نسبیت انیشتین

(هوشنگ حسن شاهی)

مقدمه

فارغ از اینکه بسیاری از ما یک سال را یک عمر تکرار کرده ایم و به ظاهر دقایق و ساعات و هفته های بسیاری را با ریتم ثابتی گذرانده ایم، ولی آهنگ گذر زمان یا ریتم تیک تاک ساعت ها، ثابت و مطلق و خطی نمی باشد و هر یک از ما گذر زمان را متفاوت تجربه می کنیم. لحظاتی را که با درد و رنج و غم و غضه و بیماری و شکنجه و انتظار سپری می کنیم، دیر می گذرد، و لحظاتی را که با عشق و شادی و نشاط و خرسندی و سودمندی و ارزشمندی می گذرانیم، زود می گذرد!! هر یک از ما حال متغیری داریم، حال متغیر ما را مردگان آینده می نامیدند و نوزادان تازه میلاد گذشته اش می نامند. گذشته و آینده ای در اختیار هیچیک از ما نمی باشد و پشیمانی از کرده ها ما را از ناکرده ها بازمی دارد!!

زمان، توالی رویدادهای برگشت ناپذیری است وساعتی که گذر زمان را اندازه گیری می کند، یک اندازه گیری نسبی رویدادی نسبت به رویدادی دیگر است، رویدادی که برای ما زمینی ها چند سال بطول می انجامید، چه بسا که از نگاه سرنشین سفینه ای تیز پرواز در یک چشم به هم زدن، به وقوع پیوسته باشد. از قرن هفدهم تا اواخر قرن نوزدهم، تبدیلات گالیله ای و مکانیک نیوتنی بی رقیب و بی منازع بود و مطلق گرائی گرایشی غالب بود. دنیای مطلق معقول افلاطونی، دنیای مطلق و مقدس کلیسائی، دنیای مطلق عقلانیت عصر روشنگری، چارچوب مطلق نیوتنی، رتیم مطلق تیک تاک جهانی، چارچور مرجع و مرجح جهانی،زمان مطلق، مکان مطلق، جرم مطلق، اندازه گیری مطلق، حقیقت مطلق، کمال مطلق ....، همه آنچه را که فیزیکدان ها از زمان گالیله و نیوتن آموخته بودند، در اواخر قرن نوزدهم با پیدایش پدیده های نوظهوری به چالش گرفته می شد. همانطور که نسبیت گالیله ای پایانی بر سکون ارسطوئی بود، نسبیت انیشتین نیز، پایانی بر زمان و مکان و جرم و انرژی مطلق جهانی بود و نسبیت به عنوان آنتی تز مطلق گرائی به میدان برآمد و اهمیت ارتباط هر چیزی را با چیزهای دیگر واکاوی کرد و با وجودی که ایده های غامض و پیچیده ای را با خود داشت، ولی چشم انداز وسیعی را بازگشائی کرد، ادراکات شهودی آدم ها به نفع فضا و زمان و جرم و انرژی مطلق بود، ولی هنری پوانکاره، ریتم گذر زمان را به حرکت وابسته می دانست و حتی از وجود امواج گرانشی سخن به میان آورد. هرمان مینکوفسکی هر واقعیت و رویدادی را به فضا- زمان نسبت می داد و فضا- زمان را مجموعه ای از رویدادها و زمان را بُعد چهارم هندسه فضا- زمان می دانست. مایکلسن و مورلی با طرح تداخل سنج هایی سرعت انتشار نور را مستقل از سرعت منبع تولید نور و سرعت حرکت ناظر بدست آورد و به فرض وجود اتر و چارچوب مرجع جهانی خاتمه داد.

جرالد فیلدز و هندریک لورنتس از انقباض طول متحرک در راستای حرکت سخن گفتند، و لورنتس روابطی مبتنی بر انطباق تئوری و تجربه بین چارچوب های لخت بی شتاب بدست آورد، و ماکس پلانگ، از کوانتائی بودن انرژی و کمّیت های کوانتائی فیزیک سخن به میان آورد. در این بازه زمانی بود که، معادلات ماکسوئل تحت تبدیلات گالیله ای در چارچوب های لخت بی شتاب شکل خود را حفظ نمی کرد و به تناقض می خورد و فیزیکدان ها را به تردید وامی داشت که به راستی اشکال در تبدیلات گالیله ای یا در معادلات ماکسوئل است، سیاره تیز پرواز عطارد، نزدیک ترین سیاره منظومه شمسی به خورشید از مداری که قوانین کپلر و قانون جاذبه عمومی نیوتن برای آن پیش بینی می کرد، پیروی نمی کرد و دائماً نقطه حظیض مدار تغییر می کرد. فارادی و ماکسوئل و نیوتن و هم عصرانشان به فضای مطلق پر شده از اتر و زمان مطلق جهانی و چارچوب مطلق جهانی باور داشتند و حتی لورنتس با فرض وجود اتر ساکن روابط تبدیلات خود را بدست آورد. در بدر به دنبال روابط تبدیلی بودند که شکل قوانین فیزیک در همه چارچوب های لخت بی شتاب حفظ شود. آلبرت انیشتین فیزیکدان شهیر آلمانی، بردوش غول هایی چون گالیله، نیوتن، فارادی، ماکسوئل، کپلر، کپرنیک، پوانکاره، لورنتس، جرالد فیلدز و... پهلو گرفت و بازی های فکری سنین نوجوانی خود را در بازۀ زمانی ۱۹۱۵-۱۹۰۵ عینیت بخشید و با انتشار تئوری نسبیّت، فهم جدیدی از فضا، زمان، جرم، انرژی و گرانش به ارمغان آورد و علم و فلسفه و نجوم و حتی علوم اجتماعی را تحت تأثیر قرار داد. در این بُرهه از زمان بود، که واژه ها رنگ و بوی نسبیتی پیدا کردند و از نسبیت فرهنگی و پُست مدرنیسم سخن گفتند، و از دسته بندی پدیده ها به خوب و بد پرهیز کردند. جای خالی گرما را سرما، جای خالی روشنائی را تاریکی، جای خالی هوا را خلاء، جای خالی آگاهی را نادانی، جای خالی آزادی را خفقان، جای خالی صلح را جنگ، جای خالی برابری را تبعیض، جای خالی مکنت را فقر، جای خالی تندرستی را بیماری، جای خالی زندگی را مرگ و جای خالی خدا را شیطان نامیدند، و سعی به پر کردن جاهای خالی کردند!!

نسبیت

واژه نسبیت را در اوائل قرن هفدهم گالیله بر زبان آورد و هر کس با الکتریسیته و مغناطیس سر و کار دارد، اثرات نسبیتی را تجربه می کند . با دور و نزدیک کردن یک آهنربا به یک حلقه مسی، در حلقه جریان الکتریکی القا می شود، میدان مغناطیسی متغیر مولد میدان الکتریکی است و میدان الکتریکی متغیر مولد میدان مغناطیسی است. قوانین فارادی و آمپروگوس و معادلات ماکسوئل همه از پیامدهای اثرات نسبیتی

می باشند. تئوری نسبیت انیشتین مبتنی بر بازی های فکری سنین نوجوانی آلبرت انیشتین و یافته های تجربی گالیله، نیوتن، مایکلسن، مورلی، لورنتس، پوانکاره، ماکس پلانگ، مینکوفسکی، فارادی، ماکسوئل ... پایه ریزی شده، تئوری نسبیت به دو تئوری خاص و عام دسته بندی شده، تئوری نسبیت خاص در سال ۱۹۰۵ و تئوری نسبیت عام در ۱۹۱۵ توسط آلبرت انیشتین انتشار یافت.

الف: نسبیت خاص

تئوری نسبیت خاص مطالعه کلیه پدیده های فیزیکی بجز گرانش در چارچوب های مرجع لخت بی شتاب می باشد، و در تئوری نسبیت فضا- زمان همگن و همسانگرد بوده و الکترودینامیک اجسام متحرک را دنبال می کند و مبتنی بر فرضیاتی به قرار زیر پایه ریزی شده:

۱- ساختار پیوسته در حال پیدایش و افول جهان هیچ چارچوب مرجع مرجحی از جمله اتر را برنمی تابد، یعنی هیچ مرکزی یا هیچ چارچوب مرجحی وجود ندارد.

۲- سرعت انتشار نور در خلا به عنوان سرعت حد جهانی مقدار ثابتی مستقل از سرعت حرکت منبع تولید نور و سرعت حرکت ناظر می باشد.

۳- قوانین فیزیک برای همه ناظران چارچوب های مرجع لخت بی شتاب، که نسبت به هم سرعت ثابتی دارند یکسان است، ولی اندازه گیری ها در چارچوب های مختلف متفاوت است.

۴- هیچ جرمی یا پیامی یا اثری با سرعتی بالغ بر سرعت نور، انتشار نمی یابد.

۵- تبدیلات لورنتس که مبتنی بر انقباض طول در راستای حرکت و تأخیر زمانی بر اثر حرکت پایه ریزی شده، جایگزین تبدیلات گالیله ای می شود که مبتنی بر زمان، مکان و جرم مطلق طراحی شده.

۶- در سرعت های پائین $v \ll c$ تبدیلات لورنتس به تبدیلات گالیله ای تبدیل می شود و نظریه نسبیت به تئوری مکانیک کلاسیک تقریب می شود.

۷- هندسه نااقلیدسی ریمانی و مینکوفسکی جایگزین هندسه اقلیدسی می شود.

۸- امواج الکترومغناطیسی در همه چارچوب های مرجع لخت بی شتاب بصورت کروی منتشر می شوند.

۹- دو رویداد هم زمان در یک چارچوب در چارچوب دیگر الزاماً هم زمان نمی باشد و هم زمانی نسبی است.

۱۰- ریتم تیک تاک ساعت یا آهنگ گذر زمان در چارچوب های مختلف، متفاوت اندازه گیری می شود.

۱۱- طول متحرک در راستای حرکت در چارچوب های مختلف، متفاوت اندازه گیری می شود.

۱۲- جرم کمّیت مستقلی نمی باشد و در چارچوب های مختلف متفاوت اندازه گیری می شود. اگر جسمی با سرعت U در حال حرکت باشد و جرم در حال سکونش m_0 باشد، جرم در حال حرکتش $m=\frac{m_0}{\sqrt{1-\frac{1}{c^2}u^2}}$ می باشد و

جرم کمیتی نسبی است.

۱۳- جرم و انرژی دو روی یک سکه بوده و انرژی معادل جرم m یا انرژی هم ارز جرم m، $E=mc^2$ می باشد که در آن c سرعت انتشار نور در خلاء است.

۱۴- فضای نسبیت یک فضای چهار بعدی طول و عرض و ارتفاع و زمان می باشد و مختصات هر رویدادی در این فضا بصورت (x, y, z, ct) می باشد. و در غیاب فضا و ماده، زمان بی معنی است.

۱۵- در همه چارچوب های مرجع لخت بی شتاب، پایستگی انرژی- اندازه حرکت با رابطه $E^2-P^2c^2=E_0^2$ برقرار است، که در آن E انرژی و P اندازه حرکت و $E_0=m_0c^2$ انرژی در حال سکون جسم می باشد.

پنجاه سال قبل از انتشار تئوری نسبیت، قوانین میکائیل فارادی و جیمز کلارک ماکسوئل در حوزه الکترومغناطیس، الکتریسیته و مغناطیس را در هم آمیخت و معادلات ماکسوئل همه را شکوکه کرد، چرا که نیروهای الکترومغناطیسی محصول حرکت نسبی بارهای الکتریکی و ناظر بودند.

تئوری نسبیت نیز در اوائل قرن بیستم در نگرشمان نسبت به فضا، زمان، جرم و انرژی، انقلابی بوجود آورد و سرانجام به کشف چیزهای عجیب و غریبی انجامید.

در اوائل قرن بیستم، تئوری نسبیت اثر چندانی روی زندگی روزمره آدم ها نداشت، چرا که سرعت های متداول موجود در مقایسه با سرعت نور ناچیز بودند و انیشتین عمدتاً بخاطر معادله $E=mc^2$ مشهور شد، چنانکه ماکس پلانگ بخاطر فرمول $E=hf$ انیشتین نه بخاطر نسبیت بلکه بخاطر کشف اثر فتوالکتریک و تابش جسم سیاه، برنده جایزه نوبل شد. تئوری نسبیت، هر چند جذابیت تئوری تکامل داروین را نداشت،

ولی با کشف انبساط جهان و تئوری بیگ بنگ به آن جذابیت منحصر به فردی داد. نسبیت خاص از این نظر خاص نامیده می شود که الکترودینامیک اجسام را فارغ از گرانش تنها در چارچوب های لخت بی شتاب مطالعه می کند.

ب) نسبیت عام

آلبرت انیشتین در سال ۱۹۱۵، تئوری نسبیت عام را به مطالعه چارچوب های شتابدار و ماهیت گرانش و انحنای فضا- زمان اختصاص داد و طی معادلاتی به نام معادلات میدان انیشتین، به مطالعه توپولوژی و هندسه فضا- زمان پرداخت. او نیز یکی از تخیل پردازترین متفکران تاریخ علم می باشد. نگرش سنتی گرانش یا نیروی جاذبه نیوتنی نیروی جاذبه ای بود که بین دو جرم بطور آنی اعمال می شد و اندازه این نیرو با حاصلضرب دو جرم نسبت مستقیم و با مجذور فاصله دو جرم نسبت عکس داشت. $F=G\frac{M_1 \cdot M_2}{d^2}$ در حالی که نسبیت عام ماهیت گرانش را در انحنای فضا- زمان جستجو می کرد و انحنای فضا - زمان را به جرم مربوط می کرد و ارتباط گرانش را با نیروهای قوی هسته ای و ضعیف هسته ای و الکترومغناطیس جستجو می کرد، نسبیت عام فضا را به مثابه ورقه پلاستیکی یا لاستیکی یا تور یا حصیری می دید که جسم سنگینی بر آن نهاده شده و آنرا گود و زنگولی کرده، انحنای فضا – زمان نه قابل رؤیت بوده و نه قابل اندازه گیری، چرا که فضا- زمان و جرم – انرژی درهم تنیده اند و خمش یا انحنای فضا- زمان با انرژی و اندازه حرکت و تابش متناسب است.

نسبیت عام به مطالعه پدیده های فیزیکی بزرگ مقیاس می پردازد و در یک مقیاس محلی تشخیص اینکه اثرات فیزیکی معلول گرانش بوده یا شتاب ناممکن می باشد، چرا که، گرانش، یک پدیده هندسی ناشی از انحنای فضا- زمان می باشد. معادلات میدانی انیشتین موقعیت های فیزیکی مختلف اعم از حرکت سیارات، میلاد و مرگ ستارگان، سیاه چاله ها، عدسی های گرانشی، تکامل جهان، تأخیر زمانی در حوزه گرانشی، امواج گرانشی، اثرات دوپلری نوری، ستاره های نوترونی و توپولوژی فضا- زمان را مطالعه می کند، تئوری نسبیت عام در اصل تئوری اصلاح قانون جاذبه عمومی است و با معادلات دیفرانسیل جزیی مرتبه دوم سر و کار دارد و میل به ایجاد وحدت بین نیروهای طبیعت دارد.

نسبیت عام، بخشی از چارچوب مدل استاندارد بیگ بنگ کیهانی می باشد و ساده ترین تئوری می باشد که با داده های تجربی همخوانی دارد.

تئوری نسبیت نقش مهمی در حوزه های نجوم، دنیای بی نهایت کوچک های زیراتمی و ذرات بنیادی و فیزیک هسته ای بازی می کند.

پدیده های نسبیتی

۱- چرا جیوه در شرایط متعارفی، مایع است؟

فلز جیوه (زنده) دارای اتم سنگینی بوده $^{202}_{80}Hg$ با آرایش الکترونی

$Hg:(2)(8)(18)(32)(18)(2)$ در اتم جیوه الکترون های نزدیک هسته، سرعتشان فوق العاده بالاست و جرم این الکترون ها بشدت افزایش می یابد و در انقباض نسبیتی طول مسیری که می پیمایند، به هسته نزدیک تر می شوند و حتی الکترون های ظرفیت میل به اشتراک گذاشتن با اتم های دیگر ندارند و در شرایط عادی در فاز مایع باقی می مانند.

۲- چرا طلا زرد است؟

فلز طلا دارای اتم سنگینی بوده ($^{197}_{79}Au$) با آرایش الکترونی $Au:(2)(8)(18)(32)(18)(1)$

در اتم طلا، الکترون های آزاد بسیاری وجود دارد، که دارای سطوح انرژی بالایی هستند، الکترون های اتم طلا با دریافت و گسیل انرژی از ترازی به تراز دیگر می روند و الکترون های پرسرعت جرم نسبیتی سنگینی داشته و بر اثر انقباض نسبیتی طول مسیر کوتاه تری را طی کرده، به هسته نزدیک تر می شوند و همین جابجایی الکترون ها در اتم طلا، سبب جذب و گسیل فوتون هایی با طول موج بلند طیف نور سفید اعم از قرمز و نارنجی و زرد می شود و همین سبب تلألو و درخشش طلا می شود، انرژی الکترون های پرسرعت لایه های درونی آنقدر زیاد می شود که به انرژی لایه های خارجی نزدیک می شود و همین سبب جذب و گسیل طول موج های بلند می شود و این اثرات نسبیتی می تواند دلیلی بر عدم میل ترکیبی طلا با سایر عناصر باشد و می تواند دلیلی نیز بر عدم خوردگی و فساد طلا باشد.

۳- چرا سیستم موقعیت یاب جهانی GPS به تصحیح نسبیتی نیاز دارد؟

GPS متشکل از تعدادی ماهواره می باشد که در فاصله 2×10^4 کیلومتری سطح زمین با سرعتی بالغ بر 10^4 کیلومتر بر ساعت، دو بار در شبانه روز به دور زمین می چرخند و اطلاعاتی را به زمین مخابره می کنند و گیرنده ها اطلاعات را دریافت کرده و با تصحیح دقیق تأخیر زمانی نسبیتی ناشی از گرانش و حرکت، محل دقیق گیرنده را نسبت به زمین اعلام می کنند و این تکنولوژی ارزشمند جایگزین نقشه های کاغذی و قطب نما شده، که در غیاب تصحیح نسبیتی تأخیر زمانی، این تکنولوژی در برآورد مختصات کیلومترها خطا می رفت.

۴- آیا برای ساخت لوله های پرتو کاتدیک به تصحیح نسبیتی نیاز داشت؟

تا اواخر قرن بیستم، تلویزیون ها، مانیتورها، کامپیوترها، عکسبرداری با پرتو ایکس و ... مجهز به لوله های بلند همراه با آهنرباهای حجیمی بود که با پرتاب الکترون هایی با سرعت ۳۰درصد سرعت نور به صفحه فسفرسانس پیکسل های نوری می ساختند، بی گمان سرعت های بالای الکترون به تصحیح نسبیتی نیاز داشت وگرنه، تصویر واضحی تشکیل نمی شد.

۵- آیا شکافت و هم جوشی هسته ای یک اثر نسبیتی است؟

در اثر شکافت یک هسته سنگین به هسته های سبک تر، مقداری انرژی آزاد می شود، و این انرژی همان انرژی بستگی نوکلئون های نهایی هسته ای است، جرم پاره های شکافت از جرم هسته اولیه کمتر است، اگر جرم گم شده m باشد، انرژی معادل آن $E=mc^2$ است، که نیروگاه های قدرت هسته ای و بمب های هسته ای مبتنی بر معادله $E=mc^2$ ساخته شده اند که یک اثر نسبیتی است.

در اثر هم جوشی هسته های سبک تر و تبدیلشان به هسته ای سنگین تر، مقدار قابل ملاحظه ای انرژی آزاد می شود، که جرم هسته سنگین از مجموع جرم هسته های سبک تر کوچک تر است. انرژی معادل جرم مفقود شده $E=mc^2$ می باشد، که در این واکنش مقداری از جرم به انرژی بستگی تبدیل شده، لذا، هم جوشی هسته این نیز یک اثر نسبیتی است.

در ستارگان با تبدیل هیدروژن به هلیوم، انرژی آزاد می شود و درخشش ستارگان بر اثر هم جوشی هسته ای نیز یک اثر نسبیتی است.

۶- چرا برخی از سیارات منظومه شمسی از جمله عطارد، چنانکه باید و شاید، از قوانین کپلر و قانون جاذبه نیوتن پیروی نمی کنند؟

سیاره تیز پرواز عطارد، نزدیک ترین سیاره منظومه شمسی به خورشید است که با سرعت فوق العاده ای، به دور خورشید در گردش است و نقطه حظیض (کوتاه ترین فاصله) مدار آن به دور خورشید دائماً جابجا می شود. و این یک اثر نسبیتی است که عطارد دستخوش انحنای فضا- زمان اطراف خورشید از قانون جاذبه نیوتن پیروی نمی کند.

۷- آیا عدسی های گرانشی یک اثر نسبیتی است؟

انحراف نور در حوزه گرانشی جسمی چگال را عدسی گرانشی می گویند، که اثری نسبیتی است. در سال ۱۹۱۹ در یک خورشیدگرفتگی کامل خورشید را رصد کردند، و انحراف نور ستارگان دور دست را در مجاورت خورشید ملاحظه کردند و به بأثیر گرانشی خورشید بر سرعت انتشار نور پی بردند. و با این تکنیک، به شناسایی سیاه چاله‌ها پرداختند، چرا که سیاه چاله ها توده های چگالی پرگرانشی هستند که حتی نور را می بلعند و نور قادر به خروج از آن نمی باشد.

۸- آیا امواج گرانشی یک اثر نسبیتی است؟

همانطور که حامل‌های انرژی امواج الکترومغناطیسی فوتون ها می باشند، حامل‌های انرژی امواج گرانشی گراویتون ها هستند و از تصادم سیاه چاله ها، امواج گرانشی گسیل می شود، که تابش زمینه کیهانی است و در آزمایشگاه ها این امواج آشکارسازی شد.

۹- آیا کاهش ریتم تیک تاک ساعت های متحرک واقعی است؟

در سال ۱۹۷۱، ساعت های اتمی نصب شده در هواپیماها و خطوط هوائی، پروازهای سرتاسر کره زمین را بازبینی کردند و بر تأخیر زمانی این ساعت ها نسبت ساعت های زمینی صحه گذاشتند.

۱۰- آیا کاهش آهنگ گذر زمان ساعت ها در حوزه گرانشی واقعی است؟

ساعت های اتمی دقیق و هم زمانی را در ارتفاعات مختلف با گرانش متفاوت از قعر دره تا نوک کوه نصب کردند و به تأخیر زمانی ساعت های قعر دره نسبت به ساعت های نوک کوه صحه گذاشتند.

۱۱- چرا سرعت نور در حوزه گرانشی کاهش می یابد؟

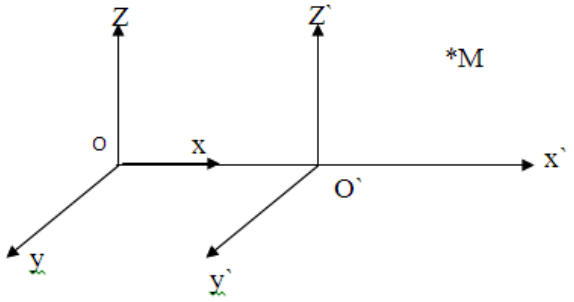
همانطور که علت شکست نور در شیشه، کاهش سرعت نور در شیشه می باشد و کاهش سرعت سبب انحراف مسیر انتشار نور می شود، همین پدیده در حوزه های گرانشی با عدسی های گرانشی به وقوع می پیوندند.

۱۲- آیا جابجایی سرخ ستارگان دور دست و انبساط جهان یک پدیده نسبیتی است؟

در سال ۱۹۲۸ ادوین هابل، ستارگان دور دست را قرمز می دید، یعنی طول موج نور گسیلی از آنها را طول موج بلند می دید و با الهام از پدیده دوپلر نوری، که پدیده ای نسبیتی است، پی به دور شدن ستارگان و در نتیجه، انبساط جهان برد؛ و انبساط جهان زمینه ساز تئوری بیگ بنگ شد و در انبساط جهان جهت زمان در جهت انبساط جهان می باشد.

تبدیلات لورنتز

تا آغاز قرن بیستم، ریتم یا آهنگ گذر زمان مستقل از حرکت بود و در تمام چارچوب های مختصات زمان به عنوان توالی رویدادها کمیتی خطی و مستقل و مطلق بود، و همه آدم ها گذر زمان را یکسان تجربه می کردند، با وجودی که گالیله به هیچ حالت سکون مطلق یا چارچوب مرجع، مرجحی باور نداشت، ولی نیوتن کالبد فضا را ساکن می دید و فکر می کرد که این کالبد ساکن پر شده از اتر که اجسام در آن غوطه ور شده اند. جرالد فیلدز انقباض طول را در راستای حرکت به زبان آورد، و هندریک لورنتس آن را به ریاضی درآورد. لورنتس هر چند به وجود اتر و چارچوب مرجح جهانی باور داشت، و فضا را همگن و همسانگرد تصور می کرد، روابط تبدیل خود را مبتنی بر انقباض طول و اتساع زمان تنظیم کرد، بقرض اینکه مختصات رویداد یا انفجاری در دستگاه S، (x, y, z, ct) و در دستگاه S'، (x', y', z', ct') باشد و دستگاه S' با سرعت v موازی محور x ها در حرکت باشد، هر دو ناظر سرعت انتشار نور را c اندازه گیری می کنند و هر دو جبهه های موج کروی را کره می بینند.



معادلات کره در دو سیستم

$$\begin{cases} x^2 + y^2 + z^2 = (ct)^2 \\ x^{2'} + y^{2'} + z^{2'} = (ct')^2 \end{cases}$$

لورنتس با فرض:

$$\begin{cases} x' = \gamma(x - vt) \\ t' = ax + bt \\ y' = y \ , \ z' = z \end{cases}$$

روابط تبدیل خود را بصورت:

$$\begin{cases} x' = \gamma(x + vt) \\ t' = \gamma(t - \frac{v}{c^2}x) \\ y' = y \\ z' = z \end{cases} \quad \text{یا} \quad \begin{cases} x = \gamma(x' + vt') \\ t = \gamma(t' + \frac{v}{c^2}x') \\ y = y' \\ z = z' \end{cases}$$

درآورد که در آن:

$$\begin{cases} \frac{dt'}{dt} = \gamma(1 - \frac{v}{c^2}\frac{dx}{dt}) \\ \frac{dt}{dt'} = \gamma(1 + \frac{v}{c^2}.\frac{dx'}{dt}) \end{cases}$$

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

$$\begin{cases} \frac{d^2t'}{dt^2}=-\frac{\gamma v}{c^2}\frac{d^2x}{dt^2} \\ \frac{d^2t}{dt'^2}=\gamma\frac{v}{c^2}\frac{d^2x'}{dt'^2} \end{cases}$$

در صورتی که $V \ll c$ باشد، از v در مقابل c صرف نظر شده و $\gamma=1$ می شود.

$$\begin{cases} x'=x-vt \\ t'=t \\ y'=y \\ z'=z \end{cases}$$

و تبدیلات لورنتس به تبدیلات گالیله ای تبدیل می شود.

۱- سرعت نسبی در دو چارچوب مرجع لخت

$$u'=\begin{cases} \frac{dx'}{dt'}=\gamma\,(\frac{dx}{dt}-v)\frac{dt}{dt'} \\ \frac{dy'}{dt'}=\frac{dy}{dt}\times\frac{dt}{dt'} \\ \frac{dz'}{dt'}=\frac{dz}{dt}\times\frac{dt}{dt'} \end{cases} \qquad \Rightarrow u'^2=\left[u^2+\gamma^2(\frac{dx}{dt}-v)^2-(\frac{dx}{dt})^2\right](\frac{dt}{dt'})^2$$

u′سرعت متحرک در دستگاه s′ و u سرعت متحرک در دستگاه s

۲- جرم نسبی در دو چارچوب مرجع لخت

$$m'=\frac{m_0}{\sqrt{1-\frac{u'^2}{c^2}}} \text{ و } m=\frac{m_0}{\sqrt{1-\frac{u^2}{c^2}}} \text{ و } m'=\frac{dt'}{dt}\times m \text{ و } m'=\gamma(1-\frac{v}{c2}\frac{dx}{dt})\,m$$

۳- انرژی نسبی در دو چارچوب مرجع لخت

انرژی در حال سکون $E_0=m_0c^2$ و $E=mc^2$ و $E'=\frac{dt'}{dt}E$ و $E'=m'c^2$

$$E'=\gamma(1-\frac{v}{c^2}\frac{dx}{dt})\,E \Rightarrow E'=\gamma(E-vP_x)$$

۴- پایستگی انرژی در دو چارچوب

طرفین دو رابطه را مجذور می کنیم.

$$E=\frac{m_0c^2}{\sqrt{1-\frac{u^2}{c^2}}} \text{ و } E'=\frac{m_0c^2}{\sqrt{1-\frac{u'^2}{c^2}}}$$

$$E'^2-p'^2c^2=E^2-p^2c^2=E_0^2$$ مقدار ثابت

۵- شتاب نسبی در دو چارچوب

$$\frac{d^2x'}{dt'^2}=(\frac{dt}{dt'})^3\ \frac{d^2x}{dt^2}$$

$$\frac{d^2y'}{dt'^2}=(\frac{dt}{dt'})^3\left[\frac{\gamma v}{c^2}\frac{d^2x}{dt^2}\frac{dy}{dt}+\frac{dt'}{dt}\times\frac{d^2y}{dt^2}\right] \quad , \quad \frac{d^2z'}{dt'^2,}=(\frac{dt}{dt'})^3\left[\frac{\gamma v}{c^2}\frac{d^2x}{dt^2}\frac{dz}{dt}+\frac{d^2z}{dt^2}\frac{dt'}{dt}\right]$$

۶- آهنگ تغییر انرژی در دو چارچوب

$$\begin{cases} E^2-p^2c^2=E.^2 & \frac{dE}{dt}=\vec{u}.\vec{F} \\ E'^2-p'^2c^2=E.^2 & \frac{dE'}{dt'}=\vec{u'}.\vec{F'} \end{cases}$$

۷- اندازه حرکت در دو چارچوب

$$\begin{cases} P'_x=m'\frac{dx'}{dt'}=\frac{m.}{\sqrt{1-\frac{u^{2'}}{c^2}}}\cdot\frac{dx'}{dt'} \\ P_x=m\frac{dx}{dt}=\frac{m.}{\sqrt{1-\frac{u^2}{c^2}}}\frac{dx}{dt} \end{cases} \Rightarrow \begin{vmatrix} p'_x=\gamma(p_x-\frac{v}{c^2}E) \\ p'_y=p_y \\ p'_z=p_z \\ E'=\gamma(E-vp_x) \end{vmatrix}$$

$$\begin{cases} p'_y=m'\frac{dy'}{dt'}=\frac{m.}{\sqrt{1-\frac{u'^2}{c^2}}} \\ p_y=m\frac{dy}{dt}=\frac{m.}{\sqrt{1-\frac{u^2}{c^2}}}\frac{dy}{dt} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} p'_x=\gamma(p_x-\frac{v}{c^2}E) \\ p'_y=p_y \\ p'_z=p_z \\ E'=\gamma(E-vp_x) \end{cases}$$

$$\begin{cases} p'_z=m'\frac{dz'}{dt'}=\frac{m.}{\sqrt{1-\frac{u'^2,}{c^2}}}\frac{dz'}{dt'} \\ p_z=m\frac{dz}{dt}=\frac{m.}{\sqrt{1-\frac{u^2}{c^2}}}\frac{dz}{dt} \end{cases} \Rightarrow$$

۸- انرژی جنبش در دو چارچوب

$$\begin{vmatrix} k'=E'-E. \\ k=E-E. \end{vmatrix} \Rightarrow k'=k+(\frac{dt'}{dt}-1)E \qquad k'=\left[\frac{1}{\sqrt{1-\frac{u'^2}{c^2}}}-1\right]E.$$

$$k=\left[\frac{1}{\sqrt{1-\frac{u^2}{c^2}}}-1\right]E_0 \qquad \text{و} \qquad k'=k+\left(\frac{dt'}{dt}-1\right)E$$

۹- نیرو در دو چارچوب

$$\begin{cases} p'_x=\gamma\left(p_x-\frac{v}{c^2}E\right) \\ p'_y=p_y \\ p'_z=p_z \end{cases}$$

$$\begin{cases} \frac{dp'_x}{dt'}=\frac{dp_x}{dt}-\frac{\gamma v}{c^2}\frac{dt}{dt'}\left[\frac{dp_y}{dt}\cdot\frac{dy}{dt}+\frac{dp_z}{dt}\cdot\frac{dz}{dt}\right] \\ \frac{dp'_y}{dt'}=\frac{dt}{dt'}\cdot\frac{dp_y}{dt} \\ \frac{dp'_z}{dt'}=\frac{dt}{dt'}\cdot\frac{dp_z}{dt} \end{cases}$$

۱۰- فرکانس نور در دو چارچوب (اثر دوپلر)

$$\begin{cases} E^2-p^2c^2=E_0^2 \\ p'_x=\gamma\left(p_x-\frac{v}{c^2}E\right) \\ E'^2-p'^2c^2=E_0^2 \end{cases}$$

جرم در حال سکون فوتون صفر است.

یعنی برای فوتون $m_0=0$ و $E_0=0$

و در راستای حرکت $E=p_xc$

انرژی فوتون $\begin{cases} E'=p'c \\ E=pc \end{cases}$

$$\frac{p'_x}{p_x}=\gamma\left(1-\frac{v}{c}\right) \qquad \text{و} \qquad p'_x=\gamma\left(p_x-\frac{v}{c^2}\cdot p_xc\right)=\gamma p_x\left(1-\frac{v}{c}\right)$$

بنا به قانون پلانگ انرژی فوتون:

$$E'=h\upsilon' \qquad E'=p'_xc$$

$$E=h\upsilon \qquad E=p_xc$$

$$\frac{E'}{E}=\frac{p'_x}{p_x}=\frac{\upsilon'}{\upsilon}\Rightarrow\frac{\upsilon'}{\upsilon}=\gamma\left(1-\frac{\upsilon}{c}\right) \quad \text{و} \quad \frac{\upsilon'}{\upsilon}=\sqrt{\frac{1-\frac{v}{c}}{1+\frac{v}{c}}}$$

$$\gamma=\frac{1}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}$$

۱۱- قضیه کار انرژی در دو چارچوب

کار برآیند نیروهای وارد بر جسم در هر دستگاهی برابر با تغییر انرژی جنبشی جسم در همان دستگاه

$$w=\int_{u_1}^{u_2}\vec{F}.\vec{dr}=\int_{u_1}^{u_2}\frac{\vec{dp}}{dt}.\vec{dr}=\int_{u_1}^{u_2}\vec{u}.\vec{dp}=\left[up-\int pdu\right]_{u_1}^{u_2}$$

$$p=mu=\frac{m.u}{\sqrt{1-\frac{u^2}{c^2}}}$$

$$w=E_2-E_1=\Delta k$$

$$w'=E'_2-E'_1=\Delta k'$$

$$w'=\frac{dt'}{dt}(E_2-E_1)$$

$$w'=\frac{dt'}{dt}w \quad \text{و} \quad \frac{dE'}{dt'}=F'u' \text{ و } \frac{dE}{dt}=Fu$$

۱۲- توان در دو چارچوب

$$\frac{dw'}{dt'}=\frac{dw}{dt}-\frac{\gamma\upsilon}{c^2}\frac{d^2x}{dt^2}\frac{dt}{dt'}w$$

۱۳- انبساط زمان

اگر ساعتی با سرعت υ در راستای محور x ازجلو ما عبور کند. ریتم تیک تاک آنرا کندتر از ساعت خودمان اندازه می گیریم. اگر بازه زمانی قرائت کردن یا اندازه گیری ها از t_1 تا t_2 بطول انجامیده باشد، در این بازه زمانی ساعت به اندازه $\Delta x=\upsilon(t_2-t_1)$ از جلو ما عبور کرده؛

بنا به تبدیل لورنتس:

$$t'_2=\gamma(t_2-\frac{v}{c^2}x_2)$$

$$\Rightarrow \quad \Delta t'=t'_2-t'_1=\gamma\left[(t_2-t_1)-\frac{v}{c^2}(x_2-x_1)\right]=\gamma\left[\Delta t-\frac{v^2}{c^2}\Delta t\right]\Rightarrow$$

$$t_1'=\gamma(t_1-\frac{v}{c^2}x_1) \qquad \boxed{\Delta t'=\frac{\Delta t}{\gamma}}$$

$\Delta t'$ بازه زمانی ساعت متحرک و Δt بازه زمانی ساعت ناظر

۱۴- انقباض طول

اگر خط کشی با سرعت v در راستای محور x از جلو ما عبور کند، طول آنرا کمتر از مقدار واقعی آن اندازه می گیریم؛ یعنی اجسام متحرک را در راستای حرکت چروکیده می بینیم. اگر مختصات ابتدا و انتهای خط کش را در دو چارچوب بنویسیم:

$$x'_2=\gamma(x_2-vt_2)$$

$$\Rightarrow \qquad x'_2-x'_1=\gamma\left[(x_2-x_1)-v(t_2-t_1)\right]$$

$$x'_1=\gamma(x_1-vt_1)$$

با توجه به اینکه دو سر خط کش را هم زمان می بینیم، لذا: $t_1 = t_2$

$$\Delta x' = \gamma \Delta x \quad و \quad \Delta x = \frac{\Delta x'}{\gamma}$$

۱۵- چرا تغییرات میدان های الکتریکی و مغناطیسی مولد یکدیگرند.

$$\phi_E = \iint \vec{E}.\vec{n}\,da = \iiint \frac{\rho\,dv}{\varepsilon.}$$ قانون گوس

$$\Rightarrow \vec{\nabla}.\vec{E} = \frac{\rho}{\varepsilon.}$$

$$\iint \vec{E}.\vec{n}\,da = \iiint \vec{\nabla}.\vec{E}\;dv$$ قضیه دیورژانس

$$\phi_B = \iint \vec{H}.\vec{m}\,da = \iiint \vec{\nabla}.\vec{H}\,dv = ۰$$ عدم وجود تک قطبی مغناطیسی $\vec{\nabla}.\vec{H} = ۰$

$$\varepsilon = \oint \vec{E}.d\ell = -\frac{d\varphi}{dt} = \iint -\frac{\partial B}{\partial t}.\vec{n}\,da$$ قانون فارادی

$$\Rightarrow \vec{\nabla} \wedge \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

$$\oint \vec{E}.\vec{d\ell} = \iint (\vec{\nabla} \wedge \vec{E}).\vec{n}\,da$$ قانون استوکس

$$\oint \vec{H}.\vec{d\ell} = I_c + I_d = \iint \vec{J}.\vec{n}\,da + \iint \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}.\vec{n}\,da$$ قانون آمپر اصلاح شده

$$\iint (\vec{\nabla} \wedge \vec{H}).\vec{n}\,da = \iint (\vec{J} + \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}).\vec{n}\,da \quad \Rightarrow \vec{\nabla} \wedge \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$$

I_c جریان رسانس و I_d جریان جابجایی است.

نتیجه گیری

در غیاب نسبیت کسی به علت عدم پیروی مدار حرکت عطارد از قوانین کپلر ونیوتن پی نمی برد. در غیاب نسبیت کسی به علت کیلومترها خطای مختصات یابی ناوگان GPS پی نمی برد، در غیاب نسبیت امکان اختراع نیروگاه های قدرت هسته ای و بمب های هسته ای و بیرون کشیدن انرژی از دل هسته های اتم مهیا نبود، در غیاب نسبیت کسی به علت تلألو و درخشندگی فلزات و عدم میل ترکیبی طلا و مایع بودن جیوه پی نمی برد، در غیاب نسبیت کسی به علت درخشش ستارگان و همجوششی هسته ای پی نمی برد، در غیاب نسبیت کسی به علت انحراف نور ستارگان دور دست در مجاورت خورشید پی نمی برد. در غیاب نسبیت کسی به فکر آشکارسازی امواج گرانشی نمی افتاد، در غیاب نسبیت، تکنولوژی تلویزیون ها، کامپیوترها، مانیتورها، میکروسکوپ ها و پرتونگاری توسعه نمی یافت. در غیاب نسبیت کسی به فکر وجود سیاه چاله ها، کرم چاله ها، ستارگان نوترونی نمی افتاد، و کسی به انبساط جهان و افزایش انتروپی پی نمی برد. در غیاب نسبیت، تئوری بیگ بنگ بر سر زبان ها نمی افتاد و کسی به علت تأخیر زمانی ساعت های اتمی نصب شده در هواپیماها، سفینه ها، فضاپیماها، ماهواره ها پی نمی برد. در غیاب نسبیت، کسی به علت انقباض طول در راستای حرکت و تأخیر زمانی ساعت های در حال حرکت پی نمی برد، در غیاب نسبیت کسی به علت کند شدن ریتم تیک تاک ساعت های اتمی در حوزه گرانشی پی نمی برد، و کسی نمی فهمید که چرا ساعت نصب شده در قعر دره کندتر از ساعت نصب شده در نوک کوه کار می کند، در غیاب نسبیت، کسی به علت سرخ دیده شدن ستارگان دور دست و ماهیت گرانش پی برد.