

نسبیت و کیهانشناسی

ویلیام جی. کافمن III

ترجمه:

دکتر تقی عدالتی - بهزاد قهرمان



بنام آن که جهان جلوه‌ای ز قدرت اوست

و جوب نشر «مجموعه علوم» چیزی نیست
جز آشنایی هرچه افزونتر خوانندگان
- بویژه دوستداران کتب و آگاهی‌های
علمی - با گستره بی‌کران علوم و دانش
های انسانی.

مجموعه علوم، در حد توان و امکان،
نظریه‌ها و دستاوردهای کهن و نوین
اندیشمندان و صاحب نظران گذشته و حال
را شامل است؛ و هر آنچه را که بتواند در
خدمت انسان قرار گیرد، در طریق نیل به
هدف غایی، ساختن و خوشبخت ساختن
انسانها، دربر می‌گیرد.

ملاك گزینش نیز، تنها، ارزش علمی -
انسانی آثار منتشره در این مجموعه
می‌باشد. امید که گامی، هرچند کوچک،
در جهت رهایی از قید وابستگی به تمامی
بیگانگان برداشته باشیم.

نشر گستره

فهرست مطالب

۷	پیشگفتار مترجمین
۹	مقدمه
۱۱	۱: مبانی نظریه گرانشی
۲۳	۲: تولد نظریه نسبیت
۳۷	۳: مبانی نسبیت عام
۴۵	۴: آزمونهای تجربی نسبیت
۵۵	۵: مفهوم قرمزگرایی
۶۵	۶: حفرة سیاه
۷۷	۷: حفرة های سفید و حفرة های کرم
۹۵	۸: کشف حفرة های سیاه
۱۰۵	۹: کهکشانها و کوازارها
۱۳۷	۱۰: امواج گرانشی
۱۴۵	۱۱: شکل جهان
۱۵۷	۱۲: سرنوشت جهان
۱۷۱	۱۳: خلقت جهان
۱۸۲	خلاصه
۱۸۹	برخی مفاهیم و اصطلاحات
۲۰۱	واژه نامه انگلیسی به فارسی
۲۰۹	فهرست عمومی اعلام

بسمه تعالی

پیشگفتار

کیهان‌شناسی، علم شناخت تحول کلی جهان است. این دانش از تصورات ساده انسانهای نخستین درباره ستاره‌شناسی آغاز، و با گذشت زمان و ارائه نظریه‌های علمی و تأیید مشاهده‌ای آنها به کیهان‌شناسی امروزی انجامیده است. از جمله نظریاتی که سهم بزرگی در پایه‌گذاری و پیشبرد این علم داشته‌اند، باید از «نظریه نیوتون» و «نظریه نسبیت اینشتین» نام برد.

هر نظریه‌ای که بخواهد نحوه تحول جهان و تغییرات تدریجی آن در فضا و زمان را توضیح دهد، ناگزیر است که بر نظریات گرانشی تکیه داشته باشد. در این کتاب، نخست با مبانی نظریه گرانشی آشنا می‌شویم و سپس کلیاتی در مورد تولد نظریه نسبیت، مبانی نسبیت عام و آزمونهای آن را خواهیم دید. در ادامه - به زبانی ساده - از مفاهیم عمیقی چون

قرمز گرایی، حفره‌های سیاه و سفید و حفره‌های کرم صحبت خواهد شد. بالاخره در فصول آخر به شکل، سرنوشت و خلقت جهان خواهیم پرداخت. اضافه می‌گردد که پی‌گیری، مطالعه و درك بیشتر در زمینه کیهانشناسی و به‌ویژه نسبیت، نیاز به سلاح نیرومند «ریاضی» دارد که استفاده از آن از محدوده چنین کتابی خارج است.

مؤلف کتاب حاضر، دکتر ویلیام جی. کافمن دانشیار فیزیک دانشگاه ایالتی سان‌دیاگو در کالیفرنیا بوده و نیز مدیر رصدخانه گرینیت در لوس‌آنجلس می‌باشد. وی در زمینه‌های «اختر فیزیک» و «کیهانشناسی» تألیفات متعددی دارد. خوشبختانه با ارائه کتاب حاضر، سه عنوان از کتب مؤلف مذکور به فارسی برگردانده شده و توسط نشر گستره به چاپ رسیده‌اند. در اینجا لازم است از همت مدیران نشر گستره که با چاپ «مجموعه علوم» - در موضوعات مختلف علمی - خدمت ارزنده‌ای را به جامعه دانش‌دوست ایران ارائه می‌دهند تشکر شود.

دکتر تقی عدالتی - بهزاد قهرمان

مشهد، شهریورماه ۱۳۶۴

مقدمه

ستاره‌شناسی دارای این تمایز دوگانه است که پیرترین علوم بوده و یکی از مجذوب‌کننده‌ترین رشته‌های تحقیق جدید به شمار می‌رود. در اواسط قرن بیستم، بسیاری از دانشمندان اعم از پیر و جوان توجه خود را به انبوهی از مسائل که در ستاره‌شناسی و اختر فیزیک مطرح می‌شود، معطوف داشتند. نتیجه این کوششها این است که به ظاهر، در مرز تغییرات بنیادی در تفکر خود در مورد کل جهان هستیم؛ به‌ویژه چنین به نظر می‌آید که «نظریه نسبیت عام» به درك عمیق از واقعیت فیزیکی بسیار مربوط است.

یکی از دستاوردهای فرعی تأسفبار پیشرفت سریع و جدید در ستاره‌شناسی و اختر فیزیک، این است که غالباً با دشواری می‌توان با آنچه که در جریان است همراه بود. هرماهه می‌توان خبر کشف جدیدی را که از اهمیت خاصی برخوردار است شنید؛ و درحالی که ستاره‌شناس حرفه‌ای باید کمی سخت‌تر کار کند تا همچنان مطلع باقی بماند، خواننده عامی یا دانشجوی ستاره‌شناسی

را باید به حال خود گذاشت.

این کتاب مخصوصاً به خاطر استفاده خواننده عامی، ستاره‌شناس غیر حرفه‌ای و دانشجوی ستاره‌شناسی تدوین شده تا آنها را بابسیاری از غریب‌ترین و مجذوب‌کننده‌ترین جنبه‌های تحقیق جاری - به ویژه نسبیت عام - آشنا کند. در این جنبه، این کتاب بر شکاف بین نشریات معاصر و کتب درسی عادی مورد استفاده در دروس ستاره‌شناسی سالهای اول دانشگاه پل می‌زند.

من عمیقاً از دکتر جی. آ. ویلر و دکتر جی. ام. پاساشوف برای اظهار نظرها و پیشنهادات بسیار مفید آنان و دکتر اچ. سی. آرپ برای تهیه بسیاری از عکسهای فریبنده که در متن مورد استفاده قرار گرفته‌اند، و همچنین از خانم لوئیس نلسن برای دستیاری او در تهیه و تایپ دستنویس مطالب، تشکر می‌کنم.

ویلیام. جی. کافمن III

مبانی نظریه گرانشی

هزاران سال است که بشر با تعجب و تحسین به آسمان شب می‌نگرد. ستارگان بی‌شماری از افق تا افق ممتد بوده، ماه نقره‌فام صورهای مختلفی به خود می‌گیرد و بالاخره سیارات در میان صور فلکی منطقة البروج سرگردان هستند که این خود مردم را به مطالعه ستاره‌شناسی وامی‌دارد. اما افرادی وجود دارند که تنها با مشاهدات و رصدهای بی‌پایان متقاعد می‌گردند. رصد شب به شب و ثبت مواضع ماه و سیارات کفایت نمی‌کند. اگر فردی «گرفت» ماه را در ۱۰ فوریه سال ۱۹۷۱ م. و ماه‌گرفتگی دیگری را در ۳۰ ژانویه ۱۹۷۲ م. ببیند، طبیعتاً این سؤال برایش مطرح می‌شود که: خسوف بعدی چه موقع رخ می‌دهد؟ برای مردم عصر باستان آشکار بود که حرکات خورشید، ماه و سیارات در میان ستارگان ثابت دوره‌های منظمی را تعقیب می‌کنند. اگر فردی بتواند این دوره‌ها یا چرخه‌ها را درک کند، می‌تواند پیش‌بینی کند که اجرام آسمانی در آینده در کجا خواهند بود؟

اخیراً ما از هوش و درک عمیق مردم باستان در رشته ستاره‌شناسی کاملاً آگاه شده‌ایم. اهرام در مصر، استون‌هنج در انگلستان و زیگورات بابلها آثار تاریخی نجومی جالبی هستند. از مطالعه این بناهای تاریخی درمی‌یابیم که ارزش عملی ساختن استون‌هنج برای بشر اولیه، کمتر از موفقیت سفر به ماه برای بشر امروزی نبوده است.

هنگامی که به ۳۰۰۰ یا ۴۰۰۰ سال قبل بازمی‌گردیم، می‌بینیم که مردم

دستگاههایی را چنان ماهرانه طرح کرده‌اند که در آن حرکت خورشید، ماه و سیارات می‌تواند پیش‌بینی شود. دقت قابل‌ملاحظه این روشهای قدیمی کاملاً شناخته شده است، و دو ستاره‌شناس چینی به نامهای هی و هو به خاطر شکست در پیشگویی يك خسوف در ۲۵۱۹ سال قبل از میلاد اعدام شدند. حتی امروزه با فنون پیشرفته، تقصیر انجام يك اشتباه در محاسبات فرد از اهمیت کمتری برخوردار است.

روشهایی که توسط پیشینیان برای محاسبه مواضع اجرام سماوی و بررسی حرکات آنها طرح گردیده است، واقعاً چشمگیر است. ادوکس دستگاهی از کره‌های بلورین متحدالمرکز را که زمین در مرکز آن قرار داشت پیشنهاد کرد که در آن خورشید، ماه و سیارات کره‌هایی بودند که با سرعت‌های مختلفی نسبت به یکدیگر در چرخش بودند. دو قرن بعد، هیپارخوس دستگاه مشهورش را به این طریق پیشنهاد کرد که سیارات به دایره‌رانهایی اتصال داشتند، و این دوایر به نوبه خود بر روی دایره حرکت مرکز به دور زمین، در حرکت بودند. این دستگاه و دستگاههای مشابه، در پیشگویی مواضع سیاره‌ای آنقدر موفق بودند که امروزه می‌توان با مراجعه به کتاب کار بزرگ بطلمیوس مثلاً محل امشب‌ماه را محاسبه کرد؛ و به‌طور تعجب‌آور درمی‌یابید که محاسبات شما با آنچه که مشاهده می‌کنید نسبتاً توافق دارد.

پس چرا ما امروزه این مدل‌های کیهانشناسی را رها کرده‌ایم؟ چرا ما با این ایده که زمین در مرکز جهان قرار دارد متقاعد نمی‌شویم؟ این‌چنین سئوالات از اهمیت شایانی برخوردارند، زیرا در جهت‌گیری روانشناسی و فلسفی دنیای غرب نقش عمده‌ای دارند. ولی از نقطه‌نظر بسیار ساده علمی، حداقل دو دلیل برای ترك کیهانشناسی زمین مرکزی و انتخاب تصویر خورشید مرکزی منظومه شمسی وجود دارد.

شاید آشکارترین محرك این جهت‌گیری مجدد، در نتیجه افزایش علم ستاره‌شناسی باشد که شروع آن از کاربرد و استفاده تلسکوپ گالیله می‌باشد. کشفیات اهله زهره، کوه‌های ماه، لکه‌های خورشیدی و اقمار مشتری رل مهمی را در طرد دستگاههای ارسطو — بطلمیوس بازی کردند. به عبارت دیگر،

کیهان‌شناسی کپرنیکی که خورشید را مرکز منظومه شمسی می‌دانست، از نظر فیزیکی معقولانه‌تر به نظر می‌رسید.

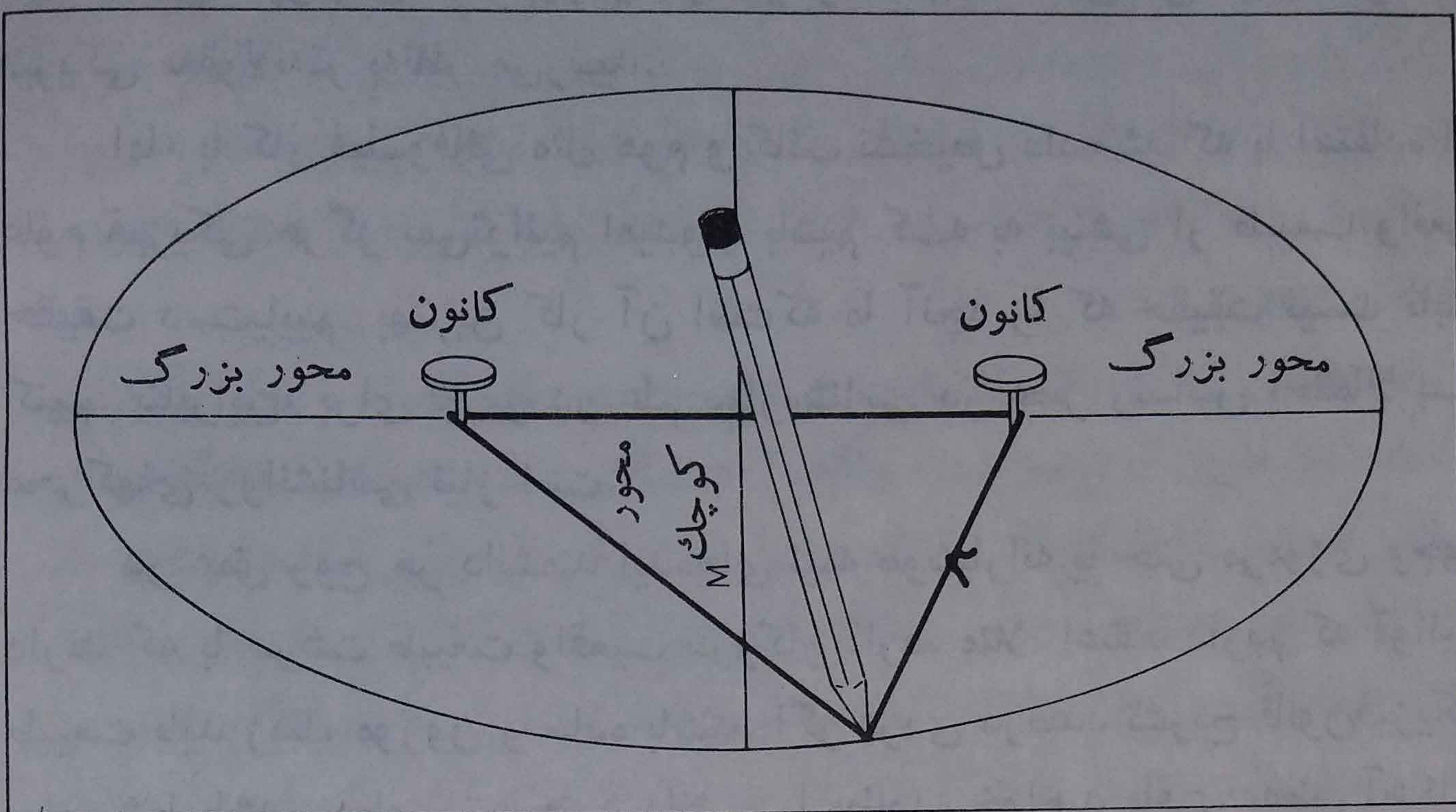
اما، با کار فیلسوفانی مثل هوم و کانت تشخیص داده شد که با استفاده از علوم فیزیکی هرگز نمی‌توانیم امیدوار باشیم که به بینشی از طبیعت واقعی حقیقت دست‌یابیم. بهترین کار آن است که ما آنچه را که حقیقت نیست ثابت کنیم. بنابراین، برای تغییر در علم ستاره‌شناسی در عصر رنسانس احتمالاً به محرک‌های روان‌شناسی نیاز است.

در عمق روح هر دانشمند ایده‌های نیمه هوشیارانه یا حتی مرموزی وجود دارند که با سرشت طبیعت واقعیت سروکار دارد. مثلاً، اعتقاد داریم که قوانین طبیعت باید زیبا، موزون و ساده باشند. اگر فردی در صدد تشریح قانون فیزیکی برای شما باشد، به‌طور حتم چنین دانشی را مطلوب خواهید یافت. به‌طور آشکار، کار ستاره‌شناسانی که از فرضیه زمین مرکزی رنج می‌بردند، مورد پسند نبود. همچنانکه دقت در تعیین مواضع سیارات افزایش می‌یافت، کرات یا دوائر حرکت مرکز بیشتری باید افزوده می‌شد. با گذشت سال‌ها، این سیستم‌ها پرزحمت‌تر و مشکل‌تر می‌گردید و زیبایی آن کاهش می‌یافت.

تزییق عمده زیبایی به دانش ستاره‌شناسی نظری، با کار یوهان کپلر در قرن هفدهم آغاز شد. بحث اصلی کپلر با بیان دقیق این که چگونه سیارات به دور خورشید حرکت می‌کنند آغاز گردید. از این که کار کپلر دری به علم فیزیک جدید را گشود، شاید با ارزش باشد که جوهره کشفیات کپلر را که به صورت سه قانون او مشهور است بیان داریم.

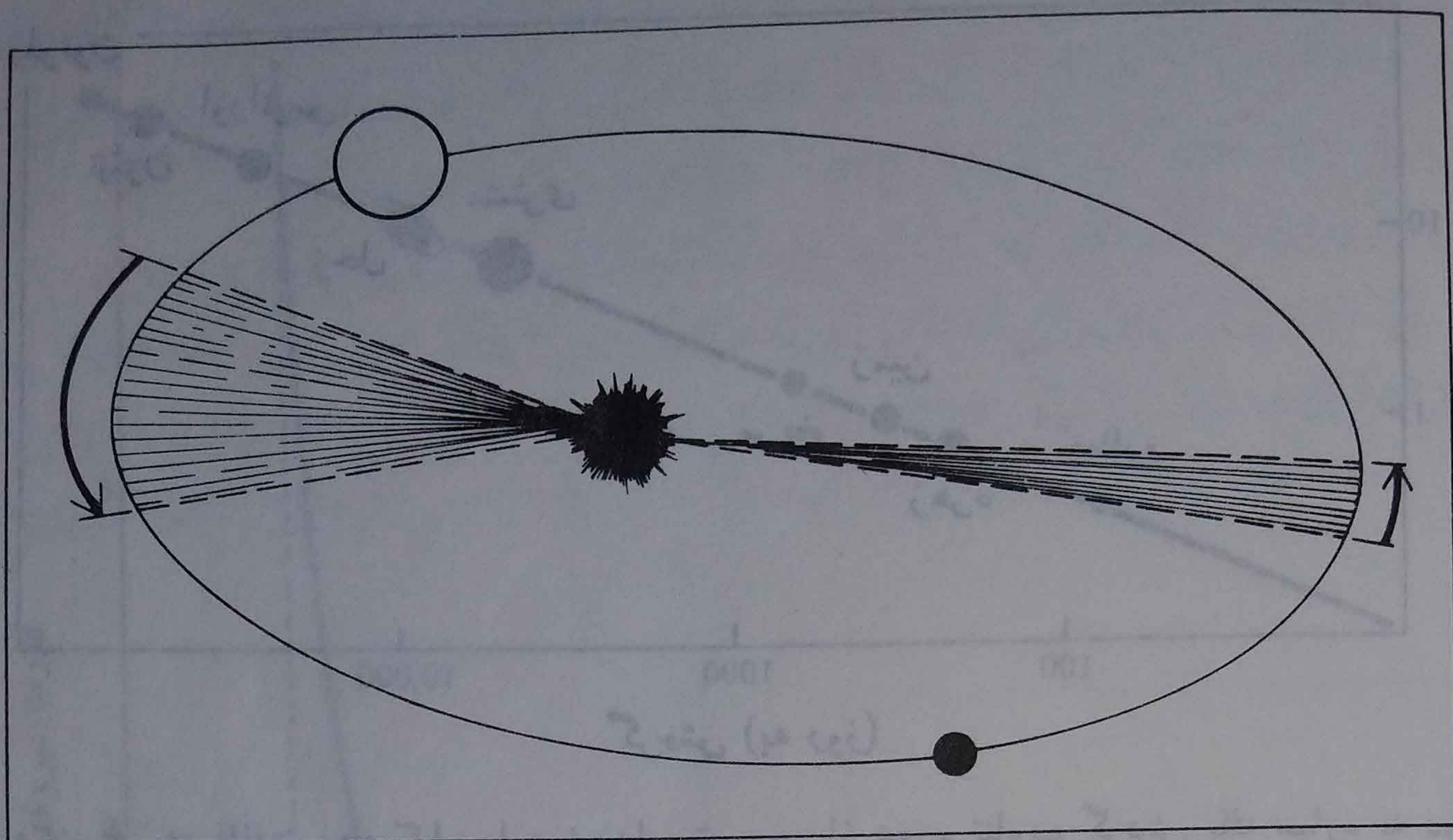
تا زمان کپلر، در تمام ایده‌های اصلی که به حرکات سیارات مربوط می‌شد از دوائر استفاده می‌گردید. امکان این که منحنی‌های دیگری نیز لازم باشد هیچگاه به‌طور جدی تلقی نشده بود. این بود که برای نخستین بار کپلر بیضی را به جای دایره در تشریح مدار سیاره مورد استفاده قرار داد (شکل ۱-۱). این ایده در قانون اول او به صورت زیر بیان می‌شود:

هر سیاره به دور خورشید بر روی مداری که یک بیضی می‌باشد و خورشید در یکی از کانونهای آن قرار دارد، حرکت می‌کند.



شکل ۱-۱: يك بیضی. در این نمودار می‌بینید که می‌توان يك بیضی را بسیار ساده و با استفاده از دو عدد پونز، قطعه‌ای نخ و يك مداد ترسیم کرد. اجزاء بیضی عبارتند از دو کانون (که دو عدد پونز است)، محور بزرگ و محور کوچک. محور بزرگ، بزرگترین فاصله از يك سر بیضی تا سر دیگر آن است که از دو کانون عبور می‌کند. محور کوچک، کوچکترین فاصله بین دو نقطه بیضی است و از مرکز آن عبور می‌کند. نیم‌محور بزرگ، نیمی از محور بزرگ؛ و به‌طور مشابه، نیم‌محور کوچک نیز نیمی از محور کوچک را نشان می‌دهد. توجه کنید که هر اندازه دو کانون به یکدیگر نزدیکتر شوند، شباهت بیضی به دایره بیشتر می‌شود.

کیپلر تمام یادداشت‌های تیکوبراهه را در دست داشت و آنها برخی از بهترین رصدهایی بودند که در دسترس قرار داشتند. براساس این مشاهدات، کیپلر قادر شد که بیان معینی در مورد این که چگونه يك سیاره در امتداد مدار بیضی حرکت می‌کند ابراز دارد. این کشف در قانون دوم او فرموله شده است: خط مستقیمی که سیاره و خورشید را بهم متصل می‌سازد، سطوح مساوی را در زمانهای مساوی جاروب می‌کند.



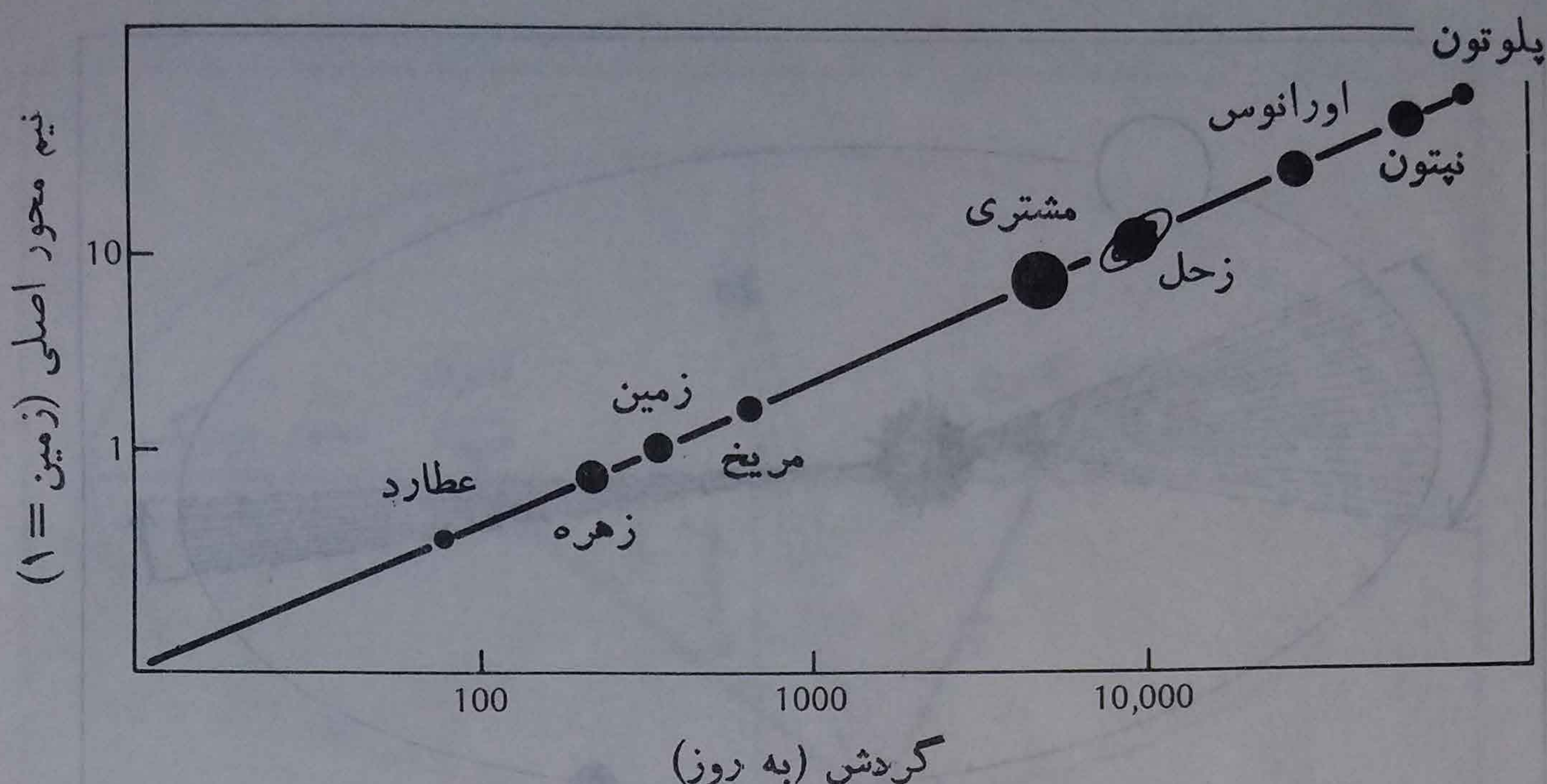
شکل ۱-۲: قوانین اول و دوم کپلر. هر سیاره به دور خورشید در يك مدار بیضی شکل حرکت می کند که خورشید در يك کانون آن است. به علاوه، خطی که سیاره و خورشید را بهم متصل می گرداند، مساحت مساوی را در زمانهای مساوی جاروب می کند.

در نهایت، قانون سوم کپلر به صورت کمی دوره تناوب مداری يك سیاره را به اندازه مدار بیضی آن به شکل زیر بهم ربط می دهد:

مربعات دوره های تناوب سیارات، به طور مستقیم متناسب با مکعب نیم محور اصلی مدار آنها است.

اولین و دومین قانون کپلر به طور ترسیمی در شکل ۱-۲ نشان داده شده اند، در صورتی که رسم نمایشی قانون سوم در شکل ۱-۳ آورده شده است.

سیارات در میان فضای گسترده و تهی بدون مزاحمت پدیده های بیگانه ای که حرکت هر روزه اجرام را پیچیده می سازند، حرکت می کنند. مثلاً، سیارات با مقاومت هوا یا اصطکاک روبرو نیستند. پس واضح است که نخستین پیشرفت بزرگ در کشف قوانین فیزیکی جهان، از جانب علم ستاره شناسی ناشی شده است. در حرکت سیارات که ما شاهد آنیم، طبیعت جهان فیزیکی به ساده ترین

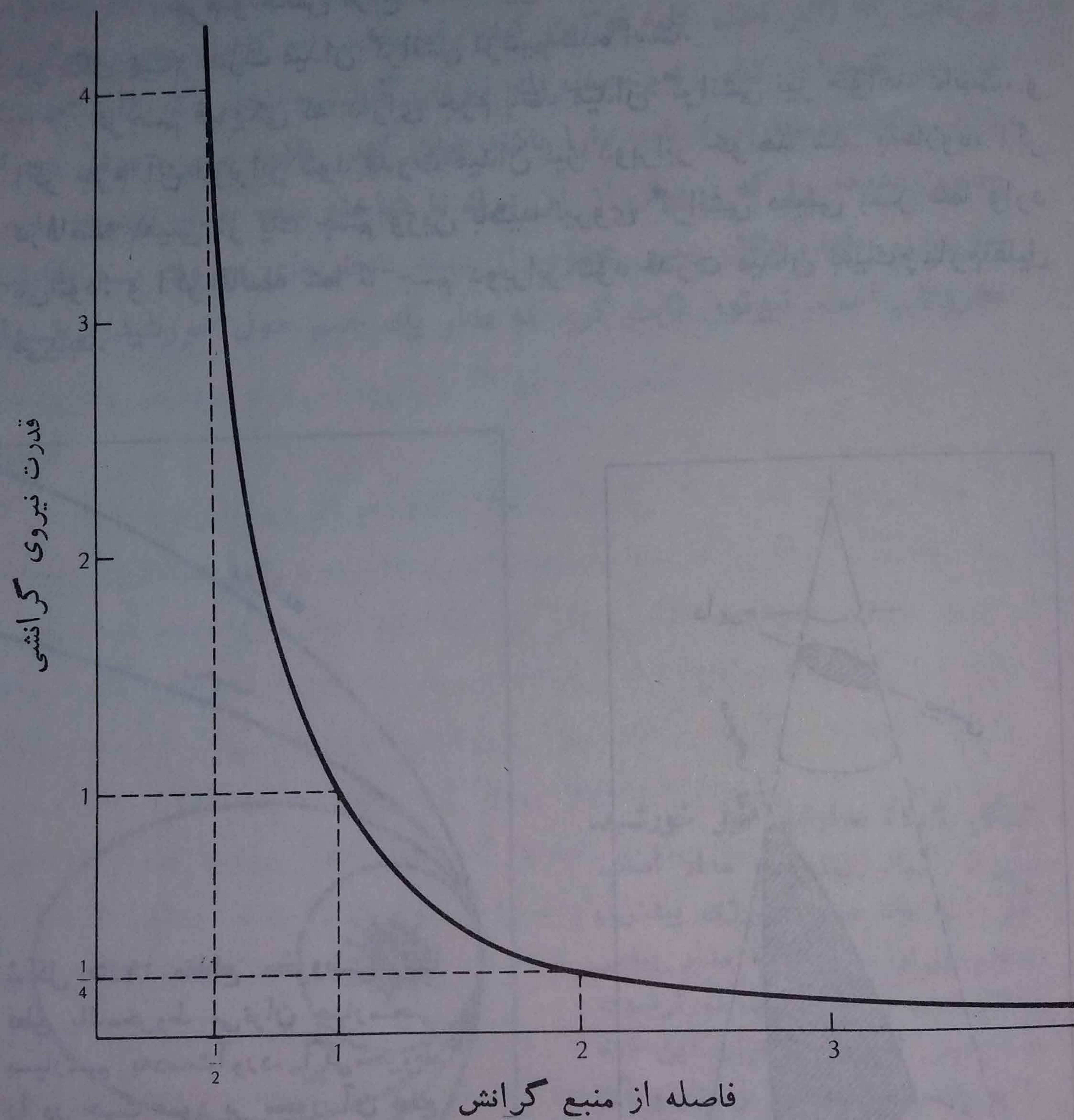


شکل ۳-۱: قانون سوم کپلر. این نمودار، ترسیمی از دوره تناوب گردش يك سیاره به دور خورشید در مقابل طول نیم محور اصلی مدار سیاره می‌باشد. این حقیقت که داده‌های تمام سیارات در امتداد خط مستقیمی قرار دارند، به ما می‌گوید که رابطه بسیار ساده‌ای بین این دو کمیت وجود دارد. قانون سوم کپلر، شیب یا جهت‌گیری دقیق این خط را پیشگویی می‌کند.

و خالص‌ترین شکل ممکن نشان داده شده است.

ایزاک نیوتون کسی بود که نبوغ کافی برای رسیدن به عمق مفهوم سه قانون کپلر را دارا بود. او برای انجام این کار، نخست ناگزیر شد که روشهای ریاضی جدیدی (حساب دیفرانسیل و انتگرال) را ابداع کند تا بتواند با کمیات متغیری از قبیل فاصله و سرعت سیارات حول خورشید محاسباتی انجام دهد. نیوتون با استفاده از این ابزار ریاضی جدید و استفاده از آنها در مورد کشفیات تجربی کپلر نتیجه گرفت که سیارات تحت تأثیر نیرویی که گرانی خوانده می‌شود، حول خورشید حرکت می‌کنند. به بیان دقیق‌تر، او نظریه گرانی خود را به این شکل فرموله کرد:

نیروی گرانشی که دو جسم بر یکدیگر وارد می‌کنند، با حاصلضرب



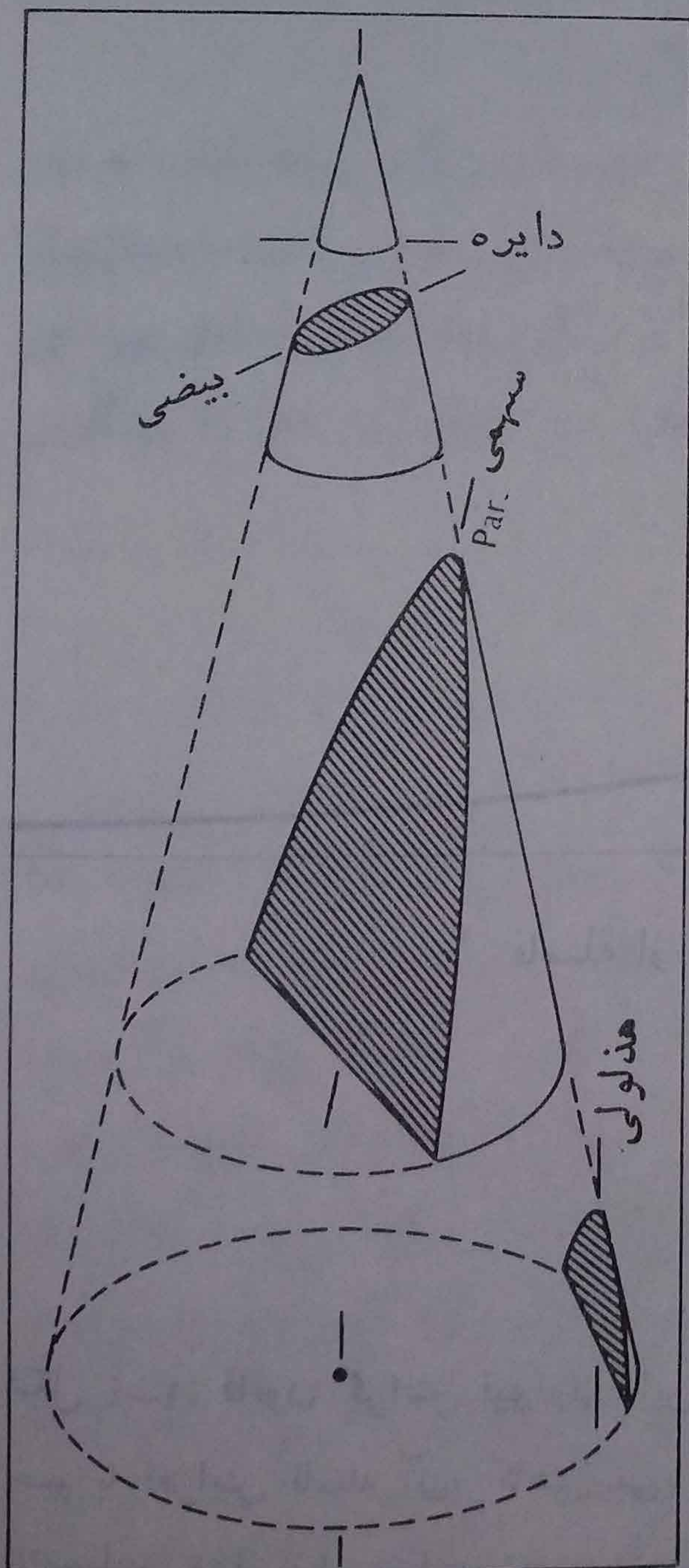
شکل ۴-۱: قانون گرانش نیوتون. این ترسیم نشان می‌دهد که چگونه نیروی گرانشی یک جسم با افزایش فاصله آن، کاهش می‌یابد. اگر فاصله جسم دو برابر شود، نیروی وارده یک‌چهارم مقدار قبل خواهد شد.

$$F \propto \frac{m}{r^2}$$

جرم و عکس مربع فاصله بین آنها متناسب است.

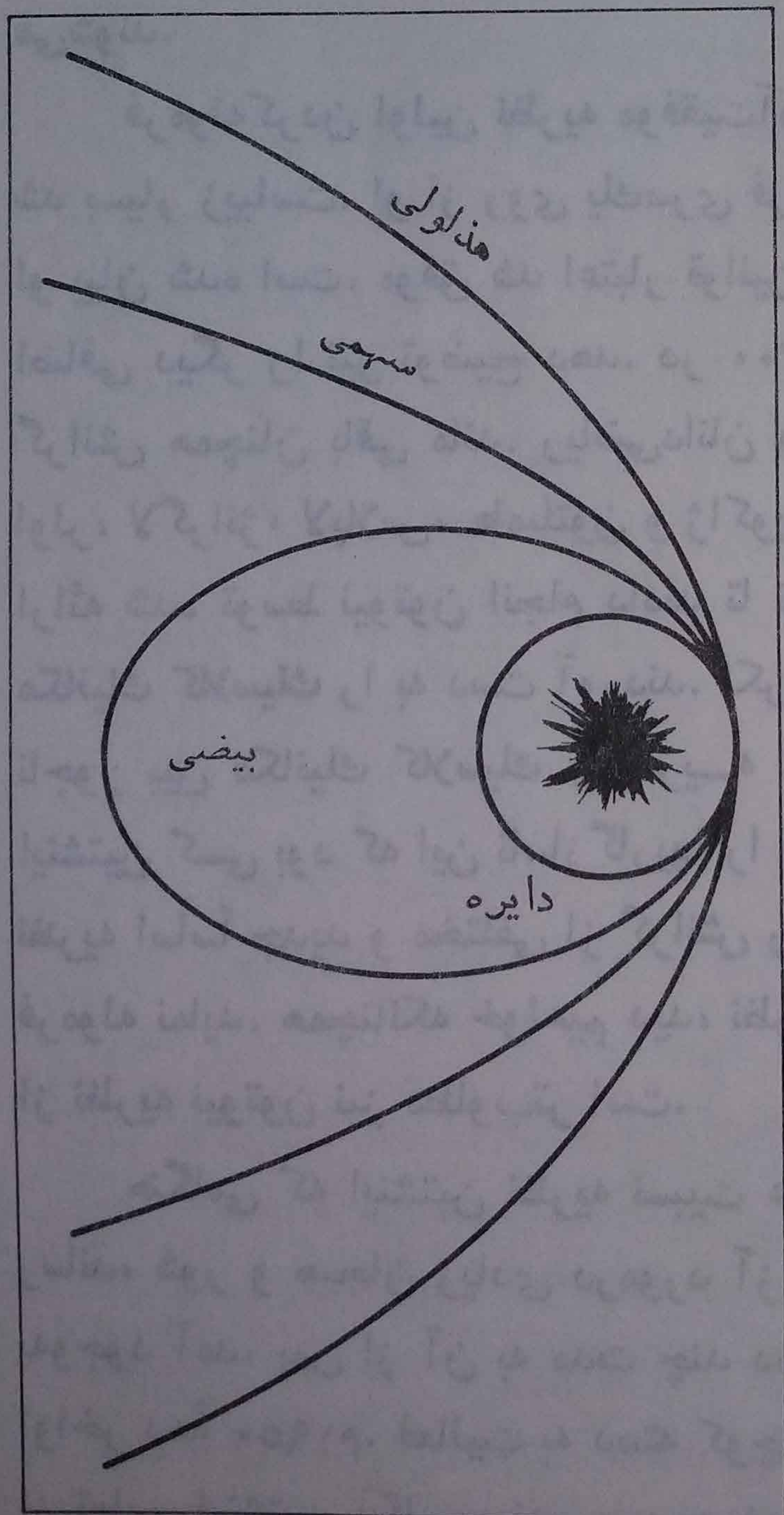
در شکل ۴-۱ قدرت میدان گرانشی ترسیم شده است.

هر جسم فیزیکی که دارای جرم باشد میدان گرانشی نیز خواهد داشت، و اگر جرم آن دوبرابر شود قدرت میدان نیز دوبرابر خواهد شد. به علاوه، اگر در فاصله معینی از یک جسم وزین باشید نیروی گرانشی معینی بر شما وارد می شود؛ و اگر فاصله شما تا جسم دوبرابر شود قدرت میدان به یک چهارم تقلیل می یابد.



شکل ۵-۱: مقاطع مخروطی. با قطع یک مخروط می توان چهار منحنی بسیار مهم به دست آورد. اگر مخروط را در جهت عمود بر محور آن قطع کنیم، واضح است که دایره به دست می آید. اگر این کار را با زاویه کوچکی نسبت به جهت عمودی انجام دهیم، شکل بیضی حاصل می شود. اگر جهت برش موازی با یک وجه مخروط باشد، سهمی به دست می آید؛ و سرانجام اگر برش به موازات محور مخروط باشد، هذلولی نتیجه می شود.

نیوتون با استفاده از این قانون گرانش و روشهای ریاضی که بسط داد، دریافت که قادر است کلیه قوانین کپلر را استخراج کند. به بیان دیگر، او توانست کشفیات کپلر را برحسب يك نیروی گرانشی کششی که کلیه اجسام مادی (نه فقط سیارات) باید دارا باشند بیان کند. علاوه براین، موفق شد که چندین پدیده را که تا پیش از آن درك یا شناخته نشده بودند توضیح داده و پیش‌بینی نماید. مثلاً، بیضی عضوی از دسته منحنی‌های معروف به مقاطع مخروطی است. نیوتون ثابت کرد که مدار يك جسم حول خورشید می‌تواند



شکل ۶-۱: مدارات حول خورشید.
دایره، کم‌انرژی‌ترین مدار است. اگر به يك ذره، انرژی بیشتری بدهیم می‌تواند به يك مدار بیضی منتقل شده و از خورشید دورتر شود. با افزایش انرژی، می‌توان این ذره را به يك مسیر سهمی فرستاد و آن را از خورشید فراری داد؛ اما این ذره در فاصله بینهایت دوری از خورشید به حال سکون درمی‌آید. اگر ذره مقدار زیادی انرژی داشته باشد، مدار آن يك مدلولی خواهد بود؛ و حتی وقتی که به فاصله بینهایت دوری از خورشید برسد باز هم با سرعت قابل‌توجهی در حال دور شدن از خورشید خواهد بود.

هر يك از مقاطع مخروطی دایره، بیضی، سهمی یا هذلولی باشد. نمودار شكل ۱-۵ نشان می‌دهد كه چگونه این منحنی‌ها را می‌توان از قطع يك مقطع مخروطی با يك صفحه به دست آورد. مدار دقیق يك جسم سماوی حول خورشید، به شیوه خاصی به میزان انرژی جسم بستگی خواهد داشت. اجرامی مانند سیارات كه در مقایسه با انرژی موجود در میدان گرانشی خورشید انرژی کمی دارند، باید در مسیرهای دایره‌ای یا بیضوی به دور خورشید گردش نمایند. اجرامی كه انرژی آنها کمی بیشتر باشد (مانند ستارگان دنباله‌دار)، می‌توانند در مسیرهای سهموی به دور خورشید بگردند. این مدارها در شكل ۱-۶ دیده می‌شوند.

فرموله کردن اولین نظریه موفقیت‌آمیز گرانش كه توسط نیوتون انجام شد بسیار زیباست. او از روی يك سری فرضیات ساده كه در قانون گرانش عام او بیان شده است، موفق شد اعتبار قوانین كپلر را ثبات بخشیده و چند پدیده اضافی دیگر را نیز توضیح دهد. در ۳۰۰ سال بعد، موفقیت‌های این نظریه گرانش همچنان باقی ماند. ریاضی‌دانان و فیزیک‌دانان بزرگ، از جمله گوس، اولر، لاگرانژ، لاپلاس، هامیلتون و ژاكوبی كارهای زیادی بر روی چهارچوب ارائه شده توسط نیوتون انجام دادند تا توصیف واقعی فیزیکی معروف به مکانیک کلاسیك را به دست آوردند. لکن تا پایان قرن گذشته، چندناسازگاری ناجور بین مکانیک کلاسیك و نظریه الكترومغناطیس آشكار شد. آلبرت اینشتین کسی بود كه این ناسازگاریها را از میان برداشت و درصدد برآمد كه نظریه اساساً جدید و مختلفی از گرانش را كه نظریه نسبیت عام خوانده می‌شود، فرموله نماید. همچنانكه خواهیم دید، نظریه دكتر اینشتین از لحاظ زیبایی حتی از نظریه نیوتون نیز مطلوب‌تر است.

هنگامی كه اینشتین نظریه نسبیت عام خود را در سال ۱۹۱۶م. به چاپ رساند، شور و هیجان زیادی درمورد آزمونهای مشاهده‌ای این نظریه جدید به وجود آمد. پس از آن به مدت چند دهه، توجه به نسبیت عام افول كرد. تا اواخر دهه ۱۹۵۰م. فعالیت به دسته كوچکی از فیزیکدانان و ریاضی‌دانانی كه از تعبیر اینشتین آگاه بودند، محدود شده بود. سپس با كشف كوازارها علاقه

بسیاری به نسبت عام ابراز شد. لذا امروزه نظریه پردازانی که در این زمینه کار می کنند، بیشتر از هر وقت دیگری می باشند. نتیجه کار جدید این است که قابلیت های کامل نسبت عام، در حال آشکار شدن است. در فصل های آینده، آنها را با جزئیات بیشتری بررسی خواهیم کرد.

تولد نظریه نسبیت

پیشرفتهای اصلی فیزیک در قرن نوزدهم، بیشتر در مورد الکتریسیته و مغناطیس صورت گرفته است. قبل از کار اُرستد و فاراده، تصور شده بود که الکتریسیته و مغناطیس دو پدیده مجزا و غیر مربوط بهم می باشند که اطلاعات زیادی درباره آنها وجود نداشت. ولی به عنوان یک سری تجربیات مؤثر، در اوایل دهه ۱۸۰۰ م. کاملاً درک شد که این دو پدیده بهم آمیخته اند. مثلاً، یک بار الکتریکی متحرک میدان مغناطیسی را به وجود می آورد؛ و بالعکس، یک میدان مغناطیسی متحرک، بدون کمک بارهای الکتریکی میدان الکتریکی تولید می کند.

به عنوان نتیجه این کشفیات، دانشمندان با پدیده‌ای مواجه شده بودند که کاملاً در چهارچوب مکانیک نیوتونی نمی گنجید. نیوتون ثابت کرد که تنها فاصله بین دو شیئی است که می تواند قدرت نیروهای را که آنها به یکدیگر اعمال می کنند، تعیین نماید. ولی به طور مثال، ارستد کشف کرد که یک جریان الکتریکی که چیزی بیشتر از بارهای الکتریکی متحرک نیست، نیرویی بر عقربه قطب‌نمای مغناطیسی وارد می کند. لذا این تجربه ثابت کرد که حرکت در تعیین طبیعت یک اندرکنش الکترومغناطیسی مهم است. به علاوه، اجرام سماوی فقط یکدیگر را جذب می کنند؛ درحالی که نیروهای الکتریکی می توانند جذب کننده یا دفع کننده باشند. نهایتاً، هرتز نشان داد که اختلالات الکترومغناطیسی با سرعت معین حرکت می کنند؛ در صورتی که به نظر می رسید مشاهدات نجومی قبلی نشان می دادند که نیروهای بین دو جسم فقط به شکل گیری آنی آنها بستگی

دارند.

در اواسط دهه ۱۸۰۰م. فیزیک دان نامدار اسکاتلندی جیمز کلرک ماکسول موفق به تشریح تمام این پدیده‌های جالب در يك نظریه واحد گردید. ماکسول این کار را با تأکید بر مفهوم میدان انجام داد. درحالی که نیوتون ثابت کرد که اجرام مستقیماً در عرض فضای خالی بر یکدیگر اثر می‌کنند؛ ماکسول استدلال کرد که اجرامی مانند ذرات باردار، تشعشعی در محیط مجاورشان به وجود می‌آورند. لذا این میدانهای تشعشعی، میانجی‌هایی بین ذرات موادمی‌باشند. به عنوان نتیجه‌ی معرفی ایده يك میدان، ماکسول قادر شد که تمام نظریه الکترومغناطیسی را در چهار معادله ساده که به عنوان معادلات میدان ماکسول شناخته شده است، فرموله نماید.

یکی از پیشگویی‌های مهم این چهار معادله این است که تمام امواج الکترومغناطیسی (امواج رادیویی، نور، پرتوهای ایکس و غیره) از میان فضای تهی و با سرعت مخصوصی که معمولاً با حرف c مشخص می‌شود، منتشر می‌گردند. این سرعت دارای مقدار شناخته شده $300,000$ کیلومتر بر ثانیه است. از این رو، معادلات میدان ماکسول علاوه بر اینکه توصیف دقیق ریاضی رابطه بین بارهای الکتریکی و جریانها و میدانهای الکتریکی و مغناطیسی منتج را به ما می‌دهند، برای اولین بار يك سرعت بنیادی را نیز ارائه می‌دهند.

اهمیت يك سرعت بنیادی در فیزیک، نمی‌تواند بیش از این تأکید شود. در مکانیک نیوتونی، ما فقط به شتابهایی در سطح ابتدایی روبرو هستیم. ولی وجود يك سرعت بنیادی بدان معنی بود که دانشمندان توانستند به طور تجربی چهارچوب اینرسی معروف به سکون مطلق را تعیین کنند. برای درک این معنی، زمین را که با سرعت v در فضا در حال حرکت است در نظر می‌گیریم. اگر ما يك شعاع نور را در جهت حرکت زمین بتابانیم، نور باید سرعت $c+v$ را داشته باشد. اگر ما شعاع نور را در جهت مقابل در نظر بگیریم، سرعت کلی باید $c-v$ گردد. در نتیجه چنین آزمایشی، باید بتوان دقیقاً تعیین کرد که زمین چگونه در جهان حرکت می‌کند.

اولین کسانی که در انجام چنین آزمایشی کوشیدند دو فیزیکدان

آمریکایی آلبرت ا. مایکلسون و ادوارد. دلیو. مورلی بودند که در مقابل تعجب همگان به طور قاطع نشان دادند که صرف نظر از جهتی که شما به يك شعاع نورانی توجه دارید، سرعت نور همیشه یکسان است. به عبارت دیگر، این عدد مخصوص (کیلومتر بر ثانیه $c = 300,000$) مهمتر از آن بود که کسی انتظار آن را می داشت. به عنوان نتیجه‌ی تجربه مایکلسون - مورلی، ممکن است نتیجه گیری کنیم که:

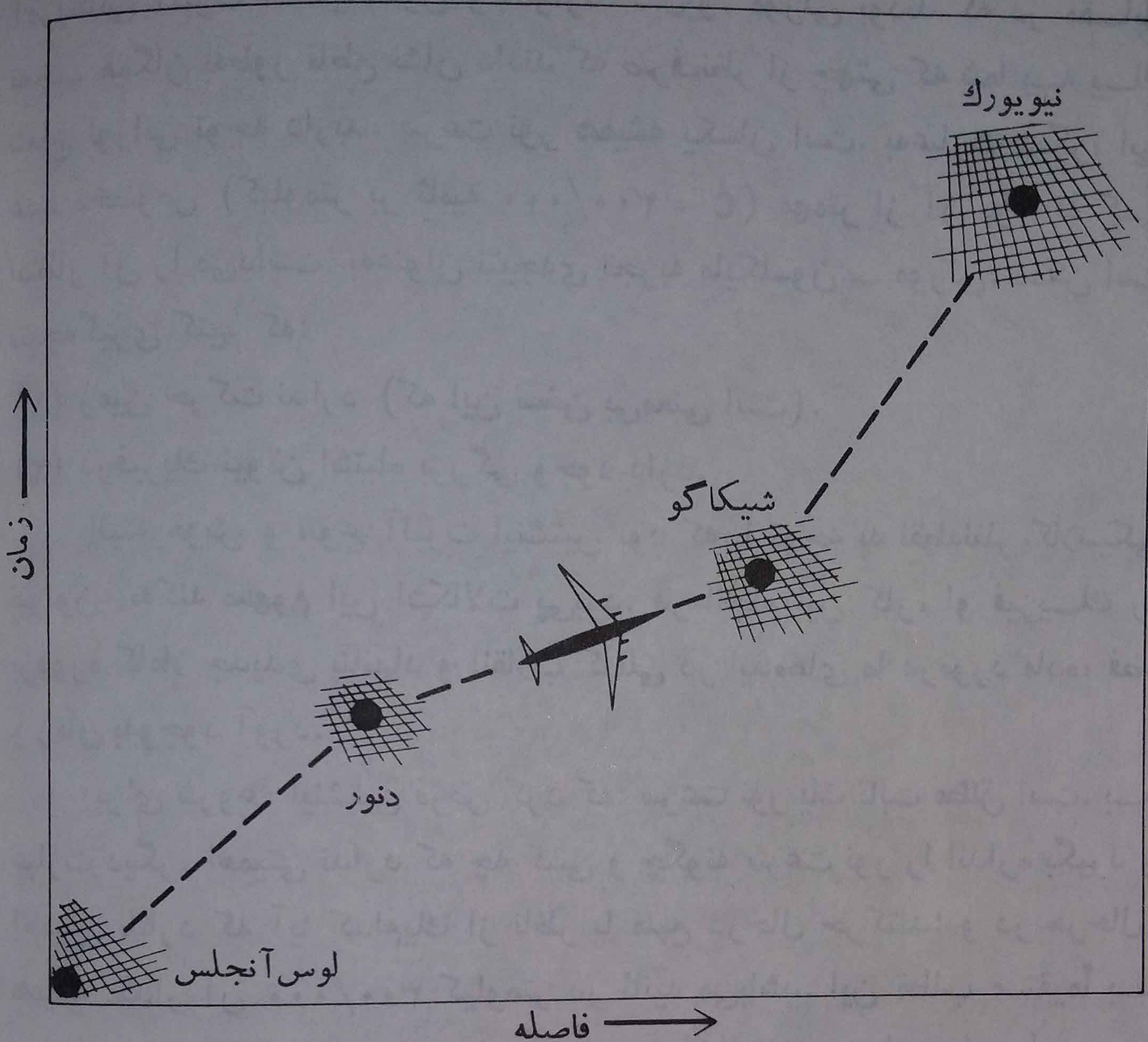
(۱) زمین حرکت ندارد (که این سخن بی معنی است).

(۲) در فیزیک نیوتن اشتباه بزرگی وجود دارد.

البته هوش و نبوغ آلبرت اینشتین بود که با توجه به نقطه نظر کلاسیکی نیوتون، به کنه مفهوم این اشکالات پی برد. در انجام این کار، او فیزیک را بر دوره کاملاً جدیدی بنانهاد و انقلاب کاملی در ایده‌های ما در مورد ماده، فضا و زمان به وجود آورد.

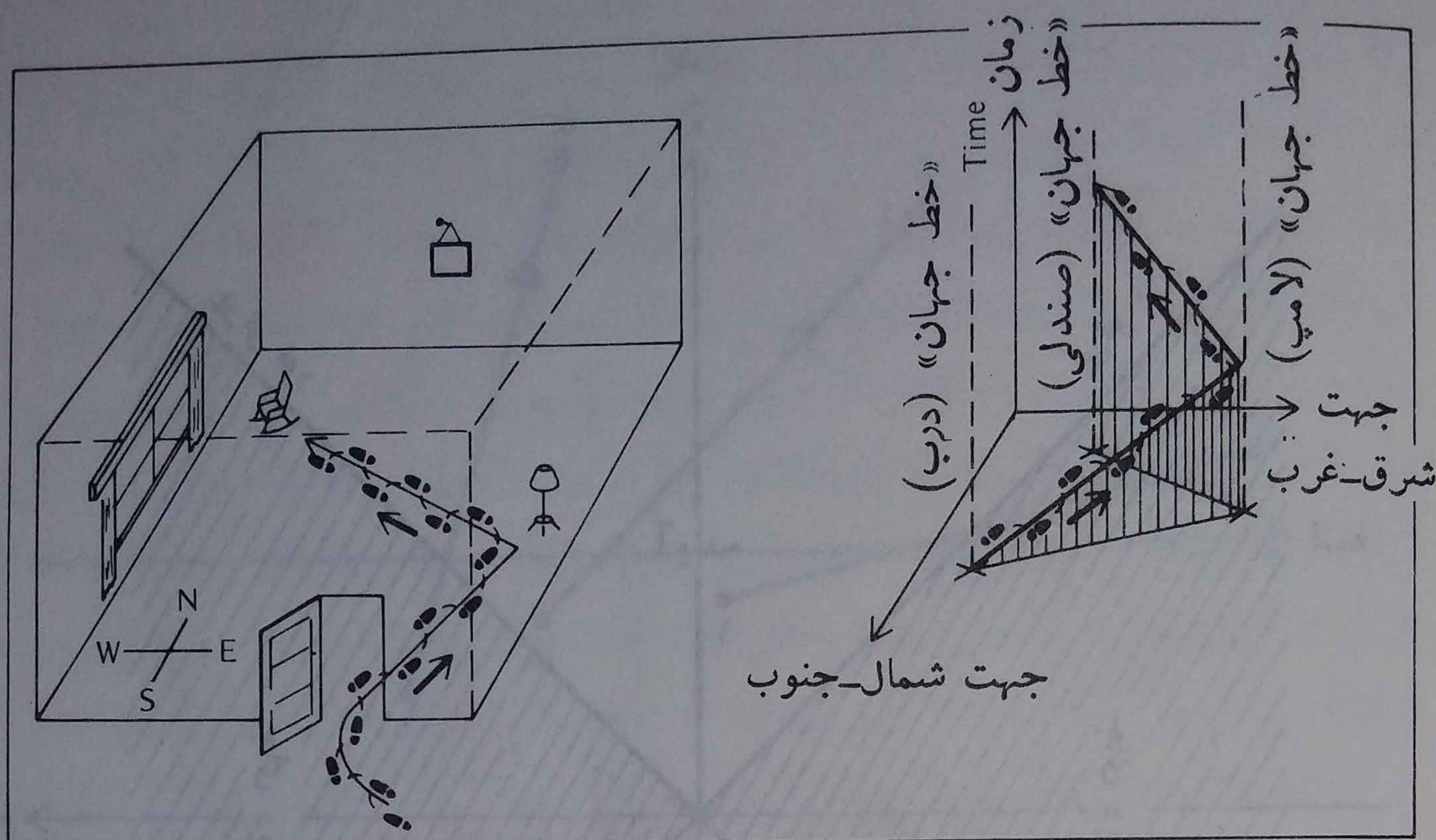
برای شروع، اینشتین فرض کرد که: سرعت نور يك ثابت مطلق است. به عبارت دیگر، اهمیتی ندارد که چه کسی و چگونه سرعت نور را اندازه بگیرد و اهمیتی ندارد که آیا کدام يك از ناظر یا منبع در حال حرکتند؛ و در هر حال، همیشه مقدار آن $300,000$ کیلومتر در ثانیه می باشد. این مطلب مستقیماً با تجربه عادی ما از فضا و زمان مغایرت دارد. به عنوان نتیجه، ایده‌های ما در مورد فضا و زمان باید تصحیح گردد. اولین تصحیحی که باید انجام شود این است که فضا و زمان دو مفهوم کاملاً مجزا نیستند. به علاوه، مفید است که زمان و فضا را به صورت يك سیستم چهاربعدی پیوسته در نظر بگیریم. یعنی این که بگوییم: زمان را به عنوان بعد چهارم، به سه بعد فضایی معمولی اضافه کنیم (بالا - پایین، چپ - راست، جلو - عقب).

برای واضح شدن آنچه که به معنی فضا-زمان است، به عنوان مثال يك سیستم ساده دوی بعدی را مورد بررسی قرار می دهیم: تصور کنید هواپیمایی از لوس آنجلس به سمت نیویورک، با توقف‌های کوتاهی در دنور و شیکاگو، در پرواز باشد. اگر ما نموداری رسم کنیم که در آن، فاصله پیموده شده در مقابل زمان رسم گردد، نموداری از فضا-زمان دوی بعدی داریم. مسیر هواپیما در این



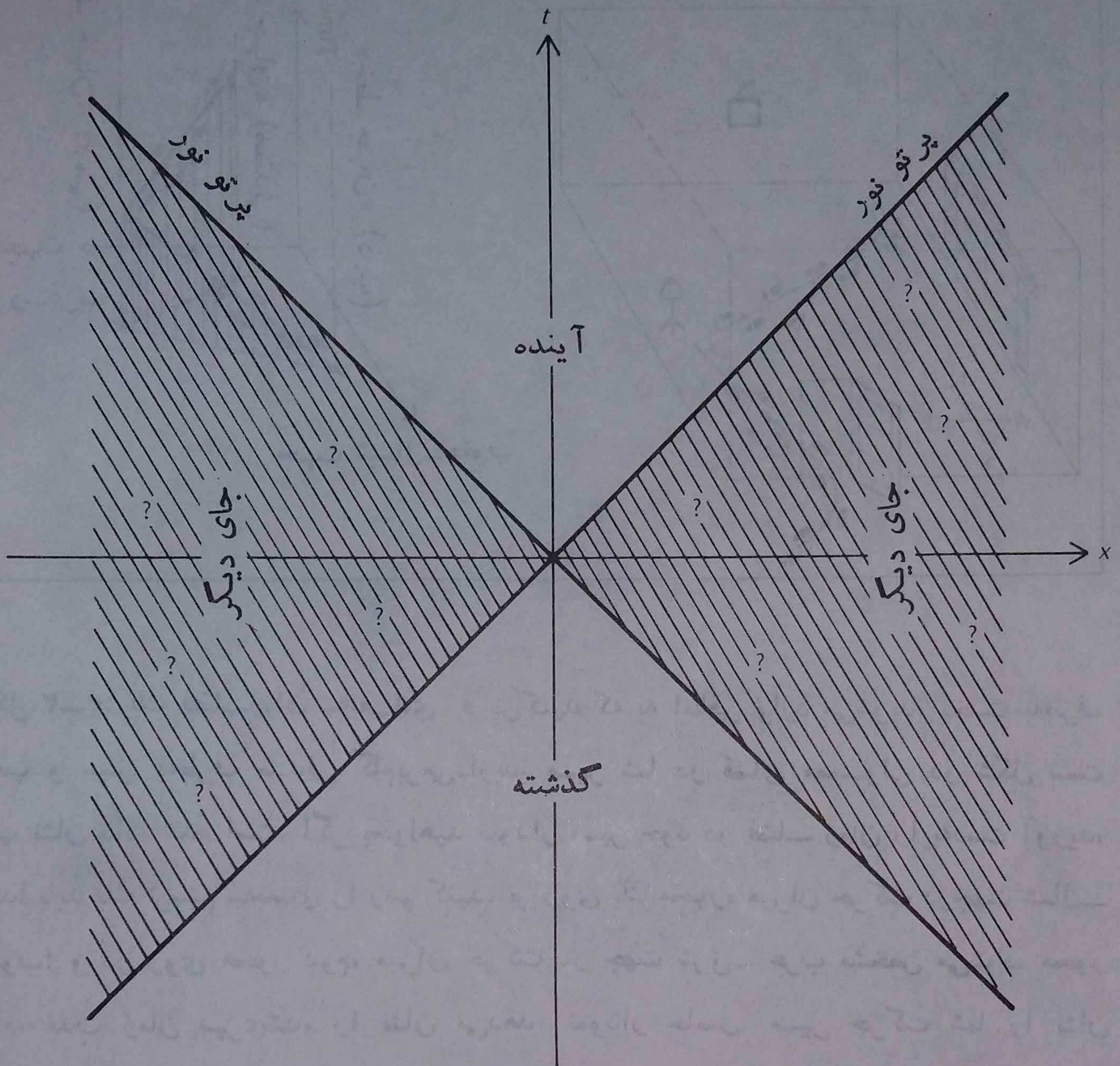
شکل ۱-۲: فضا - زمان دوبعدی. این نمودار شمایی از پرواز یک هواپیما را از لوس آنجلس تا نیویورک نشان می‌دهد. فاصله طی شده، در امتداد محور افقی؛ و زمان سپری شده، در امتداد محور قائم ترسیم شده است.

فضا - زمان در شکل ۱-۲ نشان داده شده است. با یک ساختمان مشابه، ما می‌توانیم یک سیستم سه‌بعدی یا حتی یک فضا - زمان چهاربعدی را تصور نماییم. مثلاً: شکل ۲-۲ ترسیم سیستم فضا - زمان سه‌بعدی را، برای شخصی که وارد اطاق شده و نخست به سمت یک لامپ و سپس به طرف یک صندلی قدم برمی‌دارد، نشان می‌دهد.

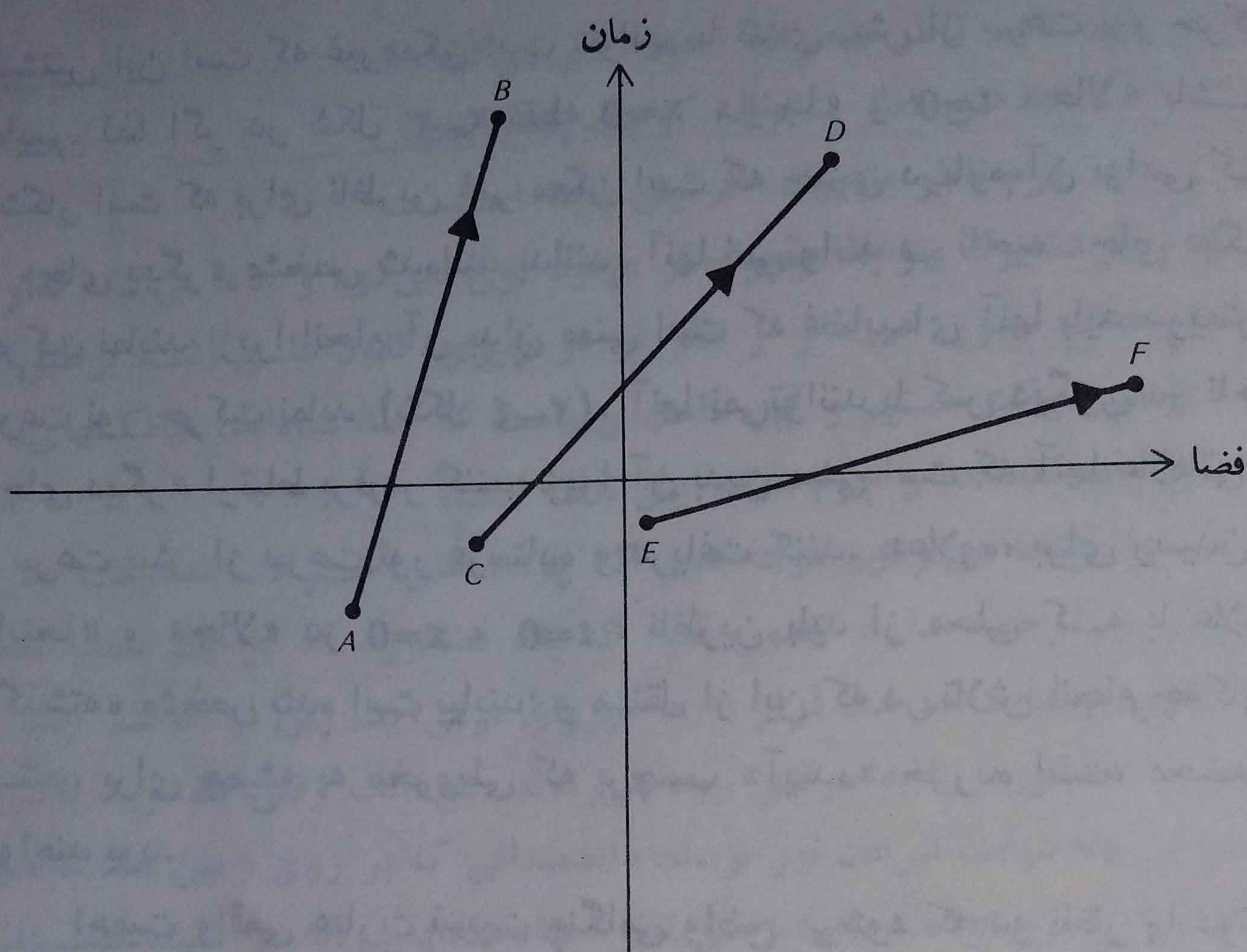


شکل ۴-۳: یک فضا-زمان سه‌بعدی. فرض کنید که به اتاقی وارد می‌شوید، نخست به طرف لامپ و سپس به طرف صندلی گام برمی‌دارید. مسیر شما در فضای معمولی در شکل سمت چپ نشان داده شده است. اگر بخواهید نمودار مسیر خود در فضا-زمان را به دست آورید، ابتدا باید یک ترسیم سه‌بعدی را رسم کنید. بر روی یک محور، میزان حرکت در جهت شمال-جنوب؛ و در روی محور دوم، میزان حرکت در جهت شرق-غرب مشخص می‌شود. محور سوم، مدت زمان سپری‌شده را نشان می‌دهد. نمودار حاصل، مسیر حرکت شما را نشان می‌دهد (شکل سمت راست).

در رسم نمودارهای فضا-زمان، فیزیکدانها مفید تشخیص داده‌اند که نمودارها را به روش ویژه‌ای ترسیم نمایند. بخصوص، یک فضا-زمان دوبعدی را مورد بررسی قرار می‌دهیم. نخست فرض کنید که x بعد فضا و t بعد زمان باشد. اضافه بر این، نموداری از x بر حسب t چنان ترسیم می‌کنیم که پرتوهای نور در امتداد خطوط ۴۵ درجه طی طریق نمایند. البته، این یک ساده‌کردن اختیاری است، ولی ثابت می‌شود که این کار فوق‌العاده راحت است. چون پرتوهای نور



شکل ۳-۴: نحوه‌ای که یک دانشمند، فضا - زمان دوبعدی را ترسیم می‌کند. طبق معمول، زمان (t) را عمودی و فاصله (x) را افقی در نظر می‌گیریم. نمودار را به نحوی ترسیم می‌کنیم که پرتوهای نور در امتداد خطوط 45° درجه حرکت کنند، و این کار به سادگی با انتخاب مقیاس صحیح محورها ممکن است: اگر یک سانتیمتر در روی محور زمان، نشان‌دهنده یک ثانیه باشد، یک سانتیمتر در روی محور فاصله نشان‌دهنده $300,000$ کیلومتر خواهد بود. اگر مرکز نمودار را ($x=0$ و $t=0$) «اینجا» و «حال» به نامیم، طبعاً نمودار به سه منطقه تقسیم می‌شود.



شکل ۴-۳: چرا نمی‌توانید به «جای دیگر» بروید. در ترسیم فضا-زمان دانشمند، سه مسیر در نظر می‌گیریم. شما بسادگی می‌توانید از نقطه A به نقطه B بروید. زمان زیادی صرف می‌شود، اما فاصله طی‌شده چندان زیاد نیست. برای رفتن از نقطه C به D، در امتداد خط ۴۵ درجه حرکت می‌کنید. برای انجام این کار باید با سرعت نور حرکت کنید. در حرکت از نقطه E به F فاصله زیادی در مدت زمان بسیار کوتاهی طی می‌شود، اما سرعت شما باید بزرگتر از سرعت نور باشد.

در امتداد خطوط ۴۵ درجه در فضا-زمان دوباره حرکت می‌کنند، لذا پرتوهای نور از نقطه $t=0$ و $x=0$ که یک مخروط نوری را تعریف می‌کند و در شکل ۳-۲ نشان داده شده است، عبور می‌کنند. در نتیجه، فضا-زمان به سه ناحیه تقسیم شده است: گذشته، آینده و «جای دیگر».

بطوری که خواهیم دید، یکی از نتایج معروف و مشهور نظریه نسبیت

اینشتین این است که غیرممکن است بتوانیم با تبدی بیش از سرعت نور حرکت نماییم. لذا اگر در شکل ۳-۲ نقطه $x=0$ «اینجا» و $t=0$ «حالا» باشد، آشکار است که برای ناظرین غیر ممکن است که چیزی درباره آن نواحی که با «جای دیگر» مشخص شده‌اند، بدانند. آنها نمی‌توانند در ناحیه «جای دیگر» حرکت نمایند، زیرا انجام آن بدان معنی است که فضاپیماي آنها باید سریعتر از سرعت نور حرکت نماید (شکل ۴-۲). آنها نمی‌توانند با کس دیگری در ناحیه «جای دیگر» ارتباط برقرار کنند، زیرا آن بدین معنی است که آنها علاماتی را با سرعت بیش از سرعت نور فرستاده و دریافت کنند. به علاوه، برای رسیدن به «اینجا» و «حالا» در $x=0$ ، $t=0$ ، ناظرین باید از محلی که با علامت «گذشته» مشخص شده است بیایند؛ و مستقل از این که در تلاش انجام چه کاری هستند، برای همیشه به مخروطی که برچسب «آینده» خورده است، محدود خواهند بود.

اهمیت واقعی عبارت نسبیت هنگامی واضح می‌شود که دو ناظر را در نظر بگیریم که نسبت به یکدیگر در حرکت بوده و می‌کشند که یک موضوع واحد را اندازه‌گیری کنند؛ برای سهولت، بحث خود را به فضا - زمان دوبعدی محدود خواهیم کرد. فاصله و زمان اندازه‌گیری شده به وسیله ناظر اول را با x و t ؛ و فواصل زمانی و مکانی اندازه‌گیری شده توسط ناظر دوم را با x' و t' مشخص خواهیم کرد. علاوه بر این، سرعت نسبی بین دو ناظر v خوانده می‌شود.

(در سال ۱۹۰۵ م. دکتر اینشتین نظریه نسبیت خاص خود را چاپ کرد. این نظریه تا حد زیادی با آنچه که دو ناظر - که نسبت به یکدیگر در حرکتند - اندازه می‌گیرند، سروکار دارد. اصل این نظریه بر پایه چند معادله ساده ریاضی که به تبدیلات لورنتز مشهورند، استوار بوده و اندازه‌گیریهای دو ناظر را به یکدیگر ربط می‌دهد. این تبدیلات با سه مورد اساسی فاصله، زمان و جرم سروکار دارد.)

فرض کنید که ما ناظری در سیستم x و t هستیم، و همچنین تصور کنید که ما در حالت سکون بوده و ناظر دوم (سیستم x' و t') با سرعت v در حال دور شدن می‌باشد. پس الزاماً از ثابت بودن سرعت نور نتیجه می‌شود که:

۱- ساعت ناظر متحرك، آهسته کار می کند.

۲- خط کش ناظر متحرك، كوچك شده است.

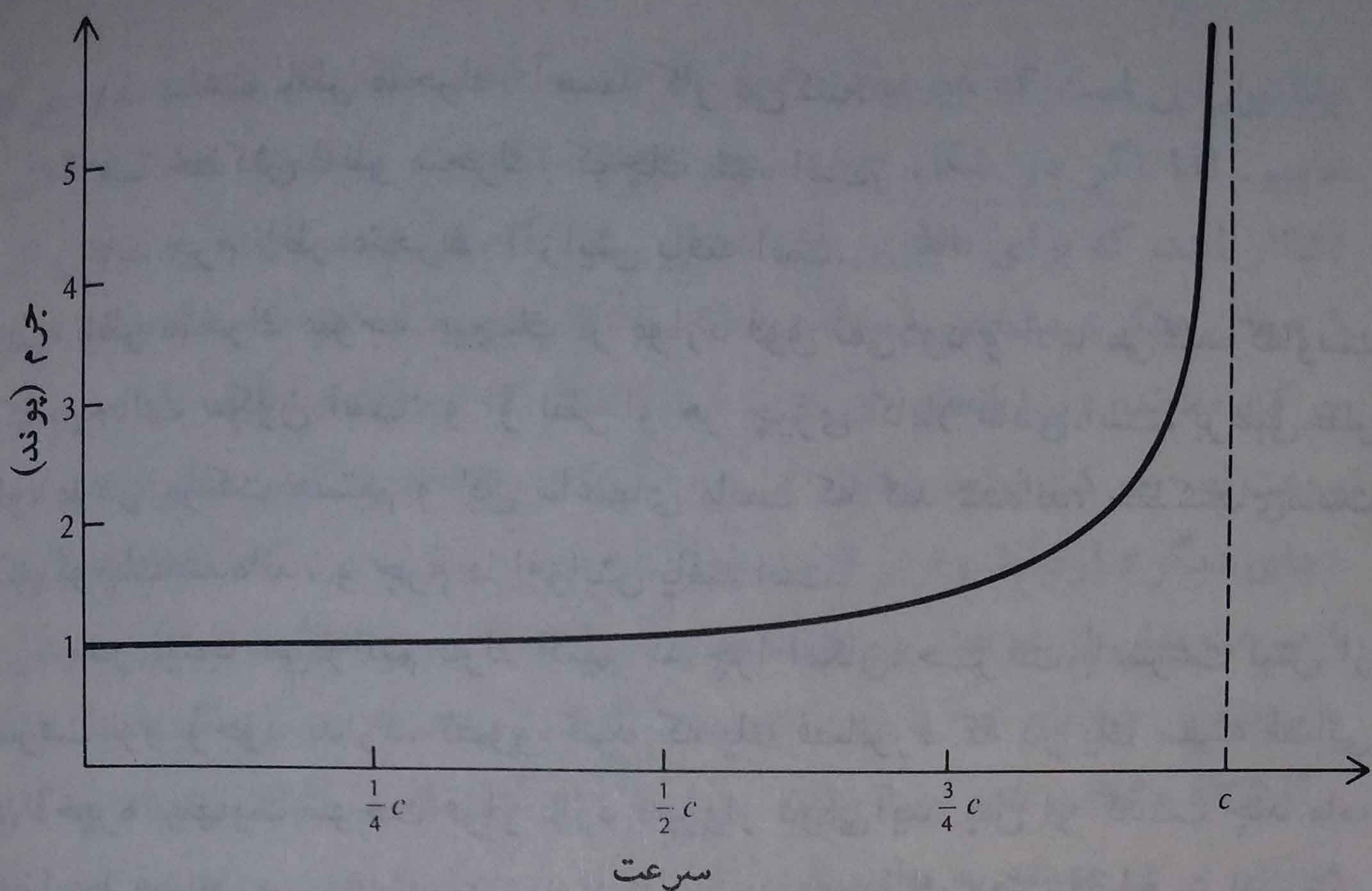
۳- جرم ناظر متحرك، افزایش یافته است.

البته ناظر متحرك متوجه هیچيك از موارد فوق نمی شود و ادعا می کند که او است که در حالت سکون است؛ و از نظر او هر چیزی کاملاً عادی است. بر طبق نظر او، ما در حرکت هستیم و این ساعتهای ماست که کند شده اند، خط کشهای ماست که كوچك شده اند، و جرم ما افزایش یافته است.

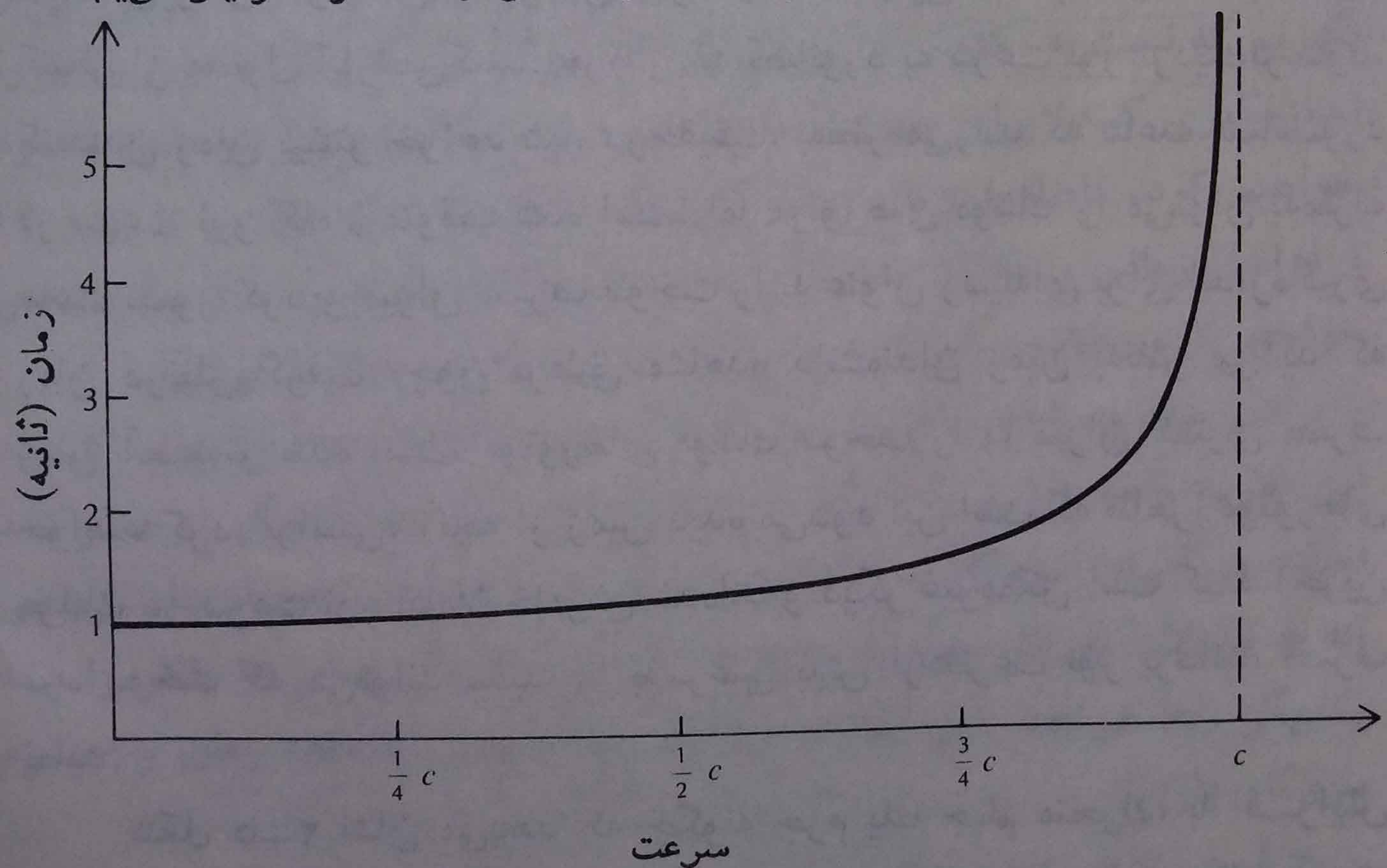
در اینجا می توانیم درك کنیم که چرا امکان حرکت با سرعت بیش از سرعت نور وجود ندارد. تصور کنید که يك فضا نورد که در يك سفینه فضایی با ذخیره بینهایت سوخت قرار دارد به پرواز در می آید. پس از گذشت چند ماه، فضاپیما فضا نورد را به سرعتی زیاد می رساند. مع ذالك وقتی فضا نورد به سرعتی بیش از ۷۵ درصد سرعت نور برسد، دانشمندانی که بر روی زمین هستند متوجه کند شدن زمان خواهند شد. بر طبق نظر آنها، ساعتهایی که در سفینه نصب شده اند کندتر از معمول کار می کنند. هر قدر که فضا نورد به سرعت نور نزدیک تر شود، کند شدن زمان بیشتر خواهد شد. در حقیقت، به نظر می رسد که ساعت فضا نورد در سرعت نور کاملاً متوقف شده است! اما موتورهای موشك را می توان به منزلت ساعت تصور کرد و میزان مصرف سوخت را به عنوان وسیله ای برای اندازه گیری زمان در نظر گرفت. چون بر طبق مشاهده دانشمندان زمین به نظر می آید که زمان آهسته تر شده است، موتورهای موشك سوخت را به میزان کمتری مصرف خواهند کرد. برآستی، آنچه از زمین دیده می شود این است که ظاهراً موتورهای موشك در سرعت نور کاملاً خاموش شده اند و دیگر غیر ممکن است که آخرین ذره سوخت که می تواند سفینه را به سرعتی بیش از سرعت نور برساند، مصرف نماید.

شکل ۵-۲ نشان می دهد که چگونه جرم يك جسم متحرك، با افزایش

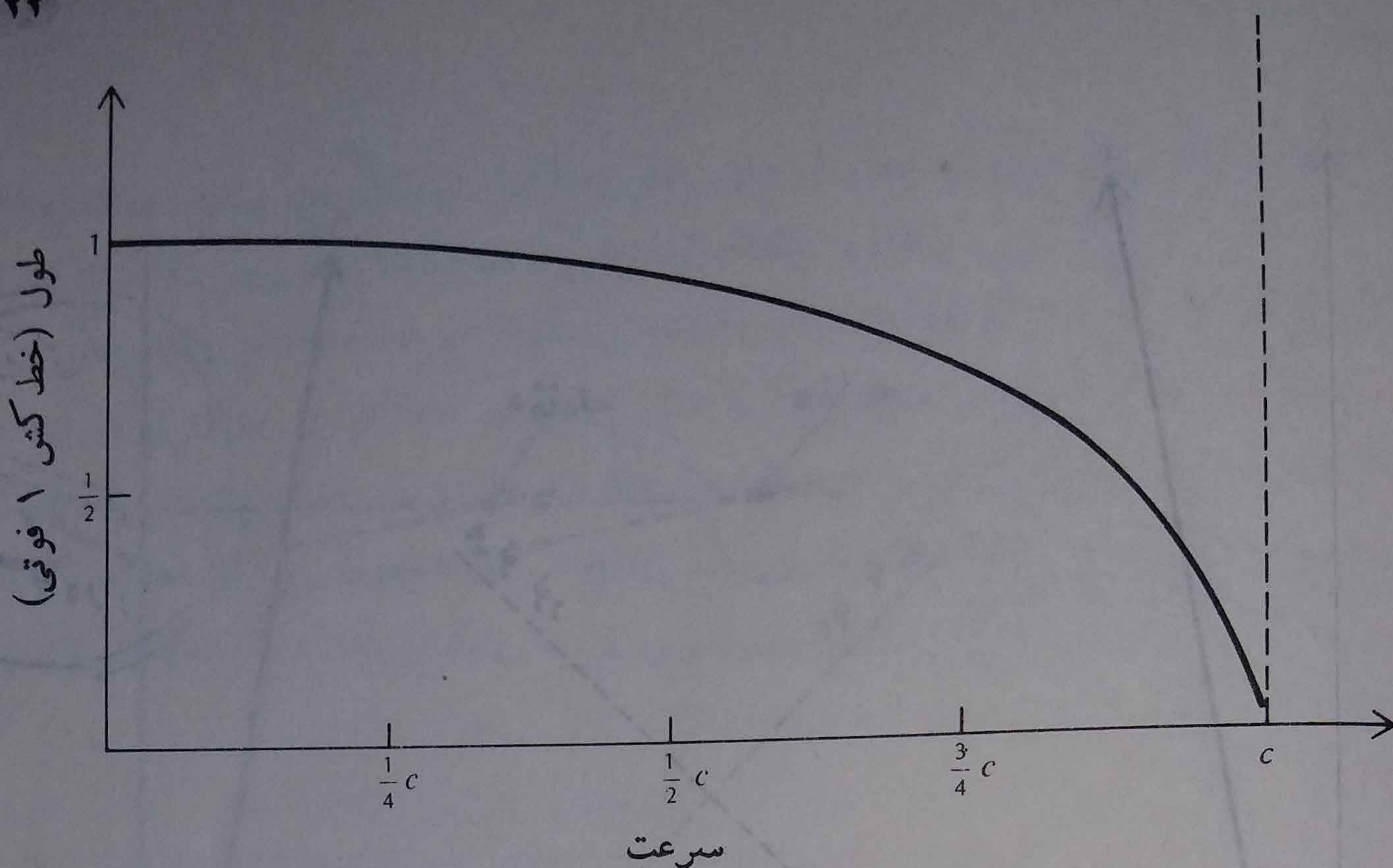
سرعت تغییر می کند. در شکل های ۶-۲ و ۷-۲ می بینیم که چگونه زمان آهسته شده و خط کشها كوچك می شوند. باید توجه کرد که این پدیده ها فقط برای سرعت های بینهایت زیاد اهمیت پیدا می کنند. در حقیقت، یکی از تنها مکان هایی



شکل ۵-۴: افزایش جرم با افزایش سرعت. این نمودار نشان می‌دهد که چگونه جرم یک جسم نیم‌کیلویی درحالی که سرعت جسم به سرعت نور نزدیک می‌شود، ظاهراً افزایش می‌یابد.



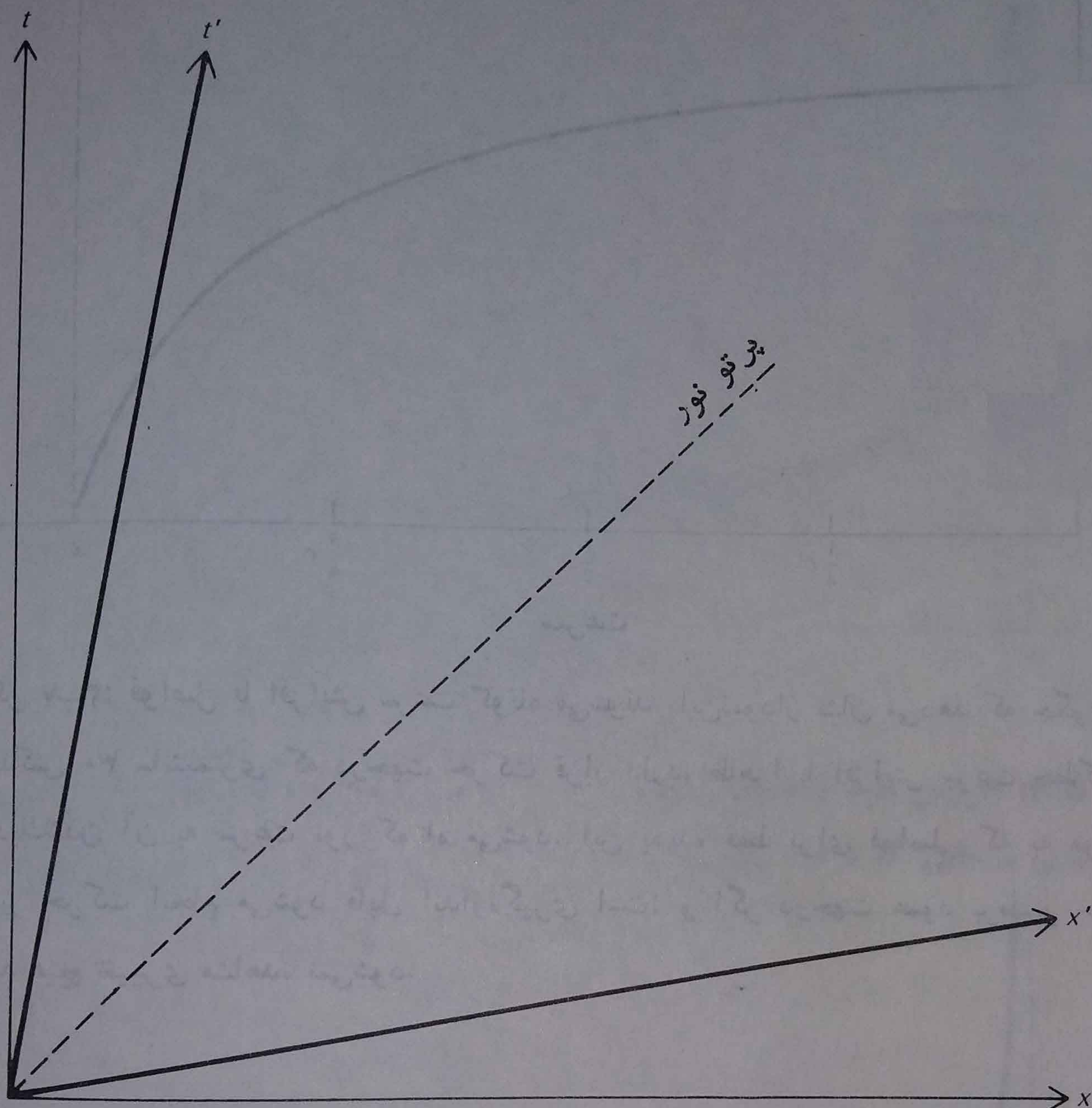
شکل ۶-۴: کندشدن زمان، با افزایش سرعت. در این نمودار می‌بینیم که هر قدر ساعتی که یک ثانیه را اندازه می‌گیرد به سرعت نور نزدیک‌تر می‌شود، طول یا مدت یک ثانیه افزایش می‌یابد.



شکل ۷-۲: فواصل با افزایش سرعت کوتاه می‌شوند. این نمودار نشان می‌دهد که چگونه یک خط کش ۳۰ سانتیمتری که در جهت حرکت قرار دارد، ظاهراً با افزایش سرعت خط کش و نزدیک شدن آن به سرعت نور کوتاه می‌شود. این پدیده فقط برای فواصلی که به موازات مسیر حرکت انجام می‌شود قابل اندازه‌گیری است؛ و اگر در جهت عمود بر مسیر حرکت باشد هیچ تغییری مشاهده نمی‌شود.

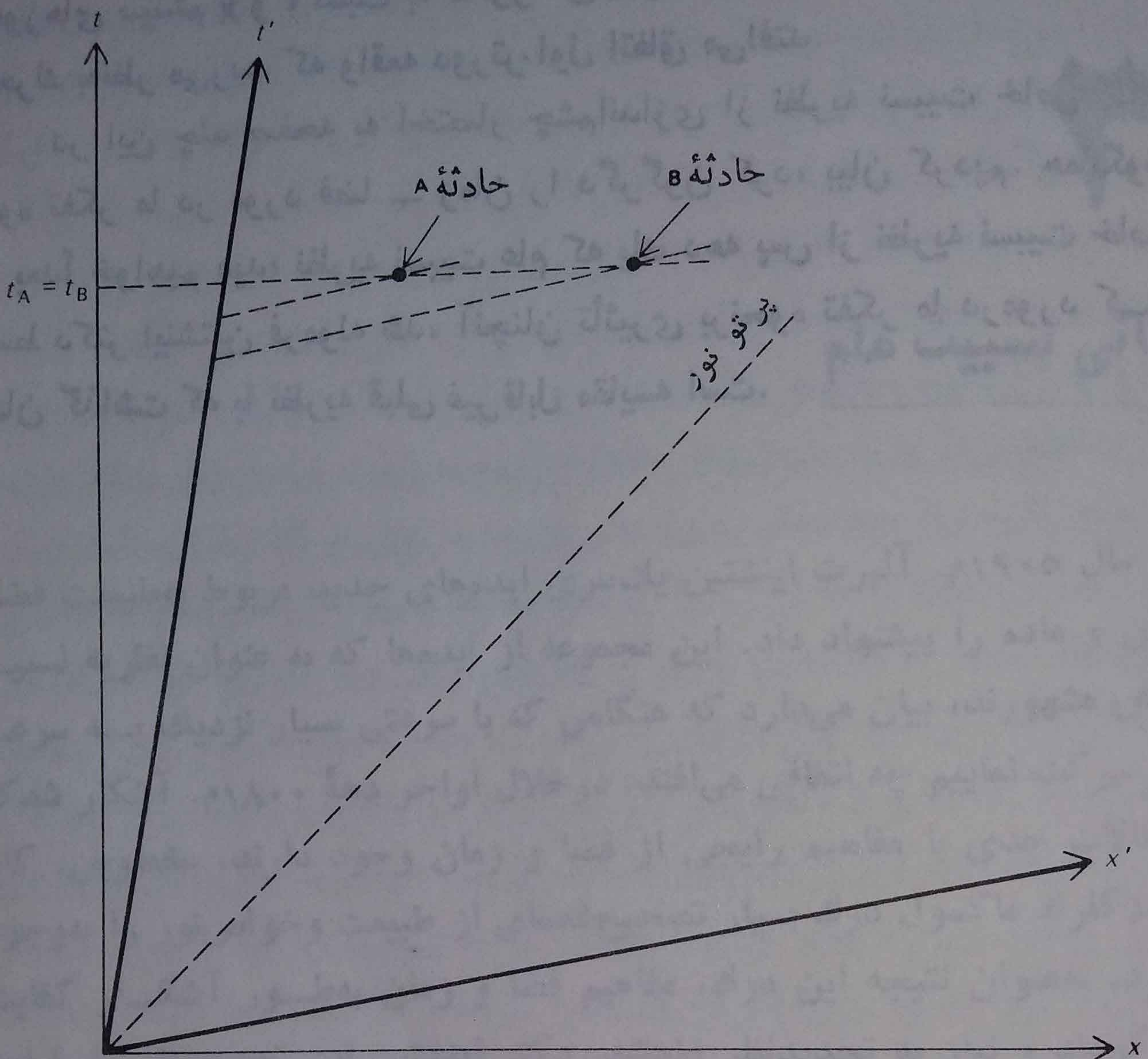
که در آن این پدیده‌ها اهمیت می‌یابند در شتاب‌دهنده‌های هسته‌ای است که در آن، پروتون‌ها و الکترون‌ها با سرعت بسیار نزدیک به سرعت نور در حرکت هستند. در آزمایشاتی که بوسیله فیزیکدانهای هسته‌ای انجام گرفته است، این پدیده‌ها با دقت بسیار زیادی به اثبات رسیده است.

نهایتاً، جالب توجه است که چگونه تبدیلات لورنتز بر نمودارهای فضا-زمان تأثیر می‌گذارد. اگر بگوییم که در سیستم x و t ، خود در حال سکون بوده و سیستم x' و t' در حرکت است؛ در ترسیم این سیستم (شکل ۳-۲) درمی‌یابیم که محورهای x' و t' نسبت به x و t کج می‌شوند. این موضوع را در شکل ۸-۲ می‌بینیم و کج‌شدگی محورها فقط در صورتی که خط پرتو نور در زاویه ۴۵ درجه باشد، حول آن تقارن دارد.



شکل ۸-۲: چگونه فضا - زمان برای يك ناظر متحرك تغییر می کند. فرض کنید که سیستم x و t در حال سکون است و طبق معمول، محور t بر محور x عمود است. اگر سیستم x' و t' در حال حرکت باشد، محورهای آن به سمت خط پرتو نور 45° درجه متمایل می شود.

در اینجا می توانیم دریابیم که چرا بین دوناظر که نسبت به یکدیگر در حرکتند، هیچ چیز به صورت «همزمانی» وجود ندارد. فرض کنید که ما در سیستم x و t دو واقعه را مشاهده می کنیم که به نظر می آید همزمان اتفاق می افتند، لکن فاصله بسیار زیادی باهم دارند. پس زمان وقوع حادثه A برابر زمان وقوع حادثه B است، یا در سیستم ما می توان نوشت: $t_A = t_B$. اما يك

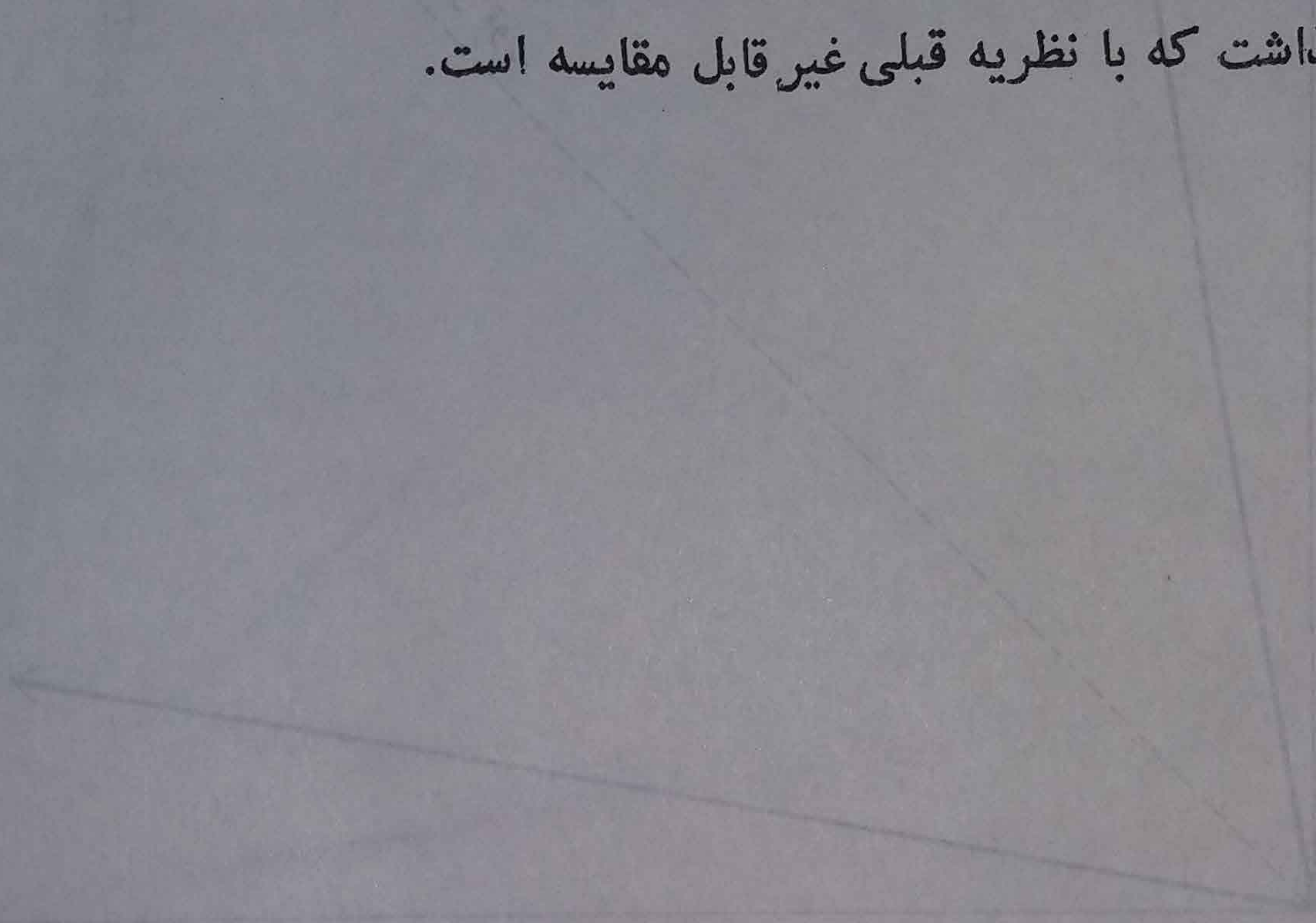


شکل ۹-۲: چرا «همزمانی» نامفهوم است. فرض کنید که سیستم x و t در حال سکون باشد. در این سیستم دو واقعه (واقعه A و B) را مشاهده می‌کنیم که به نظر می‌آید در یک زمان ($t_A = t_B$) اتفاق می‌افتند؛ ناظر متحرک در سیستم x' و t' خواهد گفت که دو واقعه در یک زمان اتفاق نیافتاده‌اند. چون محورهای سیستم متحرک - طبق آنچه در نمودار می‌بینید نسبت به محورهای x و t زاویه ساخته‌اند، ناظر خواهد گفت که واقعه B پیش از واقعه A رخ داده است.

ناظر متحرک (سیستم x' و t') خواهد گفت که این دو واقعه همزمان اتفاق نیافتاده‌اند، و دلیل آن به وضوح در شکل ۹-۲ نشان داده شده است. به دلیل این حقیقت که

محورهای سیستم x و t نسبت به محورهای x و t زاویه دارند، لذا به دیده‌ناظر متحرك به‌نظر می‌رسد که واقعه دورتر، اول اتفاق می‌افتد.

در این چند صفحه به اختصار چشم‌اندازی از نظریه نسبیت خاص که نحوه تفکر ما در مورد فضا - زمان را دگرگون کرد، بیان کردیم. همانگونه که بعداً خواهیم دید، نظریه نسبیت عام که يك دهه پس از نظریه نسبیت خاص توسط دکتر اینشتین فرموله شد، آنچنان تأثیری بر نحوه تفکر ما در مورد کل جهان گذاشت که با نظریه قبلی غیر قابل مقایسه است.



مبانی نسبیت عام

در سال ۱۹۰۵ م. آلبرت اینشتین یک سری ایده‌های جدید مربوط به طبیعت فضا، زمان و ماده را پیشنهاد داد. این مجموعه از ایده‌ها که به عنوان نظریه نسبیت خاص مشهورند، بیان می‌دارد که هنگامی که با سرعتی بسیار نزدیک به سرعت نور حرکت نماییم چه اتفاقی می‌افتد. در خلال اواخر دهه ۱۸۰۰ م. آشکار شد که اشکالات جدی با مفاهیم رایجی از فضا و زمان وجود دارند. بخصوص، کار جیمز کلرک ماکسول درک بسیار تصحیح‌شده‌ای از طبیعت و خواص نور را به وجود آورد. به عنوان نتیجه این درک، مفاهیم فضا و زمان به‌طور آشکار کفایت نمی‌کردند و نیاز به تجدیدنظر داشتند. دکتر اینشتین این تجدیدنظر را با این فرض که سرعت نور یک ثابت مطلق است، انجام داد. به علاوه، او دریافت که بسیار سودمند است که زمان را به عنوان بعد چهارم به سه بعد فضایی دیگر اضافه کند. تمام پیشگویی‌های معمولی نسبیت خاص، از ثابت بودن سرعت نور و پیوسته چهاربندی فضا - زمان، نتیجه می‌شود.

مع ذلک، می‌توانیم بیشتر از آنچه که در نظریه نسبیت خاص موجود است، امیدوار باشیم. مثلاً، مشاهده می‌کنیم که گرانش یکی از مهمترین نیروهای طبیعت است. تحت تأثیر این نیرو است که سیارات در مدارشان به دور خورشید باقی می‌مانند. گرانی، حرکت خورشید و ستارگان را در کهکشان ما کنترل می‌کند. گرانش، اندرکنش بین کهکشانها و شاید تحول کل جهان را دربر می‌گیرد. به‌طور محقق، فوق‌العاده سودمند خواهد بود اگر گرانش می‌توانست

در مفهوم چهاربعدی فضا - زمان شرکت نماید.

ستاره‌شناس قویاً تحریک شده است که جهان را بر حسب يك فضا - زمان چهاربعدی تفکر نماید. در واقع، همانطور که به جهان می‌نگریم، از نظر زمانی به عقب نگاه می‌کنیم. اگر ستاره‌ای را که ۲۰ سال نوری دور است نگاه کنیم، نوری که به چشمان ما می‌رسد، ستاره را ۲۰ سال پیش ترك کرده است. به عبارت دیگر، ما ستاره را بصورتی که بیست سال پیش بوده است می‌بینیم. بنابراین، به‌طور آشکار، هر موقع ما درباره اجرام نجومی فکر می‌کنیم درمی‌یابیم که ایده‌های ما درباره فضا و زمان درهم‌آمیخته‌اند. به‌ویژه در پرتو این حقیقت که گرانش، که اندرکنش غالب بر اجرام نجومی به‌شمار می‌رود، محرکی بسیار حقیقی برای بسط یا تعمیم نظریه نسبیت خاص است تا گرانی را شامل شود.

اما چگونه می‌توان این عمومیت‌دادن را به‌انجام رساند؟ شاید سودمندترین راه، این فرض باشد که طبیعت فضا - زمان در حضور يك میدان گرانشی تغییر می‌کند. به عبارت دیگر، در شرایط عاری از گرانی، ذرات و پرتوهای نور هنوز سعی دارند که به مفیدترین وجه حرکت نمایند؛ ولی چون فضا - زمان تغییر کرده است، مسیر منتجه، دیگر يك خط مستقیم نخواهد بود. سپس مسأله‌ای که باید تشریح شود این است که فضا - زمان به چه طریق و به چه مقدار تغییر می‌کند.

در نظریه نسبیت خاص که گرانش را شامل نمی‌شود، فضا-زمان «سطح» است. شاید در حضور يك میدان گرانشی، فضا-زمان «خمیده» گردد. يك میدان گرانشی ضعیف سبب می‌گردد که فضا-زمان کمی پیچ‌بخورد، و مسیرهای ذرات و پرتوهای نور کمی از خطوط مستقیم کلاسیکی منحرف می‌گردند. يك میدان گرانشی شدید سبب می‌گردد که فضا-زمان به طور شدید پیچ بخورد، و در نتیجه تغییرات اساسی در مسیرهای پیموده‌شده توسط ذرات و پرتوهای نور حاصل گردد.

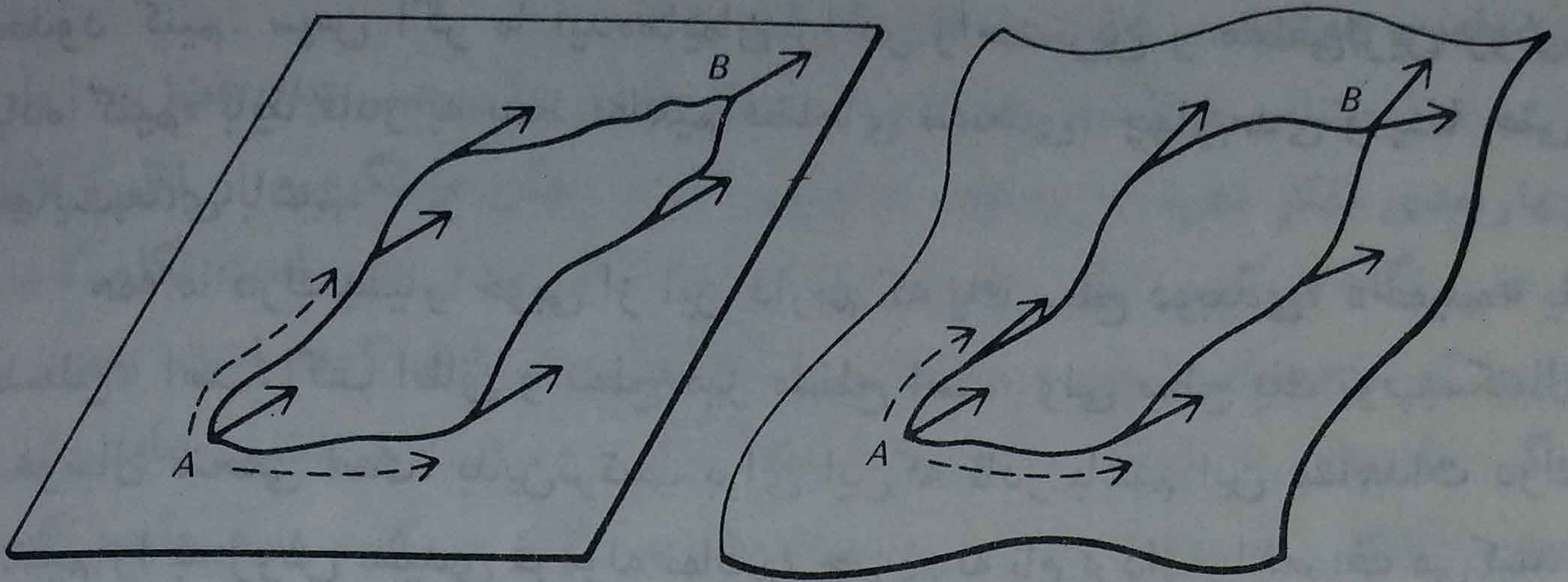
برای درك مفهوم این نمونه از بررسی گرانی، ما باید به‌طور آشکار ایده واضحی درباره آنچه که به معنی فضای «سطح» یا «خمیده» می‌باشد، داشته باشیم. فوق‌العاده مفید است که در مقاصد تصویری، بحث را به سطوح دوبعدی

محدود کنیم. سپس اگر ما ایده‌هایمان را در راحت‌ترین و منطقی‌ترین روش پیاده کنیم، باید قادر به بسط مفاهیم فضاهاى سه‌بعدی، چهاربعدی و یا حتی بینهایت‌بعدی باشیم.

همه ما درك بسیار خوبی از این داریم که يك سطح دوبعدی، «خمیده» یا «مسطح» است. كف اطاق و سطح ميز مسطح است، ولی سطح يك توپ بسکتبال یا فوتبال منحنی است. بدین ترتیب برای این که قادر باشیم این مشاهدات درك مستقیم را به روش مفیدی فرموله نماییم، چیزی به نام بردار را تعریف می‌کنند. بردار، چیزی است که هم دارای اندازه و هم جهت است. سرعت مثال خوبی از بردار است؛ در يك شاهراه شما با سرعت ۹۰ کیلومتر در ساعت به سمت شرق مسافرت خواهید کرد. می‌توانیم يك بردار را توسط يك فلش مشخص نماییم. طول فلش، اندازه یا مقدار بردار را مشخص می‌کند؛ در صورتی که فلش، جهت‌گیری بردار را نشان می‌دهد. مثلاً، ممکن است در يك روز معین يك نقشه هواشناسی را که پر از فلش‌های کوچکی برای نشان دادن سرعت باد است، تصور کنیم. اندازه فلش، سرعت باد را منعکس می‌کند و جهت‌گیری فلش، جهت وزیدن باد را نشان می‌دهد. با يك نظر اجمالی ممکن است تصویر واضحی از نحوه حرکت هوا در آن روز به دست آوریم.

حال برداری را (که با يك فلش نشان داده می‌شود) در يك سطح دوبعدی در نظر بگیرید. سپس این بردار را در اطراف این سطح از مکانی به مکان دیگر بدون تغییر در اندازه یا جهت آن حرکت می‌دهیم. این فرایند که به عنوان انتقال موازی مشهور است، به صورت زیر انجام شده است. تصور کنید که شما می‌خواهید بردار را از نقطه A به نقطه B در امتداد مسیر بخصوصی حرکت دهید. در هر مرحله در امتداد مسیر متوقف شده و بردار را بررسی می‌کنید، و هربار اطمینان پیدا می‌کنید که اندازه و جهت بردار بدون تغییر مانده است.

حالا به این حقیقت فوق‌العاده جالب که در شکل ۱-۳ نشان داده شده است توجه نمایید. با رفتن از نقطه A به نقطه B بر روی يك سطح صاف، همواره بدون توجه به این که چه مسیری را برای رفتن از نقطه A به B انتخاب کرده‌اید، در انتها به يك نقطه خواهید رسید. اما بر روی سطح خمیده، هنگامی که شما به



شکل ۱-۳: انتقال موازی بردارها به روی سطوح مسطح و خمیده. در انتقال موازی بردارها (که توسط فلشها مشخص شده‌اند)، هنگامی که شما در طول یک مسیر حرکت می‌کنید، بهترین کاری که می‌توانید انجام دهید این است که در هر قدم مطمئن شوید که طول و جهت‌گیری بردار بدون تغییر باقی می‌ماند. با رفتن از نقطه A به نقطه B روی یک سطح صاف، شما همیشه در پایان سفر یک نتیجه را به دست خواهید آورد و این مستقل از مسیر طی شده است. مع‌ذالك، در یک سطح خمیده، شما نتایج مختلفی که به مسیر انتخاب شده بستگی دارد، به دست خواهید آورد.

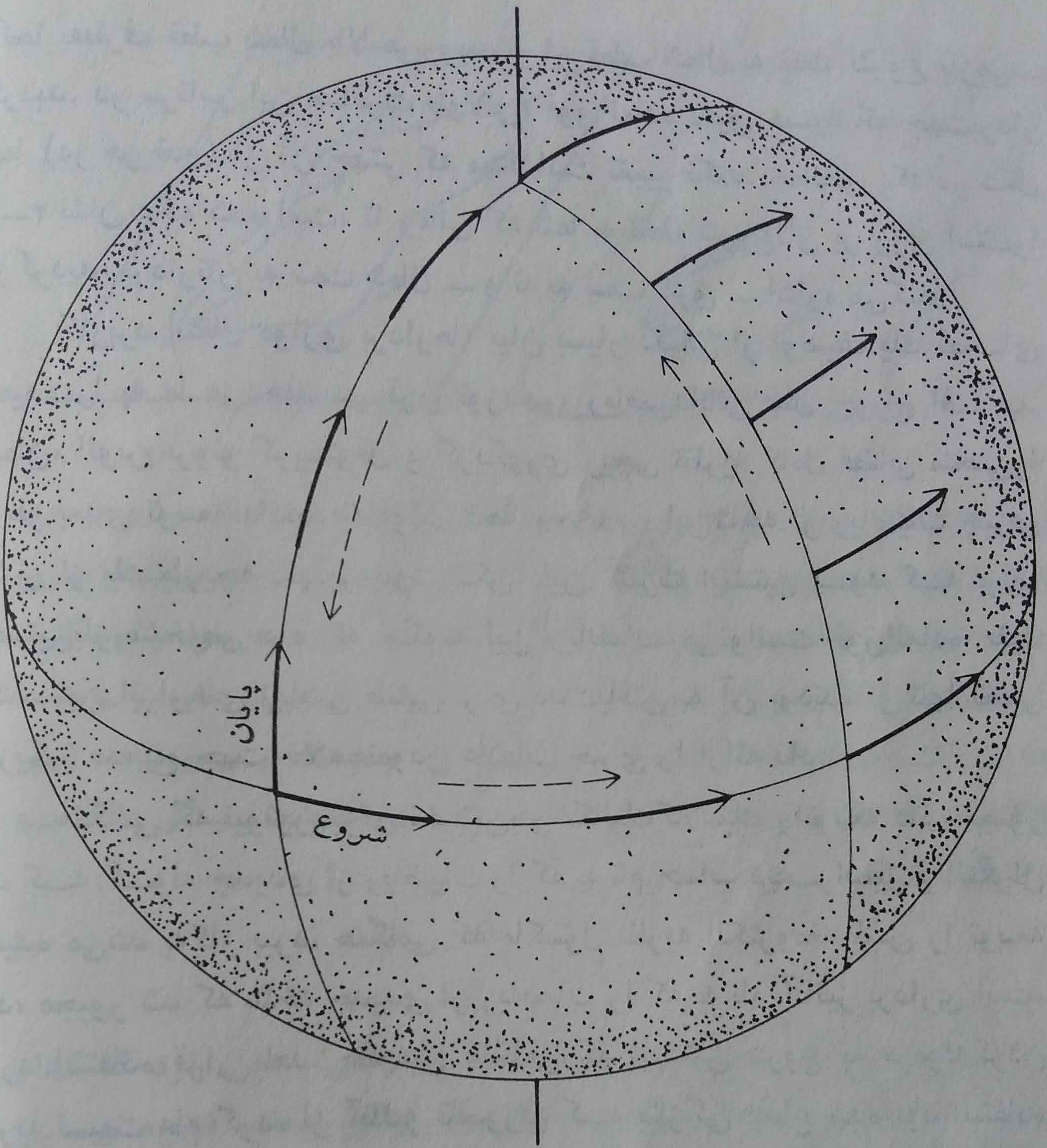
نقطه B می‌رسید، بردار متفاوتی خواهید داشت که بستگی به این دارد که کدام مسیر را انتخاب کرده باشید. به عبارت دیگر، در فضای مسطح، نتیجه نهایی انتقال موازی یک بردار، مستقل از مسیر طی شده می‌باشد. ولی در فضای خمیده، نتیجه نهایی انتقال موازی یک بردار، شدیداً به مسیر طی شده وابسته است. این معیار تشخیص فضاهای خمیده یا غیرخمیده را می‌توان به فضاهایی با هر تعداد «بعد» گسترش داد.

یک مثال بسیار روشن نهایی این پدیده، توسط فردی که برداری را به دور زمین به حرکت درمی‌آورد داده شده است. فرض کنید که حرکت خود را بر روی استوا، با برداری با طول آنچنان‌ه‌ای که به سمت شرق جهت داده شده است، شروع می‌کنید. شما در امتداد استوا، با طول جغرافیایی 90° درجه حرکت می‌کنید. سپس از

آنجا به طرف قطب شمال بالا می‌روید، و از قطب شمال به نقطه شروع بازمی‌گردید. در سرتاسر این مسافرت طولانی، فوق‌العاده دقیق هستید که جهت‌بردار شما (در هر قدم) از آن جهتی که ممتد است تغییر نکند. همانطور که در شکل ۲-۳ نشان داده شده است، تا زمانی که شما به نقطه شروع‌تان بر روی استوا باز گردید، بردارتان به سمت شمال - و نه به سمت شرق - اشاره می‌کند.

کاربرد انتقال موازی بردارها، بیان بسیار دقیقی از توصیف يك فضای خمیده را به ما می‌دهد. در قرن نوزدهم، ریاضی‌دانانی مثل جورج اف. ب. ریمان، الوین برونو کریستوفل و گریگوری ریچی نظریه کامل فضای منحنی را با هر بعدی توسعه دادند. تا اوایل دهه ۱۹۰۰ م.، این شاخه از ریاضیات چیزی بیشتر از يك بازیچه دلپذیر نبود. لکن، این آلبرت اینشتین بود که برای نخستین بار تشخیص داد که چگونه این ریاضیات می‌توانست فوق‌العاده مفید باشد. این ابزارهای ریاضی طنابی برای دستیافتن به آن بودند، او تنها تغییر فیزیکی صحیح جهت خلاصه‌نمودن علامات جبری را ارائه داد.

هنگامی که نیوتون برای نخستین بار مکانیک کلاسیک را توسعه داد، مجبور شد که گونه جدیدی از ریاضیات را که به نام حساب دیفرانسیل و انتگرال نامیده می‌شد به کار ببرد. هنگامی که ماکسول نظریه الکترومغناطیس را توسعه داد، مجبور شد که شاخه جدیدی از ریاضیات را که به نام آنالیز برداری است، مورد استفاده قرار دهد. همچنین هنگامی که اینشتین شروع به فرموله کردن نظریه نسبیت عام کرد، از آنالیز تانسوری که بتازگی ابداع شده بود استفاده کرد. آنالیز تانسوری شاخه‌ای از ریاضیات است که از کمیات ریاضی که به نام تانسور خوانده می‌شود بحث می‌کند. در اوایل دهه ۱۹۰۰ م. ریمن، گوس، ریچی و کریستوفل تعدادی از تانسورها را کشف کردند که فوق‌العاده در بیان طبیعت يك فضای خمیده مفید بودند. به خصوص، تانسور معروف به تانسور ریچی به ما می‌گوید که چگونه بردارها در هنگامی که آنها را به‌طور موازی در يك فضای خمیده انتقال می‌دهید، می‌چرخند؛ این دقیقاً همان چیزی بود که اینشتین به جستجوی آن پرداخته بود. سپس اینشتین از تانسور ریچی، معادلات میدان را به‌وجود آورد. این معادلات میدان که همه مهم هستند، کلیه چیزهایی را که



شکل ۳-۴: انتقال موازی يك بردار بر روی يك کره. تصور کنید که شما بر روی استوای زمین با يك بردار که به سمت شرق ممتد است، حرکت می کنید. این بردار را به طور موازی در امتداد طول جغرافیایی ۹۰ درجه جابه جایی کنید. سپس به سمت بالا به طرف قطب شمال حرکت می کنید. حال به مکان شروع باز می گردید. در هر قدم در امتداد مسیر، شما بسیار دقیق هستید که بردار مثل گام قبلی در يك جهت باقی بماند. علی رغم این، در انتهای سفرتان فلش به جانب شمال اشاره می کند و نه به سمت شرق!

لازم است در مورد خواص زمان و فضا در يك میدان گرانشی بدانیم به ما می‌گوید.

ولی به‌طور آشکار این کافی نیست. معادلات اینشتین به ما می‌گوید که چگونه فضا - زمان توسط میدان گرانشی پیچ‌خورده است، اما در مورد این که چگونه اجرام در فضای خمیده حرکت می‌کنند چیزی بیان نمی‌دارد. در بحث این وضعیت، فرض می‌کنیم که ذرات و پرتوهای نور به مؤثرترین روش از میان فضا - زمان می‌گذرند. به بیان دقیق‌تر، اگر شئی بخواهد از نقطه A به نقطه B برود، مسیری که دنبال می‌شود کوتاه‌ترین فاصله‌ای است که از اتصال این دو نقطه در فضا - زمان حادث می‌گردد. اگر فضا - زمان مسطح باشد، به‌طور آشکار مسیر آن يك خط مستقیم خواهد بود؛ و اگر خمیده باشد، مسیر حاصل زمین‌سنجی نامیده می‌شود. معادلاتی که شخص باید حل کند تا پیام‌وزد مسیری که يك شئی یا پرتو نور دنبال می‌کند، معادلات زمین‌سنجی نامیده می‌شوند. بنابراین اکثر مسائل در نسبیت عام، شامل حل همزمان معادلات میدان با معادلات زمین‌سنجی می‌باشند. در فصلهای آینده، نتایج جالب چنین محاسباتی بیشتر بررسی خواهد شد.

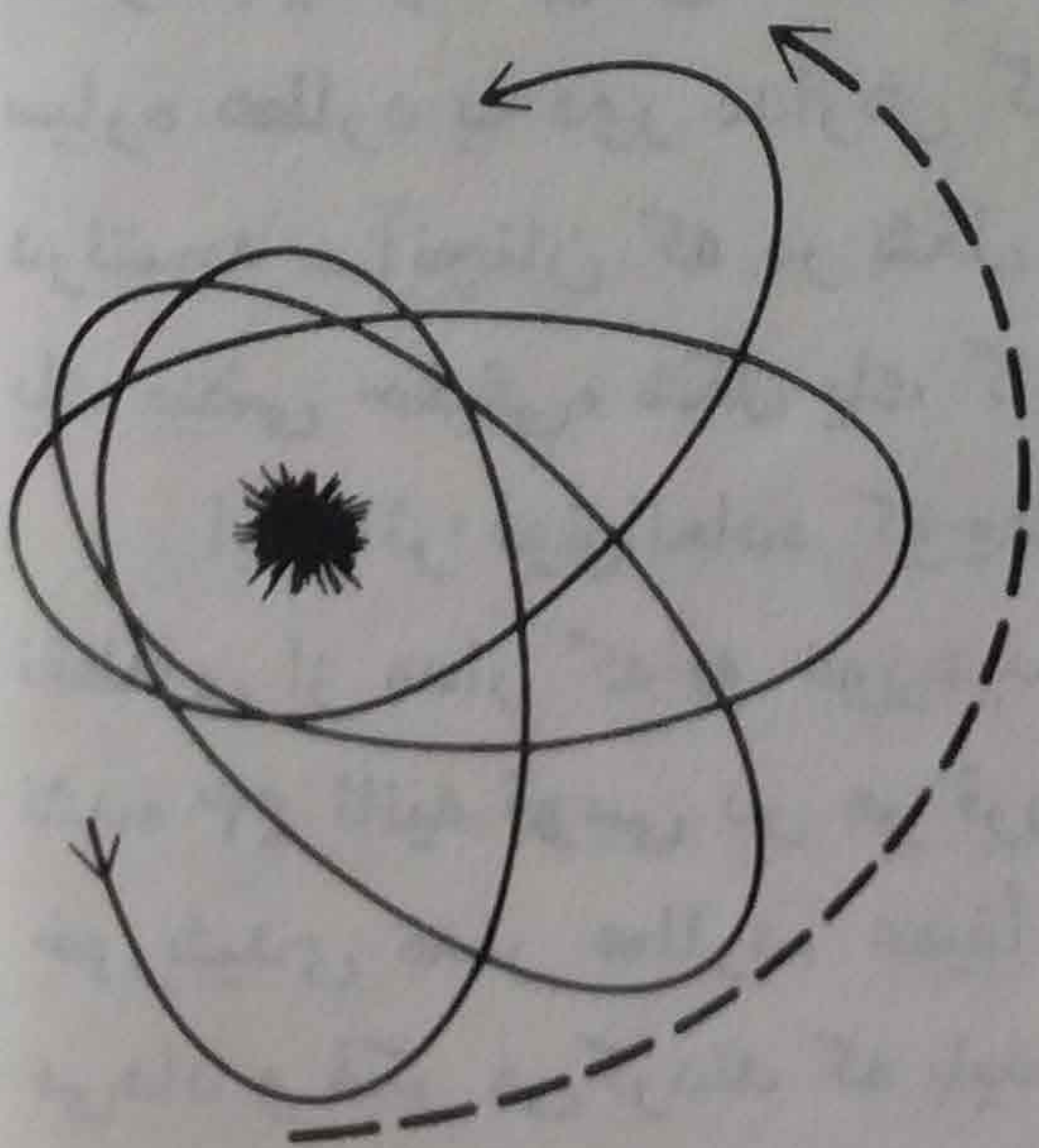
آزمونهای تجربی نسبیت

تا پایان قرن گذشته، بیش از پیش روشن شده بود که در مورد حرکات سیاره عطارد چیز غلطی وجود دارد. با استفاده از مکانیک نیوتونی، ستاره‌شناسان باید قادر باشند که مدارهای کلیه سیارات را با دقت بسیار زیاد محاسبه نمایند. اما حتی پس از این که کلیه اصلاحات شناخته شده ناشی از اختلالات به وجود آمده توسط سیارات خارجی به کار رفت، باز هم محاسبات در مورد پیش‌بینی حرکت عطارد - با دقت مورد نظر - با شکست روبه‌رو شد. به خصوص، به نظر می‌آید که مدار بیضی عطارد با کندی بسیار در حال حرکت به اطراف یا حرکت تقدیمی می‌باشد. در غیاب اثر سیارات خارجی و بر طبق مکانیک کلاسیک، مدار سیاره عطارد باید یک بیضی کامل باشد. ولی مشاهدات نشان می‌دهد که مادامی که سیاره عطارد به دور مدارش گردش می‌کند، مدار آن به‌طور آهسته می‌چرخد. در نتیجه - آنچنان که در شکل ۱-۴ نشان داده شده است - سیاره عطارد بجای یک بیضی حقیقی، شکل یک گل را ترسیم می‌کند.

این اثر، فوق‌العاده کوچک است. قرین خورشید مدار عطارد (یعنی، نقطه‌ای از مدار که به خورشید از همه نزدیکتر است) به میزان توضیح داده شده ۴۳ ثانیه قوسی در هر قرن، حرکت می‌کند. اما این حرکت تقدیمی قرین خورشیدی مدار عطارد، عمیقاً ستاره‌شناسان را در اوایل دهه ۱۹۰۰ م. آزار می‌داد و فکر می‌کردند که باید بتوانند توضیحی برای آن بیابند. در سال ۱۹۱۶ م. آلبرت اینشتین نظریه جدید و متحولی را در مورد گرانش

که به عنوان نظریه نسبیت عام شناخته شد، ارائه داد. اساس این نظریه بر آن است که میدان گرانشی توسط خمیدگی یا پیچ خوردگی فضا - زمان چهاربعدی تجلی می کند. معادلات معروف به معادلات میدان، بیان می دارند که با چه شدتی فضا - زمان خمیده شده است، و معادلات زمین سنجی نیز می گویند که چگونه اجرام در این فضای پیچ خورده حرکت می کنند. هنگامی که اینشتین توجه خود را به حرکت سیارات به دور خورشید یا يك ستاره وزین معطوف داشت، دریافت که در حقیقت مدارها باید به طور ایده آل بیضی هایی باشند که در حرکت تقدیمی اند. نزدیک خورشید یا يك ستاره دیگر که میدان گرانشی در آنجا بیشترین مقدار را دارد، میزان حرکت تقدیمی باید بزرگترین مقدار باشد. دور از منبع گرانی، جایی که میدان ضعیف است هر انحرافی از مکانیک نیوتونی باید اساساً غیر قابل ارزش باشد. به علاوه، بر طبق محاسبات اینشتین میزان حرکت تقدیمی قرین خورشیدی عطارد باید ۴۳ ثانیه قوسی در هر قرن باشد. برای نخستین بار ما توضیحی برای حرکت معماگونه عطارد داشتیم و این تشریح لازم می دارد که کلیه ایده های خود را در مورد گرانش تغییر دهیم.

شاید مشکل بتوانیم شور و هیجانی را که در سال ۱۹۱۶ م. در جامعه



شکل ۱-۴: حرکت تقدیمی قرین خورشیدی عطارد. بر طبق نظریه کلاسیک، پس از کسر اثرات اضافی ناشی از سیارات خارجی، مدار عطارد حول خورشید باید يك بیضی کامل باشد. در عوض، خود بیضی به آهستگی حرکت کرده یا حرکت تقدیمی انجام می دهد. در نتیجه عطارد شکل يك گل را ترسیم می کند. (در نمودار، این اثر به طرز بسیار اغراق آمیزی درج شده است).

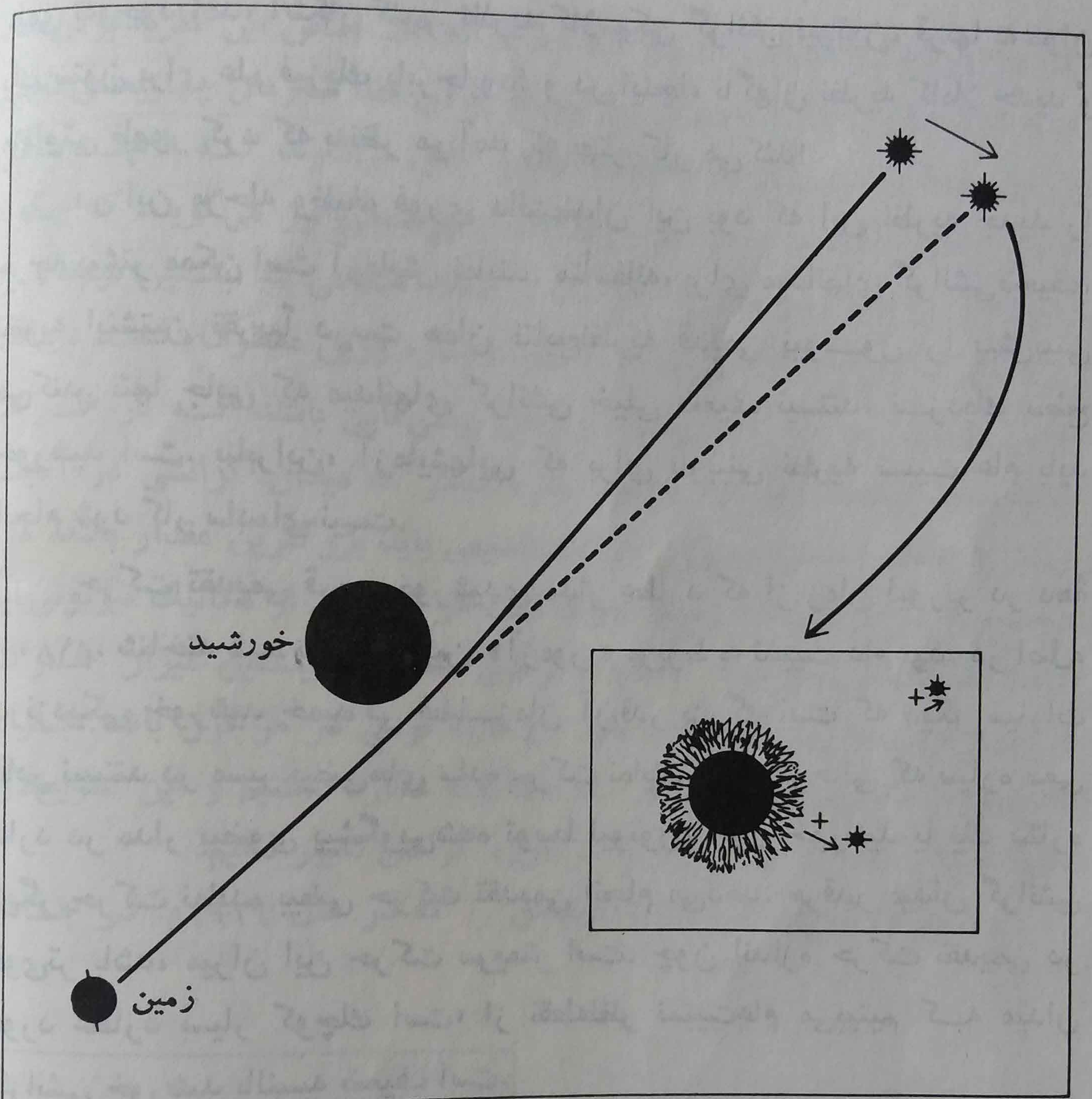
علمی به وجود آمد، آشکار کنیم. نظریه کلاسیکی گرانش نیوتون، قرن‌ها به عنوان يك ستون برای علم فیزیک پابرجا بود؛ و در اینجا، ناگهان نظریه کاملاً جدید و متفاوتی ظهور کرد که به نظر می‌آمد که بهتر کار می‌کند!

در این مرحله وظیفه فوری دانشمندان این بود که این نظریه جدید را هرچه بیشتر ممکن است آزمایش نمایند. متأسفانه، برای میدانهای گرانشی ضعیف، نظریه اینشتین تقریباً درست همان نتایج نظریه قدیمی نیوتون را پیش‌بینی می‌کند. تنها جایی که میدانهای گرانشی خیلی ضعیف نیستند، نزدیک سطح خورشید است. بنابراین، آزمایشهایی که برای بازبینی نظریه نسبیت عام باید انجام شود کار ساده‌ای نیست.

حرکت تقدیمی قرین خورشیدی مدار عطارد که از زمان لیوریر در دهه ۱۸۰۰ م. شناخته شده بود، نخستین «آزمون» مربوط به نسبیت عام بود. در اصل، در نزدیکی خورشید خمیدگی فضا-زمان آن قدر بزرگ است که دیگر سیارات قادر نیستند در مسیر بیضی‌های ساده حرکت نمایند. بلکه در حالی که سیاره سعی دارد در مدار بیضوی پیشگویی شده توسط نیوتون، حول خورشید یا يك ستاره دیگر حرکت نماید، بیضی حرکت تقدیمی انجام می‌دهد. هر قدر میدان گرانشی قوی‌تر باشد، میزان این حرکت سریعتر است. چون اندازه حرکت تقدیمی در مورد عطارد بسیار كوچك است، از نقطه نظر نسبیت عام می‌بینیم که میدان گرانشی خورشید بالنسبه ضعیف است.

دومین آزمونی که در مورد نسبیت عام صورت گرفته است، ناشی از حقیقت پرتوهای نور در فاصله بسیار نزدیکی از خورشید است. در حالی که شعاعهای نور ستارگان دور از میان فضا - زمان خمیده نزدیک سطح خورشید عبور می‌کنند، به مقدار کمی خم یا منحرف می‌شوند (شکل ۲-۴). این ایده که پرتوهای نور در میدان گرانشی می‌توانند تحت تأثیر قرار بگیرند، تا بحال به طور جدی مورد بررسی قرار نگرفته بود. ولی محاسبات اینشتین آشکار کرد که يك شعاع نور که درست از سطح خورشید می‌گذرد، بایستی تحت زاویه $1/75$ ثانیه قوسی منحرف شود.

واضح است که اشکال این چنین مشاهده‌ای ناشی از این حقیقت است که



شکل ۴-۳: انحراف نور توسط خورشید. پرتو نوری که از نزدیک سطح خورشید عبور می‌کند، کمی منحرف می‌گردد. این اثر نخستین بار در خلال یک کسوف کامل مشاهده شد.

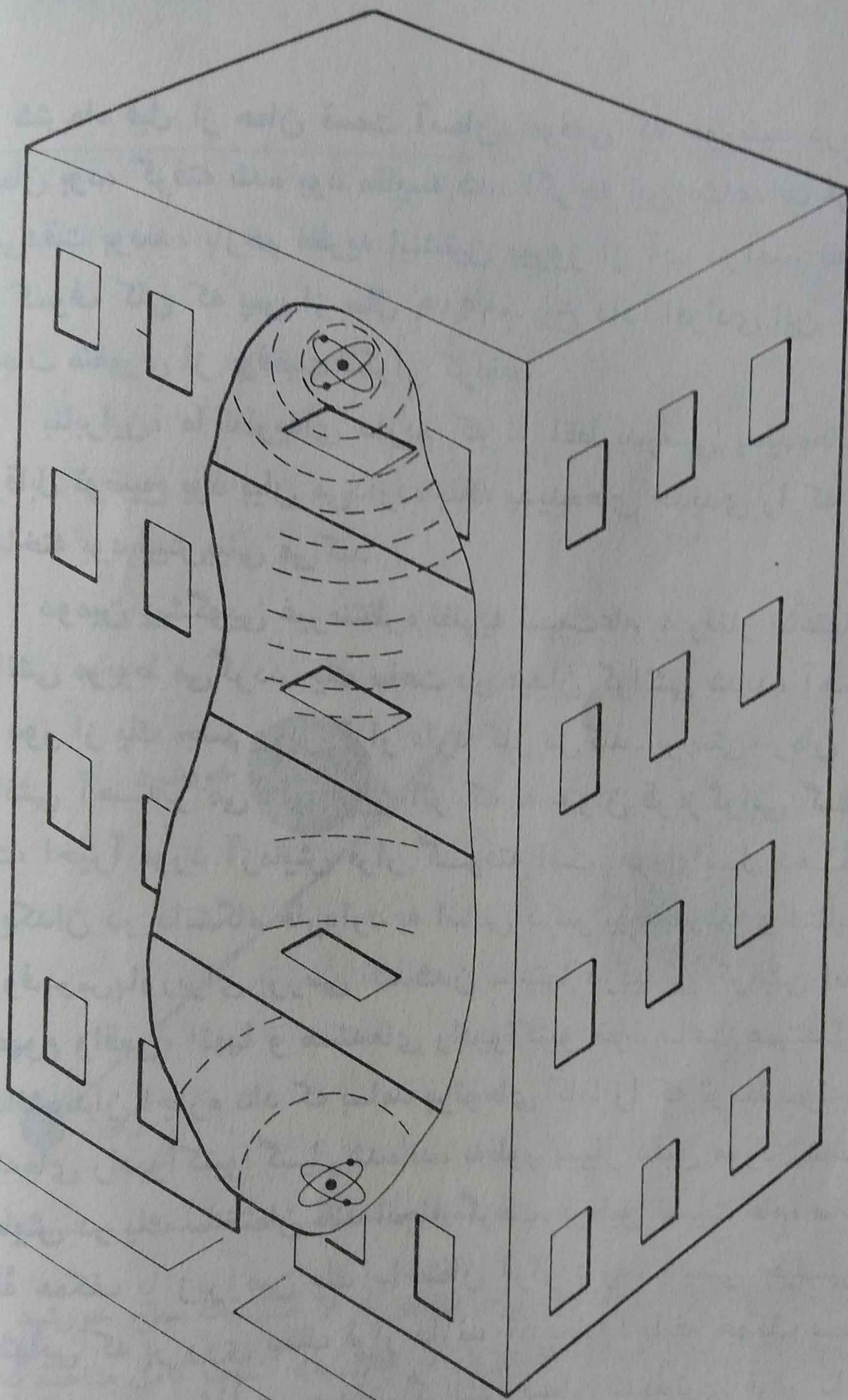
خورشید آن قدر درخشنده است که تحت شرایط عادی، رؤیت حرکت ستارگان مجاور خورشید غیرممکن است. کسوف کلی سال ۱۹۱۹م. فرصت منحصر به فردی را برای غلبه بر این مشکل به وجود آورد. در خلال چند دقیقه گرانبهای کسوف کلی، عکسهایی از ستارگان مجاور خورشید گرفته شد. این عکسها با عکسهایی

که شش ماه قبل از همان قسمت آسمان، موقعی که خورشید در قسمت دیگر آسمان بود، گرفته شده بود مقایسه شد. اگرچه این مشاهدات فوق العاده مشکل و بی دقت بودند، باز هم نظریه اینشتین پیروز از آب درآمد. تقریباً در خلال هر کسوف کلی که پس از سال ۱۹۱۹ م. رخ داد، افرادی این آزمایش را با درجات متغیری از موفقیت تکرار کردند.

بنابراین، ما نظریه‌ای داریم که نه فقط بدرستی پدیده‌هایی را که قبلاً غیر قابل توضیح بود بیان می‌دارد، بلکه پدیده‌های جدیدی را که تا پیش از آن ناشناخته بود پیش‌بینی می‌کند.

دومین پیشگویی غیرمنتظره نظریه نسبیت عام به رفتار ساعتها در يك میدان گرانشی مربوط می‌گردد. يك ساعت در میدان گرانشی شدید، آهسته‌تر از ساعتی که دور از يك جسم وزین قرار دارد کار می‌کند. برآستی، زمان در يك میدان گرانشی آهسته‌تر می‌گذرد. این اثر که به عنوان قرمزگرایی گرانشی مشهور است، اخیراً مورد آزمایش قرار گرفته است. در اوایل دهه ۱۹۶۰ م. سه فیزیکدان در دانشگاه هاروارد به اسامی دکتر پوند، ربکا و اشنایدر، از پدیده معروف موس‌باور برای بررسی کندشدن ساعتها در میدان گرانشی استفاده کردند. به مفهوم واقعی، اتمها و هسته‌های رادیواکتیو خود ساعت هستند. پدیده مزباهر به دانشمندان اجازه داد که بسامد پرتوهای گاما را که توسط نمونه‌های معینی از هسته‌های رادیواکتیو گسیل شده‌اند، به‌طور بسیار دقیق مورد امتحان قرار دهند. آزمایش در يك ساختمان بلند انجام گرفت. بر طبق نسبیت عام، ساعت‌هایی که در طبقه همکف یا زیرزمین يك ساختمان قرار دارند بایستی خیلی آهسته‌تر از ساعت‌هایی که بر روی سقف قرار دارند کار بکنند؛ طبقه همکف به مرکز زمین نزدیک‌تر بوده و لذا در میدان گرانشی بسیار شدیدتری قرار دارد. با مقایسه بسامد پرتوهای گاما که در پدیده موس‌باور در زیرزمین و در چندین طبقه بالاتر به کار رفته‌اند، فیزیکدانان هاروارد موفق شدند که کندشدن زمان را آشکار کنند (شکل شمایی ۳-۴). این نتایج با پیش‌بینی‌های اینشتین با دقتی بهتر از يك درصد توافق داشت.

این سه پدیده (حرکت تقدیمی قرین خورشید مدار عطارد، انحراف نور



شکل ۳-۴: قرمزگرایی گرانشی. برطبق نظریه نسبیت عام، ساعتها در يك میدان گرانشی کند می‌شوند. بنابراین، ساعتی که در طبقه همکف يك ساختمان قرارداشته باشد در مقایسه با ساعت واقع در اطاق زیرشیروانی که از مرکز زمین دورتر است، کندتر کار می‌کند. این پدیده نخستین بار با استفاده از پرتوهای گاما که از هسته‌های رادیواکتیو ناشی می‌شد، در خانه‌ای در نزدیکی بوستن انجام گرفت.

توسط خورشید و قرمزگرایی گرانشی) سه آزمون کلاسیک نسبیت عام را تشکیل می‌دهند. در يك حالت معین، انبساط جهان ممکن است به عنوان چهارمین آزمون مورد بررسی قرار گیرد، اما سه آزمون کلاسیک واقعاً تنها مصداق تجربی هستند که از نظریه اینشتین در دست داریم و این فوق‌العاده تأسفبار است. بیش از نیم قرن است که فیزیکدانها سیلی از کتب و مقالات در مورد نظریه‌ای جمع کرده‌اند که به مفهوم ساده، مصداق تجربی اندکی دارند.

وضعیت، در گذشته نزدیک، بسیار حاد گردید. تعدادی از فیزیکدانان نظریه‌های جدیدی از گرانش را که شبیه کار اینشتین بوده، اما با یکدیگر اساساً متفاوتند، پیشنهاد کردند. مثلاً دکتر برانس و دکتر دیک علاوه بر میدان تانسوری معمولی اینشتین، يك میدان اسکالر ضعیف پیشنهاد کردند که ممکن است در گرانش با اهمیت باشد. پیشگویی‌های نظریه اسکالر تانسوری برنس - دیک، تقریباً با نظریه نسبیت عام رایج یکی است. اگرچه نظریه برنس - دیک معروف‌ترین نظریه‌های نسبیت عام غیر اینشتینی است و چند نحوه فرموله کردن دیگر نیز وجود دارد که اساساً با کار اینشتین متفاوت هستند، اما نتایج آنها فقط اختلاف مختصری با سه آزمون کلاسیک دارند. سپس مسئله این است که آزمونهای بسیار دقیقی از نسبیت عام انجام گیرد. تنها آزمایشی که در آزمایشگاه می‌تواند انجام شود - یعنی تجربه قرمزگرایی گرانشی با استفاده از پدیده موس باور - هیچ کمکی نمی‌تواند بکند، زیرا تمام نظریه‌های غیر اینشتینی به دلایل مختلف نتایج یکسانی را به دست می‌دهند.

انحراف نوری که از مقابل خورشید عبور کرده و در خلال يك گرفت کلی خورشید اندازه‌گیری شود، مشاهده بسیار مشکلی است. گرفتگیها اغلب در فراز اقیانوسها یا جنگلها که در آنها وسیله علمی در دسترس نیست، اتفاق می‌افتد. اغلب در نزدیکی خورشید در هنگام گرفتگی، ستارگان روشن وجود ندارند. دوره کوتاه گرفتگی چنین معنی می‌دهد که اگر اشتباهی در کار رخ دهد، شما نمی‌توانید مشاهده را مجدداً تکرار کنید. در نتیجه، اندازه‌گیریهای زاویه انحراف يك پرتو نور که درست از سطح خورشید می‌گذرد، کم و بیش نامعین است. اشتباهات ممکن که ناشی از عدم دقت در اندازه‌گیری است، حداقل ۸ درصد

است. مثلاً، در خلال گرفتگی سال ۱۹۵۲ م. این زاویه $۱/۷۰$ ثانیه قوسی با خطای به اضافه یا منهای $۰/۱۰$ ثانیه قوسی اندازه گیری شده بود. اینشتین این مقدار را $۱/۷۵$ ثانیه قوسی پیش بینی کرده بود.

به طور واضح، توافق با پیشگویی اینشتین چشمگیر است. اما اکثر نظریه های جدیدتر نتایج را حدود $۱/۶۰$ یا $۱/۷۰$ ثانیه قوسی پیشگویی می کنند. آشکار است که آنها را نمی توان رد کرد. متأسفانه، امید کمی به اصلاح قابل توجه مشاهدات گرفتگی قدیمی وجود دارد و دانشمندان باید به چیز دیگری توجه نمایند.

يك امکان این حقیقت را در بر می گیرد که خورشید نشر موج کوتاه بسیار کمی ساطع می کند، ولی منابع دیگری از قبیل کوازارهای ۳C ۲۷۳ و ۳C ۲۷۹ که نزدیک صفحه دایرة البروج قرار دارند در موج کوتاه بسیار درخشانند. خورشید در ۸ اکتبر هر سال ۳C ۲۷۹ را می پوشاند. بنابراین، باید بتوان انحراف نور (یعنی امواج کوتاه) را بدون انتظار وقوع گرفتگی کلی خورشیدی معمولی، اندازه گیری کرد. تنها مسئله باقی مانده بهبود قدرت تجزیه تلسکوپهای موج کوتاه است. سپس خطای تجربی به اضافه و منهای ۱ درصد یا کمتر تقلیل می یابد.

برای سالیان متمادی این طور گمان می رفت که حرکت تقدیمی قرین خورشید مدار عطارد، قویترین آزمون نسبیت عام اینشتین است. نظریه او اندازه حرکت تقدیمی را ۴۳ ثانیه قوسی در هر قرن پیشگویی می کرد، که این مقدار تا حدود ۱ درصد با مشاهدات واقعی توافق داشت. اکثر نظریه های جدیدتر مقدار بسیار کمتری مثل ۳۸ یا ۴۰ ثانیه قوسی در هر قرن پیشگویی می کنند. اگرچه به نظر می رسد که تأیید ایده های اینشتین به طور قاطع انجام گرفته، اما کار با نظریه مداری در منظومه شمسی برپایه این فرض بود که خورشید کاملاً کروی است. در اواخر دهه ۱۹۶۰ م. دکتر دیک در دانشگاه پرینستون يك سری مشاهدات استادانه و ماهرانه ای را انجام داد که مبین این بود که خورشید در حقیقت يك شبه کره پخ می باشد. خورشید در استوا برآمده تر از قطبین است. اگر خورشید پخ باشد، مکانیک نیوتونی معمولی بیان می دارد که يك برآمدگی

استوایی، مقدار حرکت تقدیمی کمی را تولید می کند که هیچ ربطی به نسبیت ندارد. به عبارت دیگر، از ۴۳ ثانیه قوسی مشاهده شده در هر قرن، تنها ۴ یا ۵ ثانیه باید ناشی از مکانیک کلاسیک معمولی باشد. بنابراین، محاسبات نسبیتی باید مسبب ۳۸ یا ۴۰ ثانیه قوسی در هر قرن باشد.

بهبودی که در زمینه مشاهدات ما انجام خواهد شد، با در نظر گرفتن عطارد دوچندان می شود. نخست آن که پخ خورشید باید به طور مبسوط بررسی گردد. اگر سطح خورشید پخ به نظر بیاید آیا بدین معنی است که کل میدان گرانشی خورشید ناشی از یک شبه کره پخ است؟ دوم آنکه، دانشمندان باید اطلاعات دقیق تری از مکان خود سیاره عطارد داشته باشند. بهترین راه آن است که یک قمر مصنوعی به دور سیاره عطارد قرار دهیم. این کار احتمالاً جزو برنامه های عادی فضایی در سالهای آینده خواهد بود.

خود برنامه فضایی فرصت های خوبی را برای آزمون نسبیت عام به وجود می آورد؛ زیرا زمان در یک میدان گرانشی کند می شود و ارسال پیامهای رادیویی فضاپیماهایی که از پشت خورشید عبور می کنند، به تأخیر می افتد. مقدار مشاهده شده این تأخیر تا حد سه درصد با نظریه اینشتین تطبیق دارد. یکی از اشکالات این است که گازهای داغ نزدیک خورشید، یعنی تاج خورشیدی نیز امواج رادیویی را کند می کند. اگر ارسال پیامها فقط در یک فرکانس انجام شود، تشخیص اثر ناشی از تاج از اثر ناشی از گرانش آسان نمی باشد. اگر در آینده فضاپیماهایی طرح شوند که به پشت خورشید به پرواز در آیند و باتجهیزاتی که در چند بسامد موج ارسال می کنند مجهز باشند، این مشکل مرتفع خواهد شد. گرانش باید بر تمام نورها با کلیه بسامدها دقیقاً اثر یکسانی داشته باشد، پس هر اختلافی بین ارسال پیامها در بسامدهای مجزا، به طور کامل ناشی از گازهای درون تاج خورشیدی می باشد. در نتیجه، ما می توانیم به طور آشکار تفاوت بین اثرات تاج و گرانش را از هم تشخیص دهیم.

پیشگویی دیگر نسبیت که می توانست با فن فضایی مورد آزمون قرار گیرد، به رفتار ژيروسکوپها مربوط می شد. در حالی که جسمی مثل زمین می چرخد، فضا — زمان باید در مسیر حرکت و حول زمین چرخان اندکی کشیده

شود. این کشیده شدن چهارچوبهای اینرسی موجب می شود که ژيروسکوپ که در يك قمر چرخنده قرار دارد، حرکت تقدیمی بسیار کندی را انجام دهد؛ و میزان این حرکت می تواند به آسانی به عنوان آزمونی برای نسبیت عام به کار برده شود.

به طور خلاصه، آزمونهاى نظریه نسبیت باید تا حدی بهبود یابند که خطاهای ناشی از تجربه به کمتر از يك درصد تقلیل یابد. تنها پس از این، می توانیم قاطعانه بگوییم که ایده های اینشتین واقعاً در پایه های محکمی استوارند یا خیر. بایستی اشاره شود که نظریه اینشتین از نظر ریاضی فوق العاده ساده و زیبا است، ولی نظریه های رقیب آن چنین نیستند. اگر زیبایی و سادگی به گونه ای معیار اعتبار شمرده شوند، با اطمینان می توانیم همچنان فرض کنیم که حق با اینشتین است.