهی است در مسیر ذرات کوچکتری که ماده را بوجود می‌آورند. بنابراین می‌توان پی‌برد که مطالعهٔ کمی حرکت براونی بر بصیرت ما نسبت به نظریهٔ جنبشی ماده خواهد افزود. واضح است که حرکت قابل رؤیت براونی به اندازهٔ ملکولهای نامرئی بمباران کننده بستگی دارد. در صورتی که این ملکولها مقداری انرژی، یا به عبارت دیگر جرم و سرعت، نمی‌داشتند، اصلاً حرکت براونی وجود پیدا نمی‌کرد. پس اگر مطالعهٔ حرکت براونی به تعیین جرم یك ملکول بینجامد، جای تعجب نخواهد بود. (شکل در صفحهٔ ۶۳)

در نتیجهٔ تحقیقات دشوار نظری و عملی، جنبه‌های کمی نظریهٔ جنبشی شکل گرفتند. برگه‌ای که سرشتهٔ آن در حرکت براونی بود، از جمله برگه‌هائی بود که به نتایج کمی انجامید. همین نتایج کمی را از راههای مختلف دیگری، که از سرشته‌های متفاوت شروع می‌شوند، می

توان بدست آورد. این واقعیت که روشهای مختلف، نگرش واحدی را تأیید می‌کنند حائز اهمیت فراوان است. زیرا انسجام درونی نظریهٔ جنبشی ماده را آشکار می‌سازند.

در اینجا فقط یکی از نتایج کمی متعددی که از راه آزمایش و نظریه به آن رسیده‌اند ذکر می‌شود: فرض کنیم یك گرم از سبکترین عنصر، که ئیدرژن است، داریم و می‌پرسیم: در این یك گرم چند دانه ملکول وجود دارد؟ جوابی که بدست می‌آید تنها مربوط به ئیدرژن نیست، بلکه مربوط به همهٔ گازها می‌باشد، زیرا می‌دانیم که درچه شرایطی دو گاز دارای تعداد ملکولهای برابر هستند.

نظریهٔ جنبشی به ما امکان می‌دهد که این سؤال را از روی اندازه‌گیریهای حرکت براونی یك ذرهٔ معلق، پاسخ دهیم. جواب بدست آمده عددی است فوق‌العاده بزرگ و آن عبارت است از عدد ۳ که به دنبال آن ۲۳ رقم دیگر قرار گرفته است: شمارهٔ ملکولهای موجود در یك گرم ئیدرژن چنین است:

۳۰۳،۰۰۰،۰۰۰،۰۰۰،۰۰۰،۰۰۰،۰۰۰،۰۰۰

تصور کنید که اندازهٔ هرکدام از ملکولهای ئیدرژن به‌قدری بزرگ شود که با میکرسکپ قابل رؤیت گردد، یعنی قطر آن نظیر ذرات براونی به یك دوهزارم سانتیمتر برسد. حال چون بخواهیم این ملکولها را در صندوقی جای دهیم، صندوقی لازم می‌شود که هر ضلع آن تقریباً نیم کیلومتر است!

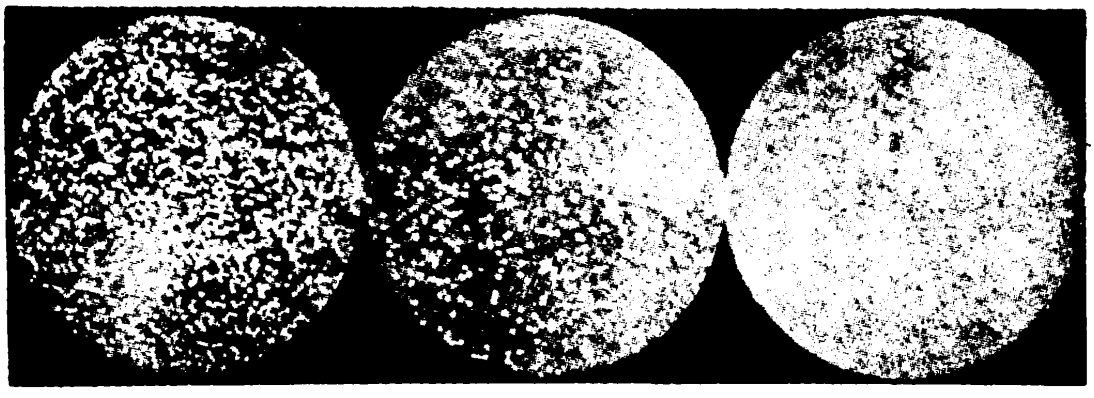
اگر عدد ۱ را بر عدهٔ ملکولها تقسیم کنیم، جرم یك ملکول بدست می‌آید. جواب عدد فوق‌العاده کوچك زیر است:

گرم ۳۳،۰۰،۰۰۰،۰۰۰،۰۰۰،۰۰۰،۰۰۰،۰۰۰،۰۰۰،۰

که جرم یك ملکول ئیدرژن است.

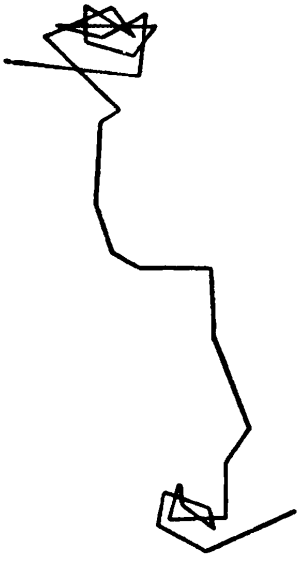
آزمایشهای حرکت براونی فقط یکی از آزمایشهای متعدد و مستقل از یکدیگر است که برای تعیین این عدد، که اهمیت فراوانی در علم فیزیك دارد، انجام شده است.

در نظریهٔ جنبشی ماده و در همهٔ دستاوردهای مهم آن تحقق برنامهٔ فلسفی عامی را مشاهده می‌کنیم، و آن عبارت از این‌است که تمام پدیده‌ها

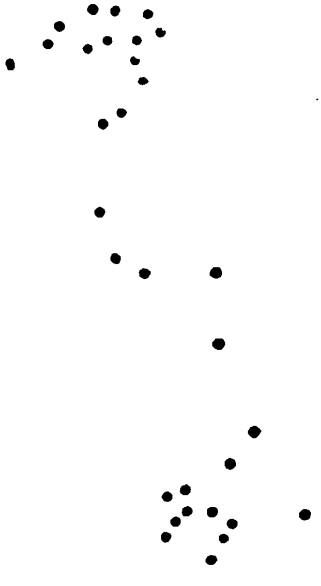


ذرات براونی در زیر میکرسکپ
عکس از ژ. پررن

عکس یك ذرهٔ براونی که پس از مدت زیادی باز بودن دهانهٔ دوربین عکاسی از پشت میکرسکپ برداشته شده.
عکس از برومبرگ و واویلوف



خط سیری که از وصل کردن نقاط مختلف بدست می‌آید.



اوضاع مختلف یك ذرهٔ براونی در حین حرکت

به کنش متقابل میان ذرات ماده تحویل گردد.

خلاصهٔ آنچه گفته شد

در مکانیك می‌توان با معلوم بودن وضع فعلی جسم متحرك و شناختن نیروهائی که بر آن وارد می‌شوند، به وضع گذشتهٔ آن پی‌برد و مسیر آیندهٔ آن را پیش‌بینی کرد. مثلاً می‌توان مسیر آیندهٔ تمام سیارات را مشخص ساخت. در اینجا نیروهای مؤثر عبارت از نیروهای گرانشی نیوتنی هستند که تنها به فاصله بستگی دارند. نتایج عظیم مکانیك کلاسیك این فکر را به ما القا می‌کند که نگرش مکانیکی را می‌توان به صورت سازگار و منسجمی در تمام شاخه‌های فیزیك بکار بست، و همهٔ پدیده‌ها را می‌توان به وسیلهٔ نیروهای جاذبه یا دافعهٔ موجود میان ذرات تغییر ناپذیر، که فقط تابع فواصل این ذراتند، تبیین کرد.

در نظریهٔ جنبشی ماده دیده می‌شود که چگونه این نگرش، که از مسائل مکانیکی برخاسته است، پدیده‌های حرارتی را شامل می‌شود و چگونه به تصویر کارآمدی از ساختمان ماده می‌انجامد.

۲

انقراض نگرش مکانیکی

دوشارهٔ الکتریکی ـ شاره‌های مغناطیسی ـ نخستین اشکال جدی ـ سرعت نور ـ نور چون جوهری مادی ـ معمای رنگ ـ موج چیست؟ ـ نظریهٔ موجی نور ـ موج نور طولی است یا عرضی؟ اثیر و نگرش مکانیکی.

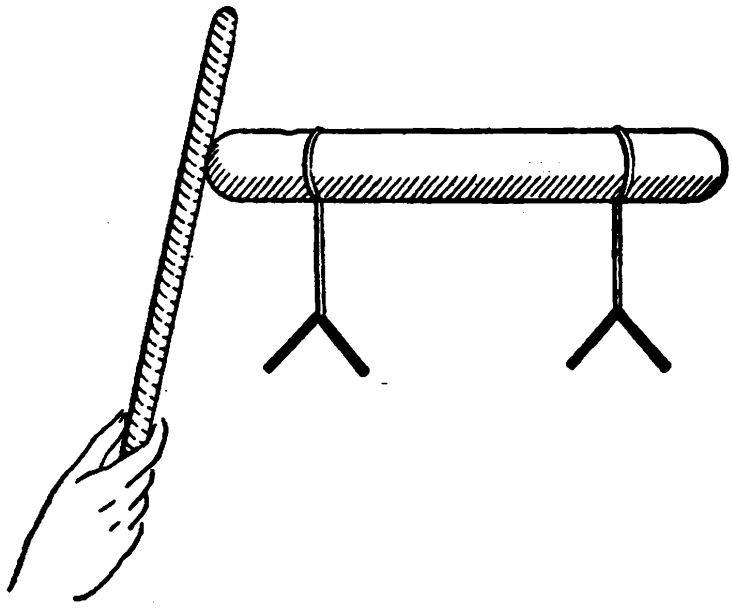
دوشارهٔ الکتریکی

در صفحات آینده به شرح بیروح چند آزمایش ساده می‌پردازیم. این شرح تنها از آن جهت خسته‌کننده نیست‌که توصیف آزمایشها در مقایسهٔ با اجرای عملی آنها جلب توجه نمی‌کند، بلکه معنی آزمایشها نیز تا موقعی که نظریه آن را روشن نسازد، آشکار نیست. قصد ما آن است که مثال برجسته‌ای از نقش نظریه در فیزیك بدست داده باشیم.

۱. میله‌ای فلزی بر پایه‌های بلوری قرار دارد و هریك از دو سر میله با سیمی به یك الکترسکپ متصل است. الکترسکپ چیست؟ اسباب ساده‌ای است که در آن دو ورقهٔ طلا از قطعه فلز کوتاهی آویخته شده‌اند، و مجموع را در داخل یك ظرف شیشه‌ای جا داده‌اند، و فلز در داخل فقط به اجسام غیر فلزی به‌نام عایق متصل است. علاوه بر میلهٔ فلزی و الکترسکپ، یك میلهٔ کائوچوئی سخت و یك قطعه پارچهٔ پشمی هم در اختیار ماست.

آزمایش را به طریق زیر انجام می‌دهیم: ابتدا نگاه می‌کنیم که آیا ورقه‌های طلا به هم چسبیده‌اند یا نه؛ زیرا این وضعی است که در حال عادی باید داشته باشند. اگر تصادفاً چنین نباشد، به مجرد تماس انگشت با میلهٔ فلزی، ورقه‌ها به حال عادی خود در می‌آیند. پس از انجام این کارهای مقدماتی، میلهٔ کائوچو را با پارچهٔ پشمی بشدت مالش می‌دهیم و

سپس به میلهٔ فلزی متصل می‌کنیم. یك مرتبه ورقه‌های طلا از هم باز می شوند! حتی پس از آنکه میلهٔ کائوچو را هم از آن دور کنیم، باز ورقه‌ها



از یکدیگر جدا می‌مانند.

۲. آزمایش دوم را با همان وسیله انجام می‌دهیم. این‌بار هم‌آزمایش را از وضعی شروع می‌کنیم که در آن ورقه‌های طلا نزدیك یکدیگر باشند. منتها این دفعه میلهٔ کائوچوئی مالش داده را به میلهٔ فلزی نمی‌چسبانیم بلکه آن را فقط نزدیك میله نگاه می‌داریم. باز هم ورقه‌ها از یکدیگر جدا می‌شوند، ولی با یك اختلاف! اگر میلهٔ کائوچوئی را، بدون تماس با فلز، از آن دور کنیم، ورقه‌های طلا از هم جدا نمی‌مانند و بیدرنگ به حال عادی بر می‌گردند.

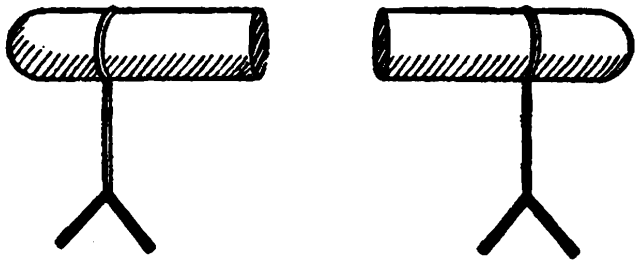
۳. برای آزمایش سوم دستگاه را اندکی تغییر می‌دهیم. میلهٔ فلزی را دوتکه انتخاب می‌کنیم که به هم متصل شده باشند. میلهٔ کائوچوئی را مالش می‌دهیم و مجدداً به فلز نزدیك می‌کنیم. باز ورقه‌های طلا از هم باز می‌شوند. ولی این بار پیش از آنکه میلهٔ کائوچوئی را دور سازیم دو تکهٔ میلهٔ فلزی را از هم جدا می‌کنیم، و سپس میلهٔ کائوچو را دور می‌سازیم، مشاهده می‌کنیم که دیگر مثل آزمایش دوم ورقه‌های طلا به وضع عادی بر نمی‌گردند و از هم جدا می‌مانند.

با این آزمایشهای ساده ومحقر نمی‌توان اشتیاق کسی را برانگیخت.

در قرون وسطی شاید کسی که به این آزمایشها دست می‌زد، محکوم شناخته می‌شد. از نظر ما، هم این عدم توجه و هم آن نظر قرون وسطائی، هر دو غیرمنطقی است. فقط با یك بار خواندن این شرح، بدشواری می‌توان این آزمایشها را تکرار کرد و گیج نشد. اطلاع مختصری از نظریهٔ آنها، آزمایشها را قابل فهم می‌سازد. می‌توان از این پیشتر رفت و گفت: نمی توان تصور کرد که بدون وجود تصوّر کم و بیش مشخصی از معنی این آزمایشها، بتوان آنها را به تصادف انجام داد.

اکنون به شرح اندیشه‌های بنیادی نظریهٔ حقیر و ساده‌ای می‌پردازیم که همهٔ حقایق فوق را می‌تواند توضیح دهد.

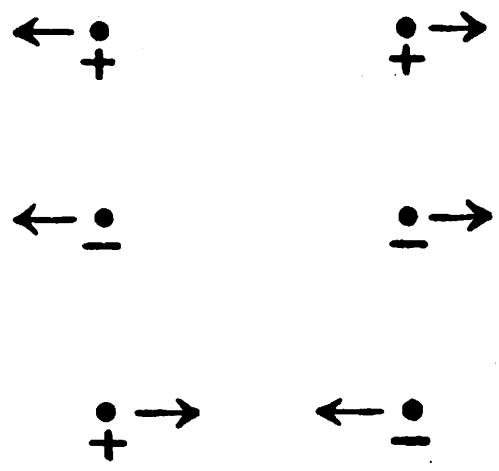
دو شارهٔ الکتریکی وجود دارند که یکی را مثبت (+) می‌نامند و دیگری را منفی (−). این شاره‌ها چیزهائی هستند شبیه جوهر مادی، به مفهومی که شرح داده شد؛ به این معنی که مقدار هریك از آنها کم یا زیاد می‌شود، ولی مقدار کلشان در هردستگاه مجزا همیشه ثابت می‌ماند. باوجود این یك فرق اساسی بین این جوهرهای مادی و حرارت، ماده یا انرژی، وجود دارد. عدهٔ جوهرهای مادی الکتریکی دوتا است. مقایسه‌ای راکه با پول کردیم نمی‌توان در اینجا بکار برد، مگرآنکه تا حدی‌آن را کلیت بخشیم.



جسم وقتی از نظر الکتریکی خنثی است که شاره‌های مثبت و منفی آن دقیقاً یکدیگر را از بین برده باشند. کسی که پول ندارد، یا حقیقتاً پولی ندارد و یا اینکه آنچه در تملك دارد درست به اندازهٔ قرض او است. به‌این ترتیب می‌توان ستون بدهکار و بستانکار را در دفتر دارائی او با دو نوع شارهٔ الکتریکی مقایسه کرد.

فرض دیگر این نظریه این است که دو شارهٔ الکتریکی همنوع، یکدیگر را می‌رانند، در حالی که دو شاره که نوعشان مختلف است یکدیگر

را جذب می‌کنند، و این نکته را با تصویر زیر می‌توان نمایش داد.
فرض نظری دیگری هم ضرورت دارد: اجسام بر دو دسته‌اند. یکی



آنها که شارهٔ الکتریکی به آزادی در آنها جریان می‌یابد و رسانا نامیده می‌شوند؛ دستهٔ دیگر اجسامی که شارهٔ الکتریکی براحتی از آنها عبور نمی‌کند، و آنها را نارسانا می‌نامند. ولی این مسأله را هم باید دانست که نباید این تقسیم‌بندی را خیلی جدی شمرد. رسانا یا نارسانای تمام عیار افسانه‌ای است که هرگز تحقق پیدا نمی‌کند. فلزات و زمین و بدن انسان همه مثالهائی از اجسام رسانا هستند که بعضی بهتر و بعضی بدترند، شیشه و کائوچو و چینی نارسانا هستند. هوا تا حدی نارساناست، و کسانی که آزمایشهای یاد شده را دیده باشند این گفته را درك می‌کنند. همیشه بهانهٔ خوبی است که نتایج بد آزمایشهای الکترواستاتیك را به رطوبت هوا نسبت داد که رسانائی هوا را زیادتر می‌کند.

این فرضهای نظری برای توضیح آزمایشهای فوق کفایت می‌کنند. ما به همان ترتیب دو مرتبه آنها را در پرتو نظریهٔ شاره‌های الکتریکی شرح می‌دهیم.

۱. میلهٔ کائوچوئی مثل همهٔ اجسام درحال عادی از لحاظ الکتریکی خنثی است. این میله محتوی دو شارهٔ مثبت و منفی است که به مقادیر متساوی در آن وجود دارند. چون آن را با پارچهٔ پشمی مالش دهیم این دو از یکدیگر جدا می‌شوند. این گفته صرفاً یك قرارداد است و با اصطلاحات این نظریه، عمل اصطکاك را بیان می‌کند. نوع الکتریسیتهٔ اضافی که در میله می‌ماند منفی نامیده می‌شود، و این نام هم صرفاً نتیجهٔ

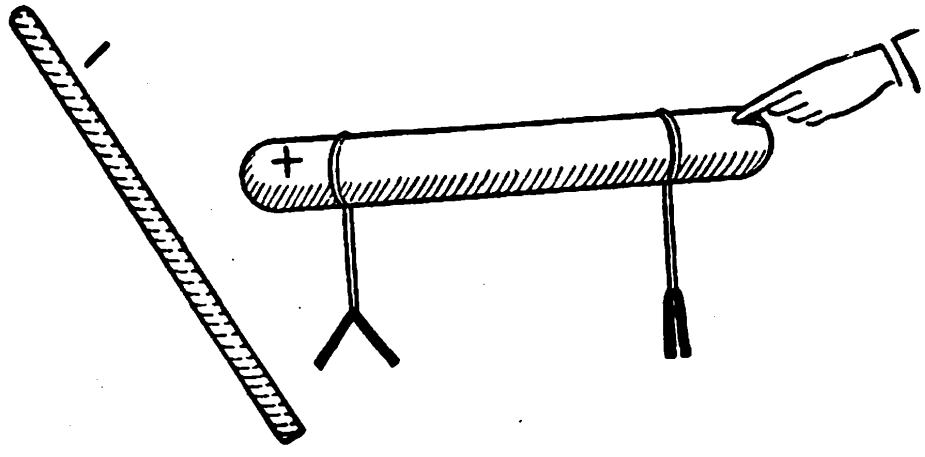
قرارداد است. اگر آزمایش را با میله‌ای شیشه‌ای که با پوست گربه مالش داده شده انجام می‌دادیم، برای موافقت با قرارداد پذیرفته شده، نام نوع الکتریسیتهٔ اضافی را مثبت می‌گذاشتیم. آزمایش را ادامه می‌دهیم و شارهٔ الکتریکی را از طریق تماس میلهٔ کائوچو با رسانای فلزی، داخل آن می کنیم. شاره در فلز به آزادی حرکت می‌کند و در همه جای آن و از جمله ورقه‌های طلای الکترسکپ پخش می‌شود. چون اثر منفی بر منفی اثری دفعی است، ورقه‌های طلا تا جائی‌که ممکن است از هم دور می‌شوند. چون میلهٔ فلزی بر شیشه یا نارسانای دیگری تکیه دارد، تا موقعی که رسانائی هوا اجازه بدهد الکتریسیته در جسم رسانا باقی می‌ماند. اکنون خوب می‌فهمیم که چرا باید پس از آزمایش انگشت را به میلهٔ فلزی بچسبانیم. در این صورت فلز و بدن انسان و زمین یك جسم رسانای بسیار بزرگ را تشکیل می‌دهند و شارهٔ الکتریکی به قدری رقیق می‌شود که عملاً و محسوساً چیزی از آن در الکترسکپ باقی نمی‌ماند.

۲. این آزمایش نیز درست به همان صورت آزمایش قبل شروع می شود. تنها فرقی که دارد این است که میلهٔ کائوچوئی عوض چسبیدن به میلهٔ فلزی، نزدیك آن نگاه داشته می‌شود. دو شارهٔ داخل رسانا که در حرکت کردن آزادند، از هم جدا می‌شوند، زیرا یکی جذب می‌شود و دیگری دفع می‌گردد. هنگامی‌که میلهٔ کائوچوئی دور شود، دو شاره مجدداً مخلوط می‌شوند، زیرا شاره‌های غیر همنوع یکدیگر را حذب می‌کنند.

۳. حال دو تکه میلهٔ فلزی‌را، پیش از دورکردن میلهٔ کائوچوئی، از هم جدا می‌کنیم. دیگر دو شاره نمی‌توانند با هم مخلوط شوند، و ورقه‌های طلا که دارای شارهٔ الکتریکی از نوع واحدی هستند از هم جدا می‌مانند.

در پرتو این نظریهٔ ساده تمام حقایقی که ذکر کردیم قابل فهم می شوند. این نظریه نه‌تنها درك این حقایق، بلکه فهم بسیاری از واقعیاتی را که درقلمرو الکترواستاتیك اتفاق می‌افتند ممکن می‌سازد. هدف از وضع هر نظریه آن است که ما را به حقایق جدید هدایت کند، آزمایشهای تازه‌ای را پیشنهاد کند و به کشف پدیده‌ها و قوانین تازه بینجامد. برای اینکه مطلب واضحتر شود مثالی می‌زنیم. در آزمایش دوم تغییری داده می‌شود. فرض کنید که میلهٔ کائوچوئی هنوز نزدیك یك میلهٔ فلزی است و

من انگشت خود را به میلهٔ رسانا می‌چسبانم. چه اتفاقی خواهد افتاد؟ جوابی که نظریه می‌دهد این است: شارهٔ دفع شده (—) از راه بدن فرار می‌کند، و فقط یك شاره یعنی شارهٔ مثبت باقی می‌ماند؛ و فقط ورقه‌های



الکترسکپی که نزدیك به میلهٔ کائوچوئی است از هم دور می‌ایستند. آزمایش واقعی هم این پیش‌بینی را تأیید می‌کند.

نظریه‌ای که مورد بحث است، یقیناً از دیدگاه فیزیك جدید ساده‌نگر و ناکافی است، ولی برای نشان دادن ویژگیهای هر نظریهٔ فیزیکی نمونهٔ بسیار خوبی بشمار می‌رود.

در علم هیچ نظریهٔ جاودانی وجود ندارد. همیشه اتفاق می‌افتد که بعضی از واقعیاتی که نظریه‌ای پیش‌بینی می‌کند به وسیلهٔ آزمایش رد می شود. هر نظریه‌ای یك دورهٔ رشد تدریجی و پیروزی دارد، که پس از آن دچار انحطاط سریع می‌شود. پیدایش و انقراض نظریهٔ جوهری گرما، که قبلاً بحث شد، یك نمونه است. مثالهای مهمتر و عمقی‌تر را بعداً مورد بحث قرار خواهیم داد. تقریباً هر پیشرفت بزرگی که در علم صورت می پذیرد نتیجهٔ بحرانی است که در ضمن تلاش برای حل مشکلات موجود، در نظریه‌های قدیمی پدیدار می‌گردد. افکار قدیمی و نظریه‌های کهنه را، با وجود آنکه متعلق به گذشته‌اند، باید مطالعه کرد. زیرا تنها راه درك اهمیت نظریه‌های جدید و پی‌بردن به وسعت میدان اعتبار آنها همین است.

در صفحات اول این کتاب کار محقق را با عمل کارآگاهی مقایسه کردیم، که پس از جمع‌آوری اسناد لازم تنها با تفکر، جواب درست را پیدا می‌کند. ولی این مقایسه را از یك جنبهٔ اصلی باید بسیارسطحی شمرد.

در زندگی و در داستانهای کارآگاهی جنایت مشخص است. کارآگاه به جست و جوی نامه‌ها، اثرهای انگشت و گلوله‌ها و اسلحه‌ها می‌پردازد. ولی اقلاً این را می‌داند که قتلی اتفاق افتاده است. کار اهل علم چنین نیست. می‌توانید پیش خود شخصی را تصور کنید که از الکتریسیته هیچ نمی‌داند. پیشینیان هم به خوشی زندگی می‌کردند و اطلاعی هم از الکتریسیته نداشتند. فلز، بطری، ورقهٔ طلا، میلهٔ کائوچوئی، پارچهٔ پشمی و به طور خلاصه تمام مصالح لازم برای انجام این سه آزمایش را در اختیار این شخص بگذارید. ممکن است او مرد با فرهنگی باشد. اما او احتمالاً در بطری شراب خواهد ریخت، یا پارچهٔ پشمی را برای تمیزکردن بکار خواهد برد. ولی هرگز به فکر او خطور نمی‌کند که با این مواد کارهائی را بکند که ما شرح دادیم. کارآگاه می‌داندکه جنایت اتفاق افتاده است، مسأله مشخص است: قاتل حسن کیست؟ دانشمند باید دست‌کم قسمتی از جنایت را خود مرتکب شود، و سپس خودش هم به تجسس بپردازد. بعلاوه وظیفه‌اش به توضیح یك قضیه ختم نمی‌شود، بلکه باید فکر همهٔ پدیده‌هائی راکه اتفاق افتاده‌اند یا ممکن است بعداً اتفاق بیفتند، بکند.

با طرح مفهوم شاره‌ها متوجه تأثیر آن افکار مکانیکیی می‌شویم که می‌خواهند همه چیز را به کمك جوهرهای مادی و نیروهائی که بین آنها کارگر می‌افتد، حل و فصل کنند. برای اینکه بدانیم آیا دیدگاه مکانیکی را می‌توان در توضیح پدیده‌های الکتریکی بکار برد، باید به مسألهٔ زیر توجه کنیم: دو کرهٔ کوچك داریم که هر دو بار الکتریکی دارند، یعنی هر دو دارای مقداری اضافی از یك شارهٔ الکتریکی هستند. می‌دانیم که این دو کره یا یکدیگر را جذب می‌کنند و یا دفع. ولی آیا نیروی جذب یا دفع تنها به فاصلهٔ آنها بستگی دارد؟ و اگر چنین است، این بستگی چگونه است؟

ساده‌ترین حدس آن است‌که بستگی این نیرو به فاصله مانند نیروی گرانش است که فی‌المثل چون فاصله سه برابر شود شدت نیرو ۹ برابر کاهش یابد. آزمایشهائی که به توسط کولن[1] انجام شد صحت این قانون را

1. Coulomb

نشان داد. یکصد سال پس از آنکه نیوتن قانون گرانش را کشف کرد، کولن نیز رابطهٔ مشابهی را برای نیروی الکتریکی بدست آورد. دو اختلاف عمده میان قانون نیوتن و قانون کولن وجود دارد: جاذبهٔ گرانشی همیشه حاضر و ناظر است، در صورتی‌که نیروی الکتریکی تنها هنگامی وجود دارد که اجسام بار الکتریکی داشته باشند. در مورد گرانش تنها جاذبه وجود دارد، در صورتی‌که نیروهای الکتریکی یا جذب می‌کنند و یا دفع.

در اینجا همان سؤالی، که در ارتباط با حرارت مطرح شد، پیش می آید. آیا شاره‌های الکتریکی جوهرهای مادی بی‌وزنی هستند یا نه؟ به عبارت دیگر آیا وزن یك قطعه فلز وقتی که خنثی است با وزن آن در هنگامی‌که بار الکتریکی دارد برابر است؟ ترازوهای ما اختلافی را نشان نمی‌دهند. نتیجه می‌گیریم که شاره‌های الکتریکی نیز از اعضای خانوادهٔ جوهرهای بی‌وزنند.

پیشرفت بیشتری در نظریهٔ الکتریسیته دو مفهوم جدید را وارد میدان می‌کند. بار دیگر ازتعریفهای دقیق احتراز می‌جوئیم و به مفاهیمی، نظیر مفاهیمی‌که برایمان آشنا است، متوسل می‌شویم. بیاد آوریم‌که برای فهم پدیده‌های گرمائی تمیز میان گرما و دما امری بسیار اساسی بود. در اینجا نیز تشخیص پتانسیل الکتریکی از بار الکتریکی کمال ضرورت را دارد. اختلاف میان این دو مفهوم از راه مقایسهٔ زیر آشکار می‌شود:

پتانسیل الکتریکی — دما
بار الکتریکی — گرما

دو جسم رسانا، مثلاً دو گوی با اندازه‌های متفاوت، ممکن است بار الکتریکی برابر داشته باشند، یعنی فزونی یك نوع شارهٔ الکتریکی در هر دوتای آنها یکی باشد، ولی پتانسیلهای آنها یکسان نخواهند بود. پتانسیل گوی کوچکتر بیشتر و از آن گوی بزرگتر کمتر است. چگالی شارهٔ الکتریکی روی گوی کوچکتر بیشتر و در نتیجه شارهٔ الکتریکی در آن متراکمتر است. چون نیروهای دافعه با افزایش چگالی زیاد می‌شوند،

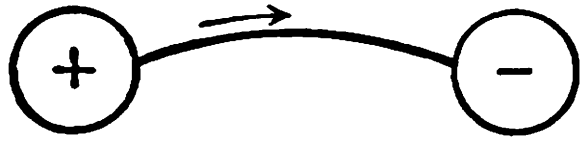
میل بار الکتریکی به فرار در گوی کوچکتر بیش از گوی بزرگ، خواهد بود. این میل فرار بار از جسم رسانا مقیاس مستقیم پتانسیل آن است. برای اینکه اختلاف میان بار و پتانسیل بهتر آشکار شود، عباراتی چند را که مبین رفتار اجسام گرما دیده هستند می‌آوریم و در مقابل رفتار نظیر را در رساناهای باردار می‌نویسیم.

گرما	الکتریسیته
دو جسم که در ابتدا دمایشان متفاوت است، چون در تماس بایکدیگر قرار گیرند، پس از مدتی دارای یك دما می‌شوند.	دو جسم رسانای عایق بندی شده که بدواً پتانسیلهای مختلف دارند، چون در تماس با یکدیگر قرار گیرند، سریعاً دارای پتانسیل واحدی می‌شوند.
چون مقادیر متساوی گرما به اجسامی که ظرفیت گرمائی مختلف دارند داده شود، تغییرات دما در آنها متفاوت خواهد بود.	چون مقادیر متساوی الکتریسیته به اجسامی داده شود که ظرفیت الکتریکی آنها مساوی هم نباشد، پتانسیلهای این اجسام با یکدیگر متفاوت خواهد شد.
چون دماسنجی در تماس با جسمی قرار گیرد، با طول ستون جیوه، دمای خود را و از آن رو دمای جسم را نشان می‌دهد.	چون الکترسکپی را به‌جسم رسانا متصل کنیم، از میزان جدائی ورقه‌های طلا پتانسیل الکترسکپ، و از آن رو پتانسیل جسم رسانا بدست می‌آید.

ولی در ادامهٔ این مقایسه باید جانب احتیاط را رعایت کرد. با آوردن یك مثال نقاط اختلاف و مشابهت را روشن می‌کنیم. اگر جسم گرمی با جسم سردی تماس حاصل کند، گرما از جسم گرمتر به جسم سردتر جاری می‌شود. از طرف دیگر فرض کنید که دو جسم رسانای عایق‌بندی شده داشته باشیم که بارهای مساوی ولی مخالف هم، یکی مثبت و دیگری منفی داشته باشند. پتانسیل این دو جسم با یکدیگر فرق می‌کند.

مطابق قرارداد پتانسیل مربوط به بار منفی را کمتر از پتانسیل مربوط به بار مثبت می‌گیریم. چون این دو جسم را با سیمی به یکدیگر متصل کنیم، بنا به نظریهٔ شاره‌های الکتریکی، هیچ یك وجود بار الکتریکی و در نتیجه اختلاف پتانسیل الکتریکی را نشان نخواهند داد. در مدت کوتاهی که اختلاف پتانسیل از میانه بر می‌خیزد، باید «جریان» بار الکتریکی را از یکی به دیگری تصور کنیم. این جریان چگونه است؟ آیا شارهٔ مثبت است که به جسم منفی می‌رود، یا شارهٔ منفی است که به جسم مثبت جاری می‌شود.

با اطلاعاتی که تاکنون داریم، هیچ مبنائی برای انتخاب یکی از دو شق در دست نیست. هر دو امکان را می‌توان پذیرفت یا می‌توان تصور کرد که جریان در آن واحد از دو طرف انجام می‌گیرد. چون از طریق آزمایش راهی برای اتخاذ تصمیم وجود ندارد، اهمیتی نمی‌توان برای هیچ یك از دو شق قائل شد و فقط باید قرارداد کرد. تحولاتی که به نظریهٔ بسیار بنیادی‌تری برای الکتریسیته انجامید، پاسخی برای این مسأله فراهم آورد که در قالب نظریهٔ ساده و ابتدائی شاره‌های الکتریکی کاملا بی‌معنی است. فعلاً طرز بیان زیر را می‌پذیریم: شارهٔ الکتریکی از رسانائی که پتانسیل آن بیشتر است به جسمی که پتانسیل آن کمتر است جریان می‌کند. در مورد دو جسم رسانای فوق الکتریسیته از مثبت به منفی می‌رود.



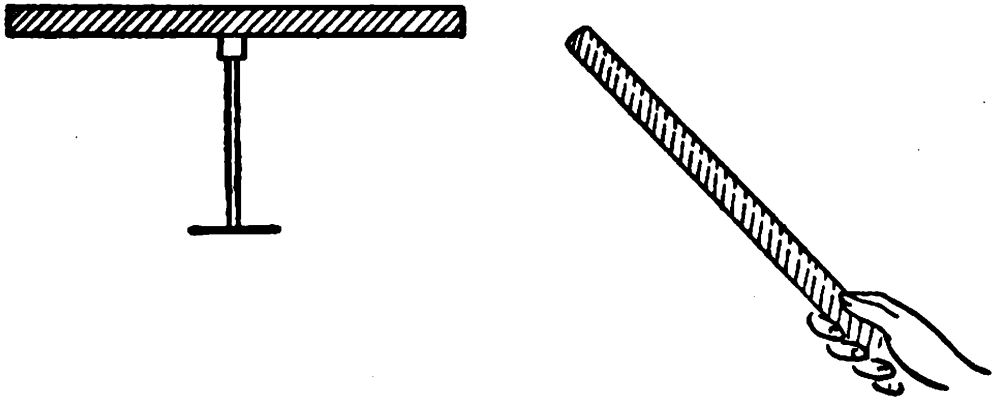
این طرز بیان، قراردادی و در این مرحله کاملاً من‌عندی است. از این اشکال بخوبی واضح می‌شود که مقایسهٔ بین گرما و الکتریسیته را به هیچ وجه نباید کامل شمرد.

امکان پذیرفتن نگرش مکانیکی را برای توجیه حقایق مقدماتی الکتریسیته ملاحظه کردیم. همین کار در مورد پدیده‌های مغناطیسی نیز امکان‌پذیر است.

شاره‌های مغناطیسی

در اینجا نیز مانند پیش، از حقایق ساده شروع می‌کنیم، و سپس به جست و جوی توضیح نظری آنها می‌پردازیم.

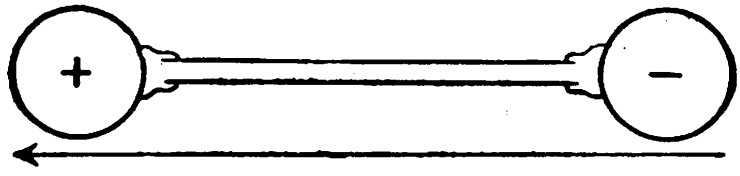
۱. دو آهنربای میله‌ای بلند داریم که یکی از آنها از وسط بر پایه‌ای قرار دارد و آزادانه می‌تواند حرکت کند، و میلهٔ دیگر را بدست گرفته‌ایم. سرهای این دو مغناطیس را به قسمی به یکدیگر نزدیک می‌کنیم که جاذبهٔ شدیدی بین آن دو حس می‌شود. این کار را همیشه می‌توان کرد. اگر جاذبه‌ای ملاحظه نشود کافی است که سر دیگر آهنربائی را که در دست داریم امتحان کنیم. اگر میله‌ها مغناطیده باشند حتماً اتفاقی روی خواهد داد. دو سر آهنربا را قطب‌های آن می‌نامند. در ادامهٔ آزمایش قطب آهنربائی را که بدست گرفته‌ایم در طول آهنربای آزاد حرکت می‌دهیم. کاهشی در جاذبه مشهود می‌گردد، و هنگامی که این قطب به وسط آهنربای آزاد می‌رسد هیچ نیروئی مشاهده نمی‌شود. اگر قطب را در همان امتداد حرکت دهیم، دافعه‌ای مشهود می‌افتد که رفته رفته زیادتر می‌شود و منتهای شدت آن در قطب دیگر آهنرباست.



۲. این آزمایش ما را به فکر آزمایش دیگری می‌اندازد. هر آهنربا دو قطب دارد. آیا می‌شود یکی از این دو قطب را جدا کرد. چیز ساده‌ای که بخاطر می‌رسد این است که آهنربا را از وسط بشکنیم. همان طور که دیدیم نیروئی میان قطب یك آهنربا و وسط آهنربای دیگر کارگر نیست. ولی نتیجه‌ای که از شکستن آهنربا بدست می‌آید مایهٔ شگفتی و غیر منتظر است. اگر آزمایش (۱) را با نصفهٔ آهنربا تکرار کنیم، نتایج همان

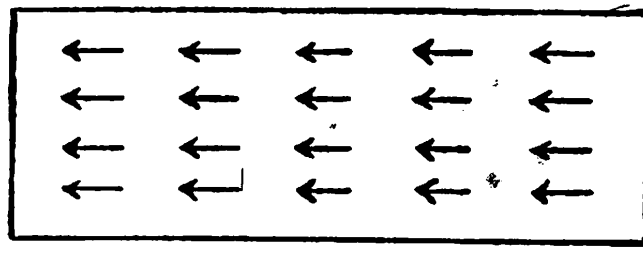
خواهند بود! یعنی در جائی که سابقاً اثری از نیروی مغناطیسی دیده نمی‌شد، اینك قطب نیرومندی وجود دارد.

این حقایق را چگونه می‌توان تعلیل کرد؟ می‌توان به تقلید از نظریهٔ شاره‌های الکتریکی نظریه‌ای هم برای مغناطیس ساخت. زیرا همان طور که در الکترواستاتیك جاذبه و دافعه داشتیم در اینجا هم داریم. دو رسانای کروی را تصور کنید که دارای بارهای الکتریکی مساوی، منتها یکی مثبت و دیگری منفی، باشند. مقصود از «مساوی» این است که قدر مطلق آنها یکی است، مثلا ۵ + و ۵ − دارای قدر مطلق مساوی هستند. می‌شود فرض کرد که میله‌ای نارسانا مثل شیشه این دو گلوله را به یکدیگر اتصال داده باشد. این مجموعه را می‌توان با پیکانی که از رسانای منفی به رسانای مثبت ممتد باشد نمایش داد. تمام این مجموع را دو قطبی الکتریکی می‌نامیم. واضح است که دوتا از این دو قطبیها کاملاً مانند



آهنرباهای میله‌ای آزمایش (۱) رفتار می‌کنند. اگر این دستگاه اختراعی را مدلی برای آهنربای واقعی بشماریم، و وجود شاره‌های مغناطیسی را بپذیریم، ممکن است بگوئیم که هر آهنربا چیزی جز یك دو قطبی مغناطیسی نیست که در دو انتهای آن دو شارهٔ مغناطیسی متفاوت وجود دارد. این نظریهٔ ساده، که از نظریهٔ شاره‌های الکتریکی تقلید شده است، برای توضیح آزمایش (۱) کفایت می‌کند. در یك سر آن جاذبه و در سر دیگر دافعه وجود دارد و در وسط هم نیروهای برابر و مخالف موازنه می‌کنند. آزمایش دوم چه می‌شود؟ اگر میلهٔ شیشه‌ای را از وسط بشکنیم دو قطب جدا از هم بدست می‌آوریم. همین هم باید در مورد میلهٔ آهنی دو قطبی مغناطیسی روی دهد، در صورتی که نتایج آزمایش دوم خلاف این بود. این تناقض ما را مجبور می‌کند که نظریهٔ ظریفتری بپردازیم. به جای مدل سابق، می‌توان چنین فرض کرد که هر آهنربا از دو قطبیهای مغناطیسی بسیار کوچکی ساخته شده که شکستن آنها و جدا کردن قطبین آنها غیر

ممکن است. در تمام آهنربا نظم حکمفرماست، زیرا این دو قطبیهای بنیادی همه در یك امتداد واقع شده‌اند. بیدرنگ می‌توان فهمید که چرا هنگامی که یك مغناطیس از وسط شکسته می‌شود قطبهای جدیدی در دوسر آهنرباها



پدیدار می‌گردد؛ و چرا این نظریهٔ دستکاری شده حقایق آزمایشهای (۱) و (۲) را توضیح می‌کند.

برای توضیح بسیاری از حقایق همان نظریهٔ ساده‌تر کفایت می‌کند، و اصلاح ضرورت ندارد. می‌دانیم که آهنربا قطعات آهن را به خود جذب می‌کند. چرا؟ در یك قطعه آهن معمولی دو شارهٔ مغناطیسی با یکدیگر آمیخته‌اند. در نتیجه رویهمرفته اثری مشاهده نمی‌شود. چون قطب مثبتی به آهن نزدیك شود با جذب شارهٔ منفی و دفع شارهٔ مثبت «فرمان تفکیك» را به شاره‌های مغناطیسی صادر می‌کند. جاذبهٔ میان میلهٔ آهنربا و آهن نتیجه می‌شود. هنگامی که آهنربا دور شود شاره‌ها، بسته به آنکه تا چه حد فرمان نیروی خارجی را بخاطر می‌سپرند، کم و بیش به حال اول خود باز می‌گردند.

خوب است کمی هم در جنبهٔ کمی مسأله صحبت شود. هرگاه دو میلهٔ مغناطیدهٔ بلند داشته باشیم، می‌توانیم در جاذبهٔ (یا دافعهٔ) میان قطبهای آن دو، وقتی که به یکدیگر نزدیك شوند، تحقیق کنیم. در صورتی که میله‌ها به قدر کافی بلند باشند از اثر قطبهای دیگر می‌توان صرف‌نظر کرد. بستگی جاذبه یا دافعهٔ میان قطبها به فاصله به چه صورت است؟ جواب آزمایش کولن این است که این بستگی به فاصله، همان شکل قانون گرانش نیوتن یا قانون الکترواستاتیك کولن را دارد.

در این نظریه بازهم کاربست دیدگاه عامی را مشاهده می‌کنیم و آن گرایش به توضیح پدیده‌ها از طریق نیروهای جاذب یا دافعی است که به فاصله بستگی دارند و میان ذرات تغییر ناپذیر مؤثر می‌افتند.

در اینجا لازم است که به واقعیت معروفی اشاره شود، که بعداً از آن استفاده خواهیم کرد: زمین دو قطبی مغناطیسی بزرگی است. البته توضیحی در اختیار نداریم که چرا چنین است. قطب شمال زمین تقریباً قطب منفی (−) و قطب جنوب، قطب مثبت (+) آن است. نامهای مثبت و منفی کاملاً قراردادی هستند، ولی پس از آنکه انتخاب شدند، تشخیص قطبها را در موارد دیگر میسر می‌سازند. عقربهٔ مغناطیسی، که بر محور قائمی قرار دارد، تحت فرمان نیروی مغناطیسی زمین است، و قطب (+) آن متوجه قطب شمال یعنی به سمت قطب مغناطیسی (−) زمین می‌باشد.

با وجود این که می‌توان نگرش مکانیکی را به وجهی سازگار در حوزهٔ پدیده‌های الکتریکی و مغناطیسی بکار برد، معذلك نباید نسبت به آن تعصب یا علاقه بخرج داد. زیرا برخی از جنبه‌های آن، اگر مایهٔ ناامیدی نباشند، مسلماً رضایت‌بخش هم نیستند. ناچار شده‌ایم جوهرهای مادی نوع جدیدی اختراع کنیم: دو شارهٔ الکتریکی و دوقطبیهای مغناطیسی بنیادی. اینك اندك اندك در کثرت جوهرهای مادی غرق می‌شویم.

نیروها بسیار ساده هستند. نیروهای گرانشی، الکتریکی و مغناطیسی همه به صورت واحدی بیان می‌شوند. ولی تاوان این سادگی گران تمام می‌شود، و آن توسل به جوهرهای مادی بی‌وزن جدید است. این جوهرهای مادی مفاهیمی کم و بیش ساختگی هستند که هیچ گونه ارتباطی با جوهر بنیادی جرم ندارند.

نخستین اشکال جدی

اکنون به جایی رسیده‌ایم که به نخستین اشکال بزرگ در کاربست نظرگاه عام فلسفی خود اشاره کنیم. بعداً خواهیم دید که این اشکال، همراه با اشکالی مهمتر، بر این اعتقاد که تمام پدیده‌ها را می‌توان به شکل مکانیکی تعلیل کرد خط بطلان کشید.

ترقی شگرف الکتریسیته، به مثابهٔ شاخه‌ای از علم و فن، با کشف جریان الکتریکی آغاز شد. در اینجا به یکی از موارد معدود در تاریخ علم

بر می‌خوریم که در آن تصادف نقش مهمی را بازی کرده است. داستان انقباض پای قورباغه را به اشکال مختلف نقل کرده‌اند. بدون توجه به درستی جزئیات این داستان، شکی نیست که اکتشاف تصادفی گالوانی[1] موجب شد که ولتا[2] در آخر قرن هجدهم چیزی را بسازد که به «باتری ولتا» معروف است البته باتری ولتا دیگر مورد استعمال زیادی ندارد، ولی هنوز در آزمایشهای مدرسه‌ای و در توضیحات کتابهای درسی مثال ساده‌ای از منبع جریان الکتریکی بشمار می‌رود.

اساس ساختمانی باتری ولتا ساده است: چندین ظرف شیشه‌ای است که در آنها آب با مقدار کمی جوهر گوگرد ریخته شده است. در هر ظرف دو صفحهٔ فلزی یکی از مس دیگری از روی، قرار دارد که در محلول غوطه‌ور شده‌اند. صفحهٔ مسی هر ظرف به صفحهٔ رویین ظرف دیگر متصل است، به قسمی که در آخر کار صفحهٔ رویین ظرف اول و صفحهٔ مسی ظرف آخر آزاد می‌مانند؛ در صورتی که تعداد اجزاء، یعنی ظرفهای شیشه‌ای، به اندازهٔ کافی زیاد باشد، به وسیلهٔ الکترسکپ دقیقی می‌توان اختلاف پتانسیل میان مس شیشهٔ اول و روی شیشهٔ آخر را مشاهده کرد.

غرض از تعبیهٔ باترئی که از چندین جزء تشکیل شده، این است که به کمك دستگاهی که شرح داده شد چیزی بدست آوریم که بسهولت قابل اندازه‌گیری باشد. بنابر این از نظر توضیحات بعدی، یك ظرف شیشه‌ای هم کافی خواهد بود. پتانسیل مس از پتانسیل روی بیشتر است، و مقصود از «بیشتر» در اینجا همان است که از بزرگتر بودن ۲ + از ۲ − منظور می‌شود. اگر رسانائی را به صفحهٔ مس متصل کنیم و رسانای دیگری را به صفحهٔ روی ببندیم، هردوی آنها بار الکتریکی پیدا می‌کنند؛ اولی مثبت و دومی منفی می‌شود. تاکنون چیز تازه یا حیرت‌آوری اتفاق نیفتاده است و می‌توان سعی کرد که تصور قبلی خود از اختلاف پتانسیل را در اینجا بکار بست. قبلاً دیدیم که اگر دو جسم رسانا را، که با یکدیگر اختلاف پتانسیل دارند، با سیمی به هم متصل کنیم، این اختلاف پتانسیل به سرعت از بین می‌رود، بطوری که شارهٔ الکتریکی از یك

1. Galvani 2. Volta

رسانا به رسانای دیگر جاری می‌شود. این رویداد شبیه تعادل دما از طریق جاری شدن گرماست. ولی آیا در مورد باتری ولتا هم عمل به همین نحو انجام می‌گیرد؟ ولتا در گزارش خود نوشت که صفحه‌ها مانند رساناهائی عمل می‌کنند که:

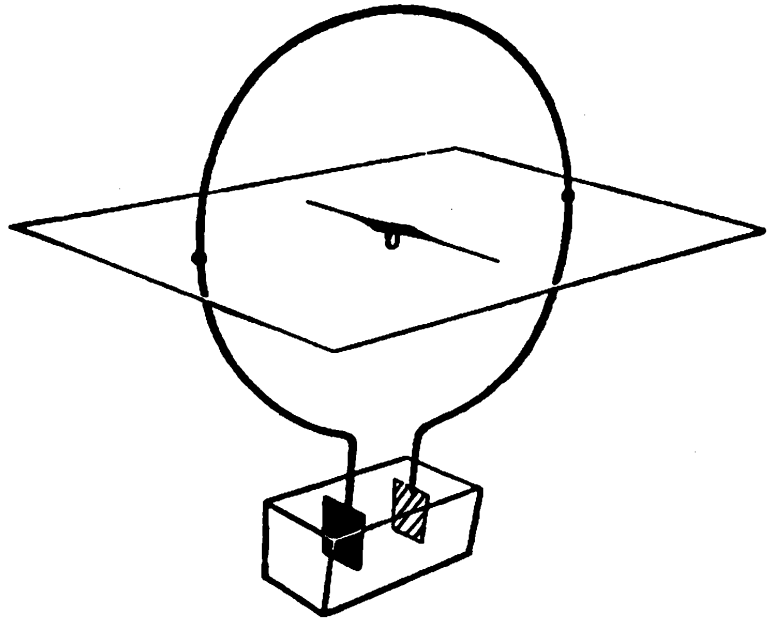
... اندکی بار الکتریکی دارند، ولی عمل آنها دائمی است، یا اینکه پس از هر تخلیه خود بخود بارشان تأمین می‌شود. خلاصه آن‌که باری تمام نشدنی فراهم می‌آورند و کنشی دائمی بر شارهٔ الکتریکی اعمال می‌کنند.

چیزی که در آزمایش ولتا مایهٔ تعجب می‌شود این است که اختلاف پتانسیل میان مس و روی، مانند مورد دو جسم رسانا با اتصال یك سیم از بین نمی‌رود، این اختلاف باقی می‌ماند و مطابق نظریهٔ شاره‌های الکتریکی سبب جریان دائمی شاره از پتانسیل بیشتر (صفحهٔ مس) به پتانسیل کمتر (صفحهٔ روی) می‌گردد. برای نجات نظریهٔ شاره‌ای می‌توان چنین اندیشید که نیروی ثابتی در کار است که اختلاف پتانسیل را ایجاد می‌کند و جریان شارهٔ الکتریکی را سبب می‌شود. ولی از لحاظ انرژی این پدیده، کاملاً حیرت آور است. در سیمی که جریان را منتقل می‌کند مقدار قابل ملاحظه‌ای گرما تولید می‌شود که اگر سیم به اندازهٔ کافی نازك باشد آن را آب می‌کند. پس در سیم انرژی گرمائی تولید می‌شود. اما باتری ولتا خود دستگاهی مجزاست و انرژی از خارج به آن نمی‌رسد. برای نجات قانون بقای انرژی باید ببینیم که تبدیل انرژی در کجا صورت می‌پذیرد و گرما به خرج چه چیزی تولید می‌شود. واضح است که در باتری فرایندهای شیمیائی صورت می‌گیرد. در این فرایندها هم صفحات روی و مس غوطه‌ور و هم مایع شرکت دارند. از لحاظ تولید انرژی زنجیره‌ای از تبدیلات انجام می‌پذیرد: انرژی شیمیائی ← انرژی جاری شدن شارهٔ الکتریکی یعنی جریان ← گرما. باتری ولتا دائمی نیست. فعل و انفعالات شیمیائی که با جریان الکتریسیته همراه می‌باشد پس از مدتی باتری را از کار می‌اندازد.

آزمایشی که عملاً اشکالات موجود در تطبیق اندیشه‌های مکانیکی را نشان داد، برای کسی که اولین بار آن را می‌شنود تعجب آور است. این آزمایش یکصد و بیست سال پیش به توسط ارشتد[1] انجام گرفت، و او خود چنین می‌گوید:

> از روی این آزمایشها ظاهراً ثابت شده است که دستگاه گالوانی، عقربهٔ مغناطیسی را بحرکت در می‌آورد، و برخلاف تلاشی که بعضی از فیزیکدانان برجسته در چند سال پیش بکار بستند، هنگامی عقربه حرکت می‌کند که مدار گالوانی بسته باشد نه این که باز باشد.

فرض کنیم یك باتری ولتا و یك سیم رسانا داشته باشیم، اگر سیم فقط به صفحهٔ مسی باتری متصل باشد نه به صفحهٔ رویین، اختلاف پتانسیل وجود خواهد داشت، ولی جریانی برقرار نمی‌شود. حال فرض کنیم سیم را به شکل دایره‌ای در آورده در مرکز آن عقربهٔ مغناطیسی را جا دهیم، بطوری که عقربه و سیم در یك صفحه باشند، تا زمانی که سیم با روی تماس حاصل نکند، هیچ واقعه‌ای روی نمی‌دهد. نیروئی وارد نمی‌شود و



اختلاف پتانسیل موجود تأثیری در مکان عقربه ندارد. تصور این نکته

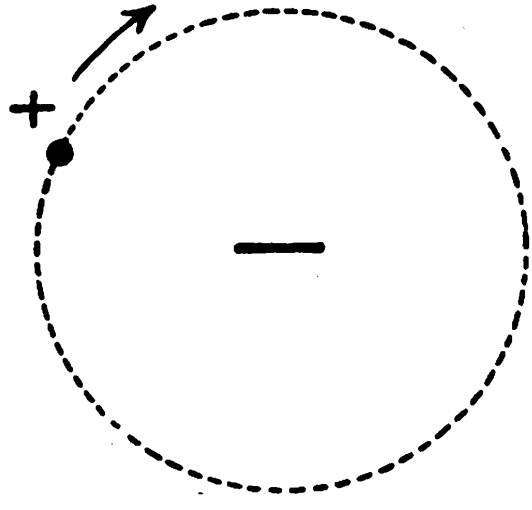
1. Oersted

خیلی مشکل است که چگونه کسانی که ارشتد آنان را «فیزیکدانان برجسته» می‌خواند، چنین اثری را متوقع بوده‌اند.

حال سیم را به صفحهٔ روی وصل می‌کنیم. بلافاصله امر عجیبی اتفاق می‌افتد. عقربهٔ مغناطیسی از وضع سابق خود منحرف می‌شود. اگر صفحهٔ کتاب معرف صفحهٔ دایره باشد، یکی از قطبهای آن به طرف خواننده متوجه می‌شود. حاصل آنکه نیروئی عمود بر صفحهٔ سیم بر قطب مغناطیسی وارد می‌آید. در مقابل حقایق آزمایش چاره‌ای نداریم جز این که امتداد نیرو را چنین تصور کنیم.

این آزمایش از دو نظر قابل توجه است: یکی این که رابطه‌ای را میان دو پدیدهٔ ظاهراً مختلف یعنی الکتریسیته و مغناطیس نشان می‌دهد. جنبهٔ دیگر از این هم مهمتر است. نیروی مؤثر میان قطب مغناطیسی و قسمت کوچکی از سیم، که شارهٔ الکتریکی در آن جریان می‌کند، در امتداد خط واصل سیم و قطب مغناطیسی یا در امتداد خطی که ذرات شارهٔ جاری الکتریکی را به دو قطبیهای مغناطیس جزئی متصل می‌کند، قرار ندارد. نیرو بر این امتداد عمود است! نخستین دفعه است که نیروئی ظاهر می‌شود متفاوت با چیزی که می‌خواستیم تمام کنشهای دنیای خارج را به آن تحویل کنیم. بخاطر داریم که نیروهای گرانش و الکترواستاتیك و مغناطیسی از قوانین نیوتن و کولن پیروی می‌کنند و در امتداد خط واصل میان اجسام جاذب یا دافع یکدیگر می‌باشند.

شصت سال پیش رولاند[1] با آزمایش ماهرانه‌ای این اشکال را واضحتر



1. Rowland

ساخت. چون از شرح جزئیات فنی آن چشم بپوشیم اساس آزمایش او به قرار زیر است: گوی باردار کوچکی را تصور کنید که بر دایره‌ای بسرعت حرکت می‌کند. در مرکز این دایره یك عقربهٔ مغناطیسی قرار دارد. این آزمایش اساساً همان آزمایش ارشتد است، با این تفاوت که به جای جریان معمولی، باری داریم که حرکتی مکانیکی دارد. رولاند مشاهده کرد که نتیجهٔ عمل عیناً مشابه با وقتی است که جریانی در سیم مستدیر داشته باشیم، و عقربه تحت تأثیر نیروئی عمود بر سطح حرکت منحرف می‌شود.

حرکت گوی را سریعتر می‌کنیم، در نتیجه نیروی وارد بر عقربه افزایش می‌پذیرد. انحراف عقربه واضحتر می‌گردد. این مشاهده، اشکال مهم دیگری را پیش می‌آورد. نه تنها نیرو در امتداد خط واصل بار و آهنربا نیست، بلکه شدت آن نیز تابع سرعت بار است. نگرش مکانیکی رویهمرفته مبتنی بر این نظر بود که همهٔ پدیده‌ها را می‌توان بر حسب نیروهائی تبیین کرد که تنها به فاصله بستگی دارند نه به سرعت، نتیجهٔ آزمایش رولاند مسلماً این اعتقاد را سست می‌کند. مع‌ذلك می‌توان محافظه کار بود و به دنبال راه حلی در چارچوب افکار کهنه برآمد.

از این قبیل اشکالات و موانعی که به طور ناگهانی و غیر منتظر در سیر فاتحانهٔ یك نظریه پیش می‌آید، در علم بسیار دیده شده است. گاهی اوقات بنظر می‌رسد که تعمیم ساده‌ای از افکار قدیمی، دست کم به طور موقت، چاره ساز است. فی‌المثل در مورد حاضر ممکن است تصور شود که با بسط نظرگاه پیشین و داخل کردن نیروهائی عمومیتر میان ذرات مسأله حل شود. ولی چه بسا که وصله کردن نظریهٔ قدیمی غیر ممکن باشد، و اشکالات موجب سقوط آن و پیدایش نظریه‌ای تازه شود. در اینجا تنها رفتار عقربهٔ کوچك مغناطیسی نبود که باعث سقوط نظریه‌های ظاهراً باثبات و بارور مکانیکی شد. ضربهٔ شدیدتر از ناحیهٔ دیگری بر آن وارد آمد. اما این داستان دیگری است که بعداً نقل خواهیم کرد.

سرعت نور

در کتاب دو علم جدید گالیله، گفتگوئی میان استاد و شاگردانش در بارهٔ سرعت نور دیده می‌شود:

ساگردو: اما سرعت نور از چه نوع است و چه اندازه باید باشد؟ آیا فوری و بی‌وقفه است یا چون حرکتهای دیگر به زمان نیازمند است؟
سیمپلیچیو: تجربهٔ روزانه نشان می‌دهد که انتشار نور فوری است، چه هنگاهی که شلیك تفنگی را از دور نگاه می‌کنیم، جرقهٔ آن بدون گذشت زمان به چشم ما می‌رسد، در صورتی که صوت آن پس از مدت قابل ملاحظه‌ای شنیده می‌شود.
ساگردو: بسیار خوب آقای سیمپلیچیو، تنها نتیجه‌ای که از این تجربهٔ مأنوس می‌توانم بگیرم این است که صوت در راه رسیدن به گوش کندتر از نور حرکت می‌کند: این تجربه نمی‌گوید که آیا نور بی وقفه منتشر می‌شود یا اینکه با وجود سرعت فوق‌العاده زیاد، به زمان احتیاج دارد.
سالویاتی: چون این تجربه و مشاهدات نظیر آن چندان قطعی نبودند به این فکر افتادم که روشی ابداع کنم که با آن بتوان یقین حاصل کرد که آیا انتشار نور براستی آنی و فوری است یا...

سالویاتی سپس به شرح روش آزمایش خود می‌پردازد. برای این‌که بهتر با فکر او آشنا شویم، خوب است چنین فرض کنیم که سرعت نور نه فقط متناهی بلکه کوچك نیز هست، یعنی همان طور که گهگاه در فیلمهای سینما حرکات را کند می‌کنند، سرعت نور را کند شده فرض می‌کنیم. دو شخص الف و ب هر کدام در دست خود فانوس روپوشیده‌ای دارند و در فاصلهٔ یك کیلومتری یکدیگر ایستاده‌اند. شخص الف روپوش فانوس خود را برمی‌دارد. قرار بر این است که ب به محض رؤیت روشنائی فانوس الف، فانوس خود را آشکار سازد. فرض کنید که در «حرکت کند شده»، نور فقط در هر ثانیه یك کیلومتر طی مسافت کند. الف با برداشتن روپوش فانوس، علامتی می‌فرستد. ب پس از یك ثانیه آن را می‌بیند و در پاسخ علامت می‌دهد. این علامت را الف دو ثانیه پس از فرستادن علامت خود رؤیت می‌کند. به عبارت دیگر اگر نور در هر ثانیه یك کیلومتر بپیماید و فاصلهٔ الف و ب یك کیلومتر باشد، مدت زمانی که میان ارسال و دریافت علامت توسط الف، طول می‌کشد برابر دو ثانیه خواهد بود. برعکس اگر الف سرعت نور را نداند ولی فرض کند که رفیقش قرار را مراعات خواهد کرد،

هرگاه دو ثانیه پس از برداشتن روپوش از فانوس خود، نور فانوس ب را دریافت کند، می‌تواند نتیجه بگیرد که سرعت انتشار نور یك کیلومتر در ثانیه است.

البته با وسایل آزمایشی که آن روزها در اختیار گالیله بود، او شانس چندانی برای تعیین سرعت نور از این راه نداشت. زیرا با فاصلهٔ یك کیلومتر باید فواصلی زمانی از مرتبهٔ یك صد هزارم ثانیه را اندازه می‌گرفت.

گالیله مسألهٔ تعیین سرعت نور را طرح ریزی کرد، ولی خود به حل آن موفق نگردید. غالب اوقات طرح و تدوین یك مسأله، اساسیتر از حل آن است که فقط به مهارت ریاضی یا آزمایشی احتیاج دارد. پرسشهای جدید و امکانات تازه را طرح کردن و مسائل قدیمی را از زاویه‌ای جدید نگریستن به تخیل خلاق نیاز دارد و پیشرفت راستین را مشخص می‌کند. اصل ماند و قانون بقای انرژی از تفکر ابتکاری و تازه در آزمایشها و پدیده‌های بسیار معروف بدست آمدند. مثالهای دیگری از این قبیل را در صفحات آیندهٔ کتاب خواهیم دید، و در آنجا بر اهمیت مطالعهٔ حقایق شناخته شده از دیدگاهی نو تأکید خواهیم کرد و نظریه‌های جدید را شرح خواهیم داد.

چون به مسألهٔ نسبتاً سادهٔ تعیین سرعت نور بازگردیم، از این نکته دچار شگفتی می‌شویم که چرا به فکر گالیله نرسید که این آزمایش را می‌توان به سادگی و دقت بیشتر، آن هم تنها به توسط یك نفر انجام داد. او می‌توانست به جای این که شخص دیگری را در فاصلهٔ یك کیلومتری قرار دهد، در آنجا آینه‌ای بگذارد که به محض رسیدن علامت نورانی آن را بازپس فرستد.

تقریباً دویست و پنجاه سال بعد، همین اصل را فیزو[1] بکار برد و برای نخستین بار از راه آزمایشهای زمینی، سرعت نور را بدست آورد. سرعت نور مدتی قبل، و البته با دقتی کمتر، توسط رومر[2] از راه رصد نجومی بدست آمده بود.

1. Fizeau 2. Roemer

پر واضح است که به علت زیاد بودن سرعت نور، برای اندازه‌گیری آن یا باید از فاصله‌هائی چون فاصلهٔ میان زمین و سایر سیارات استفاده کرد و یا فنون آزمایشی بسیار ظریفی را بکار برد. رومر از طریقهٔ اول استفاده کرد. فیزو راه دوم را پیمود. از زمان این‌آزمایشهای نخستین تاحال، بارها عدد بسیار مهمی را کـه نمایندهٔ سرعت نور است با دقتهای فزاینده اندازه گرفته‌اند، و درهمین قرن روش بسیار دقیقی برای این‌کار به‌وسیلهٔ مایکلسن[1] ابداع شده است. نتیجهٔ این آزمایشها چنین خلاصه می‌شود: سرعت نور در خلأ تقریباً ۱۸۶،۰۰۰ مایل یا ۳۰۰،۰۰۰ کیلومتر در ثانیه است.

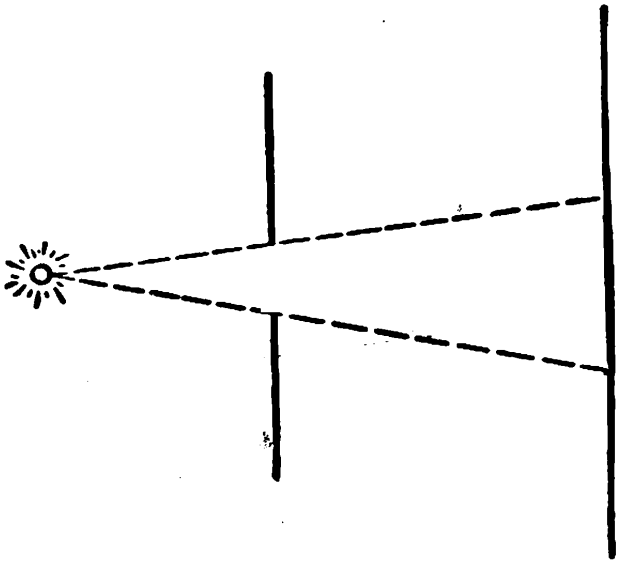
نور به مثابهٔ جوهری مادی

بار دیگر بحث را با چند واقعیت آزمایشی آغاز می‌کنیم. عددی که در بالا آمد، سرعت نور در خلأ است. نور در صورتی که مانعی نبیند با این سرعت فضای تهی را می‌پیماید. اگر ظرفی شیشه‌ای را از هوا خالی کنیم باز هم از پشت آن می‌توانیم دید؛ سیارات و ثوابت و سحابیها را با آنکه نورشان از فضای تهی عبور می‌کند و به چشم ما می‌رسد، می‌بینیم. این واقعیت ساده که می‌توان چیزی را از پشت ظرف شیشه‌ای دید، خواه در آن هوا باشد یا نباشد، دلیل است براین که وجود هوا چندان اثری ندارد. به همین جهت است که آزمایشهای نور را می‌توان در یک اتاق معمولی انجام داد و همان نتیجهٔ آزمایش در خلأ را بدست آورد.

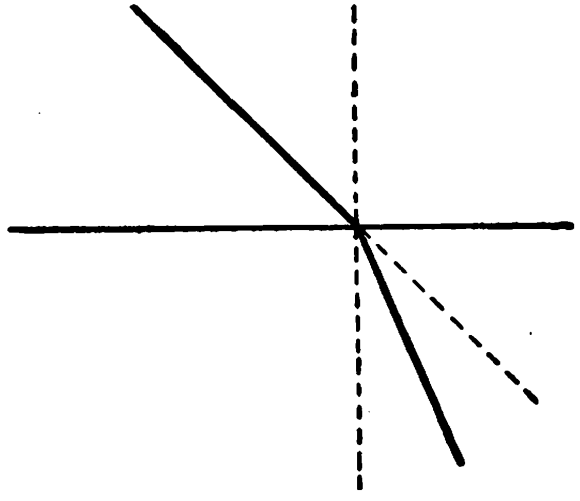
یکی از ساده‌ترین حقایق مربوط به نور این است که انتشار نور مستقیم‌الخط است. برای اثبات آن می‌توان آزمایش مقدماتی و سادهٔ زیر را ذکر کرد: در برابر یك چشمهٔ نور نقطه‌ای، پردهٔ سوراخ‌داری گذاشته شده است. چشمهٔ نقطه‌ای چشمهٔ نور بسیار کوچکی است، مثلاً روزنهٔ بسیار کوچکی در یك فانوس کاملاً پوشیده. روی دیوار مقابل، سوراخ پرده به صورت لکهٔ روشنی برزمینهٔ تاریك نموده خواهد شد. شکل زیر نشان می‌دهد که ارتباط این پدیده با انتشار مستقیم‌الخط نور به چه نحوی است. توضیح همهٔ این پدیده‌ها و موارد پیچیده‌تری که در آنها نور، سایه و نیمسایه آشکار می‌شوند، با این فرض که نور در خلأ یا در هوا به خط

1. Michelson

مستقیم انتشار پیدا می‌کند، امکان‌پذیر است.



اکنون به مثال دیگری می‌پردازیم که در آن نور از میان ماده عبور می‌کند. می‌خواهیم بدانیم اگر باریکه‌ای از نور خلأ را بپیماید و بر روی صفحه‌ای شیشه‌ای بتابد چه روی خواهد داد؟ هرگاه دراین حالت هم قانون انتشار مستقیم‌الخط نور معتبر باشد، مسیری که باید بپیماید آن است که با خط نقطه‌چین نمایش داده شده است. اما عملاً چنین نیست. بطوری که در شکل نشان داده شده شکستی در مسیر وجود دارد. آنچه در اینجا مشاهده می‌کنیم به نام شکست نور معروف است: عصائی که نیمی از آن در آب فرو برده شده و از وسط شکسته بنظر می‌رسد یکی از نمودهای

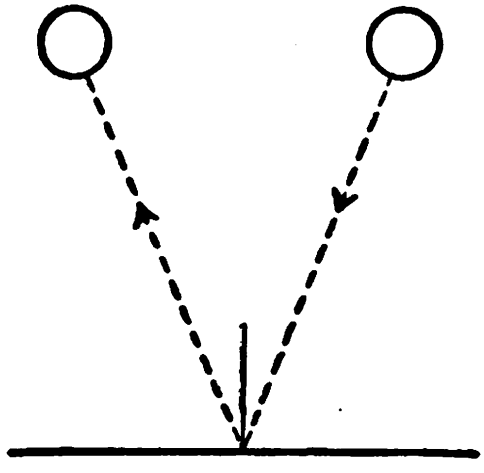


بیشمار شکست نور می‌باشد.

این حقایق بخوبی نشان می‌دهند که چگونه می‌توان نظریهٔ مکانیکی

ساده‌ای برای نور ابداع کرد. قصد ما آن است که نشان دهیم چگونه فکر جوهر مادی و ذرات و نیروها در حوزهٔ نور شناسی نفوذ کردند و چگونه سرانجام دیدگاه فلسفی قدیمی فرو ریخت.

در مورد نور، نظریهٔ مکانیکی خود را به ساده‌ترین و ابتدائی‌ترین شکل مطرح می‌سازد. فرض کنیم که همهٔ اجسام نورانی، ذرات نور از خود صادر می‌کنند که چون به چشم ما برسند احساس روشنی را موجب شوند. تاکنون به قدری به وضع جوهرهای مادی جدید عادت کرده‌ایم که هروقت برای توضیحی مکانیکی لازم باشد، بی‌آنکه دچار تردید شویم، جوهر جدیدی وضع می‌کنیم. این ذرات باید در فضای خالی با سرعت معین و به خط مستقیم سیر کنند و پیغام اجسامی را که از آنها گسیل شده‌اند به چشم ما برسانند. همهٔ پدیده‌هائی که با انتشار مستقیم‌الخط نور سازگارند نظریهٔ ذره‌ای را تأیید می‌کنند. زیرا تنها این نوع حرکت برای ذرات مجاز است. نظریهٔ ذره‌ای انعکاس یا بازتاب نور از آینه‌ها را بسادگی تمام تعلیل می کند و آن را از نوع همان انعکاسی می‌شمارد که توپ لاستیکی، مطابق شکل زیر، در برخورد با دیوار تجربه می‌کند.



تبیین شکست نور اندکی دشوارتر است. بدون آنکه وارد جزئیات شویم، می‌توان به امکان تبیینی مکانیکی پی‌برد. هنگامی که ذرات فی‌المثل برسطح شیشه می‌تابند، ممکن است ذرات مادهٔ شیشه نیروئی بر آنها وارد آورد، نیروئی که بطرزی غریب فقط در مجاورت ماده اثر می‌کند. چنانکه می‌دانیم هر نیروئی که بر ذرهٔ متحرکی وارد شود، سرعت آن را تغییر خواهد داد. اگر نیروی کل مؤثر بر روی ذرات نور، نیروئی جذبی

عمود بر سطح شیشه باشد، حرکت جدید در امتدادی میان امتداد اولی نور و خط عمود خواهد بود. این توضیح ساده ظاهراً از توفیق نظریهٔ ذره‌ای نور بشارت می‌دهد. مع‌ذلك برای آن‌که سودمندی و حیطهٔ اعتبار این نظریه را تعیین کنیم لازم است به تحقیق در حقایقی تازه‌تر و پیچیده‌تر بپردازیم.

معمای رنگ

باز هم نبوغ نیوتن بود که برای نخستین بار کثرت رنگها را در جهان تبیین کرد. در زیر شرح یکی از آزمایشهای نیوتن را از زبان خود او نقل می‌کنیم:

> به سال ۱۶۶۶ (که مشغول تراش شیشه‌هائی به اشکال غیر کروی بودم) منشور مثلث‌القاعده‌ای از شیشه ساختم تا با آن پدیدهٔ رنگها را بررسی کنم. اتاق خود را تاریك کردم. روزنی بر پنجرهٔ اتاق درست کرده بودم تا مقداری به اندازه، از نور خورشید داخل اتاق شود. منشور را برمدخل روزن قراردادم تا شاید نور پس از شکست بر دیوار مقابل بیفتد. در بدو امر مشاهدهٔ رنگهای روشن و سیری‌که ایجاد شده بود سرگرمی جذاب و گیرنده‌ای بود.

نوری که از خورشید می‌تابد «سفید» است، و پس از عبور از منشور تمام رنگهائی را که در جهان وجود دارد، به نمایش می‌گذارد. طبیعت خود نیز همین کیفیت را در نقش زیبای رنگین کمان آشکار می‌سازد. برای توضیح رنگین‌کمان از زمانهای کهن کوششهائی بعمل آمده است. داستان تورات که رنگین‌کمان را مهر پیمانی می‌شمارد که میان خدا و انسان بسته شده، به تعبیری یك «نظریه» است. ولی این نظریه به طرزی قانع کننده توضیح نمی‌دهد که چرا رنگین‌کمان گهگاه ظاهر می‌شود، و چرا همیشه با باران همراه است. در اثر بزرگ نیوتن بود که برای اولین بار معمای رنگ به طور علمی مورد بررسی قرار گرفت و به راه حل آن اشاره شد.

یك کنار رنگین‌کمان همیشه سرخ است و کنار دیگر آن بنفش، و

میان این دو کرانه تمام رنگهای دیگر جای گرفته‌اند. تعبیر نیوتن از این پدیده به این قرار است: تمام رنگها در نور سفید وجود دارند. آنها فضای بین سیارات و جو زمین را هماهنگ با یکدیگر می‌پیمایند. اثر مجموع آنها در چشم نور سفید است. به این تعبیر نور سفید مخلوطی از انواع مختلف ذرات نور است که هرکدام به رنگ خاصی تعلق دارند. در آزمایش نیوتن، منشور این ذرات را در فضا از یکدیگر جدا می‌کند. مطابق نظریهٔ مکانیکی شکست نور نتیجهٔ نیروهائی است که به توسط ذرات شیشه بر ذرات نور وارد می‌آیند. نیروهای وارد بر ذرات مربوط به رنگهای مختلف با یکدیگر فرق می‌کنند. مقدار این نیرو برای نور بنفش از همه زیادتر و برای نور سرخ از همه کمتر است. بنابراین رنگها در امتدادهای مختلف می‌شکنند و چون از منشور خارج می‌شوند از یکدیگر جدا می‌گردند. در مورد رنگین‌کمان، قطرات باران کار منشور را انجام می‌دهند.

در اینجا نظریهٔ جوهری نور پیچیده‌تر از پیش است. چه سروکار ما دیگر با یك جوهر نورانی نیست بلکه با جوهرهای نورانی بسیاری است که هرکدام به رنگ خاصی تعلق دارند. مع‌ذلك اگر این نظریه تا اندازه‌ای درست باشد، باید نتایج آن با مشاهده مطابق درآید.

سلسلهٔ رنگهائی که در نور سفید خورشید وجود دارد و در آزمایش نیوتن آشکار شد، طیف آفتاب و یا به عبارت دقیقتر طیف مرئی نامیده می‌شود. تفکیك شدن نور سفید را به رنگهای مختلف تجزیهٔ نور می‌نامند. اگر توضیح ما درست باشد باید بتوان نورهای جدا شدهٔ طیف را دوباره به وسیلهٔ منشوری که به درستی تنظیم شده است با یکدیگر ترکیب کرد. جریان عمل باید معکوس فرایند قبلی باشد. باید از ترکیب رنگهای جدا شده، نور سفید بدست آید. نیوتن از راه آزمایش ثابت کرد که به راستی می‌توان هرچند بار که بخواهیم نور سفید را از طیف آن و طیف را از نور سفید بدست آورد. این آزمایشها پایهٔ محکمی را برای این نظریه بوجود آورد که ذرات مربوط به رنگهای مختلف، جوهرهای تغییرناپذیری هستند. نیوتن خود چنین نوشت:

... اینها رنگهائی نیستندکه تازه بوجودآمده باشند، بلکه فقط از هم

جدا گردیده و آشکار شده‌اند، چه اگر آنها را دوباره با یکدیگر مخلوط کنیم و درهم آمیزیم همان رنگی که قبل از تجزیه داشتند ترکیب می شود. به همین دلیل دگرگونیهائی که از ترکیب رنگهای گوناگون بدست می‌آید، واقعی نیستند، زیرا وقتی نور مرکب را جدا کنند همان رنگهای قبل از ترکیب مجدداً آشکار می‌شود. چنانکه می‌دانید چون گردهای زرد و آبی را با یکدیگر کاملاً مخلوط کنند، چشم بی‌سلاح آن را سبز می‌بیند، با آنکه رنگ ذرات تشکیل دهنده براستی تغییر نکرده بلکه فقط با هم آمیخته‌اند؛ چون با میکرسکپ خوبی آن را نگاه کنیم دانه‌های آبی و زرد جدا از هم بنظر می‌رسند.

فرض کنیم که نوار بسیار نازکی از طیف را مجزا کرده باشیم، به این معنی که از میان همهٔ رنگها، یکی را از شکافی عبور می‌دهیم و با صفحه‌ای راه رنگهای دیگر را می‌بندیم. تابه‌ای که به این ترتیب بدست می‌آید نوری همگن است یعنی آن را نمی‌توان به اجزای دیگری تجزیه کرد. این نتیجه‌ای از نظریه است که بسهولت می‌توان آن را با آزمایش تأیید کرد. چنین تابهٔ تك رنگی را به هیچ وسیله نمی‌توان تقسیم کرد. برای به دست آوردن نور همگن راههای ساده‌ای وجود دارد. مثلاً سدیم وقتی فروزنده شود نور همگن زرد رنگی از خود گسیل می‌کند. غالباً آزمایشهای مبحث نور را با نور همگن انجام می‌دهند، زیرا چنانکه آشکار است، نتیجه بسیار ساده‌تر خواهد بود.

تصور کنید که ناگهان اتفاق عجیبی روی دهد: خورشید به گسیل نور یك رنگ همگنی، مثلاً زرد، بپردازد. تنوع فراوان رنگها بر سطح زمین به طور ناگهانی از بین می‌رود. تمام اشیاء یا زرد خواهند بود یا سیاه! این پیش‌بینی نتیجه‌ای است از نظریهٔ جوهری نور، زیرا مطابق این نظریه هیچ رنگ جدیدی نمی‌تواند بوجود آید. صحت این پیش‌بینی را آزمایش تصدیق می‌کند: در اتاقی که چشمهٔ نور آن سدیم فروزان است، تمام اشیاء یا زرد رنگند یا سیاه. علت تنوع رنگ در عالم، تنوع در رنگهائی است که نور سفید را می‌سازند.

نظریهٔ جوهری نور در تمام این حالات بسیار کار آمد است. هرچند

که ضرورت پیش کشیدن ایـن همه جوهـرهای مـادی، به تعـداد رنگهای مختلف، اندکی ناراحت کننده است. ایـن فرض هـم که ذرات نـور همگی سرعت واحدی در فضای تهی دارند بسیار ساختگی بنظر می‌رسد.

می‌توان تصور کرد که فرضهائی دیگر و نظریـه‌ای مـاهیتاً متفاوت نیز بتواند به همین‌انـدازه کارآمد باشد و همهٔ توضیحات لازم را بـدهد. ما بزودی طلوع نظریهٔ دیگری را شاهد خواهیم بود که بر پایهٔ مفاهیمی کاملاً متفاوت بنا گردیده است. و در عین‌حال همین حوزه از پدیده‌های نورشناختی را می‌تواند تعلیل کند. ولی پیش از تدوین فـرضهای بنیادی ایـن نظریـهٔ جدید باید به سؤالی پاسخ داد که به هیچ وجه با ملاحظات مربوط به مسائل نور ارتباط ندارد. باید بار دیگر به مکانیك بازگشت و پرسید:

موج چیست؟

شایعه‌ای که از واشنگتن شروع می‌شود سریعاً به نیویورك می‌رسد، با آن‌که حتی یك تن ازکسانی هم که آن را پراکنده‌اند سفری میان این دو شهر نکرده باشد. در اینجا دو حرکت کامـلاً متفاوت وجـود دارد: یکـی حرکت شایعه از واشنگتن تا نیویورك است، و دیگری حرکت کسانـی که شایعه را انتشار می‌دهند. هنگامی که باد بر مزرعهٔ گندمی می‌وزد، موجی تولید می‌کند که در سرتاسر مزرعه منتشر مـی‌شود. در اینجا نیز بـاید بین دو حرکت، یکی حرکت موج و دیگری حـرکت تك‌تك ساقه‌های گیاهـان، که تنها نوسانات کوچکی دارند، فرق قائـل شد. ما موجهائـی را دیده‌ایم که با انداختن سنگی در حوض آب تـولید می‌شود و بـه شکل دایـره‌هائی منتشر می‌گردد که رفته رفته بزرگتر می‌شوند. حرکت موج چیزی است، و حرکت ذرات آب چیز دیگر. ذرات آب فقط در جای خود بـالا و پایین می روند، حرکت مشهود مـوج حرکت حـالت ماده است نـه حرکت خود ماده، چوب‌پنبـه‌ای که روی موج باشد، این مسأله را بخـوبی روشن می‌سازد، زیرا به جای این‌که همراه موج پیش برود، به تبعیت از حرکت واقعی آب پایین و بالا می‌رود.

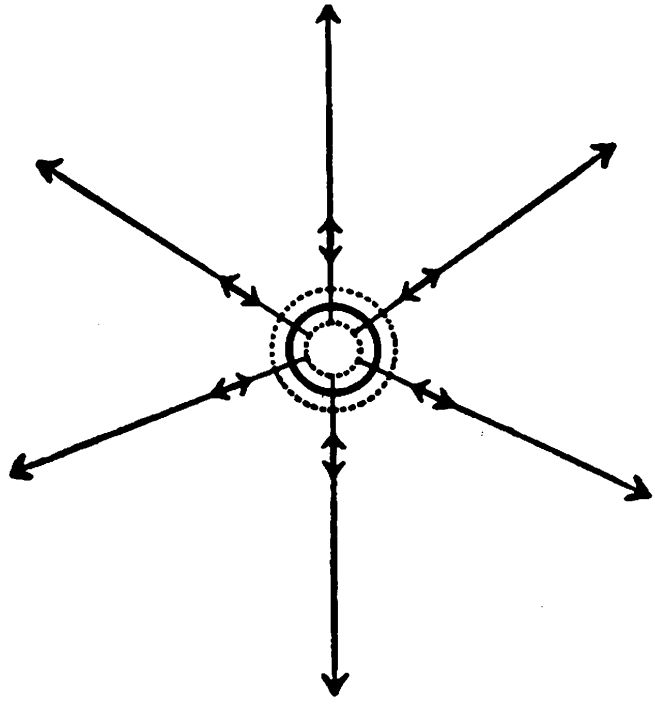
برای آن‌که سازوکار حرکت موج را بهتر بفهمیم به آزمایش خیالی دیگری متوسل می‌شویم. فـرض شود که فضـای بـزرگی به طـور کاملاً

یکنواخت از آب یا هوا یا محیط دیگری پر شده باشد. در وسط این فضا کره‌ای قرارداده شده است. در آغاز آزمایش هیچ حرکتی وجود ندارد. ناگهان این کره به «نفس‌زدن» آهنگ‌داری آغاز می‌کند و بدون آنکه از کروی بودن خارج شود، منبسط و منقبض می‌شود. در محیط اطراف این کره چه اتفاقی خواهد افتاد؟ مطالعهٔ خود را از لحظه‌ای آغاز می‌کنیم که کره شروع به انبساط می‌کند. ذراتی از محیط که در مجاورت کره هستند رانده می‌شوند به قسمی که چگالی پوسته‌ای کروی از این محیط (هوا، آب یا هرچیز دیگر که باشد) نسبت به مقدار معمولی آن زیاد می‌شود. به همین ترتیب هنگامی که کره منقبض می‌شود، چگالی همین قسمت از محیط که در مجاورت بلا فصل کره است کاهش خواهد یافت. این تغییرات چگالی در تمام محیط منتشر می‌شود. ذراتی که محیط از آنها تشکیل شده است فقط ارتعاشات کوچکی می‌کنند، در صورتی که حرکت کلی حرکت یک موج پیشرونده است. نکتهٔ اساساً جدیدی که در اینجا باآن روبرو هستیم این‌است که برای اولین بار شاهد حرکت چیزی هستیم که ماده نیست بلکه انرژی است که در ماده انتشار پیدا می‌کند.

با توجه به مثال کرهٔ تپنده، دو مفهوم کلی فیزیکی را مطرح می‌کنیم که برای مشخص کردن امواج کمال اهمیت را دارند. مفهوم اول سرعت انتشار موج است که به جنس محیط بستگی دارد، و مثلاً در هوا و در آب فرق می‌کند. مفهوم دوم طول موج است. در مورد امواج دریا یا رودخانه، طول موج فاصلهٔ میان دو برآمدگی متوالی یا دو فرو رفتگی متوالی موج است. به این ترتیب طول موج امواج دریا بزرگتر از طول موج امواج رودخانه است. در مورد امواجی که کرهٔ تپنده بوجود می‌آورد، طول موج عبارت از فاصلهٔ میان دو پوستهٔ کروی مجاور یکدیگر است که در یک لحظهٔ معین چگالی ماکزیمم یا مینیمم را دارند. بدیهی است که این فاصله تنها تابع جنس محیط نیست. آهنگ تپش کره نیز مسلماً تأثیر زیادی دارد، و هرچه تپش سریعتر باشد، طول موج کوتاهتر می‌شود، و هرچه تپش کندتر گردد طول موج بلندتر می‌شود.

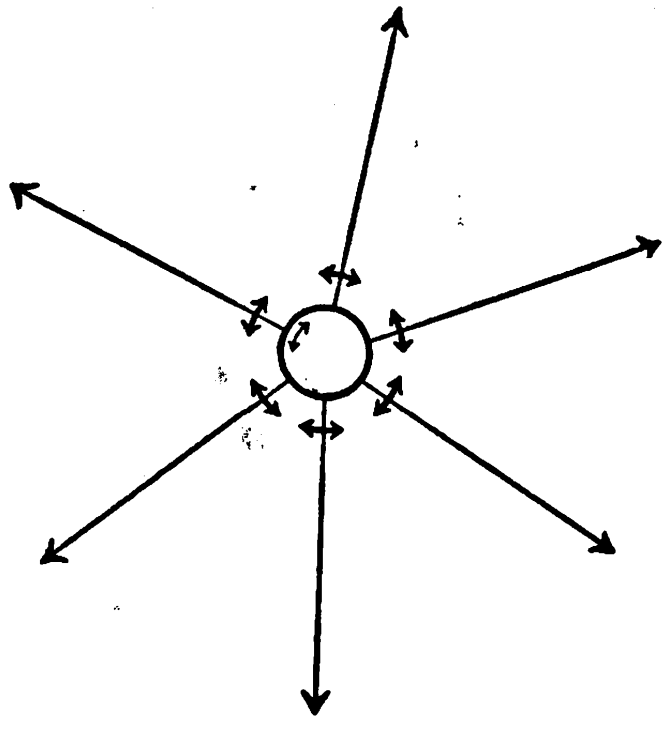
مفهوم موج در فیزیک قرین توفیق بسیار بوده است. قدر مسلم این‌که این مفهوم مفهومی مکانیکی است. این پدیده، نتیجهٔ حرکت ذراتی است

که، بنا بر نظریهٔ جنبشی، اجزای تشکیل دهندهٔ ماده‌اند. از این قرار، می توان هر نظریه را که در آن از مفهوم موج استفاده می‌شود، به طور کلی نظریه‌ای مکانیکی شمرد. مثلاً توضیح پدیده‌های صوتی اساساً بر این مفهوم مبتنی است که اجسام مرتعش مانند تارهای صوتی و سیمهای ویولن، چشمه‌های امواج صوتی هستند و این امواج، بنحوی که در مورد کرهٔ تپنده شرح داده شد، در هوا منتشر می‌شوند. پس می‌توان تمام پدیده‌های صوتی را به میانجیگری مفهوم موج به پدیده‌های مکانیکی تحویل کرد.



قبلاً اصرار کردیم که باید میان حرکت ذرات و حرکت موج، که حرکت حالت محیط است، فرق گذاشت. این دو حرکت خیلی با یکدیگر فرق دارند، منتها در مثال کرهٔ تپنده بخوبی آشکار است که بر امتداد واحدی صورت می‌پذیرند: ذرات محیط بر قطعه خطهای کوتاهی نوسان می‌کنند، و چگالی نیز هماهنگ با این حرکت متناوباً زیاد و کم می‌شود. امتدادی که موج در آن پراکنده می‌شود و خطی که این نوسانات بر آن انجام می‌گیرد، یکی است. این نوع موج را موج طولی می‌نامند. آیا موج منحصر به همین یك نوع است؟ برای مطالعات بعدی ما توجه به این نکته کمال اهمیت را دارد که بدانیم نوع دیگر از موج به نام امواج عرضی نیز وجود دارد.

در مثال سابق خود تغییری می‌دهیم: همان کره را داریم، منتها به جای آن‌که در هوا یا آب غوطه‌ور باشد، در مادهٔ چسبناکی جای گرفته

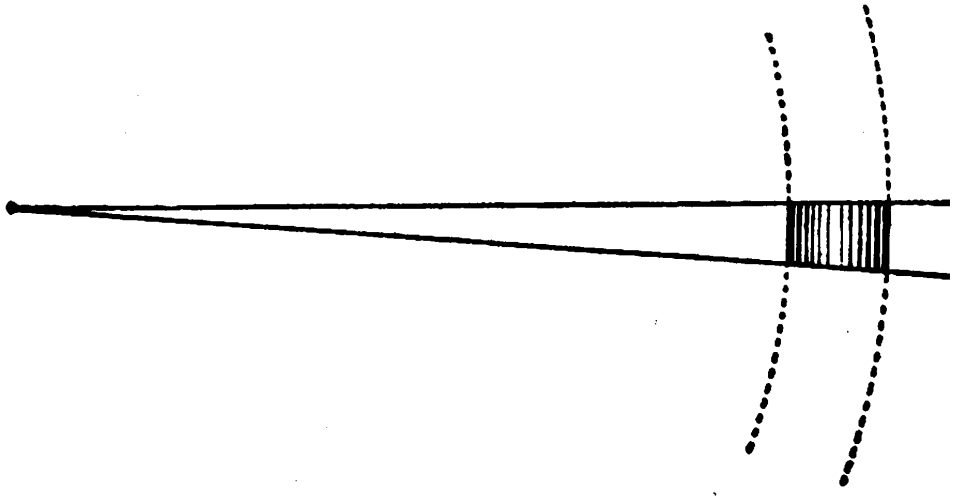


است. بعلاوه دیگر نمی‌تپد، بلکه به شکل منظمی به دور یک محور ثابت، به زاویهٔ کوچکی در یك جهت دوران می‌کند و سپس در جهت عکس می چرخد. مادهٔ چسبنده به کره می‌چسبد و قسمتهای چسبیده ناچار از حرکت کره تقلید خواهند کرد. این قسمتها به نوبهٔ خود قسمتهای مجاور خود را وادار به تقلید می‌سازند و الی آخر، بطوری که موجی در محیط پدید می‌آید. اگر اختلاف میان حرکت ماده و حرکت موج را در نظر آوریم، می‌بینیم که این دو حرکت بر یك خط انجام نمی‌گیرند: موج در امتداد شعاع کره منتشر می‌شود، در صورتی که جهت حرکت ذرات محیط عمود بر این امتداد است. به این ترتیب موجی عرضی ایجاد کرده‌ایم.

امواجی‌که بر سطح آب منتشر می‌شوند امواج عرضی هستند: چوب‌پنبه‌ای که روی آب واقع است در جای خود بالا و پایین می‌رود، اما موج بر روی سطح افقی پیش می‌رود. از طرف دیگر امواج صوتی آشناترین نمونهٔ امواج طولی محسوب می‌شوند.

یك نکتهٔ دیگر: موجی که به توسط کرهٔ تپنده یا کرهٔ نوسان کننده در محیطی همگن ایجاد می‌شود، موجی کروی است، و به این جهت چنین

نامیده می‌شود که در هر لحظه تمام نقطه‌هائی که بر روی کره‌ای محیط بر چشمهٔ موج واقعند، حالت واحدی را دارند. قطعه‌ای از یکی از این کره‌ها را در فاصلهٔ زیادی از چشمه، در نظر می‌گیریم. هراندازه که این قطعه دورتر باشد و خود آن قطعه کوچکتر انتخاب شود، شباهت آن به صفحهٔ مستوی زیادتر می‌گردد. اگر خیلی زیاد در بند دقت نباشیم، می‌توانیم بگوئیم میان قسمتی از یك صفحه و قطعه‌ای از سطح کره‌ای که شعاع آن خیلی بزرگ است، تفاوت محسوسی وجود ندارد. به همین جهت در بحث از قسمت کوچکی از یك موج کروی، که به فاصلهٔ زیاد از چشمه قرار دارد، از موج تخت نام می‌بریم. در شکل هراندازه‌که قسمت هاشور زده از



مرکز کره‌ها دورتر و زاویهٔ میان دو شعاع، کوچکتر باشد، موج تخت بهتر نمایش داده شده است. مفهوم موج تخت مثل بسیاری از مفاهیم دیگر فیزیکی قصه‌ای است که فقط به درجهٔ معینی از دقت، تحقق می‌یابد. مع‌ذلك مفهومی است بسیار مفید که بعدها به آن محتاج خواهیم شد.

نظریهٔ موجی نور

بخاطر بیاورید که چرا توضیح پدیده‌های نوری را ناگهان متوقف ساختیم. غرض ما آن بود که نظریهٔ دیگری را دربارهٔ نور مطرح سازیم که با نظریهٔ ذره‌ای اختلاف دارد ولی در عین‌حال می‌کوشد که همان حوزه از واقعیات را تعلیل کند. به این منظور ناچار شدیم رشتهٔ سخن را قطع کنیم و به شرح مفهوم امواج بپردازیم. اینك می‌توانیم به موضوع اصلی خود باز گردیم.

یکی از معاصران نیوتن، یعنی هویگنس[1] بود که نظریهٔ کاملاً جدیدی را وضع کرد. او در رسالهٔ مربوط به نور خود نوشت:

> بعلاوه اگر نور برای انتشار خویش به زمان احتیاج داشته باشد ـ واین مسأله‌ای است که اکنون مورد بحث ماست ـ نتیجه چنان خواهد بود که این حرکت متوالیاً بر مادهٔ واسط تأثیر می‌کند و بنابراین مانند صوت به صورت سطوح و امواج کروی منتشر می‌گردد. علت این‌که آنها را موج می‌نامیم شباهتی است که میان آنها و امواجی که با افتادن سنك در آب ایجاد می‌شوند و به صورت دایره‌های متوالی پخش می‌گردند، وجود دارد. گواین‌که امواج سطح آب علت دیگری دارند و فقط بر سطح مستوی انتشار پیدا می‌کنند.

مطابق نظر هویگنس نور موج است، یعنی انتقال انرژی است نه انتقال جوهر مادی. دیدیم که نظریهٔ ذره‌ای بسیاری از حقایق مشهود را توضیح می‌داد. آیا نظریهٔ موجی هم این توانائی را دارد؟ باید بار دیگر همان سؤالاتی را که نظریهٔ ذره‌ای پاسخ گفته است مطرح سازیم و ببینیم که آیا نظریهٔ موجی هم می‌تواند به همان خوبی پاسخ دهد.

این کار را به شکل مکالمه‌ای میان (ن) و (ه) انجام می‌دهیم. (ن) معتقد به نظریهٔ ذره‌ای نیوتن است و (ه) نظریهٔ هویگنس را قبول دارد. در این سؤال و جواب هیچ یك حق ندارد از دلایلی که بعد از این دو استاد بزرگ پیدا شده است، استفاده کند.

ن. در نظریهٔ ذره‌ای سرعت نور معنی کاملاً مشخصی دارد و آن سرعتی است که ذرات با آن فضای تهی را می‌پیمایند. معنی سرعت نور در نظریهٔ موجی چیست؟

ه. البته مقصود از آن سرعت امواج نور است. هر موجی با سرعت معینی منتشر می‌گردد، موج نور هم به همین کیفیت.

ن. به این سادگیها هم نیست. امواج صوتی در هوا منتشر می‌شوند،

---

1. Huygens

و امواج اقیانوس در آب. هر موج محیطی مادی لازم دارد تا بتواند درآن انتشار پیدا کند. ولی نور از خلأ یعنی از جائی که صوت نمی‌تواند عبور کند، می‌گذرد. فرض وجود موجی در فضای تهی مثل فرض این است که موجی اصلاً وجود ندارد.

ه. البته این اشکالی است؛ ولی برای من تازگی ندارد. استاد من در این باره به‌دقت بسیار اندیشه‌کرد و به این نتیجه رسید که یگانه راه رهائی از این دشواری آن است که به وجود جوهر فرضی «اثیر» (اتر) قائل شویم که محیطی شفاف است و تمام جهان را پر کرده است. در واقع همهٔ عالم در اثیر غوطه‌ور است اگر جرأت کنیم و این مفهوم را وارد کنیم، همه چیز روشن و قانع‌کننده می‌شود.

ن. ولی من به‌چنین فرضی ایراد دارم: نخست آن‌که یك جوهر فرضی دیگر را وارد می‌کند و هم اکنون تعداد جوهرهای مادی در فیزیك بسیار زیاد است. دلیل دیگری نیز علیه آن وجود دارد؛ البته شك ندارید که هر چیز را باید در قالب مکانیك تعلیل کرد. با اثیر چه خواهید کرد؟ آیا می توانید به این سؤال ساده پاسخ دهید که اثیر چگونه از ذرات بنیادی خود ساخته شده است و چگونه در پدیده‌های دیگر متجلی می‌شود؟

ه. اعتراض اول شما بجاست. ولی با قبول اثیر بی‌وزن و ساختگی از شر ذره‌های بسیار ساختگیتر نور آسوده می‌شویم. اینك به جای بینهایت جوهر مادی که هرکدام به یکی از رنگهای بیشمار طیف مربوط می‌شد، سروکار ما با یك جوهر مادی ۱سر۱د۱آمیز خواهد بود. آیا قبول ندارید که این خود پیشرفتی واقعی است؟ دست‌کم تمام اشکالات در یك نقطه متمرکز شده‌اند. دیگر به این فرض ساختگی احتیاجی نیست که ذرات مربوط به رنگهای مختلف، فضای تهی را با سرعت واحدی سیر کنند. استدلال دوم شما نیز صحیح است. ما نمی‌توانیم برای اثیر توضیحی مکانیکی ارائه دهیم. ولی شکی نیست که مطالعات بعدی پدیده‌های نوری، و شاید پدیده‌های دیگر، ساختمان آن را آشکار خواهند ساخت. فعلاً باید در انتظار آزمایشهای جدید و نتایج آنها باشیم. ولی امیدوارم که سرانجام مسألهٔ ساختمان مکانیکی اثیر حل و آشکار خواهد شد.

ن. بسیار خوب، اکنون که در این مسأله نمی‌توان به نتیجهٔ قطعی

رسید از آن می‌گذریم. من، با چشم پوشیدن از این ایرادها، میل دارم بدانم که نظریهٔ شما پدیده‌هائی را که در نظریهٔ ذره‌ای بسیار روشن و قابل فهم هستند چگونه توضیح می‌کند. مثلاً این حقیقت را در نظر می‌گیریم که نور در خلأ یا هوا در امتداد خط راست منتشر می‌شود. تکه کاغذی که در مقابل شمعی قرار گیرد، سایه‌ای بر دیوار می‌اندازد که حدود کاملاً مشخصی دارد. اگر نظریهٔ موجی نور درست باشد، دیگر امکان تشکیل سایه‌ای که حدود آن کاملاً مشخص باشد وجود نخواهد داشت. زیرا موج می‌تواند خم شود و از کنار آن بگذرد و حد سایه را محو سازد. شما می‌دانید که یك کشتی کوچك بر روی دریا نمی‌تواند مانعی برای امواج بشمار آید. امواج آن را دور می‌زنند و سایه‌ای بوجود نمی‌آورند.

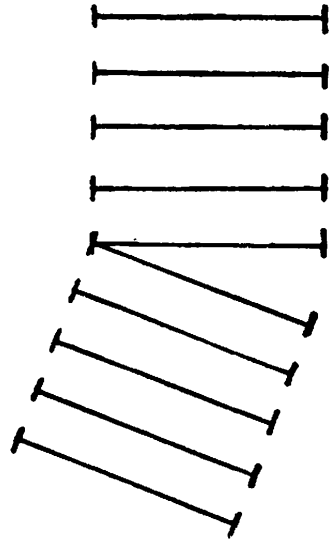
ه. این استدلال قانع‌کننده نیست. امواج کوتاهی را روی رودخانه‌ای در نظر بگیرید که به کشتی بزرگی برخورد کنند، امواجی که در یك طرف کشتی ایجاد شده‌اند در طرف دیگر آن دیده نخواهند شد. در صورتی که موجها به اندازهٔ کافی کوچك و کشتی به اندازهٔ کافی بزرگ باشد، سایه‌ای کاملاً مشخص تشکیل می‌شود. بسیار محتمل است که انتشار مستقیم‌الخط نور به علت کوچکی فوق‌العادهٔ طول موج آن در مقایسه با اندازهٔ موانع عادی و قطر روزنهائی باشد که در آزمایشها مورد استفاده قرار می‌گیرند. ازکجا که اگر موانع بی‌اندازه کوچکی در سر راه آن گذاشته شود سایه‌ای تشکیل گردد. ممکن است تعبیهٔ دستگاهی که بتواند خم شدن نور را نشان دهد با دشواریهای آزمایشی بزرگی همراه باشد. با وجود این اگر چنین آزمایشی را بتوان به مرحلهٔ عمل درآورد، در انتخاب میان نظریهٔ موجی یا نظریهٔ ذره‌ای دارای اهمیت بسیار خواهد بود.

ن. ممکن است نظریهٔ موجی درآینده سبب پیدایش حقایق جدیدی شود، ولی من اکنون با هیچ دادهٔ آزمایشی آشنا نیستم که آن را به طرز قانع‌کننده‌ای تأییدکند. تا زمانی که از راه آزمایش به‌طور قطع ثابت نشود که نور ممکن است خم شود، من هیچ دلیلی برای نپذیرفتن نظریهٔ ذره‌ای نور، که ساده‌تر و بنا برآن بهتر از نظریه موجی است، نمی‌بینم.

با آن‌که حق مطلب آن‌گونه که باید ادا نشده است، باید این گفتگو را قطع کنیم. هنوز باید نشان داد که نظریهٔ موجی چگونه شکست نور و

تنوع رنگها را توضیح می‌دهد. چنانکه دیدیم نظریهٔ ذره‌ای بخوبی از عهدهٔ این کار برمی‌آید. از شکست نور شروع می‌کنیم، ولی بهتر است ابتدا مثالی را در نظر گیریم که هیچ ارتباطی با مبحث نور ندارد.

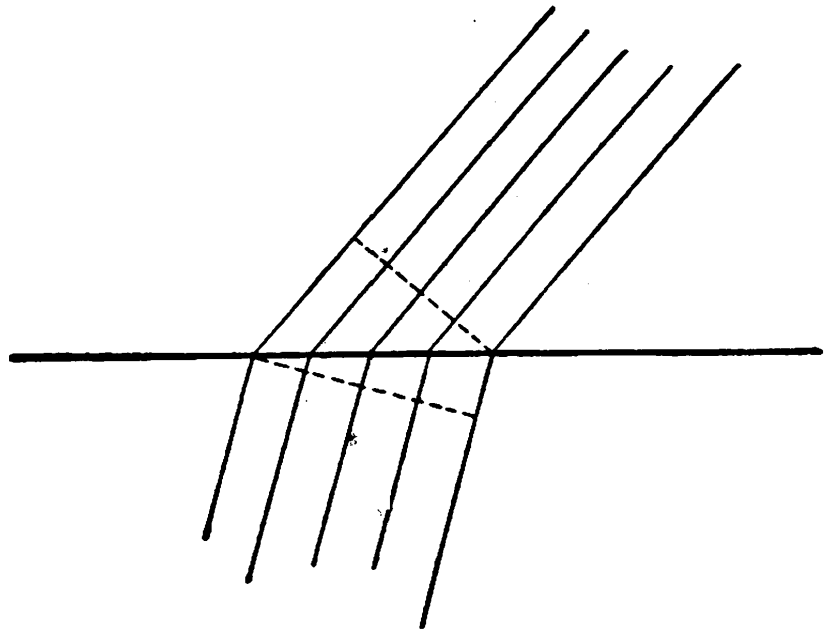
دو نفر که هرکدام یك سرعصائی را در دست دارد در فضای بزرگ و بازی قدم می‌زنند. در ابتدا به خط مستقیم و با سرعت مساوی پیش می روند. تا موقعی که سرعتشان یکی است، اعم از آن‌که زیاد باشد یا کم، عصا فقط متحمل تغییر مکانهای موازی خواهد شد، یعنی نخواهد چرخید و امتدادش تغییر نخواهد کرد. همهٔ وضعیتهای متوالی عصا موازی هم خواهند بود. اگر در یك مدت بسیار کوچك، مثلاً در کسری از ثانیه، حرکات آن دو با یکدیگر مساوی نباشد چه روی خواهد داد؟ بدیهی است که در این فاصله عصا خواهد چرخید بطوری که دیگر به موازات وضعیت نخستین جابجا نخواهد شد. چون دوباره سرعتها یکسان شود امتداد عصا همان امتداد سابق نخواهد بود. این کیفیت را بوضوح در شکل نمایش داده‌ایم.



تغییر امتداد درست در همان فاصلهٔ زمانی اتفاق می‌افتد که در آن سرعتهای دو راه پیما با هم متفاوت شود.

این مثال به‌ما کمك خواهد کرد که شکست یك موج را بفهمیم. موج تختی که از میان اثیر می‌گذرد به صفحه‌ای شیشه‌ای برخورد می کند. درشکل صفحهٔ بعد موجی را می‌بینیم که ضمن حرکت جبههٔ موج نسبتاً وسیعی دارد. جبههٔ موج صفحه‌ای است که در هر لحظه تمام اجزای اثیر واقع بر آن حالت مشابهی دارند. چون سرعت نور تابع جنس محیطی است

که از آن می‌گذرد، بدیهی است که این سرعت در شیشه با سرعت در



فضای تهی فرق خواهد داشت. در زمان بسیار کوتاهی که جبههٔ موج وارد شیشه می‌شود، قسمتهای مختلف آن سرعتهای متفاوت خواهند داشت. بدیهی است آن قسمت که داخل شیشه شده سرعتی دارد برابر با سرعت نور در شیشه، در صورتی که بقیهٔ موج هنوز همان سرعت در اثیر را دارد. به علت همین اختلاف سرعت، که در جبههٔ موج در فاصلهٔ زمانی «ورود» به شیشه دست می‌دهد، است که امتداد خود موج تغییر می‌کند.

به این ترتیب می‌بینیم نه تنها نظریهٔ ذره‌ای بلکه نظریهٔ موجی نیز می‌تواند شکست نور را توضیح دهد. ملاحظات بیشتر که با اندکی ریاضی توأم است نشان می‌دهد که توضیح نظریهٔ موجی ساده‌تر و بهتر، و نتایج آن کاملاً با مشاهده سازگار است. در واقع اگر بدانیم که تابهٔ نور در عبور از محیط شکننده چگونه می‌شکند، به کمك استدلالهای کمی می‌توان سرعت نور را در این محیطها بدست آورد. اندازه‌گیریهای مستقیم، این پیش‌بینیها و در نتیجه نظریهٔ موجی نور را بخوبی تأیید می‌کند.

مسأله‌ای که هنوز باقی ماندهٔ مسألهٔ رنگ است.

باید بخاطر داشت که هر موجی با دو عدد مشخص می‌شود: یکی سرعت و دیگری طول موج آن. فرض بنیادی نظریهٔ موجی این است که: رنگهای مختلف به طول موجهای مختلف مربوط می‌شوند. طول موج نور

زرد با طول موج نور سرخ یا بنفش فرق می‌کند. به این ترتیب تفکیک ساختگی ذراتی که به رنگهای گوناگون تعلق دارند جای خود را به تفاوت طبیعی طول موج می‌دهد.

بنا بر این آزمایشهای نیوتن در بارهٔ تجزیهٔ نور را می‌توان به دو زبان متفاوت شرح داد، که یکی زبان نظریهٔ موجی است و دیگری زبان نظریهٔ ذره‌ای، مثلاً:

زبان ذره‌ای	زبان موجی
ذراتی که متعلق به رنگهای مختلف هستند، در خلأ سرعت واحدی دارند، ولی در شیشه سرعتهایشان متفاوت است.	اشعه‌ای که طول موجهای مختلف دارند و متعلق به رنگهای گوناگون هستند، در اثیر سرعت واحدی دارند، ولی سرعتهایشان در شیشه با یکدیگر متفاوت است.
نور سفید ترکیبی است از ذراتی که رنگهای گوناگون دارند. در طیف این ذرات از یکدیگر جدا می‌شوند.	نور سفید ترکیبی است از امواجی که طول موجهای متفاوت دارند و در طیف از یکدیگر جدا می‌شوند.

عقل چنین اقتضا می‌کند که برای خاتمه دادن به ابهامی که از وجود دو نظریهٔ مختلف دربارهٔ پدیده‌های واحد نتیجه می‌شود، به بررسی دقیق مزایا و معایب هر یك از آن دو بپردازیم و سپس یکی از دو نظریه را قبول کنیم. مکالمهٔ (ن) و (ه) نشان داد که اخذ تصمیم کار آسانی نیست. اتخاذ تصمیم در این مرحله بیشتر تابع ذوق و سلیقه است تا اعتقاد علمی. در زمان نیوتن و تا بیش از صد سال بعد از او بیشتر فیزیکدانان طرفدار نظریهٔ ذره‌ای بودند.

تاریخ رأی خود را به سود نظریهٔ موجی و علیه نظریهٔ ذره‌ای مدتها بعد در میانهٔ قرن نوزدهم اعلام کرد. (ن) در ضمن محاوره با (ه) اظهار نظر کرد که اتخاذ تصمیم دربارهٔ یکی از دو نظریه امری است که، بنا بر اصول، از راه آزمایش امکان‌پذیر است. نظریهٔ ذره‌ای خم شدن نور را ممکن نمی‌شمارد و وجود حدود مشخص را برای سایه ضروری می‌داند. در

صورتی که بنا بر نظریهٔ موجی، مانعی که به اندازهٔ کافی کوچك باشد سایه‌ای نخواهد انداخت. کارهای علمی یانگ[1] و فرنل[2] این نتیجه را از راه آزمایش ثابت کرد و نتایج نظری لازم از آن بدست آمد.

پیش از این، آزمایش فوق‌العاده ساده‌ای را شرح دادیم که در آن پردهٔ سوراخ‌داری در مقابل چشمه‌ای نقطه‌ای قرار گرفته و سایه‌ای بر دیوار تشکیل شده بود. اکنون آن آزمایش را ساده‌تر و چنان فرض می‌کنیم که چشمهٔ نور، نوری همگن گسیل کند. برای اینکه نتیجهٔ بهتری بدست آید چشمه باید پر نور باشد. فرض کنیم که سوراخ پرده بتدریج کوچك و کوچکتر شود. چون چشمه‌ای قوی بکار بریم و سوراخ را به اندازهٔ کافی کوچك کنیم، پدیدهٔ تازه و شگفت‌انگیزی ظاهر می‌شود که به هیچ وجه از دیدگاه نظریهٔ ذره‌ای قابل فهم نیست. دیگر حد فاصل مشخصی میان روشنی و تاریکی وجود ندارد. روشنی ضمن یك رشته حلقه‌های روشن و تاریك اندك اندك در زمینهٔ تاریك محو می‌شود. پیدایش حلقه‌ها وجه مشخص صریح نظریهٔ موجی است. توضیح نواحی روشن و تاریك متناوب، در آزمایش دیگری که تا اندازه‌ای با این آزمایش متفاوت است آشکارتر خواهد بود. فرض کنیم بر صفحهٔ کاغذ تیره‌ای با سوزن دو سوراخ ایجاد کرده باشیم که نور از آنها می‌گذرد. در صورتی که سوراخها نزدیك به یکدیکر باشند و چشمهٔ نور همگن و قوی باشد، تعداد زیادی نوارهای روشن و تاریك بر دیوار مشاهده خواهند شد، که بتدریج در تاریکی محو می‌شوند. توضیح آن ساده است. نوار تاریك در جائی درست می‌شود که فرو رفتگی موج یکی از سوراخها با برآمدگی موج مربوط به سوراخ دیگر منطبق شود و یکدیگر را خنثی کنند. نوار روشن مربوط به جائی است که دو فرورفتگی یا دو برآمدگی موجهای دو سوراخ سوزن یکدیگر را تلاقی کنند و سبب تقویت اثر یکدیگر شوند. توضیح حلقه‌های روشن و تاریك آزمایش قبلی، که در آن پرده‌ای با یك سوراخ بکار رفته بود، دشوارتر است، ولی اساس هر دو یکی است. شکل نوارهای تاریك و روشن در آزمایش دو سوراخی و حلقه‌های روشن و تاریك در آزمایش تك‌سوراخی

1. Young 2. Fresnel

را باید بخاطر بسپارید، چون بعداً این دو شکل متفاوت را توضیح خواهیم داد. آزمایشهای فوق پراش نور را نشان می‌دهند. پراش، انحراف از انتشار مستقیم‌الخط نور در آن هنگام است که بر سر راه آن سوراخها یا موانع کوچکی قرار داده باشند. (شکل در صفحهٔ ۱۰۵)

اگر اندکی از ریاضیات استفاده شود، می‌توان بسی پیشتر رفت. می توان دید که برای ایجاد الگوی پراش بخصوصی چه طول موجی باید بکار برد. به این ترتیب آزمایشهای فوق، امکان اندازه‌گیری طول موج نور چشمهٔ همگن بکار رفته را فراهم می‌آورند. برای این‌که تصوری از کوچکی این اعداد داشته باشید طول موج دو نور بنفش و سرخ را، که دو حد طیف خورشید هستند، در اینجا ذکر می‌کنیم:

طول موج نور سرخ برابر است با ۰٫۰۰۰۰۸ سانتیمتر

طول موج نور بنفش برابر است با ۰٫۰۰۰۰۴ سانتیمتر

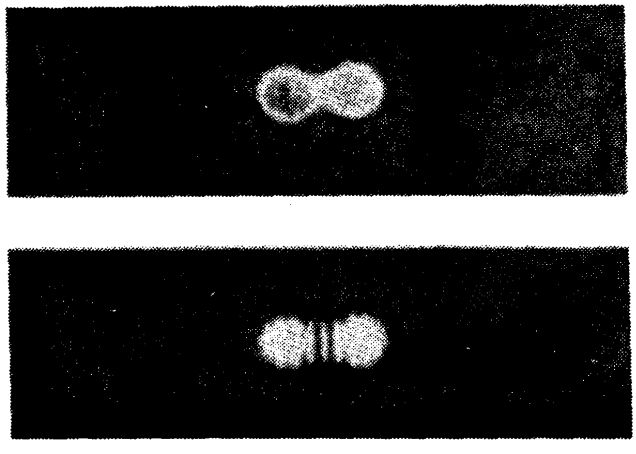
نباید از کوچکی این اعداد متعجب شویم. پدیدهٔ سایهٔ با حدود مشخص، یعنی پدیدهٔ انتشار مستقیم‌الخط نور، از آن رو در طبیعت مشاهده می‌شود که تمام موانع و سوراخهائی که به طور معمولی می‌بینیم در مقایسه با طول موجهای نور فوق‌العاده بزرگند. تنها موقعی که سوراخ و مانع بسیار کوچك شود، نور سرشت موجی خود را آشکار می‌سازد.

مع‌ذلك داستان تجسس نظریه‌ای دربارهٔ نور هنوز بپایان نرسیده است. رأی دادگاه قرن نوزدهم، قطعی و نهائی نبود. مسألهٔ انتخاب میان ذره و موج، مسأله‌ای است که برای فیزیکدانان جدید هم مطرح است، ولی این بار مسأله هم عمقیتر و هم ظریفتر است. خوب است فعلاً شکست نظریهٔ ذره‌ای نور را قبول کنیم، تا در موقع خود به ماهیت معماگونهٔ پیروزی نظریهٔ موجی پی‌بریم.

امواج نور طولی هستند یا عرضی؟

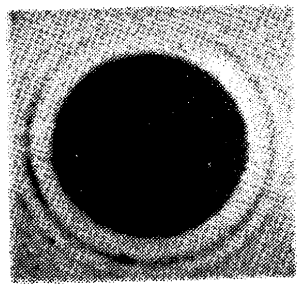
تمام پدیده‌های نوری که مورد مطالعهٔ ما قرار گرفتند مؤید نظریهٔ موجی بودند. خم شدن نور از موانع کوچك و توضیح شکست نور محکمترین دلایل درستی این نظریه بشمار می‌روند. از دیدگاه مکانیکی یك مسألهٔ دیگر باقی می‌ماند که باید جواب داده شود و آن تعیین خواص

مکانیکی اثیر است. برای حل این مسأله دانستن این نکته ضروری است که آیا امواج نور در اثیر امواجی طولی هستند یا عرضی. بـه عبارت دیگر آیا نور مانند صوت منتشر می‌شود؟ آیا این موج نتیجهٔ تغییرات چگـالی محیط است و نـوسانات ذرات محیط در امتـداد انتشار هستند؟ یـا اینکه اثیر به مربائی کشسان (الاستیك) شباهت دارد که فقط امواج عرضی در آن ممکن است تـولید شونـد، و حـرکت ذرات در امتـدادی عمود بر امتداد انتشار موج انجام می‌گیرد؟

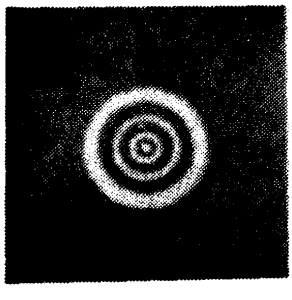


در تصویر بالائی عکس لکه‌های نوری دیده می‌شود که با عبور متوالی دو تابهٔ نور از دو سوراخ سوزن بدست می آید. (یك سوراخ سوزن باز است و از آن نور می‌گذرد، سپس آن را بسته و سوراخ دیگر را باز کرده‌اند.) عکس زیری مربوط به موقعی است که نور از هر دو سوراخ در آن واحد عبور می‌کند.

(عکس از و. آرکادیف)



پراش نـور هنگام عبـور از سوراخ کوچك



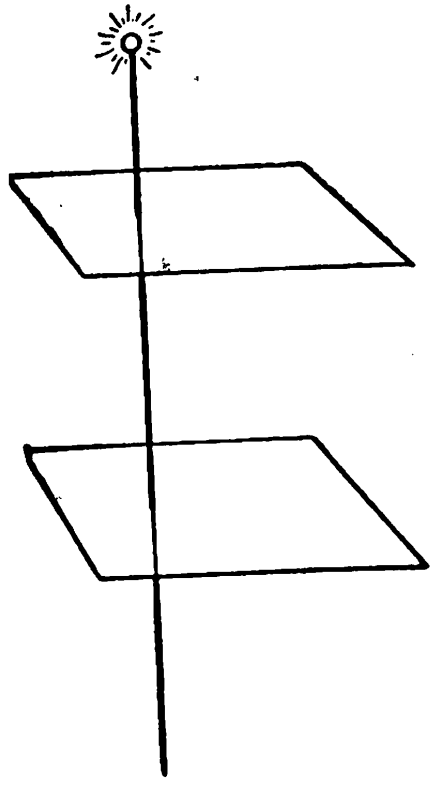
پراش نور هنگام برخورد با مانع کوچك

(عکس از و. آرکادیف)

پیش از حل مسأله بهتر است که از راه حدس ببینیم کدام یك از این دو جواب بر دیگری ترجیح دارد. پرواضح است که اگر امواج نور امواجی طولی بودند بخت با ما یار بوده است. زیرا در این صورت مشکلاتی که در طرح و تعبیهٔ اثیری مکانیکی خواهیم داشت بسیار آسانتر خواهند بود و احتمالاً تصویری که از اثیر خواهیم داشت، شبیه تصویر مکانیکی گازی است که انتشار امواج صوتی را توضیح می‌دهد. تصور اثیری که ناقل امواج عرضی باشد بسیار دشوارتر خواهد بود. تصور محیطی مربا مانند متشکل از ذراتی که امواج عرضی را انتشار می‌دهند، کار آسانی نیست. اعتقاد هویگنس بر آن بود که اثیر «هوا مانند» است نه مربامانند. اما طبیعت به محدودیتهای ما وقعی نمی‌گذارد. آیا طبیعت در این مورد با فیزیکدانانی که می‌کوشند تمام رویدادها را از دیدگاه مکانیکی بررسی کنند، نظر مساعد داشته است؟ برای پاسخ دادن به این سؤال لازم است آزمایشهای تازهٔ دیگری را مورد بحث قرار داد.

از میان آزمایشهای متعددی که جواب این سؤال را به ما می‌دهند، فقط یکی را انتخاب می‌کنیم و به بررسی جزئیات آن می‌پردازیم. فرض شود که ورقهٔ بسیار نازکی از بلور تورمالین را در اختیار داریم که به شکل خاصی، که نیازی به ذکر آن در اینجا نیست، بریده شده باشد. نازکی این ورقهٔ بلورین باید به‌اندازه‌ای کم باشد که از پشت آن بتوان چشمهٔ نور را رؤیت کرد. حال دو ورقه از این نوع را می‌گیریم و آنها را میان چشم خود و چشمهٔ نور قرار می‌دهیم. انتظار چه رویدادی را خواهیم داشت؟ اگر صفحه‌های تورمالین به قدر کافی نازك باشند، باز هم نقطهٔ روشنی دیده خواهد شد. احتمال آنکه آزمایش انتظار ما را برآورد زیاد است. بی‌آنکه نگران احتمالی بودن این گفته باشیم، فرض می‌کنیم که از پشت دو ورقهٔ بلورین نقطهٔ روشنی رؤیت شود. اکنون با چرخاندن یکی از دو ورقه، وضعیت آن را بتدریج تغییر می‌دهیم. این گفته در صورتی دارای معنی است که محل محوری که دوران حول‌آن انجام می‌گیرد ثابت بماند. خطی را که با شعاع ورودی مشخص می‌شود، محور اختیار می‌کنیم، به این معنی که همهٔ نقاط یکی از بلورها، جز آن که بر محور قرار دارد، تغییر مکان پیدا می‌کنند. حادثهٔ عجیبی اتفاق می‌افتد، نور رفته رفته ضعیف می

شود تا آن‌که بکلی از بین می‌رود. اگر باز هم چرخاندن را ادامه دهیم، مجدداً نور آشکار می‌شود و چون به وضعیت اولیه بازگردیم همان منظرهٔ نخستین را دوباره خواهیم دید.



بدون این‌که وارد شرح جزئیات این آزمایش و آزمایشهای مشابه شویم، می‌توان سؤال زیر را طرح کرد: آیا با فرض طولی بودن امواج نور می‌توان این پدیده‌ها را توضیح داد؟ اگر امواج طولی باشند ذرات اثیر نیز مانند تابهٔ نور در امتداد محور حرکت می‌کنند. اگربلور بچرخد چیزی در امتداد محور تغییر نمی‌کند. نقاط واقع بر محور حرکت نمی‌کنند و فقط تغییر مکانهای بسیار خردی در نقاط نزدیك به آن صورت می‌پذیرد. امکان ندارد که تغییری این اندازه چشمگیر، چون ناپدید شدن و ظاهر شدن تصویری جدید، برای موجی طولی واقع شود. این پدیده و بسیاری پدیده‌های دیگر را تنها با فرض عرضی بودن امواج نور، و نه طولی بودن آنها، می‌توان توضیح داد! به عبارت دیگر باید فرض کرد که اثیر «مربا-مانند» است.

این نتیجه مایهٔ تأسف است! باید خود را آمادهٔ روبرو شدن با

اشکالات عظیمی ساخت که از توضیح مکانیکی اثیر سرچشمه می‌گیرد.

اثیر و نگرش مکانیکی

بحث دربارهٔ کوششهائی که به قصد پی‌بردن به ماهیت مکانیکی اثیر، به عنوان محیط انتقال نور انجام شده است، داستان مفصلی را تشکیل می دهد. چنانکه می‌دانیم مقصود از ساختمان مکانیکی این است که ماده متشکل از ذرات شمرده شود و نیروهائی میان آنها عمل کند که در امتداد خطهای واصل آنها هستند و تنها به فاصله بستگی دارند. فیزیکدانان برای آنکه از اثیر جوهر مادی مکانیکی مربامانندی بسازند ناچار شده‌اند به فرضهای بسیار مصنوعی و غیرطبیعی متوسل شوند. چون این فرضها به گذشتهٔ تقریباً فراموش شده‌ای تعلق دارد، نیازی به ذکر آنها در اینجا نیست. ولی نتیجه‌ای که بدست آمد قابل‌توجه و با اهمیت است: مصنوعی بودن این فرضها و ضرورت قبول این همه فرضهای مستقل از یکدیگر کافی بود تا اعتقاد به دیدگاه مکانیکی را متزلزل سازد.

علاوه بر دشواریهائی که در ساختمان اثیر جلوه‌گر می‌شوند، ایرادهای ساده‌تر دیگری نیز وجود دارد. اگر بخواهیم پدیده‌های نوری را به طور مکانیکی توضیح دهیم، ناچاریم که وجود آن را در همه جای جهان فرض کنیم. اگر نور برای انتشار به محیط محتاج است پس فضای تهی نمی‌تواند وجود داشته باشد.

ولی بنا بر معلوماتی که مکانیك به ما می‌دهد، می‌دانیم که فضای میانستاره‌ای دربرابر حرکت اجسام مادی مقاومت نمی‌کند. مثلاً سیارات ازمربای اثیر، بی‌آن‌که با مقاومتی شبیه به مقاومت محیطهای مادی روبرو شوند، می‌گذرند. اگر اثیر مزاحم حرکت ماده نشود، باید گفت که کنش متقابلی میان ذرات اثیر و ذرات ماده وجود ندارد. نور، هم از اثیر عبور می‌کند و هم از آب و شیشه؛ ولی سرعت آن در دو جسم متفاوت است. این واقعیت را چگونه می‌توان به طور مکانیکی تعلیل کرد؟ ظاهراً تنها با این فرض که کنش متقابلی میان ذرات اثیر و ذرات ماده وجود دارد. ولی دیدیم که در مورد اجسامی که آزادانه حرکت می‌کنند فرض این بود که چنین کنشهای متقابلی وجود ندارد. به عبارت دیگر میان ماده و اثیر، در

پدیده‌های نورشناختی کنش متقابل وجود دارد ولی در پدیده‌های مکانیکی وجود ندارد. این خود به طور قطع نتیجه‌ای است بسیار معمائی!

برای رهائی از این همه اشکالات یك راه بیشتر بنظر نمی‌رسد. ضمن تلاش برای درك پدیده‌های طبیعی از دیدگاه مکانیکی لازم آمد که در جریان پیشرفت علم تا قرن بیستم، جوهرهای مادی مجعولی چون شاره‌های الکتریکی و مغناطیسی، ذرات نور و اثیر را وارد کنیم. نتیجه‌ای که از این کار بدست آمد فقط آن بود که تمام اشکالات در چند نقطهٔ اصلی، نظیر اثیر در مورد پدیده‌های نوری، متمرکز شوند. بنظر می‌رسد که تمام تلاشهای بی‌ثمری که برای ساختن اثیر از راهی ساده انجام شده و نیز ایرادهای دیگر، همه دال برآنند که فرض بنیادی بُر خطا بوده است، فرضی که بنا برآن می‌توان تمام رویدادهای طبیعت را از دیدگاهی مکانیکی تعلیل کرد. علم نتوانست برنامهٔ مکانیکی را به طرزی قابل قبول اجرا کند، و امروز هیچ فیزیکدانی به امکان تحقق آن عقیده ندارد.

در مطالعهٔ اجمالی که از اندیشه‌های اصلی فیزیکی کردیم، به پاره‌ای مسائل حل‌نشده برخوردیم. با دشواریها و موانعی مواجه شدیم که ما را در تلاش برای دست یافتن به نگرشی یکدست و منسجم از پدیده‌های عالم خارج دچار نومیدی می‌ساختند. در مکانیك کلاسیك بر گهٔ تساوی جرم گرانشی و جرم ماندی وجود داشت که به آن توجهی نشد. سرشت ساختگی و جعلی شاره‌های الکتریکی و مغناطیسی، را دیدیم. در کنش متقابل میان جریان الکتریکی و عقربهٔ مغناطیسی، به اشکالی برخوردیم که حل نشده بجای ماند. باید بخاطر داشت که این نیرو در امتداد خط واصل سیم و قطب مغناطیسی وارد نمی‌آمد و به سرعت بار متحرك بستگی داشت، قانونی که امتداد و اندازهٔ این نیرو را بیان می‌کرد بسیار پیچیده بود. و بالاخره همین اشکال بزرگی که با اثیر داشتیم.

فیزیك جدید بر همهٔ این مسائل تاخته و آنها را حل‌کرده است. ولی در ضمن تلاش برای حل‌آنها، مسائل عمیقتر و جدیدتری ایجاد شده است. اکنون معرفت ما از دانش فیزیکدانان قرن نوزدهم وسیعتر و عمقیتر است. چیزی که هست اینکه تردیدها و دشواریهای ما نیز وسعت و عمق بیشتری یافته‌اند.

خلاصهٔ آنچه گفته شد:

در نظریه‌های کهنهٔ شاره‌های الکتریکی و در نظریه‌های موجی و ذره‌ای نور شاهد کوششهائی هستیم که برای تطبیق نگرش مکانیکی بکار رفته‌اند. ولی در کاربرد این نگرش در حوزهٔ پدیده‌های نوری و الکتریکی با اشکالات فراوان روبرو می‌شویم.

بار الکتریکی متحرك بر عقربهٔ مغناطیسی اثر می‌کند. ولی نیروی مؤثر به جای آن‌که فقط به فاصله بستگی داشته باشد، به سرعت بار نیز بستگی دارد. این نیرو نه جاذب است و نه دافع بلکه عمود بر خط واصل بار به‌عقربهٔ مغناطیسی عمل می‌کند.

در مبحث نور باید بر له نظریهٔ موجی و علیه نظریهٔ ذره‌ای تصمیم بگیریم. تصور امواجی که در محیطی متشکل از ذرات منتشر شوند و نیروهائی مکانیکی میان آن ذرات عمل کنند، محققاً تصوری مکانیکی است. محیطی که نور در آن منتشر می‌گردد کدام است و خواص مکانیکی آن از چه قرار؟ تا جواب این سؤال داده نشود نمی‌توان به تحویل پدیده‌های نورشناختی به پدیده‌های مکانیکی امیدی داشت. ولی مشکلاتی که در حل این مسأله وجود دارد به اندازه‌ای عظیم است که ناچار باید از سؤال و در نتیجه از نگرش مکانیکی چشم پوشید.

۳

میدان، نسبیت

نمایش میدان ــ دو رکن نظریهٔ میدان ــ واقعیت میدان ــ میدان و اثیر ــ چوب‌بست مکانیکی ــ اثیر و حرکت ــ زمان، فاصله، نسبیت ــ نسبیت و مکانیك ــ پیوستار فضا ــ زمان ــ نسبیت عمومی ــ بیرون آسانسور و درون آن ــ هندسه و آزمایش ــ نسبیت عمومی و اثبات آن ــ میدان و ماده.

نمایش میدان

در نیمهٔ دوم قرن نوزدهم افکاری جدید و انقلابی در علم فیزیك وارد شدند. این افکار راه را برای نگرش فلسفی جدیدی که با نگرش مکانیکی متفاوت بود گشودند. نتایج کارهای فارادی[1] و ماکسول[2] و هرتز[3] به پیشرفت فیزیك جدید و پیدایش مفاهیم جدیدی منجر شدند، که نقش تازه‌ای را از واقعیت رقم زدند.

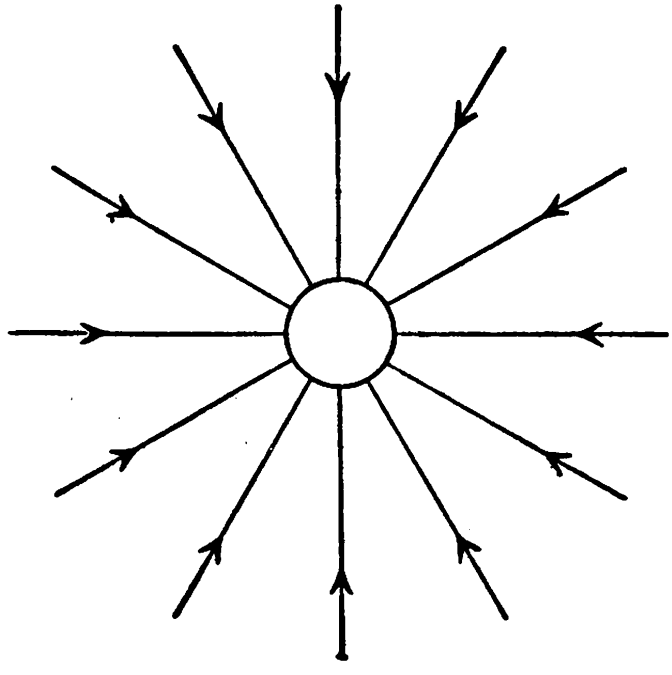
کار ما این است که آن دگرگونی را که این مفاهیم جدید در علم موجب شده‌اند بیان کنیم و نشان دهیم که چگونه بتدریج بر وضوح و توان این مفاهیم افزوده شده است. در اینجا خواهیم کوشید که توالی منطقی را دنبال کنیم و چندان در بند ترتیب تاریخی رویدادها نباشیم.

مفاهیم جدید از پدیده‌های الکتریکی نشأت گرفته‌اند. ولی آسانتر آن است که نخست آنها را از راه مکانیك مطرح سازیم. می‌دانیم که هر دو ذره یکدیگر را جذب می‌کنند و نیروی جاذبه به نسبت مجذور فاصله کاهش می‌یابد. می‌توان این واقعیت را به طریق جدیدی نمایش داد و ما با آن‌که

---

1. Faraday 2. Maxwell 3. Hertz

می‌دانیم فهم مزیت این طرز بیان دشوار است، این کار را می‌کنیم.
دایرهٔ کوچکی که در شکل زیر دیده می‌شود نمایندهٔ جسم جذب



کننده‌ای، مثلاً خورشید، است. در واقع باید این نمودار را در فضا تصور کرد و آن را تصویری بر روی یك صفحه نپنداشت. به همین جهت دایرهٔ کوچك معرف کره‌ای در فضا، مثلاً خورشید، است. چون جسم دیگری که آن را «جسم آزمایشی» نام می‌دهیم به نزدیکی خورشید آورده شود، در امتداد خطی که مراکز این دو جسم را به یکدیگر متصل می‌کند، جذب می‌شود. بنابراین این خطوط روی شکل، امتداد نیروهای جاذبهٔ خورشید را در مواضع مختلف جسم آزمایشی نمایش می‌دهد. پیکانهائی که بر روی هر یك از خطوط رسم شده علامت آن است که نیرو متوجه به خورشید یعنی نیروئی جاذب است. این خطوط را **خطوط نیروی میدان گرانش** می‌نامند. فعلاً آنچه می‌گوئیم یك اصطلاح است و لزومی ندارد که اهمیت بیشتری برای آن قائل شویم. یکی از مشخصات شکل ما، که دربارهٔ اهمیت آن بعداً سخن خواهیم گفت، این است که: خطوط نیرو در فضا رسم شده‌اند، جائی که در آن ماده‌ای حضور ندارد. فعلاً تمام خطهای نیرو یا به طور خلاصه میدان فقط بیانگر این نکته است که چون جسم آزمایشی در

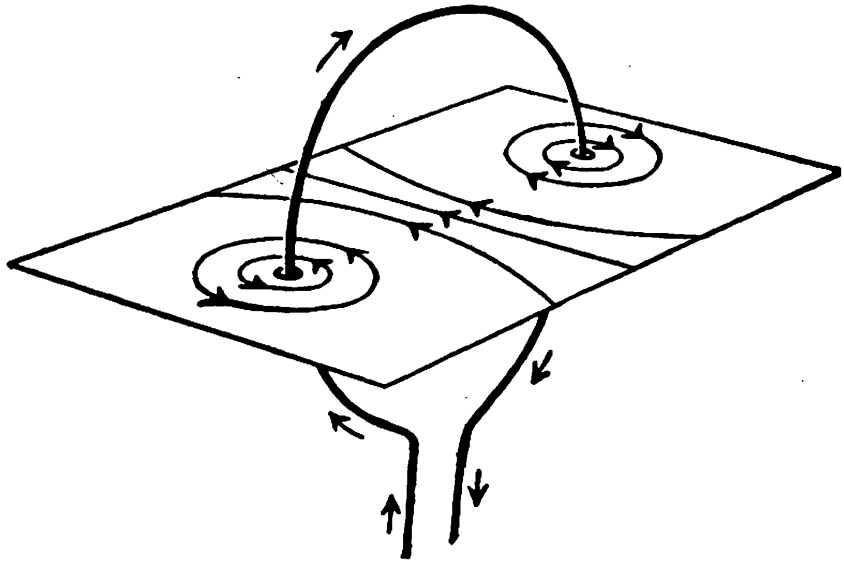
مجاورت کره‌ای که این میدان برایش ساخته شده قرار گیرد چگونه رفتار خواهد کرد.

خطوطی که در مدل فضائی ما دیده می‌شوند همه بر سطح کره عمودند. چون همهٔ آنها از یك نقطه خارج می‌شوند در نزدیکی کره تراکم آنها زیادتر است و بتدریج که از کره دور می‌شویم کمتر می‌شود. چون فاصله تا کره دو یا سه برابر شود، چگالی خطوط در مدل فضائی ما چهار یا نه مرتبه کاهش می‌یابد، اگرچه این کیفیت در شکل ما مشهود نیست. پس این خطوط دو نیاز را بر می‌آورند. از یك طرف امتداد نیروی وارد بر جسمی را نشان می‌دهند که به مجاورت کرهٔ خورشید آورده شده است. از طرف دیگر چگالی خطوط نیرو در فضا، چگونگی تغییر نیرو با فاصله را آشکار می‌سازد. ترسیم میدان در صورتی که به درستی تفسیر شود، هم امتداد نیروی گرانش را نشان می‌دهد و هم بستگی آن را به فاصله بیان می‌کند. همان طور که قانون گرانش را می‌توان به کمك الفاظ یا به زبان دقیق و با صرفهٔ ریاضیات بیان کرد، آن را از روی ترسیم میدان نیز می‌توان دریافت. این نمایش که آن را نمایش به وسیلهٔ میدان می‌خوانیم ممکن است روشن و جالب توجه باشد، ولی دلیلی در دست نیست که آن را واقعاً پیشرفتی بشمار آوریم. اثبات مفید بودن آن در مورد گرانش بسیار دشوار است. ممکن است کسی این خطوط را بیش از یك ترسیم بشمارد و تصور کند که کنش واقعی نیروها از میان آنها می‌گذرد. البته این تصور اشکالی ندارد، ولی در این صورت باید فرض شود که در امتداد خطوط نیرو، تندی تأثیر بی‌نهایت بزرگ است. نیروی کارگر میان دو جسم، بنابر قانون نیوتن، فقط به فاصله بستگی دارد و زمان دخالتی در آن ندارد. نیرو از جسمی به جسم دیگر، بی‌گذشت زمان، منتقل می‌شود! ولی چون حرکت با تندی بی‌نهایت در نظر هر شخص عاقل امر بی‌معنائی است، کوشش برای اینکه ترسیم ما چیزی بیش از یك مدل باشد به جائی ره نمی‌برد.

- اما فعلاً قصد آن را نداریم که در مسألهٔ گرانش بحث کنیم و این مسأله به عنوان مقدمه‌ای که فهم روشهای استدلال مشابهی را در نظریهٔ الکتریسیته آسان می‌سازد، مورد استفاده قرار گرفت.

بحث خود را از آزمایشی آغاز می‌کنیم که تعبیر مکانیکی آن دشواریهای فراوانی برای ما ایجاد کرد. جریانی داشتیم در مداری به شکل دایره. در وسط مدار عقربه‌ای مغناطیسی قرار داشت. همین که الکتریسیته به جریان افتاد، نیروی جدید ظاهر شد که بر قطب مغناطیسی تأثیر می‌کرد و بر خط واصل سیم و قطب عمود بود. این نیرو، در صورتی که معلول بار الکتریکی جاری شمرده می‌شد، مطابق آزمایش رولاند به سرعت بار بستگی داشت. این واقعیتهای آزمایشی با نگرشی فلسفی که نیروها را در امتداد خط واصل میان ذرات و تنها تابع فاصله می‌دانست، متناقض بود.

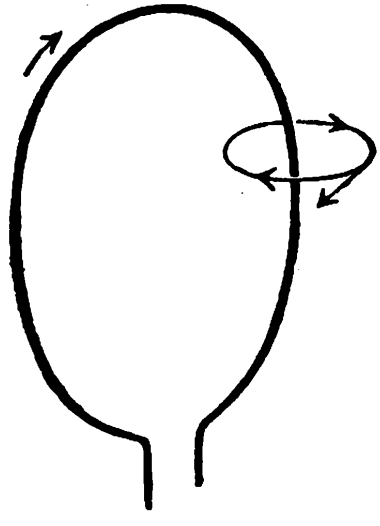
بیان دقیق نیروئی که جریان بر قطب مغناطیسی وارد می‌کند کاملاً پیچیده و در واقع بسی پیچیده‌تر از رابطهٔ مربوط به نیروهای گرانش است. مع‌ذلك سعی می‌کنیم که مانند مورد نیروهای گرانشی، تصویری از کنشهای جریان مجسم سازیم. سؤال این است: جریان با چه نیروئی بر قطبی مغناطیسی که در نقطه‌ای در نزدیکی آن قرار گرفته است تأثیر می‌کند؟ بیان این نیرو با الفاظ کار مشکلی است. حتی فرمول ریاضی آن



نیز مفصل و نازیباست. بهتر آن است که آنچه را دربارهٔ این نیرو می‌دانیم با شکل یعنی با مدل فضائی خطوط نیرو نمایش دهیم. یك اشکال کار این است که هر قطب مغناطیسی همیشه با قطب دیگری همراه است که یك دو قطبی را بوجود می‌آورند. اما همیشه می‌توان عقربهٔ مغناطیسی را

بقدری بلند تصور کرد که فقط نیروهای وارد بر قطبی که نزدیك جریان است، محسوس باشند، قطب دیگر به اندازه‌ای دور است که می‌توان از نیروی وارد بر آن چشم پوشید. برای این‌که ابهامی در کار نباشد، فرض می‌کنیم که قطب نزدیکتر به سیم قطب مثبت باشد.

خصوصیات نیروی مؤثر بر قطب مثبت مغناطیس را می‌توان از روی شکل قبل خواند. نخست به پیکانهائی توجه کنید که نزدیك سیم دیده می‌شوند و امتداد جریان را از پتانسیل بیشتر به پتانسیل کمتر نشان می‌دهند. خطوط دیگر همان خطوط نیروی متعلق به جریان هستند و همه بر صفحه‌ای قرار دارند. اگر این خطوط آن طور که باید، رسم شوند هم امتداد بردار نیروئی را که نمایندهٔ اثر جریان بر قطب مغناطیسی است نشان می‌دهند و هم از طول این بردار ما را مطلع می‌سازند. چنانکه می‌دانیم نیرو بردار است و برای تعیین یك بردار لازم است که هم امتدادش را بدانیم و هم طول آن را. مسألهٔ اصلی ما مسألهٔ امتداد نیروی وارد بر قطب است. سؤال ما این است: چگونه از روی شکل می‌توان امتداد نیرو را در هر نقطهٔ فضا بدست آورد؟



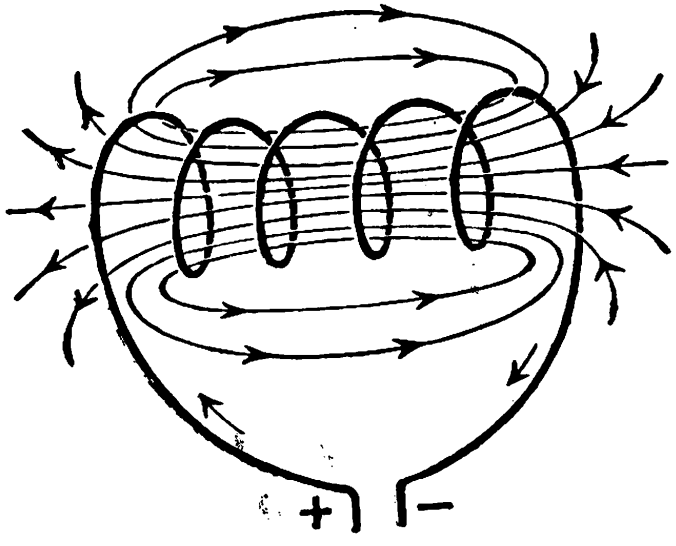
قاعدهٔ خواندن امتداد نیرو از روی چنین مدلی بآسانی مثال سابق، که خطوط نیرو مستقیم بودند، نیست. در شکل بعدی فقط یك خط نیرو را کشیده‌ایم تا روش کار روشنتر شود. چنانکه دیده می‌شود بردار نیرو بر امتداد مماس بر خط نیرو واقع است. پیکان بردار نیرو و پیکانهای واقع بر خط نیرو در یك امتدادند. این همان امتدادی است که در آن نیرو بر

قطب مغناطیسی واقع در این نقطه وارد می‌شود. یك شکل خوب، یا به تعبیر بهتر یك مدل خوب، تا اندازه‌ای ما را از طول بردار نیرو در هر نقطه نیز مطلع می‌کند: هر جا که خطوط متراکم‌ترند، یعنی در نزدیکی سیم، بردار نیرو درازتر است و در نقاط دورتر که خطوط چگالی کمتری دارند طول آن کوتاهتر خواهد بود.

به این ترتیب خطوط نیرو، یا به عبارت دیگر میدان، امکان تعیین نیروهای وارد بر قطب مغناطیسی را در هر نقطه از فضا فراهم می‌آورد. فعلاً این تنها چیزی است که زحمت ساختن میدان را توجیه می‌کند. اگر بدانیم میدان چه حقیقتی را آشکار می‌سازد، با علاقهٔ بیشتری خطوط نیروی منسوب به جریان را بررسی خواهیم کرد. این خطوط دایره‌هائی گرداگرد سیم هستند و بر صفحه‌ای واقعند که بر صفحهٔ سیم عمود است. چون نیرو را از روی شکل بخوانیم، بار دیگر به این نتیجه می‌رسیم که نیرو در امتدادی اثر می‌کند که بر خط واصل میان سیم و قطب عمود است، زیرا مماس بر دایره بر شعاع آن عمود است. تمام اطلاعات ما از نیروهای مؤثر را می‌توان با ساختن میدان خلاصه کرد. ما مفهوم میدان را میان جریان و قطب مغناطیسی وارد می‌کنیم تا نیروهای مؤثر را به طریق ساده‌ای نمایش دهیم.

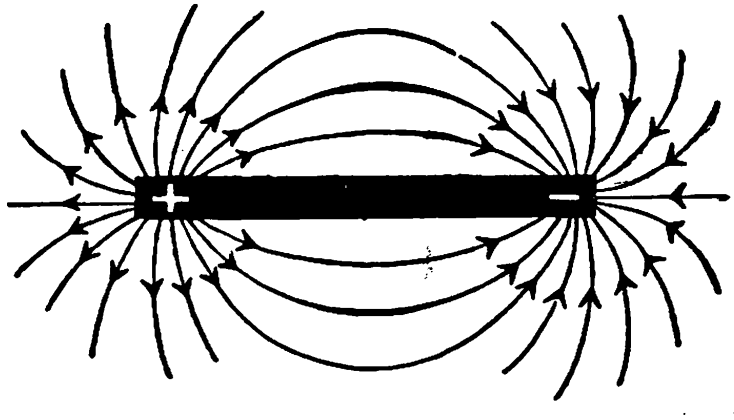
هر جریان با میدانی مغناطیسی همراه است، یعنی چون قطبی مغناطیسی به نزدیکی سیمی که جریان از آن می‌گذرد آورده شود، نیروئی بر آن تأثیر می‌کند. در اینجا یادآور می‌شویم که با استفاده از این خاصیت توانسته‌اند وسیلهٔ بسیار حساسی بسازند که وجود جریان را نشان دهد. همین‌که یاد گرفتیم خواص نیروهای مغناطیسی را از روی مدل میدانی یك جریان بخوانیم، همیشه می‌توانیم برای نشان دادن اثر نیروهای مغناطیسی در هر نقطه از فضا، میدان محیط بر سیمی را که جریان از آن می‌گذرد رسم کنیم. مثال اول ما چیزی است که سولنوئید نام دارد، و آن در واقع سیم‌پیچی است که در شکل نشان داده شده است. قصد ما آن است که از راه آزمایش همهٔ اطلاعات ممکن را در خصوص میدان مغناطیسی جریانی که از یك سولنوئید می‌گذرد بدست آوریم و این اطلاعات را در ساختن میدان بکار بریم. نتیجه‌ای که از کار خود می‌گیریم شکلی است که

ملاحظه می‌شود: خطوط میدان منحنیهائی بسته هستند و طوری سولنوئید



را احاطه می‌کنند که مشخص میدان مغناطیسی جریان باشند.

میدان آهنربای میله‌ای را نیز می‌توان به طریقی شبیه میدان جریان نمایش داد. تصویر بعدی نمایش همین میدان است. خطوط نیرو از قطب مثبت متوجه به قطب منفی می‌باشند. بردار نیرو همیشه بر این خط نیرو مماس است و چون چگالی خطوط در قطبین بیشتر است، طول آن در این نقاط بیش از نقاط دیگر خواهد بود. بردار نیرو نمایندهٔ اثر آهنربا بر یک قطب مثبت مغناطیسی است. در این حالت «چشمهٔ» میدان مغناطیسی جریان نیست، بلکه آهنربا می‌باشد. دو شکل اخیر را باید به دقت با یکدیگر مقایسه کرد: در شکل نخستین میدان مغناطیسی جریانی را داریم که از سولنوئیدی می‌گذرد. شکل دوم مربوط به میدان یک آهنربای میله‌ای است. اگر سولنوئید و آهنربا را فراموش کنیم و فقط به دو میدان نگاه کنیم، بلافاصله



متوجه می‌شویم که هر دو دقیقاً ویژگیهای واحدی دارند. در هر دو حال

جهت خطوط نیرو از یك سر سولنوئید یا آهنربا به سر دیگر آن است.

این نخستین ثمرهٔ نمایش میدان است! اگر میدان این شباهت کامل را میان آهنربای میله‌ای و جریانی که از سولنوئید می‌گذرد آشکار نساخته بود، بدشواری می‌شد به آن پی‌برد.

اکنون می‌توان مفهوم میدان را در معرض آزمونی دقیقتر نهاد. بزودی خواهیم دید که آیا میدان چیزی بیش از نمایش جدیدی از نیروهای مؤثر است یا نه. می‌توان چنین استدلال کرد: فعلاً فرض شود که میدان تمام آثاری را که از چشمهٔ آن نشأت می‌گیرد به طور منحصر به فرد مشخص سازد. این فقط یك حدس است. معنی این فرض آن است که اگر یك سولنوئید و یك آهنربای میله‌ای دارای میدان واحدی باشند، تمام آثار دیگر آنها نیز باید یکی باشد. باز معنی این فرض آن است که دو سولنوئید که در آنها جریان الکتریکی جاری است شبیه به دو آهنربای میله‌ای خواهند بود، و نسبت به وضعی که با یکدیگر دارند، درست مانند دو آهنربای میله‌ای همدیگر را جذب یا دفع می‌کنند، و نیز معنی این فرض آن است که یك سولنوئید و یك آهنربای میله‌ای مانند دو آهنربای میله‌ای یکدیگر را جذب یا دفع می‌کنند. به‌طور خلاصه معنی این فرض آن است که تمام آثار سولنوئیدی که جریان از آن می‌گذرد با آهنربای میله‌ای متناظر با آن یکی است، زیرا مسؤول ایجاد این آثار میدان است و میدان در هر دو مورد دارای کیفیت واحدی می‌باشد. آزمایش حدس ما را کاملاً تأیید می‌کند!

هیچ می‌دانید که بدون مفهوم میدان، پی‌بردن به این حقایق چه اندازه دشوار می‌بود؟! رابطه‌ای که نیروی مؤثر میان یك سیم حامل جریان و یك قطب مغناطیسی را بیان می‌کند بسیار پیچیده است. در حالت مربوط به دو سولنوئید باید به تجسس نیروهائی بپردازیم که از طریق آنها دو جریان بر یکدیگر تأثیر می‌کنند. ولی اگر این کار را به کمك مفهوم میدان انجام دهیم، با شباهتی که میان میدان سولنوئید و میدان آهنربای میله‌ای وجود دارد، بیدرنگ به سرشت این آثار پی می‌بریم.

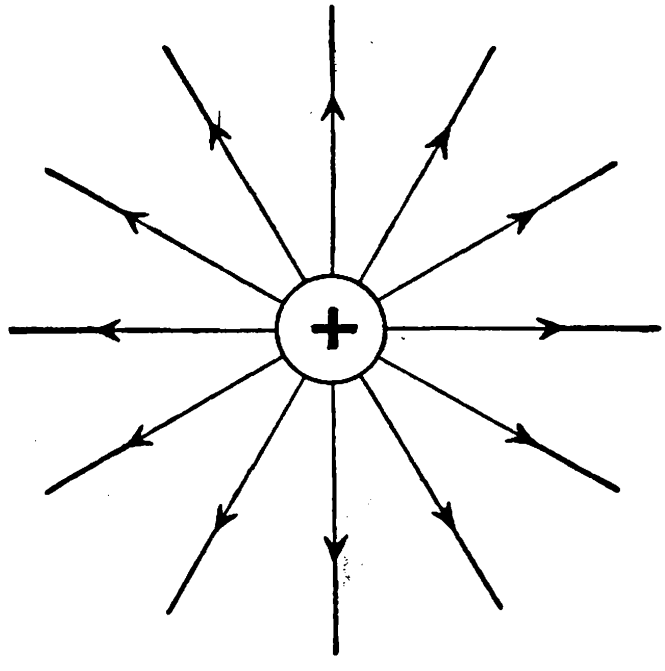
اکنون حق داریم که میدان را چیزی بیش از آنچه در ابتدا تصور می‌رفت بدانیم. بنظر می‌رسد که برای توضیح پدیده‌ها تنها خواص میدان

لازم باشد. تفاوت چشمه‌های میدان اهمیتی ندارد. اهمیت مفهوم میدان در این است که ما را به حقایق آزمایشی جدید رهنمون می‌شود.

معلوم شد که میدان مفهومی است بسیار مفید. در آغاز چیزی بود که در فاصلهٔ میان چشمهٔ میدان و عقربهٔ مغناطیسی قرار می‌گرفت و نیروهای مؤثر را بیان می‌کرد. «عاملی» از جریان تصور می‌شد که آثار و کنشهای جریان از طریق آن صورت می‌گرفت. ولی اکنون این عامل خود چون مترجمی شده است که قوانین را به زبان ساده و روشن و قابل فهم ترجمه می‌کند.

نخستین موفقیت میدان این فکر را القا می‌کند که شاید بهتر باشد تمام آثار و کنشهای جریانها و آهنرباها و بارهای الکتریکی را به طور غیر مستقیم یعنی به کمك میدان مترجم مورد ملاحظه قرار دهیم. می‌توان میدان را چیزی شمرد که همیشه با جریان همراه است، یعنی حتی در موقعی که قطب مغناطیسی برای پی‌بردن به آن موجود نباشد، باز هم وجود دارد. حال این برگهٔ جدید را به طور منطقی و منظم دنبال می‌کنیم.

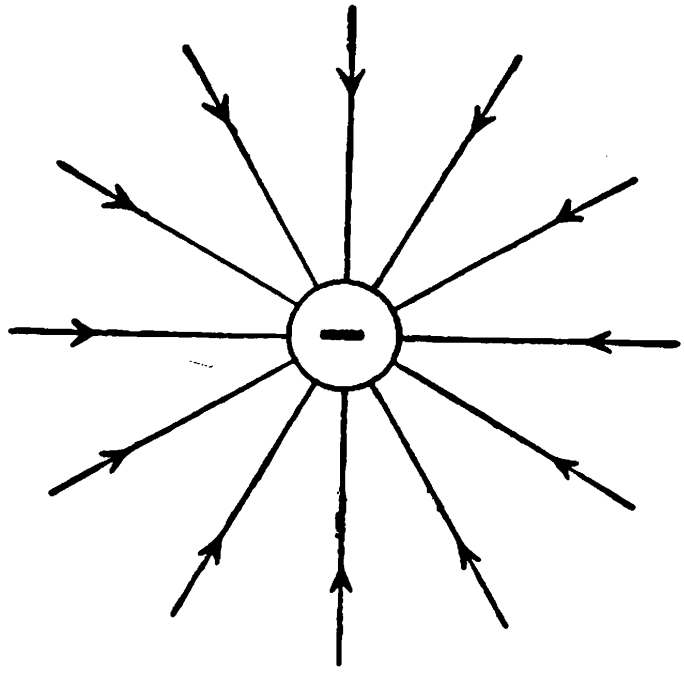
برای یك جسم رسانای باردار هم می‌توان میدانی تصور کرد، درست مانند میدان گرانش یا میدان جریان یا میدان آهنربای میله‌ای. بار



دیگر از ساده‌ترین مثال آغاز می‌کنیم: برای تعیین میدانِ گوئی که بار

مثبت دارد باید پرسید که چه نیروهائی بر جسم آزمایشی کوچکی، که آن نیز بار مثبت دارد و به نزدیکی چشمهٔ میدان یعنی گوی باردار آورده شده است، وارد می‌آیند. این نکته که ما جسم آزمایشی را با بار مثبت انتخاب می‌کنیم و نه بار منفی، فقط مسألـه‌ای است قراردادی و صرفاً جهت پیکانهای خطوط نیرو را مشخص می‌کند. نظر به شباهتی که میان قانون نیوتن و قانون کولن وجود دارد، مدل این میدان شبیه مدل میدان گرانش است (صفحهٔ ۱۱۷). تنها اختلاف بین این دو مدل آن است که جهت پیکانها مخالف یکدیگر است. زیرا دو جرم یکدیگر را جذب می‌کنند، در صورتی که دو بار مثبت یکدیگر را می‌رانند. اما میدان گوئی با بار منفی درست مانند میدان گرانش است، زیرا که در آن جسم آزمایشی مثبت به طرف چشمهٔ میدان جذب می‌شود.

اگر هر دو قطب مغناطیسی و الکتریکی در حال سکون باشند، هیچ



اثر جاذبه یا دافعه‌ای بین آنها مشهود نمی‌گردد. بیان این واقعیت به زبان میدان چنین است: میدان الکتریکی ساکن (الکترو استاتیك) تأثیری در میدان مغناطیسی ساکن ندارد و بالعکس. مقصود از اصطلاح «میدان ساکن (استاتیك)» میدانی است که با مرور زمان تغییر نمی‌کند. بارهای الکتریکی و آهنرباها در صورتی که نیروهای خارجی در آنها تأثیر نکنند،

برای همیشه در کنار یکدیگر به حال سکون باقی خواهند ماند. میدانهای گرانشی و الکتریکی ساکن و مغناطیسی ساکن سرشتهای متفاوتی دارند. با یکدیگر نمی‌آمیزند و هرکدام بدون توجه به دیگران تشخص خود را حفظ می‌کند.

دوباره به گوی الکتریکی برمی‌گردیم که تاکنون آن را ساکن فرض کرده بودیم. فرض می‌کنیم که در اثر نیروئی خارجی شروع به حرکت کند. گوی باردار در حال حرکت است. این جمله به زبان میدان چنین معنی می‌دهد: میدان بار الکتریکی با زمان تغییر می‌کند. از طرف دیگر حرکت بار الکتریکی، چنانکه در آزمایش رولاند دیدیم، معادل با جریان است. به این ترتیب رشتهٔ منطقی زیر نتیجه می‌شود:

تغییر میدان الکتریکی ← حرکت بار الکتریکی

↓

میدان مغناطیسی وابسته به آن ← جریان

بنابراین نتیجه می‌گیریم: تغییر میدان الکتریکی که از حرکت یك بار نتیجه می‌شود همیشه با میدانی مغناطیسی همراه است.

این نتیجه متکی بر آزمایش ارشتد می‌باشد، ولی میزان شمول آن بیشتر است، و در آن تشخیص داده شده است که رابطهٔ یك میدان الکتریکی متغیر در زمان با یك میدان مغناطیسی از نظر بحثهای بعدی کمال ضرورت را دارد.

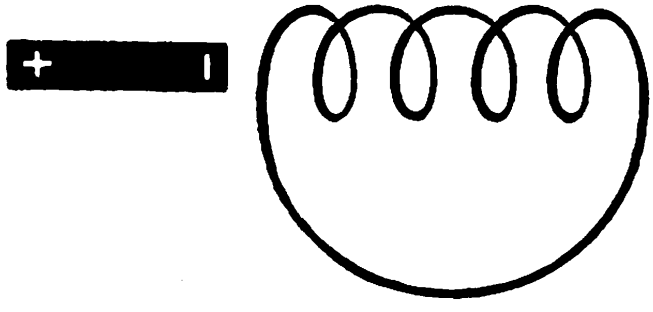
مادام که باری در حالت سکون است، فقط میدان الکتریکی ساکن وجود دارد. به محض این‌که بار الکتریکی به حرکت آغاز کند، میدان مغناطیسی آشکار می‌شود. از این بیشتر هم می‌توان گفت: هرچه بار بزرگتر و حرکت آن سریعتر باشد، میدان مغناطیسی حاصل از حرکت بار شدیدتر و نیرومندتر خواهد بود. این نیز نتیجه‌ای از آزمایش رولاند است. یك بار دیگر با استفاده از زبان میدان می‌توان چنین گفت: هرچه میدان الکتریکی تندتر تغییر کند، میدان مغناطیسی مربوط به آن نیرومندتر خواهد بود.

ما سعی کرده‌ایم حقایقی را که می‌شناختیم از زبان شاره‌ها، که بر طبق نگرش مکانیکی قدیمی وضع شده بود، به زبان جدید میدان ترجمه کنیم. بعدها خواهیم دید که زبان جدید تا چه اندازه روشن و آموزنده و جامع است.

دو رکن نظریهٔ میدان

« تغییر هر میدان الکتریکی همراه با ایجاد میدانی مغناطیسی است.» اگر جای دوکلمهٔ «مغناطیسی» و «الکتریکی» را با یکدیگر معاوضه کنیم، جملهٔ بالا به این صورت در می‌آید: «تغییر هر میدان مغناطیسی همراه با ایجاد میدان الکتریکی است.» فکر تدوین این مسأله را استعمال زبان میدان به ما القا می‌کند، ولی تنها آزمایش می‌تواند صحت یا سقم این گفته را معین سازد.

اندکی بیش از یکصد سال پیش فارادی به آزمایشی دست زد که به کشف بزرگ جریانهای القائی انجامید. تکرار این آزمایش بسیار ساده است. یك سولنوئید یا مدار الکتریکی دیگر، یك آهنربای میله‌ای و یکی از انواع متعدد اسبابهائی که وجود جریان الکتریکی را ردیابی می‌کنند برای این کار کافی است. در آغاز آهنربای میله‌ای را نزدیك سولنوئیدی که مدار بسته‌ای را تشکیل می‌دهد، به حال سکون قرار می‌دهیم؛ هیچ جریانی از سیم نمی‌گذرد، زیرا چشمه‌ای وجود ندارد. فقط میدان مغناطیسی ساکن آهنربای میله‌ای وجود دارد که با زمان تغییر نمی‌کند. حال بسرعت مکان آهنربا را با دور کردن آن از سولنوئید یا با نزدیکتر ساختن آن به

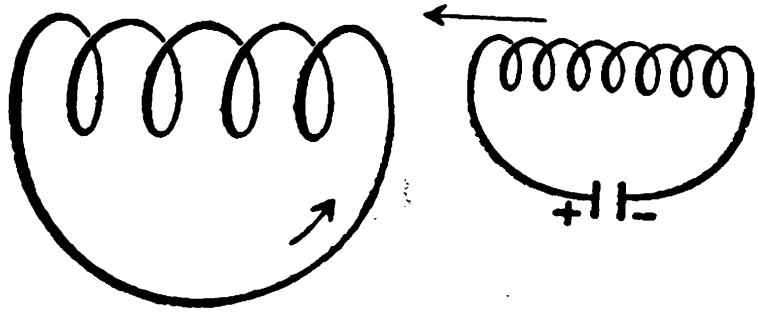


سولنوئید، تغییر می‌دهیم. در سولنوئید جریانی ظاهر می‌شود که مدت زمان کوتاهی دوام می‌آورد و سپس از بین می‌رود.

هروقت که وضعیت آهنربا تغییر کند، مجدداً جریانی ظاهر می‌شود که آن را می‌توان با اسبابی که به اندازهٔ کافی حساس باشد، ردیابی کرد. ولی معنی جریان از دیدگاه نظریهٔ میدان آن است که میدانی الکتریکی وجود دارد که سبب جاری شدن شارهٔ الکتریکی در سیم می‌شود. موقعی که آهنربا به حال سکون درآید، جریان و بنابرآن میدان الکتریکی نابود می‌گردد.

یك لحظه تصور کنید که از زبان میدان اطلاعی نداریم، و می خواهیم نتایج این آزمایش را به طور کمی و کیفی به زبان مفاهیم مکانیکی قدیمی شرح دهیم. آزمایش ما نشان می‌دهد که: از حرکت یك دو قطبی مغناطیسی، نیروی جدیدی خلق می‌شود که شارهٔ الکتریکی را در سیم به حرکت درمی‌آورد. سؤال بعدی این است که: آیا این نیرو به چه چیز بستگی دارد؟ پاسخ دادن به این سؤال بسیار دشوار است. بایستی بستگی این نیرو را به سرعت حرکت آهنربا، به شکل آن و نیز به شکل مدار، مورد تحقیق قرار داد. بعلاوه اگر این آزمایش با زبان کهنه تفسیر شود، هیچ نشانه‌ای وجود ندارد که اگر به جای آهنربای میله‌ای، مدار الکتریکی دیگری را به حرکت درآوریم باز هم جریانی القا می‌شود.

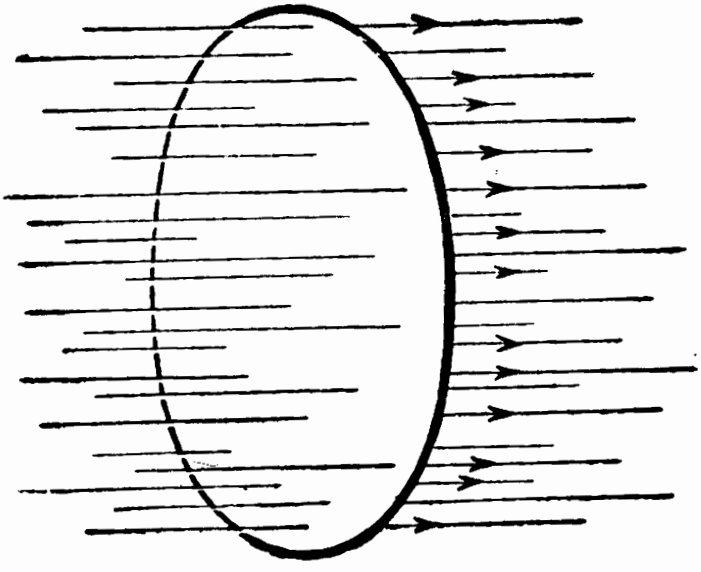
چون به زبان میدان سخن بگوئیم و به این اصل که کنش را میدان تعیین می‌کند اعتماد کنیم، مسأله صورت دیگری پیدا می‌کند. بلافاصله دیده می‌شود که سولنوئیدی که جریانی از آن می‌گذرد بخوبی می‌تواند کار آهنربای میله‌ای را انجام دهد. شکل زیر دو سولنوئید را نشان می دهد که در یکی از آنها، که کوچکتر است، جریانی عبور می‌کند و در دیگری، که بزرگتر است، جریان القائی را می‌توان مشاهده کرد. چون



سولنوئید کوچك را جابجا کنیم، همانگونه که قبلاً آهنربای میله‌ای را

حرکت می‌دادیم، در سولنوئید بزرگتر جریان القائی تولید می‌شود. بعلاوه می‌توان به جای حرکت دادن سولنوئید کوچك با قطع و وصل جریان یعنی قطع و وصل مدار، میدان مغناطیسی را ایجاد کرد و از بین برد. بار دیگر آزمایش حقایقی را که نظریهٔ میدان پیش‌بینی کرده است، تأیید می‌کند!

اینك به مثال ساده‌تری می‌پردازیم. سیم بسته‌ای داریم که به هیچ چشمهٔ جریانی متصل نیست. در نزدیکی آن میدانی مغناطیسی وجود دارد. کاری به این نداریم که چشمهٔ این میدان مغناطیسی مدار دیگری است که جریانی از آن می‌گذرد یا آهنربائی میله‌ای است. در شکل، یك مدار بسته و خطوط نیروی مغناطیسی دیده می‌شوند. بیان کمی و کیفی پدیده‌ای القائی به زبان میدان بسیار آسان است. چنانکه در شکل دیده می‌شود



برخی از خطوط نیرو از سطحی که با سیم محدود شده است می‌گذرند. باید خطوط نیروئی را در نظر بگیریم که قسمتی از صفحه را، که سیم حد آن است، قطع می‌کنند. تا زمانی که میدان تغییر نکند، هراندازه هم که قوی باشد، جریانی در سیم مشاهده نخواهد شد. ولی به‌محض آن‌که عدهٔ خطوطی که از سطح محدود به سیم می‌گذرند تغییر کند، جریانی در آن بوجود می آید. سبب تولید این جریان همان تغییر شمارهٔ خطوطی است که از این سطح عبور می‌کنند. ولی علت این تغییر مطرح نیست. تغییر شمارهٔ خطوط تنها مفهومی است که در توضیح کیفی و کمی جریان القائی، اساسی می

باشد. معنی «تغییر تعداد خطوط نیرو» این است که چگالی خطوط تغییر می‌کند، و این نیز خود به معنی تغییر شدت میدان است.

به این ترتیب رشتهٔ استدلال ما چنین می‌شود: تغییر میدان مغناطیسی ← جریان القائی ← حرکت بار الکتریکی ← پیدایش میدان الکتریکی.

بنابراین: هر میدان مغناطیسی متغیر همراه با میدانی الکتریکی است.

اکنون ما دو رکن بسیار مهم نظریهٔ میدان الکتریکی و میدان مغناطیسی را بدست آورده‌ایم. رکن اول ارتباط میدان الکتریکی متغیر و میدان مغناطیسی است. این ارتباط بر پایهٔ آزمایش ارشتد در مورد انحراف عقربهٔ مغناطیسی بنا شده و نتیجهٔ آن این است: هر میدان الکتریکی متغیر همراه با میدانی مغناطیسی است.

رکن دوم رابطهٔ میان میدان مغناطیسی متغیر با جریان القائی است و از آزمایش فارادی نتیجه می‌شود. این دو رکن شالودهٔ یك تبیین کمی را تشکیل می‌دهند.

در اینجا نیز میدان الکتریکی که همراه با میدان مغناطیسی متغیر است به صورت چیزی واقعی جلوه‌گر می‌شود. قبلاً ناچار بودیم که وجود میدان مغناطیسی یك جریان را، بدون آنکه قطبی در کار باشد، تصور کنیم. اکنون نیز باید به طریق مشابهی مدعی شویم که میدان الکتریکی، بر فرض آن‌که سیمی هم نباشدکه جریان القائی را نشان دهد، وجود دارد.

اگر حقیقت را بخواهید، این ساختمان دو ستونی را ممکن است بر یك ستون متکی ساخت، و آن رکنی است که بر آزمایش ارشتد بنا می‌شود. نتیجهٔ آزمایش فارادی را می‌توان با ملاحظهٔ قانون بقای انرژی از این آزمایش نتیجه گرفت. ما از آن جهت ساختمانی دو ستونی را بکار گرفتیم که گفتارمان روشنتر و به صرفه مقرونتر باشد.

لازم است در اینجا از یك نتیجهٔ دیگر نظریهٔ میدان هم سخن گفته شود. مداری داریم که جریانی از آن عبور می‌کند و فرضاً یك باتری ولتا چشمهٔ این جریان است. اتصال سیم و چشمهٔ جریان به طور ناگهانی قطع می‌شود. بدیهی است که دیگر جریان وجود نخواهد داشت! ولی در فاصلهٔ زمانی کوتاهی که قطع جریان اتفاق می‌افتد، رویداد پیچیده‌ای صورت می

پذیرد که می‌شود آن را با نظریهٔ میدان پیش‌بینی کرد. پیش از قطع جریان میدانی مغناطیسی در اطراف سیم وجود داشت که به محض قطع شدن جریان از میان رفت. بنابراین با قطع جریان، میدانی مغناطیسی ناپدید گردید. شمارهٔ خطوط نیروئی که از سطح محدود به سیم می گذشت بسرعت تغییر کرد. اما چنین تغییر ناگهانی، به هر طریق که انجام شده باشد، باید جریانی القائی بوجود آورد. آنچه اهمیت دارد تغییر میدان مغناطیسی است که هرچه شدیدتر باشد جریان القائی نیز شدیدتر خواهد بود. این نتیجه نیز آزمون دیگری برای نظریهٔ میدان است. قطع جریان باید همراه با ایجاد یك جریان القائی لحظه‌ای شدید باشد. آزمایش هم این پیش‌بینی را تأیید می‌کند. هرکس که جریانی را قطع کرده باشد باید متوجه جرقه‌ای که جستن می‌کند شده باشد. این جرقه اختلاف پتانسیل شدیدی را نشان می دهد که از تغییر سریع میدان مغناطیسی نتیجه شده است.

همین فرایند را از نقطهٔ نظری دیگر یعنی از لحاظ انرژی می‌توان بررسی کرد. میدانی مغناطیسی از بین رفت و جرقه‌ای تولید شد. جرقه نمایندهٔ مقداری انرژی است. بنابراین میدان مغناطیسی نیز باید چنین باشد. اگر بخواهیم مفهوم میدان و زبان آن را بطرزی سازگار و منسجم بکار بریم، باید میدان مغناطیسی را چون انباری از انرژی بشمار آوریم. فقط به این ترتیب است که خواهیم توانست پدیده‌های الکتریکی و مغناطیسی را موافق با قانون بقای انرژی مورد شرح و تفسیر قرار دهیم.

میدان، که در آغاز مدلی مفید بود، بتدریج واقعیتر شد. به کمك آن حقایق قدیمی را فهمیدیم و به حقایقی تازه رهنمون شدیم. نسبت دادن انرژی به میدان گامی جدید در مسیری بشمار می‌رود که درآن مفهوم میدان اهمیتی هرچه بیشتر پیدا می‌کند و مفاهیم جوهرهای مادی، که بنیادهای نگرش مکانیکی بودند، هرچه بیشتر سرکوب می‌شوند.

واقعیت میدان

بیان ریاضی و کمی قوانین میدان در معادلات ماکسول خلاصه می شود. حقایقی که تاکنون ذکر شد به تدوین این معادلات منجر شده‌اند. ولی محتوای این معادلات بسی بیشتر از آن است که ذکر کرده‌ایم. صورت

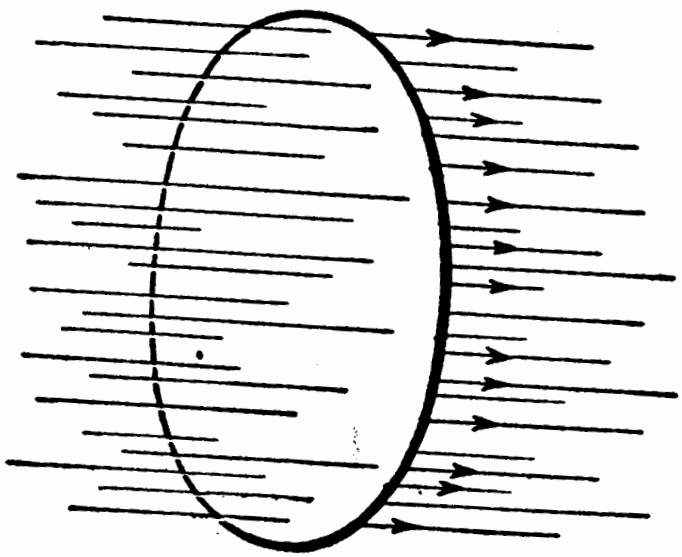
سادهٔ آنها عمقی را پنهان می‌دارد که فقط با مطالعهٔ دقیق آشکار می‌شود.

تدوین این معادلات بزرگترین حادثه‌ای است که از زمان نیوتن به این طرف در فیزیك روی داده است و علت آن تنها محتوای غنی آنها نیست، بلکه این معادلات الگوئی برای قوانین نوع جدید بشمار می‌روند.

جنبه‌های ویژهٔ معادلات ماکسول، که در معادلات دیگر فیزیك جدید هم مشاهده می‌شوند، در یك جمله خلاصهٔ می‌گردد و آن این‌که: معادلات ماکسول قوانینی هستند که ساختار میدان را نمایش می‌دهند.

چرا معادلات ماکسول از لحاظ شکل و ماهیت با معادلات مکانیك کلاسیك اختلاف دارند؟ معنی اینکه می‌گوئیم این معادلات ساختار میدان را بیان می‌کنند چیست؟ چگونه است که از نتایج آزمایشهای ارشتد و فارادی می‌توان قوانین نوع جدید را استخراج کرد که تا این حد در تحول بعدی فیزیك اهمیت داشته‌اند.

از آزمایش ارشتد دانستیم که چگونه میدانی مغناطیسی در اطراف یك میدان الکتریکی متغیر، چنبره می‌زند؛ و نیز از آزمایش فارادی دریافتیم که چگونه میدانی الکتریکی در اطراف یك میدان مغناطیسی متغیر ایجاد می‌شود. برای آشکار ساختن بعضی از جنبه‌های مشخص نظریهٔ ماکسول بهتر است تمام توجه خود را موقتاً به یکی از این دو آزمایش، مثلاً آزمایش فارادی؛ معطوف سازیم. بار دیگر شکلی را، که در آن جریانی



الکتریکی از تغییر میدان مغناطیسی القا می‌شد، نقل می‌کنیم. می‌دانیم که

جریان القائی موقعی ظاهر می‌شود که شمارهٔ خطوط نیروئی که از سطح محدود به سیم می‌گذرد، تغییر کند. پس اگر میدان مغناطیسی تغییرپذیرد یا شکل مدار عوض شود یا خود مدار حرکت کند، یعنی به طریقی تعداد خطوط مغناطیسی گذرندهٔ از صفحه تغییر کند، جریانی القائی ظاهر می‌شود. برای آن‌که تمام این امکانات مختلف در نظر گرفته شود و تأثیرهای خاص هریك مورد بحث قرار گیرد، ناچار نظریهٔ پیچیده‌ای ضرورت پیدا می‌کند. ولی آیا نمی‌توان مسأله را ساده کرد؟ برای این کار می‌کوشیم هرعاملی را که به شکل مدار و طول آن و سطحی که به وسیلهٔ سیم محدود می‌شود ارتباط دارد حذف کنیم. تصور می‌کنیم که مدار رفته رفته کوچك و کوچکتر شود تا به جائی برسد که سطح محدود به آن نقطه‌ای را در فضا احاطه کند. در این صورت هر عاملی که به شکل مدار و وسعت آن مربوط باشد خود بخود بی‌اهمیت می‌شود. در این حد که منحنیهای بسته به نقطه‌ای تبدیل می‌شوند، اندازه و شکل اهمیت خود را از دست می‌دهند و قوانینی به دست می‌آید که تغییرات میدانهای الکتریکی و مغناطیسی را در هرلحظه و در هر نقطهٔ دلخواه از فضا، به هم مربوط می‌کند.

این یکی از گامهای اساسی است که برای دست یافتن به معادلات ماکسول برداشته می‌شود. در اینجا نیز به یك آزمایش خیالی دست می‌زنیم که در خیال انجام می‌شود و در آن آزمایش فارادی را در مورد مداری که بی‌اندازه کوچك شده و به نقطه‌ای میل کرده است، تکرار می‌کنیم.

حقیقت امر آن است که باید این کار را به جای یك گام کامل یك نیمه گام بنامیم. تاکنون تمام توجه ما به آزمایش فارادی معطوف بوده است. اما رکن دیگر نظریهٔ میدان نیز، که بر آزمایش ارشتد مبتنی است، باید به دقت تمام و به وجهی مشابه در نظر گرفته شود. در این آزمایش خطوط نیروی مغناطیسی برگرد جریان چنبره می‌زنند. چون خطوط نیروی دایره‌ای شکل مغناطیسی را تا حد یك نقطه کوچك کنیم، نیمهٔ دوم گام را برداشته‌ایم و گام کامل است که ارتباط میان تغییرات میدانهای الکتریکی و مغناطیسی را در هرلحظه و برای هر نقطهٔ از فضا مشخص می‌سازد.

ولی یك گام اساسی دیگر نیز باید برداشته شود. بنا بر آزمایش فارادی باید سیمی موجود باشد تا وجود میدان الکتریکی آزمون شود،

همان گونه که در آزمایش ارشتد باید قطبی مغناطیسی موجود باشد تا وجود میدان مغناطیسی امتحان گردد. افکار نظری ماکسول از حدود این حقایق تجربی فراتر می‌رود. در نظریهٔ ماکسول میدان الکتریکی و مغناطیسی، یا به طور خلاصه میدان الکترو مغناطیسی چیزی واقعی است. میدان الکتریکی خود به طور مستقل، از میدان مغناطیسی متغیر بوجود می‌آید، خواه سیمی باشد که وجود آن را بیازماید خواه نباشد. میدان مغناطیسی هم از یك میدان الکتریکی متغیر پدید می‌آید، خواه قطبی مغناطیسی برای آزمون آن وجود داشته باشد یا موجود نباشد.

پس دوگام اساسی ما را به معادلات ماکسول می‌رسانند. گام اول: با ملاحظهٔ آزمایشهای ارشتد و رولاند، خطوط دایره‌ای شکل میدان مغناطیسی که دور جریان و میدان الکتریکی متغیر چنبره می‌زنند باید تا حد یك نقطه کوچك شوند. با ملاحظهٔ آزمایش فارادی، خطوط دایره‌ای شکل میدان الکتریکی، که در اطراف میدان مغناطیسی متغیر چنبره می زنند، باید تا حد یك نقطه کوچك شوند. قدم دوم آن است که میدان را چیزی بشماریم که دارای واقعیت خارجی است. میدان الکترو مغناطیسی به محض آن‌که ایجاد شد، مطابق قوانین ماکسول وجود دارد و تأثیر می گذارد و تغییر می کند.

معادلات ماکسول ساختار میدان الکترو مغناطیسی را توصیف می کنند. تمام فضا جولانگاه این قوانین است، و مانند قوانین مکانیکی تنها منحصر به نقاطی نمی‌شوند که در آنها ماده یا بار الکتریکی وجود دارد.

بخاطر داریم که وضع در مکانیك چگونه بود. با دانستن مکان و سرعت یك ذره در یك لحظهٔ معین و با شناختن نیروهائی که وارد می‌آیند، مسیر آیندهٔ ذره را می‌شد پیش‌بینی کرد. در نظریهٔ ماکسول، اگر میدان فقط برای یك لحظه معلوم باشد چگونگی تغییرات میدان را در فضا و زمان می‌توان از معادلات نظریه بدست آورد. همان‌گونه که با معادلات مکانیك می‌توانستیم سرگذشت ذرهٔ مادی را دنبال کنیم، به کمك معادلات ماکسول می‌توان از سرگذشت میدان آگاه شد.

با همهٔ این احوال هنوز یك اختلاف اساسی میان قوانین مکانیکی و قوانین ماکسول وجود دارد. مقایسهٔ قانون گرانش نیوتن با قوانین میدان

ماکسول اهمیت برخی از جنبه‌های خاص این معادلات را آشکار می‌سازد.

با کمك قوانین نیوتن می‌توان حرکت زمین را از نیروئی که میان خورشید و زمین عمل می‌کند بدست آورد. این قوانین حرکت، زمین را به کنش و اثر خورشید دور دست ارتباط می‌دهد. زمین وخورشید با آن‌که این همه از یکدیگر فاصله دارند، در صحنهٔ نمایش نیروها هر دو بازیگرند.

در نظریهٔ ماکسول بازیگر مادی وجود ندارد. معادلات ریاضی نظریه قوانین ناظر بر میدان الکترو مغناطیسی را بیان می‌کنند. این قوانین برخلاف قوانین نیوتن دو رویداد دور از هم را به هم ارتباط نمی‌دهند و آنچه را در اینجا اتفاق می‌افتد به شرایطی که در آنجا وجود دارد متصل نمی‌سازند. میدانی که اکنون و اینجا وجود دارد تابع میدانی است که در همسایگی نزدیك و در زمانی که تازه گذشته وجود داشته است. از روی این معادلات می‌توان گفت که کمی آن طرفتر در فضا و کمی بعدتر در زمان چه روی خواهد داد، بدان شرط که بدانیم در اینجا و اکنون چه روی می‌دهد. این معادلات امکان افزایش معرفت ما از میدان را تنها قدم به قدم و خرده خرده میسر می‌سازد. می‌توان آنچه را در اینجا اتفاق می‌افتد با جمع همین گامهای کوچك از آنچه در دور دست روی داده است، استنتاج کرد. برعکس در نظریهٔ نیوتن برای ارتباط حوادث دور از هم، گامهای بزرگ مجازند. آزمایشهای ارشتد و فارادی را از معادلات ماکسول می‌توان بدست آورد، ولی تنها با جمع کردن گامهای کوچکی که هرکدام از معادلات ماکسول تبعیت کنند.

بررسی ریاضی جامعتری از معادلات ماکسول نشان می‌دهد که می توان نتایج تازه و غیر منتظری از آنها بدست آورد. و تمامی نظریه را در معرض آزمونی عالیتر نهاد. زیرا نتایج نظری آن ماهیتاً کمی هستند و از یك رشته استدلال منطقی نتیجه می‌شوند.

بار دیگر به یکی از همان آزمایشهای خیالی متوسل شویم. گوی کوچکی که دارای بار الکتریکی است بر اثر نیروی خارجی به حرکت نوسانی واداشته شده و مانند آونگی بسرعت رفت و آمد می‌کند. با اطلاعاتی که از تغییرات میدان داریم می‌خواهیم آنچه را که روی می‌دهد به زبان میدان بیان کنیم.

نوسان بار الکتریکی، یك میدان الکتریکی متغیر را بوجود می آورد. این میدان همیشه با میدان مغناطیسی متغیری همراه است. هرگاه سیمی، که مدار بسته‌ای را تشکیل می‌دهد، در مجاورت این میدان قرار گیرد، همین میدان مغناطیسی متغیر جریانی الکتریکی را در مدار القا می کند. همهٔ اینها تکرار مطالب آشناست. ولی مطالعهٔ معادلات ماکسول بصیرت بسیار عمیقتری نسبت به مسألهٔ بار الکتریکی نوسان کننده به ما می‌دهد. با استنتاج ریاضی از معادلات ماکسول می‌توان به بررسی ماهیت میدان گرداگرد بار نوسان کننده پرداخت و ساختار آن را در نقاط نزدیك به چشمه یا دور از آن، و نیز تغییرات میدان را در زمان مشخص ساخت. حاصل این استنتاج امواج الکترو مغناطیسی است. انرژئی که از بارنوسان کننده تشعشع می‌شود با سرعت معینی در فضا منتشر می گردد؛ و چنان که می‌دانیم انتقال انرژی و حرکت حالت چیزی است که شاخص تمام پدیده‌های موجی می‌باشد.

تاکنون انواع مختلف امواج را در نظر گرفته‌ایم. موجی طولی وجود دارد که از کرهٔ تپنده تولید می‌شد و در آن تغییرات چگالی از طریق محیط انتشار پیدا می کرد. محیطی مربامانند داشتیم که در آن امواج عرضی منتشر می‌شد. تغییر شکل محیط مربامانند که معلول حرکت دورانی کره بود محیط را می‌پیمود. در مورد امواج الکترو مغناطیسی چه نوع تغییراتی است که انتشار می‌یابد؟ فقط تغییرات میدان الکترو مغناطیسی! هر تغییر میدان الکتریکی یك میدان مغناطیسی ایجاد می کند، و هر تغییری در این میدان مغناطیسی میدانی الکتریکی را بوجود می‌آورد، و باز هر تغییری که در میدان... و قس علی‌هذا. چون میدان نمایندهٔ انرژی است، تمام این تغییراتی که در فضا با سرعت معینی منتشر می‌شوند، موجی را بوجود می‌آورند. چنانکه از این نظریه نتیجه می‌شود، خطوط نیروی الکتریکی و مغناطیسی در سطوحی عمود بر امتداد انتشار قرار دارند. بنابراین موج ایجاد شده، عرضی است. تصویری ابتدائی که بنا بر آزمایشهای ارشتد و فارادی از میدان رسم کردیم هنوز محفوظ و برقرار است، ولی اکنون می‌فهمیم که معنی عمیقتری دارد.

امواج الکترو مغناطیسی در فضای تهی انتشار پیدا می‌کنند. و این

نیز نتیجه‌ای از این نظریه است. اگر بارنوسان کننده به طور ناگهانی متوقف شود، میدان آن میدانی الکترواستاتیك می‌شود. ولی سلسلهٔ امواجی که از نوسان تولید شده بودند به سیر خود ادامه می‌دهند. پس امواج وجود مستقل و جداگانه‌ای دارند و سرگذشت تغییرات آنها را می‌توان مانند سرگذشت هر شیء مادی دیگری دنبال کرد.

می‌بینیم که تصویر ما از موج الکترو مغناطیسی، که با سرعت معینی در فضا منتشر می‌شود و با زمان تغییر می‌پذیرد، تنها بدان سبب از معادلات ماکسول نتیجه می‌شود که این معادلات ساختار میدان الکترو-مغناطیسی را در هر نقطه از فضا و در هر لحظه از زمان بیان می‌کنند.

سؤال بسیار مهم دیگری وجود دارد. امواج الکترو مغناطیسی با چه سرعتی در فضای تهی منتشر می‌شوند؟ این نظریه به کمك معلوماتی که از آزمایشهای سادهٔ دیگر بدست آمده است و هیچ ارتباطی به انتشار امواج ندارد، جواب صریحی به این سؤال می‌دهد: سرعت موج الکترومغناطیسی برابر با سرعت نور است.

آزمایشهای ارشتد و فارادی پایه‌هائی هستند که معادلات ماکسول بر آنها بنا شده‌اند. همهٔ نتایجی که تاکنون از مطالعهٔ دقیق این قوانین بدست آمده‌اند به زبان میدان بیان شده‌اند. کشف نظری موج الکترو-مغناطیسی که با سرعت نور منتشر می‌شود یکی از بزرگترین دستاوردهای تاریخ علم است.

آزمایش، پیش‌بینی این نظریه را تأیید کرده است. پنجاه سال پیش هرتز برای نخستین‌بار وجود موج الکترومغناطیسی را عملاً اثبات کرد و با آزمایش نشان داد که سرعت آن برابر سرعت نور است. امروز میلیونها نفر امواج الکترومغناطیسی را می‌فرستند و دریافت می‌کنند. ابزار آنها خیلی پیچیده‌تر از اسبابی است که هرتز بکار برد و می‌تواند وجود این امواج را نه تنها در چند متری مراکز تولید بلکه در هزاران کیلومتری آنها ردیابی کند.

میدان و اثیر

موج الکترومغناطیسی، موج عرضی است و در فضای تهی با سرعت

نور منتشر می‌شود. این نکته که سرعت موج الکترومغناطیسی با سرعت نور یکی است به وجود رابطهٔ بسیار نزدیکی میان پدیده‌های نورانی و الکترومغناطیسی اشاره می‌کند.

هنگامی که بنا بود از دو نظریهٔ ذره‌ای یا موجی یکی را برای نور انتخاب کنیم، ما نظریهٔ موجی را برگزیدیم. پراش نور قاطعترین برهانی بود که ما را به این انتخاب واداشت. اگر فرض کنیم که موج نور هم موجی الکترومغناطیسی است هیچ یک از تعلیلها و توضیحهای حقایق نورشناختی را نقض نکرده‌ایم. برعکس نتایج جدیدی نیز از آن بدست می آید. اگر براستی چنین باشد، باید میان خواص نوری و الکتریکی ماده ارتباطی موجود باشد که بتوان آن را از این نظریه استنتاج کرد. این واقعیت که چنین نتایجی بدست می‌آیند و آزمایش هم آنها را تأیید می‌کند برهانی قاطع بر درستی نظریهٔ الکترومغناطیسی نور می‌باشد.

این نتیجهٔ عظیم، حاصل نظریهٔ میدان است. دو شاخهٔ ظاهراً بی ارتباط علم در زیر پرچم نظریهٔ واحدی با یکدیگر جمع می‌شوند. معادلات ماکسول هم القای الکتریکی و هم شکست نور را تعلیل می‌کنند. اگر قصد آن باشد که آنچه را که روی داده است یا ممکن است روی دهد با نظریهٔ واحدی توصیف و توضیح کنیم، باید گفت که اتحاد نورشناسی و الکتریسیته قدم بزرگی است به پیش. از دیدگاه فیزیک تنها اختلاف میان موج الکترومغناطیسی معمولی و موج نور در طول موج آنهاست: طول موج نور خیلی کوتاه است و چشم آدمی به وجود آن پی‌می‌برد، در صورتی که طول موج امواج معمولی الکترومغناطیسی بلند است و با گیرندهٔ رادیوئی ردیابی می‌شوند.

نگرش قدیمی مکانیکی در این صدد بود که همهٔ حوادث طبیعی را به نیروهائی تحویل کند که میان ذرات مادی کارگر بودند. نخستین نظریهٔ ساده‌نگر شارهٔ الکتریکی نیز بر همین نگرش مکانیکی مبتنی بود. فیزیکدان ابتدای قرن نوزدهم از میدان خبری نداشت. آنچه برای او واقعیت داشت جوهر مادی و تغییرات آن بود. او می‌کوشید تا تأثیر دوبار الکتریکی بر یکدیگر را فقط به کمک مفاهیمی بیان کند که مستقیماً به آن دوبار مربوط می‌شدند.

مفهوم میدان نیز در آغاز تنها وسیله‌ای بود که فهم پدیده‌ها را از دیدگاهی مکانیکی آسانتر می‌ساخت؛ در صورتی که در زبان جدید میدان، چیزی که برای فهم کنش دوبار بر یکدیگر اصلی و اساسی بشمار می‌رود، توصیف میدانی است که میان دوبار الکتریکی وجود دارد و نه خود بارها. شناسائی و قبول مفاهیم جدید بتدریج رشد یافت، تا این‌که میدان جوهر مادی را تحت‌الشعاع خود قرارداد. آنگاه پی‌برده شدکه حادثهٔ بسیار مهمی در فیزیك روی داده است. واقعیت تازه‌ای خلق و مفهوم تازه‌ای وضع شده بود که در توصیف مکانیکی جائی نداشت. این مفهوم میدان آهسته آهسته با مبارزه‌ای سخت، مقام برجستهٔ خود را در فیزیك بدست آورد و امروز یکی از مفاهیم اصلی آن بشمار می‌رود. از نظر فیزیکدان جدید مفهوم میدان به همان اندازهٔ صندلیی که روی آن نشسته است واقعیت دارد.

اگر تصور شود که نگرش جدید مبتنی بر میدان، علم را از اشتباهات نظریهٔ قدیمی شارهٔ الکتریکی برکنار داشته، یا این‌که نظریهٔ جدید دستاوردهای نظریهٔ قدیمی را از میان برداشته است، از جادهٔ انصاف منحرف شده‌ایم. نظریهٔ جدید شایستگیها و محدودیتهای نظریهٔ کهنه را آشکار می سازد، و راه را چنان باز می‌کند که از افقی بلندتر بتوان به مفاهیم قدیمی نظر کرد. این کیفیت تنها منحصر به نظریه‌های شارهٔ الکتریکی و میدان نیست، بلکه به همهٔ تحولاتی که در نظریه‌های فیزیکی روی می‌دهد، هر اندازه هم که انقلابی باشند، قابل اطلاق است. در نظریهٔ ماکسول نیز با مفهوم بار الکتریکی مواجهیم. منتها آن را فقط چشمه‌ای برای میدان الکتریکی می‌دانیم. قانون کولن همچنان معتبر و در معادلات ماکسول مدغم است و آن را می‌توان مانند بسیاری از نتایج دیگر از این معادلات بدست آورد. هنوز هم می‌توان نظریهٔ قدیمی را برای پژوهش حقایقی که در حوزهٔ اعتبار آن قرار دارند بکار برد. ولی از نظریهٔ جدید نیز می‌توان استفاده کرد زیرا که تمام حقایق شناخته شده در حوزهٔ اعتبار آن جای دارند.

در مقام مقایسه می‌توان گفت که ساختن نظریه‌ای جدید به آن نمی ماند که انبار کهنه‌ای را خراب کنیم و به جایش آسمانخراش جدیدی بسازیم. بلکه به صعود از کوهی می‌ماند که هرچه بالاتر رویم افق دید ما

وسیعتر می‌گردد و مناظر تازه آشکار می‌شود و به روابط نامنتظری میان نقطهٔ عزیمت خود با محیط با شکوه اطراف آن پی می‌بریم. اما نقطه‌ای که از آن آغاز کردیم هنوز در پایین کوه وجود دارد و دیده می‌شود، منتها کوچکتر بچشم می‌آید و بخش کوچکی از منظرهٔ وسیعی را تشکیل می‌دهد که با گذشتن از موانع این راه پر مخاطره، در برابر ما گشوده شده است.

مدت زیادی طول کشید تا وسعت شمول نظریهٔ ماکسول شناخته شد. نخست میدان را چیزی می‌شمردند که باید بعدها با کمك مفهوم اثیر به طور مکانیکی تفسیر شود. وقتی که آشکار شد اجرای این برنامه عملی نیست، موفقیتهای نظریهٔ میدان بقدری برجسته و با اهمیت شده بودند که دیگر جانشین کردن آن با جزمیات مکانیکی میسر نبود. از طرف دیگر مسألهٔ ابداع مدل مکانیکی اثیر رفته رفته جذبهٔ خود را از دست داد و با ملاحظهٔ ماهیت جبری و مصنوعی فرضهای این مدل، نتایج حاصل از آن هرچه نومیدکننده‌تر شد.

تنها راه حل آن است که قبول کنیم فضا خاصیت فیزیکی انتقال امواج الکترو مغناطیسی را دارد، و ذهن خود را در معنی این گفته خسته نسازیم. ممکن است باز هم از کلمهٔ اثیر استفاده شود، ولی فقط به این ترتیب که از آن تنها خاصیت فیزیکی بخصوصی از فضا در نظر باشد. این کلمه در تاریخ تطور علم چندین‌بار معنی خود را عوض کرده است. اکنون دیگر منظور از آن محیط انتشاری نیست که از ذرات ساخته شده باشد. سرگذشت اثیر هنوز تمام نشده است و در نظریهٔ نسبیت ادامه خواهد یافت.

چوب بست مکانیکی

حال که به اینجای داستان رسیدیم، باید به آغاز داستان، به قانون ماند گالیله بازگردیم. بار دیگر نقل می‌کنیم:

> هر جسمی حالت سکون یا حرکت یکنواخت خود در خط مستقیم را حفظ می‌کند، مگر این‌که نیروهائی که بر آن کارگر می‌افتند مجبورش کنند که حالت خود را تغییر دهد.

ممکن است تعجب کنید و بگوئید ما کـه اصل مـاند را فهمیده‌ایم، دیگر دربارهٔ آن چه می‌توان گفت؟ با آن‌که در قانون ماند به اندازهٔ کافی بحث شده، هنوز مطلب خاتمه نیافته است.

دانشمندی را تصور کنید که معتقد است می‌توان به‌وسیلهٔ آزمایشهای عملی صحت یا بطلان قانون ماند را اثبات کرد. این شخص گویهای کوچکی را بر میزی افقی می‌گذارد و آنها را هل می‌دهد و سعی می‌کند که تـا حد ممکن اصطکاك را از میانه بردارد. او متوجه می‌شود کـه هرچه سطح میز و سطح گویها صافتر شود حـرکت یکنـواخت‌تر می‌گـردد. درست در همان موقعی که او می‌خواهد حکم نهائی خـود را دربارهٔ اصل ماند اعلام کند، شخص دیگری با وی به‌یك شوخی عملی می‌پردازد. فیـزیکدان ما در اتاق بـدون پنجره‌ای کار می‌کند و با دنیای بیرون ارتباطی نـدارد. آن دیگری ماشین خاصی نصب می‌کند که با آن می‌تواند اتاق را گرد محوری که از مرکز آن می‌گذرد با سرعت بچرخاند. به محض این‌که دوران آغاز می‌شود، فیزیکدان چیزهای تازه و غیر منتظری را مشاهده خواهد کرد. گوئی کـه تاکنون حرکت یکنواخت داشت، سعـی می‌کند تـا جائی‌که ممکن است از مرکز اتاق دورتر و به دیـوارهای آن نزدیکتر شود. بـه خود او نیز این احساس دست می‌دهدکه نیروئی عجیب او را به دیوارهای اتاق می‌فشارد. احساس او شبیه به احساس کسی است کـه در قطار راه‌آهن نشسته است و قطار با سرعت زیاد پیچـی را می‌پیمـاید، و حتی از ایـن هم بهتـر، شبیه احساس کسی است که در چرخ فلك دواری نشسته است. همهٔ نتایجی کـه رشته بود پنبه می‌شود.

فیزیکدان ما باید قانون ماند را باطل شمارد، و بـا بطلان آن تمام قوانین مکانیك را به دور ریـزد. قانـون ماند نقطـهٔ شروع وی بـود و در صورتی که این قانون تغییر کند، تمام نتایج آن نیـز تغییـر خواهند کـرد. اگرکسی مجبور باشد تمـام عمر در اتاقی دوار بسر برد وتمام آزمایشهای خـود را در آن انجام دهد، قوانینی برای مکانیك بدست خـواهد آورد کـه با قوانین ما تفاوت خواهند داشت. برعکس اگر با معرفتی عمقی از اصول فیزیك و اعتقادی جازم به آنها وارد اتـاق شود، توضیحی کـه برای نقض مکانیك ارائه می‌دهد عبارت از این است که اتاق دوران می‌کند. حتی بـه

کمك آزمایشهای مکانیکی می‌تواند بگوید که اتاق چگونه می‌چرخد.

چرا تا این اندازه نسبت به ناظر و اتاق دوار او علاقه نشان می دهیم؟ برای این‌که ما خود بر روی زمین، تاحدی دارای همین وضع هستیم. از زمان کوپرنیکوس[1] به این طرف می‌دانیم که زمین بر گرد محور خود می‌چرخد و بعلاوه به دور خورشید نیز حرکت می‌کند. حتی این فکر ساده هم که برای همه واضح و روشن است در مقابل پیشرفت علم دست نخورده مانده است. مع‌ذلك فعلاً به این مسأله کاری نداریم و نظر سادهٔ کوپرنیکوس را می‌پذیریم. اگر ناظر دوار نتواند قوانین مکانیك را تأیید کند، ما نیز بر روی زمین نباید بتوانیم قوانین مکانیك را تأیید کنیم. چیزی که هست حرکت دورانی زمین ما بالنسبه حرکت کندی است و تأثیر آن چندان واضح نیست. مع‌ذلك آزمایشهای زیادی وجود دارند که انحراف اندکی را از قوانین مکانیکی نشان می‌دهند. سازگاری این آزمایشها را با یکدیگر می‌توان دلیلی بر دوران زمین دانست.

بدبختانه نمی‌توان خود را در میان زمین و خورشید قرار داد، و صحت قانون ماند را ثابت کرد و نظر صحیحی نسبت به دوران زمین بدست آورد. این کار را فقط در خیال می‌توان انجام داد. تمام آزمایشهای ما باید بر روی زمینی انجام شود که ناگزیر روی آن بسر می‌بریم. بیان علمی‌تر این امر چنین است: زمین دستگاه مختصات ماست.

برای آن‌که معنی این کلمات واضحتر شود به ذکر مثال ساده‌ای می پردازیم. می‌توان در هر لحظه، مکان سنگی را که از بالای برجی رها شده است، پیش‌بینی کرد و گفت که در فلان لحظه، از زمان سنگ کجا خواهد بود؛ و این پیش‌بینی را به وسیلهٔ مشاهده تأییدکرد. اگر خط‌کشی را پهلوی برج قرار داده باشیم، می‌توانیم بگوئیم که در لحظهٔ معین، جسم در حال سقوط بر کدام یك از درجات خط‌کش منطبق خواهد بود. البته برج و خط‌کش نباید از لاستیك یا مادهٔ دیگری ساخته شده باشندکه درضمن آزمایش تغییر شکل پیدا کنند. تنها چیزهائی که، از نظر اصول، در این آزمایش لازمند عبارتند از یك خط‌کش نامتغیرکه محکم به زمین اتصال داشته باشد،

1. Copernicus

و یك ساعت خوب. اگر این دو چیـز را داشته باشیـم دیگر نه کاری بـه کار معماری برج داریم و نه حتی بودن و نبودن‌آن برای ما تفاوتی دارد. فرض خط‌کش و ساعت فرضی پیش‌پا افتاده است، و معمـولاً در شرح ایـن آزمایشها صریحاً ذکر نمی‌شود. ولی این تحلیل نشان می‌دهد که در هریك از گفته‌های ما چه مفروضات پنهانی وجود دارد. در این مورد وجود میلهٔ صلب و ساعت دلخواهی را پذیرفتیم که بدون آنهـا آزمون قـانون گالیله در خصوص سقوط اجسام غیرممکن است. با این دو اسباب فیزیکی ساده و در عین حال اساسی، یعنی میله و ساعت، می‌توان این قانون مکانیکی را با میزانی از دقت تأیید کـرد. چون این آزمایش بـا کمال دقت انجـام شود، اختلافهائی را میان آزمایش و نظریه نشان می‌دهد کـه نتیجهٔ دوران زمین یا به عبارت دیگـر نتیجهٔ ایـن واقعیت است کـه قوانین مکانیك، بصورتی که قبلاً تدوین شدند، در دستگـاه مختصاتـی که بـه طور صلب به زمین متصل باشد صحت مطلق ندارند.

در تمام آزمایشهای مکانیکی، از هر نوع که باشند، بـاید مکان نقاط مادی را در لحظهٔ معین، درست مانند آزمایش سقوط اجسام، بدست آورد. اما این مکان همیشه باید در قیـاس با چیزی نظیر بـرج و خط‌کش در مثال پیشین بیان شود. بایـد چیـزی در دست بـاشد که آن را چهارچوب مرجع می‌نامیم، که چوب بستی مکانیکی است، و بـا آن می‌توان مکان اجسام را معین کـرد. در تعیین مکان اشخاص یـا اشیاء در شهـر، خیـابانها به منزلهٔ همان چهارچوبی است که مقـایسه نسبت بـه آنهـا بعمل می‌آیـد. هنگـام بیان قوانین مکانیك لازم ندانستیم که این چهارچوب را توصیف کنیم زیـرا برای ما که بر روی زمین زندگی می‌کنیم و تعیین چهارچوبی که به طـور صلب به زمین متصل باشد اشکالی ندارد. این چهارچوب که تمام مشاهدات خـود را بـا آن مقایسه مـی‌کنیم و از اجسام صلب و تغییرناپذیـر ساخته مـی‌شود، دستگاه مختصات نـام دارد. چـون ایـن اصطلاح را زیـاد بکار خواهیم برد از این پس آن را به صورت د. م. می‌نویسیم.

در تمام احکام فیزیکی که تاکنون دیده‌ایم ذکر یك نکته ناقص مـانده است و از توجه به این امر غفلت کرده‌ایم که تمام مشاهدات باید در د.م. معینی انجـام شوند. به جای آن‌که ساخت این د. م. را شرح دهیم، اصلاً

از وجود آن غفلت کردیم. مثلاً هنگامی که نوشتیم: «جسمی حرکت یکنواخت دارد...» باید نوشته باشیم: «جسمی نسبت به یك د. م. انتخاب شده حرکت یکنواخت دارد...» تجربهٔ ما با اتاق دوار به ما آموخت که نتایج آزمایشهای مکانیکی ممکن است به د.م. انتخاب شده بستگی داشته باشد.

اگر دو د.م. نسبت به یکدیگر حرکت دورانی داشته باشند، قوانین مکانیك نمی‌تواند برای هر دوتای آنها معتبر باشد. اگر سطح آب استخری، که یکی از دو دستگاه مختصات را تشکیل می‌دهد، افقی باشد، در دستگاه مختصات دیگر، سطح آب یك استخر مشابه حالت منحنی پیدا می‌کند مانند فنجان قهوه‌ای که با قاشق آن را بهم بزنند.

هنگام تنظیم برگه‌های اصلی مکانیك از یك نکتهٔ مهم غافل ماندیم و نگفتیم که این قوانین درچه دستگاه مختصاتی معتبرند. به همین جهت تا هنگامی که معلوم نشود کدام چهارچوب مرجع منظور نظر است، تمام مکانیك کلاسیك پا در هوا می‌ماند. اما فعلاً از این اشکال می‌گذریم. ما به فرضی متوسل می‌شویم که مختصری نادرست است و آن این است که قوانین مکانیك در هر د. م. که به طور صلب به زمین متصل است معتبر هستند. این فرض از آن جهت ضرورت دارد که د. م. ثابت گردد و معنی احکام ما معین شوند. اگرچه این گفته، که زمین چهارچوب مرجع مناسبی است، کاملاً صحیح نیست، ولی فعلاً این فرض را می‌پذیریم.

به این ترتیب فرض می‌شود که د. م. خاصی وجود دارد که قوانین مکانیك نسبت به آن معتبرند. آیا فقط همین یك د. م. وجود دارد؟ فرض شود که د. م. دیگری مانند قطار راه آهن یا کشتی یا هواپیما داشته باشیم که نسبت به زمین در حرکت باشد. آیا قوانین مکانیك در این د. م. جدید نیز صدق می‌کنند یا نه؟ به طور قطع می‌دانیم که این قوانین در همه حال معتبر نیستند، مثلاً در قطاری که پیچی را می‌پیماید یا در کشتیی که در گرداب افتاده و یا در هواپیمائی که پشتك مارپیچی می‌زند. با مثال ساده‌ای شروع می‌کنیم: یك د.م. نسبت به د.م. «خوب» ما، یعنی دستگاه مختصاتی که قوانین مکانیك در آن معتبرند، به طور یکنواخت حرکت می‌کند. مثلاً قطار راه آهن یا کشتی خیالی که بر جادهٔ بسیار همواری با سرعتی که تغییر

نمی‌کند، در خط مستقیم پیش می‌رود. بنا برتجارب روزانهٔ خود می‌دانیم که هر دو د. م. دستگاههای «خوب» خواهند بود، به این معنی که آزمایشهائی که در قطار و کشتی انجام شوند دقیقاً به همان نتایجی منجر می‌شوند که روی زمین خواهند داد. ولی اگر قطار ناگهان بایستد یا حرکت آن سریع شود، یا اگر دریا طوفانی گردد، حوادث عجیبی اتفاق می‌افتد. در قطار چمدانها از باربند فرو می‌افتند و در کشتی میزها و صندلیها به اطراف پرتاب می‌شوند و مسافرین کشتی دچار دریازدگی می‌گردند. معنی این حوادث از نظر فیزیکی آن است که قوانین مکانیك را نمی‌توان در مورد این د.م. ها بکار برد و این دستگاهها، د.م. های «بد»ی هستند.

این نتیجه را می‌توان به صورت یك اصل که به اصل نسبیت گالیله موسوم است بیان کرد. اگر قوانین مکانیك در یك د. م. معتبر باشند، در هر د. م. دیگری که نسبت به آن حرکت یکنواخت داشته باشد نیز صادق خواهند بود.

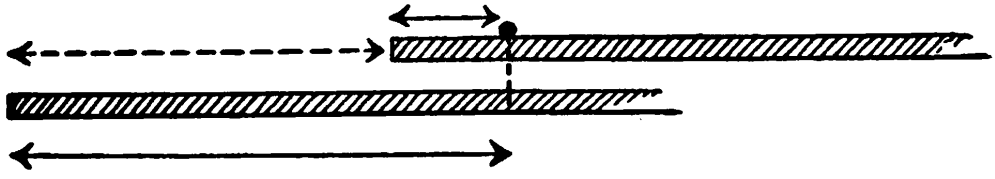
پس اگر دو د.م. داشته باشیم که نسبت به یکدیگر در حرکت غیر یکنواخت باشند، قوانین مکانیك نمی‌توانند در هر دوی آنها صادق باشند. دستگاههای مختصات «خوب»، یعنی آنهائی را که در آنها قوانین مکانیك معتبرند، دستگاههای ماندی می‌خوانیم. این پرسش که آیا اصلاً دستگاه ماندی وجود دارد یا نه هنوز پاسخ قطعی نیافته است. ولی اگر یك دستگاه ماندی وجود داشته باشد، بینهایت از آن وجود خواهد داشت. هر د.م. که نسبت به دستگاه اولی حرکت یکنواخت داشته باشد خود نیز یك د.م. ماندی است.

دو د.م. را در نظر می‌گیریم که با سرعت معینی نسبت به یکدیگر از نقطه‌ای معلوم به حرکت یکنواخت در آیند. اگر خواننده بخواهد تصویر ملموسی را پیش خود مجسم کند، ممکن است حرکت کشتی یا قطاری را بنظر آورد که به طور یکنواخت نسبت به زمین در حال حرکت است. صحت قوانین مکانیك را می‌توان با همان میزان دقت آزمایشهای روی زمین، در کشتی یا قطاری که حرکت یکنواخت دارد نیز تأیید کرد. ولی اگر ناظران دو دستگاه مشاهدات مربوط به حادثهٔ واحدی را از دیدگاه د.م. های متفاوت خود بررسی کنند، اشکالاتی پیش خواهد آمد. هر ناظر

میل دارد مشاهدات ناظر دیگر را به زبان دستگاه خود بیان کند. بار دیگر به ذکر مثال ساده‌ای می‌پردازیم: حرکت یک ذره را از دو د.م. یکی زمین و دیگری قطاری که به طور یکنواخت حرکت می‌کند مشاهده می‌کنیم. هر دو، دستگاههائی ماندی هستند. اگر مکانها و سرعتهای نسبی دو دستگاه در یك لحظهٔ معین، معلوم باشد، آیا می‌توان با دانستن آنچه در یك دستگاه مشاهده شده، آنچه را در دستگاه دیگر مشاهده می‌شود، بدست آورد؟ برای توصیف رویدادها دانستن این نکته بسیار مهم است که چگونه باید از یك دستگاه به دستگاه دیگر رفت. زیرا دو دستگاه با هم معادل هستند. هر دو به یك اندازه برای توصیف حوادث طبیعی شایسته‌اند. در واقع کافی است که نتایج مشاهدهٔ یك ناظر را در یك د.م. دانست تا به نتایجی که ناظر دیگر بدست می‌آورد پی‌برد.

حال مسأله را به صورت مجردتری، بدون دخالت کشتی یا قطار، در نظر می‌گیریم. برای آسان کردن کار تنها به بررسی حرکت در امتداد خطوط مستقیم خواهیم پرداخت. میله‌ای صلب و ساعت خوبی در اختیار داریم. این میلهٔ صلب در حالت سادهٔ حرکت مستقیم‌الخط نمایندهٔ یك د.م. است همان طور که در آزمایش برج گالیله چنین بود. همواره بهتر و ساده‌تر آن است که د.م. را در حرکت مستقیم‌الخط میله‌ای صلب و در حرکت فضائی آن را چوب‌بستی صلب متشکل از میله‌های موازی و عمود بر یکدیگر تصور کنیم و کاری به دیوارها و برجها و خیابانها و نظایر آنها نداشته باشیم. در ساده‌ترین حالت چنان فرض می‌شود که دو د.م. یعنی دو میلهٔ صلب داریم، یکی از این دو میله را بالای دیگری رسم می‌کنیم و آنها را به ترتیب «بالائی» و «پائینی» می‌نامیم. و نیز فرض می‌کنیم که این دو د.م. با سرعت معینی نسبت به یکدیگر در حرکت هستند، بطوری که یکی به موازات دیگری می‌لغزد. بهتر است چنین تصور کنیم که طول میله‌ها بینهایت است و هر یك نقطهٔ مبدأی دارد ولی هیچ کدام انتهائی ندارد. برای دو د.م. ما یك ساعت کفایت می‌کند، زیرا جریان زمان در دو دستگاه یکی است. هنگام شروع مشاهده، مبدأ دو میله بر یکدیگر منطبق است و مکان یك نقطهٔ مادی در این لحظه در هر دو د.م. با عدد واحدی مشخص می‌گردد. نقطهٔ مادی بر درجه‌ای از مقیاس میله قرار

گرفته است. ولی چون میله‌ها به حرکت یکنواخت نسبت بـه یکدیگر آغاز کنند، اعدادی که نماینـدهٔ مکان نقطه هستند پس از مـدتی، مثلاً یك ثانیه، با هم اختلاف پیدا می‌کنند. یك نقطهٔ مادی را روی میلـهٔ بالائـی در نظر بگیرید. عددی که مکان آن را بر روی میلهٔ بالائی مشخص می‌کند بامرور زمان تغییر نمی‌کند. ولی عدد نظیر در میلهٔ پایینی تغییر خواهد کرد. عوض این‌که بگوئیم «عدد مـربوط به مکان یك نقطه» به طور خلاصه می‌گوئیم

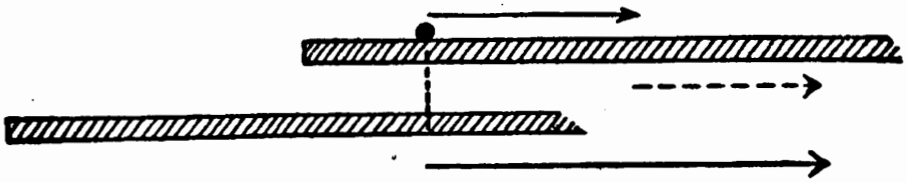


«مختص یك نقطه». به این ترتیب از روی شکل می‌بینیم که هرچند جملهٔ زیر پیچیده می‌نماید، عبارتی درست است و مطلب ساده‌ای را بیان می‌کند: مختص نقطه‌ای در د.م. پائینی برابر است بـا مختص آن در د.م. بـالائی به علاوهٔ مختصات مبدأ د.م. بـالائی نسبت به د.م. پایینی. نکتهٔ مهـم آن است که اگـر مکان ذره را نسبت به یکی از د.م.هـا در دست داشته باشیم همیشه می‌توانیم مکان آن را در د.م. دیگر حساب کنیم. برای این منظور لازم است از مکان نسبی این دو دستگـاه مختصات در هرلحظه آگاه باشیم. هرچند که ایـن مطالب خیلی فـاضلانه بنظر مـی‌رسند ولی در واقع بسیار ساده‌اند و ارزش این همه توضیح را ندارند؛ چیـزی که هست بعدها بسیـار مفید فایده واقع خواهند شد.

نکتهٔ دیگری که باید به آن توجه شود تفاوتـی است که بیـن تعیین مکان یك نقطه و تعیین زمان یك رویداد وجود دارد. هر ناظری میلهٔ خود را دارد که د. م. اوست، ولی بـرای همهٔ ناظـران فقط یـك ساعت وجـود دارد. زمان چیز «مطلقی» است که بـرای تمام ناظران د. م. هـای مختلف بر یك نحو جریان دارد.

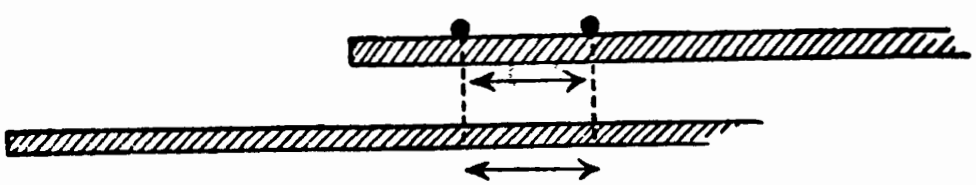
اکنون به ذکر مثال دیگری می‌پردازیم، مردی با سرعت سه کیلومتر در ساعت بر عرشهٔ کشتی بزرگی قدم می‌زند: این سرعت عبـارت از سرعت وی نسبت به کشتی یا به عبارت دیگر نسبت به دستگاه مختصاتی است که به طور صلب به کشتی متصل است. اگر سرعت کشتی نسبت به ساحل سی

کیلومتر در ساعت باشد، و اگر سرعتهای یکنواخت مرد و کشتی هر دو در یك امتداد باشند، آنگاه سرعت مرد نسبت به ناظری که بر ساحل است برابر سی و سه کیلومتر در ساعت و نسبت به خود کشتی سه کیلومتر در



ساعت است. این نکته را می‌توان به شکل انتزاعی‌تری بیان کرد: سرعت حرکت نقطه‌ای مادی نسبت به د.م. پائینی برابر است با سرعت آن نسبت به د.م. بالائی به علاوه با منهای سرعت د.م. بالائی نسبت به د.م. پایینی، بنا برآن که سرعتها در یك امتداد باشند یا امتداد آنها مخالف یکدیگر باشد. به این ترتیب در صورتی که سرعتهای نسبی دو د.م. را بدانیم، نه تنها می‌توانیم مکان را از دستگاهی به دستگاه دیگر تبدیل کنیم، بلکه می‌توانیم سرعت را نیز از یك دستگاه به دستگاه دیگر انتقال دهیم. مکانها یا مختصات و سرعتها نمونه‌هائی از کمیتهائی هستند که در د.م.-های مختلف متفاوتند و با قوانین تبدیل، که در مورد اخیر بسیار ساده‌اند، به یکدیگر مربوط می‌شوند.

مع‌ذلك کمیاتی وجود دارند که در هر دو د. م. یکی هستند و برای تعیین آنها احتیاجی به قوانین تبدیل نیست. مثلاً بر روی میلهٔ بالائی به جای یك نقطه دو نقطهٔ ثابت را اختیار می‌کنیم و فاصلهٔ میان آنها را در نظر می‌گیریم. این فاصله تفاضل مختصات دو نقطه است. برای یافتن مکان دو نقطه در د.م. های مختلف ناچاریم که از قوانین تبدیل استفاده کنیم. ولی در تعیین تفاضل دو مکان اثر د.م. های مختلف یکدیگر را خنثی می‌کنند، و این نکته از روی شکل بخوبی روشن است. باید فاصلهٔ میان دو مبدأ را یك بار اضافه و یك بار کم کنیم. به همین جهت فاصلهٔ میان دو



نقطه ناوردا (نامتغیر) است، یعنی چیزی است که تابع انتخاب د.م. نیست.

مثال دیگر برای کمیتی که مستقل از د.م. است، تغییر سرعت است، که در مکانیك با آن آشنا شده‌ایم. بار دیگر نقطه‌ای مادی، که بر امتداد خط مستقیمی در حرکت است، از دو د.م. مشاهده می‌شود. تغییر سرعت آن برای هر یك از دو ناظر عبارت از تفاضل بین دو سرعت است، و در محاسبهٔ این تفاضل اثر حرکت نسبی یکنواخت دو د.م. از بین می رود. بنابراین، به شرط آن‌که حرکت نسبی دو د.م. نسبت به یکدیگر یکنواخت باشد، تغییر سرعت نیز کمیتی ناوردا است. در غیر این صورت، تغییر سرعت در دو د.م. متفاوت خواهد بود، و این اختلاف از تغییر سرعت حرکت نسبی دو میله که نماینده‌های دو دستگاه مختصاتند، ناشی می‌شود.

اکنون به ذکر آخرین مثال می‌پردازیم: دو نقطهٔ مادی داریم که میان آنها نیروهائی در کار است، و این نیروها فقط به فاصله بستگی دارند. در مورد حرکت مستقیم‌الخط، فاصله و بنا بر آن نیرو ناوردا است. در نتیجه قانون نیوتن که نیرو را به تغییر سرعت مربوط می‌سازد در هر دو د.م. معتبر خواهد بود. بار دیگر به نتیجه‌ای می‌رسیم که آزمایشهای روزانه آن را تأیید می‌کنند: اگر قوانین مکانیك در یك د.م. معتبر باشند، در هر دستگاه دیگری که نسبت به آن حرکت یکنواخت داشته باشد نیز صدق خواهند کرد. البته مثالی که زدیم مثال بسیار سادهٔ حرکت مستقیم‌الخط بود که در آن می‌توان د.م. را با یك میلهٔ صلب نمایش داد، ولی نتایجی که از آن گرفتیم اعتبار عام دارند و می‌توان آنها را به صورت زیر خلاصه کرد:

(۱) هیچ قاعده‌ای در دست نیست که از روی آن بتوان یك دستگاه ماندی را معین کرد. مع‌ذلك اگر یك چنین دستگاهی وجود داشته باشد، می‌توان تعدادی نامتناهی از چنین دستگاهها را پیدا کرد. زیرا تمام د.م.-هائی که نسبت به یکدیگر حرکت یکنواخت دارند ماندی هستند، به شرط آن که یکی از آنها دستگاه ماندی باشد.

(۲) زمان متناظر با یك حادثه در همهٔ د. م. ها یکی است، ولی مختصات و سرعتها متفاوتند، و بر طبق قوانین تبدیل تغییر می‌کنند.

(۳) گرچه در انتقال از یك د.م. به د.م. دیگر مختصات و سرعت

تغییر می‌کنند، ولی نیرو و تغییر سرعت، و بنا برآن قوانین مکانیك، نسبت به قوانین تبدیل ناوردا هستند.

قوانین تبدیلی را که در اینجا برای مختصات و سرعتها بیان کردیم، قوانین تبدیل مکانیك کلاسیك یا به اختصار تبدیل کلاسیك می‌خوانیم.

اثیر و حرکت

اصل نسبیت گالیله برای پدیده‌های مکانیکی صحت دارد. قوانین مکانیکی واحدی بر تمام دستگاههای ماندی، که در حرکت یکنواخت نسبت به یکدیگرند، قابل تطبیق است. می‌خواهیم بدانیم که آیا این اصل دربارهٔ پدیده‌های غیر مکانیکی، و مخصوصاً پدیده‌هائی که در آنها مفهوم میدان بسیار مهم بود، هم معتبر است یا نه؟ همهٔ مسائلی که گرد این سؤال جمع آمده‌اند، ما را بیدرنگ به آغازگاه نظریهٔ نسبیت رهنمون می‌شوند.

چنانکه دیدیم سرعت نور در «خلأ»، یا به اصطلاح دیگر در اثیر، ۳۰۰،۰۰۰ کیلومتر در ثانیه است، و نور خود موجی الکترومغناطیسی است که در اثیر منتشر می‌شود. میدان الکترومغناطیسی حامل انرژی است، و چون از چشمه گسیل شد، صاحب وجود مستقلی می‌گردد. فعلاً همچنان بر این عقیده‌ایم که اثیر محیطی است که امواج الکترومغناطیسی، و نیز امواج نور، در آن انتشار پیدا می‌کنند، و در عین حال از اشکالات متعدد ساخت مکانیکی آن آگاهیم.

در اتاق دربسته‌ای نشسته‌ایم و رابطهٔ خود را با خارج چنان قطع کرده‌ایم که هوا هم نتواند به اتاق نفوذ کند یا از آن خارج شود. اگر بی‌حرکت نشسته و حرف بزنیم، از نظر فیزیکی به تولید امواجی صوتی پرداخته‌ایم که از چشمهٔ ساکن خود با سرعت صوت در هوا پراکنده می شوند. اگر هوا یا محیط مادی دیگری میان دهان و گوش موجود نباشد، هرگز نمی‌توان صوتی را ردیابی کرد. آزمایش نشان داده است که اگر در د. م. انتخاب شده بادی نوزد و هوا به حال سکون باشد، سرعت صوت در تمام جهات به یك اندازه است.

اکنون چنین تصور کنیم که اتاق به طور یکنواخت در فضا حرکت کند. کسی که بیرون اتاق است (یا اگر دوست‌تر دارید، کسی که بیرون

قطار است) از پشت شیشه‌های آن می‌تواند آنچه را که در درون اتاق می گذرد مشاهده کند. او می‌تواند از روی اندازه‌گیریهای ناظر داخل اتاق سرعت صوت را نسبت به د. م. خود، که به محیط دور و برش متصل است و اتاق نسبت به آن در حرکت می‌باشد، بدست آورد. این همان مسألهٔ قدیمی تعیین سرعت جسم در یك د.م. است، برحسب آن‌که سرعت آن در دستگاه دیگر معلوم باشد.

ناظر داخل اتاق مدعی است که سرعت صوت برای او در تمام جهات یکی است.

ناظر بیرونی ادعا می‌کند که: سرعت صوتی که در اتاق متحرك منتشر می‌شود، چون در د.م. من اندازه گرفته شود، در همهٔ جهات مختلف یکی نیست. مقدار آن در امتداد حرکت اتاق از اندازهٔ رسمی سرعت صوت زیادتر و در امتداد مخالف از آن کمتر است.

اینها نتایجی است که از تبدیلات کلاسیك گرفته می‌شود و آزمایش هم آنها را تأیید می‌کند. اتاق در ضمن حرکت هوا را، که محیط انتشار صوت است، با خود همراه می‌برد و به همین جهت سرعت صوت برای ناظران داخل و خارج مساوی یکدیگر نمی‌شود.

از نظریهٔ صوت، به عنوان موجی‌که درمحیطی مادی منتشر می‌شود، نتایج بیشتری را نیز می‌توان بدست آورد. یك راه برای آن‌که صدای کسی را که سخن می‌گوید نشنویم، که البته ساده‌ترین راه نیست، آن است که با سرعتی بیش از سرعت صوت نسبت به هوائی که سخنگو را احاطه کرده است بدویم. در این صورت امواج صوتی تولید شده هرگز به‌گوش ما نخواهند رسید. از طرف دیگر اگر کلمهٔ با اهمیتی را، که دیگر تکرار نمی شود، نشنیده باشیم باید با سرعتی بیش از سرعت صوت بدویم تا به موج آن برسیم و آن کلمه را بچنگ آوریم. در این مثالها چیزی که با عقل سازگار نباشد وجود ندارد، جز اینکه در هر دوحالت باید بتوان با سرعتی در حدود ۳۶۰ متر در ثانیه دوید، و می‌توان تصورکرد که پیشرفتهای فنی آینده چنین سرعتهائی را میسر گرداند. گلولهٔ توپهای موجود سرعتشان بیش از سرعت صوت است، و اگر کسی بر چنین گلوله‌ای سوار باشد هرگز صدای در رفتن توپ را نخواهد شنید.

تمام این مثالها سرشتی صرفاً مکانیکی داشتند، و اکنون موقع طرح سؤالهای مهم فرارسیده است: آیا می‌توان آنچه را در بارهٔ موج صوتی گفته شد در مورد موج نوری نیز تکرار کرد؟ و آیا اصل نسبیت گالیله و تبدیلات کلاسیك، که در مکانیك صادق بودند، قابل اطلاق بر پدیده‌های الکتریکی و نور شناختی نیز هستند؟ اگر پیش از بررسی دقیق این پرسشها با «آری» یا «نه» پاسخ خود را بیان کنیم، جنبهٔ احتیاط را از دست داده‌ایم.

در مورد امواج صوتی در اتاقی که نسبت به ناظر بیرونی حرکت یکنواخت دارد، ملاحظهٔ مراحل زیر برای نتیجه‌گیری ما بسیار اساسی محسوب می‌شود:

اتاق متحرك همراه خود هوائی را که امواج صوت در آن منتشر می‌شود انتقال می‌دهد.

سرعتهای مشاهده شده در دو د.م. که نسبت به یکدیگر حرکت یکنواخت دارند با تبدیلات کلاسیك به یکدیگر مربوط می‌شوند.

در تطبیق همین مسأله به نور، تدوین موضوع کمی فرق می‌کند. ناظران داخل اتاق دیگر صحبت نمی‌کنند، بلکه علائم و امواج نوری را در جهات مختلف ارسال می‌دارند. بعلاوه فرض می‌شود که چشمهٔ امواج نور برای همیشه به حال سکون در اتاق قرار دارد. حرکت امواج نور در اثیر درست مانند حرکت امواج صوتی در هواست.

آیا اثیر نیز مانند هوا در حرکت اتاق شرکت می‌کند؟ از آن‌رو که تصوری مکانیکی در بارهٔ اثیر نداریم، جواب گفتن به این سؤال فوق‌العاده دشوار است. اگر اتاق بسته باشد هوای درون آن چاره‌ای ندارد جز اینکه با آن حرکت کند. بدیهی است که در بارهٔ اثیر چنین فکری بی‌معنی است، زیرا تمام مواد در اثیر شناورند و اثیر در همه چیز نفوذ می‌کند. هیچ دری به روی اثیر بسته نیست. دراین مورد منظور از «اتاق متحرك»، د. م. متحرکی است که چشمهٔ نور به طور صلب به آن متصل است. با همهٔ این احوال می‌توان تصور کرد که اتاق متحرك و چشمهٔ نور آن اثیر را همراه خود انتقال می‌دهند، همان‌گونه که چشمهٔ صوتی و هوا همراه با اتاق بسته منتقل می‌شدند. ولی تصور کیفیتی کاملاً مخالف نیز امکان‌پذیر است. اتاق در اثیر مانند کشتی بردریائی کاملاً آرام حرکت می‌کند و هیچ جزئی

از محیط را همراه خود نمی‌برد، بلکه از آن می‌گذرد. در تصویر اول اتاق متحرك همراه با چشمهٔ نور، اثیر را با خود منتقل می‌کند. قیاس با موج صوتی امکان‌پذیر است. نتایجی مشابه می‌توان بدست آورد. در تصویر دوم اتاق و چشمهٔ نور متحرك، اثیر را با خود نمی‌برند. قیاس با موج صوتی ممکن نمی‌شود و نتایجی که برای موج صوتی بدست آمد به موج نوری قابل اطلاق نیست. این دو تصویر دو حد امکانات هستند. البته می‌توان امکان پیچیده‌تری را تصور کرد که فقط قسمتی از اثیر در حرکت اتاق و چشمهٔ نور آن شرکت می‌کند. ولی پیش از آن‌که ببینیم کدام یك از امکانات ساده‌تر حدی با آزمایش سازگارتر است، بحث در حالت پیچیده‌تر ضرورت ندارد.

از حالت اول شروع و چنین فرض می‌کنیم که اثیر همراه اتاقی که چشمهٔ نورانی به طور صلب به آن متصل است، حرکت می‌کند. اگر به اصل تبدیل سادهٔ سرعت امواج صوتی معتقدیم، می‌توانیم نتایج بدست آمده را در مورد امواج نور نیز بکار ببریم. دیگر موجبی برای تردید در قانون سادهٔ تبدیل مکانیکی باقی نمی‌ماند، که به موجب آن سرعتها در بعضی حالات با یکدیگر جمع می‌شوند و در حالات دیگر از هم کم می‌گردند. بنابراین فعلاً هم انتقال اثیر با اتاق و چشمهٔ نور متحرك را قبول داریم و هم تبدیل کلاسیك را. اگر من چراغ را روشن کنم و چشمهٔ نور به طور صلب به اتاق من متصل باشد، سرعت نور برای من، عدد تجربی معروف ۳۰۰،۰۰۰ کیلومتر در ثانیه است. ولی ناظر بیرونی حرکت اتاق، و در نتیجه حرکت چشمهٔ نور را نیز در نظر می‌گیرد و چون اثیر نیز همراه چشمهٔ نور در حرکت است چنین نتیجه می‌گیرد که: سرعت نور در د. م. من که بیرون اتاق است در امتدادهای مختلف متفاوت است. این سرعت در امتداد حرکت اتاق از سرعت متعارفی آن بیشتر و در امتداد مخالف از این سرعت کمتر است. نتیجه‌ای که می‌گیریم این است: اگر اثیر در حرکت اتاق و چشمهٔ نور شرکت کند و قوانین مکانیك معتبر باشند، سرعت انتشار نور باید به سرعت چشمهٔ نور بستگی داشته باشد. اگر چشمهٔ نور به سمت ما حرکت کند، سرعت نوری که از آن به چشم ما می‌رسد باید بیش از حالتی باشد که چشمه از ما دور می‌شود.

اگر سرعت ما زیادتر از سرعت نور باشد باید بتوان از چنگ علامت نورانی گریخت، و نیز باید بتوان رویدادهای گذشته را، با رسیدن به امواجی که قبلاً فرستاده شده‌اند، دید. البته ترتیب توالی آنها برای ما عکس ترتیبی خواهد بود که بدان فرستاده شده‌اند و رشتهٔ حوادثی که روی زمین اتفاق افتاده است چون فیلمی وارونه بنظر خواهد رسید که از پایان خوش داستان شروع شود.

این نتایج همه از این فرض بدست می‌آید که د. م. متحرك، اثیر را نیز همراه خود منتقل می‌کند و قوانین تبدیل مکانیکی معتبر هستند. اگر چنین باشد، شباهت میان نور و صوت از هر جهت کامل است.

ولی هیچ نشانه‌ای دال بر درستی این نتایج در دست نیست. بلکه برعکس تمام مشاهداتی که به قصد اثبات آنها انجام شده‌اند آنها را نقض می‌کنند و کوچکترین تردیدی در وضوح و روشنی حکم نهائی وجود ندارد. لازم به تذکر است که این حکم از آزمایشهائی نتیجه شده است که به علت اشکالات فنی ناشی از مقدار زیاد سرعت نور، غیرمستقیم بوده‌اند. سرعت نور همیشه و در همهٔ د. م. ها یکی است، و حرکت چشمهٔ نور یا چگونگی این حرکت در آن تأثیری ندارد.

در اینجا به شرح جزئیات آزمایشهائی که این نتیجهٔ مهم از آنها بدست آمده است، نمی‌پردازیم. ولی دلایلی را می‌آوریم که گرچه مستقیماً عدم بستگی سرعت نور را به حرکت چشمهٔ نور اثبات نمی‌کنند، اما این حقیقت را قابل قبول و قابل فهم می‌سازند.

در منظومهٔ شمسی، زمین و سیارات دیگر برگرد خورشید حرکت می کنند. ما از وجود منظومه‌های سیاره‌ای دیگری شبیه به منظومهٔ خودمان اطلاعی نداریم. ولی منظومه‌های زیادی از ستارگان دوگانه وجود دارند که از دو ستاره تشکیل شده‌اند و هر دوی آنها برگرد نقطهٔ واحدی که گرانیگاه آنها خوانده می‌شود حرکت می‌کنند. مشاهدهٔ حرکت این ستاره‌های مضاعف درستی قانون گرانش نیوتن را نشان می‌دهد. اکنون فرض می کنیم که تندی نور به سرعت جسمی که نور از آن گسیل می‌شود بستگی دارد. پس پیغامی که از ستاره به ما می‌رسد، که همان شعاع نور است، بسته به سرعت ستاره در لحظه‌ای که آن را گسیل می‌کند، تندتر یا کندتر

حرکت می‌کند. در این صورت حرکت ستاره‌های دوگانهٔ دور دست حرکتی کاملاً آشفته خواهد بود و تحقیق درستی قوانین گرانش که بر منظومهٔ سیاره‌ای ما حاکم است، امکان نخواهد داشت.

اینك آزمایش دیگری را در نظر می‌گیریم که بر فکر بسیار ساده‌ای مبتنی می‌باشد. چرخی را تصور کنید که خیلی سریع دوران می‌کند. بنا به فرضی که کردیم اثیر در حرکت چرخ با آن شریك است. اگر موج نوری از مجاورت این چرخ عبور کند، باید سرعت آن هنگام سکون چرخ با سرعت آن در موقع حرکت چرخ تفاوت داشته باشد. و همان طورکه سرعت صوت در هوای ساکن با سرعت آن در هوای توفانی فرق دارد، سرعت نور در اثیر ساکن نیز باید با سرعت نور در اثیری که به واسطهٔ گردش چرخ به حرکت در آمده است، اختلاف داشته باشد. ولی چنین اختلافی تاکنون مشاهده نشده است. از هر نقطه‌ای که به این مطلب بپردازیم و به هر آزمایش قطعی که متوسل شویم، در همه حال حکم نهائی مخالف این فرض است که حرکت، اثیر را منتقل می‌کند. از این قرار نتیجهٔ مشاهدات که با براهین مفصل و فنی دیگری تأیید می‌شود، چنین است:

سرعت انتشار نور به حرکت چشمه‌ای که نور از آن گسیل می‌شود بستگی ندارد.

نباید چنین فرض کرد که جسم متحرك، اثیرِ حول و حوش خود را همراه خود می‌برد.

بنابراین باید از خیال تشابه امواج نور و امواج صوت منصرف شویم و به شق دیگر قضیه توجه کنیم: ماده در اثیر حرکت می‌کند و اثیر در حرکت آن شریك نیست. معنی این گفته آن است که دریائی از اثیر فرض می‌شود که همهٔ د.م. ها یا در آن به حال سکون هستند و یا نسبت به آن حرکت یکنواخت دارند. فعلاً کاری به این مسأله نداریم که آیا آزمایش مؤید این نظریه است یا آن را رد می‌کند. بهتر است که نخست با معنی این فرض جدید و با نتایجی که از آن استنتاج می‌شود بیشتر آشنا شویم.

دستگاه مختصاتی وجود دارد که نسبت به دریای اثیر، ساکن است. در مکانیك میان چند د.م. که نسبت به یکدیگر حرکت یکنواخت داشته باشد، تفاوتی نمی‌توان قائل شد. همهٔ این د.م. ها به یك اندازه «خوب»

یا «بد» هستند. اگر دو د. م. نسبت بـه یکدیگـر حـرکت یکنواخت داشته باشند، در مکانیك این سؤال، که کدام یك متحرك و کدام یك ساکن است، سؤالی بی‌معناست. تنها حـرکت نسبی یکنواخت است که می‌توان مشاهده کرد. بنا بر اصل نسبیت گالیله نمی‌توان از حرکت یکنواخت مطلـق سخن گفت. مقصود از این عبارت که حرکت مطلق نیـز وجـود دارد و حـرکت منحصر به حـرکت نسبی نمـی‌بـاشد، چیست؟ مقصود ایـن است کـه د.م. خاصی وجود دارد که بعضی از قوانین طبیعت در آن دستگاه با دستگاههای دیگر فرق دارد؛ و نیز ناظری می‌تواند از راه مقایسهٔ قوانینی کـه در د.م. خاص او صحت دارند بـا قـوانینی که در تنها دستگاهـی که انحصار مطلق معیار بودن را دارد معتبرنـد، تشخیص دهند که د. م. وی ساکـن است یا متحرك. در اینجا وضـع بـا مکانیك کلاسیك، که در آن بنا بـر قانون ماند گالیله حرکت مطلق پوچ و بی‌معناست، تفاوت پیدا می‌کند.

اگر حرکت از میان اثیر فرض شود، در حوزهٔ پدیده‌های میدان چـه نتایجی بدست می‌آید؟ مقصود از ایـن فـرض آن است کـه به وجـود د.م. مخصوصی قائل شویم که نسبت به دریای اثیر ساکن است و به همین جهت از همهٔ دستگاههای دیگر متمایز می‌باشد. واضح است که بعضی از قـوانین طبیعت باید در ایـن د.م. صورت دیگری پیدا کنند، وگرنـه جملهٔ «حـرکت از میان اثیر» عبارت بی‌معنائی خواهد بود. اگر اصل نسبیت گالیله درست باشد، حرکت از میان اثیر معنائی نمی‌توانـد داشته باشد. آشتـی ایـن دو مفهوم با هم غیرممکن است. مع‌ذلك اگـر د.م. خاصـی یافت شود که بـه اثیر متصل باشد، آنگاه صحبت از «حرکت مطلـق» و «سکون مطلق» معنی مشخصی خواهد داشت.

در واقع حق انتخابی برای ما وجود ندارد. ما کوشیدیم اصل نسبیت گالیله را نجات دهیم و برای این کار فرض کردیم که دستگاههای مقایسه، اثیر را همراه با خود منتقل می‌کنند. ولی این فرض به تناقض بـا آزمـایش انجامید. تنها راهی که در مقابل داریم آن است که اصل نسبیت گالیله را رها کنیم و این فـرض را بیازمائیـم که همهٔ اجسام در دریـای ساکـن اثیر حرکت می‌کنند.

قدم بعدی آن است که نتایجی را که با اصل نسبیت گالیلـه سازگار

نبودند و حرکت از میان اثیر را تأیید می‌کردند بررسی کنیم و آنها را به بوتهٔ آزمایش قرار دهیم. تصور این قبیل آزمایشها بسیار ساده است، ولی انجام آنها بسیار دشوار می‌باشد. چون سروکار ما در این کتاب با افکار است، لزومی ندارد که نگران دشواریهای فنی باشیم.

دوباره به اتاق متحرك و دو ناظر، که یکی در داخل اتاق و دیگری در بیرون آن هستند، بازمی‌گردیم. ناظر بیرونی در د. م. معیار است که دریای اثیر را مشخص می‌کند. این د.م. دستگاه ممتازی است که در آن سرعت نور همیشه مقدار ثابت و متعارف خود را دارد. نور کلیهٔ چشمه‌های نور، چه در دریای آرام اثیر ساکن باشند و چه متحرك با سرعت واحدی منتشر می‌شوند. اتاق و ناظر داخل آن در میان دریای اثیر حرکت می‌کنند. فرض کنید در وسط اتاق چشمهٔ نوری روشن و خاموش شود. بعلاوه دیوارهای اتاق را شفاف تصور کنید بطوری که ناظران داخلی و خارجی هر دو بتوانند سرعت نور را اندازه بگیرند. اگر از این دو ناظر پرسیده شود که انتظار چه نتایجی را دارند، پاسخ آنان چیزی خواهد بود شبیه آنچه در زیر می‌آید:

ناظر بیرونی: د. م. من را دریای اثیر مشخص کرده است. سرعت نور در د.م. من همیشه اندازهٔ معیاری خود را دارد. من هیچ احتیاجی به تحقیق در این مسأله ندارم که آیا چشمهٔ نور یا اجسام دیگر متحرکند یا نه؛ زیرا آنها هرگز دریای اثیر مرا همراه خود نمی‌برند. د.م. باید سرعت معیاری خود را داشته باشد و امتداد شعاع نور یا حرکت چشمهٔ نور را در آن تأثیری نیست.

ناظر درونی: اتاق من در دریای اثیر حرکت می‌کند. یکی از دیوارها از چشمهٔ نور دور و دیگری به آن نزدیك می‌شود. اگر اتاق من نسبت به دریای اثیر با سرعت نور حرکت کند، هرگز نوری که از وسط اتاق گسیل می‌شود به دیواری که با سرعت نور از آن می‌گریزد نخواهد رسید. اگر سرعت حرکت اتاق کمتر از سرعت نور باشد، نوری که از وسط اتاق گسیل می‌شود به یکی از دیوارها زودتر خواهد رسید تا به دیوار دیگر. دیواری که به سمت موج نور حرکت می‌کند زودتر از دیواری که از آن دور می‌شود، آن را دریافت خواهد کرد. بنابراین گرچه چشمهٔ نور به طور

صلب به د.م. من متصل است، سرعت نور در تمام جهات یکسان نیست. این سرعت در امتداد حرکت نسبت به دریای اثیر کوچکتر و در امتداد مخالف آن بزرگتر است، چه در حالت اول دیوار از موج نور فرار می‌کند و در حالت دوم دیوار به سمت موج حرکت می‌کند و سعی دارد که زودتر آن را ببیند.

به این ترتیب فقط در دستگاهی که با دریای اثیر متمایز می‌شود سرعت نور در تمام جهات یکسان است. در د.م. های دیگر، که نسبت به دریای اثیر حرکت می‌کنند، سرعت نور بسته به امتدادی خواهد بود که در آن اندازه‌گیری انجام می‌شود.

آزمایش قطعیی که بررسی شد محك تشخیص درستی نظریهٔ حرکت از میان دریای اثیر می‌گردد. در حقیقت طبیعت دستگاهی را در اختیار ما گذاشته است که با سرعت نسبتاً زیادی حرکت می‌کند و آن کرهٔ زمین در حرکت سالانه‌اش به دور خورشید است. اگر فرض ما صحیح باشد، سرعت نور در امتداد حرکت زمین باید با سرعت در امتداد مخالف آن متفاوت باشد. این اختلاف را می‌توان حساب کرد و طرح مناسبی برای آزمون عملی آن ریخت. چون از نظریه اختلافهای زمانی کوچکی نتیجه می‌شود، تدابیر آزمایشی بسیار هوشمندانه‌ای را باید اندیشید. این تدبیرها همه در آزمایش معروف مایکلسن-مورلی[1] بکار رفته‌اند. نتیجهٔ آن حکم «مرگ» نظریهٔ دریای اثیری است که همهٔ اجسام در آن حرکت می‌کنند. این آزمایش نشان داد که سرعت نور به هیچ روی تابع امتداد نیست. اگر نظریهٔ دریای اثیر پذیرفته شود، نه‌تنها سرعت نور بلکه سایر پدیده‌های میدانی هم در یك د.م. متحرك باید بستگی به امتداد را نشان دهند. همهٔ آزمایشها به همان نتیجهٔ منفی آزمایش مایکلسن-مورلی منجر شده‌اند، و هیچ نوع بستگی به امتداد حرکت زمین را آشکار نکرده‌اند.

وضع رفته رفته خطیرتر می‌شود. دو فرض را سنجیده‌ایم: اول آن‌که اجسام متحرك اثیر را همراه خود می‌برند. عدم بستگی سرعت نور به حرکت چشمهٔ نور این فرض را نقض کرد. دوم آن‌که د.م. ممتازی وجود

1. Michelson-Morley

دارد و این‌که همهٔ اجسام حرکت خود را از میان دریای اثیر آرامی انجام می‌دهند ولی اثیر را به همراه خود نمی‌برند. در این صورت اصل نسبیت گالیله بی‌اعتبار می‌شد و سرعت نور در د.م. های مختلف اندازهٔ واحدی نمی‌داشت؛ در این مورد نیز تناقضی با آزمایش وجود دارد.

نظریه‌های ساختگیتری نیز مورد بررسی قرار گرفت که در آنها فرض می‌شد که حقیقت چیزی بینابین این دو حالت حدّی است. اثیر تا اندازه‌ای در حرکت جسم شرکت می‌کند. ولی این نظریه‌ها همه دچار شکست شدند: تمام کوششهائی که برای توضیح پدیده‌های الکترومغناطیسی در د.م. متحرك، با توسل به حرکت اثیر، حرکت از میان اثیر یا ترکیبی از این دو، بیحاصل و ناموفق بوده است.

به این ترتیب یکی از برجسته‌ترین صحنه‌های تاریخ علم پدید آمد: هیچ یك از فرضهای مربوط به اثیر به جائی نرسید. حکم آزمایش همیشه منفی بود. چون به سیر تکاملی فیزیك نظر افکنیم خواهیم دید که اثیر به محض تولد به «کودك هولناك[1]» خانوادهٔ جوهرهای فیزیکی تبدیل شد. نخست بنای ساختمان مکانیکی ساده‌ای برای اثیر به جائی نرسید و ناچار از این کار منصرف شدند. همین مسأله تا حد زیادی سبب سقوط نگرش مکانیکی گردید. سپس امید ما به این‌که با اثیر د.م. خاصی متمایز خواهد شد که می‌توان با آن نه‌تنها به حرکت نسبی بلکه به حرکت مطلق نیز دسترس پیدا کرد مبدل به یأس گردید. این تنها راهی بود که اثیر می توانست علاوه بر انتقال امواج وجود خود را توجیه کند. هرچه کوشش شد که به اثیر واقعیتی داده شود فایده‌ای نبخشید. نه ساختمان مکانیکی اثیر آشکار شد و نه قضیهٔ حرکت مطلق به جائی رسید. از همهٔ خواص اثیر فقط یکی باقی ماند که همان قابلیت انتقال امواج الکترومغناطیسی است. همهٔ تلاشهای ما برای کشف خواص اثیر به اشکالات و تناقضات منتهی شد. پس از این همه تجربه‌های تلخ اکنون موقع آن رسیده است که بکلی اثیر را فراموش کنیم و دیگر نامی ازآن به میان نیاوریم. از این پس خواهیم گفت: فضای ما دارای این خاصیت فیزیکی است که امواج را می

1. enfant terrible

تواند منتقل کند، و به این ترتیب کلمه‌ای را که می‌خواهیم از آن پرهیز کنیم، از قلم می‌اندازیم.

ولی باید دانست که حذف یك کلمه از فهرست لغات، درمان درد نیست. در واقع گرفتاریهای ما بیش از آن است که به این ترتیب از میان برداشته شود!

اینك حقایقی را که آزمایش به حد کفایت مؤید آنهاست، بدون توجه به مسألهٔ ا-ر[1] می‌نویسیم:

۱. نور در فضای تهی دارای سرعت معینی است که به حرکت چشمهٔ آن یا گیرندهٔ آن بستگی ندارد.

۲. در دو د.م. که نسبت به یکدیگر حرکت یکنواخت دارند، تمام قوانین طبیعت دقیقاً یکی خواهند بود، و هیچ راهی برای تشخیص حرکت یکنواخت مطلق وجود ندارد.

آزمایشهای زیادی وجود دارد که این دو حکم را تأیید می‌کنند، و هیچ آزمایشی نیست که یکی از آن دو را نقض کند. حکم اول مبیّن خاصیت ثبات سرعت نور است، و حکم دوم تعمیم اصل نسبیت گالیله، که برای پدیده‌های مکانیکی وضع شده است، به تمام رویدادهای طبیعی است.

در مکانیك دیدیم که: اگر سرعت نقطه‌ای مادی نسبت به یك د.م. فلان اندازه باشد، در د.م. دیگری که نسبت به د.م. اولی حرکت یکنواخت دارد، اندازهٔ دیگری خواهد داشت. این نکته از اصول تبدیلات سادهٔ مکانیکی نتیجه می‌شود. و این تبدیلات خود بلاواسطه از دریافت شهودی ما حاصل می‌گردد (حرکت مرد نسبت به کشتی و کشتی نسبت به ساحل)، و ظاهراً در این مورد چیز باطل و نادرستی وجود ندارد. ولی این قانون تبدیل با ثابت بودن سرعت نور سازگار نیست. به عبارت دیگر چون بر دو حکم بالا اصل سوم زیر را اضافه کنیم:

۳. تبدیل سرعتها و مکانها از یك دستگاه ماندی به دستگاه دیگر

---

۱. مؤلف کتاب در اینجا به‌جای کلمهٔ اثیر (Ether) این علامت را «E-r» گذاشته است، و ما هم آن را به صورت «ا-ر» در ترجمهٔ فارسی نقل کرده‌ایم. ـ مترجم.

مطابق قانون تبدیل کلاسیك است، تناقض بخوبی آشکار می‌شود. نمی توان (۱) و (۲) را با اصل (۳) ترکیب کرد.

ظاهراً تبدیل کلاسیك خیلی روشن و ساده است نیازی به تغییر آن نیست. قبلاً سعی کردیم که (۱) و (۲) را تغییر دهیم، و با عدم موافقت آزمایش مواجه شدیم. تمام نظریه‌های مربوط به حرکت «ا-ر» مستلزم تغییر (۱) و (۲) بودند و این، کار درستی نبود. اکنون یك بار دیگر به ماهیت خطیر دشواریها پی می‌بریم، و برگهٔ تازه‌ای لازم است. کلید حل معمّا آن است که فرضهای بنیادی (۱) و (۲) را بپذیریم، و با آنکه عجیب می‌نماید، اصل (۳) را به کناری بگذاریم. این برگهٔ جدید با تحلیل اساسی‌ترین و ابتدائی‌ترین مفاهیم آغاز می‌شود. نشان خواهیم داد که چگونه این تحلیل ما را به دگرگونی نگرشهای کهنهٔ خود وادار می‌کند و چگونه تمام اشکالات ما را از میانه برمی‌دارد.

زمان، فاصله، نسبیت

فرضهای جدید عبارتند از:

(۱) سرعت نور در خلأ در تمام د.م. هائی که نسبت به یکدیگر حرکت یکنواخت دارند، یکی است.

(۲) تمام قوانین طبیعت در د. م. هائی که نسبت به یکدیگر حرکت یکنواخت دارند، یکسان است.

نقطهٔ شروع نظریهٔ نسبیت همین دو فرض است. از این به بعد دیگر تبدیل کلاسیك را بکار نخواهیم برد، زیرا می‌دانیم که با فرضهای ما سازگار نیست.

در این مورد نیز، مثل همهٔ موارد دیگر در علم، باید خود را از تعصبهای ریشه‌داری که بی‌نقد و بررسی تکرار می‌شوند رهانید. چون دیده‌ایم که هر تغییری در (۱) و (۲) با تجربه تناقض پیدا می‌کند، باید جرأت داشت و درستی آنها را پذیرفت و بر نقطهٔ ضعف ممکن حمله آورد، و این نقطهٔ ضعف طریقهٔ تبدیل مکان و سرعت از یك د. م. به د. م. دیگر می‌باشد. قصد ما آن است که از (۱) و (۲) نتایجی بدست آوریم و ببینیم که در چه مورد و چگونه این دو فرض تبدیلات کلاسیك را نقض می‌کنند.

و آنگاه به مفهوم فیزیکی حاصل پی‌بریم.

یك‌بار دیگر اتاق متحرك با ناظرهای خارجی و داخلی را مورد استفاده قرار می‌دهیم. بازهم علامتی نورانی از وسط اتاق گسیل شده است. ولی از دو ناظر می‌پرسیم که بدون توجه به آنچه راجع به محیط انتشار گفته شد و با قبول دو اصل بالا، نظر خود را ابراز دارند. جوابهای این دو را نقل می‌کنیم:

ناظر درونی: چون همهٔ دیوارها از چشمهٔ نور به یك فاصله‌اند، سرعت نور در جهات مختلف یکی است. علامت نورانی که از وسط اتاق گسیل شده، به طور همزمان به دیوارها می‌رسد.

ناظر بیرونی: در دستگاه من نیز سرعت نور مانند سرعت در دستگاه ناظری است که با اتاق حرکت می‌کند. اینکه چشمهٔ نور در د. م. من حرکت کند یا نکند اهمیتی ندارد، زیرا حرکت آن در سرعت نور تأثیری نمی‌کند. آنچه من می‌بینم علامتی نورانی است که با سرعت متعارف، که در تمام جهات یکسان است، انتشار پیدا می‌کند. یکی از دیوارها سعی دارد که از علامت نورانی بگریزد و دیگری میل دارد به آن نزدیك شود. به همین جهت علامت نورانی به دیوار فراری دیرتر می‌رسد تا به دیواری که مشتاق رسیدن به آن است. گرچه اختلاف زمان، به دلیل کوچکی سرعت حرکت اتاق نسبت به سرعت نور، خیلی کوچك و ناچیز است، ولی علامت نورانی هرگز به دو دیوار مقابل که بر امتداد حرکت عمود هستند در یك زمان نمی‌رسد.

از مقایسهٔ پیش بینیهای این دو ناظر به نتیجهٔ حیرت‌آوری می‌رسیم، که بی‌رو دربایستی، ظاهراً اصول مسلم فیزیك کلاسیك را نقض می‌کند. دو رویداد یعنی دو تابهٔ نور که به دو دیوار می‌رسند، برای ناظر داخلی همزمان هستند و برای ناظر خارجی نیستند. در فیزیك کلاسیك برای ناظران همهٔ د. م. های مختلف فقط یك ساعت و یك جریان زمان داشتیم، و در نتیجه کلماتی چون «همزمان» و «زودتر» و «دیرتر» دارای معانی مطلقی بودند مستقل از دو دستگاه مختصات. دو رویداد که در یك د.م. در زمان واحدی اتفاق می‌افتاد در همهٔ د.م. های دیگر نیز ضرورتاً همزمان بودند.

فرضهای (۱) و (۲)، یعنی نظریهٔ نسبیت، ما را مجبور می‌کنند که

از این نظر عدول کنیم. ما به دو رویداد برخوردیم که در یك د.م. در یك زمان اتفاق می‌افتند و در د.م. دیگر در زمانهای مختلف. وظیفهٔ ما آن است که حقیقت این پیامد را درك کنیم و معنی این جمله را بفهمیم: «دو رویداد که در یك د.م. همزمان هستند ممکن است در د.م. دیگر همزمان نباشند.»

مقصود از عبارت «دو حادثهٔ همزمان در یك د.م.» چیست؟ هر کس بنابر دریافت شهودی خود چنین تصور می‌کند که معنی این جمله را می داند. چون می‌دانیم که تکیه بر دریافت شهودی و ارزش دادن بی‌اندازه به آن خطرناك است، معقولتر آن است که محتاط باشیم و سعی کنیم که تعریفهای دقیقی ارائه کنیم. نخست به یك سؤال ساده جواب می گوئیم.

ساعت چیست؟

احساس ابتدائی ذهنی ما در بارهٔ مرور زمان این قابلیت را به ما می دهد که تأثرات زمانی خویش را مرتب کنیم و حکم کنیم که فلان رویداد «زودتر» و رویداد دیگر «دیرتر» اتفاق افتاده است. ولی برای اینکه نشان دهیم فاصلهٔ زمانی میان دو رویداد مثلاً ۱۵ ثانیه است به ساعت احتیاج داریم؛ با استفاده از ساعت مفهوم زمان مفهومی عینی می‌شود. هر پدیدهٔ فیزیکی را می‌توان به عنوان ساعت بکار برد به شرط آنکه بتوان آن را دقیقاً، هرچندبار که لازم باشد، تکرار کرد. چون فاصلهٔ میان آغاز و انجام این رویداد به عنوان واحد زمان اختیار شود، هر فاصلهٔ زمانی غیرمشخص را می‌توان با تکرار این رویداد فیزیکی اندازه گرفت. تمام ساعتها، از ساعت شنی ساده گرفته تا ابزارهای بسیار دقیق، همه بر شالودهٔ این فکر ساخته شده‌اند. در ساعت شنی واحد زمان عبارت از مدتی است که طول می‌کشد تا شنها از شیشهٔ بالائی به شیشهٔ پایینی بریزند و چون شیشه را وارونه کنند عین آن حادثهٔ فیزیکی تکرار می‌شود.

در دو نقطهٔ دور از هم دو ساعت کامل داریم که هر دو دقیقاً زمان واحدی را نشان می‌دهند. این عبارت، هر دقتی هم که در اثبات آن بکار رود، باید درست باشد. ولی حقیقتاً معنی آن چیست؟ چگونه می‌توان مطمئن شد که ساعتهائی که دور از یکدیگرند زمان واحدی را نشان می دهند؟ یك راه ممکن، استفاده از تلویزیون است. باید در نظر داشت که

تلویزیون به عنوان یك مثال اختیار شده است و در استدلال ما نقش اساسی ندارد. ممکن است پهلوی یکی از ساعتها ایستاد و به تصویر تلویزیونی ساعت دیگر نگاه کرد. آن وقت می‌توان گفت که آیا ساعتها زمان واحدی را نشان می‌دهند یا نه. تصویر تلویزیونی به وسیلهٔ امواج الکترومغناطیسی فرستاده می‌شود و بنابراین با سرعت نور منتقل می‌گردد. بر روی تلویزیون تصویری را می‌بینیم که اندك زمانی قبل فرستاده شده است، در صورتی که بر روی ساعت رویدادی را می بینیم که در لحظهٔ حال واقع می‌شود. البته بآسانی می‌توان از این اشکال دوری جست. باید تصویرهای تلویزیونی دو ساعت را در نقطه‌ای که به فاصلهٔ مساوی از هر دو قرار دارد بگیریم و از این نقطهٔ مرکزی آنها را مشاهده کنیم. در این صورت اگر علامتهای نورانی همزمان فرستاده شوند، در یك لحظه نیز به ما خواهند رسید. اگر دو ساعتِ خوب به ترتیبی باشند که چون از نقطه‌ای که فاصلهٔ آن دو را نصف می‌کند مشاهده شوند زمان واحدی را نشان دهند، این دو ساعت برای تعیین زمان رویدادهائی که در دو نقطهٔ دور از یکدیگر اتفاق می‌افتند کاملاً مناسب خواهند بود.

در مکانیك فقط از یك ساعت استفاده می‌کردیم. ولی این کار بی‌دردسری نبود. زیرا مجبور بودیم که همهٔ اندازه‌گیریها را در نزدیکی این یك ساعت انجام دهیم. چون به این ساعت از راه دور و مثلاً به وسیلهٔ تلویزیون نگاه کنیم، همیشه باید در خاطر داشته باشیم که آنچه ما اکنون می‌بینیم در حقیقت کمی زودتر اتفاق افتاده است، همان طور که نور آفتاب را هشت دقیقه پس از گسیل آن مشاهده می‌کنیم. باید در تمام قرائتهای زمانی تصحیحات مربوط به فاصلهٔ خود از ساعت را بعمل آوریم.

بنابراین استعمال یك ساعت واحد اسباب زحمت است. چون اکنون می‌دانیم که چگونه در مورد همزمان بودن و با هم کار کردن دو یا چند ساعت دور از هم قضاوت کنیم، می‌توانیم از چندین ساعت، به هر تعداد که بخواهیم، در یك د. م. معین استفاده کنیم. هر یك از این ساعتها وسیله‌ای است که زمان رویدادهائی را تعیین می‌کند که در نزدیکی آن اتفاق می‌افتند. تمام ساعتها نسبت به د. م. در حال سکون، همهٔ آنها ساعتهای «خوب» و همزمان شده هستند، یعنی در لحظهٔ واحد همهٔ آنها

زمان واحدی را نشان می‌دهند.

در تنظیم این ساعتها هیچ امر عجیبی وجود ندارد. ما به جای یك ساعت چند ساعت همزمان شده داریم و می‌توانیم بگوئیم که آیا در یك د. م. معین دو رویداد دور از هم همزمان هستند یا نه. اگر در موقع حدوث این دو رویداد، ساعتهای همزمان شدهٔ مجاور آنها زمان واحدی را نشان دهند، آن رویدادها همزمان خواهند بود. حال اگر بگوئیم که از رویدادهای دور دست یکی پیش از دیگری به وقوع پیوسته است، گفتهٔ ما معنی مشخصی دارد. تمام این احکام را به کمك ساعتهای همزمان شده‌ای که در د.م. ما به حال سکون قرار دارند، می‌توان صادر کرد.

این قضایا با فیزیك کلاسیك هماهنگند و هیچ تناقضی با تبدیلات کلاسیك مشاهده نمی‌شود.

در تعریف رویدادهای همزمان، ساعتها را به کمك علائم همزمان می‌کنند. در ترتیبات کار لازم است که این علائم با سرعت نور منتقل شوند، سرعتی که در نظریهٔ نسبیت اهمیتی اساسی دارد.

چون می‌خواهیم مسألهٔ مهم دو د.م. را که نسبت به یکدیگر حرکت یکنواخت دارند بررسی کنیم، باید دو میله را در نظر بگیریم که در هر یك چندین ساعت کار گذاشته شده است. ناظری که در یکی از این دو د.م. متحرك نسبت به هم قرار گرفته است میله و مجموعهٔ ساعتهای مخصوص به خود را در اختیار دارد که به طور صلب به هم متصلند.

هنگامی که دربارهٔ اندازه‌گیریهای مکانیك کلاسیك بحث شد، برای همهٔ د.م. ها فقط از یك ساعت استفاده کردیم. اکنون در هر د.م. چندین ساعت داریم. این اختلاف چندان اهمیتی ندارد. یك ساعت کفایت می‌کرد و تا موقعی که ساعتهای بکار رفته همزمان با هم کار کنند هیچ‌کس حق اعتراض ندارد که چرا از چندین ساعت استفاده شده است.

اکنون کم‌کم به آن نقطهٔ اساسی نزدیك می‌شویم که در آن تبدیل کلاسیك متناقض با نظریهٔ نسبیت درمی‌آید. هنگامی که دو دسته ساعت نسبت به یکدیگر در حرکت یکنواخت باشند، چه روی می‌دهد؟ پاسخ فیزیکدان کلاسیك این است: هیچ اتفاقی نمی‌افتد. ساعتها هنوز هم ضرباهنگ ثابت خود را خواهند داشت و ما می‌توانیم برای تعیین زمان ساعتهای

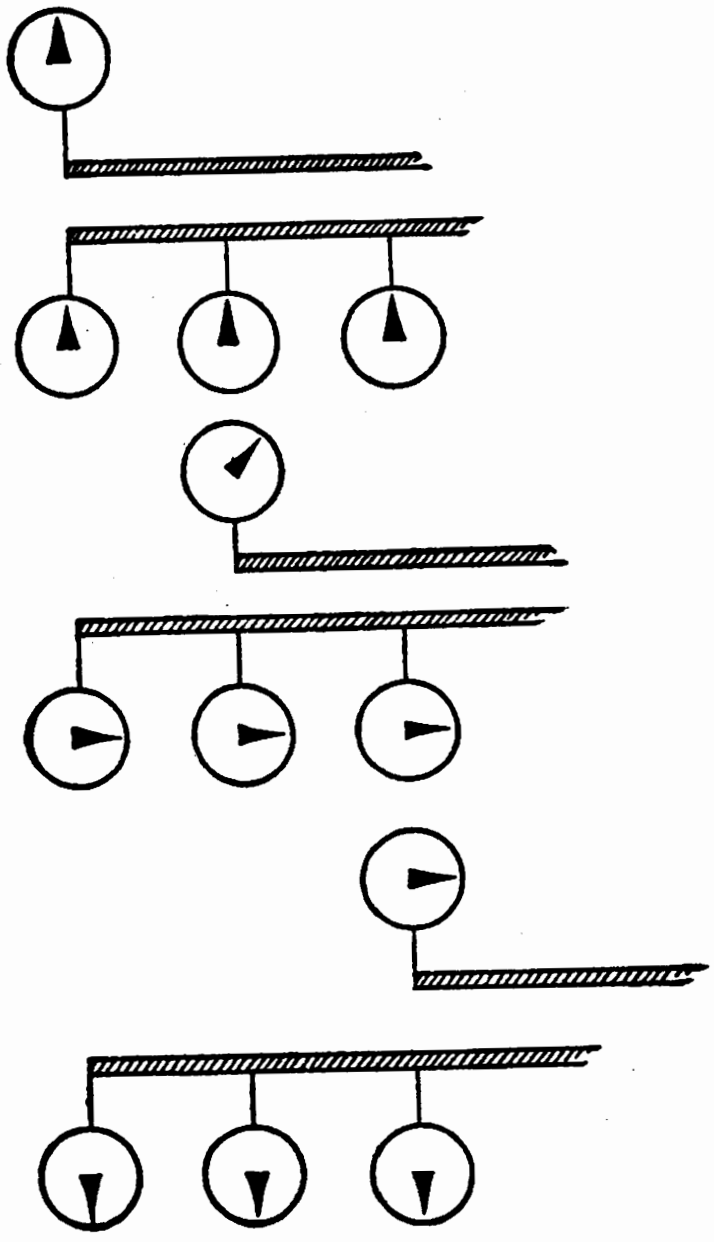
متحرك یـا ساکن را بکار بریم. بنـابر فیزیك کلاسیك دو رویداد که در یك د.م. همزمان باشند در هر د.م. دیگری نیز همزمان خواهند بود.

ولی ایـن تنها پـاسخ ممکن نیست. بخوبی می‌توان ساعـت متحرکی را تصور کرد که ضرباهنگ آن با ساعت ساکن فرق کند. فعلاً در این باره که آیا ضرباهنگ ساعتها در ضمن حرکت تغییر می‌کند یا نه حکمی نمی‌کنیم و فقط امکان آن را مورد بحث قرار می‌دهیم. آیـا منظور از ایـن گفته که ساعتهای متحرك ضرباهنگ خود را تغییر مـی‌دهند چیست؟ بـرای سهولت امر چنین فرض مـی‌کنیم که در د.م. بالائـی فقط یـك ساعـت و در د.م. پائینی چندین ساعت داشته باشیم. سازوکار همهٔ ایـن ساعتها یکـی است، و ساعتهای پائینی همزمان شده‌اند یعنی در آن واحد زمان واحـدی را نشان می‌دهند. در شکل زیر سه وضعیت متوالی دو د.م. را که نسبت به یکدیگر حرکت یکنواخت دارنـد رسم کرده‌ایـم. در شکل اول وضعیت عقربـه‌های ساعت بالائی و ساعتهای پایینی، بنا به قـرارداد، یکـی است، چه مـا خود آنها را بر این وضع قرار داده‌ایم. همهٔ ساعتها زمـان واحدی را نشان می دهند. در شکل دوم وضعیت نسبی ساعتها در اندك زمانی بعد دیده می‌شود؛ همهٔ ساعتهـای د.م. پایینی زمان واحـدی را نشان مـی‌دهند، ولـی ساعت بالائی دیگر با آنها میزان نیست. ضرباهنگ آن تغییر کـرده است و زمـان آن فرق می‌کند، زیرا که نسبت به دستگاه پایینی در حرکت است. در شکل سوم می‌بینیم که اختلاف وضع عقربه‌های ساعت با مرور زمان زیادتـر شده است.

ناظری که در د.م. پـایینی ساکـن است مـی‌بیند که ساعـت متحرك ضرباهنگ خود را تغییر مـی‌دهـد. محققاً در صورتـی که ساعت نسبت بـه ناظری کـه در د.م. بـالائی ساکن است متحـرك بـاشد، عیـن همین نتیجه بدست خواهدآمد. در ایـن حالت باید در د.م. بالائی چند ساعت و در د.م. پایینی فقط یك ساعت موجود باشد.

در مکانیك کلاسیك به طور ضمنی فرض شده بود که ضرباهنگ ساعت متحرك تغییر نمی‌کند. ایـن نکته به قدری آشکار مـی‌نمود که حتی بـه آن اشاره‌ای هـم نمی‌شد. امـا هیچ چیـزی پرواضح نیست. اگر بـراستی پایبند دقت هستیم باید فرضهائی را که تاکنون در فیزیـك مسلم شمرده شده‌انـد،

مورد تحلیل قرار دهیم.



یك فرض را نباید فقط به دلیل آن‌که با فیزیك کلاسیك سازگار نیست نامعقول دانست. مادام که قانون تغییر ضرباهنگ در همهٔ د.م.های ماندی به یك شکل باشد، می‌توان چنین پنداشت که ساعت متحرك ضرباهنگ خود را تغییر می‌دهد.

مثال دیگری می‌آوریم: خط‌کشی یك‌متری را در دست گیرید، معنی این عبارت این است که تا موقعی که خط‌کش در یك د.م. به حال سکون باشد طول آن مساوی یك متر خواهد بود. حال خط‌کش به طور یکنواخت

حرکت می‌کند و بر میله‌ای که نمایندهٔ د.م. است می‌لغزد. آیا باز هم طول آن همان یك متر بنظر خواهد آمد؟ باید قبلاً طریقهٔ تعیین طول آن را دانست. تا موقعی که خط‌کش به حال سکون بود، سر و ته آن بر علامتهائی منطبق می‌شدند که د.م. یك متر از هم فاصله داشتند. از همین‌جا نتیجه گرفتیم: طول خط‌کش ساکن برابر یك متر است. طول خط‌کش را در ضمن حرکت چگونه اندازه می‌گیریم؟ راه کار از این قرار است. در یك لحظهٔ معین دو ناظر به طور همزمان از سر و ته خط‌کش عکس برمی‌دارند. چون عکسها همزمان برداشته شده‌اند می‌توان نشانه‌های میلهٔ د. م. را که با ابتدا و انتهای خط‌کش متحرك منطبقند با هم مقایسه کرد. به این ترتیب طول آن تعیین می‌شود. چنانکه می‌بینید به وجود دو ناظر احتیاج است تا رویدادهای همزمان را در جاهای مختلف یك د.م. یاداشت کنند. دلیلی در دست نیست که نتیجهٔ این اندازه‌گیریها همان طول خط‌کش ساکن باشد. چون باید دو عکس همزمان برداشته شوند، و چنانکه می‌دانیم این خود مفهومی نسبی است و به د. م. بستگی دارد، کاملاً ممکن است که نتایج این اندازه‌گیری در د.م.هائی که نسبت به یکدیگر حرکت می‌کنند متفاوت باشد.

نه‌تنها تغییر ضرباهنگ ساعت متحرك بلکه تغییر طول خط‌کش متحرك نیز قابل تصور است، به این شرط که قوانین این تغییرات در همهٔ د. م. های ماندی یکسان باشد.

ما در اینجا تنها به بحث در امکانات تازه پرداختیم بی‌آنکه دلیلی برای قبول آنها ارائه کنیم.

یادآور می‌شویم: سرعت نور در تمام د.م.های ماندی یکسان است. این واقعیت به هیچ وجه با تبدیلات کلاسیك سازش ندارد. رشته باید از جائی پاره شود. آیا همین‌جا سر بزنگاه نیست؟ آیا نمی‌شود تغییر ضرباهنگ ساعت و تغییر طول خط‌کش را پذیرفت زیرا ثابت بودن سرعت نور مستقیماً از این فرضها نتیجه می‌شود؟ البته که می‌توان چنین کرد: این اولین جائی است که نظریهٔ نسبیت با فیزیك کلاسیك اختلاف اساسی پیدا می‌کند. استدلال خود را می‌توان معکوس کرد: اگر سرعت نور در تمام د.م. ها ثابت باشد، میله‌های متحرك باید طول خود را تغییر دهند و ساعتهای

متحرك باید ضرباهنگ خود را عوض کنند و قوانین ناظر بر ایـن تغییرات باید با کمال دقت بدست آیند.

در این گفته‌ها هیچ مطلب اسرارآمیز یا نامعقولی وجود نـدارد. در فیزیك کلاسیك همواره فـرض مـی‌شد که ساعت متحرك و ساکـن ضرباهنگ واحدی دارند و طول میلهٔ متحرك با میلهٔ ساکن یکی است. اگر سرعت نور در همهٔ د. م. ها یکسان، و اگر نظریهٔ نسبیت معتبر باشد، پس چاره‌ای جز فداکردن این فرض نداریم. گسستن از تعصبات ریشه دوانیده، دشوار است و راه دیگری هم وجود نـدارد. از دیـدگاه نظریـهٔ نسبیت مفاهیم قـدیمی من‌عندی جلوه می‌کنند. چرا، همان‌گونـه که در چند صفحهٔ پیش خـود نیز چنین کردیم، به زمان مطلقی باور داشته باشیم که برای همهٔ ناظران و در همهٔ د. م. ها بر یك نهج جریان دارد؟ چرا باور کنیم که فواصل تغییرناپذیر هستند؟ زمان بـا ساعت و مختصات فضائی بـا خط‌کش معین مـی‌شوند، و نتیجهٔ این اندازه‌گیریهـا ممکـن است بـه رفتار ساعتها و میله‌هـا در هنگام حرکت بستگی داشته باشد. دلیلی برای این عقیده نداریم که ساعت و میله آن طور که مـا دوست داریـم رفتار کنند. مشاهـدات مـربـوط بـه میدان الکترومغناطیسی، به طور غیر مستقیم، نشان می‌دهند که ضرباهنگ ساعت و طول میله با حرکت تغییر مـی‌کند، در صورتـی که بـراساس پـدیده‌های مکانیکی تصور نمی‌کردیم چنین شود. باید مفهوم زمان نسبی در هـر د. م. را بپذیریم، زیـرا بهتریـن راه احتـراز از دشواریهای مـاست. پیشرفتهای علمی دیگری، که از نظریهٔ نسبیت نتیجه می‌شود، نشان مـی‌دهد که ایـن خصوصیت تازه را نباید «چارهٔ ناگزیر» شمرد زیرا که مزیتهای ایـن نظریه بسیار برجسته‌اند.

تـاکنون سعی مـا برآن بـوده است که نشان دهیم چـه کارهائی بـه فرضهای بنیادی نظریهٔ نسبیت منجر شده‌اند و چگونه ایـن نظریه بـا دیدی تازه از فضا و زمان، ما را مجبور کرده است که در تبدیلات کلاسیك تجدید نظر کنیم و آنها را تغییر دهیم. قصد ما آن است که افکاری را بررسی کنیم که پایهٔ نگرش فیزیکی و فلسفی جدیدی هستند. این افکار، افکاری ساده‌اند، ولی بصورتی که در اینجا تـدوین شده‌اند، نه برای رسیدن بـه نتایج کیفی بسنده‌اند و نه برای وصول به نتایج کمی. بازهم ناچاریم به شیوهٔ مأنـوس

خود متوسل شویم و فقط اندیشه‌های اصلی را توضیح دهیم و به ذکر بعضی از اصول دیگر اکتفا کنیم.

برای اینکه تفاوت دید میان فیزیکدان قدیمی، که به تبدیلات کلاسیك عقیده‌مند است و ما او را «ق» می‌خوانیم، با فیزیکدان جدید، که نظریهٔ نسبیت را می‌داند و ما او را «ج» می‌نامیم، آشکار شود گفتگوئی را میان آنها تصور می‌کنیم:

ق. من به اصل نسبیت گالیله در مکانیك باور دارم، زیرا می‌دانم که در دو د. م. که نسبت به یکدیگر حرکت یکنواخت دارند، قوانین مکانیك یکسان است. به عبارت دیگر، این قوانین نسبت به تبدیلات کلاسیك «ناوردا» هستند.

ج. ولی اصل نسبیت باید به تمام رویدادهای دنیای خارج قابل اطلاق باشد. نه فقط قوانین مکانیك بلکه تمام قوانین طبیعت باید در د. م. هائی که نسبت به یکدیگر حرکت یکنواخت دارند، یکسان باشند.

ق. ولی چطور ممکن است که تمام قوانین طبیعت در د. م. هائی که نسبت به یکدیگر حرکت یکنواخت دارند یکسان باشد؟ معادلات میدان، یعنی معادلات ماکسول نسبت به تبدیلات کلاسیك «ناوردا» نیستند. این نکته از مثال سرعت نور بخوبی آشکار شده است. بنابر تبدیل کلاسیك سرعت نور نباید در دو د. م. که نسبت به یکدیگر حرکت یکنواخت دارند یکی باشد.

ج. این فقط نشان می‌دهد که نمی‌توان تبدیل کلاسیك را بکار بست. پیوند میان دو د. م. باید به صورت دیگری باشد؛ مختصات و سرعتها را نمی‌توان بصورتی که این قوانین تبدیل می‌گویند به یکدیگر ربط داد. قوانین تازه‌ای را باید به جای آنها گذاشت. این قوانین را باید از فرضهای بنیادی نظریهٔ نسبیت استنتاج کرد. فعلاً در بیان ریاضی این قانون تبدیل جدید بحث نمی‌کنیم، و فقط می‌پذیریم که با قوانین کلاسیك فرق دارد. آن را به اختصار تبدیل لورنتس می‌نامیم. همان‌گونه که قوانین مکانیك نسبت به تبدیل کلاسیك ناوردا بودند، می‌توان نشان داد که معادلات ماکسول، یعنی قوانین میدان نیز، نسبت به تبدیل لورنتس ناوردا هستند. بخاطر آورید که وضع در فیزیك کلاسیك بر چه منوال بود. قوانین تبدیلی برای مختصات

و قوانین تبدیلی برای سرعتها داشتیم، قوانین مکانیك هم برای دو د.م. که نسبت به یکدیگر حرکت یکنواخت داشتند یکسان بودند. قوانین تبدیلی برای فضا داشتیم ولی برای زمان چنین قوانینی وجود نداشت، زیرا زمان در همهٔ د. م. ها یکی بود. اما در نظریهٔ نسبیت مسأله طور دیگری است. قوانین تبدیل برای فضا و زمان و سرعت با قوانین تبدیل کلاسیك فرق دارند. ولی در اینجا نیز باید قوانین طبیعت در همهٔ د.م. هائی که نسبت به یکدیگر حرکت یکنواخت دارند یکسان باشند. قوانین طبیعت باید ناوردا باشند ولی نه چون گذشته نسبت به تبدیل کلاسیك، بلکه نسبت به تبدیل نوع جدیدی که همان تبدیل لورنتس باشد. در تمام د.م. های ماندی قوانین واحدی معتبرند، و انتقال از یك د.م. به د.م. دیگر مطابق تبدیل لورنتس انجام می‌پذیرد.

ق. حرف شما را قبول می‌کنم، ولی مایلم بدانم که میان تبدیل کلاسیك با تبدیل لورنتس چه تفاوتی وجود دارد.

ج. بهتر است که سؤال شما را به طریق زیر جواب داد. بعضی از خصوصیات تبدیل کلاسیك را ذکر کنید. آنگاه من روشن می‌سازم که آیا این خصوصیات در مورد تبدیل لورنتس نیز صدق می‌کنند یا نه، و اگر نمی کنند چه تغییراتی در آنها باید داده شود.

ق. اگر در د.م. من در فلان لحظه و فلان محل حادثه‌ای روی دهد ناظری که در د.م. دیگر قرار دارد و نسبت به د.م. من درحرکت یکنواخت است به مکان رویداد عدد دیگری نسبت می‌دهد، ولی بدیهی است که زمان وقوع رویداد در دو دستگاه یکی خواهد بود. ما در همهٔ د.م. ها یك ساعت بکار می‌بریم، و اینکه ساعت متحرك باشد یا نباشد، تأثیری ندارد. آیا این مطلب مورد قبول شما نیز هست؟

ج. نه خیر، نیست! هر د.م. باید با ساعت ساکن مخصوص به خود مجهز باشد، زیرا حرکت، ضرباهنگ ساعت را تغییر می‌دهد. دو ناظر که در دو د.م. مختلف هستند، نه فقط به مکان یك حادثه بلکه به زمان وقوع آن نیز اعداد مختلفی نسبت می‌دهند.

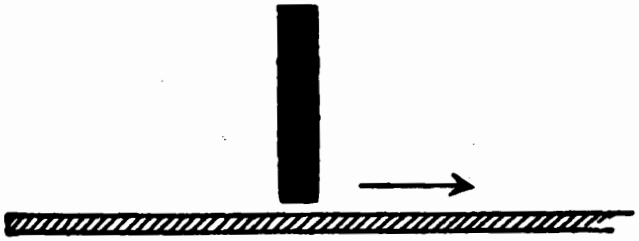
ق. معنی این جمله آن است که دیگر زمان ناوردا نیست. بنا بر تبدیل کلاسیك زمان در تمام د.م. ها یکی است. در تبدیل لورنتس زمان

تغییر می‌کند و همان منزلت مختصات را در تبدیل قدیم دارد. مایلم بدانم که بر سر فاصله چه می‌آید؟ در مکانیک کلاسیک طول میلهٔ صلب در سکون یا حرکت یکی است. آیا اکنون هم این مطلب صحیح است؟

ج. نه خیر دیگر صحیح نیست. در واقع از تبدیل لورنتس نتیجه می‌شود که میلهٔ متحرك در امتداد حرکت منقبض می‌شود و هرچه سرعت زیادتر شود، مقدار انقباض بیشتر می‌گردد. هراندازه خط‌کش تندتر حرکت کند کوتاهتر می‌شود. ولی این انقباض فقط در امتداد حرکت انجام می گیرد. در شکل میلهٔ متحرکی را نمایش داده‌ام که با سرعتی در حدود ۹۰

درصد سرعت نور حرکت می‌کند و طول آن نصف می‌شود، ولی بطوری که در شکل بعدی نشان داده شده انقباضی در امتداد عمود بر حرکت عارض نمی‌شود.

ق. پس اینطور که می‌گوئید ضرباهنگ ساعت متحرك و طول میلهٔ متحرك تابع سرعت است، ولی به چه نحو؟



ج. هرچه سرعت افزونتر گردد، تغییرات محسوستر می‌شوند. از تبدیل لورنتس نتیجه می‌شود که اگر سرعت خطکش به سرعت نور برسد، طول آن صفر می‌شود. همین طور ضرباهنگ ساعت متحرك در مقایسه با ساعتهای ساکنی که از کنار آنها می‌گذرد، کند می‌شود و اگر با سرعت نور حرکت کند، در صورتی که ساعت «خوبی» باشد از کارکردن می‌ایستد.

ق. این گفتار شما مخالف تجربه است. می‌دانیم که طول اتومبیل ضمن حرکت کوتاه نمی‌شود؛ و نیز می‌دانیم که راننده همواره می‌تواند ساعت «خوب» خود را با ساعتهائی که از کنارشان می‌گذرد مقایسه کند و برخلاف گفتهٔ شما اختلافی هم مشاهده نمی‌کند.

ج. گفته‌های شما یقیناً صحیح است؛ چیزی‌که هست اینکه سرعتهای مکانیکی نسبت به سرعت نور بسیار کوچکند و تطبیق نظریهٔ نسبیت به آنها خنده‌آور است. هر راننده‌ای می‌تواند با کمال اطمینان فیزیك کلاسیك را بکار برد ولو اینکه سرعتش را صد هزار برابر هم زیاد کند. ناسازگاری میان آزمایش و تبدیل کلاسیك زمانی آشکار می‌شود که به سرعت نور نزدیك شویم. تنها با سرعتهای بسیار زیاد است که می‌توان صحت تبدیل لورنتس را در معرض آزمایش قرارداد.

ق. ولی هنوز اشکال دیگری وجود دارد. من براساس مکانیك می توانم اجسام متحرکی را تصور کنم که سرعت آنها از سرعت نور هم زیادتر باشد. جسمی که نسبت به کشتی متحرك با سرعت نور حرکت کند، نسبت به ساحل سرعتی بیش از سرعت نور خواهد داشت. در این صورت تکلیف میله‌ای که چون با سرعت نور حرکت می‌کرد طولش صفر می‌شد، چه می‌شود؟ پس اگر سرعت از سرعت نور بیشتر شود باید انتظار داشت که طول آن منفی گردد!

ج. براستی که جائی برای چنین طعنه‌ای وجود ندارد! از دیدگاه نظریهٔ نسبیت هیچ جسم مادی نمی‌تواند سرعتی بیش از سرعت نور داشته باشد. سرعت نور حد بالای سرعت برای اجسام مادی است. اگر سرعت جسمی نسبت به کشتی مساوی سرعت نور باشد، سرعت آن نسبت به ساحل نیز برابر با سرعت نور خواهد بود. قانون مکانیکی سادهٔ جمع و تفریق سرعتها دیگر معتبر نیست، یا به عبارت دقیقتر، این قانون فقط به

طور تقریبی برای سرعتهای کوچك معتبر است نه برای سرعتهای نزدیك به سرعت نور. عدد نمایندهٔ سرعت نور به طور صریح در تبدیل لورنتس وارد می‌شود، و نقش یك حالت حدی را ایفا می‌کند و منزلتی چون سرعت بینهایت در مکانیك کلاسیك دارد. در مقابل، در حد سرعتهای کم دوباره به مفاهیم قدیمی می‌رسیم. از دیدگاه نظریهٔ جدید روشن است که در چه شرایطی فیزیك کلاسیك معتبر است و محدودیتهای آن در کجاست. بنابراین انطباق نظریهٔ نسبیت به حرکت اتومبیل و کشتی و راه‌آهن متحرك همان‌قدر خنده‌آور است که وقتی جدول ضرب کفایت می‌کند آدمی از ماشین حساب استفاده کند.

نسبیت و مکانیك

نظریهٔ نسبیت زائیدهٔ ضرورت است. این نظریه از بطن تضادهائی جدی و عمیق در نظریه قدیمی برخاست که هیچ راهی برای رهائی از شرشان بنظر نمی‌رسید. قوت این نظریهٔ جدید در آن است که با استحکام و سادگی همهٔ آن اشکالات را حل می‌کند و فقط چند فرض بسیار قانع کننده را مبنای کار خود قرار می‌دهد.

گرچه این نظریه از مسألهٔ میدان نتیجه شد، ولی کلیهٔ قوانین فیزیك را شامل می‌شود. در این موقع اشکالی بنظر می‌رسد: قوانین میدان از یك‌سو و قوانین مکانیك از سوی دیگر، از دو نوع کاملاً متفاوت هستند. معادلات میدان الکترومغناطیسی نسبت به تبدیل لورنتس «ناوردا» هستند و معادلات مکانیك نسبت به تبدیل کلاسیك ناوردا می‌باشند؛ در صورتی که نظریهٔ نسبیت مدعی است که تمام قوانین طبیعت باید نسبت به تبدیل لورنتس، و نه نسبت به تبدیل کلاسیك، «ناوردا» باشند. قوانین تبدیل کلاسیك تنها یك حالت حدی و خاص از تبدیل لورنتس هستند و به وقتی مربوط می‌شوند که سرعتهای نسبی در د. م. کوچك باشند. در این صورت، مکانیك کلاسیك نیز باید چنان تغییر کند که با ضرورت ناوردایی نسبت به تبدیل لورنتس سازگار شود. به عبارت دیگر، مکانیك کلاسیك در سرعتهائی که نزدیك سرعت نور باشند معتبر نمی‌تواند بود. فقط یك تبدیل از یك دستگاه مختصات به دستگاه دیگر امکان‌پذیر است و آن تبدیل لورنتس می

باشد.

تغییر دادن مکانیك کلاسیك بصورتی که نه با نظریهٔ نسبیت تناقضی پیدا کند و نه با نتایج متنوع مشاهداتی که به توسط مکانیك کلاسیك تبیین می‌شوند، کار ساده‌ای بود. مکانیك قدیمی حالت حدی مکانیك جدید و در مورد سرعتهای کم معتبر است.

بهتر است مواردی از تغییر در مکانیك کلاسیك را که نظریهٔ نسبیت موجب شده است مورد توجه قرار دهیم. با این کار ممکن است به نتایجی برسیم که اثبات یا رد آنها به وسیلهٔ آزمایش میسر باشد.

فرض شود که جسمی به جرم معین در تحت تأثیر نیروئی خارجی، بر امتداد خط مستقیمی حرکت کند. این نیرو چنانکه می‌دانیم با تغییر سرعت متناسب است. به بیان صریحتر، اهمیتی ندارد که سرعت جسم از ۱۰۰ متر در ثانیه به ۱۰۱ متر در ثانیه تغییر کرده باشد یا از ۱۰۰ کیلومتر در ثانیه به ۱۰۰ کیلومتر و یك متر در ثانیه و یا از ۳۰۰،۰۰۰ کیلومتر در ثانیه به ۳۰۰،۰۰۰ کیلومتر و یك متر در ثانیه. اگر تغییر سرعت در زمان معینی مقدار ثابتی باشد، نیروئی که این تغییر سرعت را ایجاد می‌کند مقدار ثابتی خواهد داشت.

آیا این جمله از لحاظ نظریهٔ نسبیت صحیح است؟ به هیچ وجه صحیح نیست! این قانون فقط در مورد سرعتهای کوچك صدق می‌کند. پس مطابق نظریهٔ نسبیت قانون سرعتهای نزدیك به سرعت نور کدام است؟ در صورتی که سرعت زیاد باشد، نیروئی که برای زیاد کردن آن لازم است فوق‌العاده بزرگ خواهد بود. نیروئی که مثلاً برای افزودن یك متر در ثانیه بر سرعت ۱۰۰ متر در ثانیه لازم است، همان نیروئی نخواهد بود که برای افزودن یك متر در ثانیه بر سرعتی نزدیك به سرعت نور ضرورت دارد. هرچه سرعت نزدیکتر به سرعت نور باشد، افزایش آن مشکلتر است. چون سرعتی برابر سرعت نور شود، افزایش بیشتر آن محال می‌گردد. به این ترتیب تغییراتی که نظریهٔ نسبیت پیشنهاد می‌کند حیرت‌آور نیستند. سرعت نور حد بالای سرعتهاست. هیچ نیروی محدودی هر اندازه هم بزرگ باشد، نمی‌تواند تغییری فراتر از این حد را موجب شود. به جای قانون قدیمی مکانیك که نیرو را به تغییر سرعت ارتباط می‌داد، قانون

پیچیده‌تری پدیدار می‌شود. از دیدگاه ما مکانیک کلاسیک ساده است زیرا که تقریباً در تمام مشاهدات معمولی سرو کار ما با سرعتهائی است که خیلی کوچکتر از سرعت نور می‌باشند.

جسم در حال سکون جرم معینی دارد که جرم سکون نامیده می‌شود. بنا بر مکانیک هر جسمی در مقابل تغییر در حرکت آن مقاومت می‌کند؛ هرچه جرم بزرگتر باشد این مقاومت زیادتر است، و هراندازه جرم کوچکتر باشد، مقاومت کمتر است. در نظریهٔ نسبیت نکتهٔ دیگری هم هست. نه‌تنها اگر جرم سکون جسم بیشتر باشد ایستادگی بیشتری در مقابل تغییر حرکت نشان می‌دهد، بلکه هراندازه سرعت آن هم بیشتر شود مقاومت آن شدیدتر می‌گردد. اجسامی که سرعتشان نزدیک سرعت نور است مقاومت بسیار زیادی در مقابل نیروهای خارجی نشان می‌دهند. در مکانیک کلاسیک مقاومت یك جسم معین، تغییرناپذیر بود و فقط با جرم آن مشخص می‌شد. در نظریهٔ نسبیت این مقاومت هم به جرم سکون جسم بستگی دارد و هم به سرعت آن. چون سرعت جسم به سرعت نور نزدیك گردد، این مقاومت فوق‌العاده زیاد می‌شود.

با نتایجی که ذکر شد، می‌توان این نظریه را به محك آزمایش سنجید. آیا پرتابه‌هائی که سرعتی نزدیك به سرعت نور دارند به همان نحوی که این نظریه پیش‌بینی می‌کند، در مقابل نیروی خارجی مقاومت نشان می‌دهند؟ چون احکام نظریهٔ نسبیت در این مورد جنبهٔ کمّی دارند، در صورتی که پرتابه‌هائی پیدا کنیم که سرعتشان نزدیك سرعت نور باشد می‌توان نظریه را تأیید یا رد کرد.

براستی در طبیعت پرتابه‌هائی می‌توان یافت که دارای چنین سرعتهائی باشند. اتمهای اجسام رادیوآکتیو، مثلاً رادیوم، توپهائی هستند که ازخود پرتابه‌هائی با سرعتهای عظیم پرتاب می‌کنند. بدون اینکه وارد جزئیات شویم به نقل یکی از نظریه‌های فیزیك و شیمی جدید می‌پردازیم. تمام مادهٔ جهان از معدودی ذرات بنیادی ساخته شده‌اند. همان‌طور که در ساختمانهای یك شهر، با اندازه‌ها، ساختها و معماریهای متفاوت، از کلبه تا آسمانخراش، آجرهای ساختمانی از چند نوع تجاوز نمی‌کند، در ساختمان تمام عناصر شناخته شدهٔ عالم مادی ما ـ از ئیدرژن سبك‌ترین، تا اورانیوم

سنگین‌ترین آنها- نیز بیش از چند نوع محدود آجر ساختمانی، یعنی ذرات بنیادی، بکار نرفته است. عناصر سنگین که در واقع همان ساختمانهای پیچیده‌اند، ناپایدارند و استحاله پیدا می‌کنند یا به‌اصطلاح رادیوآکتیو هستند. هرچندگاه یك‌بار بعضی‌از آجرها یا ذرات بنیادی، که اتمهای رادیوآکتیو را می‌سازند، از آنها کنده شده با سرعتی زیاد نزدیك به سرعت نور به خارج پرتاب می‌گردند. اتم عنصری چون رادیوم، مطابق با نظریه‌های کنونی که با آزمایشهای متعدد هم تأیید شده‌اند، ساختمان پیچیده‌ای دارد و استحالهٔ رادیوآکتیوی یکی از پدیده‌هائی است که ترکیب اتمها از اجزای ساده‌تر یعنی از ذرات بنیادی را آشکار می‌سازد.

با آزمایشهائی بسیار دقیق و هوشمندانه می‌توان به چگونگی مقاومت این ذرات در مقابل نیروی خارجی پی‌برد. این آزمایشها نشان می دهند که مقاومت این ذرات، مطابق پیش‌بینی نظریهٔ نسبیت، به سرعت بستگی دارد. در موارد متعدد دیگر نیز که توانسته‌اند بستگی این مقاومت را به سرعت اندازه بگیرند، سازگاری کامل میان آزمایش و نظریه مشاهده شده است. ما یك‌بار دیگر با خصیصه‌های اصلی کار خلاق در علم روبه‌رو می‌شویم: پیش‌بینی حقایقی چند توسط نظریه و تأیید آنها به وسیلهٔ آزمایش.

این نتیجه، تعمیم مهم دیگری را القا می‌کند. جسم ساکن دارای جرم است، ولی انرژی جنبشی یعنی انرژی حرکت ندارد. جسم متحرك هم جرم دارد و هم انرژی جنبشی، و مقاومت آن در مقابل تغییر سرعت شدیدتر از جسم ساکن است. از این قرار معلوم می‌شود که انرژی جنبشی بر مقاومت آن می‌افزاید. هرگاه دو جسم دارای جرم سکون برابر باشند، آنکه انرژی جنبشی زیادتر دارد، در مقابل نیروی خارجی ایستادگی بیشتری می‌کند.

صندوقی را تصور کنید که در آن گلوله‌هائی قرار دارد. صندوق و گلوله‌ها در د. م. ما به حال سکون هستند، برای حرکت دادن آن یعنی زیاد کردن سرعت آن، نیروئی لازم است. ولی اگر گلوله‌ها در داخل صندوق مانند ملکولهای گاز با سرعت متوسطی نزدیك به سرعت نور در جهات مختلف حرکت کنند، آیا بازهم همان مقدار نیرو، در همان مدت، همان ازدیاد سرعت را سبب می‌شود؟ در این حالت چون انرژی جنبشی

گلوله‌ها زیادتر است، مقاومت صندوق زیادتر است و نیروی بزرگتری لازم می‌شود. انرژی و دست‌کم انرژی جنبشی، در مقابل حرکت مانند جرم ثقیل ایستادگی می‌کند. آیا این گفته در مورد اقسام دیگر انرژی هم درست است؟

نظریهٔ نسبیت از فرض بنیادی خود پاسخی روشن و قانع کننده برای این سؤال استنتاج می‌کند، پاسخی که بازهم ماهیتاً کمّی است: همهٔ انواع انرژی در مقابل تغییر حرکت ایستادگی می‌کنند. همهٔ انواع انرژی مانند ماده عمل می‌کنند. وزن یك قطعهٔ آهن وقتی تفته است بیش از موقعی است که سرد است. اشعه‌ای که از خورشید گسیل شده است و در فضا منتشر می‌شود دارای انرژی است و بنابراین دارای جرم است. خورشید و تمام ستارگانی که تشعشع می‌کنند، با گسیل اشعه از جرمشان کاسته می شود. این نتیجه‌گیری، که صفتی عام دارد، یکی از دستاوردهای مهم نظریهٔ نسبیت است و با همهٔ حقایقی که آن را آزموده‌اند سازگار درآمده است.

فیزیك کلاسیك به دو جوهر مادی قائل بود: ماده و انرژی؛ اولی وزن داشت و دومی بی‌وزن بود. در فیزیك کلاسیك دو قانون بقا وجود داشت: یکی برای ماده و دیگری برای انرژی. پیشتر پرسیده شد که آیا فیزیك جدید هم به این نظر، که دو جوهر مادی و دو قانون بقا وجود دارد، پایبند است. جواب «نه» است. بنابر نظریهٔ نسبیت تمایزی اساسی میان جرم و انرژی وجود ندارد. انرژی جرم دارد و جرم نمایندهٔ انرژی است. به جای دو قانون بقا یك قانون بیشتر نداریم، و آن قانون بقای جرم-انرژی است. نگرش تازه در پیشبرد بیشتر فیزیك موفق و پر بار بوده است.

چه شد که مسألهٔ جرم داشتن انرژی و نمایندهٔ انرژی بودن جرم مدتی دراز در تاریکی ماند؟ آیا وزن قطعهٔ آهن تفته بیشتر از قطعه آهن سرد است؟ جوابی که اکنون به این سؤال می‌دهیم «بلی» است، ولی جوابی که در صفحهٔ (۴۵) دادیم «نه» بود. صفحاتی که بین این دو جواب قرار گرفته برای پنهان داشتن این تناقض کافی نیستند.

اشکالی که فعلاً با آن دست به گریبان هستیم نظیر همان است که

قبلاً با آن روبرو شدیم. تغییر جرمی که نظریهٔ نسبیت پیش‌بینی می‌کند به اندازه‌ای کوچك است که اندازه‌گیری مستقیم آن حتی با حساسترین ترازوها هم میسر نیست. اثبات وزن داشتن انرژی از راههائی غیرمستقیم ولی قطعی بدست می‌آید.

علت فقدان قرینهٔ آشکار، نرخ تبدیل بسیار کوچکی است که میان جرم و انرژی موجود است. انرژی در مقایسه با جرم به ارزی کم‌بها شده در مقابل پولی پرارزش می‌ماند. مثالی این کیفیت را واضحتر می‌کند. مقدار گرمائی که بتواند سی‌هزار تن آب را به بخار تبدیل کند، فقط یك گرم وزن دارد! انرژی را مدتها بی‌وزن تصور می‌کردند زیرا جرمی که نمایندهٔ آن است بسیار کوچك است.

جوهر مادی انرژی دومین قربانی نظریهٔ نسبیت است. اولین قربانی آن محیطی بود که امواج نور در آن منتشر می‌شدند.

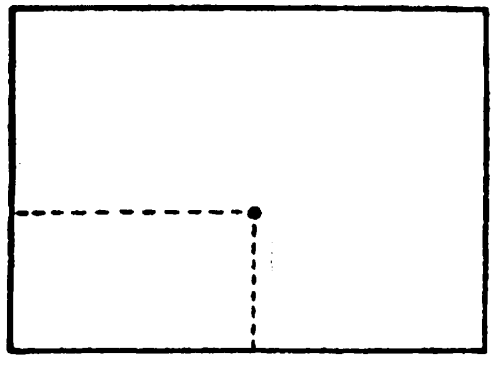
تأثیر نظریهٔ نسبیت از مسأله‌ای که موجب آن شد بسی فراتر می رود. این نظریه اشکالات و تناقضهای نظریهٔ میدان را از میان برمی‌دارد. قوانین مکانیکی عمومیتری تدوین می‌کند. به جای دو قانون بقا، یك قانون می‌گذارد. مفهوم کلاسیك زمان مطلق را تغییر می‌دهد. حوزهٔ اعتبار این نظریه فقط به یك رشته از فیزیك محدود نمی‌شود. بلکه چهارچوبی را تشکیل می‌دهد که تمام پدیده‌های طبیعت را شامل می‌شود.

پیوستار فضا ـ زمان

«انقلاب فرانسه در روز چهاردهم ژوئیهٔ سال ۱۷۸۹ در پاریس آغاز گردید.» در این جمله زمان و مکان رویدادی بیان شده است. به کسی که «پاریس» را نمی‌شناسد و برای اولین‌بار این جمله را می‌شنود، باید گفت: پاریس شهری است بر روی زمین که طول جغرافیائی آن ۲ درجهٔ شرقی و عرض جغرافیائی آن ۴۹ درجهٔ شمالی است. این دو عدد مکان و «۱۴ ژوئیهٔ ۱۷۸۹» زمانی را مشخص می‌کنند که حادثهٔ انقلاب فرانسه در آن اتفاق افتاده است. در فیزیك اهمیت تعیین اینکه حادثه‌ای کی و کجا روی داده است بیش از علم تاریخ می‌باشد، زیرا این اطلاعات پایه و اساس توصیف کمّی را تشکیل می‌دهند.

سابقاً به خاطر سادگی، تنها حرکت بر امتداد خط مستقیم را بررسی کردیم. میلهٔ صلبی، که مبدأ داشت ولی منتهائی نداشت، د. م. ما بود. اکنون نیزهمین محدودیت را حفظ می‌کنیم. نقاط مختلفی را روی این میله در نظر می‌گیریم؛ مکان این نقاط فقط با یك عدد مشخص می‌شود که همان مختص نقطه است. وقتی می‌گوئیم مختص نقطه‌ای ۲٫۱۵ متر است، یعنی فاصلهٔ آن از مبدأ ۲٫۱۵ متر است. برعکس اگر کسی عددی و واحد مقیاسی به من بدهد، همیشه می‌توانم نقطه‌ای را بر روی میلهٔ صلب متناظر با این عدد پیدا کنم. می‌توان چنین گفت: هر نقطهٔ مشخص بر روی میله متناظر با عدد معینی و هر عدد معین متناظر با نقطهٔ خاصی است. این واقعیت را ریاضیدانان با جملهٔ زیر بیان می‌کنند: نقاط واقع بر روی میله یك پیوستار یك بعدی را تشکیل می‌دهند. در نزدیکی هر نقطهٔ واقع بر میله نقطهٔ دیگری می‌توان یافت که هر قدر که بخواهیم به آن نزدیك باشد. فاصلهٔ بین هر دو نقطهٔ واقع بر میله را می‌توان با گامهائی، هراندازه کوچك که بخواهیم، پیمود. بنابراین کوچکی دلخواه گامهائی که دو نقطهٔ دور از هم را به یکدیگر متصل می‌سازد، معرف پیوستار است.

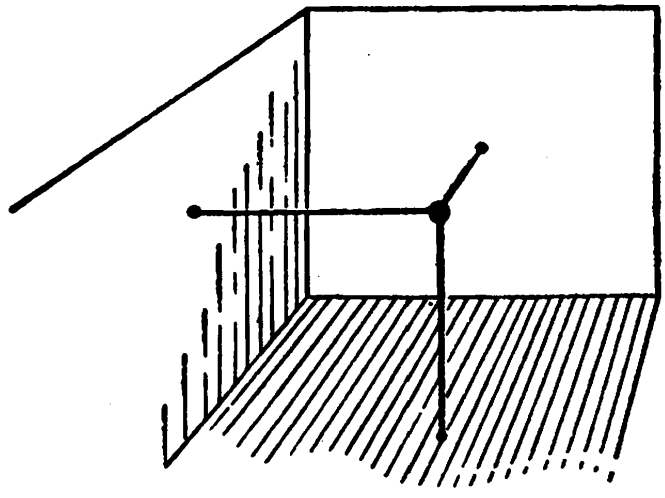
اکنون مثال دیگری می‌زنیم. صفحه‌ای داریم، و اگر میل دارید که مسأله ملموستر باشد، این صفحه را سطح میز چهارگوشی تصور کنید. مکان یك نقطه بر روی میز به جای یك عدد با دو عدد مشخص می‌شود. این دو عدد فاصله‌های نقطه از دو لبهٔ عمود برهم میز هستند. به هر نقطهٔ میز یك جفت عدد مربوط می‌شود و به هر جفت عدد یك نقطه. به عبارت دیگر این صفحه یك پیوستار دو بعدی است. نزدیك هر نقطه نقاطی



را می‌توان یافت که هرقدر بخواهیم به آن نزدیك باشند. دو نقطهٔ دور از

هم را می‌توان با منحنیی به هم وصل کرد که به گامهای کوچك دلبخواهی تقسیم شده است. بنابراین کوچکی دلبخواه گامهائی که دو نقطهٔ دور از هم را به یکدیگر اتصال می‌دهند، و چنانکه می‌دانیم هر یك از آنها با دو عدد مشخص می‌شوند، در اینجا نیز معرف پیوستار دوبعدی است.

یك مثال دیگر. فرض کنید که بخواهید اتاق خود را به عنوان د. م. انتخاب کنید؛ معنی این گفته آن است که می‌خواهید مکان تمام نقاط را نسبت به دیوارهای صلب اتاق مشخص سازید. مکان نوك چراغ برق، در صورتی که ساکن باشد، با سه عدد معین می‌شود. دوتا از این اعداد فاصلهٔ چراغ را تا دیوارهای قائم تعیین می‌کنند و عدد سوم فاصلهٔ چراغ تا کف اتاق است. هر نقطه از فضا با سه عدد متناظر است، و به هر سه عدد فقط یك نقطه در فضا مربوط می‌شود. این مطلب با این جمله بیان می‌شود: **فضای ما یك پیوستار سه بعدی است.** در نزدیکی هر نقطهٔ فضا نقاط بسیاری



وجود دارد. در اینجا نیز کوچکی گامهائی که دو نقطهٔ دور از هم را به یکدیگر متصل می‌کنند، و هرکدام از این نقاط به سه عدد مشخص شده‌اند، معرف یك پیوستار سه بعدی است.

آنچه را که گفته شد نمی‌توان فیزیك شمرد. برای آنکه این مطالب به فیزیك مربوط شود باید حرکت ذرات مادی را در نظر گرفت. برای مشاهده و پیش‌بینی رویدادهای طبیعی، نه فقط مکان بلکه زمان وقوع آنها نیز باید منظور شود. بار دیگر به مثال بسیار ساده‌ای متوسل می‌شویم.

سنگ کوچکی، که آن را می‌توان چون ذره‌ای تصور کرد، از بالای

برجی رها می‌شود. فرض این است که بلندی برج ۸۰ متر باشد. از زمان گالیله به این طرف می‌توانسته‌ایم مختص این سنگ را در هر لحظهٔ دلبخواهی بعد از رها شدن، معین کنیم. در «جدول زمانی» زیر مکان سنگ در ۰، ۱، ۲، ۳، ۴ ثانیه پس از سقوط داده شده است.

بلندی از زمین به متر	زمان به ثانیه
۸۰	۰
۷۵	۱
۶۰	۲
۳۵	۳
۰	۴

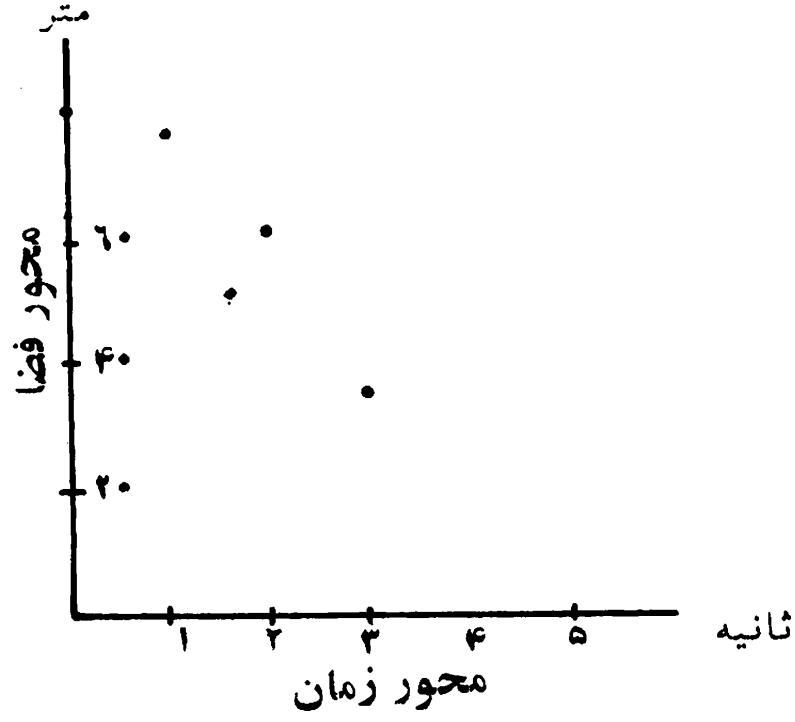
پنج رویداد در این جدول زمانی ثبت شده‌اند که هرکدام با دو عدد زمان و مختص فضائی هر رویداد مشخص می‌گردد. رویداد اول رها شدن سنگ است از ارتفاع ۸۰ متری زمین در ثانیهٔ صفر. رویداد دوم تطابق سنگ است با میلهٔ صلب (برج) در ارتفاع ۷۵ متری زمین. این رویداد یك ثانیه پس از شروع اتفاق افتاده است. رویداد آخر نمایندهٔ رسیدن سنگ است به زمین.

می‌توان معلوماتی را که از جدول زمانی بدست می‌آید به طرز دیگری عرضه کرد. پنج جفت عددی را که در جدول زمانی موجود است می‌توان پنج نقطهٔ واقع بر یك سطح شمرد. اول باید مقیاسی انتخاب شود. پاره خطی را نمایندهٔ یك متر و پاره خط دیگری را نمایندهٔ یك ثانیه اختیار می‌کنیم. مثلاً:

اکنون دو خط عمود بریکدیگر می‌کشیم و خط افقی را محور زمان و خط قائم را محور فضا نام می‌دهیم. بلافاصله دیده می‌شود که جدول زمانی

ما با پنج نقطه از صفحهٔ فضا-زمان ما نمایش داده می‌شود.

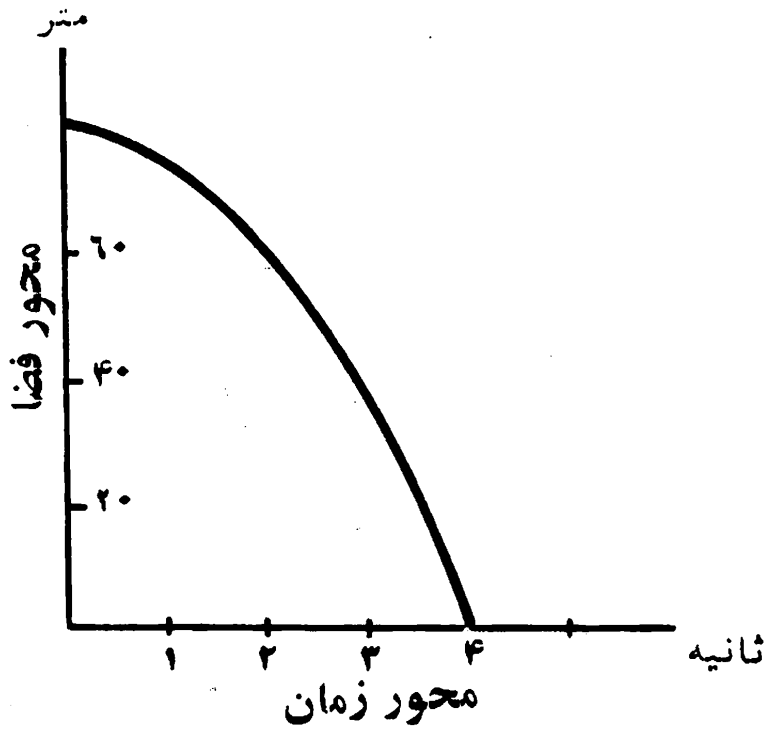
فواصل این نقطه‌ها از محور فضا، مختصات زمانی آنها را نشان می‌دهند که در ستون اول جدول زمانی ثبت شده‌اند؛ و فواصل آنها از محور زمان معرف مختصات فضائی آنهاست. مطلب واحدی به دو طریق بیان شده است: یکی به صورت «جدول زمانی» و دیگری به صورت نقاطی بر صفحه.



هر یك از آنها را می‌توان از روی دیگری ساخت. انتخاب یکی از این دو نمایش بسته به ذوق و سلیقهٔ شخص است، چه در واقع معادلند.

اکنون قدری جلوتر می‌رویم. فرض کنیم «جدولی زمانی» داشته باشیم که مکان نقاط را به جای اینکه ثانیه به ثانیه معلوم کند، هریك صدم ثانیه به یك صدم ثانیه مشخص می‌سازد، در این صورت برصفحهٔ فضا-زمان، عوض پنج نقطه نقاط بسیار زیادی خواهیم داشت. بالاخره اگر مکان ذرهٔ متحرك برای هرلحظه معین باشد، یا چنانکه ریاضیدانان می گویند اگر مختصات فضائی تابعی از زمان باشد، آنگاه مجموعهٔ نقاط ما خطی پیوسته می‌شود. بنابراین شکل بعدی ما دیگر مانند سابق قسمتی از معرفت ما از حرکت سنگ نیست، بلکه شامل معرفت کامل ما در این باره است.

حرکت در امتداد میلهٔ صلب (برج)، که حرکت در پیوستار یك بعدی



است، در اینجا به صورت یك منحنی در پیوستار فضا-زمان دو بعدی نمایش داده می‌شود. هر نقطه در پیوستار فضا-زمان ما متناظر با یك جفت عدد است که یکی از آنها مختص زمانی است و دیگری مختص فضائی؛ برعکس به هر جفت عدد، که رویدادی را مشخص می‌کنند، نقطه‌ای در صفحهٔ فضا-زمان مربوط می‌شود. دو نقطهٔ مجاور نمایندهٔ دو رویداد، هستند که در دو مکان بسیار نزدیك به یکدیگر و در دو زمان بسیار نزدیك به هم اتفاق افتاده‌اند.

ممکن است به این نمایش ایراد بگیرید و بگوئید: چه معنی دارد که واحد زمان را با پاره خطی نمایش دهیم و آن را به طور مکانیکی با فضا ترکیب کنیم و از دو پیوستار یك بعدی یك پیوستار دو بعدی بسازیم؟ در این صورت باید به همین شدت نسبت به نمودارهائی که تغییرات دما را در تابستان گذشته در شهر نیویورك نشان می‌دهند یا معرف تغییرات هزینهٔ زندگی در چند سال اخیرند نیز اعتراض کنید، زیرا در هر یك از این موارد نیز همین روش بکار گرفته شده است. در نمودارهای دما، پیوستار یك بعدی دما با پیوستار یك بعدی زمان ترکیب شده و پیوستار دو بعدی دما-

زمان را بوجود آورده است.

اکنون به مثال ذره‌ای که از بالای برج ۸۰ متری رها شد، باز می گردیم. تصویر نموداری حرکت، قرارداد مفیدی است. زیرا مکان ذره را در هر لحظهٔ دلبخواه مشخص می‌کند. حال که می‌دانیم که ذره چگونه حرکت می‌کند، می‌خواهیم بار دیگر حرکت آن را مجسم سازیم. دو راه برای این کار داریم.

تصویر ذره را که مکان آن با مرور زمان در فضای یك بعدی تغییر می‌کند در نظر می‌آوریم. حرکت را چون رشته‌ای از حوادث در پیوستار یك بعدی تصور می‌کنیم. فضا و زمان را با یکدیگر نمی‌آمیزیم و تصویری پویا (دینامیك) بکار می‌بریم. در این تصویر مکان ذره با زمان تغییر می‌کند.

اما همین حرکت را می‌توان به صورت دیگری هم مجسم کرد. اگر خط منحنی را در پیوستار دو بعدی فضا-زمان در نظر گیریم تصویری ایستا (استاتیك) از آن ساخته‌ایم. در این صورت حرکت چون چیزی نموده شده که هست، چیزی که در پیوستار دو بعدی فضا-زمان وجود دارد، و نه چون چیزی است که در پیوستار یك بعدی فضائی تغییر می‌پذیرد.

این هر دو تصویر کاملاً معادل هستند و ترجیح یکی بر دیگری صرفاً تابع قرارداد و ذوق است.

آنچه در اینجا دربارهٔ دو طرز نمایش حرکت گفته شد هیچ ربطی با نظریهٔ نسبیت ندارد. از هر دو طرز نمایش می‌توان، با ارزش مساوی، استفاده کرد، هرچند که فیزیك کلاسیك بیشتر به تصویر پویا (دینامیکی) مایل است و حرکت را به صورت حوادثی که در فضا روی می‌دهند توصیف می‌کند، نه اینکه آن را چیزی بداند که در فضا-زمان وجود دارد. اما نظریهٔ نسبیت دید ما را تغییر داد. این فرضیه، آشکارا به تصویر ایستا (استاتیك) مایل است و نمایش حرکت را به مثابهٔ چیزی که در فضا-زمان وجود دارد، تصویری مناسبتر و نمایشی عینی‌تر از واقعیت می‌شمارد. هنوز باید به این سؤال جواب گفته شود که: چرا این دو تصویر از لحاظ فیزیك کلاسیك معادل یکدیگرند و از دیدگاه نظریهٔ نسبیت معادل نیستند؟

برای دست یافتن به جواب باز باید به دو د.م. متوسل شویم که

نسبت به یکدیگر حرکت یکنواخت دارند.

بر طبق فیزیك کلاسیك ناظران دو د. م. که نسبت به یکدیگر در حرکت یکنواختند مختصات فضائی متفاوتی را به یك حادثهٔ معین نسبت می‌دهند، در حالی که مختصات زمانی هر دو دستگاه را یکی می‌شمارند. مثلاً در مثالی که قبلاً دیدیم، برخورد ذره با زمین در د. م. انتخابی ما با مختص زمانی «۴» و مختص فضائی «۰» معین می‌شود. بنا بر مکانیك کلاسیك برای ناظر دیگری هم که حرکت یکنواختی نسبت به د. م. انتخابی ما دارد، سنگ پس از همان «۴» ثانیه به زمین می‌رسد. اما این ناظر فاصله را در د. م. خود می‌سنجد و معمولاً مختص فضائی متفاوتی به رویداد برخورد نسبت می‌دهد. حال آنکه مختص زمانی برای او و برای ناظرانی که نسبت به یکدیگر حرکت یکنواخت دارند یکی است. فیزیك کلاسیك برای همهٔ ناظران فقط به یك جریان زمان «مطلق» قائل است. در هر د. م. می‌توان پیوستار دو بعدی را به دو پیوستار یك بعدی، یعنی زمان و فضا، تقسیم کرد. در فیزیك کلاسیك به علت سرشت مطلق زمان، انتقال از تصویر «ایستای» حرکت به تصویر «پویای» حرکت دارای مفهومی عینی است.

ولی قبلاً به این مسأله معتقد شدیم که تبدیل کلاسیك را نمی‌توان به صورت عام در فیزیك مورد استفاده قرارداد. از نظر عملی، این تبدیل هنوز در سرعتهای کم کارآمد است، ولی به درد حل و فصل مسائل بنیادی فیزیك نمی‌خورد.

از لحاظ نظریهٔ نسبیت، زمان برخورد سنگ با زمین برای همهٔ ناظران یکسان نیست. مختص زمانی و مختص فضائی هر دو در د.م. های مختلف، متفاوتند و در سرعتهای نزدیك به سرعت نور این تفاوت زمان کاملاً محسوس می‌گردد. در این نظریه، برخلاف فیزیك کلاسیك، پیوستار دو بعدی قابل تجزیه به دو پیوستار یك بعدی نیست. برای تعیین مختصات فضا-زمانی در یك د. م. دیگر نباید زمان و فضا را جدا از هم در نظر گرفت. تفکیك پیوستار دو بعدی به دو پیوستار یك بعدی از دیدگاه نظریهٔ نسبیت کاری بی‌دلیل و من عندی است و متضمن مفهومی عینی نیست.

آنچه را که گفته شد بسهولت می‌توان به حالتی تعمیم داد که

حرکت به خط مستقیم محدود نباشد. در حقیقت برای بیان حوادث طبیعی دو عدد کافی نیست، بلکه چهار عدد لازم است. فضای فیزیکی، که تصور آن از طریق اشیاء و حرکات آنها حاصل آمده، دارای سه بعد است و مکان نقاط با سه عدد مشخص می‌شود. لحظهٔ وقوع یك رویداد عدد چهارم است. به هر رویداد چهار عدد معین مربوط می‌شود. با هر چهار عدد یك رویداد معین متناظر است. بنابراین: جهان رویدادها پیوستاری چهاربعدی است. در این گفته هیچ چیز عجیبی وجود ندارد، و جملهٔ آخر، در فیزیك کلاسیك و نظریهٔ نسبیت هر دو به یك اندازه صادق است. تفاوت این دو بازهم موقعی معلوم می‌شود که دو د. م. را، که نسبت به یکدیگر در حرکت یکنواختند، در نظر بگیریم. اتاق در حرکت است و ناظران داخلی و خارجی مختصات فضا ـ زمانی رویدادهای واحدی را اندازه می‌گیرند. فیزیکدان کلاسیك پیوستار چهاربعدی را به یك فضای سه بعدی و یك پیوستار یك‌بعدی زمان تجزیه می‌کند. فیزیکدان قدیمی چون زمان را مطلق می‌شمارد، تنها نگران تبدیلهای فضائی است. از نظر او تفکیك پیوستارهای چهاربعدی به فضا و زمان امری طبیعی و سودمند است. اما از دیدگاه نظریهٔ نسبیت، در انتقال از یك دستگاه به دستگاه دیگر، زمان نیز مانند فضا تغییر می‌کند، و تبدیل لورنتس خواص تبدیلی پیوستار فضا ـ زمان چهاربعدی دنیای چهاربعدی رویدادها را مورد بررسی قرار می‌دهد.

عالم رویدادها را هم می‌توان با تصویری پویا، که در زمینهٔ فضای سه‌بعدی با زمان تغییر می‌کند، توصیف کرد، و هم می‌توان با تصویری ایستا بر زمینهٔ پیوستار فضا ـ زمان چهاربعدی. از نظر فیزیك کلاسیك این دو تصویر پویا و ایستا، معادل یکدیگر هستند. ولی از دیدگاه نظریهٔ نسبیت تصویر ایستا مناسبتر و عینی‌تر است.

در نظریهٔ نسبیت نیز می‌توانیم، در صورتی که بخواهیم، از تصویر پویا استفاده کنیم. ولی باید بخاطر داشت که این تجزیهٔ به زمان و فضا متضمن معنائی عینی نیست، زیرا دیگر زمان امری «مطلق» نمی‌باشد. ما در صفحات آینده با زبان «پویا»، و نه با زبان «ایستا»، سخن می‌گوئیم؛ ولی محدودیتهای آن را از خاطر نخواهیم برد.

نسبیت عمومی

هنوز یک نکته باقی است که باید روشن شود. هنوز یکی از بنیادیترین پرسشها حل و فصل نشده است: آیا دستگاه ماندی وجود دارد یا نه؟ در بارهٔ قوانین طبیعت و عدم تغییر آنها نسبت به تبدیل لورنتس و اعتبار آنها در همهٔ دستگاههای ماندی که نسبت به یکدیگر حرکت یکنواخت دارند، چیزهائی فراگرفتیم. قوانین را داریم ولی چهارچوب مرجع را نمی‌شناسیم.

برای آنکه از این دشواری آگاه‌تر شویم با فیزیکدان کلاسیک به گفتگو می‌نشینیم و سؤالهای ساده‌ای از او می‌کنیم:

«دستگاه ماندی کدام است؟»

«دستگاه ماندی د. م. خاصی است که قوانین مکانیک در آن صادق هستند. جسمی که بر آن نیروهای خارجی وارد نشوند، در چنین د. م. حرکت یکنواخت خواهد داشت. از روی همین خاصیت می‌توان یک د. م. ماندی را از دستگاههای دیگر متمایز کرد.»

«ولی منظور از اینکه نیروئی بر یک جسم وارد نمی‌آید چیست؟»

«معنی این جمله فقط این است که جسم به طور یکنواخت در یک د.م. ماندی حرکت می‌کند.»

در اینجا می‌توان دوباره پرسید: «د.م. ماندی کدام است؟» ولی چون امید چندانی نمی‌رود که بتوان جواب بهتری از جوابهای بالا گرفت، سؤال خود را تغییر می‌دهیم تا شاید اطلاعات ملموستری بدست آوریم.

«آیا دستگاه مختصاتی که به‌طور صلب به زمین متصل باشد یک د.م. ماندی است؟»

«هرگز! زیرا به واسطهٔ حرکت وضعی زمین، قوانین مکانیک در روی زمین به طور کامل صادق نیستند. دستگاه مختصاتی را که به طور صلب به خورشید متصل باشد، در بسیاری موارد می‌توان د.م. ماندی شمرد، ولی چون حرکت دورانی خورشید را در نظر گیریم متوجه می‌شویم که د. م. متصل به خورشید را نیز نمی‌توان کاملاً ماندی دانست.

«پس د.م. ماندی شما به طور ملموس چیست؟ و حالت حرکت آن از چه قرار باید باشد؟»

«این د.م. صرفاً یـك داستان مفید است. من نمی‌دانـم که چگونـه تحقق خارجی پیدا می‌کند. اگر بتوان از اجسام مادی به اندازهٔ کافی دور شد و خود را از تمام آثار خارجی بـرکنار نگاه داشت، آن وقت د.م. من ماندی خواهد بود.»

«اما مقصود شمـا از د.م.ی که از تـأثیرات خارجـی بـرکنار باشد چیست؟»

«مقصودم آن است که این د.م. ماندی باشد.»

باز به سؤال اول خود رسیدیم!

گفتگوی ما وجـود اشکال عظیمی را در فیزیـك کلاسیك آشکار می سازد. قوانینی را داریم، ولی نمی‌دانیم ایـن قـوانین را در چـه چهارچوب مـرجعی اعمـال کنیم، بنظر می‌رسد کـه شالودهٔ ساختمان فیزیك ما برآب است.

از راه دیگری نیز می‌توان به همین اشکال رسید. فـرض کنید که در عالم فقط یـك جسم وجود داشته بـاشد و آن د. م. مـا بشمار رود. ایـن جسم به دوران آغاز می‌کند. بنابر مکانیك کلاسیك قوانین فیزیکی مربـوط به جسم دوار با قوانین مربوط به جسم غیـر دوار فـرق دارند. اگـر اصل ماند در یك مورد صحیح باشد، در مورد دیگر صدق نخواهد کرد. امـا ایـن گفته‌ها همه تردیدآمیز می‌نمایند. آیا تصورِ حرکتِ یك جسم در جهان به تنهائی، امکان‌پذیر است؟ همیشه وقتی از حرکت نام بـرده مـی‌شود مقصود تغییر مکان آن نسبت به جسم دیگر است. خـلاف عقل سلیـم است که از حـرکت یـك جسم بتنهائی صحبت شود. مکانیـك کلاسیك و عقـل سلیم در این نکته شدیداً اختلاف نظـر دارند. دستورالعمل نیوتن چنین است: اگـر اصل مانـد صحت داشته باشد، د. م. یا در حـال سکون است و یـا حرکت نسبی دارد؛ اگر اصل ماند صادق نباشد، حرکت جسم حرکت غیر یکنواخت خواهد بـود. بنابراین رأی مـا در بارهٔ حرکت یا سکـون، موکول به این می‌شود کـه آیا همهٔ قوانین فیزیك را در د. م. مورد نظر می‌توان بکار برد یا نه.

دو جسم مثـلاً زمیـن و خـورشید را در نظر بگیریـد. حـرکتی که مشاهده می‌شود باز یك حرکت نسبی است. این حرکت را می‌توان با اتصال

د.م. به زمین یا خورشید توصیف کرد. از این دیدگاه دستاورد بزرگ کوپرنیکوس عبارت می‌شود از انتقال د.م. از زمین به خورشید. ولی چون حرکت نسبی است و هر چهارچوب مرجعی را می‌توان بکار برد، دلیلی ندارد که یك د.م. را بر د.م. دیگر ترجیح داد.

در اینجا فیزیك دخالت می‌کند و دید مبتنی بر عقل سلیم ما را تغییر می‌دهد. د.م. منسوب به خورشید بیشتر از د.م. متصل به زمین به دستگاه ماندی شباهت دارد. قوانین فیزیك در د.م. کوپرنیکوس بهتر از د.م. بطلمیوس قابل انطباق هستند. اهمیت اکتشاف کوپرنیکوس بیشتر از همین جنبهٔ فیزیکی قضیه است، و مزیت بزرگی را که استعمال د. م. متصل به خورشید در توصیف حرکت سیارات دارد، آشکار می‌سازد.

در فیزیك کلاسیك حرکت یکنواخت مطلق وجود ندارد. اگر دو د.م. نسبت به یکدیگر به‌طور یکنواخت حرکت کنند، دیگر این جمله که: «این د.م. ساکن است و آن دیگری متحرك»، معنائی ندارد. ولی اگر حرکت دو د.م. نسبت به یکدیگر غیر یکنواخت باشد، می‌توان گفت: «این جسم متحرك و آن دیگری ساکن است (یا حرکت یکنواخت دارد).» در این حالت حرکت مطلق معنی مشخصی پیدا می‌کند. در اینجا درهٔ عمیقی عقل سلیم را از فیزیك کلاسیك جدا می‌سازد. اشکالاتی که به آنها اشاره شد، یعنی اشکال دستگاه ماندی و حرکت مطلق، ارتباط بسیار نزدیکی با یکدیگر دارند. حرکت مطلق تنها زمانی ممکن می‌شود که بتوان دستگاهی ماندی را تصور کرد که تمام قوانین طبیعت در آن معتبر باشند.

ممکن است چنین تصور شود که برای رهائی از این اشکالات هیچ راهی وجود ندارد، و هیچ نظریهٔ فیزیکی نمی‌تواند از آنها اجتناب کند. ریشهٔ این اشکالات در این است که قوانین طبیعت فقط در دستهٔ مخصوصی از د.م. ها، یعنی دستگاههای ماندی، صدق می‌کنند. امکان حل آنها بسته به پاسخی است که به سؤال زیر داده می‌شود: «آیا می‌توان قوانین فیزیك را طوری تدوین کرد که نه فقط در د.م. هائی که نسبت به یکدیگر در حرکت یکنواخت هستند، بلکه در دستگاههائی که نسبت به یکدیگر حرکتی کاملاً دلبخواه دارند نیز صدق کنند؟» اگر چنین کاری شدنی باشد، اشکالات از میانه برداشته می‌شود؛ و از آن پس بآسانی می‌توان

قوانین طبیعت را در هر د. م. بکار برد. اگر این کار انجام شده بود، دیگر مبارزهٔ شدیدی که در روزگاران نخستین علم میان نگرشهای کوپرنیکوس و بطلمیوس وجود داشت، بی‌معنی می‌بود. هر د.م. را با شایستگی کامل می‌شد مورد استفاده قرارداد. دو جملهٔ: «خورشید ساکن است و زمین حرکت می‌کند» یا «خورشید متحرك و زمین ساکن است»، تنها مبین دو قرارداد متفاوت مربوط به دو د.م. مختلف می‌شدند.

آیا می‌توان یك فیزیك نسبیتی واقعی وضع کرد که در همهٔ د.م. ها صحت داشته باشد؟ فیزیکی که در آن جائی برای حرکت مطلق موجود نباشد و فقط به حرکت نسبی بپردازد؟ آری، چنین عملی امکان‌پذیر است!

ما برای ساختن فیزیك جدید، دست‌کم یك برگه در دست داریم، گرچه برگه‌ای بسیار ضعیف است. فیزیك واقعاً نسبیتی باید بر همهٔ د.م. ها و در نتیجه بر مورد خاص د.م. ماندی نیز قابل اطلاق باشد. ما قوانین این د.م. ماندی را می‌شناسیم. قوانین عام جدید که در همهٔ د.م. ها صحت دارند، بایستی در حالت خاص دستگاه ماندی به قوانین شناخته شدهٔ قدیمی تبدیل شوند.

مسألهٔ تدوین قوانین فیزیکی برای همهٔ د.م. ها به وسیلهٔ «نظریهٔ نسبیت عمومی» حل شده است. نظریهٔ پیشین، که فقط در دستگاههای ماندی صحت دارد، نظریهٔ نسبیت خصوصی نامیده می‌شود. البته این دو نظریه نمی‌توانند یکدیگر را نقض کنند، چه ما باید قوانین قدیمی نظریهٔ نسبیت خصوصی برای دستگاههای ماندی را در قوانین عمومی ادغام کنیم. ولی چون د.م. ماندی تاکنون تنها دستگاهی بود که قوانین فیزیك برای آنها تدوین شده بود، اینك به صورت حالت حدی خاصی در می‌آید. زیرا در اینجا د.م. هائی که نسبت به هم حرکت دلبخواه دارند مجاز شمرده می‌شوند.

این برنامه نظریهٔ نسبیت عمومی است. ولی در ترسیم راههای اجرای این برنامه باید از آنچه تاکنون بوده هم مبهمتر بود. اشکالات جدیدی که ضمن تحول علم پیدا شده‌اند موجب می‌شوند که نظریهٔ ما هرچه انتزاعیتر باشد. هنوز ماجراهای نامنتظرهٔ دیگری چشم به راه ما هستند. ولی قصد نهائی ما درك بهتر واقعیت است. حلقه‌هائی جدید به آن

زنجیرهٔ منطقی که نظریه را به مشاهده مرتبط می‌سازد افزوده شده است. برای آنکه راهی را که از نظریه به آزمایش می‌انجامد، از فرضهای غیرضروری و ساختگی پاك کنیم و حوزهٔ وسیعتری از واقعیتها را توضیح دهیم، ناچاریم که این زنجیره را هرچه درازتر سازیم. هرچه فرضهای ما ساده‌تر و اساسیتر شوند، افزار ریاضی استدلال پیچیده‌تر و راه میان نظریه و مشاهده درازتر و پیچاپیچتر می‌گردد. هرچند جملهٔ زیر معمائی بنظر می‌رسد، مع‌ذلك می‌توان گفت: فیزیك جدید ساده‌تر از فیزیك قدیم است و به همین جهت مشکلتر و پیچیده‌تر بنظر می‌رسد. هراندازه تصور ما از دنیای خارجی ساده‌تر و وسعت شمول آن زیادتر باشد، هماهنگی جهان را بیشتر در فکر ما منعکس می‌سازد.

فکر جدید ما فکر ساده‌ای است: می‌خواهیم فیزیکی بسازیم که در تمام د. م. ها معتبر باشد. انجام یافتن این کار موجب دشواریهائی صوری می‌شود و ما را ناچار می‌سازد که افزارهای ریاضی جدیدی را بکار بریم که با آنچه تاکنون بکار می‌رفته تفاوت دارند. ما در اینجا فقط ارتباط میان این برنامه و دو مسألهٔ اساسی یعنی گرانش و هندسه را نشان خواهیم داد.

بیرون آسانسور و درون آن

قانون ماند اولین پیشرفت بزرگ علم فیزیك و در حقیقت آغاز واقعی آن بشمار می‌رود. این قانون حاصل تصور آزمایشی خیالی بود. در این آزمایش جسمی که بر آن اصطکاك یا نیروی خارجی دیگری وارد نمی‌شد برای همیشه حرکت می‌کرد. از این مثال، و بعدها از بسیاری مثالهای دیگر، به اهمیت این قبیل آزمایشهای خیالی که زائیدهٔ فکر هستند، پی‌بردیم. اکنون نیز بار دیگر به آزمایشهائی خیالی متوسل می‌شویم که اگرچه بسیار تخیلی بنظر می‌رسند، مع‌ذلك تا حدی که با این روشهای ساده امکان دارد، به فهم هرچه بیشتر نسبیت کمك می‌کنند.

قبلاً آزمایشهائی خیالی با اتاقی که حرکت یکنواخت داشت، انجام دادیم. در اینجا، برای تغییر ذائقه هم که شده، آسانسوری را در نظر می‌گیریم که در حال سقوط است.

آسانسور بزرگی را در بلندترین طبقهٔ عمارت آسمانخراشی، که بسیار بلندتر از هر آسمانخراش واقعی است، تصور کنید. ناگهان بند آن پاره می شود و آسانسور به حال آزاد به زمین سقوط می‌کند. ناظران داخل آسانسور در حین سقوط آزمایشهائی را انجام می‌دهند. در بررسی این آزمایشها نگران مقاومت هوا یا اصطکاك نخواهیم بود، زیرا در شرایط دلخواه می‌توان وجود آنها را در نظر نگرفت. یکی از ناظران ساعت و دستمال خود را از جیب در می‌آورد و آنها را رها می‌کند. بر این دو جسم چه روی خواهد داد؟ برای ناظری که بیرون آسانسور است و از پنجرهٔ آسانسور داخل آن را می‌نگرد، ساعت و دستمال با شتاب واحدی به طرف زمین سقوط می کنند. بخاطر داریم که شتاب جسم ساقط شونده هیچ ارتباطی با جرم آن ندارد، و از همین واقعیت بود که تساوی جرم ماندی و جرم گرانشی آشکار شد (صفحهٔ ۳۷). همچنین بخاطر داریم که تساوی این دو جرم ماندی و گرانشی از دیدگاه مکانیك کلاسیك امری کاملاً اتفاقی بود و در ساختمان آن هیچ سهمی نداشت. ولی در اینجا تساوی فوق، که به صورت تساوی شتاب همهٔ اجسام ساقط شونده جلوه‌گر می‌شود، اهمیتی اساسی دارد و پایهٔ تمام بحث را تشکیل می‌دهد.

حال مجدداً به سراغ دستمال و ساعت می‌رویم: برای ناظر خارجی این دو با شتاب واحدی سقوط می‌کنند. ولی سقوط آسانسور و دیوارها و کف و سقف آن نیز بر همین نحو است. بنابراین فاصلهٔ این دو جسم با کف اتاق تغییر نخواهد کرد. برای ناظر داخلی این دو جسم در همان‌جائی که رها شدند، می‌مانند. ناظر داخلی می‌تواند از میدان گرانش چشم‌پوشی کند، زیرا چشمهٔ این میدان در خارج د.م. وی قرار دارد. او می‌بیند که هیچ نیروئی در داخل آسانسور بر این دو جسم وارد نمی‌شود. به همین جهت این دو جسم در حال سکون هستند، و مثل آن است که در یك د.م. ماندی قرار گرفته باشند. عجب چیزهای غریبی در آسانسور اتفاق می افتد! اگر ناظر جسمی را در داخل آسانسور به هر سمتی مثلاً بالا یا پایین براند جسم تا موقعی که به سقف یا کف آسانسور نخورده است، به طور یکنواخت حرکت می‌کند. سخن کوتاه، قوانین مکانیك کلاسیك برای ناظر داخل آسانسور صحت دارند. همهٔ اجسام بصورتی که قانون ماند

می‌خواهد رفتار می‌کنند. د.م. جدید ما، که به آسانسورِ در حالِ سقوطِ آزاد به طور صلب متصل است، فقط از یك لحاظ با د. م. ماندی اختلاف دارد. در یك د. م. ماندی، جسم متحرکی که بر آن هیچ نیروئی اثر نکند، الی‌الابد حرکت یکنواخت خواهد داشت. د.م. ماندی بصورتی که در فیزیك کلاسیك تعریف می‌شود، نه از نظر فضا محدود است و نه از نظر زمان. اما وضع ناظر داخل آسانسور نوع دیگری است. سرشت ماندی د. م. وی در زمان و فضا محدودیت دارد. دیر یا زود جسم متحرك ما، که حرکت یکنواخت دارد، به دیوارهای آسانسور می‌خورد و حرکت یکنواخت از میان می‌رود. دیر یا زود خود آسانسور هم با زمین برخورد می‌کند و ناظران و آزمایشهایشان را از بین می‌برد.

این خاصیت موضعی د. م. خاصیتی کاملاً اساسی است. اگر آسانسور خیالی ما از قطب تا استوا را اشغال می‌کرد، و دستمال در قطب و ساعت در استوا رها می‌شدند، آن وقت برای ناظر خارجی ساعت و دستمال یك شتاب واحد نمی‌داشتند و نسبت به یکدیگر ساکن نمی‌بودند. تمام استدلال ما غلط از آب درمی‌آمد! ابعاد آسانسور باید به اندازه‌ای باشد که بتوان شتاب تمامِ اجسامِ درونِ آن را نسبت به ناظر خارجی، یکسان شمرد.

با این محدودیت، د.م. برای ناظر داخلی صفت ماندی پیدا می‌کند، و دست‌کم می‌توان دستگاه مختصاتی را نام برد که در آن تمام قوانین فیزیك معتبر است، هرچند که این د.م. از لحاظ فضا و زمان محدود می باشد. اگر د. م. دیگر و آسانسور دیگری را تصور کنیم که نسبت به آسانسوری که به حال آزاد سقوط می‌کند در حرکت یکنواخت باشد، آنگاه هر دو د. م. به طور موضعی ماندی خواهند بود. تمام قوانین در هر دوی آنها دقیقاً یکسان هستند، و انتقال از یکی به دیگری مطابق تبدیل لورنتس انجام خواهد شد.

حال ببینیم که ناظران داخلی و خارجی حوادث داخل آسانسور را چگونه توصیف می‌کنند.

ناظر خارجی، که متوجه حرکت آسانسور و اجسام داخل آن است، آن را مطابق قانون گرانش نیوتن می‌یابد. از نظر او حرکت یکنواخت نیست بلکه، به علت تأثیر میدان گرانش زمین، شتابدار است.

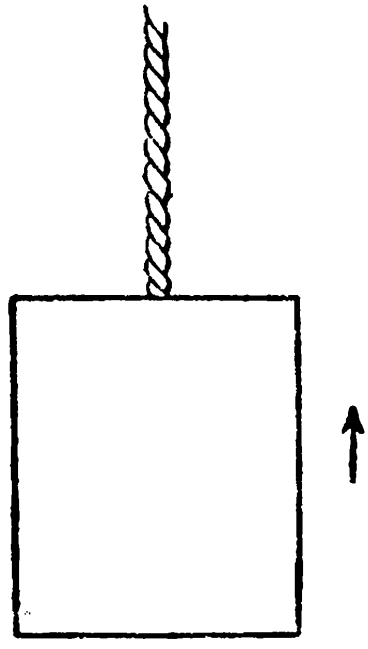
ولی اگر نسلی از فیزیکدانان در آسانسور زاده و بزرگ شوند، شیوهٔ استدلال کاملاً متفاوتی خواهند داشت. اینان تصور می‌کنند که دستگاهی ماندی در اختیار دارند و تمام قوانین طبیعت را نسبت به آسانسور خود مورد مقایسه قرار می‌دهند، و بحق معتقدند که قوانین فیزیك در د.م. آنان صورت بسیار ساده‌ای دارد. از نظر آنان طبیعی است که آسانسور را ساکن و د.م. خود را دستگاهی ماندی فرض کنند.

حل اختلاف میان ناظر خارجی و ناظر داخلی غیر ممکن است. هرکدام مدعی آن است که همهٔ حوادث باید با د.م. او مقایسه شود. ولی می‌توان چنان کرد که این دو بیان به یك اندازه از انسجام برخوردار باشند.

از این مثال واضح می‌شود که توصیف نامتناقض پدیده‌های فیزیکی در دو د. م. مختلف امکان‌پذیر است، حتی اگر این دو دستگاه نسبت به یکدیگر در حرکت یکنواخت هم نباشند. ولی برای چنین توصیفی باید گرانش را به حساب آورد و به اصطلاح پلی‌زد که گذار از یك د. م. به د.م. دیگر را میسر سازد. میدان گرانشی برای ناظر خارجی وجود دارد، در صورتی که برای ناظر داخلی وجود ندارد. برای ناظر خارجی حرکت شتابدار آسانسور در میدان گرانشی زمین وجود دارد، در صورتی که برای ناظر داخلی آنچه موجود است سکون و فقدان میدان گرانشی است. این «پل» یعنی میدان گرانشی که توضیح وقایع را در هر دو د.م. امکان‌پذیر می‌سازد، بر ستون بسیار مهمی تکیه دارد: هم‌ارزی جرم ماندی و جرم گرانشی. بدون این برگه، که در مکانیك کلاسیك به آن اعتنائی نمی‌شود، همهٔ استدلالهای ما فرو می‌ریزد.

اکنون وقت آزمایش خیالی دیگری فرارسیده است. فرض شود که یك د.م. ماندی در اختیار ما باشد که در آن قانون ماند صدق کند. قبلاً شرح دادیم که اگر آسانسوری در چنین د.م. ماندی قرار گرفته باشد، چه حوادثی در آن روی می‌دهد. اکنون تصویر را عوض می‌کنیم. کسی از بیرون طنابی به آسانسور بسته است و آن را با نیروی ثابتی در امتدادی که روی شکل نشان داده شده، می‌کشد. در این کار طرز عمل اهمیتی ندارد. چون قوانین مکانیك در این د.م. صحت دارند آسانسور با شتابی

ثابت که در امتداد حرکت است، حرکت می‌کند. بار دیگر به توضیحاتی که ناظران بیرونی و درونی از پدیده‌هائی که در آسانسور اتفاق می‌افتند،



می‌دهند گوش می‌دهیم.

ناظر بیرونی: د. م. من د. م. ماندی است. آسانسور با شتاب ثابت حرکت می‌کند، زیرا نیروی ثابتی بر آن وارد می‌شود. ناظران داخلی آسانسور در حرکت مطلق هستند و قوانین مکانیك برای آنان صحت ندارد. آنان اجسامی را که بر آنها نیروئی وارد نمی‌آید به حال سکون نمی‌بینند. اگر جسمی به حال آزاد رها شود، بزودی با کف آسانسور تلاقی می کند، زیرا کف آسانسور رو به بالا، به طرف جسم حرکت می‌کند. این کیفیت برای ساعت و دستمال دقیقاً به یك نحو اتفاق می‌افتد. باکمال تعجب باید بگوییم که ناظر داخل آسانسور همیشه ناچار است بر کف آن قرار گیرد، زیرا به محض اینکه به هوا بجهد دیری نمی‌گذردکه کف اتاق به او می‌رسد.

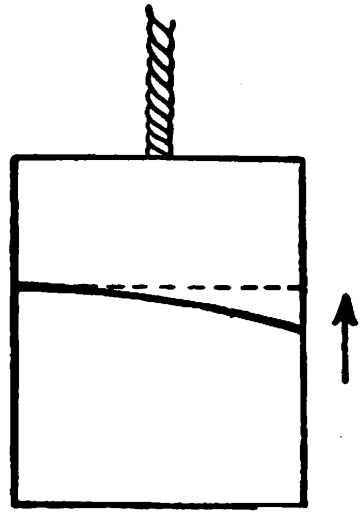
ناظر درونی: من دلیلی ندارم که قبول کنم آسانسور من در حرکت مطلق است. من قبول دارم که د. م. من، که به طور صلب به آسانسور متصل است، حقیقتاً یك د. م. ماندی نیست، اما بر این عقیده هم نیستم که حرکت مطلق دارد. ساعت و دستمال و اجسام دیگر سقوط می‌کنند چون تمام آسانسور در یك میدان گرانشی قرار گرفته است. من هم دقیقاً همان

نوع حرکاتی را مشاهده می‌کنم که ناظر روی زمین مشاهده می‌کند. او آنها را به سادگی با اثر میدان گرانشی تبیین می‌کند. من نیز چنین می‌کنم.

این دو توصیف یکی از ناظر بیرونی و دیگری از ناظر درونی هر دو کاملاً سازگار و نامتناقض هستند؛ و نمی‌توان یکی را برگزید و آن را درست دانست. هر یك از این دو را می‌توان برای توضیح پدیده‌هائی که در آسانسور روی دهد انتخاب کرد، یا با ناظر بیرونی به حرکت غیر یکنواخت و فقدان میدان گرانشی قائل شد، و یا همراه ناظر درونی سکون دستگاه و وجود میدان گرانشی را پذیرفت.

ناظر خارجی ممکن است فرض کند که آسانسور در حرکت غیر یکنواخت «مطلق» است. ولی حرکتی را که با فرض یك میدان گرانشی مؤثر از میان برداشته شود نمی‌توان حرکت مطلق شمرد. شاید بتوان برای رهائی از دو دلی در برابر این دو توصیف متفاوت راهی جست، و برله یکی و علیه دیگری تصمیمی گرفت. فرض کنید که یك شعاع نور از پنجرهٔ آسانسور به درون آن وارد شود و پس‌از زمان بسیارکوتاه [illegible] طرف مقابل برسد. حال ببینیم که دو ناظر در بارهٔ نظر می‌کنند.

ناظر بیرونی که به حرکت شتابدار آسانسور استدلال می‌کند: شعاع نوری که از پنجره داخل می‌شود در امتداد خط مستقیم به طرف دیوار مقابل حرکت می



به طرف بالا در حرکت است و در مدتی که شعاع نور، آسانسور را به

سمت دیوار مقابل می‌پیماید، مکان آسانسور تغییر می‌کند. به همین جهت شعاع درست به نقطهٔ مقابل محل ورود خود نمی‌رسد، بلکه کمی پایینتر را روشن می‌کند. این تغییر محل تابش خیلی کوچك خواهد بود، ولی چنین اختلافی وجود دارد. در نتیجه مسیر شعاع نور نسبت به آسانسور خط مستقیم نیست بلکه خطی است که کمی انحنا دارد. این اختلاف نتیجهٔ مسافتی است که آسانسور در مدت کوتاهی که نور از یك طرف به طرف دیگر آن رفته، پیموده است.

ناظر داخل آسانسور که معتقد به اثر میدان گرانشی بر تمام اشیاء موجود در آسانسور است، چنین خواهد گفت: آسانسور حرکت شتابدار ندارد، بلکه تنها اثر میدان گرانشی مطرح است. شعاع نور بی‌وزن است و درنتیجه از تأثیر میدان گرانشی در امان است. اگر به خط افقی وارد شود، درست به نقطهٔ مقابل محل ورود خود می‌رسد.

از این بحث بنظر می‌رسد که انتخاب یکی از دو طرز تصور امکان‌پذیر است، زیرا پدیده برای دو ناظر یکسان نیست. اگر چیزی غیر منطقی در توضیحاتی که دادیم وجود نداشته باشد، آنگاه تمام استدلال سابق ما باطل می‌شود و ما نخواهیم توانست همهٔ پدیده‌ها را به دو راه منطقی یکی با میدان گرانش و دیگری بدون آن توصیف کنیم.

ولی خوشبختانه در استدلال ناظر درونی خطای عظیمی وجود دارد که استنتاج قبلی ما را از خطر بطلان می‌رهاند. او گفت: «شعاع نور بی‌وزن است و در نتیجه از تأثیر میدان گرانشی در امان است»؛ این ادعا صحت ندارد. شعاع نور حامل انرژی است و انرژی جرم دارد. ولی هر جرمِ ماندی از آن‌رو مجذوب میدان گرانشی می‌شود که جرمهای ماندی و گرانشی هم‌ارزند. شعاع نور در میدان گرانشی درست مانند جسمی که با سرعت نور به طور افقی پرتاب گردد، خم می‌شود. اگر ناظر درونی به درستی استدلال کرده بود و خمیدن شعاع نور را در یك میدان گرانشی به حساب آورده بود، دقیقاً همان نتایج ناظر بیرونی را بدست می‌آورد.

میدان گرانشی زمین البته آن اندازه نیرومند نیست که بتواند شعاع نور را بقدری خم کند که این اثر مستقیماً با آزمایش ثابت شود. اما آزمایشهای مشهوری که در ضمن کسوفهای خورشید انجام شده‌اند، به

طور مسلم ولی غیر مستقیم اثر میدان گرانشی را بر مسیر شعاع نور آشکار ساخته‌اند.

از این مثالها نتیجه می‌شود که به تدوین یك فیزیك نسبیتی امید زیادی می‌توان داشت. ولی برای این کار نخست باید به سراغ مسألهٔ گرانش رفت.

از مثال آسانسور به ارتباط منطقی هر یك از دو توصیف پی‌بردیم. دانستیم که هم می‌شود به فرض حرکت غیر یکنواخت متوسل شد و هم نشد. می‌توان به کمك یك میدان گرانش حرکت «مطلق» را از مثالهای خود حذف کرد. اما در این صورت دیگر در حرکت غیر یکنواخت چیز مطلقی وجود نخواهد داشت. میدان گرانشی می‌تواند حرکت مطلق را کاملاً از میان ببرد. به این ترتیب اشباح حرکت مطلق و د.م. ماندی از فیزیك اخراج می‌شوند و فیزیك نسبیتی جدید بنا می‌گردد. آزمایشهای خیالی ما نشان دادند که مسألهٔ نسبیت عمومی چگونه با مسألهٔ گرانش پیوندی نزدیك پیدا می‌کند، و چرا هم‌ارزی دو جرم ماندی و گرانشی در این ارتباط این اندازه اساسی می‌شود. واضح است که راه حل مسألهٔ گرانش در نظریهٔ نسبیت عمومی، با راه حل نیوتن فرق دارد. قوانین گرانش باید، چون همهٔ قوانین دیگر طبیعت، طوری تدوین شوند که به تمام د.م. های ممکن قابل اطلاق باشند. در صورتی که قوانین مکانیك کلاسیك، بصورتی که به وسیلهٔ نیوتن تدوین شدند، فقط در د.م. های ماندی صحت دارند.

هندسه و آزمایش

مثال بعدی ما حتی از مثال آسانسور در حال سقوط هم خیال‌انگیزتر است. باید به مسألهٔ تازه‌ای بپردازیم که عبارت از رابطهٔ میان نظریهٔ نسبیت عمومی و هندسه باشد. بحث خود را با تصور جهانی آغاز می‌کنیم که در آن فقط موجوداتی دو بعدی زندگی می‌کنند، نه چون جهان ما که مخلوقاتی سه بعدی دارد. سینما ما را به مخلوقاتی دو بعدی بر پرده‌ای دو بعدی عادت داده است. اکنون چنین تصور کنید که این موجوداتِ تصویری براستی جان داشته باشند و بتوانند فکر کنند و علوم خود را

بیافرینند. در نظر آنها فضای هندسی همان پردهٔ دو بعدی است. همان طور که برای ما تصور فضای چهاربعدی ممکن نیست، این موجودات هم نمی توانند فضای سه بعدی را، بطریقی ملموس، تصور کنند. می‌توانند خط راستی را کج کنند، و دایره را خوب می‌شناسند، ولی استعداد ساختن کره را ندارند، زیرا در این صورت باید از پردهٔ دوبعدی خود خارج شوند. ما خود نیز در وضع مشابهی هستیم: ما هم می‌توانیم خطوط و سطوح را خم کنیم، ولی تصور فضای سه‌بعدی خمیده برایمان خالی از اشکال نیست.

موجودات تصویری ما با زیستن، اندیشیدن و آزمایش‌کردن سرانجام بر دانش هندسهٔ دوبعدی اقلیدسی تسلط پیدا می‌کنند. به این ترتیب مثلاً ثابت می‌کنند که مجموع سه زاویهٔ مثلث برابر ۱۸۰ درجه است. آنها می توانند از مرکز واحد دو دایره رسم کنند که یکی کوچك و دیگری بزرگ باشد، و پی می‌برند که نسبت میان محیطهای دو دایره همان نسبت میان شعاعهای آنهاست، نتیجه‌ای که خود از مشخصات هندسه اقلیدسی بشمار می‌رود. اگر پرده بینهایت وسیع می‌بود، آنگاه چون یکی از این موجودات تصویری سفری را در امتداد خط مستقیم آغاز می‌کرد، هرگز به نقطهٔ عزیمت باز نمی‌گشت.

اکنون تصور کنید که این موجودات دو بعدی در شرایط دیگری زندگی کنند. فرضاً شخصی از خارج، یعنی از «بعد سوم»، آنها را از روی پرده بردارد و بر سطح کره‌ای قرار دهد که شعاعش بسیار بزرگ است. اگر اندازهٔ این اشباح نسبت به سطح کره بسیار کوچك باشد و وسایل ارتباط با نقاط دور در اختیار آنها نباشد و بعلاوه نتوانند از محل خود زیاد هم دور شوند، در این صورت از تغییر وضع خود آگاهی پیدا نخواهند کرد. بازهم مجموع زوایا در مثلثهای کوچك ۱۸۰ درجه است؛ نسبت بین محیطهای دو دایرهٔ متحدالمرکز کوچك همان نسبت میان شعاعهای آنها است؛ و سفری در امتداد خط مستقیم هرگز آنان را به جای اولی ایشان باز نخواهد آورد.

حالا فرض کنید که این مخلوقات تصویری با گذشت زمان دانش نظری و فنی خود را بوجود آورند و به وسایل ارتباطی دست یابند که با آنها بتوانند راههای دراز را در زمانهای کوتاه بپیمایند. آنگاه متوجه

خواهند شد که چون در خط راست حرکت کنند، سرانجام به نقطهٔ عزیمت خود باز خواهند گشت. مقصود از خط راست همان مسیر دایرهٔ عظیمه کره می‌باشد. همچنین خواهند دید که دیگر نسبت میان محیطهای دو دایرهٔ متحدالمرکز برابر با نسبت شعاعهای آن دو دایره نخواهد بود.

اگر موجودات دوبعدی ما محافظه کار باشند و هندسهٔ اقلیدسی را، در ایامی که امکان مسافرت به جاهای دور را نداشته‌اند و این هندسه با حقایق مشهود سازگار بوده است، بخوبی یاد گرفته باشند، علی‌رغم قرائنی که از اندازه‌گیریها دستگیرشان می‌شود، به هر محمل ممکنی متوسل می‌شوند تا آن را حفظ کنند. کاری می‌کنند که فیزیك بار این اختلافها را بر دوش کشد. ممکن است به جست و جوی عواملی فیزیکی چون دما برآیند، که سبب تغییر شکل خطوط و انحراف از هندسهٔ اقلیدسی می‌شود. ولی زود یا دیر متوجه خواهند شد که برای توضیح این حوادث باید راه منطقی‌تر و قانع‌کننده‌تری را اختیار کرد. سرانجام پی خواهند برد که دنیای آنها دنیائی متناهی است و اصول هندسهٔ آن غیر از اصولی است که آنان فراگرفته‌اند و متوجه خواهند شد که جهان آنان سطح دوبعدی یك کره است، هرچند که آنها از تصور چنین جهانی عاجزند. دیری نخواهد گذشت که اصول هندسی جدیدی را خواهند آموخت، که گرچه با اصول هندسهٔ اقلیدسی تفاوت دارد، ولی می‌توان آن را بطرزی مرتبط و منطقی برای جهان دوبعدی تدوین کرد. نسل جدیدی که با معرفت از هندسهٔ کره بزرگ می‌شود، هندسهٔ اقلیدسی قدیمی را پیچیده‌تر و مصنوعیتر خواهد یافت، زیرا با حقایق مشهود سازگاری ندارد.

اکنون به سراغ مخلوقات سه‌بعدی جهان خود باز می‌گردیم.

آیا منظور از اینکه فضای سه‌بعدی ما خاصیت اقلیدسی دارد چیست؟ معنی این جمله آن است که همهٔ احکامی را که در هندسهٔ اقلیدسی به طور منطقی اثبات شده‌اند می‌توان با آزمایش عملی نیز تأیید کرد. می‌توان به کمك اجسام صلب یا به وسیلهٔ اشعهٔ نور اشکالی ساخت که با اشکال انگاره‌ای هندسهٔ اقلیدسی متناظر باشد. لبهٔ یك خط‌کش یا یك شعاع نور نمایندهٔ خط مستقیم است؛ مجموع زوایای مثلثی که با میله‌های باریك صلب ساخته شده باشد ۱۸۰ درجه است؛ نسبت میان محیطهای دو دایرهٔ

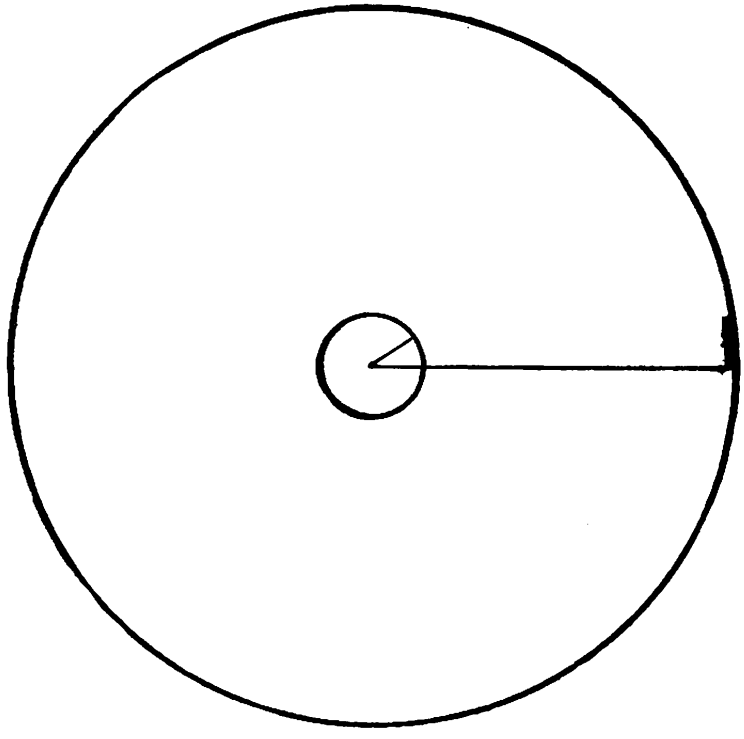
متحدالمرکز، که با سیمهائی غیر قابل انعطاف ساخته شده باشند، همان نسبت میان شعاعهای آنهاست. هندسهٔ اقلیدسی چون به این ترتیب تعبیر شود فصلی از فیزیك و فصل ساده‌ای از آن خواهد شد.

ولی می‌توان تصور کرد که اختلافاتی پیدا شود؛ مثلاً مجموع زوایای یك مثلث بزرگ، که از میله‌هائی ساخته شده که به دلایل متعدد آنها را صلب شمرده‌اند، مساوی ۱۸۰ درجه نباشد. چون تاکنون با فکر نمایش ملموس اشکال هندسهٔ اقلیدسی به وسیلهٔ اجسام صلب خو گرفته‌ایم، ممکن است به جست و جوی نیروهائی فیزیکی برآئیم که رفتار نامنتظرهٔ میله‌های صلب را سبب شده باشند آنگاه سعی خواهیم کرد که به ماهیت فیزیکی این نیروها و اثر آنها در پدیده‌های دیگر، پی‌بریم. برای نجات هندسهٔ اقلیدسی تقصیر را به گردن صلب نبودن اجسام و عدم تطابق کامل آنها با اشکال هندسهٔ اقلیدسی خواهیم انداخت. سعی خواهیم کرد نمایش بهتری از رفتار اجسام بدست آوریم که با هندسهٔ اقلیدسی سازگار باشد. اگر با همهٔ این احوال نتوانیم این هندسه را با فیزیك، به صورت منطقی و ساده‌ای ترکیب کنیم، باید از این فکر که فضای ما فضائی اقلیدسی است دست بشوئیم و با فرضهائی کلیتر در بارهٔ ماهیت هندسی فضا به جست و جوی تصویر قانع‌کننده‌تری از واقعیت برآئیم.

ضرورت این کار را می‌توان با آزمایشی خیالی آشکار کرد و نشان داد که فیزیکی براستی نسبیتی را نمی‌توان بر پایه‌های هندسهٔ اقلیدسی بنا نهاد. استدلال ما متضمن نتایجی است که قبلاً در بارهٔ د. م. ماندی و نظریهٔ نسبیت خصوصی گفته شده است.

فرض کنید بر روی قرصی دو دایره یکی خیلی کوچك و دیگری خیلی بزرگ با مرکز واحد رسم کرده باشیم. این قرص نسبت به ناظری بیرونی بسرعت دوران می‌کند. ناظری داخلی نیز بر روی قرص قرار دارد. بعلاوه فرض می‌کنیم که د. م. ناظر بیرونی یك د. م. ماندی است. ناظر بیرونی می‌تواند در د. م. ماندی خود، دو دایرهٔ کوچك و بزرگ را، که در د. م. وی به حال سکون قرار دارند ولی بر دایره‌های قرص دوار منطبق می‌باشند، رسم کند. چون د. م. ناظر بیرونی یك د. م. ماندی است، هندسهٔ اقلیدسی در آن صحت دارد و به همین جهت از نظر او نسبت

بین محیط دو دایره همان نسبت میان شعاعها خواهد بود. ولی آیا برای ناظر واقع بر روی قرص هم مسأله از همین قرار است؟ از نظر فیزیك



کلاسیك و همچنین از دیدگاه نظریهٔ نسبیت خصوصی د. م. او یك د. م. غیر مجاز است. ولی اگر قصد ما دستیابی به اشکال تازه‌ای از قوانین فیزیك باشد که در هر د. م. معتبر باشند، باید ناظر روی قرص و ناظر بیرونی را با اهمیت واحدی مورد ملاحظه قرار دهیم. ما از بیرون قرص، ناظر روی قرص را می‌بینیم که می‌کوشد محیط دایره‌ها و شعاعهای آنها را بر روی قرص دوار اندازه بگیرد. او همان خط‌کش کوچکی را بکار می‌برد که مورد استفادهٔ ناظر بیرونی است. مقصود از «همان» یا این است که حقیقتاً همان خط‌کش مدرج را ناظر بیرونی به ناظر داخلی می‌دهد، و یا اینکه ناظر داخلی یکی از دو خط‌کشی را بکار می‌برد که چون در د.م. واحدی به حال سکون باشند طولشان با هم برابر است.

ناظر داخلی به اندازه‌گیری شعاع و محیط دایرهٔ کوچك می‌پردازد. نتایج وی باید درست مطابق نتایج ناظر بیرونی باشد. محور دوران قرص از مرکز دایره‌ها می‌گذرد. قسمتهائی از قرص که نزدیك مرکز هستند سرعتهای کوچك دارند. اگر این دایره به اندازهٔ کافی کوچك باشد، می

توان با کمال اطمینان مکانیك کلاسیك را بکار برد و به نظریهٔ نسبیت خصوصی توجهی نکرد. مقصود از این گفته آن است که طول خط‌کش برای ناظران بیرونی و داخلی یکی است و نتیجهٔ این اندازه‌گیریها برای هر دو یکسان خواهد بود. سپس ناظر داخلی به اندازه‌گیری شعاع دایرهٔ بزرگ می‌پردازد. چون خط‌کش بر شعاع قرار گیرد، از دیدگاه ناظر خارجی متحرك می‌شود. مع‌ذلك این خط‌کش منقبض نمی‌شود و برای هر دو ناظر طول واحدی را خواهد داشت، زیرا امتداد حرکت عمود بر امتداد خط‌کش است. به این ترتیب نتیجهٔ سه اندازه‌گیری برای هر دو ناظر یکی می‌شود، و آن سه عبارتند از دو شعاع و محیط دایرهٔ کوچك. ولی در مورد اندازه‌گیری چهارم دیگر چنین نخواهد بود: طول محیط دایرهٔ بزرگ برای دو ناظر یکی نخواهد شد. هنگامی که خط‌کش در امتداد حرکت بر محیط دایرهٔ بزرگ قرار گیرد به نظر ناظر خارجی منقبض شده می‌نماید و طول آن از خط‌کش ساکن کوتاهتر بنظر می‌رسد. سرعت این دایره بسی بیشتر از سرعت دایرهٔ داخلی است و این انقباض را باید به حساب آورد. حال اگر نظریهٔ نسبیت خصوصی را بکار بندیم نتیجه‌ای که بدست می‌آوریم چنین خواهد بود: چون دو ناظر طول محیط دایرهٔ بزرگتر را اندازه بگیرند، نتایج متفاوتی بدست خواهند آورد. چون فقط یکی از چهار طولی که به‌وسیلهٔ ناظران اندازه‌گیری شده است برای هر دوی آنان یکی نیست، نسبت دو شعاع هم که با نسبت محیط دایره‌ها برای ناظر خارجی مساوی بود، برای ناظر داخلی مساوی نخواهد بود. معنی این سخن آن است که ناظر واقع بر قرص نمی‌تواند صحت هندسهٔ اقلیدسی را در د. م. خود تأیید کند.

پس از آنکه چنین نتیجه‌ای بدست آمد، ممکن است ناظر داخلی بگوید که مایل نیست د.م. هائی را که هندسهٔ اقلیدسی در آنها معتبر نیست، مورد توجه قرار دهد. شکست هندسهٔ اقلیدسی نتیجهٔ دوران مطلق و ناشی از این امر می‌باشد که د.م. او دستگاهی نامناسب و غیرمجاز است. ولی در واقع با چنین استدلالی، فکر اساسی نظریهٔ نسبیت عمومی را نفی می‌کند. بنابراین اگر بخواهیم حرکت مطلق را نفی کنیم و به فکر نظریهٔ نسبیت عمومی وفادار باشیم، باید فیزیك را بر بنیاد هندسه‌ای کلیتر

از هندسهٔ اقلیدسی بنا کنیم. اگر همهٔ د.م. ها مجاز باشند، هیچ راه گریزی از این پیامد وجود نخواهد داشت.

تغییراتی که از نظریهٔ نسبیت عمومی ناشی شده است، منحصر به فضای تنها نیست. در نظریهٔ نسبیت خصوصی در هر د.م. ساعتهای ساکنی داشتیم که ضرباهنگ همه یکسان بود و همه همزمان شده بودند، یعنی در آن واحد زمان واحدی را نشان می‌دادند. حال بر ساعتی که در یك د.م. غیر ماندی قرار گرفته است چه روی می‌دهد؟ بازهم آزمایش خیالی قرص چرخنده بکار خواهد آمد. ناظر بیرونی در د.م. ماندی خود ساعتهای کاملی دارد که همه به یك آهنگ کار می‌کنند و همه همزمان شده‌اند. ناظر داخلی دو ساعت از همان ساعتها را انتخاب می‌کند و یکی را بر دایرهٔ کوچك و دیگری را بر دایرهٔ بزرگ قرار می‌دهد. ساعت واقع بر دایرهٔ کوچك نسبت به ناظر خارجی سرعت ناچیزی دارد. بنابراین با اطمینان خاطر می‌توان چنین نتیجه گرفت که ضرباهنگ آن مساوی ضرباهنگ ساعتهای ناظر بیرونی خواهد بود. ولی ساعتی که بر دایرهٔ بزرگ قرار گرفته است سرعت قابل ملاحظه‌ای دارد که ضرباهنگ آن را نسبت به ساعتهای ناظر خارجی و نیز نسبت به ساعت واقع بر دایرهٔ کوچك تغییر می‌دهد. بنابراین دو ساعت دوار ضرباهنگهای متفاوتی خواهند داشت و چون نتایج حاصل از نظریهٔ نسبیت خصوصی را بکار بریم بار دیگر خواهیم دید که در د. م. دوار خود نمی‌توانیم ترتیباتی را بوجود آوریم که شبیه همان ترتیبات یك د.م. ماندی باشد.

برای اینکه روشن شود چه نتایجی از این تجربه وتجربه‌های خیالی قبلی می‌توان بدست آورد، بار دیگر گفتگوئی را نقل می‌کنیم که میان فیزیکدان قدیمی (ق) که به فیزیك کلاسیك معتقد است و فیزیکدان جدید (ج) که با نظریهٔ نسبیت عمومی آشناست، صورت گرفته است: (ق) ناظر بیرونی است که در د.م. ماندی قرار دارد. (ج) ناظری است که بر قرص دوار قرارگرفته است.

ق. در د.م. شما هندسهٔ اقلیدسی صحت ندارد. من مراقب اندازه‌گیریهای شما بودم و تصدیق می‌کنم که نسبت دو محیط در د.م. شما مساوی نسبت میان دو شعاع نیست. ولی این نشانهٔ آن است که د.م. شما

یك د.م. مجاز نیست، در صورتی‌که د.م. من خاصیت ماندی دارد و من با کمال اطمینان می‌توانم هندسهٔ اقلیدسی را در آن بکار بندم. قرص شما در حرکت مطلق است و از لحاظ فیزیك کلاسیك د.م. غیر مجازی را تشکیل می‌دهد که قوانین مکانیك در آن معتبر نیستند.

ج. من هیچ میل ندارم چیزی دربارهٔ حرکت مطلق بشنوم. د.م. من بخوبی د.م. شماست. آنچه من متوجه شدم این است‌که شما نسبت به د.م. من حرکتی دورانی دارید: هیچ‌کس نمی‌تواند مرا از این‌که تمام حرکتها را نسبت به قرص خود در نظرگیرم منع کند.

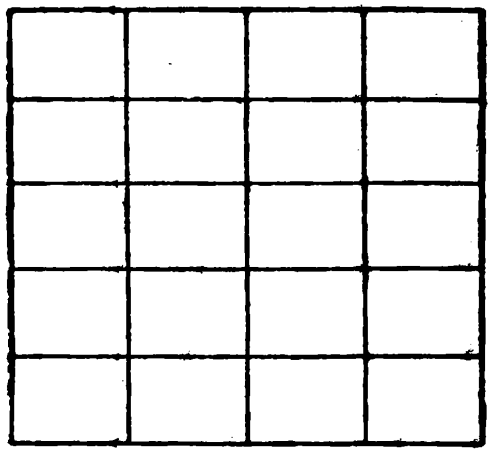
ق. آیا بر روی قرص متوجه نیروئی نشدیدکه می‌خواست شما را از مرکز به خارج براند؟ اگر قرص شما چرخ فلك دوار سریعی نبود، دو رویدادی را که مشاهده‌کردید اتفاق نمی‌افتاد. نه نیروئی را حس می‌کردید که می‌خواهد شما را به خارج براند، و نه متوجه می‌شدید که هندسهٔ اقلیدسی بر د.م. شما قابل تطبیق نیست. آیا این حقایق کافی نیست تا شما متقاعد شوید که د.م. شما در حرکت مطلق است؟

ج. به هیچ‌وجه! درست است که من به دو نکته‌ای که اشاره کردید متوجه شده‌ام، ولی میدان گرانش نیرومندی را مسؤول این هر دو حادثه می‌دانم که بر قرص من کارگر است. چون این میدان گرانش به خارج قرص متوجه است، میله‌های صلب را تغییر شکل می‌دهد و ضرباهنگ ساعتهای مرا عوض می‌کند. میدان گرانش، هندسهٔ نااقلیدسی و ساعتهائی که ضرباهنگهای متفاوت دارند، به نظر من همه در ارتباط با یکدیگرند. هر د.م.ی را که قبول کنیم باید به وجود میدان گرانش مناسبی نیز قائل شویم که بر میله‌های صلب و ساعتها تأثیر می‌کند.

ق. آیا هیچ به اشکالاتی که از نظریهٔ نسبیت عمومی شما بر می‌خیزد توجه دارید؟ با مثال غیر فیزیکی ساده‌ای نکته را روشن می‌کنیم: شهری خیالی را در امریکا تصور کنید که خیابانهائی متوازی و خیابانهای دیگری عمود برآنها داشته باشد. با این فرض قطعات زمینی که به این خیابانها محدود می‌شود همه دقیقاً به یك اندازه‌اند. به این ترتیب بسهولت می‌توان موضع هر قطعه را مشخص کرد. اما چنین کاری بدون هندسهٔ اقلیدسی امکان‌پذیر نیست. مثلاً نمی‌توان تمام سطح زمین را به صورت این شهر

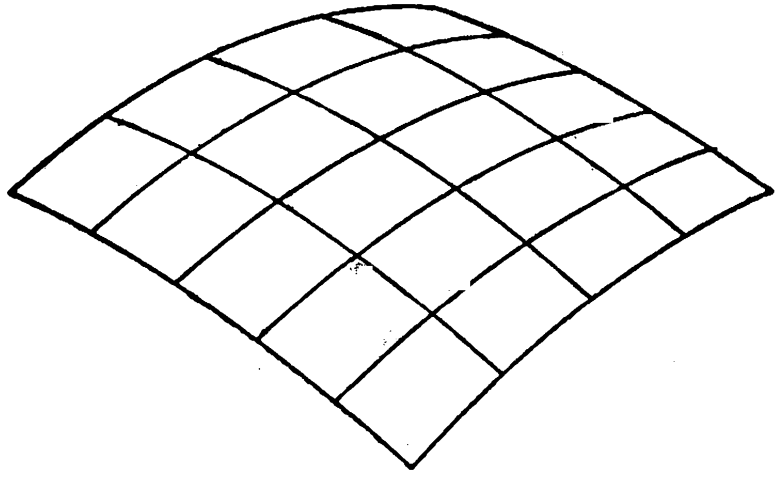
خیالی امریکائی قسمت‌بندی کرد. با یك نگاه بر سطح کره درستی گفتهٔ مرا قبول خواهید کرد. ولی قرص دوار شما را هم نمی‌توان به صورت این «شهر خیالی» تقسیم‌بندی کرد. شما مدعی هستید که خط‌کشهای شما به وسیلهٔ میدان گرانش تغییر شکل داده‌اند. همین نکته که نمی‌توانید قضیهٔ اقلیدس را در مورد تساوی نسبت محیط دایره‌ها با نسبت شعاعها تأیید کنید بوضوح نشان می‌دهد که در این کار خیابان‌بندی دیر یا زود با اشکالاتی مواجه می‌شوید و پی می‌برید که این کار بر روی قرص شما غیر ممکن است. هندسه‌ای که روی قرص دوار به‌کار شما می‌خورد به هندسهٔ سطح منحنی شباهت دارد که خیابان‌بندی فوق بر سطح وسیعی از آن غیر ممکن است. برای آن‌که مثال ما فیزیکی‌تر باشد، سطحی را تصور کنید که نقاط مختلف آن دماهای متفاوت داشته باشند. آیا می‌توانید با خط‌کش آهنی کوچك که با دما منبسط می‌شود «خیابان‌بندی عمود و متوازی» شکل زیر را بسازید؟ البته که نمی‌توانید! میدان گرانش شما همان بلائی را به سر خط‌کشهای شما می‌آورد که دما بر خط‌کش آهنی کوچك من می‌آورد.

ج. آنچه گفتید مرا نمی‌ترساند. این خیابان‌بندی عمود و متوازی فقط برای تعیین مکان نقاط می‌باشد و ساعت برای ترتیب رویدادها. لازم نیست که این شهر امریکائی باشد؛ بسهولت می‌توان آن را یك شهر قدیمی اروپائی تصور کرد. فرض کنید که شهر شما از مادهٔ پلاستیکی ساخته شده و تغییر شکل یافته باشد. در این صورت هم می‌توانم قطعات را نمره‌



گذاری کنم و خیابانهای عمود بر یکدیگر را بشناسم؛ هرچند که دیگر

خیابانها خطوط مستقیم نیستند و به فاصلهٔ مساوی از یکدیگر قرار ندارند. به همین نحو بر سطح زمین طول و عرض جغرافیائی مکان نقاط مختلف را مشخص می‌کنند، ولو دیگر خیابان بندی از نوع «شهر امریکائی» نباشد.



ق. ولی هنوز هم اشکالی به نظر من می‌رسد. شما مجبور هستید که «ساختمان شهر اروپائی» خود را مورد استفاده قرار دهید. قبول دارم که می‌توانید نقاط و رویدادها را تحت نظم در آورید، ولی این نوع خیابان بندی مسألهٔ اندازه‌گیری فاصله را مخدوش می‌سازد. این خیابان‌بندی خواص متری فضا را به شما نمی‌دهد، در حالی که خیابان‌بندی من می‌داد. مثالی می‌آورم. من در شهر امریکائی خود می‌دانم که برای پیمودن ده قطعه باید مسافتی دو برابر طول پنج قطعه را طی کنم. چون می‌دانم که طول همهٔ قطعات با یکدیگر مساوی هستند، و بلافاصله می‌توانم فواصل را تعیین کنم.

ج. این صحیح است، من در «شهر اروپائی» خود نمی‌توانم از روی عددِ قطعاتِ تغییر شکل یافته، بلافاصله فواصل را تعیین کنم. من باید مطلب دیگری را هم بدانم و آن عبارت از خواص هندسی سطحی است که در اختیارم قرار دارد. همه می‌دانند که فاصلهٔ میان صفر درجه تا ده درجهٔ طول جغرافیائی روی خط استوا همان فاصلهٔ صفر درجه تا ده درجهٔ طول جغرافیائی در نزدیك قطب شمال نیست. ولی هر دریانوردی می‌داند که فاصلهٔ چنین نقاطی را در روی زمین چگونه بدست آورد. زیرا او خواص هندسی سطح زمین را می‌داند. او این فاصله را به کمك محاسباتی که مبتنی

بر مثلثات کروی است بدست می‌آورد و یا به طور تجربی این کار را می کند یعنی با کشتی خود این دو فاصله را با سرعت واحد می‌پیماید. در مثالی که شما زدید مسأله بسیار پیش‌پاافتاده شده است، زیرا فاصلهٔ خیابانهای عمود یا متوازی، از یکدیگر یکسان می‌باشد. در مورد زمین مسأله پیچیده‌تر است. نصف‌النهارهای صفر درجه و ده درجه در قطبهای زمین با یکدیگر تلاقی می‌کنند و در استوا دورترین فاصله را از یکدیگر دارند. همین طور در مورد خیابان‌بندی «شهر اروپائی» من نیز برای تعیین فواصل به اطلاعات بیشتری احتیاج دارم تا شما از خیابان‌بندی شهر امریکائی خود. برای دست یافتن به این معلومات اضافی باید به مطالعهٔ خواص هندسی پیوستار خود در هر حالت خاص بپردازم.

ق. ولی همهٔ مطالب نشان می‌دهند که جانشین ساختن چوب بست پیچیده‌ای که شما ناگزیر از آن هستید به جای ساختمان سادهٔ هندسهٔ اقلیدسی چقدر نامناسب است. آیا حقیقتاً این کار ضرورتی هم دارد؟

ج. به نظر من اگر خواسته باشیم که قوانین فیزیك ما به هر دستگاهی قابل انطباق باشد و د. م. اسرارآمیز ماندی هم در کار نباشد، این کار ضرورت دارد. من اعتراف می‌کنم که ابزار ریاضی من پیچیده‌تر از مال شماست، ولی در عوض فرضهای فیزیکی من ساده‌تر و طبیعی‌تر هستند.

بحث ما محدود به پیوستار دوبعدی بود. نکتهٔ مورد بحث در نظریهٔ نسبیت عمومی از این هم پیچیده‌تر است، زیرا در آنجا سر و کار ما به جای پیوستار دوبعدی با پیوستار چهاربعدی فضا-زمان است. اما رئوس اندیشه‌های اصلی همان است که در پیوستار دوبعدی بدان اشاره شد. در نظریهٔ نسبیت عمومی نمی‌توان چوب بست مکانیکی میله‌های عمود و متوازی و ساعتهای همزمان شدهٔ نظریهٔ نسبیت خصوصی را بکار برد. در یك د. م. دلبخواه نمی‌توان مکان و زمان یك رویداد را به کمك میله‌های صلب و ساعتهای هماهنگ و همزمان، بصورتی که در د.م. خصوصی معمول بود، تعیین کرد. هنوز هم می‌توان رویدادها را با میله‌های نااقلیدسی و ساعتهای غیر هماهنگ مرتب کرد. ولی اندازه‌گیریهائی عملی را که مستلزم میله‌های صلب و ساعتهای همزمان شده است، تنها در د.م. های ماندیِ موضعی می‌توان انجام داد. در چنین

دستگاه مختصاتی تمامی نظریهٔ نسبیت خصوصی معتبر است. ولی د. م. «خوب» ما صرفاً موضعی است و خاصیت ماندی آن از لحاظ فضا و زمان محدود می‌باشد. ما در د. م. دلخواه خود هم می‌توانیم نتایج اندازه‌گیریهائی را که در د. م. ماندی موضعی انجام می‌شود، پیش‌بینی کنیم. ولی برای این کار لازم است ماهیت هندسی پیوستار فضا-زمانی خود را بشناسیم.

آزمایشهای خیالی ما فقط سرشت کلی و عمومی فیزیك نسبیتی جدید را آشکار می‌سازند، و نشان می‌دهند که مسألهٔ بنیادی ما مسألهٔ گرانش است؛ و نیز نشان می‌دهند که نظریهٔ نسبیت عمومی به تعمیم دیگری در مفاهیم «زمان» و «فضا» منجر می‌شود.

نسبیت عمومی و اثبات آن

نظریهٔ نسبیت عمومی می‌کوشد که قوانین فیزیکی را طوری تنظیم کند که در همهٔ د.م.ها صحت داشته باشند. مسألهٔ اساسی این نظریه مسألهٔ گرانش است. از زمان نیوتن به این طرف، این نظریه نخستین اقدام جدی در تدوین مجدد قانون گرانش است. آیا حقیقتاً این کار ضرورت هم دارد؟ ما سابقاً از دستاوردهای نظریهٔ نیوتن و از پیشرفتهای عظیم نجوم بر پایهٔ قانون گرانش او، مطلع شدیم. قانون نیوتن هنوز هم اساس همهٔ محاسبات نجومی است. ولی در عین حال بر اعتراضهائی که بر این نظریهٔ قدیمی وارد می‌آمد نیز واقف شدیم. قانون نیوتن فقط در د. م. های ماندیِ فیزیك کلاسیك صحت دارد، و یادآور می‌شویم که د. م. ماندی دستگاهی بود که قوانین مکانیك در آن معتبر بودند. نیروی مؤثر میان دو جرم به فاصلهٔ آنها از یکدیگر بستگی دارد. چنانکه می‌دانیم رابطهٔ میان نیرو و فاصله، نسبت به تبدیل کلاسیك ناوردا است. ولی این قانون در چهارچوب نظریهٔ نسبیت خصوصی نمی‌گنجد. فاصله نسبت به تبدیل لورنتس ناوردا نیست. سعی شد که قانون گرانش چنان تعمیم یابد که با نظریهٔ نسبیت خصوصی سازگار باشد، یا به عبارت دیگر چنان تدوین شود که نسبت به تبدیل لورنتس، و نه تبدیل کلاسیك، ناوردا بماند؛ یعنی همان کاری که با موفقیت در مورد قوانین حرکت

صورت گرفت. ولی قانون گرانش نیوتن لجوجانه با تلاشهائی که برای ساده کردن و گنجاندن آن در طرح کلی نظریهٔ نسبیت خصوصی انجام گرفت، مخالفت کرد. حتی اگر در این کار هم موفقیت حاصل می‌شد برداشتن گام دیگری ضرورت داشت، و آن گذر از د.م. ماندی نظریهٔ نسبیت خصوصی به د.م. دلبخواه نظریهٔ نسبیت عمومی بود. از طرف دیگر آزمایشهای خیالی آسانسور ساقط شونده بوضوح روشن ساختند که هیچ امید موفقیتی برای تدوین نظریهٔ نسبیت عمومی پیش از حل مسألهٔ گرانش نمی‌توان داشت. از این بحث دیده می‌شود که چرا حل مسألهٔ گرانش در فیزیك کلاسیك با حل آن در نسبیت عمومی فرق دارد.

ما کوشیده‌ایم راهی را که به نظریهٔ نسبیت عمومی منتهی می‌شود نشان دهیم، و دلایلی را که به تغییر نگرشهای قدیمی مجبورمان می‌کند، آشکار سازیم، وبدون آن‌که وارد ساختمان صوری نظریهٔ تازه شویم، بعضی از جنبه‌های نظریهٔ گرانش جدید را مشخص می‌سازیم و آنها را با نظریهٔ قدیمی مقایسه می‌کنیم. با ملاحظهٔ آنچه تاکنون گفته شده است درك ماهیت اختلافها کار دشواری نیست.

(۱) معادلات گرانشی نظریهٔ نسبیت عمومی را می‌توان در هر د.م. بکار برد. انتخاب هر د.م. خاص برای هر حالت مخصوص امری است که تنها به سهولت کار مربوط می‌شود؛ از لحاظ نظری همهٔ د.م. ها مجاز هستند. چون از گرانش صرف نظر کنیم خود بخود به د.م. ماندی نظریهٔ نسبیت خصوصی باز می‌گردیم.

(۲) قانون گرانش نیوتن حرکت جسم را در این نقطه و در این لحظه به اثر جسمی ارتباط می‌دهد که در همین زمان در فاصلهٔ دور قرار دارد. همین قانون است که الگوئی برای نگرش مکانیکی بشمار می‌رود. ولی نگرش مکانیکی منقرض شد. با معادلات ماکسول به الگوی جدیدی برای قوانین طبیعت دست یافتیم. قوانین ماکسول قوانینی ساختاری هستند. این قوانین رویدادهائی را که اکنون و در این نقطه واقع می‌شوند به رویدادهائی که کمی بعد در مجاورت این نقطه اتفاق خواهند افتاد، ارتباط می‌دهند. این قوانین تغییرات میدان الکترو مغناطیسی را توصیف می‌کنند. معادلات گرانش جدید نیز معادلاتی ساختاری هستند و بیان کنندهٔ تغییرات

میدان گرانشی می‌باشند. به یك تعبیر می‌توان گفت که گذار از قانون گرانش نیوتن به نسبیت عمومی تا اندازه‌ای به گذار از نظریهٔ شاره‌های الکتریکی و قانون کولن به نظریهٔ ماکسول شباهت دارد.

(۳) جهان ما اقلیدسی نیست. ماهیت هندسی جهان را جرمها و سرعتها تعیین می‌کنند. معادلات گرانشی نظریهٔ نسبیت عمومی می‌کوشند تا خواص هندسی جهان ما را آشکار سازند.

حال فرض کنید که در اجرای منطقی برنامه نظریهٔ نسبیت عمومی موفق شده باشیم. آیا خطر آن نمی‌رود که با نظر پردازی خود از واقعیت دور شده باشیم؟ می‌دانیم که نظریهٔ قدیمی بخوبی مشاهدات نجومی را توضیح می‌کند. آیا ممکن است میان نظریهٔ جدید و مشاهده پلی زد؟ هر تحقیق فکری باید مورد آزمایش قرار گیرد و هر نتیجه‌ای، هر اندازه هم که جذاب باشد، چون با واقعیت وفق نکند باید طرد شود. نظریهٔ جدید از بوتهٔ امتحان چگونه بیرون می‌آید؟ این سؤال را با یك جمله می‌توان پاسخ داد: نظریهٔ قدیمی حالت حدی خاصی از نظریهٔ جدید است. اگر نیروهای گرانشی بالنسبه ضعیف باشند، قانون قدیمی نیوتن حد تقریبی خوبی از قوانین جدید خواهد بود. بنابراین تمام مشاهداتی که با نظریهٔ کلاسیك سازگارند، نظریهٔ نسبیت عمومی را نیز تأیید می‌کنند. نظریهٔ کهنه از مرحلهٔ عالیتر نظریهٔ نو نتیجه می‌شود.

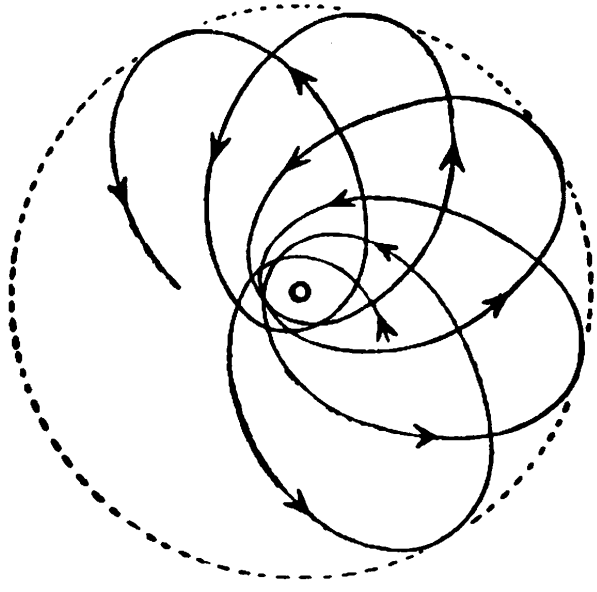
حتی اگر هیچ مشاهدهٔ دیگری را نتوان به سود نظریهٔ جدید ذکر کرد، و اگر تبیینی که این نظریه از رویدادها می‌کند به همان خوبی نظریهٔ قدیمی باشد، در صورتی که بنا بر انتخاب آزاد یکی از دو نظریه گذاشته شود، باید نظریهٔ جدید را انتخاب کرد. معادلات نظریهٔ جدید ازلحاظ صوری پیچیده‌تر می‌باشند، ولی فرضهای مقدماتی آن ازدیدگاه اصول بنیادی بسیار ساده‌ترند: دوشبح ترسناك زمان مطلق ودستگاه ماندی ناپدید شده‌اند. برگهٔ هم‌ارزی جرمهای ماندی و گرانشی کان لم یکن شمرده نشده است. دیگر به فرضی دربارهٔ بستگی نیروهای گرانشی به فاصله نیاز نیست. معادلات گرانشی به صورت قوانینی ساختاری درآمده‌اند، و این همان شکل مطلوب تمام قوانین فیزیکی پس از پیشرفتهای بزرگ نظریهٔ میدان می‌باشد.

از قوانین گرانشی جدید می‌توان پاره‌ای نتایج تازه استخراج کرد که

در قانون گرانش نیوتن مندرج نیستند. یکی از این نتایج خم شدن اشعهٔ نور در میدان گرانشی است که قبلاً به آن اشاره شد. اکنون به دو پیامد دیگر اشاره می‌شود.

اگر قوانین قدیمی، در حالتی که نیروهای جاذبه ضعیف باشد، از قوانین جدید بدست می‌آیند، باید انحراف از قانون گرانش نیوتن را موقعی انتظار داشت که نیروهای گرانشی نسبتاً قوی باشند. منظومهٔ شمسی را در نظر بگیرید. سیارات، که زمین هم یکی از آنهاست، در مدارهائی بیضی شکل به دور خورشید می‌گردند. عطارد نزدیکترین سیاره به خورشید است. جاذبهٔ میان خورشید و عطارد از جاذبهٔ میان خورشید و هر سیارهٔ دیگری شدیدتر است. اگر امیدی به یافتن انحرافی در قانون نیوتن باشد، در مورد همین سیارهٔ عطارد است. مطابق نظریهٔ کلاسیك مسیر عطارد نیز از همان نوع مسیر سیارات دیگر می‌باشد، با این تفاوت که به خورشید نزدیکتر است.

بنا بر نظریهٔ نسبیت عمومی حرکت این سیاره باید کمی متفاوت



باشد. نه تنها عطارد باید به دور خورشید حرکت کند، بلکه بیضی این سیاره نیز باید نسبت به د.م. ی که به خورشید متصل است، بکندی دوران کند. همین دوران مدار بیضی شکل عطارد اثر جدیدی است که با نظریهٔ نسبیت عمومی تعبیر می‌شود. نظریهٔ جدید می‌تواند مقدار این حرکت

را هم تعیین کند. بیضی مدار عطارد هر سه میلیون سال یك دور تمام می چرخد! ملاحظه می‌کنید که این اثر چقدر کوچك و ناچیز است، و اگر در مورد سیارات دورتر به جست و جوی آن بر می‌خاستیم، هیچ امیدی به اخذ نتیجه نمی‌رفت.

بر انحراف حرکت سیارهٔ عطارد از شکل بیضوی، پیش از تدوین نظریهٔ نسبیت عمومی واقف بودند، و توضیحی برای آن نداشتند. از طرف دیگر نظریهٔ نسبیت عمومی بدون توجه به این مسألهٔ خاص پدید آمد. بعدها نتایج مربوط به دوران مدار بیضی شکل سیاره به دور خورشید، از معادلات گرانشی جدید بدست آمد. در مورد عطارد، نظریهٔ نسبیت عمومی انحراف از قانون گرانش نیوتن را با کمال موفقیت توضیح داد.

نتیجهٔ دیگری نیز از نظریهٔ نسبیت عمومی بدست می‌آید که آزمایش آن را تأیید می‌کند: قبلاً دیدیم که ضرباهنگ ساعتی که بر دایرهٔ بزرگ قرص دوار گذاشته شود با ضرباهنگ ساعت واقع بر دایرهٔ کوچك فرق می کند. به همین ترتیب از نظریهٔ نسبیت نتیجه می‌شود که اگر ساعتی در کرهٔ خورشید باشد، ضرباهنگ آن با ساعت واقع بر کرهٔ زمین اختلاف دارد، زیرا اثر میدان گرانش در خورشید بسیار نیرومندتر از اثر آن بر روی زمین است.

در صفحهٔ ۹۱ دیدیم که سدیم فروزان نور یکنواخت زرد رنگی گسیل می‌کند که طول موج معینی دارد. در این اشعه اتم سدیم یکی از ضرباهنگهای خود را آشکار می‌سازد. می‌توان گفت که اتم، ساعتی را نمایش می‌دهد و طول موج گسیل شده یکی از ضرباهنگهای این ساعت است. بنا بر نظریهٔ نسبیت عمومی طول موج گسیل شده از اتم سدیمی که بر روی کرهٔ خورشید قرار دارد باید اندکی بزرگتر از طول موجی باشد که اتم سدیم بر روی زمین گسیل می‌کند.

مسألهٔ آزمون نتایج نظریهٔ نسبیت عمومی از راه مشاهده، مسألهٔ بسیار ظریفی است و هنوز به طور قطع و یقین حل و فصل نشده است. از آنجا که در این کتاب روش ما پرداختن به اندیشه‌های اصلی بوده است، در این موضوع بیش از این پیش نمی‌رویم و فقط اشاره می‌کنیم که تاکنون حکم آزمایش مؤید نتایج بدست آمدهٔ از نظریهٔ نسبیت عمومی بوده است.

میدان و ماده

دانستیم که چگونه و چرا نگرش مکانیکی دستخوش انقراض گردید. غیر ممکن بود که بتوان همهٔ پدیده‌ها را با فرض نیروهای ساده‌ای که میان ذرات خلل‌ناپذیر عمل می‌کنند، توضیح داد. تلاشهای نخستین ما برای گذشتن از نگرش مکانیکی و توسل به مفاهیم میدان نتایج بسیار درخشانی را در پدیده‌های الکترومغناطیسی به بار آورد. قوانین ساختاری میدان الکترومغناطیسی تدوین شد. این قوانین رویدادهائی را که در فضا و زمان خیلی نزدیك به یکدیگر بودند به هم مربوط می‌ساخت. این قوانین در چهارچوب نظریهٔ نسبیت خصوصی می‌گنجیدند، زیرا نسبت به تبدیل لورنتس ناوردا بودند. بعد از آن نظریهٔ نسبیت عمومی، قوانین گرانش را تدوین کرد. این قوانین نیز قوانینی ساختاری هستند؛ قوانینی ساختاری که میدان گرانشی میان ذرات مادی را توصیف می‌کنند. تعمیم قوانین ماکسول نیز به قسمی که آنها هم چون قوانین گرانش نظریهٔ نسبیت عمومی بر هر د.م. قابل انطباق باشد کار آسانی بود.

اکنون دو واقعیت در اختیار ماست: ماده و میدان. شك نیست که در زمان حاضر نمی‌توان مانند فیزیکدانان اوایل قرن نوزدهم تصور کرد که تمام علم فیزیك بر مفهوم ماده مبتنی است. فعلاً ما هر دو مفهوم را می‌پذیریم. آیا می‌توان ماده و میدان را دو واقعیت متمایز و متفاوت شمرد؟ هرگاه ذرهٔ کوچکی از ماده را در نظر بگیریم، ممکن است به طریق ساده نگرانه‌ای سطح معینی را برای آن تصور کنیم که ذره به آن سطح ختم می‌شود و میدان از آن آغاز می‌گردد. با این طرز تصور ناحیه‌ای که در آن قوانین میدان معتبر است از ناحیه‌ای که ماده در آن حضور دارد به شکل ناگهانی جدا می‌شود. ولی ملاکهای فیزیکی تمیز ماده از میدان کدامند؟ پیش از آن‌که با نظریهٔ نسبیت آشنا شویم، ممکن بود به این پرسش چنین پاسخ دهیم: ماده دارای جرم است و میدان جرمی ندارد؛ میدان نمایندهٔ انرژی و ماده نمایندهٔ جرم است. ولی با اطلاعات تازه‌ای که بدست آورده‌ایم دیگر چنین جوابی را کافی نمی‌دانیم. از نظریهٔ نسبیت یاد گرفته‌ایم که ماده نمایندهٔ مخزن عظیم انرژی است و انرژی به نوبهٔ خود نمایندهٔ ماده است. از این قرار نمی‌توان تمایزی کیفی میان ماده و میدان

قائل شد، زیرا تفاوت میان ماده و انرژی تفاوتی کیفی نیست. درست است که عظیمترین بخش انرژی در ماده تمرکز دارد، ولی میدانی که ذره را احاطه می‌کند نیز نمایندهٔ انرژی است، گو این‌که مقدار آن بسیار کمتر است. بنابراین می‌توان گفت: ماده در جائی قرار دارد که تمرکز انرژی زیاد است، و میدان در جائی که غلظت انرژی کم است. اگر چنین باشد تفاوت میان ماده و میدان کمی خواهد بود نه کیفی. ماده و میدان را دو کیفیت کاملاً متفاوت شمردن بی‌معنی است. نمی‌توان سطح مشخصی را تصور کرد که ماده و میدان را بوضوح از هم جدا کند.

همین اشکال در مورد بار الکتریکی و میدان آن نیز پیش می‌آید. نمی‌توان هیچ ملاك کیفی واضحی برای تشخیص ماده از میدان و بار از میدان بدست داد.

قوانین ساختاری ما یعنی قوانین ماکسول و قوانین گرانش، در نقاطی که تمرکز انرژی زیاد است یا به تعبیر دیگر در نقاطی که چشمه‌های میدان، یعنی بار الکتریکی و ماده، وجود دارد، فرو می‌مانند. آیا نمی‌شد که در معادلات خود تغییر مختصری می‌دادیم که در همه‌جا و حتی در نقاطی که غلظت انرژی خیلی زیاد است نیز معتبر باشند؟

فیزیك را نمی‌توان بتنهائی بر پایهٔ ماده بنا نهاد. اما تفکیك ماده از میدان نیز پس از پی‌بردن به هم‌ارزی جرم و انرژی چیزی ساختگی و ناروشن است. آیا نمی‌توان از مفهوم ماده چشم پوشید و فیزیکی ساخت که صرفاً بر مفهوم میدان مبتنی باشد؟ آنچه به عنوان ماده بر روی حواس ما تأثیر می‌کند در واقع همان انرژی است که شدیداً در ناحیهٔ کوچکی از فضا متمرکز شده است. می‌توان ماده را همچون ناحیه‌ای از فضا شمرد که در آن میدان فوق‌العاده نیرومند است. به این ترتیب زمینهٔ فلسفی تازه‌ای ایجاد می‌گردد. هدف نهائی آن توضیح همهٔ رویدادهای طبیعی به وسیلهٔ قوانینی ساختاری خواهد بود که برای همیشه و در همه‌جا معتبر باشند. به این تعبیر سنگی که رها می‌گردد، میدان متغیری است که در آن حالتهائی که به بزرگترین شدت میدان در فضا مربوط می‌شوند با سرعت سنگ حرکت می‌کنند. در این فیزیكِ جدید جائی برای هم میدان و هم ماده وجود ندارد، و حقیقت واقع همان میدان است و بس. این نگرش جدید از دستاورهای

بزرگ فیزیک میدان است و از موفقیتهائی نشأت گرفته است که با بیان قوانین الکتریسیته، مغناطیس و گرانش به صورت قوانینی ساختاری و بالاخره از هم‌ارزی جرم و انرژی حاصل آمده‌اند. مسألهٔ آخر تغییر قوانین میدان است بنحوی که در نقاطی هم که تمرکز انرژی فوق‌العاده زیاد است، صحت داشته باشند.

در اجرای این برنامهٔ اخیر هنوز به توفیق قانع‌کننده و منسجمی دست نیافته‌ایم. تشخیص این که آیا انجام این برنامه امکان‌پذیر است یا نه، امری است که به آینده تعلق دارد. در حال حاضر هنوز باید در تمام ساختمانهای نظری خود دو حقیقت را فرض کنیم: میدان و ماده.

مسائل بنیادی دیگری هنوز در برابر ما است. می‌دانیم که تمام انواع ماده فقط از چند نوع ذره ساخته شده‌اند. آیا چگونه اشکال مختلف ماده از این ذرات بنیادی ساخته شده‌اند؟ کنش متقابل این ذرات بنیادی با میدان چگونه است؟ برای یافتن جواب این پرسشها بوده است که افکار جدیدی به فیزیک راه یافته‌اند، افکاری که بنیاد نظریهٔ کوانتومی هستند.

خلاصهٔ آنچه گفته شد:

میدان، مفهوم جدیدی است که در فیزیک ظاهر می‌شود، مفهومی که از زمان نیوتن به این طرف مهمترین ابداع است. نیروی تخیل علمی نیرومندی لازم بود تا پی برده شود که بار الکتریکی و ذرهٔ مادی عناصر اساسی توصیف پدیده‌های فیزیکی نیستند، بلکه میدانی که فضای میان بارها و ذرات را آکنده است عنصر اصلی است. میدان مفهومی بسیار بارآور است. معادلات ماکسول، که هم ساختمان میدان الکترومغناطیسی را بیان می‌کند و هم پدیده‌های الکتریکی و نور را توضیح می‌دهد، از آن نتیجه می‌شوند.

خاستگاه نظریهٔ نسبیت نیز مسائل میدان است. تناقضات و ناسازگاریهای نظریهٔ قدیمی ما را مجبور می‌کند که برای پیوستار فضا-زمان، که صحنهٔ همهٔ رویدادهای جهان فیزیکی است، خواص جدیدی قائل شویم.

نظریهٔ نسبیت در ضمن تحول خود از دو مرحله می‌گذرد. مرحلهٔ نخستین

آن به نظریهٔ نسبیت خصوصی منتهی می‌شود که تنها بر دستگاههای مختصات ماندی قابل تطبیق است، یعنی بر دستگاههائی که در آنها قانون ماند نیوتن صحت دارد. نظریهٔ نسبیت خصوصی بر دو فرض بنیادی مبتنی است: یکی این‌که قوانین فیزیکی در تمام دستگاههای مختصاتی که نسبت به یکدیگر حرکت یکنواخت دارند، یکسان است؛ و دیگر این‌که سرعت نور همیشه مقدار ثابتی دارد. از این دو فرض، که کاملاً با آزمایش تأیید شده‌اند، خواص میله‌ها و ساعتهای متحرك و بستگی تغییرات طول و ضرباهنگ آنها بسرعت نتیجه می‌شود. نظریهٔ نسبیت قوانین مکانیك را تغییر می‌دهد. وقتی که سرعت ذرات متحرك به سرعت نور نزدیك شود قوانین اعتبار خود را از دست می‌دهند. آزمایش، قوانین جدیدی را که نظریهٔ نسبیت خصوصی برای جسم متحرك وضع کرده است کاملاً تأیید می‌کند. پیامد دیگری که از نظریهٔ نسبیت (خصوصی) بدست می‌آید ارتباط جرم و انرژی است. جرم انرژی است و انرژی جرم دارد. دو قانون بقای ماده و انرژی در قانون واحدی ادغام می‌شوند که قانون بقای جرم-انرژی نام دارد.

نظریهٔ نسبیت عمومی تحلیل عمیقتری از پیوستار فضا-زمان ارائه می دهد. اعتبار این نظریه دیگر منحصر به دستگاههای مختصات ماندی نیست. نظریهٔ نسبیت عمومی به مسألهٔ گرانش می‌پردازد و قوانین ساختاری جدیدی را برای میدان گرانشی تدوین می‌کند. این نظریه ما را مجبور می‌سازد که به تحلیل نقش هندسه در توصیف جهان فیزیکی بپردازیم. تساوی جرم گرانشی و جرم ماندی، که در مکانیك رسمی امری صرفاً تصادفی است، در این نظریه عنصری اساسی محسوب می‌شود. نتایج آزمایشی نظریهٔ نسبیت عمومی تفاوت اندکی با نتایج مکانیك کلاسیك پیدا می‌کنند. در مواردی که مقایسه امکان‌پذیر است، نتایج این نظریه از بوتهٔ آزمایش سربلند بیرون می‌آیند؛ ولی قوت این نظریه به لحاظ ساخت منطقی و سادگی فرضهای بنیادی آن است.

نظریهٔ نسبیت بر اهمیت مفهوم میدان در فیزیك تأکید می‌ورزد. ولی هنوز به تدوین یك فیزیك میدانی ناب توفیق پیدا نکرده‌ایم، و فعلاً باید وجود میدان و ماده، هر دو را بپذیریم.

۴

کوانتوم

پیوستگی ـ ناپیوستگی ـ کوانتومهای بنیادی ماده و الکتریسیته ـ کوانتومهای نور ـ طیف نور ـ امواج ماده ـ امواج احتمال ـ فیزیك و واقعیت.

پیوستگی ـ ناپیوستگی

نقشهٔ شهر نیویورك و حومهٔ آن را در برابر خود گسترده‌ایم و از خود می‌پرسیم: با قطار به کدام یك از نقاط این نقشه می‌توان رفت؟ با مراجعه به جدول برنامهٔ راه‌آهن، این نقاط را روی نقشه مشخص می‌کنیم. اکنون سؤال را تغییر می‌دهیم و می‌پرسیم با اتومبیل به چه نقطه‌هائی می توان رفت؟ اگر روی نقشه خطوطی رسم کنیم که نمایندهٔ راههائی باشند که از نیویورك خارج می‌شود، بدیهی است که با اتومبیل به همهٔ نقاطی که بر این خطوط واقعند می‌توان رفت. در هر دو مورد مجموعه‌ای از نقاط بدست می‌آید. در حالت اول این نقطه‌ها از یکدیگر مجزی هستند و نمایندهٔ ایستگاههای راه‌آهن می‌باشند، و در حالت دوم نقاطی هستند واقع بر خطوطی که نمایش دهندهٔ جاده‌های مختلف می‌باشند. پرسش دوم به فاصلهٔ هر یك از این نقاط تا نیویورك ـ یا به بیان دقیقتر تا نقطهٔ معینی در نیویورك ـ مربوط می‌شود. در حالت اول، اعداد معینی با نقاط روی نقشه متناظرند. این اعداد شلنگ‌انداز و به‌طور نامنظم تغییر می‌کنند، ولی تغییراتشان همیشه متناهی است. فاصلهٔ نیویورك تا نقاط مختلفی که با قطار به آنها می‌توان رفت، بطرزی ناپیوسته تغییر می‌کند. فاصلهٔ نقاطی را که با اتومبیل می‌توان به آنها رفت، به هر اندازهٔ کوچك که خواسته باشیم می‌توان تغییر داد. این فاصله‌ها بطرزی پیوسته تغییر می‌کنند. تغییرات فاصله را در مورد اتومبیل می‌توان، هراندازه خواسته باشیم، کوچك کرد.

در صورتی که در مورد قطار چنین نیست.

بازده یك معدن زغال سنگ را به طور پیوسته می‌توان تغییر داد. مقدار زغال تولید شده را می‌توان به دلخواه و به هر میزان اندکی هم که خواسته شود، زیاد یا کم کرد. ولی عدهٔ کارگرانی را که در معدن کار می کنند فقط به طور ناپیوسته می‌توان تغییر داد. چقدر بی‌معنی و مضحك است که گفته شود: «از دیروز شمارهٔ کارگران ۳٫۷۸۳ نفر افزایش یافته است!»

اگر از کسی دربارهٔ موجودی جیبش سؤال شود، جوابی که خواهد داد عددی است که فقط دو رقم اعشار دارد. مبلغ پول منحصراً به صورت جهشی ناپیوسته تغییر می‌کند. در ایران کوچکترین پول ممکن، یا به بیان ما «کوانتوم بنیادی» پول ایران، یك ریال است. کوانتوم بنیادی پول انگلیس یك فارثینك است که معادل نصف کوانتوم بنیادی پول ایران است. در اینجا سر و کار ما با دو کوانتوم می‌باشد که مقدار آنها را با یکدیگر می‌توان سنجید. نسبت ارزشهای این دو کوانتوم معنی مشخصی دارد، زیرا یکی از آنها دو برابر دیگری می‌ارزد.

می‌توان گفت: بعضی از کمیات به طور پیوسته تغییر می‌کنند، و برخی دیگر بطرزی ناپیوسته، با قدمهائی که نمی‌توان آن را کوچکتر کرد. این قدمهای غیر قابل تقسیم، کوانتومهای بنیادی کمیت مورد نظر نامیده می‌شوند. مقدار زیادی شن را می‌توان وزن کرد و جرم آن را پیوسته دانست، گواین‌که ساختمان دانه‌ای شن اظهرمن‌الشمس است. اگر اتفاقاً شن خیلی قیمت پیدا کند و برای توزین آن ترازوهای خیلی حساس بکار رود، باید متوجه این نکته بود که تغییرات جرم همیشه مضاربی از جرم یك دانه شن است. جرم این دانهٔ شن کوانتوم بنیادی شن بشمار می‌رود. ازین مثال دیده می‌شود که چگونه با زیاد کردن دقت در اندازه‌گیری می‌توان به ماهیت ناپیوستهٔ کمیتی پی‌برد که قبلاً پیوسته شمرده می‌شد.

اگر خواسته باشیم فکر اصلی نظریهٔ کوانتوم را در یك جمله خلاصه کنیم، چنین می گوئیم: باید فرض شود که بعضی از کمیتهای فیزیکی، که تا کنون پیوسته شمرده می‌شدند، متشکل از کوانتومهای بنیادی هستند.

حوزهٔ حقایقی که با نظریهٔ کوانتومی سر و کار دارند، فوق‌العاده وسیع است. این حقایق را فنون بسیار پیشرفتهٔ آزمایشهای جدید آشکار ساخته‌اند. چون در اینجا، نه می‌توان آزمایشهای اساسی را نشان داد و نه آنها را تشریح کرد، ناگزیر در بیشتر موارد نتایج را نقل می‌کنیم و تعبداً می‌پذیریم. منظور ما فقط آن است که اندیشه‌های اصلی را روشن سازیم.

کوانتومهای بنیادی ماده و الکتریسیته

تصویری که نظریهٔ جنبشی از ماده رسم می‌کند آن است که تمام عناصر از ملکولها ساخته شده‌اند. ساده‌ترین حالت را که مربوط به سبکترین عنصر، یعنی ئیدرژن، می‌باشد در نظر گیرید. در صفحهٔ ۶۰ دیدیم که چگونه با بررسی حرکت براونی توانسته‌اند جرم ملکول ئیدرژن را تعیین کنند که عبارت است از:

$$۳۳ooooooooooooooooooooooooo\text{ر}o \text{ گرم}$$

معنی این اندازه‌گیری آن است که جرم ناپیوسته است. تغییر جرمِ مقداری ئیدرژن، فقط به صورت مضاربی از مقدار بسیار کوچکی انجام می‌پذیرد که همان جرم ملکول ئیدرژن باشد. اما فرایندهای شیمیائی نشان می‌دهند که ملکول ئیدرژن را می‌توان دو پاره کرد، یا به عبارت دیگر ملکول ئیدرژن از دو اتم تشکیل شده است. پس در فرایندهای شیمیائی به جای ملکول، اتم کوانتومِ بنیادی بشمار می‌رود. چون عدد بالا را بر دو تقسیم کنیم، جرم اتم ئیدرژن بدست می‌آید که تقریباً برابر است با:

$$۱۷ooooooooooooooooooooooooo\text{ر}o \text{ گرم}$$

جرم کمیتی ناپیوسته است. ولی هنگام توزین، از این رهگذر دچار دردسر نمی‌شویم. حتی با حساسترین ترازوها هم هرگز نمی‌توان به‌دقتی دست یافت که این ناپیوستگی در تغییرات جرم را ردیابی کند.

به مطلبی که همه می‌دانند رجوع می‌کنیم. سیمی به یك چشمهٔ جریان متصل است؛ جریان در سیم از پتانسیل بیشتر به طرف پتانسیل کمتر حرکت می‌کند. بخاطر داریم که نظریهٔ سادهٔ جریان شاره‌های الکتریکی در سیم بسیاری از حقایق آزمایشی را توضیح می‌کرد و نیز بخاطر داریم (صفحهٔ ۷۳) که تصمیم‌گیری در این باره که آیا شارهٔ مثبت

از پتانسیل بیشتر به پتانسیل کمتر می‌رود یا شارهٔ منفی از پتانسیل کم به پتانسیل زیاد صرفاً جنبهٔ قراردادی داشت. فعلاً از همهٔ پیشرفتهائی که از مفاهیم میدانی حاصل شده‌اند چشم می‌پوشیم. حتی هنگامی هم که در قالب سادهٔ شارهٔ الکتریکی فکر می‌کنیم، هنوز مسائلی وجود دارد که باید حل و فصل شود. همان طور که از کلمهٔ «شاره» برمی‌آید، در گذشته الکتریسیته را کمیتی پیوسته می‌شمردند. بنا بر نگرشهای قدیمی مقدار بار الکتریکی را می‌شد به هر اندازهٔ دلخواه تغییر داد. نیازی به فرض کوانتومهای بنیادی الکتریسیته نبود. دستاوردهای نظریهٔ جنبشی ماده، ما را به طرح سؤال جدیدی برانگیخت. آیا کوانتومهای بنیادی شاره‌های الکتریکی هم وجود دارد؟ سؤال دیگری هم که باید جواب گفته شود این است: آیا جریان الکتریسیته، جاری شدن شارهٔ مثبت است یا شارهٔ منفی یا هر دو؟

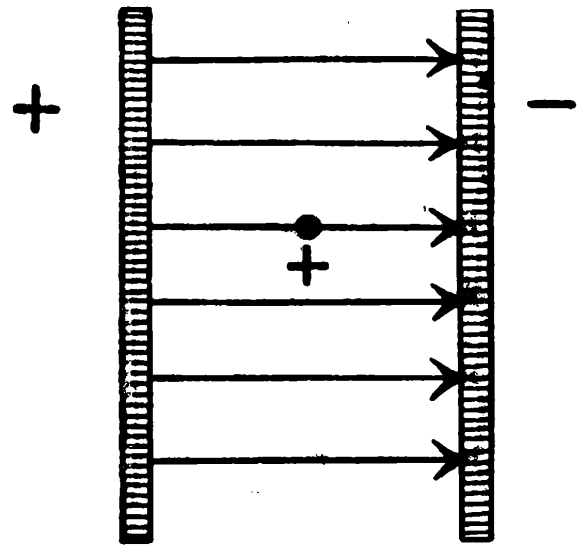
اساس همهٔ آزمایشهائی که می‌توانند به این پرسشها پاسخ دهند، آن است که شارهٔ الکتریکی را از سیم جدا کنند، وآن را در فضای تهی حرکت دهند و از هم‌نشینی با ماده محروم سازند، آنگاه به تحقیق در خواص آن بپردازند. در چنین شرایطی است که این خواص در کمال وضوح آشکار می‌شوند. آزمایشهای بسیاری از این نوع در اواخر قرن نوزدهم انجام شد. پیش از آن که به توضیح اندیشهٔ اساسی این آزمایشها، دست‌کم در یك مورد، بپردازیم، نتایج را ذکر می‌کنیم. شاره‌ای که در سیم جاری می‌شود شارهٔ منفی است، و بنا بر این از پتانسیل کمتر به پتانسیل بیشتر می‌رود. اگر این نتیجه را از ابتدا، وقتی که برای نخستین‌بار نظریهٔ شاره‌های الکتریکی شکل گرفت، می‌دانستیم کلمات را عوض می‌کردیم و الکتریسیتهٔ میلهٔ شیشه‌ای را منفی و از آن میلهٔ کائوچوئی را مثبت می‌نامیدیم. در این صورت مناسبتر آن بود که شارهٔ جاری را شارهٔ مثبت بدانیم. چون حدس اول ما برخطا بود، اکنون ناچاریم با این قرارداد نامناسب بسازیم. مسألهٔ مهم دیگر این است که آیا ساختمان این شارهٔ منفی «دانه‌ای» است، و آیا این شاره مرکب از کوانتومهای الکتریکی است یا نه. باز هم آزمایشهای متعدد و مستقل از یکدیگر نشان داده‌اند که در وجود کوانتومهای بنیادی این الکتریسیتهٔ منفی شکی نیست. همان

طور که ساحل دریا از دانه‌های شن و خانه از آجر ساخته شده است، شارهٔ الکتریکی منفی نیز متشکل از دانه‌های الکتریکی است. این نتایج را تقریباً چهل سال پیش ج. ج. تامسن[1]، در کمال وضوح، تدوین کرد. کوانتومهای بنیادی الکتریسیتهٔ منفی را الکترون نام داده‌اند. بدین ترتیب هر بار الکتریکی منفی از عدهٔ زیادی بارهای بنیادی منفی به صورت الکترون تشکیل شده است. بار منفی نیز، مانند جرم جسم، به طور ناپیوسته تغییر می‌کند. اما این بار الکتریکی بنیادی به اندازه‌ای کوچك است که در بسیاری از پژوهشها ممکن و حتی مناسب است که بار را کمیتی پیوسته شمرد. به این ترتیب نظریه‌های اتمی و الکترونی کمیتهای فیزیکی ناپیوسته را، که تغییراتشان به صورت جهشی است، وارد علم می‌کنند.

فرض شود که دو صفحهٔ فلز موازی در جائی قرار گرفته باشند که هوا کاملاً از آنجا خارج شده باشد. یکی از این دو صفحه بار مثبت دارد و دیگری بار منفی. چون بار آزمایشی را میان این دو صفحه جای دهیم، صفحهٔ مثبت آن را دفع و صفحهٔ منفی آن را جذب می‌کند. بنا بر این، امتداد خطوط نیروی میدان الکتریکی از صفحهٔ مثبت به صفحهٔ منفی خواهد بود. نیروی وارد بر بار آزمایشی منفی، خلاف امتداد بالا را خواهد داشت. هرگاه صفحات به اندازهٔ کافی وسیع باشند، تراکم خطوط نیرو میان آن دو در همه‌جا به یك اندازه خواهد بود؛ و این که بار آزمایشی در کجا قرار گرفته است، اهمیتی نخواهد داشت، و نیرو، در نتیجهٔ چگالی خطوط نیرو، در همه‌جا یکسان خواهد بود. الکترونهائی که میان دو صفحه قرار گیرند، مانند دانه‌های باران در میدان گرانشی زمین، به موازات یکدیگر از صفحهٔ منفی به طرف صفحهٔ مثبت حرکت می‌کنند. آزمایشهای متعدد معروفی وجود دارد که در آنها آبشاری از الکترونها را به چنین میدانی می‌آورند، و این میدان همهٔ آنها را در یك امتداد قرار می‌دهد. یکی از ساده‌ترین آنها، این است که سیم گرم شده‌ای را میان دو صفحهٔ باردار قرار دهند. از چنین سیم گرم شده‌ای الکترونهائی گسیل می‌شود که به توسط خطوط نیروی میدان خارجی امتداد خاصی پیدا می‌کنند. به عنوان

1. J.J. Thomson

مثال لامپهای رادیو، که همه با آن آشنائی دارند، بر همین اصل مبتنی است.



آزمایشهای هوشمندانهٔ فراوانی در مورد تابه‌های الکترونی انجام گرفته و در تغییر مسیر آنها در میدانهای الکتریکی و مغناطیسی گوناگون تحقیق شده است. حتی توانسته‌اند یك دانه الکترون را مجزا کنند و بار بنیادی و جرم یعنی مقاومت ماندی آن را در مقابل نیروی خارجی اندازه بگیرند. ما در اینجا فقط مقدار جرم الکترون را ذکر می‌کنیم: جرم الکترون تقریباً دو هزارم مرتبه کوچکتر از جرم اتم ئیدرژن است. به این ترتیب جرم اتم ئیدرژن که خود بسیار کوچك است، در برابر جرم الکترون، بسیار بزرگ بشمار می‌رود. از دیدگاه نظریهٔ میدان تمام جرم و به عبارت دیگر تمام انرژی یك الکترون، انرژی میدان آن است. بخش عمدهٔ شدت این میدان در داخل کرهٔ بسیار کوچکی جای دارد، و چون از «مرکز» الکترون دور شویم این میدان ضعیف می‌شود.

پیشتر گفتیم که اتم هر عنصر، کوچکترین کوانتوم بنیادی آن می باشد. دیر زمانی این گفته مورد قبول بود، ولی اکنون دیگر کسی به آن عقیده ندارد. علم، نگرشی تازه پرداخته است که محدودیتهای نگرش قدیمی را آشکار می‌سازد. کمتر گفته‌ای را در فیزیك می‌توان یافت که بیش از بیان ساختمان پیچیدهٔ اتم، متکی بر واقعیات بوده باشد. نخست معلوم شد که الکترون، کوانتوم بنیادی شارهٔ الکتریکی منفی، یکی از اجزای تشکیل دهندهٔ اتم یعنی یکی از مصالح ساختمانیی است که ماده را می‌سازند. مثالی

که پیشتر از آن یاد کردیم، یعنی سیم گرمی که الکترون گسیل می‌کند، یکی از آزمایشهای متعددی است که برای استخراج این ذرات از ماده بکار می‌رود. این نتیجه، که ارتباط نزدیك میان مسألهٔ ساختمان ماده و ساختمان الکتریسیته را آشکار می‌سازد، بدون شك پیامدی از آزمایشهای متعدد و مستقل از یکدیگر است.

بیرون کشیدن چند الکترون از اتمی که در آن قرار دارند، نسبتاً آسان است. این کار را می‌توان، چنانکه در مثال سیم گرم شده دیدیم، با گرما انجام داد یا از راههای دیگری چون بمباران کردن اتمها با الکترونهای دیگر.

فرض کنیم که سیم فلزیِ نازك گداخته‌ای را در ئیدرژن رقیق فرو بریم. این سیم به گسیل الکترون در تمام جهات خواهد پرداخت. این الکترونها در یك میدان الکتریکی خارجی سرعت معینی بدست می‌آورند. سرعت الکترون، مانند سرعت سنگی که در میدان گرانشی زمین سقوط می کند، زیاد می‌شود. به این ترتیب تابه‌ای از الکترونها بدست می‌آید که با سرعت معین در امتداد معین حرکت می‌کنند. امروزه به کمك میدانهای بسیار قوی توانسته‌اند به الکترونها سرعتی در حدود سرعت نور بدهند. آیا هنگامی که تابه‌ای الکترونی به ملکولهای ئیدرژن رقیق برخورد می کنند چه اتفاقی می‌افتد؟ ضربهٔ الکترونی که به اندازهٔ کافی سریع باشد، نه فقط ملکول ئیدرژن را به دو اتم می‌شکافد، بلکه الکترونی را نیز از یکی از این دو اتم بیرون می‌کشد.

این واقعیت را می‌پذیریم که الکترونها اجزای سازندهٔ ماده‌اند. در این صورت، دیگر اتمی که یك الکترون از آن بیرون کشیده شده نمی‌تواند از لحاظ الکتریسیته خنثی باشد. اگر قبلاً خنثی بود، حال دیگر نمی‌تواند چنین باشد، زیرا یك بار بنیادی از دست داده است، و بنا بر این قسمت باقیمانده ناچار بار مثبت خواهد داشت. بعلاوه چون جرم الکترون بسیار کمتر از جرم سبکترین اتم است، با اطمینان می‌توان نتیجه گرفت که بخش عمدهٔ جرم اتم در الکترونهای آن نیست، بلکه در ذرات بنیادی باقیمانده می‌باشد که بسیار سنگینتر از الکترونها هستند. این قسمت سنگین اتم را هستهٔ آن می‌نامیم.

در فیزیك آزمایشی جدید راههائی برای شکستن هستهٔ اتم و یا تبدیل اتمهای یك عنصر به اتمهای عنصر دیگر، و یا بیرون کشیدن ذرات بنیادی سنگین از هستهٔ اتم، بوجود آمده است. این فصل از فیزیك که «فیزیك هسته‌ای» نام دارد و راذرفورد[1] سهم زیادی در آن داشته است، از نظر آزمایشی بسیار جالب توجه می‌باشد؛ ولی نظریه‌ای که اندیشه‌های بنیادی آن ساده باشد و حقایق متنوع و پردامنهٔ فیزیك هسته‌ای را به هم مربوط سازد، هنوز در دست نیست. چون در این کتاب توجه ما به جانب افکار عام فیزیکی است، با وجود اهمیت زیادی که این فصل در فیزیك جدید دارد، ناچار از آن چشم می‌پوشیم.

کوانتومهای نور

دیواری را در نظر بگیرید که در کنار دریا ساخته شده باشد. امواج دریا لاینقطع بر دیوار می‌کوبند و قسمتی از سطح آن را می‌شویند و با خود به دریا می‌برند و راه را برای امواج جدید باز می‌کنند. جرم دیوار نقصان می‌پذیرد. می‌توان این سؤال را مطرح کرد که مثلاً در مدت یك‌سال چه اندازه از آن کاسته می‌شود. اکنون جریان دیگری را تصور می‌کنیم. می‌خواهیم ازجرم دیوار به همان نسبت سابق، منتها ازراهی دیگر، بکاهیم. دیوار را مورد اصابت گلوله قرار می‌دهیم. دیوار در نقاطی که گلوله به آن می‌خورد ترك برمی‌دارد. از جرم دیوار کاسته می‌شود و می‌توان تصور کرد که میزان کاهش در هر دو حال یکسان باشد. مع‌ذلك از شکل ظاهری دیوار بخوبی معلوم می‌شود که امواج پیوستهٔ دریا در کار بوده‌اند یا رگبار ناپیوستهٔ گلوله‌ها. برای فهم پدیده‌ای که در زیر به آن خواهیم پرداخت، خوب است که تفاوت تأثیر موج دریا و رگبار گلوله‌ها را بخاطر بسپاریم.

قبلاً گفتیم که سیم گرم شده از خود الکترون گسیل می‌کند. اکنون راه دیگری را برای بیرون کشیدن الکترون از فلزات شرح می‌دهیم. نور همگنی چون نور بنفش که طول موج معینی دارد؛ بر سطح فلزی تابانده می‌شود. این نور الکترونهائی را از فلز بیرون می‌کشد. الکترونها از فلز

1. Rutherford

کنده می‌شوند و رگباری از آنها ایجاد می‌گردد. سرعت آنها در امتداد معین زیاد می‌شود. از دیدگاه اصل انرژی می‌توان گفت: قسمتی از انرژی نور به انرژی جنبشی الکترونهای کنده شده تبدیل می‌گردد. با روشهای آزمایشی جدید می‌توان گلوله‌های الکترونی را ثبت کرد و سرعت آنها و در نتیجه انرژی آنها را بدست آورد. بیرون کشیدن الکترونها از طریق تاباندن نور بر فلز را اثر فوتوالکتریك می‌خوانند.

نقطهٔ شروع، اثر نوری همگن با شدت معین بود. همان طور که در همهٔ آزمایشها معمول است، باید تغییری ایجاد کرد و دید که آیا این تغییر تأثیری در نتیجهٔ مشاهده شده دارد.

نخست شدت نور بنفش همگن را که بر صفحهٔ فلزی می‌تابد، تغییر می‌دهیم و بستگی انرژی الکترونهای گسیل شده را به شدت نور تحقیق می‌کنیم. قبل از توسل به آزمایش، سعی می‌کنیم از راه استدلال جواب را بدست آوریم. می‌توان چنین استدلال کرد: در اثر فوتوالکتریك قسمتی از انرژی تشعشعی به انرژی حرکت الکترونها تبدیل می‌شود. حال اگر نوری به همان طول موج، ولی از چشمه‌ای نیرومندتر، بر فلز بتابانیم انرژی الکترونهای گسیل شده باید بیشتر شود زیرا که انرژی تشعشعی فزونی یافته است. توقع داریم که چون شدت نور زیادتر شود سرعت الکترونها نیز بیشتر گردد. ولی بار دیگر آزمایش پیش‌بینی ما را نقض می‌کند. یك‌بار دیگر متوجه می‌شویم که قوانین طبیعی بصورتی نیستند که ما می‌خواهیم. اینك با یکی از آزمایشهائی روبرو شده‌ایم که با نقض پیش‌بینیهای ما، نظریه‌ای را که اساس این پیش‌بینیهاست باطل می‌کند. نتیجهٔ عملی این آزمایش، از دیدگاه نظریهٔ موجی حیرت‌آور است. همهٔ الکترونهائی که مشاهده می‌شوند دارای سرعت واحد و در نتیجه انرژی واحد هستند که با افزایش شدت نور تغییر نمی‌کند.

این نتیجهٔ تجربی را نمی‌توان با قبول نظریهٔ موجی پیش‌بینی کرد. بار دیگر از تعارض میان نظریهٔ کهنه و آزمایش، نظریهٔ جدیدی پدید می‌آید.

اکنون دانسته و از روی عمد، نسبت به نظریهٔ موجی رعایت انصاف را نمی‌کنیم؛ دستاوردهای بزرگ این نظریه و توضیح درخشان آن را در

مورد خم شدن نور در اطراف موانع کوچك، فراموش می‌کنیم. حال که توجه ما به اثر فوتوالکتریك معطوف است، از این نظریه می‌خواهیم که توضیحی بسنده از این پدیده ارائه دهد. بدیهی است که از نظریهٔ موجی نمی‌توان عدم بستگی انرژی الکترونها را به شدت نوری که آنها را از صفحهٔ فلزی کنده است، استنتاج کرد. به همین جهت نظریهٔ دیگری را می آزمائیم. بخاطر داریم که نظریهٔ ذره‌ای نیوتن، که بسیاری از پدیده‌های مشاهده شده را بخوبی توجیه می‌کرد، در مورد خمیدن نور، که اکنون بعمد از آن چشم پوشیده‌ایم، دچار شکست شد. در زمان نیوتن مفهوم انرژی وجود نداشت. به‌نظر او دانه‌های نور بی‌وزن بودند، و هر رنگی خصوصیات جوهری خود را داشت. بعدها که مفهوم انرژی بوجود آمد و معلوم شد که نور حامل انرژی است، هیچ‌کس به این فکر نیفتاد که این مفهوم جدید را بر نظریهٔ ذره‌ای نور منطبق سازد. نظریهٔ نیوتن محکوم به مرگ شد، و تا قرنی که در آن هستیم هیچ‌کس مجدانه در صدد احیای آن برنیامد.

اگر بخواهیم فکر اصلی نظریهٔ نیوتن را نگاه داریم، باید فرض کنیم که نور همگن مرکب از دانه‌های انرژی است و به جای ذرات قدیمی باید کوانتومهای نور را که **فوتون** نامیده می‌شوند قرارداد. فوتونها در واقع تکه‌های کوچك انرژی هستند که در خلأ با سرعت نور حرکت می کنند. تجدید حیات نظریهٔ نیوتن در این قالب تازه به نظریهٔ کوانتومی نور می‌انجامد. نه تنها ماده و بار الکتریکی، بلکه انرژی تشعشعی نیز ساختمانی دانه‌ای دارد، یعنی از کوانتومهای نور ساخته شده است. علاوه بر کوانتومهای ماده و الکتریسیته، کوانتومهای انرژی نیز وجود دارند.

فکر کوانتوم انرژی را نخستین‌بار در آغاز این قرن، پلانك مطرح ساخت تا با آن آثاری بسیار پیچیده‌تر از اثر فوتوالکتریك را توضیح دهد. ولی پدیدهٔ فوتوالکتریك، با کمال وضوح و سادگی، ضرورت تغییر مفاهیم قدیمی را نشان می‌دهد.

کاملاً واضح است که این نظریهٔ کوانتومی نور، اثر فوتوالکتریك را توضیح می کند. هنگامی که رگباری از فوتونها بر ورقهٔ فلزی می‌بارد، کنشی که میان اشعه وماده روی می‌دهد عبارت از تعداد زیادی رویداد منفرد است

که در هرکدام فوتونی به‌اتم برخورد می‌کند و الکترونی از آن بیرون می کشد. این رویدادهای منفرد، همه مانند هم هستند. الکترونهای کنده شده نیز انرژی واحدی دارند. با این تعبیر، ازدیاد شدت نور به معنی افزایش تعداد فوتونهای تابنده است. در این صورت عدهٔ الکترونهائی که از ورقهٔ فلزی کنده شده، بیشتر می‌شود. ولی انرژی هر الکترون همان است که بود. به این ترتیب دیده می‌شود که این نظریه کاملاً با مشاهده مطابقت دارد. حال اگر تابهٔ همگنی از رنگ دیگر، مثلاً نور سرخ به جای نور بنفش، بر سطح فلز بتابد چه روی می‌دهد؟ بهتر آن است که جواب این سؤال را به آزمایش واگذار کنیم.

انرژی الکترونهای کنده شده را باید اندازه گرفت و نتیجه را با انرژی الکترونهائی که نور بنفش بیرون می‌کشد، مقایسه کرد. انرژی الکترونی که با نور سرخ کنده می‌شود، کوچکتر از انرژی الکترونی است که نور بنفش بیرون کشیده است. معنی این حرف آن است که انرژی کوانتومهای نور برای رنگهای مختلف متفاوت می‌باشد. انرژی فوتون مربوط به رنگ سرخ نصف انرژی فوتون مربوط به رنگ بنفش است. به بیان دقیقتر، انرژی کوانتوم نور رنگ همگن به نسبت افزایش طول موج کم می‌شود. میان کوانتومهای انرژی و کوانتومهای الکتریسیته یک اختلاف اساسی وجود دارد. کوانتومهای نور برای طول موجهای مختلف، متفاوتند؛ در صورتی که کوانتومهای الکتریسیته همیشه از یک‌گونه‌اند. اگر بخواهیم یکی از تشبیهات قبلی را بکار بریم، باید کوانتومهای نور را با کوانتومهای پولی مقایسه کنیم که از کشوری به کشور دیگر فرق می‌کنند.

باز هم نظریهٔ موجی نور را کنار می‌گذاریم و فرض می‌کنیم که نور ساختمانی دانه‌ای دارد و از کوانتومهای نور، یعنی از فوتونهائی تشکیل شده است که با سرعت نور در فضا حرکت می‌کنند. به این ترتیب در تصور جدید، نور رگباری از فوتونهاست و فوتون، کوانتوم بنیادی انرژی نورانی است. ولی اگر از نظریهٔ موجی چشم بپوشیم، مفهوم طول موج نیز از بین می‌رود. چه مفهوم تازه‌ای جای آن را می‌گیرد؟ انرژی کوانتومهای نور جانشین طول موج می‌شود. عباراتی را که با واژگان

نظریهٔ موجی بیان می‌شود می‌توان به عباراتی در نظریهٔ کوانتومی تشعشع، ترجمه کرد. مثلاً:

واژگان نظریهٔ موجی	واژگان نظریهٔ کوانتومی
نور همگن طول موج مشخصی دارد.	نور همگن از فوتونهائی تشکیل می‌شود که انرژی معینی دارند.
طول موج کنارهٔ سرخ طیف دو برابر طول موج کنارهٔ بنفش آن است.	انرژی فوتون کنارهٔ سرخ طیف نصف انرژی فوتون کنارهٔ بنفش آن است.

جریان امر را می‌توان به شکل زیر خلاصه کرد:

پدیده‌هائی وجود دارند که توضیح آنها با نظریهٔ کوانتومی امکان‌پذیر است ولی با نظریهٔ موجی ممکن نیست: اثر فوتوالکتریک یکی از اینها است، و نظایر دیگر نیز برای آن می‌توان یافت. پدیده‌های دیگری وجود دارند که با نظریهٔ موجی قابل توضیحند، ولی نظریهٔ کوانتومی از تعلیل آنها عاجز می‌ماند. خم شدن نور در اطراف موانع، نمونهٔ کاملی از این پدیده‌ها بشمار می‌رود. بالاخره پدیده‌هائی هم، چون انتشار مستقیم‌الخط نور، وجود دارند که هم با نظریهٔ موجی و هم با نظریهٔ کوانتومی قابل توضیحند.

خوب، نور واقعاً چیست؟ موج است یا رگباری از فوتونها؟ قبلاً نیز چنین سؤالی را طرح کردیم و پرسیدیم: آیا نور موج است یا رگباری از ذره‌های نور؟ در آنجا قرائن زیادی برای طرد نظریهٔ ذره‌ای و قبول نظریهٔ موجی، که همهٔ پدیده‌ها را توضیح می‌داد، در دست بود که نظریهٔ ذره‌ای را رد می‌کرد. ولی اکنون مسأله بسیار پیچیده‌تر شده است. ظاهراً امکان توضیح پدیده‌های نوری، با قبول یکی از دو زبانِ ممکن، وجود دارد. چنین بنظر می‌رسد که گاهی باید یکی را بکار برد، و زمانی نظریهٔ دیگر را. مواردی هم وجود دارد که از هر دو می‌توان استفاده کرد. براستی دچار اشکال جدیدی شده‌ایم. دو تصویر متضاد از واقعیت در برابر ماست که هیچ یك بتنهائی نمی‌تواند پدیده‌های نوری را توضیح دهد؛ در صورتی که از دو نظریه توأماً این کار ساخته است!

چگونه ممکن است این دو تصویر را با یکدیگر ترکیب کرد؟ چگونه می‌توان به این هر دو خصیصهٔ کاملاً مخالف نور پی‌برد؟ حل و فصل این اشکال جدید کار آسانی نیست. بار دیگر با یك مسألهٔ بنیادی روبرو شده‌ایم.

موقتاً نظریهٔ فوتونی نور را می‌پذیریم و سعی می‌کنیم حقایقی را که با نظریهٔ موجی توضیح می‌شدند به کمك آن درك کنیم. از این راه بر اشکالاتی تأکید می‌ورزیم که این دو نظریه را در نگاه اول آشتی‌ناپذیر می نمایند. یادآور می‌شویم: چون تابه‌ای از نور همگن از سوراخ سوزنی بگذرد، حلقه‌های روشن و تاریك ایجاد می‌شود (صفحهٔ ۱۰۵). چگونه می توان این پدیده را به کمك نظریهٔ کوانتومی، بدون توجه به نظریهٔ موجی، فهمید؟ یك فوتون از سوراخ می گذرد. انتظار می‌رود که اگر فوتون عبور کند پرده روشن شود و اگر عبور نکند تاریك بماند. ولی چیزی که ما می بینیم حلقه‌های روشن و تاریك است. ممکن است که مطلب را چنین حل و فصل کرد: شاید میان مبدأ سوراخ و فوتون کنش متقابلی وجود دارد که موجب پدیدار شدن حلقه‌های پراش می گردد. البته این جمله را بدشواری می‌توان توضیح مسأله بشمارآورد. حداکثرآن را می‌توان برنامه‌ای برای توضیح این مطلب دانست و امید بست که در آینده بتوان از راه کنش متقابل میان ماده و فوتون به درك پدیدهٔ پراش نایل آمد.

ولی این امید ضعیف نیز با بحث قبلی ما در بارهٔ آزمایشی دیگر نقش برآب می‌شود. دو سوراخ سوزن را در نظر می گیریم. نور همگن از آن دو می گذرد. نوارهای روشن و تاریك بر روی پرده تشکیل می گردد. این اثر را چگونه می‌توان از دیدگاه نظریهٔ کوانتومی تفسیر کرد؟ ممکن است چنین استدلال کرد: یك فوتون از هر دو سوراخ می گذرد. اگر فوتون نور همگن نمایندهٔ ذرهٔ بنیادی نور باشد، تصور تقسیم آن به دو قسمت و عبور آن از دو سوراخ کار دشواری است. از این گذشته حاصل کار باید مثل حالت قبل حلقه‌های روشن و تاریك باشد نه نوارهای روشن و تاریك. پس چه می‌شود که وجود سوراخ دیگر نتیجهٔ کار را این اندازه تغییر می‌دهد؟ ظاهراً سوراخی که فوتون از آن نمی گذرد، اگر چه ممکن است فاصلهٔ آن تا سوراخ دیگر زیاد باشد، سبب می‌شود که حلقه‌ها به نوارهای روشن و تاریك تغییر شکل دهند! اگر فوتون رفتاری مانند ذره در فیزیك کلاسیك

داشته باشد، باید فقط از یکی از سوراخها عبور کند. ولی در این حالت درك پدیدهٔ پراش ناممکن است.

علم ما را مجبور می‌سازد که اندیشه‌های نو و نظریات جدید خلق کنیم. کار این افکار و نظریات جدید آن است که دیوار تناقضاتی را که غالباً راه پیشرفت علم را سد می‌کنند بشکافند. تمام افکار اساسی علم زاییدهٔ نزاع پرتحرکی هستند که میان واقعیت و کوششهای ما برای فهم آن جریان دارد. اکنون نیز مسأله‌ای پیش آمده است که برای حل آن به اصولی تازه نیاز است. پیش از آن که به شرح تلاشهای فیزیك جدید برای توضیح تضاد میان نظریهٔ کوانتومی و نظریهٔ موجی بپردازیم، نشان می دهیم که عین همین دشواری در مواردی هم‌که سر و کار ما به‌جای کوانتوم نور با کوانتوم ماده است، بروز می‌کند.

طیف نور

می‌دانیم که ماده فقط از چند نوع ذره ساخته شده است. الکترون نخستین ذرهٔ بنیادی ماده بود که کشف شد. ولی الکترون، کوانتوم بنیادی الکتریسیتهٔ منفی نیز هست. بعلاوه آموختیم که در نتیجهٔ وجود پاره‌ای پدیده‌ها، ناگزیر از این فرض هستیم که نور متشکل از کوانتومهای بنیادی نور است و کوانتومهای مربوط به طول موجهای متفاوت، با هم فرق می کنند. قبل از ارائهٔ این مطلب، باید به شرح پدیده‌هائی پرداخت که در آنها ماده و تشعشع هر دو نقش اساسی دارند.

خورشید اشعه‌ای را گسیل می‌کند که با منشور می‌توان آن را به اجزای تشکیل دهنده‌اش تجزیه کرد. به این ترتیب است که طیف پیوستهٔ آفتاب بدست می‌آید. در این طیف همهٔ طول موجهائی که در حد فاصل دو کرانهٔ آن هستند، وجود دارد. به ذکر مثالی می‌پردازیم: قبلاً گفته شد که سدیم فروزان نور همگنی از خود گسیل می‌کند، نوری که تکفام یعنی دارای یك طول موج واحد است. هرگاه سدیم فروزان در مقابل منشور گذاشته شود فقط یك خط زرد مشاهده می‌گردد. بطور کلی چون جسم تشعشع کننده‌ای در برابر منشور گذاشته شود، نوری که از آن خارج می‌گردد به اجزای تشکیل دهندهٔ خود، تجزیه می‌شود.

تخلیهٔ الکتریسیته در لولهٔ محتوی گاز، چشمهٔ نوری را بوجود می‌آورد و طیفی آشکار می‌گردد که مشخص کنندهٔ جسم گسیلنده است. چنین چراغی در برابر طیف‌نما گذاشته می‌شود. طیف‌نما دستگاهی است که کار منشور را می‌کند، منتها با دقت و حساسیت بیشتر. طیف‌نما نور را به اجزای آن می‌شکند، یعنی آن را تجزیه می‌کند. نور خورشید، در طیف‌نما به طیفی پیوسته تجزیه می‌شود که همهٔ طول موجها در آن وجود دارند. اگر چشمهٔ نور، گازی باشد که از آن جریان برق می‌گذرد، طیف مشخصات دیگری خواهد داشت. به‌جای طیف پیوسته و چند رنگ آفتاب، نوارهای درخشان جدا از همی دیده می‌شوند که بر زمینهٔ تاریك پیوسته‌ای قرار دارند. هر نوار، در صورتی که خیلی باریك باشد، به یك رنگ معین و به تعبیر نظریهٔ موجی به یك طول موج معین مربوط است. مثلاً اگر بیست خط در طیف دیده شود، هر یك از آن خطوط را با عدد معینی مشخص می‌کنند که معرف طول موج مربوط به آن خط است. بخارهای عناصر مختلف هرکدام مجموعهٔ خطوط طیفی مخصوص به خود را دارند، و در نتیجه مجموعهٔ اعدادی که طول موجهای طیف گسیل شده را مشخص می‌کنند، در آنها متفاوت است. همان‌طورکه اثر انگشت هیچ دو فردی مثل هم نیست، مجموعهٔ نوارهای طیف هیچ دو عنصری هم مانند هم نیست. بتدریج که فهرستی از این خطوط به وسیلهٔ فیزیکدانان ترتیب داده شد، وجود قوانینی هم آشکار گردید، و معلوم شد که می‌توان فرمول ریاضی ساده‌ای را جانشین ستونهائی از اعداد ظاهراً بی‌ارتباطی کرد که معرف طول موجهای مختلف بودند.

آنچه را که گفته شد می‌توان به زبان و اصطلاحات فوتونی ترجمه کرد. این نوارها با طول موجهای معین یا به عبارت دیگر با فوتونهائی که هرکدام انرژی معینی دارند، متناظر هستند. بنا بر این گازهای درخشنده، فوتونهائی با انواع انرژیهای ممکن از خود گسیل نمی‌کنند، بلکه هر گاز فوتونهائی را گسیل می‌کند که مشخص کنندهٔ جنس گاز هستند. یك بار دیگر واقعیت میدان وسیع امکان را محدود می‌سازد.

اتم هر عنصر خاص، مثلاً ئیدرژن، فقط فوتونهائی را گسیل می‌کند که انرژی معینی دارند. تنها گسیل کوانتومهائی با انرژی معین مجاز

است و بقیه ممنوع هستند. برای سادگی فرض کنید که عنصری در طیف فقط یك خط دارد، یعنی فقط فوتونهائی با یك انرژی مشخص گسیل می کند. این اتم از نظر انرژی، پیش از گسیل فوتون ثروتمندتر است و پس از آن فقیرتر می‌شود. از اصل انرژی نتیجه می‌شود که تراز انرژی هر اتم پیش از گسیل فوتون بالاتر و پس از آن پایینتر است، و تفاضل میان این دو تراز باید مساوی انرژی فوتون گسیل شده باشد. به این ترتیب این نکته را که اتم عنصر فقط در یك طول موج اشعه گسیل می‌کند یا به عبارت دیگر فوتونهای آن فقط یك انرژی معین دارند، می‌توان چنین بیان کرد: در هر اتم از این عنصر فقط دو تراز انرژی، مجاز است و گسیل یك فوتون متناظر است با گذار اتم از تراز بالاتر به تراز پایینتر.

ولی علی‌القاعده در طیف عناصر بیش از یك خط وجود دارد. فوتونهای گسیل شده به‌جای یك انرژی واحد با چندین انرژی متناظرند. به عبارت دیگر باید چنین فرض کرد که در هر اتم ترازهای انرژی بسیاری مجاز شمرده می‌شود، و گسیل هر فوتون متناظر است با گذار اتم از یك تراز انرژی بالاتر به یکی از ترازهای انرژی پایینتر. نکتهٔ اساسی آن است که با وجود این، هر ترازی در اتم مجاز نیست؛ زیرا در طیف یك عنصر هر طول موج، یا هر انرژیی برای فوتون، پدیدار نمی‌گردد. به‌جای آن که بگوئیم که خطوط و طول موجهای معینی معرف طیف هر اتم می‌باشند، می‌توان گفت که هر اتم ترازهای انرژی معینی دارد، و گسیل کوانتومهای نور با گذار اتم از یك تراز انرژی به ترازی دیگر متناظر است. ترازهای انرژی معمولاً پیوسته نیستند، بلکه ناپیوسته‌اند. دوباره می‌بینیم که واقعیت امکانات را محدود می‌سازد.

نخستین کسی که نشان داد چرا فقط این خطوط، و نه خطهای دیگر، در طیف ظاهر می‌شوند، بور[1] بود. نظریهٔ او، که بیست و پنج سال پیش تدوین شد، تصویری از اتمها رسم می‌کند که دست‌کم در موارد ساده می توان از روی آن طیف عناصر را محاسبه کرد و اعداد ظاهراً بی‌معنی و بی‌ارتباط با یکدیگر به ناگاه در پرتو این نظریه، ارتباطی منطقی با هم

1. Bohr

پیدا می‌کنند.

نظریهٔ بور گام واسطی است به جانب نظریه‌ای عمقیتر و عمومیتر که مکانیك موجی یا مکانیك کوانتومی نامیده می‌شود. قصد ما در این صفحات آخر این است که اندیشه‌های اصلی این نظریه را آشکار سازیم. قبل از پرداختن به این کار لازم است به نتیجهٔ نظری آزمایش دیگری اشاره شود که حالتی خصوصیتر دارد.

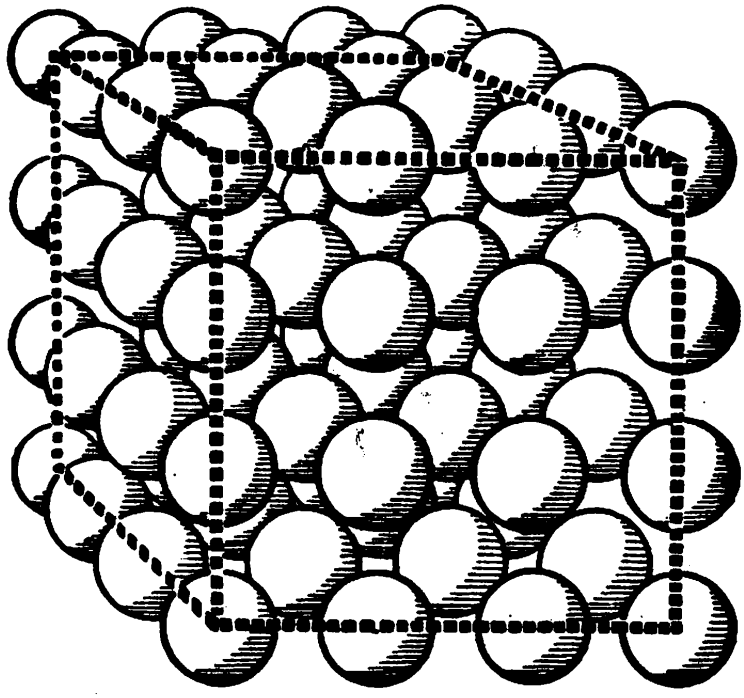
طیف مرئی با طول موجی شروع می‌شود که مربوط به نور بنفش است، و با طول موج دیگری مربوط به نور سرخ، خاتمه می‌پذیرد. به عبارت دیگر انرژی فوتونهای طیف مرئی همیشه در حد فاصل بین انرژی فوتون نور سرخ و انرژی فوتون نور بنفش قرار دارد. البته این محدودیت از خواص چشم انسان است. اگر اختلاف انرژی بعضی از ترازهای انرژی به اندازهٔ کافی زیاد باشد، آنگاه فوتون فرابنفش گسیل می‌شود و خطوطی را بوجود می‌آورد که بیرون طیف مرئی قرار دارند. وجود این خطها را با چشم نمی‌توان تشخیص داد، بلکه باید از صفحهٔ عکاسی استفاده کرد.

پرتوهای X نیز از فوتونهائی تشکیل شده است که انرژی آنها بسیار بیشتر از انرژی نور مرئی است یا به عبارت دیگر طول موج آنها هزاران بار کوچکتر از طول موجهای نور مرئی می‌باشد.

آیا تعیین طول موجهائی به این کوچکی از راه آزمایش امکان‌پذیر است؟ تعیین طول موج نور معمولی خود کار دشواری بود و ناچار شدیم که از موانع یا سوراخهای بسیار خرد استفاده کنیم. برای آن که دو سوراخ سوزن که پراش نور معمولی را موجب می‌شدند بتوانند پراش پرتو X را نشان دهند، باید چندین هزار بار کوچکتر و به یکدیگر نزدیکتر باشند. پس چگونه می‌توان طول موجهای این اشعه را اندازه گرفت. طبیعت خود در این کار به کمك ما می‌آید.

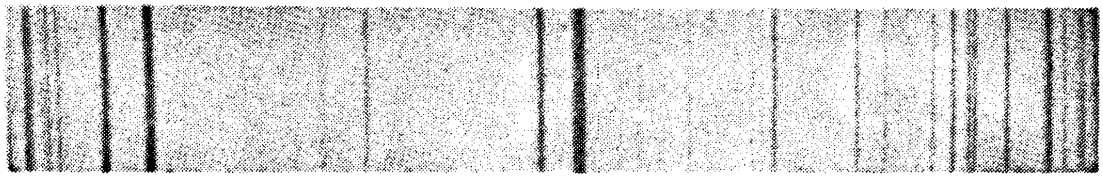
یك بلور مجموعه‌ای است از اتمهائی که به فاصله‌های بسیار کم از یکدیگر، بر اساس نقشه‌ای کاملاً منظم قرار گرفته‌اند. شکل زیر مدل ساده‌ای را از ساختمان یك دانهٔ بلور نمایش می‌دهد. در اینجا به عوض سوراخهای ریز، موانع بسیار کوچکی وجود دارد که از اتمهای این عناصر تشکیل شده و با نظم کاملی بسیار نزدیك به یکدیگر قرار گرفته‌اند. فاصلهٔ

میان اتمها، که از نظریهٔ ساختمان بلوری بدست می‌آید، به اندازه‌ای کم



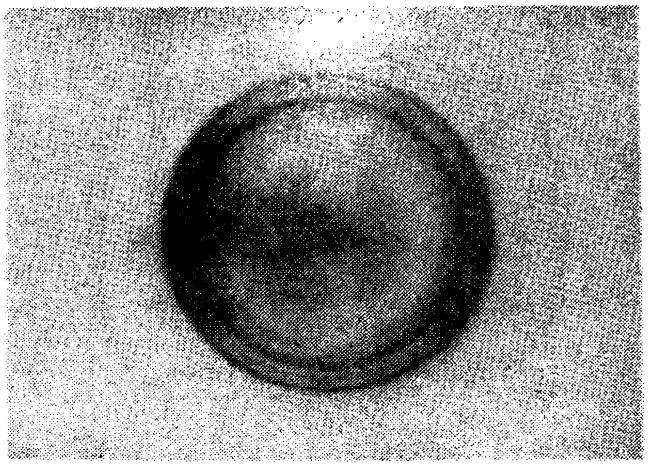
است که می‌تواند پراش پرتو X را آشکار سازد. آزمایش نیز ثابت کرده است که می‌توان به وسیلهٔ این موانع به هم فشرده، که از آرایش سه‌بعدی منظمی در بلور برخوردارند، پرتو X را پراشیده ساخت.

فرض کنید که تابه‌ای از پرتو X بر بلوری بتابد و پس از عبور از آن، روی صفحهٔ حساس عکاسی ثبت شود. الگوی پراش بر روی این صفحه مشهود می‌گردد. روشهای مختلفی برای مطالعهٔ طیف پرتو X و به‌دست آوردن اطلاعات مربوط به طول موج، از روی الگوی پراش بکار برده می‌شود. برای شرح تمام جزئیات نظری و آزمایشی آنها چندین کتاب لازم است. در عکس ۳ فقط یك الگوی پراش، که به یکی از این روشها بدست آمده، ارائه شده است. در اینجا نیز حلقه‌های روشن و تاریك که شاخص نظریهٔ موجی بودند مشاهده می‌شود. در قسمت مرکزی شعاع نپراشیده قابل رؤیت است. اگر بلور میان پرتو X و صفحهٔ عکاسی قرار نمی‌گرفت، فقط لکهٔ روشن مرکزی دیده می‌شد. از روی این قبیل عکسها می‌توان طول موجهای طیف پرتو X را محاسبه کرد، و بالعکس اگر طول موج معلوم باشد می‌توان نتایجی دربارهٔ ساختمان بلور بدست آورد.



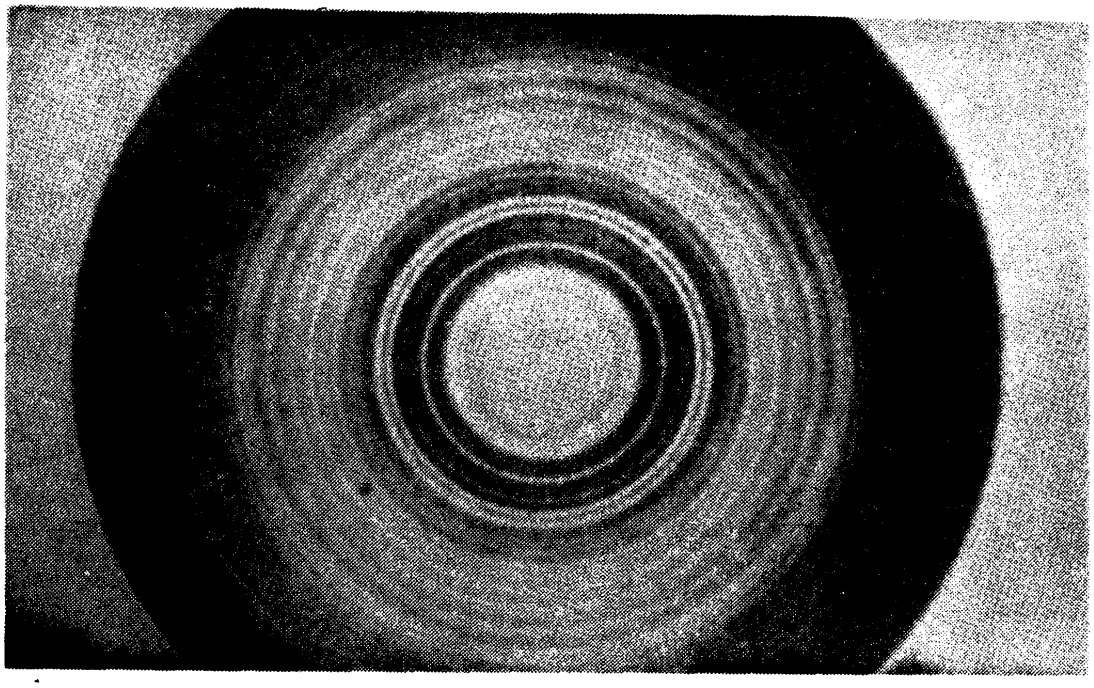
(عکس از آ. ج. شنستون)

خطوط طیفی



(عکس از لاستوویسکی و گرگور)

پراش پرتو ایکس



(عکس از لوریا و کلینگر)

پراش امواج الکترونی

امواج ماده

چگونه می‌توان این واقعیت را درك کرد که فقط بعضی از طول موجهای مشخص در طیف عناصر آشکار می‌شوند. بارها در فیزیك اتفاق افتاده است که از راه تشبیه مناسبی میان پدیده‌های نامرتبط با یکدیگر، پیشرفتی اساسی حاصل شده است. در این کتاب به دفعات دیده‌ایم که افکاری که در شاخه‌ای از علم بوجود آمده و بسط یافته‌اند، با کمال موفقیت در شاخه‌های دیگر بکار رفته‌اند. تکامل نگرشهای مکانیکی شامل مثالهای زیادی از این نوع است. انطباق مسائل حل شده به مسائل حل نشده ممکن است افکاری را سبب شود که نور تازه‌ای بر دشواریها بیندازد. یافتن قیاسی سطحی، که در واقع چیزی را بیان نمی‌کند، کار آسانی است؛ ولی کشف خصیصهٔ اساسی مشترکی که تفاوتهای ظاهری آن را پنهان کرده‌اند، و بر پایهٔ آن نظریهٔ جدید و موفقی ساختن، کار خلاق و مهم بشمار می‌رود. تحول نظریهٔ موسوم به مکانیك موجی که کمتر از ۱۵ سال پیش به وسیلهٔ دوبروی[1] و شرودینگر[2] آغاز شد، نمونهٔ بارز نظریه‌های موفقیت‌آمیزی است که از مقایسه‌ای عمیقانه و ثمربخش حاصل شده‌اند.

نقطهٔ عزیمت ما مثال کلاسیکی است که ربطی به فیزیك جدید ندارد. یك سر لولهٔ لاستیکی یا فنرلالهٔ بسیار درازی را در دست می‌گیریم و آن را بطرزی هماهنگ بالا و پایین می‌بریم تا سر دیگر شروع به نوسان کند. همان طور که در چندین مثال دیگر دیده‌ایم، در نتیجهٔ نوسان موجی ایجاد

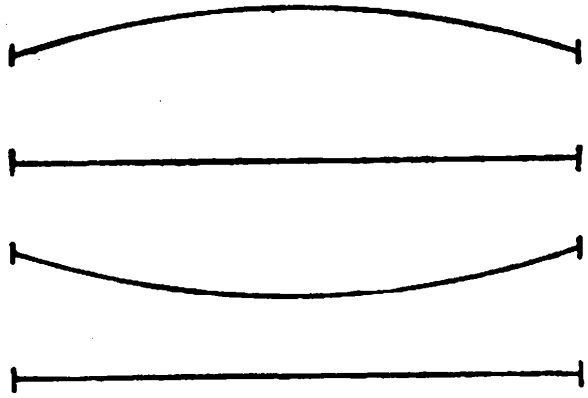
می‌شود که با سرعت معین لوله را می‌پیماید. اگر طول لوله را بی‌نهایت تصور کنیم، همین که قطعات موج ایجاد شدند، به سیر بی‌پایان خود، بدون تداخل، ادامه می‌دهند.

اکنون مثال دیگری را در نظر می‌گیریم. دو سر لوله بسته شده‌اند. اگر میل داشته باشید می‌توانید به‌جای لوله یکی از تارهای ویولن را در

1. De Broglie 2. Schrödinger

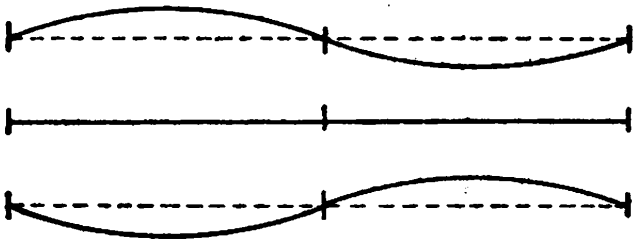
نظر بگیرید. حال اگر موجی در یکی از دو سر لولهٔ لاستیکی یا زه ویولن ایجاد شود، چه روی خواهد داد؟ موج مثل حالت قبل حرکت خود را آغاز می‌کند، ولی دیری نمی‌گذرد که از سر دیگر منعکس می‌شود. اکنون دو موج وجود دارد: یکی موجی که از نوسان ایجاد شده و دیگری موجی که از انعکاس بدست آمده است. این دو موج در جهات مخالف پیش می روند و با یکدیگر تداخل می‌کنند. ترسیم تداخل این دو موج و یافتن موجی که از ترکیب آنها نتیجه می‌شود، کار دشواری نیست. این موج را موج ساکن می‌نامند. دو کلمهٔ «موج» و «ساکن» ظاهراً نقیض یکدیگرند. مع‌ذلك نتیجه‌ای که از ترکیب دو موج حاصل می‌شود، این ترکیب لغوی را توجیه می‌کند.

ساده‌ترین مثال موج ساکن حرکت زهی است که دو سر آن ثابت شده باشند و خود آن بصورتی که در شکل نشان داده شده است بالا و پایین رود. این حرکت از قرارگرفتن دو موج برروی یکدیگر نتیجه می‌شود که در جهات مخالف پیش می‌روند. خصوصیت ویژهٔ این حرکت آن است که: فقط دو سر زه در حال سکون هستند. این نقطه‌های ساکن را گره‌های موج می‌نامند. در واقع مثل آن است که موج بین این دو نقطه قرار گرفته است، و تمام نقاط زه با هم به ماکزیمم و مینیمم انحراف خود می‌رسند. ولی این ساده‌ترین نوع موج ساکن است. انواع دیگری نیز وجود دارد.

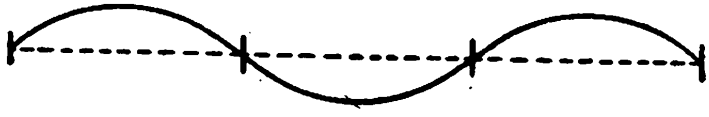


مثلاً ممکن است در یك موج ساکن، سه گره موجود باشد، دو گره در دو سر زه و یکی در وسط آن. در این حالت همیشه سه نقطهٔ ساکن وجود دارد. نگاهی به شکل زیر نشان می‌دهد که در اینجا طول موج، نصف حالتی است که در آن فقط دو گره وجود دارد. به همین ترتیب امواج

ساکن ممکن است دارای چهار یا پنج گره و یا بیشتر باشند و در هر حالت



طول موج به عدهٔ گره‌ها بستگی خواهد داشت. شمارهٔ گره‌ها همیشه عدد صحیح است و به‌طور جهشی تغییر می‌کند. جملهٔ: «تعداد گره‌ها مثلاً ۳٫۵۷۶ است»، جمله‌ای کاملاً بی‌معنی است. بنا بر این طول موج فقط به طور



ناپیوسته می‌تواند تغییر کند. در این مسألهٔ کاملاً کلاسیك، خصوصیات آشنای نظریهٔ کوانتوم را می‌توان تشخیص داد. حقیقت امر آن است که موج ساکنی که نوازندهٔ ویولن ایجاد می‌کند، بسیار پیچیده‌تر از این است و ترکیبی است از چندین موج که دو یا سه یا چهار گره یا بیشتر دارند، و در نتیجه از اختلاط چندین طول موج بدست می‌آید. فیزیك می‌تواند این موج مرکب را به امواج ساکن ساده‌ای که از آنها تشکیل شده است تجزیه کند. اگر بخواهیم از اصطلاحات قبلی استفاده کنیم، می‌توانیم بگوئیم که زه نوسان کننده، مانند عنصر گسیل کنندهٔ تشعشع، طیف مخصوص به خود را دارد. و مانند مثال طیف یك عنصر، فقط بعضی از طول موجها مجاز هستند و همهٔ طول موجهای دیگر ممنوع هستند.

به این ترتیب شباهتی را میان تار نوسان کننده و اتمی که تشعشع می‌کند، کشف کردیم. اگرچه این تشبیه عجیب بنظر می‌رسد، ولی قیاسی را که اختیار کرده‌ایم ادامه می‌دهیم و نتایج بیشتری از آن استخراج می کنیم. اتمهای همهٔ عناصر از ذراتی بنیادی ساخته شده‌اند که بعضی سنگینترند و هسته را می‌سازند، و سبکترها الکترونها هستند. این منظومهٔ ذرات، شبیه آلت موسیقی کوچکی است که در آن امواج ساکن ایجاد می‌شوند.

اما موج ساکن نتیجهٔ تداخل دو یا چند موج متحرك است. بنابراین اگر حقیقتی در این تشبیه وجود داشته باشد، باید آرایشی ساده‌تر از اتمها بتوان یافت که با موج منتشر شونده متناظر باشد. ساده‌ترین آرایش کدام است؟ در عالم مادی ما هیچ چیزی ساده‌تر از الکترونی که بر آن هیچ نیروئی وارد نمی‌شود، یعنی الکترونی که در حال سکون یا در حرکت یکنواخت است، وجود ندارد. به این ترتیب می‌توان حلقهٔ دیگری را برای زنجیرهٔ مقایسهٔ خود حدس‌زد. الکترونی که به طور یکنواخت حرکت می‌کند، با موجهائی به طول موج معین متناظر است. این همان فکر نو و شجاعانهٔ دوبروی بود.

قبلاً نشان داده شد که در بعضی پدیده‌ها نور سرشت موجگونهٔ خود را آشکار می‌کند، و در بعضی دیگر ماهیت دانه‌ای خود را ظاهر می سازد. پس از آن که با فکر موجی بودن نور خو گرفتیم، با کمال تعجب، دریافتیم که در بعضی موارد و از جمله در مورد اثر فوتوالکتریك، رفتار نور به رگباری از فوتونها شباهت دارد. اکنون در مورد الکترونها قضیه کاملاً برعکس است. ما به این فکر عادت کرده‌ایم که الکترون ذره است و کوانتوم بنیادی ماده و الکتریسیته می‌باشد. در مورد بار الکتریکی و جرم آن نیز تحقیق شد. اگر در افکار دوبروی حقیقتی وجود داشته باشد، باید پدیده‌هائی وجود داشته باشند که در آنها ماده خاصیت موجگونهٔ خود را آشکار سازد. این نتیجه، که بدواً از راه مقایسهٔ با صوت به آن رسیده‌ایم، بسیار عجیب و غیر قابل فهم بنظر می‌رسد. ذرهٔ متحرك را با موج چه مناسبت؟ ولی این نخستین‌بار نیست که در فیزیك با اشکالی از این نوع روبه‌رو شده‌ایم. همین مسأله را در حوزهٔ پدیده‌های نوری نیز دیدیم.

اندیشه‌های بنیادی، مهمترین نقش را در تکوین یك نظریهٔ فیزیکی ایفا می‌کنند. کتابهای فیزیك از فرمولهای پیچیدهٔ ریاضی آکنده است، ولی نظریه‌های فیزیکی از فرمولها آغاز نمی‌شوند، بلکه فکر و اندیشه نقطهٔ شروع آنهاست. فکر و اندیشه بعداً باید قالب ریاضی یك نظریهٔ کمّی را بپذیرد تا مقایسه با آزمایش امکان‌پذیر شود. این حقیقت را می‌توان با مثالی که هم‌اکنون در دست ماست، روشن ساخت. حدس اصلی آن است که الکترونی که به طور یکنواخت حرکت می‌کند، در بعضی از پدیده‌ها رفتاری

مانند موج خواهد داشت. فرض کنید یک الکترون، یا رگباری از الکترونهای هم سرعت، در حرکت یکنواخت باشند. جرم و بار و سرعت هر الکترون معلوم است، و اگر بخواهیم مفهوم موج را بطریقی به الکترونهای متحرك مربوط کنیم، سؤالی که پیش می‌آید این است که: طول موج آن چیست؟ این سؤالی است کمّی و برای پاسخ دادن به‌آن باید نظریه‌ای کم و بیش کمّی ساخته شود. طرح چنین نظریه‌ای براستی کار ساده‌ای است. سادگی ریاضی کار دوبروی، کاری که به این سؤال جواب می‌دهد، براستی حیرت‌آور است. در هنگامی که این کار انجام شد، فنون ریاضی بسیار ظریفتر و پیچیده‌تری در نظریه‌های فیزیکی دیگر بکار گرفته می‌شد. ریاضیات مسألهٔ امواجِ ماده، فوق‌العاده ساده و مقدماتی است، ولی اندیشه‌های بنیادی آن بسیار عمیق و جامع می‌باشند.

قبلاً در مورد امواج نور و فوتونها نشان داده شد که هر مطلبی را که به زبان نظریهٔ موجی باشد می‌توان به زبان فوتون و ذرات نور ترجمه کرد. این حکم در مورد امواج الکترونی نیز حقیقت دارد. با زبان ذره‌ای الکترونهائی که به طور یکنواخت حرکت می‌کنند آشنا هستیم، ولی گفته‌ای که با زبان ذره‌ای بیان شود، به همان ترتیبی که در مورد فوتونها دیدیم، قابل ترجمه به زبان موجی است. دو برگه، قواعد این ترجمه را وضع می‌کنند. شباهت امواج نور با امواج الکترونی یا به تعبیر دیگر شباهت میان فوتونها و الکترونها یکی از این دو برگه است. همان روشی را که در ترجمهٔ نور بکار بردیم در مورد ماده هم بکار می‌بریم. نظریهٔ نسبیت خصوصی برگهٔ دیگر را در اختیار ما می‌گذارد. قوانین طبیعت باید نسبت به تبدیل لورنتس ناوردا باشند نه نسبت به تبدیل کلاسیك. با این دو برگه طول موج مربوط به الکترون متحرك تعیین می‌شود. از این نظریه نتیجه می‌شودکه اگر الکترونی با سرعت ۱۵،۰۰۰ کیلومتر در ثانیه حرکت کند، طول موجی دارد که بسهولت آن را می‌توان حساب کرد. این طول موج در ناحیهٔ طول موجهای پرتو X قرار می‌گیرد. حال نتیجه می‌گیریم که اگر خاصیت موجی ماده قابل ردیابی باشد، باید بتوان آن را با آزمایشی نظیر آزمایش پرتو X انجام داد.

یك تابهٔ الکترونی را تصور کنید که با سرعت در حرکت یکنواخت

باشد. اگر بخواهیم واژگان موجی را بکار گیریم، به‌جای تابهٔ الکترونی از یك موج همگن الکترونی صحبت می‌کنیم. فرض کنید که این تابهٔ الکترونی بر بلور بسیار نازکی، که کار پراش را می‌کند، بتابد. فاصلهٔ میان موانع پراشنده در بلور به اندازه‌ای کوچك است که پراش پرتو X امکان‌پذیر است. ممکن است که اثر مشابهی هم برای امواج الکترونیی، که طول موجشان در همین حدود باشد، انتظار رود. یك صفحهٔ حساس عکاسی پراش امواج الکترونی را که از لایهٔ نازك بلوری می‌گذرند، ثبت می‌کند. براستی که آزمایش به چیزی جامهٔ عمل می‌پوشاند که بی‌تردید یکی از بزرگترین موفقیتهای نظریه بشمار می‌آید و آن پدیدهٔ پراش امواج الکترونی است. شباهت میان پراش موج الکترونی و پراش پرتو X، بطوری که از مقایسهٔ الگوهای عکس ۳ دیده می‌شود، کاملاً آشکار است. می‌دانیم که از روی این تصاویر می‌توان طول موج پرتو X را بدست آورد. همین کار بر امواج الکترونی نیز قابل اطلاق است. از الگوی پراش، طول موج موج ماده بدست می‌آید و توافق کامل کمّی نظریه و آزمایش، زنجیرهٔ استدلال ما را بطرزی درخشان تأیید می‌کند.

اشکالات قبلی ما با این نتیجه‌ای که بدست آمد، دامنه‌دارتر و عمیقتر شده‌اند. این نکته را با ذکر مثالی، شبیه به مثالی که در مورد موج نور آوردیم، می‌توان روشن کرد. الکترونی که بر سوراخ بسیار کوچکی پرتاب شود مانند موج نور خم خواهد شد. حلقه‌های روشن و تاریك بر صفحهٔ حساس عکاسی نقش می‌بندد. می‌توان امیدوار بود که این پدیده را بتوان با کمك کنش متقابلی میان الکترون و لبهٔ سوراخ توضیح داد، هرچند که چنین توضیحی چندان محتمل نیست. در آزمایش دو سوراخ چه روی می دهد؟ به‌جای حلقه‌های روشن و تاریك نوارهای روشن و تاریك ظاهر می شود. چگونه امکان دارد که وجود سوراخ دیگر نتیجه را کاملاً تغییر دهد؟ الکترون لایتجزاست، ظاهراً فقط می‌تواند از یکی از دو سوراخ عبور کند. چگونه ممکن است الکترونی که از یك سوراخ می گذرد پی‌برد که سوراخی دیگر در نزدیکی آن وجود دارد؟

پیشتر پرسیدیم: نور چیست؟ آیا رگباری از ذرات است یا موج؟ اکنون می‌پرسیم که: ماده چیست، الکترون چیست؟ آیا ذره است یا موج؟

الکترون هنگامی که در یك میدان الکتریکی یا مغناطیسی خارجی حرکت می‌کند رفتاری مانند ذره دارد، و چون به توسط بلور پراشیده شود، مانند موج رفتار می‌کند. در مورد کوانتوم ماده هم به‌همان اشکالی برخوردیم که در مورد کوانتوم نور به آن رسیده بودیم. یکی از بنیادیترین مسائلی که از پیشرفتهای اخیر علم ناشی شده این است که چگونه می‌توان این دو نگرش متناقض از ماده و موج را با هم آشتی داد. این مسأله در زمرهٔ آن دسته از اشکالات بنیادی است که چون به درستی تدوین شوند تا مدتی دراز پیشرفت علم را سبب خواهند گردید. فیزیك کوشیده است که این مسأله را حل کند و آینده قضاوت خواهد کرد که آیا راه حلی که فیزیك جدید پیشنهاد می‌کند ماندنی است یا زود گذر.

امواج احتمال

بنا بر مکانیك کلاسیك اگر مکان و سرعت یك نقطهٔ مادی را بدانیم، ونیروهای خارجی وارد برآن را بشناسیم، می‌توانیم به‌مدد قوانین مکانیك مسیر آیندهٔ آن را پیش‌بینی کنیم. جملهٔ: «نقطهٔ مادی در فلان لحظه در فلان مکان و دارای فلان سرعت است» در مکانیك کلاسیك معنی مشخصی دارد. اگر این بیان معنی خود را از دست بدهد، استدلال ما (صفحهٔ ۲۹) نیز در بارهٔ پیش‌بینی مسیر آینده باطل می‌شود.

در اوایل قرن نوزدهم کوشش دانشمندان صرف آن می‌شد که تمام فیزیك را به نیروهائی ساده تقلیل دهند که بر ذراتی مادی، که در هرلحظه مکانها و سرعتهای معینی دارند، وارد می‌شوند. خوب است به خاطر بیاوریم که در آغاز سفر خود در قلمرو مسائل فیزیکی، وقتی که دربارهٔ مکانیك بحث می‌کردیم، حرکت را چگونه توصیف کردیم. بر روی مسیرهای معینی که مکان دقیق جسم را در هر لحظه نشان می‌داد نقاطی اختیار کردیم. در هر نقطه بردارهای مماس، امتدادها و اندازه‌های سرعت را مشخص می‌کردند. این کار هم ساده بود و هم قانع کننده. ولی آن را نمی توان برای کوانتومهای بنیادی ماده یعنی الکترونها و برای کوانتومهای انرژی یعنی فوتونها بکار برد. نمی‌توان حرکت فوتون یا الکترون را به همان ترتیبی که در مکانیك کلاسیك معمول است تصویر کرد. مثال دو

سوراخ سوزن این نکته را بوضوح نشان می‌دهد. بنظر می‌رسد که الکترون و فوتون از هر دو سوراخ می‌گذرند. بنا بر این توضیح ایـن اثـر با تصور مسیری از نوع کلاسیك قدیمـی آن بـرای یـك الکترون یا یـك فوتون، غیر ممکن است.

البته ناچاریم که وجود اعمال ابتدائی از قبیل عبـور الکترونها یـا فوتونها را از سوراخ بپذیریم. در وجود کوانتومهای بنیادی ماده و انرژی نمی‌توان شك کرد. ولی تدوین قوانین مقدماتی مسلماً بـا مشخص کـردن مکان و سرعت در هر لحظه، بـه همان سیـاق سادهٔ فیزیـك کلاسیك، میسر نیست.

به همین جهت بهتر آن است که از راه دیگری وارد شویـم و همان گامهای کوچك را پی در پی تکرار کنیم. الکترونها یکی پس از دیگری به سمت سوراخها فرستاده می‌شوند. کلمهٔ «الکترون» را فقـط بـرای مشخص بودن گفتار بکار می‌بریم وگرنه آنچه می‌گوئیم در بـارهٔ فوتـون نیز صحت دارد.

آزمایش واحـدی مکرر در مکرر و دقیقاً به یك شیوه اجرا می‌شود. الکترونها همه دارای سرعـت واحـدی هستند و به سمت دو سوراخ سوزن حرکت می‌کنند. لازم به ذکر نیست که این آزمایش، آزمایشی خیالی است که هرگز آن را نمی‌توان در عمل انجام داد، ولی تصور آن اشکالی ندارد. نمی‌توان فوتونها یا الکترونها را در لحظه‌هائی معین دانه دانه مانند گلولهٔ تفنگ پرتاب کرد.

نتیجهٔ آزمایشهای مکرر باید برای یك سوراخ همان حلقه‌های روشن و تاریك و برای دو سوراخ نوارهـای روشن و تاریـك بـاشد. ولـی یـك اختلاف اساسی در بین هست: در مورد یك الکتـرون تنهـا، نتیجهٔ آزمایش قابل فهم نبود. چون آزمایش به دفعات زیاد تکرار شود فهم آن آسانتر می گردد. می‌توان گفت: نوار روشن در جائی ظاهر می‌شود که تعداد زیـادی الکترون بر آن فرود آمده باشند. در نقاطی که تعداد الکترونهـای فـرود آمده کمتر است، نوارها تاریکترنـد. لکـهٔ سیاه کاملاً تاریك، نشانـهٔ آن است که هیچ الکترونی بـه آن نرسیده است. البته مجاز نیستیم که فـرض کنیم همهٔ الکترونها از یك سوراخ می‌گذرند. اگر چنین بـود بسته یا بـاز

بودن سوراخ دیگر کمترین تأثیری نداشت. ولی می‌دانیم که بستن سوراخ دیگر اختلافی را سبب می‌گردد. چون یك ذره غیر قابل تقسیم است، نمی‌توان تصور کرد که از هر دو سوراخ عبور کند. تکرار تجربه به دفعات زیاد راه گریز دیگری را نشان می‌دهد: بعضی از الکترونها از یك سوراخ می‌گذرند و بعضی دیگر از سوراخ دوم. نمی‌دانیم که چرا هر الکترون سوراخ خاصی را انتخاب می‌کند، ولی نتیجهٔ آزمایشهای مکرر آن است که هر دو سوراخ در انتقال الکترونها از چشمه به پرده دخالت دارند. اگر وقتی که آزمایش تکرار می‌شود، فقط به بیان آنچه برای گروهی از الکترونها روی می‌دهد بپردازیم و کاری به رفتار فرد فرد ذرات نداشته باشیم، اختلاف میان حلقه‌ها و نوارهای روشن و تاریك قابل فهم می‌گردد. از بحث مربوط به یك رشته آزمایش پی‌در پی، اندیشهٔ تازه‌ای زاده می‌شود، و آن تصور گروهی از ذرات است که فرد فرد آنها رفتاری غیر قابل پیش‌بینی دارند. نمی‌توان مسیر یك الکترون تنها را پیش‌بینی کرد. ولی می‌توان پیش‌بینی کرد در آخر کار، نوارهای روشن و تاریك بر روی پرده ظاهر خواهند شد.

موقتاً فیزیك کوانتومی را به‌کناری می‌گذاریم.

در فیزیك کلاسیك دیده‌ایم که اگر مکان و سرعت نقطه‌ای مادی را در لحظهٔ معین بدانیم و نیروهای وارد بر آن را بشناسیم، می‌توانیم مسیر آینده آن را پیش‌بینی کنیم. و نیز دیدیم که چگونه نگرش مکانیکی بر نظریهٔ جنبشی ماده تطبیق داده شد. ولی در این نظریه از شیوهٔ استدلال ما فکر جدیدی زاده شد که درك کامل آن به فهم بحثهای بعدی ما کمك می‌کند.

ظرف پر از گازی در اختیار ماست. برای آن‌که بتوان حرکت هر ذره را دنبال کرد باید در صدد یافتن حالتهای اولیهٔ هر ذره، یعنی مکان و سرعت اولیه همهٔ ذرات، برآمد. چون عده ذرات بی‌اندازه زیاد است، بر فرض که چنین عملی امکان‌پذیر باشد، عمر آدمی کفایت نمی‌کند که نتایج اندازه‌گیری را روی کاغذ بیاورد. حال اگر کسی بخواهد برای محاسبهٔ مکان نهائی ذره‌ها روشهای معمول در مکانیك کلاسیك را بکار برد اشکالات به حدی خواهد بود که کار غیرممکن می‌شود. از لحاظ اصول می‌توان از

همان روشی استفاده کرد که در حرکت سیارات بکار می‌رود. ولی در عمل این روش بی‌ثمر است و باید به روش آماری توسل جست. در این روش از آگاهی دقیق نسبت به حالتهای اولیه صرف‌نظر می‌شود. دانش ما نسبت به وضع دستگاه در یك لحظهٔ معین، اندك است و در نتیجه نسبت به آینده و گذشتهٔ آن کمتر می‌توانیم اظهار نظر کنیم. به این ترتیب با سرنوشت فرد فرد ذرات گازکاری نخواهیم داشت. مسألهٔ ما از سرشتی دیگر است، مثلاً نمی‌پرسیم که: «سرعت هر ذره در این لحظه چه اندازه است؟» ولی ممکن است بپرسیم: «چند ذره می‌توان یافت که سرعت آنها میان ۳۰۰ و ۳۱۰ متر در ثانیه باشد؟» به تك‌تك ذرات کاری نداریم، آنچه در صدد تعیین آن هستیم مقادیر متوسطی است که مجموعه را مشخص می‌کنند. بدیهی است که روش آماری صرفاً زمانی به درد می‌خورد که عدهٔ افراد دستگاه بسیار زیاد باشد.

با استفاده از روش آماری نمی‌توان وضع یك فرد را در میان جمعیت پیش‌بینی کرد. تنها چیزی که پیش‌بینی آن میسر است شانس یا احتمال این است که آن فرد در فلان وضع خاص باشد. اگر قوانین آماری به ما بگویند که یك سوم ذرات سرعتی میان ۳۰۰ و ۳۱۰ متر در ثانیه دارند، معنی آن این است که اگر مشاهدات خود را برای تعداد زیادی از ذرات تکرار کنیم، براستی این مقدار متوسط را بدست می‌آوریم. یا به عبارت دیگر احتمال یافتن ذره‌ای که سرعتش در این فاصله باشد، یك سوم است.

همین‌طور با دانستن آهنگ توالد در یك اجتماع بزرگ نمی‌توان فهمید که آیا فلان خانواده از نعمت فرزند برخوردار است یا نه. منظور از آن اطلاع از نتایج آماری است و به افراد مربوط نمی‌شود.

اگر عدهٔ زیادی پلاك اتومبیل را از نظر بگذرانیم، این قانون‌آماری را کشف می‌کنیم که ثلث اعدادی که دیده می‌شوند قابل قسمت بر ۳ می باشند. ولی هرگز نمی‌توان از پیش‌گفت که آیا نمرهٔ اتومبیلی که لحظه‌ای بعد خواهیم دید دارای این خاصیت است یا نه. قوانین آماری تنها در مورد اجتماعات بزرگ صحت دارند، آنها را نمی‌توان به فرد فرد اعضا تطبیق داد.

اکنون می‌توانیم دومرتبه به مسألهٔ کوانتوم بپردازیم.

قوانین فیزیك کوانتومی سرشتی آماری دارند. بدین معنی که بر یك دستگاه منفرد مربوط نمی‌شوند بلکه بر انبوهی از دستگاههای مشابه قابل انطباق هستند. اثبات این قوانین از راه اندازه‌گیری یك دستگاه منفرد ممکن نیست، بلکه تنها از طریق یك رشته اندازه‌گیریهای پی‌درپی میسر است.

تجزیهٔ رادیوآکتیوی یکی از حوادث بیشماری است که فیزیك کوانتومی سعی در تدوین قوانین آن دارد، قوانینی که بر استحالهٔ خود به خود عناصر به یکدیگر ناظر است. مثلاً می‌دانیم که در مدت ۱۶۰۰ سال از یك گرم رادیوم نصف آن متلاشی می‌شود و نصف دیگر باقی می‌ماند. ما به تقریب می‌توانیم پیش‌بینی کنیم که تا نیم ساعت دیگر چند اتم متلاشی می‌شود. ولی حتی در توصیفهای نظری خود هم نمی‌توانیم بگوئیم که چرا اتمهای خاصی در این مجموعه محکوم به فنا شده‌اند. براساس معرفت کنونی نمی‌توان اتمهائی را که محکوم به متلاشی شدن هستند مشخص کرد. سرنوشت اتم به سن آن بستگی ندارد؛ هیچ نشانه‌ای از قانونی که بر رفتار فردی آنها ناظر باشد در دست نیست. فقط می‌توان قوانینی آماری تدوین کرد، قوانینی که بر مجموعهٔ بزرگی از اتمها حاکمند.

مثال دیگری می‌زنیم: چون گاز درخشنده‌ای از یك عنصر، در مقابل طیف‌نما گذاشته شود، خطوطی با طول موجهای معین ظاهر می‌شود. بروز مجموعهٔ ناپیوسته‌ای از طول موجها، ویژهٔ پدیده‌های اتمی است و وجود کوانتومهای بنیادی را آشکار می‌سازند. ولی این مسأله خصوصیت دیگری نیز دارد. بعضی از خطوط طیف کاملاً واضح و بعضی دیگر کم‌سو هستند. خط واضح طیف نشانهٔ آن است که عدهٔ نسبتاً زیادی فوتون با این طول موج خاص گسیل شده است. خط طیفی کم‌سو نشانهٔ آن است که عدهٔ کمتری فوتون با این طول موج گسیل شده است. در این مورد هم نظریهٔ کوانتومی احکامی صرفاً آماری صادر می‌کند. هر خط نمایندهٔ گذار از تراز انرژی بالاتر به تراز انرژی پایینتر است. این نظریه فقط از احتمال هر یك از این گذارهای ممکن خبر می‌دهد و دربارهٔ گذار واقعی یك اتم منفرد چیزی نمی‌گوید. کار کرد این نظریه از آن جهت درخشان است که در همهٔ این پدیده‌ها مجموعهٔ بزرگی از اتمها شرکت دارند نه اتمهای منفرد.

ظاهراً چنین بنظر می‌رسد که فیزیك کوانتومی تا اندازه‌ای به نظریهٔ جنبشی ماده شباهت دارد، زیرا هر دوی آنها ماهیتی آماری دارند و به مجموعه‌های بزرگ مربوط می‌شوند. ولی حقیقت امر چنین نیست. در این قیاس نه تنها درك وجوه مشابهت، بلکه درك وجوه اختلاف نیز بسیار مهم است. شباهت میان نظریهٔ جنبشی ماده و فیزیك کوانتومی از لحاظ ماهیت آماری آنهاست. اما اختلافها کدامند؟

اگر بخواهیم بدانیم چند مرد و زن که سنشان بیش از ۲۰ سال است در شهری زندگی می‌کنند، باید ورقه‌ای به هر یك از اهالی بدهیم که در آن عنوانهای «مرد»، «زن» و «سن» آمده باشد. بر فرض آنکه همهٔ جوابها صحیح باشند، می‌توان با شمارش و تفکیك آنها نتیجه‌ای آماری بدست آورد. نامهای اشخاص و محل سکونت آنان، که روی ورقه نوشته شده، اهمیتی ندارند. نظر آماری ما حاصل اطلاع از موارد فردی است. همین طور در نظریهٔ جنبشی ماده نیز قوانین آماری ناظر بر مجموعه بر پایهٔ قوانین انفرادی بنا شده است.

ولی در فیزیك کوانتومی جریان قضیه کاملاً بر عکس است. در اینجا قوانین آماری بدون واسطه داده شده‌اند. قوانین انفرادی کنار گذاشته شده‌اند. در مثال یك فوتون یا یك الکترون و دو سوراخ دیدیم که نمی‌توان حرکتِ ممکن ذرات بنیادی را در زمان و فضا، بصورتی توصیف کرد که در فیزیك کلاسیك معمول است. فیزیك کوانتومی قوانین انفرادی ذرات بنیادی را کنار می‌گذارد و مستقیماً قوانین آماری حاکم بر مجموعه‌های ذرات را وضع می‌کند. امکان ندارد که بر مبنای فیزیك کوانتومی مکان و سرعت یك ذرهٔ بنیادی را، بصورتی که در فیزیك کلاسیك معمول است، تعیین کرد یا مسیر آینده آن را پیش‌بینی نمود. فیزیك کوانتومی فقط با مجموعه‌ها سر و کار دارد و قوانین آن خاص گروههاست و برای افراد نیست.

چیزی که ما را به تغییر در نگرش کلاسیك وامی‌دارد تفکر صرف یا میل به تازگی و نوآوری نیست، بلکه ضرورت بی چون و چراست. از میان اشکالاتی که در تطبیق نگرش قدیمی پیش می‌آید فقط به یك مسألهٔ خاص یعنی به پدیده پراش اشاره کردیم، ولی باید دانست که مسائل

متعدد دیگری را نیز می‌توان ذکر کرد که به همین اندازه قانع کننده‌اند. کوششهائی که برای فهم واقعیت انجام می‌شود، پیوسته تغییراتی را در نگرش ما موجب می‌شود. ولی همیشه تشخیص این نکته با آینده است که آیا برای مشکلات خود تنها راه حل ممکن را برگزیده‌ایم یا راه حل بهتری نیز می‌توان یافت.

ما به ناچار از توصیف حالات انفزادی، به عنوان حوادثی عینی که در فضا و زمان روی می‌دهند، چشم پوشیدیم: ناگزیر شدیم به قوانینی روی آوریم که سرشتی آماری دارند. اینها خصیصه‌های اصلی فیزیک کوانتومی جدید هستند.

پیشتر، موقعی که واقعیتهای فیزیکی جدید میدان الکترومغناطیسی و میدان گرانش را مطرح کردیم، ویژگیهای معادلاتی را ذکر کردیم که قالب ریاضی افکار ما بشمار می‌رفتند. اکنون نیز همین روش را در مورد فیزیک کوانتومی بکار می‌بندیم. به اجمال اشاره‌ای به کارهای بور، دوبروی، شرودینگر، هایزنبرگ[1]، و دیراک[2] و بورن[3] می‌کنیم.

نظر خود را متوجه یک الکترون می‌سازیم. این الکترون ممکن است در تحت اثر یک میدان الکترومغناطیسی دلخواه باشد، یا از هر تأثیر خارجی برکنار باشد. مثلاً ممکن است که در میدان یک هستهٔ اتمی حرکت کند یا از بلوری پراشیده شود. فیزیک کوانتومی به ما می‌آموزد که معادلات ریاضی این مسائل را چگونه تدوین کنیم.

قبلاً به شباهت میان یک تار مرتعش ویولن، یک غشاء طبل، یک آلت موسیقی بادی یا هر آلت موسیقی دیگر از یک طرف و یک اتم تشعشع کننده از طرف دیگر واقف شدیم. میان معادلات ریاضی مربوط به مسألهٔ صوتی و معادلات ریاضی مربوط به فیزیک کوانتومی نیز شباهتی موجود است. ولی در اینجا نیز تعبیر فیزیکی کمیتهائی که در این دو مورد بدست می‌آیند کاملاً با یکدیگر اختلاف دارد. علی‌رغم شباهتهای ظاهری در معادلات، کمیتهای فیزیکی مربوط به تارمرتعش و اتم درحال تشعشع، معانی کاملاً متفاوتی دارند. درمورد تار صحبت از انحراف هر نقطه از تار در هر

1. Hisenberg 2. Dirac 3. Born

لحظه از وضعی است که آن نقطه درحالت عادی دارد. اگر شکل تار نوسان کننده را در یك نقطهٔ معین بدانیم، هر چه را که بخواهیم می‌توانیم بدست آوریم. به این ترتیب از روی معادلات ریاضی تار نوسان کننده، انحراف از وضع عادی را در هر لحظهٔ دیگر می‌توان حساب کرد. این واقعیت را که به هر نقطهٔ تار انحراف معینی از وضع عادی مربوط می‌شود، با دقت بیشتر به صورت زیر می‌توان بیان کرد: در هر لحظه انحراف از وضع عادی تابعی از مختصات تار می‌باشد. تمام نقاط تار پیوستاری یك بعدی را تشکیل می‌دهند و انحراف تابعی است که در این پیوستار یك بعدی تعریف می‌شود و از معادلات تار در حال نوسان بدست می‌آید.

همین طور در مورد یك الکترون نیز برای هر نقطه از فضا و هر لحظهٔ از زمان تابعی معین می‌شود. این تابع را موج احتمال نام می‌دهیم. در مقام تشبیه، موج احتمال نظیر انحراف تار از وضع عادی در مسألهٔ صوتی است. موج احتمال در هر لحظه، تابع پیوستاری سه بعدی است، در صورتی که در تار لرزان انحراف، تابعی از پیوستار یك بعدی است. موج احتمال، فهرست معلومات ما از دستگاه کوانتومی مورد مطالعه است و از روی آن می‌توان به تمام پرسشهای با معنی آماری مربوط به این دستگاه پاسخ داد. این تابع، مکان و سرعت الکترون را در هر لحظه به ما نمی‌دهد، زیرا چنین سؤالی در فیزیك کوانتومی بی‌معنی است. ولی احتمال حضور الکترون را در یك جای معین، در اختیار ما می‌گذارد؛ یا به ما می‌گوید که در کدام نقطه، احتمال دیدن یك الکترون از نقاط دیگر زیادتر است. نتیجهٔ کار به یك اندازه‌گیری مربوط نمی‌شود، بلکه بر اندازه‌گیریهای مکرر قابل اطلاق است. همان‌طور که معادلات گرانشی، میدان گرانشی و معادلات ماکسول، میدان الکترومغناطیسی را تعیین می‌کنند، از معادلات فیزیك کوانتومی نیز موج احتمال بدست می‌آید. قوانین فیزیك کوانتومی نیز قوانینی ساختاری هستند. ولی معنی مفاهیم فیزیکی حاصل از معادلات فیزیك کوانتومی بسیار انتزاعیتر از معانی مربوط به میدان گرانشی یا میدان الکترومغناطیسی است. این معادلات، صرفاً ابزارهائی ریاضی برای پاسخ گفتن به پرسشهائی ماهیتاً آماری بشمار می‌روند.

تاکنون الکترون را در میدانی خارجی تصور کرده‌ایم. اگر در این

میدان، الکترون که کوچکترین بار ممکن الکتریکی است، موجود نبود بلکه بار قابل ملاحظه‌ای مشتمل برمیلیاردها الکترون وجود داشت، می‌شد از فیزیك کوانتومی صرف نظر کرده و مسأله را بر اساس فیزیك قدیمی پیش از کوانتوم حل کرد. در مورد جریانهای داخل سیم، رساناهای باردار و امواج الکترومغناطیسی می‌توان فیزیك سادهٔ قدیمی را، که در معادلات ماکسول نهفته است، بکار برد. ولی در گفتگو از اثر فوتو الکتریك، شدت خطوط طیفی، رادیو آکتیویته، پراش امواج الکترونی و بسیاری پدیده‌های دیگر، که در آنها سرشت کوانتومی ماده و انرژی متجلی می شود، این عمل امکان‌پذیر نیست. در این صورت باید به اصطلاح یك طبقه بالاتر رفت. در حالی که در فیزیك کلاسیك از مکان و سرعت یك ذره صحبت می‌کردیم، و اکنون باید امواج احتمالی را در پیوستار سه بعدی که با این مسألهٔ تك ذره‌ای متناظر است، مورد ملاحظه قرار دهیم. فیزیك کوانتومی برای حل یك مسأله دستورالعمل خاص خود را دارد، مشروط برآن‌که بدانیم مسألهٔ مشابه را در فیزیك کلاسیك چگونه حل باید کرد.

در مورد یك ذرهٔ بنیادی، الکترون یا فوتون، امواج احتمالی در پیوستار سه بعدی داریم. این امواج رفتار آماری دستگاه را، در صورتی که آزمایش به دفعات انجام شود، مشخص می‌کنند. حال ببینیم اگر به‌جای یك ذره دو ذره، مثلاً دوالکترون، یك الکترون ویك فوتون یا یك الکترون و یك هسته، داشته باشیم چه می‌شود؟ در اینجا به دلیل وجود کنش متقابل میان ذرات، نمی‌توان آنها را جدا از هم در نظر گرفت و هرکدام را با یك موج احتمال در پیوستار سه بعدی توصیف کرد. در واقع فهم اینکه فیزیك کوانتومی چگونه به مسألهٔ دستگاهی که از دو ذره تشکیل شده است می‌پردازد، چندان دشوار نیست. باید یك طبقه پایین آمد و موقتاً به فیزیك کلاسیك رجوع کرد. مکان دو نقطهٔ مادی در فضا در هر لحظه با شش عدد، یعنی سه عدد برای هر یك از نقطه‌ها، مشخص می‌شود. مجموعهٔ مکانهای ممکن دو نقطهٔ مادی پیوستاری شش بعدی را تشکیل می‌دهد، نه مانند حالت مربوط به یك نقطه که پیوستاری سه بعدی است. اکنون چون مجدداً یك طبقه بالاتر به فیزیك کوانتومی رویم، امواج احتمالی خواهیم داشت که در پیوستاری شش بعدی هستند نه در پیوستاری سه بعدی که به

یك نقطهٔ مادی مربوط می‌شود. به همین ترتیب اگر سه یا چهار یا چند نقطه داشته باشیم، امواج احتمال، توابعی در پیوستارهای نه بعدی و دوازده بعدی و بیشتر خواهند بود.

از همین جا آشکار می‌شود که امواج احتمال از میدانهای گرانشی و الکترومغناطیسی، که در فضای سه بعدی وجود دارند و انتشار پیدا می کنند، انتزاعیتر هستند. زمینهٔ امواج احتمال پیوستاری است بسیار بعدی و تنها در مورد یك نقطه است که عدهٔ ابعاد آن با فضای فیزیکی برابر می گردد. اهمیت فیزیکی امواج احتمال تنها در آن است که از روی آن می توان به سؤالات معنی‌دار آماری، چه در مورد چند نقطه و چه در مورد یك نقطه، جواب داد. مثلاً در مورد یك الکترون می‌توان پرسید: که احتمال رسیدن آن به نقطهٔ معین، چقدر است؟ در مورد دو ذره ممکن است چنین سؤال شود: احتمال رسیدن این دو ذره به دو نقطهٔ مشخص در لحظهٔ معین چه اندازه است؟

نخستین گامی که ما را از فیزیك کلاسیك جدا کرد آن بود که از توصیف موارد انفرادی، به صورت رویدادهائی عینی در فضا و زمان، چشم پوشیدیم، و ناچار شدیم که با استفاده از امواج احتمال روش آماری را بکار بندیم. با انتخاب این راه ناگزیر باید گام دیگری هم در جهت تجرید و انتزاع برداریم، و امواج احتمال چندین بعدی را برای مسألهٔ چند جسم مطرح سازیم.

برای رعایت اختصار، هرچه را که غیر از فیزیك کوانتومی است فیزیك کلاسیك می‌خوانیم. فیزیك کلاسیك اختلافی ریشه‌ای با فیزیك کوانتومی دارد. قعمد فیزیك کلاسیك آن است که اشیاء را بصورتی که در فضا موجودند توصیف و قوانین حاکم بر تغییرات آنها را در زمان تدوین کند. ولی پدیده‌هائی که سرشت ذره‌ای و موجی ماده و اشعه را آشکار می‌سازند، و ماهیت ظاهراً آماری رویدادهای بنیادی از قبیل تلاشی رادیوآکتیوی و پراش و گسیل خطوط طیفی و نظایر آنها را فاش می کنند، ما را به عدول از این نگرش کلاسیك مجبور ساختند. کار فیزیك کوانتومی توصیف تك تك اشیاء در فضا و تغییرات آنها در زمان نیست. در فیزیك کوانتومی محلی برای عباراتی از این قبیل وجود ندارد: «این شیء چنین

و چنان است، و فلان خاصیت را دارد.» در عوض عباراتی از این گونه زیاد دیده می‌شود: «فلان اندازه احتمال دارد که این شیء چنین و چنان باشد و فلان خاصیت را داشته باشد.» در فیزیک کوانتومی جائی برای قوانین حاکم بر تغییرات تك تك اشیاء در زمان وجود ندارد، بلکه قوانینی موجود است که بر تغییرات احتمال در زمان ناظرند. فقط همین تغییر بنیادی (که به توسط فیزیك کوانتومی به فیزیك راه یافته است) بود که تبیین سرشت ناپیوسته و آماری پدیده‌هائی را میسر ساخت که در آنها کوانتومهای بنیادی ماده و اشعه وجود خود را آشکار می‌سازند.

مع‌ذلك مسائلِ باز هم دشوارتری در پیش است که هنوز به صراحت حل و فصل نشده‌اند. در اینجا فقط به بعضی از این مسائلِ حل نشده اشاره می‌کنیم. علم کتابی نیست که به آخر رسیده باشد و هرگز هم چنین نخواهد بود. هر پیشرفت مهم، مسائل جدیدی را به همراه می‌آورد، و هر تکاملی، در دراز مدت اشکالات تازه و عمیقتری را آشکار می‌سازد.

می‌دانیم که در مورد سادهٔ یك یا چند ذره می‌توان از توصیف کلاسیك به توصیف کوانتومی رفت و به‌جای توصیف رویدادهای عینی در زمان و مکان، به امواج احتمال متوسل شد. ولی مفهوم بسیار با اهمیت میدان را در فیزیك بخاطر می‌آوریم. آیا کنش متقابل میان کوانتومهای بنیادی ماده و میدان را چگونه باید توصیف کرد؟ اگر برای توصیف کوانتومی ده ذره، یك موج احتمال سی بعدی ضرورت دارد، ناچار برای توصیف کوانتومی میدان موج احتمال بی‌نهایت بعدی لازم می‌شود. گذار از مفهوم میدان کلاسیك به مسألهٔ امواج احتمالِ متناظر با آن در فیزیك کوانتومی گام بسیار دشواری است. یك طبقه بالا رفتن در اینجا کار آسانی نیست، و تلاشهائی که تاکنون برای حل این مسأله صورت گرفته است، رضایت بخش نبوده‌اند. مسألهٔ بنیادی دیگری نیز وجود دارد. در تمام بحثهای مربوط به گذار از فیزیك کلاسیك به فیزیك کوانتومی از همان توصیف معمولی پیش از نسبیتی استفاده شد که زمان و فضا را دو چیز متفاوت می‌شمرد. ولی اگر بخواهیم از توصیف کلاسیکی شروع کنیم که نظریهٔ نسبیت پیشنهاد می‌کند، صعود ما به مسألهٔ کوانتوم بسیار دشوارتر خواهد بود. این خود مسألهٔ دیگری است که فیزیك جدید به آن پرداخته

و هنوز به حل کامل و رضایت بخش آن دست نیافته است. دشواری دیگری نیز در ساختن فیزیك مناسبی برای ذرات سنگین، از جمله هستهٔ اتم، وجود دارد. علی‌رغم معلومات آزمایشی زیادی که در بارهٔ هستهٔ اتم بدست آمده و کوششهای فراوانی که برای درك مسألهٔ هسته‌ای انجام شده است، هنوز نسبت به بسیاری از پرسشهای بنیادی این حوزه از فیزیك در تاریکی قرار داریم.

شك نیست که فیزیك کوانتومی حقایق بیشماری را توضیح داده و در اغلب موارد به توافق کامل میان نظریه و مشاهده دست یافته است. فیزیك جدید کوانتومی باز هم بر فاصلهٔ ما از نگرش کهنهٔ مکانیکی افزوده است. بازگشت به مواضع پیشین از هر زمان دیگر نامحتملتر بنظر می‌رسد. مع‌ذلك تردیدی نیست که فیزیك کوانتومی هم بر دو مفهوم میدان و ماده مبتنی است و به این تعبیر نظریه‌ای دوگانه می‌باشد و در راه تحقق مسألهٔ قدیمی ما، که تحویل همه چیز به میدان بود، قدم تازه‌ای برنمی‌دارد.

آیا تحولات آینده در امتداد راهی است که فیزیك کوانتومی انتخاب کرده است، و یا محتملتر آن است که افکار انقلابی تازه‌ای به فیزیك راه یابد؟ آیا همان گونه که در گذشته نیز کراراً روی داده است، راه پیشرفت بار دیگر به پیچی تند می‌رسد؟

در چند سال اخیر تمام اشکالات فیزیك کوانتومی برگرد چند نقطهٔ اساسی متمرکز بوده‌اند. فیزیك بیصبرانه در انتظار حل آنها می‌باشد. ولی به هیچ وجه نمی‌توان گفت که چه وقت و در کجا بر این دشواریها چیره خواهیم شد.

فیزیك و واقعیت

از تکامل علم فیزیك، که به اجمال با اشاره به بنیادیترین افکار و اندیشه‌های آن بررسی شد، چه نتایج کلی حاصل می‌شود؟

علم صرفاً مجموعه‌ای از قوانین و طوماری از حقایق نامرتبط نیست. علم، با مفاهیم و اندیشه‌هایش، که آزادانه ابداع شده‌اند، زادهٔ عقل آدمی است. نظریه‌های فیزیك می‌کوشند تا تصویری از واقعیت رسم کنند و رابطه‌ای میان این تصویر و عالم پهناور دریافتهای حسی برقرار سازند.

بنابراین تنها محک حقانیت ساختمانهای فکری ما این است که آیا نظریه‌های ما این حلقهٔ اتصال را بوجود می‌آورند و اگر بوجود می‌آورند به چه طریق.

دیدیم که با پیشرفت فیزیك واقعیتهای جدیدی آفریده شدند. اما این زنجیرهٔ آفرینش با شروع فیزیك آغاز نمی‌شود بلکه از آن بسی فراتر می‌رود. یکی از ابتدائی‌ترین مفاهیم، مفهوم «جسم» است. مفاهیم درخت و اسب و هر جسم مادی دیگر مخترعاتی هستند که بر شالودهٔ تجربه ساخته شده‌اند، و البته دریافتهائی که منشأ این مفاهیم هستند، نسبت به دنیای پدیده‌های فیزیکی بسیار ابتدائی هستند. گربه‌ای که موشی را بازی می‌دهد نیز با فکر خود واقعیت ابتدائی خود را می‌آفریند. همین نکته که گربه در مقابل هر موشی که ببیند عکس‌العمل یکسانی از خود نشان می‌دهد، دلیل بر آن است که او نیز پیش خود مفاهیم و نظریه‌هائی می سازد که راهنمای او در عالم دریافتهای حسیش است.

«سه درخت» چیزی است که با «دو درخت» اختلاف دارد. همین‌طور «دو درخت» غیر از «دو تخته سنگ» است. مفاهیم اعداد خالص۲، ۳، ۴، ...، منتزع و جدا از اشیائی که سبب پیدایش آنها شده‌اند، آفریده‌های عقلی شخص متفکرند و به‌کار توصیف واقعیت دنیای ما می‌آیند.

احساس ذهنی و روانشناختی ما از زمان موجب می‌شود که بتوانیم دریافتهای حسی خود را تنظیم کنیم. مثلاً بگوئیم فلان رویداد پیش از فلان حادثه اتفاق افتاده است. ولی هر لحظه از زمان را، به کمك ساعت، به عددی ارتباط دادن و زمان را پیوستاری یك بعدی شمردن، خود ابداعی محسوب می‌شود؛ از همین گونه‌اند مفاهیم هندسهٔ اقلیدسی و هندسهٔ نااقلیدسی و مفهوم فضا به مثابهٔ پیوستاری سه بعدی.

فیزیك، در واقع، از اختراع جرم و نیرو و دستگاه ماندی شروع شد. این مفاهیم جملگی مخترعات آزاد فکر می‌باشند. این مفاهیم به تدوین دیدگاه مکانیکی منجر شدند. از نظر فیزیکدانِ ابتدای قرن نوزدهم واقعیت دنیای خارج متشکل از ذراتی بود که نیروهائی میان آنها اثر می‌کردند و این نیروها تنها به فاصله بستگی داشتند. او تا جائی که می‌توانست سعی کرد این اعتقاد را حفظ کند که تمام رویدادهای طبیعت را می‌توان به

کمك این مفاهیم بنیادی از واقعیت، تعلیل کرد. اشکالاتی که به انحراف عقربهٔ مغناطیسی مربوط می‌شد و همین طور دشواریهائی که از ساختمان اثیر نشأت می گرفت، فکر خلق واقعیتی زیرکانه‌تر را در ما برانگیخت. آنگاه اختراع مهم میدان الکترومغناطیسی پدیدار شد. تخیل علمی متهورانه‌ای لازم بود تا دریابد که ممکن است برای نظم بخشیدن و پی‌بردن به حقیقت رویدادها، رفتار خود اجسام واجد اهمیت نباشد بلکه رفتار چیزی میان آنها، یعنی میدان، ضرورت داشته باشد.

پیشرفتهای بعدی، مفاهیم کهنه را از بین بردند و مفاهیم جدیدی خلق کردند. نظریهٔ نسبیت، مفهوم زمان مطلق و دستگاه مختصات ماندی را باطل شمرد. از این پس دیگر زمینهٔ رویدادها زمان یك بعدی و فضای سه بعدی نبود، بلکه پیوستار فضا-زمانی چهاربعدی بود که خود ابداع فکریِ دیگری بود و خواص تبدیلاتیِ تازه‌ای داشت. دیگر به دستگاه مختصات ماندی احتیاجی نبود. هر دستگاه مختصاتی برای توصیف رویدادهای طبیعی شایسته شد.

نظریّهٔ کوانتومی نیز خصوصیتهای بنیادی و تازه‌ای را برای واقعیت آفرید. ناپیوستگی جانشین پیوستگی شد. به‌جای قوانینی که بر افراد ناظر است، قوانین احتمالاتی پدیدار شدند.

واقعیتی که فیزیك جدید آفریده است با واقعیت روزگاران اولیه فرسنگها فاصله دارد. ولی هدف نظریه‌های فیزیکی همان است که بود.

سعی ما بر آن است که به کمك نظریه‌های فیزیکی، راه خود را در انبوه حقایق مشهود پیدا کنیم و عالم دریافتهای حسی خود را بفهمیم و آن را تحت نظم و قاعده در آوریم. دوست داریم حقایق مشاهده شده به شکلی منطقی از برداشت ما نسبت به واقعیت بدست آیند. اگر معتقد نباشیم که به کمك ساختمانهای نظری خود می‌توانیم به درك واقعیت نایل شویم، و اگر باور نداشته باشیم که در جهان هماهنگی و انسجامی درونی وجود دارد، دیگر علمی ممکن نخواهد بود. این اعتقاد تا کنون انگیزهٔ همهٔ آفرینشهای علمی بوده است و در آینده نیز چنین خواهد بود. در ضمنِ کوششها و درگیرودار مبارزات پر هیجان میان نگرشهای کهنه و نو، اشتیاق همیشگی خود را برای درك جهان و اعتقاد راسخ خود را

به هماهنگی جهان باز می‌شناسیم.

خلاصهٔ آنچه گفته شد:

باز هم تنوع زیاد حقایق در قلمرو پدیده‌های اتمی ما را مجبور می کند که مفاهیم فیزیکی جدیدی اختراع کنیم. ماده ساختمانی دانه‌ای دارد و از ذرات بنیادی، که کوانتومهای ماده‌اند، ساخته شده است. همین طور بار الکتریکی نیز ساختمان دانه‌ای دارد، و مهمتر از همه اینکه انرژی نیز چنین است. فوتونها، کوانتومهای انرژی هستند و نور متشکل از آنهاست.

آیا نور موج است یا رگباری از فوتونها؟ آیا تابهٔ الکترونی رگباری از ذرات بنیادی است یا موج است؟ این سؤالها را آزمایش در برابر فیزیك طرح کرده است. برای آنکه جوابی به این پرسشها دهیم، باید از توصیف رویدادهای اتمی به صورت اموری که در فضا و زمان اتفاق می افتند، چشم بپوشیم و بیش از پیش از نگرش کهنهٔ مکانیکی دوری گزینیم. فیزیك کوانتومی قوانینی وضع می‌کند که بر گروه حکمفرماست نه بر افراد؛ خواص مورد بحث قرار نمی‌گیرند، بلکه احتمالات توصیف می‌شوند؛ قوانینی تدوین نمی‌شوند که آیندهٔ دستگاهها را آشکار سازند، بلکه قوانینی بدست می‌آید که بر تغییرات احتمال در زمان ناظر است و سر و کارشان با اجتماع گروه کثیری از افراد است.

واژه نامهٔ

فارسی به انگلیسی

آ

آزمایش	experiment
آزمایش خیالی	ideal experiment
آزمایش قطعی	crucial experiment
آمار	statistics
آهنربا	magnet
آهنربای میله‌ای	bar magnet
آهنگ	rate

الف

اتمگرایان	atomists
اتمگرائی	atomism
اثر	action, effect
اثر فوتوالکتریک	photoelectric effect
اثیر	ether
احتمال	probability
اختلاف پتانسیل	potential difference
اختیاری	arbitrary
ارتعاش	vibration
اشعهٔ X	X-rays
اصطکاک	friction
اصل بنیادی	fundamental principle
اصل نسبیت	principle of relativity
اصل نسبیت گالیله	Galilean principle of relativity
الکتروستاتیک	electrostatics
الکتروسکوپ	electroscope
الکترومغناطیس	electromagnetism
الکترومغناطیسی	electromagnetic
الکتریسیته	electricity
الگو	pattern
الگوی پراش	diffraction pattern
امتداد	direction
انبساط	expansion
انتشار	propagation
انحراف	deflection
اندازه	magnitude
انرژی	energy
انرژی پتانسیل	potential energy
انرژی جنبشی	kinetic energy
انرژی شیمیائی	chemical energy
انرژی گرمائی	heat energy
انرژی مکانیکی	mechanical energy
انعکاس	reflection
انفصالی	discrete
انقباض	contraction
انگاره‌ای	ideal
ایستا	static

ب

باتری ولتا	Volta battery
بار	charge
باردار	charged
بازتاب	reflection
برآمدگی (موج)	crest
بردار	vector
بردار سرعت	velocity vector

conservation of energy	بقای انرژی
crystal	بلور
crystalline	بلورین

پ

stable	پایدار
potential	پتانسیل
electric potential	پتانسیل الکتریکی
diffraction	پراش
diffract	پراشیدن
X-rays	پرتو–X
dynamic	پویا
arrow	پیکان (در بردارها)
Volta battery	پیل ولتا
continuum	پیوستار
Euclidean continuum	پیوستار اقلیدسی
n-dimensional continuum	پیوستار n–بعدی
space-time continuum	پیوستار فضا–زمان
non-Euclidean continuum	پیوستار نااقلیدسی
continuous	پیوسته

ت

beam	تابه
deceleration	تأنی
transformation	تبدیل
classical transformation	تبدیل کلاسیک
Lorentz transformation	تبدیل لورنتس
pulsation	تپش
pulsating	تپنده
pulsate	تپیدن
experience	تجربه
dispersion	تجزیه (نور)
radioactive disindegration	تجزیهٔ رادیواکتیوی
discharge	تخلیهٔ الکتریکی
interference	تداخل
formulation	تدوین
formulate	تدوین کردن
energy level	تراز انرژی
equilibrium	تعادل
generalization	تعمیم
diffraction grating	توری پراش
speed	تندی

ث

constant of motion	ثابت حرکت
ponderable	ثقیل

ج

attractive	جاذب
attraction	جاذبه
wave front	جبههٔ موج
attractive	جذبی
mass	جرم
body	جرم (در نجوم)
mass-energy	جرم–انرژی
rest mass	جرم سکون
gravitational mass	جرم گرانشی
inertial mass	جرم ماندی
current	جریان
induced current	جریان القائی
electric current	جریان الکتریکی
element	جزء
tides	جزر و مد
body	جسم
test body	جسم آزمایشی
radioactive material	جسم رادیواکتیو
rigid body	جسم صلب
kinetic	جنبشی
substance	جوهر
substance	جوهر مادی
electric substance	جوهر مادی الکتریکی
heat substance	جوهر مادی گرما
light substance	جوهر مادی نور
light substance	جوهر نورانی
direction, sense	جهت
mercury	جیوه

چ

viscous	چسبناک
viscous	چسبنده
source	چشمه
light source	چشمهٔ نور
density	چگالی
frame of reference	چهارچوب مرجع

ح

state	حالت
state of motion	حالت حرکت
motion	حرکت

حرکت انتقالی (در نجوم)	revolution
حرکت براونی	Brownian movement
حرکت مستقیم‌الخط	rectilinear motion
حرکت مطلق	absolute motion
حرکت نسبی	relative motion
حرکت وضعی (در نجوم)	rotation
حرکت یکنواخت	uniform motion
حرکت یکنواخت نسبی	relative uniform motion
حساب دیفرانسیل	differential calculus
حکمت طبیعی	natural philosophy
حلقه (روشن و تاریک در نورشناسی)	ring

خ

خط نیرو	line of force
خواص متری	metric properties
خیالی	ideal

د

دافع	repulsive
دافعه	repulsion
دانه	corpuscle
دریافت شهودی	intuition
دستگاه ماندی	inertial system
دستگاه مختصات	coordinate system
دفعی	repulsive
دلبخواه	arbitrary
دما	temperature
دماسنج	thermometer
دوار	rotating
دوران	rotation
دوقطبی	dipole
دوقطبی الکتریکی	electric dipole
دوقطبی مغناطیسی	magnetic dipole
دینامیک	dynamics

ذ

ذره	corpuscle, particle
ذرهٔ آزمایشی	test particle
ذرهٔ بنیادی	elementary particle

ر

رادیواکتیو	radioactive
رادیواکتیویته	radioactivity
ردیابی کردن	detect
رطوبت	humidity
رسانا	conductor
رسانائی	conductivity
رسانش	conduction

س

ساخت	structure
ساختار	structure
سازوکار	mechanism
ستارهٔ دوگانه	double star
سحابی	nebula
سرعت	velocity, speed
سرعتسنج	speedometer
سرعت نسبی	relative velocity
سطح مستوی	plane
سهمی	parabola
سیاره	planet
سیم‌پیچ	solenoid

ش

شاره	fluid
شتاب	acceleration
شتاب منفی	deceleration
شکست	refraction
شکست نور	refraction
شکننده (محیط شکنندهٔ نور)	refractive
شهود	intuition

ص

صفحه	plane
صلب	rigid
صوتشناختی	acoustical
صوتی	acoustical
صورتبندی	formulation

ض

ضرباهنگ	rythm

ط

طول موج	wavelength
طیف	spectrum
طیف مرئی	visible spectrum
طیف‌نما	spectroscope

ظ

ظرفیت گرمائی	heat capacity

ع

عایق	insulator
عایق‌بندی شده	insulated
عطارد	mercury
عقربهٔ مغناطیسی	magnetic needle
علامت نوری	light signal
عنصر	element

ف

فرابنفش	ultraviolet
فرضیه	hypothesis
فرورفتگی (موج)	trough
فروزان	incandescent
فروزش	incandescence
فروزنده	incandescent
فشار	pressure
فشار درونی	internal pressure
فضا	space
فضا-زمان	space-time, time-space
فضای میان ستارگان	interstellar space
فضای میان سیارات	interplanetary space
فعل و انفعال شیمیائی	chemical reactions
فوتون	photon
فیزیک آزمایشی	experimental physics
فیزیک هسته‌ای	nuclear physics

ق

قابل مشاهده	observable
قانون تبدیل	transformation law
قانون حرکت	law of motion
قانون ساختاری	stucture law
قانون طبیعت	law of nature
قانون طبیعی	law of nature
قانون گرانش	law of gravitation
قانون ماند	law of inertia
قطب مغناطیسی	magnetic pole

ك

کالریک	caloric
کشسان	elastic
کندشدن	decelerate
کنش	action
کنش متقابل	interaction
کوانتوم	quantum
کوانتوم بنیادی	elementary quantum
کوانتومها	quanta
کوانتومهای نور	light quanta

گ

گذار	transition
گذر	transition
گرانیگاه	center of gravity
گرما	heat
گرمای نهان تبخیر	latent heat of vaporization
گرمای نهان‌گداز	latent heat of melting
گرمای ویژه	specific heat
گره	node
گسسته	discrete
گسیل	emission
گسیلش	emission
گسیلنده	emitter

م

ماده	matter
ماند	inertia
ماندی	inertial
متوسط	average
مثلثات کروی	spherical trignometry
محلی	local
محیط	medium
محیط واسط	medium
مختص (در جمع مختصات)	coordinate
مدار	orbit
مدار (الکتریکی)	circuit
مدل	model
مرکز ثقل	center of gravity
مسألهٔ تک ذره	one-particle poblem
مستقیم‌الخط	rectilinear
مشاهده‌پذیر	observable
معادلات ماکسول	Maxwell's equations
مغناطیده	magnetized
مغناطیس	magnetism
مفهوم بنیادی	fundamental concept
مقدار مطلق	absolute value
مکان	position
مکان نسبی	relative position
مکانیک کلاسیک	classical mechanics
مکانیک کوانتومی	quantum mechanics
مکانیکی	mechanical

ملکول	molecule
من عندی	arbitrary
موج	wave
موج احتمال	probability wave
موج الکترونی	electron wave
موج تخت	plane wave
موج ساکن	standing wave
موج عرضی	transverse wave
موج طولی	longitudinal wave
موج کروی	spherical wave
موجگونه	wave like
موج نوری	light wave
موج ماده	matter wave
موضعی	local
میدان	field
میدان الکتروستاتیک	electrostatic field
میدان الکترومغناطیسی	electromagnetic field
میدان الکتریکی	electric field
میدان الکتریکی ساکن	electrostatic field
میدان گرانشی	gravitational field
میدان ماده	matter field
میدان مغناطیسی	magnetic field
میدان مغناطیسی ساکن	magnetostatic field

ن

ناپایدار	unstable
ناپیوستگی	discontinuity
ناپیوسته	discontinuous
نارسانا	insulator, dielectric
ناظر	observer
نامتغیر	invariant
ناوردا	invariant
ناوردائی	invariance
نرخ تبدیل	rate of exchange
نسبی	relative
نسبیت	relativity
نسبیت خصوصی	special relativity
نسبیت عمومی	general relativity
نظریه	theory
نظریهٔ الکترو مغناطیسی	electromagnetic theory
نظریهٔ جنبشی ماده	kinetic theory of matter
نظریهٔ جوهر مادی	substance theory
نظریهٔ جوهری	substance theory
نظریهٔ ذره‌ای نور	corposcular theory of light
نظریهٔ کوانتومی	quantum theory
نظریهٔ موجی نور	wave theory of light
نگرش	view
نگرش مکانیکی	mechanical view
نمایش	representation
نمایش به وسیلهٔ میدان	field representation
نمودار برداری	vector diagram
نوار (روشن و تاریک در نورشناسی)	band
نور	light
نورشناختی	optical
نورشناسی	optics
نور همگن	homogeneous light
نوری	optical
نوسان	oscillation
نوسان‌کردن	oscillate
نیرو	force
نیروی جذب به مرکز	centripetal force

و

واقعیت	reality
ورقه	plate
وضع	position

ه

هسته	nucleus
هم‌ارز مکانیکی گرما	mechanical equivalent of heat
همزمان شده	synchronized
همزمانی	simultaneity
همنام (بار الکتریکی)	like

ی

یکنواخت	uniform

واژه نامهٔ

انگلیسی به فارسی

A

absolute motion	حرکت مطلق
absolute value	قدرمطلق، مقدار مطلق
acceleration	شتاب
acoustical	صوتی، صوتشناختی
action	کنش، اثر
aether—ether	
arbitrary	من عندی، دلبخواه، اختیاری
arrow	پیکان
atomism	اتمگرائی
atomists	اتمگرایان
attraction	جاذبه
attractive	جاذب، جذبی
average	متوسط

B

band	نوار (روشن و تاریک نور در نورشناسی)
bar magnet	آهنربای میله‌ای
beam	تابه
body	جسم، جرم (در نجوم)
Brownian movement	حرکت براونی

C

caloric	کالریک
centre of gravity	مرکز ثقل، گرانیگاه
centripetal force	نیروی جذب به مرکز
charge	بار
charged	باردار
chemical energy	انرژی شیمیائی
chemical reaction	فعل و انفعال شیمیائی
circuit	مدار (الکتریکی)
classical mechanics	مکانیک کلاسیک
classical transformation	تبدیل کلاسیک
conduction	رسانش
conductivity	رسانائی
conductor	رسانا
conservation of energy	بقای انرژی
constant of motion	ثابت حرکت
continuum	پیوستار
Euclidean...	پیوستار اقلیدسی
n-dimensional...	پیوستار n-بعدی
non-Euclidean...	پیوستار نااقلیدسی
space-time...	پیوستار فضا-زمان
continuous	پیوسته
contraction	انقباض
coordinate	مختص (در جمع مختصات)
coordinate system	دستگاه مختصات
corpuscular theory of light	نظریهٔ ذره‌ای نور
corpuscle	ذره، دانه
crest	برآمدگی (موج)
crucial experiment	آزمایش قطعی
crystal	بلور
crystalline	بلورین
current	جریان
induced...	جریان القائی

D

decelerate	کند شدن
deceleration	تأنی، شتاب منفی
deflection	انحراف
density	چگالی
detect	ردیابی کردن
differential calculus	حساب دیفرانسیل
diffract	پراشیدن
diffraction	پراش
diffraction grating	توری پراش
dipole	دوقطبی
electric...	دوقطبی الکتریکی
magnetic...	دوقطبی مغناطیسی
direction	امتداد، جهت
discharge	تخلیهٔ الکتریکی
discontinuity	ناپیوستگی
discontinuous	ناپیوسته
discrete	انفصالی، گسسته
dispersion	تجزیه (نور)
double star	ستارهٔ دوگانه
dynamic	پویا
dynamics	دینامیک

E

elastic	کشسان
electric charge	بارالکتریکی
electric current	جریان الکتریکی
electric dipole	دوقطبی الکتریکی
electric field	میدان الکتریکی
electricity	الکتریسیته
electric potential	پتانسیل الکتریکی
electric substance	جوهر مادی الکتریکی
electromagnetic	الکترومغناطیسی
electromagnetic field	میدان الکترومغناطیسی
electromagnetic theory	نظریهٔ الکترو مغناطیسی
electromagnetic wave	موج الکترومغناطیسی
electromagnetism	الکترومغناطیس
electronic wave	موج الکترونی
electroscope	الکتروسکوپ
electrostatic field	میدان الکتروستاتیک، میدان الکتریکی ساکن
electrostatics	الکتروستاتیک
element	عنصر، جزء
elementary particle	ذرهٔ بنیادی
elementary quantum	کوانتوم بنیادی
emission	گسیل، گسیلش
emitter	گسیلنده
energy	انرژی
kinetic...	انرژی جنبشی
mechanical...	انرژی مکانیکی
potential...	انرژی پتانسیل
energy level	تراز انرژی
equilibrium	تعادل
ether	اثیر
Euclidean continuum	پیوستار اقلیدسی
expansion	انبساط
experience	تجربه
experiment	آزمایش
experimental physics	فیزیک آزمایشی

F

field	میدان
electromagnetic...	میدان الکترومغناطیسی
electrostatic...	میدان الکتروستاتیک
gravitational...	میدان گرانشی
field representation	نمایش به وسیلهٔ میدان
fluid	شاره
force	نیرو
line of...	خط نیرو
formulate	تدوین کردن، صورتبندی کردن
formulation	تدوین، صورتبندی
frame of reference	چهارچوب مرجع
friction	اصطکاک
fundamental concept	مفهوم بنیادی
fundamental principle	اصل بنیادی

G

Galilean relativity principle	اصل نسبیت گالیله
generalization	تعمیم
general relativity	نسبیت عمومی
gravitation	گرانش
gravitational field	میدان گرانشی
gravitational mass	جرم گرانشی

H

heat	گرما
specifit...	گرمای ویژه
heat capacity	ظرفیت گرمائی
heat energy	انرژی گرمائی

heat substance جوهرمادی گرما
homogeneous همگن
humidity رطوبت
hypothesis فرضیه

I

ideal خیالی، انگاره‌ای
ideal experiment آزمایش خیالی
incandescence فروزندگی، فروزش
incandescent فروزان، فروزنده
induced current جریان القائی
inertia ماند
inertial ماندی
inertial mass جرم ماندی
inertial system دستگاه ماندی
insulated عایق‌بندی شده
insulator نارسانا، عایق
interaction کنش متقابل
interference تداخل
interplanetary space فضای میان ــ سیاره‌ای، فضای میان سیارات
interstellar میان ــ ستاره‌ای، میان ستارگان
intuition شهود، دریافت شهودی
invariance ناوردائی
invariant ناوردا، نامتغیر

K

kinetic جنبشی
kinetic energy انرژی جنبشی
kinetic theory of matter نظریهٔ جنبشی ماده

L

latent heat of melting گرمای نهان‌گداز
latent heat of vaporization گرمای نهان تبخیر
law of gravitation قانون گرانش
law of inertia قانون ماند
law of motion قانون حرکت
law of nature قانون طبیعی، قانون طبیعت
light نور
homogeneous... نور همگن
light quanta کوانتومهای نور
light signal علامت نوری
light source چشمهٔ نور
light substance جوهر مادی نور
light wave موج نوری
like همنام (بار الکتریکی)
line of force خط نیرو
local موضعی، محلی
longitudinal wave موج طولی
Lorentz transformation تبدیل لورنتس

M

magnet آهنربا
magnetic dipole دوقطبی مغناطیسی
magnetic field میدان مغناطیسی
magnetic needle عقربهٔ مغناطیسی
magnetic pole قطب مغناطیسی
magnetism مغناطیس
magnetized مغناطیده
magnetostatic field میدان مغناطیسی ساکن
magnitude اندازه
mass جرم
mass-energy جرم‌ــانرژی
matter ماده
matter field میدان ماده
matter wave موج ماده
Maxwell's equation معادلات ماکسول
mechanical مکانیکی
mechanical energy انرژی مکانیکی
mechanical equivalent of heat هم‌ارز مکانیکی گرما
mechanical view نگرش مکانیکی
mechanism سازوکار
medium محیط، محیط واسط
mercury عطارد، جیوه
metric properties خواص متری
model مدل
molecule ملکول
motion حرکت

N

natural philosophy حکمت طبیعی
n-dimensional continuum پیوستار n بعدی
nebula سحابی
node گره
non-Euclidean continuum پیوستار نااقلیدسی
nuclear physics فیزیک هسته‌ای
nucleus هسته

O

observable	مشاهده‌پذیر، قابل مشاهده
observer	ناظر
one-particle problem	مسالهٔ تک ذره
optical	نوری، نورشناختی
optics	نورشناسی، نورشناخت
orbit	مدار
oscillate	نوسان کردن
oscillation	نوسان

P

parabola	سهمی
pattern	الگو
diffraction...	الگوی پراش
photoelectric effect	اثر فوتو الکتریک
photon	فوتون
plane	صفحه، سطح مستوی
planet	سیاره
plane wave	موج تخت
plate	ورقه
ponderable	ثقیل
position	مکان، وضع
potential	پتانسیل
potential difference	اختلاف پتانسیل
potential energy	انرژی پتانسیل
pressure	فشار
internal...	فشار درونی
principle of relativity	اصل نسبیت
probability	احتمال
probability wave	موج احتمال
propagation	انتشار
pulsate	تپیدن
pulsating	تپنده
pulsation	تپش

Q

quanta	کوانتومها
quantum	کوانتوم
quantum mechanics	مکانیک کوانتومی
quantum theory	نظریهٔ کوانتومی

R

radioactive disintegration	تجزیهٔ رادیواکتیوی
radioactive material	جسم رادیواکتیو
radioactivity	رادیواکتیویته
rate	آهنگ
rate of exchange	نرخ تبدیل
reality	واقعیت
rectilinear	مستقیم‌الخط
rectilinear motion	حرکت مستقیم‌الخط
reflection	انعکاس، بازتاب
refraction	شکست، شکست نور
refractive	شکننده
relative	نسبی
relative motion	حرکت نسبی
relative position	مکان نسبی
relative uniform motion	حرکت یکنواخت نسبی
relative velocity	سرعت نسبی
relativity	نسبیت
general...	نسبیت عمومی
special...	نسبیت خصوصی
representation	نمایش
repulsion	دافعه
repulsive	دافع، دفعی
rest mass	جرم سکون
revolution	حرکت انتقالی (در نجوم)
rigid	صلب
rigid body	جسم صلب
ring	حلقه (روشن و تاریک در نورشناسی)
rotation	دوران، حرکت وضعی (در نجوم)
rotating	دوار
rythm	ضرباهنگ

S

signal	علامت، پیام
simultaneity	همزمانی
simultaneous	همزمان
solenoid	سیم پیچ
source	چشمه
space	فضا
interplanetary...	فضای میان سیارات
space-time	فضا – زمان
space-time continuum	پیوستار فضا–زمان
special relativity	نسبیت خصوصی
specific heat	گرمای ویژه
spectroscope	طیف نما
spectrum	طیف
visible spectrum	طیف مرئی
speed	تندی، سرعت

speedometer سرعتسنج، کیلومترشمار
spherical trignometry مثلثات کروی
spherical wave موج کروی
stable پایدار
standing wave موج ساکن
state حالت
state of motion حالت حرکت
static ایستا
statics استاتیک
statistics آمار
structure ساخت، ساختار
structure law قانون ساختاری
substance جوهرمادی، جوهر
heat... جوهر مادی گرما
light... جوهر مادی نور، جوهر نورانی
substance theory نظریهٔ جوهرمادی، نظریهٔ جوهری
synchronized همزمان شده

T

temperature دما
test body جسم آزمایشی
test particle ذرهٔ آزمایشی
theory نظریه
thermometer دماسنج
tides جزر و مد
transformation تبدیل
Lorentz transformation تبدیل لورنتس
transformation law قانون تبدیل
transition گذار، گذر
transverse wave موج عرضی
trough فرورفتگی (موج)

U

ultraviolet فرابنفش
uniform یکنواخت
uniform motion حرکت یکنواخت
unstable ناپایدار

V

vector بردار
vector diagram نمودار برداری
velocity سرعت
relative velocity سرعت نسبی
velocity vector بردار سرعت
vibration ارتعاش
view نگرش
viscous چسبنده، چسبناک
visible spectrum طیف مرئی
Volta battery پیل ولتا، باتری ولتا

W

wave موج
longitudinal... موج طولی
plane... موج تخت
spherical... موج کروی
standing... موج ساکن
transversal... موج عرضی
wave front جبههٔ موج
wavelength طول موج
wavelike موجگونه
wave mechanics مکانیک موجی
wave theory of light نظریهٔ موجی نور

X

X-rays پرتو–X، اشعهٔ–X

فهرست راهنما

آ

آزمایش قطعی ۴۵

الف

اثر فوتوالکتریک ۲۲۲
اثیر ۹۸، ۱۰۱، ۱۰۵، ۱۰۷ تا ۱۰۹، ۱۴۵، ۱۴۷، ۱۴۸،
۱۵۰، ۱۵۱ تا ۱۵۵
اجزای باتری ۷۹
احتمال ۲۴۲
ارسطو ۱۴
ارشتد ۸۱، ۸۳
اصل نسبیت گالیله ۱۴۰
«اصول» ۱۸
الکتروسکوپ ۶۵
الکترون ۲۱۸
انتشار مستقیم‌الخط نور ۸۶ تا ۸۸، ۱۰۴
انرژی پتانسیل ۴۸ تا ۵۰
انرژی جنبشی ۴۸ تا ۵۰
انرژی گرمائی ۵۰، ۵۲
انرژی مکانیکی ۵۰

ب

باتری ولتا ۷۹
بار الکتریکی ۷۲ تا ۷۴
بازتاب نور ۸۸
براون ۵۹، ۶۰
بردار سرعت ۲۷
بردارها ۱۸ تا ۲۴
بطلمیوس ۱۸۵، ۱۸۶
بلک ۴۰، ۴۱، ۵۰
بلور ۲۳۰، ۲۳۱
بلور تورمالین ۱۰۶
بور ۲۲۹، ۲۳۰، ۲۴۵
بورن ۲۴۵

پ

پتانسیل الکتریکی ۷۲ تا ۷۴
پراش پرتو-X ۲۳۱، ۲۳۲
پراش موج الکترونی ۲۳۲، ۲۳۸
پراش نور ۱۰۴
پرتو-X ۲۳۰ تا ۲۳۲
پلانک ۲۲۳
پیوستار چهاربعدی ۱۸۲
پیوستار دوبعدی ۱۷۵
پیوستار سه‌بعدی ۱۷۶
پیوستار یک‌بعدی ۱۷۵

ت

تامسن ۲۱۸
تبدیل کلاسیک ۱۴۵
تبدیل لورنتس ۱۶۵ تا ۱۶۷، ۱۶۹
تجزیهٔ رادیواکتیوی ۲۴۳
تجزیهٔ نور ۹۰، ۱۰۲
تراز انرژی ۲۲۹
تصویر ایستای حرکت ۱۸۰، ۱۸۱
تصویر پویای حرکت ۱۸۰
تعمیم ۲۵
تغییر سرعت ۱۶، ۱۷، ۲۴، ۲۷ تا ۲۹، ۳۱

ث

ثابت حرکت ۴۹

ج

جرم ۳۶
جرم اتم ئیدروژن ۲۱۶
جرم الکترون ۲۱۹
جرم-انرژی ۱۷۳
جرم سکون ۱۷۱
جرم گرانشی ۱۹۰،۱۸۸،۳۷
جرم ماندی ۱۹۰،۱۸۸،۳۷
جرم ملکول ئیدروژن ۲۱۶
جریان ۷۸، ۷۹
جریان القائی ۱۲۲
جریان الکتریکی ۷۹،۷۸
جسم آزمایشی ۱۱۲
جسم رادیواکتیو ۱۷۱
جوهر مادی گرما ۴۴،۴۳
جوهرهای مادی الکتریکی ۶۷
جوهرهای مادی بی‌وزن ۷۲،۴۳
جوهر نورانی ۹۰

چ

چهارچوب مرجع ۱۳۸

ح

حرکت براونی ۵۹ تا ۶۲
حرکت مستقیم‌الخط ۱۸
حرکت مطلق ۱۸۶،۱۸۵،۱۵۱
حرکت نسبی یکنواخت ۱۵۱
حرکت یکنواخت ۱۶

خ

خطوط طیفی ۲۲۸
خطوط نیرو ۱۱۲
خمیدن شعاع نور در میدان گرانشی ۲۰۸،۱۹۳
خواص متری ۲۰۳

د

دستگاه ماندی ۱۸۳،۱۴۰
دستگاه ماندی موضعی ۱۸۹
دستگاه مختصات ۱۳۷ تا ۱۳۹
د.م.ا ۱۳۸
دما ۴۲،۴۱
دوبروی ۲۴۵،۲۳۶،۲۳۳
«دو علم جدید» ۸۳،۱۷
دوقطبی الکتریکی ۷۶
دوقطبی مغناطیسی ۷۶
دوقطبیهای مغناطیسی بنیادی ۷۷
دیدگاه مکانیکی ۱۰۸،۱۰۴
دیراک ۲۴۵

ذ

ذرات بنیادی ۱۷۲
ذرهٔ نور ۲۲۳،۸۸
ذیمقراطیس ۵۴

ر

رادیوم ۱۷۲،۱۷۱
راذرفورد ۲۲۱
رساناها ۶۸
روش آماری ۲۴۲
رولاند ۸۲
رومر ۸۵
رومفورد ۵۰،۴۶،۴۵

ژ

ژول ۵۰ تا ۵۲

س

ساختار میدان ۱۲۹،۱۲۷
ساعتهای همزمان شده ۱۶۰،۱۵۹
سدیم ۹۱
سرعت موج الکترومغناطیسی ۱۳۲
سرعت نور ۸۶
سیم‌پیچ ۱۱۶

ش

شرودینگر ۲۴۵،۲۳۳
شکست نور ۱۰۰،۹۹،۸۸،۸۷
شمارهٔ ملکولها ۶۲

ط

طول موج ۱۰۱،۹۳
طیف مرئی ۲۳۰،۹۰
طیف نما ۲۲۸

ظ

ظرفیت گرمائی ۴۲

ع

عایق ۶۵
عطارد ۲۰۸،۲۰۹

ف

فارادی ۱۱۱،۱۲۲
فرنل ۱۰۳
فوتون ۲۲۳
فوتون فرابنفش ۲۳۵
فیزو ۸۵
فیزیک هسته‌ای ۲۲۱

ق

قانون حرکت ۳۶
قانون گرانش ۳۳
قانون ماند ۱۵،۱۳۶
قطب آهنربا ۷۵
قوانین تبدیل ۱۴۳

ک

کالریک ۴۳
کپرنیکوس ۱۳۷،۱۸۵،۱۸۶
کوانتوم بنیادی ۲۱۵
کوانتومهای نور ۲۲۳
کولن ۷۱،۷۲،۷۷

گ

گالوانی ۷۹
گالیله ۱۳ تا ۱۷،۴۰،۵۴،۸۳،۸۵
گرما ۳۹ تا ۴۶
گرمای ویژه ۴۲
گره ۲۴۴

ل

لایب نیتس ۲۹

م

ماکسول ۱۱۱
مایر ۵۰
مایکلسن ۸۶،۱۵۳
مختص یک نقطه ۱۴۲
معادلات ماکسول ۱۲۶ تا ۱۳۴
ملکولها ۵۷
موج ۹۲
موج احتمال ۲۴۶
موج الکترونی ۲۳۲،۲۳۷
موج تخت ۹۶
موج ساکن ۲۳۴
موج طولی ۹۴،۱۰۵
موج عرضی ۹۴،۱۰۵
موج کروی ۹۵
مورلی ۱۵۳
میدان ۱۱۲
میدان استاتیک ۱۳۶
میدان الکترومغناطیسی ۱۲۹،۱۳۰
میدان ساکن ۱۳۶
میدان و ماده ۲۱۰

ن

نارسانا ۶۸
نامتغیر ۱۴۳
ناوردا ۱۴۳
نرخ تبدیل ۵۰
نسبیت ۱۵۶
نسبیت خصوصی ۱۸۶
نسبیت عمومی ۳۸،۱۸۶
نظریهٔ الکترومغناطیسی نور ۱۳۳
نظریهٔ جنبشی ۵۶،۵۷،۵۹،۶۱،۶۲،۶۴
نگرش مکانیکی ۵۶،۷۸،۱۳۳
نمایش به وسیلهٔ میدان ۱۱۳
نور سفید ۸۹
نور همگن ۹۱
نیرو ۱۷،۲۴،۲۵،۲۸،۲۹
نیرو و ماده ۵۴
نیوتن ۱۳،۱۵ تا ۱۸،۲۹،۷۲،۸۲،۸۹،۹۰

و

ولتا ۷۹،۸۰

ه

هایزنبرگ ۲۴۵
هرتز ۱۱۱،۱۳۲
هسته ۲۲۱
هلمهوتز ۵۵،۵۶
هم‌ارز مکانیکی گرما ۵۲
هویگنس ۹۷

ی

یانگ ۱۰۳