درس گفتار

دوره‌ی آشنایی مقدماتی با نظریه‌ی نسبیت عام انیشتین

ارائه کننده: دکتر فرهنگ لران

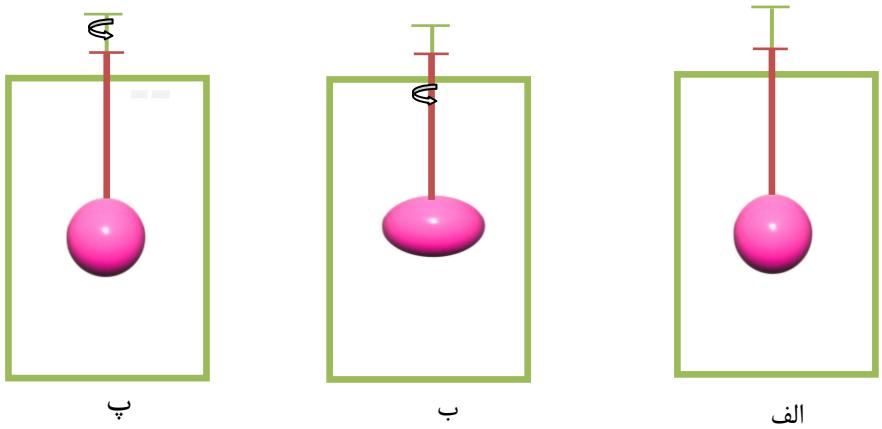
تهیه کننده: مریم اشرفی

اصل هم‌ارزی

❖ مفهوم فضای مطلق

در گذشته مردم بر این باور بودند که فضا-زمان دارای ساختار مطلق است. درصورتی‌که ذره‌ای نسبت به این ساختار شتاب داشته باشد، در اثر اندرکنش ذره با فضا-زمانِ مطلق، ذره از خود لختی نشان می‌دهد. درحالی‌که اگر ذره نسبت به فضای مطلق شتاب نداشته باشد از خود لختی نشان نمی‌دهد. دو ذره با جرم‌های ۲ کیلوگرم و ۱۰۰ کیلوگرم را درنظر بگیرید. فرض کنید که به این دو ذره نیرو وارد نمی‌شود و هر دو با سرعت ثابت ۲ متر بر ثانیه حرکت می‌کنند. آشکار است که با اندازه‌گیری سرعت این دو جسم نمی‌توان جرم آنها را به‌دست آورد.

در مکانیک نیوتونی شتاب نسبی نیست و فضای مطلق میزان شتاب یک جسم را تعیین می‌کند. توپ لاستیکی که درون اتاقکی آویزان است را درنظر بگیرید (شکل۱-الف). در وضعیت یک، توپ با سرعت زاویه‌ای ω می‌چرخد و اتاق ساکن است (شکل۱-ب) و در وضعیت دو، توپ ساکن و اتاقک با سرعت زاویه‌ای ω می‌چرخد (شکل۱-پ). در حالت اول چون توپ نسبت به فضای مطلق شتاب‌دار است در اثر اندرکنش با آن تغییر شکل می‌دهد. درحالی که در وضعیت دوم چون توپ نسبت به فضای مطلق شتاب ندارد، تغییر شکل نمی‌دهد.



شکل۱: الف) توپ و اتاق ساکن هستند. ب) توپ با سرعت زاویه‌ای ω می‌چرخد و اتاق ساکن است. پ) توپ ساکن و اتاق با سرعت زاویه‌ای ω می‌چرخد.

ویژگی مهم فضای مطلق این است که تحول ندارد و با گذشت زمان شکل آن تغییر نمی‌کند. ازاین‌رو فضای مطلق قابل مشاهده نیست. مفهوم فضای مطلق دارای مشکل منطقی است و در چهارچوب قانون سوم نیوتون قرار نمی‌گیرد. زیرا فضای مطلق تغییر نمی‌کند ولی متوجه تغییرات اشیاء می‌شود. به بیان دیگر فضای مطلق با اشیاء برهمکنش می‌کند و به آن‌ها شتاب می‌دهد اما خود آن بدون تغییر می‌ماند.

اصل ماخ

ماخ بر این باور بود که مفهومی به نام فضای مطلق وجود ندارد. در دیدگاه ماخ، وضعیتی که توپ می‌چرخد و کل جهان اطراف آن ساکن است با حالتی که توپ ساکن است و کل جهان به دور آن می‌چرخد، هم‌ارز است. به بیان دیگر، در دیدگاه ماخ شتاب نسبی است. با وجود اینکه دیدگاه ماخ، یک دیدگاه فلسفی و کیفی است، ولی ابطال‌پذیر است; یعنی با یک آزمایش ساده می‌توان درستی یا نادرستی اصل ماخ را مورد بررسی قرار داد. شکل(۱-پ) را درنظر بگیرید براساس مکانیک نیوتونی، چون توپ نسبت به فضای مطلق ساکن است دچار تغییر شکل نمی‌شود. درحالی‌که در دیدگاه ماخ، چون وضعیت توپ با توجه به دنیای اطراف آن تعیین می‌شود، با چرخش فضای اطراف، توپ تغییر شکل می‌دهد.

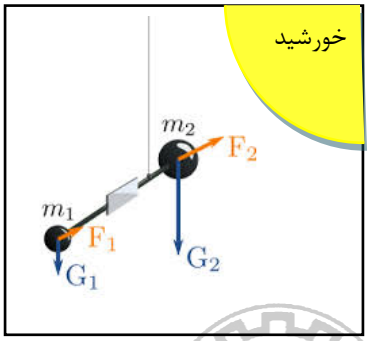
مطابق اصل ماخ هر جرمی وضعیت خود را با جهان اطراف می‌سنجد. بدین‌ترتیب اگر لختی جسمی در همه جهات یکسان باشد، به این معنا است که توزیع جرم در جهان حول نقطه‌ی مشاهده، متقارن است. در صورتی که اصل ماخ را بپذیریم نیاز به فرمول‌بندی یک مکانیک جدید داریم. مکانیکی که در آن لختی مطلق نیست.

❖ اصل هم‌ارزی

اگر دو توپ کاملاً مشابه با جرم‌های متفاوت را از بالای سطح شیب‌دار بدون اصطکاک رها کنیم، هم‌زمان به پایین سطح شیب‌دار می‌رسند. این بدین معنا است که شتاب گرانشی هر دو جسم یکسان است. یعنی شتاب گرانشی از جرم مستقل است. در دیدگاه نیوتونی نیروی گرانش متناسب با جرم گرانشی است. بدین‌ترتیب اگر شتاب گرانشی مستقل از جرم باشد، باید نسبت جرم‌گرانشی به جرم‌لختی برای همه‌ی اجسام یکسان باشد. درستی این گزاره توسط اتووش[1] مورد آزمایش قرار گرفت. در این آزمایش اتووش دو جسم با جنس و جرم

[1] Eötvös

متفاوت را به میله‌ی صلبی متصل و آنها را از سقف آویزان کرد. از طرف خورشید نیروی گرانشی به این دو جسم وارد می‌شود. اگر خورشید نیروی مساوی به این دو جسم وارد نکند با تغییر وضعیت زمین نسبت به خورشید آنها شروع به چرخیدن می‌کنند. نتیجه آزمایش این بود که چرخشی در دو جسم مشاهده نشد. بدین ترتیب از طرف خورشید نیروی یکسانی به دو جسم با جرم‌های متفاوت وارد می‌شود، که این تأیید کننده برابر بودن جرم‌لختی و جرم‌گرانشی است.

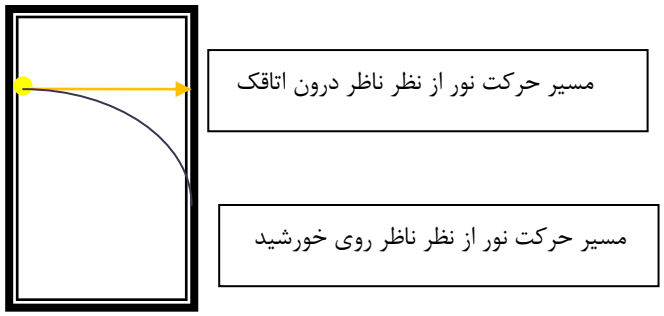


شکل۲: آزمایش اتووش

مطابق اصل هم‌ارزی، ذرات، پادذرات، نور و انرژی در میدان گرانشی، یکسان سقوط می‌کنند. یک اتاقک دربسته‌ای را در نظر بگیرید که در میدان گرانشی یک ستاره سقوط می‌کند. مطابق اصل هم‌ارزی همه‌ی اشیائی که داخل اتاقک قرار دارند در میدان گرانشی به طور یکسان سقوط می‌کنند و وضعیت آنها نسبت به همدیگر تغییر نمی‌کند. بدین‌ترتیب افرادی که داخل این اتاقک هستند با انجام هیچ آزمایش فیزیکی نمی‌توانند تشخیص دهند که از ستاره‌ها دور هستند یا در گرانش یک ستاره سقوط می‌کنند.

بیان دیگری از اصل هم‌ارزی این است که، وضعیتی که اتاقک با شتاب g حرکت می‌کند با وضعیتی که اتاقک در میدان گرانشی یک جسم، شتاب g پیدا می‌کند، صرف‌نظر از نیروهای کشندی، هم‌ارز است. هم‌ارزی به این معنا است که نتیجه‌ی آزمایش‌های فیزیکی که در این دو وضعیت انجام می‌شوند، یکسان است. درحالی‌که در مکانیک نیوتونی، مطابق اصل اول، این دو وضعیت با هم متفاوت هستند. اتاقکی که در فضای میان کهکشان‌ها رها شده، لخت است. اما اتاقکی که در میدان گرانشی سقوط می‌کند نالخت است زیرا حرکت آن شتاب‌دار است.

اتاقکی را درنظر بگیرید که در نزدیکی خورشید سقوط می‌کند. فرض کنید که چشمه‌ی نوری مطابق شکل ۳ روی یکی از دیواره‌های اتاقک در فاصله‌ی ۱۰سانتی‌متری از سقف قرار دارد.



شکل۳

حال چشمه‌ی نور را روشن می‌کنیم. مطابق اصل هم‌ارزی از نظر افرادی که داخل اتاقک هستند، نور به ضلع مقابل، در نقطه‌ای که به فاصله‌ی ۱۰ سانتی‌متری از سقف قرار دارد، برخورد می‌کند. درحالی‌که از نظر فردی که روی خورشید قرار دارد چون اتاقک دارای شتاب است، مسیر نور خمیده است. بدین‌ترتیب هنگامی که نور از کنار خورشید عبور می‌کند خم می‌شود که این یکی از پیامدهای اصل هم‌ارزی است.

همه‌ی نظریه‌های گرانشی که در آنها اصل هم‌ارزی پذیرفته شده باشد خم‌شدن نور را پیش‌بینی می‌کنند، اما نظریه‌ای درست است که در آن میزان خم شدن نور با میزان خمیدگی نور که توسط آزمایش اندازه‌گیری می‌شود، یکسان باشد. ادینگتون[۲] میزان خمیدگی نور یک ستاره را در نزدیکی خورشید اندازه‌گیری کرد. میزان خمیدگی که با بکارگیری مکانیک نیوتونی به‌دست می‌آید با نتایج آزمایش ادینگتون سازگار نیست. در حالی‌که پیش‌بینی نسبیت‌عام انیشتین برای میزان خم شدن نور یک ستاره در نزدیکی خورشید، با نتیجه‌ی آزمایش ادینگتون سازگار است.

اتاقکی را درنظر بگیرید که در گرانش خورشید سقوط می‌کند. فرض کنید که کف اتاقک یک آشکارساز و در سقف آن یک چشمه نور قرار داده و طول‌موج آن را اندازه می‌گیریم. از نظر ناظرهای داخل اتاقک طول‌موج نور تغییر نمی‌کند. از نظر ناظر روی خورشید آشکارساز از فرستنده دور می‌شود، هنگامی که چراغ روشن شده، سرعت اتاقک صفر و هنگامی که نور به آشکارساز می‌رسد، سرعت آن مخالف صفر است. بدین ترتیب، از نظر ناظر روی خورشید، طول موج نور افزایش می‌یابد. یعنی اگر رنگ نور از نظر ناظر داخل اتاقک زرد باشد، از نظر ناظر روی خورشید رنگ نور به سمت قرمز جابجا می‌شود. این پدیده «انتقال به قرمز گرانشی» نامیده می‌شود. اگر جای چشمه و آشکارساز را عوض کنیم از نظر ناظر روی خورشید طول موج نور کاهش می‌یابد. که به این پدیده «انتقال به آبی گرانشی» گفته می‌شود. بدین‌ترتیب، گرانش روی آهنگ کار ساعت‌ها تأثیر می‌گذارد.

[2] Eddington

آزمایش‌های مختلفی برای بررسی تغییر ضرب‌آهنگ ساعت‌ها صورت گرفته است. یک جفت ساعت دوقلو، یکی در بریتانیا و دیگری در محلی در آمریکا قرار داده شده است. ساعتی که در بریتانیا قرار دارد به دلیل آنکه به سطح دریا نزدیک‌تر است کندتر کار می‌کند. میزان اختلاف زمانی میان این دو ساعت دقیقاً با پیش‌بینی نظریه‌ی نسبیت عام انیشتین برابر است.

حال فرض کنید اتاقک با شتاب مشخصی نسبت به ناظری، به سمت بالا حرکت می‌کند. اگر چشمه‌ی نور را روی سقف اتاقک قرار داده باشیم از نظر ناظر بیرون اتاقک، چشمه به آشکارساز نزدیک می‌شود. بدین‌ترتیب طول موج نور هنگامی که به آشکارساز می‌رسد کاهش می‌یابد. اگر جای چشمه و آشکارساز را عوض کنیم، از نظر ناظر بیرونی طول‌موج نوری که به آشکارساز می‌رسد افزایش می‌یابد.

هنگامی که نور در میدان گرانشی سقوط کند می‌شود طول‌موج آن کاهش و هنگامی که از میدان گرانشی دور می‌شود طول موج آن افزایش می‌یابد.

ستاره‌ی بسیار سنگینی را درنظر بگیرید. طول موج نوری که از ستاره بیرون می‌آید با دور شدن از سطح آن، افزایش می‌یابد. اگر ستاره به اندازه‌ی کافی سنگین باشد، طول‌موج نوری که از ستاره بیرون می‌آید، به سمت بی‌نهایت میل می‌کند. بدین‌ترتیب نورهایی که از سطح ستاره خارج می‌شوند قابل آشکارسازی نیستند. این ستاره‌ی بسیار سنگین سیاه‌چاله نامیده می‌شود.

سیاه‌چاله یک ستاره‌ی بسیار سنگین است که هر نوری که از آن بیرون می‌آید دچار انتقال به قرمز بی‌نهایت می‌شود.