بسم الله الرحمن الرحيم

دانشگاه سمنان

دانشکده فیزیک

پایان نامه کارشناسی ارشد فیزیک (گرانش)

موضوع:

تحلیل ساختار ماشین زمان در نسبیت عام

توسط:

فیروزه عیدی زاده

استاد راهنما:

دکتر حسین غفار نژاد

مهر ۱۳۹۳

دانشگاه سمنان

دانشکده فیزیک

پایان نامه کارشناسی ارشد فیزیک (گرانش)

تحت عنوان:

تحلیل ساختار ماشین زمان در نسبیت عام

ارائه شده توسط:

فیروزه عیدی زاده

در تاریخ ۸ مهرماه ۱۳۹۳ توسط کمیته تخصصی زیر مورد بررسی و تصویب نهایی قرار گرفت:

۱- استاد راهنما	دکتر حسین غفار نژاد
۲-استاد داور داخلی	دکتر گوهر رستگارزاده
۳-استاد داور داخلی	دکتر حسین مهربان

به پاس تعبیر عظیم و انسانی شان از کلمه ایثار و از خود گذشتن، به پاس عاطفه ی سر شار و گرمای امید بخش وجودشان که در این سردترین روزگاران بهترین پشتیبانی است، به پاس قلب های بزرگشان که فریادرس است و سرگردانی و ترس در پناهشان به شجاعت می گراید و به پاس محبت های بی دریغشان که هرگز فروکش نمی کند، این مجموعه را به

پدر و مادرم

این دو فرشته نگهبان و مهربان تقدیم می کنم.

و تقدیم به:

آنان که دوستشان دارم

و

آفتاب وجودشان را در هیچ آسمانی نخواهم یافت...

تقدیر و تشکر:

با سپاس بی حد به درگاه یگانه معبود هستی که به من توانایی داد تا بتوانم ذره ای از علم بی کرانش را فرا گیرم، وظیفه خود می دانم از کلیه کسانی که در پیمودن این مسیر همراه و راهنمایم بوده اند، تقدیر و قدردانی کنم.

از پدر بزرگوار و مادر مهربانم که نگاهشان معنی امید است و تفسیر محبت کمال تشکر و قدر دانی را دارم، چرا که جایگاه امروزی خویش را مدیون زحمات بی دریغ آنان می دانم.

از جناب آقای دکتر غفار نژاد که راهنمایی پایان نامه اینجانب را بر عهده داشته اند و مراتب علمی خود را مرهون زحمات بی دریغ ایشان می دانم، کمال تشکر و قدر دانی را دارم. و همچنین از آقای دکتر مهربان و خانم دکتر رستگارزاده که داوری این پایان نامه را بر عهده داشتنه اند تشکر ویژه دارم.

چکیده

در این پایان نامه با استفاده از حل معادلات اینشتین امکان ساخت ماشین زمان را در سرعت های کمتر و بیشتر از سرعت نور بررسی می کنیم. که بیشتر از نسبیت عام اینشتین کمک می گیریم، و نشان می دهیم که ماشین زمان را می توان با استفاده از کرم چاله های چهار بعدی، مدل استوانه ای دوار و با استفاده از سیگنال های فرانوری ساخت. شرط ساختن ماشین زمان دسترسی داشتن به کرم چاله ها می باشد، که این کرم چاله ها به وسیله ی منحنی های بسته زمان گونه به بند کشیده شده اند.

کلمات کلیدی: کرم چاله- منحنی بسته زمان گونه- مخروط نور

فهرست مطالب

مقدمه ۱

فصل اول

ماشین زمان ۹

فصل دوم

برگشت زمان سرعت کمتر از نور ۱۷

۲-۱ نمودار فضا- زمان ۱۸

۲-۲ مخروط نور ۲۰

۲-۳ فواصل زمانی فضا – زمان ۲۱

۲-٤ منحنی بسته زمان گونه ۲۳

۲-۵ استوانه دوار ۲٤

۲-٦ چگونه این کار شدنی است؟ ۲۵

۲-۷ برگشت زمان در سرعت های فرو نوری ۲۷

فصل سوم

از سرعت فرانوری (سوپر لومینال) تا ماشین زمان ۲۸

فصل چهارم

ماشین زمان به عنوان کرم چاله چهار بعدی ۳۳

٤-١ شرایط وجود ماشین زمان در فضا- زمانی با توپولوژی اقلیدوسی..... ٣٤

٤-٢ روند ایجاد کرم چاله ها در فضا- زمان ٣٨

٤-٣ فضا- زمان انعطاف پذیر ٤٠

٤-٤ منابع انرژی برای ماشین زمان ٤٣

فصل پنجم

یک حل جدید ایستا با تقارن استوانه ای به کمک معادلات اینشتین ٤٥

٥-١ متریک و تانسور انرژی- تکانه ٤٦

٥-٢ تفسیر فیزیکی از تانسور انرژی – تکانه ٤٧

٥-٢-١ تفسیر اول ٤٧

٥-٢-٢ تفسیر دوم ٤٩

٥-٣ ماشین زمان ٥١

نتیجه گیری ٥٤

مراجع ٥٦

فهرست شکل‌ها

شکل(۲-۱)دوران ماده ۱۸
شکل (۲-۲) فضا-زمان ۱۸
شکل(۲-۳)جهان خط یک ذره در مبدا ۱۹
شکل (۲-٤) جهان خط یک ذره با حرکت یکنواخت ۱۹
شکل (۲-۵) جهان خط یک ذره شتاب دار ۱۹
شکل (۲-٦) واحد فضا-زمانی ۲۰
شکل (۲-۷) فوتون با سرعت نور ۲۰
شکل (۲-۸) مخروط نور ۲۰
شکل(۲-۹) لوپ بک ۲۲
شکل (۲-۱۰) منحنی زمان گونه بسته ۲۳
شکل (۲-۱۱) استوانه دوار ۲٦
شکل(۳-۱) مختصات دو ناظر با سرعت های ۷۵/ سرعت نور ۳۰
شکل(۳-۲) مقایسه پالس سوپرلومینال نوری و تونل زنی میکرو موج با بخار هوا ۳۱
شکل (۳-۳) زمان برگشت سیگنال با چهار برابر سرعت نور ۳۲

مقدمه

گرانش رشته ای بسیار غنی از لحاظ ریاضی و مفهوم است. این نیروی عظیم هر چیزی را تحت سلطه ی خود قرار می دهد، حتی خطوط فضا و زمان هم تحت تاثیر گرانش خمیده می شوند.

در علم فیزیک و ریاضی، فضا–زمان[1] به هرگونه مدل ریاضی گفته می‌شود که زمان و مکان را به صورت ساختاری واحد و درهم‌پیوسته با یکدیگر ترکیب کند. بر اساس فرضیات مفهوم فضای اقلیدسی، جهان، سه بعد مکانی و یک بعد زمانی مستقل از هم دارد. فضا و زمان بر طبق نظریه نسبیت اینشتین به یکدیگر بافته شده اند و ساختار تار و پودی چهاربعدی به نام فضا–زمان را به وجود آورده اند. در فضا–زمان سه بعد فضا و یک بعد زمان درهم ادغام می‌شوند و یک محیط پیوسته ی چهار بعدی را ایجاد می‌کنند. بر اساس نظریه ی اینشتین، خمیدگی به علت وجود جرم و انرژی ایجاد می شود

بر طبق نظریه نسبیت عام اینشتین، حرکت اجسام در ساختار تار و پودی فضا–زمان صورت می گیرد. یعنی جسم در حال حرکت تابع شکل فضا–زمانی است که در آن واقع شده است. بر اساس این نظریه،

[1] space-time

گرانش باعث تغییر شکل ساختار فضا–زمان می شود و در نتیجه حرکت جسم نیز بر اثر میدان گرانشی تغییر می کند.

نسبیت اینشتین با نسبیت کلاسیکی فرق دارد. قبل از اینشتین مردم فکر می کردند که زمان مطلق است، یعنی یک ساعت بزرگ زمان کل جهان را اندازه گیری می کند. اما در این مفهوم مشکلی وجود دارد، در چارچوب زمان مطلق سرعت نور نمی تواند مطلق باشد. در سال ۱۸۸۱ مایکلسون با آزمایشات خود ثابت کرد، که سرعت نور همواره یکسان است و هیچ وقت تغییر نمی کند.

اینشتین با نظریه نسبیت خاص خود نشان داد؛ که قانون نیوتن تنها در شرایط خاصی، آن هم به صورت تقریبی، صحت دارد، وقتی سرعت اجسام زیاد می شود (در حد سرعت نور) نمی توان از قانون نیوتن استفاده کرد. و در سال ۱۹۰۵ نظریه نسبیت خاص اینشتین، قوانین درست فیزیک را برای اجسام در کوچک مقیاس و بزرگ مقیاس توصیف کرد.

ما در این پایان نامه به شناخت ماشین زمان[1] می پردازیم. یکصد سال پیش، تنها عده ی معدودی از مردم به امکان سفر انسان در فضای خارج از زمین باور داشتند. سفر در زمان نیز درست مانند سفر در فضا تنها یک داستان علمی–تخیلی محسوب می شد. اما امروزه پروازهای فضایی اتفاقی معمول است. آیا سفر در زمان نیز روزی اتفاقی معمول خواهد شد؟

این پایان نامه شامل پنج فصل است. فصل اول آن ماشین زمان است، که در مورد تاریخچه ماشین زمان و اینکه چگونه از زبان تخیل به زبان علمی تبدیل شد، صحبت می شود. با استفاده از قانون تبدیل لورنتس فضا–زمان را از یک چارچوب به چارچوب دیگر می بریم. و $\Delta x\ ,\Delta t$ جدید می سازیم، به شرط آنکه Δt آن حقیقی بماند.

در ادامه به معرفی تأخیون[2] پرداخته شده است، تأخیون را ذره ای می نامند که سرعت آن بیشتر از سرعت نور است. هر چند که هنوز تأخیونی دیده نشده اما دلیلی برای انکار سرعت بیش از سرعت نور وجود ندارد.

[1] Machine time
[2] Tachyon

بیشتر از نسبیت عام اینشتین کمک گرفته شده است که ناظران لخت و غیر لخت دارد. و طول مسیرهایی را که با سرعت کمتر از سرعت نور به گذشته سفر می کند را تعریف می کنیم، که به آنها منحنی های بسته زمان گونه[۱] می گوییم. با استفاده از این منحنی ها معادله اینشتین حل می شود. اولین حل را گودل[۲] در سال ۱۹۴۹ به دست آورد و اجازه ساخت ماشین زمان را داد[۲].

معادله اینشتین به صورت زیر می باشد:

$$G_{\mu v} + \frac{\Lambda}{2}\, g_{\mu v} = \frac{8\pi G}{c^4}\, T_{\mu v}$$

گودل با حل این معادله با کمک نسبیت عام اینشتین نشان داد که سفر به گذشته نقض نمی شود. روش دیگری که برای ساخت ماشین زمان به آن اشاره شده است استفاده از کرم چاله ها[۳] می باشد. ثون[٤] و همکارانش از این کرم چاله ها برای ساخت ماشین زمان استفاده کردند، کرم چاله مسافت ناحیه ای از فضا–زمان را به یکدیگر وصل می کند و توسط منحنی بسته زمان گونه به بند کشیده می شود[۵].

فصل دوم برگشت زمان در سرعت کمتر از نور می باشد. دراین فصل، از راه حل استفاده از یک مدل استوانه ای که نشان می دهد سفر زمان مطابق با مفهوم نسبیت عام ممکن است استفاده می کنیم. این راه حل آشکارا سفر در زمان و ارتباط زمانی را نه تنها در آینده بلکه همچنین در گذشته امکان پذیر می داند. مهمترین نکته این است که این راه حل، نشان می دهد که سفر معکوس در زمان بدون داشتن سرعتی سریع تراز سرعت نور چگونه ممکن است انجام بپذیرد؟ شبیه سازی های کامپیوتری پیشرفته، این الگو را به عنوان رویکردی معتبر برای سفر از زمان فعلی به زمان گذشته تایید کرده است.

برای درک استفاده از استوانه های دوار[۵] به فهمی از نسبیت عام و فیزیک فضا–زمان نیاز داریم. فیزیک فضا–زمان شامل ایده هایی در مورد نمودارهای فضا–زمان، مخروط نور[٦] و منحنی های بسته زمان گونه می باشد. که به طور مختصر در مورد هر کدام جداگانه با رسم شکل توضیحاتی داده شده است.

---

[3] Close time-like curves
[4] Godel
[3] Wormholes
[4] Thorne
[5] Rotating Cylinder
[6] Light-cone

فصل سوم در مورد، سرعت های بیشتر از سرعت نور (سوپرلومینال) و ارتباط آن با ماشین زمان صحبت می‌کند.

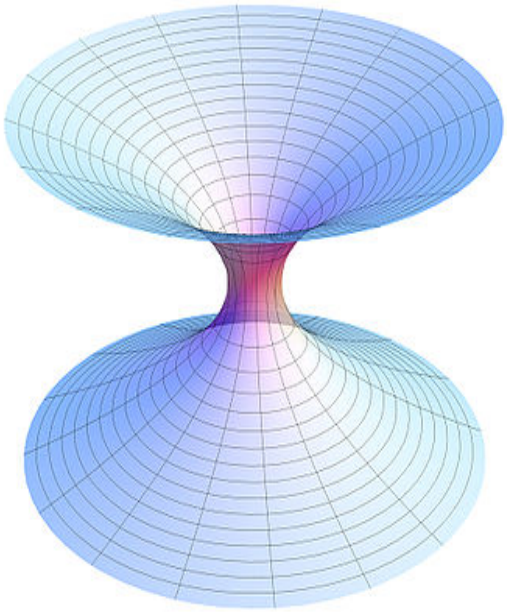
سرعت تنها یکی از روش هایی است که باعث تغییر در زمان می شود. در این فصل ما از سیگنال هایی کمک می گیریم که سرعتشان از سرعت نور بیشتر باشد. در ابتدا سیگنال را یک نقطه در امتداد زمان در نظر می گیریم که دارای انرژی محدودی می باشد، و از زمان محدود آن چشم پوشی می شود. انرژی محدود آن باعث باریک شدن باند فرکانس سیگنال می شود.

تمام آزمایشات سرعت های فرانوری[1] را با باندهای فرکانسی عریض انجام می دهند. نتیجه ی پهنای کم باند فرکانس این است، که مدت زمان سیگنال طولانی است. بنابراین علیت حفظ می شود.

از آنجایی که در فصل چهارم از کرم چاله کمک گرفته شده است، لازم است که در ابتدا به معرفی کرم چاله پرداخته شود.
کرم چاله ساختاری است در درون فضا که میان بری بین دو نقطه جدا از هم ایجاد می کند. با سفر درون کرم چاله، یک فضانورد قادر خواهد بود قبل از اینکه نور بتواند فاصله بین دو نقطه را طی کند از یک نقطه به نقطه دیگر برسد.

در صفحه ی دور از سیاه چاله صفحه ی حاوی آن تقریبا صاف و بدون انحنا می باشد، زیرا جاذبه در آنجا ضعیف است. به محض اینکه به سیاه چاله می رسیم انحنا افزایش می یابد، و صفحه به درون یک چاله ختم می شود. اما به جای اینکه چاله تا ابد فرو رود، در اینجا مجددا باز می شود تا صفحه دومی را زیر صفحه اولی به وجود آورد. صفحه دوم را جهان دیگر می نامیم، که از طریق کرم چاله به جهان دیگر[2] متصل می شود.

[1] Superluminal
[2] Elsewhere



تنها راهی که کرم چاله می تواند مفهوم فیزیکی بیابد آن است که، کرم چاله به درون جهان دیگر، که از هر طریقی ساخته شده است، باز شود. کرم چاله هر دم با زمان تغییر می کند. در ابتدا دو جهان از همدیگر جدا هستند، پس این دو جهان در نقطه ای که دارای تکینگی می باشد به همدیگر مرتبط می شوند، در نقطه ای که در آن انحنای فضا بی نهایت است. پس گلوگاه کرم چاله به بیرون باز می شود، اما تنها برای فاصله زمانی کوتاهی، که بعد از آن مجددا بسته خواهد شد. و دو جهان مجددا ارتباطشان از همدیگر قطع می گردد. این مرحله بسیار سریع اتفاق می افتد به طوری که هیچ چیز نمی تواند قبل از آنکه گلوگاه از میان برود وارد کرم چاله شود، حتی نور.

علت اینکه گلوگاه کرم چاله به این سرعت بسته می شود این است که، درون آن نیروی شدید گرانشی می باشد. اما با چرخیدن سیاه چاله اثر بسته شدن از بین می رود، و این امید را می افزاید که کرم چاله بتواند آنقدر باز بماند تا امکان عبور یک شیئ یا یک شخص را از میان خود بدهد.

فصل چهارم که موضوع آن ماشین زمان به مشابه کرم چاله چهار بعدی است شامل چهار بخش است. در بخش اول شرایط وجود ماشین زمان در فضا–زمانی با توپولوژی اقلیدوسی مورد بررسی قرار گرفته است. میدان گرانشی ایجاد شده از گرد و غبار[1] را در گستره ی D که شامل منحنی بسته زمان گونه می باشد را در

[1] dust

نظر می گیرد، از میدان های گرانشی که برای حل گودل مفید است کمک گرفته شده و زمان ویژه و زمان سپری شده را به دست می آوریم. و در آخر این بخش به این نتیجه می رسیم که زمان ویژه برگشت به گذشته می تواند از هر عدد کوچک مثبتی کوچکتر شود، اما سرعت ماشین زمان باید در حد سرعت نور نگه داشته شود.

در بخش دوم به روند ایجاد کرم چاله در فضا–زمان اشاره می شود. شرط ایجاد کرم چاله داشتن منحنی های بسته زمان گونه می باشد، که منحنی های بسته زمان گونه را می توان با تغییر گستره توپولوژی D ساخت. در ادامه بخش به چگونگی تغییر توپولوژی پرداخته می شود.

در بخش سوم از این فصل در مورد فضا–زمان ارتجاعی بحث می شود. ما در این بخش احتمال اینکه یک کرم چاله چهار بعدی ایجاد کنیم و به گذشته سفر کنیم را بررسی می کنیم. کرم چاله چهار بعدی باید بین فضا–زمان چهار بعدی و پنج بعدی به عنوان یک مسیر مرتبط کننده شناخته شود، که برای این کار باید مختصه پنجم به عنوان محور زمانی را داشته باشیم. و در آخر این بخش نتیجه می گیریم که برای حرکت در بعد پنجم بدنه ی ماشین زمان ضروری است که بار الکتریکی کافی داشته باشد.

در بخش چهارم هم در مورد منابع انرژی برای ماشین زمان بحث می شود.

عنوان فصل پنجم یک حل جدید ایستا با تقارن استوانه ای به کمک معادلات اینشتین می باشد. برای سفر به گذشته ون استوکام[1] از یک استوانه که به اندازه کافی بچرخد استفاده کرد. کورت گودل راه حل دیگری از معادله نسبیت عام را ارائه کرد، که شامل حلقه های زمان بود. او کشف کرد که اگر کل جهان در حال چرخش بوده است، می توان در فضا–زمان مدارهایی را یافت، که با چرخش خود به گذشته می رسند.

در حقیقت گودل نشان داد، که در چنین جهانی شما می توانید از زمین جدا شده و به هر مکان و هر زمانی که دوست دارید سفر کنید.

[1] Van Stockum

جسم چرخنده چگونه می تواند دروازه ای به سوی گذشته باشد؟ چرخش می تواند باعث شود که فضانوردی یا حتی ذره ای از ماده ای بتواند سرعت نور را بشکند، اما در ضمن می تواند روی حرکت خود نور نیز تأثیر بگذارد.

مطابق تئوری نسبیت عام، اگر جسم بزرگی یا یک سیاه چاله در حال چرخش باشد، در فضا مانند یک گرداب عمل خواهد کرد و هر اشعه ی نوری را که از کنار آن عبور می کند به دور خود خواهد کشید. در حالت طبیعی این اثر کششی بسیار کم است. اما اگر جسم به اندازه کافی سنگین باشد و سرعت چرخشی کافی نیز داشته باشد، نور می تواند درون محوطه گرانشی چرخان، اسیر شده و درون یک حلقه چرخان بیافتد. در سال ۱۹۷۰، فیزیکدانی به نام تیپلر[1] نشان داد که اگر استوانه ای فوق متراکمی با سرعتی معادل نصف سرعت نور حول محور خود بچرخد، می توان از آن به مشابه یک ماشین زمان استفاده کرد. وقتی نور در اطراف استوانه با سرعتی زیاد بچرخد اگر سرعتش از سرعت نور بیشتر شود، از سد سرعت نور عبور کرده و به درون استوانه می رود.

این فصل شامل سه بخش است. در ابتدا، میدان گرانشی را برای فضا-زمان با دو تفسیر بیان می کند. در تفسیر اول تانسور انرژی-تکانه[2] مربوط به فضا-زمان را با ثابت کیهانی دلخواه (اختیاری) که میدان گرانشی آن توسط مایع سیال[3] با میدان اسکالر بدون جرم ایجاد می شود. و در تفسیر دوم، ثابت کیهانی غیر منفی است و ماده ای که میدان گرانشی را ایجاد می کند، مایع سیال با میدان اسکالر بدون جرم و میدان الکترومغناطیسی است.

در بخش اول، در مورد متریک[4] و تانسور انرژی-تکانه بحث می شود. یک متریک که ثابت کیهانی[5] آن مثبت است بیان شده است. مولفه های غیر صفر تانسور ریچی[6] و نمادهای کریستفل[7] غیر صفر را به دست می آوریم. سپس با استفاده از معادله ی اینشتین و مختصات استوانه ای متریک آن را تعریف می کنیم.

---

[1] Tipler
[2] Stress-energy tensor
[3] Ideal liquid
[4] Metric
[5] Cosmological constant
[6] Ricci tensor
[7] Chhristoffel's symbols

در بخش دوم، تفسیر فیزیکی از تانسور انرژی–تکانه را بیان می کند. و با استفاده از این تفاسیر محدوده ی ثابت کیهانی را به دست می آوریم.

در بخش سوم به بحث ماشین زمان می پردازیم. با کمک متریک (۱)، متریک بسته و هموار را می نویسیم و شرط زمان گونه بودن را اعمال می کنیم. از آنجایی که مسافتی که ماشین زمان باید طی کند مشخص است، زمان ویژه ژئومتریک[1] را به دست می آوریم. زمان ویژه $\tau(L)$ زمانی است، که سرعت ماشین زمان به سمت سرعت نور برود. و در آخر زمان لازم و زمان ویژه را با یکدیگر ارتباط می دهیم.

در آخر نتیجه گیری می کند، که میدان گرانشی می تواند توسط یک ماده فیزیکی حقیقی بیان شود. در حل کیهانی اگر چگالی ماده کیهانی کوچک باشد، برای اینکه مسافت سفر زمانی کوچک نشود باید $l(L)$ و $\tau(L)$ به قدر کافی کوچک باشد. و نشان می دهیم که، باید ثابت کیهانی کوچک را پذیرفت. و میدان اسکالر که در هر دو تفسیر استفاده می شود و به مختصات سوم وابسته است، باید به قدر کافی بزرگ باشد.

در تفسیر دوم که ثابت کیهانی کوچک است، شدت، جریان و القای میدان الکتریکی، باید بزرگ باشد. اما اگر چگالی را بزرگ در نظر بگیریم، میدان اسکالر باید کوچک شود

1 chronometric

فصل اول

ماشین زمان

تا جایی که ما از گذشته اطلاع داریم، سفر به گذشته، مشاهده آن، شاید اثرگذاری بر آن و تصحیح اشتباهات دوران جوانی، خیال پردازی دائمی بشر بوده است. دراینجا به توصیف برخی از تحقیقات اخیر علمی بر روی این موضوع می پردازیم.

قبل از قرن بیستم، سفرزمان تنها در آثار داستانی و تخیلی بحث می شد. بعد از سال ۱۹۰۰ نسبیت خاص بحث علمی از ماشین زمان را ممکن ساخت. سوالی که ممکن است در این زمینه مطرح شود این است که، کاملا معنادار است در مورد سفری که به همان نقطه در فضا بر می گردد صحبت کنیم؟ اما اینشتین و مینوکوفسکی به ما می گویند که فضا و زمان هم ارزند. بنابراین آیا ما بعد از یک سفر، می توانیم به نقطه شروع خود در زمان برگردیم؟ در اینجا پاسخ مشهوری وجود دارد: فضا-زمان درنسبیت خاص مسطح و سخت است؛ در همان حال که سفر به گذشته امکان پذیر است، این کار نیازمند سرعت هایی بیشتر از سرعت نور است. در زیر به این موضوع می پردازیم.

قانون تبدیل لورنتس از فضا (ΔX) و زمان (ΔT) کمیت ها را از یک چارچوب به چارچوب دیگر تبدیل می‌کند. یک کمیت که در یک چارچوب با سرعت V در طول محور X حرکت می‌کند. معادلات (ΔX) و (ΔT) آن با معادلات زیر داده می‌شود:

$$\overline{\Delta t} = \frac{1}{\sqrt{1 - {v^2}/{c^2}}}\left(\Delta t - \frac{v}{c^2}\,\Delta x\right) \qquad (1-1)$$

$$\overline{\Delta x} = \frac{1}{\sqrt{1 - {v^2}/{c^2}}}(\Delta x - v\Delta t) \qquad (2-1)$$

از آن جایی که سرعت u از یک حرکت نسبی در چارچوب مرجع ${\Delta x}/{\Delta t}$ است، ما همچنین داریم:

$$\overline{\Delta t} = \frac{1}{\sqrt{1 - {v^2}/{c^2}}}\Delta t\,\left(1 - \frac{uv}{c^2}\right) \qquad (3-1)$$

برای حقیقی ماندن (ΔT) سرعت چارچوب v نباید از سرعت نور c فراتر رود. اما $\overline{\Delta t}$ می تواند علامت مخالف (ΔT) داشته باشد. اگر

$${u}/{c} > {c}/{v} > 1 \qquad (4-1)$$

یکی ممکن است فکرکند که این نتیجه، ادامه داستان مشهور اتساع زمان است. هر چه یک نفر از نقطه ی سکون با سرعت بیشتری سفر کند، زمان بر او کندتر می گذرد؛ زمان در سرعت نور باز می ایستد اگر سرعت کمتر از سرعت نور شود، زمان معکوس می گردد. ماشین زمان را می‌توان به شیوه زیر ساخت. هنگامی که شیئی با سرعت بیش از سرعت نور که یک تاخیون نامیده می‌شود$u > c$ توسط یک منبع ساطع شود. و به صورت وارون با سرعت $v < c$ حرکت می‌کند شرط (۱-٤) را برآورده می سازد.

تاخیون قبل از اینکه خارج شود، در یک زمان T به هدف خود خواهد رسید. سپس اگر با منبع بازگرداننده برگردد، قبل از انتشار با زمان $2T$ به نقطه مرجع خود خواهد رسید.

هرچند که هیچ تاخیونی وجود ندارد، و ماشین‌های زمان نمی توانند با فیزیک نسبیت خاص ساخته شوند، با این وجود باید تاکید شود که هیچ دلیل منطقی سرعت بیش از سرعت نور را انکار نمی‌کند. در واقع

یک جهان فرضی که در آن تاخیون وجود دارد، به طور فیزیکی استوار و پایدار است. اگرچه تاخیون ها برای آزمایشات جستجو شدند، ولی هیچ وقت به دست نیامدند[۱] .

اینک ما به نسبیت عام اینشتین می‌رسیم، که در آن چارچوب، هندسه فضا–زمان دیگر ثابت نیست، در واقع بسته به مقدار ماده ی جهان، می تواند شکل تمام چارچوب های غیر منتظره را به خود بگیرد. به ویژه، این امر زمانی امکان پذیر است که هندسه هایی وجود داشته باشد که شامل مسیرهای باشند که در آن مسیرها بتوان با سرعتی کمتر از سرعت نور به گذشته سفر کرد، این مسیرها را منحنی های بسته زمانگونه می گویند.

اولین حل برای تئوری اینشتین با منحنی های بسته زمان گونه توسط گودل در سال ۱۹۴۹ به دست آمد و اجازه ساخت ماشین زمان را داد[۲] .

گودل معادلات گرانش اینشتین را از نسبیت عام حل کرد:

$$G_{\mu v} + \frac{\Lambda}{2}\, g_{\mu v} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu v} \qquad (5-1)$$

سمت چپ هندسی است و شامل تانسور اینشتیبن می شود، $G_{\mu v}$ از تانسور متریک $g_{\mu v}$ گرفته شده در آنچه که ژئومتریک فضا–زمان با یک عبارت کیهان شناسی معرفی شده است. سمت راست ماده را توصیف می کند، $T_{\mu v}$ تانسور انرژی–تکانه ماده است. ماده هندسه را با استقاده از معادله (۱–۵) تعیین می کند.

گودل $T_{\mu v}$ را ثابت فضا–زمان قرارداد که تنها مولفه زمان–زمان آن صفرنمی‌شود.

$$T_{00} = \frac{c^4}{8\pi G}\Lambda > 0 \qquad (6-1)$$

تانسور متریک که سپس معادلات اینشتین را حل می‌کند، منجر به جهان خط زیر می‌شود:

$$ds^2 = g_{\mu v}\, dx^{\mu} dx^{v}$$

$$= (cdt - \sqrt{\frac{2}{\Lambda}}\,\big(cosh\sqrt{\Lambda}\; r - 1\big)d\theta)^2 - dr^2 - \frac{1}{\Lambda}\, sinh^2\sqrt{\Lambda}\; r\, d\theta^2 - dz^2\,, \qquad (7-1)$$