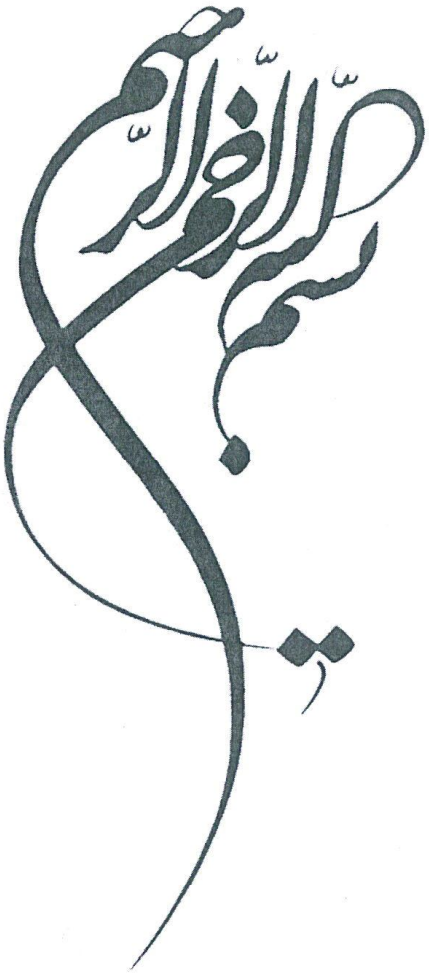
بسم الله الرحمن الرحیم

با سمه تعالی

دانشگاه تربیت دبیر شهید رجائی

مدیریت تحصیلات تکمیلی

تعهدنامه اصالت اثر

اینجانب حسین لطفی راوندی متعهد می شوم که مطالب مندرج در این پایان نامه حاصل کار پژوهشی اینجانب است و دستاوردهای پژوهشی دیگران که در این پژوهش از آن ها استفاده شده است، مطابق مقررات ارجاع و در فهرست منابع و ماخذ ذکر گردیده است. این پایان نامه قبلا برای احراز هیچ مدرک هم سطح یا بالاتر ارائه نشده است. در صورت اثبات تخلف(در هر زمان) مدرک تحصیلی صادر شده توسط دانشگاه از اعتبار ساقط خواهد شد.

کلیه حقوق مادی و معنوی این اثر متعلق به دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی می باشد.

نام و نام خانوادگی دانشجو

امضا

دانشکده علوم پایه

بررسی اصل ماخ و تغییرات ثابت گرانش در مدل برنز - دیک

نگارش

حسین لطفی راوندی

استاد راهنما: دکتر یوسف فرزان نهاد

پایان نامه برای دریافت درجه کارشناسی ارشد

در رشته فیزیک گرانش

فروردین 90

شماره: ۱۴۰۱/ق
تاریخ: ۹۰/۴/۲۶
پیوست:

دانشگاه تربیت دبیر شهید رجائی

صورتجلسهٔ دفاع پایان‌نامه تحصیلی دوره کارشناسی ارشد

با تأییدات خداوند متعال و با استعانت از حضرت ولی عصر (عج) جلسه دفاع از پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد آقای حسین لطفی‌راوندی رشتهٔ فیزیک تحت عنوان بررسی اصل ماخ و تغییرات ثابت گرانش در مدل برنز – دیک، که در تاریخ: ۹۰/۳/۱۸ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه تربیت دبیر شهید رجائی برگزار گردید و نتیجه به شرح زیر می باشد.

☑ قبول (بادرجه ..... امتیاز .....) ☐ دفاع مجدد ☐ مردود

۱ ـ عالی (۲۰ – ۱۸)

۲ ـ بسیار خوب (۱۷/۹۹ – ۱۶)

۳ ـ خوب (۱۵/۹۹ – ۱۴)

۴ ـ قابل قبول (۱۳/۹۹ – ۱۲)

اعضاء	نام و نام خانوادگی	مرتبه علمی	امضاء
استاد راهنما	دکتر یوسف فرزان‌نهاد	استادیار	
استاد داور داخلی	دکتر رضا رشیدی	استادیار	
استاد داور خارجی	دکتر شهرام جلال‌زاده	استادیار	
نماینده تحصیلات تکمیلی	خانم معصومه شهبازی	کارشناس‌ارشد	

دکتر ایوب اسماعیل پور
رئیس دانشکده علوم پایه

تهران ،لویزان ،کدپستی :۱۵۸۱۱ – ۱۶۷۸۸
صندوق پستی :۱۶۳ – ۱۶۷۸۵
تلفن :۹– ۲۲۹۷۰۰۶۰ فکس :۲۲۹۷۰۰۳۳
Email:sru@sru.ac.ir
www.srttu.edu

تقدیر و تشکر

اکنون که به یاری خدا توفیق انجام این پایان نامه را یافته ام، مراتب تشکر و سپاس خود را از استاد گرانقدر، آقای دکتر یوسف فرزان نهاد که ارائه این تحقیق مرهون راهنماییها و توجه ایشان است و همچنین دیگر اساتید دانشکده علوم ابراز می دارم.

چکیده

اصول ماخ و هم ارزی از مهم ترین اصولی هستند که پایه های نظری نسبیت عام را تشکیل می دهند. وجود برخی ناسازگاریهای نسبیت عام با اصل ماخ سبب شد برنز و دیک در سال 1961 به منظور تلفیق اصل ماخ در نظریه گرانش یکی از نخستین نظریه های اسکالر تانسوری را فرمول بندی کنند. در این نظریه، یک میدان اسکالر ϕ وجود دارد که از طریق آن اصل ماخ احیا می شود. از طرف دیگر وجود این اسکالر باعث تغییر ثابت گرانش و نقض اصل هم ارزی قوی در این نظریه شده است. از دیگر ویژگیهای این نظریه وجود ثابتی به نام ω است که تحقیقات زیادی برای تعیین آن صورت گرفته است.

این پایان نامه ضمن مرور نسبیت عام و نظریه برنز- دیک، به مقایسه این دو نظریه در حوزه های نظری و عملی می پردازد. بدین منظور، روی معادلات میدان هر دو نظریه تقریب فرانیوتونی زده می شود. و ثابت ωو تغییرات ثابت گرانش بر حسب پارامترهای تقریب فرانیوتونی محاسبه می شوند.

واژگان کلیدی: اصل ماخ- اصل هم ارزی ضعیف- اصل هم ارزی قوی-ثابت گرانش- تقریب فرانیوتنی

فهرست

فصل اول: اصول و مبانی نظری نسبیت عام 1
1-1چارچوبهای لخت 2
1-2فضای مطلق نیوتون 3
1-3 ایراداتی بر فضای مطلق نیوتون 3
1-4 اتر ماکسول 4
1-5 اصل ماخ 4
1-6 نتایج اصل ماخ 5
1-7 مقایسه نظریه نیوتون با اصل ماخ 6
1-8 اصل هم ارزی 7
1-9 ارتباط اصل ماخ با اصل هم ارزی 8
فصل دوم: نسبیت عام 9
2-1 معادلات میدان اینشتین 10
2-2 حد نیوتونی 12
2-3 حل شوارتزشیلد 13
فصل سوم: مکانیک فرانیوتونی اجرام سماوی 16
3-1تقریب فرانیوتونی 17
3-2 معادلات عمومی حرکت 29
3-3 انحراف نور توسط خورشید 32
3-4 جابجایی حضیض عطارد 34
3-5 تاخیر زمانی انعکاس سیگنالهای رادار 37
فصل چهارم:کیهانشناسی استاندارد 39
4-1 اصول کیهانشناسی 40
4-2 متریک فریدمن- رابرتسون - واکر 41

فهرست

3-4 جهان باز، جهان بسته و جهان تخت.....42
4-4 جهان مادی و جهان تابشی.....44
5-4 حل معادلات اینشتین در کیهانشناسی.....45
6-4 پارامترهای مشاهده پذیر کیهانشناسی.....47
فصل پنجم: نظریه برنز- دیک.....50
1-5 اصل ماخ در نسبیت عام.....51
2-5 معادلات میدان برنز- دیک.....52
3-5 اصل ماخ در نظریه برنز- دیک.....54
4-5 اصل هم ارزی در نظریه برنز- دیک.....55
5-5 تقریب فرانیوتونی معادلات میدان برنز- دیک.....57
6-5 تبدیلات همدیس.....60
7-5 حل معادلات میدان برنز- دیک در کیهانشناسی.....63
8-5 اندازه گیری ثابت گرانش و تغییرات آن.....66
9-5 حد ω.....69
فصل ششم: نتایج.....71
1-6 آزمون های حوزه منظومه شمسی.....72
2-6 انبساط عالم.....73

فهرست نمودار ها

نمودار4-1 وضعیت انبساط جهان بر حسب مقادیر مختلف k 48

فهرست شکل ها

شکل3-1 انحراف نور توسط خورشید.....32
شکل3-2 بخشهای مختلف مدار بیضوی سیارات.....34
شکل5-1 آزمایش ترازوی پیچشی.....66
شکل5-2 آزمایش آونگ پیچشی.....66

فهرست علائم

از 1 تا 3 تغییر می کنند..... اندیس های لاتین
از 0 تا 3 تغییر می کنند.....اندیس های یونانی
جمع بسته می شوند.....تکرار اندیس ها
$-1,+1,+1,+1$ ..... ضرایب متریک $g_{\alpha\beta}$
متریک مینکوفسکی..... $\eta_{\alpha\beta}$
مشتق زمانی کمیت ها..... علامت دات روی کمیت ها
بردارها..... $\rightarrow$ روی حروف
سرعت نور واحد در نظر گرفته می شود.....سرعت نور

فهرست پیوستها

پیوست الف: جزئیات حل رابطه(2-7).....74
پیوست ب: جزئیات حل روابط(3-22) و (3-23) و (3-24).....74
پیوست ج: جزئیات حل روابط(3-26) و (3-27).....75
پیوست د: جزئیات حل روابط(3-30) و (3-31).....76
پیوست ه: جزئیات حل روابط(3-32) و (3-33).....76

پیوست و: جزئیات حل روابط (3-35) و (3-36)..... 77
پیوست ز: جزئیات حل روابط (3-38) و (3-39)..... 77
پیوست ح: جزئیات حل روابط (3-42) و (3-43) و (3-44)..... 78
پیوست ط: جزئیات حل روابط (3-47) تا (3-49)..... 78
پیوست ی: جزئیات حل روابط (3-50) تا (3-52)..... 79
پیوست ک: جزئیات حل روابط (3-125) تا (3-128)..... 79
پیوست ل: جزئیات حل روابط (5-56) تا (5-64)..... 80
فهرست منابع..... 83

فصل 1
اصول و مبانی نظری نسبیت عام

1-1 چارچوب های لخت[1]

سه قانون نیوتون در مکانیک به شرح زیر هستند.

الف)ذرات آزاد با سرعت ثابت حرکت می کنند (یعنی با شتاب صفر، یا به عبارت دیگر، با سرعت ثابت در امتداد خط راست).

ب)نیروی برداری وارد بر یک ذره برابر است با حاصلضرب جرم آن در شتاب برداری آن: $\vec{f} = m\vec{a}$.

ج)نیروهای کنش و واکنش برابر و مختلف العلامت اند، مثلا اگر ذره A نیروی $\vec{f}$ را بر ذره B وارد کند B نیز نیروی $\vec{f}$ – را بر A وارد می کند.

قوانین فیزیکی معمولا نسبت به یک چارچوب مرجع که تعریف کمیات فیزیکی ای چون سرعت و شتاب و غیره را امکانپذیر می سازد، بیان می شوند. از میان چارچوبهای مرجع، چارچوبهای صلب بر چارچوبهای دیگر مرجح اند و در میان چارچوبهای صلب، چارچوبهای لخت ممتازند. قوانین نیوتون در چارچوبهای لخت اعتبار دارند.

چارچوب مرجع صلب، تعمیم تخیلی جسم صلب است. مثلا، زمین چارچوب صلبی را در سراسر فضا به دست می دهد که مرکب از تمامی نقاطی است که به طور صلب نسبت به زمین و نسبت به یکدیگر ساکن اند. با انتخاب سه صفحه دو به دو بر هم عمود در این چارچوب و اندازه گیری x, y , z به عنوان فاصله از این صفحات، می توانیم به شیوه های مختلف، یک دستگاه مختصات متعامد دکارتی، S، را به چنین چارچوبی وابسته سازیم. همچنین باید پارامتر زمانی t نیز تعریف شود تا از این دستگاه بتوان برای نمایش زمان و مکان رویدادها استفاده کرد. چارچوب صلبی را که از چنین مختصاتی برخوردار باشد چارچوب دکارتی می نامیم.

قانون اول نیوتون آزمونی است برای مشخص کردن چارچوبهای لخت از میان چارچوبهای صلب: هنگامی چارچوب صلب را لخت می نامیم که ذرات آزاد نسبت به آن بی شتاب حرکت کنند. اما، چون همه ذرات تحت تاثیر گرانش اند، هیچ ذره ای در نزدیکی یک جرم سنگین، آزاد (از نیرو) نیست. از این رو معیار حرکت یکنواخت فقط در مناطقی از چارچوب صادق است که به اندازه کافی از هر ماده جاذبی دور باشند.

از لحاظ تجربی، چارچوب ثوابت مدتها، با دقت قابل ملاحظه ای، لخت شمرده می شد و چارچوب مرجع اساسی برای قوانین نیوتون به شمار می رفت. امروزه که می دانیم حتی کهکشان ما می چرخد و عالم انبساط می یابد، می توان به جای ثوابت چارچوب صلبی را نشاند که در آن، از دید ما، همه کهکشانها در امتداد شعاع دور می شوند.

2-1 فضای مطلق نیوتون[1]

طبق نظر نیوتون، ذره در برابر حرکت یکنواخت، با هر سرعتی که باشد، مقاومت نمی کند، اما در برابر هر گونه تغییر در سرعت، یعنی شتاب، مثبت یا منفی، مقاومت می کند. این نکته را قانون دوم نیوتون دقیق بیان می کند: ثابت m در معادله $\vec{f} = m\vec{a}$ معیاری است برای سنجش لختی ذره، یعنی مقاومت آن در برابر شتاب. در اینجا شاید بپرسید: شتاب نسبت به چه؟ پاسخ این سوال از لحاظ عملی ساده است: نسبت به هریک از چارچوبهای لخت. اما این پاسخ از لحاظ فیزیکی و از لحاظ ذوقی به هیچ وجه خرسندکننده نیست و نیوتون از این نکته کاملا آگاه بود. چه چیزی باعث می شود که رده چارچوبهای لخت، به عنوان معیار بی شتابی، از دیگر چارچوبها متمایز شوند؟ نیوتون برای پاسخ به این پرسش اصل وجود فضای مطلق را وضع کرد. فرض بر این است که این فضای مطلق بر هر ذره ای اثر می گذارد، به نحوی که در برابر شتاب یافتن آن مقاومت می کند. نیوتون فضای مطلق را با چارچوب مرکز جرم منظومه شمسی یکی گرفت و پس از او دیگران آن را با چارچوب ثوابت یکسان دانستند. اما از لحاظ منطقی می توان آن را با هر چارچوب لخت دیگر یکی فرض کرد.

3-1 ایراداتی بر فضای مطلق نیوتون[1]

مفهومی که نیوتون از فضای مطلق داشت همواره منتقدانی داشته است، از هویگنس[1] و لایب نیس[2] و اسقف برکلی[3]، که حدودا معاصر نیوتون بودند، تا ارنست ماخ[4] در قرن نوزدهم و اینشتین در قرن بیستم. برخی براهینی که علیه فضای مطلق توسط این دانشمندان ارائه گردید، به شرح زیر است.

الف) فضای مطلق صرفا وضعی و من درآوردی است و هیچ چیزی را توضیح نمی دهد.

ب)هیچ راهی برای مشخص کردن فضای مطلق نیوتون از میان بی نهایت چارچوب لخت وجود ندارد.

1-Huygens 2-Leibniz 3-Berkeley 4-Mach

ج) تصور چیزی که بر اجسام دیگر تاثیرگذار است اما از اجسام دیگر تاثیر نمی پذیرد(فضای مطلق) با فهم علمی انسان در تعارض است. این الفاظ از اینشتین است اما او اصل فکر را به ماخ نسبت می دهد، و در هر حال اساسی ترین اشکالی است که به فضای مطلق گرفته شده است.

4-1 اتر ماکسول[1]

مدتی چنین می نمود که اتر ماکسول[1] می تواند با فضای مطلق نیوتون یکی شمرده شود و بنابراین جوابی به اشکالات بالا بدهد. فرض این نکته که چارچوب اتر ساکن بر چارچوب ثوابت منطبق است، معقول به نظر می آمد. موفقیت عظیم نظریه ماکسول تا حدود سال 1860، دیگران را به تلاش شدید برای یافتن شاهد مستقیمی بر وجود اتر، واداشت. به ویژه سعی شد که رانش اتر نسبت به زمین، یعنی سرعت زمین نسبت به اتر هنگام گردش به دور خورشید، تعیین شود. معروفترین این آزمایشها، آزمایش مایکلسون و مورلی[2] در سال 1887 بود که در آن یک علامت نوری یک بار در جهتی که برای رانش اتر فرض می شد و بار دیگر در جهت عمود بر آن، از چشمه ای به آینه ای تابانده می شد و بازتاب می یافت، و هدف این بود که به کمک روشهای ظریف تداخل، یک تفاوت زمانی را میان حرکت در این دو جهت اندازه گیری کنند. مثال معروف شناگری که در رودی شنا می کند، اساس این آزمایش را روشن می سازد: رفت و برگشت با شنا در عرض رودخانه کمتر از رفت و برگشت همان مسافت با شنا در امتداد جریان آب، طول می کشد. اما مایکلسون و مورلی موفق به ثبت هیچگونه تفاوت زمانی ای نشدند. چون سرعت مداری زمین 30 کیلومتر در ثانیه است، فارغ از نحوه جریان اتر در درون منظومه شمسی می توان انتظار داشت که رانش اتر دست کم در لحظه ای از سال، به این اندازه باشد، و دستگاه مایکلسون و مورلی به خوبی قابلیت آن را داشت که چنین رانشی را ثبت کند. آزمایشهای بسیار بعدی، که به همان دقت و ظرافت طرح شده بودند، همه در یافتن رانش اتر ناکام شدند. بنابراین کم کم معلوم شد که اتر ماکسول وجود خارجی ندارد و با این نتیجه وجود فضای مطلق نیوتون از لحاظ تجربی هم با مشکل روبرو شد.

5-1 اصل ماخ[1]

ارنست ماخ از جمله اصلی ترین منتقدین نیوتون به شمار می رود. در این قسمت به بیان دیدگاههای او در مورد لختی و فضا پرداخته می شود.

1-Maxwell 2-Michelson-Morley

الف)فضا به خودی خود وجود ندارد بلکه ذرات و فاصله میان آنهاست که مفهوم فضا را ایجاد می-کند.

ب) لختی هر ذره حاصل نوعی اثر بین آن ذره و بقیه ذرات عالم است.(که هنوز مشخص نشده است.)

ج) معیارهای موضعی بی شتابی ، از روی نوعی میانگین حرکات همه ذرات عالم تعیین می شوند.

د) تنها چیزی که در مکانیک اهمیت دارد حرکت نسبی همه جرمهاست. از این رو ماخ می نویسد: "... فرقی نمی کند که زمین را دور محور خود در گردش بدانیم، یا زمین را ساکن و ستارگان را به دور آن در گردش بپنداریم ... قوانین لختی باید به نوعی در نظر گرفته شوند که از فرض دوم همان نتایج فرض اول به دست آید."

اینشتین این مجموعه اندیشه ها را *اصل ماخ* نامید. تا آن زمان نظریه کمی که این اندیشه ها را توضیح دهد به وجود نیامده بود.

بنابر آنچه گفته شد معلوم می شود ماخ وجود نیروهای اینرسی را در عالم می پذیرد. از دیدگاه وی ستارگان ثابت و اجرام کیهانی دوردست دستگاه مرجع اینرسی(لخت) را می سازند. زیرا شتاب نسبت به ستارگان ثابت است که موجب بروز نیروهای اینرسی می شود.(و نه شتاب نسبت به یک فضای نا شناخته.) این نیرو نیرویی است ناشناخته که دارای ویژگیهایی به شرح زیر است:

الف) اندازه و جهت این نیرو بستگی به شتاب نسبی اجسام دارد.

ب) وابستگی آن به جرم به گونه ای است که نقش اجرام بسیار بزرگ واقع در فواصل دور را چنان بارز می کند که در مقایسه با تغییرات ظاهری موضعی حول یک دستگاه مادی دارای نقش غالب باشد.

ج) از لحاظ وابستگی به فاصله نیز برد این نیروها بسیار بلند است به گونه ای که اثر اجرام بسیار دور تحت تاثیر اجرام کوچک نزدیکتر واقع در پیرامون سیستم مورد نظر قرار نمی گیرد.[2]

6-1 نتایج اصل ماخ[1]

گاهی ادعا می شود که اصل ماخ محتوای فیزیکی ندارد، چون آزمایش کردن با عالم امکان پذیر نیست، نمی توان این اصل را آزمود. هیچگاه نمی توان حکم کرد که عامل ایجاد لختی، فضای مطلق است یا جرمهای کیهانی، و بنابراین انتخاب یکی از این دو، مساله ای است فلسفی، تا فیزیکی. اما چنین نیست و اصل ماخ به پاره ای پیشگوییهای آزمودنی که نظریه نیوتون قادر به پیشگویی آن نبود، رهنمون می شود:

الف) تذکر زیرین را از شیاما[1] داریم: در 1926 تحقیق شد که کهکشان ما، تا حدودی مانند یک دستگاه منظومه ای عظیم، می چرخد و دوره آن در نزدیکی خورشید 250 میلیون سال است. قبلا کانت[2] این چرخش را برای توجیه شکل تخت کهکشان (که راه شیری در آسمان گواه آن است) فرض کرده بود. همچنین اگر چنین چرخشی وجود نداشته باشد خورشید ظرف مدت 20 میلیون سال به مرکز کهکشان سقوط می کند. اگر ماخ از این چرخش آگاهی داشت اصل او، او را به فرض وجود یک عالم عظیم برون کهکشانی- که وجود آن تا مدتها بعد هنوز از راه مشاهده معلوم نشده بود- راهنمایی می کرد، تا معیار سکون در کهکشان فراهم شود. در حالیکه بر اساس نظریه نیوتون، از چرخش کهکشان هیچ نکته قابل توجهی نتیجه نمی شود.

ب)طبق اصل ماخ نباید انتظار داشت که یک ذره آزمون در یک جهان تهی از ماده، هیچ گونه لختی داشته باشد. وارد کردن جرمهای دیگر به این عالم، به تدریج به ذره لختی می بخشد. بنابراین، با تعمیم این موضوع، می توان انتظار داشت که لختی هر ذره در نزدیکی جرمهای بزرگ افزایش یابد و علاوه بر این، حتی می توان انتظار داشت که این لختی، بر حسب نحوه توزیع جرم، جهت دار هم باشد. اما معلوم شده است که لختی در بخشی از عالم که ما در آن زندگی می کنیم، تا درجه بالایی از صحت، همسانگرد است. از این نکته، کسانی نتایجی گرفته اند: نخست اینکه چون ماده در همسایگی دیوار به دیوار ما(خورشید، سیارات، و غیره) آشکارا ناهمسانگرد است، بنابراین بخش غالب اثر القای جرم باید از ماده دوردست ناشی شود. دوم اینکه ماده دوردست، یعنی عالم، باید نسبت به ما همسانگرد باشد. این نتایج، احتمال همسانگردی تقریبی عالم را، که از طریق نوری مشاهده شده است، افزایش می دهد.

این دو مثال به خوبی نشان می دهند که اصل ماخ محتوای فیزیکی دارد.

7-1 مقایسه نظریه نیوتون با اصل ماخ[1]

نیوتون برای توجیه فضای مطلق خود آزمایشهایی را پیشنهاد کرد که در آن پیامدهای چرخش یک جسم نسبت به فضای مطلق را توضیح می داد. یکی از این آزمایشها، آزمایش چرخش کره کشسان بود. یک کره کشسان چرخان، در ناحیه استوایی خود بیضوی شکل می شود. نیوتون به این پرسش که کره از کجا پی می برد که می چرخد و بنابراین باید شکل بیضوی به خود بگیرد، چنین پاسخ می داد که کره اثر فضای مطلق را حس می کند. اما پاسخ ماخ چنین بود که کره اثر جرمهای کیهانی را که به دور آن می- گردند حس می کند. به نظر نیوتون چرخش نسبت به فضای مطلق، نیروهای مرکزگریز را به وجود می- آورد که از نیروهای گرانشی کاملا متمایزند. به نظر ماخ نیروهای مرکزگریز، نیروهای گرانشی اند، یعنی

1-sciama 2-Kant

حاصل اثر جرم بر جرم اند.

مقایسه این دو نظریه در فضای تک ذره هم جالب به نظر می رسد. فرض کنید فقط یک ذره در عالم وجود دارد. در چنین حالتی هیچ نیرویی بر ذره وارد نمی شود. از قانون دوم نیوتون می توان نوشت:

$$m\vec{a} = 0 \qquad (1\text{-}1)$$

از دیدگاه نیوتون که لختی یک جسم را مقاومت آن جسم در برابر فضای مطلق تعریف کرده بود، می توان مقدار جرم وشتاب را به صورت زیر نتیجه گرفت:

$$\vec{a} = 0 \quad \text{و} \quad m \neq 0 \qquad (2\text{-}1)$$

در حالیکه از دیدگاه ماخ از آنجایی که عامل ایجاد لختی، وجود جرمهای موجود در عالم است، و در عالم تک ذره هیچ جرم ایجاد کننده لختی موجود نمی باشد، طبق روابط زیر، این جرم جسم است که صفر است، نه شتاب آن:

$$\vec{a} \neq 0 \quad \text{و} \quad m = 0 \qquad (3\text{-}1)$$

از آنچه گفته شد، تردیدی باقی نمی ماند که نظریات ماخ منجر به نتایجی می شود که با فیزیک سازگاری بیشتری دارد، در حالیکه نتایج نیوتون سازگاری چندانی با فیزیک ندارد.

8-1 اصل هم ارزی[1]

در نظریه های گرانشی وجود دو نوع جرم و برابری آنها سالها مورد بحث بوده است. یکی از این جرمها جرم لختی است که در قانون دوم نیوتون به صورت نسبت بین نیرو و شتاب در نظر گرفته می شود و مقاومت جسم را در برابر شتاب اندازه می گیرد. نوع دیگر جرم در معادله نیروی جاذبه میان دو جرم دیده می شود که جرم گرانشی نام دارد. در طبیعت نسبت جرم گرانشی و جرم لختی همه ذرات یکی است. تناسب این دو جرم را اووتوش[1] نخست در 1889 و سرانجام در 1922 با دقت 5 قسمت در 10^9، تحقیق کرد. او دو وزنه برابر را که جنسشان یکی نبود از دو بازوی یک ترازوی پیچشی دقیق که در امتداد شرقی- غربی قرار داشت آویزان کرد. چون نیروی گریز از مرکز بر جرم لختی وارد می شود، اگر جرم لختی دو وزنه برابر نباشد در هرجا از زمین در دو قطب و استوا جفت نیرویی تولید می شود. با تغییری زیرکانه در آزمایش اووتوش با استفاده از نیروی گریز از مرکز مداری زمین که راستای آن هر 12 ساعت یک بار عوض می شود و بنابراین قابل تقویت از طریق تشدید است رل[2]، کروتکوف[3] و دیک[4] (پرینستون، 1964) با دقت یک قسمت در 10^{11}، و حتی براگینسکی[5] و پانوف[6] (مسکو 1971) با دقت یک قسمت در 10^{12} برابری جرم گرانشی و لختی را نتیجه گرفتند.

1-Evotos 2-Roll 3-Krotkov 4-Dicke 5-Braginski 6-Panov

برابری جرم گرانشی و جرم لختی بیانگراصل هم ارزی ضعیف است. به بیان دیگر بر طبق اصل هم ارزی ضعیف در میدان گرانشی همه ذرات دارای شتاب یکسان هستند. بنابراین مسیری که یک ذره در فضا و زمان می پیماید به ذره ای که انتخاب می شود بستگی ندارد و همه اجرام در حال سقوط بر روی یک ژئودزیک حرکت می کنند. لذا در نظریه هایی که اصل هم ارزی ضعیف در آنها لحاظ شده است، معادله حرکت ذرات با استفاده از مشتق هموردای تانسور انرژی- تکانه به معادله یک ژئودزیک منجر می شود. بیان دیگر این اصل ایجاب می کند، هرآسانسوری که در حال سقوط آزاد باشد، دستگاه لختی را تشکیل دهد، به طوری که قوانین حرکتی نیوتون در آن برقرار باشد.

اصل هم ارزی قوی بقیه فیزیک را در این مورد با مکانیک همراه می کند. طبق اصل هم ارزی قوی همه چارچوبهای لخت موضعی بی چرخش و در حال سقوط آزاد، از لحاظ انجام همه آزمایشهای فیزیکی به طور موضعی هم ارزند. نتیجه مستقیم این اصل ثابت بودن ثابتهای بنیادی فیزیکی است.

9-1 ارتباط اصل ماخ با اصل هم ارزی[3]

در قسمت قبل دیدیم اینشتین به کمک اصل هم ارزی ضعیف، چارچوب های لخت را تعریف کرد. به این صورت که چارچوب های در حال سقوط آزاد در یک میدان گرانشی، چارچوب های لخت را تشکیل می دهند. در این چارچوب های لخت تمامی قوانین حرکتی نیوتون برقرار است.

طبق اصل ماخ در غیاب خورشید و سایر اجرام، چارچوب های لخت به کمک متوسط میدان گرانشی اجرام کیهانی یا متوسط چگالی ستاره های ثابت تعیین شوند. بنابراین در چنین شرایطی چارچوب های ساکن نسبت به ستارگان، چارچوبهای لخت را تشکیل می دهند. اما در نزدیکی جرم بزرگی مثل خورشید، چارچوب های لخت به سمت خورشید شتاب می گیرند. در این شرایط نیز قوانین حرکت در این چارچوب ها هنوز همان قوانین نسبیت خاص هستند و حضور خورشید هیچ تاثیری بر این قوانین ندارد. از این نظر اصل هم ارزی ضعیف با اصل ماخ در تضاد است.

فصل2
نسبیت عام

2-1معادلات میدان اینشتین[4]

معادلات میدان اینشتین را می توان با وردش از کنش اینشتین- هیلبرت بدست آورد. این کنش شامل یک بخش مادی به عنوان چشمه میدان گرانشی و یک بخش گرانشی است که به صورت زیر نوشته می شود:

$$I = I_G + I_M \qquad (1\text{-}2)$$

که در آن I_G کنش میدان گرانشی و I_M کنش توزیع مادی است. کنش میدان گرانشی و کنش توزیع مادی را می توان به شکل زیر نوشت:

$$I_G = \int_\Omega L_G(g_{\nu\lambda}, \partial_\mu g_{\nu\lambda})\sqrt{-g}\,d\Omega \qquad (2\text{-}2)$$

$$I_M = \int_\Omega L_M(g_{\nu\lambda}, \partial_\mu g_{\nu\lambda})\sqrt{-g}\,d\Omega \qquad (3\text{-}2)$$

که در آن L_G چگالی لاگرانژی میدان گرانشی و L_M چگالی لاگرانژی توزیع ماده است که روی عنصر حجمی چهار بعدی Ω انتگرالگیری می شوند.

چگالی لاگرانژی تابعی از تانسور متریک و مشتق اول آن است که با اسکالر ریچی R متناسب و به شکل زیر نوشته می شود:

$$L_G = \frac{R}{16\pi G} \qquad (4\text{-}2)$$

که در آن G ثابت گرانش است.

کنش (2-2) به شکل زیر نوشته می شود:

$$I_G = \frac{1}{16\pi G}\int_\Omega R\sqrt{-g}\,d\Omega \qquad (5\text{-}2)$$

وردش از کنش (2-1) نسبت به متریک به صورت زیر است:

$$\delta I = \delta I_G + \delta I_M \qquad (6\text{-}2)$$

با توجه به پیوست الف، وردش از کنش میدان گرانشی به صورت زیر است:

$$\delta I_G = \frac{1}{16\pi G}\delta\int_\Omega R\sqrt{-g}\,d\Omega$$
$$= \frac{1}{16\pi G}\left(\int_\Omega \sqrt{-g}\left(R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}R\right)\delta g^{\mu\nu}\,d\Omega + \int_\Omega \sqrt{-g}\,g^{\mu\nu}\delta R_{\mu\nu}\,d\Omega\right) \qquad (7\text{-}2)$$

در این رابطه انتگرال $\int_\Omega \sqrt{-g}\,g^{\mu\nu}\delta R_{\mu\nu}\,d\Omega$ به صورت زیر محاسبه می شود: