



نظریه‌های همه چیز

درباره‌ی مترجم

تورج حوری متولد سال ۱۳۴۱ فارغ‌التحصیل دوره‌ی کارشناسی فیزیک اتمی و مولکولی از دانشگاه تهران، دوره‌ی کارشناسی ارشد فیزیک ذرات بنیادی از دانشگاه تبریز با عنوان پایان‌نامه‌ی «استحاله‌ی بوزون-فرمیون القا شده توسط توپولوژی» و دوره‌ی دکتری فیزیک ذرات بنیادی با گرایش نظریه‌ی ریسمان از دانشگاه فردوسی مشهد با عنوان پایان‌نامه‌ی «مکانیزم جاذب در سیاهچاله‌های غیرحدی». نویسنده دو مقاله ISI در مجله‌ی معتبر ژورنال فیزیک انرژی‌های بالا (JHEP) در زمینه‌ی سیاهچاله‌ها و تقارن‌های نظریه‌ی ریسمان.

نظریه‌های همه چیز

فرانک کلوز

ترجمه‌ی تورج حوری

انتشارات مازیار

فهرست مطالب

۱. گستاخی لرد کلوین ۷
۲. یک نظریه‌ی همه‌چیز چیست و همه‌چیز به چه معناست؟ ۹
۳. نظریه‌ی لاگ پشت‌های بی‌جان نیوتون ۱۳
۴. نظریه کوانتومی چیزهای کوچک ۳۶
۵. مواد وزین ۵۸
۶. ابرهای گرانش کوانتومی ۷۵
۷. بازگشت به آینده ۹۶
- یادداشت‌ها مراجع، مطالعات بیشتر ۱۰۲
- نمایه ۱۰۳

گستاخی لرد کلوین

در سال ۱۹۸۰ استیون هاکنینگ بر این باور بود که پایان فیزیک نظری نزدیک است و از راه رسیدن یک نظریه‌ی همه‌چیز را قریب الوقوع می‌دانست. او ناخودآگاه ادعای دانشمند آمریکایی آلبرت مایکلسون در ۱۸۹۴ را بازگو می‌کرد که «اصول بنیادین بزرگ با استحکام پی‌ریزی شده‌اند. حقایق دیگر فیزیک را باید در ششمین رقم اعشار جستجو کرد» یا از آن لرد کلوین در ۱۹۰۰ را که «اکنون در فیزیک چیز تازه‌ای برای کشف به جا نمانده است. همه‌ی آنچه که باقی مانده، اندازه‌گیری‌های دقیق‌تر و دقیق‌تر است؟ کسی چه می‌داند.

تنها طبیعت گستردگی آن سوی افق دید ما را می‌داند و بارها محدودیت‌های تصورات ما را آشکار کرده است. هنوز چند سالی بیش از اشارات لرد کلوین نگذشته بود که کشف ساختار اتم و ظهور مکانیک کوانتومی و نظریه‌ی نسبیت، نشان داد که شور و نشاط غول‌های علمی قرن نوزدهم ساده‌لوحانه بوده است. حقیقت معانی متنوعی دارد و در نتیجه برداشت‌ها نسبتاً متفاوتی از آن می‌شود. کلام لرد کلوین (یقیناً) و آلبرت مایکلسون (تا حدی) خارج از متن و اشتباه نقل شده‌اند. در یک تفسیر دقیق‌تر، آنچه که آن‌ها گفته‌اند، برای جویندگان نظریه‌ی همه‌چیز پیام عمیقی دربر دارد.

این عقیده‌ی سرسختانه و پایدار لرد کلوین که نقش اصلی فیزیک، اندازه‌گیری هرچه دقیق‌تر کمیت‌های شناخته شده است، در واقع از اشارات مایکلسون الهام گرفته شده بود. لرد کلوین تحت تأثیر نظریه‌ی تابش الکترومغناطیسی مکسول و همین‌طور ترمودینامیک، که توصیفی مکانیکی از گرماست — که خود کلوین از معماران اصلی آن بود — قرار داشت. او احساس کرد که مفهوم انرژی را احتمالاً می‌توان با در اختیار داشتن مجموعه‌ای از اصول زیربنایی جامع، برحسب جنبش ذرات درک کرد.

در روز جمعه ۲۷ آوریل سال ۱۹۰۰، کلوین در موسسه‌ی سلطنتی لندن، جایی که مایکل فارادی در زمینه‌های الکتریسیته و مغناطیس به کشفیاتی نائل شده بود، طی یک سخنرانی درباره‌ی دیدگاه‌های خود، فرا رسیدن عصر نوینی را در فیزیک نوید می‌داد. به جای این ادعای غیرانتقادی که ترکیب نور، گرما و مکانیک به معنای نزدیک بودن

پایان فیزیک است، کلوین سخنان خود را اینگونه آغاز کرد: «زیبایی و وضوح نظریه‌ی دینامیکی که ادعا می‌کند نور و گرما مدهای حرکتی هستند، در حال حاضر پشت دو ابر پنهان شده‌اند.» این سخنرانی بعداً به سخنرانی «دو ابر» مشهور شد. برخلاف این باور عام که لرد کلوین در سخنرانی خود، مغرورانه پایان فیزیک را اعلام می‌کرد او در واقع توجهات را به سوی دو معمای حل نشده جلب می‌کرده است. اگر او بر خطا بود، این امید وجود می‌داشت که «دو ابر» صرفاً بنخارهای نازکی در یک آسمان آبی باشند. اما در حقیقت آنها منادیان طوفان بودند. برطرف کردن آنها نیازمند ساختن دو ستون عظیم فیزیک قرن بیستمی بود: نظریه‌ی نسبیت اینشتین و نظریه‌ی کوانتوم.

بنابراین، لُرد کلوین مطمئناً در اشتباه بود، با این وجود او از محدودیت‌های فیزیک اواخر قرن نوزدهم به خوبی آگاهی داشت. در حقیقت، با یک بازنگری معلوم می‌شود که در زمان اشارات او، نشانه‌هایی از انقلابات قریب‌الوقوع در فیزیک قرن بیستمی آشکار شده بود. این موضوع ارزش به خاطر سپردن را دارد، بخصوص وقتی این ادعاهای جدیدتر را که پایان فیزیک بار دیگر در افق دید قرار گرفته است را ارزیابی می‌کنیم.

یک نظریه‌ی همه چیز چیست و همه چیز به چه معناست؟

به طور کلی نظریه‌های همه چیز می‌توانند چون نظریه‌هایی توصیف شوند که در همه‌ی شاخه‌های مطرح دانش کنونی کار می‌کنند — فیزیک، نجوم، ریاضیات و غیره — نظریه‌هایی که می‌خواهند همه‌ی آنچه را که تاکنون درباره‌ی عالم شناخته‌ایم توضیح دهند. همین جا می‌توان دید که یک نظریه‌ی همه چیز، هدفی متحرک است. دوران استیلا‌ی یک توضیح روشنگر از عالم شناخته شده می‌تواند دهه‌ها، بلکه قرن‌ها به طول انجامد. این مدت می‌تواند بستری برای پیشرفت‌های بی‌شمار در علم و فناوری باشد. سپس شاید به عنوان یک نتیجه‌ی مستقیم یا غیرمستقیم این پیشرفت‌ها، کشف «جدیدی» صورت گیرد و به این «همه چیز»ی اضافه شود که شناخته شده است اما نمی‌تواند از سوی نظریه‌ی پذیرفته شده با واژگانی سازگار با خود نظریه توضیح داده شود. پس برای این «همه چیز» جدید نظریه‌ی جدیدی لازم می‌آید و این دور ادامه می‌یابد.

«دو ابر» لرد کلونین پیام‌آور جابه جایی‌های الگوواری از درک ما از فضا-زمان و ساختار ریزمقیاس ماده بود. با توجه به وسعت و غنای فیزیک هسته‌ای و فیزیک کوانتومی و اینکه نظریه‌ی نسبیت اینشتین کارهای بزرگ نیوتون در گرانش و مکانیک را در خود مستحیل کرد، تعجب‌آور است که چگونه علم قرن نوزدهمی توانسته است نسبت به آن‌ها نایبنا بماند. توضیح اینکه چگونه این ارکان بنیادین دانش، در شرایطی که آیزاک نیوتون، جیمز کلرک مکسول و لرد کلونین نظریه‌های همه چیز را خلق کرده بودند، زمان چنان درازی پنهان ماندند، تنها با ویژگی‌های ژرف جهان ما و قابلیت ما در گشودن موفقیت‌آمیز رمزهای قوانین حاکم بر آن میسر است.

یک نظریه‌ی همه چیز (که گاهی با مخفف TOE نشان داده می‌شود) باید قادر به توصیف طبیعت در تمام فواصل، زمان‌ها و انرژی‌ها باشد. تجربه‌ی ما با همه‌ی رشدی که طی قرن‌ها داشته است، هنوز تنها به بخش کوچکی از این قلمروها محدود است.

در عمل، طبیعت این طیف وسیع را به طور همگن نمی‌پوشاند و می‌توانیم برای زیرمجموعه‌هایی از این پدیده‌ها، نظریه‌هایی بنا کنیم به طوری که چشم‌پوشی از یک ناحیه مانع پیشرفت در زمینه‌های دیگر نباشد.

اینکه نتوانسته‌ایم درک خود را بدون داشتن یک نظریه‌ی واقعی همه‌چیز پیش ببریم، پیامد روشی است که براساس آن پدیده‌های طبیعت می‌توانند به سازمان‌های جداگانه گروه‌بندی شوند: آن‌ها چیزی را شکل می‌دهند که من آن را «پیاذ کیهانی» نامیده‌ام که لایه‌های آن به هم متصل‌اند اما محتوای آن‌ها با یک تقریب عالی مستقل از یکدیگر هستند. یک نظریه‌ی همه‌چیز در یک لایه موفق می‌شود زیرا طبیعت به طور مؤثر، نمودهای لایه‌های دیگر را به قرنطینه می‌سپارد. آن‌ها در نتیجه‌ی یک جدایش مناسب، در توصیف پدیده‌های لایه‌ی مورد نظر بدون ایفای نقش می‌مانند.

در این کتاب این تقسیم‌بندی را برای جهان مادی در مقیاس گسسته نشان خواهم داد و مقیاس‌های مختلف انرژی، دما یا تفکیک فضایی را که مطالعه‌ی آن‌ها برای آشکار کردن دینامیک‌شان ضروری است، به طور کمی بیان خواهم کرد. برای مثال، پیش از قرن بیستم فیزیک به دماهایی پایین‌تر از دمای کوره‌های دمشی محدود بود: حتی میلیون‌ها درجه‌ی سانتی‌گراد که دمای متعارف فیزیک هسته‌ای است نیز بیرون از محدوده بودند چه رسد به هزاران تریلیون درجه‌ای که بوزون هیگز در آن پدیدار می‌شود. بنابراین می‌توانیم یک نظریه‌ی همه‌چیز بنا کنیم که در آن «همه چیز» به معنای «محدوده‌ی خاصی از انرژی» باشد. رشد و توسعه‌ی تاریخی علم نیز همین است. رسیدن به شرایطی که برخورددهنده‌ی بزرگ هادرون در سرن (CERN) آشکار کرد قرن‌ها به درازا کشید اما در این راه دانشمندان رشته‌ای از نظریه‌ها را توسعه دادند که در محدوده‌های مختلفی از انرژی کاربرد داشتند.

به عنوان مثال، در مقیاس انسانی، چنان نظریه‌هایی از قبل وجود داشته‌اند. روابط ریاضی دلالت‌کننده بر هر چیزی بزرگ‌تر از هسته اتمی از زمان کارهای اروین شرودینگر فیزیکدان اتریشی، ورنر هایزنبرگ فیزیکدان آلمانی و پل دیراک ریاضیدان کمبریج، از نود سال قبل با ما بوده است. معادلات این نظریه که رفتار الکترون‌ها و اتم‌ها را توصیف می‌کنند به دانشجویان آموزش داده می‌شوند. اما آسان بودن آن‌ها گمراه‌کننده است چرا که جز برای چند مورد ساده، به کار بستن آن‌ها دشوار و حل آن‌ها غیرممکن است. تنها با تکامل رایانه‌های قدرتمند در سال‌های اخیر است که دامنه‌ی حل چنان مسائلی گسترده‌تر شده است. کسی تاکنون از این معادلات حتی خواص اسید آمینه‌های ساده را نیز استنتاج نکرده است چه رسد به کارکردهای مولکول DNA، اما این موضوع تردیدی در پیشرفت حیرت‌انگیز زیست‌شناسی مدرن به وجود

نمی‌آورد. به طریق مشابه با شروع از «نظریه‌ی همه‌چیز اجسام بزرگ متحرک» نیوتون، می‌توانیم ماه گرفتگی و خورشید گرفتگی را پیش‌بینی کنیم اما وضع هوا را نه. بنابراین وقتی نظریه‌ی همه‌چیز دیراک برای رفتار الکترون‌ها در حاشیه‌ی اتم‌ها به کار گرفته می‌شود، می‌توان پیچیدگی‌های هسته‌ی اتم را مجزا و از آن چشم‌پوشی کرد. نظریه‌ی همه‌چیز برای توالی کد ژنتیکی می‌تواند از نمادهای A، C، G و T که معرف آدنین، سیتوزین، گوانین و تیمین به عنوان واحدهای متصل اسیدهای نوکلئیک در یک رشته‌ی DNA هستند، ناشی شود. اگر هدف اولیه‌ی شما دستکاری این زنجیره‌های اسیدهای آمینه است، نظریه‌ی بنیادی‌تر دیراک برای فیزیک اتمی و شیمی که اساس وجود و ساختار مولکول‌های پیچیده است، می‌تواند به قرنطینه برود. حتی امروز، نیز برای برخی محدوده‌های انرژی هیچ نظریه‌ای وجود ندارد و جستجوی مدرن برای نظریه‌های واقعی همه‌چیز شامل یافتن نظریه‌هایی برای پوشاندن تمام مقیاس‌های انرژی است. با نبود یک نظریه‌ی همه‌چیز فراگیر یا با ناتوانی ما در حل معادلات «نظریه‌ی بعضی چیزها»-یی که فرموله شده‌اند، پیشرفت علم محدود نشده است. یکی از موضوعات این کتاب پاسخ به این پرسش است که آیا جستجوی یک «نظریه‌ی راستین همه‌چیز» هدفی واقع بینانه است و در کنار آن نشان دادن این حقیقت است که پیشرفت علم کاربردی تا حد زیادی مستقل از وجود چنین نظریه‌هایی است.

ساختار کتاب نشان خواهد داد که چگونه این هدیه‌ی طبیعت که علم می‌تواند مناطق «همه چیز» را در قرنطینه نگه دارد، انگیزه‌ی پیشرفت فیزیک نظری طی قرن‌ها شده است. فصل‌های ۳ و ۴ با شروع از مکانیک نیوتونی در قرن هفدهم و کاربرد آن در ترمودینامیک در قرن نوزدهم، این تاریخ را تا زمان حاضر مرور می‌کند. الکتریسیته، مغناطیس و نور با نظریه‌ی مکسول در قرن نوزدهم توصیف شدند اما داده‌های جدید منجر به تولد نظریه‌های کوانتوم و نسبیت خاص شدند. پیوند نسبیت با نظریه‌ی کوانتومی و دانش مکانیک، به نظریه‌ی بنیادین دیراک انجامید که زیربنای شیمی و ساختار DNA و الهام‌بخش مدل استاندارد به عنوان نظریه‌ی اصلی ذرات و نیروها با بوزون کشف‌شده‌ی هیگز به منزله‌ی سنگ سرطاق آن است. فصل ۵ نظریه‌های گرانش و شکوفا شدن آن‌ها در نظریه‌ی نسبیت عام را شرح می‌دهد، اما تلاش برای یافتن یک نظریه‌ی ماندگار برای گرانش کوانتومی موضوع فصل ۶ است. در صفحات واپسین، این ایده‌ها برای ارزیابی مسیر محتمل به سوی نظریه‌ی نهایی همه‌چیز باهم جمع می‌شوند. اما عنوان کتاب خود دو پرسش مطرح می‌کند: یک نظریه چیست و «همه چیز» به

چه معناست؟ سرود را «حیات، جهان هستی و همه چیز»^۱ اجرامی کند. در این کتاب «حیات» و تا حد زیادی «جهان هستی در قرنطینه خواهند بود: «همه چیز» به بقیه ارجاع دارد یعنی به محتوای بی‌جان جهان هستی. توضیح اینکه این محتویات از کجا آمده‌اند، درک قوانین حاکم بر رفتار آن‌ها و توضیح اینکه چرا چنین خواصی دارند — خواصی که وجود حیات را به شکلی که ما می‌شناسیم ممکن می‌کنند — بالاترین چالش فیزیکی نظری است.

نظریه‌پردازی درباره‌ی همه‌ی این موضوعات آسان است. اما این بدان معنا نیست که هر نظریه‌ای بدرد علم می‌خورد. علم بدنه‌ای از معرفت است که به داده‌های تجدیدپذیر و قابل نمایش تکیه دارد. اگر داده‌ها با نظریه‌ی شما ناموافق باشند، علم از شما انتظار تجدید نظر دارد؛ و این وجه تمایز علم با آیین‌ها و مکاتب است که واقعیت‌ها را طوری تفسیر می‌کنند که با نظریه سازگار شود. این تجربه است که تصمیم می‌گیرد چه نظریه‌هایی توصیف‌کننده‌ی طبیعت‌اند و چه مفاهیمی چیزی جز یک مشت ایده‌های زیبا نیستند. از این منظر شاید شکسپیر بودن یا باخ بودن آسان‌تر از یک فیزیکدان نظری بودن است، چراکه اگر چند لغت در هملت یا فرازهایی در یک قطعه‌ی موسیقی از باخ تغییر کنند، کار هنری باقی می‌ماند، در حالیکه با تغییر یک نماد در معادلات اینشتین یا در نظریه‌ای که به کشف بوزون هیگز منجر شد، کل عمارت فرو می‌ریزد. یک نظریه هر قدر هم که زیبا باشد اگر تجربه آن را تأیید نکند از نظر علمی چیزی زائد است.

اکنون زمان آن است که نخستین الزام یک نظریه‌ی قدرتمند را خلاصه کنیم، مخصوصاً نظریه‌ای را که مدعی است یک نظریه‌ی همه‌چیز است. یک نظریه‌ی قوی آن است که مجموعه‌ای از پدیده‌های جدا افتاده را تحت یک مفهوم واحد درمی‌آورد و الهام‌بخش روابط جدیدی است که می‌توانند مورد آزمون تجربی قرار گیرند. این الزام که نظریه باید (لااقل از جنبه‌ی اصولی) آزمون‌پذیر باشد، آنچه را که صلاحیت علم بودن را دارد، محک می‌زند. آزمون‌پذیری حلقه‌ی پایانی زنجیره‌ی پرسش‌هایی از این دست است: آیا جهان هستی ما تنها یکی است و بس؟، چه چیزی می‌توانسته است مقدم بر آن باشد؟ و آیا اساساً چنین پرسش‌هایی در حیطه‌ی علم قرار می‌گیرند؟

۱. نام کتابی علمی-تخیلی از داگلاس آدامز انگلیسی.

نظریه‌ی لاک پشت‌های بی‌جان نیوتون

طبیعت و قوانین طبیعت در تاریکی پنهان بودند، خداوند گفت «بگذار نیوتون باشد» و همه چیز روشن شد.

«سنگ‌نوشته‌ی الکساندر پوپ بر مزار نیوتون
که ۲۱ مارس ۱۷۲۷ چشم از جهان فروبست»

در قرن هفدهم آیزاک نیوتون قوانین حرکت مشهور خود را ارائه کرد. این قوانین برای دویست سال به منزله‌ی نظریه‌ی همه‌چیز برای دینامیک اجسام کُند (نسبت به سرعت نور) بودند. نیوتون نشان داد که چگونه تأثیر متقابل یک جسم بر دیگری موجب تغییر در حرکت آن‌ها می‌شود. فرمول‌بندی او از چیزی که اکنون مکانیک کلاسیک نامیده می‌شود شامل سه قانون است که در نگاه اول «بدیهی» و به طور فریبنده‌ای ساده به نظر می‌رسند.

اولین قانون به قانون لختی (اینرسی) موسوم است: یک جسم فیزیکی به سکون یا به حرکت یکنواخت خود با سرعت ثابت ادامه خواهد داد مگر اینکه یک تأثیر خارجی، یک «نیرو» بر آن اثر کند. هر چه نیرو بزرگتر باشد شتاب جسم بیشتر خواهد شد. تجربه نشان می‌دهد که با اعمال همان نیرو روی توپ تنیس و یک گلوله‌ی سربی هم اندازه‌ی آن، توپ تنیس شتاب بیشتری می‌گیرد: نیوتون چنین حکم کرد که شتاب نسبی دو جسم بر واحد نیرو معیاری از لختی ذاتی یا «جرم» آن‌هاست. این به قانون دوم نیوتون معروف است.

در واقع قانون دوم قانون اول را به عنوان یک حالت خاص در خود دارد: اگر نیروی برآیندی بر جسم وارد نشود، شتابی وجود ندارد و جسم به راه خود ادامه می‌دهد یا ساکن می‌ماند. اصطلاح «برآیند» می‌تواند به معنای نبود هرگونه نیرویی یا وجود نیروهای خنثی‌کننده‌ی یکدیگر باشد. مثالی از حالت دوم وضعیت زمان حال شما بر روی زمین است. اینکه در راستای قائم در حالت سکون هستید، به این خاطر است که کف اتاق به پاها یا صندلی شما نیرویی برابر و در خلاف جهت نیروی گرانش وارد

می‌کند. اغلب به این وضعیت با عنوان قانون سوم نیوتون رجوع می‌شود— برای هر کنش، واکنشی مساوی و مخالف جهت آن وجود دارد. به دلیل واکنش به کنش روبه پایین گرانش است که احساس وزن می‌کنیم.

مکانیک نیوتونی نظریه‌ی همه‌چیز مورد نیاز را برای توصیف حرکت اجسام کُند و بزرگ فراهم کرد. اما این محدودیت‌ها روی شمول و کلیت آن برای دویست سال بعدی به درستی درک نشدند. وقتی نیوتون نظریه‌ی خود را منتشر کرد، سرعت نور درست دوازده سال قبل از آن اندازه‌گیری شده بود، سرعتی که در مقایسه با تجارب روزانه سرسام‌آور بود. باید بیش از دویست سال می‌گذشت تا اینشتین نشان دهد که نظریه‌ی نیوتون برای اجسامی که با سرعتی نزدیک به سرعت نور حرکت می‌کنند از اعتبار می‌افتد. نظریه‌ی اتمی به صد سال آینده تعلق داشت و نیاز به یک مکانیک کوانتومی برای توصیف دینامیک اتم‌ها دو قرن دیگر زمان می‌طلبید. بنابراین در سرتاسر قرن هجدهم و بخش اعظم قرن نوزدهم، برای مقاصد عملی، مکانیک نیوتونی نظریه‌ی نهایی بشمار می‌رفت.

می‌توانی آن را حل کنی؟

داشتن یک نظریه گام اول است. در عمل برای مفید واقع شدن نظریه، باید پیامدهای آن را محاسبه کرد. در بازی بیلیارد وقتی گوی نشانه به بسته‌ی گوی‌ها ضربه می‌زند تعداد پانزده گوی قرمز از طریق برخورد، تکان دادن و جهیدن از یکدیگر به حرکت در می‌آیند. اگر حوصله‌ی انجام محاسبات را داشته باشید، قوانین نیوتون می‌توانند مسیر آن‌ها را تعیین کنند. برای دانشمندان ویکتوریایی که به محاسبات جبری و خط‌کش مهندسی به عنوان پیشرفته‌ترین ابزار محدود بودند این کار می‌توانست بالاترین حد عملگرایی باشد. امروزه برنامه‌های رایانه‌ای می‌توانند مسیر ذرات بنیادین را نیز ردیابی کنند. بنابراین مسائلی که در گذشته پیچیده‌تر از آن بودند که حل شوند اکنون به راحتی تسلیم کدهای رایانه‌ای می‌شوند. این نمونه‌ای است از این واقعیت که چگونه توسعه‌ی ابزارهای مدرن می‌تواند موجب گسترش محدوده‌ی کاربرد یک نظریه‌ی همه‌چیز شود.

قدرت و محدودیت‌های دینامیک نیوتونی را می‌توان در کاربردهای آن در حرکات ماه و سیارات، جزر و مد و پیش‌بینی اوضاع جوی دید. آیزاک نیوتون نظریه‌ی دینامیک خود را در سال ۱۶۸۷ در کتاب اصول خود منتشر کرد. او قوانین خود را معرفی و از گراویتالاس — واژه‌ی لاتین برای وزن — در قانون گرانش جهانی خود استفاده

کرد. مشهور است که این کشف از بصیرت او در درک این حقیقت ناشی شده است که حرکت سیب‌های افتان و حرکت سیارات همه تحت قانون واحد گرانش انجام می‌شوند. برخلاف نیروهای جاذبه و دافعه‌ی الکتریکی ناشی از بارهای مثبت و منفی در اتم‌ها که یکدیگر را خنثی می‌کنند، جاذبه‌ی گرانشی تک تک ذرات یک جسم بزرگ باهم جمع می‌شوند. خورشید که از دید یک ناظر زمینی بزرگتر از یک ناخن انگشت به نظر نمی‌رسد، از فاصله‌ی صدهامیلیون کیلومتر در فضا، سیارات را به یک والس کیهانی وادار می‌کند. نیوتون نشان داد که گرانش مابین دو جسم با مجذور فاصله‌ی آن‌ها کاهش می‌یابد و یک جسم پرجرم مانند خورشید بازوهای گرانشی خود را به طور یکنواخت در تمام جهات فضا گسترش می‌دهد.

مدار زمین به دور خورشید بیضی است که به اندازه کافی به دایره نزدیک است به گونه‌ای که می‌توان آزمایش فکری زیر را انجام داد: خورشید را در مرکز کره‌ای تجسم کنید که شعاع آن برابر شعاع مدار زمین است. نیروی گرانش وارد شده به زمین روی تمام نقاط این کره یکسان است. حال اگر شعاع مدار زمین را دوبرابر کنیم، مساحت کره‌ی فرضی چهار برابر می‌شود زیرا مساحت با مربع شعاع متناسب است. نیوتون دریافت که اگر نیروی گرانشی در تمام جهات با تقارن کروی منتشر شود، شدت نیرو در هر فاصله به طور یکنواخت روی سطح کره‌ی مفروض توزیع خواهد شد. چون مساحت کره با مربع شعاع افزایش می‌یابد، شدت نیرو در هر نقطه کاهش می‌یابد و این مدل منجر به قانون عکس مجذوری نیروی گرانشی می‌شود.

این تشابهات، رابطه‌ی ذاتی مابین رفتار این نیروها و ماهیت سه بعدی فضا را روشن می‌کنند. این رابطه، فرضیه نیوتون را مبنی بر اینکه نیروی گرانش مابین دو جسم بدون تماس به طور آنی منتقل می‌شود، توجیه می‌کند. ناحیه اطراف یک جسم با میدان گرانشی آن پر می‌شود و این جسم روی هر جسم دیگری که در این میدان واقع شده باشد نیرویی اعمال می‌کند. این همان نیروی گرانشی است که پرش کنندگان سقوط آزاد را به سمت زمین می‌کشد و در همان حال زمین را بر مدار خود حول خورشید نگه می‌دارد.

نظریه‌ی نیوتون توضیح می‌دهد که مدار سیارات به دور خورشید بیضی است که خورشید در یکی از دو کانون آن واقع شده است. این نظریه همچنین پیشگویی می‌کند که سرعت یک سیاره با عکس جذر فاصله از خورشید تغییر می‌کند. بنابراین سیاره‌ی زحل که نسبت به زمین حدود نه بار از خورشید دورتر است، یک سوم سرعت مداری زمین را دارد و دوره تناوبی چرخش آن سی بار بیشتر از زمین است. جهان نیوتون یک جهان ساعت‌وار بود که در آن سیارات در مدارهای منظم و پایدار قرار داشتند؛

طراحی بی‌عیب و نقص جهان در هماهنگی با چیزی بود که از یک خالق متعال انتظار می‌رفت. اما این شکل ایده‌آل مدت زیادی دوام نیاورد.

از زمان بطلمیوس فیلسوف مصری قرن دوم میلادی، ماه بیش از ۲۰,۰۰۰ بار مدار خود را دور زمین کامل کرده است. اواخر قرن هفدهم، فیزیکدان و ستاره‌شناس سلطنتی ادموند هالی زمان‌بندی خورشیدگرفتگی‌های ثبت شده در قرون وسطی و دوران باستان را بررسی کرد. او دریافت که وقتی از موقعیت و مسیر ماه برای تعیین خورشیدگرفتگی استفاده می‌کند، زمان‌های محاسبه شده با آنچه که واقعا روی می‌دهد یک ساعت اختلاف دارد. هالی نتیجه گرفت که ماه در زمان‌های گذشته باید عرض آسمان را از شرق به غرب آهسته‌تر از زمان خود او طی کرده باشد.

این ادعایی بزرگ و حتی کفرآمیز بود. تغییر در حرکت ماه به گونه‌ای که هالی ادعا می‌کرد به این معنا بود که مسیر آن از طریق آسمان‌ها مدارهای منظم خود را تکرار نمی‌کند. چنان تغییری در مدار ماه می‌توانست نهایتاً منجر به ناپدید شدن سیستم از طریق افتادن ماه بر روی زمین یا فرار آن به فضا شود. برای بسیاری از فلاسفه، تئوریزه کردن فروپاشی کیهان به این روش توهینی به خداوند بود، زیرا به طور ضمنی چنین تعبیر می‌شد که خدا چنان صنعت‌گر بی‌مهارتی است که دستگاه ستارگان و سیارات ساخته‌ی او ممکن است دچار بی‌نظمی و خرابی شود. با این همه هالی راست می‌گفت و در نهایت حتی بنیادگرایان نیز ناگزیر از پذیرش ادعای هالی شدند. اکنون پرسش اینگونه مطرح می‌شود: چه چیزی موجب شتاب فزاینده‌ی ماه می‌شود؟

برای آن دو سهم وجود دارد که یکی توسط پیر سیمون لاپلاس ریاضیدان فرانسوی در سال ۱۷۷۶ کشف شد که یک محدودیت اساسی نظریه نیوتون را به نمایش گذاشت. لاپلاس نشان داد که اگر برخلاف نظریه کنش آنی از راه دور نیوتون، نیروی گرانش با صرف زمان از طریق فضا منتقل شود، مدارها نهایتاً تنزل خواهند کرد. این مفهوم بعدها پایه‌ای برای نظریه‌ی گرانش اینشتین شد. محاسبات لاپلاس تقریباً به نیمی از اثر مشاهده شده دلالت داشت؛ سهم دوم که ناظر بر نیمه‌ی دوم اثر بود با بعضی ظرایف و پیچیدگی‌های نظریه نیوتون ارتباط داشت.

ماه موجب جزر و مد در اقیانوس‌ها می‌شود. با چرخش زمین، ماه این برآمدگی‌های جزر و مدی را به سوی خود می‌کشد، بنابراین اگر ماه درست بالای سر باشد یک جزر و مد بلند اتفاق خواهد افتاد. (موقعیت این چینی ماه حتماً موجب جزر و مد بلند می‌شود اما هر جزر و مد شدیدی با قرار داشتن ماه در موقعیت عمودی اتفاق نمی‌افتد. هر روز دو جزر و مد قوی روی می‌دهد که یکی از آن‌ها زمانی است که ماه در طرف دورتر زمین قرار دارد.) سپس این برآمدگی، کشش گرانشی اضافه‌ای را روی ماه

اعمال می‌کند که چرخش آن و همین‌طور زمین را کند می‌کند و اگرچه تعداد روزهای ماه کاهش می‌یابد اما روزهای شمسی و ماه‌های قمری به تدریج بلندتر می‌شوند. زمین همیشه یک روی خود را به ماه نشان می‌دهد همان کاری ماه با زمین می‌کند و به این ترتیب در آینده‌ی دور هر ماه فقط یک روز خواهد داشت.

فناوری مدرن این محاسبات نظری را تأیید می‌کند. ساعت‌های اتمی طول مدت سال را با دقت کسری از یک میلیونیم ثانیه اندازه‌گیری می‌کنند — زمان نیمه شب به صورت دوره‌ای تنظیم می‌شود — و با استفاده از مسافت یاب‌های لیزری که با آینه نصب شده روی ماه توسط فضانوردان آپولو کار می‌کند، معلوم شده است که ماه به تدریج از زمین دور می‌شود. هیچ کیهان‌منظم و پایداری وجود ندارد. نظریه‌ی نیوتون با پیش‌داوری‌های بنیادگرایانه در تعارض بود اما مضمون یک کائنات بی‌ثبات آن با واقعیت سازگار بود.

نظریه‌ی گرانش نیوتون، حرکت زمین به دور خورشید و حرکت ماه به دور زمین را به طور بی‌عیب و نقصی توصیف می‌کند. این منجر به پرسش دیگری می‌شود: اگر موقعیت، سرعت و جرم زمین، ماه و خورشید در لحظه‌ای مشخص باشد آیا می‌توانیم مسیرهای آینده‌ی آن‌ها را با استفاده از قوانین حرکت نیوتون محاسبه کنیم؟ این به مسئله‌ی سه جسم مشهور است.

در سال ۱۸۸۷ آنری پوانکاره ریاضیدان فرانسوی نشان داد که برای چنان وضعیتی، یک راه‌حل جبری کلی وجود ندارد. در حالت‌های خاص مانند وقتی که سه جسم یک مثلث متساوی‌الاضلاع تشکیل می‌دهند (که در مورد خورشید، زمین و ماه عملاً اتفاق نمی‌افتد) حل جبری وجود دارد اما برای یک آرایش دلخواه، سه جسم خیلی زیادند. یک دلیل آن این است که برای سه جسم که تحت گرانش متقابل یکدیگر حرکت می‌کنند در حالت کلی تکراری وجود ندارد تا منحنی بسته‌ای تشکیل دهند که شکل آن با یک فرمول تحلیلی قابل توصیف باشد.

تکنیک حل مسئله روش تکرارپذیر (iterative) است یعنی استفاده از دنباله‌ای از تقریب‌ها که به نمایش هرچه نزدیک‌تر به جواب واقعی منجر می‌شود. ابتدا مجموعه‌ی زمین و ماه را موجودی منفرد فرض می‌کنیم که حول خورشید می‌چرخد. سپس حرکت زمین و ماه را در حالی که از حرکت مرکب آن‌ها حول خورشید چشم‌پوشی کرده‌ایم، محاسبه می‌کنیم. نتیجه‌ی این محاسبه می‌تواند با در نظر گرفتن تأثیر خورشید روی حرکت ماه بر گرد زمین به عنوان یک اختلال، دقیق‌تر شود.

اینجا مثال آموزنده‌ای از محدودیت‌های یک نظریه‌ی همه‌چیز را شاهد هستیم. ممکن است ما توانسته باشیم معادلات حرکت را تعیین کنیم، اما این بدان معنا نیست

که می‌توانیم آن‌ها را با دقت حل کنیم. برای سه جسم با جرم‌ها و فواصل نسبی مختلف مانند سیستم ماه - زمین - خورشید، یک راه‌حل عملی به معادلات نیوتون می‌تواند با اختلال‌های متوالی به دست آید. اما برای تعداد زیادی از اجسام این روش دچار شکست می‌شود. این یک قید عمومی است و مختص اجسامی که برهمکنش گرانشی متقابل دارند نیست. برهمکنش‌های متقابل الکتریکی مابین تعداد زیادی از اتم‌ها یا حرکات متلاطم در اتمسفر نیز به طور دقیق قابل حل نیستند. به جای آن باید براساس نظریه زیربنایی، مدل‌هایی برای حل تقریبی توسعه داده شوند. هنگام مطرح شدن ترمودینامیک به این موضوع باز خواهیم گشت و خواهیم دید که مفاهیم آشنایی مانند دما و فشار به عنوان معیارهایی از حالات حرکتی و دینامیک ذرات تشکیل دهنده‌ی یک سیستم بزرگ مقیاس تفسیر می‌شوند.

جهان نیوتون

قانون کاهش عکس مجذور نیروی گرانش با فاصله برای ساختار جهان هستی و احتمالاً برای پیشرفت علم فیزیک دارای اهمیت اساسی است. $99/8$ درصد جرم منظومه‌ی شمسی مربوط به خورشید است و از مابقی آن سیاره‌ی مشتری بیشترین سهم را دارد. مشتری حدود سیصد برابر زمین جرم دارد اما آنچنان از زمین دور است که به دلیل قانون عکس مجذوری تضعیف نیرو با فاصله، کشش گرانشی قابل توجهی روی زمین اعمال نمی‌کند. این را با نیروی قابل ملاحظه‌ی ماه که کوچک اما نزدیک است، مقایسه کنید. گرانش ماه موجب جزر و مد می‌شود اما سیارات دیگر و کهکشان‌های دوردست هیچ تأثیر قابل سنجشی روی اقیانوس‌ها ندارند.

جزر و مدها، خورشید گرفتگی‌ها و مدارات اقمار مصنوعی می‌توانند بدون نیاز به دخالت دادن این اجرام دوردست تعیین شوند. اگر نیروی گرانش به جای نسبت عکس مجذور با فاصله، نسبت مستقیم داشت، آثار گرانشی سیارات بیرونی منظومه‌ی شمسی مانند زحل، مشتری، اورانوس و نپتون می‌توانست با آثار کروی ماه رقابت کند. در چنین جهانی این امکان وجود داشت که ما ساکن سیاره‌ای چون زمین باشیم اما بعید بود که بتوانیم قاعده‌های گرانش را تعیین کنیم: امکان چشم پوشی از همه‌ی اجسام به جز دو تا از آن‌ها به همراه اختلال کوچکی از جسم سوم، چیزی است که محاسبات و فرموله کردن قواعد اساسی را ممکن ساخته است. در جهانی که توزیع ستارگان تقریباً یکنواخت است، تعداد آن‌ها با مجذور فاصله‌ی آن‌ها افزایش خواهد یافت. مقدار جرم نیز به همین نسبت سریع‌تر از نقصان تأثیر گرانشی آن رشد خواهد

کرد. در نتیجه نیروی گرانشی این ستارگان دوردست بر گرانش خورشید و سیارات بزرگ منظومه شمسی چیره خواهد شد.

در گیتی واقعی که جاذبه‌ی گرانشی با عکس مجذور فاصله کاهش می‌یابد، کهکشان‌های دوردست یک گرانش پس زمینه‌ی ثابت ایجاد می‌کنند. این گرانش هرچند در مقایسه با گرانش ماه و خورشید ضعیف است اما وجود دارد. برای تجربه کردن آن باید سوار یک ترن هوایی با مسیری پریپیچ و خم شوید. برای داشتن حسی از ترن هوایی و اینکه چگونه این وسیله الهام‌بخش اینشتین برای اصلاح نظریه‌ی نیوتون شد، ابتدا باید شرایط آن را امتحان کنیم.

برای شروع، اصول اساسی را دوباره بررسی می‌کنیم. حرکت یعنی اینکه موقعیت یک جسم در یک لحظه با موقعیت آن در لحظه‌ی دیگر متفاوت است. یک حقوقدان ممکن است سوال کند «چه چیزی موقعیت را تعریف می‌کند؟» که پاسخ منطقی آن این است «نسبت به من.» در حالت کلی موقعیت و حرکت یک ذره، تنها می‌تواند نسبت به یک چارچوب مرجع معین تعریف شود. نیوتون یک فضا و زمان مطلق را تجسم کرد، یک شبکه‌ی استعاری نامرئی از میله‌های سنجش که بالا و پایین، چپ و راست و پس و پیش را تعریف می‌کنند: یعنی سه بعد مکانی را. اجسامی که نسبت به این دستگاه، در حال سکون یا حرکت یکنواخت (بدون شتاب) هستند طبق قوانین حرکت نیوتون حرکت می‌کنند. این شبکه‌ی ذهنی چیزی را تشکیل می‌دهد که چارچوب مرجع لخت (اینرسیال) نامیده می‌شود.

در نظریه‌ی نیوتون تمام چارچوب‌های لخت باید دارای شبکه‌ی میله‌های خود باشند که با سرعت ثابت در مسیر مستقیم و بدون چرخش نسبت به هم حرکت می‌کنند (که این سرعت می‌تواند صفر هم باشد). در این چارچوب‌ها ساعت‌ها همیشه یک زمان را نشان می‌دهند یا اختلافی باهم دارند که مقدار آن همواره ثابت و بدون تغییر است. بنابراین ساعت بیگ بن در لندن و ساعت ایستگاه بزرگ مرکزی نیویورک زمان‌هایی را نشان می‌دهند که به دلیل قرارداد ناحیه‌های زمانی پنج ساعت با هم اختلاف دارند اما بازه‌های زمانی در هر دو مکان یکی است. اگر دو رویداد در یک چارچوب لخت همزمان روی دهند در دیگری نیز همزمان خواهند بود. با حرکت ما سیستم مقایسه بی‌تغییر می‌ماند.

هیچ حالت سکون مطلق وجود ندارد؛ تنها حرکت‌های نسبی بدون ابهامند. اما مقدار شتاب در تمام چارچوب‌های لخت یکسان است. وقتی در تبلیغ اتومبیلی قید می‌شود که شتاب سکون تا ۶۰ مایل در ساعت آن سه ثانیه طول می‌کشد به ناظر خاصی اشاره نمی‌شود و همه بر سر آن توافق دارند.

سرنشینان یک اتومبیل مسابقه خواهند دید که محیط اطراف آن‌ها به طور پیوسته سریع‌تر و سریع‌تر از مقابل دیدگان آن‌ها عبور می‌کند. آن‌ها همچنین احساس خواهند کرد که به پشتی صندلی فشار داده می‌شوند چنانکه گویی تحت تأثیر یک نیروی نامرئی هستند. علاوه بر این سرنشینان وقتی به یک پیچ می‌رسند احساس خواهند کرد که نیرویی می‌خواهد آن‌ها را به بیرون پرتاب کند که این همان نیروی گریز از مرکز است. در مدت شتاب‌گیری اتومبیل، سرنشینان می‌توانند لاف‌ل به طور تقریبی مقدار نیرو را حدس بزنند. در این شرایط اتومبیل و محتوای آن در چارچوب لخت قرار ندارند. اکنون به تجربه‌ی سواری روی یک ترن هوایی باز می‌گردیم که نمایش دیگری از آثار شتاب است. تصور کنید که سوار ترن هوایی هستید و چشمان شما بسته است. شما از جهان پیرامون خود منزوی شده‌اید با این وجود می‌توانید ادعا کنید که نسبت به چیزی در حال چرخش هستید. شبکه اندازه‌گیری میله‌ای نیوتون حضوری قابل دیدن ندارد و هیچ جسم مادی وجود ندارد که به این شبکه دلالت کند، اما همین که دارای چرخش هستید به شما امکان می‌دهد که با وجود خود آن را حس کنید و این چیزی است که آن را نیروی گریز از مرکز می‌نامیم.

دویست سال بعد از نیوتون، ارنست ماخ فیزیکدان و فیلسوف اتریشی پیشنهاد کرد که به دلیل وجود ستارگان دوردست است که احساس نسبییت مطلق می‌کنیم. این، پیامد جسمانی گرانش است که تحت قانون عکس مجذور نیوتون در سرتاسر جهانی مملو از ستارگان سرایت و نفوذ دارد. تعداد ستارگان با مجذور فاصله‌ی آن‌ها از ما رشد می‌کند و کشش گرانشی تک تک آن‌ها با عکس مجذور فاصله کاهش می‌یابد به طوری که اثر کلی ثابت می‌ماند.

در یک جهان ایستا مجموع کشش گرانشی تمام ستارگان بی‌نهایت است. اما اکنون می‌دانیم که جهان در حال انبساط است اما با این وجود مفهوم شبکه‌ی گرانش به جای خود باقی‌ست. اینشتین روی این چوب‌بست نظریه خود را با تعمیم گرانش نیوتون بنا نهاد اما برای این کار دویست سال دیگر زمان لازم بود. تا اوایل قرن بیستم قوانین نیوتون در حرکت و قانون گرانش عمومی او یک نظریه‌ی همه‌چیز برای جهان ساعت‌وار به شمار می‌رفت.

و طولی نکشید: شیطان با فریاد «آهای. بگذار اینشتین باشد» شرایط را به حالت اول بر گرداند.

— از جی.سی. اسکوایر «در ادامه‌ی شعر پوپ درباره‌ی نیوتون»