دانشکده فیزیک

کنش های تصحیح یافته در نسبیت عام

نگارش:

مریم نوری

استاد راهنما: سرکار خانم دکتر فاطمه شجاعی

پایان نامه برای دریافت درجه کارشناسی ارشد

در رشته فیزیک

بهمن ماه ۱۳۸۷

بسم الله الرحمن الرحيم

دانشگاه تهران

دانشکده فیزیک

کنش های تصحیح یافته در نسبیت عام

نگارش: مریم نوری

استاد راهنما: سرکار خانم دکتر فاطمه شجاعی

پایان نامه برای دریافت درجه کارشناسی ارشد

در

رشته فیزیک

بهمن ۱۳۸۷

University of Tehran

Physics Department

Modified actions in General Relativity

By: Maryam Nouri

Supervisor: Dr. Fatimah Shojai

A thesis submitted to the Graduate Studies Office
In partial fulfillment of the requirements for
The degree of Master of Science in

Physics

January 2009

Abstract:

The speed of light is one of the fundamental physical constants. It appears in many equations and plays different roles in them. In the formulation of varying speed of light theories the first step is to specify which of these roles is subject to variation. In this thesis firstly we shall discuss these different roles.

Since a varying speed of light theory can be a solution to the cosmological puzzles, we shall also review them here.

As it is not consistent to allow a constant to vary in an equation that has been derived from a variational principle with the hypothesis of constancy of the quantity, one needs to go back to the Lagrangian and derive the new equations, after having replaced the constant by a dynamical field. To illustrate this point, we discuss a scalar-tensor Lagrangian for general Relativity considering the speed of light as a degree of freedom of the theory in the metric and Palatini approaches.

At the end we shall apply this model to the cosmological context and get some solutions for the scale factor and speed of light.

Key words: varying speed of light theory- metric approach- palatini approach.

چکیده

سرعت نور به عنوان یک ثابت بنیادی، در قسمت های مختلف فیزیک نقش های گوناگونی دارد که هر کدام معرف پارامتر متفاوتی به لحاظ فیزیکی می باشند. برای فرمول بندی یک نظریه سرعت متغیر نور ابتدا باید معلوم شود تغییرات کدام یک از این سرعت ها مورد نظر است. در این پایان نامه ابتدا به این مفاهیم مختلف سرعت نور پرداخته می شود. یکی از دلایل مطرح شدن نظریات سرعت متغیر نور، به عنوان روشی جایگزینِ روش تورمی، برای حل برخی معماهای کیهانشناسی استاندارد می باشند، که در ادامه ی بحث مورد مطالعه قرار می گیرد.

بدیهی است که مجاز دانستن تغییرات یک کمیت ثابت در معادلاتی که با کمک اصل کمترین کنش و با فرض ثابت بودن آن کمیت بدست آمده اند به نتایج صحیحی منجر نمی شود بلکه لازم است ماهیت دینامیکی آن کمیت در کنش منظور شود و سپس از معادلات وردش گرفته شود. در این راستا سپس معادلات میدان نظریات سرعت متغیر نور را به دو روش متریکی و پالاتینی برای کلی ترین کنش اسکالر-تانسوری بدست خواهیم آورد.

نهایتاً مدلی برای کیهانشناسی کلاسیکی ارائه می گردد و پس از بدست آوردن معادلات میدان، حل های کیهانشناسی مورد علاقه برای فاکتور مقیاس و سرعت نور بدست می آیند.

کلید واژه ها: نظریه ی سرعت متغیر نور، روش متریکی، روش پالاتینی.

تقدیر و تشکر

حمد و سپاس ایزد منان را که با الطاف بیکران خود این توفیق را بر من ارزانی داشت تا بتوانم این پایان نامه را به اتمام برسانم. همچنین وظیفه خود می دانم تا از استاد بزرگوارم سرکار خانم دکتر شجاعی نهایت قدردانی و سپاس را داشته باشم. سلامتی و توفیق روزافزون ایشان را از خداوند خواستارم.

از مادر و پدرم که همواره مشوق من بوده و از هیچ کوششی در فراهم آوردن امکانات برای من دریغ ننموده اند کمال سپاسگزاری را دارم.

فهرست مطالب

مقدمه ۱

فصل اول: سرعت نور c ۲

۱-۱-مروری بر تاریخچه ی سرعت نور c ۲

۱-۱-۱-یک ثابت با نقش های متفاوت ٤

۱-۱-۲-سرعت متغیر نور ۹

۱-۱-۳-مبانی نظریات سرعت متغیر نور (VSL) ۱۰

۱-۲-معماهای کیهانشناسی در نظریه های سرعت متغیر نور ۱۸

۱-۲-۱-فرض های بنیادین کیهانشناسی استاندارد ۱۸

۱-۲-۲-مشکلات مدل استاندارد انفجار بزرگ ۱۹

۱-۲-۳-معمای افق کیهانشناسی ۲۱

۱-۲-٤-معمای تخت بودن کیهان ۲۲

فصل دوم: معادلات میدان ۲۵

۲-۱-گرانش متریکی ۲۵

۲-۱-۱-کنش اینشتین-هیلبرت ۲٦

۲-۲-گرانش متریک-آفینی ۲۷

۲-۲-۱-کنش اینشتین-هیلبرت ۲۹

۲-۳-نظریه ی اسکالر-تانسوری ۳۲

۲-۳-۱-معادلات میدان در رهیافت متریکی ۳۳

۲-۳-۲-معادلات میدان در رهیافت پالاتینی ۳۵

فصل سوم: حل های کیهانشناسی زمان در نظریه های سرعت متغیر نور ۳۸

۳-۱-معرفی مدل ٤۰

۳-۲-رهیافت متریکی ٤۰

۳-۲-۱-کیهان c-غالب ٤٦

۳-۲-۲-کیهان (Λ -c)-غالب ۵۰
۳-۳-رهیافت پالاتینی ۵۲

نتیجه گیری ۵۶

منابع و مآخذ ۵۹

مقدمه

اخیراً نظریه های سرعت متغیر نور برای حل مشکلات مدل استاندارد کیهانشناسی همچون مسئله افق، مسئله تختی مورد توجه بسیاری قرار گرفته است.

نظریه های سرعت متغیر نور در واقع تلاشی است برای تعمیم نسبیت خاص استاندارد و تغییر آن، که قید ثابت بودن سرعت نور را نداشته باشد. از طرف دیگر، همان طور که می دانیم نسبیت خاص اینشتین بر دو اصل نسبیت و ثابت بودن سرعت نور بنا شده است. این دو اصل در واقع منجر به ناوردایی لورنتس می شوند و این ناوردایی یکی از پایه های فیزیک نسبیتی استاندارد است. ولی اخیراً با مطرح شدن امکان به هم خوردن ناوردایی لورنتس توجه بیشتری به نظریه های سرعت متغیر نور و نیز نظریه هایی که در آن ناوردایی لورنتس شکسته، شده است. پس با توجه به مسائل فوق انگیزه ی مطالعه ی بیشتر نظریه های سرعت متغیر نور مطرح می شود.

در فصل اول این پایان نامه علاوه بر بررسی نقش های مختلف سرعت نور به بررسی بحث های بنیادی نظریات سرعت متغیر نور پرداخته خواهد شد. همچنین به کاربرد نظریات سرعت متغیر نور برای حل برخی معماهای کیهانشناسی استاندارد (معمای افق و معمای تخت بودن کیهان) پرداخته می شود و ملاحظه می گردد که نظریات سرعت متغیر نور می توانند، راه حل جایگزینی برای مدل تورمی برای حل این معماها باشند.

در فصل دوم ابتدا مروری بر گرانش متریکی (نسبیت عام) و گرانش متریک-آفینی خواهد شد و معادلات میدان را در گرانش اینشتین در خلاء برای هر دو رهیافت بدست می آید. سپس به نظریه اسکالر-تانسوری به عنوان یک نظریه ی گرانشی موفق و کارآمد در توصیف پدیده های کیهانشناسی اشاره می شود و معادلات میدان را در دو رهیافت متریکی و پالاتینی برای کلی ترین کنش اسکالر-تانسوری بدست آورده خواهد شد.

در فصل آخر، یک مدل کیهانشناسی مبتنی بر اصول لازم در طرح سرعت متغیر نور که در فصل های قبل به آن پرداختیم، معرفی می گردد. سپس معادلات میدان در دو رهیافت متریکی و پالاتینی برای مدل فوق بدست می آید. و با نوشتن معادلات در کیهان فریدمن-رابرتسون-واکر با سرعت متغیر نور، در هر دو حالت پاسخ های معادلات کیهانشناسی بدست خواهند آمد.

فصل اول

سرعت نور c

۱-۱-مروری بر تاریخچه ی سرعت نور c

نور و مسائل مربوط به آن همواره یکی از مباحث مهم و مورد توجه فیزیکدانان بوده و هست. نخستین تلاش های علمی در این زمینه از زمان گالیله[۱] آغاز شد. وی به اتفاق همکارش برای اندازه گیری سرعت نور اقدام کردند. روش کار به این طریق بود که همکار گالیله درحالیکه فانوسی در دست داشت بالای تپه ای ایستاده بود و گالیله بالای تپه ای دیگر. هردو با خود فانوسی داشتند که روی آنها را پوشانده بودند دستیار وی به مجرد آنکه نور گالیله را می دید با برداشتن پرده ای از روی فانوس خود به گالیله علامت می داد گالیله این آزمایش را با فواصل بیشتر و بیشتر تکرار کرد اما نتوانست اختلاف زمانی بین برداشتن پرده از روی فانوس خود و دستیارش را بدست آورد و سرانجام گفت که سرعت نور خیلی زیاد است.

نخستین بار سرعت نور در سال ۱٦۷٦ توسط رومر[۲] با استفاده از ماه گرفتگی محاسبه شد و معلوم گشت که سرعت نور محدود است عددی را که رومر بدست آورد ۲۱۵هزار کیلومتر بر ثانیه بود که معاصران وی آن را باور نمی کردند. در سال ۱۷۲٦ برادلی[۳] با استفاده از تغییر وضعیت ستارگان نسبت به زمین سرعت نور را محاسبه کرد و عدد ۳۰۰هزار کیلومتر بر ثانیه را بدست آورد.

نخستین بار فیزو[٤] با استفاده از روش غیرنجومی و اصلاح روش گالیله سرعت نور را اندازه گیری کرد و مقدار آن را ۳۱۳هزار کیلومتر بر ثانیه آورد تمام این نتایج به صورت تجربی بدست آمده بود و از پشتوانه ای نظری بی نصیب بود و استناد به این اندازه گیری ها نمی توانست به یک نتیجه جهان

---

۱ Galileo
۲ Romer
۳ Bradley
۴ Fizeau

شمول برسد. به عنوان نمونه آیا اندازه ی سرعت های بدست آمده زمینی و سماوی باید یکسان باشد یا خیر؟

در دهه ی ۱۸٦۰ کلارک ماکسول[۱] با استفاده از قوانین الکترومغناطیس که خود معادلات آن را نوشته بود دیدگاهی کلی و جهان شمول در مورد سرعت امواج الکترومغناطیسی که نور بخش کوچکی از آن بود، ارائه کرد.

امواج الکترومغناطیسی که بطور نظری در سال ۱۸٦٤ توسط معادلات کلارک ماکسول پیشگویی شد، نشان داد که سرعت انتشار این امواج در خلاء از رابطه ی زیر بدست می آید:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}} = 3 \times 10^8 m/s \qquad (۱-۱)$$

در این رابطه μ_0, ε_0, c به ترتیب سرعت نور، ثابت گذردهی خلاء و ثابت تراوایی مغناطیسی هستند. همچنانکه رابطه ی (۱-۱) نشان می دهد، سرعت نور (امواج الکترومغناطیسی) در خلاء، ثابت است. اما سرعت ثابت امواج الکترومغناطیسی بایستی نسبت به یک دستگاه مقایسه می شد، و این دستگاه همان دستگاه اتر[۲] بود. یعنی اتر ساکن مطلق فرض می شد وتمام اجسام نسبت به آن در حرکت بودند و سرعت امواج الکترومغناطیسی و در نتیجه سرعت نور نسبت به اتر ثابت بود. این نظریه در حالی شکل گرفت که ناوردایی گالیله ای معتبر و بی نقص تصور می شد. بنابراین اگر سرعت نور نسبت به یک دستگاه لخت c باشد و دستگاه با سرعت v نسبت به اتر در حرکت باشد در آن صورت سرعت نور نسبت به اتر w برابر خواهد شد با: $w = c + v$. چنانچه نور در جهت مخالف دستگاه حرکت کند آنگاه خواهیم داشت: $w = c - v$

بر این اساس ماکسول به فکر محاسبه سرعت حرکت منظومه شمسی نسبت به اتر افتاد. وی در سال ۱۸۷۹ طی نامه ای که برای تاد[۳] در آمریکا نوشت، طرحی را برای اندازه گیری سرعت حرکت منظومه ی شمسی نسبت به اتر پیشنهاد کرد. یک آمریکایی به نام مایکلسون[٤] این طرح را دنبال کرد و برای انجام آزمایش، تداخل سنجی نیز ساخت و در سال ۱۸۸۰ آزمایش کرد.

آنچه از آزمایش مایکلسون بدست آمد بسیار گیج و ناراحت کننده بود. اولین فکری که قوت گرفت این بود که باید اشکال از معادلات ماکسول باشد که تنها ۲۰ سال از عمر آن می گذشت یعنی باید آنها را طوری تغییر داد تا با ناوردایی گالیله ای سازگار باشد. اما آزمایش فیزو و سایر نتایج حاصل از حرکت نور و امواج الکترومغناطیسی آنها را تأیید می کرد. هر تلاشی که برای توجیه علت شکست

---

۱ Clark Maxwell
۲ Ether
۳ Todd
٤ Michelson

نتیجه ی آزمایش مایکلسون انجام می دادند با شکست مواجه می شد. در این میان دو نظریه از بقیه جالب تر به نظر می رسید: یکی کشش اتری که به موجب آن چارچوب اتر به طور موضعی به کلیه ی اجسام با جرم محدود متصل است. این نظریه هیچ اصلاحی را در قوانین نیوتن[۱]، ناوردایی گالیله ای و معادلات ماکسول لازم نمی دانست. اما این نظریه با کجراهی نور ستارگان ناسازگار بود. نظریه دوم نظریه گسیلی بود که طبق آن معادلات ماکسول را باید طوری اصلاح می کردند که سرعت نور به سرعت چشمه ی صادر کننده بستگی داشته باشد. این نظریه نیز با نور واصل از ستارگان دوتایی ناسازگار بود.

در این اثنا اینشتین[۲] نظریه ی انقلابی نسبیت را ارائه کرد. مسئله ی نسبی بودن سرعت، از نظر اینشتین تا جاییکه به اعتبار اصل نسبیت[۳] مربوط می شد به اتر و حرکت سوقی ربطی نداشت. طبق اصل نسبیت: قوانین طبیعت در تمام چارچوب های مرجع لخت یکسان اند. اینشتین پس از مطرح کردن اصل نسبیت، به دو اصل موضوعه ی بنیادی زیر پرداخت:

۱-قوانین فیزیکی در تمام دستگاه های لخت یکسان است.

۲-سرعت نور در خلاء، در هر چارچوب لختی که اندازه گیری می شود با صرفنظر از حرکت منبع نور، معادل c است.

اصل موضوعه ی دوم اینشتین، در واقع اندیشه ی مکانیکی نیوتنی و سینماتیکی گالیله ای را رد می کند. نسبیت علاوه بر آنکه بخوبی توانست علت شکست نتیجه ی آزمایش مایکلسون را توجیه کند، از تمام آزمایش های مربوط به آن نیز با موفقیت بیرون آمد. بنابراین ناوردایی لورنتس[۴] جانشین ناوردایی گالیله و وارد نسبیت خاص[۵] شد.

از این تاریخچه می توان این طور برداشت کرد که سرعت نور از یک ویژگی ساده نور تا نقش یک ثابت بنیادی تحول یافته است و وارد اکثر معادلات فیزیک شده است که به ظاهر این معادلات جدا از نور و خواص آن می باشند.

۱-۱-۱-یک ثابت با نقش های متفاوت [۲]

سرعت نور یک ثابت بنیادی است که در قوانین مختلف فیزیکی با مفاهیم مختلف خود را ظاهر می کند. آنچه باعث تطبیق دو و یا چند تا از این انواع می شود مشاهدات تجربی و نیز برخی ملاحظات

---

۱ Newton
۲ Einstein
۳ Principle of Relativity
۴ Lorentz Invariance
۵ Special Relativity

نظری می باشد. در اینجا سعی داریم برخی از این مفاهیم را روشن تر بیان کنیم. برای این کار از دسته بندی زیر استفاده می کنیم:

الف) c_{EM}: ثابت الکترومغناطیسی

چهار معادله زیر، با عنوان معادلات ماکسول شناخته می شوند:

$$\vec{\nabla}.\vec{D} = \rho \,, \vec{\nabla}.\vec{H} = 0 \,, \vec{\nabla}\times\vec{H} = \vec{J} + \partial_t \vec{D} \,, \vec{\nabla}\times\vec{E} = -\partial_t \vec{B} \qquad (۲-۱)$$

که ρ چگالی بارهای آزادو $\vec{J}$ چگالی جریان می باشد. بردار جابه جایی $\vec{D}$، به بردار میدان الکتریکی $\vec{E}$وقطبش $\vec{P}$ بوسیله رابطه $\vec{D} = \varepsilon_0 \vec{E} + \vec{P}$ مربوط است و همچنین بردار میدان مغناطیسی $\vec{H}$ به بردار القای مغناطیسی(چگالی شار مغناطیسی) $\vec{B}$ومغناطش $\vec{M}$از طریق رابطه $\vec{B} = \mu_0(\vec{H} + \vec{M})$ وابسته است که ε_0و μ_0 به ترتیب ضرایب گذردهی و نفوذ پذیری خلاء می باشند. قبل از اضافه کردن جمله $\partial_t \vec{D}$ به قانون آمپر، هیچگونه ارتباطی بین میدان الکتریکی و میدان مغناطیسی برقرار نبود. اما پس از تصحیح رابطه آمپر، معلوم شد که میدانهای الکتریکی و مغناطیسی هنگامی که وابستگی زمانی داشته باشند با یکدیگر ارتباط دارند و به صورت امواج الکترومغناطیسی در فضا انتشار پیدا می کنند.

می توان پتانسیل الکترومغناطیسی را از طریق روابط $\vec{E} = -\vec{\nabla}\varphi - \partial_t \vec{A}$ و $\vec{B} = \vec{\nabla}\times\vec{A}$ تا حد یک تبدیل پیمانه ای بدست آورد.

$$\vec{A} \to \vec{A} - \vec{\nabla} f \,, \varphi \to \varphi + 1/c\partial_t f \quad (f \text{ میدان اسکالر دلخواه است}) \qquad (۳-۱)$$

می توان نشان داد معادله یک موج الکترومغناطیسی به صورت زیر می باشد

$$(\partial_t{}^2 - {c_{EM}}^2 \nabla^2)(\varphi, \vec{A}) = 0 \qquad (٤-۱)$$

که در این رابطه ${c_{EM}}^2 \equiv \dfrac{1}{\varepsilon_0 \mu_0}$ است و c_{EM}به عنوان سرعت امواج الکترومغناطیسی و بنابراین سرعت نور در خلاء می باشد. کشف ماهیت نور به عنوان امواج الکترومغناطیسی یکی از درخشان ترین نتایج کار ماکسول به شمار می آید. به کار بردن عبارت سرعت نور برای c_{EM} خیلی محدود کننده می باشد زیرا c_{EM} یک ویژگی تمام پدیده های الکترومغناطیسی می باشد. به عبارت بهتر می توان آن را ثابت الکترومغناطیسی نامید.

با قرار دادن $x^0 = c_{EM} t$ می توان معادلات ماکسول را به صورت زیر بیان کرد

$$\partial_\mu F^{\mu\nu} = J^\nu \qquad (۵-۱)$$

که در آن $F_{\mu\nu} = \partial_\mu A_\nu - \partial_\nu A_\mu$ و $A^\mu = (\varphi, \vec{A}/c_{EM})$ و $J^\mu = (\rho, \vec{J}/c_{EM})$ و $\mu,\nu = 0,1,2,3$.

در پیمانه لورنتس $\partial_\mu A^\mu = 0$ است و معادله موج برای A^μ بدست می آید، که بیانگر این است که نظریه الکترودینامیک ماکسول ناوردای لورنتس می باشد.

ب) c_{ST} : ثابت فضا–زمان

نقش بعدی که به c مربوط می کنیم این است که c رابطی بین فضا و زمان می باشد. این ثابت در تبدیلات لورنتس معمول و توصیف نسبیت خاصی از فضا–زمان وارد می شود. ثابتی که در تبدیلات لورنتس معمول ظاهر می شود را ثابت ساختار فضا–زمان می نامیم و با c_{ST} نمایش می دهیم. در این صورت المان طول فضا–زمان مینکوفسکی به صورت زیر در می آید

$$ds^2 = -(dx^0)^2 + (dx^1)^2 + (dx^2)^2 + (dx^3)^2 \qquad (۱-۶\text{الف})$$

$$ds^2 = -(c_{ST}dt)^2 + (dx^1)^2 + (dx^2)^2 + (dx^3)^2 \qquad (۱-۶\text{ب})$$

به صورت کاملاً مستقل از الکترومغناطیس، می توان نشان داد که c_{ST} را می توان به عنوان یک سرعت حدی که ناوردای جهانی است تعریف کرد[۱]، بنابراین قانون معمول جمع سرعت ها می بایستی دچار تغییراتی شود، و همان طور که می دانیم این تغییرات می بایستی شرایط زیر را ارضاءکنند: (ترکیب سرعت ها با $\oplus$نشان داده شده است)

۱)عنصر همانی،O، به نحوی وجود داشته باشد که برای تمامی u ها :

$$O \oplus u = u \oplus O = u \qquad (۷-۱)$$

۲)عنصر جهانی، در اینجا c_{ST}، وجود دارد چنان که برای تمامی u ها :

$$c_{ST} \oplus u = u \oplus c_{ST} = c_{ST} \qquad (۸-۱)$$

۳)قانون شرکت پذیری در ترکیب سرعت ها وجود داشته باشد.

$$u \oplus (v \oplus w) = (u \oplus v) \oplus w \qquad (۹-۱)$$

٤)مشتق های $\frac{d(u \oplus v)}{du}$و $\frac{d(u \oplus v)}{dv}$ وجود داشته و برای تمامی u ها و v ها پیوسته باشند.

۵)با شرط $u, v \neq 0$ داشته باشیم:

$$\frac{d(u \oplus v)}{du} \rangle 0 \quad \text{و} \quad \frac{d(u \oplus v)}{dv} \rangle 0 \qquad (۱۰-۱)$$

این شرایط به قانون استاندارد ترکیب سرعت های نسبیت خاص با c_{ST} به عنوان سرعت حدی منجر می شوند. این نکته نیز جالب توجه می باشد که بیشتر این ساختار ها روی اصول موضوعه ای بناشده اند که اصول جهانی هستند ونمی توان بوسیله ی خواص برهم کنش های خاص طبیعت آنها را بدست آورد. سرعت حدی را می توان بوسیله ی قرار دادن $ds^2 = 0$ از رابطه (۱–۶ب) بدست آورد.

در نهایت با مطالعه ی دینامیک ذرات نقطه ای درنسبیت خاص می توان عامل تبدیل[۱] بین انرژی و جرم، که برابر $c_{ST}{}^2$ می باشد، رابدست آورد. بنابراین رابطه ای درست که بین دو مفهوم جرم و انرژی وجود دارد برابر است با:

$$E = mc_{ST}{}^2 \qquad (۱۱-۱)$$

حال اجازه دهید به فضا-زمان خمیده نسبیت عام[۲] برویم. می دانیم که در این فضا-زمان المان طول به صورت $ds^2 = g_{\mu\nu}dx^\mu dx^\nu$ است. هر ناظر می تواند زمان ویژه[۳] را به صورت زیر تعریف کند:

$$ds^2 = -c_{ST}{}^2 d\tau^2 \qquad (۱۲-۱)$$

که طبیعی ترین تعریف می باشد، زیرا بوسیله ی این تعریف سرعت حدی که بوسیله ی رابطه ی $ds^2 = 0$ داده می شود، برای تمام ناظران، مستقل از مکان آنها در فضا و زمان حرکت آنها، به صورت یکسان بدست می آید. همچنین بوسیله ی این تعریف می توان اثر اتساع زمان را برای هر ناظر در حال سکون نسبت به دستگاه مختصات x^α، بدست آورد.

$$-c_{ST}{}^2 d\tau^2 = g_{00}(dx^0)^2 \qquad (۱۳-۱)$$

درحالت استاندارد که $c_{EM} = c_{ST}$ می باشد، می توان فاصله ی فضایی $d\ell$ را بین دو نقطه با مختصات x^i و $x^i + dx^i$ به کمک سیگنال های نوری محاسبه کرد. در این حالت ضرب c_{ST} در زمان ویژه ای که توسط ناظر واقع در x^i، برای سیگنال نوری که از x^i به $x^i + dx^i$ می رود اندازه گیری می شود، فاصله فضایی $d\ell$ را بدست می دهد. این بدین معنی است که تعیین فاصله هم نیازمند اندازه گیری زمان و هم استفاده از سیگنال نوری می باشد. در حالت معمول، ابهامی در این مورد وجود ندارد، زیرا می توان از سیگنال های نوری که با سرعت جهانی c_{ST} انتشار می یابند، استفاده کرد. ولیکن، اگر این دو سرعت برهم منطبق نبودند، تعیین فاصله فرآیند پیچیده تری را طی می کرد، زیرا در این صورت نور به جای یک ژئودزی پوچ[۴] روی یک ژئودزی زمان گونه[۵] حرکت می کند. به هر حال، هر جا که این جفتیدگی[۶] استاندارد ماده و هندسه، در نتیجه ی انطباق دو سرعت، برقرار نبود، می بایستی معنی هندسی تازه ای برای تانسور متریک یافت و روش دیگری را برای محاسبه ی بازه های فضایی وزمانی جانشین کرد.

از نظر تاریخی، ابتدا ثابت الکترومغناطیس به عنوان سرعت نور شناخته شدو بعد از آن، سرعت نور در تبدیلات لورنتس و مفاهیم فضا و زمان وارد شد. بعد از مطالعه ی دینامیک نسبیتی مشخص شد

---

[۱] Conversion Factor
[۲] General relativity (GR)
[۳] Proper Time
[۴] Null Geodesic
[۵] Time like Geodesic
[۶] Coupling

که ذرات بدون جرم با سرعت نور حرکت می کنند. ولیکن نکته ای که باید اینجا مد نظر قرار داد این می باشد که تا حد دقت آزمایشاتی از نوع آزمایشات مایکلسون-مورلی[1]، c_{EM} با سرعت جهانی c_{ST} یکسان می باشد. به عبارتی دیگر جرم فوتون تا دقت معین برابر صفر است و معادلات ماکسول ناوردای لورنتس هستند. بنابراین متمایز کردن دو مفهوم سرعت نور، c_{EM}، و سرعت حدی طبیعت، c_{ST}، که خواص فضا-زمان را نشان می دهد، می بایستی با دقت زیادی انجام شود.

ج) c_{GW}: سرعت امواج گرانشی در خلاء

می دانیم که معادلات اینشتین در خلاءرا می توان با کمک وردش گیری از کنش استاندارد، که به شکل زیر است بدست آورد:

$$S = \int \sqrt{-g} R d^4 x \qquad (۱-۱٤)$$

و همچنین تنها درجات آزادی برای میدان های گرانشی، حالت های بدون جرم و با اسپین دو هستند که همان امواج گرانشی می باشند. اگر میدان گرانشی را به صورت اختلالی، $h_{\mu\nu}$، نسبت به فضا-زمان مینکوفسکی[2]، $\eta_{\mu\nu}$، در نظر بگیریم با کمک گرفتن از المان طول

$$ds^2 = -(c_{ST} dt)^2 + (\eta_{ij} + h_{ij}) dx^i dx^j \qquad (۱-۱۵)$$

و با فرض $h_{ij}\eta^{ij} = 0$ و $\partial^i h_{ij} = 0$ معادلات اینشتین در خلاء به شکل معادلات انتشار موج به صورت زیر در می آیند:

$$(\partial_t{}^2 - c_{ST}{}^2 \nabla^2) h_{ij} = 0 \qquad (۱-۱٦)$$

در نتیجه سرعت انتشار امواج گرانشی برابر با سرعت جهانی فضا-زمان خواهد بود، $c_{ST} = c_{GW}$، و تا زمانی که به معتبر بودن نظریه نسبیت عام اینشتین پایبند باشیم، این برابری اجتناب ناپذیر می باشد. ولیکن اگر مجبور به فرمول بندی نظریه ای باشیم که در آن کوانتاهای حاصل امواج گرانشی جرم دار باشند، در این صورت ممکن است سرعت انتشار امواج گرانشی، c_{GW}، با سرعت جهانی، c_{ST}، یکسان نباشد که این خود منجر به وارد شدن تصحیحاتی به قوانین گرانش نیوتن در مقیاس های کیهانی می شود.

د) c_E : ثابت اینشتین

با فرض جفتیدگی گرانش با ماده، معادلات میدان اینشتین را به صورت زیر داریم:

---

[1] Michelson-Morley
[2] Minkowski

$$G_{\mu\nu} = \frac{\alpha}{2} T_{\mu\nu} \qquad (۱-۱۷)$$

که ثابت جفتیدگی بین تانسور اینشتین، $G_{\mu\nu}$، و تانسور انرژی مومنتوم $T_{\mu\nu}$ برابر $\alpha = \frac{16\pi G}{c^4}$ می باشد، که c در آن بعد سرعت دارد که می توان آن را c_E نامید. برای یافتن تفسیری برای این ثابت می بایستی حد میدان ضعیف گرانشی را برای این معادلات بررسی کرد. در حد میدان ضعیف گرانشی متریک را می توان به صورت زیر نوشت:

$$ds^2 = -(1+h_{00})(c_{ST}dt)^2 + \eta_{ij}dx^i dx^j \qquad (۱-۱۸)$$

در این صورت معادله ژئودزی برای ذرات جرم دار $(u^\mu \equiv \frac{dx^\mu}{ds} = (1, \vec{v}/c_{ST}), u^\mu \nabla_\mu u^\nu = 0)$ به شکل زیر در می آید:

$$\partial_t v^j = -\frac{1}{2} {c_{ST}}^2 \eta^{ij} \partial_i h_{00} \qquad (۱-۱۹)$$

برای برقرار بودن معادلات گرانش نیوتن در این حد میدان ضعیف می بایستی مؤلفه h_{00} متریک اختلالی را به عنوان پتانسیل گرانشی نیوتن، Φ، در نظر بگیریم:

$$\partial_t v^j = -\frac{\partial \Phi}{\partial x_j} = -\frac{1}{2} {c_{ST}}^2 \partial^i h_{00} \Rightarrow h_{00} = \frac{2\Phi}{{c_{ST}}^2} \qquad (۱-۲۰)$$

حال با مقایسه معادله اینشتین با معادله ی پواسون، $\nabla^2 \Phi = 4\pi G\rho$، خواهیم داشت:

$$\frac{2\nabla^2 \Phi}{{c_{ST}}^2} = \frac{\alpha}{2}(T_{00} - \frac{1}{2} g_{00} T) \qquad (۱-۲۱)$$

و با توجه به اینکه برای یک سیال $T_{00} = \rho {c_{ST}}^2$، در این صورت

$$\alpha = \frac{16\pi G}{{c_{ST}}^4} \qquad (۱-۲۲)$$

که در این صورت حد ضعیف میدان گرانشی برای معادلات اینشتین به معادلات گرانش نیوتنی منجر می شود. بنابراین در محدوده ی نظریه نسبیت عام، $c_E = c_{ST}$ برقرار است.

۱-۱-۲-سرعت متغیر نور

همان طور که گفتیم، ثابت بودن سرعت نور به عنوان یک اصل موضوعه مطرح شده است. اصل موضوعه ها در هر زمینه ی علمی دارای این ویژگی هستند که اعتبار خود را تا زمانیکه با مورد نقض روبرو نشده اند، حفظ می کنند و به محض مواجه با یک تناقض از اعتبار ساقط می شوند. از آن جاییکه فیزیک یک دانش تجربی است، الزاماً بایستی ابطال اصولش نیز بر پایه ی تجربه باشد.

علاوه بر مشاهدات تجربی که می تواند اصول موضوعه ای را به چالش بکشد سازگاری این اصول با سایر نظریه هایی که قادر به توجیه پدیده های فیزیکی هستند نیز از اهمیت خاصی برخوردار است. تجارب کیهانی دهه ی ۱۹۷۰ به بعد اصل ثابت بودن سرعت نور را با مشکل جدی مواجه ساخته است. یکی از دلایل مطرح شدن نظریه هایی با سرعت متغیر نور این است که به عنوان روش جایگزینی (علاوه بر مدل تورمی کیهانشناسی) برای توجیه برخی معماهای کیهانشناسی استاندارد، ارائه شده اند.

در بخش قبل ملاحظه شد که سرعت نور در قسمت های مختلف فیزیک ظاهر می شود و نقش های گوناگونی را نیز ایفا می کند، بنابراین تمایز قائل شدن بین این مفاهیم در حین بحث در مورد یک نظریه سرعت متغیر نور[۱] حائز اهمیت می باشد، بدین معنی که در چنین نظریاتی این ثوابت، بسته به نحوه ی فرمول بندی نظریات، ممکن است مقادیر مختلفی را به خود بگیرند.

اولین مرحله در فرمول بندی نظریه سرعت متغیر نور این می باشد که معین شود تغییرات کدام یک از سرعت هایی که در بخش قبل ذکر گردید، مورد نظر است و سپس سراغ فرمول بندی نظریه رفت. به عبارتی دیگر بعد از تقلیل نظریه سرعت متغیر نور به سرعت نور ثابت، لزومی ندارد سرعت های مختلف کماکان برهم منطبق باشند.

تاکنون مدل های زیادی از نظریات سرعت متغیر نور مطرح شده است، که شروع آنها با پیشنهاد موفات[۲][۳] در سال ۱۹۹۲ به عنوان روشی جایگزین برای روش تورمی، برای توجیه معماهای کیهانشناسی استاندارد می باشد. نقطه ی کلیدی نظریه ها این است که در آنها یا سرعت نور v_{photon} –سرعتی که فوتون انتشار می یابد– است که فرض شده متغیر است و یا سرعت حدی علی جهانی $v_{\lim}$ است که فرض بر متغیر بودن آن داریم. اگر چه نوشته های بسیاری در این زمینه وجود دارد اما آگاهی کاملی از بعضی مسئله های بنیادی و ملاک های پایه برای بررسی نوشته های VSL را نمی دهند. در ادامه این مسائل بنیادی را بررسی می کنیم.

۱-۱-۳-مبانی نظریات سرعت متغیر نور(VSL)[٤]

۱)سرعت نور و اندازه گیری:

---

[۱] VSL Theory
[۲] J.W. Moffat