

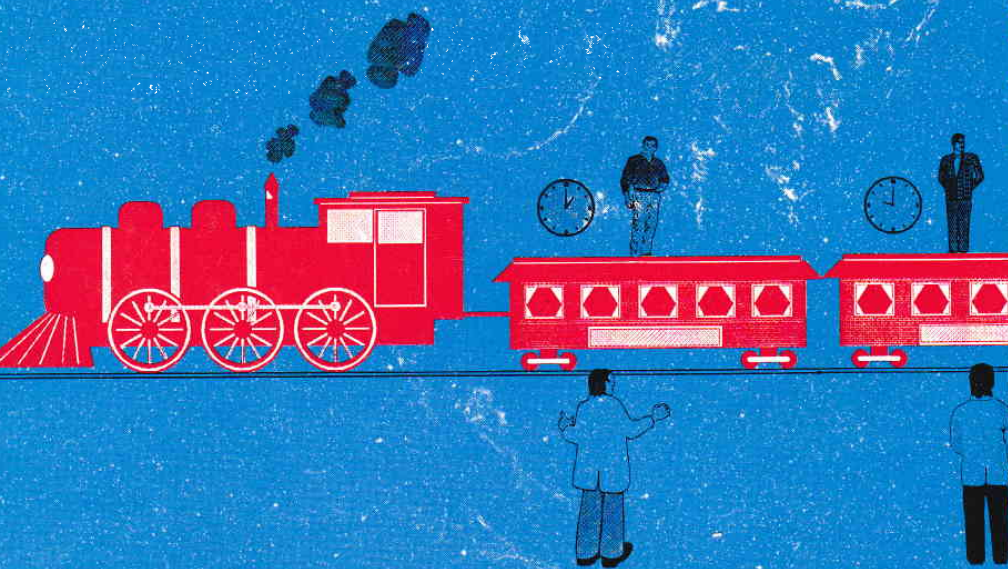
آلودگی آبیستین

چگونه مفاهیم نسبیت را مجسم کنیم؟

چگونه مفاهیم نسبیت را مجسم کنیم؟

ترجمه جهان‌شاه میرزایی

ترجمه جهان‌شاه میرزایی



لوئز ایشیتین

چگونه مفاهیم نسبیت را مجسم کنیم؟

ترجمه جهان‌شاه میرزابیگی

Epstein, Lewis Carroll, *RELATIVITY VISUALIZED*,
Insight press, San francisco, 1985

چگونه مفاهیم نسبیت را مجسم کنیم؟
تألیف لوئیز ایپشتین
ترجمه جهانشاه میرزاییگی
طراح و صفحه آرا: محمدباقر اکبری
حروفچین کامپیوتری: افسانه شیشه بر

حروفچینی : افسانه
لینوگرافی : مهران
چاپ : حیدری
صحافی : آینده سازان
ناشر : انتشارات پرنگار پارس
نوبت چاپ : اول
تاریخ انتشار : بهار ۱۳۷۴
تیراژ : ۵۰۰۰ نسخه
قیمت : ۵۰۰۰ ریال

مرکز پخش: نشر علوم دانشگاهی

تهران خیابان انقلاب، خیابان فروردین، چهارراه روانمهر پلاک ۹۸ انتشارات نگاه
کد پستی: ۱۳۱۴۸ صندوق پستی ۳۴۶-۱۳۱۴۵ تلفن: ۶۴۱۹۱۷۰

تقدیم به
فرزندان دبندم،
نازنین و پویا

فهرست مطالب

۳	۱
جعبه پاندورا	اصل نسبیت
۳۳ آزمایشهای ذهنی	۱ حکم گالیله
۳۳ حرکت همزمان شده	۲ نور
۳۴ زمان متفاوت	۷ در روزگار اتر
۳۹ حرکت همزمان نشده	۹ حکم گالیله در خطر
۴۲ فضا منقبض می شود	۹ حکم گالیله پیروز می شود
۴۳ خلاصه	۱۳ خلاصه
۴۴ پرسش و پاسخ	۱۴ پرسش و پاسخ
۴۰ انقباض عرضی وجود ندارد	۱۵ اتر قدیم
۵۳ بازی با زمان	
۵۶ دیدن یا اندازه گرفتن	
۴	۲
اندازه گیری نتایج	مسئله اصلی
۶۱ دو نوع سرعت	۲۱ یک قدم به عقب
۶۴ کندشدن زمان	۲۲ مسئله
۶۷ سرعت سنج کیهانی	۲۳ احتمالات
۷۱ پرسش و پاسخ	۲۴ یک طرح غیرعقلانه
۷۲ امواج نوری	۲۵ مرور
	۲۵ پرسش و پاسخ
	۳۰ داخل کله فیزیکدان

۱۰۸	عمر غیر ممکن است	۷۳	زمان همزمان نشده
۱۰۹	افق نهایی	۶۸	آیا فوتون می‌داند که ساعت نوری در حرکت است؟
	۷	۷۱	اثر و کسی که در واقع حرکت می‌کند
	پایه سوم	۷۶	اجتماع ساعتها
۱۱۳	جرم	۷۸	رکوردهای شکنی

		۵	افسانه
			چرا؟
۱۲۰	تکانه نسبی	۸۱	افسانه‌های خوب و بد
۱۲۴	نیروی جنبش	۸۲	داستان
		۸۳	خارج از بدن
		۹۰	دو نوع زمان
		۹۱	پرسش و پاسخ
		۹۲	سه بعد
		۹۳	در آغاز
		۹۴	چه چیز آن را متبصر می‌کند؟
		۹۷	پرسش و پاسخ
		۹۷	افسانه اثبات می‌شود
		۹۹	سخن پایانی
		۱۰۱	پرسش و پاسخ
		۱۰۲	افسانه‌های حرکت
		۸۴	از طریق فضا و زمان
		۸۸	

	۸		
	$E = mc^2$		
	انرژی معادل		
۱۲۷	وزن معادل		
۱۲۸	جرم دهنده		
۱۳۲	یک اشتباه رایج		
۱۳۴	آیا جرم انرژی است؟		
۱۳۱	اهمیت سرعت نور		
	$E = mc^2$ به وسیله نوری که		
۱۳۶	از یک آینه متحرک بازمی‌جهد		
	۹		
	مما		
۱۴۳	سقوط نور		
۱۴۴	آیا c می‌تواند تغییر کند؟		
۱۴۶	بحران		
		۱۰۵	مهبانگ
		۱۰۷	تکوین عالم
			نگاه به عقب

۱۸۲	پرسش و پاسخ
۱۸۳	همه چیز چین دار می شود
۱۸۶	پرسش و پاسخ

۱۸۸	چگونه می توان خطوط مستقیم را بر روی سطوح خمیده رسم کرد؟
-----	---

۱۲

	انتهای فضا و زمان
۱۹۱	سیاهچاله
۱۹۸	سورخ کرمها و پلها
۱۹۹	دو کیهانشناسی
۲۰۱	پرسش و پاسخ

۱۹۲	سیاهچاله پیش بینی می شود
۱۹۶	چگونه بینهایت را رسم کنیم

۲۰۳	پیوست
۲۰۴	ناو جنگی در وان حمام
۲۰۶	جرقه زدن
۲۰۷	چقدر بزرگ!
۲۰۸	پتک
۲۱۱	فیل و پر

۲۱۲	واژه نامه
۲۱۴	فهرست راهنما

۱۴۶	بازهم کندشدن زمان
۱۴۷	فضازمان خمیده

۱۴۵	نور سنگین
۱۵۱	چقدر کند؟

۱۰

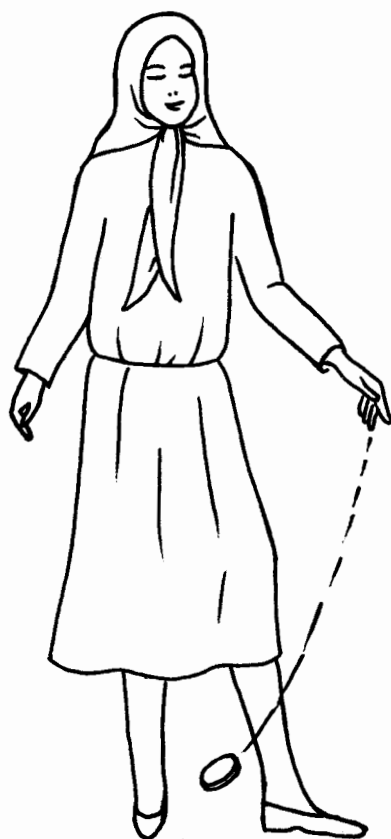
	علت گرانش
۱۵۳	منشأ گرانش
۱۵۴	تعجب
۱۵۶	با چه سرعتی می توانید سقوط کنید؟
۱۶۰	تونلی به سوی چین
۱۶۲	در دام جاذبه گرانشی
۱۶۴	پرسش و پاسخ
۱۶۵	فرار
۱۶۵	مدل، نه شکل

۱۵۸	کف اتاق بالامی آید
۱۶۰	تیین گاليله
۱۶۷	گرانش به وسیله شکست

۱۱

	فضا چین خوردگی پیدامی کند
۱۷۱	گلوله در مقابل فوتون
۱۷۴	دست انداز
۱۷۷	علت دیگر
۱۷۸	اثر دست انداز

انسان تنها موجودی است که دربارهٔ چیزهایی که
اثر مستقیم بر زندگی او ندارند می‌اندیشد



شکل ۱-۱. اگر زمین در حرکت بود، اجسامی
که از ارتفاعی سقوط می‌کردند به خط مستقیم
پایین نمی‌آمدند

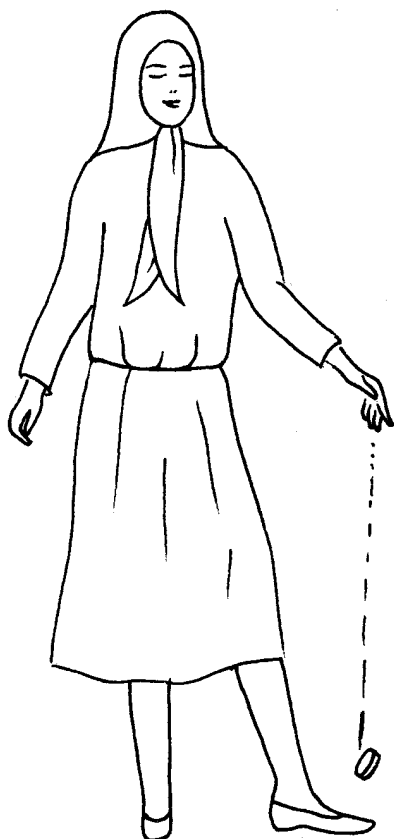
اصل نسبیت

حکم گالیله

در سال کشف دنیای جدید توسط
کریستوف کولومب، یک دانشجوی سال دوم
به نام کوپرنیک، ریاضیات و اخترشناسی را
کشف کرد. این کشفیات به اضافهٔ یک عمر
مطالعه و تحقیق، کوپرنیک را به این نتیجه
رساند که زمین نه تنها یک کرهٔ فضایی است
بلکه حول خورشید هم حرکت می‌کند.

اما باورکردنش سخت بود! بسیاری از
اندیشمندان در آن زمان معتقد بودند که محال
است کره‌ای به سنگینی زمین بتواند حرکت
کند، آن هم یک حرکت دایمی. آنها در ردّ
نظریهٔ کوپرنیک چنین استدلال می‌کردند:
فرض کنید زمین در حرکت است و شما هم
سکه‌ای را از بالا مستقیماً روی پایتان رها
می‌کنید. در مدت زمانی که سکه در حال
سقوط به طرف زمین است، زمین مقداری

تکان می‌خورد، و نه دور می‌زند، بلکه با حرکت یکنواخت در یک جهت پیش می‌رود) نمی‌توانید تشخیص بدهید که در حال حرکت هستید یا نه. همه چیز در داخل جعبه طوری اتفاق می‌افتد که گویی جعبه در حال سکون است. این ایده بنیادی را حکم گالیله می‌گویند.

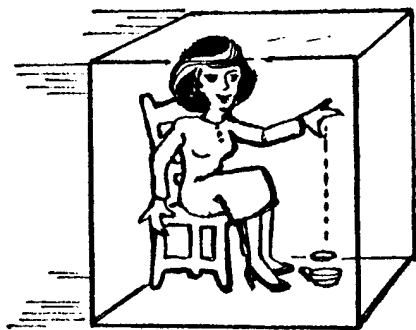


شکل ۱-۲. اما اجسام در حال سقوط مستقیماً پایین می‌آیند. بنابراین، زمین نمی‌تواند در حال حرکت باشد

حرکت می‌کند و پای شما نیز همراه با آن جابه‌جا می‌شود. در این صورت باید سکه به پای شما اصابت نکند. اما در واقع چنین نیست. اگر شما این آزمایش را انجام دهید می‌بینید که سکه درست روی پای شما فرود می‌آید. از این رو، زمین نمی‌تواند حرکت کند.

در حدود یک قرن بعد، زمانی که اولین مستعمرات انگلیس در آمریکای شمالی ایجاد شد، گالیله دفاع از ایده حرکت زمین را بر عهده گرفت. در اینجا، به اختصار استدلال گالیله را می‌آورم. فرض کنید شما در داخل یک هواپیما که با سرعت یکنواخت (و مافوق صوت) حرکت می‌کند، ایستاده‌اید و سکه‌ای را از بالا مستقیماً روی پاهایتان رها می‌کنید. مطمئن باشید که این سکه مستقیماً روی پای شما می‌افتد.^۱ گالیله به جای هواپیما به کابین کشتی اشاره کرده است، اما نکته اصلی این است که اگر شما داخل جعبه مسدودی باشید که با حرکت یکنواخت حرکت می‌کند (یعنی نه می‌ایستد، نه به حرکت درمی‌آید، نه تکان

۱. اگر پای شما همراه با هواپیمای در حال حرکت به طرف راست جابه‌جا شود، سکه نیز در همان زمان به طرف راست حرکت خواهد کرد، زیرا سکه قبل از رها شدن (همراه با بدن شما) در سرعت هواپیما شریک است. بعد از رها شدن نیز با همان سرعت اولیه به طرف راست پیش می‌رود و در نتیجه، هنگام پایین آمدن به پای شما برخورد می‌کند.



وانگهی اگر پنجره جعبه را باز کنید و ببینید که جعبه دیگری به شما نزدیک می شود، باز هم نمی توانید تشخیص بدهید که دارید حرکت می کنید؛ نمی دانید که شما به جعبه نزدیک می شوید یا جعبه به شما. آنچه می توانید بگویید این است که هر دو جعبه نسبت به هم حرکت می کنند.

چکیده حکم گالیلئو چنین است: تمامی حرکت های خطی و یکنواخت نسبی اند. عالم پر است از ذراتی که با سرعت های مختلف و در جهت های مختلف در حرکت اند. چه کسی می تواند بگوید کدام ذره واقعاً و مطلقاً در حال سکون است؟ از این رو، هرگز نمی توان گفت که "سرعت این ذره ۱۵۰۰ کیلومتر بر ساعت است." آنچه می توانیم بگوییم این است که "سرعت این ذره، مثلاً نسبت به هوا، یا نسبت به ماه، یا نسبت به این جبهه موج ۱۵۰۰ کیلومتر بر ساعت است." این گفته ها خیلی معقول به نظر می رسند و اگر به خاطر کنجکاوی های فرانسیسکو گریمالدی در مورد نور نبود، این مسئله برای همیشه حل شده تلقی می شد. گریمالدی نقاش تیزبینی بود که رسماً برای دو نفر از پاپ های مخالف گالیلئو کار می کرد.

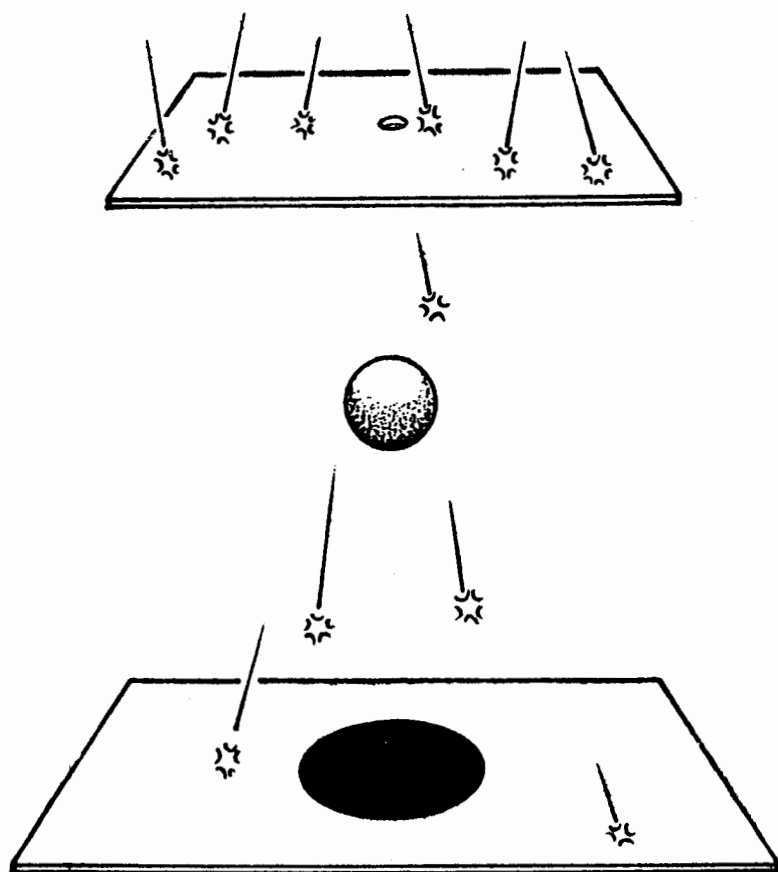
نور

گریمالدی متوجه شد که در پیرامون و حتی در داخل سایه یک جسم کدر چندین دایره یا فریز مشاهده می شود. تا آن زمان بیشتر مردم

شکل ۱-۳. حرکت یکنواخت بر خط مستقیم هیچ اثری بر رویدادهای داخل جعبه ندارد. ممکن است این گفته برای شما بدیهی به نظر برسد اما در روزگار گالیلئو یک ایده جدید به شمار می رفت.

فکر می کردند که نور رگباری از ذرات بسیار ریز است. این فکر با نظر گالیلئو در مورد دنیای ذرات و اینکه چرا نور به خط مستقیم حرکت می کند و چرا سایه طرح دقیق جسمی است که سایه می اندازد کاملاً سازگار بود، اما فریزهای گریمالدی را توجیه نمی کرد.

در طرح های زیر، نور یک ماده شاره گونه فرض شده است که می تواند تا حدودی در اطراف و پشت اجسامی که بر سر راه آن قرار دارند جاری شود. در این طرح ها فریزها حاصل موجک هایی فرض شده اند که از لبه های جسم در جهت جریان منتشر می شوند، درست مثل موجک هایی که از لبه های سنگی که



شکل ۱-۴. اگر نور رگباری از ذرات ریز باشد، جسمی که سر راه نور قرارداد باید سایه کامل تشکیل دهد (آن طور که در شکل دیده می شود). برای انجام این آزمایش یک چشمه نقطه ای نور لازم است. خورشید (یا لامپ) چشمه نقطه ای نور نیستند. در این طرح، نور از یک سوراخ دایره ای عبور کرده است و بنابراین می توان گفت چشمه نقطه ای است.

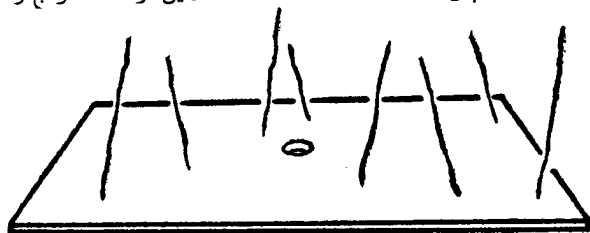
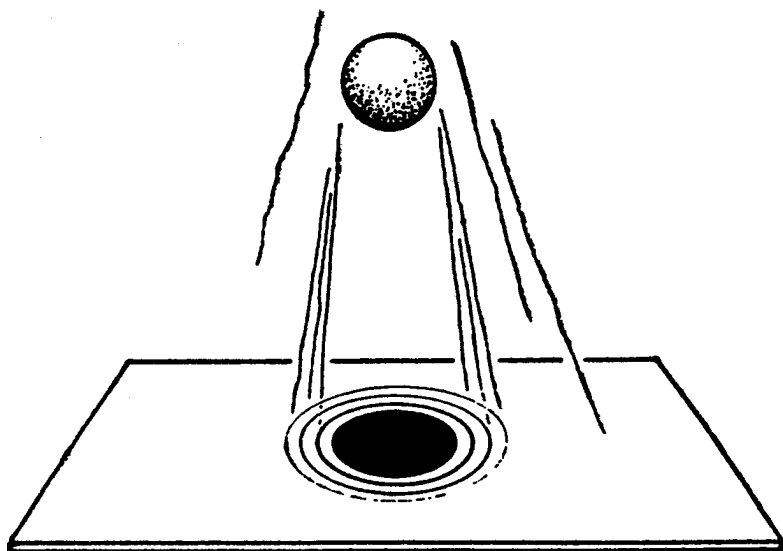
در داخل جریان تند آب قرارداد پراکنده می شوند. از این طریق برای اولین بار ماهیت موجی نور در دنیا مطرح شد. با تکامل این نظریه، نور به جای شارش شاره از طریق فضا، همچون ارتعاشاتی در نظر گرفته شد که در فضا منتقل می شود. (بعداً برای توجیه اثرهای ذره ای نور دوباره به این موضوع بازمی گردیم.) مهمترین حسن نظریه موجی نور این بود که به سؤالات زیر پاسخ می داد.

دیده می شود توجیه می کند. این نظریه همچنین توجیه می کند که چرا بخار آب در نزدیکیهای دودکش لوکوموتیو یا لوله کتری دیده نمی شود. اما مهمتر از همه، نظریه موجی به معلم فیزیکی که می خواهد این نظریه را در کلاس درس توضیح بدهد کمک می کند تا یک وسیله الکتریکی بسازد که امواج نوری با ابعاد بزرگ تولید می کند. وسیله ای که پروفیسور هرتر در سال ۱۸۸۷ برای کلاش ساخت اولین فرستنده امواج رادیویی بود.

(۱) چرا نور اجسام کوچکی را که بر سر راهش قرار می گیرند دور می زند؟
(پراکندگی امواج)

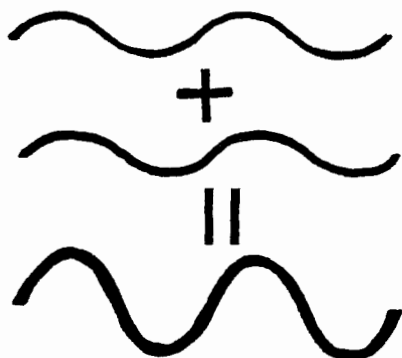
(۲) چرا نور در جاهایی که انتظار می رود وجود داشته باشد محو می شود؟
(امواج همدیگر را خنثی می کنند).

نظریه موجی نور حلقه های روشنی را که هنگام نگاه کردن به یک چشمه کوچک نور از طریق یک روزنه (یا یک پرده شفاف)

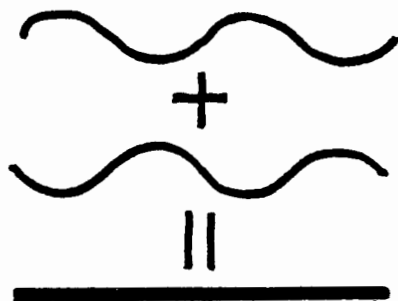


کنیم می بینیم که با حلقه های نور در آمیخته است.

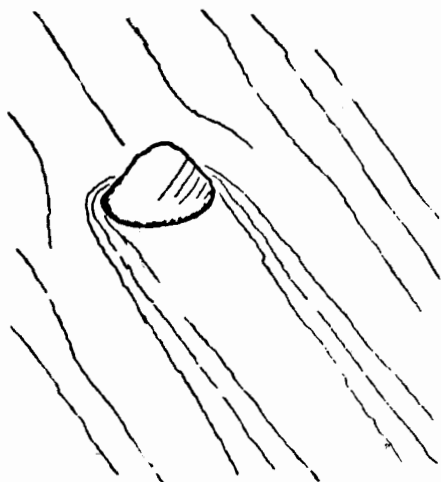
شکل ۱-۵. اما در واقع ناحیه پشت جسم سایه کامل نیست. اگر از نزدیک و با دقت به سایه نگاه



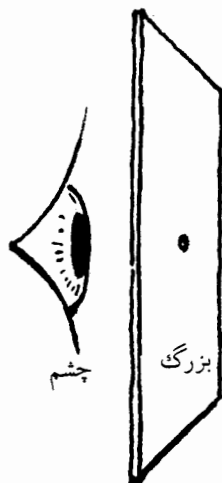
شکل ۱-۸. این امواج با هم ترکیب می‌شوند و همدیگر را تقویت می‌کنند، یعنی همفازند



شکل ۱-۹. این امواج با هم ترکیب می‌شوند و همدیگر را خنثی می‌کنند، یعنی در فاز مخالف‌اند. اختلاف فاز آنها دقیقاً نصف یک چرخه (۱۸۰ درجه) و تداخل آنها کاملاً ویرانگر است. اما این موضوع ظاهراً قانون پایستگی انرژی را نقض می‌کند. اگر نور، نور را خنثی می‌کند انرژی آن به کجا می‌رود؟ معلوم می‌شود که هر زمان نوری نور دیگر را در یک محل خنثی می‌کند در جای دیگری (معمولاً خیلی نزدیک به جای اول) نور، نور را تقویت می‌کند و تمام انرژی که در محل اول ناپدید شده است در این محل پدیدار می‌شود. این موضوع در مورد صوت، آب، و هر نوع موج دیگری صادق است.



شکل ۱-۶. توجه کنید که امواج به داخل ناحیه آرام پشت سنگ نفوذ می‌کنند



شکل ۱-۷. سوراخ بسیار ریزی را در یک ورقه آلومینیومی ایجاد کنید. سپس شب هنگام از طریق این سوراخ به یک لامپ روشنایی در خیابان از فاصله دور نگاه کنید.

در روزگار اتر

برسانند. آن چیز فرضی را در آن زمان اثر (اثر) نامیدند. نام اتر به این خاطر انتخاب شد تا چیزی در مرز واقعیت را برساند.

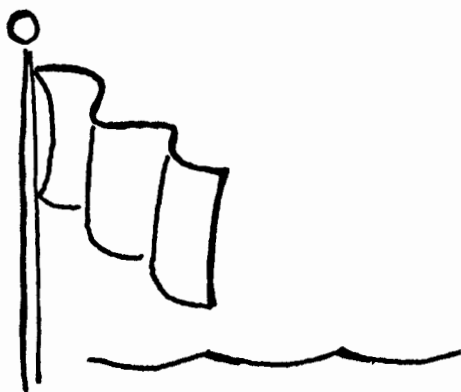
اگر امواج نور، امواج اتری بودند آنگاه باید پرتوهای X و امواج رادیویی نیز امواج اتری باشند. در این صورت، اتر باید همچنانکه فضای تهی را پرمی کرد در داخل اجسام مادی نیز نفوذ می کرد.

شکل ۱-۱۰. مولکولهای آب داخل ابر بخار از دودکش بیرون می آیند. باوجود این، هنگام بیرون آمدن از دودکش دیده نمی شوند زیرا فاصله آنها از هم خیلی زیاد است و تقریباً می توان گفت که تک تک بیرون می آیند. نورهایی که از این مولکولهای جدا از هم به چشم ما می آید همفاز نیستند و بنابراین همدیگر را خنثی می کنند. اما این مولکولها چسبناک اند، بنابراین به همدیگر می چسبند و گروههای چندین هزار مولکولی، که به قطرات ریز معروف اند، تشکیل می دهند. مولکولهای هر قطره ریز در حجم کوچکی از فضا متراکم می شوند و نورهایی را که به چشم ما می فرستند تقریباً همفازند. این نورهای همفاز همدیگر را تقویت می کنند و در نتیجه ابر بخار آب مرئی می شود. واژه فاز یک اصطلاح برای توصیف موقعیت در امتداد هر موجی است: اگر قله یک موج را صفر درجه بگیریم آنگاه نقطه حضیض آن ۱۸۰ درجه و قله موج بعدی ۳۶۰ درجه است.

بدون آب، امواج آب؛ بدون پرچم، موج پرچم؛ بدون هوا، امواج صوتی؛ بدون زمین، امواج زلزله و بدون دست موج حاصل از تکان دادن دست نمی تواند وجود داشته باشد. در اوایل این قرن اگر کسی نظریه موجی نور را جدی می گرفت و باور می کرد که نور خورشید از خورشید می آید آنگاه باید قبول می کرد که چیزی در فضا (در فضای تهی میان زمین و خورشید) وجود دارد که می تواند به جنبش درآید و نور را از طریق فضای تهی به زمین



اتر شگفت‌انگیزترین ماده‌ای بود که نه تنها نور بلکه گرانی و حتی خود ماده را به طریقی واحد توجیه کرد. گرانی ناشی از اختلاف فشار در اتر بود. فشار در داخل و نزدیک به اجسام سنگینی مثل زمین، کمتر از فشار در نقاط دور فرض می‌شد. از این رو، فشار اتر در طرف روبه زمین ماه از فشار اتر در طرف دورتر ماه کمتر بود. این اختلاف فشار باعث کشیده شدن ماه به طرف زمین می‌شد. به همین ترتیب ماه نیز نیروی جاذبه‌ای بر زمین تولید می‌کرد.



اتمها گردبادهای کوچکی بودند که در داخل اتر می‌چرخیدند (مثل حلقه‌های دود). این گردبادها به دور خود می‌چرخیدند و برای همیشه پهلوی هم باقی می‌ماندند زیرا اتر همانند هر آبشارهای^۱ بدون اصطکاک بود. اما اگر اتم شکسته می‌شد تمام انرژی (چرخش) آن بیرون می‌ریخت. بدین ترتیب، نظریه قدیمی قرن نوزدهم پیشگویی می‌کرد که اگر اتمها شکسته شوند انرژی آزاد می‌شود! اتر یک ایده فلسفی نبود بلکه یک مدل علمی بود که به کمک آن بسیاری پدیده‌های اپتیکی، همچون قطبش، شکست، و شکست دوگانه از لحاظ کمی توضیح داده می‌شد.

شکل ۱-۱۱. هر موجی جنبشی به این طرف و آن طرف است. بنابراین اگر چیزی نباشد که به این سو و آن سو بجنبد موج نمی‌تواند وجود داشته باشد. موج چیزی را که با آن به جنبش درمی‌آید با خود حمل نمی‌کند، زیرا موج طناب پیچ و تاب‌داری نیست که در فضا حرکت کند. امواج (مثل امواج صوتی، امواج نور، و امواج آب) از داخل هم عبور می‌کنند اما یک طناب پیچ و تاب‌دار نمی‌تواند از داخل طناب پیچ و تاب‌دار دیگر عبور کند. ماده‌ای که به جنبش درمی‌آید باید قبل از رسیدن موج به هر نقطه در فضا در آن نقطه وجود داشته باشد.

۱. اجزای گردباد به این دلیل پهلوی هم باقی می‌مانند که فشار داخل آن از فشار خارج کمتر است. نیروی مرکز‌گریز چرخش در داخل در برابر فشار شاره خارج مقاومت می‌کند.

درصد انجام آن برآمدند و انواع روشها را برای انجام آن به کار گرفتند. بعضی از این روشها، در صورت موفقیت، می توانست از حرکت زمین از طریق اثر انرژی مفید استخراج کند. اما ساده ترین روش، از لحاظ نظری، این بود که بینیم چقدر طول می کشد تا نور لامپی که در وسط اتاقی آویزان است به دیوارهای اتاق برسد. اگر اتاق در داخل اتر حرکت می کرد باید نور لامپ (امواج نوری یا امواج اتری در حال انبساط) زودتر از دیوار جلو به دیوار عقب می رسید. اما وقتی آزمایش در داخل اتاق انجام شد، نور لامپ (بدون توجه به حرکت اتاق) همواره همزمان به دو دیوار عقب و جلو می رسید. به این ترتیب، هیچ اثری از شارش اتر مشاهده نشد.^۱

حکم گالیلئ پیروزمی شود

نه تنها این آزمایش بلکه روشهای دیگری که برای آشکارسازی شارش اتر پیش بینی شده بودند از بوته آزمایش موفق درنیامدند. هیچ کس نمی دانست چرا همه این آزمایشها با شکست مواجه می شود. هیچ نظریه ای برای

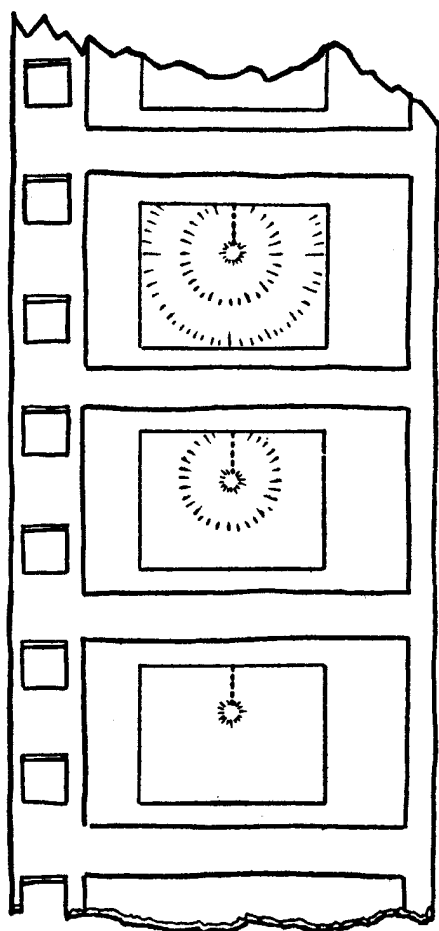
۱. آزمایشی که از لحاظ نظری ساده ترین است از لحاظ فنی مشکلترین آزمایش است. در کتابهای مقدماتی نسبت و فیزیک عمومی، شرح آزمایشهای از لحاظ فنی ساده تر به تفصیل آمده است. من پیشنهاد می کنم، برای آشنایی بیشتر با این آزمایشها این کتابها را مطالعه کنید.

حکم گالیلئ در خط

اتر مفهوم جدیدی را به دنیای مفاهیم فیزیک وارد کرد. قبل از اتر دنیا پر بود از ذرات ماده و نور که با سرعتهای متفاوت در همه جهات حرکت می کردند. هیچ کدام از این ذرات وضعیت بخصوصی نداشت. از هیچ طریقی امکان نداشت که یک ذره یا هر گروهی از ذرات را انتخاب کرد و گفت که این ذره (یا گروه ذرات) در حال سکون است. سپس اتر وارد میدان شد. اتر چیز بخصوصی بود. جوهر بنیادینی بود که ذرات ماده و نور از آن درست می شدند. هرگاه کسی در داخل اتر حرکت می کرد واقعاً حرکت می کرد.

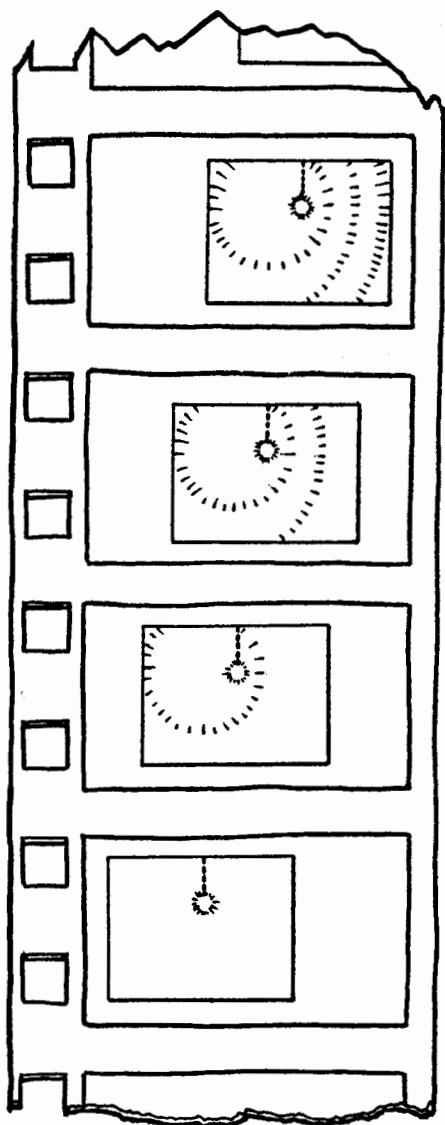
وانگهی، اتر نوعی نقطه مرجع دور نبود، بلکه چیزی بود که تمام فضا را پر می کرد. چون زمین در فضا حرکت می کرد، باید اثری از کشیده شدن آن در اتر محسوس می شد. حتی در داخل یک جعبه مسدود هم باید اثری از جریان اتر آشکار می شد زیرا اتر از داخل اشیای مادی، درست از لابه لای اتمها که خود چیزی جز اتر نبودند، عبور می کرد. اما اگر کسی می توانست در داخل یک جعبه مسدود در فضا از حرکت خود باخبر شود آنگاه حکم گالیلئ نقض می شد.

اگر شارش اتر می توانست آشکار شود، که ظاهراً چنین بود، آنگاه حکم گالیلئ باطل می شد. وقتی سرانجام در سالهای آخر عصر ملکه ویکتوریا امکان انجام چنین آزمایش فوق العاده مهمی فراهم شد بسیاری دانشمندان



شکل ۱-۱۲. تصویر فیلم متحرک را از پایین به بالا نگاه کنید. این فیلمها لامپی را نشان می‌دهند که در وسط اتاقی آویزان است. یکی از دیوارهای اتاق شیشه‌ای است، و بنابراین از بیرون می‌توان رویدادهای داخل اتاق را مشاهده کرد. اولین فیلم موج نوری در حال انبساط را در اتاق ساکن نشان می‌دهد. همچنانکه انتظار می‌رود، نور همزمان به دیوارهای مقابل می‌رسد. فیلم دوم همین لامپ را در اتاقی که در اتر حرکت می‌کند نشان می‌دهد. اگر اتاق در داخل اتر به سمت راست حرکت کند آنگاه شارش اتر در داخل اتاق باید به سمت چپ باشد. قسمتی از نور لامپ که به طرف چپ می‌رود مجانی بر این شارش اتر سوار می‌شود. اتر برای این قسمت از نور چون باد موافق عمل می‌کند و باعث می‌شود که نور در یک مرحله به دیوار سمت چپ برسد. قسمتی از نور که به طرف راست می‌رود در جهت مخالف

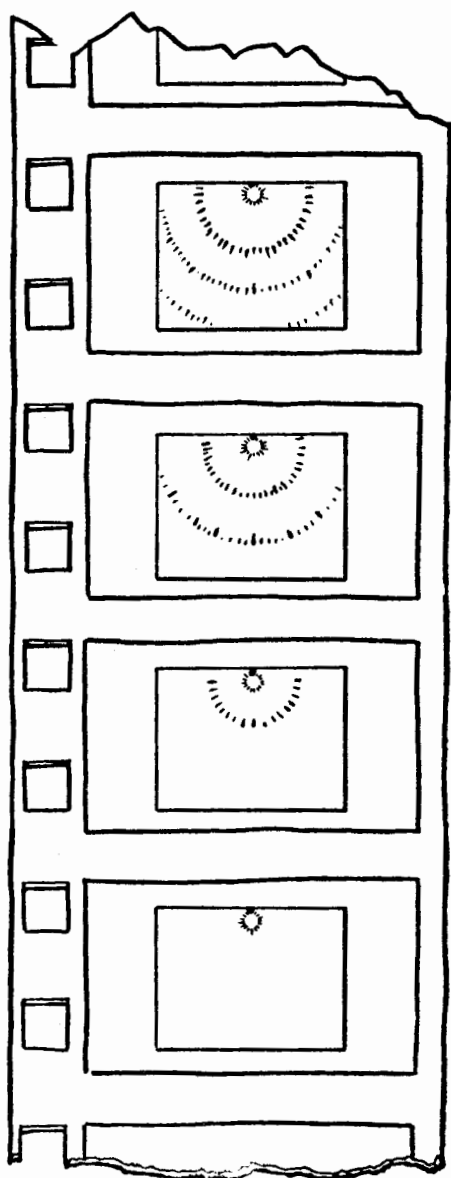
اتر حرکت می‌کند و در سه مرحله به دیوار سمت راست می‌رسد. اما وقتی آزمایشگران در داخل اتاق این آزمایش را انجام دادند متوجه شدند که نور، بدون توجه به حرکت اتاق، همواره دقیقاً همزمان به دیوارهای طرف چپ و راست می‌رسد. یعنی آزمایشگرانی که در داخل اتاق متحرک آزمایش می‌کنند همواره توالی رویدادها را آن‌طور که فیلم اول نشان می‌دهد، می‌بینند. اما اگر شما از بیرون به اتاق، هنگامی که از کنار شما عبور می‌کند، نگاه کنید آیا توالی رویدادها را آن‌طور که فیلم اول نشان می‌دهد می‌بینید یا آن‌طور که فیلم دوم؟ آیا قابل درک است که آزمایشگران داخل اتاق متحرک توالی رویدادها را به صورت فیلم اول و شما که از بیرون نگاه می‌کنید آنها را به صورت فیلم دوم ببینید؟ اگر چنین چیزی قابل درک باشد، آنگاه دنیا باید پیچیدگیهای غیرقابل انتظاری داشته باشد. شاید چنین باشد.



توجه این پدیده وجود داشت. اما آزمایشگاه دیوان عدالت فیزیک است، جایی که رأی نهایی از آنجا صادر می‌شود، و در آزمایشگاه هیچ آزمایشی نمی‌توانست علیه حکم گالیله رأی صادر کند.

رفته‌رفته بعضی دانشمندان به این نتیجه رسیدند که برای سازگاری با اصل بنیادی جدید باید نظریه اصلی را تغییر بدهند. در اصل جدید به صراحت مطرح شده بود که هیچ چیز، حتی نور، نمی‌تواند حکم گالیله را نقض کند. هنری پوانکاره، دانشمند معروف، طی گفتگویی در سنت لوئیز (میسوری) در سال ۱۹۰۴ اصطلاح اصل نسیت را برای اصل بنیادی جدید پیشنهاد کرد. اما نگفت که چگونه می‌توان فیزیک را به‌خاطر سازگاری با اصل جدید تغییر داد.

این وضع، تا پیش آمدن یک بحران حاد همچنان ادامه داشت. این بحران حاد معلول یک مسئله به‌ظاهر واضح و بدیهی بود که موضوع فصل آینده است.



شکل ۱-۱۳. این فیلم لامپی را نشان می‌دهد که در یک اتاق ساکن روشن شده است. نور ابتدا به کف اتاق برخورد می‌کند.

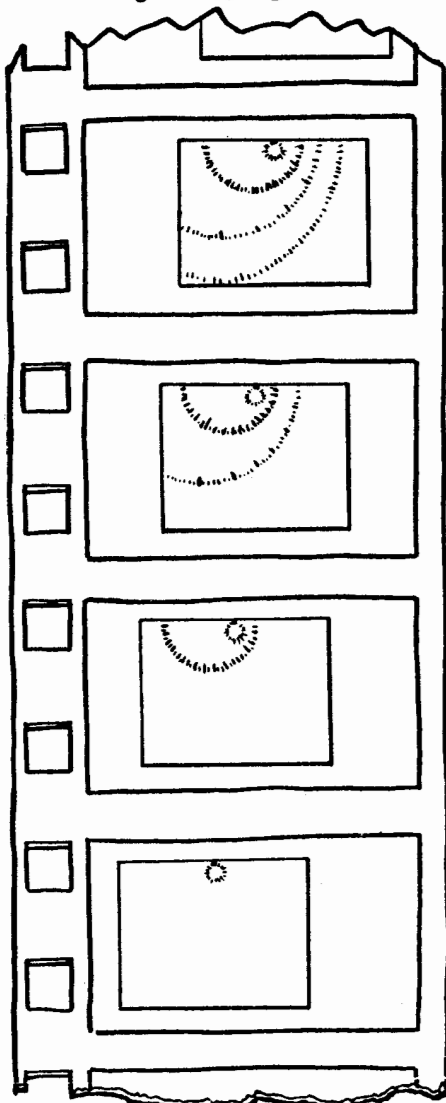
خلاصه

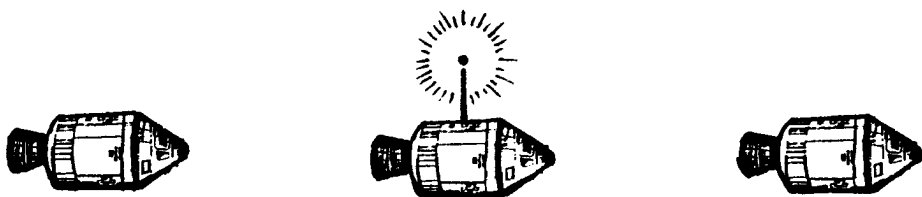
طبق حکم گالیله، سکه‌ای که مستقیماً از بالا روی پای شما فرومی‌افتد، حتی اگر در یک اتاق متحرک هم باشید، روی پای شما خواهد افتاد. همین طور، ممکن است شما

انتظار داشته باشید که نور لامپی که به سقف اتاقی آویزان است ابتدا به کف اتاق (مستقیماً در زیر آن) برخورد کند، حتی اگر شما در یک اتاق متحرک باشید. اما اگر نور، امواج اتر باشد و اتاق هم در داخل اتر حرکت کند (یعنی یک باد اتری در داخل اتاق بوزد) نور باید توسط باد اتری منحرف شود و ابتدا به کف اتاق (مستقیماً در زیر لامپ) برخورد نکند (بیشتر دانشمندان این طور فکر می‌کردند). وقتی آزمایشگران این ایده را در داخل اتاق آزمودند متوجه شدند که نور، درست مثل سکه، بدون توجه به حرکت اتاق یا اینکه دانشمندان چه فکر می‌کردند، منحرف نمی‌شود و ابتدا به کف اتاق مستقیماً در زیر لامپ برخورد می‌کند.

تعمیم حکم گالیله به اشیای اتری (مثل نور) و اشیای مکانیکی (مثل سکه) را اصل نسبیت نامیدند.

شکل ۱-۱۴. این فیلم لامپی را نشان می‌دهد که در اتاق متحرکی روشن شده است. در این فیلم مشاهده می‌شود که نور توسط باد اتری منحرف می‌شود و ابتدا به کف اتاق برخورد نمی‌کند. اما وقتی آزمایشگران در داخل اتاق این ایده را آزمودند متوجه شدند که نور بدون توجه به حرکت اتاق ابتدا به کف آن برخورد می‌کند. اگر یکی از دیوارهای اتاق شیشه‌ای بود و شما به داخل آن، هنگامی که از کنار شما می‌گذشت، نگاه می‌کردید آیا به همین نتیجه می‌رسیدید؟ شاید نه.





شکل ۱-۱۵

پرسش

پاسخ

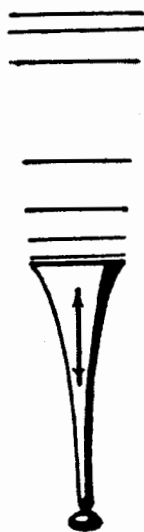
ب) پاسخ درست است. فرض کنید این داستان واقعیت دارد. همچنین فرض کنید که کشتیها در داخل جعبه بسیار بزرگی که با همان سرعت در حال حرکت است قرار دارند و فضانوردان می‌توانند ادعا کنند که خود آنها، کشتیهایشان و جعبه بزرگ در داخل فضا در حال حرکت‌اند. اما اگر بتوانند چنین ادعایی بکنند آنگاه اصل نسبیت را آشکارا نقض کرده‌اند. بنابراین، فضانوردان باید همواره به این نتیجه برسند که سیگنال همزمان به کشتیهای جلو و عقب می‌رسد. توجه کنید که این نتیجه‌ای است که فضانوردان باید به آن برسند، نه کسی که از خارج عبور کشتیها را تماشا می‌کند. دنیای عجیبی است! فضانوردان می‌گویند که سیگنال همزمان به کشتیهای عقب و جلو می‌رسد و شما، که در کنار ایستاده‌اید، می‌گویید همزمان نمی‌رسد. آیا به چشمان خود می‌توانید شک کنید؟

سه کشتی فضایی با فاصله مساوی از هم و پشت سر هم در حال حرکت‌اند. این کشتیها در اعماق فضا، دور از هر نوع مرجعی هستند. فضانوردان می‌خواهند بدانند سرعتشان چقدر است. برای این کار کشتی وسط یک سیگنال رادیویی یا یک درخش نوری گسیل می‌کند. اگر کشتیها بی‌حرکت باشند، سیگنال همزمان به کشتی عقب و جلو می‌رسد. اما اگر در حال حرکت باشند آیا می‌توانیم سرعت آنها را از روی اختلاف زمانی که طی آن سیگنال به کشتیهای جلو و عقب می‌رسد برآورد کنیم؟ (الف) بلی، سرعت را می‌توان به ترتیبی که در بالا توصیف شد برآورد کرد (ب) خیر، نمی‌توان سرعت را از این طریق برآورد کرد

اثر قدیم

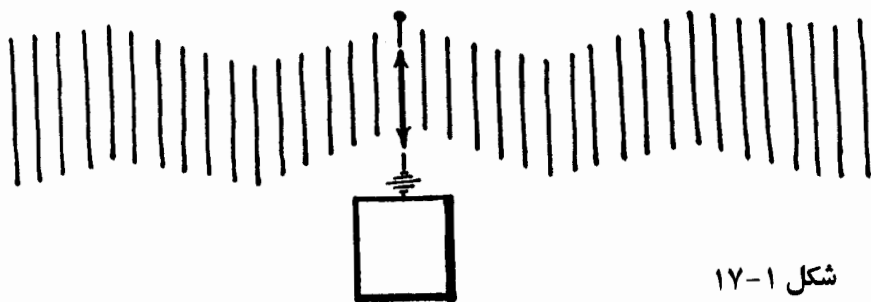
اثر چه جور جوهری بود؟ ابتدا هوا و صوت را در نظر بگیرید. صوت عبارت است از امواج تراکمی در هوا، لایه‌هایی از هوا که به‌تأویب متراکم و منبسط شده است. امواج تراکمی به این دلیل شروع به حرکت می‌کنند که یک چیزی به‌طرف عقب و جلو به‌حرکت درمی‌آید. به‌عنوان مثال، صدا از انتهای بوق خارج می‌شود و در جهت تراکم منتشر می‌شود.

امواج اثر نیز به این دلیل شروع به حرکت می‌کرد که چیزی به‌طرف عقب و جلو در حرکت بود. به‌عنوان مثال، امواج رادیویی (که چیزی جز امواج بلند نور نیستند) به این دلیل شروع به حرکت می‌کنند که الکترون‌ها در آنتن فرستنده به‌طرف عقب و جلو به‌حرکت درمی‌آیند. اما امواج رادیویی نه از انتهای آنتن بلکه از پهلوی آن خارج می‌شوند. بنابراین، امواج رادیویی، برخلاف امواج صوتی، در جهت عمود بر امتداد حرکت به‌عقب و جلو منتشر می‌شوند. در شکل دیده می‌شود که لایه‌های اثر، ضمن دور شدن امواج از آنتن، به‌طور متناوب به‌طرف بالا و پایین جابه‌جایی شوند. موج به این دلیل به حرکت ادامه می‌دهد که هر لایه‌ای اثر بر لایه مجاورش اثر می‌گذارد؛ هر لایه یک نیروی برشی بر لایه بعدی وارد می‌کند. اگر قرار باشد که هر لایه بر لایه بعدی نیروی برشی وارد کند آنگاه باید یک وسیله ارتباطی جامد میان آنها وجود داشته باشد. این گفته به این معنی است که باید اثر را یک جوهر صلب و کشسان در نظر گرفت. (مانند فولاد که هم صلب است و هم کشسان). چرا اثر را گاز یا مایع در نظر نمی‌گیریم؟ زیرا گاز و مایع مقاومت برشی ندارند. به همین دلیل است که شما می‌توانید انگشت خود را به راحتی در آب فرو کنید اما در



شکل ۱-۱۶

فولاد نمی‌توانید. امواج برشی در ماده‌ای که مقاومت برشی ندارد نمی‌توانند منتشر شوند. (مرکز زمین مایع است زیرا امواج برشی زمین‌لرزه نمی‌توانند در آن منتشر شوند). باوجود این، اتر نمی‌تواند صلب باشد. چرا؟ زیرا سیارات در آن حرکت می‌کنند.



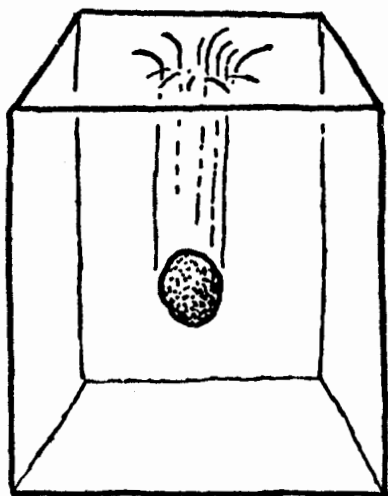
شکل ۱-۱۷

پس اتر باید یک شارۀ صلب و کشسان بوده باشد. ممکن است تصور شود که ترکیب "شارۀ صلب و کشسان" ناممکن است. اما، این ترکیب، همچنانکه لُردکلونین تأکید کرده است، یک ترکیب ممکن است. شارۀ صلب اگر به آرامی تغییر شکل پیدا کند همچون شارۀ رفتار می‌کند، اما اگر تغییر شکل آن تَند و ناگهانی باشد صلب می‌شود. در نتیجه اتر در مقابل امواج نور همچون جسم صلب و در مقابل سیارات، که در مقایسه بانور کندتر حرکت می‌کنند، همچون شارۀ رفتار می‌کند. اتر تنها شارۀ صلب در جهان نبود.

یخ یک شارۀ صلب است، زیرا اگر سنگی از بالا روی یک قطعه یخ گذاشته شود به آرامی در آن فرومی‌رود. ژله، قیر، و حتی شیشه نیز شارۀ صلب‌اند. (پنجره‌های شیشه‌ای کلیساهای قرون وسطی از بالا نازک و از پایین ضخیم شده‌اند، زیرا شیشه، همچون یک شارۀ، به آرامی طی قرن‌ها به طرف پایین حرکت کرده است.) سرعت جسمی که از داخل شارۀ صلب عبور می‌کند باید کمتر از سرعت امواج ارتعاشی در داخل شارۀ صلب باشد. سیارات می‌توانند آزادانه از داخل اتر عبور کنند زیرا سرعت آنها خیلی کمتر از سرعت نور است. سیارات نمی‌توانند تندتر از نور از داخل اتر عبور کنند، زیرا وقتی سرعت آنها به سرعت نور نزدیک می‌شود اتر همچون جسم صلب رفتار می‌کند. بنابراین نظریۀ اتر در قرن نوزدهم وقایع را پیشگویی می‌کرد.

نظریۀ قدیم اتر همچنین تصویری از بارالکتریکی و میدانهای الکترواستاتیکی، و اینکه چگونه می‌توانند نیرو و امواج الکتریکی تولید کنند به‌دست داد. حتی الکترون و پادالکترون (پوزیترون) را به‌نوعی پیشگویی کرد، اگرچه هنوز کشف نشده بودند!

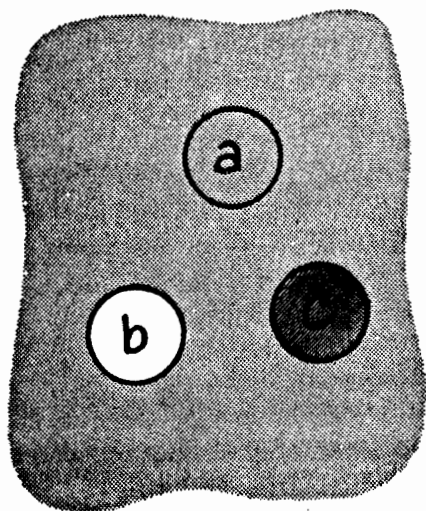
فرض کنید اتر در فضای تهی به‌صورت یک تهی جای خاکستری رنگ مشخص شده



شکل ۱-۱۸. یخ یک شاره صلب است، زیرا سنگ به آرامی در آن فرومی‌رود. ژله، قیر، و شیشه نیز شاره صلب‌اند.

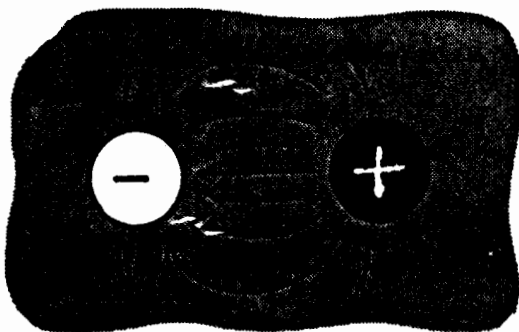
است. همچنین فرض کنید که از محلی به نام a در ناحیه خاکستری رنگ یک تکه از ناحیه خاکستری را برمی‌دارید تا ناحیه سفید رنگ b بر جای بماند و سپس قسمت برداشته شده را به‌زور در محل دیگری به نام c جایی دهید. با این کار ناحیه c خاکستری‌تر (و یا شاید سیاه) می‌شود. درواقع، شما سیاه و سفید را نمی‌آفرینید بلکه آنها را از خاکستری جدا می‌کنید. به همین ترتیب بارهای $+$ و $-$ (معروف به پوزیترون و الکترون) را می‌توان از خلأ جدا کرد. به عبارت دیگر، می‌توان فضای تهی را تقسیم کرد. این کار انرژی می‌خواهد و انرژی لازم را پرتوهای پر قدرت X (که همان امواج خیلی کوتاه نورند) فراهم می‌کنند. از این پدیده که به تولید زوج معروف است، چندین بار عکس گرفته شده است.

جاذبه میان بارهای $+$ و $-$ به صورت زیر توجیه می‌شد: اگر یک قطعه فضای تهی خاکستری رنگ را بردارید (که جای آن سفید باقی می‌ماند) و آن را به‌زور در جای دیگری قرار دهید در فضای میان نواحی سفید و سیاه کشش یا جابه‌جایی ایجاد می‌کنید. (یادمان باشد اتر کشسان بود.) این کشش، که گاهی آن را میدان جابه‌جایی می‌نامیدند، میدان الکتریکی است. اگر مثبت و منفی را جدا از هم نگه‌ندارید، کشش آنها را به سرعت پیش هم برمی‌گرداند. (هنوز برخی فیزیکدانان انگلیسی میدان الکتریکی قوی را میدان کشش شدید می‌نامند.)



شکل ۱-۱۹

اگر مثبت و منفی را رها کنیم تا در اثر کشش همدیگر را جذب کنند، ممکن است این تصور پیش آید که پس از آن کشش از بین می‌رود و همه چیز به حالت اول برمی‌گردد: یک فضای تهی خاکستری یکدست. اما آیا هنگامی که کشش در زمین بر اثر حرکت سریع گسل زمین لرزه از بین می‌رود، همه چیز به آرامی به حالت اول برمی‌گردد؟ آری، همه چیز به حالت اول برمی‌گردد اما نه به آرامی. انرژی کشش رها می‌شود و محیط اطراف زمین را به لرزه درمی‌آورد. به همین ترتیب، رهایی ناگهانی کشش میان مثبت و منفی، محیط خاکستری رنگ اتر را به لرزه درمی‌آورد. این لرزه عبارت است از یک پرتو تابش که همواره بر اثر نابودی پوزیترون-الکترون گسیل می‌شود. این تابش را امواج برشی تعبیر می‌کردند که از داخل اتر عبور می‌کرد و قبلاً شرح آن رفت.



شکل ۱-۲۰

ضمناً، بسیاری از معادلات قدیم که برای توصیف حرکت امواج در اتر به کار می‌رفتند امروز توسط زمین‌شناسان برای توصیف حرکت امواج زمین‌لرزه در پوسته جامد زمین به کار می‌روند. به عنوان مثال، امواج زمین‌لرزه مثل امواج نور، بر اثر بازتاب قطبیده می‌شوند و معادلات اتر این فرایند را توصیف می‌کنند. در واقع، معادلات اتر خیلی بهتر از امواج اتر، امواج زمین‌لرزه را توصیف می‌کنند زیرا این معادلات امواج تراکمی و امواج برشی را توصیف می‌کنند و این امواج در زمین وجود دارند نه در اتر. (در گذشته تصویری رفت که ممکن است پرتوهای X امواج تراکمی در اتر باشند، در صورتی که پرتوهای X قطبیده می‌شوند و امواج تراکمی نمی‌توانند قطبیده شوند.)

اتر قدیم جذاب و فریبنده است. اما واقعیت سرسخت تاریخی این است که، در پایان قرن نوزدهم، پیشرفت فیزیک حاصل کار کسانی نیست که عاشق اتر بودند. آغاز قرن بیستم با نظریه و کشف الکترون همراه بود. قبل از آن همواره تصویری کردند که سرعت نور در شیشه کندتر از سرعت آن در فضا است، زیرا اتر در شیشه چگالتر است تا اتر در فضا. سپس این ایده مطرح شد که ذرات باردار کوچکی به نام الکترون در اتم وجود دارد. امواج نورانی هنگام عبور از شیشه با الکترونها اتم شیشه برخورد می‌کنند. الکترونها برانگیخته امواج نورانی جدیدی از خود گسیل می‌کنند. این امواج جدید طوری با امواج ورودی برخورد می‌کنند که اثر خالص آن کاهش سرعت امواج در داخل شیشه است. بنابراین، اگر الکترونها در داخل شیشه وجود می‌داشت، دیگر وجود اتر چگال در داخل شیشه ضروری نبود. با گذشت زمان، هر ایده‌ای به ایده دیگر منجر می‌شد. ایده الکترون تمام چیزهایی را که قبلاً قابل توضیح نبودند توجیه می‌کرد و سرانجام همین ایده راه را برای ورود به دنیای کاملاً جدیدی به نام تکنولوژی الکترونیک هموار کرد. اتر در برخورد با اصل نسبیت و نظریه فوتون با مشکلاتی مواجه شد و اکنون فقط در خاطره‌ها وجود دارد.

"دنیا چگونه است" به قدری از "دنیا چگونه باید باشد" فاصله دارد که هر کس استدلالش را، به جای اولی، با دومی آغاز می کند ره به جایی نمی برد

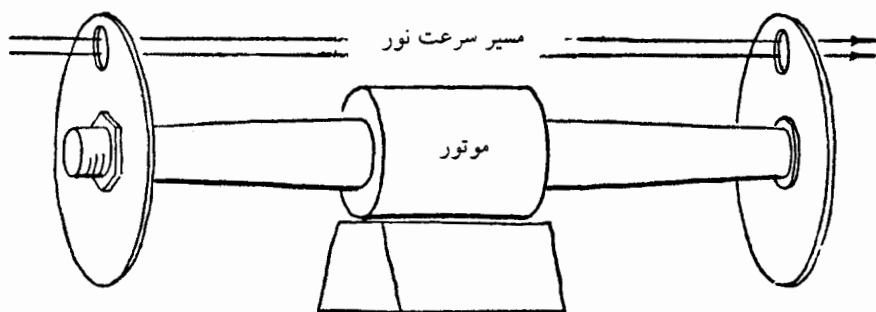
۲

مسئله اصلی

یک قدم به عقب

چیزی که قبلاً توضیح داده نشده است، شوق برداشتن یک قدم به جلو را برمی انگیزد. اما کشف گاهی چهره‌ای عبوس از خود نشان می دهد. گاهی یک وضع خاصی که تصویر می رود کاملاً تفهیم و توضیح داده شده است گنگ و مبهم به نظر می رسد و شوق

معمولاً هر کشفی، مخصوصاً کشفیات علمی، در شناخت دنیا یک قدم به جلو محسوب می شود. اما در واقع این طور نیست. کشف یک پدیده جدید یا پیدا کردن یک تبیین برای



شکل ۲-۱. سرعت نور را با این وسیله

فوق العاده ساده می توان اندازه گیری کرد. با تنظیم سرعت موتور به گونه ای که وقتی نور فاصله میان دو سوراخ را طی می کند دیسک یک بار بچرخد، می توان سرعت نور را تعیین کرد.

بدهد؟ پاسخ این سؤال عبارت است از ۱۰۷ میلیون به اضافه یک کیلومتر بر ساعت. اگر کامیون با سرعت یک کیلومتر بر ساعت از نور دور شود چطور؟ آیا فکر می‌کنید که جواب باید ۱۰۷ میلیون منهای یک کیلومتر بر ساعت باشد؟ درست است، همین مقدار انتظار می‌رود. اما، با کمال تعجب چنین نیست. دستگاه، علی‌رغم سرعت کامیون، در هر دو مورد مقدار ۱۰۷ میلیون کیلومتر بر ساعت را نشان می‌دهد.

چرا با نزدیک (یا دور) شدن کامیون به (یا از) چشمه نور، سرعت آن اندکی زیاد (یا کم) نمی‌شود؟ در سال ۱۹۰۰ این سؤال مهمترین سؤال در دنیا بود. سرپیچی سرعت نور از قواعد حاکم بر سرعت اجسام دیگر تکان‌دهنده، مایه دردسر و برای بعضی فیلسوفان باورنکردنی بود.

لازم به تذکر است که قبل از اینکه جهان علمی تسلیم این واقعیت بشود که نزدیک (یا دور) شدن به (یا از) چشمه نور، با هر سرعتی، هیچ تأثیری در سرعت مشاهده‌شده نور ندارد آزمایش دو کامیون به طرق مختلف و به دفعات زیاد تکرار شد.

شما می‌توانید فرض کنید که نور از ذرات یا از امواج درست شده‌است. همچنین می‌توانید فرض کنید که حکم گالیله معتبر است یا برخطاست. هر فرض دیگری را هم که

برداشتن یک قدم به جلو به یأس مبدل می‌شود. در این فصل جنبه منفی کشفیات علمی بازگویی شود.

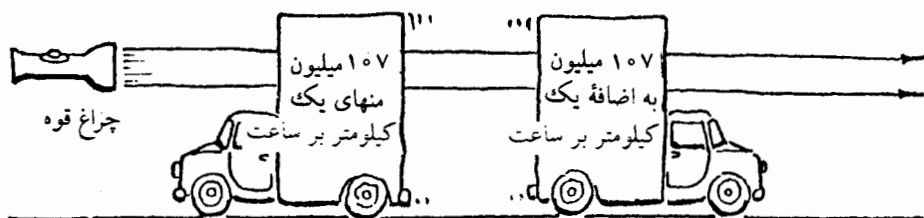
مسئله

نور فوق‌العاده تند حرکت می‌کند. آنچنان تند که گالیله، پس از کوشش برای اندازه‌گیری آن، به این نتیجه رسید که سرعت نور باید بینهایت باشد. سرانجام همزمان با کشف طلا در کالیفرنیا، سرعت نور نیز در آزمایشگاههای اروپا اندازه‌گیری شد. معلوم شد که سرعت نور ۱۰۷ میلیون کیلومتر بر ساعت است (امواج رادیویی و پرتوهای X نیز با سرعت نور حرکت می‌کنند). این مقدار، ده‌هزار برابر تندتر از سرعت مداری زمین حول خورشید و یک میلیون برابر تندتر از سرعت صوت^۱ و ده میلیون بار تندتر از سریعترین وسایل نقلیه زمینی است. این مقدار برابر با سرعت نور در فضای تهی یا فضای تقریباً تهی (مانند هوا) است. سرعت نور در آب، در شیشه، یا در پلاستیک کم می‌شود (گاهی حتی به نصف این مقدار می‌رسد).

فرض کنید وسیله‌ای وجود دارد که سرعت نور را، وقتی نور از داخل این وسیله می‌گذرد، اندازه‌می‌گیرد. این وسیله عدد ۱۰۷ میلیون کیلومتر بر ساعت را برای نور نشان می‌دهد همچنین فرض کنید که این وسیله در داخل کامیونی قرار دارد که با سرعت یک کیلومتر بر ساعت به طرف نور حرکت می‌کند. در این حالت انتظار دارید که وسیله چه عددی را نشان

۱. گالیله قبل از آنکه به اندازه‌گیری سرعت نور

بپردازد سرعت صوت را اندازه‌گیری کرد.



شکل ۲-۲. آزمایش دو کامیون. داخل هر کامیون وسیله‌ای قرار دارد که سرعت نور را وقتی از داخل آن می‌گذرد اندازه می‌گیرد.

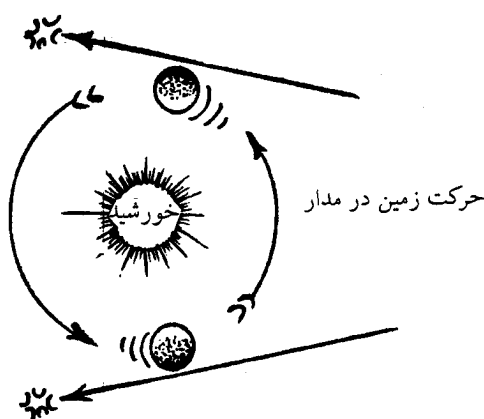
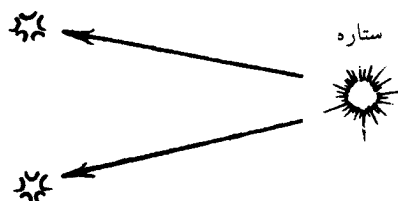
می‌خواهید وضع کنید، اما از این فرضیات نمی‌توانید نتیجه‌ای معنی بگیرید. اینکه چرا سرعت نور مطلق است مسئله مستقلی است؛ و در واقع یک پارادوکس (باطلنما) در خود و فی نفسه است.

احتمالات

این باطلنما را به دو طریق می‌شد حل کرد. یکی اینکه نور را یک ماده بسیار عجیب و غریب فرض می‌کردند. در واقع هم معلوم نبود که نور واقعاً چیست. بعضیها فکر می‌کردند که نور موج است، بعضیها آن را ذره می‌دانستند و در کتاب مقدس هم آمده بود که "نور نبود ظلمت است". شاید بهتر بود نور را چیزی تصور می‌کردند که همواره به یک طریق از کنار آنها می‌گذرد، چیزی که نمی‌توانستند از آن پیشی بگیرند. یعنی چیزی که همواره نسبت به آنها ثابت بود (مثل رنگین کمان، که اگر به طرف چپ می‌رفتند آن هم به طرف چپ و اگر به طرف راست می‌رفتند آن هم به طرف راست حرکت می‌کرد).

بوم سعی می‌کردم یک چیز عجیب و غریب برای نور وضع کنم که بتواند ثابت بودن سرعت ظاهری نور را توجیه کند. همچنین استدلال می‌کردم که "اگر سرعت نور چیز عجیب و غریبی است خود نور هم باید عجیب و غریب باشد". اما این راه حلی نبود که ایشتم پیشنهاد کرد.

اگر من [مؤلف] در سال ۱۹۰۰ دانشمند



یک طرح غیرعقلانه

اینشتین به خود گفت "نمی‌دانم نور چیست ، و اصلاً برای من مهم نیست که نور چي باشد. نور مهم نیست، سرعت نور مهم است." اما سرعت چیست ؟ سرعت عبارت است از مسافت تقسیم بر زمان. سرعت مساوی است با معیار فضا تقسیم بر معیار زمان. پس اگر اشکالی در مورد سرعت وجود دارد این اشکال مربوط می‌شود به فضا و زمان.. شاید لازم باشد ایده‌های فضا و زمان را تغییر دهیم.

$$\text{زمان} / \text{فضا} = \text{سرعت}$$

شکل ۲-۳. سرعت نور ستاره در صورتی که زمین در حرکت باشد. تندترین چیزی که ما در اختیار داریم سیاره‌ای است که بر آن سواریم. سرعت نور ستاره را یکبار هنگامی که زمین به آن نزدیک و یکبار هنگامی که از آن دور می‌شود اندازه‌می‌گیریم. سرعتهای اندازه‌گیری شده "باید" به اندازه دو برابر سرعت مداری زمین با هم تفاوت داشته باشند. اما در واقع چنین تفاوتی اصلاً وجود ندارد.

آن کجاست؟ در این مورد احتمالاً جاروب برقی اصلاً به برق وصل نشده است. تنها با دیدن جرقه ممکن است این فکر پیش بیاید که سیم پیچ موتور جاروب خراب شده است.

اگر در خانه‌ای بسته نشود، معمولاً دو کار می‌شود انجام داد. یا باید کناره‌های در را آنقدر بتراشیم که جابفتند یا به کمک یک

من توجه رقابتی آینده اینشتین را به این نکته جلب می‌کنم که این راه حل اینشتین، در کل، یک راه حل عاقلانه نیست. اگر چیزی اشکال پیدامی‌کند، معمولاً اشکال آن در کجاست؟ اشکال را معمولاً باید در جایی جست که زودتر خراب می‌شود. هنگامی که جاروب برقی روشن نمی‌شود، معمولاً عیب

مرور

بیشتر سرعتها نسبی اند. یعنی این سرعتها هم به ناظر وابسته اند و هم به جسمی که نظاره می شود. به عنوان مثال، سرعت نسبی باد، بسته به اینکه موافق باشد یا مخالف، می تواند زیاد و کم شود. اما، با کمال تعجب، نور از این قاعده مستثناست؛ چه به طرف آن بروید و چه از آن دور شوید، سرعت آن همواره 300000 کیلومتر بر ثانیه است. سرعت نور نسبی نیست، مطلق است.

اینشتین نتیجه گرفت که دلیل رفتار استثنایی نور نقص در مفهوم رایج سرعت، یا در مفهوم رایج فضا و زمان، است.

پوشش

اگر تفنگی را از روی لوکوموتیوی که روبه جلو در حرکت است به طرف جلو شلیک کنیم سرعت گلوله برابر است با سرعت قطار به اضافه سرعت خروج گلوله از دهانه تفنگ. آیا سرعت نور چراغ جلو لوکوموتیو نیز، به همین ترتیب، به مقدار سرعت قطار افزوده می شود؟

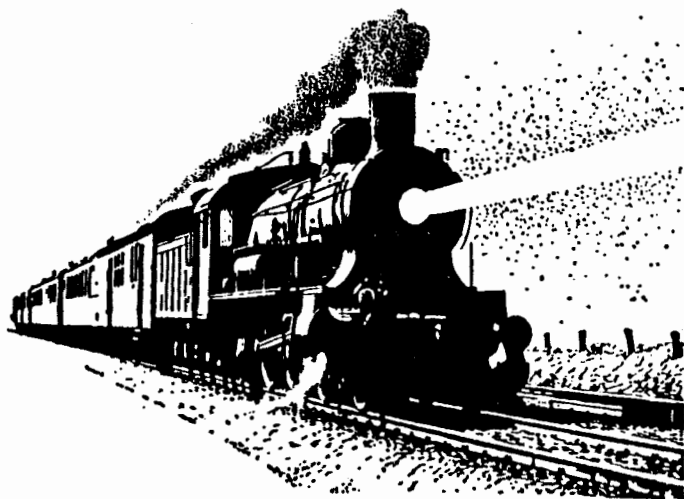
(الف) سرعت نور چراغ جلو با سرعت قطار ترکیب می شود و بنابراین افزایش می یابد.

(ب) سرعت نور جلو لوکوموتیوی که روبه جلو در حرکت است برابر است با سرعت نور چراغ جلو لوکوموتیوی که در ایستگاه ایستاده است.

جک بسیار بزرگ خانه را از پی آنقدر بلند کنیم که در بسته شود. البته اگر این در از اول طوری ساخته شده باشد که فقط به کمک جک بسته شود در آن صورت سایر در و پنجره ها، هنگام بلند شدن ساختمان به کمک جک، بسته نخواهند شد. بنابراین، بلند کردن ساختمان از پی یک راه حل عاقلانه نیست.

فضا و زمان شالوده عمارت فیزیک اند. فضا و زمان در زیربنای همه شاخه های علم فیزیک (مکانیک، ترمودینامیک، الکتریسیته، مغناطیس، و اپتیک) قرار دارند. اما فقط در یکی از شاخه های علم فیزیک به نام اپتیک مشکل وجود دارد، آنهم نه در همه اپتیک بلکه فقط در سرعت نور آن. فرض کنید فضا و زمان را طوری با جک "بلند" می کنیم که مشکل سرعت نور را حل کنیم. در این صورت، ایده جدید فضا و زمان چگونه می تواند در سایر شاخه های علم فیزیک، که قبلاً با آنها سازگار بود، سازگاری داشته باشد؟ "بلند کردن" فضا و زمان به کمک جک همانا و گشودن جعبه پاندورا با تمامی پیامدهای نامعینش همان.

با این حال علی رغم تمام این مشکلات افکار اینشتین پیروزشد. اما همواره باید به خاطر داشته باشیم که هر پیروزی با چه قیمتی به دست می آید. پیروزی اینشتین به قیمت ده هزار شکست به دست آمد. درست مثل درخت که به قیمت تلف شدن ده هزار از تخمهای آن توسط باد رشد می کند. شاید به همین دلیل است که این تعداد انسان بر روی زمین وجود دارد.



شکل ۲-۴

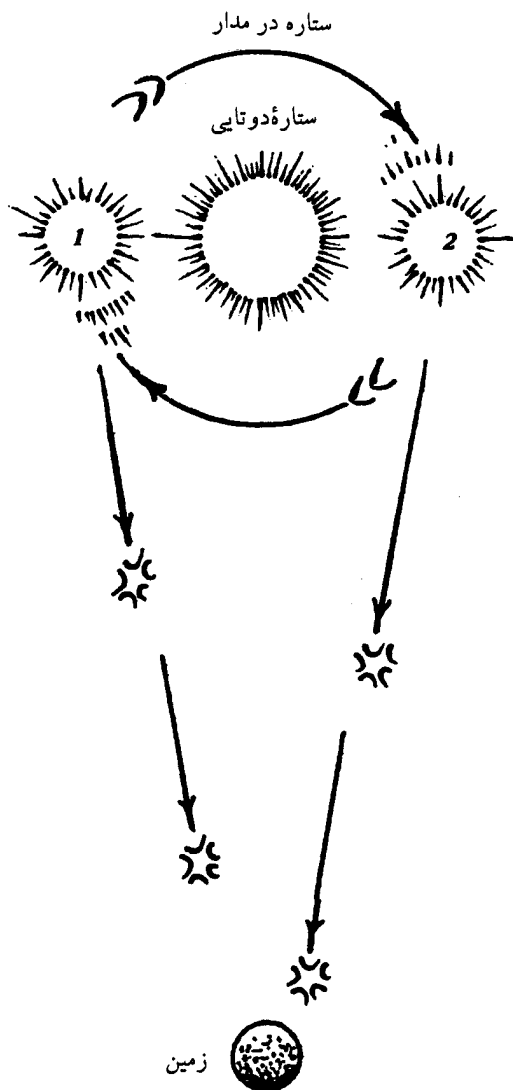
پاسخ

با استفاده از این ستاره‌های دوتایی می‌خواست ببیند که آیا سرعت نور به سرعت چشمه نور بستگی دارد یا نه، و نتیجه گرفت که سرعت نور به سرعت چشمه بستگی ندارد. درواقع، روش آزمون پوانکاره بسیار ساده بود.

در شکل زیر ستاره همدم در موقعیت (۲) به زمین نزدیک و در موقعیت (۱) از زمین دور می‌شود. اگر سرعت نور به سرعت ستاره‌ای که نور گسیل می‌کند بستگی داشته باشد، سرعت نور هنگامی که از موقعیت (۲) به طرف زمین می‌رود تندتر است از سرعت نور هنگامی که از موقعیت (۱) به طرف زمین می‌رود. در مسافت‌های طولانی، مانند نوری که از ستارگان دور می‌آید، نور گسیل شده از موقعیت (۲) از نور گسیل شده از موقعیت (۱) پیشی می‌گیرد. در این صورت شما باید ببینید که ستاره همدم قبل از اینکه موقعیت (۱) را ترک کند به موقعیت (۲) رسیده است. اما در واقع چنین چیزی هیچگاه اتفاق نمی‌افتد.

ب) پاسخ درست است. زیرا اگر شما به طرف چشمه نور بروید (یا از آن دور شوید) سرعت شما تأثیری در سرعت نور ندارد (آزمایش دو کامیون شکل ۲-۲). طبق اصل نسبیت، اگر شما به طرف چیزی حرکت کنید و یا آن چیز به طرف شما حرکت کند نتیجه یکسان است. آیا آزمایش هم این منطق را تأیید می‌کند؟

سرعت قطارها، هر چقدر هم تند حرکت کنند، برای این آزمون کافی نیست، اما سرعت بعضی ستاره‌ها به اندازه کافی زیاد است. شاید سرعت نور ستارگانی که به زمین نزدیک می‌شوند از سرعت نور ستارگانی که از زمین دور می‌شوند بیشتر باشد. در حدود یک سوم ستارگان شناخته شده همدمهایی دارند که به دور آنها می‌گردند. بیشتر این همدمها ضمن گردش در مدارهای خود گاهی به زمین نزدیک و گاهی از آن دور می‌شوند. پوانکاره



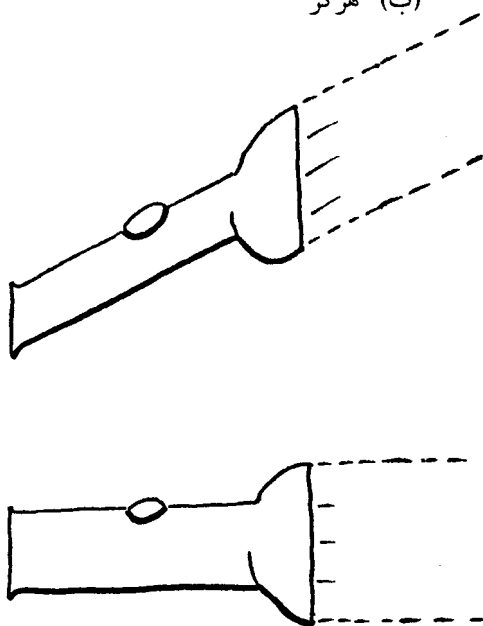
نزدیک و از آن دور می شود. اگر سرعت نور به سرعت ستاره بستگی داشته باشد، شما باید ببینید که ستاره همدم به موقعیت (۲) رسیده است، در حالی که هنوز موقعیت (۱) را ترک نکرده است. اما در واقع هرگز چنین چیزی دیده نشده است.

شکل ۲-۵. سرعت نور یک ستاره هنگامی که ستاره در حرکت است. شاید سرعت نور ستاره ای که به زمین نزدیک می شود بیشتر از سرعت نور ستاره ای باشد که از زمین دور می شود. اما آزمون هیچ اختلافی میان این دو نشان نمی دهد. همدم چرخان این ستاره دوتایی به تناوب به زمین

همچنین سرعت سوت قطار نیز، مانند سرعت نور چراغهای جلو آن، تحت تأثیر سرعت قطار قرار نمی‌گیرد. (بسامد را با سرعت اشتباه نگیرید.) با وجود این، اگر شما به چشمه صوت نزدیک شوید سرعت صوت نسبت به شما افزایش می‌یابد. اکنون ممکن است این پرسش مطرح شود که "صوت چگونه می‌تواند اصل نسبیت را نقض کند؟ مگر نه این است که تمامی فیزیک باید از قوانین اساسی یکسانی تبعیت کند؟" پاسخ این است که در مسئله صوت عامل سومی هست که نقش کلیدی بازی می‌کند. این عامل مهم هواست. ممکن بود یک چیزی (مثل اتر) در فضا وجود داشته باشد که همان نقشی را در برابر نور بازی کند که هوا در مقابل صوت بازی می‌کند. اما جهان با یک چنین خمیرمایه‌ای سرشته نشده است. فضای تهی هیچ عامل کلیدی که بتوان آن را نقطه مرجع به‌شمار آورد ندارد؛ مرجعی که به ما بگوید چه چیزی واقعاً در حرکت است. و اینک آخرین نکته طنزآمیز داستان: اگرچه سرعت نور چراغ جلو داخل قطار در حال حرکت افزایش نمی‌یابد، ولی تکانه و انرژی آن افزایش می‌یابد! عجیب است که مفاهیم کمتر آشنایی چون تکانه و انرژی بیشتر از مفهوم آشنای سرعت از شهود تبعیت می‌کنند.

پرسش

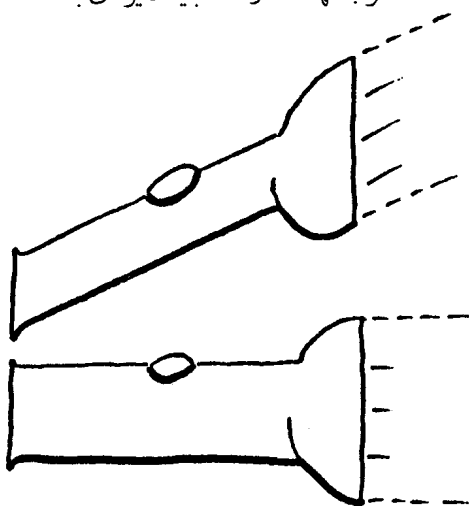
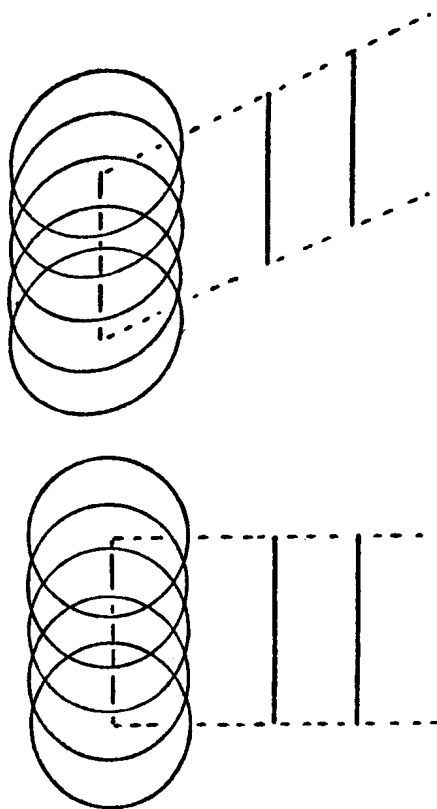
آیا هرگز دیده شده است که یک باریکه نور در فضای تهی به طور مایل حرکت کند؟
(الف) گاهی
(ب) هرگز



پاسخ

ب) پاسخ درست است. این پاسخ بر این فرضیه مبتنی است که باریکه نور یک توالی از امواج است. (بعداً نشان خواهیم داد که با فرض ذره بودن باریکه نور نیز همین پاسخ به دست می آید.) امواج به این دلیل حرکت می کنند که هر نقطه روی موج پاشیده می شود و به یک موج دایره ای کوچک به نام موجک تبدیل می شود. تمام این موجکها به هم افزوده می شوند و مجدداً موج قبلی را در موقعیت جدیدی تشکیل می دهند.

اگر امواج به طور مایل حرکت کنند موجکهای دایره ای باید به صورت بیضوی در آیند. اما این امواج نمی توانند بیضوی باشند. زیرا چنانچه موج بخواهد با سرعت یکسان (سرعت نور) و در همه جهات حرکت کند آنگاه موجکها فقط و فقط باید دایره ای باشند.

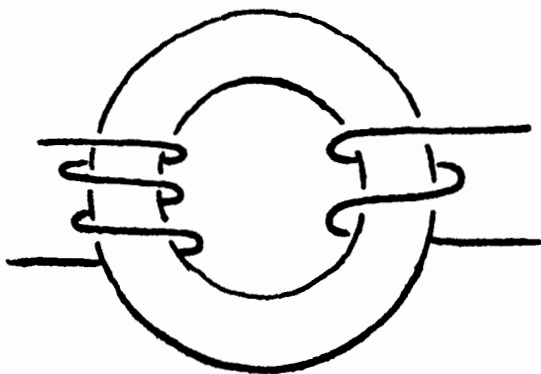


داخل کله فیزیکدان

آزمایشگاه دیوان عالی فیزیک است، اما چرخهای عدالت به کندی می چرخند و فیزیک نظری دانان کم طاقت! وانگهی، انجام آزمایش دو کامیون به دلیل مشکلات فنی تقریباً محال بود. باوجود این، نتایج این آزمایش از لحاظ نظری پیشگویی شده بود. چگونه؟ با درک قواعد الکتریسته و مغناطیس.

هر تر ثابت کرد که امواج نور (و همین طور امواج رادیویی) امواج الکترومغناطیسی اند. این امواج به صورت زیر عمل می کنند.

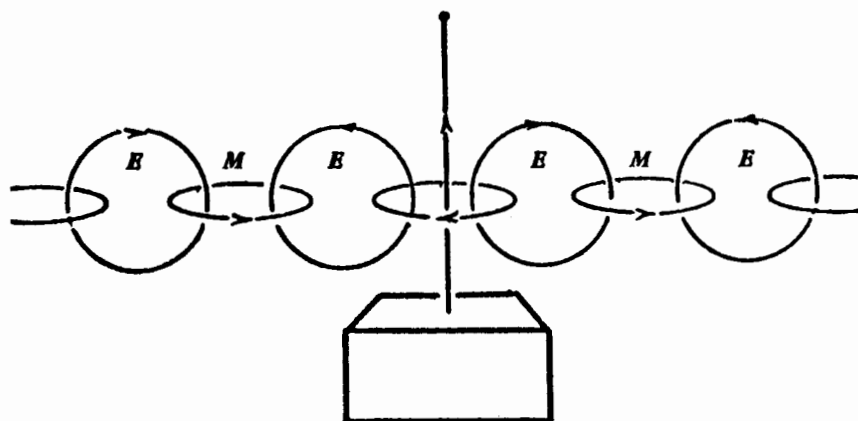
هنگامی که شدت میدان مغناطیسی افزایش یا کاهش می یابد، میدان الکتریکی القایی شود و به دور میدان مغناطیسی متغیر حلقه می زند. این گفته دقیقاً اساس ترانسفورماتورهای ac است. برعکس، هنگامی که شدت میدان الکتریکی افزایش یا کاهش می یابد، میدان مغناطیسی القایی شود و به دور میدان الکتریکی متغیر حلقه می زند.



شکل ۲-۸. اساس کار مبدل جریان متناوب به این صورت است که میدان الکتریکی متغیر در یک سیم پیچ جریان الکتریکی آن سیم پیچ را به تغییر وامی دارد؛ جریان الکتریکی متغیر، میدان مغناطیسی متغیر در حلقه آهنی تولید می کند؛ میدان مغناطیسی متغیر، میدان الکتریکی متغیری را در اطراف حلقه آهنی القایی کند؛ این میدان الکتریکی متغیر، جریان الکتریکی متغیری در سیم پیچ دیگر القایی کند. اما این میدانها بدون سیم پیچها و حلقه های آهنی نیز می توانند وجود داشته باشند. (حلقه آهنی، مؤثر است اما اساسی نیست.) در فضای تهی میدان الکتریکی متغیر، مستقیماً میدان مغناطیسی متغیر تولید می کند، و میدان مغناطیسی متغیر نیز به نوبه خود، مستقیماً میدان الکتریکی متغیر دیگری القایی کند و به همین ترتیب.

این دوگانگی، در واقع، قلب نظریه الکترومغناطیسی است. وقتی میدان الکتریکی یا مغناطیسی، به هر طریق، در عالم تولید شد جاودانه می‌شود و برای همیشه در فضا پیش می‌رود. مثلاً، اگر شما بخواهید با تخلیه بار الکتریکی یک جسم باردار، میدان الکتریکی وابسته به آن را از بین ببرید، یا اگر با منهدم کردن یک آهنربا سعی کنید میدان مغناطیسی وابسته به آن را نابود کنید، مرگ هر یک از این دو میدان باعث تولد میدانی جدیدی از نوع دیگر می‌شود: مرگ میدان الکتریکی باعث تولد میدان مغناطیسی می‌شود و برعکس. هر میدان در حال مرگ یک میدان متغیر است، و هر میدان متغیر میدانی جدیدی از نوع دیگر تولید می‌کند.

بنابراین، این فرایند برای همیشه ادامه پیدامی‌کند. با از بین رفتن میدان الکتریکی، میدان



شکل ۲-۹. میدانهای متغیر میدانهای دیگری القامی‌کنند که به دور آنها حلقه می‌زنند. میدان الکتریکی متناوب در آنتن فرستنده میدان مغناطیسی القامی‌کنند که به دور آن حلقه می‌زند. وقتی میدان مغناطیسی نیز تغییر کند، به نوبه خود، میدان الکتریکی القامی‌کنند که به دور آن حلقه می‌زند، و به همین ترتیب. زنجیر میدانهای حلقه‌شونده، موج رادیویی تشکیل می‌دهد. تک تک حلقه‌های زنجیر تغییر نمی‌کنند، بلکه فقط از آنتن دور می‌شوند. با حرکت حلقه‌ها میدان نیز حرکت می‌کند. از این رو، میدان در هر نقطه ثابت در فضا، همچنانکه حلقه‌ها حرکت می‌کنند، به طور پیوسته تغییر می‌کند.

توجه کنید که حلقه‌های زنجیر یک موج الکترومغناطیسی را فقط در سه بعد می‌توان تصویر کرد. موج صوتی را در یک یا دو بعد می‌توان تصویر کرد. در واقع، تمامی قوانین مکانیک را می‌توان بر روی یک میز بسیلارد نمایش داد. اما برهم‌کنشهای الکترومغناطیسی طور دیگریند. مفاهیم الکترومغناطیس، برخلاف مکانیک، در فضای دوبعدی نمی‌گنجند. در اینجا فضاهای سه‌بعدی اساسی‌اند. به زودی خواهید دید که ایده‌هایی وجود دارند که حتی در فضای سه‌بعدی نیز نمی‌گنجند.

مغناطیسی و با از بین رفتن میدان مغناطیسی، میدان الکتریکی تولید می‌شود: میدان الکتریکی "دوباره صورت واقعیت به خود می‌گیرد". این حرکت دائمی سازوکاری است که امواج رادیویی، امواج نور، و حتی پرتوهای X را از طریق فضا منتشر می‌کند.

مسافرت پشت مسافرت. اگرچه مدتهاست که ایستگاه فرستنده سیگنالی نمی‌فرستد، شمعها خاموش‌اند، و آزمایشگاه تابش بسته است ولی امواج قبلاً گسیل شده در اجرای آخرین دستور همچنان به پیش می‌تازند: توقف هرگز!

اکنون فرض کنید سوار بر یک کامیون در جهت حرکت موج به پیش می‌رانید. اگر شما موج را، درحالی که ظاهراً آهسته‌تر حرکت می‌کند، اندازه بگیرید می‌توانید با سریعتر راندن کامیون آن را درحالی که باز هم آهسته‌تر حرکت می‌کند اندازه بگیرید. اگر به اندازه کافی سرعت بگیرید می‌توانید موج را، درحالی که ایستاده به نظر می‌رسد، اندازه بگیرید.

اگر موج در حالت سکون اندازه‌گیری شود آنگاه میدانهایی که این موج را تولید می‌کنند نیز در حالت سکون (یا ایستا) اندازه‌گیری می‌شوند. اما شما نمی‌توانید در فضای تهی میدان ایستا داشته باشید. برای اینکه میدانهای ایستاداشته باشید به آهنرباها و اجسام باردار نیازمندید. اگر آهنرباها و اجسام باردار حضورداشته باشند آنگاه فضا تهی نیست. میدان ایستا هم از آهنربا یا باری که آن را تولید می‌کند مستقل نیست. با انهدام آهنربا یا تخلیه اجسام باردار میدان ایستا هم از بین می‌رود.

بنابراین، شما هرگز موج نور ساکن در فضای تهی مشاهده نخواهید کرد. برای اینکه موج نور وجود داشته باشد باید حرکت کند زیرا از میدانهای الکتریکی و مغناطیسی درست شده است. میدانهای الکتریکی-مغناطیسی هم تنها به کمک یک سازوکار بده-بستان که به تغییر بستگی دارد می‌توانند وجود داشته باشند. مشاهده یک موج نوری ایستا مثل مشاهده یک ترانسفورماتور ac است که در dc کار می‌کند.

ممکن است شما تصور کنید که به کمک حرکت خود می‌توانید چیزهای عجیبی چون تغییرات میدان الکتریکی-مغناطیسی را درک کنید. اما یادتان باشد که حکم گالیله و اصل نسبیت پوانکاره چنین چیزی را منع می‌کنند، زیرا چنین تغییراتی در قوانین الکتریسته و مغناطیس، که در یک آزمایشگاه مسدود و منزوی مشاهده شود، به منزله آگاهی از حرکت اتاق آزمایشگاه منزوی است.

برای اینکه بدانیم اندازه‌گیری موج ایستا امکان‌پذیر نیست، یادآوری می‌کنیم که حتی موجی را که در حال کند (یا تند) شدن است نیز نمی‌توان اندازه گرفت، زیرا موج کندشونده بالاخره می‌ایستد. از لحاظ نظری، نتیجه آزمایش دو کامیون، کاملاً جدا و مستقل از هرگونه آزمایش پیش‌بینی می‌شود.

شهود قدرتمندترین و درعین حال غیر قابل
اعتمادترین موتور علم است

۳

جعبه پاندورا

آزمایشهای ذهنی

حرکت همزمان شده

فرض کنید یک ناوگان کشتی به یک ترتیبی آرایش گرفته‌اند. می‌خواهیم این ناوگان را بدون تغییر آرایش به حرکت درآوریم و به جای دیگر منتقل کنیم. این کار مستلزم این است که کشتیها همزمان شروع به حرکت کنند و همزمان بایستند. اگر یکی از کشتیها اندکی تندتر یا اندکی کندتر حرکت کند، فاصله آن با کشتیهای مجاور تغییر می‌کند و آرایش ناوگان برهم می‌خورد.

فرض کنید که این ناوگان متشکل است از سه فضاییما که در دوردستهای فضا، جایی که گرانی قابل چشمپوشی است، در حرکت‌اند. فضاییمای فرماندهی در وسط فاصله میان دو فضاییمای دیگر واقع است. ازاین‌رو، دستورهایی که از این فضاییما صادر می‌شود،

آزمایش ذهنی، آزمایشی است که در ذهن انجام می‌شود. آزمایشگر به این دلیل می‌تواند آزمایش ذهنی انجام بدهد که تمامی قوانین حاکم بر رویدادهایی را که تجسم می‌کند در ذهن خود دارد. اینشتین از آزمایشهای ذهنی استفاده کرد تا ببیند چه تغییراتی باید در مفاهیم زمان و مکان بدهد تا سرعت نور به جای اینکه نسبی باشد، مطلق شود. برای این کار از برهان خلف استفاده کرد. اینشتین در ذهن خود فرض کرد که سرعت نور مطلق و حکم گالیله نیز همواره صادق است. سپس با این فرضها، آزمایشهای ذهنی خود را انجام داد تا ببیند چه اثری بر فضا و زمان دارند. در اینجا این آزمایش ذهنی را می‌آوریم؛ بدیهی است که اثرهای آن حیرت‌انگیز خواهد بود.

زمان متفاوت

وقت ناهار فرامی‌رسد. فرمان "ناهار بخورید" از کشتی فرماندهی صادر می‌شود. از دید فضانوردان، این فرمان همزمان به کشتیهای عقب و جلو می‌رسد. اما از دید ناظر، سیگنال "ناهار بخورید" باید کشتی جلوی را تعقیب کند و به استقبال کشتی عقبی برود. ناظر هم سیگنال روبه جلو و هم سیگنال روبه عقب را که با سرعت یکسان (سرعت ثابت و مطلق نور) نسبت به او حرکت می‌کنند، اندازه می‌گیرد. بنابراین، طبق اندازه‌گیری او، سیگنالی که کشتی را تعقیب می‌کند دیرتر از سیگنالی که به استقبال کشتی می‌رود به مقصد می‌رسد. اینشتین فرض می‌کند که سرنشینان کشتیها نیز سیگنالها را که با سرعت ثابت و مطلق نور از کنار آنها رد می‌شوند اندازه می‌گیرند. فضانوردان مشاهده می‌کنند که ناظر در حرکت است و آنها خود و کشتیهایشان ساکن هستند، و کشتی فرماندهی در وسط فاصله میان دو کشتی دیگر قرار دارد. در نتیجه، آن طور که سرنشینان اندازه می‌گیرند، سیگنالها همزمان به کشتیهای جلو و عقب می‌رسند، و همه همزمان ناهار می‌خورند. اما از دید ناظر، سرنشینان کشتی عقب زودتر از

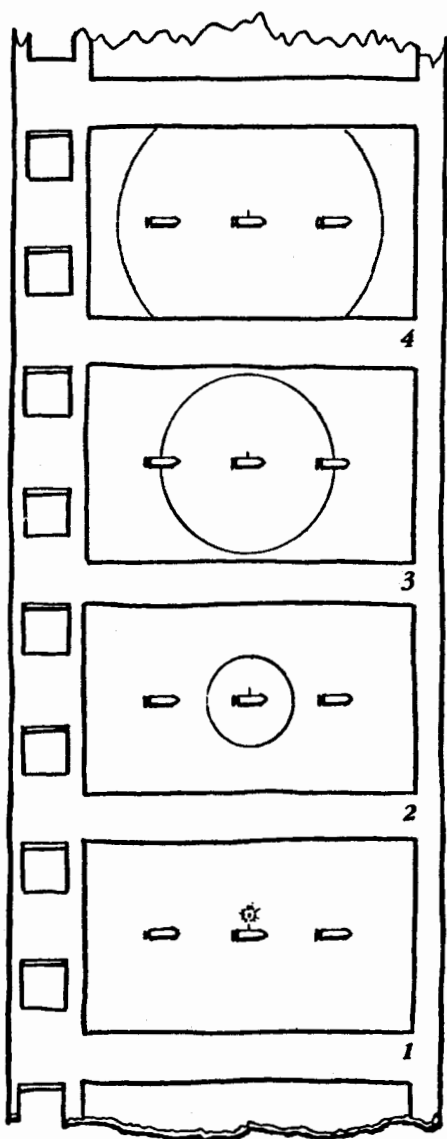
همزمان به دو کشتی عقب و جلو می‌رسد. فرامین به صورت سیگنال رادیویی و با سرعت نور ارسال می‌شوند.

ابتدا، ناوگان در حالت ماناست. طبق نظر گالیله، مانایی ناوگان به معنای ساکن بودن آن نیست، بلکه صرفاً به این معناست که سرعت آن با سرعت شما یکسان است؛ مقدار سرعت کاملاً نامعلوم است.

ناوگان در حال دادن مانور است و در جریان مانور باید آرایش آن تغییر نکند. ناظری می‌خواهد در حالت ایستاده عبور کشتیها را نظاره کند. از کشتی فرماندهی این فرمان صادر می‌شود: "موتورها را با فرمان زیر برای مدت یک دقیقه روشن کنید: ۴، ۵، ...، ۱، ۲، ۳، روشن!" این فرمان همزمان به کشتیهای عقب و جلو می‌رسد، موتورها همزمان روشن می‌شوند، و ناوگان همزمان به حرکت درمی‌آید. کشتی فرماندهی موقعیتش را طوری تنظیم می‌کند که در وسط فاصله میان دو کشتی باقی‌بماند.

اکنون ناوگان به آرامی به سمت راست حرکت می‌کند. اما از دید فضانوردان، ناظر به آرامی به سمت چپ جابه‌جا می‌شود و آنها خود در حال سکون هستند! اکنون اولین نتیجه حیرت‌انگیز پدید می‌آید.





شکل ۳-۲. در حالت سکون. در این فیلم دیده می‌شود که سیگنال کشتی فرماندهی همزمان به کشتی جلو و عقب می‌رسد. منظور از "در حالت سکون" این است که کشتیها نسبت به ناظر در حالت سکون هستند. اگر ناظر و کشتیها با هم در فضا حرکت کنند، یعنی سرعت آنها یکسان باشد، آنگاه کشتیها نسبت به ناظر در حالت سکون هستند.

سر نشینان کشتی جلو شروع به خوردن ناهار می‌کنند.

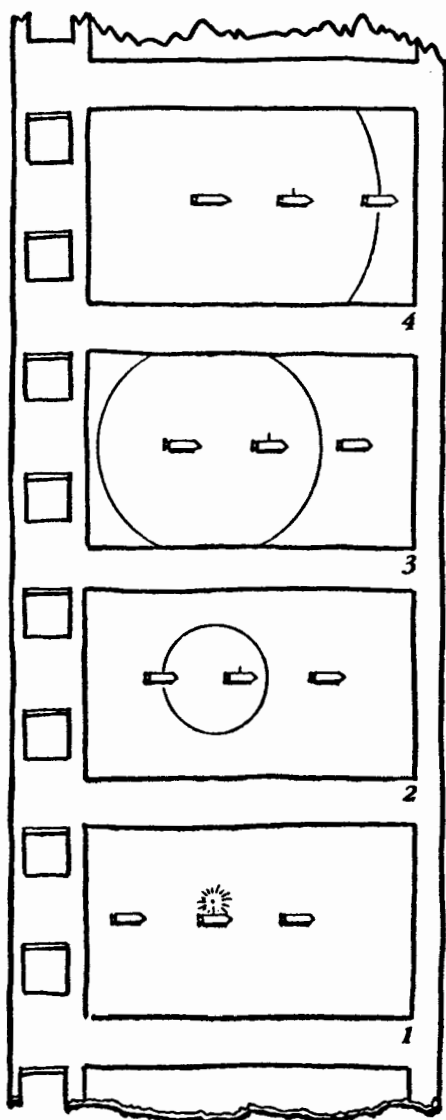
اینشتین به کمک همین آزمایش ذهنی نتیجه گرفت که رویدادهایی که برای سر نشینان فضاپیماها همزمان‌اند از نظر ناظر همزمان نیستند و برعکس. مفهوم قدیم زمان به این صورت بود که تمامی قسمتهای فضا همزمان به هم می‌رسند، بدون توجه به اینکه ناظر در حرکت باشد یا نباشد. اما اگر سرعت نور مطلق باشد، این مفهوم زمان باید تغییر کند، به گونه‌ای که قسمتهای مختلف فضا همزمان به همدیگر نرسند. حفظ مطلق بودن سرعت نور به قیمت نسبی شدن زمان انجام می‌شود.

نسبی بودن زمان اساسی‌ترین مفهوم جدید نظریه نسبیت خاص است، و همچنانکه به زودی خواهیم دید، جعبه پاندورا^۱ را بازمی‌کند. اجازه دهید به آزمایشهای ذهنی بازگردیم؛ خواهیم دید که ناهمزمانی زمان ناهار جدیدترین اثر نسبی بودن زمان نیست.

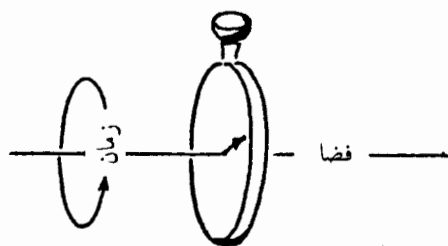
برادر وی، اپیمتئوس، که "عقلش از عقب می‌آمد" فرستاد. پاندورا جعبه‌ای همراه داشت که او را از گشودن آن منع کرده بودند، ولی وی نافرمانی کرده جعبه را گشود، و تمام بلیاتی که تاکنون گریانگیر انسان بوده از آن بیرون آمد. فقط امید در ته جعبه ماند تا نوع بشر را تسکین دهد.

غلامحسین مصاحب، دایرةالمعارف فارسی، جلد اول، اس ص ۵۲۰.

۱. در اساطیر یونان، اولین زنی که بر زمین پیداشد. زئوس، برای انتقامجویی از پرومتئوس، هفایستوس را مأمور کرد که پاندورا را از گل بسازد: آتفه در او روح دمید؛ سایر خدایان او را لطف و دلربایی و استعدادها بخشیدند، ولی هرمس به او چرب‌زبانی و حیل‌گری آموخت. چون پرومتئوس از پیش می‌دانست که زن چه آتشی بر زمین خواهد سوزاند، پاندورا را نزد



شکل ۳-۳. اگر کشتیها نسبت به ناظر در حرکت باشند اندازه گیریهای ناظر نشان می دهد که سیگنال فرماندهی زودتر به کشتی عقب می رسد. اگر ناظر یک آزمایش ذهنی انجام بدهد که در آن کشتی فرماندهی همزمان دو گلوله به طرف کشتی جلو و عقب شلیک کند (و در این آزمایش قواعد فیزیک قدیم را به کاربرد) اندازه گیریهای ناظر و سرنشینان کشتی نشان می دهند که گلوله ها همزمان به دو کشتی جلو و عقب می رسند، حتی اگر کشتیها نسبت به ناظر در حرکت باشند. مسافتی که گلوله روبه جلو طی می کند بیشتر از مسافت طی شده توسط گلوله روبه عقب است. اما سرعت گلوله روبه جلو برابر است با سرعت خروج از لوله به اضافه سرعت کشتی و سرعت گلوله روبه عقب برابر است با سرعت خروج از لوله منهای سرعت کشتی. با وجود این، سرعت نور، برخلاف سرعت گلوله ها، تحت تأثیر جسمی که نور از آن گسیل می شود، قرار نمی گیرد.

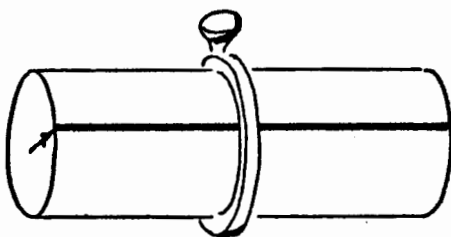


ساعت نازک زمان را در یک محل در فضا نشان می‌دهد.

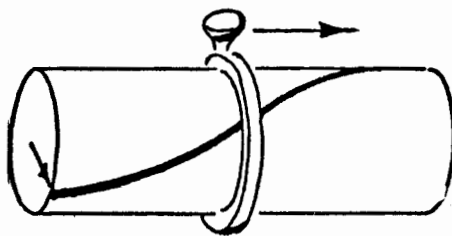
شکل ۳-۴. ساعت بزرگ. این ایده که لازم نیست تمامی قسمتهای فضا همزمان به همدیگر برسند را می‌توان با یک استوانه چرخان به‌خوبی مجسم کرد. در امتداد استوانه، مطابق شکل، یک نوار باریک رنگ زده شده است. اگر استوانه به طرف راست یا چپ حرکت نکند، تمامی قسمتهای نوار در بالای استوانه قرار می‌گیرند. اگر استوانه به حرکت درآید، به نظر می‌رسد که نوار دور استوانه پیچیده شده است! بنابراین، تمامی قسمتهای نوار با هم در بالای استوانه قرار نمی‌گیرند.

اکنون فرض کنید که استوانه ساعت بزرگی است که در فضا گسترش یافته است و نوار رنگی عقربه آن است. پیچیده شدن عقربه به دور ساعت حاکی از آن است که قسمتهای مختلف ساعت، زمانهای متفاوتی را نشان می‌دهند.

پیچیده شدن استوانه نشان می‌دهد که چرا وسیله‌ای که برای اندازه‌گیری سرعت نور در داخل یک کامیون متحرک به کار می‌رود یک نتیجه غیرمنتظره به دست می‌دهد.



ساعت بزرگ زمان را در قسمتهای مختلف فضا نشان می‌دهد. اگر ساعت در حرکت نباشد، زمان در همه‌جا یکسان است.



وقتی ساعت بزرگ در حرکت است، همه‌جا یک زمان نشان نمی‌دهند.

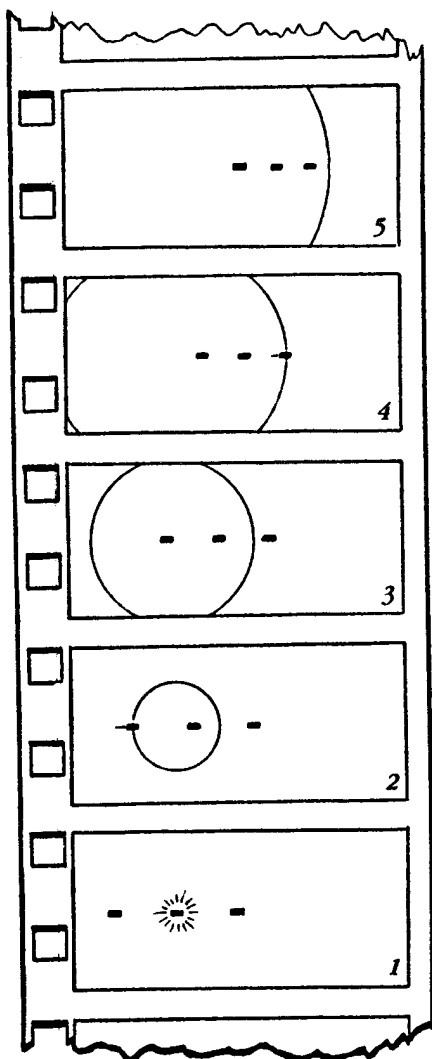
حرکت همزمان نشده

فرض کنید کشتی فرماندهی دستور دیگری برای روشن کردن موتورها صادر می‌کند. این بار سرعت کشتیها نسبت به ناظر افزایش می‌یابد. اما آن طور که ناظر می‌بیند، کدام کشتی زودتر شتاب می‌گیرد؟ کدام کشتی زودتر دستور فرماندهی را دریافت می‌کند؟ کشتی عقب. از دید سرنشینان کشتیها، هم کشتی عقب و هم کشتی جلو همزمان دستور فرماندهی را دریافت می‌کنند. از دید ناظر، فرمان ابتدا به کشتی عقب و بعد از آن به کشتی جلو می‌رسد. از این رو، برای مدت زمانی کشتی عقب تندتر از کشتی جلو حرکت می‌کند. در خلال این مدت، فضای میان کشتیها باید کاهش یابد. کشتی جلو نیز به محض دریافت فرمان شتاب می‌گیرد. از آن به بعد، سرعت کشتیها یکسان می‌شود و فاصله میان آنها دیگر کاهش نمی‌یابد.

بنابراین، یک نتیجه فوری همزمان نشدن حرکت این است که با شتاب گرفتن کشتیها فضای میان آنها از دید ناظر کاهش می‌یابد. اما از دید سرنشینان کشتی، کشتیها همزمان شتاب می‌گیرند و بنابراین فضای میان آنها هیچ تغییری نمی‌کند.

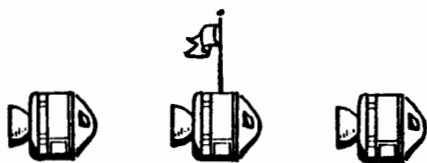
اگر بار دیگر فرمان افزایش سرعت از طرف کشتی فرماندهی صادر شود، باز هم فضای میان کشتیها از دید ناظر کاهش می‌یابد و از دید سرنشینان کشتیها تغییر نمی‌کند.

هنگامی که کشتی فرماندهی دستور کاهش



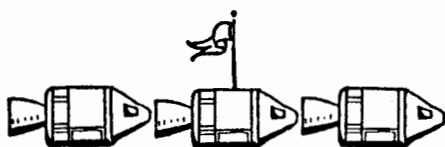
شکل ۳-۵. چون سیگنال زودتر به کشتی عقب می‌رسد، فاصله میان دو کشتی، آن طور که ناظر اندازه می‌گیرد و در فیلم نشان داده شده است، کوتاهتر می‌شود.

اکنون کلاه خود را قاضی کنید و از خود بپرسید که چگونه ممکن است سرعت کشتیها کاهش یابد، بدون آنکه سرنشینان آن متوجه شوند؟ اگر کشتیها به اندازه کافی به هم نزدیک شوند قسمت جلو یکی با عقب دیگری برخورد می‌کند، و در صورتی که سرنشینان این موضوع را باور نداشته باشند، عملاً آن را تجربه خواهند کرد!



شکل ۳-۷

سرعتها را صادر می‌کند، این دستور نیز، از دید ناظر، زودتر به کشتی عقب می‌رسد. در نتیجه ابتدا کشتی عقب از سرعت خود می‌کاهد. در فاصله زمانی میان کاهش سرعت کشتی عقب و رسیدن فرمان به کشتی جلو، که هنوز با سرعت بیشتر در حرکت است، فضای میان کشتیها افزایش می‌یابد. سرانجام وقتی همه کشتیها سرعت خود را کم کردند، فضای میان آنها به حالت قبل از صدور فرمان برمی‌گردد.



شکل ۳-۶

انقباض عرضی وجود ندارد

ثابت شده است جسمی که با سرعت زیاد حرکت می‌کند به ظاهر در امتداد حرکت منقبض می‌شود. ممکن است این سؤال پیش بیاید که آیا جسم در امتداد عمود بر جهت حرکت نیز منقبض (یا منبسط) نمی‌شود؟ پاسخ این پرسش این است که اندازه‌های جسم در امتداد عمود بر جهت حرکت تغییری نمی‌کنند. در اینجا این موضوع را توضیح می‌دهیم.

فرض کنید جسم متحرک در امتداد عمود بر جهت حرکت منقبض می‌شود. همچنین فرض کنید که جسم متحرک گلوله‌ای است که در لوله تفنگ در حرکت است. گلوله بر اثر انقباض به اصطلاح لاغر می‌شود و گاز حاصل از انفجار که گلوله را بیرون می‌راند از کنار آن خارج می‌شود. اکنون وضعیت را از دید گلوله بررسی کنید. گلوله "ویژه" قطر خود و قطر لوله تفنگ را اندازه می‌گیرد و از دید گلوله لوله تفنگ منقبض می‌شود. از این رو، گلوله در تفنگ گیر می‌کند و تفنگ منفجر می‌شود.



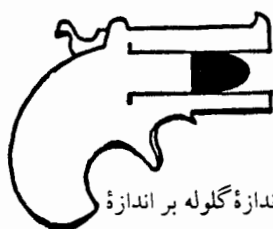
ساکن



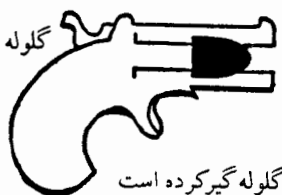
متحرک

بنابراین ممکن است گلوله‌های با سرعت خیلی زیاد، گاز پیش رانش خود را از کنار خود عبور دهند و یا در داخل لوله تفنگ گیرکنند، که از لحاظ منطقی ناممکن است. از همین استدلال می‌توان برای ردّ این ادعا که اجسام متحرک در امتداد عمود بر جهت حرکت منبسط می‌شوند استفاده کرد.

می‌توان به کمک یک استدلال منطقی، نظیر استدلال بالا، نشان داد که اجسام در امتداد عمود بر جهت حرکت نیز منقبض نمی‌شوند. شما سعی کنید این استدلال را ارائه کنید. اگر این کار را بکنید خواهید دید که همواره با شکست مواجه خواهید شد، زیرا در جهت حرکت ناهمزمانی در زمان وجود دارد. در نتیجه، جسم متحرک فقط و فقط در جهت حرکت منقبض می‌شود.

اندازه گلوله بر اندازه
لوله منطبق است

گلوله پاریک شده است



گلوله گیر کرده است

شکل ۳-۸

۱. "ویژه" به معنای اندازه یک جسم از نظر ناظری است که نسبت به جسم در حرکت نیست. اگر ناظر بر یک کشتی سوار باشد، ویژه طول کشتی را اندازه می‌گیرد. اما اگر کشتی از کنار ناظر بگذرد، ناظر ویژه طول آن را اندازه نمی‌گیرد. ایده "ویژه" به مفاهیم زمان و مکان نیز قابل تعمیم است.

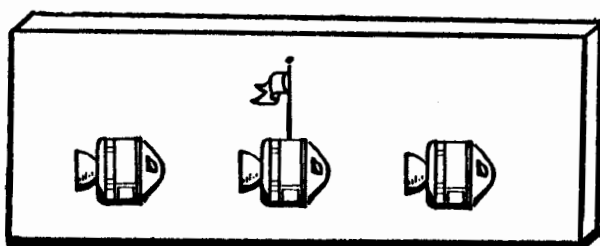
فضا منقبض می‌شود

برای اینکه کشتیها نمای مایل پیدا کنند تابلو در فضا می‌چرخد، بنابراین بعد از چرخش جهت حرکت آنها عوض می‌شود. جهت حرکت کشتیهای فضایی واقعی از طریق فضا تغییر نمی‌کند، بنابراین در واقع نمی‌توان آنها را در فضا چرخاند. با وجود این، به نظر می‌رسد که چرخیده‌اند و در واقع هم می‌چرخند، اما نه در فضا. در فصل ۵ به این نکته اشاره خواهیم کرد.

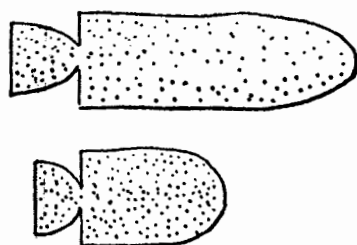
پاسخ این اعتراض این است که کشتیها متشکل‌اند از تعداد فوق‌العاده زیادی اتم کوچک که با فضای معینی از هم جدا شده‌اند. اتمها خود کشتیهای کوچکی هستند. همچنانکه ضمن اندازه‌گیری معلوم می‌شود که فضای میان کشتیها منقبض شده است، فضای میان اتمها نیز منقبض می‌شود. این گفته به این معنی است که کشتیها به همان نسبتی منقبض می‌شوند که فضای میان آنها منقبض می‌شود. خود فضا هم منقبض می‌شود، اما فقط در یک جهت: در جهت حرکت.

مسئله دقیقاً در حکم این است که شما یک تابلو از یک ناوگان کشتی داشته باشید و آن را به یک طرف خم کنید، به گونه‌ای که تمام محتویات تابلو منقبض می‌شود. در واقع، تابلو منقبض نمی‌شود. سرنشینان کشتی در داخل تابلو نیز هیچ نوع تغییری را در دنیای خود (محتوای تابلو) احساس نمی‌کنند. اما اگر ناظر تابلو را مایل مشاهده کند، سرنشینان کشتی نیز ناظر را مایل مشاهده خواهند کرد. به نظر سرنشینان کشتی ناظر منقبض شده است.





شکل ۳-۱۰. آیا انقباض فضا ناشی از خطای دید است؟ خطای دید چیزی است که می‌توان آن را با چشم دید یا با دوربین از آن عکس گرفت، اما همچون سراب نمی‌توان آن را، به هیچ طریقی لمس یا احساس کرد. تمام اجسامی که طول چیزی را در حال سکون می‌بینند یا احساس می‌کنند ویژه طول آن را اندازه می‌گیرند. تمام اجسامی که طول چیزی را در حال حرکت می‌بینند یا احساس می‌کنند، طول منقبض شده آن را اندازه می‌گیرند. آیا شما این موضوع را خطای دید می‌دانید؟ خود دانید!

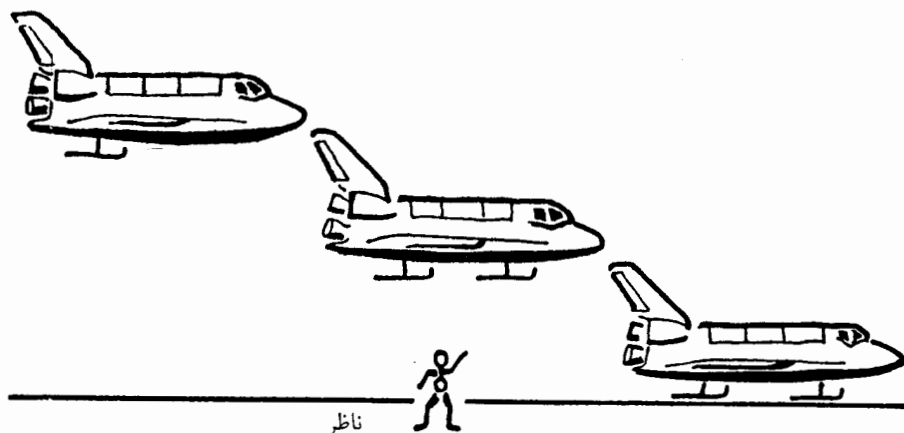


شکل ۳-۱۱. ناظر از طریق اندازه‌گیری متوجه می‌شود که کشتی در جهت حرکت منقبض شده و چگالی آن نیز افزایش یافته است. چرا؟ چون اتمهای تشکیل دهنده کشتی در یک حجم کوچکتر متراکم می‌شوند، وانگهی، همان طور که در فصل ۷ توضیح خواهیم داد، جرم هر اتم نیز افزایش می‌یابد.

خلاصه

برای اینکه ایده جدیدی را که در این فصل مطرح کردیم به صورت خلاصه توضیح بدهم در نظر بگیرید که شما در کنار یک باند فرودگاه ایستاده‌اید و شاهد فرود یک فضاپیماي پر سرعت هستید.

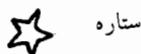
اگر خلبان هر دو چرخ فرود را همزمان پایین بیاورد، به نظر ناظر ابتدا چرخ عقبی پایین می‌آید. اگر ناظر احساس کند که هر دو چرخ همزمان با زمین تماس حاصل می‌کنند، به نظر خلبان چرخ جلو زودتر به زمین می‌رسد. اگر ناظر احساس کند که فضاپیما به صورت افقی فرود می‌آید، به نظر خلبان سر فضاپیما پایین است (و به همین دلیل احساس می‌کند که ابتدا چرخ جلو به زمین می‌رسد). تمامی این مشاهدات پیامد ناهمزمانی در زمان است. به نظر ناظر طول فضاپیما و به نظر خلبان طول میدان فرودگاه منقبض شده است. هر کدام ویژه طول خود را اندازه می‌گیرند. این امر نیز نتیجه غیرمستقیم ناهمزمانی در زمان است.



هر دو چرخ همزمان به زمین می‌رسند، بنابراین به نظر سرنشینان فضاپیما این دو رویداد نمی‌تواند همزمان باشد.

شکل ۳-۱۲. به نظر ناظر ابتدا چرخ عقب پایین می‌آید، درست به همان دلیل که به نظر او ابتدا سرنشینان کشتی عقب ناهار می‌خورند. این مشاهده هنگام فرود سرپایین فضاپیما کاملاً برعکس می‌شود: در این حالت ناظر می‌بیند که

پرسش



|||||

|||||



شکل ۳-۱۳

ناظر یک ستاره بسیار دور را مستقیماً بالای سر خودش مشاهده می‌کند. فرض کنید که ستاره می‌تپد، و تپهای نور به صورت یک جبهه تخت، مطابق شکل، بر روی یک باند فرودگاه پایین می‌آیند. اگر ناظر بر یک کشتی سوار شود و در امتداد باند فرودگاه به حرکت درآید مشاهده می‌کند که تپ نور:

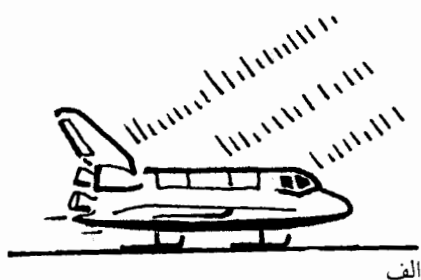
(الف) ابتدا با عقب کشتی برخورد می‌کند

(ب) ابتدا با جلو کشتی برخورد می‌کند

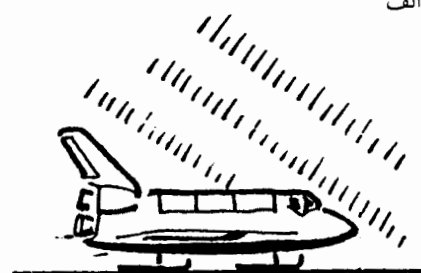
(ج) همزمان با جلو و عقب کشتی برخورد می‌کند

پاسخ

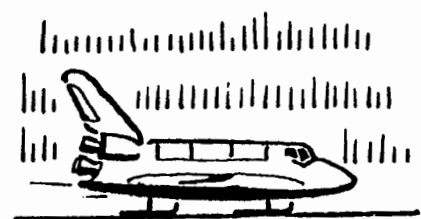
ب) پاسخ درست است. ناظر که در کنار باند ایستاده است مشاهده می‌کند که تپهای موج به صورت یک جبهه تخت به زمین می‌رسند. اما برای کسی که در داخل یک کشتی در امتداد باند حرکت می‌کند، اول قسمت جلو جبهه به زمین می‌رسد. بنابراین، جبهه باید کج شده باشد، درست مثل فرود سربازین فضاپیما که اندکی پیش توصیف شد. چون جبهه تپهای نور کج می‌شود، باید سرنشینان کشتی، به ظاهر، ستاره را مستقیماً بالای سر خود نبینند، بلکه به نظر آنها ستاره اندکی جلوتر باشد. عجیب است! نه؟ بارش باران را در نظر بگیرید. آیا اگر هنگام باریدن باران در حال دوچرخه سواری باشید باز هم قطرات باران مستقیماً روی سر شما پایین می‌آید؟



الف



ب



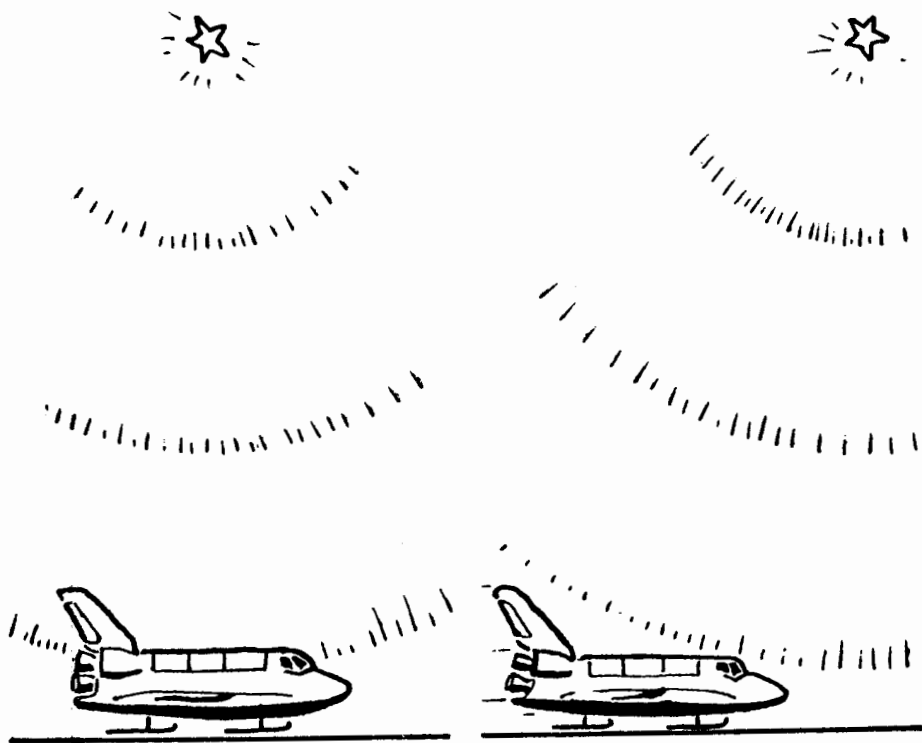
ج

این یک واقعیت محض است که اگر یک کشتی فضایی سرعتش را تغییر دهد یا جهت حرکتش را عوض کند، به نظر سرنشینان کشتی موقعیت همه ستارگان در فضا تغییر می‌کند. وقتی کشتی با سرعت خیلی زیاد در حرکت است، به ظاهر نور همه ستارگان از طرف جلو می‌آید، و آسمان در قسمت عقب کشتی تهی از ستاره می‌شود. هنگامی که دوچرخه با سرعت خیلی زیاد در حرکت است، به ظاهر تمامی قطرات باران از قسمت جلو می‌آید و قسمت عقب دوچرخه خشک خشک است.

در حالت خاص، همچنانکه کشتی زمین

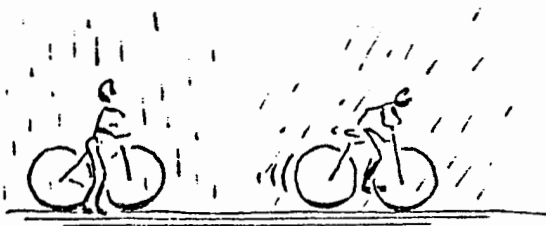
حول خورشید می چرخد، به نظر می رسد که تمامی ستارگان در دایره های کوچکی می چرخند. چقدر طول می کشد تا این ستارگان دایره ها را طی کنند؟ یکسال. برای دیدن این اثر، که به "ایرهای نور ستاره" معروف است، و در سال ۱۷۲۶، مدتها قبل از تولد پدر بزرگ اینشتین کشف شد، رصد دقیق با تلسکوپ لازم است.

ایرهای هیچ ارتباطی با اختلاف منظر ندارد. "اختلاف منظر"، که در سال ۱۸۳۶ کشف شد، به فاصله ستاره بستگی دارد ولی ایرهای برای تمامی ستارگان یکسان است.



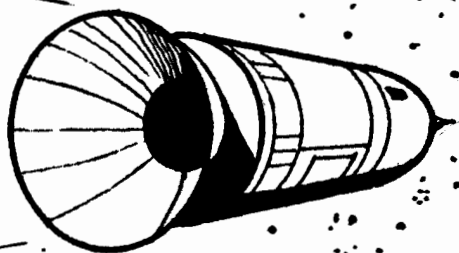
شکل ۳-۱۵

شکل ۳-۱۶



شکل ۳-۱۷. اگر در فضا به حالت سکون

شناور بمانیم، به نظر می‌رسد که ستارگان در سرتاسر آسمان پراکنده شده‌اند. اما همین ستارگان از داخل یک کشتی پرسرعت چنین به نظر نمی‌رسند. در این حالت، ستارگان در قسمتی از آسمان متراکم می‌شوند که ناظران داخل کشتی به طرف آن در حرکت‌اند. این تراکم ستارگان در ظاهر به یک خوشه کهکشانی غول‌پیکر می‌ماند. آیا ناظر با نگرستن به آسمان می‌تواند تشخیص بدهد که از طریق فضا در حال حرکت است؟ خیر. ناظر فقط می‌داند که نسبت به ستارگان در حرکت است. توجه کنید که فرض بر این است که فاصله ستارگان از کشتی فضایی فوق‌العاده زیاد است، بنابراین آنچه در اینجا توصیف شد هیچ ربطی به ستارگانی که کشتی از کنار آنها می‌گذرد ندارد.



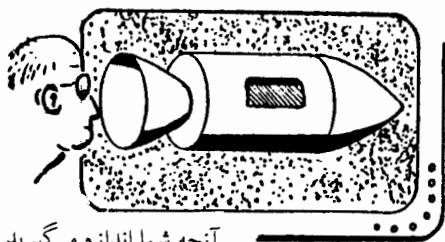
پرسش

فرض کنید در داخل یک کشتی فضایی هستید که طول آن به حدود دو کیلومتر می‌رسد. یک کشتی بیگانه از کنار شما می‌گذرد، و یا شما از کنار یک کشتی بیگانه رد می‌شوید (هیچ راهی برای تشخیص این دو امکان از همدیگر وجود ندارد). وقتی کشتی عبوری در کنار شماست، مشاهده می‌کنید که طول آن دقیقاً برابر طول کشتی شماست. یعنی طبق وقت شما، وقتی عقب کشتی بیگانه در کنار سر کشتی شماست، سر این کشتی در کنار قسمت عقب کشتی شما قرار دارد. آیا، با این حساب، طول دو کشتی با هم برابر است؟

(الف) بلی، طول دو کشتی با هم برابر است.
(ب) خیر، طول دو کشتی با هم برابر نیست

پاسخ

(ب) پاسخ درست است. با اینکه طبق اندازه‌گیری شما طول دو کشتی برابر است، اما در واقع چنین نیست، زیرا شما کشتی خود را در حالت سکون اندازه می‌گیرید (چون در داخل آن هستید) و کشتی بیگانه را در حال حرکت، و چیزی که در حال حرکت باشد منقبض می‌شود. در نتیجه، طول کشتی شما برابر حدود دو کیلومتر و طول کشتی بیگانه بیشتر از دو کیلومتر است. ویژه طول هر کشتی برابر است با مقداری که سرنشینان آن کشتی اندازه می‌گیرند.



آنچه شما اندازه می‌گیرید

شکل ۳-۱۸



مقداری که سرنشینان کشتی بیگانه اندازه می‌گیرند

شکل ۳-۱۹

پرسش

فرض کنید شما طول کشتی بیگانه در حال عبور را دقیقاً برابر طول کشتی خود اندازه می‌گیرید. سرنشینان کشتی بیگانه طول کشتی خود را چقدر می‌یابند؟

(الف) برابر طول کشتی شما

(ب) بلندتر از کشتی شما

(ج) کوتاهتر از کشتی شما

پاسخ

(ب) پاسخ درست است. اگر شما طول کشتی در حال حرکت را حدود دو کیلومتر اندازه بگیرید، معلوم می‌شود که ویژه طول آن بیشتر از دو کیلومتر است، و سرنشینان این ویژه طول را اندازه می‌گیرند. سرنشینان کشتی بیگانه کشتی شما را در حال حرکت می‌بینند. اگر شما طول کشتی خود را حدود دو کیلومتر بدانید طول آن به نظر سرنشینان کشتی دیگر که آن را در حال حرکت می‌بینند، کمتر از دو کیلومتر است.

اما اگر شما در زمانی که عقب کشتی بیگانه در کنار سر کشتی شماست، سر آن کشتی را اندازه بگیرید، آیا از نظر سرنشینان آن کشتی نیز این دو رویداد بر هم منطبق‌اند؟ نه. چرا؟ زیرا این دو رویداد مطابق وقت شما همزمان هستند. رویدادهایی که برای شما همزمان هستند برای کشتی بیگانه همزمان نیستند. ناهمزمانی زمان علت اصلی اثر انقباض طول است.

اگر در واقع، کشتی شما و کشتی بیگانه هم‌اندازه باشند، یعنی طول هر دو حدود دو کیلومتر باشد نتیجه مشاهدات چه خواهد بود؟ در آن صورت، وقتی از کنار هم رد می‌شوید هر یک طول کشتی دیگری را کمتر از دو کیلومتر اندازه می‌گیرد.

پرسش

باز هم فرض کنید که طول کشتی بیگانه را دقیقاً برابر طول کشتی خود اندازه می‌گیرید. شما، که در سر کشتی نشسته‌اید، زمان عبور از کنار کشتی بیگانه را اندازه می‌گیرید، و ناخدای کشتی بیگانه نیز، که در سر کشتی خود نشسته است، زمان عبور از کنار کشتی شما را اندازه می‌گیرد.

(الف) زمان عبور شما از کنار کشتی بیگانه برابر است با زمان عبور کشتی بیگانه از کنار شما

(ب) زمان عبور کشتی بیگانه از کنار شما بیشتر از زمان عبور شما از کنار کشتی بیگانه است

(ج) زمان عبور شما از کنار کشتی بیگانه بیشتر از زمان عبور کشتی بیگانه از کنار شماست

پاسخ

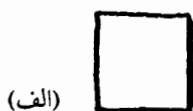
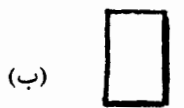
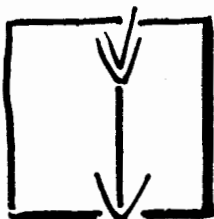
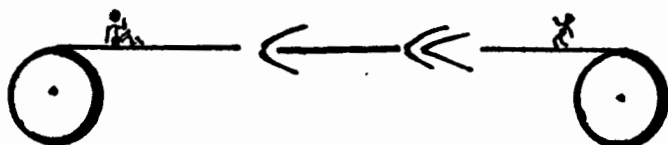
بنابراین زمان عبور شما از کنار کشتی بیگانه بیشتر از زمان عبور کشتی بیگانه از کنار شماست.

در فصل بعد این موضوع را به تفصیل بررسی خواهیم کرد. منتها در آنجا طول دو کشتی عبوری با هم برابر است، یعنی سرنشینان هر کشتی طول کشتی خود را حدود دو کیلومتر اندازه می گیرند.

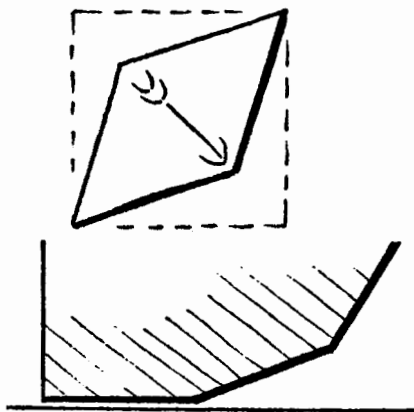
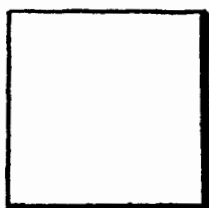
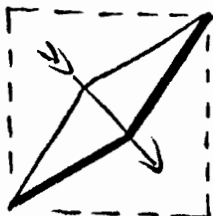
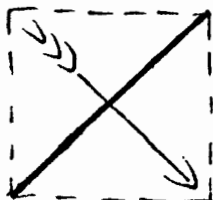
ج) پاسخ درست است. سرعت کشتی بیگانه نسبت به شما برابر است با سرعت شما نسبت به کشتی بیگانه و در جهت مخالف آن. اما ویژه طول کشتی بیگانه بیشتر از ویژه طول کشتی شماست و زمان عبور با ویژه طول متناسب است. از طرفی، طول کشتی بیگانه به نظر شما حدود دو کیلومتر و طول کشتی شما به نظر کشتی بیگانه کمتر از دو کیلومتر است.

پرسش

یک جعبه مکعب شکل، مطابق شکل، روی یک نوار نقاله می افتد. مکعب به نظر دو ناظر، که بر نقاله سوارند، چگونه می نماید؟



پاسخ



شکل ۳-۲۱

ه) پاسخ درست است. نوار به سمت چپ می‌رود، بنابراین، به نظر ناظران، جعبه ضمن سقوط به سمت راست می‌رود. برای سادگی، فرض کنید که سرعت جعبه به طرف راست برابر سرعت آن به سوی پایین است. مطابق شکل، جعبه ظاهراً با زاویه 45° درجه به سمت راست می‌رود. جعبه فقط و فقط در جهت حرکت منقبض می‌شود. توجه کنید که در این صورت ناظران باید ببینند که طرف چپ جعبه زودتر از طرف راست آن به نوار نقاله می‌رسد. به نظر ناظری که بر نقاله سوار نیست هر دو طرف جعبه همزمان به نقاله می‌رسند. انقباض همواره مستلزم ناهمزمانی در زمان است، و برعکس.

همچنین توجه کنید که به محض برخورد ته جعبه با نوار، ناظران یک "تغییر شکل" در آن مشاهده می‌کنند. قسمتی از جعبه که در طرف راست تغییر شکل است، هنوز به حرکت خود ادامه خواهد داد، اما قسمت طرف چپ از حرکت بازخواهد ایستاد. ناظری که بر نوار نقاله سوار نیست هیچ نوع تغییر شکلی را مشاهده نمی‌کند و به نظر او تمام قسمتهای ته جعبه با هم به نوار نقاله برخورد می‌کنند. اگرچه ممکن است جعبه صلب باشد، به نظر ناظران سوار بر نقاله چنین نیست.

هر چه سرعت اندازه‌گیری شده جعبه افزایش یابد، جعبه در جهت حرکت بیشتر تخت به نظر می‌رسد. در حالت حدی، وقتی سرعت جعبه به سرعت نور می‌رسد، تمامی

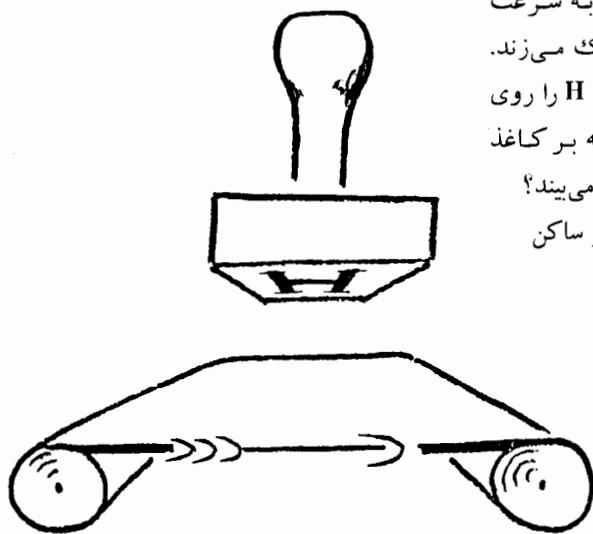
خطوط جعبه بر جهت حرکت آن عمود می‌شوند. نه تنها امواج نور، بلکه هر چیزی که ساختار خطی دارد و با سرعت نور حرکت می‌کند، باید ساختار خطی آن بر جهت حرکتش عمود باشد.

پرسش

یک مهر لاستیکی حرف H را به سرعت روی یک برگ کاغذ متحرک می‌زنند. بنابراین، ناظر کپی دقیق حرف H را روی کاغذ متحرک می‌بیند. ناظری که بر کاغذ متحرک سوار است آن را چگونه می‌بیند؟ (الف) به صورت H ، همانند ناظر ساکن

(ب) H

(ج) H



شکل ۳-۲۲

پاسخ

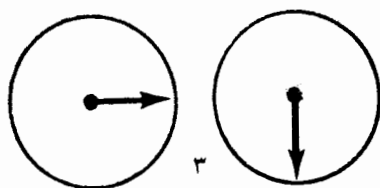
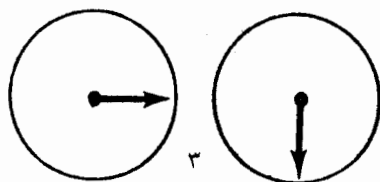
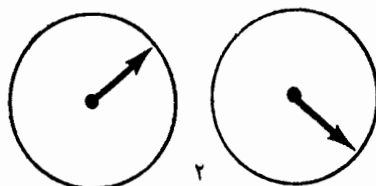
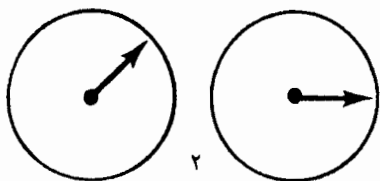
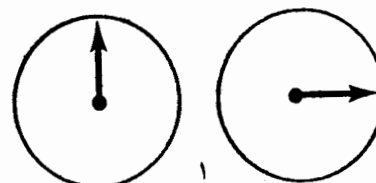
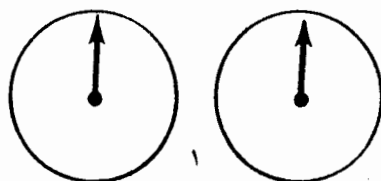
(ج) پاسخ درست است. H ی که ناظر ساکن می‌بیند در جهت حرکت منقبض شده است. بنابراین، H واقعی بر روی کاغذ باید بزرگتر باشد. اما چگونه یک H استاندارد بر روی مهر، یک H بزرگتر از خود را بر روی کاغذ می‌زند؟ پاسخ این پرسش این است که به نظر ناظر متحرک مهر به سمت چپ حرکت می‌کند و تمامی قسمتهای مهر همزمان روی کاغذ نمی‌خورد.

بازی با زمان

فرض کنید می‌توانید ترتیبی بدهید که ساعتها در مکانهای متفاوت زمانهای متفاوت نشان بدهند، مثلاً یکی از آنها یک ساعت عقبتر از دیگری باشد. همچنین فرض کنید که می‌توانید کسانی که از آنها استفاده می‌کنند را گول بزنید که این اختلاف ناشی از تنظیم غلط (یا ناهمزمانی) ساعتها نیست. به طرق مختلف می‌توانید آنها را گول بزنید. در این باره که چگونه کار شما می‌تواند مؤثر باشد بیندیشید.

شکل ۳-۲۳. این ساعتها همزمان نشده‌اند و میان

آنها یک اختلاف زمان سه‌ساعتی وجود دارد. مقدار اختلاف با زمان تغییر نمی‌کند.



شکل ۳-۲۴. این ساعتها با سرعتهای متفاوت کار می‌کنند. در ابتدا ممکن است هیچ اختلاف زمانی میان آنها وجود نداشته باشد، ولی به تدریج یکی از دیگری جلو می‌افتد و اختلاف زمانی آنها با گذشت زمان افزایش می‌یابد.

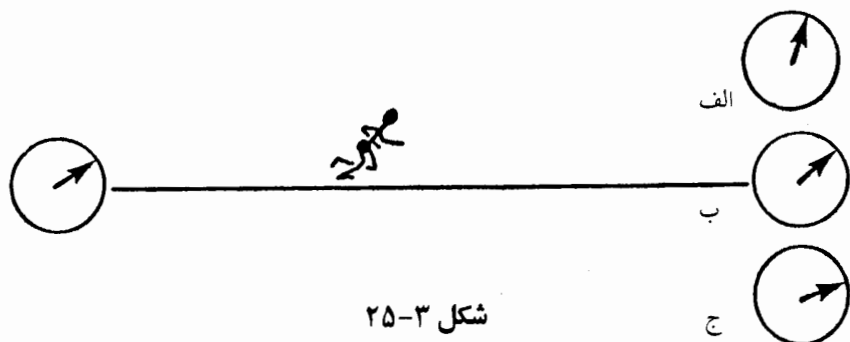
پرسش

برای اینکه در یک مسابقه دو، رکورد ورزشکار بهتر از آنچه هست باشد، باید ساعت پایانی مسابقه به صورت زیر تنظیم شود.

(الف) کمی عقبتر از ساعت آغازی

(ب) همزمان با ساعت آغازی

(ج) کمی جلوتر از ساعت آغازی



پاسخ

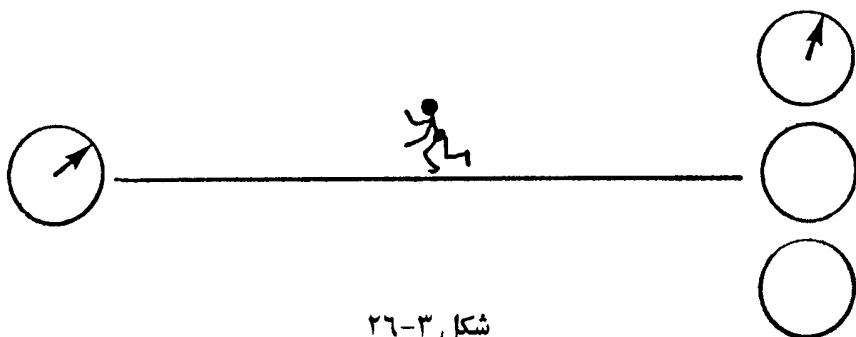
(الف) پاسخ درست است. ساعت الف عقبتر از ساعت واقع در شروع مسابقه است. بنابراین، نشان می‌دهد که دوندۀ در زمان کمتری طول مسیر مسابقه را پیموده است. راههای دیگر انجام این کار کند کردن ساعتها و یا کوتاه کردن فاصله است.

پرسش

اکنون دوندۀ سؤال قبل در جهت عکس می‌دود و ساعتها همچنان ناهمزمان‌اند. در این حالت رکورد این دوندۀ به ظاهر:

(الف) بهتر از واقع است

(ب) بدتر از واقع است

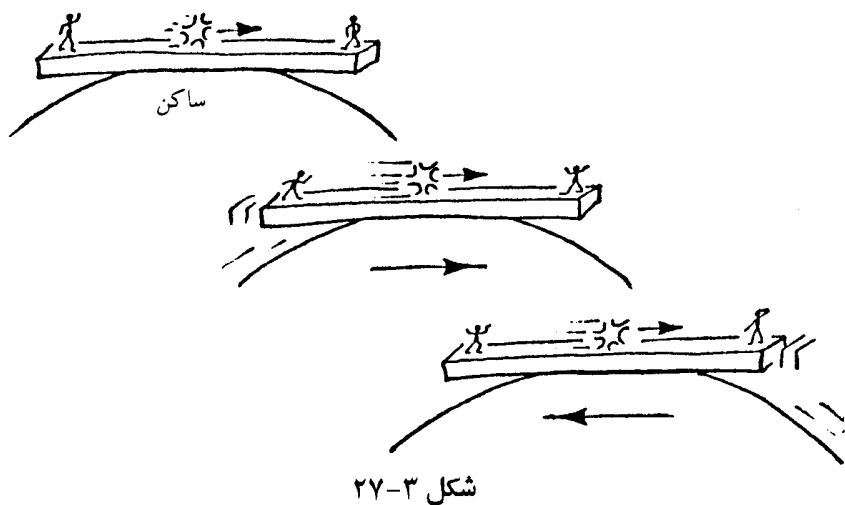


شکل ۳-۲۶

پاسخ

ب) پاسخ درست است. چون دونه در جهت عکس می‌دود، ساعت آغازی به ساعت پایانی تبدیل می‌شود. در این حالت، ساعت پایانی جلوتر از ساعت آغازی است و بنابراین زمان بیشتری را نشان می‌دهد. همزمان نکردن ساعتها در یک جهت به نفع دونه و در جهت عکس به ضرر اوست. اثر کند کردن حرکت ساعتها یا کوتاه کردن فاصله مسیر، در هر دو جهت یکسان است. با همزمان نکردن زمان به راحتی می‌توان سرعت اندازه‌گیری شده اشیا را تغییر داد. شما یک درختش نور را که در زمان معینی طول یک خط کش را طی می‌کند، اندازه می‌گیرید. اگر خط کش بر روی یک سیاره که هم جهت با درختش نور از کنار شما می‌گذرد نصب شده باشد، مدت زمان بیشتری طول می‌کشد تا درختش نور طول خط کش را طی کند. اگر سیاره در خلاف جهت درختش نور در حرکت باشد، درختش در مدت زمان کمتری طول خط کش را طی خواهد کرد.

آیا می‌توان ساعت‌های ساکنان سیاره را طوری ناهمزمان کرد که برای این دو مدت زمان مقدار یکسانی به دست آورند؟ چگونه؟ این کار با ناهمزمان کردن ساعتی که درختش نور را در ابتدای خط کش اندازه می‌گیرد نسبت به ساعتی که همین کار را در انتهای خط کش می‌کند انجام می‌شود. اما به خاطر داشته باشید که ساکنان سیاره متحرک فریب می‌خورند. تصور آنها بر این است که ساعتها در دو انتهای خط کش همزمان هستند. اما شما می‌دانید که ساعت واقع در انتهای خط کش روی سیاره متحرک، جلوتر از ساعت واقع در ابتدای همین خط کش است. مقداری که این ساعت جلوتر است به طول خط کش و سرعت سیاره متحرک بستگی دارد. ساکنان سیاره فریب می‌خورند. آنها بدون توجه به اینکه، مطابق اندازه‌گیری شما، چقدر طول می‌کشد تا درختش نور در دو جهت مخالف طول خط کش را طی کند، به کمک ساعت‌های ناهمزمان خود، همواره یک مقدار برای این دو مدت زمان به دست می‌آورند.



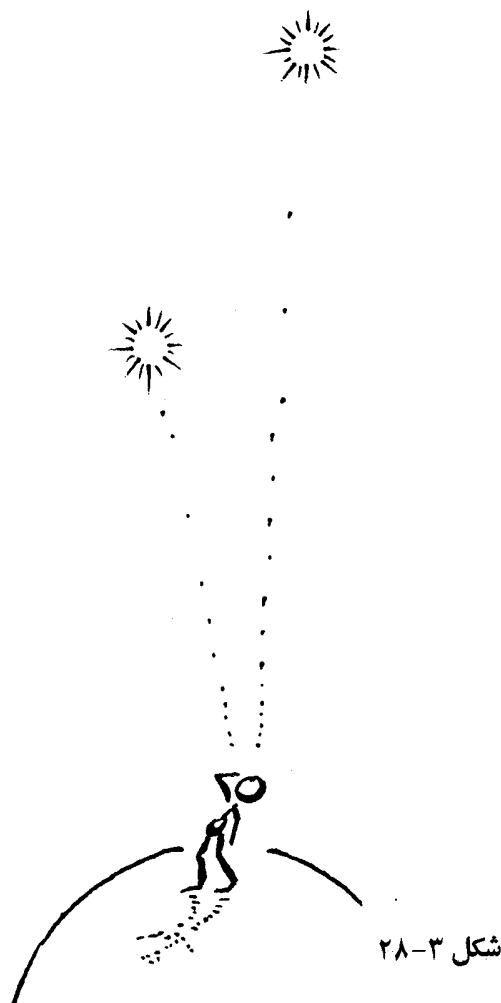
دیدن یا اندازه گرفتن

من اغلب از واژه‌های "ناظر اندازه می‌گیرد" یا "ناظر در حال حرکت اندازه می‌گیرد" استفاده کرده‌ام. اما چرا به جای "اندازه می‌گیرد" از "می‌بیند یا مشاهده می‌کند" استفاده نکرده‌ام؟ زیرا در این مورد "مشاهده می‌کند" غلط است.

به عنوان مثال، ممکن است شما دو ستاره را در پهنه آسمان خیلی نزدیک به هم ببینید، در حالی که آن دو ستاره اصلاً در فضا به هم نزدیک نباشند. یکی از این ستاره‌ها ممکن است در پشت دیگری قرار گرفته باشد، و در نتیجه ستاره ضعیف‌تر درخشان‌تر به نظر برسد.

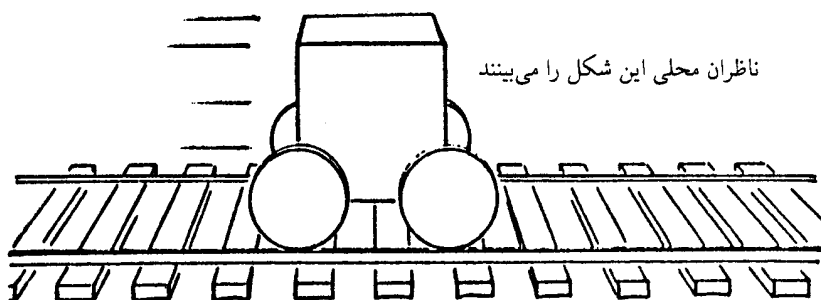
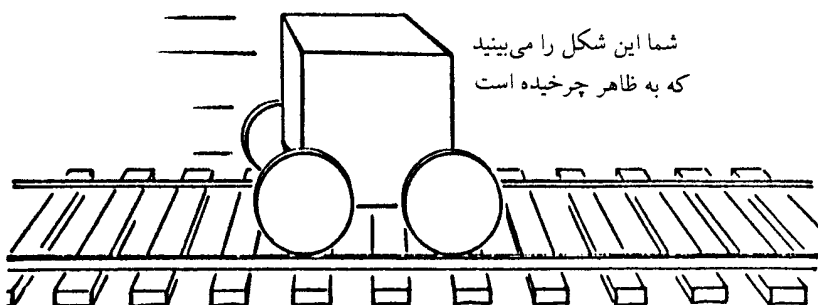
فرض کنید هر دو ستاره امشب منفجر شوند. ناظر همین امشب منفجر شدن آنها را نخواهد دید. چندین سال طول می‌کشد تا درخشهای نور حاصل از انفجار به زمین برسد. این درخشها همزمان به زمین نمی‌رسند، درخش ستاره نزدیک‌تر زودتر می‌رسد. بنابراین، با اینکه هر دو ستاره با هم منفجر می‌شوند، ناظر منفجر شدن آنها را همزمان نمی‌بیند. آیا این همان اصل مشهور ناهمزمانی زمان نسبیت نیست؟ مسلماً خیر. این نوع ناهمزمانی را سه قرن قبل از تولد اینشتین کاملاً شناخته بودند.

تأخیر زمانی درخش نور باعث می‌شود که ناظر انواع و اقسام چیزها را به غلط ببیند، بشنود، و یا انجام بدهد. به دلیل همین تأخیر زمانی، جنگ نیو اورلئان بعد از جنگ ۱۸۱۲ درمی‌گیرد! فرض کنید یک زوج ستاره (یا چرخ) در فضا پهلوی به پهلوی هم حرکت می‌کنند. ناظر ستاره



(یا چرخ) دورتر را دیرتر می‌بیند، و بنابراین در ظاهر از ستاره نزدیکتر عقب می‌افتد. به دلیل همین اثر، جعبه‌ای (یا سیارکی) که در فضا با سرعت حرکت می‌کند، به ظاهر چرخیده به نظر می‌رسد.

اگر یک تپ اختر از ناظر دور شود، تأخیر زمانی میان تپها افزایش می‌یابد. تأخیر زمانی هر تپ از تپ قبلی بیشتر می‌شود. بنابراین، فاصله زمانی میان تپها، در ظاهر خیلی بیشتر از آنچه در واقع هست، به نظر می‌رسد. اگر ستاره به سمت ناظر حرکت کند، این اثر معکوس می‌شود. اما نباید این اثر را با کندشدن زمان اینشتین اشتباه گرفت؛ کندشدن زمان اینشتین به تأخیر زمان سیگنال یا جهت حرکت بستگی ندارد.

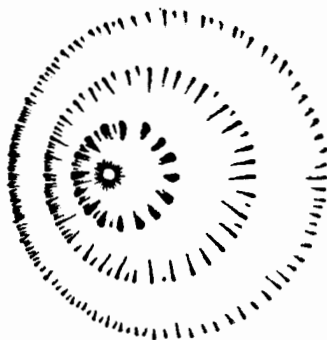


شکل ۳-۲۹

تأخیر زمانی ارسال سیگنال حتی به ناظر امکان می دهد که سرعت اجسام را سریعتر از سرعت نور ببیند! فرض کنید تفنگی که یکسال نوری از ناظر فاصله دارد مستقیماً به طرف او شلیک می شود. یکسال طول می کشد تا اولین نور حاصل از شلیک گلوله به ناظر برسد. اگر سرعت گلوله سه چهارم سرعت نور باشد، چهار سوم یکسال (یعنی یکسال و چهارماه) بعد از شلیک به ناظر اصابت می کند. بنابراین، فاصله زمانی میان اولین نور حاصل از شلیک گلوله و اصابت گلوله به ناظر چهار ماه است. ناظر در خلال این چهار ماه مشاهده می کند که گلوله یکسال نوری طی کرده است. در نتیجه به نظر ناظر سرعت گلوله سه برابر سرعت نور است.

همه اثرهای تأخیر زمانی ارسال سیگنال را می شناسند و آن را در نظر می گیرند. در اینجا نیز هیچ چیز جدیدی گفته نشده است. این اثرها را به دو طریق می توان حذف کرد: (۱) کم کردن زمان تأخیر از زمان ظاهری، و (۲) نزدیک شدن به رویداد به گونه ای که اثر تأخیر قابل چشم پوشی باشد. اگر ناظری به قدر کافی به برق آسمان نزدیک شود، رعد اینقدر به تأخیر نمی افتد.

گاهی یک رویداد دو مکان را شامل می‌شود، مثل خط شروع و خط پایان مسابقه. در این صورت، چگونه ناظر می‌تواند به قدر کافی به هر دو خط نزدیک شود؟ طبیعی است که نمی‌تواند. بنابراین، ناظر باید گروهی را که به ناظران محلی معروف‌اند به کمک بطلبد. هر کدام از این ناظران محلی به قدری به رویداد مربوط به خود نزدیک‌اند که زمان تأخیر حذف می‌شود. در پایان تمامی افراد گروه یادداشتهای خود را برای ناظر می‌فرستند و او از روی آنها رویداد واقعی را استنتاج می‌کند. ناظر اندازه‌گیریهای خود را از روی مجموعه یادداشتهای انجام می‌دهد. به جای واژه‌های "ناظر می‌بیند" باید از واژه‌های "ناظران محلی می‌بینند" استفاده شود. همه ناظران، در حالی که ممکن است در فضا پراکنده شوند، باید با هم حرکت کنند؛ در غیر این صورت در مورد سرعت اجسام در حال عبور هرگز با هم توافق نخواهند کرد. من به این دلیل به جای "می‌بیند" از "اندازه می‌گیرد" استفاده کردم که حاوی اطلاعات بیشتری در مورد رویدادهای دور است. به نظر من، "ناظر اندازه می‌گیرد" معادل است با "ناظران محلی می‌بینند".



شکل ۳-۳۰. حشره‌ای را در نظر بگیرید که بر سطح آب حرکت و امواج کوچکی تولید می‌کند. این امواج به صورت دایره منتشر می‌شوند. بزرگترین دایره موجی است که از لحاظ زمانی فرصت بیشتری برای انتشار داشته است. مرکز این دایره جایی است که حشره برای اولین بار شروع به حرکت می‌کند. آیا می‌توانید از روی شکل بگویید که حشره به کدام سمت حرکت کرده است؟ می‌توانید در این شکل به جای حشره یک ستاره و به جای موجکها امواج نور را در نظر بگیرید.

بدون اندازه گیری هیچ چیز معنا ندارد

۴

اندازه گیری نتایج

دو نوع سرعت

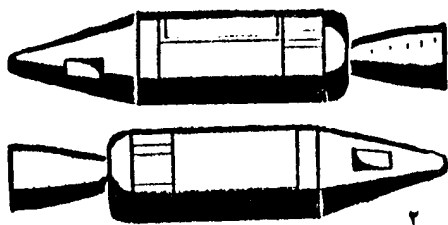
وقتی در نحوه عملکرد زمان تغییر ایجاد شود، بسیاری از انتظارات متعارف و معمولی نیز باید تغییر کنند. در واقع جعبه پاندورا اکنون باز است، و افکار شما در مورد نحوه عملکرد جهان تغییر کرده است.

فرض کنید دو کشتی مشابه از کنار هم رد می شوند و شما می خواهید سرعتی که این دو کشتی با آن از کنار هم می گذرند (سرعتی نسبی آنها) را به دست آورید. دو راه برای انجام این کار وجود دارد: (الف) سوار شدن بر قسمت جلو یک کشتی و مشاهده اینکه چقدر طول می کشد تا این کشتی از کنار کشتی دیگر (یعنی، از قسمت جلو تا قسمت عقب آن) بگذرد، (ب) مشاهده اینکه چقدر طول می کشد تا سر کشتی دیگر از ابتدا تا انتهای کشتی شما را طی کند. توجه کنید که این روش

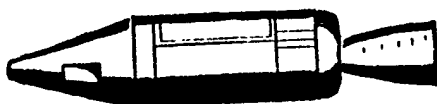
مستلزم این است که شما ناظرانی در قسمت جلو و قسمت عقب کشتی خود داشته باشید. این دو راه باید به نتیجه یکسانی منجر شوند؛ اما در واقع، چنین نیست. اگر شما روی ایده های فعلی خود در مورد فضا و زمان خط بطلان بکشید، مشاهده خواهید کرد که این دو راه به یک نتیجه نمی رسند.

زمان اندازه گیری شده در روش (الف) کوتاهتر از زمان اندازه گیری شده در روش (ب) است. چرا؟ زیرا کشتی در حال عبور، آن طور که شما اندازه گیری می کنید، منقبض شده است. بنابراین، شما با افزایش سرعت خود، به دو دلیل، سریعتر از کنار کشتی دیگر رد می شوید. اول اینکه سریعتر حرکت می کنید و دوم اینکه چیزهایی که شما از کنار آنها رد می شوید کوتاهترند.

زمانی که طول می کشد تا سر کشتی در حال عبور از سر به ته کشتی شما برود نیز کوتاهتر می شود، اما تنها به این دلیل که سر



۲



۱

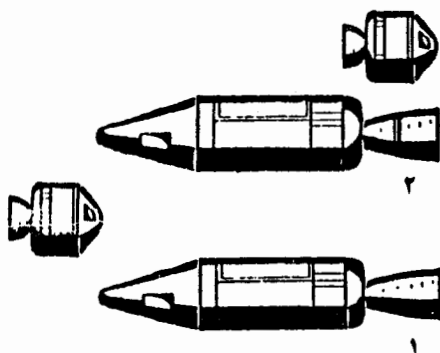


شکل ۱-۴. مطابق ایده‌های رسمی سابق زمان و مکان، شما انتظار دارید که سرکشتی شما درست در همان زمانی به ته کشتی دیگر برسد که سر کشتی دیگر به ته کشتی شما، بدون توجه به اندازه‌گیری زمان و نحوه اندازه‌گیری آن، و تنها مشروط بر اینکه دو کشتی ویژه طول مساوی داشته باشند. توجه: توالی زمانی در این شکل، همانند فیلمها از پایین به بالاست.

سریعتر عبور می‌کند. در روش (ب) طول کشتی در حال عبور تأثیری ندارد.

اکنون به نکته اصلی مسئله می‌رسیم. کسی که بر روی سرکشتی در حال عبور نشسته است می‌خواهد ببیند چقدر طول می‌کشد تا از کنار کشتی شما بگذرد. این زمان چقدر باید باشد؟ آیا همان زمانی است که طول می‌کشد تا سر کشتی شما از طول کشتی او رد شود؟ یا زمانی است که طول می‌کشد تا سرکشتی او طول کشتی شما را پشت سر بگذارد؟

این یک پرسش راحت نیست. نکته کلیدی در پاسخ این است که فرد غریبه باید با همان دقتی طول کشتی خود را اندازه بگیرد که شما طول کشتی او را اندازه می‌گیرید. هیچکدام نباید نظر خاص داشته باشید؛ نظر هر دو باید یکسان باشد. این اساس اصل نسبیت است. بنابراین، پاسخ باید (الف) باشد نه (ب).



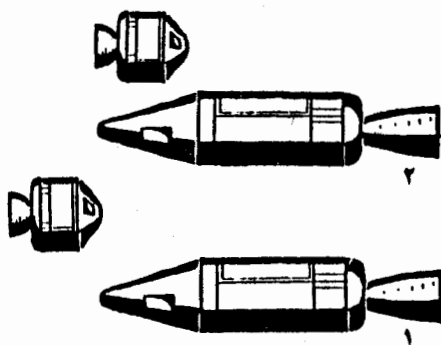
روش (ب)

شکل ۴-۳. اگر شما و کسی که در ته کشتی شما نشسته است زمانی را که طول می کشد تا سر کشتی دیگر طول کشتی شما را طی کند، اندازه بگیرید مقدار به دست آمده تحت تأثیر انقباض طول کشتی در حال عبور قرار نمی گیرد. آیا سرنشین کشتی دیگر، با استفاده از ساعت خود، همین مقدار را به دست می آورد؟

عملکرد زمان پذیریم.

باید این طور باشد که شما ساعت روی دست غریبه را کُند اندازه گیری کنید. ضریب کند شدن این ساعت باید دقیقاً برابر ضریب انقباض کشتی، آن طور که شما اندازه گیری می کنید، باشد.

این گفته به این معنی است که اگر شما در مسیری در حال دویدن باشید و کرونومتری را



روش (الف)

شکل ۴-۲. چون شما طول کشتی دیگر را در حالی که منقبض شده است اندازه می گیرید، زمانی که طول می کشد تا سر کشتی شما طول کشتی دیگر را طی کند از زمانی که بر اساس مفاهیم قدیم زمان و فضا محاسبه می شد، کوتاهتر است. سر کشتی دیگر چطور؟ چقدر طول می کشد تا کسی که بر روی سر کشتی دیگر نشسته است و از روی ساعت خودش زمان را محاسبه می کند، طول کشتی شما را طی کند؟ این پرسش ظاهراً اصل نسبیت را در تضاد با شعور متعارف قرار می دهد.

اما این گفته به این معنی است که زمانی که سرنشین کشتی دیگر برای عبور کشتی خود از کنار کشتی شما به دست می آورد کوتاهتر از زمانی است که شما و کسی که در ته کشتی شما نشسته است برای طی همین مسافت توسط کشتی او محاسبه می کنید. چگونه چنین چیزی ممکن است؟ چنین چیزی در صورتی ممکن است که تغییر اساسی دیگری را در نحوه



با خود ببرید، مدت زمانی که محاسبه خواهید کرد بهتر از حالتی است که کرومتر را جابگذارید، زیرا سرعت دویدن شما باعث کندشدن کرومتر می‌شود. سرعت شما را، هنگامی که کرومتر را همراه خود می‌برید، ویژه سرعت می‌گویند. اگر ساعت را در منزل جابگذارید، و زمان دویدن را از روی آن تعیین کنید، سرعت شما را سرعت مختصاتی می‌گویند.

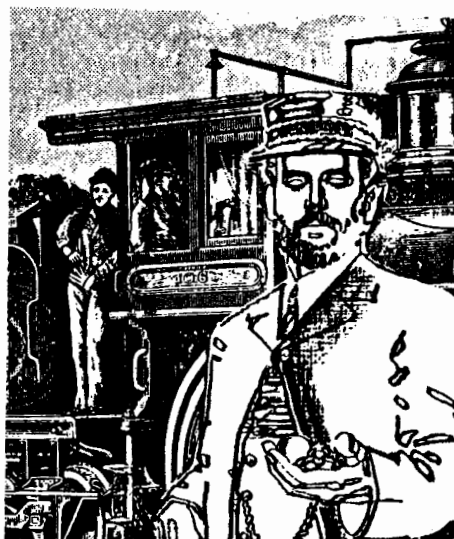
مهندس قطاری که زمان عبور قطار میان تابلوهای کیلومترشمار را با ساعت جیبی خود اندازه می‌گیرد در واقع ویژه سرعت قطار را اندازه می‌گیرد. اندازه گیرهای سرعت نور همواره سرعت مختصاتی نور را به دست می‌دهند، زیرا وسیله اندازه گیری زمان را نمی‌توان همراه نور فرستاد. بعد از مطالعه فصل بعد از خود پرسید که اگر می‌توانستیم ویژه سرعت نور را اندازه بگیریم، مقدار آن چقدر بود.

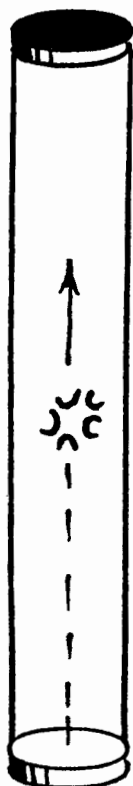
علت ناهمزمانی زمان و انقباض فضا مستقیماً مجسم شد. اکنون نشان خواهیم داد که تجسم اینکه چرا ساعت‌های متحرک ظاهراً کندکار می‌کنند راحت تر است.

کندشدن زمان

برای درک علت مستقیم کندشدن زمان، باید سازوکار یک ساعت را در نظر بگیریم. در همه ساعت‌ها یک چیزی حرکت تکراری دارد: آونگ، چرخ دنگ، رقاصک، بلورهای

شکل ۴-۴. کارکنان لوکوموتیو، با اندازه گیری سرعت قطار از روی فاصله میان کیلومترشمارها به وسیله ساعت‌های جیبی خود، ویژه سرعت قطار را اندازه می‌گیرند. اگر مدت زمانی که قطار مسافت معینی را طی می‌کرد به کمک ساعت مسئول ایستگاه اندازه گیری می‌شد سرعت مختصاتی قطار به دست می‌آمد.





شکل ۴-۵. ساعت نوری ساکن

میان دو بازجهش طی می‌کند اندازه می‌گیرند، و چون سرعت نور نمی‌تواند افزایش یابد، بنابراین باید مدت زمانی بیشتر از یک ثانیه به دست آورند. بنابراین، به نظر آنها ساعت نوری کند کار می‌کند.

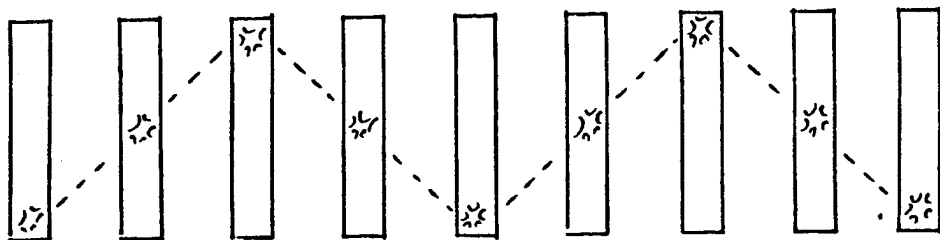
اکنون این پرسش مطرح است که آیا به صرف اینکه یک ساعت فرضی کند کار کند چگونه می‌توان نتیجه گرفت که خود زمان کند شده است؟ می‌توان گفت که اگر همه

مرتعش کوارتز، یا دیاپازون. اما در این مبحث، چیز تکراری نور است. فرض کنید نور عامل تکرار شونده است.

ساعت را یک لوله خالی بلند که در هر انستهای آن یک آینه نصب شده است در نظر بگیرید. یک درخش نور در داخل این لوله به دام می‌افتد و برای همیشه به عقب و جلو بازمی‌جهد. فرض کنید هر بازجهش تا بازجهش بعدی یک ثانیه طول بکشد. طول لوله باید ۳۰۰۰۰۰ کیلومتر و ضریب بازتاب آینه‌ها ۱۰۰٪ باشد. در این صورت، ساعت نوری نمی‌تواند یک چیز واقعی باشد؛ بلکه یک تجربه ذهنی است، و تجربه ذهنی هم نیازمند تجهیزات مفهومی است.

ساعت نوری توسط کسانی که در کنار آن سوار بر کشتی فضایی عبور می‌کنند، چگونه به نظر می‌رسد؟ سرشنیان کشتی، ساعت نوری را، در حالی که از کنار کشتی آنها به طرف عقب می‌رود، اندازه خواهند گرفت. در عین حال، درخش نور به دام افتاده در یک مسیر قطری بالا و پایین می‌رود.

اما فاصله میان بازجهیدنها، آن طور که در امتداد مسیر قطری اندازه گیری می‌شود، بیشتر از زمانی است که این فاصله صرفاً در امتداد مسیر مستقیم بالا و پایین اندازه گیری شود. وقتی درخش نور در مسیر مستقیم بالا و پایین می‌رود، یک ثانیه طول می‌کشد تا فاصله میان دو آینه را طی کند، زیرا ساعت بر همین اساس ساخته شده است. چون سرشنیان کشتی فضایی درخش نور را در حالی که مسیر طولانی‌تری را



شکل ۴-۶. ساعت نوری متحرک. با افزایش

سرعت ساعت، باید آهنگ ارتعاش عامل ارتعاش کننده کند شود، و وقتی سرعت ساعت به سرعت نور رسید از ارتعاش بازایستد. در غیر این صورت، اگر ساعت با سرعت نور در حرکت باشد و در عین حال عامل ارتعاش کننده هنوز ارتعاش کند، سرعت کل آن در فضا از سرعت نور بیشتر می شود، که ناممکن است.

می کند. اما به نظر شما کشتی آنها در فضا در حال حرکت است. بنابراین، هر چیزی که در مورد ساعت های شما صادق باشد، در مورد ساعت های آنها نیز صادق است. شما دقیقاً همان مقدار زمان آنها را کند اندازه گیری می کنید که به نظر آنها زمان شما کند شده است.

در واقع، این کاملاً عجیب است. قبل از هر چیز از این بابت عجیب است که زمان باید کند اندازه گیری شود. اما، با قبول آن، به نظر می رسد که اگر من ساعت شما را کند مشاهده کنم، شما قاعدتاً باید ساعت من را تند

ساعتها کند کار کنند، در واقع زمان کند شده است. اما انواع مختلف ساعتها وجود دارد. در واقع تمامی این ساعتها کند کاری کنند و مقدار کند شدن آنها دقیقاً برابر مقداری است که ساعت نوری کند می شود. به عنوان مثال، قلب را در نظر بگیرید. فرض کنید که شما بر روی ساعت نوری نشسته اید و با هر بازجهش درخش نور قلب شما یک بار می تپد. حتی ساعت نوری می تواند ضربان ساز قلب شما باشد. سرنشینان کشتی فضایی که در مجاورت ساعت نوری در حرکت اند نیز باید با هر بار بازجهش درخش نور یک تپش قلب را مشاهده کنند. بنابراین، این سرنشینان نیز باید آهنگ تپش قلب شما را دقیقاً برابر با آهنگ کار ساعت نوری کندتر اندازه گیری کنند. شما ویژه سرعت تپش قلب خود، کار ساعت نوری، و در واقع تمامی ساعت هایی که با خود دارید را اندازه می گیرید، بدون توجه به مقداری که سرنشینان کشتی فضایی به دست می آورند.

دلیل اینکه سرنشینان کشتی فضایی زمان شما را کند اندازه گیری می کنند این است که به نظر آنها، ساعت نوری شما در فضا حرکت

هیچ راهی وجود ندارد که در آن بتوان تصور کرد فوتونی که با سرعت نور حرکت می کند در مدت یک ثانیه از P به D می رود. در این صورت، فوتون پس از یک ثانیه کجاست؟ پاسخ این پرسش را می توان به صورت زیر استنتاج کرد: اول اینکه فوتون باید یک جایی در داخل ساعت، یعنی در فاصله میان D و Q باشد^۱. دوم اینکه فوتون همواره با سرعت نور حرکت می کند، و بعد از یک ثانیه فاصله آن از P باید متناظر با فاصله PA باشد. دایره ای به شعاع PA و به مرکز P رسم کنید. بعد از یک ثانیه فوتون باید جایی روی این دایره باشد. محل تقاطع دایره و خط DQ هر دو شرط بالا را برآورده می کند. فوتون، یک ثانیه پس از ترک P باید در آن نقطه، یعنی در B باشد (شکل ۴-۸).

اگر ساعت در مدت یک ثانیه از P به C برود، سرعت آن برابر سرعت نور خواهد بود. فوتون باید تمامی سرعت خود را به کار بگیرد تا بتواند همراه با ساعت حرکت کند. بنابراین، فوتون هیچگونه سرعتی برای حرکت به طرف بالا ندارد و فقط از P به C می رود. در این صورت، پس از گذشت یک ثانیه فوتون درست در ته ساعت نوری است و ساعت به نظر شما حرکت نمی کند.

۱. وقتی ساعت در حال حرکت است، چرا فوتون درست با کنار لوله ساعت برخورد نمی کند؟ چون فوتون خبر ندارد که ساعت حرکت می کند.

اندازه گیری کنید (نه کند). درست مثل اینکه اگر شما به کوتوله تبدیل شوید، من به صورت غول درمی آیم. اما، این نتیجه گیری همواره درست نیست. فرض کنید من از شما دور می شوم. هرچه فاصله من از شما بیشتر شود شما کوچکتر به نظر من می رسید (کوتوله). اما شما مرا به صورت کوتوله دیده می شوم. طراحان این موضوع را با نمای سه بعدی (پرسپکتیو) توضیح می دهند. همان طور که در فصل ۵ خواهیم دید، اثر زمان را نیز می توان با تبدیل زمان به یک بعد و در نظر گرفتن نمای چهار بعدی تبیین کرد.

سرعت سنج کیهانی

ساعت نوری نشان می دهد که شما باید زمان جسم متحرک را کند اندازه بگیرید، و همچنین شما به کمک آن می توانید مقدار کند شدن را دقیقاً تجسم کنید.

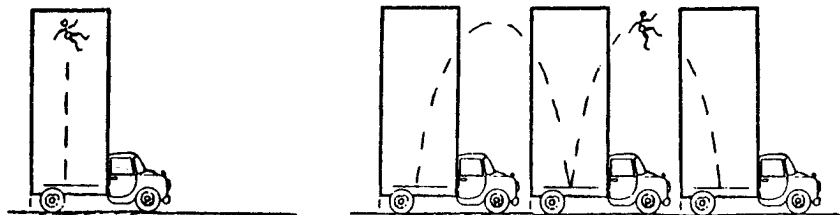
فرض کنید فوتونی در یک ساعت نوری ساکن در مدت یک ثانیه از P به A می رود. اکنون به جای اینکه شما از کنار ساعت نوری عبور کنید، فرض کنید ساعت نوری از کنار شما رد می شود (که نتیجه باید یکسان باشد). ساعت، در مدت یک ثانیه از P به Q می رود. ممکن است این تصور پیش بیاید که در این صورت نیز فوتون در مدت یک ثانیه از ته ساعت نوری به سر آن، یعنی از P به Q می رود. اما فاصله PD از PA طولانیتر است.

آیا فوتون می‌داند که ساعت نوری در حرکت است؟

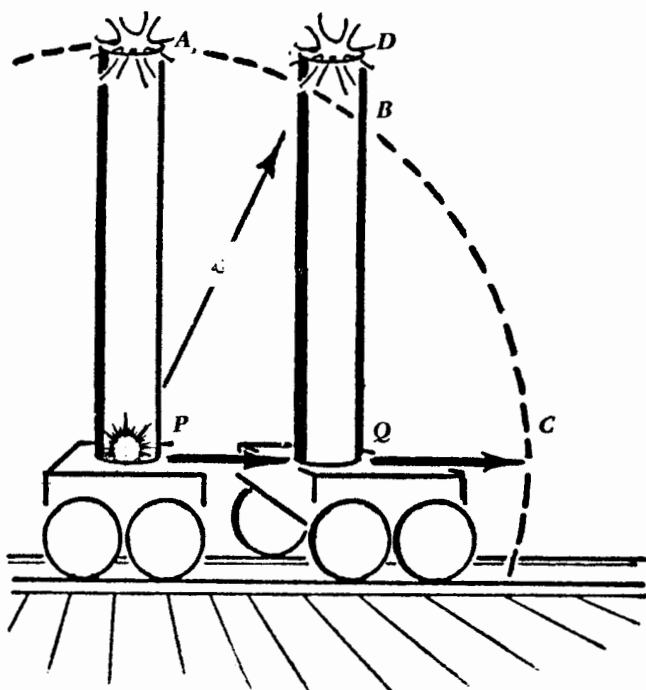
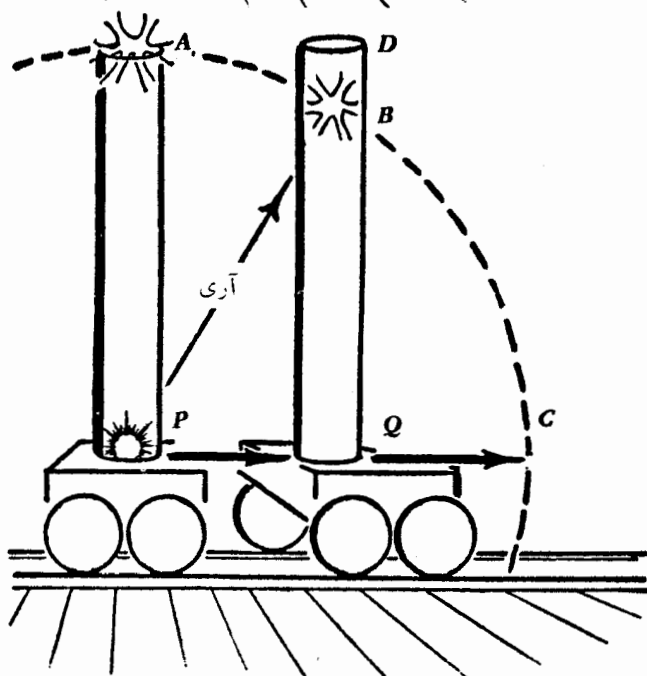
حرکت فوتون در داخل ساعت نوری، شبیه به حرکات یک ژیمناست در داخل یک کامیون در حال حرکت است، به‌جز اینکه سرعت فوتون هنگام بازتاب از آینه ناگهان معکوس می‌شود، ولی سرعت ژیمناست تحت تأثیر جاذبه گرانشی به تدریج کند می‌شود، به صفر می‌رسد و سپس معکوس می‌شود. اما، و نکته اصلی هم در همین "اما" است، اگر کامیون با سرعت یکنواخت، بدون تغییر سرعت یا شتاب حرکت کند، یعنی بدون توقف، بدون تکان، بدون دور زدن به حرکت خود ادامه بدهد، در این صورت، حرکت کامیون هیچ تأثیری بر ژیمناست نخواهد داشت.

اگرچه به نظر شما ژیمناست، ضمن جهش به بالا و پایین، به طرف کنار حرکت می‌کند، اما به نظر خود او و راننده کامیون فقط در امتداد قائم به بالا و پایین می‌جهد (شکل ۴-۷). بنابراین، سرعت ژیمناست، آن طور که شما اندازه می‌گیرید، اندکی سریعتر از مقداری است که راننده کامیون برای وی به دست می‌آورد. به نظر ژیمناست کامیون ساکن است. وانگهی، سکوی پرتاب ژیمناستیکی که بر روی زمین نصب شده است، اگر از خورشید اندازه‌گیری شود، به دلیل حرکت زمین از طریق فضا، در حال حرکت است. با وجود این، اگرچه سرعت حرکت زمین در فضا از سرعت جهش ژیمناست بیشتر است، اما ژیمناست اصلاً نگران آن نیست و، به دلیل اینکه هیچ اثری بر حرکات او ندارد، حتی از آن بی‌خبر است. فوتون نیز از حرکت ساعت نوری اطلاعی ندارد.

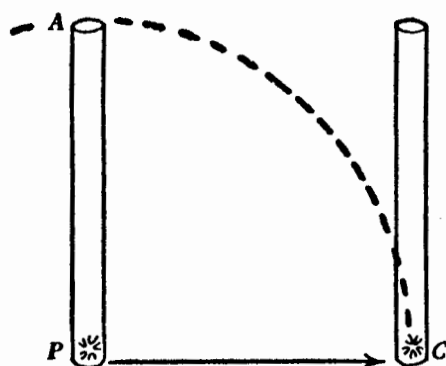
در واقع، این همان نظریه قدیمی نسبیت است؛ نظر گالیله در مورد نسبیت فضا: هرکس، بدون توجه به اینکه با چه وسیله‌ای حرکت کند، تا زمانی که شتاب نگیرد، خود را در فضا ثابت احساس می‌کند. متوجه خواهید شد که نظریه جدید نسبیت، در واقع، همین نظریه قدیمی نسبیت فضا است که نظریه نسبیت زمان به آن افزوده شده است.



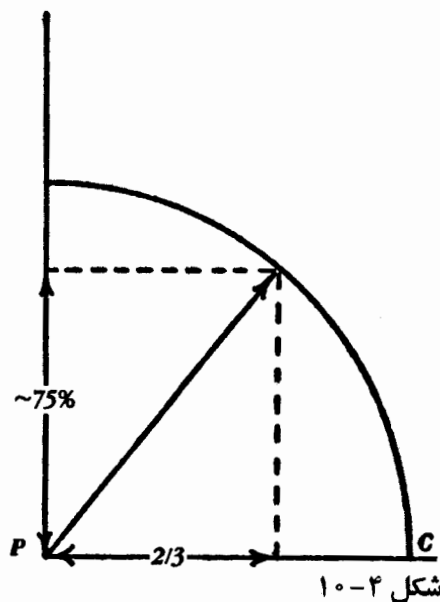
شکل ۴-۷



شکل ۴-۸



شکل ۴-۹. ساعت نوری با سرعت نور در حرکت است



شکل ۴-۱۰

اما فراموش نکنید که کسی که با ساعت حرکت می‌کند آهنگ کار آن را معمولی می‌بیند و در عوض به نظر او آهنگ کار ساعت شما $\frac{3}{4}$ آهنگ معمولی آن است

اما Q در نیمه‌راه بین P و C است، و بنابراین ساعت که در مدت یک ثانیه از P به Q می‌رود با سرعت نصف نور در حرکت است. با اندازه‌گیری از روی شکل متوجه خواهید شد که فوتون در B تقریباً در فاصله $\frac{5}{6}$ از بالای ساعت قرار دارد. در این صورت، اگرچه به نظر شما یک ثانیه گذشته است، ساعت متحرک فقط $\frac{5}{6}$ ثانیه را پشت سر گذاشته است. سرانجام فوتون به بالای ساعت متحرک می‌رسد، و آنگاه یک ثانیه بر ساعت گذشته است. اندازه‌گیری شما سرعت ساعت را نصف سرعت نور نشان می‌دهد، زیرا در حالی که ساعت ساکن شما گذشت ۶۰ ثانیه را نشان می‌دهد، ساعت متحرک تقریباً ۵۰ ثانیه را پشت سر گذاشته است. این اثر نسبی، حتی در سرعت نصف سرعت نور، خیلی محسوس نیست؛ بنابراین تعجبی ندارد که تا قرن بیستم کسی متوجه آن نشده است.

اکنون هر پرسشی در مورد ساعت را می‌توانیم حل کنیم. یک سرعت‌سنج کیهانی را که صرفاً یک ربع دایره است رسم کنید. اگر، به عنوان مثال، ساعت با دوسوم سرعت نور حرکت کند، $\frac{2}{3}$ را روی محور پایین مشخص و به کمک آن محل سر عقربه سرعت‌سنج را در بالا روی محور عمودی، مطابق شکل ۴-۱۰، پیدا کنید. در این صورت سر عقربه تقریباً در ۷۵ درصد شعاع دایره قرار می‌گیرد. این گفته به این معنی است که آهنگ کار ساعتی که با $\frac{2}{3}$ سرعت نور در حرکت است، برابر ۷۵ درصد یا $\frac{3}{4}$ آهنگ کار آن در حالت سکون است.

اثر و کسی که در واقع حرکت می کند

شما به راحتی درک می کنید که عبور شما از کنار یک جسم با عبور جسم از کنار شما تفاوتی نمی کند. گالیله نیز این نکته را درک می کرد (اگرچه، نه به راحتی شما). اما درک آن برای اینشتین و مردم هم عصر او راحت نبود. چرا؟ زیرا آنها در عصر اثر^۱ زندگی می کردند.

اثر یک ماده مرموز صلب و شاره ای بود که تمامی فضای خالی را پرمی کرد. صلب به اندازه ای که بتواند امواج عرضی نور را منتقل کند، درست همان طور که زمین امواج عرضی زمین لرزه را منتقل می کند، و شاره ای تاحدی که سیارات بتوانند از داخل آن حرکت کنند.

به نظر دانشمندان آن نسل، اگر نور یک موج در داخل اثر باشد، و ساعت نوری در داخل اثر حرکت کند، این موضوع بر نحوه حرکت موج نسبت به ساعت اثر می گذارد. بنابراین، اینکه شما در حرکت باشید یا ساعت تفاوت می کند.

اینشتین تمامی ایده های اثر را از مغزش خارج کرد و به نظریات گالیله برگشت. کار راحتی نبود. بر طبق نظریه گالیله، هرکس که همراه با ساعت نوری حرکت کند، هیچگونه تغییری در کار آن مشاهده نمی کند، و اگر ساعت نسبت به کسی در حرکت باشد، این حرکت یا تأثیری در کار ساعت ندارد، و یا تأثیر آن بر ناظر و ساعت یکسان است.

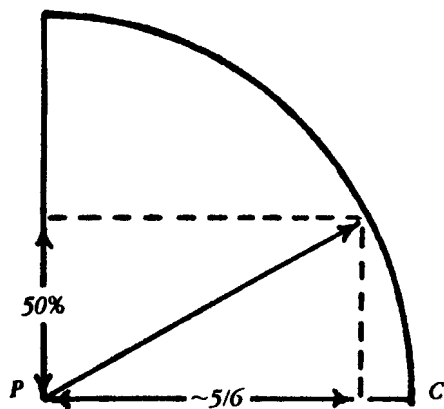
۱. $\alpha\theta\eta\rho = \text{AETHER}$ از کلمه یونانی $\alpha\theta\epsilon\omega$ به معنی چیزی شبیه به "من می سوزانم" یا "من در حرکت ابدی هستم".

نسبت به خارج قرار دارد از حرکت آن باخبر شود. اما اگر کسی در داخل ساعت منزوی نسبت به خارج از حرکت آن باخبر بشود، حکم گالیله نقض می شود، و این ناممکن است.

پوش

سرعت یک ساعت چقدر باشد تا آهنگ کار آن ۵۰٪ کاهش یابد؟ یعنی ساعت با نصف سرعت کار کند.

سرعت سنج کیهانی نشان می دهد که چگونه هرچه سرعت حرکت ساعتی زیادتر شود کندتر کار می کند و سرانجام وقتی سرعت آن به سرعت نور رسید، از حرکت بازمی ایستد. اگر سرعت حرکت ساعتی بیشتر از سرعت نور باشد چه اتفاقی می افتد؟ ساعت نمی تواند سریعتر از نور حرکت کند. چرا؟ زیرا از درخش نور پیشی می گیرد. در این صورت، درخش نور از داخل لوله ساعت نوری خارج می شود. این رویداد باعث می شود که کسی که در داخل ساعت منزوی



شکل ۴-۱۱

پاسخ

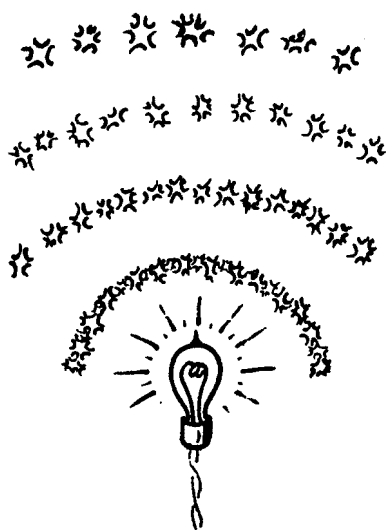
نوک عقربه سرعت سنج کیهانی را جایی قرار دهید که تصویر آن در وسط فاصله (قائم) لوله ساعت قرار گیرد. سپس تصویر آن را بر روی محور افقی پیدا کنید. از روی شکل متوجه خواهید شد که تقریباً در $\frac{5}{6}$ این فاصله قرار داد. برای اینکه آهنگ کار ساعتی نصف شود، سرعت آن باید $\frac{5}{6}$ سرعت نور باشد. اکنون می توانید نسبت را احساس کنید.

امواج نوری

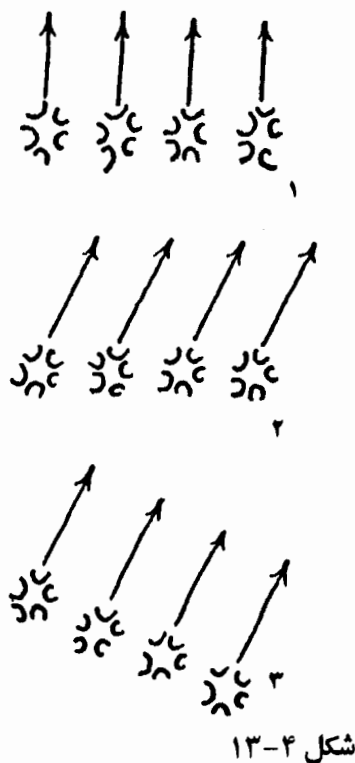
تاکنون، مطابق قدیمترین و ساده ترین مفهوم نور، ذرات منفرد نور را که فوتون نامیده می شوند مطرح کرده ایم. هر درخش نور

باید جبهه ای متشکل از یک گروه از این ذرات باشد. در نظریه موجی نور این گروه های ذرات را امواج می نامند.

برای سهولت، فرض کنید یک ردیف فوتون در این گروه یا موج وجود دارد. همان طور که در شکل ۴-۱۳ نمودار ۱ دیده می شود این فوتونها به طرف بالا حرکت می کنند. اما برای کسی که به طرف چپ در حرکت باشد جهت حرکت فوتونها چگونه به نظر می رسد؟ به نظر این شخص، فوتونها به طرف بالا و کمی متمایل به راست حرکت می کنند. اما چگونه؟ آیا، آن طور که در نمودار ۲ دیده می شود، فوتونها به صورت مایل به طرف راست می روند، یا آن طور که نمودار ۳ نشان می دهد، مستقیماً به طرف راست حرکت می کنند؟



شکل ۴-۱۲. همان طور که یک خط پیوسته به صورت توالی نقاط به نظر می رسد، نور پیوسته را نیز می توان یک توالی درخش نور در نظر گرفت



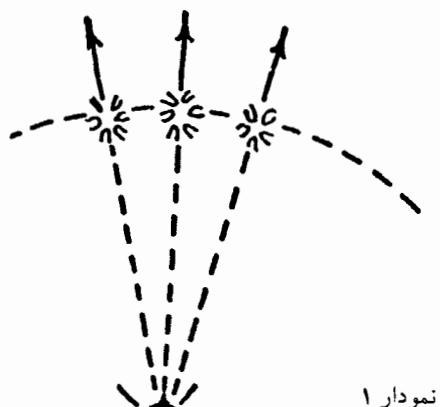
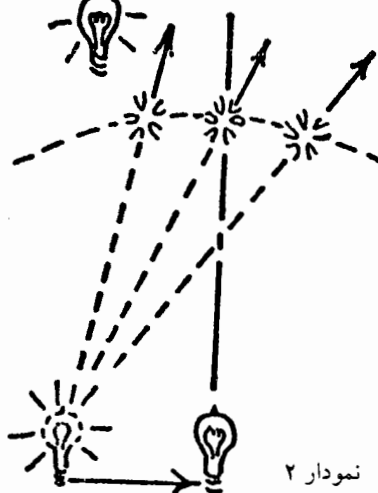
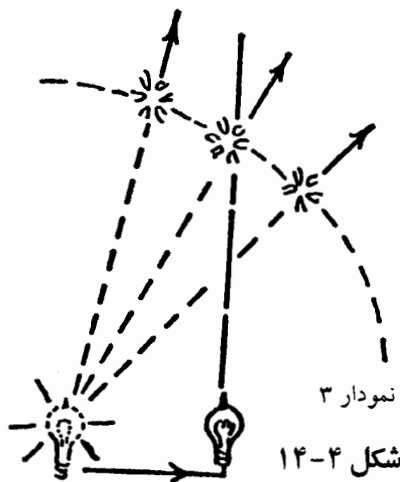
پاسخ باید نمودار ۳ باشد، زیرا موج نوری نمی‌تواند به صورت مایل حرکت کند. چرا؟ چون تمامی فوتونها از لامپ گسیل می‌شوند. به عبارت دیگر، تمامی فوتونها باید روی محیط دایره‌ای به مرکز لامپ باشند. نمودار ۳ این شرط را برآورده می‌کند، نه نمودار ۲. در واقع، در نمودار ۲ هر فوتون سرعت متفاوتی دارد، زیرا مسافت متفاوتی را از محل درخش طی کرده است، که ناممکن است.

درباره فضای میان فوتونها چه می‌توان گفت؟ همچنان که ردیف فوتونها کج می‌شود، آیا فضای میان آنها منبسط می‌شود؟ منقبض می‌شود؟ یا ثابت باقی می‌ماند؟ این فضا ثابت باقی می‌ماند، زیرا اجسام فقط و فقط در جهت حرکت خود منقبض می‌شوند. مسافت میان این فوتونها عمود بر جهت حرکت آنهاست. فاصله عمودی اندازه‌گیری شده میان اجسام همواره ویژه فاصله میان آنهاست.

زمان همزمان نشده

می‌کند. اما اگر ساعت نسبت به شخص در حرکت باشد، این موج، آن طور که در نمودار ۲ دیده می‌شود، اندکی کج می‌شود. بنابراین، یک طرف موج زودتر از طرف دیگر به بالای ساعت می‌رسد! این دقیقاً همان ناهمزمانی است که قبلاً بحث شد. ناهمزمانی در این قطر کوچک از خود ساعت نوری مشاهده می‌شود.

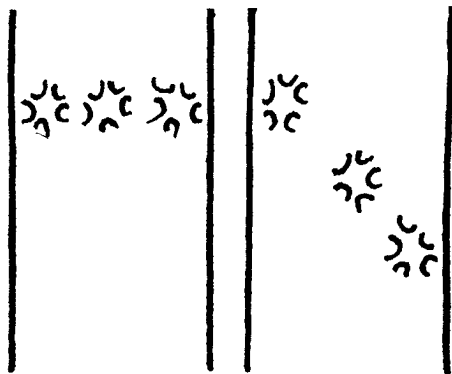
اکنون این مفاهیم را در مورد ساعت نوری به کار می‌بریم. از پایین به طرف بالای ساعت نوری یک فوتون در حرکت نیست، بلکه گروهی از فوتونها که تشکیل یک موج می‌دهند حرکت می‌کنند. کسی که نسبت به ساعت در حال سکون است، یعنی با آن حرکت می‌کند، همواره ویژه سرعت موج را اندازه می‌گیرد؛ به عبارت دیگر، به نظر این شخص موج عمود بر محور ساعت حرکت



شکل ۴-۱۴

اما این همه داستان نیست. اگر موج در ساعت ساکن نسبت به ناظر، همزمان از یک دیوار به دیوار دیگر می‌رسد، در ساعت متحرک نیز باید چنین باشد. اما در صورتی که موج کج بشود، چگونه چنین اتفاقی می‌افتد؟ با کش آمدن موج؟ خیر. می‌دانیم که فضای میان فوتونها تغییر نمی‌کند. تنها راه برای اینکه موج، همزمان به طرف دیگر برسد این است که خود ساعت در جهت حرکت منقبض شود، قبلاً درباره انقباض صحبت کردیم.

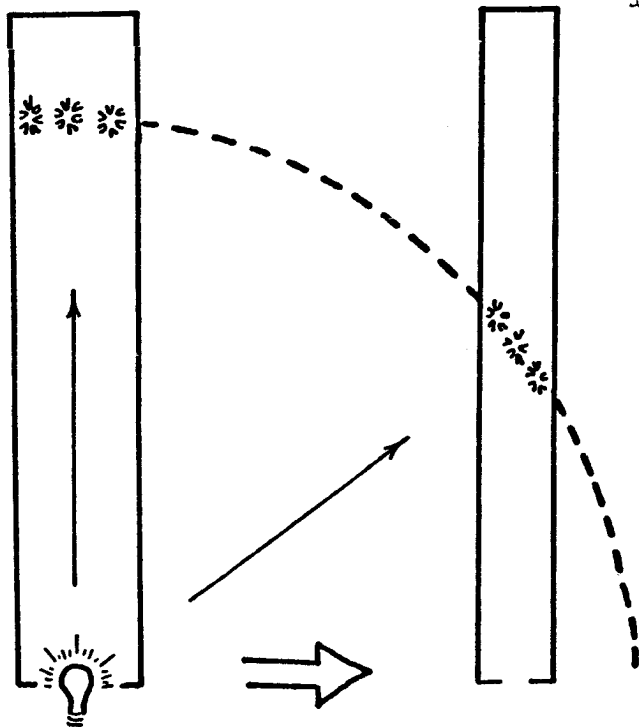
اکنون شما یک وسیله خیلی خوب در اختیار دارید. رسم دقیق نمودار ساعت نوری نه تنها میزان کندشدن زمان در یک سرعت معین، بلکه همچنین میزان ناهمزمان شدن زمان، و میزان منقبض شدن اجسام را نیز نشان می‌دهد.



شکل ۴-۱۵. این نمودار نشان می‌دهد که

ردیف کج شده فوتونها کش آمده است، اما

ردیف فوتونها نمی‌تواند کش بیاید



شکل ۴-۱۶. ساعت نوری باید به گونه‌ای

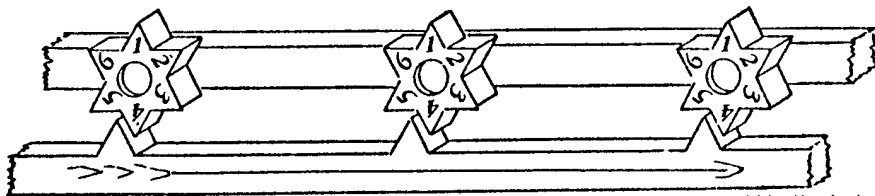
منقبض شود که ردیف فوتونها بتوانند همزمان، و

بدون کش آمدن، به طرف دیگر برسند

اجتماع ساعتها

اگر بتوان ساعتی اختراع کرد که تمامی فضا را پر کند آن گاه بهتر می توان رابطه میان فضا و زمان را فهمید. بدون یک چنین ساعتی، به ناچار باید به تعداد زیادی ساعت که در نقاط مختلف فضا پراکنده هستند و همه یک زمان را نشان می دهند اکتفا کنیم. چگونه می توان این ساعت های پراکنده و گوناگون را همزمان کرد.

فرض کنید ساعتها چرخهای دندانه دار شش دندانه باشند و هر دندانه نشاندهنده یک ساعت باشد. (اگر به نظر شما ساعت به اصطلاح شش ساعته عجیب است، کمی صبر کنید تا مقررات متریک شما را مجبور کند در یک روز ۱۰ ساعته زندگی کنید.) این چرخهای دندانه دار به فاصله های مساوی بر روی یک میله بلند ساکن نصب شده اند. چرخها توسط زائده هایی که آنها نیز در فاصله های مساوی قرار دارند، به طور متناوب به اندازه یک ششم دور می چرخند (شکل ۴-۱۷). زائده ها به فاصله مساوی روی میله دیگری نصب شده اند که به صورت یکنواخت و پیوسته به طرف راست حرکت می کند.



شکل ۴-۱۷

هنگام ساختن این سازوکار، زائده ها را به چه فاصله ای باید از هم قرار داد؟ ممکن است فوراً پاسخ بدهید: "فاصله میان زائده ها باید برابر فاصله میان چرخهای دندانه دار باشد." اما فراموش نکنید که زائده ها و میله ای که به آن وصل هستند به طرف راست در حرکت اند و معلوم شد که اجسام متحرک (همین طور فضای میان آنها) در جهت حرکت منقبض می شوند. از این رو، اگر شما بخواهید فضای میان زائده ها با فضای میان ساعتها جور در بیاید، بهتر است فضای میان زائده ها را بلندتر از فضای میان ساعتها بگیرید. به این ترتیب، وقتی میله حامل زائده ها بر اثر حرکت منقبض می شود، فضای میان زائده ها برابر با فضای میان ساعتها می شود.

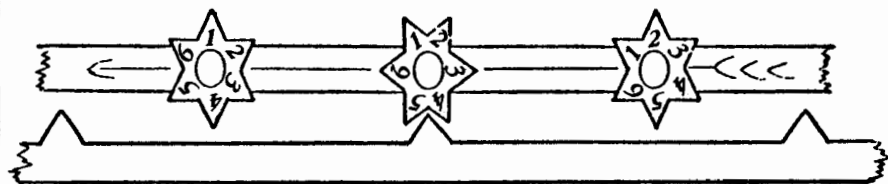
اکنون ببینیم این سازوکار به نظر کسانی (شاید مورچه هایی) که روی میله حامل زائده ها نشسته اند چگونه می آید. میله نسبت به آنها ساکن است، اما چرخهای دندانه دار (ساعتها) و میله ای که ساعتها روی آن نصب شده اند در حرکت اند. سرعت این میله و ساعتها روی آن به طرف چپ برابر سرعت میله حامل زائده ها به طرف راست است. اما نکته جالب همینجاست.



شکل ۲-۱۸

چون میله حامل زائده‌ها نسبت به کسانی که روی آن نشسته‌اند ساکن است، فضای میان زائده‌ها به نظر آنها ویژه فضا است، که بلندتر از ویژه فضای میان ساعت‌هاست. وانگهی، فضای میان ساعت‌ها، چون نسبت به ناظران همراه با زائده‌ها به طرف چپ در حرکت‌اند، منقبض شده به نظر می‌رسد. این ناظران به هیچ طریقی نمی‌توانند فضای میان زائده‌ها را بر فضای میان ساعت‌ها منطبق کنند. بنابراین، ساعت‌ها به نظر آنها ناهمزمان‌اند، و این همان ساعت‌هایی است که ما قبلاً طوری آنها را نصب کردیم که همزمان بچرخند. این مثال تکرار چیزهایی است که شما از پیش می‌دانید.

چیز دیگری که شما از پیش می‌دانستید نیز مطرح می‌شود. ناظران نه تنها ساعت‌های متحرک را ناهمزمان اندازه می‌گیرند، بلکه به نظر آنها این ساعت‌ها کند کار می‌کنند. درک این موضوع راحت است. برای اینکه یک ساعت بخصوص، از ساعت ۱ تا ساعت ۲ پیش برود، باید مسافتی برابر با فضای میان زائده‌ها را طی کند. سرعت ساعت‌ها در فضای میان زائده‌ها، مطابق اندازه‌گیری آن ناظران، برابر است با سرعت زائده‌ها در فاصله میان ساعت‌ها، بر طبق اندازه‌گیری شما. اما فضای میان زائده‌ها، مطابق اندازه‌گیری آن ناظران (ویژه فضا) بیشتر از مقداری است که شما برای این فضا اندازه می‌گیرید. بنابراین، زمانی که طول می‌کشد تا یک ساعت از یک زائده به زائده بعدی برود، طبق اندازه‌گیری آنها، بیشتر از زمانی است که شما برای آن ساعت اندازه‌گیری می‌کنید. این گفته به این معنی است که وقتی یک ساعت متحرک به نظر می‌رسد، زمانی که طول می‌کشد تا از ساعت ۱ به ساعت ۲ برود بیشتر از زمانی است که یک ساعت ساکن طی می‌کند.



شکل ۲-۱۹

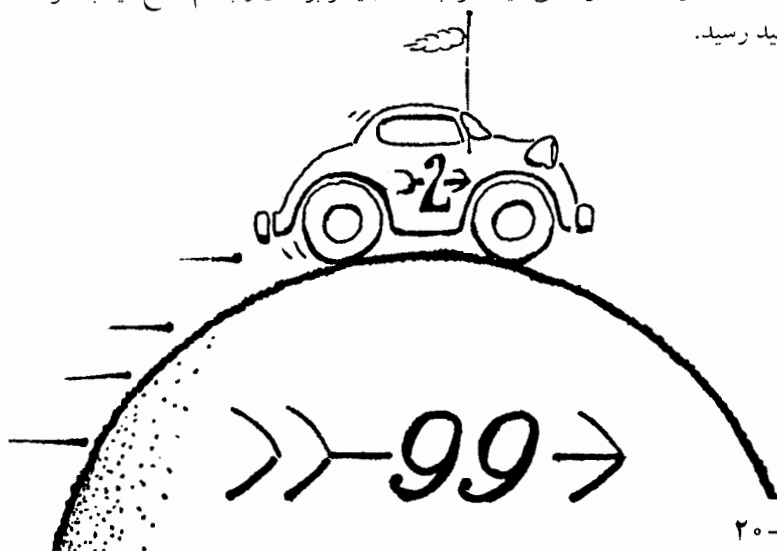
رکورد شکنی

فرض کنید سرعت نور ۱۰۰ کیلومتر بر ساعت است. و سیاره‌ای با سرعت ۹۹ کیلومتر بر ساعت در فضا حرکت می‌کند. فرض کنید یک اتومبیل کهنه روی این سیاره با سرعت فقط ۲ کیلومتر بر ساعت حرکت می‌کند. سرعت کل این اتومبیل در فضا ۱۰۱ کیلومتر بر ساعت خواهد بود، که در نتیجه رکورد سرعت نور را می‌شکند.

چرا یک چنین رویدادی ناممکن است؟ آیا چیزی باعث می‌شود که اتومبیل نتواند با سرعت ۲ کیلومتر بر ساعت حرکت کند؟ به نظر ناظران روی آن سیاره، سیاره در حال سکون است. و همه چیز نسبت به سیاره در حال سکون حرکت می‌کند. بنابراین اتومبیل کهنه هم می‌تواند با آن سرعت حرکت کند.

اما چه کسانی ۲ کیلومتر بر ساعت را اندازه‌گیری می‌کنند؟ ناظران روی سیاره. سیاره با سرعت ۹۹٪ نور در حرکت است، بنابراین ۲ کیلومتر آنها به نظر شما ۲ سانتیمتر است. و چه کسانی زمان را اندازه‌گیری می‌گیرند؟ ناظران روی سیاره. اما ساعت آنها کند است و آن یک ساعت ممکن است یک سال طول بکشد.

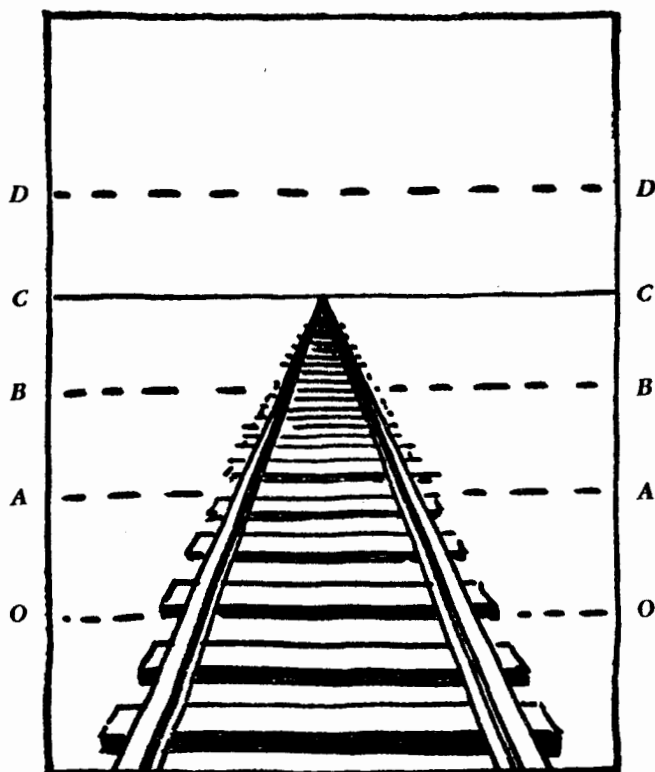
در این صورت آن ناظران فکر می‌کنند که سرعت اتومبیل ۲ کیلومتر بر ساعت است و شما آن را فقط ۲ سانتیمتر اندازه‌گیری می‌کنید. هر چه ۲ سانتیمتر بر سال را با هم جمع کنید به سرعت نور نخواهید رسید.



شکل ۲-۲۰

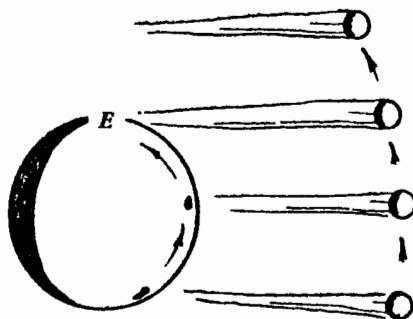
۱. به جای تبدیل به سیستم متریک، در صورت لزوم، سرعت نور را به سیستمی تبدیل کنید که عددی چون ۱۰۰ یا میلیون به دست بیاید.

درست مثل این است که روی یک ریل بینهایت طولانی قدم بزنید. از خط OO شروع کنید و به طرف AA راه بیفتید. می توانید تا BB هم پیش بروید. در واقع هیچ چیز مانع شما نیست. می توانید تا ابد روی این ریل راه بروید. اما، سرعت شما هرچه باشد، هرگز به DD نخواهید رسید. بنابراین، آیا چیزی در دنیا می تواند سریعتر از نور حرکت کند؟ نه. اجسام مادی نمی توانند سریعتر از نور حرکت کنند، اما بسیاری چیزهای دیگر می توانند!



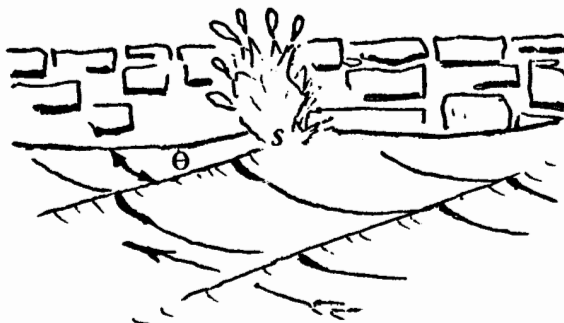
شکل ۴-۲۱. سرعت نور باید حد در نظر گرفته شود، درست همان طور که واژه حد در حساب دیفرانسیل و انتگرال سال اول دانشگاه به کار می رود. یعنی شما می توانید تا آنجا که ممکن است به آن نزدیک شوید، به شرط آن که به آن نرسید. اگر شما موقعیتهایی را در نظر بگیرید که در آنها اجسام مادی به حد می رسند، دنبال همان در دسری می گردید که دانشجویان سال اول ریاضی با قرار دادن مقدار حد در معادله دنبال آن هستند. برای آن که چیزی بتواند در فضا با سرعت نور حرکت کند، باید به نور تبدیل شود. حتی به نظر بعضی فیزیکدانان معروف، سرعت نور ممکن است حد واقعی نباشد. یعنی، حتی نور هم ممکن است با "سرعت نور" حرکت نکند.

بلی در واقع خیلی چیزها می‌توانند سریعتر از نور حرکت کنند. به عنوان مثال، سرعت سایه ماه بر روی زمین وقتی در E از کنار زمین می‌گذرد، بینهایت سریع است. سرعت لکه نور نورافکن بر روی یک ابر کاملاً بلند، اگر نورافکن به اطراف چرخانده شود، ممکن است از سرعت نور پیشی بگیرد. وقتی یک موج با دیوار سد برخورد می‌کند، اگر زاویه θ به اندازه کافی کوچک باشد، سرعت آب هنگام پایین رفتن از دیوار از سرعت نور بیشتر می‌شود. اگر θ صفر باشد، سرعت پایین رفتن از دیوار بینهایت است. و سرانجام، پیچ خوردگی در جعبه‌ای که با تسمه نقاله برخورد می‌کند، آن طور که توسط ناظران دیده می‌شود، با سرعتی بیشتر از سرعت نور در امتداد ته جعبه حرکت می‌کند.



شکل ۴-۲۲

اما فراموش نکنید که هیچ جسم مادی از سرعت نور پیشی نمی‌گیرد. ذرات نور (یا تاریکی) که لکه نور (یا سایه) درست می‌کنند، از هر لحظه به لحظه دیگر همان ذرات لحظه قبل نیستند. همین طور، ذرات در داخل آب پاشیده شده، یا ذرات ته جعبه سریعتر از نور حرکت نمی‌کنند.



شکل ۴-۲۳

یک فکر غلط در فیزیک وجود دارد که بنا به آن واقعیت نهایی عبارت است از قواعد ریاضی یا معادله. در واقع، واقعیت نهایی یک داستان کوچک یا افسانه است. برای اثبات این قضیه، من یک چیز موهوم را برای نظریه نسبیت خاص در نظر می‌گیرم که در نهایت به واقعیت می‌پیوندد.

۵

افسانه

چرا؟

کاملاً قانع و راضی نخواهد شد. ادامه کنجکاوی و طرح سؤالهای مختلف معمولاً به پاسخ زیر می‌رسد: "هیچ راهی برای توضیح اینکه چه چیزی فضا را منقبض می‌کند وجود ندارد" و همین طور تا به آخر. همه آنچه معلوم است عبارت است از: (۱) سرعت مشاهده شده نور ثابت است و (۲) حکم گالیله را نمی‌توان نقض کرد. اینها واقعتهای تجربی هستند. انقباض فضا و مانند آن نتیجه منطقی واقعتهای تجربی هستند. وانگهی، از دانش قبلی در مورد فضا و زمان نمی‌توان استدلال کرد که چیزهای عجیبی چون انقباض فضا روی خواهد داد، زیرا اگر چنین چیزی امکان داشت، انسانهای توانایی چون نیوتون یا گاوس می‌توانستند به این نتیجه برسند.

در فصلهای پیش، من نظریه نسبیت خاص را، آن طور که توسط اینشتین در مقاله معروفش، یک سال قبل از زلزله و آتش‌سوزی در سان‌فرانسیسکو، به جهانیان معرفی شد مطرح کردم. بنابراین، این کتاب می‌توانست در همینجا پایان یابد.

با وجود این، هنوز بعضی افراد کنجکاو پیوسته می‌پرسند: چرا؟ چرا؟ چرا؟ "چه چیزی زمان را ناهمزمان می‌کند؟"؛ "چه چیزی فضا را منقبض می‌کند؟"؛ "چه چیزی زمان را کند می‌کند؟"؛ "چه چیزی سرعت نور را حد بالای سرعتها قرار می‌دهد؟". اگرچه ذهن کنجکاو این تبیین استاندارد را خواهد پذیرفت (برای اینکه سرعت نور ثابت باشد این تبدیلات فضا زمان لازم است) اما با این تبیین

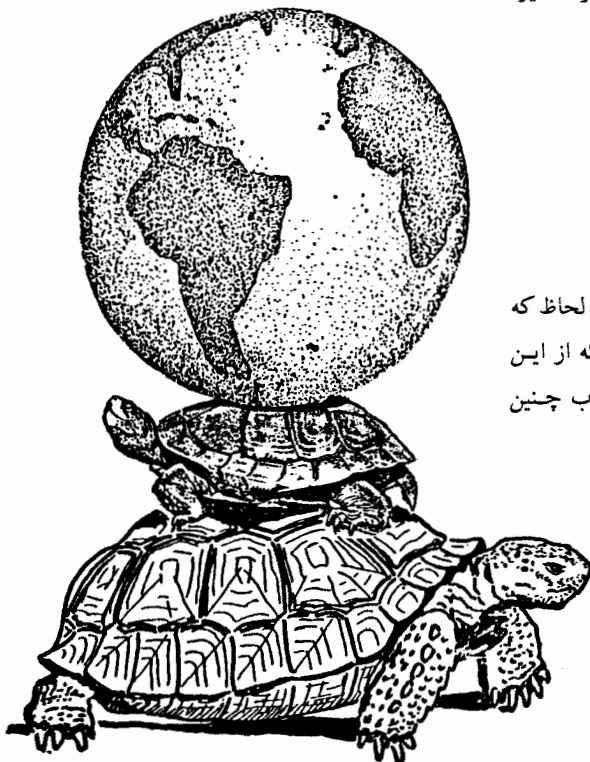
احساس راحتی بکند. اما، هر افسانه‌ای این خاصیت را ندارد. افسانه خوب باید یک شرط را برآورده کند: باید پدیده را حفظ کند. این گفته به این معنی است که آنچه در طبیعت یافت می‌شود را بتوان با آن توضیح داد، و آنچه با آن توضیح داده می‌شود را بتوان در طبیعت یافت. افسانه خوب همچنین باید راحت فهمیده شود.

مثلاً افسانه معروف لاک‌پشت یک افسانه بد است زیرا بنا به آن در قطب جنوب لاک‌پشت وجود دارد؛ اما وقتی به آنجا سفر کنید مشاهده می‌کنید که قطب جنوب پر از پنگوئن است، نه لاک‌پشت!

اما ذهن کنجکاو هنوز راضی نشده است. معلوم نیست چه می‌خواهد. من به شما خواهم گفت چه می‌خواهد. می‌داند که پاسخهای مستقیم به سؤلهایی از نوع "چه چیزی ... " ناممکن است. آنچه آرزوی ذهن کنجکاو است داستان کوچک یا افسانه‌ای است که احساس برگشتن به منزل از همان راه آشنای همیشگی را به او می‌دهد.

افسانه‌های خوب و بد

ابداع افسانه خوب به هیچوجه مخالف روح علم نیست، زیرا قبل از هر چیز باعث می‌شود که ذهن کنجکاو در این دنیای اسرارآمیز



شکل ۵-۱. افسانه لاک‌پشت از این لحاظ که احماقانه به نظر می‌رسد بد نیست، بلکه از این لحاظ بد است که در قطب جنوب چنین لاک‌پشتهای بزرگی وجود ندارد.



از طرف دیگر، افسانه نظریه میدان کوانتومی به این دلیل خوب نیست که درواقع تمامی فیزیکدانان معروف، به جای اینکه انرژی خود را صرف راحت بودن درک آن بکنند، صرف پیشرفت آن کرده‌اند. بنابراین، واسطه روحی روانی این خلأ را پرمی‌کند و اغلب فکر می‌کنند که واقعیت موجود در Karma بیشتر از واقعیت ^{**} quanta است.

بیشتر رشته‌های فیزیک، که کاملاً فهمیده شده‌اند و به صورت منظم به کار می‌روند، حتی توسط فیزیکدانان متخصص نیز بر حسب افسانه‌های خوب تصویر شده‌اند. به عنوان مثال، نیروی میان بارهای الکتریسته ایستا را بر حسب افسانه جنسیت درنظر می‌گرفتند: دو جنس مخالف همدیگر را جذب و دو جنس مشابه همدیگر را دفع می‌کنند. لختی را تنبلی ماده، که تقریباً شبیه به انسان است، و قوانین پایستگی و اصل کمترین زمان یا کمترین کنش را در قالب اقتصاد می‌ریختند. قانون دوم نیوتن را به صورت تمایل طبیعی اجسام به بی‌نظمی (قانون مورفی) تجسم می‌کردند.

برای درک محتوای نظریه نسبیت خاص نیز ابداع یک افسانه خوب لازم است: و اینکه آن افسانه.

داستان

چرا نمی‌توان سریعتر از نور حرکت کرد؟ دلیل اینکه شما نمی‌توانید سریعتر از نور حرکت کنید این است که نمی‌توانید کندتر حرکت کنید. فقط یک سرعت وجود دارد. همه چیز، از جمله شما، همواره با سرعت نور حرکت می‌کند. وقتی روی یک صندلی نشسته‌اید، چگونه در حرکت‌اید؟ از طریق زمان.

* در دین بودا، Karma حاصل کردار انسان در هر یک از مراحل هستی است که سرنوشت وی را برای مرحله دیگر معین می‌کند، سرنوشتی که نتیجه کردار است [فرهنگ حیم-م].

^{**} quanta ، جمع کوانتوم.

افسانه‌های حرکت. سه قانون حرکت، تقریباً وابسته به افسانه‌های رسمی هستند. قانون اول، یا قانون لختی، همان جوهر تنبلی است، اگر در واقع علت غایی آن نباشد. قانون دوم، یا قانون نیرو-شتاب، به عنوان رابطه علت و معلول تلقی می‌شود. درحالی که قانون سوم، قانون واکنش، بیان طبیعی یا شاید منشأ کینه‌جویی خانوادگی است.

با وجود این، بعضی از این افسانه‌های "رسمی" کامل نیستند. مثلاً افسانه دوم را در نظر بگیرید. آیا میان نیرو و شتاب رابطه علی وجود دارد؟ هر علتی قبل از معلول خود قرار دارد، اما نیرو و شتاب در زمان از هم مجزا نیستند. آیا نیرو علت و شتاب معلول است؟ چکش آبی حاصل از بستن سریع شیر آب را در نظر بگیرید. آیا از حرکت بازایستادن آب علت نیروی چکش است؟ یا آیا نیروی چکش باعث می‌شود آب از حرکت بازایستد؟ آیا افسانه علت - معلول شما را به سؤال معروف "اول مرغ یا اول تخم مرغ؟" نمی‌کشانند؟

تمامی این داستان را می‌توان با نموداری که اساساً همان نمودار سرعت-سنج کیهانی است، نشان داد. هیچگاه نمی‌توان سرعت چیزی را تغییر داد. فقط جهت سرعت در فضا زمان^۱ قابل تغییر دادن است. در حالت سکون هر چیزی به نظر می‌رسد که در زمان از O به A در حرکت است؛ اما اگر این جسم به طرف

چرا هر چه سرعت ساعت‌های متحرک در فضا بیشتر شود، ظاهراً کندتر کار می‌کنند؟ زیرا هر ساعت به طور ویژه از طریق زمان حرکت می‌کند، نه از طریق فضا. اگر شما کاری کنید که ساعت از طریق فضا نیز حرکت کند، قسمتی از سرعت آن در زمان را صرف حرکت در فضا می‌کند. هر چه سرعت حرکت ساعت در فضا بیشتر شود، مقدار بیشتری از سرعت حرکت آن در زمان به سرعت حرکت در فضا تبدیل می‌شود. این تبدیل سرعت در زمان به سرعت در فضا تا کجا ادامه می‌یابد؟ تا جایی که تمامی سرعت در زمان به سرعت در فضا تبدیل شود. در این صورت، ساعت تا آنجا که ممکن است در فضا سرعت می‌گیرد اما چیزی برای سرعت در زمان باقی نمی‌ماند. بنابراین، وقتی ساعت با سرعت نور در فضا پیش برود، دیگر کار نمی‌کند. پیر نمی‌شود.

۱. اگر واژه مساحت را نمی‌شناسید، یا اگر این واژه وجود ندارد، می‌توانید واژه فضا-فضا را به جای آن به کار ببرید. همین طور، به جای حجم می‌توانید با استفاده از واژه‌سازی، واژه فضا-فضا-فضا (space space space) بسازید. فضا زمان برای نمایش سطحی ساخته شده است که فضا را در یک جهت و زمان را در جهت دیگر اندازه‌گیری می‌کند.

است که علت احساس گذشت زمان را در شما ایجاد می‌کند.



راست، R ، یا به طرف چپ، L ، به حرکت درآید، سرعت آن به راست یا به چپ منحرف می‌شود. در نهایت، تمامی سرعت به سمت C میل می‌کند، و تمامی سرعت مشاهده شده از طریق فضا است. این نمودار را می‌توان به راحتی مدرج کرد. اگر فاصله از O تا A یک سال باشد، آنگاه فاصله از O تا C باید یک سال نوری باشد (مساftی که نور در سال طی می‌کند).

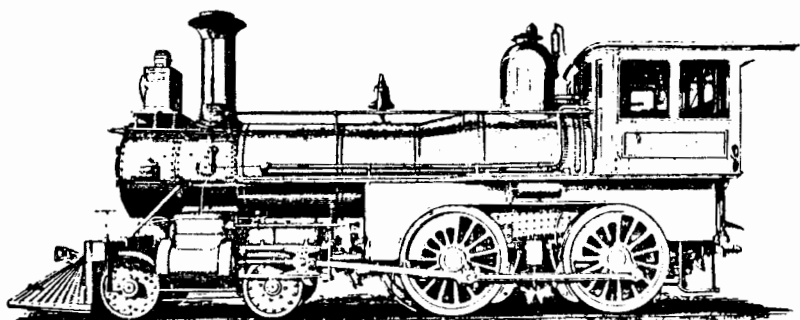
آیا می‌توانید ببینید که ویژه‌ساعت شما از حرکت باز ایستاده است؟ نه. شما همیشه نسبت به خود در حال سکون هستید (مگر اینکه در حال تمرین خارج از بدن باشید). بنابراین، هیچوقت نمی‌بینید که ویژه‌ساعت شما در فضا حرکت می‌کند. ساعت شما، آن طور که شما آن را می‌بینید، همیشه فقط در زمان حرکت می‌کند، و درواقع هم باید همین طور باشد. شما حتی نمی‌توانید ببینید که ساعت شما کند کار می‌کند، در حالی که وقتی شما در فضا در حال حرکت باشید، من می‌توانم. شما هر طور که حرکت کنید، جهت حرکت شما صرفاً از طریق زمان است، و هر طور که من در حرکت باشم، جهت حرکت من صرفاً در زمان است. اما من همیشه حرکت شما را صرفاً از طریق زمان نمی‌بینم، و همین طور شما حرکت مرا.

آیا تا حالا فکر کرده‌اید که در حرکت با سرعت نور چه احساسی دست می‌دهد؟ و چگونه احساس می‌شود؟ شما هم اکنون دارید این احساس را تجربه می‌کنید. همین سرعت

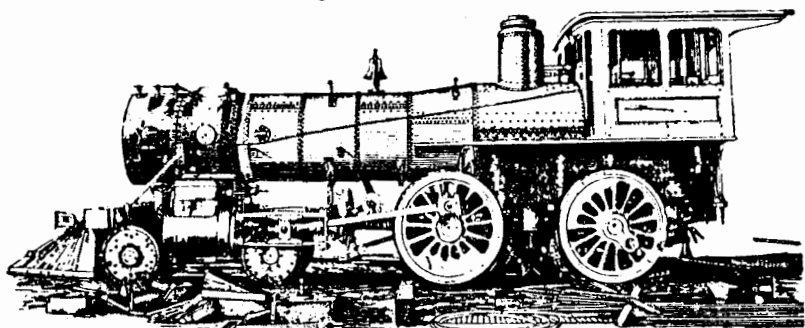
شکل ۵-۳. این نشانه‌های تزینی از Great

Laks Dredge and Dry Dock stock

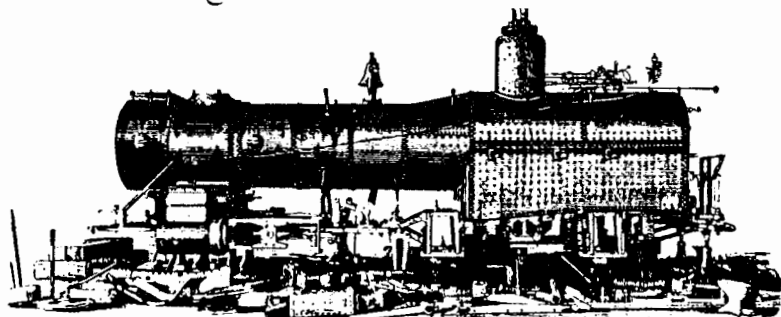
certificate افسانه نیوتون را در مورد کش ماه بر روی جزر مد دریا نشان می‌دهد. یکی از اولین و شدیدترین اعتراضها به نظریه نیوتون این بود که این نظریه به ماده بیجان مشخصه‌های موجود زنده می‌داد: ماده، بدون ارتباط فیزیکی، از راه دور ماده دیگر را جذب می‌کند (یا جذب آن می‌شود) و آن را به طرف خود می‌کشد و یا خود به طرف آن می‌رود! این مفهوم میل طبیعی (کش از راه دور) ظاهراً برگشتی به تمایلات، همدردیها، و تواناییهای افسانه‌ای است که گالیله به خاطر آنها علوم قرون وسطی را مسخره می‌کرد. نیوتون افسانه‌اش را دوست نداشت، اما این افسانه عمل می‌کرد.



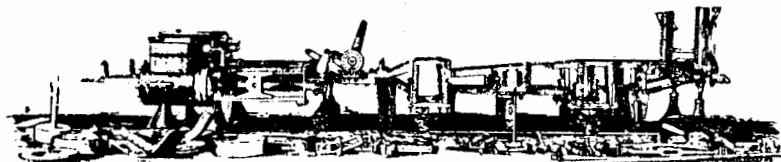
۱۶ ساعت و ۵۰ دقیقه کار لوکوموتیو آماده برای آزمایش، سه شنبه ۲۰۵۰ بعد از ظهر



۱۰ ساعت کار نصب چرخها و اتاقک ناخدا، سه شنبه ۷ صبح



۵ ساعت کار نصب دیگ بخار، یکشنبه ظهر،



شروع، یکشنبه ۷ صبح

فضا

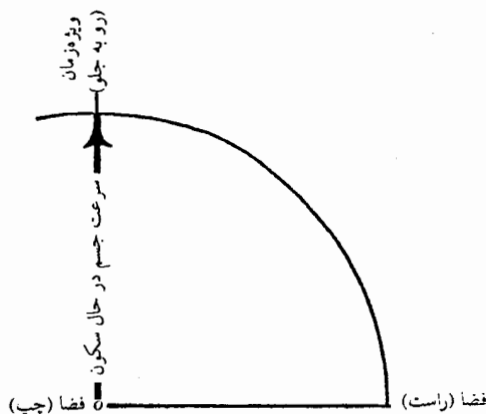
شکل ۴-۵. حرکت در زمان. لوکوموتیوها معمولاً نشان دهند حرکت در فضا هستند. این توالی در شکل، که مراحل ساخت یک لوکوموتیو مسافری را نشان می دهد، گویای حرکت در زمان است.

A diagram of a semi-circular arch with center O and radius R . The arch is represented by a dashed semi-circle. At the center O , there is a vertical upward force A and a horizontal force C acting to the right. At the left end of the arch, there is a horizontal force C acting to the left and a vertical force L acting upwards and to the left. At the right end of the arch, there is a horizontal force C acting to the right and a vertical force R acting upwards and to the right.

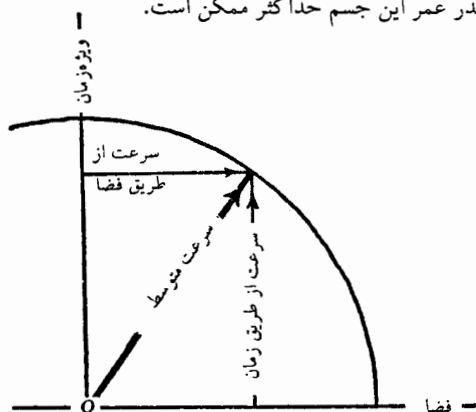
شکل ۵-۶. اگر بتوان سرعت از طریق فضا-زمان را افزایش داد، آنگاه می‌توان آن افزایش را برای افزودن به سرعت از طریق فضا، یا از طریق زمان، و یا هر دو به کار برد. اما هیچکس نمی‌داند چگونه می‌توان سرعت از طریق فضا-زمان را افزایش داد.

از طریق فضا و زمان

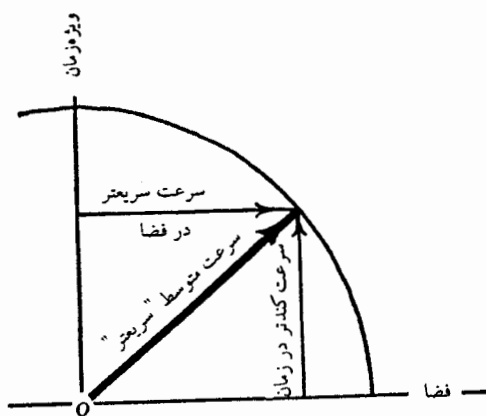
چندین جسم همزمان از نقطه O به حرکت درمی آیند. هر جسم یک سرعت متفاوت از طریق فضا، و بنابراین یک سرعت متفاوت از طریق ویژه زمان دارد. اما سرعت همه آنها از طریق فضا-زمان یکسان است و بنابراین همگی همزمان به یک دایره در فضا-زمان می‌رسند.



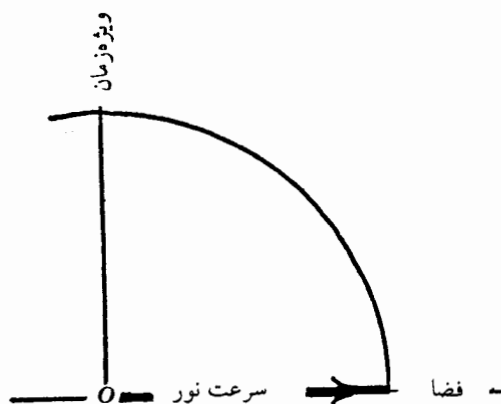
شکل ۵-۷. این جسم در فضا در حال سکون است، فقط از طریق زمان حرکت می‌کند. یک سال عمر آن برابر یک سال عمر شماست. جسمی که در فضا در حال سکون است، در زمان با حداکثر سرعت حرکت می‌کند. سرعت گذر عمر این جسم حداکثر ممکن است.



شکل ۵-۸. این جسم از طریق فضا در حرکت است، و بنابراین سرعت آن از طریق زمان کاهش یافته است. ۶۰ سال نوری در فضا حرکت می‌کند و بنابراین از عمر آن ۸۰ سال می‌گذرد. از عمر ناظری که این جسم را نگاه می‌کند یک سال گذشته است.



شکل ۵-۹. هر چه سرعت در فضا بیشتر شود، مقدار آن از طریق زمان باید کاهش یابد. این جسم ۸۰ سال نوری فضا را طی و بنابراین ۶۰ سال عمر می‌کند. ناظری که جسم را نگاه می‌کند، یک سال عمر کرده است.



شکل ۵-۱۰. این جسم یک سال نوری فضا را طی می‌کند. از عمر ناظر یک سال گذشته است، در حالی که از عمر جسم هیچ نگذشته است. جسم با حداکثر سرعت (با سرعت نور) در فضا حرکت می‌کند. سرعت آن در زمان صفر است. در زمان در حال سکون است. برای فوتون، که با سرعت نور در حرکت است و زمان بر آن نمی‌گذرد "هم‌اکنون ابدیت است". این مسئله در مورد گراویتون، و شاید نوترینو، نیز صادق است. ۶۰ و ۸۰ به این دلیل برای این مثال انتخاب شدند که داریم: $1^2 = 1^2 + (0.6)^2$. هر زوج x و y که در رابطه $x^2 + y^2 = 1$ صدق کند مناسب است.

خارج از بدن

اینکه نازنین، از لحاظ زیست‌شناختی، بزرگتر از پویاست.^۱ البته، این دو دوقلوهای مشابه بودند، و سرعت آنها در فضا زمان هم برای همیشه یکسان است، اما پویا مقداری از سرعت خود را صرف حرکت در فضا کرد، و بنابراین از لحاظ زمانی عقب افتاد. از این رو، پویا از نازنین، که تمامی سرعت خود را صرف حرکت در زمان کرد، عقب می‌افتد. از این به بعد، پویا هیچوقت به نازنین نمی‌رسد، مگر اینکه او هم در فضا به حرکت درآید.

این برای کسانی که مدعی تجربیات خارج از بدن هستند، یک مشکل جدی ایجاد می‌کند. بعد از اینکه دوباره به بدن خود برگشتند، آیا عمر جدید با عمر بخش باقی‌مانده در منزل متناظر است یا با بخش خارج شده از بدن؟

اکنون به تجربه‌های خارج از بدن، که قبلاً به آن اشاره شد، برمی‌گردم. اگر این تجربه‌ها امکان‌پذیر باشند هر کس می‌تواند شاهد حرکت خود در فضا باشد. نظاره‌ی یک دوقلوی مشابه نزدیکترین راه برای انجام این تجربه است.

فرض کنید پویا و نازنین یک چنین دوقلوهای مشابهی باشند. نازنین در منزل می‌ماند و پویا با سرعت خیلی زیاد از منزل خارج می‌شود. با رسم یک نمودار، نازنین بر روی مسیر مستقیم p در زمان حرکت می‌کند. پویا بر روی مسیر d از منزل خارج می‌شود و دوباره برمی‌گردد. اما سرعت نازنین و پویا هر دو از طریق فضا-زمان یکسان است (زیرا سرعت تمامی اشیا در فضا-زمان یکی است - افسانه همین است). این گفته به این معنی است که مسافتی که نازنین در طول مسیر p طی می‌کند همیشه برابر است با مسافتی که پویا در امتداد مسیر d پیش می‌رود. این دوقلو با هم از یک محل شروع به حرکت می‌کنند (در واقع، همه دوقلوها چنین‌اند). وقتی پویا در فضا به حرکت درمی‌آید، مسیر حرکت او منحرف می‌شود، در حالی که نازنین مستقیماً از طریق زمان پیش می‌رود. وقتی پویا، مثلاً، به نقطه D برگشت، نازنین به نقطه P رسیده است. این گفته به چه معنی است؟ این گفته به این معنی است که نازنین از لحاظ ویژه‌زمان یا عمر جلوتر از پویاست. "از لحاظ ویژه‌زمان یا عمر جلوتر است" یعنی چه؟ با کمال تعجب یعنی

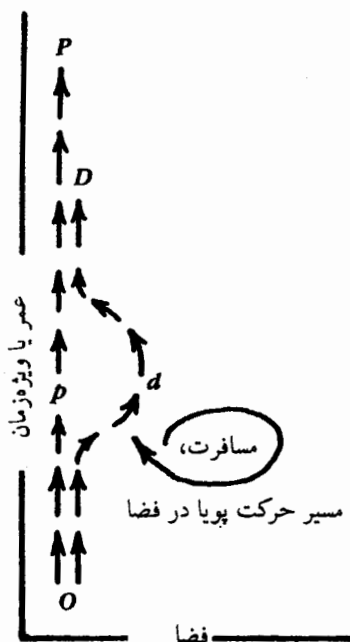
۱. تحلیل مفصل اینکه چگونه این فرایند توسط دوقلوها دیده می‌شود در فصل نسبیت خاص کتاب زیر آمده است.

دو نوع زمان

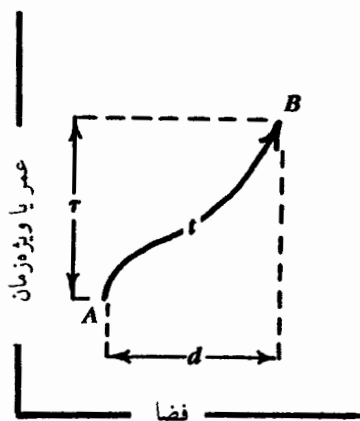
نمودار زیر، که تصویر این افسانه است، نشان می‌دهد که در نسیت همیشه باید متوجه دو جنبه یا دو تصویر از زمان باشیم: زمانی که به نظر یک ناظر برای مسافرت لازم است، و زمانی که خود مسافر فکر می‌کند مسافرتش طول کشیده است.

زمانی که ناظر برای مسافرت لازم می‌بیند برابر است با طول مسیری بر روی نمودار که مسافر آن را در زمان t پیموده است و معمولاً آن را زمان مختصاتی می‌نامند. زمانی که به نظر مسافر برای مسافرتش لازم است برابر است با مسافتی که بر روی نمودار به طرف بالا پیموده است، τ ، و آن را ویژه‌زمان می‌گویند. ویژه‌زمان نشان می‌دهد که چقدر از عمر مسافر و زمان مختصاتی نشان می‌دهد که چقدر از عمر ناظر گذشته است. مسافتی که مسافر به نظر ناظر طی کرده است، برابر است با جابه‌جایی جانبی او، d ، که معمولاً آن را جابه‌جایی فضایی می‌گویند. فقط و فقط اگر مسافر حرکت نکند، یعنی در فضا ساکن باشد، در آن صورت $t = \tau$ و $d = 0$. فقط و فقط اگر مسافر با سرعت نور در فضا حرکت کند، آن گاه $t = d$ (در صورتی که t سال و d سال نوری باشد) و $\tau = 0$ ؛ چون فوتونها با سرعت نور حرکت می‌کنند، زمان بر آنها نمی‌گذرد.

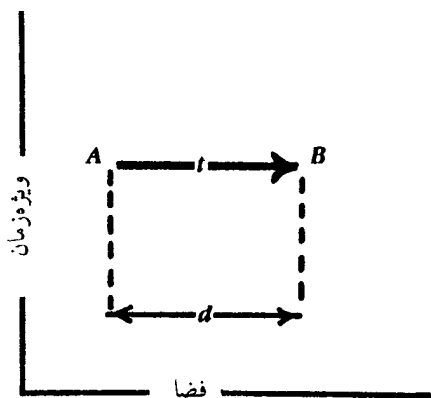
این افسانه نه تنها از لحاظ مفهومی جالب است، بلکه تصویر را می‌توان اندازه گرفت و عمر مسافر را دقیقاً محاسبه کرد.



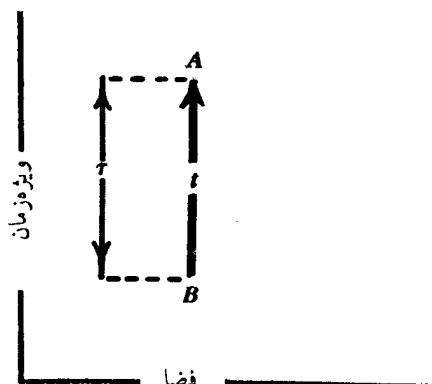
شکل ۵-۱۱. پویا و نازنین هر دو طول فضا-زمان یکسانی را طی می‌کنند، اما پویا ضمن مسافرت، فضای بیشتر و بنابراین ویژه‌زمان کمتری نسبت به نازنین دارد.



شکل ۵-۱۲. A و B رویدادهایی هستند که در فضا و زمان از هم جدا شده‌اند.



شکل ۵-۱۴. A و B در یک ویژه زمان به وقوع می پیوندند. این دو رویداد در فضا، و در زمان مختصاتی از هم جدا هستند.



شکل ۵-۱۳. A و B در یک محل به وقوع می پیوندند. این دو رویداد فقط از لحاظ زمانی از هم جدا هستند.

پرسش

این مسئله را حل کنید. فرض کنید نازنین و پویا هر دو ۱۵ ساله هستند. در جشن تولد ۱۵ سالگی آنها پویا با یک کشتی فضایی، که با نصف سرعت نور حرکت می کند، به فضا پرواز می کند و در جشن تولد ۱۷ سالگی نازنین، که در خانه مانده است، دوباره برمی گردد. اکنون، از لحاظ زیست شناختی، نازنین ۱۷ ساله است. پویا چند سال دارد؟

پاسخ

نصف سرعت نور در فضا حرکت می کند، مسیر او $1/2$ سال نوری ($1/2$ سانتیمتر) در فضا پیش می رود و به D برمی گردد. فاصله D تا P تقریباً $1/4$ سانتیمتر است. اگر ۱ سانتیمتر نشان دهند ۱ سال باشد، $1/4$ سانتیمتر معادل ۳ ماه است. یعنی نازنین ۱۷ ساله است، اما پویا ۳ ماه از او کوچکتر است. پویا، از لحاظ زیست شناختی، فقط ۱۶٫۷۵ سال عمر کرده است.

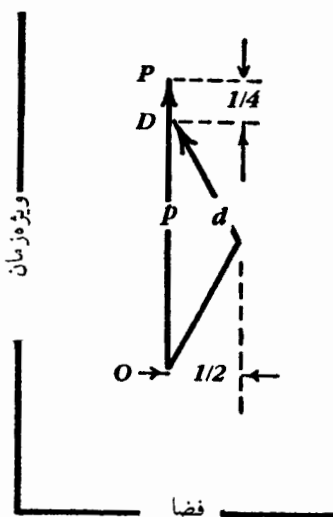
خط مستقیمی به طول ۲ سانتیمتر رسم کنید؛ فرض کنید این خط نشان دهنده ۲ سال باشد. این خط مسیر نازنین از طریق زمان از O تا P است. طول مسیر پویا نیز باید ۲ سانتیمتر (دو سال) باشد، که البته خمیده است. چون پویا با

را نشان می‌دهد. به راحتی می‌توان نموداری با دو بعد فضایی رسم کرد و آن را دقیقاً همانند این نمودار به کاربرد. هر چیز در حال سکون، فقط از طریق زمان از O به A می‌رود. نور فقط از طریق فضا حرکت می‌کند (زمان بر آن نمی‌گذرد)، اما می‌تواند جهت را انتخاب کند، مثلاً از O به B یا از O به C برود. مسافران معمولی فضا بر روی مسیرهایی مانند O به D حرکت می‌کنند. سرعت تمامی اجسام از طریق فضا زمان یکسان است، بنابراین تمامی اجسامی که همزمان از O به حرکت درمی‌آیند، همزمان به یک نیم‌دایره در فضا زمان می‌رسند.

اگر نمودار کامل رسم شود، یعنی سه بعد فضا و یک بعد زمان داشته باشد، تصویر چهاربعدي لازم می‌آید. اگرچه تصویر یک چنین نموداری غیرممکن نیست، رسم آن مشکل است. ضمناً ایده در نظر گرفتن زمان به عنوان یک بعد، مانند ابعاد فضایی، مدتها قبل از اینشتین مطرح شد! این ایده را ولز^۲ در داستان "ماشین زمان" خود، قبل از مقاله اینشتین مطرح کرد. حتی در قرن نوزدهم این

۱. ارتباط نزدیک میان فضا و زمان را پیشینیان انگلیسی و رومی خیلی واضحتر و روشتر از هم‌عصران متریک ما درک کرده بودند؛ زیرا آنان فوت را به ۱۲ اینچ و روز را به ۱۲ ساعت تقسیم کرده بودند و اینان سانتیمتر را ۱۰ میلیمتر و سال را به ۱۲ ماه تقسیم می‌کنند.

2. H. G. Wells



شکل ۵-۱۵. اگر تمامی حرکتها نسبی هستند، آنگاه چگونه می‌توان گفت که کدام دوقلو واقعاً در فضا حرکت می‌کند و هنگام بازگشت جوانتر است؟ پاسخ این است که تمامی حرکتها نسبی نیستند. تنها حرکت خطی، هموار، و بی‌شتاب نسبی است. مسافرت دوسره نمی‌تواند خطی، هموار، و بی‌شتاب باشد، زیرا مسافر، برای برگشتن به جای اول خود، باید توقف کند، به عقب برگردد و یا در یک مسیر دایره‌ای دور بزند. اگر کسی توقف کند یا به عقب برگردد، حتی در داخل اتاقک مسدود شده نیز، از حرکت خود باخبر می‌شود.

سه بعد

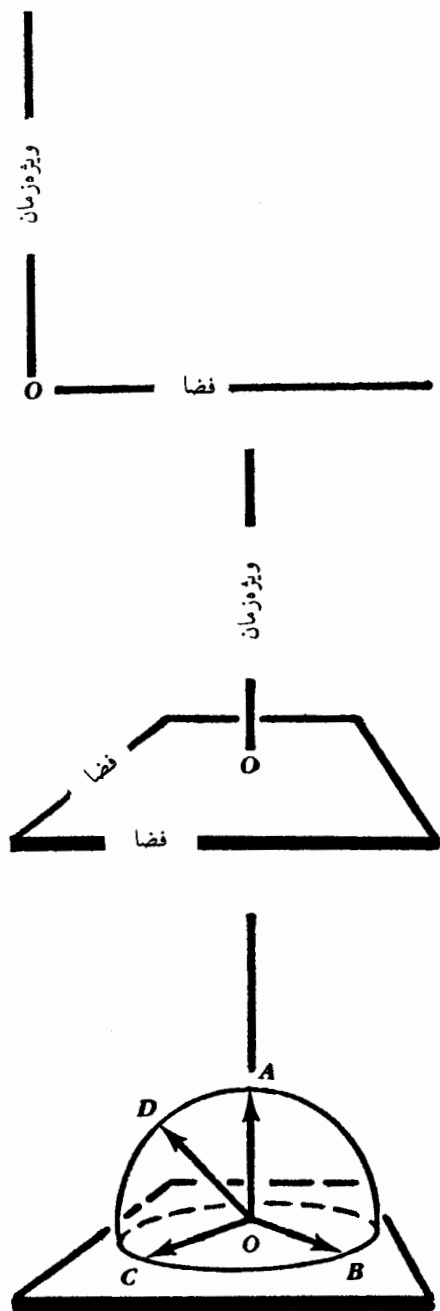
نمودار فضازمانی که تاکنون از آن استفاده شد خیلی محدودیت دارد. این نمودار فقط یک جهت را در فضا نشان می‌دهد (جهت راست-دست). همچنین، و مهمتر، فقط یک بعد فضا

ایده کم مایه مطرح شد که اشیای گم شده، در پشت بعد چهارم پنهان می شوند. هر چیزی که بر روی نمودار رسم شود، نشان دهنده یک بعد است. اما مطرح کردن زمان به عنوان یک بعد جای بحث دارد. چرا؟ زیرا بازه های زمانی، بسته به اینکه چگونه مشاهده شوند، تغییر می کنند، درست همان طور که تغییرات بازه های فضایی نیز بستگی به نحوه مشاهده آنها دارد. طول سایه یک خط کش همیشه برابر طول خط کش نیست.

اکنون دو پرسش کمتر مطرح شده اما مهم را مطرح می کنم. پرسش اول: چرا خداوند جهان را با سه بعد فضا و فقط یک بعد زمان آفریده است؟ چرا سه بعد زمان و فقط یک بعد فضا وجود ندارد؟ چرا تعداد ابعاد فضا و زمان با هم برابر نیست؟ مثلاً دو بعد فضا و دو بعد زمان. پرسش دوم: چرا در سه بعد فضا می توان به عقب، جلو، چپ، یا راست حرکت کرد، اما، به طور بیرحمانه و بدون انتخاب، جریان زمان فقط در یک جهت است؟

در آغاز

می توان به کمک افسانه به پرسشهای بالا پاسخ داد. خداوند در آغاز چهار بعد خلق کرد. این چهار بعد با همدیگر مشابه و از یکدیگر قابل تشخیص بودند. و آنگاه خداوند اتمهای انرژی (فوتونها، و بعضی لپتونها) را در این چهار بعد قرار داد. این اتمها به دلیل داشتن انرژی، با سرعت نور، تنها سرعت فضا زمان، در این چهار بعد به حرکت درآمدند. ازاین



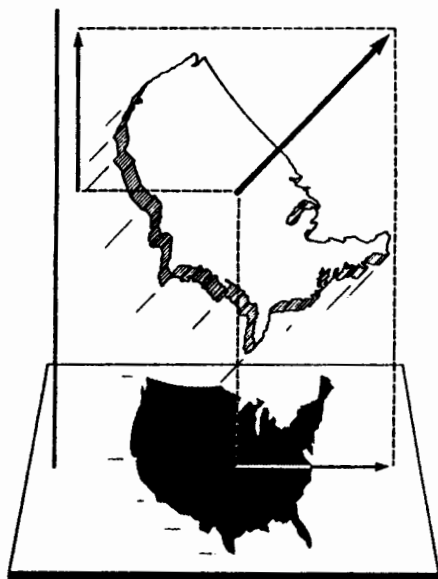
شکل ۵-۱۶

سرعت ایالات متحد از طریق فضا زمان تغییر نمی‌کند، اما جهت حرکت آن، اکنون، متمایل به شرق است، و بنابراین سه‌چهارم سرعت فضا زمان به سرعت در فضا اختصاص می‌یابد. ابعاد ویژه فضای این کشور باید بر جهت حرکت آن در فضا زمان عمود باشد. اما ناظر ویژه سرعت زمان یا ویژه ابعاد فضای جسمی را که از کنار او رد می‌شود اندازه نمی‌گیرد. ناظر فقط سایه ویژه سرعت زمان و ویژه ابعاد فضا را که بر روی ابعاد فضا و زمان او می‌افتد اندازه‌گیری می‌کند. بنابراین به نظر ناظر آهنگ گذر عمر این کشور کاهش و ابعاد شرق - غرب آن منقبض می‌شود، در حالی که ابعاد شمال - جنوب آن تغییری نمی‌کند. همچنان که ناظر نگاه می‌کند، تمامی این کشور با سرعت سه‌چهارم سرعت نور به طرف شرق حرکت می‌کند.

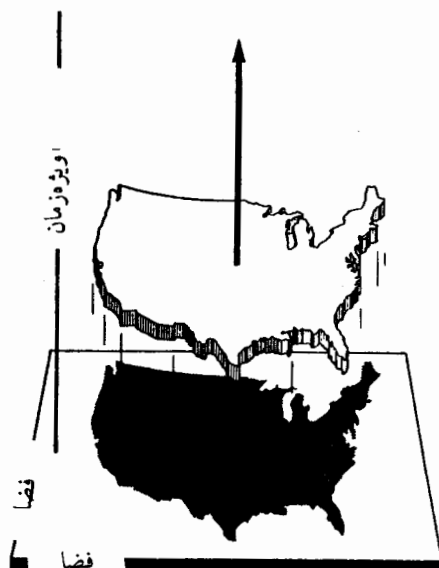
رو، آن طور که هر کدام از این اتمها مشاهده کردند، فضا، فقط و فقط در جهت حرکت آن اتم بخصوص منقبض می‌شد. چون اتمها با سرعت نور حرکت می‌کردند، انقباض فضا در جهت حرکت آن اتم بخصوص به گونه‌ای بود که بعد در آن جهت ناپدید شد. بنابراین سه بعد فضا باقی‌ماند که همگی بر جهت حرکت اتم عمودند، و روح بعد چهارم، که به صورت جریان زمان احساس می‌شود. اما اتمهایی که در جهتهای مختلف حرکت می‌کنند، نمی‌توانند در جریان زمان یکسانی سهیم باشند. هر کدام، جریان مخصوصی را انتخاب می‌کنند، که به صورت ویژه زمان اندازه‌گیری می‌شود.

این جهان فانی، فقط سایه یا تصویری از جهان چهاربعدی واقعی است. وانگهی، اگر شما شکل و سمتگیری اشیا را در جهان واقعی درک کنید، تشخیص سایه آنها، وقتی روی جهان ما می‌افتد، مشکل نیست.

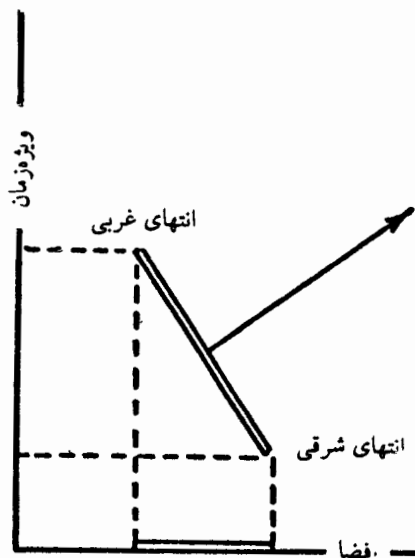
این گفته‌ها را روی یک نمودار می‌بریم. نمودار اول ایالات متحد را، از دید یک ناظر ساکن نسبت به آن، نشان می‌دهد. این کشور مستقیماً در زمان حرکت می‌کند. تصویر آن بر روی ابعاد فضای ناظر تحت تأثیر گذر عمر قرار نمی‌گیرد. نمودار دوم ایالات متحد را، از دید یک ناظر متحرک نسبت به آن، نشان می‌دهد؛ ناظر با سرعت حدود سه‌چهارم سرعت نور به طرف غرب (یا ایالات متحد با همین سرعت به طرف شرق) در حرکت است.



شکل ۵-۱۸. این ته یر نظریه نسبت خاص را به طور کامل خلاصه می‌کند. همچنین افسانه‌ای برای توجیه اثرهای عجیب و غریب فضا و زمان نسبتی به دست می‌دهد.



شکل ۵-۱۷. ایالات متحد، آن طور که توسط یک ناظر ساکن نسبت به آن دیده می‌شود. این کشور مستقیماً در زمان حرکت می‌کند، اما سایه یا تصویر آن در فضا، تحت تأثیر این حرکت قرار نمی‌گیرد.



شکل ۵-۱۹. فضا.

چه چیز آن را منقبض می‌کند؟

دوبعد فضایی می‌چرخند، مثلاً از بعد بالا- پایین به بعد راست - چپ. اما کشتیهای فضایی میان دوبعد فضایی نچرخیده بودند، بلکه میان بعد فضا و بعد زمان چرخیده بودند. در واقع چرخیده بودند.

پرسش

یک اَبَر کشتی فضایی به طول ۳۰۰۰۰۰۰ کیلومتر با سرعتی نزدیک به سرعت نور از کنار ناظری می‌گذرد. تمامی ساعتهای روی کشتی با وقت کشتی همزمان‌اند. همچنان که کشتی می‌گذرد، ناظر ساعت روی دماغه کشتی و ساعت واقع در انتهای کشتی را نگاه می‌کند و متوجه می‌شود که دو زمان متفاوت را نشان می‌دهند. دلیل این تفاوت زمانی چه می‌تواند باشد؟

پاسخ

کشتی شماره ۱ در حال سکون فقط در زمان حرکت می‌کند. فاصله میان دو انتهای آن ۳۰۰۰۰۰۰ کیلومتر است، و هر دو انتها در یک زمان هستند. کشتی شماره ۲، که با سرعت نور در حرکت است، فقط در فضا حرکت می‌کند. فاصله میان دو انتها صفر است، و هر دو انتها در یک مکان هستند (و اگر تقریباً با سرعت نور در حرکت باشد، تقریباً در یک مکان هستند). اما در این حالت یک ثانیه تفاوت زمانی میان دماغه کشتی و انتهای آن وجود دارد. یک ثانیه نوری برابر است با ۳۰۰۰۰۰۰ کیلومتر.

اما این افسانه هنوز باید چیزهای دیگری را نیز پیشگویی کند. نتیجه منطقی و واقعی کج شدن ابعاد فضا، به گونه‌ای که بر جهت حرکت از طریق فضا زمان عمود باشد، این است که ناظر سن قسمت غربی ایالات متحد را جلوتر از قسمت شرقی آن قرار بدهد. این همان ناهمزمانی زمان است که قبلاً بحث کردیم.

چرا وقتی یک خط کش به حرکت درمی‌آید، طول آن منقبض می‌شود؟ درست همان طور که یک ساعت که به طور ویژه در زمان حرکت می‌کند، فقط با تبدیل قسمتی از سرعتش، که آن را به طور ویژه برای گذر عمر به کار می‌برد، می‌تواند در فضا به حرکت درآید، خط کش نیز به طور ویژه در فضا پیش می‌رود، نه در زمان. اگر خط کش را به حرکت درآورید، به دلیل ناهمزمانی ناشی از حرکت در زمان نیز به حرکت درمی‌آید. دو انتهای خط کش، آن طور که ناظر اندازه‌گیری می‌کند، در سندهای متفاوت هستند. این خط کش، فقط با تبدیل قسمتی از طول آن، که آن را به طور ویژه برای پیش رفتن در فضا به کار می‌برد، می‌تواند در زمان پیش برود.

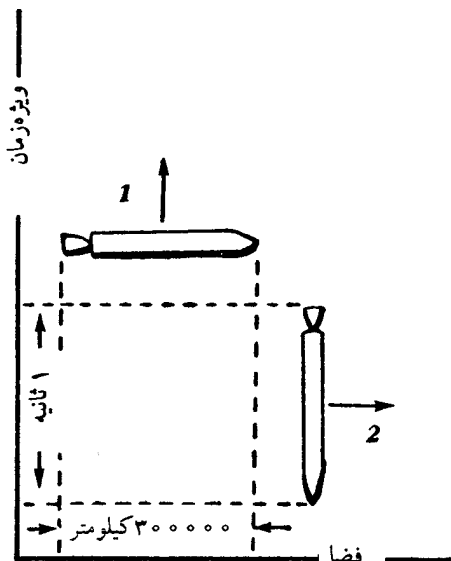
توصیف انقباض کشتیهای فضایی در فصل ۳ (صفحه ۴۲) را به یاد بیاورید. یکی از تصویرهای کشتیها طوری چرخیده بود که کج به نظر می‌رسید. تنها مشکل این بود که کشتی در فضا نچرخیده بود؛ در واقع خط سیر حرکت کشتی در فضا هرگز تغییر نکرده بود. چرخش لااقل مستلزم دوبعد است. معمولاً اشیا بین

پرسش

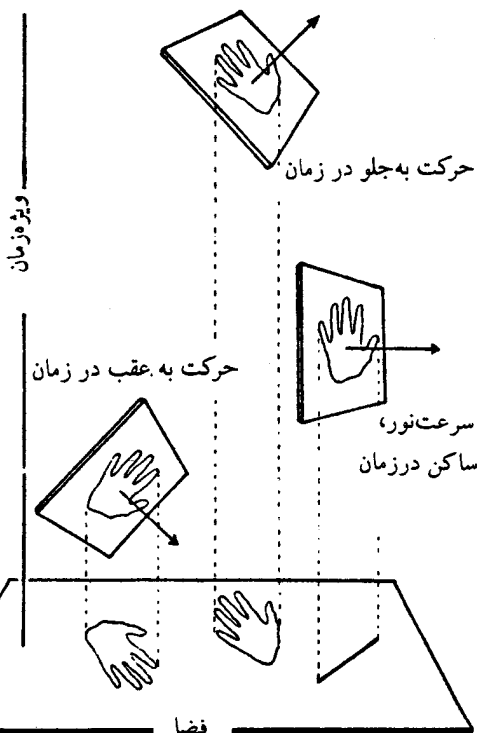
فرض کنید شما با شیئی برخورد می‌کنید که در زمان به طرف عقب حرکت می‌کند. آیا می‌توانید تشخیص بدهید که این شیء به طرف عقب در حرکت است؟

پاسخ

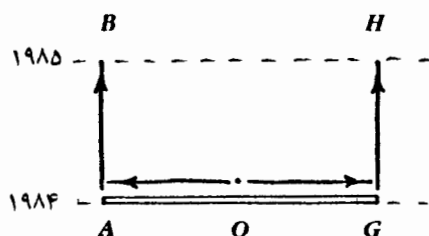
قبل از هر چیز، به نظر شیئی که در زمان به عقب حرکت می‌کند، خود شیء در زمان روبه جلو و شما و سایر اجسام در زمان روبه عقب در حرکت هستید. اگر شیء عقب‌رونده ساختار داشته باشد، می‌تواند ویژه‌انتهاهای چپ و راست را بر روی خودش تشخیص بدهد، و آن انتهاها وقتی بر روی فضای ناظر تصویر شوند و ارون می‌شوند (شکل ۵-۲۱). دست راستی که در زمان روبه عقب حرکت می‌کند، توسط ناظر به صورت دست چپ دیده می‌شود. درست مثل حالتی که در آینه دست راست خود را نگاه می‌کنیم.



شکل ۵-۲۰



شکل ۵-۲۱



فضا

شکل ۵-۲۲

سانتیمتر از موقعیت اولیه جابه جاشده اند، فوتون از O به A و خط کش از A به B ، بنابراین هر دو یک مقدار مساوی از زمان مختصاتی را طی کرده اند (زمان مختصاتی، زمانی است که ناظر اندازه می گیرد). اما ویژه زمان آنها یک سال با هم متفاوت است. زمان بر فوتون نمی گذرد، اما بر خط کش می گذرد.

۱. توجه کنید که این رفتن به معنای حرکت در فضا، آن طور که ما احساس می کنیم نیست، بلکه حرکت در زمان است، یعنی یک سال عمر می کند و این یک سال با ۱ سانتیمتر نشان داده شده است - م.

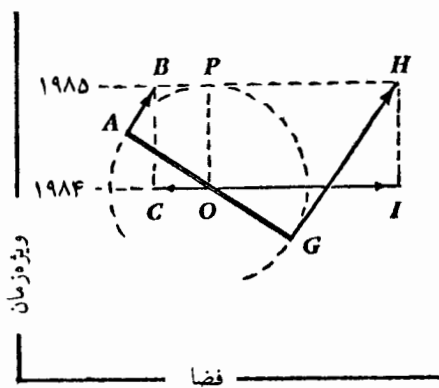
در پایان این فصل می خواهم دلیل اینکه این افسانه پدیده را نجات می دهد، مستقیماً ارائه کنم. مخصوصاً اینکه یک درخش نور، که در وسط خط کش تولید می شود، بدون ارائه کنم. مخصوصاً اینکه یک درخش نور، که در وسط خط کش تولید می شود، بدون توجه به چگونگی حرکت خط کش، همزمان به دوانتهای آن می رسد. اگر شما استدلال دوست ندارید، به بخش پایانی این فصل، تحت عنوان "سخن پایانی" مراجعه کنید.

افسانه اثبات می شود

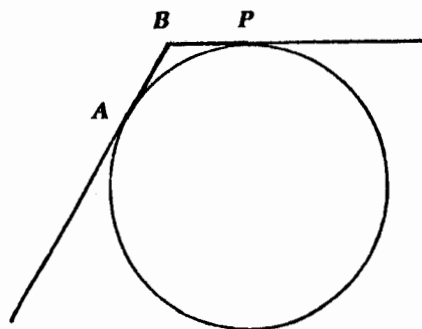
فرض کنید طول خط کش، که در فضا ساکن است، دو سال نوری است. در طول یک سال انتهای خط کش از A به B و از G به H می رود^۱، و هر انتها در طی این یک سال زمانی، مثلاً ۱ سانتیمتر در شکل ۲۲.۵ جابه جا می شود. در خلال این یک سال، قسمتی از درخش نوری که در O تولید شده است، از O به A و قسمتی از O به G می رود، و این دو قسمت نیز هر کدام در طی این یک سال نوری فضا، یک سانتیمتر در روی شکل جابه جایی شود. اگر درخش نور در روز اول سال ۱۹۸۴ گسیل شود، دو قسمت آن در روز اول سال ۱۹۸۵ به دوانتهای خط کش می رسند. اما، توجه کنید که انتهای خط کش در سال ۱۹۸۵ در B است، در حالی که فوتون نور حاصل از درخش در سال ۱۹۸۴ از A است. سایه A و B در فضا یکی است و هر دو موقعیت یکسانی در فضا دارند. هم فوتون و هم خط کش یک

این گفته به این معنی است که مرکز خط کش از خط سال ۱۹۸۴ می‌گذرد (شکل ۵-۲۳). انتهای چپ خط کش از A به طرف B و قسمتی از درخش از O به طرف C ، که مستقیماً در زیر B است، می‌رود. باید ثابت کنیم که فاصله A تا B برابر است با فاصله O تا C ، یعنی اینکه نور وقتی به موقعیت فضایی انتهای چپ خط کش می‌رسد که آن انتها به اولین ویژه سال ۱۹۸۵ رسیده باشد. همین طور، لازم است که همین شرایط برای انتهای راست خط کش ثابت شود، یعنی اینکه فاصله از G تا H برابر با فاصله از O تا I باشد. نقطه I مستقیماً زیر H است.

اگر P مستقیماً بالای O باشد، آنگاه فاصله P تا B برابر است با فاصله O تا C ، و همین طور فاصله P تا H برابر است با فاصله O تا I . همچنین، فاصله از O تا A و O تا G یک سال نوری است و فاصله از O تا P یک سال نوری است، بنابراین طول همه آنها برابر است. از این رو، نقاط A ، P ، و G روی یک دایره قرار دارند و خطوط AB ، BH ، و GH مماس بر



شکل ۵-۲۳



شکل ۵-۲۴

کار می‌کنند و خط کشیهایی که از طریق زمان پیش می‌روند، صحبت کنیم. با وجود این نمی‌توانیم متحیر نشویم: آیا افسانه واقعیت دارد؟

آیا واقعیت دارد که ما همیشه در حرکت هستیم، حتی وقتی که ساکن ایستاده‌ایم؟ آیا این درست است که ما نه تنها همیشه در حرکت ایم، بلکه همیشه با سرعت نور حرکت می‌کنیم؟

پرسش مشابهی در مورد واقعیت حرکت زمین برای کوپرنیک مطرح شد. جوابی که او در ۵۰۰ سال پیش داد برای منظور فعلی ما کافی است.

کوپرنیک (یا شاید یکی از دستیارانش) نوشت، در واقع: "خیلی مسخره است که باور کنیم جسم سنگینی چون زمین در حرکت باشد، یا بتواند واقعاً حرکت کند، آن هم به طور دائم. اما اگر بخواهیم می‌توانیم فرض کنیم که چنین است، و این فرض محاسبات را ساده‌تر و درک جهان را راحت‌تر می‌کند." همین فرض را می‌توانیم برای افسانهٔ نسبیّت خاص در نظر بگیریم.

دایره هستند. (چون $\overline{AB}$ بر $\overline{AO}$ ، $\overline{BH}$ بر $\overline{PO}$ ، و $\overline{HG}$ بر $\overline{OG}$ عمودند).

اما، اگر خطوط تماس از یک نقطه، مثلاً B رسم شوند و نقطهٔ تماس آنها A و P باشد، آنگاه باید فاصلهٔ A تا B با فاصلهٔ P تا B برابر باشد. در نتیجه A تا B برابر است با O تا C (زیرا $\overline{PB} = \overline{OC}$). همین طور، G تا H برابر است با O تا I (زیرا $\overline{PH} = \overline{OI}$). بنابراین، آنچه می‌خواستیم ثابت کنیم، ثابت شد و افسانه پدیده را نجات می‌دهد.

نمودار، اساس "ترفند" اینشتین را نشان می‌دهد. مطمئن باشید، زمانی که طول می‌کشد (زمان مختصاتی) تا نور به انتهای چپ خط‌کش برسد کمتر از زمانی است که نور به انتهای راست می‌رسد. اما ناظران همراه خط‌کش با ویژه‌زمان خود محاسبه می‌کنند، و خط‌کش به گونه‌ای کج می‌شود که ویژه‌زمان لازم برای رسیدن انتهای چپ آن به سال ۱۹۸۵ کمتر از ویژه‌زمان لازم برای رسیدن انتهای راست آن به همین سال است. ناهمزمانی انتهای چپ را جلو می‌اندازد؛ ناهمزمانی علت اصلی است.

سخن پایانی

چون سرعت نور یک ضریب تبدیل ثابت میان فضا و زمان است. می‌توان کیلومتر را بر حسب سال و سال را بر حسب کیلومتر اندازه‌گیری کرد (اخترشناسان ده میلیون کیلومتر را یک سال نوری می‌نامند). بنابراین منطقاً ما می‌توانیم از ساعتهایی که از طریق فضا

پرسش

برای روشن شدن موضوع، باید بدانید که شما ناظر کار ساعت مهندس قطار نیستید، بلکه عوامل محلی شما ناظر آن هستند. همین مسئله در مورد مهندس قطار و ساعت شما نیز صادق است؛ یعنی عوامل محلی مهندس قطار ناظر کار ساعت شما هستند، نه خود مهندس (تفاوت میان دیدن و اندازه گرفتن را ببینید، صفحه ۵۵). ساعتهای عوامل مهندس با ساعت خود او همزمان‌اند، نه با ساعت شما و عوامل شما ساعتهای خود را با ساعت شما همزمان کرده‌اند، نه با ساعت مهندس.

قطاری از کنار شما آنچنان سریع می‌گذرد که شما آهنگ کار ساعت مهندس قطار را نصف آهنگ کار ساعتهای معمولی اندازه‌گیری می‌کنید. مهندس قطار آهنگ کار ساعت شما را چگونه اندازه‌گیری می‌کند؟

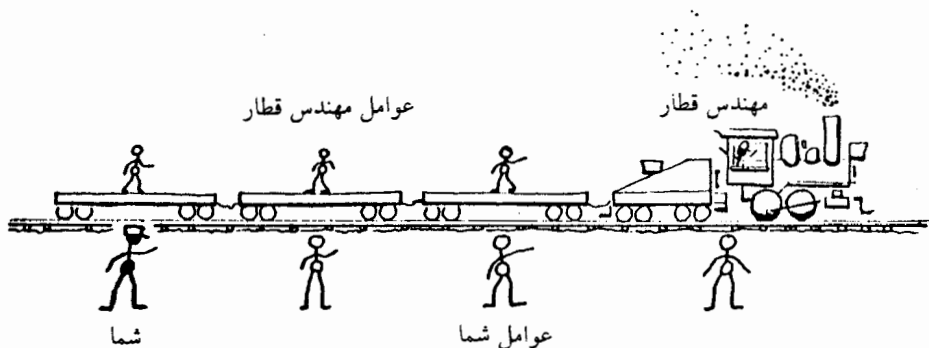
(الف) نصف سرعت کار ساعتهای معمولی

(ب) برابر سرعت کار ساعتهای معمولی

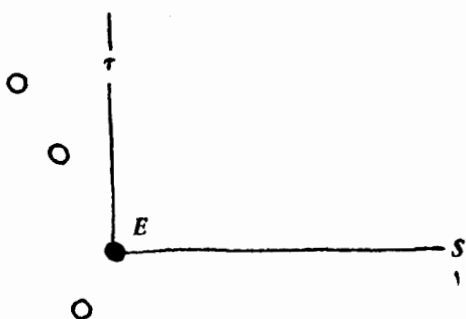
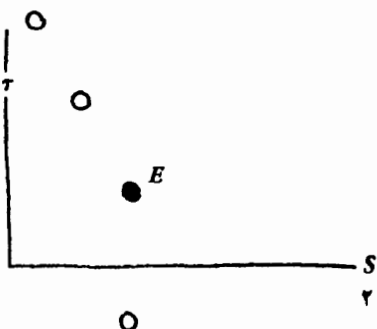
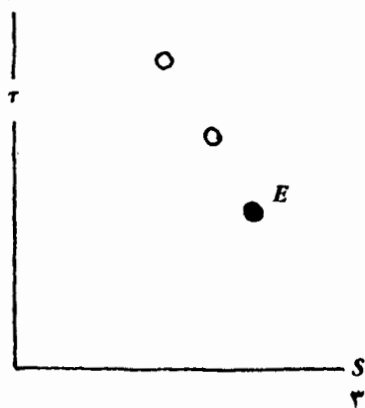
(ج) دو برابر سرعت کار ساعتهای معمولی

پاسخ

(الف) پاسخ درست است. وضعیت باید کاملاً متقارن باشد. اگر اجسام و رویدادها برای شما و مهندس قطار متفاوت باشد، همین تفاوت باعث می‌شود که واقعاً بدانید چه کسی در حرکت است و همین با اصل نسبت خاص ناسازگار است. اما چگونه ممکن است که هر طرف ببیند که ساعت طرف دیگر کند کار می‌کند؟ مگر نه اینکه اگر ساعت من نسبت به شما کند کار کند، آنگاه ساعت شما نسبت به من باید تند باشد.

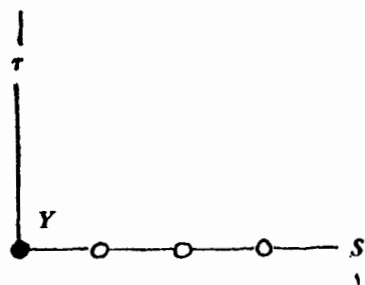
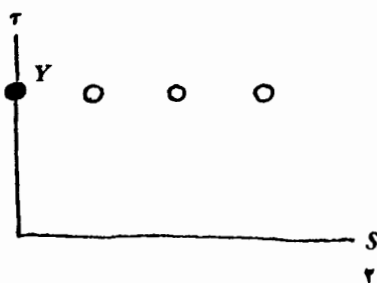
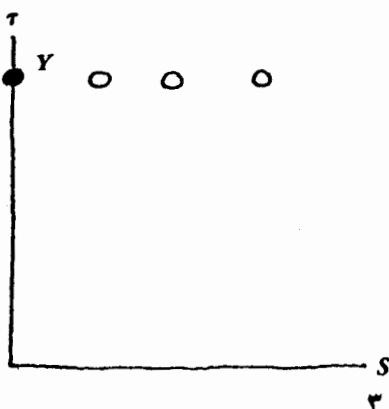


او با سرعت زیاد دیده می‌شوند. به ناهمزمانی توجه کنید: ساعت‌های عوامل جلوتر از ساعت مهندس هستند و همه با نصف سرعت معمولی کار می‌کنند.

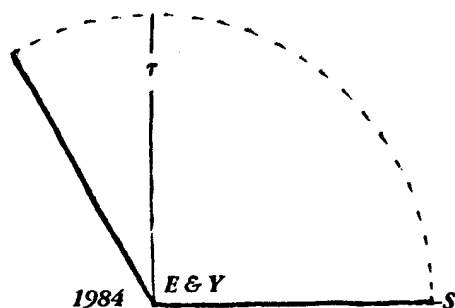


شکل ۲۷-۵

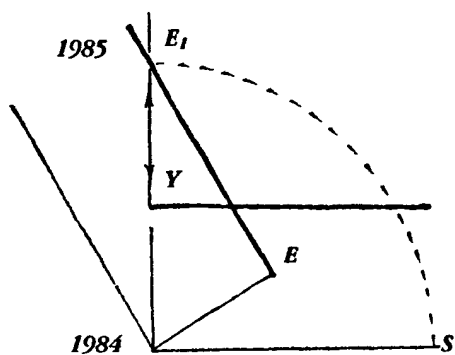
در شکل ۲۵-۵ قطار سرعت می‌گیرد و منقبض می‌شود. شکل ۲۶-۵ شما و عوامل شما را نشان می‌دهد که فقط از طریق زمان در حرکت‌اید. در شکل ۲۷-۵ مهندس و عوامل



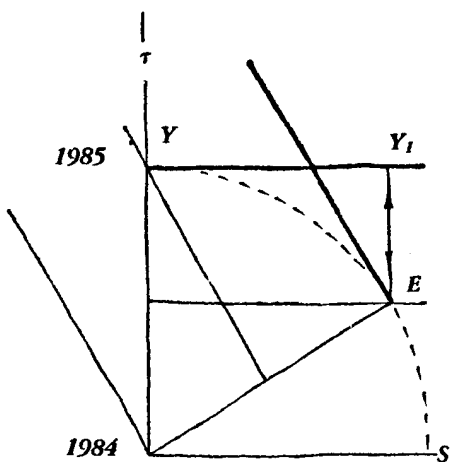
شکل ۲۶-۵



شکل ۲۸-۵



شکل ۲۹-۵



شکل ۳۰-۵

شکلهای ۵-۲۸ تا ۵-۳۰ حرکت دو خط را نشان می‌دهند. یک خط نشان دهنده شما و عوامل شما و خط دیگر نشان دهنده مهندس و عوامل اوست. هر دو خط در فضا زمان با سرعت یکسان حرکت می‌کنند.

هنگامی که قطار از کنار شما رد می‌شود (شکل ۵-۲۸) ساعت جیبی شما و ساعت جیبی مهندس اول ژانویه ۱۹۸۴ را نشان می‌دهد. در فاصله زمانی میان شکل ۵-۲۸ و شکل ۵-۲۹، ساعت شما ۱/۲ سال جلومی‌افتد، اما زمانی که ساعت عامل محلی مهندس، E_1 ، که از کنار شما رد می‌شود، نشان می‌دهد اول ژانویه سال ۱۹۸۵ است. این عامل به مهندس گزارش می‌دهد که ساعت شما ۶ ماه عقب است.

در فاصله زمانی میان شکل ۵-۲۹ و شکل ۵-۳۰، ساعت شما (و ساعتهای همه عوامل شما) ۱/۲ سال جلومی‌افتد، و اول ژانویه ۱۹۸۵ را نشان می‌دهد. با وجود این عامل محلی شما، Y_1 ، که نزدیک به قطار است، به شما گزارش می‌کند که ساعت مهندس ۶ ماه عقب است.

اگر شما تا افق پیش بروید خواهید دید که در آنجا
هیچگونه مرزی وجود ندارد.

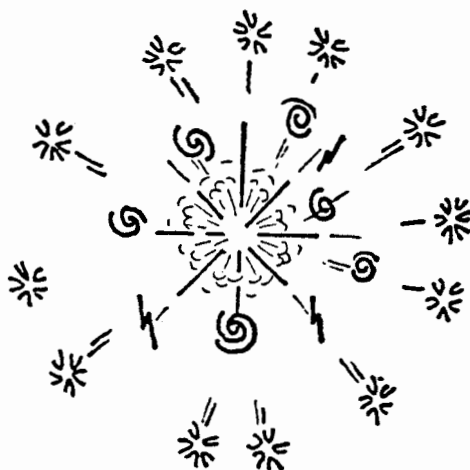
۶

مهبانگ

این فصل از لحاظ درک نسبیت اساسی نیست و بنابراین می‌توان از آن چشم پوشید. اما کاربرد نظریهٔ نسبیت در مورد سیستم جهان، مخصوصاً کیهانشناسی مهبانگ، در این فصل توضیح داده می‌شود. دلیل انتخاب این قسمت این است که اکنون خواننده می‌تواند محتوای آن را درک کند و به نظر من همهٔ کسانی که به نسبیت علاقه‌مندند به اخترشناسی نیز علاقه دارند. وانگهی، همواره مشاهدهٔ کاربرد نظریه آموزنده است. به قول نیوتون: "در فراگیری علوم، کاربرد مثالها، از احکام بیشتر است."

تکوین عالم

عالم با مهبانگ شروع شد. اکنون، این نظریه متداولترین، شناخته‌شده‌ترین، و پرطرفدارترین (هم در میان دانشمندان و هم در میان عامه) داستان تکوین است. این نظریه در



شکل ۶-۱. مهبانگ، آن طور که توسط صدها آسمان‌نما و نمایش تلویزیونی و هزارها معلم علوم و کتاب درسی علوم نشان داده شده است.

کاهشانهای منبسطشونده، این امکان را فراهم می‌کنند که به تقریب زمان وقوع مهبانگ را تعیین کنیم. از روی این زمان می‌توانیم مستقیماً بیشینه ابعاد عالم را مشخص کنیم: ابعاد عالم، برابر است با عمر آن ضرب در سرعت نور. یعنی عالم لبه خارجی یا رویه خارجی دارد. در این صورت، این پرسش مطرح می‌شود که "فرا تر از مرز خارجی چه چیزی وجود دارد؟" با وجود این، اگر کتابهای درسی اخترشناسی را بیشتر مطالعه کنید، به چیزی به نام "اصل کیهانشناختی" می‌رسید که بنابه آن، تمامی قسمتهای عالم یکسان‌اند، یا حداقل، زمانی که عمر یکسان دارند، یکسان‌اند. بنابراین هیچ جای خاصی مانند لبه نمی‌تواند وجود داشته باشد.

اگر مرغ اندیشه را به پرواز درآورید ممکن است بتوانید با فرض نوعی فضای خمیده از این بن‌بست خارج شوید. اما با مطالعه بیشتر متوجه می‌شوید که هنوز اخترشناسان درباره نوع این فضا تصمیمی نگرفته‌اند. آیا انحنا این فضا باید مثبت باشد یا منفی؟ ما، بدون در دست داشتن واقعیات مشخصی در این باره از اخترشناسان، حد وسط، یعنی انحنا صفر را انتخاب می‌کنیم. این محافظه کارانه ترین فرض است و تصویر آن نیز راحت است، زیرا انحنا صفر همان فضای تخت است.

اکنون به شما نشان خواهیم داد که چگونه با کاربرد مستقیم اثرهای ساده نسبیتی در فضای تخت، می‌توان هر دو پارادوکس درخش آتشگوی و لبه عالم را نجات داد.

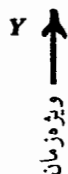
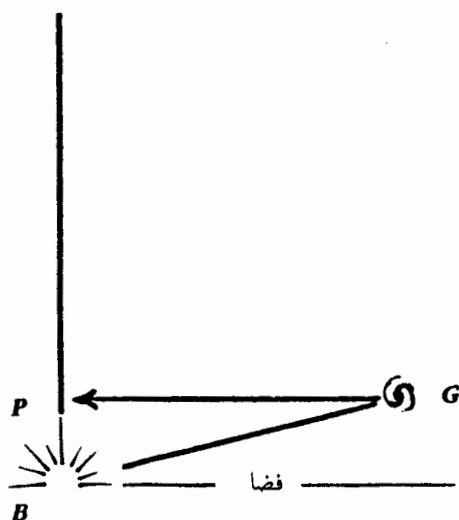
تمامی کتابهای درسی اخترشناسی نیمه دوم این قرن مطرح شده و بر این واقعیت مشاهده شده استوار است که تمامی کاهشانهای دور ظاهراً از همدیگر دور می‌شوند. گواه دیگر، که در کتابهای درسی اخیر آمده است، تابش امواج رادیویی (میکروموج) پربسامدی است که از فضا می‌آید و اولین بار در آزمایشگاههای تلفن بل کشف شد. فرض بر این است که این تابش بازمانده درخش گسیل شده از انفجار بزرگ، یا گسیل شده از آتشگوی بعد از انفجار بزرگ است.

صرفنظر از واقعیت داشتن یا افسانه بودن خود نظریه مهبانگ، ممکن است این پرسش مطرح شود که آزمایشگاههای تلفن بل چگونه توانستند بازمانده درخش مهبانگ را کشف کنند. مگر نه این که فوتونهای تشکیل دهنده درخش با سرعت نور حرکت می‌کنند. کاهشانهای بزرگ نیز در حرکت‌اند، منتهی با سرعتهای متفاوت کمتر از سرعت نور. تاکنون باید فوتونهای درخش از کاهشانها دور شده باشند، در حالی که آزمایشگاههای بل در داخل یکی از این کاهشانها هستند. در این صورت، چگونه بل می‌تواند فوتونهای مهبانگ را آشکارسازی کند؟ اگر کسی سوار بر یک ترکش کوچک خمپاره، از محل انفجار یک خمپاره دستی دور شود، انتظار نمی‌رود که صدای انفجار آن را بشنود. این تنها معیایی نیست که درباره داستان مهبانگ مطرح است.

سرعتها و مسافتهای مشاهده شده

نگاه به عقب

سرعت نور از شما دور می‌شود پانزده میلیارد سال عمر نمی‌کند. یعنی، آن طور که شما آن را مشاهده می‌کنید، این قدر عمر نمی‌کند. درواقع، اگر آن پاره دقیقاً با سرعت نور از شما دور شود، اصلاً زمان بر آن نمی‌گذرد. چون عمر نمی‌کند، شما آن را به همان صورتی که



شکل ۶-۲. شما همواره پیرتر از کهکشانهایی هستید که می‌بینید. در اینجا منظور از عمر، عمر ماده موجود در بدن شما، و در کهکشانها، نسبت به مهبانگ است. در این نمودار، فاصله از P تا Y نشان می‌دهد که چقدر شما از کهکشان G پیرتر هستید.

اول اینکه نشان خواهم داد چگونه هنوز هم می‌توان فوتونهای آتشگوی مهبانگ را آشکارسازی کرد. کمی بعد از انفجار مهبانگ، تمامی ماده عالم باید داغ سفید بوده و بنابراین فوتون گسیل کرده باشد. هنگامی که به اجسام خیلی دورتر در فضا نگاه می‌کنید، درواقع در زمان نیز به عقب می‌نگرید. آیا می‌توانید آنقدر به عقب برگردید که آتشگوی مهبانگ را ببینید؟

پاسخ فوری و بدون اندیشه به این پرسش ظاهراً این است: "نه، نمی‌توانید تا آن فاصله گذشته را ببینید." فرض کنید عمر عالم سی میلیارد سال است، و یک پاره از آن با حداکثر سرعت ممکن (یعنی با سرعت نور یا تقریباً با سرعت نور) از شما دور می‌شود. بازهم فرض کنید که پانزده میلیارد سال بعد از مهبانگ، آن پاره فوتونی به عقب به طرف زمین گسیل می‌کند. این فوتون پانزده میلیارد سال دیگر طول می‌کشد تا به عقب برگردد. این نحوه استدلال نشان می‌دهد که شما فقط نصف فاصله زمانی تا مهبانگ را می‌توانید ببینید. پانزده میلیارد سال بعد از مهبانگ، آتشگوی خیلی دور شده است. بنابراین آزمایشگاههای بل چگونه توانسته‌اند چیزی را کشف کنند؟

آزمایشگاههای بل به این دلیل می‌توانند فوتونهای مهبانگ را آشکارسازی کنند که یک نتیجه مهم نسبت در استدلال قبل نادیده گرفته شده است. آن پاره‌ای که تقریباً با

در حرکت‌اند.

پارهٔ آتشگویی که هم‌اکنون به آن نگاه می‌کنید، باید با سرعت تقریباً نزدیک به سرعت نور در حال دور شدن از شما باشد. بنابراین تابشی که از آن آشکارسازی می‌کنید، به مقدار خیلی زیادی انتقال به سرخ پیدا کرده است. اگر شما نوری را به اندازهٔ کافی انتقال به سرخ بدهید به فروسرخ (تابش گرمایی)، و اگر باز هم بیشتر آن را انتقال به سرخ بدهید، به امواج رادیویی تبدیل می‌شود. به همین دلیل است که درخش مه‌بانگ به جای اینکه دیده شود شنیده می‌شود. در حالت حد که پاره‌ها با سرعت نور از شما دور می‌شوند، طول موج تابش گسیل‌شده، بر اثر انتقال به سرخ بینهایت می‌شود و بنابراین قابل آشکارسازی نیست.

عمر غیرممکن است

اگر بر روی ایدهٔ "عالم در حال انبساط" تأمل کنید، مجبور می‌شوید در یکی از مفاهیم اصلی زمان، مخصوصاً در مفهوم عمر تجدید نظر کنید. عمر عالم اکنون چقدر است؟

درواقع نمی‌توان به این پرسش پاسخ داد. شما می‌توانید بگویید اکنون عمر این کهکشان چقدر است، اما دربارهٔ عمر کنونی کهکشان‌ها که نسبت به شما با سرعت زیاد در حرکت است، چه می‌توانید بگویید؟ اگر اجزای عالم نسبت به هم در حرکت باشند، نمی‌توانید به کل عالم عمری نسبت بدهید. هر جزء ویژه عمر خود را دارد.

در لحظهٔ تکوین بوده است می‌بینید. اگر با سرعت اندکی کمتر از سرعت نور از شما دور شود، فقط اندکی از عمر آن گذشته است، و شما آن را به همان صورتی که چند ساعت یا چند سال پس از مه‌بانگ بوده است، یعنی در زمان آتشگویی، مشاهده می‌کنید.

تمامی این داستان را می‌توان بر روی نموداری نشان داد. شما مستقیماً از طریق زمان از مه‌بانگ در B به طرف عمر کنونی خود در Y می‌روید. کهکشان دور نیز از مه‌بانگ شروع می‌کند و در امتداد مسیر BG از شما دور می‌شود. این کهکشان در G یک فوتون به طرف شما در P گسیل می‌کند. فاصلهٔ از B تا Y برابر است با فاصلهٔ از B به G و P . این فاصله نشان‌دهندهٔ زمانی (مختصاتی) است که از مه‌بانگ گذشته است، بنابراین، فوتون دقیقاً زمانی به P می‌رسد که شما به Y می‌رسید. اما عمر شما برابر طول BY است. عمر فوتون، و همچنین عمر کهکشان دور، وقتی فوتون گسیل می‌کند، برابر طول خیلی کوتاه‌تر BP است. به همین دلیل، شما یک کهکشان خیلی جوان مشاهده می‌کنید. این موضوع تقریباً جوابی برای مسئلهٔ دوقلوی مسافر است.

اگر شما به اندازهٔ کافی به عقب بنگرید و آتشگویی را ببینید، یک زمان قبل از تشکیل کهکشانها را خواهید دید. بنابراین، G باید پاره‌ای از آتشگویی باشد، نه یک کهکشان. برای اینکه شما عصر آتشگویی را، وقتی عمر عالم زیاده‌تر می‌شود ببینید، باید به پاره‌هایی نگاه کنید که با سرعت نزدیک به سرعت نور



شکل ۳-۶

افق نهایی

نسبت نه تنها در مورد عمر اندازه گیری شده کیهکشانهای پرسرعت، بلکه در مورد فضای میان آنها نیز پیامدهای حیاتی دارد. فرض کنید کیهکشانها در یک عالم یک بعدی روی یک خط قرار دارند و روی همین خط به حرکت در می آیند: کیهکشان X به فاصله یک کیلومتر از کیهکشان Y قرار دارد و با سرعت یک کیلومتر بر ساعت از کیهکشان Y دور می شود. و به همین ترتیب در مورد سایر کیهکشانها. این عالم را از دید کیهکشان Y چگونه اندازه گیری می کنید؟ در حالی که زوج کیهکشان W و V خود را به فاصله یک کیلومتر از همدیگر احساس می کنند، شما این ویژه فاصله را مشاهده می کنید. چون این زوج کیهکشان نسبت به هم در حرکت اند، درک شما از فاصله میان آنها کمتر از یک کیلومتر است.

این رشته کیهکشان می تواند بینهایت بلند و

هر جزئی خودش را پیر و سایر اجزا را جوان احساس می کند، و هرچه سایر اجزا دورتر باشند، جوانتر دیده می شوند. توجه کنید که این به این دلیل نیست که مدت زمان زیادی طول می کشد تا نور از اجزای دور به شما برسد، بلکه به این دلیل است، که هرچه اجزا از شما دورتر باشند، سرعت آنها نسبت به شما بیشتر است.

این اثر نسبی زمان در مورد هر سازوکاری که اجزای متحرک داشته باشد صادق است: هرچه یک جزء سریعتر حرکت کند، زمان کندتر بر آن می گذرد. علی الاصول نمی توان به سازوکاری که اجزای متحرک دارد عمری نسبت داد. این موضوع در اکثر سازوکارها، عملاً، بی اهمیت است، اما در مورد سازوکار عالم به عنوان یک کل دارای اهمیت اساسی است.



شکل ۴-۶

هر کدام یک کیلومتر بر ساعت سریعتر از همسایه‌اش در حرکت باشد، اما شما سرعت این کهکشانهای بینهایت دور را بینهایت سریع اندازه‌گیری نمی‌کنید. سرعت دورترین کهکشان نسبت به شما سریعتر از سرعت نور نیست و فاصلهٔ میان زوج کهکشانی که با سرعت نور حرکت می‌کنند تا صفر منقبض می‌شود.

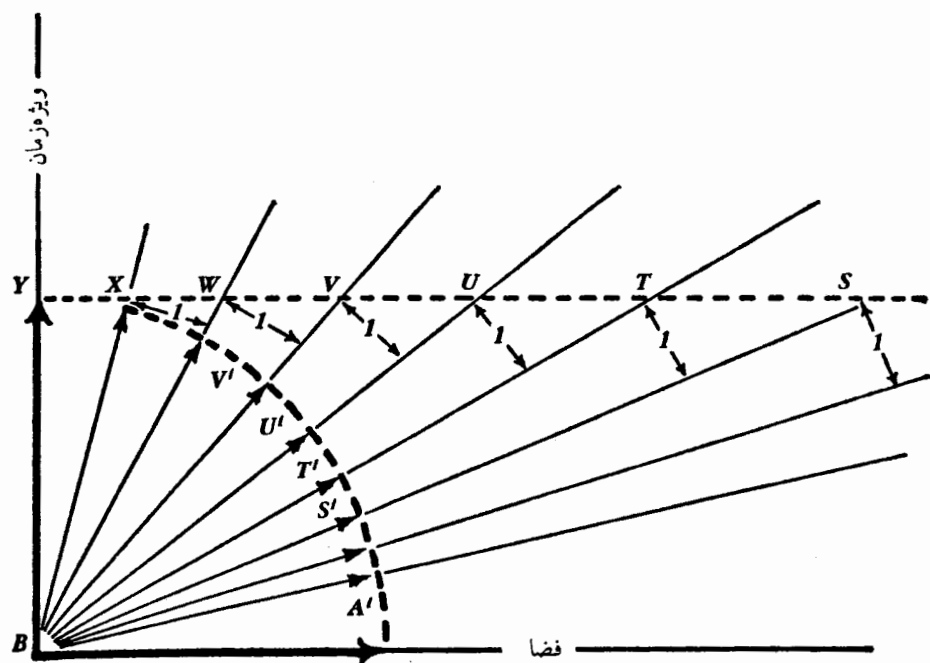
تمامی کهکشانهای مجاور فاصلهٔ میان خود را یکسان و سرعت خود را نسبت به همدیگر مساوی می‌بینند. ظاهراً این مسئله اصل کیهان‌شناختی را برآورده می‌کند. آیا همین امر می‌تواند مدل عالم در حال انبساط باشد؟ نه کاملاً.

در یک عالم در حال انبساط ویژه‌فاصلهٔ میان زوج کهکشانهای مجاور با افزایش عمر افزایش می‌یابد. اگر ناگهان ویژه‌فاصلهٔ میان تمامی زوج کهکشانهای مساوی شود، کل عالم همزمان یک عمر پیدامی‌کند؛ و این ناممکن است. اما شما به کمک نمودار فضا-زمان می‌توانید مدلی که تمامی این شرایط را برآورده کند، رسم کنید.

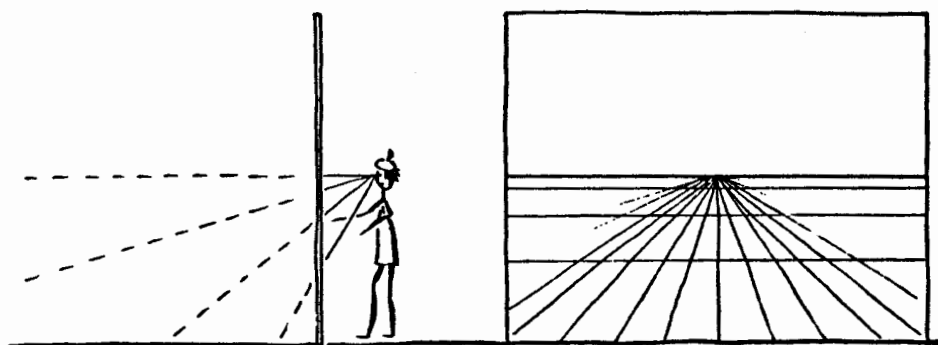
مهبانگ در B است و کهکشانهای در امتداد خطوط BW ، BX ، BY ، و به همین ترتیب حرکت می‌کنند. هنگامی که هر کهکشان به خط افقی (عبور کرده از Y) رسید، عمر آن برابر ویژه‌زمان BY است، و بنابراین در آن عمر، کهکشانهای به طور ویژه به اندازهٔ یک کیلومتر از کهکشانهای مجاور فاصله‌دارند. اما توجه داشته باشید که این کهکشانهای همه

همزمان به یک عمر نمی‌رسند. زمانی که شما اندازه می‌گیرید و لازم است تا کهکشان شما به عمر یک کیلومتر - جداربرد برابر است با طول BY . زمانی که شما اندازه می‌گیرید و لازم است تا کهکشان V به عمر یک کیلومتر - جدا (زمان مختصاتی) برسد، برابر است با طول BV .

در این مدل باید بینهایت کهکشان وجود داشته باشد، بنابراین هیچ کهکشانی نمی‌تواند آخرین کهکشان در مرز عالم باشد، درست همان‌طور که هیچ عددی نمی‌تواند آخرین عدد باشد. اما، اگر بنا باشد شما عالم را، وقتی که کهکشان شما به Y می‌رسد، بررسی کنید متوجه می‌شوید که سایر کهکشانهای روی یک دایرهٔ فضا-زمان به شعاع BY و به مرکز مهبانگ قرار دارند. هر کهکشان یک ویژه‌عمر و ویژه‌فاصلهٔ متفاوت از شما دارد. در نزدیکی A' ویژه‌عمرها تقریباً صفر است (عمر آتشگوی). در A' شما لبهٔ عالم را مشاهده می‌کنید. اگر، در این مدل، عالم برای همیشه انبساط می‌یابد چگونه می‌تواند لبه داشته باشد و شما آن را ببینید؟ درست همان‌طور که یک هنرمند لبهٔ یک سطح تخت را در افق می‌بیند، در حالی که سطح برای همیشه انبساط می‌یابد.



شکل ۵-۶



شکل ۶-۶

فضا هندسه را می‌سازد؛ فضا و زمان جنبش (انیمیشن)
ایجاد می‌کنند؛ و جرم، فضا، و زمان عالم را می‌سازند

۷

پایه سوم

جرم

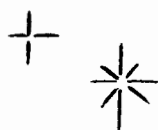
در فصل دوم تأکید کردیم که تغییر مفاهیم متعارف فضا و زمان به معنای تغییر بنیان تمامی فیزیک عالم است. اکنون با فرض اینکه چنین تغییری داده باشیم، ببینیم چه پیش می‌آید.

این یک واقعیت قابل توجه است که تمامی کمیتهای فیزیک، مانند نیرو، تکانه، انرژی، سرعت، گشتاور نیرو، و نظایر آنها را می‌توان بر حسب فقط سه اندازه فیزیکی بیان کرد: فضا (متر)، زمان (ثانیه)، و جرم (کیلوگرم). این واقعیت در مُهر انجمن فیزیک امریکا به صورت خط کش، آونگ، و کیلوگرم آمده است (شکل ۷-۱). با تغییر فضا و زمان، اکنون باید به پایه سوم سه پایه‌ای که فیزیک بر آن مستقر است، یعنی پایه جرم، توجه کنیم.

جرم از دو طریق خود را بر حواس ما می‌نمایاند: اول از طریق وزن که به گرانش



شکل ۱.۷



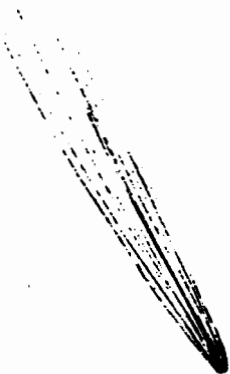
وابسته است و از مکانی به مکان دیگر تغییر می‌کند (در مشتری افزایش می‌یابد و در ماه کم می‌شود). گرانی در فصلهای ۹ تا ۱۲ بحث خواهد شد. دوم لختی؛ لختی عبارت از مشکلی که در به حرکت درآوردن یا از حرکت بازداشتن اشیا (بدون توجه به اصطکاک) ایجاد می‌شود. حتی در فضاهاهی خیلی دور که در آنها گرانی اندک است و هیچ‌گونه اصطکاک و وجود ندارد، باز هم اجسام لختی دارند؛ به همین دلیل است که کشتیهای فضایی برای مانورهای میان‌برد خود نیاز به موتورهای موشکی دارند.

تکانه (اندازه حرکت)

مشکلی که در به حرکت درآوردن یا از حرکت بازداشتن اجسام ایجاد می‌شود به سرعت و جرم آنها بستگی دارد. مثلاً ضربهٔ بُکس به سرعت حرکت مشت و به وزن مُشت بستگی دارد. اگر هنگام بُکس زدن وزنه‌ای در داخل مشت خود بگذاریم، اثر ضربهٔ بُکس به همان نسبت افزایش می‌یابد. فیزیکدانان این موضوع را با رابطهٔ زیر بیان می‌کنند

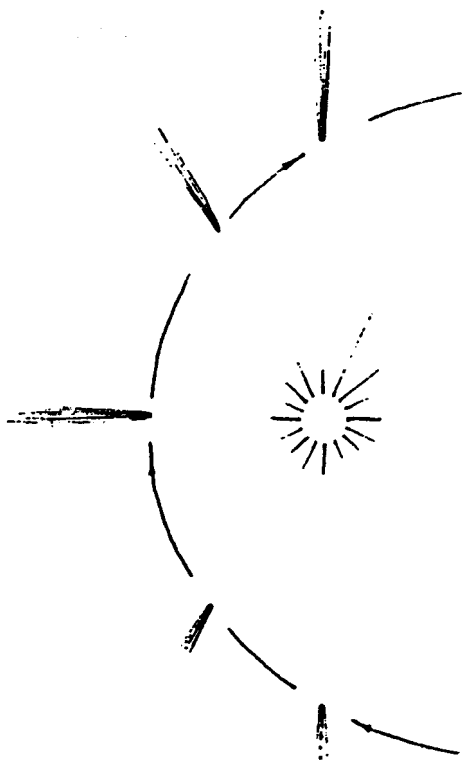
$$\text{تکانه} = \text{جرم} \times \text{سرعت}$$

اگر چیزی با شما تصادم کند و در عین حال ضربه داشته باشد، آنگاه آن چیز جرم هم باید داشته باشد. این بیان ظاهراً خیلی عمیق نیست، اما مستقیماً به یک پینش منجر می‌شود. مدت ۵ قرن است که معلوم شده است دنبالهٔ دنباله‌دارها همواره در جهت دور شدن از



شکل ۲-۲. دنباله‌دارها درست بعد از غروب آفتاب یا قبل از طلوع آفتاب به راحتی دیده می‌شوند. دُم آنها در جهت دور شدن از خورشید قرار دارد و به داخل قسمت تاریک آسمان امتداد می‌یابد.

خورشید قرار دارد. وقتی دنباله‌داری از خورشید دور می‌شود، دُم آن در جلو حرکت می‌کند. این مسئله را این‌طور تبیین می‌کنند که نور خورشید نیرویی بر ذرات گردوغبار و بلورهای یخ موجود در دُم دنباله‌دار وارد می‌کند، که به آن فشار تابش می‌گویند؛ همان



شکل ۲-۳. بعضی دنباله‌دارهای بزرگ دارای دانه‌هایی هستند که بزرگتر از خورشید و دُم آنها از شعاع مدار زمین بلندتر است. هنگامی که این دنباله‌دارها به خورشید نزدیک می‌شوند، دُم آنها بزرگ می‌شود.

۱. اکنون می‌توان گفت که امواج صوت و زمین‌لرزه باید نوعی جرم داشته باشند، زیرا حامل انرژی هستند. این گفته درست است. اما، که البته همین "اما" مهمتر است، این درواقع به نگرانی است.

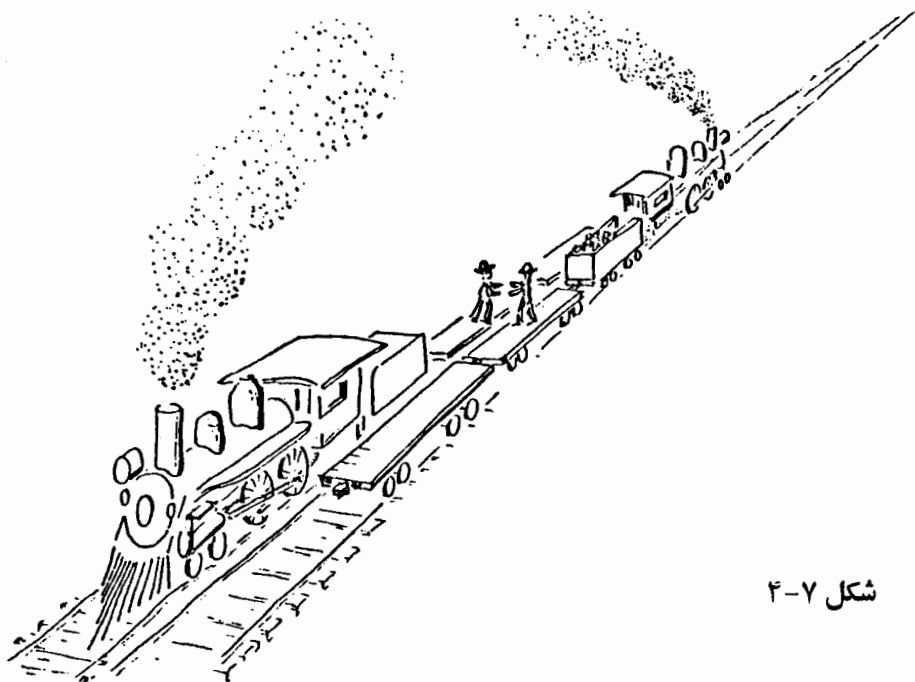
نیروی که مانع فرورمیدن خورشید بر اثر گرانی خود می‌شود. اگر نور خورشید بر دُم دنباله‌دار نیرو وارد کند، بنابراین باید ضربه داشته باشد. اگر ضربه وارد کند باید جرم داشته باشد! هرچه نور درخشانتر باشد، جرم آن بیشتر است. توجه کنید که تمامی انواع امواج حامل انرژی هستند. اما فقط امواج نور حامل جرم و تکانه هستند. هوا و زمین جرم دارند، اما این جرم، جرم موج نیست. حتی اگر موجی هم وجود نداشته باشد، این جرم به قوت خود باقی است. وانگهی، امواج صوتی و زمین‌لرزه حامل تکانه نیستند، اما در عوض به مقدار مساوی نیروی مثبت و منفی وارد می‌کنند، به گونه‌ای که اثر کلی آنها به نیروی خالص و تکانه صفر منجر می‌شود. صوت دود سیگار را در هوا پخش نمی‌کند، و زمین‌لرزه‌ها فقط تکان دهنده هستند، بولدوزر نیستند.

هنگام بررسی مفهوم جرم، نور مفهوم تازه‌ای پیدا می‌کند. در واقع، این خط فکری را می‌توان بازهم بیشتر تعمیم داد. اگر انرژی نور جرم دارد و می‌تواند به اشکال دیگر انرژی، چون انرژی گرمایی و انرژی الکتریکی تبدیل شود، در این صورت دیگر اشکال انرژی نیز باید جرم داشته باشند. در غیر این صورت، جرم ناپدید می‌شود. چون تمامی اشکال انرژی را می‌توان به یکدیگر تبدیل کرد، می‌توان استدلال کرد که تمامی اشکال انرژی باید جرم داشته باشند! در فصل بعد به این موضوع می‌پردازیم.^۱

دعوای دوقلوها

هنگام مشت زدن، مدتی طول می کشد تا مشت از بدن جدا شود و دست کاملاً به حالت کشیده درآید. فرض کنید این مدت $1/10$ ثانیه باشد. پویا می بیند که مشت نازنین در راه است. اما فراموش نکنید که نازنین روی قطاری است که با سرعت نزدیک به سرعت نور از کنار پویا می گذرد؛ بنابراین هر اتفاقی که روی قطار نازنین می افتد، از جمله پرتاب مشت او، به نظر پویا با حرکت آهسته صورت می گیرد. پویا فکر می کند که مشت با حرکت آهسته نازنین تکانه زیادی ندارد، در حالی که تکانه مشت خودش خیلی زیاد است. بنابراین، به نظر او وقتی مشتش به مشت نازنین برخورد کند آن را به عقب می راند و توی دهن نازنین می زند.

تاکنون بحث جرم (و نور) کاملاً مبتنی بر ایده های قبلاً اثبات شده اینشتین بود. اکنون می خواهیم نشان بدهم که چگونه نسبت داخل می شود. فرض کنید دو قطار (که تقریباً با سرعت نور در حرکت اند) در جهت های مخالف از کنار یکدیگر رد می شوند. یکی از دوقلوها، نازنین، در یک قطار و دیگری، پویا، در قطار دیگر است. همچنان که میان بچه ها معمول است، این دو با هم دعوا می کنند. پویا می خواهد، وقتی نازنین از کنار او رد شد با مشت به او بزند و نازنین هم همین کار را می خواهد بکند.



شکل ۲-۴

تکانه مشت پویا که به نازنین ضربه می زند

تکانه مشت نازنین بر اثر حرکت قطار. نازنین این تکانه را وارد نمی کند؛ قطار وارد می کند و بنابراین از کنار پویا رد می شود.

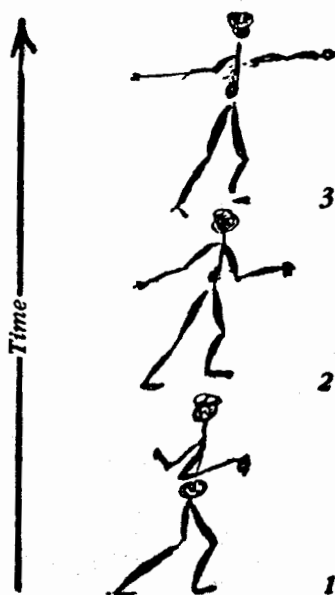
تکانه مشت پویا بر اثر حرکت قطار. پویا این تکانه را وارد نمی کند؛ قطار وارد می کند و بنابراین از کنار نازنین رد می شود.

تکانه مشت نازنین که به پویا ضربه می زند

شکل ۲-۵

می کشد، در حالی که زمان مشت خودش، همان ویژه زمان $1/10$ ثانیه ای است. بنابراین، به نظر نازنین، تکانه مشت او خیلی بیشتر از تکانه مشت پویاست، و فکر می کند که وقتی

آنچه به نظر نازنین می رسد، تصویر آینه ای چیزی است که به نظر پویا رسیده است. به نظر او زمان بر قطار پویا کند می گذرد، و مشت $1/10$ ثانیه ای پویا دو ثانیه طول

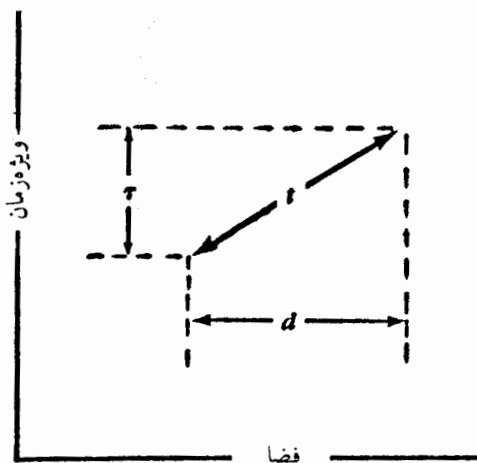


شکل ۷-۶. مشت زدن مدتی طول می‌کشد. اگر سرعت گذر زمان کم شود ضربه به یک ضربه با حرکت آهسته تبدیل می‌شود.

مشتش به مشت پویا برخورد کرد آن را به عقب می‌راند و توی دهن پویا می‌زند.

وقتی لحظه موعود فرارسید و مشتها به هم برخورد کردند، انتظارات کدام طرف برآورده می‌شود؟ نازنین یا پویا؟ وضعیت کاملاً متقارن است. در اینجا تقارن حکم می‌کند. هیچ‌کدام نمی‌تواند مشت دیگری را عقب براند و توی دهن او بزند. اثر ضربه‌ها خنثی‌کننده است: مشتها با تکانه مساوی و مخالف باهم برخورد می‌کنند.

پویا حیرت‌زده می‌شود. چطور ممکن است ضربه مشت حرکت - آهسته نازنین برابر ضربه مشت خودش باشد؟ پویا استدلال می‌کند که تنها به یک طریق ممکن است ضربه مشت نازنین برابر ضربه مشت خود او باشد و آن این است که نازنین پنجه‌بکس داشته باشد. همین طور، نازنین استدلال می‌کند که پویا پنجه‌بکس دارد.

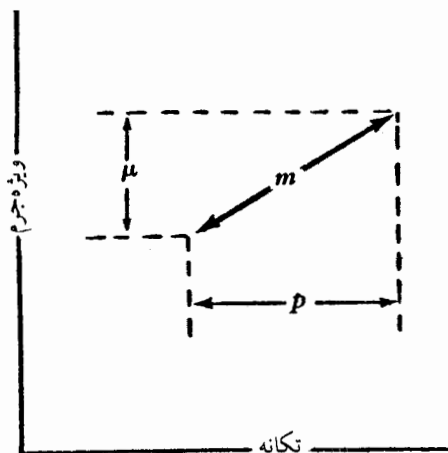


شکل ۷-۷. وقتی یک جسم مسافت d را طی می‌کند، ساعت همراه آن ویژه زمان τ و ساعت شما، که با جسم در حرکت نیست، زمان مختصاتی t را نشان می‌دهد.

پنجه‌بکس استفاده کرده‌اند. این یک اثر نسبییتی جدید است. درست همان‌طور که حرکت زمان را ناهمزمان و کند و فضا را منقبض می‌کند، بر جرم نیز اثر می‌کند. حرکت باعث می‌شود که جرم اندازه‌گیری شده یک جسم با افزایش سرعت افزایش یابد. چقدر جرم افزایش می‌یابد؟ از روی این داستان شما می‌توانید ببینید که جرم باید با همان ضریبی که سرعت زمان (و سرعت ضربه‌های مشت) کاهش می‌یابد افزایش یابد. یعنی، هرچه زمانی که برای زدن ضربه با مشت صرف می‌شود طولانی‌تر باشد، جرم اندازه‌گیری شده مشت بیشتر است.

این ایده را به راحتی می‌توان با تصویر نمایش داد. به نظر دوقلوها، ضربه در ویژه زمان τ زده می‌شود. اما در حین اینکه پویا با مشت ضربه می‌زند، شما مشاهده می‌کنید که قطار به اندازه مسافت d پیش رفته است و زمان سپری شده را t اندازه‌گیری می‌کنید. t از τ بیشتر است؛ و به همین دلیل ضربه با حرکت آهسته به نظر می‌رسد.

در این صورت جرم مشت، که شما آن را اندازه می‌گیرید، باید دقیقاً به همان نسبت t به τ از ویژه جرم بیشتر باشد. بنابراین نمودار جدیدی شبیه به نمودار فضا-زمان رسم و در آن جرم مشت را هنگامی که حرکت نمی‌کند متناسب با τ تعیین کنید. این مقدار را جرم سکون یا ویژه جرم، μ ، می‌نامند. در این صورت، جرم دینامیک اندازه‌گیری شده مشت، m ، متناسب با t است. بنابراین اگر τ با μ



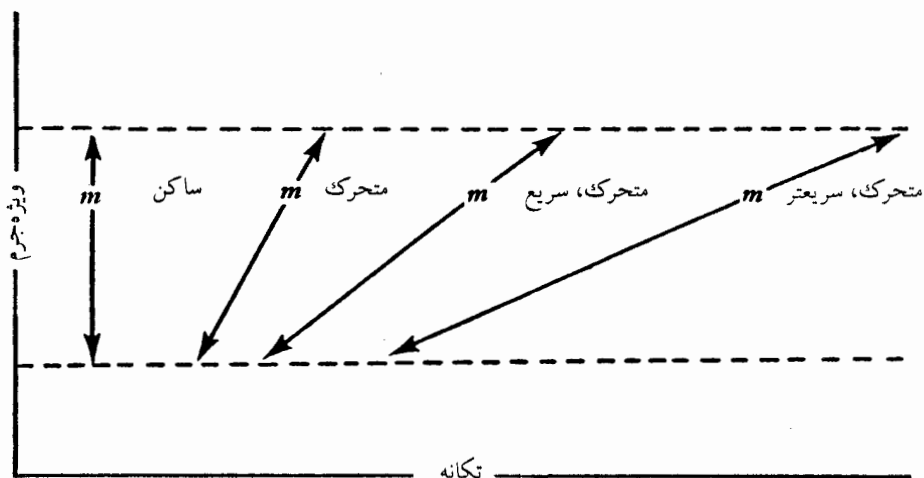
شکل ۷-۸. تکانه جسمی که در شکل ۷-۷ در حال حرکت است p و جرم سکون آن μ است. شما که با جسم در حرکت نیستید، جرم در حال حرکت آن را، که غالباً به آن جرم دینامیکی یا مختصاتی می‌گویند، m ، اندازه‌گیری می‌کنید. شکل‌های ۷-۷ و ۷-۸ از لحاظ هندسی مشابه یا متناسب‌اند. این بیان در جبر به این معنی است که:

$$d/p = \tau/\mu = t/m = k$$

k را ضریب تناسب می‌گویند. با گذشت زمان d ، τ ، و t افزایش می‌یابند و شکل ۷-۷ بزرگتر می‌شود. اگر سرعت جسم در حال حرکت تغییر نکند، p ، μ ، و m در نتیجه شکل ۷-۸ تغییر نمی‌کند. بنابراین، با گذشت زمان k ، ثابت تناسب، باید افزایش یابد.

جرم نسبی

درواقع، هیچ‌کدام از دوقلوها پنجه‌بکس نداشتند، اما ضربه‌ها طوری بود که گویی از



شکل ۲-۹

استدلال، یک استدلال کامل نیست. چرا؟ برای اینکه، به عنوان مثال، موتور اتومبیل که به آن شتاب می‌دهد همراه با اتومبیل در حرکت است و جرم اتومبیل همان ویژه جرم سکون تغییر نیافته اتومبیل باقی می‌ماند. وانگهی، بعضی نیروها، مانند گرانی، با افزایش جرم افزایش می‌یابند، و بنابراین برای آنها جرم نمی‌تواند شتاب را محدود کند. کمی بعد به این موضوع برمی‌گردم.

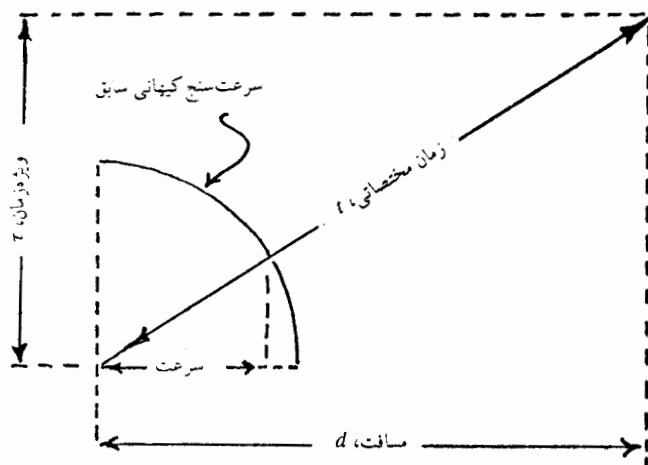
متناسب باشد l متناسب با m می‌شود. به راحتی دیده می‌شود که جرم (و تکانه) دینامیک هر جسم، با نزدیک شدن سرعت آن جسم به سرعت نور، بینهایت بزرگ می‌شود، حتی اگر ویژه جرم سکون آن بدون تغییر باقی بماند. گاهی این تبیین به عنوان دلیلی برای اینکه اجسام نمی‌توانند از نور تندتر بروند ارائه می‌شود: جرم اجسام در سرعت‌های نزدیک به سرعت نور به قدری افزایش می‌یابد که شتاب بیشتر امکان‌ناپذیر می‌شود. اما این

تکانه نسبی

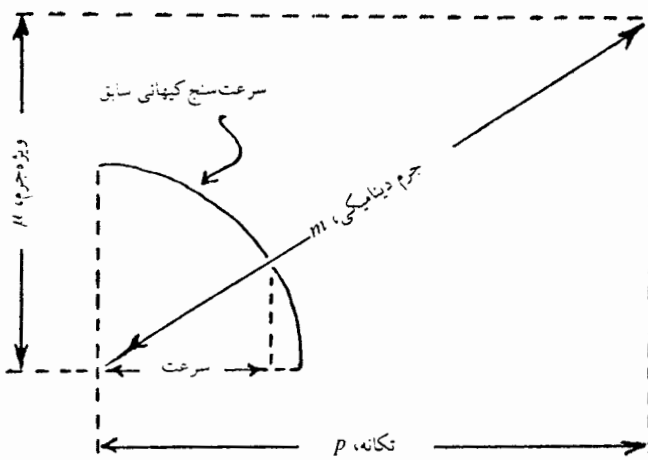
اگر τ ، ویژه زمان، به l ، ویژه جرم، و t زمان مختصاتی (زمان ناظر) به m ، جرم دینامیکی، آن طور که ناظر اندازه می‌گیرد، تبدیل شود. آنگاه چه چیزی به l ، مسافت طی شده توسط قطار تبدیل خواهد شد.

l سایه t بود، بنابراین به p ، سایه m تبدیل می‌شود. طول سایه m به دو چیز بستگی دارد: اول طول m ، و دوم نسبت طول سایه به طول m . این نسبت برابر است با نسبت d به l (فاصله

طی شده توسط قطار به زمان لازم برای طی آن فاصله، که عبارت است از سرعت قطار. بنابراین، p ، سایه m ، برابر است با جرم دینامیکی مشت ضربدر سرعت قطار. جرم ضربدر سرعت همان ضربه یا تکانه است. یعنی، p باید تکانه جرم متحرک باشد. به طور خلاصه، اگر ویژه زمان به ویژه جرم تبدیل شود، آنگاه زمان مختصاتی به جرم دینامیکی، و فاصله به تکانه تبدیل می شود. توجه کنید که تکانه p ضربه ای نیست که یکی از دو قلوها حواله دیگری می کند، بلکه تکانه مشت ناشی از سرعت قطار است. این سرعت و تکانه بزرگ باعث می شوند که سرعت و تکانه کوچکتر مشت دو قلوها کوچک به نظر برسد.

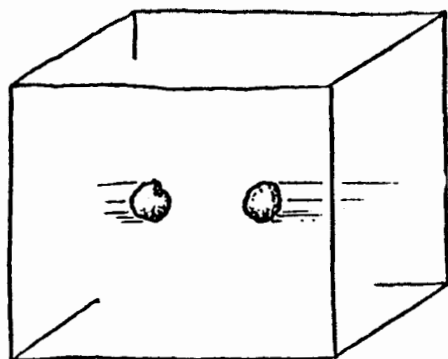


شکل ۷-۱۰

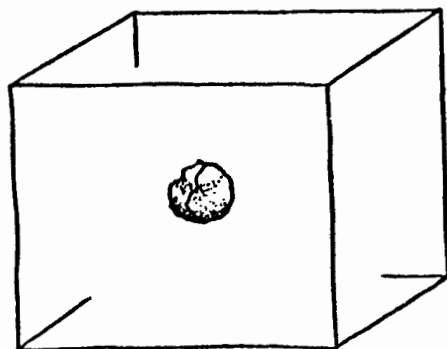


شکل ۷-۱۱

انرژی وزن دارد



شکل ۷-۱۲

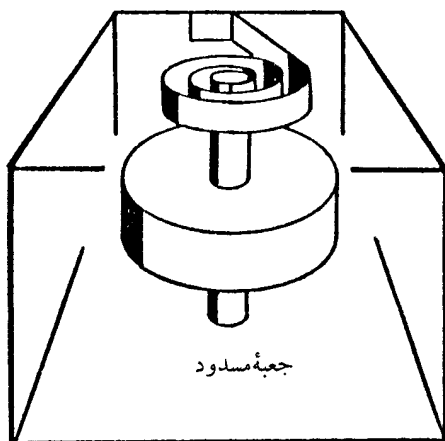


شکل ۷-۱۳. این برخورد، جرم کل یا انرژی کل داخل جعبه مسدود را تغییر نمی‌دهد.

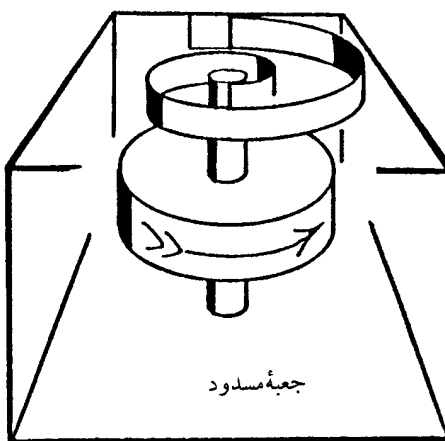
از بحثی که تاکنون داشتیم ممکن است این تصور پیش بیاید که جرم دینامیکی هر شیئی به تکانه یا سرعت آن بستگی دارد؛ اما این طور نیست. فرض کنید یک جعبه کاملاً مسدود در اختیار دارید. داخل جعبه دو تکه گل رس به طرف همدیگر در حرکت‌اند و با هم برخورد سر به سر می‌کنند. بعد از برخورد این دو تکه از حرکت باز می‌ایستند. آیا بعد از اینکه تکه‌های گل رس از حرکت باز ایستادند، جرم داخل جعبه کاهش می‌یابد؟ چگونه جرم می‌تواند خارج شود؟ جعبه مسدود است. همچنین فرض کنید که یک جعبه کاملاً بسته دارید که یک فنر کوک شده و یک چرخ لنگر در داخل آن است. وقتی کوک فنر خالی می‌شود چرخ لنگر را به گردش درمی‌آورد. جرم چرخ لنگر در حال حرکت از جرم چرخ لنگر ساکن بیشتر است. این جرم اضافی چرخ از کجا می‌آید؟ از کجا وارد جعبه کاملاً بسته می‌شود؟

در هر دو حالت جرم از جعبه خارج و به آن داخل نمی‌شود. جرم داخل جعبه در داخل جعبه باقی می‌ماند. البته، جرم تکه‌های گل رس ساکن از تکه‌های گل در حال حرکت کمتر است، اما این "کمبود" جرم جایی در داخل جعبه "مخفی" شده است. کجا؟ چه چیز در داخل جعبه بعد از برخورد یافت می‌شود که قبل از برخورد نبوده است؟ گرمای حاصل از برخورد. شاید کمبود جرم در داخل گرما باشد!

جرم چرخ لنگر در حال چرخش یقیناً از جرم چرخ لنگر ساکن بیشتر است، اما این جرم اضافی از کجا داخل جعبه تولید می‌شود؟ وقتی چرخ شروع به چرخیدن کرد، چه چیزی



شکل ۷-۱۴. در این نمودار، فنر کاملاً کوک شده است و چرخ لنگر نمی چرخد.



شکل ۷-۱۵. در این نمودار کوک فنر خالی می شود و چرخ می چرخد. هرچه فنر از دست می دهد چرخ می گیرد.

در داخل جعبه تغییر می کند؟ کوک فنر خالی می شود. پس جرم اضافی باید ناشی از فنر باشد! اما هیچ جرمی از فنر خارج نمی شود، بلکه، همراه با خالی شدن کوک انرژی از آن خارج می شود. پس انرژی باید جرم داشته باشد!

در هر دو حالت تمامی انرژی در داخل جعبه می ماند. تکه های گل دقیقاً همانقدر انرژی گرمایی تولید می کنند که انرژی جنبشی از دست می دهند، بنابراین اگر انرژی جرم داشته باشد، هیچ تغییری در کل جرم داخل جعبه ایجاد نمی شود. چرخ لنگر انرژی جنبشی و جرم را از فنر می گیرد؛ این گفته دقیقاً به این معنی است که جرم فنر کوک شده از جرم فنی که کوک آن خالی می شود بیشتر است!

کوک کردن فنر نه سرعت آن را افزایش می دهد و نه تکانه آن را. کوک کردن فقط انرژی فنر را افزایش می دهد. بنابراین، معلوم می شود که افزایش انرژی، و نه افزایش سرعت یا تکانه، موجب افزایش جرم می شود. معمولاً افزایش سرعت به معنای افزایش انرژی است، اما افزایش انرژی همواره به معنای افزایش سرعت نیست. این اثر جرم پیامد مستقیم اما پیش بینی نشده (با تعجب ایشیتین) تغییر مفاهیم فضا و زمان است.

با این حال، وزن گرما یعنی چه؟ وقتی یک ساعت جیبی را کوک می کنید، وزن آن چقدر افزایش می یابد؟ وزن انرژی چقدر است؟ این موضوعی است که در فصل بعد به آن می پردازم.

نیروی جنبش

در زمان گالیله تمایز میان انرژی و تکانه شناخته نشده بود. هر جسم در حال حرکت صرفاً چیزی به نام نیروی جنبش^۱ در اختیار داشت (همچنانکه به هر جسم الکتریسته‌دار شده چیزی به نام "مایع صمغی"^۲ یا شیشه‌ای^۳، که برق‌کاران هنوز آن را عصاره^۴ می‌نامند، و به هر جسم گرم‌شده چیزی به نام "کالریک"^۵ داده می‌شد).

وقتی شما سنگی را پرتاب می‌کنید، می‌توانید احساس کنید که نیروی جنبش از ماهیچه‌های بازوی شما به کف دست، و از کف دست به صورت فشار به سنگ منتقل می‌شود. تا زمانی که این نیروی جنبش در جسم وجود دارد می‌تواند پرواز کند. وقتی سنگ پرتاب‌شده با دیواری برخورد کند، قسمتی از نیروی جنبش به دیوار منتقل و باعث آسیب رساندن به آن می‌شود، و قسمت دیگر به هوا می‌رود و صوت تولید می‌کند. سنگ، که تمامی نیروی جنبش خود را از دست می‌دهد، به زمین می‌افتد. همچنین وقتی شما سنگ بزرگی را از زمین بلند می‌کنید، می‌توانید جریان نیروی جنبش را احساس کنید. اما در این باره که هنگام سقوط سنگ چه مقدار نیروی جنبش آزاد می‌شود، یک بحث جدی در گرفت.

گالیله نشان داد که اگر فاصله سقوط سنگ چهاربرابر افزایش یابد، سرعت آن هنگام برخورد فقط دوبرابر می‌شود. (گالیله این نتیجه را از لحاظ نظری به دست آورد و به قدری باعث تعجب او شد که ناچار شد آن را از طریق تجربی بیازماید. برخلاف تصور عامه، گالیله، مانند بیشتر فیزیکدانان نظری، ترجیح می‌داد از طریق نظری به نتایج برسد، نه از طریق آزمایش.) فیلسوفان فرانسوی نتیجه کار گالیله را این طور تعبیر کردند که هنگامی که سرعت سنگ دوبرابر می‌شود، نیروی جنبش آن چهاربرابر افزایش می‌یابد. به نظر انگلیسیها با دوبرابر شدن سرعت سنگ، نیروی جنبش آن فقط دوبرابر می‌شود.

این مجادله با معرفی مفاهیم انرژی و تکانه حل شد. انرژی همان نیروی جنبش فرانسوی بود: نیروی جنبش فرانسوی چهاربرابر و نیروی جنبش انگلیسی فقط دوبرابر افزایش می‌یافت. نیروی

۱. در کتاب اصلی معادل انگلیسی این واژه Impedo آمده است که با احتمال زیاد غلط است. معادل درست آن Impetus است به معنی نیروی جنبش، قوه حرکت آتی، محرک، و مانند آن. - م.

2. resinous humor

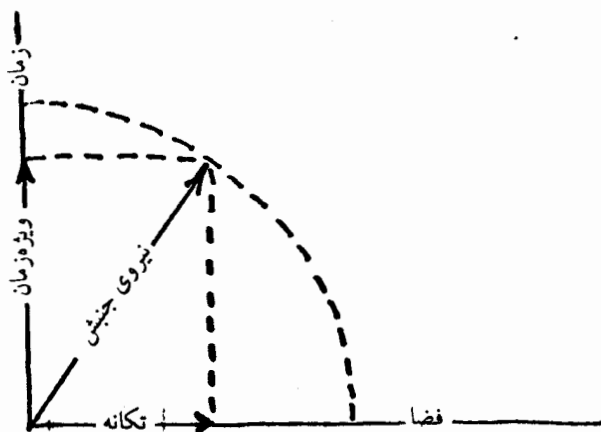
3. vitreous humor

4. juice

5. caloric

جنبش انگلیسی تکانه^۱ بود. اما یک چیز، به نام نیروی جنبش، چگونه می توانست در عین حال دو چیز باشد: یکی انرژی و دیگری تکانه. چیزی دقیقاً همانند مسئله دوگانگی موجی - ذره ای در نور. این مسئله با کنار گذاشتن واژه نیروی جنبش از واژگان فیزیک حل شد، درست همانند واژه اتر.

اما روح واژه نیروی جنبش، همانند روح واژه اتر، قوی است. نیروی جنبش این بار با نام دور و دراز "تکانه چهار - بردار" در فیزیک ظاهر شد، که برداری است با سه مؤلفه فضایی، معادل تکانه سه بعدی یک ذره و یک مؤلفه چهارم از طریق زمان، معادل انرژی ذره.

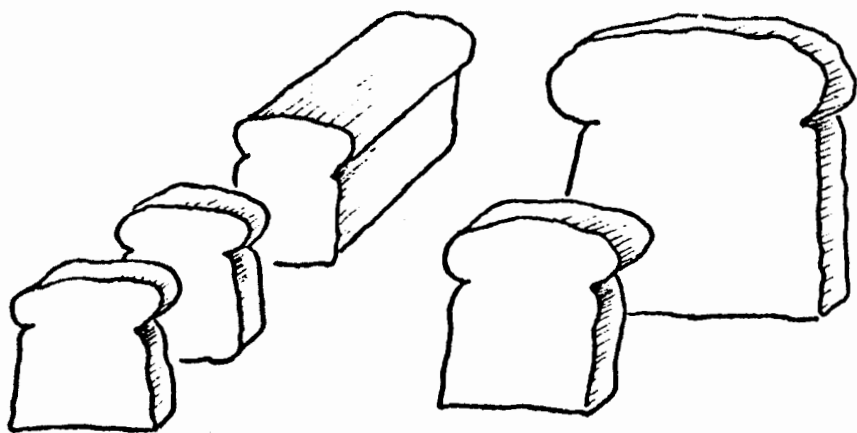


شکل ۲-۱۶

۱. تفکر انگلیسیها تحت تأثیر نیوتون بود که مکانیکش را بر تکانه بنانهاده بود؛ نیوتون تکانه را مقدار حرکت نامید. تفکر فرانسویها از لاگرانژ الهام می گرفت، که مکانیکش مبتنی بر انرژی بود. لاگرانژ انرژی را *viva viva* به معنی انرژی جنبشی نام گذاشت. چون تکانه برداری بود، به نمودار نیاز داشت. کتاب نیوتون تقریباً در هر صفحه یک نمودار دارد. انرژی اسکالر (نرده ای) بود و لاگرانژ توانست بدون استفاده از نمودار موضوع را مطرح کند. لاگرانژ افتخار می کرد که در کتابش هیچ تصویری دیده نمی شود و در عوض پراز معادله است.

نمودار جرم - تکانه یک اسباب بازی کوک شده یا هر چیزی که با جهان خارج ارتباط ندارد، تعبیر زیر را امکان پذیر می کند. نیروی جنبش، یک خط با طول ثابت است که در جهت حرکت جسم از طریق فضا - زمان قرار دارد. چیزی که شما همیشه می توانید بینید سایه های این خط است. سایه این خط را در فضا تکانه و در زمان ویژه جرم می نامند که متناسب با ویژه انرژی است. وقتی جرم سکون به تابش تبدیل می شود، یا برعکس، بردار نیروی جنبش 90° درجه جابه جا می شود.

ضمناً، مفهوم نیروی جنبش را می توان در فیزیک کلاسیک نیز حفظ کرد. این مفهوم را می توان به صورت یک برش نان در نظر گرفت (شکل ۷-۱۷). قسمت سفید نان انرژی، پوست روی نان تکانه، و ضخامت نان جرم آن است. اگر ضخامت تغییر نکند، اما قسمت سفید چهار برابر افزایش یابد، مقدار پوست نان دوبرابر می شود. اگر سطح مقطع نان تغییر نکند، اما ضخامت دوبرابر شود، هم قسمت سفید و هم پوست نان دوبرابر می شود.



شکل ۷-۱۷

ظاهراً این معادلات باید بسیار سودمند باشند،
وگرنه دانشمندان این همه وقت و انرژی صرف
آنها نمی‌کردند



$$E = mc^2$$

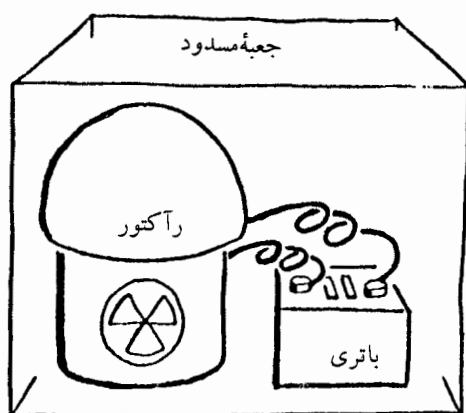
انرژی معادل وزن معادل

وزن انرژی چقدر است؟ برای پاسخ دادن به این پرسش، ابتدا توجه کنید که جرم یک مقدار معین انرژی، مثلاً یک متر - کیلوگرم^۱ باید به نوع یا شکل انرژی بستگی نداشته باشد. این انرژی ممکن است انرژی هسته‌ای در رآکتور، انرژی شیمیایی در باتری، انرژی جنبشی در چرخ اتومبیل، و یا انرژی گرمایی بخار آب باشد. دلیل این گفته روشن است.

یک رآکتور هسته‌ای و یک باتری را در داخل یک جعبه‌مسدود قرار دهید، به گونه‌ای که هیچ چیز نتواند وارد جعبه و یا از آن خارج شود. اکنون فرض کنید رآکتور یک متر - کیلوگرم انرژی الکتریکی تولید می‌کند و این مقدار انرژی را باتری می‌گیرد. رآکتور ضمن تولید انرژی باید مقداری جرم ازدست بدهد.

این جرم نمی‌تواند از جعبه‌مسدود خارج شود. در این صورت، به کجا می‌رود؟ تنها جای ممکن در داخل جعبه‌باتری است. این مقدار جرم همراه با انرژی الکتریکی به داخل باتری می‌رود. اگر بعدها، چیز دیگری (مثلاً نور) این مقدار انرژی را از باتری بگیرد، جرم را نیز همراه با آن خواهد گرفت. یعنی، اگر نور

۱. یک متر - کیلوگرم انرژی برابر است با مقدار انرژی که برای بلند کردن یک وزنه یک کیلوگرمی به اندازه یک متر لازم است. فکر نکنید که وزن این انرژی یک کیلوگرم است، زیرا یک متر - کیلوگرم انرژی همچنین می‌تواند یک وزنه ۲ کیلوگرمی را به اندازه ۱/۲ متر، و یا یک وزنه ۱/۲ کیلوگرمی را به اندازه ۲ متر بلند کند. سایر یک‌های انرژی عبارت‌اند از: کالری، ارگ، ژول، کیلووات ساعت، Btu، و الکترون ولت.



انرژی بگیرد، جرم را نیز می‌گیرد.

اگر بتوان جرم یک متریکلوگرم انرژی از یک نوع مشخص انرژی را، حتی تحت شرایط خیلی ویژه و غیرعادی، پیدا کرد آنگاه جرم یک متریکلوگرم انرژی از تمامی انواع و اشکال انرژی مشخص می‌شود، زیرا، همان‌طور که قبلاً گفتیم، جرم انرژی مستقل از نوع و شکل آن است.

جرم‌دهنده

شکل ۸-۱. اگر یک ترازوی به اندازه کافی حساس داشته باشید، می‌توانید با وزن کردن باتری قبل و بعد از شارژ شدن، وزن مقدار انرژی را تعیین کنید. فعلاً یک چنین باتری حساسی وجود ندارد.

آن راحت است. این همان موقعیت مناسب برای حمله به مسئله است. اما مقدار انرژی داده شده به هر چیز عبارت است مقدار نیروی وارد شده بر آن ضرب در مسافتی که نیرو آن را پیش می‌راند. به عنوان مثال، فرض کنید متریکلوگرم عبارت است از نیروی ۱ کیلوگرم در مسافت یک متر. بنابراین:

$$\text{فاصله} \times \text{نیرو} = \text{انرژی}$$

مسافتی که هر جسم طی می‌کند عبارت است از

جالب اینجاست که محاسبه جرم انرژی داده شده به ذراتی مانند الکترون که با سرعت نزدیک به سرعت نور در داخل شتاب‌دهنده خطی دوکیلومتری دانشگاه استنفورد حرکت می‌کنند راحت‌تر است، زیرا انرژی داده شده هم سرعت و هم جرم جسم سنگین گیرنده انرژی را افزایش می‌دهد. اما اگر جسم انرژی گیرنده قبلاً با حداکثر سرعت ممکن در حرکت باشد، انرژی داده شده سرعت آن را افزایش نمی‌دهد، بلکه فقط جرم آن را تغییر می‌دهد.

گاهی شتاب‌دهنده استنفورد را جرم‌دهنده^۱ می‌گویند زیرا ۹۹ درصد انرژی داده شده به ذرات صرف افزایش جرم آنها می‌شود، نه افزایش سرعت آنها. جرم الکترونیایی که از ماشین استنفورد خارج می‌شوند بیست برابر بیشتر از جرم پروتون است!

وقتی با افزایش انرژی، فقط یک کمیت، مثلاً جرم، تغییر می‌کند هم تحلیل و هم منطق

۱. masserator را در مقایسه با accelerator

که شتاب‌دهنده می‌گوییم جرم‌دهنده ترجمه کرده‌ام. - م.

$$۱۲۹ \quad E = mc^2$$

شدن آهنگ ماسه‌ریزی بر روی نوار، نیروی لازم برای اینکه نوار با سرعت ثابت حرکت کند، دوبرابر می‌شود. اگر ماسه‌ریزی متوقف شود، اعمال نیرو لازم نیست و در صورتی که قرقره‌ها اصطکاک نداشته باشند، نوار با سرعت ثابت حرکت خواهد کرد.

بنابراین نیروی لازم برای حفظ حرکت عبارت است از

$$\text{آهنگ} \times \text{سرعت} = \text{نیرو}$$

یا:

$$f = sr$$

آهنگ ماسه‌ریزی به صورت زیر بیان

می‌شود

$$\text{زمان} / \text{جرم} = \text{آهنگ}$$

یا:

$$r = m/t$$

که بر حسب گرم بر ثانیه بیان می‌شود. اگر در

زمانی که طی آن مسافت صرف می‌شود ضرب در سرعت آن. در نتیجه:

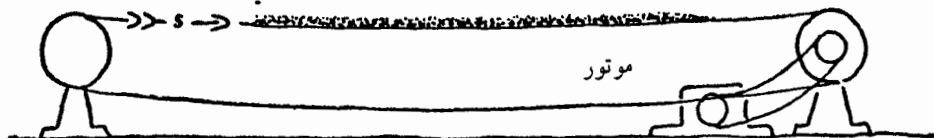
$$\text{سرعت} \times \text{زمان} = \text{نیرو}$$

یا:

$$E = fts$$

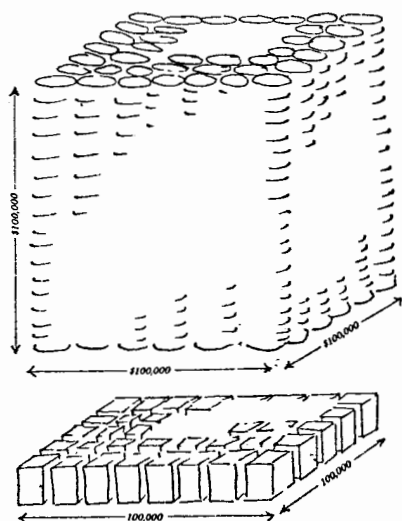
در مورد جسمی که با سرعت نزدیک به سرعت نور حرکت می‌کند، انرژی داده شده فقط جرم را می‌تواند افزایش دهد. اگر جرم جسمی که با سرعت ثابت حرکت می‌کند افزایش یابد، برای اینکه با وجود افزایش جرم سرعت ثابت باقی‌ماند، نیرو لازم است. به عنوان مثال، اگر یک نوارنقاله با سرعت ثابت در حرکت باشد و جرم ماسه روی آن افزایش یابد، برای اعمال نیرو بر نوار و نگهداشتن آن در حال حرکت، موتور لازم است. بدون موتور، حتی اگر قرقره‌های نوار بی‌اصطکاک باشند، با افزایش جرم ماسه حرکت نوار کند می‌شود.

اگر آهنگ ماسه‌ریزی بر روی نوار ثابت باشد، نیروی لازم برای حفظ نوار در حرکت با سرعت آن متناسب است. با دوبرابر شدن سرعت، نیروی لازم دوبرابر می‌شود. اگر سرعت ثابت باقی‌ماند نیروی لازم متناسب است با آهنگ افزایش جرم ماسه. با دوبرابر



که مقدار جرم موجود در انرژی افزوده را به دست می‌دهد.

در این صورت، وزن یک متر - کیلوگرم انرژی چقدر است؟ c بر حسب متر بر ثانیه است؛ با استفاده از ضرایب تبدیل مناسب، معلوم می‌شود که وزن $10^{15} = 1000000000000000$ متر - کیلوگرم انرژی یک مقدار بسیار اندک است. بنابراین تعجبی ندارد که اگر هنگام کوک کردن ساعت جیبی خود اضافه وزن احساس نکنید.



شکل ۸-۳. چگونه می‌توانید اعداد بزرگ را

مجسم کنید؟ به عنوان مثال، فرض کنید $10^{15} = 1000000000000000$ (یک و

۱۵ صفر) یک توده بزرگ از بسته‌های مکعبی باشد. عرض این توده مکعبی ۱۰۰۰۰۰ بسته، طول آن ۱۰۰۰۰۰، و ارتفاع آن نیز ۱۰۰۰۰۰ بسته است. حجمی که این توده مکعبی اشغال می‌کند برابر است با:

$$100000 \times 100000 \times 100000 = 10^{15}$$

معادله نیرو، به جای c مقدار مساوی آن، sm/t قرار دهیم داریم

$$f = sm/t$$

اکنون اگر در معادله انرژی، به جای f مقدار مساوی آن یعنی sm/t قرار دهیم داریم

$$E = (sm/t) (ts) = ms^2$$

مسافت x نیرو E با ساده کردن معادله بالا به نتیجه زیر

می‌رسیم

$$E = mss$$

که نشان می‌دهد انرژی E اضافه شده به نوار انتقاله برای اینکه آن را در حرکت نگه‌دارد، برابر است با جرم (m) افزایش یافته ضرب در سرعت (s) که جرم با آن حرکت می‌کند و باز هم ضرب در سرعت (s)، تنها به این شرط که سرعت نوار در طول این داستان تغییر نکند.

اگر جسمی، مانند الکترون، با سرعتی نزدیک به سرعت نور در حرکت باشد، سرعت آن تغییر نمی‌کند؛ این سرعت را c می‌نامند. با افزایش انرژی به این جسم فقط جرم آن افزایش می‌یابد. با قرار دادن c به جای سرعت، s ، در معادله قبلی داریم

$$E = mss$$

یا:

$$E = mc^2$$

به کمک این معادله می‌توانیم مقدار انرژی موجود در جرم افزایش یافته را محاسبه کنیم. از طرفی معادله بالا را می‌توانیم بر حسب m بنویسیم. در این صورت داریم

$$m = E/c^2$$

اهمیت سرعت نور

چرا سرعت نور مهم است؟ زیرا معلمان فیزیک به کمک آن می‌توانند ثابت کنند که معادله معروف نیرو برابر است با جرم ضرب در شتاب، یا

$$f = ma = m \, dv/dt$$

آن طور که بعضیها ناآگاهانه می‌اندیشند، یک معادله کامل نیست. معادله کامل عبارت است از:

$$f = m \, dv/dt + v \, dm/dt$$

این معادله نشان می‌دهد که حتی اگر شتاب، dv/dt ، نیز صفر باشد، در صورتی که جرم جسم متحرک با زمان تغییر کند، نیرو صفر نمی‌شود. شما غالباً می‌توانید همان شکل ناکامل را به کار ببرید. به عنوان مثال، این رابطه به همان معادله آشنای انرژی جنبشی منجر می‌شود، که بنا به آن:

چون انرژی برابر است با نیرو ضرب در فاصله، تغییرات انرژی عبارت است از

$$dE = f \, dx$$

اگر $f = m \, dv/dt$ و $dx = v \, dt$ باشد، آنگاه

$$dE = (m \, dv/dt) (v \, dt) = m \, v \, dv$$

با انتگرال گرفتن از این رابطه، داریم

$$E = \frac{1}{2} m v^2$$

که همان معادله کلاسیک انرژی جنبشی است. اما این معادله فقط وقتی برقرار است که سرعت خیلی کمتر از سرعت نور و جرم ثابت باشد. برای اثبات اینکه این معادله واقعیت را به طور کامل نمی‌رساند، ثابت بودن سرعت نور اهمیت پیدامی‌کند. چون سرعت نور تغییر نمی‌کند، dv/dt باید همیشه صفر باشد. بنابراین، فروکردن معادله $f = m \, dv/dt$ به زور در مغز دانشجویان بی‌توجهی به اهمیت سرعت نور است. معادله نیرو برای نور به صورت زیر درمی‌آید

$$f = v \, dm/dt$$

با قراردادن این رابطه در معادله تغییرات انرژی داریم

$$dE = (v \, dm/dt) dx = (v \, dm/dt) v \, dt$$

با حذف dt در معادله بالا و قراردادن c به جای v نتیجه می‌شود

$$dE = c^2 \, dm$$

با انتگرال گرفتن از طرفین این معادله، رابطه زیر به دست می‌آید

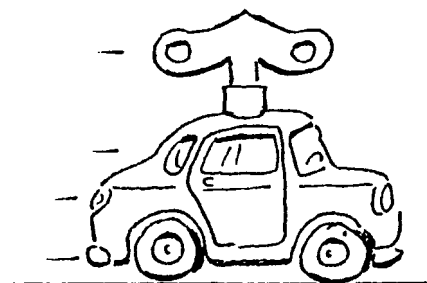
$$E = mc^2$$

که معادله درست انرژی برای نور است. این معادله شبیه به معادله انرژی جنبشی کلاسیک است،

منتهی ضریب یک دوم ندارد.

برای اینکه میزان درک خود را از این موضوع، با توجه به توضیحات بالا، بسنجید، از خود پرسید: اگر جرم ماسه‌ای که روی نوار نقاله با سرعت ثابت جمع می‌شود m باشد، انرژی معادل این مقدار جرم چقدر است؟ mv^2 یا $\frac{1}{2}mv^2$ ؟
راهنمایی: تمامی انرژی ماسه انرژی جنبشی نیست.

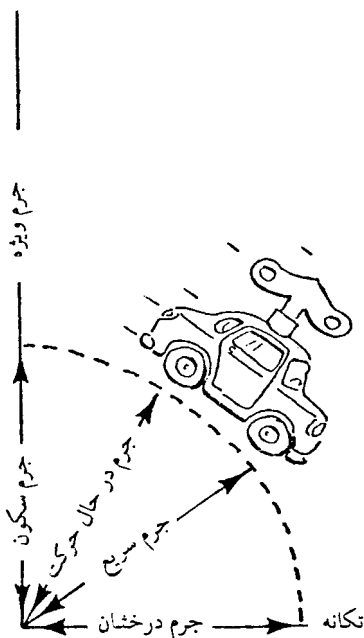
یک اشتباه رایج



شکل ۸-۴

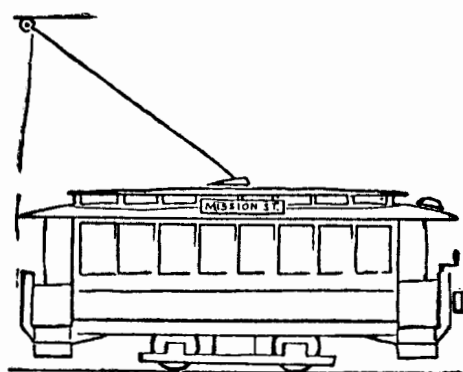
معلوم شد که جرم یک جسم، حتی اگر سرعت آن افزایش پیدانکند، می‌تواند افزایش یابد؛ مثلاً وقتی فنر یک ساعت کوک می‌شود جرم آن افزایش می‌یابد، در حالی که سرعت آن تغییر نکرده است. عکس این قضیه، حتی برای بعضی فیزیکدانان تعجب‌آور است. یعنی سرعت یک جسم ممکن است افزایش یابد، حتی اگر جرم آن افزایش پیدانکند! یک اشتباه رایج وجود دارد که بنابر آن جرم همیشه وقتی افزایش می‌یابد که سرعت افزایش یابد.

یک موتور یا اسباب‌بازی کوکی را در نظر بگیرید که منبع انرژی محرک خود را با خود حمل می‌کند. این اسباب‌بازی را به حرکت در آورید. وقتی به حرکت درآمد، با سرعت افزایش‌یافته پیش می‌رود. اما هیچ کس از خارج به آن انرژی نمی‌دهد؛ این وسیله از همان ابتدای شروع حرکت انرژی حرکتی خود را با خود حمل می‌کند. اگر هیچ انرژی از خارج اضافه نشود، جرم هم اضافه نمی‌شود. اسباب‌بازی صرفاً انرژی پتانسیل فنر را به انرژی جنبشی حرکت تبدیل می‌کند. بنابراین، به نظر شما، که اسباب‌بازی را نگاه می‌کنید،



شکل ۸-۵

جرم کل آن تغییر نمی‌کند.



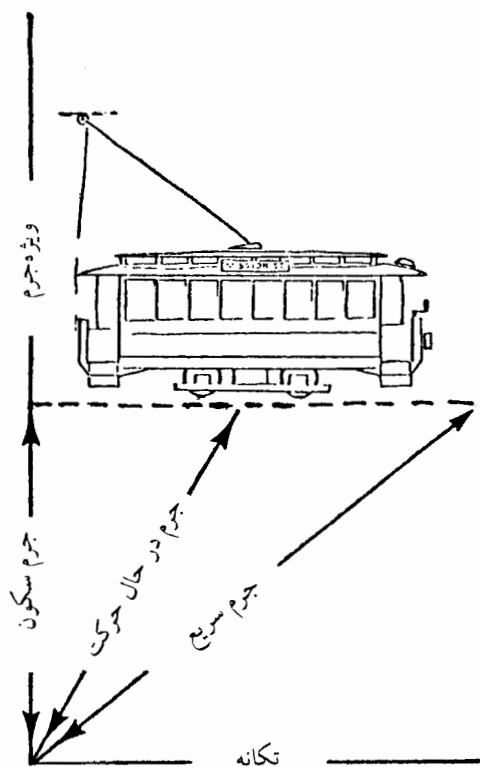
شکل ۸-۶

اما از دید مسافر داخل اسباب‌بازی، حتی جرم کل نیز ثابت نمی‌ماند. جرم کل کاهش می‌یابد! به نظر این مسافر اتومبیل در حال سکون است، و بنابراین انرژی جنبشی حرکتی احساس نمی‌کند. اما همین مسافر یقیناً خالی شدن فتر را در اتومبیل مشاهده می‌کند، و بنابراین، فتر ضمن خالی شدن باید جرم ازدست بدهد. از دید مسافر، جرم کل، یعنی جرم سکون کل، یا جرم ویژه، حتی اگر سرعت اتومبیل افزایش نیابد، باید کاهش یابد.

اسباب‌بازی یا موتور کوکی را با اتوبوس برقی یا الکترون در شتاب‌دهنده خطی مقایسه کنید. انرژی، و بنابراین جرم از خارج به اتوبوس برقی در حال حرکت یا الکترون داده می‌شود. بنابراین، شما یقیناً می‌بینید که به نسبت انرژی که از طریق سیمها به اتوبوس وارد می‌شود، جرم آن افزایش می‌یابد.

در اینجا نیز موضوع به نظر مسافر داخل اتوبوس کاملاً متفاوت است. اتوبوس به نظر مسافر ساکن است و بنابراین نمی‌تواند انرژی جنبشی حرکتی را مشاهده کند. در نتیجه، به نظر او جرم اتوبوس ثابت باقی می‌ماند.

مانند سایر مسائل، می‌توانیم این موضوع را با شکل نشان بدهیم. همچنان که اتوبوس شتاب می‌گیرد ویژه جرم آن تغییر نمی‌کند، اما جرم دینامیک و تکانه آن، آن طور که در شکل دیده می‌شود، افزایش می‌یابد. حتی اگر سرعت اتوبوس به سرعت نور محدود شود، جرم و تکانه آن محدودیت ندارد. این دو



شکل ۸-۷

هوا وزن دارد، به این معنی نیست که تمامی چیزهایی که وزن دارند هوا در آنها هست. نظریه نسبیت هیچ پاسخی برای این پرسش ندارد. اما خارج از نسبیت و کاملاً جدا از آن، اینشتین در این اندیشه بود که دلیلی ندارد خداوند دو نوع کاملاً متفاوت جرم بیافریند. به نظر اینشتین، انرژی نه تنها نوعی جرم (مثل جرم نور)، بلکه تمامی انواع جرم و حتی جرم سکون را می‌سازد. اما چگونه؟

من اطمینان دارم که منظور اینشتین از انرژی، انرژی خالص، مانند نور (انرژی با جرم سکون صفر) بوده است. همچنین او ذرات بنیادی با جرم سکون صفر را به صورت دو ذره نور (فوتون) که به نحوی به همدیگر جفت می‌شوند و به دور هم می‌چرخند در نظر گرفته است. در این صورت، تکانه کل این دو

می‌تواند تا بینهایت افزایش یابند، همان طور که در فیزیک قبل از اینشتین نیز چنین بود. اما چگونه جسمی که با سرعت محدود (سرعت نور) حرکت می‌کند، می‌تواند تکانه بینهایت داشته باشد؟ چون جرم آن بینهایت است.

همچنانکه اسباب‌بازی کوک‌شده شتاب می‌گیرد ویژه جرم آن واقعاً کاهش می‌یابد. جرم دینامیک آن ثابت می‌ماند و تکانه آن افزایش می‌یابد، اما نه تا بینهایت. درواقع، اسباب‌بازی شتاب‌یابنده، ویژه جرم خود را به تکانه تبدیل می‌کند، درست همان طور که ساعت شتاب‌یابنده سرعت از طریق زمان خود را به سرعت از طریق فضا تبدیل می‌کند. وقتی تمامی ویژه جرم اسباب‌بازی به تکانه تبدیل شد، به نور تبدیل می‌شود. ویژه جرم نور صفر است. اما جرم دینامیکی، انرژی، و تکانه آن صفر نیست. اگر ویژه جرم آن بزرگتر از صفر باشد، جرم دینامیکی، انرژی، و تکانه آن همگی باید بینهایت باشند. این موضوع را می‌توانید از نمودارها نتیجه بگیرید؟

آیا جرم انرژی است؟

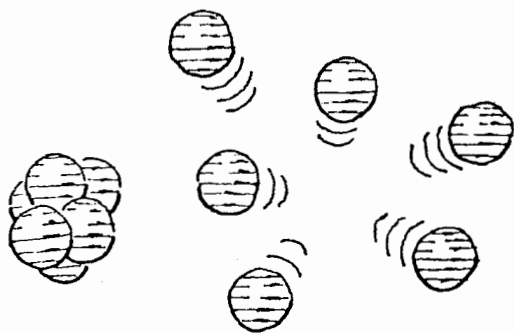
ثابت شده است که انرژی همواره جرم دارد. یعنی افزودن انرژی به چیزی معادل افزایش جرم آن است. اما آیا جرم همیشه انرژی دارد؟ به عنوان مثال، هر چیز در حال سکون جرم دارد، که ویژه جرم سکون آن است. اما ظاهراً انرژی ندارد. آیا دو نوع جرم وجود دارد؟ یک نوع جرم ناشی از انرژی و دیگری صرفاً جرم سکون بی‌خاصیت؟ مثلاً، کشف اینکه



شکل ۸-۸. یک ذره جرم سکون دار به صورت دو فوتون که به دور همدیگر می‌چرخند تصویر می‌شود. این یک مدل مفید اما ناکامل است.

$$۱۳۵ \quad E = mc^2$$

فقط از فوتونها، بلکه از تمامی ذراتی که با سرعت نور حرکت می‌کنند درست شده است: گلوئونها، گراویتونها، نوترینوها، و مانند آنها، طوری با هم قاطی شده‌اند که خود جفت‌شدگی خود را تأمین می‌کنند.



شکل ۸-۹. این نمودار فروپاشی یک هسته اتم را نشان می‌دهد. این فروپاشی ذرات بنیادی هسته را تغییر نمی‌دهد، فقط نحوه به هم پیوستن آنها را تغییر می‌دهد.

۱. کشف بعدی، مبنی براینکه برای هر ذره یک پادذره وجود دارد که می‌تواند خود و ذره را به انرژی خالص تبدیل کند، تأیید تجربی بهتری برای این نظریات است: جرم سکون از انرژی درست می‌شود.

ذره صفر است و تکانه زاویه‌ای کل آنها را می‌توان محاسبه کرد که برابر است با تکانه زاویه‌ای کاملاً مشخص ذرات بنیادی. اما اگر به طریقی فوتونها از حالت جفت‌شدگی خارج شوند، در جهات مخالف از هم دور می‌شوند و جرم سکون آنها به انرژی خالص تبدیل می‌شود!

وقتی در سالهای دهه ۱۹۳۰ از فرایندهایی که در آنها جرم هسته‌های اتم کاهش می‌یافت انرژی آزادشد (و به بمب اتمی و راکتورهای هسته‌ای منجر)، این عقیده قوت گرفت که نظر اینشتین در مورد جرم سکون تأیید شده است. اما، درواقع، تأییدنشده. هسته اتم شامل اجزای مختلفی است: پروتونها و نوترونها. این ذرات بر اثر کشش نیروهای مخالف به هم نگه‌داشته می‌شوند: نیروهای جاذبه قوی هسته‌ای و نیروهای دافعه الکتروستاتیکی. این کشش، درست مانند کشش در طناب، انرژی و بنابراین جرم ذخیره می‌کند. انرژی هسته‌ای آزادشده ناشی از جرم سکون پروتونها یا نوترونها در هسته نیست، بلکه ناشی از جرم انرژی کشش در "قشرها" است که با شکسته شدن هسته^۱، به حالت عادی برمی‌گردند.

با وجود این، احتمالاً اندیشه اینشتین در مورد ماهیت بنیادی جرم سکون خیلی به حقیقت نزدیک است. وقتی ساختار ذرات بنیادی (دارای جرم سکون) تصویر می‌شود، احتمالاً چیزی مانند یک گرداب چرخان است (آن طور که لردکلون مجسم کرده بود) که نه

$E = mc^2$ به وسیله نوری که از یک آینه متحرک بازمی‌جهد

در اینجا می‌خواهیم رابطه میان انرژی و جرم نور، $E = mc^2$ ، را ثابت کنیم. به عبارت ساده‌تر، می‌خواهیم نشان بدهیم که چند کیلوگرم در یک متر - کیلوگرم انرژی وجود دارد؛ $m = E/c^2$. نور انرژی (و جرم) خود را از الکترونهاى اتم می‌گیرد، اما توضیح اینکه این فرایند چگونه به وقوع می‌پیوندد راحت نیست^۱، و بنابراین آن را به کنار می‌نهیم. چگونه می‌توان مستقیماً یک متر - کیلوگرم انرژی به نور داد؟ با فشردن انرژی به داخل آن. نور به اشیاىی که با آنها برخورد می‌کند نیرو وارد می‌کند (دُم دنباله‌ها)، که به این معنی است که نور جرم و تکانه دارد. فرض کنید نور یک نیروی یک کیلوگرمی به آینه وارد می‌کند. اگر شدت نور خورشید ۱۰ میلیون بار افزایش یابد، نیرویی تقریباً برابر یک کیلوگرم بر آینه‌ای به مساحت یک متر مربع وارد می‌کند. در این صورت، شما یک متر - کیلوگرم انرژی به نور بازتابیده داده‌اید. یعنی، نور از آینه با همان انرژی که با آن برخورد کرده بود، به اضافه یک متر - کیلوگرم انرژی اضافی، بازمی‌جهد. اکنون در مورد جرم انرژی اضافه شده به نور بحث می‌کنیم.

آینه چگونه کار می‌کند؟ من نمی‌دانم. وقتی کوچک بودم مادرم به من می‌گفت که یک چیزهایی پشت آینه هست که از آن بیرون می‌آیند. (یکی از آن چیزها دست سیاهی بود که اگر جلوی آینه شکلک درمی‌آوردی بیرون می‌آمد و شما را خفه می‌کرد.) چون هیچ دست سیاهی هیچگاه از پشت آینه بیرون نیامد، من فهمیدم که چیزهای پشت آینه فقط سعی می‌کنند بیرون بیایند، اما چیزهای دیگری در جلو آینه آنها را به عقب می‌رانند. این توصیف بازتاب بود^۲.

۱. درک این مسئله به دلیل ناتوانی نظریه پردازان الکتروپدینامیک کوانتومی در پرداختن یک افسانه خوب، قابل درک، و عملی خیلی مشکل است.

۲. در این نوع الکتروپدینامیک کوانتومی، آینه به این دلیل کار می‌کند که الکترونهاى اتم در نقره آینه جرم نوری که با آنها برخورد می‌کند را می‌گیرند، و برای مدتی آن را بازداشت می‌کنند، و سپس در جهت مخالف آن را بیرون می‌رانند. در تمامی انواع این داستان، آنچه پشت آینه است (دیوار، کسی که از پشت حول می‌دهد، یا نور موهومی) مستلزم ضربه، یا تکانه لازم برای عقب راندن نور ورودی است. وانگهی، درک این نکته ضروری است که اینکه دقیقاً چه چیزی پشت آینه است مهم نیست، مهم این است که تکانه لازم را فراهم می‌کند.

این ایده در نمودار اول توضیح داده شده است. مقداری نور با جرم M و تکانه Mc می‌کوشد وارد یک آینه ساکن بشود. این نور به وسیله جرم مشابهی از نور و با تکانه مخالف، که از پشت آینه می‌آید، دفع می‌شود. این دو جرم مساوی، ضمن تبادل تکانه در یک لحظه به حالت سکون می‌رسند و سپس در جهت‌های مخالف به حرکت درمی‌آیند. توجه کنید که هیچ فرقی نمی‌کند شما گفته‌من را قبول کنید (تبادل تکانه) و یا گفته‌مادر را (یک چیزی از پشت آینه بیرون می‌آید)، زیرا در دو حالت تکانه‌ای که پشت آینه است به جلوی آینه می‌آید و تکانه جلو آینه به پشت آینه می‌رود.

اکنون فرض کنید که آینه بازتاب‌دهنده ساکن نیست، بلکه با سرعت v به طرف نور ورودی پیش می‌رود. آینه پیش‌رونده باید هم تکانه و هم انرژی چیزی را که بازتاب می‌دهد افزایش دهد، درست مثل راکتی که به توپ ضربه می‌زند. (آینه پس‌رونده هم تکانه و هم انرژی چیزی را که بازمی‌تاباند کاهش می‌دهد و آینه ساکن صرفاً تکانه را معکوس می‌کند و انرژی را تغییر نمی‌دهد.)

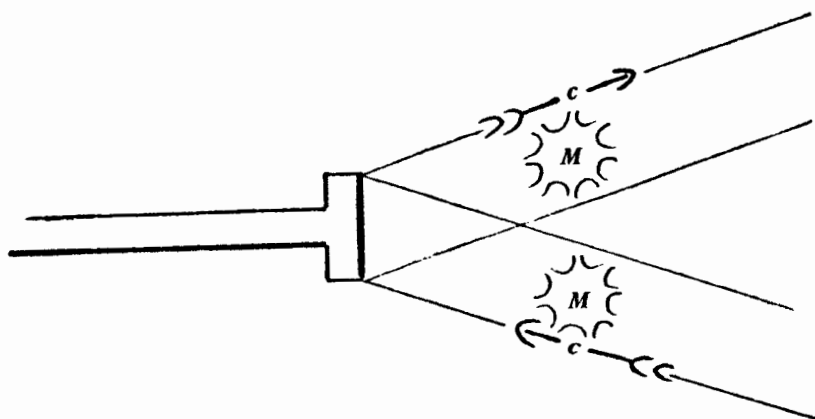
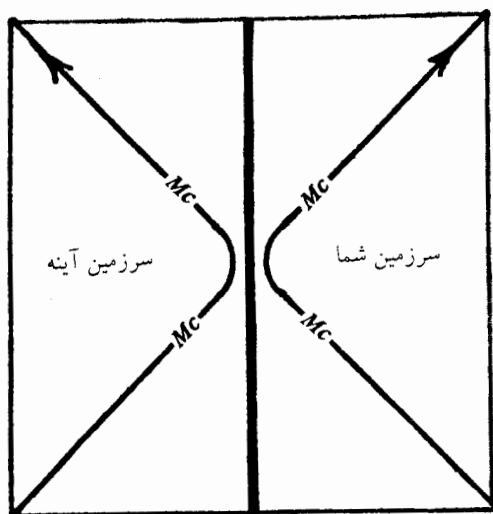
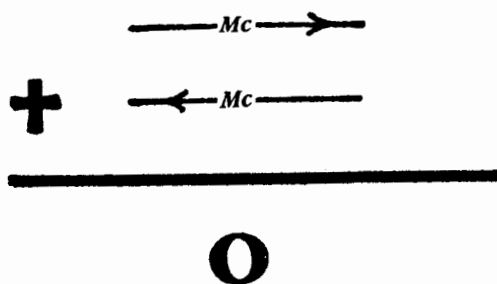
تکانه و انرژی توپ تنیس ضربه خورده با افزایش سرعت آن افزایش می‌یابد، اما سرعت نور تغییر نمی‌کند. در این صورت، تکانه و انرژی نور بازتابیده چگونه افزایش می‌یابد؟ با افزایش جرم آن. (این تنها چیز در مورد نور است که می‌تواند تغییر کند.) جرم نوری که از آینه پیش‌رونده بازمی‌جهد عبارت است از جرم M که به آینه برمی‌خورد، به اضافه یک نوع جرم اضافی m که ناشی از هر آن چیزی است که به نور بازتابیده فشار می‌آورد (در این داستان نور پشت آینه).

نمودار نشان می‌دهد که جرم نور M به قسمت جلو و جرم $(M + m)$ نور به عقب آینه نزدیک می‌شود. اما طبق گفته‌مادر، $M + m$ از آینه خارج و M به آن داخل می‌شود. به عقیده‌من، جرم $(M + m)$ می‌کوشد از آینه خارج شود اما با جرم M برخورد می‌کند. جرم M که می‌کوشد داخل آینه شود با جرم M خارج‌شونده برخورد می‌کند خودش بازمی‌تابد و جرم خارج‌شونده را به داخل آینه برمی‌گرداند، اما هیچ چیز از خروج جرم m جلوگیری نمی‌کند و بنابراین از سرزمین آینه خارج می‌شود.

همچنین می‌توان فرض کرد که جرم $(M + m)$ با طرف پس‌رونده آینه برخورد می‌کند و فقط جرم M آن به عقب، به داخل سرزمین آینه بازمی‌تابد، درحالی‌که جرم M با قسمت پیش‌رونده آینه برخورد می‌کند و با جرم افزایش‌یافته $(M + m)$ به جلو بازمی‌تابد.

در تمامی روایت‌های مختلف این قصه، نور پشت آینه جرم m ازدست می‌دهد و نور جلو آینه جرم m به‌دست می‌آورد. یعنی، نوری که از جبهه پیش‌رونده آینه بازمی‌تابد انرژی با جرم m به‌دست می‌آورد و هر عاملی که آینه را از پشت فشار می‌دهد این انرژی را تأمین می‌کند.

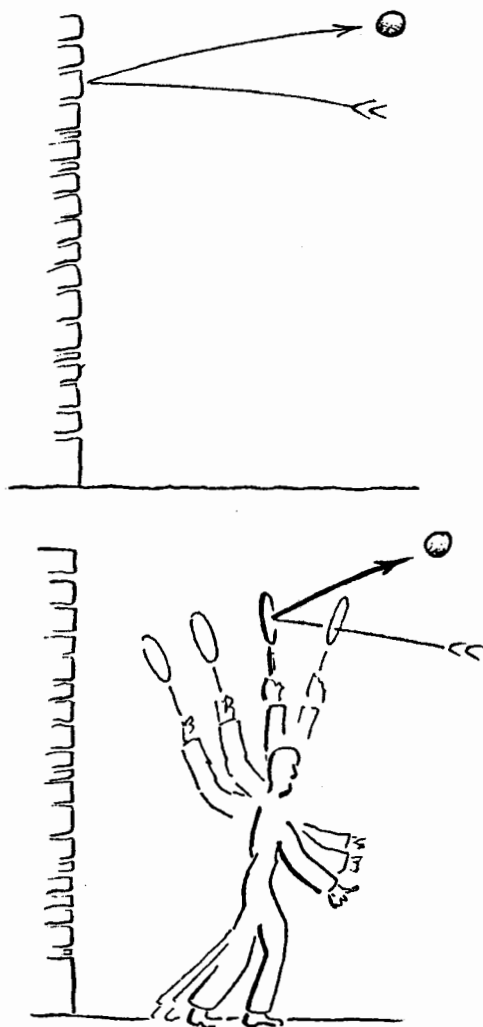
هم قبل و هم بعد از بازتاب، تکانه نوری که به طرف راست می‌رود $Mc + mc$ ، و تکانه

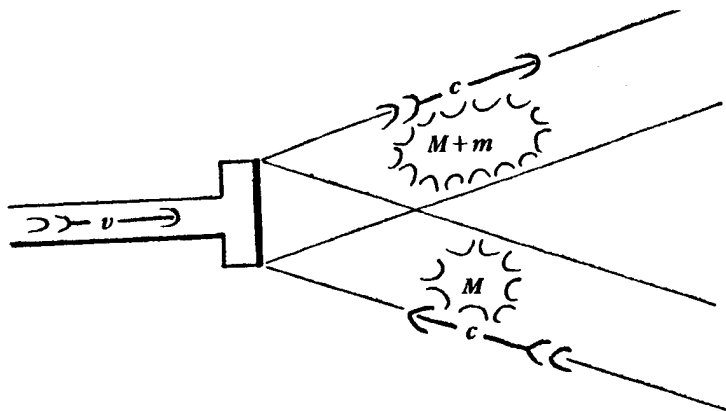
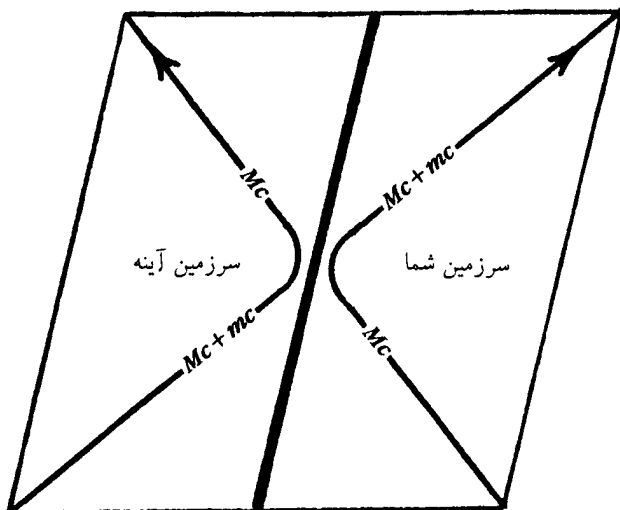
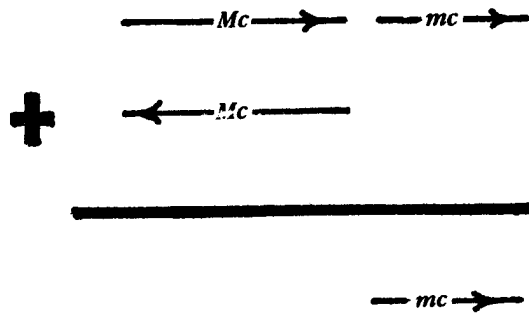


نوری که به طرف چپ می‌رود Mc - است. بنابراین تکانه خالص کل عبارت است از $Mc + mc - Mc = mc$. در لحظه بازتاب (تبادل تکانه) تمامی جرم باید به طور لحظه‌ای به سکون برسد؛ یعنی، باید با آینه حرکت کند. بنابراین، در آن لحظه تکانه خالص کل باید برابر مجموع جرم واردشونده به آینه و خارج‌شونده از آن ضرب در سرعت آینه باشد:

$$(M + M + m) v = mc$$

این رابطه را به خاطر بسپارید.





انرژی E که آینه بازتابان به نور بازتابیده می‌دهد برابر است با نیرویی (یا نیروی فشار تابشی) که به آن وارد می‌کند ضرب در مسافتی که این نیرو اثر می‌کند. مسافت برابر است با زمان لازم برای طی مسافت ضرب در سرعت آینه. در نتیجه:

$$E = \text{سرعت} \times \text{زمان} \times \text{نیرو} = \text{مسافت} \times \text{نیرو}$$

نیرو ضرب در زمانی که نیرو بر یک جسم اثر می‌کند برابر است با تکانه یا ضربه‌ای که به آن جسم وارد می‌شود. تکانه آینه (یا نور موهومی پشت آینه) که صرف توقف نور ورودی به آینه می‌شود، Mc ، به اضافه تکانه‌ای که به نور بازتابیده داده می‌شود، $(Mc + mc)$ ، باید برابر باشد با نیروی وارد بر آینه ضرب در زمانی که این نیرو اثر می‌کند. بنابراین:

$$Mc + Mc + mc = \text{نیرو} \times \text{زمان}$$

اکنون در معادله انرژی به جای $(\text{زمان} \times \text{نیرو})$ مقدار مساوی آن در رابطه بالا را قرار می‌دهیم، داریم:

$$E = (Mc + Mc + mc) v = c (M + M + m) v$$

قبلاً ثابت کردیم که:

$$(M + M + m) v = mc$$

بنابراین:

$$E = cmc = mc^2$$

راههای طبیعت اسرار آمیزند، اما روی هم رفته
منطقی هستند

۹

معما

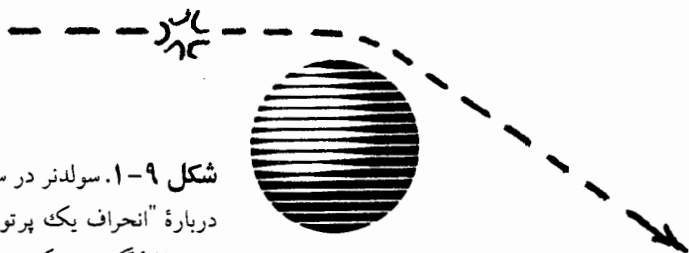
سقوط نور

اگر نور حامل انرژی باشد (و همین طور هم هست، زیرا در غیراین صورت نمی توانست پوست شما را بسوزاند)، پس وزن هم دارد^۱. اگر نور وزن داشته باشد، باید سقوط کند.

این تصور که گرانی باعث سقوط نور می شود به سیمون لاپلاس اخترشناس برمی گردد. سالی که ناپلئون جنگهای خارجی خود را آغاز کرد، این اخترشناس اثر گرانی یک ستاره را بر نوری که از کنار آن رد می شد بررسی کرد. در سال ۱۸۰۰ جان سولدنر (نقشه کش) مقدار انحراف نوری که از کنار خورشید یا زمین عبور می کرد را محاسبه کرد. حتی گمان می رود که نور، اگر اصلاً جرم نیز نداشته باشد، بتواند سقوط کند، زیرا (همان طور که گالیله در برج کج پیزا نشان داد) حرکت اجسام در حال سقوط به جرم بستگی ندارد. با وجود این، این طرز تفکر فیزیکی تا

سال ۱۹۰۶ مسکوت ماند. در این سال معلوم شد که تمامی انواع انرژی (از جمله نور) حامل جرم (از یک نوع) هستند، این جرم وزن دارد، و وزن هم سقوط می کند. اما همین کشف، که رابطه جرم - انرژی اینشتین آن را به صورتی اجتناب ناپذیر درآورده بود، اینشتین را با یک معمای عمیق روبه رو کرد.

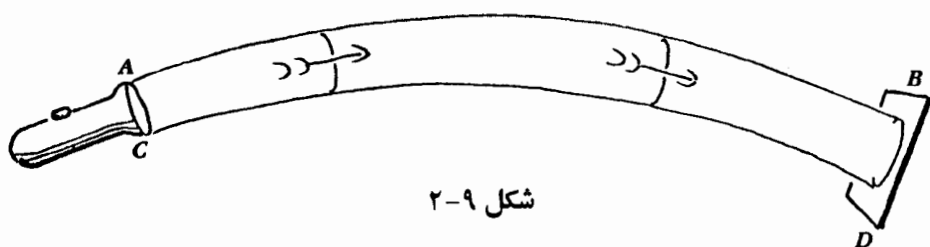
۱. در فصلهای پیشین واژه های جرم و وزن به جای هم به کار رفتند. دلیل این کار این بود که اگر انرژی، جرم لختی (یا تکانه) دارد پس وزن هم دارد، و چون فقط یک نوع جرم وجود دارد، این یک نتیجه گیری عجیب نیست. اگر دو نوع جرم وجود داشت، ممکن بود یک نوع آن لختی بدون وزن داشته باشد. اما، علی رغم چندین تحقیق دقیق، هیچ کس تاکنون نتوانسته است جرمی پیدا کند که لختی و وزن با نسبتهای مساوی نداشته باشد.



شکل ۹-۱. سولدنر در سن ۲۵ سالگی مقاله‌ای دربارهٔ "انحراف یک پرتو نور از مسیر مستقیم بر اثر جاذبهٔ گرانشی یک جسم سماوی که نور از نزدیکی آن رد می‌شود" منتشر کرد. سولدنر در سالی که کنونی‌های امریکای شمالی نبرد خود را علیه بریتانیای کبیر آغاز کردند متولد شد، و در باواریا، محل زندگی اینشتین که اکنون جزء آلمان جنوبی است، بزرگ شد.

آیا C می‌تواند تغییر کند؟

نمودار زیر انحراف یک باریکهٔ نور چراغ قوه را بر اثر گرانی نشان می‌دهد. جبههٔ موج که در AC روی چراغ قوه شروع می‌شود در DB روی پرده به پایان می‌رسد. نور قسمت بالای باریکه از A تا B و نور پایین این باریکه از C تا D را طی می‌کند. نور قسمت پایین در داخل منحنی حرکت می‌کند (مسافت CD کوتاه‌تر از AB است) و بنابراین مسیر آن از چراغ قوه تا



شکل ۹-۲

اندیشهٔ اینشتین این بود که سرعت نور ثابت است. از این رو، اینشتین گرفتار معمای بزرگی شد که خود باعث آن شده بود. شاید نظریه‌اش خود - سازگار نبود، شاید غیر منطقی بود.

پرده کوتاه‌تر است. جبههٔ موجی که از AC شروع می‌شود، سرانجام به BD می‌رسد. این گفته به این معنی است که همان قدر طول می‌کشد که پرتو نور از A تا B برود که از C تا D ، حتی اگر مسیر از A تا B بلندتر از مسیر از C تا D باشد. یعنی نور باید در مسیر کوتاه‌تر کند تر^۱ حرکت کند! اما هستهٔ مرکزی تمامی

۱. در پرسش پایان فصل اول معلوم شد که موج

نور سنگین

در سال ۱۸۰۰ بسیاری دانشمندان معروف معتقد بودند که نور بر اثر گرانی منحرف می‌شود. اما این طرز تفکر تا حدود یک قرن تعقیب نشد. چرا؟ زیرا در همان سال ۱۸۰۰ بسیاری دانشمندان معروف همچنین معتقد بودند که نور از ذرات ریزی درست شده است. در دهه‌های بعد از سال ۱۸۰۰ ایده ذره‌ای بودن نور تضعیف و نظریه موجی نور مسلط شد.

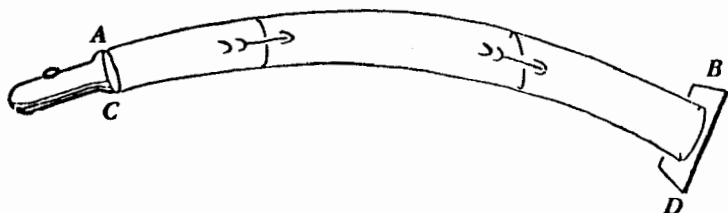
امواج (مانند امواج صوتی و زمین لرزه) جرم ندارند؛ این امواج حتی تکانه هم ندارند. بنابراین دلیلی وجود نداشت که قبول کنند گرانی بر آنها اثر می‌کند. در اواسط قرن، ماکسول نشان داد که امواج نوری، برعکس سایر امواج، حامل تکانه هستند. هیچ‌کدام از معاصران ماکسول این نتیجه‌گیری او را جدی نگرفتند، و هیچ‌کس فکر نمی‌کرد که تکانه مستلزم جرم است. در سالهای دهه اول ۱۹۰۰، اینشتین این موضوع را ثابت کرد، و همین باعث شد که نظریه وزن داشتن نور، و بنابراین سقوط آن، دوباره مطرح شود.

ضمناً، اینشتین با مطرح کردن اینکه نور نه تنها حامل جرم است، بلکه آن را در بسته‌های کوچکی حمل می‌کند، این طرز فکر را بیشتر به عقب برگرداند! نیوتون این بسته‌های کوچک را ذره نامیده بود و اینشتین آنها را فوتون نامگذاری کرد. فوتونها به صورت یکی از سنگ‌بناهای نظریه کوانتومی درآمدند.

حرکت کند، که نمی‌تواند.

از کجا می‌توان متوجه شد که نور به صورت مایل حرکت کرده‌است یا نه؟ اگر نور به صورت مایل حرکت کند، یک مؤلفه طولی دارد که نمی‌توان آن را کاملاً قطبیده کرد.

نور باید همواره در جهت عمود بر خود حرکت کند و نمی‌تواند مایل باشد. اگر سرعت نوری که از A به B می‌رود با سرعت نوری که از C به D می‌رود برابر باشد، آنگاه نور قبل از آنکه به B برسد به D می‌رسد و به‌ناچار باید به صورت مایل



بحران

بازهم کندشدن زمان

باریکه نور، برای اینکه سقوط کند، باید منحرف شود. برای اینکه منحرف شود باید طرف پایین آن خیلی کندتر از طرف بالای آن حرکت کند. بنابراین سرعت نور در نزدیکی زمین یا در هر میدان گرانشی، باید کاهش یابد و این کاهش تا زمانی که نور در میدان پایین می‌رود ادامه داشته باشد.

این موضوع نه تنها اینشتین را به دردسرانداخت، بلکه بدخواهانش را نیز خوشحال کرد. بعضیها اینشتین را دوست نداشتند. (حتی زنش او را دوست نداشت.) چه کسی یک جوان تازه به دوران رسیده را که با گستاخی در صدد تغییر مفاهیم فضا و زمان است دوست دارد؟ بعضیها نظریه‌اش را دوست نداشتند. چه کسی نظریه‌ای را که فهم آن، حتی برای کسانی که فیزیک خوب می‌دانند، مشکل است دوست دارد؟ یقیناً، استادانی که بر همه چیز، جز این نظریه جدید، مسلط بودند آن را دوست نداشتند. اکنون ظاهراً شکافی در سنگ طاق پل اندیشه اینشتین پیداشده بود و کسانی، چه در رشته فیزیک و چه خارج از آن، از فرو ریختن آن خوشحال می‌شدند.

اما اینشتین یک متفکر بسیار زیرک بود. نه تنها راه روشنی برای خروج از این بن‌بست پیدا کرد، بلکه ضمن این کار تبیینی برای علت گرانش نیز به دست داد.

اینشتین این پارادوکس را به طریقی همانند نوآوریهای قبلی خود حل کرد. او گفت همچنان که در میدان گرانشی پایین می‌روید، سرعت نور کم نمی‌شود، بلکه سرعت خود زمان کاهش می‌یابد.

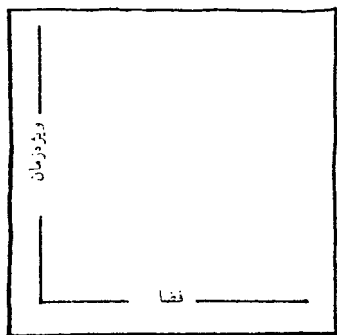
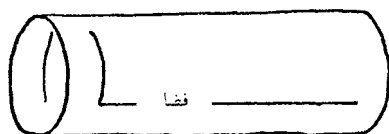
این نظریه خودبه‌خود مسئله سرعت نور را نیز حل می‌کند، زیرا اگر زمان کندشود، آن گاه همه چیز، از جمله سرعت نور، کند می‌شود. اما چه چیزی از این موضوع عاید می‌شود؟ یعنی، چرا خیلی راحت نپذیریم که خود سرعت نور کم می‌شود و موضوع را به همینجا خاتمه دهیم؟ تفاوت میان کندشدن سرعت نور و کندشدن سرعت زمان در این است که اگر زمان کندشود، ناظران محلی واقع در میدان گرانشی، که زمان آنها کند می‌شود، سرعت نور را معمولی و تغییر نیافته اندازه می‌گیرند. ساعت ناظران دور، که از میدان گرانشی فاصله زیادی دارند، کند نخواهد شد و بنابراین اندازه‌گیری آنها سرعت نور را در ناحیه گرانی کند نشان می‌دهد.

اما تغییر یک چیز بنیادی مانند سرعت زمان نه تنها بر سرعت نور اثر می‌گذارد بلکه انواع نتایج دیگر را دربردارد. به عنوان مثال، فرض کنید دو قلوها، پویا و نازنین، دقیقاً هم‌سن هستند. پویا به پشت‌بام یک ساختمان چندطبقه می‌رود و نازنین به زیرزمین آن. بعد از مدتی پویا از پشت‌بام پایین می‌آید و نازنین از زیرزمین بالا می‌رود. در این صورت پویا مستر از نازنین است، زیرا زمان،

فضازمان خمیده

اکنون توضیح خواهیم داد که چگونه این افسانه، و نمودار مربوط به آن، را می‌توان طوری تعمیم داد که برای کندشدن زمان به کار رود، و جالبتر این که چگونه زمان‌گند اثری را که ما گرانی می‌نامیم تولید می‌کند.

فرض کنید شما یک نمودار فضا-زمان را (مانند شکل) لوله می‌کنید. این کار هیچ اثری بر خود نمودار ندارد. نقشه‌ها را هنگامی که داخل لوله‌های پستی می‌گذارند، همیشه آنها را لوله می‌کنند و نقشه لوله شده هیچ فرقی با نقشه قبل از آن ندارد. ممکن است خواندن نقشه لوله شده برای شما سخت باشد، اما بعضی ماشینها نقشه‌ها را وقتی که لوله می‌شوند راحت‌تر می‌خوانند. اگر بتوانیم نمودار را طوری لوله کنیم که زمان روی یک دایره بیفتد، همانند ساعت معمولی، خیلی بهتر است.

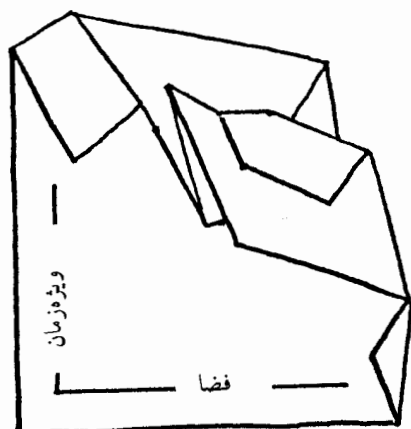


شکل ۹-۴

در زیرزمین کندتر می‌گذرد تا در بالا پست‌بام! درواقع، دوقلوها به جای اول برنمی‌گردند، بلکه پیامهایی با هم ردوبدل می‌کنند. هر نوع پیام با هر نوع پیام‌رسان. به عنوان مثال، فرستادن ضربان قلب از طریق تلفن لیوانی. پویا از طریق نخ تلفن لیوانی ضربان قلب نازنین را کندتر از ضربان قلب خودش و نازنین ضربان قلب پویا را تندتر از ضربان قلب خودش می‌شود.

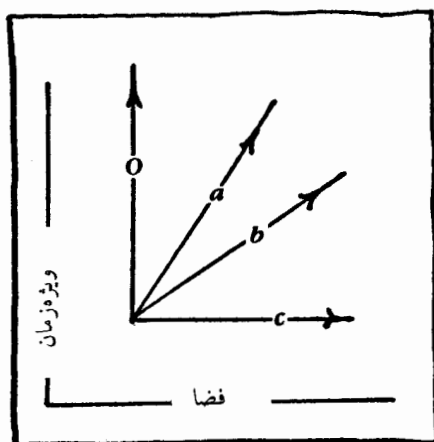
با مقایسه ساعت‌های اتمی در بالا و پایین برجهای بلند، تغییر بسامد ناشی از کندشدن زمان در پایین این برجها، در عمل مشاهده شده است. همچنین بسامد نوری که از یک میدان گرانشی قوی بالا می‌آید کاهش می‌یابد و بنابراین یک انتقال به سرخ گرانشی قابل آشکارسازی در نوری که از نزدیکی ستاره‌های خیلی سنگین می‌گذرند، تولید می‌کند.

کندشدن زمان ناشی از گرانی با کندشدن زمان حاصل از حرکت، به شرح زیر، فرق می‌کند: اگر کندشدن زمان ناشی از حرکت باشد، من فکر می‌کنم ساعت خودم درست و ساعت شما کنداست و شما، برعکس، فکر می‌کنید که ساعت خودتان درست و ساعت من کنداست. اما اگر کندشدن زمان ناشی از گرانی باشد و شما از من نزدیکتر به سطح زمین باشید، در این صورت، من فکر می‌کنم ساعت من درست اما ساعت شما کنداست و شما فکر می‌کنید ساعت خودتان درست اما ساعت من تنداست.



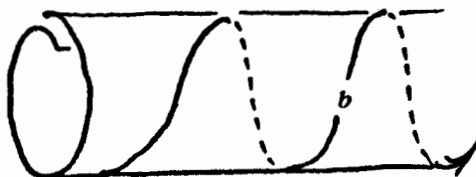
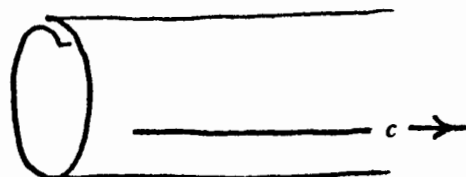
حتی اگر خواسته باشید می‌توانید نقشه را
مچاله کنید، بدون آنکه به نمودار روی آن
آسیبی برسد. مچاله کردن کاغذ الگوی لباس
هیچ تأثیری بر آن ندارد. یعنی، بعد از
مچاله شدن نیز یک نخ نقاط یکسانی را به هم
وصل می‌کند. مدل لباس نسبت به سطح کاغذ
الگو، داخلی به حساب می‌آید و به شکل آن
در فضای سه بعدی بستگی ندارد. فقط بریدن
نمودار یا کاغذ الگو ارتباط طبیعی و ذاتی
اجزای آن را تغییر می‌دهد.

وقتی نمودار لوله می‌شود، اجسامی که در
فضا-زمان به خط مستقیم حرکت می‌کنند در
داخل لوله به صورت مارپیچ درمی‌آیند، و هر
چه حرکت اجسام کندتر باشد حلقه‌های مارپیچ
فشرده‌تر است. اجسام ساکن، که فقط از طریق
زمان پیش می‌روند، یک دایره، و باریکه‌های
نور، که فقط از طریق فضا حرکت می‌کنند،
یک خط مستقیم در داخل لوله تشکیل
می‌دهند. این نمودار اعم از اینکه لوله شده
باشد یا نشده باشد، فضا-زمان بدون گرانی را
نمایش می‌دهد.

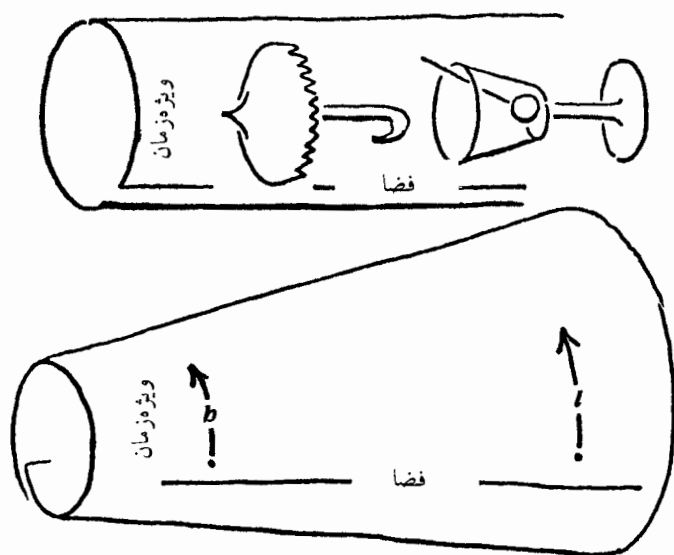


شکل ۹-۵

شکل ۹-۶



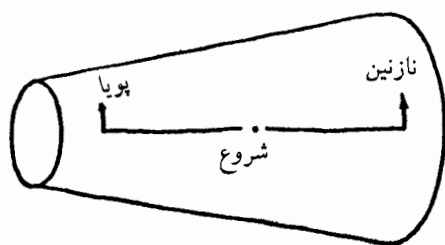
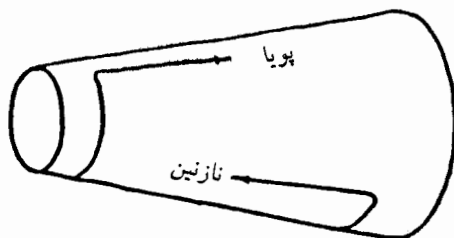
اکنون نمودار را طوری تغییر می‌دهیم که اثر گرانی را بر زمان نشان بدهد. فرض کنید جهت فضا عمود بر میدان گرانی است، آن طور که توسط سمتگیری چتر و لیوان نشان داده شده است. چکار می‌توان کرد تا زمان بر اشیایی که پایینتر هستند کندتر بگذرد؟ برای این کار می‌توان نمودار فضا-زمان استوانه‌ای را به صورت مخروط درآورد، به گونه‌ای که قاعدهٔ بزرگتر، در پایین باشد.



شکل ۹-۷

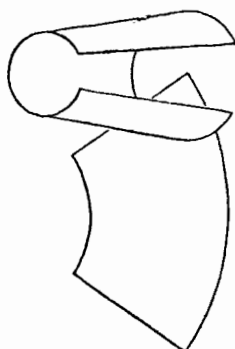
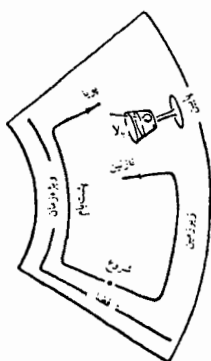
جهت زمان حول مخروط می‌خزند. اما طول مسیر بالا، h ، حول قسمت باریک مخروط، کوتاهتر است از طول مسیر پایین، l ، حول قاعدهٔ آن. بنابراین، مورچه‌روی مسیر بالا از مورچه دیگر جلومی‌افتد. منظور این است که از لحاظ ویژه‌زمان یا عمر جلومی‌افتد.

فرض کنید دو جسم ساکن، یکی بالاتر از دیگری، در داخل مخروط وجود دارد. این دو جسم فقط از طریق زمان حرکت می‌کنند. مطابق افسانه، تمامی اجسام از طریق فضا-زمان، با سرعت یکسان حرکت می‌کنند. فرض کنید دو جسم مورچه باشند. مورچه‌ها در



شکل ۹-۸

فضازمان مخروطی همان چیزی را که من وعده داده بودم نمایش می‌دهد: یعنی، هر جا که لازم است، زمان کند می‌شود.



اکنون می‌توانید ببینید از لحاظ نموداری چه اتفاقی برای پویا و نازنین می‌افتد. این دو در یک نقطه و در یک سن از هم جدایی می‌شوند: پویا به پشت‌بام می‌رود و در همانجا می‌ماند و نازنین هم به زیرزمین می‌رود و در آنجا اقامت می‌کند. هردو با یک سرعت در فضازمان حرکت می‌کنند؛ یعنی، هردو مسافت یکسانی را بر روی نمودار طی می‌کنند، و زمان مختصاتی یکسانی پیش می‌روند. اما وقتی تصمیم می‌گیرند پیش هم برگردند، پویا خود را بزرگتر از نازنین (از لحاظ سنی) می‌یابد.

برای اینکه تمامی این داستان را در یک نگاه ببینیم، مخروط را مطابق شکل می‌بریم و آن را پهن می‌کنیم. معلوم می‌شود طول مسیری که پویا طی می‌کند برابر است با طول مسیری که نازنین طی کرده است. این طول نشان‌دهنده مقدار زمان مختصاتی طی شده است. اما پویا از لحاظ ویژه‌زمان بزرگتر از نازنین است.

زمان مختصاتی معیاری از گذشت زمان است که شما از یک فاصله دور، خارج از اثر گرانی، مشاهده می‌کنید. ویژه‌زمان معیاری از گذشت زمان است که خود جسم، تحت تأثیر گرانی، احساس می‌کند. از این رو، نمودار

شکل ۹-۹. ظاهراً طول مسیری که پویا طی کرده است بلندتر از مسیر طی شده توسط نازنین است، اما در واقع چنین نیست. شما می‌توانید هردو مسیر را اندازه بگیرید، و صحت آن را تحقیق کنید.

گرانی سرعت زمان را کند می‌کند. در اینجا محاسبه خواهیم کرد که برای اینکه یک باریکه نوری شتاب رو به پایین، g ، پیدا کند، زمان چقدر باید کند شود. (شتاب رو به پایین نور برابر با شتاب رو به پایین همه اجسام مادی است.) فاصله قائم میان پایین و بالای یک باریکه نور چراغ قوه برابر h است. وقتی زمان T بر قسمت بالای باریکه گذشت زمان کمتر $(T - t)$ بر قسمت پایین آن می‌گذرد. نسبت خالص t/T را محاسبه می‌کنیم. (راهنمایی: $t/T \approx 10^{-16}$ صرفاً درصد کاهش در سرعت زمان است. در وضعیت خیلی خیلی غیر عادی و حدی، که در آن زمان متوقف می‌شود، این درصد ممکن است به ۱۰۰ درصد برسد.)

در حالی که قسمت بالای باریکه مسافت CT را طی می‌کند، قسمت پایین مسافت کمتر $c(T - t)$ پیش می‌رود؛ یعنی، قسمت بالای باریکه یک مسافت cT بیشتر از پایین پیش می‌رود. همین اختلاف مسافت، باریکه را به طرف پایین کج می‌کند. بعد از گذشت زمان T ، مؤلفهٔ رو به پایین سرعت باریکه باید برابر سرعت رو به پایین هر جسم در حال سقوط باشد، gT . در این حالت، دو مثلث قائم‌الزاویهٔ کوچک روی نمودار مشابه‌اند، بنابراین نسبت CT به gT برابر نسبت h به c است. از این رو:

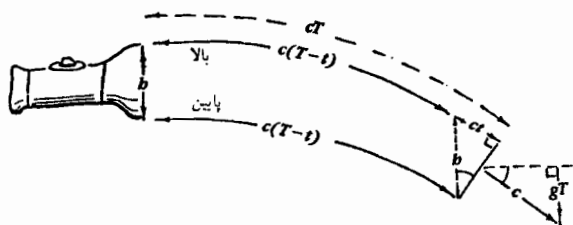
$$ct/gT = h/c$$

٤

$$t/T = gh/c^2$$

توجه کنید که مثلثهای کوچک مشابه یا متناسب اند، زیرا زاویه های آنها با هم برابرند. زاویه ها به این دلیل برابرند که ct موازی با c و gt موازی با h است.

اگر h ارتفاع قد شما، در حدود دو متر، و g شتاب گرانی زمین ($\approx ۱۰ \text{ متر بر ثانیه}$) باشد، سرعت زمان در محل پای شما در حدود $۳۰۰٬۰۰۰٬۰۰۰ \text{ متر بر ثانیه}$ کمتر از سرعت زمان در محل سر شماست. این اختلاف اندک، همچنان که خواهید دید، نه تنها برای خم کردن نور، بلکه برای تولید خود گرایی نیز کفایت می‌کند!



شکل ۹-۱۰

چگونه زمین بر ماه نیرو وارد می‌کند، در حالی که،
جز فضای تهی، هیچ ارتباطی میان آنها وجود
ندارد؟

۱۰

علت گرانش

منشأ گرانش

حال سقوط به طور پیوسته افزایش می‌یابد.
از این رو، گالیله نتیجه گرفت که سرعت
جسم در حال سقوط متناسب است با فاصله‌ای
که جسم طی آن سقوط می‌کند. بنابراین ایده
باد، به عنوان علت گرانش، باید کنار گذاشته
می‌شد و هیچ مدل مناسبی هم برای آن وجود
نداشت.

وانگهی، گالیله هنوز در اشتباه بود. سرعت
یک جسم در حال سقوط با مسافتی که جسم
سقوط می‌کند متناسب نیست. نمی‌تواند
متناسب باشد. برای اینکه دلیل آن را بدانید
فرض کنید یک جسم بعد از سقوط مسافت
یک متر سرعت معینی داشته باشد. در این
صورت، بعد از سقوط مسافت $\frac{1}{2}$ متر نصف
آن سرعت، و بعد از سقوط مسافت $\frac{1}{4}$ متر
یک‌دهم آن سرعت را داشته است. برای اینکه
کمی سرعت بگیرد باید اندکی پایین بیاید. اما

چگونه نیروی گرانش بر سیب وارد می‌شود؟
مگر نه اینکه هیچ طناب مرئی آن را به سوی
زمین نمی‌کشد. عاملی که بر سیب اثر می‌کند
باید نامرئی باشد. چه عامل نامرئی می‌شناسید
که بتواند نیرو وارد کند؟ باد. بنابراین، گالیله
اولین بار فکر کرد که علت گرانی بادی است
که از فضا به سوی زمین می‌وزد. در واقع، زمین
باد را به سوی خود می‌کشد. به همین دلیل
گالیله ابتدا (به غلط) فکر کرد که تمامی اجسام
در حال سقوط به یک سرعت سقوط حد
(سرعت باد) می‌رسند و بعد از آن با سرعت
ثابت حد سقوط می‌کنند.

اما اگر شما در مورد جسم سنگینی که از
فاصله ۵ یا ۱۰ سانتی‌متری، ۱۰ یا ۲۰
سانتی‌متری، و ۱ یا ۲ متری بر روی سر شما
می‌افتد فکر کنید فوراً به این نتیجه می‌رسید
(همچنان که گالیله رسید) که سرعت جسم در

این استدلال پس از سه قرن فراهم شد. تکان‌دهنده بود، زیرا معلوم شد که سرعت سقوط نه به نخ بستگی دارد نه به باد، یا فشار، و یا هر نیروی دیگر، بلکه به شکل فضازمان وابسته است.

تعجب

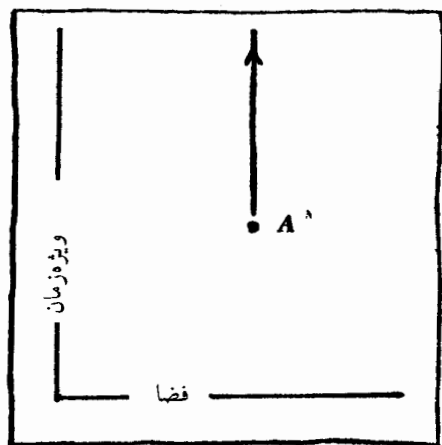
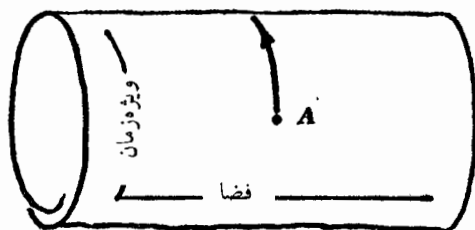
انتظار می‌رفت که فضازمان خمیده باعث کندی زمان بشود، و همین طور هم شد. اما اکنون چیزی را مطرح خواهیم کرد که شما انتظار آن را نداشتید، یک چیز جالب توجه. به نمودار استوانه با گرانث صفر برگردید و مسیر یک جسم ساکن را رسم کنید. می‌توانید مسیر را در نقطه‌ای مانند A شروع کنید و از طریق زمان پیش بروید. مسیر دقیقاً به دور استوانه می‌پیچد. این مسیر به راست یا چپ منحرف نمی‌شود؛ در فضا ساکن است.

اکنون یک انتهای استوانه را به صورت مخروط درآورید (شکل ۱۰-۲). بر روی مخروط، مسیر یک جسم را رسم کنید که در حالت سکون شروع به حرکت می‌کند و سپس به حال خود رهایی شود. مسیر جسمی که به حال خود رهایی شود یک خط راست است. چگونه می‌توان روی یک مخروط یک خط راست کشید؟ به همان ترتیب که روی استوانه خط راست می‌کشیم؛ مخروط را باز کنید و یک خط راست روی آن بکشید. در نقطه A جسم ساکن است، بنابراین مسیر آن به چپ یا راست منحرف نمی‌شود، اما مستقیماً از طریق

اگر با سرعت صفر سقوط را آغاز کند، چقدر طول می‌کشد تا حتی همان فاصله اندک را سقوط کند؟ تا ابد! بنابراین، سیب به خودی خود سقوط را آغاز نمی‌کند. اگر کسی، به خاطر شروع سقوط، آن را به طرف پایین بکشد، سیب سقوط می‌کند و سرعت آن هنگام سقوط بیشتر و بیشتر می‌شود، اما سیب خودش شروع به سقوط نمی‌کند. ممکن است جهان طوری ساخته شده باشد که سیبها به خودی خود سقوط نکنند. مگر نه اینکه موتورهای بتزینی، و موتورهای (ساعت) برقی قدیم خود-آغازگر نیستند، اما سیبها، دستکم در این جهان، خود-آغازگرند.

سرانجام، گالیله به این نتیجه رسید که اجسام نه بر اثر گذر از طریق فضا، بلکه بر اثر عبور از طریق زمان سرعت می‌گیرند. بنابراین، حتی اگر سیب با سرعت صفر شروع به حرکت کند و هنوز از فضا عبور نکند (شروع به حرکت) می‌تواند سرعت بگیرد، چون از طریق زمان گذرمی‌کند. سرعت یک جسم در حال سقوط متناسب است با مدت زمانی که در حال سقوط است، نه مسافتی که طی آن سقوط می‌کند.

اما چگونه عبور از طریق زمان باعث می‌شود یک جسم سرعت بگیرد؟ این یک قاعده بدون استدلال است. باید استدلال داشته باشد (در فیزیک هر چیزی همیشه باید با استدلال همراه باشد). استدلال، مانند سرعت، با گذر از طریق زمان به دست می‌آید. در مورد این قاعده، استدلال سه قرن طول کشید. وقتی

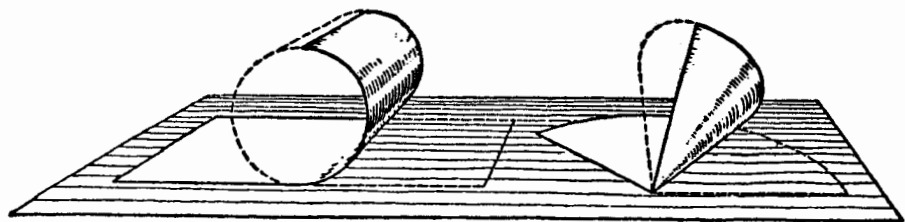


شکل ۱۰-۱

زمان پیش می‌رود. این خط را با خط کش امتداد بدهید، مسیر به دست می‌آید. اکنون ببینید این خط به کجا می‌رود. این خط، اندک‌اندک، به طرف انتهای پهن مخروط پیش می‌رود. انتهای پهن، انتهای زمان کند، یا انتهای پایین است. توجه کنید، جسم ساکن، ساکن باقی نمی‌ماند. شیب آن به طرف پایین، ابتدا کاملاً به کندی و سپس با سرعت هرچه بیشتر افزایش می‌یابد. سپس سقوط می‌کند. سطح مخروطی سبب می‌شود اجسام ساکن سقوط کنند. کندی زمان باعث می‌شود سطح فضا زمان مخروطی شود. اما شما هنوز علت گرانش را کشف نکرده‌اید.

قبلاً کندی زمان را نتیجه فرعی گرانی معرفی کردیم، اما اکنون می‌توانید ببینید که کند شدن زمان علت اصلی گرانش است!

در اینجا من قویاً پیشنهاد می‌کنم که کتاب را ببندید؛ کاغذ، مداد، خط کش، قیچی، و نوار بردارید. چند استوانه و مخروط کاغذی درست کنید و ببینید چگونه این اثر را نشان می‌دهند. همین الآن این کار را بکنید.

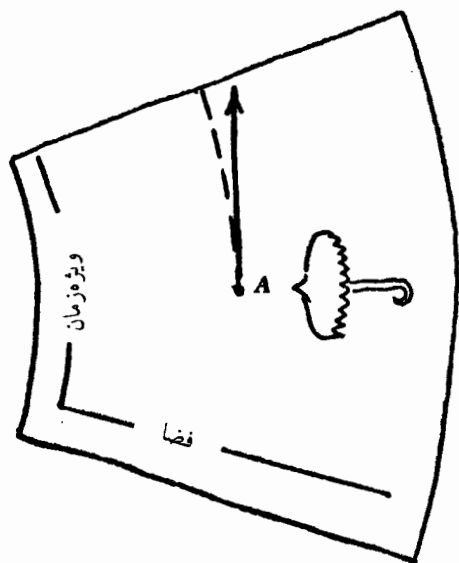
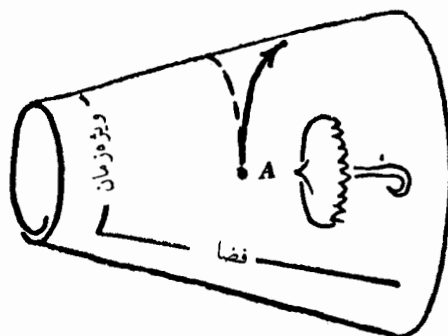


شکل ۱۰-۲. نحوه ساختن استوانه و مخروط

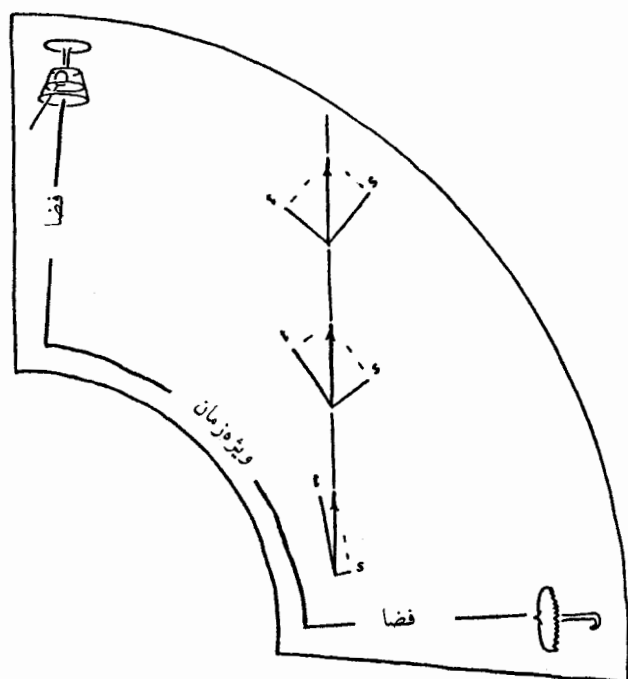
با چه سرعتی می‌توانید سقوط کنید؟

پاسخ این سؤال را از روی نمودار می‌توان پیدا کرد. سرعت جسم در حال سقوط از طریق فضا زمان، مانند سرعت هر جسم دیگر، ثابت است. اگر جسم در حال سقوط از حالت سکون سقوط کند، فقط در جهت زمان شروع به حرکت می‌کند. و در همین جهت با همین سرعت به حرکت خود ادامه می‌دهد تا به قسمت دیگر نمودار فضا زمان می‌رسد. در قسمت دیگر نمودار، جهت فضا با جهت زمان متفاوت است. این حرکت که ابتدا از طریق زمان شروع شد، اکنون در جهت فضا نیز قرار دارد. در حالت حدّ، وقتی مسیر بینهایت

نه تنها علت گرانش کشف شد، بلکه شما یک پاداش هم گرفتید. یکی از مشکلات ایده متعارف گرانش این است که سرعت جسم در حال سقوط به‌طور پیوسته افزایش می‌یابد. در این صورت، چه چیزی جسم در حال سقوط را باز می‌دارد که سرعت آن از سرعت نور بیشتر نشود؟ جرم در حال افزایش آن؟ خیر، زیرا شتاب جسم در حال سقوط مستقل از جرم است.



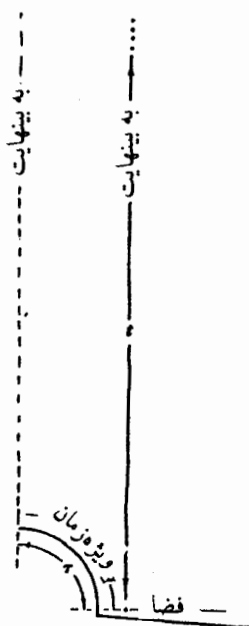
شکل ۱۰-۳. زاویه میان خط مماس و قوس دایره از صفر در A شروع و به نسبت اینکه چقدر در امتداد قوس پیش بروید بزرگ می‌شود. چون زمان در جهت قوس جریان دارد و شما به‌طور پیوسته در زمان حرکت می‌کنید، نتیجه می‌شود که زاویه میان مماس و قوس متناسب با زمان افزایش می‌یابد. از این رو شیب خط، مماس روی مخروط متناسب با زمان است، و شیب خط با سرعت روبه پایین جسم در حال سقوط، که از A در حالت سکون شروع می‌شود، متناسب است. بنابراین، سرعت روبه پایین جسم در حال سقوط متناسب با زمان افزایش می‌یابد، که همان قاعده گالیله برای اجسام در حال سقوط است. این قاعده تا زمانی صادق است که سرعت جسم در حال سقوط خیلی کمتر از سرعت نور، یا زاویه میان مماس و قوس کوچک باشد.



شکل ۱۰-۴

طولانی می شود (یعنی، بعد از بینهایت زمان مختصاتی) جسم از طریق فضا با همان سرعتی حرکت می کند، که ابتدا با آن از طریق زمان شروع کرده بود. این گفته به این معنی است که جسم، درحد، با سرعت نور سقوط می کند. توجه کنید که در حالی که بینهایت زمان مختصاتی، t ، طول می کشد تا جسم به سرعت نور برسد، در این مدت فقط مقدار محدودی از ویژه زمان، τ ، می گذرد.

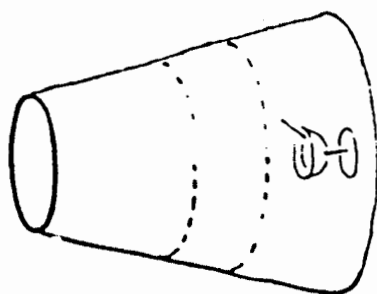
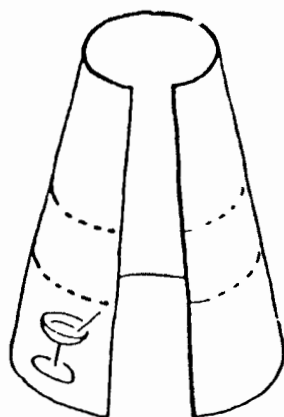
درواقعیت، اجسام درحال سقوط، مدت ها قبل از آنکه به سرعت نزدیک به سرعت نور برسند، با زمین برخورد می کنند. حتی اگر سوراخی در زمین حفر شود و جسم بتواند تا مرکز زمین سقوط کند، بازهم به سرعت نزدیک به سرعت نور نمی رسد. زمین، برای این موضوع، خیلی کوچک است.



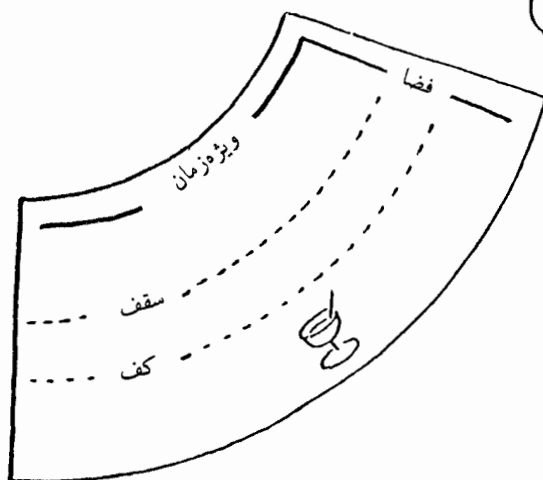
شکل ۱۰-۵

کف اتاق بالا می آید

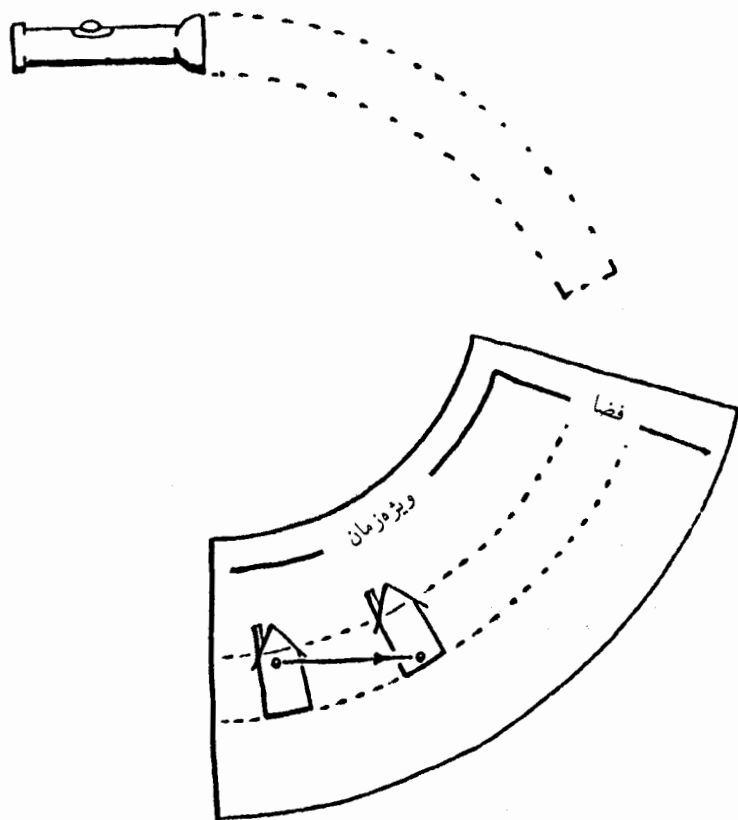
نمودار مخروطی فضازمان باعث شد جسم ساکن به پایین سقوط کند، اما از کجا معلوم که این جسم با شتاب گرانی (یک g) سقوط می‌کند؟ برای اینکه بینیم این جسم به درستی سقوط می‌کند، مخروط را روی قاعدهٔ بزرگتر قرار دهید، از یک یال آن را ببرید و سپس بازکنید. در این حالت کف و سقف اتاق روی مخروط را در نظر بگیرید. طولهای قوس مخروط در این دو محل باید به نسبت عکس سرعت زمان (و سرعت نور) در آنجا باشند. یعنی، هرچه قوس طولانیتر باشد، زمان کندتر می‌گذرد. از این رو، انحناى قوس باید عکس انحناى باریکه در حال سقوط نور چراغ قوه باشد. بدین معنی که خم قوس به بالا همان خم باریکه به پایین است. شتاب رو به پایین باریکه برابر یک g بود، بنابراین شتاب رو به بالای قوس نیز باید یک g باشد. از این رو، جسمی که در امتداد مسیر مستقیم افقی در حال حرکت است، یک شتاب رو به پایین مؤثر یک g نسبت به قوس دارد.



شکل ۱۰-۶



شکل ۱۰-۷



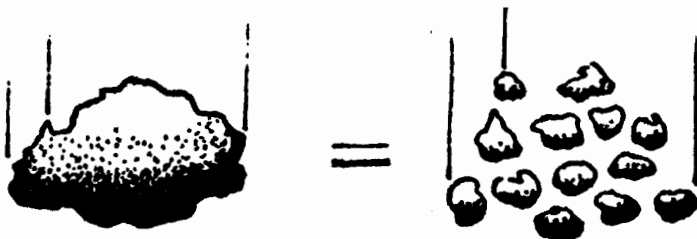
شکل ۱۰-۸

اگر بخواهید نمودار باز شده فضا زمان مخروطی را دقیقاً تعبیر کنید، باید بگویید که اتاق یک شتاب روبه بالای برابر با یک g دارد. در واقع، بنا به نظریه گرانی اینشتین اجسام سقوط نمی کنند، بلکه کف اتاق بالا می آید! این نظریه به راحتی توضیح می دهد که چرا اجسام سنگین سریعتر از اجسام سبک سقوط نمی کنند. اما خیلی این مسئله را سرسری نگیرید، زیرا اگر کف هم در نیواورلئان و هم در کلکته بالا بیاید، قطر زمین ثابت باقی نمی ماند.

تبیین گاليله

در اینجا تبیین گاليله مبنی بر اینکه چرا اجسام سبک و سنگین (بدون در نظر گرفتن مقاومت هوا) با هم سقوط می‌کنند می‌آید.

شتاب یک جسم سنگین در حال سقوط، مثلاً یک سنگ بزرگ، برابر است با شتاب سقوط یک سنگ کوچک، زیرا سنگ بزرگ چند تا سنگ کوچک است که با هم سقوط می‌کنند. گاهی بعضیها که در این موارد می‌اندیشند، به همین نتایج می‌رسند. اینان، گرچه اولین کسانی نیستند که این فکر به آنها نسبت داده شود، ولی، به هر حال، پا جای پای بزرگان می‌گذارند.



شکل ۱۰-۹

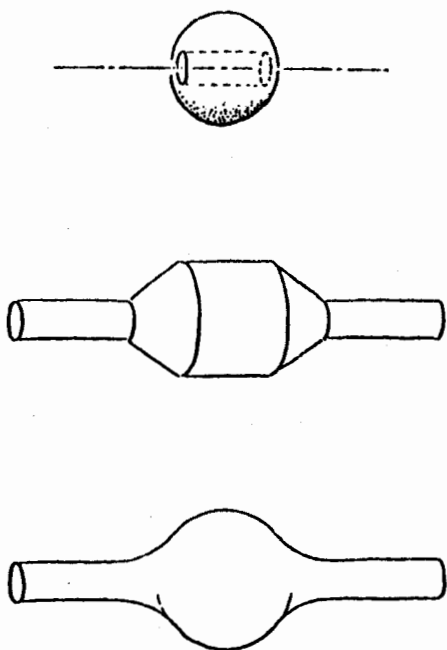
تونلی به سوی چین

در داخل زمین، گرانی زمین کم می‌شود^۱ و در مرکز آن به صفر می‌رسد.

مدل نمودار فضا زمان یک خط فضایی که از طریق سوراخی در زمین عبور می‌کند را می‌توان به صورت زیر توضیح داد. طبق معمول، ویژه زمان همانند ساعت (با استفاده از زاویه) حول نمودار اندازه گیری می‌شود. زمان مختصاتی صرفاً اندازه طولی اثری است که

۱. گرانی را با فشار اشتباه نگیرید. هرچه به داخل زمین برویم فشار افزایش می‌یابد، اگرچه گرانی کاهش می‌یابد.

فرض کنید تونلی در زمین حفر شود. همچنین فرض کنید که این تونل مستقیماً از مرکز زمین می‌گذرد و از طرف دیگر زمین، از چین، سردر می‌آورد. (اگر این تونل از شمال آمریکا حفر می‌شد، از استرالیا، نزدیک اقیانوس هند، خارج می‌شد). درباره این تونل خوب فکر کنید، زیرا نشان دهنده مکانیک نمودار فضا زمان هنگام عبور از یک ناحیه با گرانی تقریباً صفر در فضای دور به یک ناحیه با گرانی قوی در سطح زمین و به ناحیه با گرانی صفر در مرکز زمین است. توجه داشته باشید که



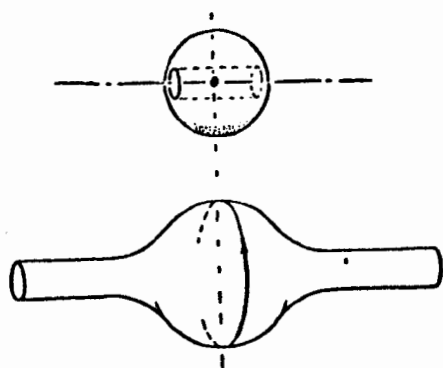
شکل ۱۰-۱۰. اگر جسمی به طور مستقیم به داخل یک چاه سقوط کند، تا آنجا که به جسم مربوط می‌شود، فضا فقط یک بعد دارد، که مستقیماً از زمین عبور می‌کند. سطح فضازمان برای یک چنین فضای یک بعدی در بالا نشان داده شده است. این سطح که از استوانه و مخروط درست شده است یک تقریب خام و اولیه برای سطح هموار و دقیقتر پایین آن است.

در محل تبدیل کره و استوانه، که در آن سطح فضازمان پُرشیب است، شدت گرانی حداکثر است. اینجا سطح زمین است. تبدیل کره به استوانه باید تا بینهایت ادامه یابد، اما همان طور که در شکل می‌بینید، بیشتر آن در نزدیک کره زمین اتفاق می‌افتد.

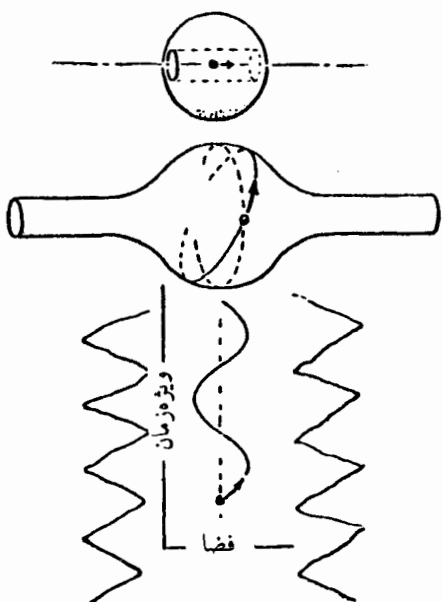
جسم متحرک بر روی نمودار برجای می‌گذارد. فضا به چپ و راست در امتداد سطح در جهت خطی که از سوراخ می‌گذرد اندازه‌گیری می‌شود. در ناحیه با گرانی صفر به فاصله دور از زمین، نمودار فضازمان درست همان سطح استوانه‌ای است که قبلاً بحث کردیم. نزدیک به سطح زمین، که در آن گرانی قوی است، استوانه به مخروط تبدیل می‌شود. در مرکز زمین، که در آن باز هم گرانی صفر است، مخروط دوباره به استوانه تبدیل می‌شود، و به همین ترتیب در انتهای دیگر که تونل از زمین خارج می‌شود. تبدیل استوانه به مخروط، درست همانند تبدیلات نیروی گرانشی که این اشکال آن را نمایش می‌دهند، نسبتاً تدریجی است. بنابراین، به تدریج یالهای تیز سطح فضازمان هموار می‌شوند. سطح هموارشده فضازمان در داخل زمین (داخل تونل) کروی است. این سطح کروی را با کره زمین اشتباه نگیرید.

سطح فضازمان به چه کار می‌آید؟ این سطح نشان می‌دهد که اجسام چگونه می‌توانند در امتداد خط از طریق تونل حرکت کنند. ابتدا جسمی را در مرکز زمین، در حال سکون، در نظر بگیرید. مسیر آن روی سطح فضازمان صرفاً اثری است حول "استوای" نمودار. یعنی، در فضا به چپ و راست حرکت نمی‌کند، بلکه همان طور که شکل ۱۰-۱۱ نشان می‌دهد، فقط از طریق زمان حرکت می‌کند.

در دام جاذبه گرانشی



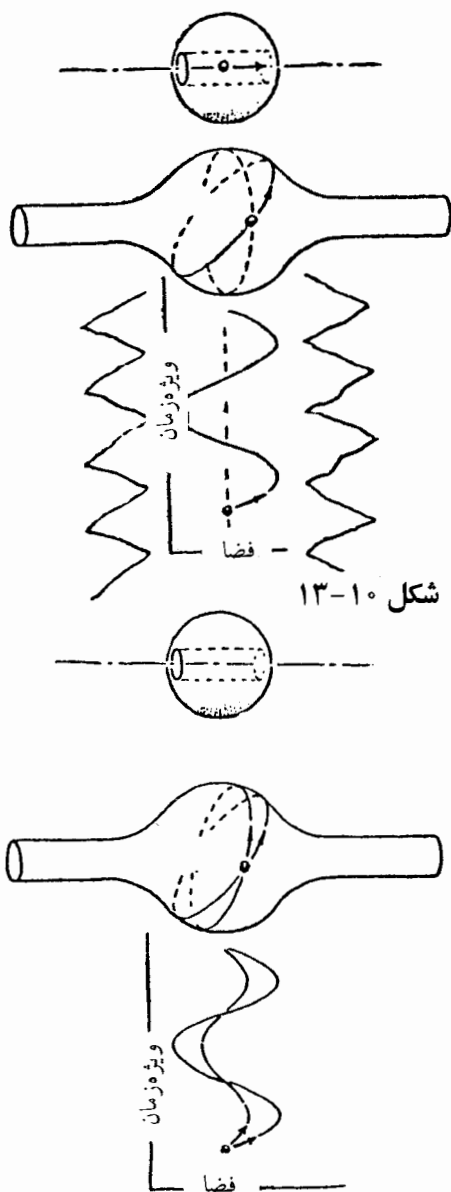
شکل ۱۰-۱۱



شکل ۱۰-۱۲

اکنون فرض کنید که یک ضربه آرام به طرف راست بر جسم وارد می آید و جسم به کندی به طرف راست حرکت می کند. این اثر را می توان با اندکی کج کردن مسیر جسم به طرف راست بر روی نمودار فضا-زمان نمایش داد. اکنون جسم حول سطح فضا-زمان روی یک دایره بزرگ متمایل به "استوا" حرکت خواهد کرد. اثر آن همانند اثر دایره البروج روی یک کره است (شکل ۱۰-۱۲). اگر شما سطح فضا-زمان را به صورت تخت^۱ در آورید "خط استوا" به یک خط مستقیم از طریق زمان تبدیل می شود و "دایره البروج" همانند یک موج سینوسی حول خط مستقیم زمان به چپ و راست نوسان خواهد کرد. از این مسئله چه چیزی نتیجه می شود؟ نتیجه می شود که جسمی که بر اثر ضربه آرام شما به طرف راست حرکت کرد، پس از مدتی بر اثر گرانی متوقف می شود، و سپس جاذبه گرانشی آن را به عقب می کشد. هنگام برگشتن در مرکز متوقف نمی شود و از آن می گذرد. اما باز هم بر اثر جاذبه گرانشی متوقف می شود و دوباره به طرف مرکز برمی گردد. این جسم، مانند یک آونگ، در یک حرکت هماهنگ ساده، به جلو و عقب حرکت می کند.

۱. این یک کار مشکل است. آیا تاکنون سعی کرده اید یک پوست پرتقال را به صورت تخت در آورید.



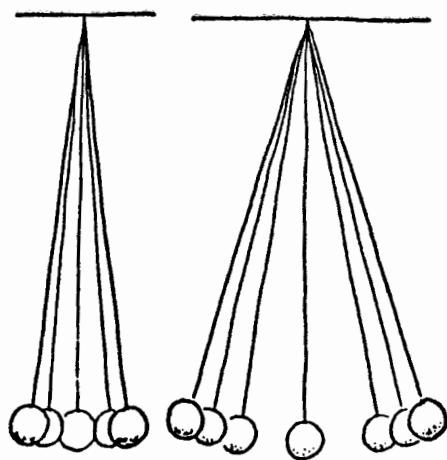
شکل ۱۰-۱۳

نظر نیوتون در این مورد این بود که جاذبه گرانشی یک نیروی فنرگونه بر جسم وارد می‌کند و باعث می‌شود که به جلو و عقب نوسان کند. به نظر اینشتین هیچ‌گونه فنر یا نیروی دیگری وجود نداشت و جسم صرفاً به خط مستقیم (تا حد ممکن مستقیم) در امتداد سطح فضا زمان حرکت می‌کرد. اگر سطح فضا زمان خمیده می‌شد، مسیر هر چیزی که بر روی آن در حرکت بود را خم می‌کرد.

اکنون فرض کنید ضربه محکمتری به طرف راست بر جسم وارد می‌آید. جسم به سرعت به طرف راست به حرکت درمی‌آید. این اثر را نیز می‌توان با کج کردن شدید مسیر جسم به طرف راست نمایش داد (شکل ۱۰-۱۳). این بار نیز جسم، همانند قبل، روی یک دایره بزرگ حول سطح فضا زمان حرکت می‌کند، منتهی تمایل آن دایره به طرف "استوا" افزایش می‌یابد. از این رو، جسم با دامنه بزرگتری به طرف جلو و عقب نوسان خواهد کرد، یعنی، قبل از توقف و برگشت تا فاصله بیشتری از مرکز دور می‌شود.

اکنون موضوع جالبی را مطرح می‌کنم. اگر دو جسم همزمان از مرکز زمین شروع کنند، و اگر به یکی از آنها ضربه شدیدتری وارد آید و بنابراین مقدار بیشتری از مرکز دور شود، با وجود این، هر دو همزمان به مرکز برمی‌گردند. دلیل این گفته را می‌توان از روی مسیر جسم نوسان‌کننده بر روی سطح فضا زمان کروی مشاهده کرد (شکل ۱۰-۱۴). محیط کره، اعم از اینکه در امتداد استوا اندازه‌گیری

شکل ۱۰-۱۴. محیط تمامی دایره‌های بزرگ یک کره یکسان است. بنابراین، زمان لازم برای نوسان در داخل تونل برای تمامی اجسام یکسان است.



شکل ۱۵-۱۰

درجه حول سطح فضازمان می‌گردند، نازنین پیش پویا برمی‌گردد. این نقاط ملاقات روی طرفهای مقابل کره فضازمان قرار دارند، و بنابراین متقاطرنند. پویا و نازنین، هر دو مسیرهای دایره بزرگ میان این نقاط را طی می‌کنند، و طول مسیرهای آنها میان متقاطرها مساوی است، و بنابراین همزمان به متقاطرها می‌رسند. این دوقلوها، به کمک گرانی، همزمان و در یک طول عمر زیست‌شناختی به یک نقطه می‌رسند. توجه داشته باشید، درجات گردش حول سطح فضازمان طول عمر را تعیین می‌کند، و دوقلوها، نازنین و پویا، میان هر دو ملاقات ۱۸۰ درجه طی می‌کنند.

اگر دوقلوها در فضای تهی باشند، پویا در منزل بماند و نازنین بر روی یک فتر بلند به عقب و جلو بازبجهد، و گرانی هم وجود نداشته باشد، آنگاه هنگام برگشتن، نازنین از

شود یا دایره البروج، یکسان است. محیط حتی به اینکه دایره البروج چقدر خم می‌شود نیز بستگی ندارد. طول مسیر حول سطح فضازمان دوره نوسان را نشان می‌دهد. بنابراین، جسم در داخل تونل همانند یک آونگ است (شکل ۱۵-۱۰). وقتی فاصله آن از مرکز بیشتر است سریعتر نوسان می‌کند؛ از این رو، زمان یک رفت و برگشت تغییر نمی‌کند.

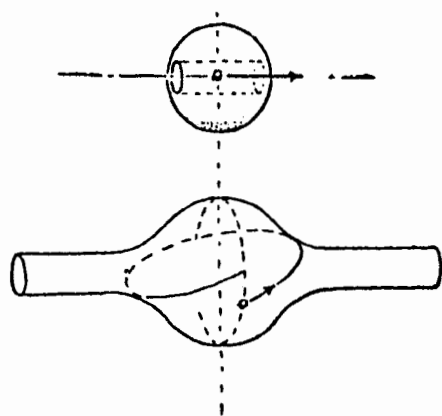
پرسش

فرض کنید دوقلوهای مشابه، پویا و نازنین، در مرکز زمین هستند. پویا در مرکز زمین باقی می‌ماند و نازنین در داخل تونل، همانند تاب‌بازی، به طرف عقب و جلو نوسان می‌کند. یعنی، نازنین از پویا دور می‌شود و دوباره به طرف او برمی‌گردد. در اینجا پویا دوقلوی مانده در منزل و نازنین دوقلوی مسافر است. الف) بعد از مدتی معلوم می‌شود که پویا بیشتر از نازنین عمر کرده است

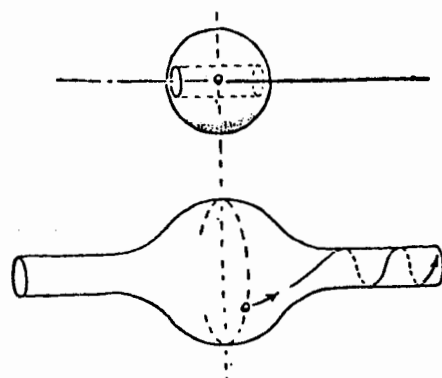
ب) در این وضعیت، دوقلوها پس از به هم رسیدن متوجه می‌شوند که هنوز هم سن هستند

پاسخ

ب) پاسخ درست است. اگر سطح فضازمان تخت بود، دوقلوی مسافر، یعنی نازنین، کمتر از دوقلوی در منزل، یعنی پویا، عمر می‌کرد. اما سطح فضازمان در میدان گرانشی زمین تخت نیست. هر نیم‌چرخه، یعنی هربار که ۱۸۰



شکل ۱۰-۱۶



شکل ۱۰-۱۷

لحاظ زیست‌شناختی کمتر از پویا عمر کرده‌است. اکنون متوجه می‌شویم که گرانشی چیزی بیشتر از نیروست.

فرار

اما، اگر جسم آنقدر پیش برود که از تونل خارج شود قضیه فرق می‌کند. در این حالت، مسیر جسم از قسمت کروی سطح فضازمان خارج می‌شود (شکل ۱۰-۱۶). از این رو، طول مسیر رفت - برگشت افزایش می‌یابد، و زمان بیشتری طول می‌کشد تا جسم یک بار رفت و برگشت کند.

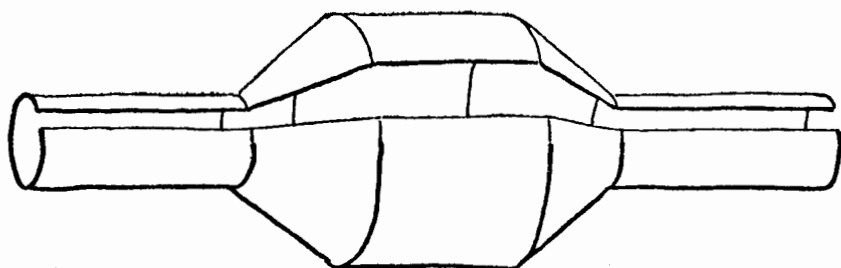
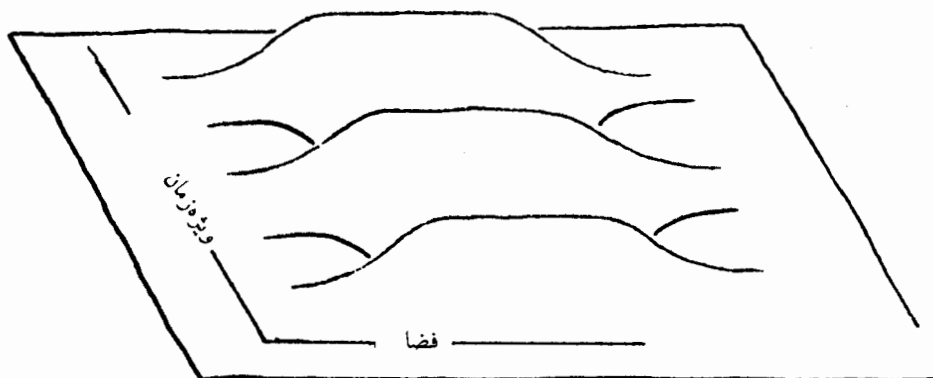
اگر ضربه‌ای که بر جسم وارد می‌آید به اندازه کافی شدید باشد، جسم نه تنها از تونل خارج می‌شود، بلکه وارد قسمت استوانه‌ای فضازمان می‌شود. در داخل قسمت استوانه‌ای، هیچ نیروی بازگرداننده‌ای به جسم وارد نمی‌شود و بنابراین برای همیشه مارپیچ‌وار به پیش می‌رود. جسم از میدان گرانشی فرار می‌کند (شکل ۱۰-۱۷). توجه داشته باشید که مسیر مارپیچ لوله‌نشده یک خط مستقیم در فضازمان است، نکته مهم عبارت است از مسیر اثر جسم بر روی سطح، نه مسیر (مارپیچ) اثر آن از طریق فضای سه‌بعدی.

مدل، نه شکل

دانستن این نکته مهم است که مسیر اثر جسم به وسیله مدل خود سطح کنترل می‌شود، یعنی به تاروپود نخهایی که سطح را درست می‌کنند

در آورد؛ در این حالت سطح و اثرهای روی آن تغییری نمی‌کنند. نمودار ۱۰-۱۸ یک سطح فضا زمان ساده شده را نشان می‌دهد که از یک طرف پاره و باز شده است. قسمت داخل زمین (قسمت پهن) هنگام باز شدن چین و چروک دار شده است. اگر بخواهید می‌توانید این قسمت‌ها را نیز تخت کنید. مورچه‌های کور، که بر روی این سطح در حرکت باشند، به استثنای گوشه‌ها، هیچ تمایزی میان سطح لوله شده و سطح باز شده نمی‌توانند قایل شوند.

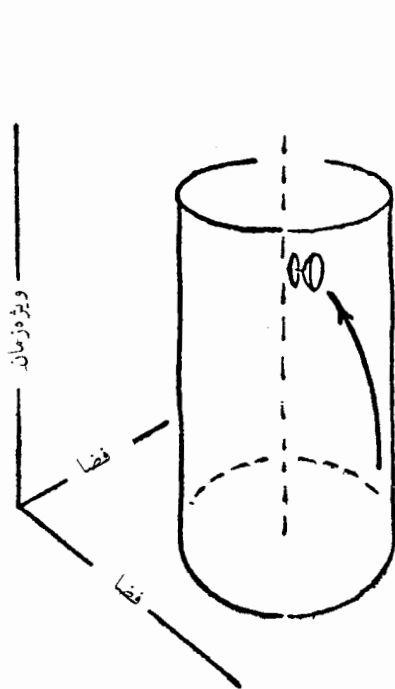
بستگی دارد، نه به شکل سه بعدی سطح. شکل به این دلیل انتخاب می‌شود که نمایش سطح خوب و آموزش آن راحت باشد، درست همان طور که لباس بر تن مانکن فروش آن را تسهیل می‌کند. در داخل لبای شویی شکل سه بعدی لباس درهم پیچیده و بد شکل می‌شود، اما مدل لباس کوچکترین تغییری نمی‌کند، اگرچه تشخیص آن مشکل است. درست همان طور که لباس را می‌توان با تا کردن و یا به صورت مجاله پهن کرد، سطح فضا زمان را نیز می‌توان به صورت تخت



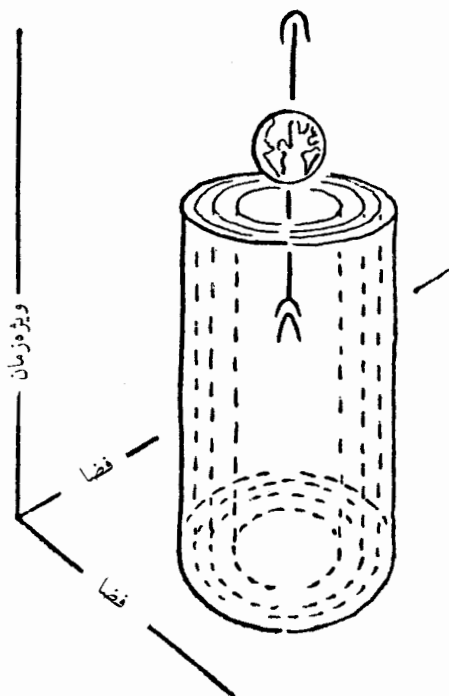
گرانش به وسیله شکست

اگر شما نخواهید فضا زمان خمیده شود، در صورتی که سرعت اجسام از طریق فضا زمان را به جای ثابت متغیر در نظر بگیرید، می توانید تمامی اثرهای گرانشی را بدون فضا زمان خمیده تصویر کنید. سرعت در زمین و در نزدیکی زمین کاهش می یابد. یک لوله تار نوری را، که از طریق زمان در حرکت است، مجسم کنید. زمین از طریق زمان در مرکز لوله حرکت می کند (شکل ۱۰-۱۹). ضریب شکست لوله خارج از مرکز آن کاهش می یابد، که در واقع در لوله های نوری واقعی نیز چنین است. سرعت اجسام از طریق فضا زمان، به صورت معکوس با ضریب شکست محیطی که در آن حرکت می کنند متناسب است. هرچه ضریب شکست بیشتر باشد، سرعت کمتر است.

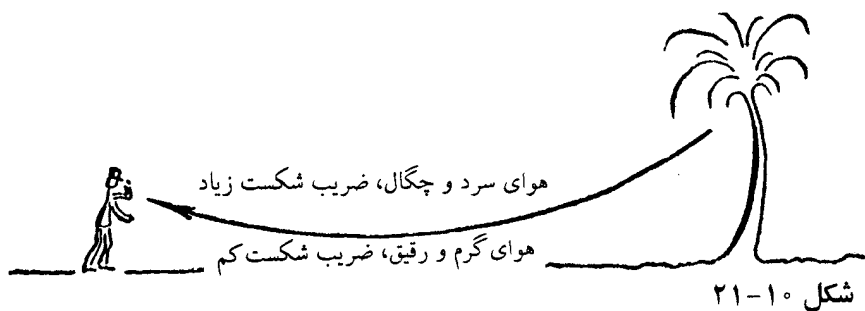
شکست در محیط های با ضریب شکست متغیر را می توان با پدیده سراب به بهترین وجه نمایش داد. توجه داشته باشید که مسیر پرتو نور به محیط های با ضریب شکست زیاد نزدیک و از محیط های با ضریب شکست کم دور می شود (شکل ۱۰-۲۱).



شکل ۱۰-۲۰

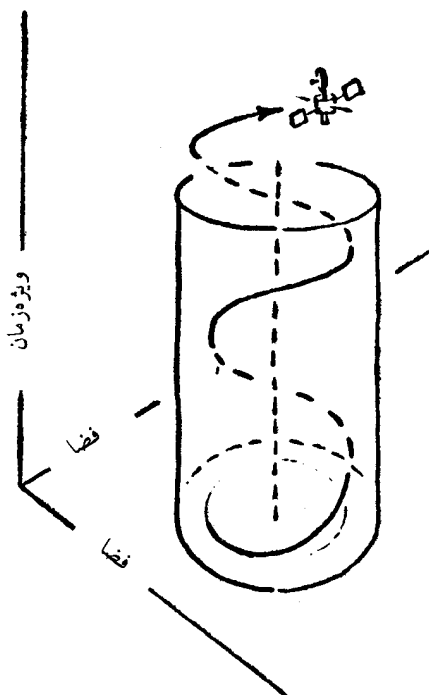


شکل ۱۰-۱۹

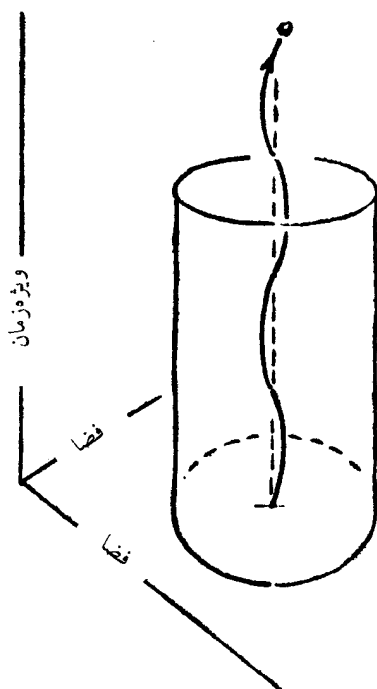


مسیر یک جسم که در ابتدا در فضا ساکن است، و فقط از طریق زمان حرکت می‌کند "شکسته" می‌شود و به سمت زمین شتاب می‌گیرد.

شکل ۱۰-۲۲ سنگی را نشان می‌دهد که در یک تونل از طریق مرکز زمین به عقب و جلو "شکسته" می‌شود. به همین طریق نور از لوله نور حرکت می‌کند. شکل ۱۰-۲۳ یک کشتی فضایی را نشان می‌دهد که دور زمین می‌چرخد. این نیز یک طریق دیگر از حرکت نور در لوله نور است.



شکل ۱۰-۲۳

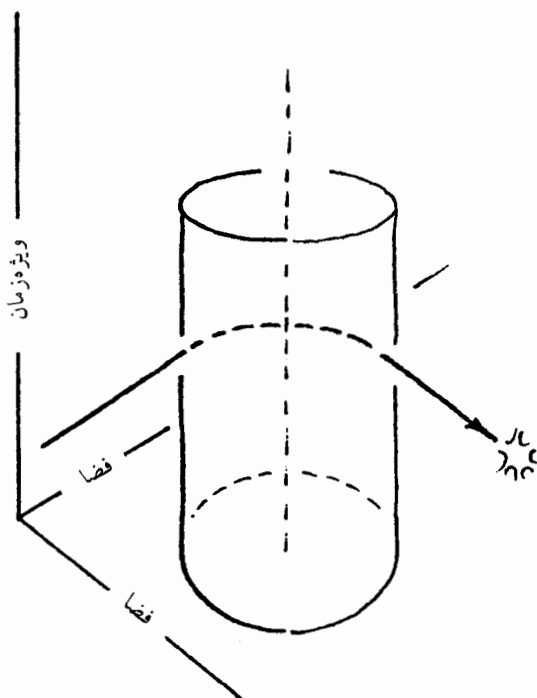


شکل ۱۰-۲۲

شکل ۱۰-۲۴ یک باریکه نور را نشان می‌دهد که با عبور از کنار زمین (یا خورشید) "شکسته" شده است. در اینجا باریکه طوری "می‌شکند" که گویی از کنار یک عدسی استوانه‌ای گذشته است.

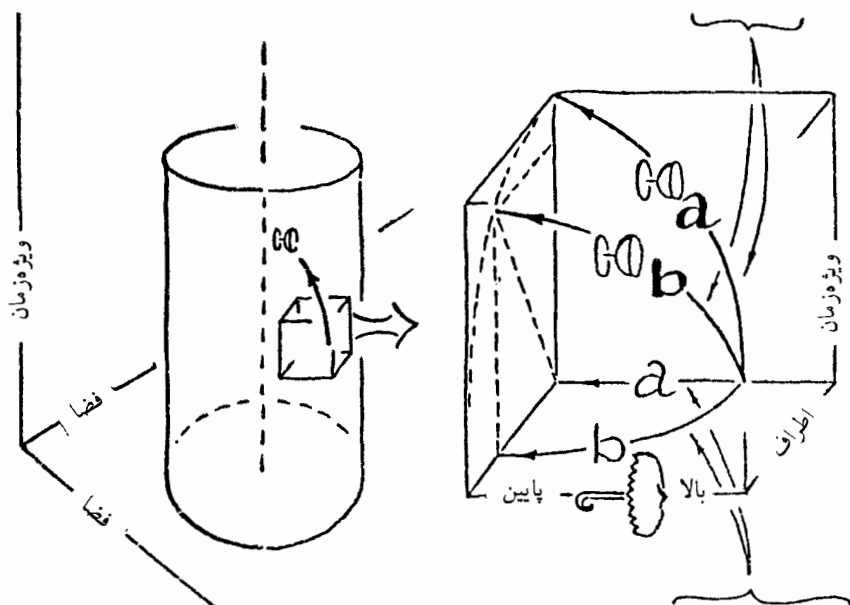
شکل ۱۰-۲۵ یک مکعب کوچک (بزرگ شده) فضازمان را نشان می‌دهد. اگر لیوان صرفاً به طرف پایین رها شود مسیر a ، اما اگر به اطراف پرت شود، مسیر b را دنبال می‌کند. انحنای مسیر لیوان از طریق فضازمان به شیب "ضریب شکست" در جهت روبه پایین بستگی دارد. لیوان روی مسیر a و لیوان روی مسیر b حرکت از طریق فضازمان را عمود بر این شیب آغاز می‌کنند. از این رو، شعاع انحنای مسیر a و مسیر b یکسان است. شعاع انحنای مسیر لیوان در فضازمان، و نه یقیناً در فضا، اعم از اینکه آن را به پایین رها یا به اطراف پرت کنید، یکسان است.

همچنین توجه کنید که ویژه زمان برای اینکه لیوان a یک مسافت معین سقوط کند بیشتر از ویژه زمان لازم برای سقوط لیوان b در همین مسافت است. اما زمان مختصاتی هر دو یکسان است، زیرا طول مسیرهای a و b با هم برابر است.



شکل ۱۰-۲۴

انحنای مسیرها در فضا زمان یکسان است



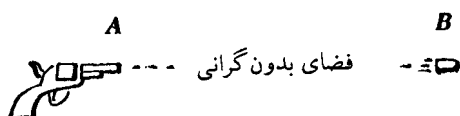
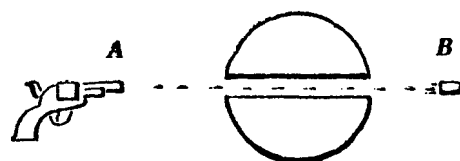
مسیرها در فضا:

یک مسیر مستقیم به پایین و مسیر دیگر خمیده

شکل ۱۰-۲۵

این موقعیت شگفت انگیز تر از آن نیست که شما خیال می کنید، بلکه شگفت انگیز تر از آن است که بتوانید فکرش را بکنید.

۱۱



شکل ۱۱-۱

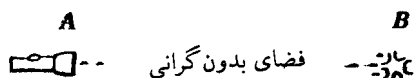
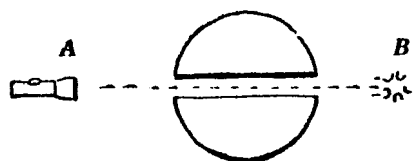
فضا چین خوردگی پیدا می کند

گلوله در مقابل فوتون

اکنون می خواهم مطلبی را بیان کنم که چندان آشکار نیست و به نظر شما عجیب می آید. درواقع، حتی بر اینشتین هم آشکار نبود. اینشتین قبل از اینکه به شناخت گرانی برسد، چندین سال درباره آن فکر کرده بود.

اگر شما در فضای تهی با گرانی صفر، گلوله ای را از نقطه A به نقطه B شلیک کنید، این گلوله در مدت زمان معینی با سرعت ثابت مسافت میان A و B را طی خواهد کرد.

فرض کنید که شما ابتدا کره زمین را میان دو نقطه A و B قرار می دهید، تونلی در آن حفر می کنید که گلوله از آن بگذرد، و سپس از نقطه A به نقطه B شلیک می کنید. زمانی که طول می کشد تا گلوله دوم از A به B برسد،



شکل ۱۱-۲

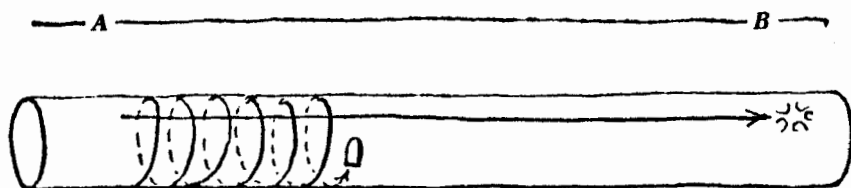
مسیر آن مارپیچ وار به طرف راست است. اما زمان بر نور نمی گذرد. نور مستقیماً از طریق استوانه پیش می رود، و بنابراین فقط از طریق فضا در حرکت است.

هنگامی که سطح فضا زمان بر اثر گرانی، به صورت قیف گونه گشاد می شود، گام مسیر مارپیچ فضا زمان گلوله افزایش می یابد. همان طور که قبلاً نشان داده شد، گام مارپیچ بر اثر حرکت روی مقطع مخروطی افزایش می یابد. در اینجا نیز سعی کنید با ساختن یک مدل کاغذی این آزمایش را انجام دهید. چون فاصله میان حلقه های مارپیچ افزایش می یابد، گلوله قسمت کمتری از سرعت خود را صرف حرکت از طریق زمان می کند. بنابراین، بیشتر سرعت آن صرف حرکت از طریق فضا، به طرف راست می شود. طول کلی مسیر گلوله از A تا B کاهش می یابد و بنابراین زمان کمتری طول می کشد تا از A به B برسد.

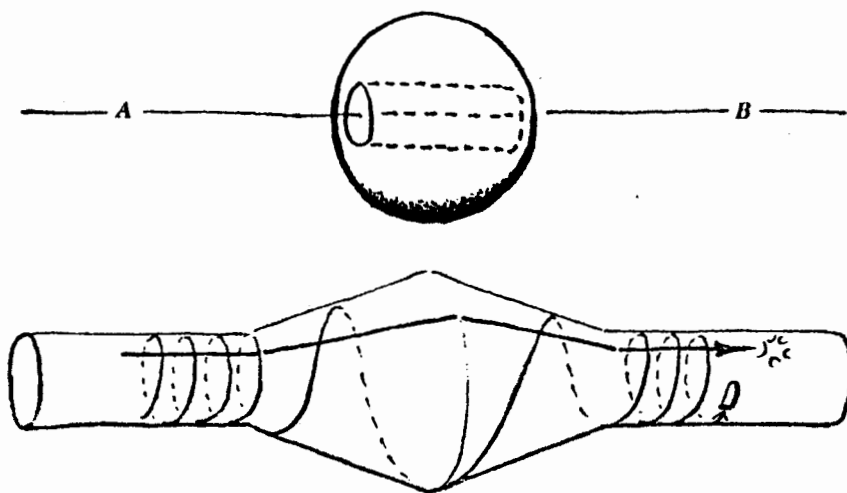
کمتر خواهد بود. چرا؟ زیرا این گلوله در سر راه خود به طرف نقطه B به مرکز زمین سقوط می کند. البته، هنگام خروج، تمامی سرعتی را که ضمن نزدیک شدن به مرکز زمین به دست آورده بود ازدست می دهد، اما در هر حال سرعت آن در داخل زمین بیشتر از سرعت آن در فضای تهی است.

اکنون آزمایش را به جای هفت تیر با یک چراغ قوه تکرار کنید. در این آزمایش نتیجه معکوس می شود. وقتی چراغ قوه را رو به داخل تونل روشن کنید، زمانی که لازم است تا نور از A و از طریق تونل به B برسد کاهش نمی یابد، افزایش می یابد. چرا؟

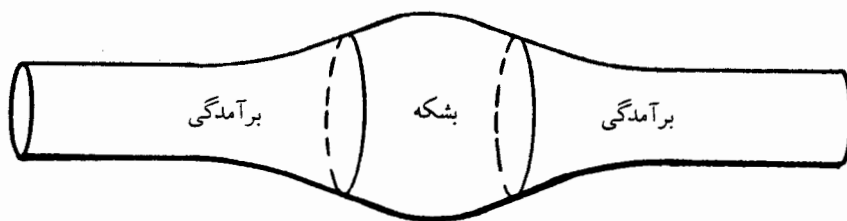
شکل های ۱۱-۳ و ۱۱-۴ نمودار طرح وار این وضعیت را نشان می دهند. در حالت بدون زمین - بدون گرانی سطح فضا زمان استوانه ای است. در این حالت، گلوله، نسبت به نور، کند حرکت می کند و بنابراین عمده تاً از طریق زمان در حرکت و



شکل ۱۱-۳. این نمودار مسیر فضا زمان گلوله و فوتون را هنگام عبور از A به B در فضای تهی بدون گرانی نشان می دهد. طول مسیر فوتون، که صرفاً از طریق فضا در حرکت است، فضای میان A و B را مشخص می کند.



شکل ۱۱-۴. این نمودار مسیر فضا زمان گلوله و فوتون را در فاصله میان A و B ، هنگامی که زمین نیز میان این نقاط قرار دارد، نشان می‌دهد. مسیر فوتون، که صرفاً از طریق فضا حرکت می‌کند، بر اثر قسمت مخروطی افزایش می‌یابد. بنابراین، فاصله فضایی میان A و B ، هنگامی که از داخل زمین پیاده می‌شود، باید به نحوی افزایش یابد.



است و نشان‌دهنده قسمت سطح فضا زمان داخل زمین است. اما، ساختن و تجسم مخروط، راحت‌تر از ساختن و تجسم بشکه و برآمدگی است، درحالی که تقریباً همان اثر را تولید می‌کند.

شکل ۱۱-۵. سطح فضا زمان در زمین و نزدیک به زمین را، که در شکل ۱۱-۴ با دو مخروط ناقص نشان داده شده بود، می‌توان، به صورت دقیقتر، با یک بشکه و دو قسمت برآمده از هر انتهای آن نمایش داد. سطح بشکه کروی

دست انداز

به عبارت دقیقتر، قسمت مخروطی گویای آن است که گرانی زمین، به نحوی، فاصله میان A و B را افزایش می دهد. یک سری بازررس صحرایی، به نام ناظر محلی، متوجه خواهند شد که، هنگام قرارداد زمین میان A و B ، فاصله میان این دو نقطه (طول دستان ناظرها) افزایش خواهد یافت.

ناظران محلی چگونه متوجه می شوند که فضای اضافی میان A و B تامی شود؟ آنها متوجه نمی شوند که چگونه تامی شود، بلکه همین قدر می دانند که فضای اضافی ایجاد شده است. تاشدگی ممکن است یک فراز یا نشیب و یا تعدادی چین و چروک (شکل ۱۱-۸) باشد. می دانیم که فقط مدل داخلی سطح مهم است، از شکل صرفاً برای سهولت نمایش استفاده می شود.

از طرف دیگر، مسیر نور، که قبلاً از داخل استوانه به صورت مستقیم بود، اکنون در قسمت مخروطی منحرف می شود. این انحراف هم طول مسیر و هم زمان لازم برای طی این مسیر را افزایش می دهد. توجه کنید که افزایش زمان لازم برای اینکه نور قسمت "دست انداز" را طی کند محدود است. کاهش زمان گلوله بر اثر وجود این دست انداز ممکن است بینهایت باشد. اگر گلوله با سرعت صفر به سمت راست شروع به حرکت کند، در فضای بدون گرانی، بینهایت طول می کشد تا از A به B برود. در واقع، هیچگاه به B نمی رسد. اما اگر با سرعت صفر شروع کند و زمین هم در فاصله میان A و B باشد، در مدت زمان محدودی به طرف مرکز زمین سقوط خواهد کرد، و بنابراین کاهش زمان بینهایت خواهد بود.

A

B



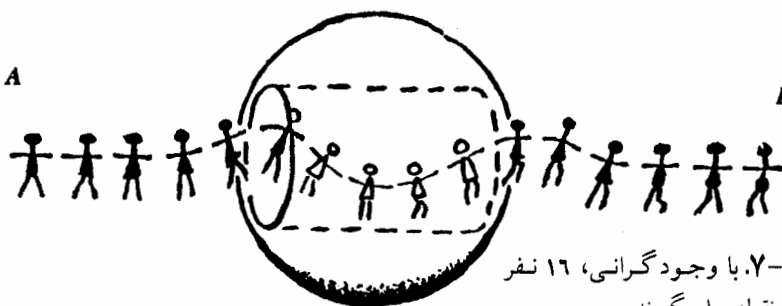
شکل ۱۱-۶. در فضای بدون گرانی، ۱۵

ناظر محلی به صورت دست کشیده میان A

و B جامی گیرند

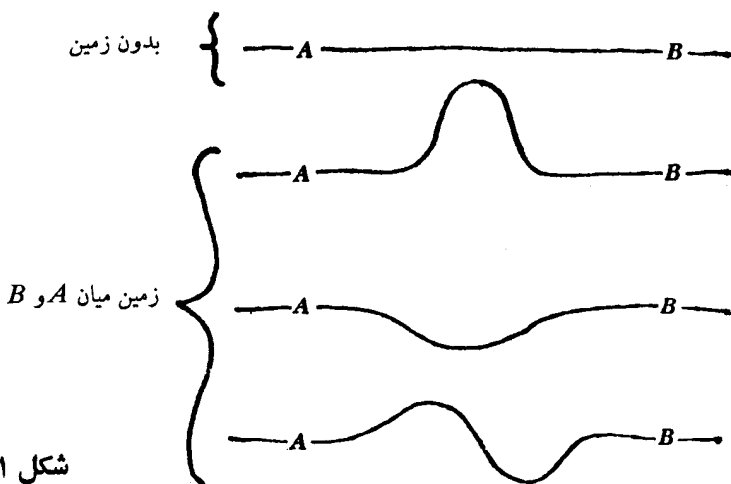
A

B

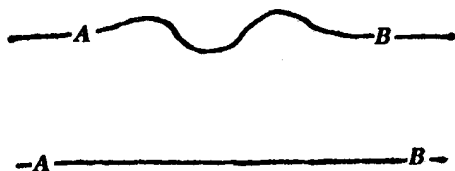


شکل ۱۱-۷. با وجود گرانی، ۱۶ نفر

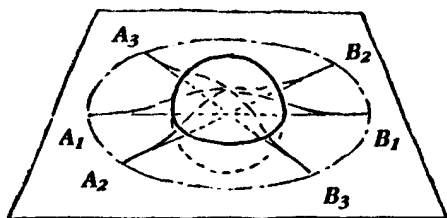
میان این دو نقطه جامی گیرند



شکل ۱۱-۸

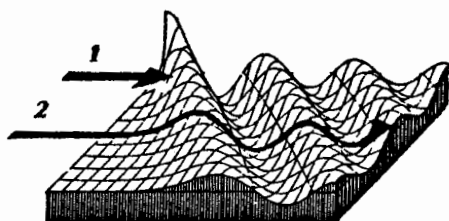


شکل ۱۱-۹



شکل ۱۱-۱۰. هنگامی که زمین میان نقاط
قرار می‌گیرد، فاصله میان تمامی زوج نقطه‌ها
افزایش می‌یابد.

اگر A و B را از دو طرف بکشیم چه
اتفاقی برای چین و چروکها می‌افتد؟ (شکل
۱۱-۹). متأسفم، این کار را نمی‌توانید بکنید.
چرا؟ فرض کنید مسافت از طریق مرکز زمین
در امتداد قطرهای مختلف یک دایره بزرگ،
که حول زمین رسم شده است، اندازه‌گیری
شود. (ناچارید مرغ اندیشه و تخیل را به پرواز
درآورید). هر قطر بر اثر گرانش اندکی
طولانیتر می‌شود (شکل ۱۱-۱۰). اما محیط
دایره چطور؟ محیط دایره خارج از ناحیه
گرانش است (یا در ناحیه‌ای است که گرانش
آن ضعیف است). بنابراین، محیط دایره
تغییر نمی‌کند. اگر A و B را از دو طرف
بکشید، محیط دایره را نیز باید بکشید. اما
محیط تحت تأثیر گرانش تغییر نمی‌کند، بنابراین
طول اضافی ندارد که در آن تابخورد. به این
ترتیب، نمی‌توانید چین و چروکهای قطر را
برطرف کنید. این چروکها وجود دارند و شما
ناچارید آنها را قبول کنید.



شکل ۱۱-۱۱. هنگامی که یک باریکه نور به خط مستقیم حرکت کند، با چینها برخورد می‌کند (باریکه ۱) و شما می‌توانید آنها را در سطح ببینید. اگر این باریکه، به جای این که به خط مستقیم حرکت کند، در سطح حرکت کند، با چینها برخورد نمی‌کند (باریکه ۲). بنابراین شما نمی‌توانید چینها را ببینید. از طرف دیگر، با وجود این که چینها دیده نمی‌شوند، اثرهای دیگری تولید می‌کنند که قابل آشکارسازی و توصیف هستند.

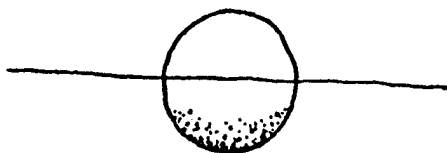
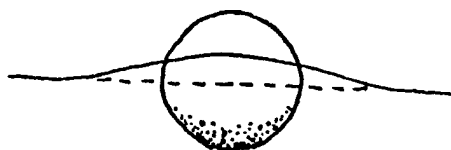
اجسام به داخل تونل نمایش می‌دهند، به گونه‌ای که گویی یک فراز و نشیب در فضای تهی وجود دارد! این یک مفهوم کاملاً گمراه‌کننده است، بنابراین سعی کنید آن را از ذهن خود خارج کنید. می‌دانیم که گرانی فقط ناشی از اثر کشیدن زمان است، حتی اگر پیچ و تاب فضا هم وجود نداشته باشد. در واقع، اینشتین برای چندین سال گرانی را فقط اثر کشیدن زمان می‌دانست. پیچ و تاب اثر-گیری است که هنگامی که در جنگ جهانی اول در انستیتوی ویلهلم قصر کار می‌کرد به ذهن او رسید.

بهترین راه برای آرایش چینها این است که آنها را به صورت یک "دست‌انداز" یک جا جمع کنید. اما توجه داشته باشید که دلیل این "بهترین راه" این است که شما به راحتی می‌توانید "ببینید" چه چیزی در جریان است. همچنین توجه داشته باشید که شما در واقع نمی‌توانید چینها یا پستی‌بلندیها را ببینید، اگرچه مانند مورچه کوری که سطح را احساس می‌کند، می‌توانید آنها را احساس کنید.

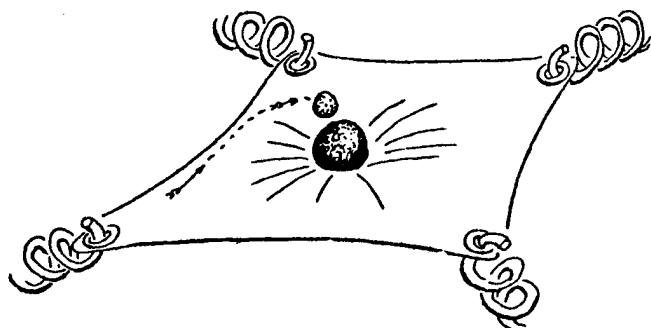
معمولاً شما چینها را به این دلیل می‌بینید که نور در فضا مستقیم پیش می‌رود و با آنها برخورد می‌کند (شکل ۱۱-۱۱). اما در این سطح نمی‌توانید چینها را ببینید، زیرا نور در سطح حرکت می‌کند!

در واقع می‌توان گفت که اصلاً چین یا پستی‌بلندی در این سطح وجود ندارد. زیرا، در غیر این صورت سطح نمی‌توانست از مرکز زمین عبور کند. اما این سطح از مرکز زمین عبور نمی‌کند؛ با این حال، به گونه‌ای عمل می‌کند که گویی چین خوردگی دارد. به طور کلی، این موقعیت شگفت‌انگیز تر از آن نیست که شما خیال می‌کنید، بلکه شگفت‌انگیز تر از آن است که بتوانید فکرش را بکنید.

بنابراین، گرانش باعث می‌شود که نتیجه اندازه‌گیریهای مسافت به گونه‌ای باشد که گویی یک پیچ و تاب در وسط دایره رسم شده حول زمین وجود دارد. در تعداد زیادی از کتابهای عامه‌فهم راجع به این موضوع، پیچ و تاب به صورت یک فرورفتگی، ناشی از وزن زمین، آمده است. این کتابها گرانی را با فروغلتیدن



شکل ۱۱-۱۲. اگرچه اندازه گیریهای مسافت مستقیماً از طریق زمین انجام می‌شود، نتیجه اندازه گیری به گونه‌ای است که گویی وسیله اندازه گیری گره افتاده است.

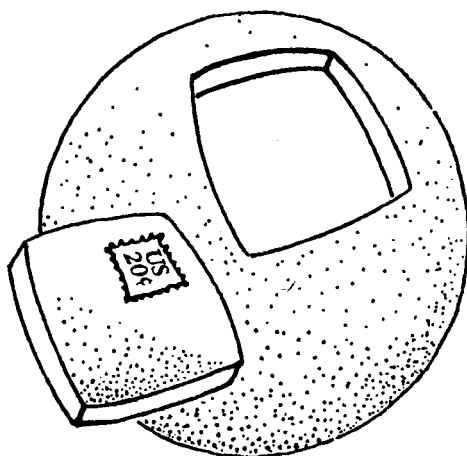


شکل ۱۱-۱۳. تصور غلط

علت دیگر

برای تشخیص هر نوع چین و چروک باید پیچ و تاب کافی وجود داشته باشد. چینهای کم عمق روی بدنه اتومبیل تقریباً قابل آشکارسازی نیستند. پیچ و تابی که کره زمین در فضا تولید می‌کند را فعلاً نمی‌توان آشکارسازی کرد. برای آشکارسازی چروکی که فقط از یک منحنی کوچک تشکیل شده است، پهنه وسیعی از فضا لازم است. اگر شما یک قسمت کوچک از پوست پرتقال را بردارید، این قسمت عملاً تخت است. چین فقط وقتی مشاهده می‌شود که قسمت بزرگی از

ابتدا کُند شدن زمان را صرفاً یک اثر فرعی گرانی می‌دانستند، اما بعداً معلوم شد که کُند شدن زمان را می‌توان علت گرانی در نظر گرفت. همین طور، پیچ و تاب در فضا را ابتدا یک اثر فرعی در نظر گرفتند، اما بعداً معلوم شد که خود پیچ و تاب می‌تواند گرانی تولید کند و باید این گرانی را نیز در نظر گرفت تا تصویر کامل شود. اگر پیچ و تاب گرانی تولید می‌کند، چگونه نادیده گرفته شده است؟ زیرا هم پیچ و تاب و هم گرانی اضافی حاصل از آن به راحتی قابل تشخیص نیستند.



شکل ۱۱-۱۴. یک قسمت کوچک از پوست پرتقال را می‌توان تقریباً به صورت تخت درآورد، اما یک تکهٔ بزرگ را نمی‌توان حتی به طور تقریبی تخت روی زمین قرارداد.

مانند خورشید رسم کنید. ناظران محلی متوجه خواهند شد که سطح این دایره به گونه‌ای است که یک پیچ و تاب در آن وجود دارد. سعی کنید مدلی از این سطح رسم کنید. چون رسم یک مدل خوب از این پیچ و تاب مشکل است، فرض کنید که شکل آن مخروطی است.

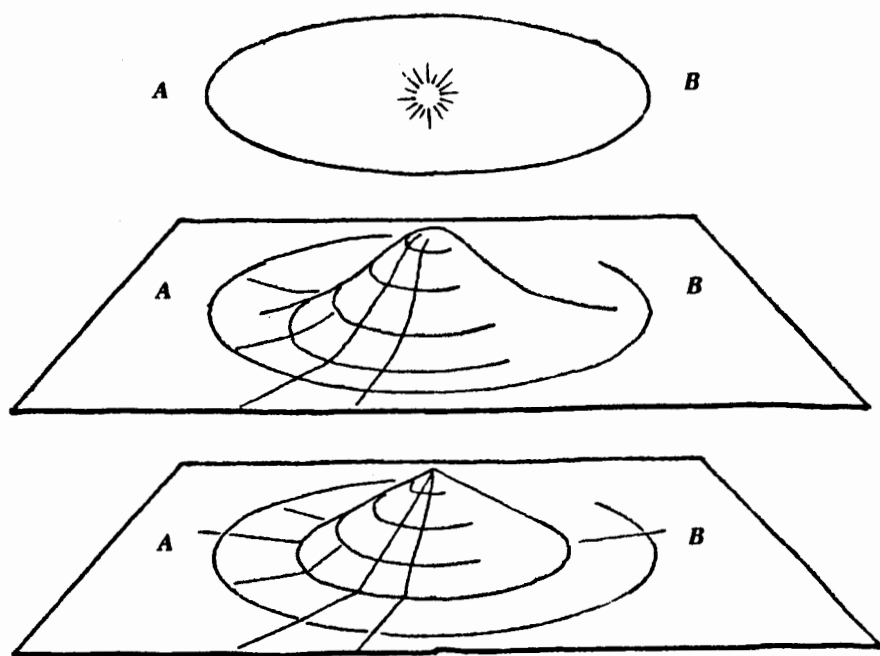
دو راه برای رسم مخروط وجود دارد. می‌توانید آن را به شکل صافی چای درست کنید. برای این کار کافی است یک دایره از کاغذ جدا کنید و آن را در امتداد یک شعاع ببرید. سپس دو لبهٔ بریده شده را روی هم بگذارید و همانجا چسب بزنید. یا می‌توانید به

پوست پرتقال را در اختیار داشته باشیم. این گفته به این معنی است که گرانی حاصل از فضای خمیده، در حرکت اجسامی که داخل اتاق حرکت می‌کنند، یک اثر قابل آشکارسازی نیست. در اینجا گُندشدن زمان مؤثر است. اما اثر گرانشی پیچ و تاب در فضا باید بر حرکت جسمی که یک مسافت طولانی در داخل گرانی شدید حرکت می‌کند، قابل آشکارسازی باشد.

اثری که شما می‌خواهید آشکارسازی کنید، فقط به پیچ و تاب و یا چین و چروک در مسیر جسمی که در فضا حرکت می‌کند، بستگی دارد. این اثر به سرعت جسم در فضا بستگی ندارد؛ اثر گرانی ناشی از گُندشدن زمان به سرعت جسم بستگی دارد. اگر سرعت جسم زیاد باشد، گُندشدن زمان وقت کافی برای اثر کردن بر آن پیدانمی‌کند. (به همین دلیل است که گلوله‌های پرسرعت تقریباً به خط مستقیم حرکت می‌کنند.) بنابراین، اگر بخواهید سوای اثر گُندشدن زمان، اثر چینه‌ها را آشکارسازی کنید، بهتر است یک جسم پرسرعت، مانند نور، را در نظر بگیرید.

اثر دست‌انداز

اکنون از جنبهٔ گُندشدن زمان گرانشی چشم‌می‌پوشیم؛ این همان اثری است که ما در زندگی روزمره با آن سروکار داریم. فقط اثر پیچ و تاب را در نظر می‌گیریم. دایره‌ای حول مرکز یک جسم بزرگ

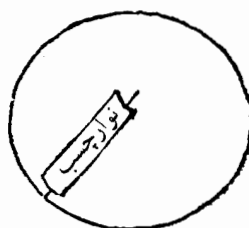


شکل ۱۱-۱۵

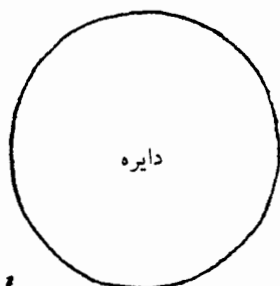
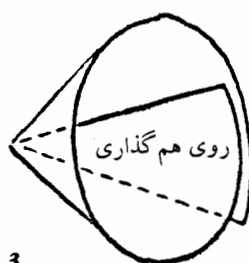
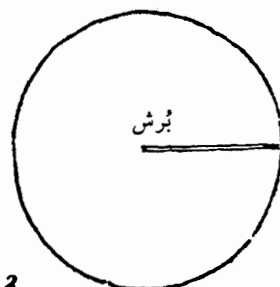
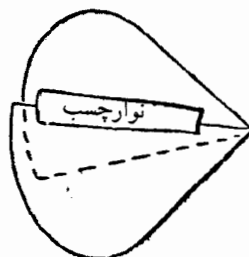
در آید، و سپس، در جهت حرکت پرتو آن را امتداد بدهید. چگونه می‌توان این پرتو را روی سطح کانونی رسم کرد؟ پرتو به خط مستقیم حرکت می‌کند، اما سطح خمیده است. بنابراین، باید مخروط را باز کنید، آن را به صورت تخت در آورید، با خط کش یک خط مستقیم روی آن بکشید و سپس دوباره آن را به حالت اول برگردانید. هنگام رسم خط مستقیم، تخت بودن مخروط کاملاً مهم است. سعی کنید خیلی در این باره دقت کنید، چون در نتیجه مؤثر می‌افتد. چگونه می‌توان این پرتو را دوباره روی سطح تخت امتداد داد؟ با فشار دادن مخروط در نزدیکی تماس خط و

روش حلی سازها عمل کنید. به این ترتیب که یک قطعه از دایره را مطابق شکل بردارید. سپس دو لبه حاصل را روی هم بگذارید و چسب بزنید. دایره خود به خود به شکل مخروط در می‌آید.

مخروط حاصل را روی یک برگ کاغذ تخت بگذارید. یک خط روی کاغذ بکشید، به گونه‌ای که از نزدیکی خورشید بگذرد، اما با آن برخورد نکند؛ این خط را یک باریکه نور در نظر بگیرید. خورشید در رأس مخروط واقع است. چگونه می‌توان یک پرتو را بر روی سطح مخروطی امتداد داد؟ در هر قسمت مخروط را فشار دهید تا به صورت تخت



روش حلی سازها



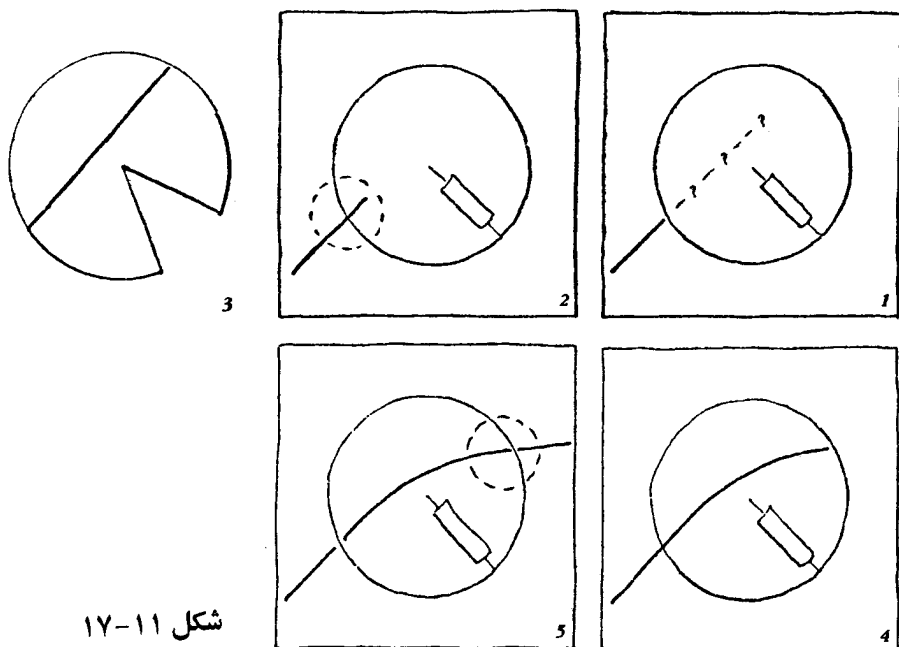
روش صافی چای



شکل ۱۱-۱۶

توجه کنید که پیچ و تاب فضا مسیر چیزی را که از طریق فضا در حرکت است به گونه‌ای خم می‌کند که جهت حرکت آن در فضا تغییر نکند. اما، این پیچ و تاب مسیر چیزی را که فقط از طریق زمان در حرکت است (و در فضا ساکن) تغییر نمی‌دهد و بنابراین حرکت آن در فضا رو به پایین نمی‌شود.^۱ وقتی شما سنگی را از بلندی رها می‌کنید، سقوط آن ناشی از جنبهٔ کندشدن زمان گرانشی است، نه جنبهٔ پیچ و تاب فضا.

امتداد دادن پرتو به طور مستقیم، به همان ترتیب که روی سطح مخروطی انجام شد. می‌بینیم که خورشید پرتو نوری را که از کنار آن رد می‌شود خم می‌کند. انحرافی که شما از این طریق پیدا کرده‌اید به انحراف ناشی از اثر کندشدن زمان افزوده می‌شود. مقدار این انحراف به گونه‌ای است که انحراف ناشی از کندشدن زمان را دو برابر می‌کند. بنابراین، مقدار انحراف پرتو نوری که از نزدیکی خورشید رد می‌شود، دو برابر مقداری است که سولدر و اینشتین برای آن در نظر گرفته بودند.



شکل ۱۱-۱۷

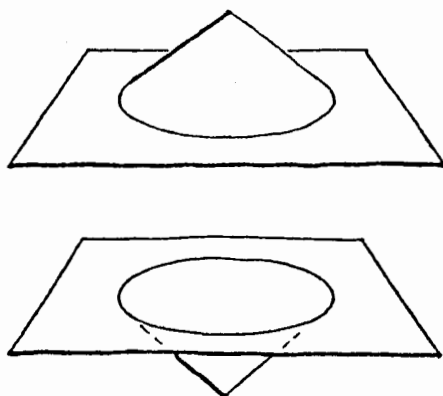
نیرو بر آن وارد نمی‌کند.

۱. این موضوع یادآور اثر میدان مغناطیسی بر ذرهٔ باردار است. اگر ذره ساکن باشد، میدان

پرسش

پرتو نور از روی یک برآمدگی فضا عبور می‌کند. اگر این پرتو از داخل یک فروفتگی رد می‌شد، انحراف آن:

- الف) همانند انحراف از روی برآمدگی بود
ب) مخالف انحراف از روی برآمدگی بود



شکل ۱۱-۱۸

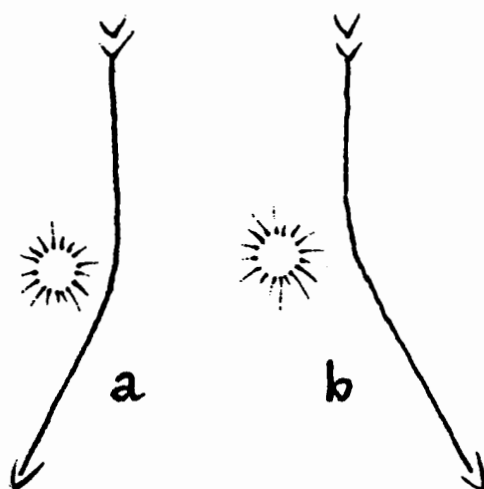
جواب

الف) جواب درست است. اگر در این باره تردید دارید می‌توانید مسیر پرتو را، به جای قسمت خارجی، روی قسمت داخلی مخروط رسم کنید. بهتر این است که آن را روی یک کاغذ شفاف رسم کنید تا هم از "بالا" و هم از "پایین" دیده شود.

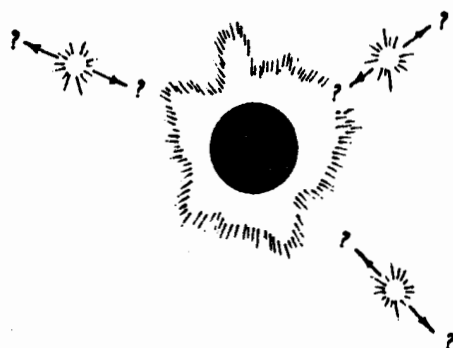
پرسش

در خلال گرفت خورشید، شما می‌توانید ستاره‌های نزدیک به آن را ببینید. این ستاره‌ها ظاهراً:

- الف) به سمت خورشید کشیده می‌شوند
ب) از خورشید دور می‌شوند



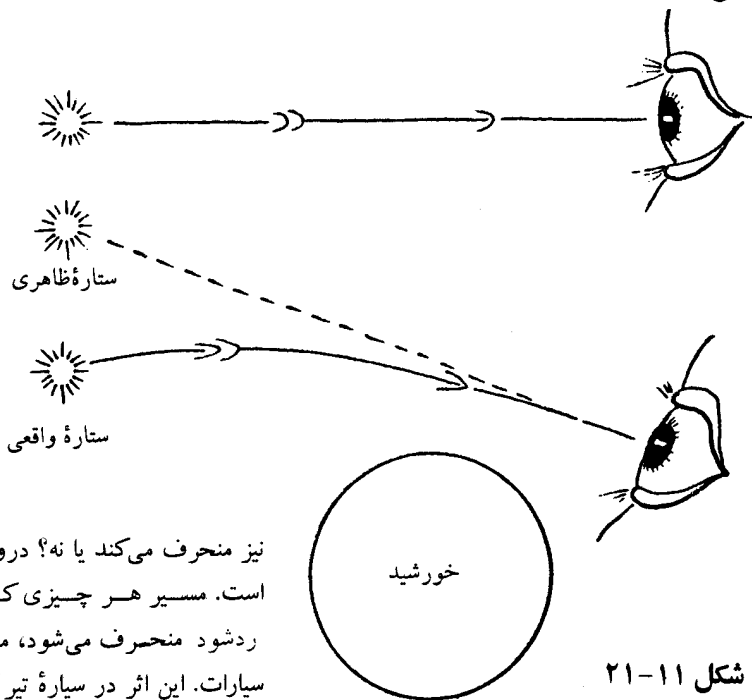
شکل ۱۱-۱۹



شکل ۱۱-۲۰. بیشینه انحراف نور ستاره‌ای که از نزدیک خورشید رد می‌شود در حدود ۲ ثانیه قوس است. بهترین قدرت تفکیک چشم غیر مسلح سالم حدود ۲ دقیقه قوس است.

پاسخ

ب) پاسخ درست است. نور ستاره، آن طور که در شکل دیده می‌شود، بر اثر گرانش خورشید منحرف می‌شود. پرتوهای نور به سمت خورشید خم می‌شوند، و بنابراین به نظر شما از یک فاصله دور نسبت به خورشید می‌آیند! این انحراف به قدری کوچک است که چشم غیر مسلح نمی‌تواند آن را ببیند.



شکل ۱۱-۲۱

نیز منحرف می‌کند یا نه؟ در واقع، همین طور است. مسیر هر چیزی که از روی چین رد شود منحرف می‌شود، مخصوصاً مسیر سیارات. این اثر در سیاره تیر که نزدیکتر به خورشید است و بنابراین پُربیج‌تابترین قسمت منظومه شمسی است، شدیدتر است. کدام اثر؟ این اثر دقیقاً همان چیزی است که شما انتظار دارید. به دلیل اثر گُندشدن زمان گرانشی متعارف (نیوتونی)، این سیاره باید در یک مسیر بیضی‌وار حول خورشید بچرخد، و

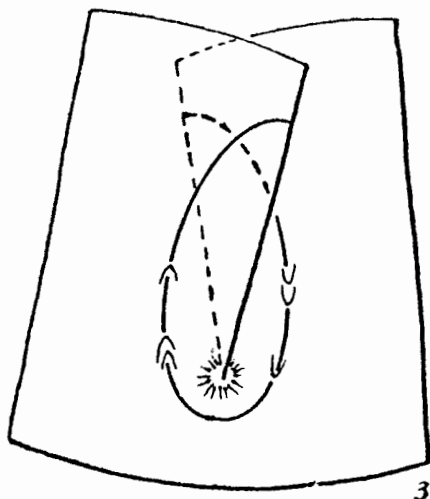
همه چیز چین‌دار می‌شود

اگر دست‌انداز فضا مسیر باریکه نوری را که از کنار آن رد می‌شود منحرف می‌کند، آیا مسیر چیزهای دیگری را که از کنار آن رد می‌شوند

اگر سیاره چندبار دور خورشید بچرخد، نقطه بالای بیضی به تدریج، در همان جهتی که سیاره حول خورشید می‌چرخد، خورشید را دور می‌زند.

انتقال مدار تیر حول خورشید در حدود یک قرن قبل از تولد اینشتین مشاهده شده بود، اما تا زمان کشف انحنای فضا بدون توضیح باقی ماند. بعضی اخترشناسان، قبل از اینشتین فکرمی کردند که این انتقال ناشی از

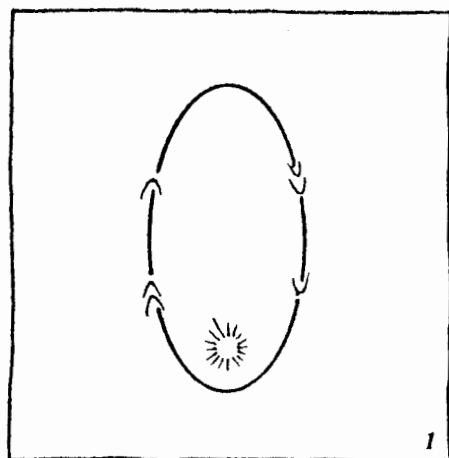
همین طور هم هست. اما فضایی که این سیاره در آن حرکت می‌کند، یک فضای تخت نیست؛ این فضا چین دارد. باز هم فرض کنید که خورشید در مرکز سطح مخروطی است. برای اینکه یک کاغذ تخت را به مخروط تبدیل کنید، آن را تا به مرکز (محل خورشید) ببرید و یکی از لبه‌های بریده شده را اندکی از روی دیگری رد کنید (شکل ۱۱-۲۲). در این حالت، بیضی منحنی بسته تشکیل نمی‌دهد.



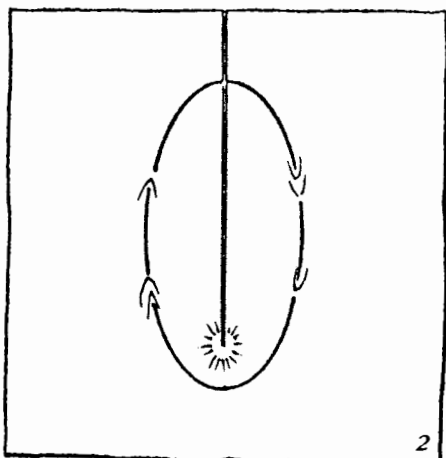
3

شکل ۱۱-۲۲

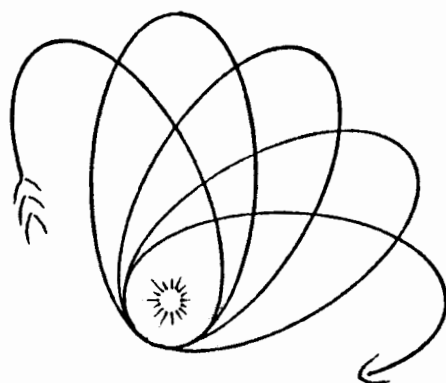
یک سیاره کشف نشده، به نام وولکان^۱ یا رب النوع آتش، در فضای میان سیاره تیر و خورشید است. این اخترشناسان تلاش زیادی برای پیدا کردن وولکان کردند، اما این سیاره پیدانشد.



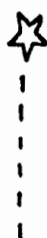
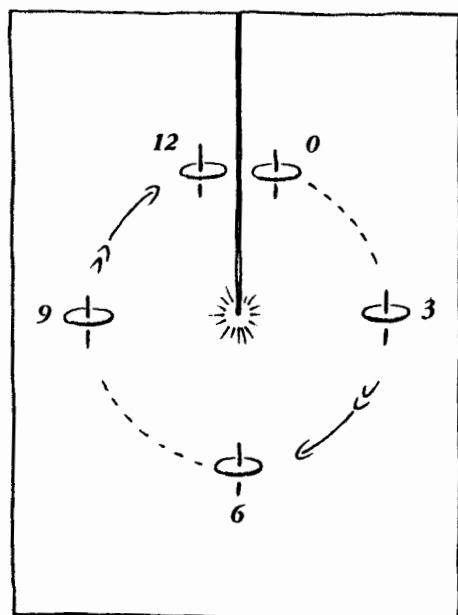
1



2



شکل ۱۱-۲۳



شکل ۱۱-۲۴

آیا اگر مسیر دایره کامل بود، این انحراف فضا کشف می‌شد؟ بلی. چگونه؟

وقتی یک کشتی فضایی یکبار یک مسیر دایره‌ای را دور می‌زند، چگونه می‌توان از انحراف فضا صحبت کرد؟ به دو طریق. اول از طریق مرجع محلی. یک چرخش‌نما (ژیروسکوپ) را در داخل کشتی قرار دهید. اگر چرخش‌نما آزاد باشد همیشه در یک جهت (محلی) ثابت قرار می‌گیرد. بنابراین، اگر اکنون چرخش‌نما به طرف خورشید باشد، بعد از این که کشتی یک دور کامل به گرد خورشید گشت، باز هم باید به طرف خورشید باشد. دوم از طریق یک مرجع دور. اگر ستاره قلب‌الاسد^۱ اکنون، آن طور که از کشتی فضایی دیده می‌شود، مقابل خورشید باشد، بعد از این که کشتی یک دور کامل به گرد خورشید گشت، باز هم باید مقابل خورشید قرار بگیرد.

فرض کنید در یک لحظه خاص هم چرخش‌نما به طرف خورشید است و هم قلب‌الاسد در مقابل خورشید قرار دارد. بعد از مدتی، قلب‌الاسد به مقابل خورشید برمی‌گردد و چرخش‌نما به طرف خورشید است. اما هر دو با هم برنمی‌گردند! قلب‌الاسد زودتر از چرخش‌نما برمی‌گردد. چگونه ممکن است؟

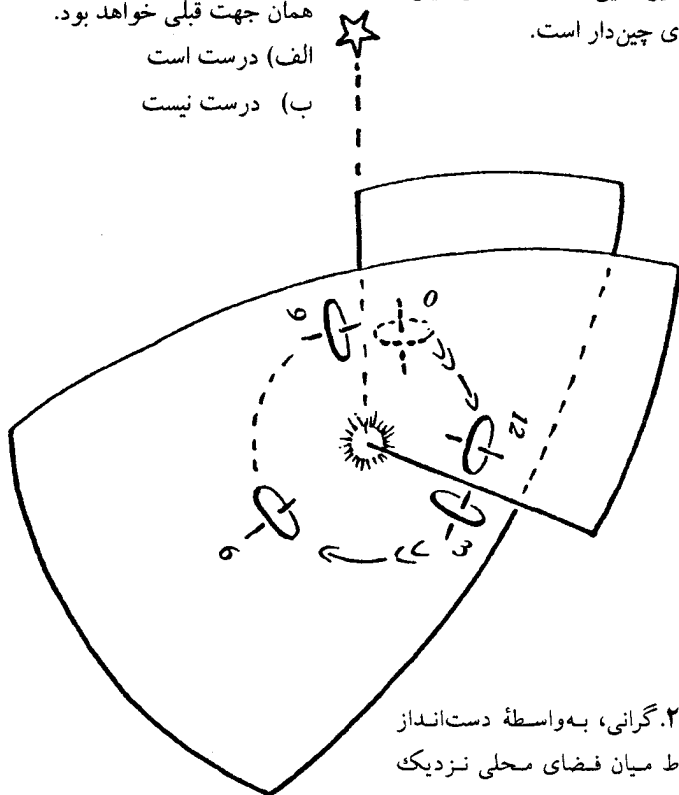
انتظارات شما مبتنی بر فضای تخت است، اما اکنون یک دست‌انداز مخروطی حول خورشید وجود دارد. باز هم یک مدل کاغذی از فضای پیچ و تاب‌دار درست کنید؛ یک

پرسش

فرض کنید جهت چرخش نما به طرف خورشید نیست. همچنین فرض کنید که جهت آن بر صفحه مدار دایره‌ای حول خورشید عمود است (زاویه 90° درجه). هنگام چرخیدن یک دور کامل حول خورشید (و برگشتن به قلب الاسد) بازهم جهت آن در همان جهت قبلی خواهد بود.

الف) درست است

ب) درست نیست

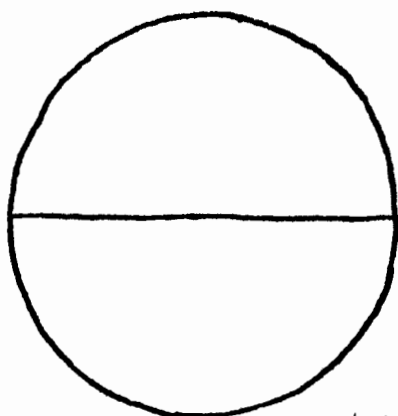


کاغذ به صورت شکل ببرید و لبه‌های بریده شده را روی هم بگذارید (شکل ۱۱-۲۵). وقتی فضا چین دار می‌شود، هنگام برگشتن قلب الاسد، چرخش نما به موقعیت جهتگیری اولیه‌اش بر نمی‌گردد. کشتی فضایی باید مسافت طولانی‌تری را در امتداد مسیرش حول خورشید طی کند تا دوباره جهت چرخش نما به طرف خورشید قرار بگیرد. این "مسافت طولانی‌تر" نشانی "از فضای چین دار است."

شکل ۱۱-۲۵. گرانی، به واسطه دست‌انداز مخروطی، ارتباط میان فضای محلی نزدیک خورشید و فضای دور اشغال شده توسط قلب الاسد را چین دار کرده است. اعداد ساعت بر روی شکل موقعیتهای فضای محلی حول مدار را مشخص می‌کنند. قلب الاسد نشان‌دهنده یک موقعیت ثابت در فضای دور است.

پاسخ

الف) پاسخ درست است. سطح مخروطی را بازکنید و دوباره آن را به صورت تخت



ویژه دایره

درآورد. این سطح فضایی است که کشتی فضایی در آن زندگی می‌کند. در این سطح جهت چرخش نما در یک جهت ثابت است. این جهت ثابت بر سطح تخت عمود است. چرخش نما، نه تنها هنگامی که کشتی فضایی آن را به موقعیت اولیه اش برمی‌گرداند، بلکه در سرتاسر مدار بر این سطح عمود است. این سطح همچنین سطح دوران کشتی فضایی نیز هست.

پرسش

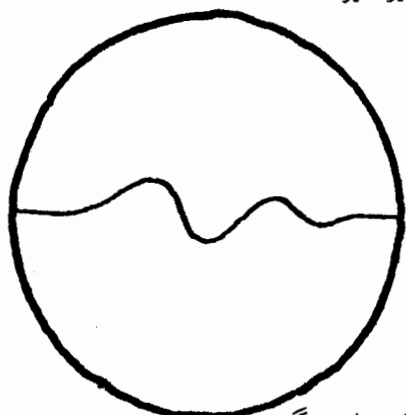
اثر قرار دادن یک جرم در داخل یک دایره عبارت است از بلندتر شدن قطر دایره نسبت به زمانی که جرم در داخل دایره نیست. اما فرض کنید اثر قرار دادن جرم کوتاهتر شدن قطر دایره باشد. در این صورت، در این حالت خیالی، نقطه بالای مدار سیاره به تدریج:

الف) در جهت چرخش سیاره حول خورشید منتقل می‌شود

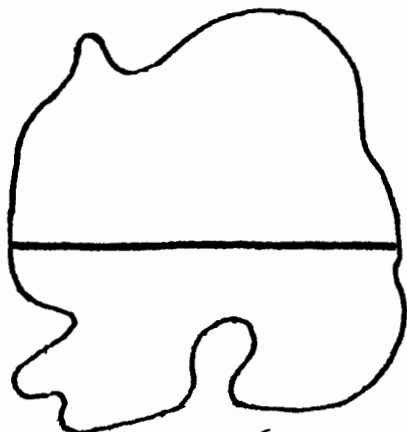
ب) در خلاف جهت چرخش سیاره منتقل می‌شود

پاسخ

ب) پاسخ درست است. در زندگی واقعی گاهی قطر نسبت به محیط خیلی بزرگ یا محیط نسبت به قطر خیلی کوچک است. بنابراین، شما ناچارید یک قطعه از صفحه مداری را بردارید یا یک قطعه از آن را روی قطعه دیگر بگذارید. اما در این حالت فرضی،



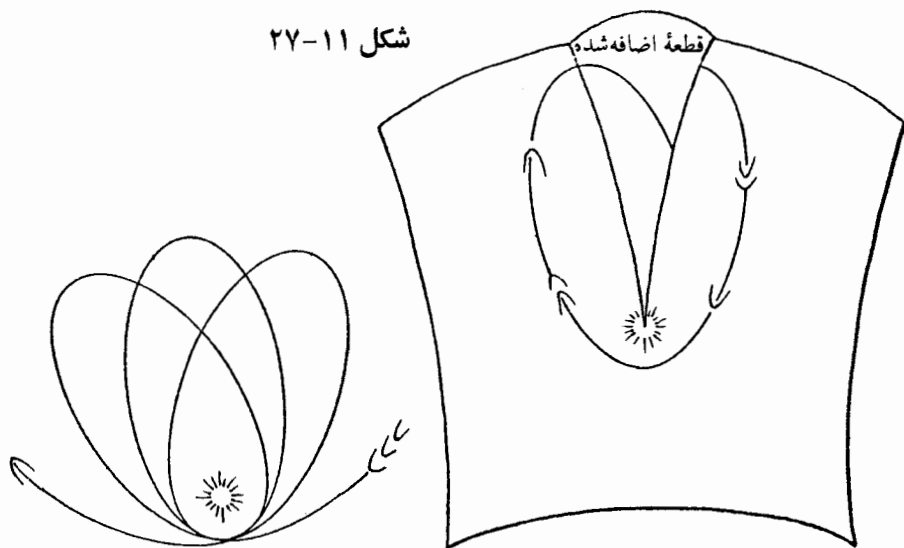
قطر خیلی بزرگ



محیط خیلی بزرگ

قطر نسبت به محیط خیلی کوچک یا محیط نسبت به قطر خیلی بزرگ است. بنابراین، شما به ناچار باید یک قطعه به آن اضافه کنید، نه از آن بردارید. در شکل ۱۱-۲۷ دیده می‌شود که اثر اضافه کردن یک قطعه به صفحه مدار، مخالف اثر برداشتن یک قطعه از آن است. اثر آن بر چرخش نما و انحراف پرتو نوری که از نزدیک خورشید می‌گذرد نیز باید مخالف باشد. اما، البته، این از نوع چینهایی نیست که در طبیعت یافت می‌شود.

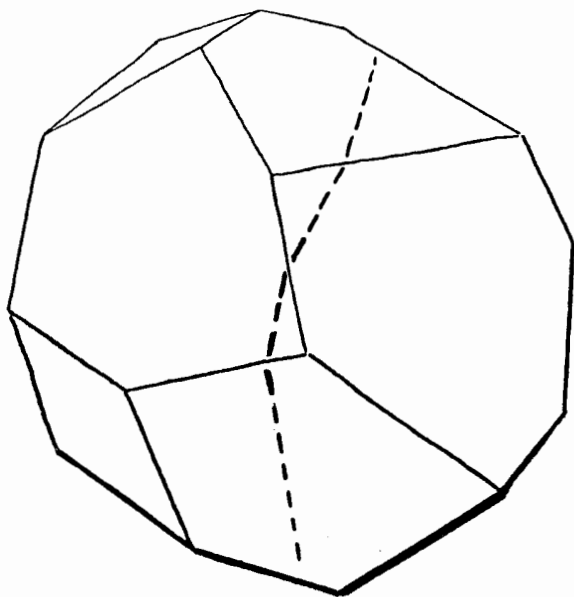
شکل ۱۱-۲۷



چگونه می‌توان خطوط مستقیم را بر روی سطوح خمیده رسم کرد؟

چگونه می‌توان یک خط مستقیم را روی یک سطح خمیده رسم کرد؟ اگر بتوانید این کار را بکنید می‌توانید با تمامی انواع ایده‌ها آزمایش انجام دهید.

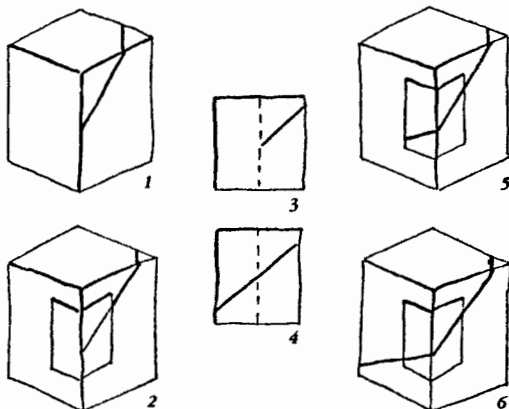
هر سطح خمیده را می‌توان از کنار هم گذاشتن تعدادی سطح تخت ساخت، یا تقرب زد. شما یقیناً می‌توانید روی سطح تخت خط راست رسم کنید. مشکل، رسم خط راست حول قسمت خمیده سطح است. وقتی خط راست به قسمت خمیده رسید چکار می‌کنید؟



شکل ۱۱-۲۸

یک قطعه کاغذ را روی قسمت خمیده بگذارید. خط راست را روی این کاغذ بکشید. اکنون کاغذ را بردارید و آن را به صورت تخت درآورید. خط را روی کاغذ تخت شده امتداد دهید و سپس آن را دوباره روی قسمت خمیده بگذارید. خط را روی سطح تخت مجاور امتداد دهید. این کار، در عمل، همانند چسباندن یک نوار چسب روی گوشه یک جعبه است، به گونه‌ای که نوار پاره نشود، تاب نداشته باشد، و چین و چروک بر ندارد.

اکنون یک ایده جدید در ذهن خود دارید. چکار با آن می‌توانید بکنید؟



شکل ۱۱-۲۹

چگونه چیزی را که خیلی دور و فوق العاده عمیق
است می توان پیدا کرد؟

انتهای فضا و زمان

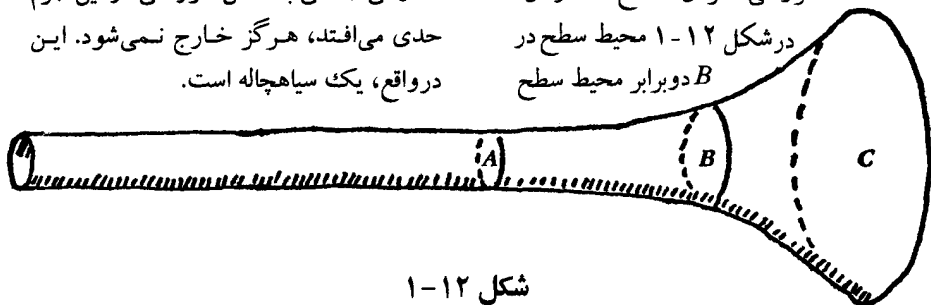
سیاهچاله

فرض کنید می توانید جرم زمین را به دلخواه
افزایش دهید. زمان، نزدیک به زمین کندتر و
کندتر می شود. چقدر کند می شود؟ در نهایت
متوقف می شود. وقتی زمان متوقف شد، هیچ
چیز، حتی نور حرکت نمی کند. بدون حرکت
یعنی بدون فرار؛ یک دام کامل برای همه چیز،
حتی نور، یک سیاهچاله.

اما چگونه می توان زمان را متوقف کرد؟ با
مخروطی کردن سطح فضازمان.
در شکل ۱-۱۲ محیط سطح در
 B دو برابر محیط سطح

در A است، و بنابراین سرعت ویژه زمان در B
نصف سرعت ویژه زمان در A است. در C
محیط پنج برابر محیط در A است، و بنابراین،
سرعت ویژه زمان در C یک پنجم سرعت
ویژه زمان در A است. برای توقف ویژه زمان
کافی است که سطح فضازمان به صورت یک
مخروط با قاعده بینهایت دربیاید.

هرچه جرم جسم افزایش یابد، سطوح
فضازمان و فضا-فضا، آن طور که شکل های
۱۲-۴ تا ۱۲-۷ نشان می دهند، بیشتر ظاهر
می شود. در حالت حدی، شکل ۱۲-۷،
گسیختگی نمودارها پدید می آید. بدین معنی
که وقتی جسمی به داخل سوراخی در این جرم
حدی می افتد، هرگز خارج نمی شود. این
درواقع، یک سیاهچاله است.

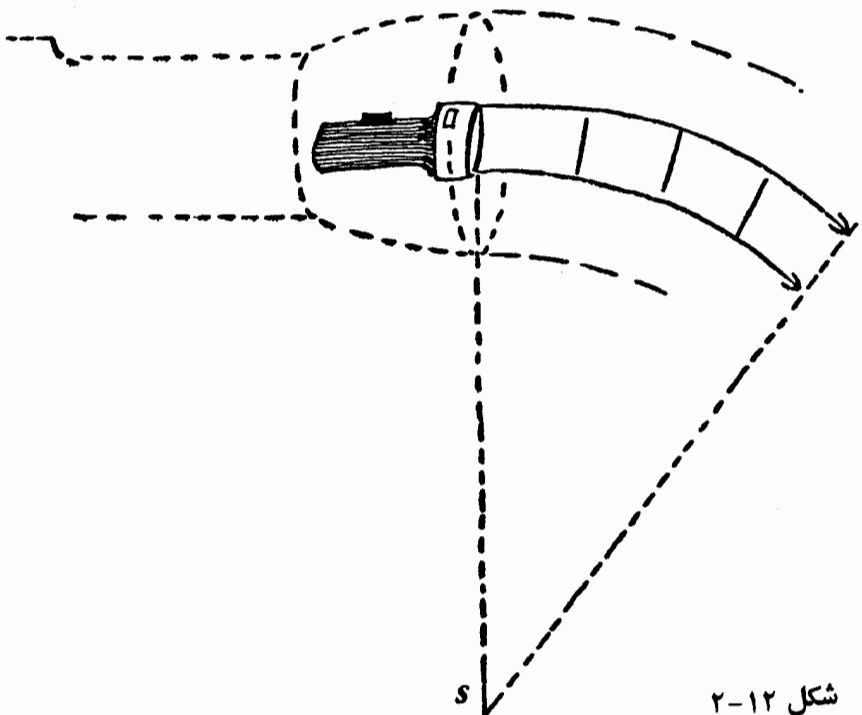


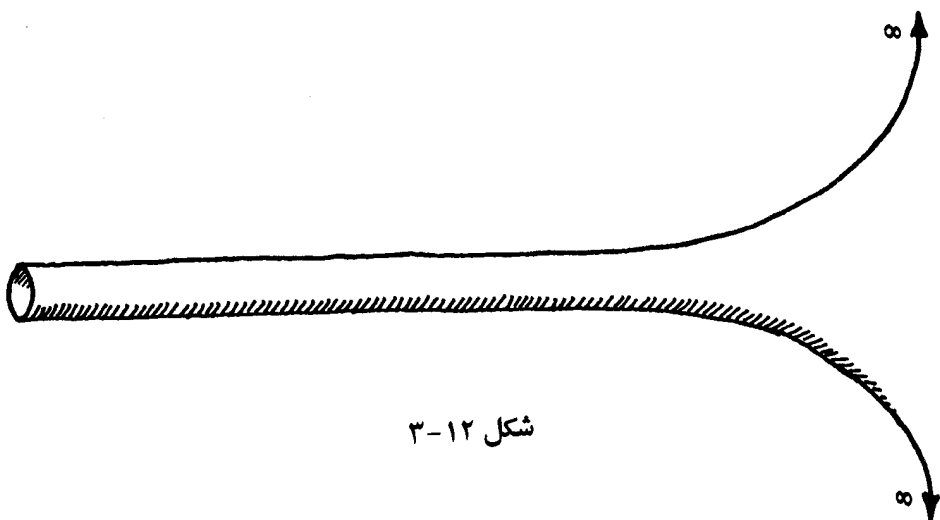
شکل ۱-۱۲

سیاهچاله پیش‌بینی می‌شود

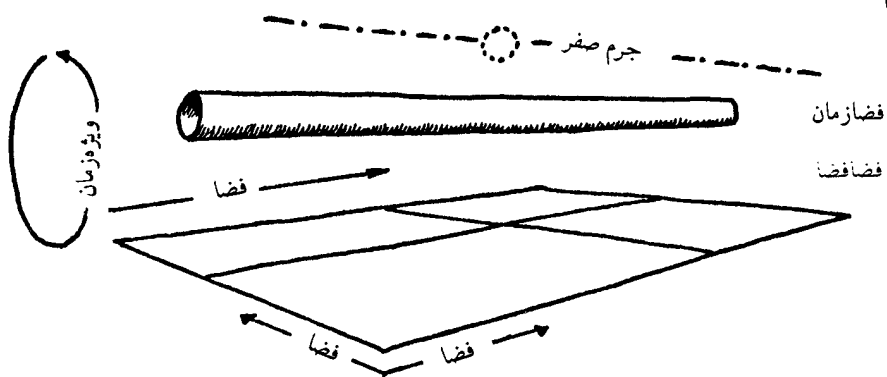
از اینکه در حالت حدی، زمان گُند شده می‌تواند نور را متوقف کند نباید خیلی تعجب کنید. با برونیایی می‌توانید نقطه‌ای مانند K در مرکز انحنای باریکه نور در حال سقوط پیدا کنید که در آن جهت موج حرکت نمی‌کند! نقطه K مرکز سیاهچاله نیست. این نقطه صرفاً یک نقطه به اندازه کافی نزدیک به سیاهچاله است که می‌تواند زمان را متوقف کند.

گرانی که باریکه نشان داده شده را خم می‌کند فوق‌العاده شدید است، اما بینهایت شدید نیست (اگر گرانی بینهایت باشد، نور مستقیماً سقوط می‌کند). چون گرانی بینهایت شدید نیست، جرم مولد آن هم لازم نیست بینهایت بزرگ باشد. برای ایجاد سیاهچاله نه جرم بینهایت لازم است و نه چگالی بینهایت.

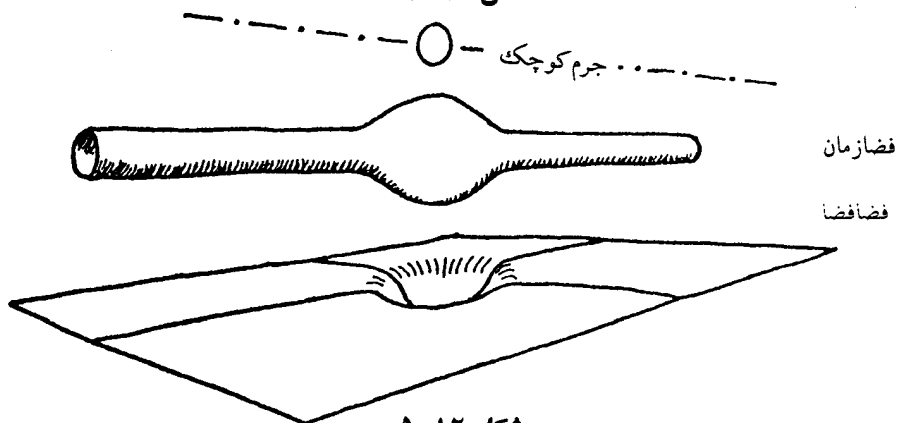




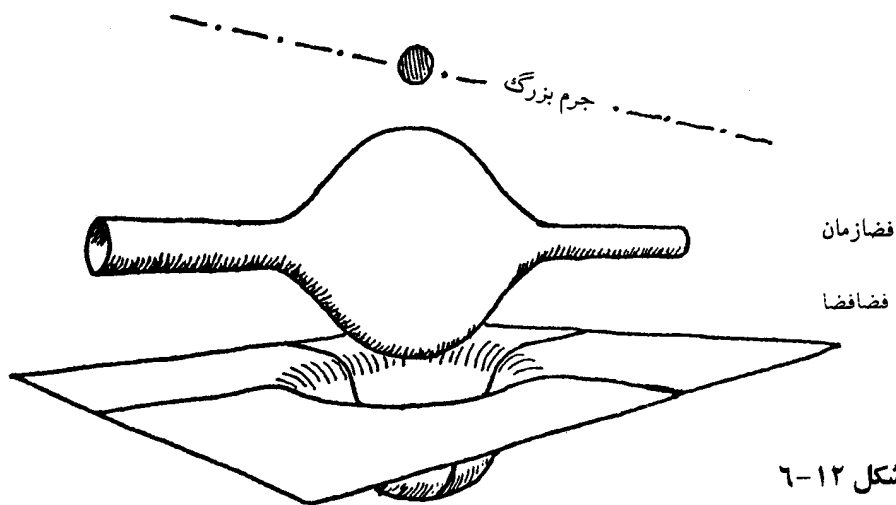
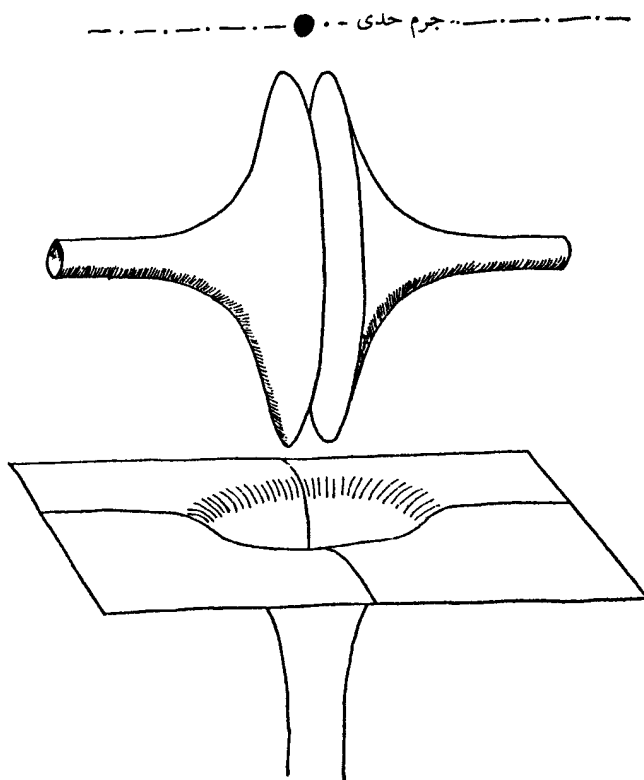
شکل ۱۲-۳



شکل ۱۲-۴



شکل ۱۲-۵

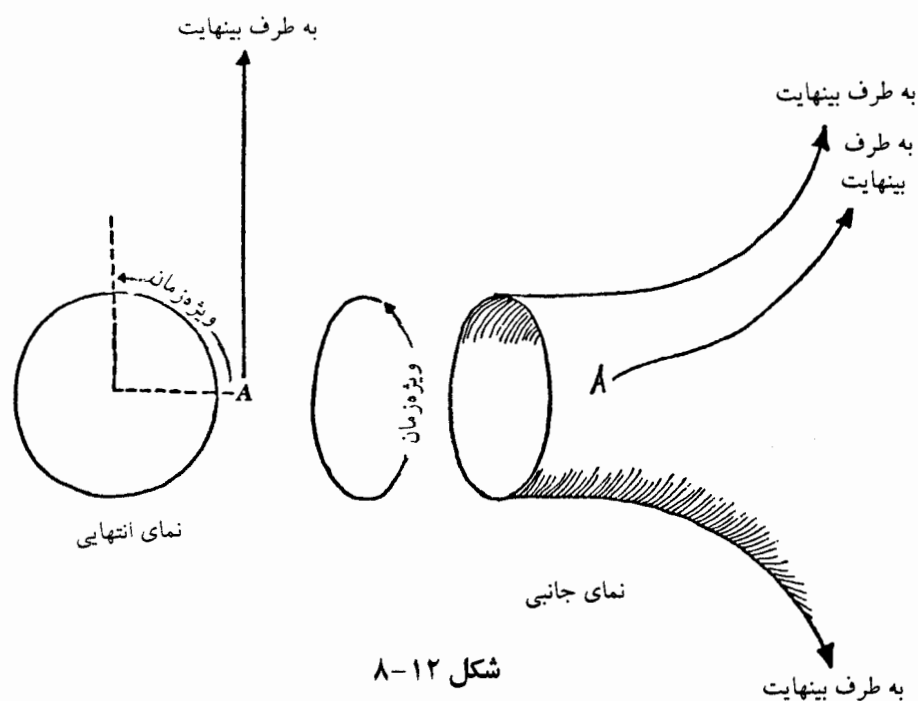


مسیر چند درجه حول سطح پیچیده است، به دست می آید. نمودار، مسیری را که از A شروع می شود و به طرف افق در بینهایت می رود نشان می دهد. این مسیر بینهایت بلند است، اما برای این که به بینهایت برسد فقط یک ربع دور (یعنی ۹۰ درجه) لازم دارد.

آنچه در اینجا درباره سیاهچاله ها گفته شد چیزی است که نظریه در مورد تأثیر جرمهای حدی بر فضا زمان عنوان می کند. اما، نظریه تصریح نمی کند که آیا یک چنین جرمهایی واقعاً در دنیا وجود دارد یا نه. وجود مسئله دیگری است. شما می توانید با مطالعه اخبار آسمان و تلسکوپ و ساینتیفیک امریکن اطلاعات لازم را در این باره کسب کنید.

اکنون می خواهم شما را به تعجب وادارم. اگر من به داخل سیاهچاله سقوط کنم شما می بینید که من برای همیشه سقوط می کنم. یعنی، شما هرگز مرا نخواهید دید که به جایی که زمان متوقف می شود (افق) برسم. اما من از روی ویژه زمان خودم، برای همیشه در حال سقوط نیستم. در یک مدت زمان محدود به افق می رسم. این گفته تمایز میان زمان شما (یا زمان مختصاتی) و ویژه زمان شخصی من (یا زمان زیست شناختی) را کاملاً نشان می دهد.

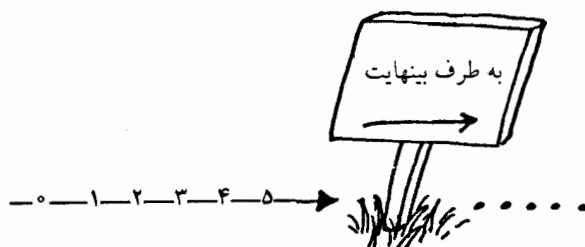
همچنان که می دانید، زمان مختصاتی از روی طول مسیر بر روی سطح فضا زمان اندازه گیری می شود، در حالی که ویژه زمان به کمک دوران مسیر حول سطح، یعنی این که



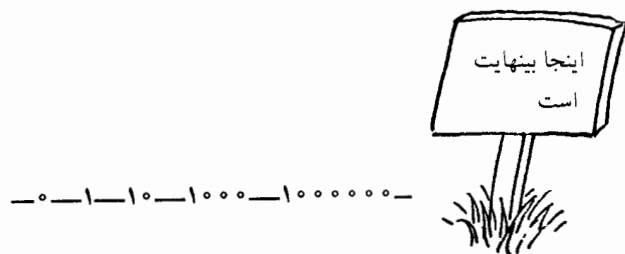
شکل ۱۲-۸

چگونه بینهایت را رسم کنیم

چگونه بینهایت را می‌توان به کمک نمودار نشان داد؟ اگر شما یک خط شماره‌دار رسم کنید، همواره قبل از این که به بینهایت برسید به انتهای دیگر کاغذ می‌رسید.

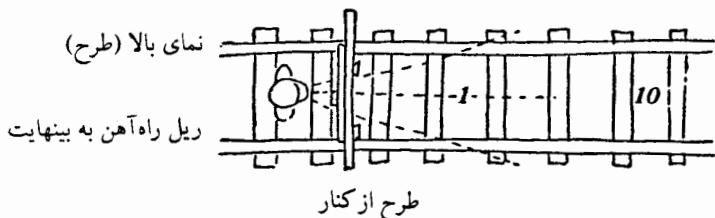
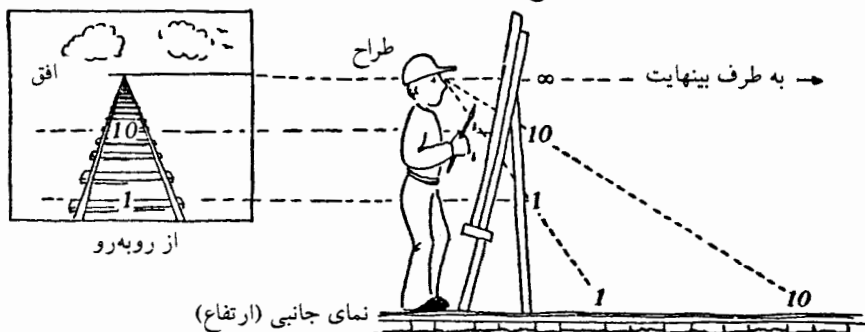


طراحان هم همین کار را می‌کنند. فرض کنید یک نقطه روی صفحه بینهایت باشد و یک خط شماره‌دار مانند زیر رسم کنید.

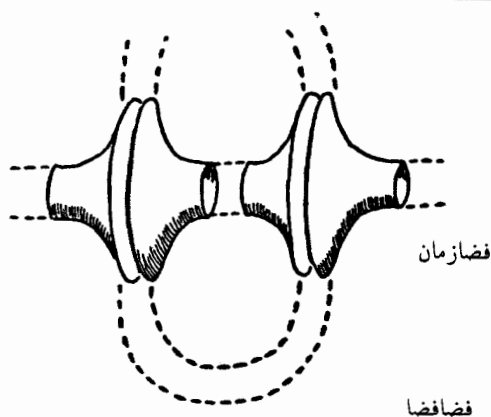
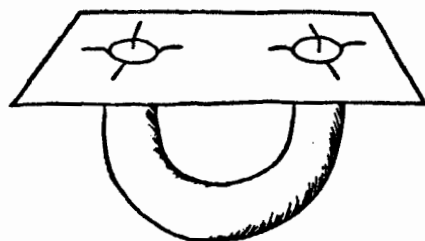


شکل ۹-۱۲

طراحان چگونه این کار را انجام می‌دهند؟ با استفاده از فرایند تصویر بر روی شبکه چشم. آنها این کار را طرح ژرفانما (پرسپکتیو) می‌نامند (شکل ۱۰-۱۲). ریل راه آهن یک خط شماره‌دار به طرف بینهایت است. نقاش طوری ریل را رسم می‌کند که هر نقطه آن متناظر با یک نقطه روی طرح باشد. نقاط بینهایت نشان‌دهنده خط افق روی طرح هستند. نقاط روی قسمت فضا‌زمان یا نمودار فضا‌فضا که در بینهایت هستند نیز روی افق هستند.



شکل ۱۰-۱۲



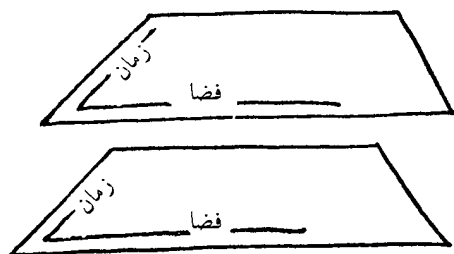
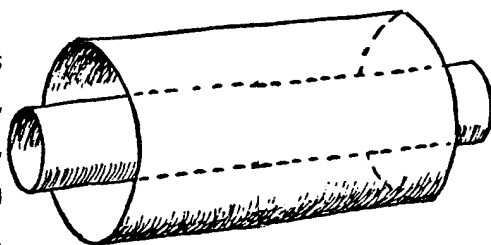
شکل ۱۱-۱۲. سوراخ کرم. هنگام فکرکردن درباره این چیزها، شما نه تنها در مورد وجود آنها، بلکه همچنین در این باره که آیا دوام دارند یا نه نیز باید سؤال کنید. به عنوان مثال، یک مداد می تواند روی یکی از نقاطش بایستد، اما آیا در این حالت دوام می آورد.

پرواز می‌آید. دانشمندان واقعی نیز هنرمندند و هنرمندان دوست ندارند مرزهای ناشناخته را به حال خود رها کنند. بنابراین، انواع چیزهای خیالی طرح می‌شود، تا این قسمت‌ها را با آن پر کنند. اما توجه داشته باشید که نظریه نیازی به این چیزهای ساختگی برای پر کردن این قسمت‌ها ندارد.

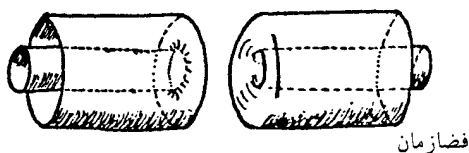
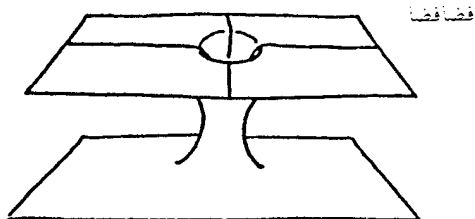
در اینجا دو نمودار برای نمایش مرزهای ناشناخته یا انتهای آزاد وجود دارد. اولی را سوراخ کرم نام گذاشته‌ایم. این سوراخ دو سیاهچاله را به هم وصل می‌کند. شما می‌توانید از یک سیاهچاله پایین بروید و در زمان و مکان دیگری از دیگری خارج شوید.

نمودار دوم را پلی (یا دروازه‌ای) به عالم دیگر می‌نامیم. ابتدا شما به دو عالم، یا دو جهان مجزا، هر کدام با زمان و فضای خود نیاز دارید. این دو عالم را می‌توان به صورت دو ورقه موازی، که هیچوقت همدیگر را قطع نمی‌کنند، مجسم کرد. اگر بخواهیم می‌توانیم این دو عالم را توی هم لوله کنیم، بدون اینکه با هم تماس پیدا کنند. (فراموش نکنید که تمامی این چیزهای سه‌بعدی صرفاً به خاطر نمایش به کار می‌روند). سرانجام، می‌توانیم کاری بکنیم که سطح خارجی به طرف داخل و سطح داخلی به طرف خارج برگردانده شود. این کار پلی میان عالم‌ها تشکیل می‌دهد. می‌توانید از یک سیاهچاله در این عالم پایین بروید و از یک سیاهچاله در عالم دیگر خارج شوید.

با حذف انتهای آزاد در سیاهچاله، چرا این کار در انتهای فضا و انتهای زمان انجام ندهیم؟ باز هم



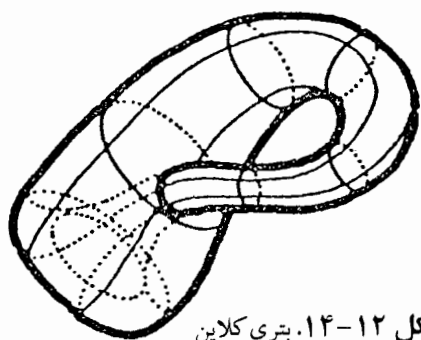
شکل ۱۲-۱۲. عالم‌های موازی، تخت، و لوله‌شده.



شکل ۱۲-۱۳. پل میان عالم‌های موازی

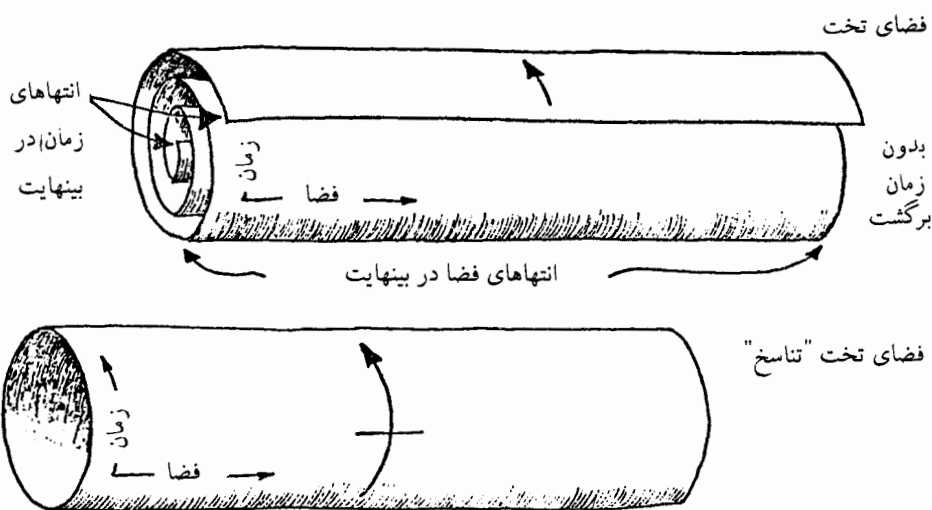
سوراخ کرم‌ها و پل‌ها

اگرچه معلوم نیست سیاهچاله‌ها وجود داشته باشند، تخیل در مرزهای ناشناخته و بی‌کران به



شکل ۱۲-۱۴. بتری کلاین

تمامی انواع طرحها را می‌توان در ذهن مجسم کرد. بعضی مفاهیم دور از ذهن، به نام بتریهای کلاین، شامل سطوح یک‌طرفه هستند. دوتا از ساده‌ترین آنها را در اینجا می‌آورم.



شکل ۱۲-۱۵

دوکیهانشناسی

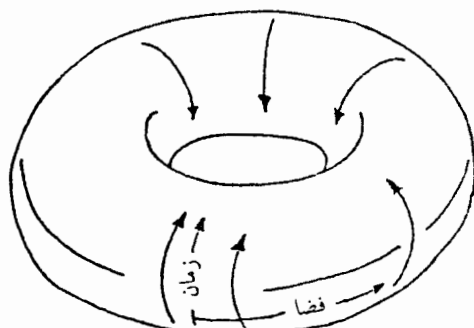
به انتهای آینده زمان، هیچ مبنایی در فیزیک وجود ندارد.

فضا را نیز می‌توان فرض کرد که در هر جهت تا بینهایت ادامه می‌یابد. این نظریه اقلیدوسی ممکن است درست باشد. با وجود این، اگر شما این نظریه را دوست ندارید، می‌توانید کارهای دیگری انجام بدهید.

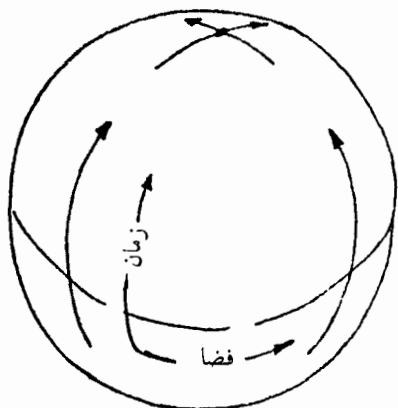
می‌توان فرض کرد که طومار زمان دو انتهای آزاد دارد، یکی در بینهایت دور در گذشته و یکی در بینهایت دور در آینده. این ممکن است به‌خوبی عملی باشد. اما اگر شما برای همیشه در یک جهت به پیش نروید می‌توانید دو انتها را به همدیگر وصل کنید: تناسخ ارواح. برای این تناسخ، یا اتصال انتهای گذشته

چند لایه ای درست کنید.

کیهان شناسی می تواند یک نوع بازی توپولوژی باشد. فراموش نکنید که از جمله قواعد این بازی این است که فضا زمان باید خمیده باشد، و برای خمیده کردن فضا زمان نیز جرم لازم است. بدون یک مقدار ویژه - جرم زمینه و توزیع آن در کیهانشنا شما چیزی جز "ممکن است بوده باشد" در اختیار ندارید.

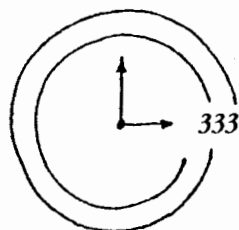


شکل ۱۲-۱۷. عالم بسته ضد بانگ



شکل ۱۲-۱۸. عالم نوسانی

می توانید دو انتها را طوری به هم وصل کنید که یک کیک کشمشي تشکیل بدهد. یا می توانید دو انتها را گره بزنید، به طوری که بتوان آن را باد کرد و به صورت کره درآورد. عالَمهای بسته وجود دارند، یعنی می توان آنها را دور زد، همان طور که ماژلان زمین را دور زد.



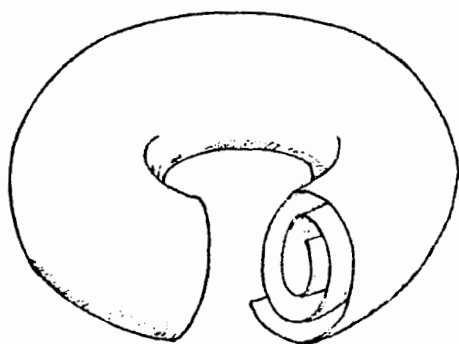
شکل ۱۲-۱۶. ریاضیدان صفحه ساعت را به صورت یک دایره با چندین حلقه در نظر می گیرد، زیرا ساعت سه امروز صبح، امروز بعد از ظهر، و فردا همه زمانهای متفاوتی هستند.

مدل کره ای حاکی از آن است که اجسام ساکن، که فقط از طریق زمان در حرکت اند، به طور متناوب با هم برخورد می کنند و سپس از هم دور می شوند. نقاط برخورد را می توان به صورت "قطبهای شمال و جنوب فضا زمان" تصویر کرد.

ضمناً، اگر بخواهید می توانید انتهای فضا را به هم وصل کنید، بدون این که انتهای فضا زمان را به هم وصل کرده باشید. اگر انتهای فضا زمان را به هم وصل نکنید، چیزی به دست می آید که ریاضیدانان آن را کیک کشمشي چند لایه می نامند، همچنین می توانید یک گره

پاسخ

ب) پاسخ درست است. دو نوع کیک کشمشی از هم متمایز نیستند. یکی را می‌توان به دیگری تبدیل کرد. چگونه؟ دور کیک کشمشی را از یک جهت با نوار ببیچید. سوراخ کوچکی در آن ایجاد کنید. از داخل سوراخ آن را بیرون بکشید. اکنون نوارهای کیک کشمشی در جهت دیگری قرار می‌گیرند (مطابق شکل ۱۲-۲۱) و بنابراین این دو نوع کیک به همدیگر تبدیل شدند.



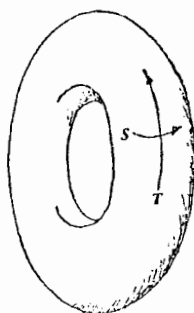
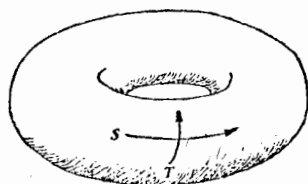
شکل ۱۲-۱۹. عالم چندلایه

پرسش

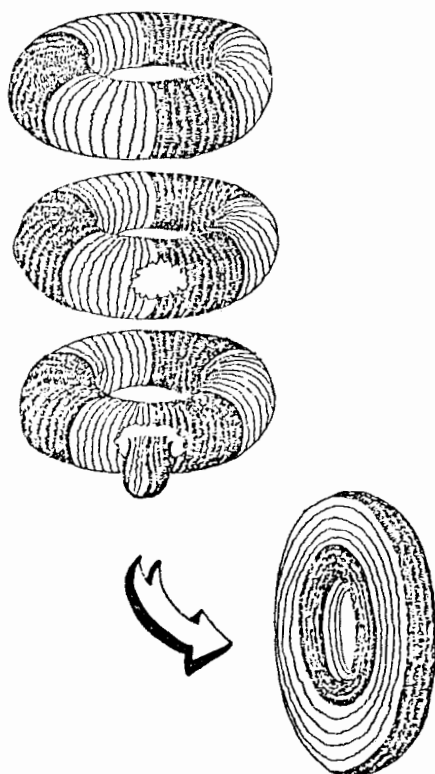
دو نوع عالم کیک کشمشی متمایز از هم وجود دارد. تمایز آنها وابسته به جهت انتخاب شده برای فضا و زمان است. این دو نوع عالم را می‌توان به صورت زیر تصویر کرد.

الف) درست است

ب) درست نیست



شکل ۱۲-۲۰



شکل ۱۲-۲۱

پیوست

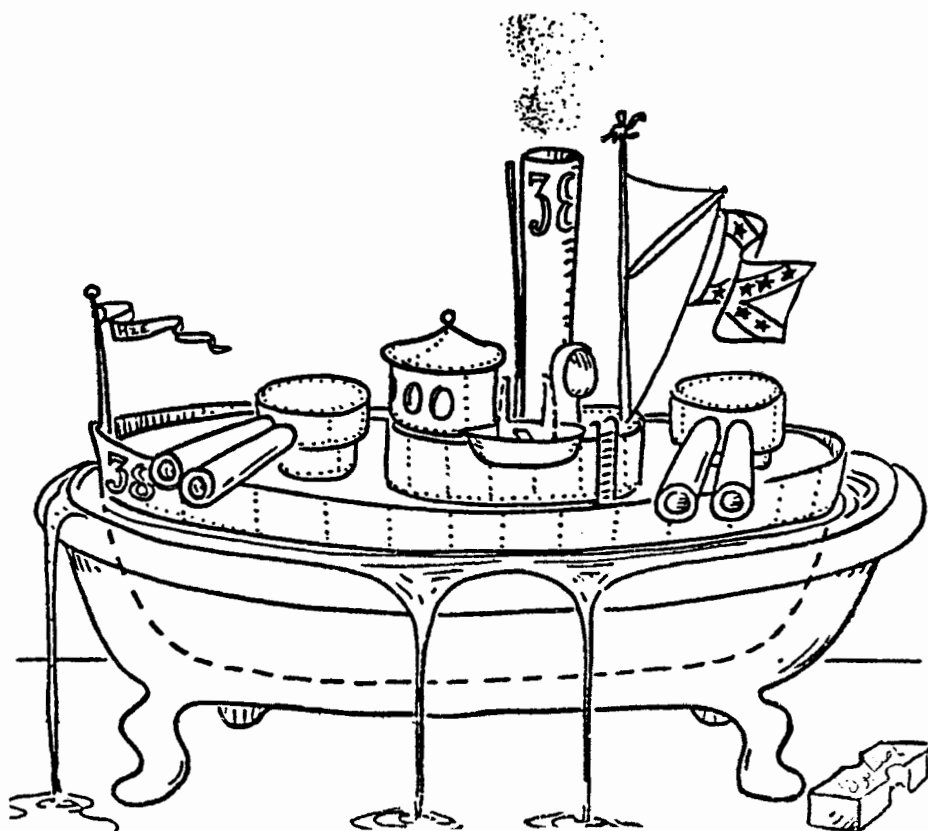
اگر این کتاب را پسندیدید می‌توانید کتاب دیگری از همین نویسنده و همین مترجم به نام "چگونه مفاهیم فیزیک رادِرک کنیم" را مطالعه کنید. در این فصل قسمتهایی از آن کتاب آمده است.

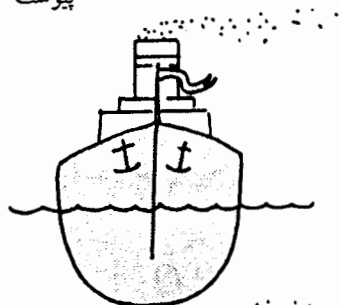
ناو جنگی در وان حمام

وجود داشته باشد شناور می ماند
ب) کشتی به ته آب می رود زیرا وزن آن از
وزن آب خیلی بیشتر است

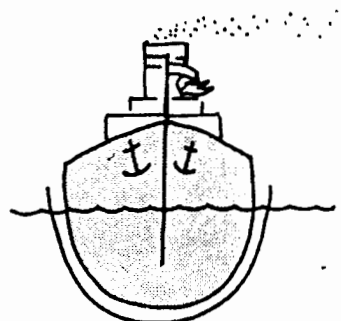
آیا ناو جنگی می تواند در وان حمام شناور
شود؟ البته به این شرط که یا وان خیلی بزرگ
باشد یا ناو خیلی کوچک. در هر حالت، تنها
مقدار کمی آب در اطراف و در زیر کشتی
وجود دارد. در حالت خاص فرض کنید که
وزن کشتی ۱۰۰ تن (یک کشتی بسیار
کوچک) و وزن آب داخل وان ۴۵ کیلوگرم
است. آیا کشتی شناور می شود یا به ته آب
می رود؟

الف) اگر به اندازه کافی آب در اطراف آن

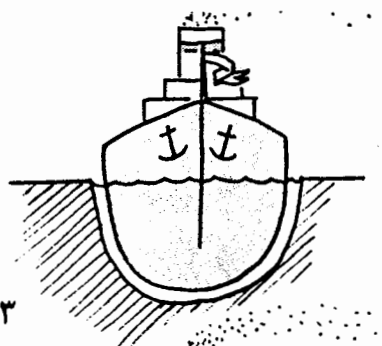




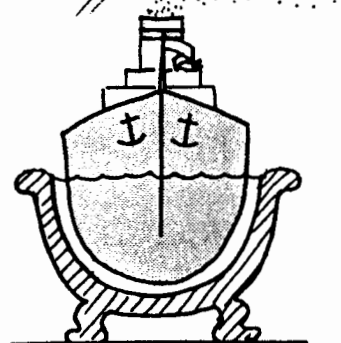
۱



۲



۳



۴

پاسخ: (الف) پاسخ درست است. راههای مختلفی برای اثبات درستی این پاسخ وجود دارد. این راه را که در اینجا توصیف می‌شود یک دانشجو پیشنهاد کرده‌است. فرض کنید یک کشتی در اقیانوس شناور است (شکل ۱). سپس یک کیسه پلاستیکی بسیار بزرگ را به دور کشتی بکشید (این کار در واقع با یک تانکر نفت انجام شد) (شکل ۲). بعد از آن فرض کنید که تمام آب اقیانوس، به جز آب داخل کیسه، یخ می‌بندد (شکل ۳). سرانجام یک وان بزرگ از یخ جامد به صورت شکل ۴ از یخ ببرید.

این پرسش خطر اندیشیدن تنها روی واژه‌ها را، به جای رسم شکل و پرداختن به ایده‌ها، مجسم می‌کند. اگر شما فقط روی واژه‌ها تأمل کنید می‌توانید چنین استدلال کنید: برای اینکه کشتی شناور بماند باید همسنگ وزن خودش از آب را جابه‌جا کند. وزن کشتی ۱۰۰ تن است اما در مقابل فقط ۴۵ کیلوگرم آب موجود است. پس کشتی نمی‌تواند شناور شود. اما اگر همین ایده را به تصویر بکشید متوجه خواهید شد که جابه‌جایی به آن حجمی از آب اشاره دارد که با حجم کشتی از آن تا سطح آب (که در واقع خالی است) برابر است. این حجم است که اگر از آب پریاشد برابر با ۱۰۰ تن می‌شود.

تنها به پرسشها یا واژه‌ها تکیه نکنید! سعی کنید مفاهیم آنها را به طریق هندسی رسم و سپس همراه با تصویر تا آنجا که در توان دارید فکر کنید.

جرقه زدن

اگر چیزی بار الکتریکی مثبت پیدا کند، آنگاه

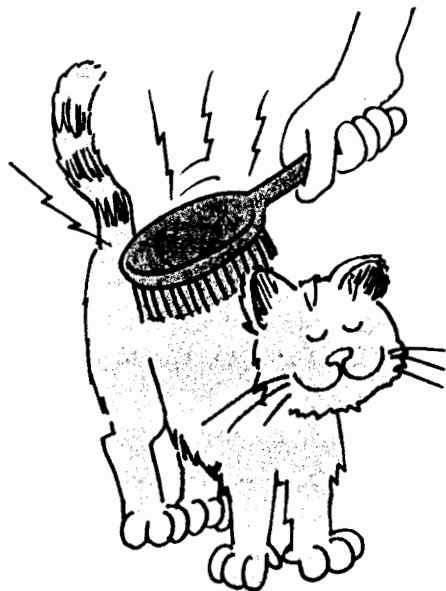
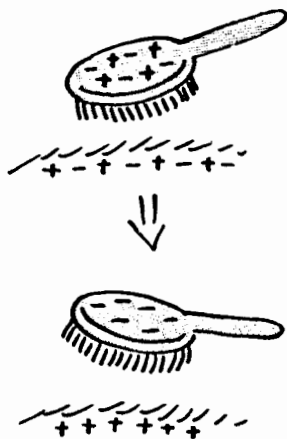
چیز دیگری

(الف) به همان اندازه بار مثبت می گیرد

(ب) به همان اندازه بار منفی می گیرد

(ج) بار منفی می گیرد، اما نه لزوماً به همان اندازه

(د) مغناطیسی می شود

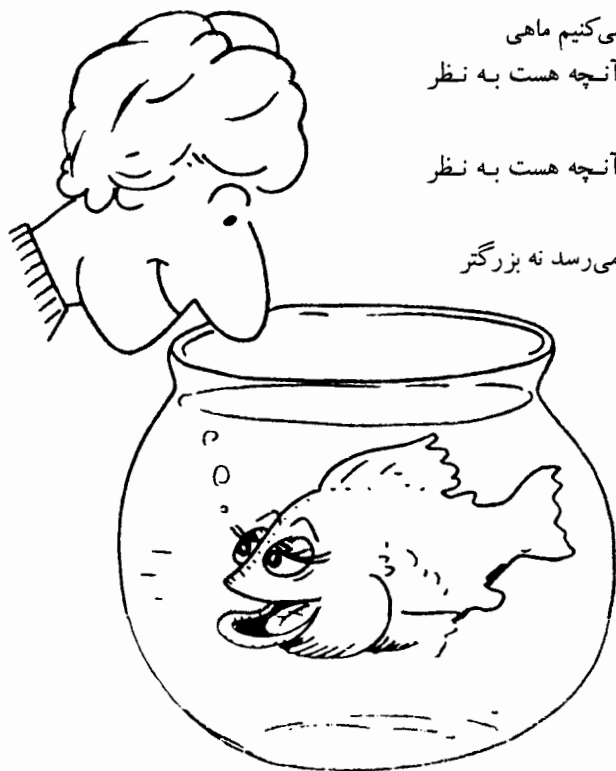


انرژی که صرف برس زدن به موی گربه می شود در بارهای جدا شده انباشته می شود. هرگاه برس را به گربه نزدیک کنیم این انرژی به صورت جرقه آزاد می شود.

پاسخ: (ب) پاسخ درست است. هنگامی که موهای گربه ای را با برس شانه می کنید، موهای گربه بار الکتریکی مثبت و موهای برس بار الکتریکی منفی پیدا می کند. با این کار شما الکتریسیته نمی آفرینید، الکتریسیته از قبل در آنجا حضور دارد. در هر اتم موهای گربه، قبل از برس زدن، به تعداد مساوی الکتریسیته مثبت و منفی وجود دارد: الکتریسیته مثبت در هسته آنها و الکتریسیته منفی در الکترونهای اطراف آنها؛ کار برس فقط این است که بارهای مثبت و منفی را از هم جدا می کند. دلیل این امر این است که الکترون خواهی یا "تمایل به جذب الکترون" موهای برس از موهای گربه خیلی بیشتر است. بر اثر تماس موهای برس با موهای گربه، الکترونهای منفی به موهای گربه منتقل و یک بی تعادلی در بار الکتریکی برس - گربه ایجاد شود. موی گربه کسر بار منفی دارد که در اصطلاح می گوئیم بار مثبت پیدا کرده است. اضافه بار منفی موی برس نیز باعث می شود که بار برس منفی شود. در نتیجه موی برس و موی گربه بار مساوی اما ناهمنام پیدا می کنند.

چقدر بزرگ!

- هنگامی به یک ماهی در داخل یک تنگ
شیشه‌ای پر از آب نگاه می‌کنیم ماهی
(الف) بسیار بزرگتر از آنچه هست به نظر
می‌رسد
(ب) بسیار کوچکتر از آنچه هست به نظر
می‌رسد
(ج) نه کوچکتر به نظر می‌رسد نه بزرگتر



پاسخ: (الف) پاسخ درست است. اندازه جسم را با اندازه زاویه‌ای آن می‌توانیم تخمین بزنیم. بدون آب ماهی تحت زاویه S دیده می‌شود، اما با وجود آب نور خم می‌شود (یا به اصطلاح می‌شکند) و ماهی ظاهراً تحت زاویه L دیده می‌شود.

در بعضی عدسیهای بازتابان دوربینها، با پُر کردن فضای میان آینه و فیلم با یک قطعه شیشه، از این خاصیت تغییر ظاهری اندازه زاویه‌ای اجسام استفاده می‌کنند. این شیشه

اندازه تصویر را بر روی فیلم کوچک می‌کند. با کوچک شدن اندازه تصویر، تصویر متراکمتر می‌شود و به این ترتیب زمان نوردهی کاهش می‌یابد. شیشه همچنین میدان دید دوربین را افزایش می‌دهد (از روی شکل دیده می‌شود که تصویر کوچک شده شمع، فضای اضافی را در بالا و پایین آن ایجاد می‌کند).

بعضیها فکر می‌کنند که خود فضا نیز خمیده می‌شود، بنابراین نوری که از یک کهکشان خیلی دور می‌آید، همچنان که از طریق فضا عبور می‌کند، خمیده می‌شود (نگاه کنید به شکل). اگر این طور باشد، کهکشانهای دور باید، همچون ماهی، به صورتی باورنکردنی بزرگ به نظر برسند.

پتک

در نمایش کلاسی زیر، سندان، استاد جصور فیزیک را از چه چیز پتک در امان نگه می‌دارد؟^۱

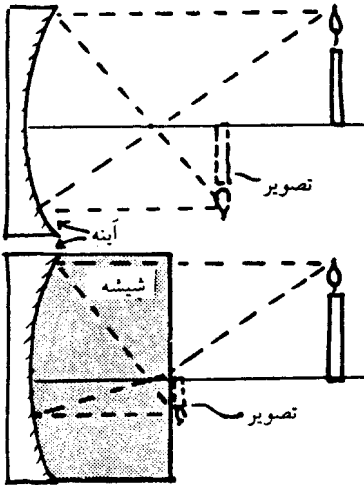
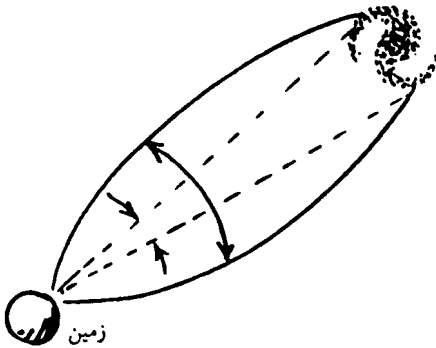
(الف) تکانه پتک

(ب) انرژی جنبشی آن

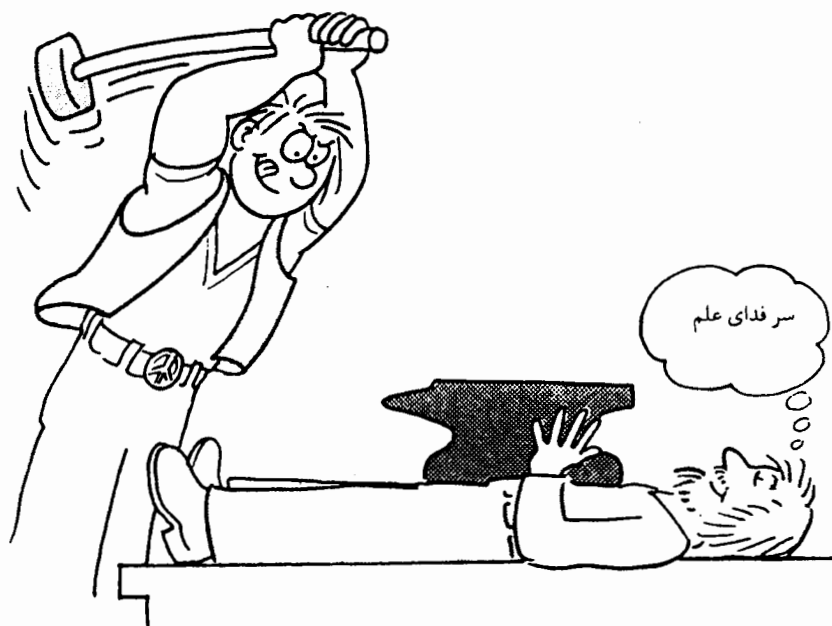
(ج) ... هر دو

(د) ... هیچکدام

پاسخ: (ب) پاسخ درست است. هر قسمتی از تکانه که پتک به سندان منتقل می‌کند به استاد (و از آنجا به زمین که استاد روی آن قرار دارد) منتقل می‌شود. سندان استاد را در مقابل تکانه پتک (حتی به قدر یک ذره هم)

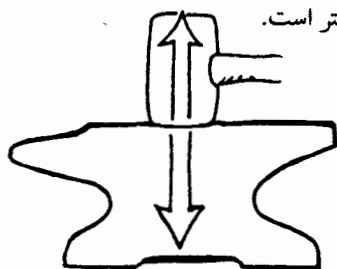


۱. این نمایشی است که من و دانشجویان چند ترم پیش هرگز آن را فراموش نمی‌کنیم. در آن زمان من حساب نشده از یکی از دانشجویان خواستم که پتک بزند. این دانشجو دستپاچه شد و به جای سندان دست مرا هدف گرفت. دستم از دو جا شکست! اکنون این آزمایش را فقط به کمک همکاران باتجربه‌ام انجام می‌دهم - پاول هیوویت.



محافظة نمی‌کند. محافظت در مقابل انرژی جنبشی داستان دیگری است. بخش مهمی از انرژی جنبشی پتک هرگز به استاد نمی‌رسد. این قسمت از انرژی جنبشی به صورت گرما جذب سندان می‌شود. آیا تاکنون توجه کرده‌اید که سر پتک بعد از کوبیده شدن بر سندان چقدر داغ می‌شود؟ گرما گورستان انرژی جنبشی است.

می‌توانیم آنچه میان پتک و سندان ردوبدل می‌شود را اندکی بیشتر توضیح بدهیم. در جریان برخورد، نیروی وارد بر سندان در هر لحظه مساوی و در جهت مخالف نیروی وارد بر پتک است. پتک با همان شدت و در همان مدتی بر سندان عمل می‌کند که سندان بر پتک عمل می‌کند (یا در واقع عکس‌العمل نشان می‌دهد). بنابراین، ضربه‌ای که پتک را متوقف می‌کند برابر است با ضربه‌ای که به سندان و سپس به استاد وارد می‌شود. اگر پتک به توقف کامل برسد، ضربه باید تمامی تکانه پتک را خنثی کند، و همین ضربه باید همین مقدار تکانه به سندان بدهد. بنابراین، مشاهده می‌کنیم که سندان هر مقداری از تکانه را که پتک از دست می‌دهد جذب می‌کند: تکانه پتک کاملاً به سندان منتقل می‌شود. البته، این تکانه سندان را به سرعت به حرکت در نمی‌آورد، زیرا سندان خیلی از پتک سنگینتر است.

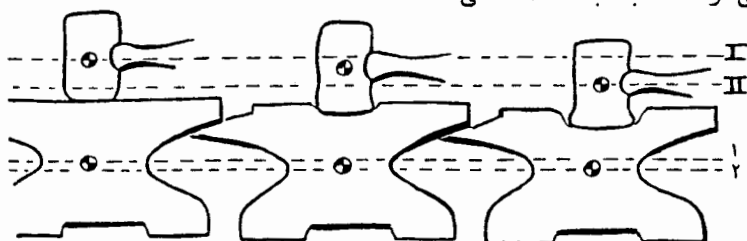


می‌توانیم آنچه میان پتک و سندان ردوبدل می‌شود را اندکی بیشتر توضیح بدهیم. در جریان برخورد، نیروی وارد بر سندان در هر لحظه مساوی و در جهت مخالف نیروی وارد بر پتک است. پتک با همان شدت و در همان مدتی بر سندان عمل می‌کند که سندان بر پتک عمل می‌کند (یا در واقع عکس‌العمل نشان می‌دهد). بنابراین، ضربه‌ای که پتک را

محافظة نمی‌کند. محافظت در مقابل انرژی جنبشی داستان دیگری است. بخش مهمی از انرژی جنبشی پتک هرگز به استاد نمی‌رسد. این قسمت از انرژی جنبشی به صورت گرما جذب سندان می‌شود. آیا تاکنون توجه کرده‌اید که سر پتک بعد از کوبیده شدن بر سندان چقدر داغ می‌شود؟ گرما گورستان انرژی جنبشی است.

می‌توانیم آنچه میان پتک و سندان ردوبدل می‌شود را اندکی بیشتر توضیح بدهیم. در جریان برخورد، نیروی وارد بر سندان در هر لحظه مساوی و در جهت مخالف نیروی وارد بر پتک است. پتک با همان شدت و در همان مدتی بر سندان عمل می‌کند که سندان بر پتک عمل می‌کند (یا در واقع عکس‌العمل نشان می‌دهد). بنابراین، ضربه‌ای که پتک را

اکنون انرژی جنبشی را در نظر می‌گیریم. هنگامی که تکانه را تحلیل می‌کنیم زمانی که طی آن نیرو عمل می‌کند را در نظر می‌گیریم، اما وقتی انرژی را تحلیل می‌کنیم مسافتی که طی آن نیرو اثر می‌کند را منظور می‌کنیم. به همین دلیل انرژی که جسم کسب می‌کند برابر است با نیرو ضرب در مسافتی که طی آن نیرو به جسم فشار می‌آورد. مسافتهای نسبی که پتک و سندان طی برخورد حرکت می‌کنند را از روی نمودار مشاهده کنید. توجه کنید که پتک از حالت I تا حالت II حرکت می‌کند در حالی که سندان فقط از حالت ۱ تا حالت ۲ جابه‌جا می‌شود که نسبت به فاصله طی شده

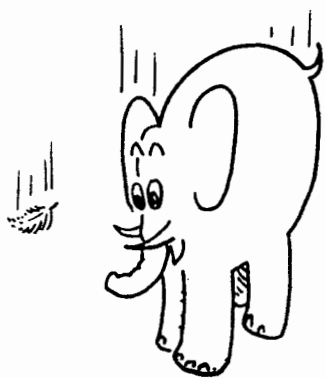


توسط پتک خیلی کم است^۱. نیروها مساوی اما فاصله‌هایی که طی آن اثر می‌کنند نامساوی است. بنابراین تغییرات انرژی جنبشی حاصل نیز نامساوی است: انرژی جنبشی که پتک از دست می‌دهد بیشتر از انرژی جنبشی است که سندان به دست می‌آورد.

بنابراین، در حالی که تمامی تکانه پتک به سندان و سپس به استاد منتقل می‌شود تمام انرژی جنبشی آن منتقل نمی‌شود. استاد فیزیک از اثر انرژی جنبشی پتک در امان می‌ماند، و مجدداً صحیح و سالم به کلاس درس برمی‌گردد.

۱. راه دیگر بیان این مطلب این است که بگوییم سرعت پتک از حدود ۵۰ کیلومتر در ساعت به ۱۵ کیلومتر در ساعت کاهش می‌یابد، در حالی که سرعت سندان از صفر به ۱۵ کیلومتر در ساعت می‌رسد. اگرچه سرآخر سرعت هر دوی آنها یکسان می‌شود اما سرعت پتک در دیگر لحظات از سرعت سندان بیشتر است و بنابراین طی برخورد باید فاصله بیشتری طی کند.

فیل و پر



یک فیل و یک پر از روی درخت بلندی
همزمان سقوط می‌کنند. نیروی مقاومت هوا بر
روی کدام یک بیشتر است؟

(الف) فیل

(ب) پر

(ج) نیروی مقاومت هوا بر هر دو یکسان است

منظور اصلی پرسش را متوجه نشده‌اید. به
عبارت دیگر، به پرسشی که "باید" پاسخ
نداده‌اید. دقت کنید که میان آنچه درباره‌اش
پرسیده می‌شود و اثر آن باید تمایز قائل
شوید. از این نوع پرسشها فراوان مطرح شده
است، بنابراین خیلی مواظب باشید.

پاسخ: (الف) پاسخ درست است. توجه کنید که
اگرچه اثرهای مقاومت هوا بر روی پر
محسوستر است اما نیروی بالفعل مقاومت هوا
در برابر فیل چندین برابر بزرگتر است از
نیروی مقاومت هوا در برابر پر. همچنین فیل
سنگین در هوا تندتر سقوط می‌کند و مقاومت
هوا در برابر آن باز هم بیشتر می‌شود. پر خیلی
سبک است (در حدود گرم) و قبل از آنکه
نیروی مقاومت هوا با وزنش برابر شود
سرعتش چندان زیاد نمی‌شود. پس از آن پر به
سرعت حد می‌رسد. از این لحظه به بعد شتاب
صفر می‌شود و هم سرعت و هم نیروی
مقاومت هوا تا پایان مدت سقوط ثابت
باقی می‌مانند. از طرف دیگر، نیروی مقاومت
هوا در برابر فیل مثلاً تا ۲۰ نیوتون افزایش
می‌یابد. این نیرو نسبت به نیروی مقاومت هوا
در مقابل پر خیلی زیاد است اما در مقایسه با
وزن یک فیل بینوای ۲ تنی که با سرعت
فزاینده به طرف زمین سقوط می‌کند قابل
چشمپوشی است.

اگر شما به این پرسش پاسخ درست
نداده‌اید احتمالاً به این دلیل بوده است که

واژه‌نامه

interference	تداخل	fireball	آتشگوی
constructive interference	تداخل سازنده	thought experiment	آزمایش ذهنی
destructive interference	تداخل ویرانگر	detection	آشکارسازی
symmetry	تقارن	superfluid	ابرشاره
momentum	تکانه	aberration	ابیراهی
angular momentum	تکانه زاویه‌ای	Doppler-effect	اثر دوپلر
pair production	تولید زوج	parallax	اختلاف منظر
gravitation attraction	جاذبه گرانشی	vibration	ارتعاش
wave front	جبهه موج	principle of relativity	اصل نسبیت
rest mass	جرم سکون	expansion	انبساط
coupling	جفت‌شدگی	kinetic energy	انرژی جنبشی
synchronized motion	حرکت همزمان شده	red shift	انتقال به سرخ
desynchronized motion	حرکت همزمان نشده	sideways contraction	انقباض عرضی
uniform motion	حرکت یکنواخت	length contraction	انقباض طول
trough	حوض	space contraction	انقباض فضا
Galileo's dictum	حکم گالیله	shear waves	امواج برشی
elementary particles	ذرات بنیادی	crest	اوج
desynchronized time	زمان همزمان نشده	beam	باریکه
double stars	ستاره‌های دوتایی	light beam	باریکه نور
cosmic speedometer	سرعت‌سنج کیهانی	extrapolation	برونبایی
coordinate speed	سرعت مختصاتی	frequency	بسامد
black hole	سیاهچاله	anti electron	پاد الکترون
flow	شارش	energy conservation	پایستگی انرژی
fluidlike	شاره گونه	scattering	پراکندگی
refraction	شکست	ray	پرتو
double refraction	شکست دوگانه	pulsating star	تپ اختر
rigid	صلب	light pulse	تپ نور

stationary	مانا	bang-proof	ضد بانگ
compressed	متراکم	refractive index	ضریب شکست
antipode	مقاطر	oscillating universe	عالم نوسانی
compresstional wave	موج تراکمی	disintegration	فروپاشی
wavelet	موجک	fringe	فریز
Big bang	مهبانگ	radiation pressure	فشار تابش
annihilation	نابودی	empty space	فضای تهی
out of phase	ناهمفاز	polarization	قطبش
theory	نظریه	polarized	قطبیده
centrifugal force	نیروی مرکز گریز	elastic	کشسان
proper mass	ویژه جرم	galaxy	کهکشان
proper speed	ویژه سرعت	gravitation	گرانش
proper length	ویژه طول	gravity	گرانی
companion	همدم	fault	گسل
in phase	همفاز	torque	گشتاور نیرو
dense air	هوای چگال	inertial	لختی
		light pipe	لوله نوری

فهرست راهنما

۱۷۶	انستیتو قیصر ویلهلم	۳۳	آزمایش ذهنی
۹۹ - ۹۷، ۷۴، ۴۰، ۳۹	انقباض فضا	۲۴	آلبرت اینشتین
۶۱	انواع سرعت	۴۶	ایراهی نور
۲۰۱، ۲۰۰	انواع عالمها	۷۱، ۷	اتر
۲۰۶	بار منفی	۸، ۷	اتمهای اتری
۵۵، ۵۳	بازی با زمان	۱۳۵، ۱۳۴	اتمهای انرژی
۹۱، ۹۰	پارادوکس دوقلو	۵۹	اثر دوپلر
۱۶۵، ۱۶۴	پارادوکس دوقلو و گرانش		اثر چین خوردگی فضا
۲۰۸	پتک	۱۸۶، ۱۸۵	بر چرخش نما
۲۰۹	پتک و سندان		اثر چین خوردگی فضا
۱۹۹، ۱۹۸	پلی میان عالمها	۱۸۴، ۱۸۳	بر مدار سیارات
۵۷، ۵۶	تعریف اندازه گیری	۱۴۶، ۱۴۳	اثر گرانی بر نور
۱۳۵، ۱۳۴	تعریف جرم		اثر گرانی بر ویژه زمان
۵۷، ۵۶	تعریف دیدن	۱۹۵	و زمان مختصاتی
۵۹	تعریف ناظران محلی	۷۷، ۷۶	اجتماع ساعتها
۲۰۸	تکانه پتک	۱۰۶	اصل کیهانشناسی
۱۲۱، ۱۲۰	تکانه نسبی	۱۲	اصل نسیت
۵۹، ۵۶	تأخیر زمانی	۲۰۷	اضافه بار
۲۰۶	جرقه	۸۲، ۸۱	افسانه حرکت
۱۲۶، ۱۱۳	جرم	۸۴	افسانه های حرکت
۱۴۳، ۱۲۷، ۱۲۶، ۱۲۲	جرم انرژی	۹۳، ۸۴	افسانه نسبیت
۱۱۹، ۱۱۸	جرم دینامیکی	۲۰۷	الکتریسته مثبت
۱۱۹	جرم سکون	۳۲، ۳۰	امواج الکترومغناطیسی
۱۱۹، ۱۱۸	جرم نسبی	۲۰۰، ۱۹۹	انتهای زمان
۱۴۱ - ۱۳۶	جرم نور	۱۸۳، ۱۸۲	انحراف نور ستاره
۱۹۶	چگونه بینهایت را رسم کنیم	۲۳، ۲۲	اندازه گیری سرعت نور
		۲۰۸	انرژی جنبشی پتک

۱۱۴	ضربه	چگونه می‌توان خطوط مستقیم را ...	
۲۴	طرح نسبیت اینشتین	۱۸۸، ۱۸۹	
۱۹۹، ۱۹۸	عالمهای موازی	۱۲۴، ۱۲۵	چهار بردار تکانه
۲۰۷	عدسی بازتابان	۷۲، ۹	حرکت از داخل اتر
۱۵۵ - ۱۵۳	علت گرانش	۳۳، ۳۴	حرکت همزمان شده
۱۶۵	فرار از جاذبه گرانشی	۳۹، ۴۰	حرکت همزمان نشده
	فضا چین خوردگی پیدامی‌کند	۷۲، ۷۳ - ۲۹	حرکت مایل نور
۱۸۹، ۱۷۱		۱۳، ۱	حکم گالیله
۸۵	فضازمان تعریف شده	۱۹۸، ۱۹۹	دروازه‌ای بین عالمها
۱۴۷، ۱۴۸	فضازمان خمیده	۱۶۱، ۱۶۴	در دام جاذبه گرانشی
	کنشدن زمان بر اثر حرکت	۱۷۸، ۱۸۰	رسم مخروط
۶۴ - ۶۸		۱۱۴	دنباله‌دار
	کنشدن زمان بر اثر گرانی	۹۱، ۹۴	دو نوع زمان
۱۴۶ - ۱۵۱		۱۹۰، ۱۹۱	زمان متوقف شده
۱۰۱، ۱	کوپرنیک	۳۴، ۳۷	زمان همزمان نشده
۲۰۰	کیک کشمشی	۶۵، ۶۷	ساعت نوری
۱۹۹ - ۲۰۱	کیهانشناسی	۲۲	سرعت اندازه‌گیری شده
	گرانش به وسیله شکست	۷۲ - ۷۵	سرعت امواج نوری
۱۷۷ - ۱۷۰		۶۷	سرعت سنج کیهانی
۱۵۸ - ۱۵۶	گرانش و سقوط	۷۳ - ۷۵	سرعت مختصاتی
۱۷۷	گرانی	۵۷ - ۵۸	سرعت نور
۱۸۱ - ۱۷۷، ۱۴۶ - ۱۴۳	گرانی و نور		سریعتر از سرعت نور
۱۸۳، ۱۸۲	گرفت خورشید	۵۹، ۶۰، ۷۸، ۸۰	
۳	گریمالدی	۱۹۸	سوراخ کرمها و ...
۱۱۱، ۱۱۰، ۱۰۶	لبه عالم	۱۴۴	سولدنر
۱۹، ۱۵	ماهیت اتر	۱۸۴	سیاره ولکان
	ماهیت غیر ثابت سرعت نور	۱۹۳ - ۱۹۵	سیاهچاله
۱۴۶، ۱۴۵		۱۹۲ - ۱۹۴	سیاهچاله و زمان
۱۲۸، ۱۲۷	متر - کیلوگرم	۱۴۳	سیمون لاپلاس
۱۸۳	مدار سیاره تیر	۱۲۸	شتابدهنده خطی استنفورد

۲۱۱	نیروی مقاومت هوا	۱۶۶، ۱۶۵	مدل، نه شکل
۴۱-۴۰	ویژه تعریف	۲۱	مسئله سرعت نور
۱۱۹، ۱۱۸	ویژه جرم	۱۰۶-۱۰۵	مهبانگ
۷۴، ۷۳	ویژه سرعت	۴۰، ۳۹	ناهمزمانی حرکت
۴۹، ۴۸	ویژه طول	۳۶-۳۴	ناهمزمانی زمان
۵	هاینریش هرتز	۱۵۲	نظر گالیله درباره گرانش
۳۴، ۳۳	همزمانی	۷، ۴	نظریه موجی نور
۲۶، ۱۲	هنری پوانکاره	۱۴۴	نور سنگین
۱۲۷	یکاهای انرژی	۱۲۴	نیروی جنبش

