بسم الله الرحمن الرحيم

**دانشگاه آزاد اسلامی**
**واحد تهران مرکزی**

**دانشکده علوم پایه ، گروه فیزیک**

**پایان نامه برای دریافت درجه کارشناسی ارشد(M.Sc)**

گرایش:ذرات بنیادی و نظریه میدان ها

**عنوان:**
# بررسی سناریوی نیروی آنتروپی-گونه در یک سیاهچاله شوارتزشیلد ناجابجا

استاد راهنما:
دکتر سید حمید مهدی پور

استاد مشاور:
دکتر فرهاد اسماعیلی قدسی

پژوهشگر:
آرش کشاورز

تیرماه ۱۳۹۱

**ISLAMIC AZAD UNIVERSITY**

Central Tehran Branch

Faculty of Science - Department of Physics

"M.Sc" Thesis

On Elemntary particles and Field Theory

**Subject:**
Investigation of Entropic Force Scenario
in a Noncommutative Schwarzschild Black Holl

**Supervisor:**
Dr. Seyed Hamid Mehdipour

**Advisor :**
Dr. Farhad Esmaili Ghodsi

**By:**
Arash Keshavarz

**July ۲۰۱۲**

تشکر و قدردانی:
با سپاس فراوان از اساتید گرانقدر آقای دکتر سید حمید مهدی پور و آقای دکتر فرهاد اسماعیلی قدسی که از راهنمایی و مشاوره ایشان در این مطالعه بهره مند گشته ام.

تقدیم به

پدر و مادر عزیزم

فهرست مطالب

عنوان شماره صفحه

چکیده ..... ۱
مقدمه ..... ۲

**فصل اول : اصول نسبیت عام**

۱-۱- نقش اصول فیزیکی ..... ۵
۱-۲- اصل ماخ ..... ٦
۱-۳- جرم در نظریه نیوتن ..... ۱۱
۱-٤- اصل هم ارزی ..... ۱٤
۱-٥- اصل هم وردایی عام ..... ۱۷
۱-٦- اصل جفت شدگی کمینه گرانشی ..... ۱۸
۱-۷- اصل هم خوانی ..... ۱۸

**فصل دوم : ناجابجایی گرانش**

۲-۱- سیاهچاله های ناجابجا ..... ۲۱
۲-۲- مدل های هندسه فازی ..... ۲٤
۲-۳- راه حل های سیاهچاله در گرانش ناجابجا ..... ۳۰
۲-٤- هم ارز ناجابجای متریک شوارتزشیلد ..... ۳۱
۲-٥- به سوی سیاهچاله شوارتزشیلد القاء شده از ناجابجایی .....۳٤
۲-٦- معادله القاء شده کاملاً ناجابجای اینشتین ..... ۳۸
۲-۷- راه حل القاء شده ناجابجای شوارتزشیلد ..... ۳۹

**فصل سوم : نظریه هولوگرافیک ورلینده**

۳-۱- درباره منبع گرانش و قوانین نیوتن ..... ٤۲
۳-۲- نیروی آنتروپی ..... ٤۳
۳-۳- ضرورت قوانین نیوتن ..... ٤٥
۳-٤- نیرو و اینرسی ..... ٤٥
۳-٥- قانون گرانش نیوتن ..... ٤۷
۳-٦- سرشت و توانمندی استنتاج ..... ٤۸

۳-۷- اینرسی و پتانسیل نیوتن ..... ٤٩
۳-۸- اثرات ناشی از گرانش برای توزیع های عام ماده ..... ٤٩
۳-۹- معادله پواسون برای توزیع عام ماده ..... ٥٠
۳-۱۰- نیروی گرانش برای مکان های ذره دلخواه ..... ٥٢
۳-۱۱- اصل هم ارزی و معادلات اینشتین ..... ٥٣
۳-۱۲- قانون اینرسی و اصل هم ارزی ..... ٥٣
۳-۱۳- استنتاج معادلات اینشتین ..... ٥٥
۳-۱٤- نیرو روی مجموعه ای از ذرات در مکان های اختیاری ..... ٥٦

**فصل چهارم : رهیافت نیروی آنتروپی گونه در حضور یک سیاهچاله شوارتزشیلد ناجابجا**

٤-۱- آیا نیروی آنتروپی می تواند اصل هم ارزی نسبیت عام را نقض کند؟ ..... ٥٩
٤-۲- روش نیروی آنتروپی در یک سیاهچاله ناجابجا ..... ٦٠
٤-۳- بررسی نظریه ورلینده با وجود سیاهچاله ناجابجا براساس جرم لکه ای گاوسی ..... ٦١
٤-٤- بررسی نظریه ورلینده با وجود سیاهچاله ناجابجا براساس جرم لکه ای لورنتسی ... ٦٧

**مراجع** ..... ٦٩
**چکیده انگلیسی (Abstract)** ..... ٧٢

فهرست شکل ها

عنوان شماره صفحه

شکل ۱-۱ ..... ٦
شکل ۱-۲ ..... ۷
شکل ۱-۳ ..... ۸
شکل ۱-٤ ..... ۹
شکل ۱-٥ ..... ۱۳
شکل ۱-٦ ..... ۱٥
شکل ۱-۷ ..... ۱٦
شکل ۱-۸ ..... ۱٦
شکل ۱-۹ ..... ۱٦
شکل ۱-۱۰ ..... ۱۹
شکل ۲-۱ ..... ۳۷
شکل ۲-۲ ..... ۳۷
شکل ۲-۳ ..... ۳۸
شکل ۳-۱ ..... ٤٤
شکل ۳-۲ ..... ٤٦
شکل ۳-۳ ..... ٤۷
شکل ٤-۱ ..... ٦٤
شکل ٤-۲ ..... ٦٦

## چکیده

به تازگی ورلینده[۱] یک مدل جدید دوگانگی بین ترمودینامیک و گرانش پیشنهاد کرده است که منجر به ظهور پدیده دارای منشأ[۲] برای منبع گرانش و نسبیت عام می شود. در این تز، برخی از ویژگی های این مدل در حضور سیاهچاله شوارتزشیلد و سیاهچاله باردار ناجابجا را با انجام روش حالت های مختصات همدوس با نمایش ساختارهای لکه ای بررسی می کنیم.کمیت های مختلفی را به دست می آوریم، به عنوان مثال، دما، انرژی و نیروی آنتروپی. رویکرد ما به وضوح نشان می دهد که نیروی آنتروپی در کوچکترین سلول بنیادی صفحه هولوگرافیک با شعاع $r_0$ متوقف می شود. بر این اساس، می توانیم نتیجه گیری کنیم که بقایای سیاهچاله، بدون برهمکنش های گرانشی هستند. تمایز بین جرم گرانشی و جرم لختی در اندازه بقایای سیاهچاله مشاهده می شود که به معنای نقض اصل هم ارزی[۳] است.


---

۱- verlinde

۲- emergent

۳- Equivalence principle

**مقدمه**

می دانیم که سالهای سال است که نظریه مکانیک کوانتومی با گرانش سر سازگاری نشان نمی دهد و هنوز نظریه ای کامل و خود سازگار از گرانش کوانتومی ساخته نشده است. از طرفی تابش هاوکینگ[۱]، پیامد اثر کوانتومی متقابل میان میدانها در یک هندسه کلاسیک و یک افق رویداد می باشد. از اینرو، مطالعه جزئیات تابش هاوکینگ می تواند به عنوان یک راهنمای اساسی جهت ساخت نظریه گرانش کوانتومی محسوب شود. با در نظر گرفتن اهمیت این موضوع، بسیار مفید است که تفاسیر متنوع اثر هاوکینگ را از زوایای گوناگون مورد بررسی قرار دهیم، تا درک بیشتری نسبت به طبیعت سیاهچاله ها حاصل گردد.

تا به امروز، تابش هاوکینگ از طرق مختلفی مورد بررسی قرار گرفته است، که جملگی از پیچیدگی قابل توجهی برخوردارند. اما در سال ۲۰۱۰، ورلینده با بیانی ساده نشان داد قانون دوم نیوتن و قانون جهانی گرانش نشأت گرفته از یک سناریوی هولوگرافی می باشد. در حقیقت، می توان برهمکنش گرانشی را به صورت نوعی نیروی آنتروپی-گونه در قالب اصل هولوگرافی و قاعده هم بخشی[۲] تفسیر نمود. **این** فرمولبندی آنتروپی-گونه **از** گرانش و لختی، به سرعت در جهت مطالعه ترمودینامیک تمامی سیستم هایی که دارای خصیصه افق هستند (مانند سیاهچاله ها) به کار رفت و گسترش یافت. ما نیز در این میان، با توجه به اهمیت موضوع، می خواهیم به گسترش سناریوی هولوگرافی ورلینده با کمک اصلاحات ناجابجایی بپردازیم و با بهره گیری از قانون هم بخشی و اصل هولوگرافی، نیروی آنتروپی-گونه را در حضور سیاهچاله شوارتزشیلد ناجابجا محاسبه نماییم.

از نقطه نظری دیگر، اهمیت و ضرورت بررسی مسأله مورد نظر ما در فضای ناجابجایی علاوه بر استلزام وجود آن در فواصل بسیار کوچک، ( مفهوم غیر موضعی بودن فضا ) از میان برداشتن تکینگی ها در مسأله می باشد. هایزنبرگ[۳] که از جمله پدید آورندگان مکانیک کوانتومی می باشد، پیشنهاد کرد که یک ساختار ناجابجایی را می توان برای مطالعه فضا زمان در مقیاس طولهای بسیار کوچک به کار برد. علت علاقه مندی اخیر فیزیکدانان به هندسه ناجابجایی را باید در پیش بینی های نظریات کوانتومی، از جمله نظریه ریسمان جستجو کرد. این پیش بینی ها حاکی از آنند که اندازه گیری مکان با دقتی بیش از طول پلانک[۴] ممکن نیست و ناجابجایی تنها در سطح پلانک ظاهر می شود. از طرفی، پدیده تابش هاوکینگ از افق یک سیاهچاله یک پدیده بسیار جالب و مورد توجه

---

۱- Hawking

۲- Equipartition principle

۱- Heisenberg

۲- Planck

در میان فیزیکدانان در ۳۰ سال اخیر بوده است. از آنجائی که تولید یک میکرو سیاهچاله در آزمایشگاههای امروزی امری امکان پذیر است از اینرو پس از احداث آزمایشگاه برخورد دهنده بزرگ هادرونی (LHC) که در سوئیس و فرانسه واقع شده است و شروع آزمایشات آن در سال ۲۰۱۰ میلادی، امید به تولید چنین میکرو سیاهچاله هایی دور از انتظار نیست و یکی از عوامل مهم مشاهداتی در تأیید تولید و آشکارسازی میکرو سیاهچاله ها همان پدیده تابش هاوکینگ از سطح سیاهچاله به صورت ذراتی که قابلیت آشکار شدن در آشکارسازهای LHC نظیر ATLAS، ALICE و CMS را دارند می باشد. بنابراین پژوهشی دقیق در خصوص جزئیات پدیده تابش هاوکینگ از اهمیت بسزایی برخوردار است.

# (فصل اول)

## « اصول نسبیت عام »

### ۱-۱ نقش اصول فیزیکی

ما آماده ایم کار اصلی مان را ارائه دهیم ، بدین معنی که نسبیت خاص را به نظریه هایی که با گرانش ترکیب می شوند توسعه دهیم.

در این فصل به بررسی جزئیات اصول فیزیکی که اینشتین[۱] در تحقیقاتش برای نظریه عام بکار برده خواهیم پرداخت.

مکاتب فکری وجود دارند که این فرایند را غیر ضروری فرض کرده اند، اما بیشترشان معتقدند که کافی است تا نظریه را تعیین کنیم و نتایج آنرا بررسی کنیم. کمی مشکوک به نظر می رسد ، اما بررسی این اصول فیزیکی به آگاهی یافتن در مورد نظریه کمک می کند و درک آن را افزایش می دهد. با این حقیقیت که آنها برای اینشتین مهم بوده و به نظر کافی بود تا گنجایش آنها را توجیه کند. در غیر اینصورت کمک خواهند کرد تا بفهمیم چطور یکی از بزرگترین دستاوردهای ذهن بشر رخ داده است.

در حقیقت می توانیم حالت مشابه نسبیت عام را بپذیریم ، اما در انجام این کار ، درک اینکه چطور چارچوب نسبیت عام از چارچوب نظریه نیوتن یا نسبیت خاص متفاوت است را از دست داده ایم. بعلاوه اگر محدودیت ها را در نظریه شناسایی کنیم ، شانس بیشتری برای رهایی بخشیدن آن با در نظر گرفتن اساس فیزیکی نظریه، نسبت به سرهم بندی ساده ریاضیات داریم. شاید مهم باشد که اینشتین بیشتر زندگیش را به تلاش برای یکی کردن نسبیت عام و الکترومغناطیس با ابزارهای مختلف ریاضی گذاشت ، اما موفق نشد . پنج اصل که تلویحاً یا بطور آشکار انیشتین را در تحقیقاتش راهنمایی کرد **عبارتند از:**

۱-اصل ماخ[۲] ۲- اصل هم ارزی ۳-اصل هم وردایی[۳]

٤- اصل جفت شدگی کمینه گرانشی[٤] ٥- اصل هم خوانی[٥]

بعضی از اصول، بیشتر ماهیت فلسفی دارند و این خیلی شگفت آور نیست، اما تلاش خواهیم کرد تا فرمول دقیقی از آنها بسازیم . به امید اینکه سرانجام، اصول را در مقابل نظریه بررسی کنیم. اکنون اصول را یکی یکی بحث می کنیم.

---

۱- Inestein

۱- Mach's principle

۲- principle of covariance

۳- principle of minimal gravitational coupling

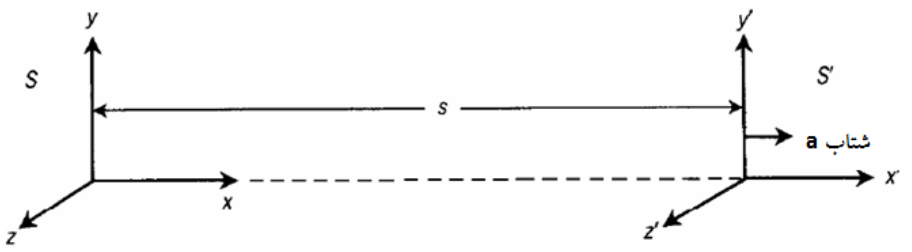
٤- corresponding principle

### ۱-۲ اصل مـــاخ

وجود دو اصل اول از درک ماهیت قانون نیوتن که خود از درستی بیشتری برخوردار است منشأ گرفته است. آیا قوانین نیوتن در تمام چارچوب های مرجع حفظ می شوند؟ همانطور که قبلا دیده ایم ، آنها در کلاس های ممتاز چارچوب به نام چارچوب های **لخت** هستند . بنابراین، این سوال مطرح می شود که آنها در چارچوب های غیر لخت چه شکلی به خود می گیرند؟

حالت قانون دوم نیوتن برای چهارچوب متحرک 's بررسی خواهد شد. 's با چهارچوب s و شتاب a مرتبط است.

به شکل ساده تر، فرض می کنیم که چهارچوب ها در شکل بندی استانداردی با شتاب در راستای محور معمول هستند ( شکل ۱-۱ )




(شکل ۱-۱): دو چارچوب مختصات $s$ و $s'$ که در آن $s'$ نسبت به $s$ با شتاب $a$ در حال حرکت است.

فرض کنیم که مشاهده کنندگان ساعت هایشان را وقتی با هم ملاقات دارند یکی می کنند ، سپس ارتباط بین فرمول ها به شکل زیر به دست می آیند:

$$x = x' + s \quad ، \quad y = y' \quad ، \quad z = z' \quad ، \quad t = t' \qquad (۱-۱)$$

از معادله اول در می یابیم که

$$\dot{x} = \dot{x}' + \dot{s}$$

با مشتق گیری دوباره

$$\ddot{x} = \ddot{x}' + \ddot{s} = \ddot{x}' + a \qquad (۲-۱)$$

ذره $m$ با حرکت در راستای محور x تحت تأثیر نیروی $F = (F,0,0)$ را در نظر بگیرید. آنگاه قانون دوم نیوتن می شود $F = m\ddot{x}$ ، از (۱-۲ ) داریم :

$$F = m\ddot{x}' + ma$$

از دیدگاه ناظر $S'$ ، این معادله می تواند در یک شکل استاندارد با عبارت جرمی که شتاب وابسته به $S'$ را در سمت راست زمان بندی می کند بازنویسی شود. آنگاه

$$F - ma = m\ddot{x} \qquad (۳-۱)$$

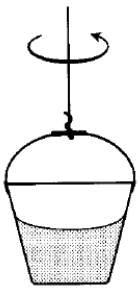
در مقایسه با $S$ ، ناظر $S'$کاهش نیرو را روی مقدار کاربردی $ma$ آشکار می سازد. این نیروی اضافی، نیروی لختی نامیده می شود. دیگر نیروهای لختی معروف به نیروهای کوریولیس و گریز از مرکز هستند.

نکته اینجاست که تمام نیروهای لختی ، دارای جرم به عنوان ثابت تناسب هستند.

روی هم رفته، نیروهای لختی ، فضا نوردان را در خاموشی فضا پیماها و چرخ های هوایی برای شکستن اثرات گریز از مرکز کمک می کند. آیا کافی است تا به توصیف این ها به عنوان نیروهای ظاهری یا اثرات چهارچوب مرجع بپردازیم؟

تعاملی بایدبرای این اثرات چشمگیر باشد. این سوال مطرح می شود که، ریشه فیزیکی نیروهای لختی چیست؟

نظریه نیوتن تلاشی برای جواب دادن به این سوال نکرده، دیدگاه ماخ همانطور که خواهیم دید این کار را انجام داده است .اجازه دهید سوال اساسی دیگری بپرسیم ، اگر قانون نیوتن تنها در چارچوب های لخت برقرار است، پس چطور می توانیم چارچوب های لخت را پیدا کنیم؟ نیوتن فهمید که این سوال اساسی بوده و تلاش کرد تا آن را با آزمایش هوشمندانه – آزمایش مشهور سطل- جواب دهد. اول از همه او وجود فضای کامل را فرض نمود: « فضای کامل» در ماهیت خود بدون ارتباط با هر چیز خارجی همیشه یکسان و بی تحرک باقی می ماند. ناظر لخت یک ناظر ساکن یا ناظری با حرکت یکنواخت وابسته به فضای کامل می شود. نیروهای لختی تنها وقتی که ناظر در شتاب کامل وابسته به فضای کامل باشد به وجود می آیند. آزمایش سطل ابزاری است برای آشکار سازی چنین حرکت هایی . برای دقت بیشتر ، آزمایش تعیین می کند که آیا سیستم در چرخش کامل وابسته به فضای کامل هست یا نه. آزمایش شامل سطل آویزان با محتوای آب است و طنابی که در چارچوب لخت قرار دارد. طناب پیچ می خورد و سطل آزاد است.



(شکل ۱-۲): سطل محتوی آب، متصل به طناب که در چارچوب لخت قرار دارد.طناب پیچ می خورد و سطل آزاد است.

حرکت بر ٤ مرحله تقسیم می شود:

۱) در ابتدا سطل می چرخد ، اما آب تکان نمی خورد و سطح آن یکنواخت باقی می ماند.

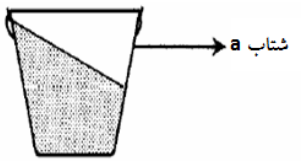
۲) سرانجام اثرات مالشی بین سطل و آب چرخش را با آب ارتباط می دهد. نیروی گریز از مرکز باعث جمع شدن آب اطراف کناره سطل می شود و سطح توگود می شود( شکل ۱-۲ ) . چرخش سریع آب موجب توگودی بیشتر سطح می شود.

۳) سرانجام سطل آرام به سمت پائین می آید و می ایستد، اما آب کماکان برای چند لحظه به چرخش خود ادامه می دهد و سطح آن توگود باقی می ماند.

٤) در نهایت، آب به سطح یکنواخت خود بر می گردد.

توضیح نیوتن از این آزمایش این است که خمیدگی سطح آب در۲و۳ از اثرات گریز از مرکز بخاطر چرخش آب در خصوص فضای کامل بوده است. این خمیدگی مستقیماً به بررسی های موضعی مثل چرخش سطل مرتبط نمی شود، در ۱ سطح یکنواخت است وقتی سطل می چرخد و در۳ منحنی است، وقتی سطل ثابت است. در این مسیر، نیوتن دستورالعمل هایی را برای تعیین اینکه آیا سیستم در چرخش کامل است یا نه ارائه داده است.

بحث های مشابه جهت سیستم هایی که به فضای کامل شتاب بخشیده به کار رفته است. در اینجا سطح درگوشه نسبت به افق مایل می شود. ( شکل ۱-۳)




(شکل ۱-۳): سطل محتوی آب که با شتاب خطی $a$ کشیده می شود. سطح آب در گوشه نسبت به افق مایل می شود.

به عبارت ساده تر ، تمام ناظران باید به سطلی از آب مجهز باشند. پس ناظرها لخت خواهند بود اگرو فقط اگر سطح آب صاف باشد.

ما اکنون به دیدگاهی که ماخ در سال ۱۸۹۳ پیشنهاد کرده بود رسیدیم،اگرچه نظرات مشابهی به وسیله بیشاپ برکلی[۱] در همان اوایل نمایان گشت. این دیدگاه نیمه فلسفی است. در مرحله آغازین، هیچ مصداقی از مفهوم حرکت تنها برای حرکت نسبی نبود؛ برای مثال، بر طبق نظر ماخ ،نمی توان گفت بدن در عالم تهی دارای جنبش است . بنابراین، هیچ چیزی نیست که حرکت بدن بتواند به آن رجوع کند. بعلاوه، در جهان پرجمعیت ، برهمکنش بین همه مواد در جهان وجود دارد (بالا و پایین برهمکنش گرانشی معمول) که منبع اثرات لختی است که در بالا بحث کردیم. در جهان، جرم مواد در آنچه ثوابت نامیده شده قرار دارد.

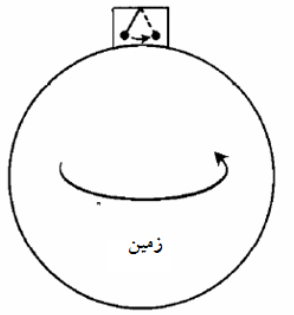
---

[۱] - Bishop Berkley

از دیدگاه ماخ ، مرجع لخت، مرجعی است که در حالت ممتاز حرکت وابسته به حرکت میانگین ثوابت است. بنابراین ، ثوابت از طریق جرمشان، پخش، و حرکت که چارچوب لخت موضعی را معین می کند وجود دارند. این ماهیت اصل ماخ است. برگردیم به آزمایش سطل، نیوتن دلیلی نداشت که چرا سطح وقتی در چرخش فضای کامل است بالا خم نمی شد. اما ماخ می گوید: خمیدگی پایه ها به این دلیل است که آب در چرخش نسبی نسبت به ثوابت است.

یک راه دیدن تفاوت های بین دو دیدگاه پرسیدن این سوال است که چه اتفاقی می افتد اگر سطل ثابت باشد و عالم (یعنی ثوابت) بچرخد؟ بنابراین، تمام حرکت ها نسبی هستند ،آنها از دیدگاه ماخ پیروی می کنند که سطح آب منحنی خواهد شد، در حالی که نظریه نیوتن چنین اثری را آشکار نکرد. از این رو، ماخ کل مواد را با هم جفت شده می بیند ، از این طریق نیروهای لختی ریشه فیزیکی در مواد دارند. سطل اثر جزیی روی جنبش آب دارد ، زیرا جرم آن خیلی کوچک است. از طرف دیگر ، ثوابت بیشتر ماده در جهان را در بر می گیرند و این حقیقت را خنثی می کنند که آنها در فاصله خیلی دوری هستند.

آونگی را در نظر بگیرید که در قطب شمال نوسان می کند(شکل ۱-٤).




(شکل ۱-٤): آونگی در چارچوب غیر چرخشی در حال نوسان است.

بر طبق نظریه نیوتن، آونگ در چارچوب وابسته به فضای کامل نمی چرخد. در این چارچوب زمین تحت جسم آویخته می چرخد. ناظری که روی زمین ثابت است آونگ را در حال چرخش خواهد دید. زمان صرف شده برای آونگ زمانیست که برای چرخش ۳٦۰ درجه زمین در فضای کامل صرف می شود. همچنین می توانیم اندازه بگیریم که زمین چه زمانی صرف گردش ۳٦۰ درجه نسبت به ثوابت می کند. واقعیت شگفت انگیز این است که با محدودیت های دقت آزمایشی، دو زمان برابرند. به بیان دیگر، ثوابت در حال چرخش در فضای وابسته به فضای کامل نیستند. از آنجایی که چارچوب های لخت آنهایی هستند که ثوابت در آنها نمی چرخند، در نظریه نیوتن، هیچ اولویتی برای پیش بینی آن نیست و به طور ساده یک انطباق است. هرگاه ما انطباق را در نظریه فیزیکی پیدا می کنیم ، باید به آن نظریه مشکوک شویم که حاکی از آن است که بعضی چیزهای اساسی در حال جریان

است. از دیدگاه ماخ ، این ثوابت هستند که چارچوب های لخت را مشخص می کنند و نتیجه دقیقاً همان است که انتظار آن را داشتیم .

از طرف دیگر، نیروهای لختی (حداقل در درستی آزمایشات) به واسطه جرم های موضعی مثل زمین یا خورشید بی تأثیر هستند. بنابراین ما نباید اثرات لختی را برای نوسان محسوس در نظر بگیریم.

حرکت یک ذره را در یک جهان خالی در نظر بگیرید. آنگاه، با توجه به دیدگاه ماخ، از آنجا که هیچ موجود مزاحمی وجود ندارد ذره نمی تواند آثار لختی را تجربه نماید. اکنون ذره دیگر از جرم کوچک را معرفی می نماییم. معرفی این جرم خیلی کوچک خواص لختی از اولین ذره را به مقدار متعارفش بر می گرداند. اثر آن می تواند خیلی جزئی باشد. این نشان می دهد که بزرگی نیروی لختی روی جسم به وسیله جرم عالم و پخش آن معین می شود. مخصوصاً اگرجهان دارای خواص مشابه فیزیکی نباشد، آثار لختی هم دارای خواص مشابه نخواهد بود.به عنوان مثال، اگر یک دلیل قابل قبول برای بودن ماده در مسیری خاص باشد، پس اثرات لختی به مسیر وابسته خواهد بود.

آزمایشاتی بطور مجزا به وسیله هیوز و درِوِر[1] در سال ۱۹۶۰ انجام گرفت که ثابت کرد جرم به نسبت حداقل ۱ به $۱۰^{۱۸}$ دارای خواص مشابه است. آزمایش هیوز و درِوِر درست ترین آزمایش خنثی نام گرفت که تاکنون انجام گرفته است . این نتایج خنثی به دو شکل تفسیر می شود، یا اصل ماخ غیر قابل دفاع است یا جهان بسیار ایزوتروپی است. مدارکی از منابع دیگر وجود داردکه پیشنهاد می کند جهان ما در مقیاس بزرگ دارای خواص مشابه زیاد است.

در نظریه نیوتن ، پتانسیل گرانشی $\varphi$ در نقطه ای به فاصله $r$ از مبدأ ، به علت وجود ذره ای به جرم $m$ در مبدأ $\varphi = -Gm/r$ است، که $G$ ثابت گرانش نیوتن است. پتانسیل در هر نقطه می تواند به خودی خود وابسته به خواص جسم باشد. اگرچه از دیدگاه ماخ ، جرم $m$ بستگی به حالت جهان دارد، از این رو ، نسبت این دو اثر مانند $G$ شامل اطلاعات در مورد جهان است، خصوصاً اگر جهان در حالتی متفاوت درمبدأ جهان بود، ثابت $G$ مقدار متفاوتی داشت. جهان تکاملی ایجاب می کند که $G = G(t)$ ، یعنی تابعیتی زمانی از مبدأ پیدایش جهان دارد . اگر جهان جنبه یکسانی از هر نقطه را ارائه نمی داد (به جز اختلالات داخلی ) ، $G$ از نقطه ای به نقطه دیگر متغیر بود. نظریه ماخ اساساً باید به اشخاص فرصت محاسبه $G$ از دانش ساختار جهان را بدهد.

حالت کنونی اصل ماخ چیست؟ بزرگترین محدودیت این اصل این است که یک رابطه کمّی برای برهمکنش مواد نمی دهد. به طور مشابه، می توان بحث کرد که نظرات ماخ واقعاً به فهم اینکه چرا فرق اساسی بین حرکت شتاب دار و بدون شتاب در طبیعت ظاهر می شود کمک نمی کنند، یعنی

---

[1] - Hughes & Drever

توضیح نمی دهند که چرا برهمکنش باید مستقل از سرعت باشد اما به شتاب وابسته باشد. بعضی منتقدان معتقدند که ماخ تنها فضای کامل نیوتن را به وسیله ستاره های دور دست جایگزین کرده و چیز جدیدی نیاموخته است . این اصل از اهمیت فراوانی برای اینشتین که تلاش کرده تا آن را با نظریه عام خود ترکیب نماید برخوردار بود.

ما این بخش را با تلاش در درستی عبارات اصل ماخ به پایان رساندیم، اصلی که به فرمول نسبیت عام مربوط بود. اجازه دهید تا به مسیر موثری که ذرات و شعاع نور روی آن به عنوان هندسه جهان سیر دارند رجوع کنیم. اولین عبارت تلاش دارد تا قسمت اساسی نظرات ماخ را ترکیب نماید.

*توزیع مواد ، هندسه را نشان می دهد.

عبارت دیگر به این اعتقاد بر می گردد که غیر ممکن است تا در مورد حرکت یا هندسه عالم تهی صحبت کرد، بنابراین ، هیچ راه حلی در پاسخ به جهان تهی نیست.

** اگر ماده نباشد، هندسه ای هم نیست.

عبارت نهایی به جهانی بر می گردد که شامل یک جسم است، از این رو چیزی برای بر هم کنش با جسم وجود نداردو هیچ خواص لختی ندارد.

*** جسم در جهان تهی دیگر دارای خواص لختی نیست.

**۱-۳ جرم در نظریه نیوتن**

تا کنون خیلی ساده در مورد جرم جسم $(m)$ صحبت کرده ایم. حتی در نظریه نیوتن، می توانیم سه جرم به هر جسم نسبت دهیم که هر یک جزئیات متفاوتی از جسم را توصیف می کنند. اسم ، نماد گذاری و توصیف عمومی آنها عبارتند از :

۱) جرم لختی $m_I$ ، که اندازه مقاومت جسم در برابر حرکت است .

۲) جرم گرانشی انفعالی $m_P$ ، که اندازه عکس العمل جسم برای یک میدان گرانشی است .

۳) جرم گرانشی فعال $m_A$ ، که مقدار استحکام منبع آن برای تولید میدان گرانشی است.

ما در آینده این ها را به ترتیب بحث خواهیم کرد.

جرم لختی $m_I$ کمیتی است که در قانون دوم نیوتن اتفاق می افتد . این جرم ، اندازه مقاومت جسم در تغییر حرکت است که به آن اینرسی گویند. قانون دوم نیوتن به طور دقیق تر عبارتست از:

$$F = \frac{d(m_I v)}{dt} \qquad (۱-۴)$$

یا

$$F = m_I a \qquad (۱-۵)$$

برای جرم لختی ثابت $m_I$. نکته اینجاست که از راه قیاسی، مستقیماً چیزی برای انجام با گرانش ندارد، هر چند دو جرم دیگر این کار را انجام می دهند .

جرم گرانشی انفعالی $m_P$، پاسخ جسم برای قرار گرفتن در میدان گرانشی را اندازه می گیرد. اجازه دهید پتانسیل گرانشی در بعضی نقاط با $\varphi$ مشخص شود. پس ، اگر $m_P$ در این مکان قرار گیرد، نیرویی را که تجربه می کند خواهد بود:

$$F = -m_P \nabla \varphi \qquad (۶-۱)$$

جرم گرانشی فعال $m_A$ استحکام میدان گرانشی تولید شده به وسیله خود جسم را اندازه گیری می کند. اگر $m_A$ در مبدأ قرار گیرد ، پتانسیل گرانشی در هر نقطه به فاصله $r$ از مبدأ می شود:

$$\varphi = -\frac{Gm_A}{r} \qquad (۷-۱)$$

خواهیم دید که چطور این سه جرم به چهارچوب نظریه نیوتن مربوطند. ما از نتایج قابل مشاهده شروع می کنیم که اگر ما نیروهای غیر بنیادی را نادیده بگیریم، مثل مقاومت هوا، آنگاه دو جسم که از ارتفاع یکسان انداخته می شوند، با هم به زمین می رسند. به بیان دیگر، آنها شتاب یکسانی را صرف نظر از آرایش داخلی متحمل خواهند شد. این نتیجه تجربی به آزمایش معروف گالیله در برج پیزا مشهور است.

البته، شما با چکش و پَر به این نتیجه دست پیدا نخواهید کرد، زیرا مقاومت هوا سقوط پَر را به تأخیر می اندازد. این آزمایش در ماه ممکن خواهد بود،چون در ماه هوا نیست. در واقع، خوانندگان، وقایع فرود در ماه را به یادمی آورند ، وقتی فضانورد تلاش کرد تا این آزمایش را انجام دهد و نتایج پیش بینی شده را تأیید کرد.

فرض می کنیم دو ذره از جرم لخت $m_{I1}$ و $m_{I2}$ و جرم گرانشی منفعل $m_{P1}$و $m_{P2}$ از ارتفاع یکسانی در میدان گرانشی سقوط کنند. آن وقت داریم:

$$m_{I1}a_1 = F_1 = -m_{P1}\nabla\varphi,$$

$$m_{I2}a_2 = F_2 = -m_{P2}\nabla\varphi.$$

نتایج مشاهده ای $a_1 = a_2$ است ، با توجه به اینکه داریم :

$$\frac{m_{I1}}{m_{P1}} = \frac{m_{I2}}{m_{P2}}$$

با تکرار این آزمایش با دیگر اجسام می بینیم که نسبت $\frac{m_I}{m_P}$ برای هر جسمی برابر است با یک ثابت جهانی ، مانند $\alpha$ . با انتخاب مناسب واحدها می توانیم بدون از دست دادن عمومیت $\alpha$را ۱ در نظر بگیریم، به این نتیجه می رسیم که: