بسم الله الرحمن الرحيم

دانشگاه آزاد اسلامی

واحد تهران مرکزی

دانشکده علوم، گروه فیزیک

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

گرایش : نجوم

عنوان :

مقایسه خواص آماری تهی جاها در نقشه های خوشه‌های کهکشانی و کهکشان‌ها

استاد راهنما:

دکترسپهر اربابی بیدگلی

استاد مشاور:

دکترخسرو معدنی پور

نگارش:

مرجان نیکوفرد

زمستان ۱۳۹۰

تقدیم به :

پدر و مادر عزیزم که از ابتدای این راه مشوق و همراهم بودند و

همیشه دلسوزانه مرا در مشکلات این مسیر یاری دادند

و همسرم که در طی کردن این مرحله در کنارم بود.

تشکر و قدرانی:

با تشکر و سپاس فراوان از جناب آقای دکتر اربابی که در تمام مراحل تحقیق الهام بخش بنده بودند و راهنمایی‌هایشان در سرتاسر تحقیق همراه و همیار من بود.

با تشکر و سپاس فراوان از برادر و خواهر عزیزم که در مراحل تحقیق مرا از راهنمایی‌هایشان بهره‌مند ساختند ودر فازهای پایانی کمک شایانی به اینجانب نمودند.

با تشکر و سپاس فراوان از جناب آقای دکتر معدنی پور که راهنمایی‌های گرانقدرشان موجب شد مسیر درست را بیابم .

تعهد نامه اصالت پایان نامه کارشناسی ارشد

اینجانب مرجان نیکوفرد دانش آموخته مقطع کارشناسی ارشد نا پیوسته به شماره دانشجویی ۸۷۰۰۰۲۵۳۶۰۰ در رشته فیزیک که در تاریخ ۹۰/۱۱/۲۹ از پایان نامه خود تحت عنوان : مقایسه خواص آماری تهی جاها در نقشه های خوشه‌های کهکشانی و کهکشان‌ها با کسب نمره ۱۸ و درجه عالی دفاع نموده ام بدینوسیله متعهد می شوم :

۱- این پایان نامه حاصل تحقیق و پژوهش انجام شده توسط اینجانب بوده و در مواردی که از دستاوردهای علمی و پژوهشی دیگران (اعم از پایان نامه ، کتاب ، مقاله و ...) استفاده نموده ام ، مطابق ضوابط و رویه های موجود ، نام منبع مورد استفاده و سایر مشخصات آن را در فهرست ذکر و درج کرده ام .

۲- این پایان نامه قبلاً برای دریافت هیچ مدرک تحصیلی (هم سطح ، پایین تر یا بالاتر) در سایر دانشگاهها و موسسات آموزش عالی ارائه نشده است .

۳- چنانچه بعد از فراغت از تحصیل ، قصد استفاده و هرگونه بهره برداری اعم از چاپ کتاب ، ثبت اختراع و ... از این پایان نامه داشته باشم ، از حوزه معاونت پژوهشی واحد مجوزهای مربوطه را اخذ نمایم .

۴- چنانچه در هر مقطع زمانی خلاف موارد فوق ثابت شود ، عواقب ناشی از آن را بپذیرم و واحد دانشگاهی مجاز است با اینجانب مطابق ضوابط و مقررات رفتار نموده و در صورت ابطال مدرک تحصیلی ام هیچگونه ادعایی نخواهم داشت .

نام و نام خانوادگی : مرجان نیکوفرد

تاریخ و امضاء :

بسمه تعالی

درتاریخ : ۹۰/۱۱/۲۹

دانشجوی کارشناسی ارشد خـانم مرجـان نیکـوفرد از پایـان نامـه خـود دفـاع نمـوده و بـا نمـره ۱۸ هجده مورد تصویب قرار گرفت .

امضاء استاد راهنما

چکیده:

تهی‌جاها اجزای مهمی از جهان در مقیاس مگاپارسک هستند. بررسی آنها می‌تواند اطلاعات قابل توجهی در زمینهٔ نحوهٔ شکل گیری خوشه‌های کهکشانی، کهکشان‌ها و ساختار درونی آنها و حتی نوع ماده تاریک در اختیار ما قرار دهد. مقایسهٔ تهی‌جاها در بین کهکشان‌ها می‌تواند اطلاعات ما را در زمینهٔ نوع بر هم کنش میان کهکشان‌ها افزایش دهد.

از اینرو در این پایان نامه برای بررسی خواص آماری تهی‌جاها در ساختارهای بزرگ مقیاس خوشه‌های کهکشانی در سه بعد از تابع احتمال تهی جاها(VPF) استفاده شده است. این مطالعه بر روی داده‌های کاتالوگ MaxBCG که زیر مجموعه ای از نقشه SDSS است و در آن ۱۳۸۲۳ خوشهٔ کهکشانی معرفی شده، انجام شده است. این خوشه ها از یک نمونهٔ محدود به حجم در یک محدوده ۰,۵ مگاپارسک مکعبی از فضا و در مساحتی ۷۵۰۰ درجه مربعی از آسمان با انتقال به سرخ‌هایی در محدودهٔ ۰,۱ تا ۰,۳ انتخاب شده‌اند. برای قابل استفاده شدن داده‌های خام نقشه برای یافتن تهی‌جاها و محاسبهٔ VPF، تصحیحات مختلفی شامل برش داده،تبدیل بُعد و میل به طول و عرض و تبدیل انتقال به سرخ به فاصله در دستگاه مختصات همراه روی آنها انجام شده است.

به منظور ارزیابی قابلیت تابع VPF در تشخیص ساختارهای بزرگ مقیاس نتایج به دست آمده در خوشه‌های کهکشانی با تابع احتمال تهی‌جا در توزیع‌های تصادفی که فاقد هر گونه ساختار هستند،مقایسه شده است. نتیجهٔ مقایسه نشان می‌دهد که تابع VPF توان تشخیص ساختار بزرگ مقیاس را تا فواصل ۲۰ مگاپارسک دارد که چندین برابر قطر بزرگ‌ترین خوشه-هاست. از این رو VPF که در این رساله اَلگوریتم محاسبه آن نیز معرفی شده است،روش آماری مناسبی برای مقایسهٔ داده‌های رصدی و شبیه‌سازی‌های ساختار بزرگ مقیاس به شمار می‌رود.

کلمات کلیدی: تهی جاها، کهکشان ، نقشه های انتقال به سرخ، تابع احتمال تهی جا، ساختار بزرگ مقیاس

بسمه تعالی

فهرست :

فصل اول؛مقدماتی از کیهان شناسی ۱
مقدمه ۱
۱-۱ نسبیت عام ٤
۱-۲ معادله‌ی انیشتین ٦
۱-۳ اصول نسبیت عام ۸
۱-۳-۱ اصل هم‌ارزی ۸
۱-۳-۲ اصل ماخ ۱۰
۱-۳-۳ اصل هم وردایی عام ۱۰
۱-۳-٤ اصل جفتیدگیِ کمینهٔ گرانشی ۱۱
۱-۳-۵ اصل هم‌خوانی ۱۱
۱-٤ هندسه و گرانش ۱۱
۱-٤-۱ منابع گرانش: ۱۱
۱-۵ کیهان شناسی ۱۲
۱-۵-۱ معادلات فریدمان ۱۳
۱-۵-۱-۱ فرضیات معادله ۱۳
۱-۵-۱-۲ معادلات ۱٤
۱-۵-۱-۳ پارامتر چگالی ۱٦
۱-٤-۵-۱ حل معادلهٔ فریدمان ۱۸
۱-٦ انتقال به سرخ ۱۹
۱-٦-۱ اندازه گیری ، توصیف و تفسیر ۲۱
۱-٦-۲ انتقال به سرخ گرانشی ۲۲
۱-٦-۳ انتقال به سرخ کیهانی ۲۳
فصل دوم؛کیهان شناسی رصدی ۲۷
۲-۱ کهکشان ها (Galaxies) ۲۷

۲-۲ گونه‌های کهکشان از دید نمای ظاهری ۳۰
۲-۲-۱ کهکشان نامنظم ۳۰
۲-۲-۲ کهکشان مارپیچی ۳۰
۲-۲-۳ کهکشان مارپیچی میله‌ای ۳۱
۲-۲-٤ کهکشان بیضوی ۳۱
۲-۳ گروه ها و خوشه‌های کهکشانی ۳۳
۲-۳-۱ گروه‌های کهکشانی ۳۳
۲-۳-۲ خوشه‌های کهکشانی ۳٤
۲-٤ ساختار کهکشان ها ۳۵
۲-٤-۱ صفحهٔ کهکشان ۳۵
۲-٤-۲ هالهٔ کهکشان ۳٦
۲-٤-۳ هستهٔ کهکشان ۳٦
۲-۵ منشأ کهکشان‌ها ۳٦
۲-٦ تحول کهکشان‌ها ۳۸
فصل سوم ؛ تهی جاها ٤۲
مقدمه ٤۲
۳-۱ تاریخچهٔ تهی‌جا ٤۲
۳-۲ تعاریف تهی‌جا ٤۳
۳-۳ بررسی مقالات ٤۵
۳-۳-۱ Voids in the distribution of galaxies: an assessment of their significance and derivation of a void spectrum; G. Kauffmann & A.P.Fairall 1991 [8] ٤٦
۳-۳-۲ Statistics of Voids in the 2dF Galaxy Redshift Survey; Patiri, Rijo et al. 2006[9] ٤۷
۳-٤ کهکشان‌های تهی‌جا ٤۸
۳-۵ فهرستی از خصوصیات تهی‌جاها[۲] ٤۹
۳-٦ تابع احتمال تهی‌جاها ۵۰
۳-٦-۱ خصوصیات تابع احتمال تهی‌جا [۱٤] ۵۱
۳-٦-۲ تابع احتمال تهی جا در نقشه‌های کهکشانی ۵۲

۳-۷ محاسبهٔ تابع چگالی احتمال تهی‌جاها [۲٤] ۵۳
فصل چهارم ؛نمونه‌های رصدی ۵٤
٤-۱ نقشه‌های ساختار بزرگ مقیاس ۵٤
٤-۱-۱ تاریخچه ۵٤
٤-۱-۲ نقشه‌های انتقال به سرخ ۵٦
٤-۲ تعدادی از مهمترین نقشه‌های ساختار بزرگ مقیاس ۵۷
٤-۲-۱ Center for Astrophysics Surveys(CfA1&2) ۵۷
٤-۲-۲ Las Companas Redshift Survey (LCRS) ۵۹
٤-۲-۳ Solan Digital Sky Survey (SDSS) ٦۰
٤-۲-٤ Deep Extragalactic Evolutionary Probe (DEEP) ٦٦
٤-۲-۵ Two Mass ALL Sky Survey (2MASS) ٦٦
٤-۲-٦ The 2degree Field Galaxy Redshift Survey (2dF GRS) ٦۷
٤-۲-۷ The 6degree Field Galaxy Survey (6dF GS) ٦۹
فصل پنجم؛ تحلیل داده‌ها ۷۱
مقدمه ۷۱
۵-۱ آماده سازی داده‌ها ۷۱
۵-۱-۱ تبدیل بُعد و میل به طول و عرض در دستگاه دکارتی ۷۲
۵-۱-۲ تبدیل انتقال به سرخ به فاصله [۳٦] ۷٤
۵-۲ انتخاب نمونه‌ها ۷٦
۵-۳ برش داده‌ها ۷۷
۵-٤ شبکه بندی داده‌ها ۷۸
۵-۵ یافتن تابع احتمال تهی‌جا ۷۹
۵-٦ استخراج مشخصات آماری ۸۰
فصل ششم؛بررسی نتایج ۸۱
٦-۱ مقایسه با داده‌های تصادفی ۸۱
٦-۲ توزیع خوشه‌های کهکشانی ۸۳
٦-۳ مقایسهٔ نتایج با داده‌های کهکشان‌ها ۸٤
پیوست الف؛ دستگاه‌های مختصات ۸۵

۱-الف) مختصات جغرافیایی..... ۸۵
۲-الف) سامانه‌های موقعیت یابی نجومی ۸۷
۱-۲-الف) دستگاه مختصات افقی (ارتفاع _سمتی)..... ۸۸
۲-۲-الف) دستگاه مختصات استوایی..... ۸۹
۳-۲-الف دستگاه مختصات دایرة البروجی..... ۹۱
٤-۲-الف) دستگاه مختصات کهکشانی..... ۹٤
۳- الف) تبدیل مختصات از یک دستگاه به دستگاه دیگر..... ۹۵
پیوست ب؛ مفاهیم آماری..... ۹۷
ب-۱) مفاهیم پایهٔ علم آمار..... ۹۷
ب-۱-۱) تعریف آمار..... ۹۷
ب-۲) مطالعهٔ توصیفی داده‌های طبقه بندی نشده ۹۹
ب-۲-۱) شاخص‌های عددی ۹۹
ب-۳) توصیف مقداری مشاهدات طبقه بندی شده..... ۱۰۲
ب-۳-۲) پارامترهای تعیین انحراف از قرینگی..... ۱۰۳
ب-۳-۳) پارامترهای تعیین انحراف از کشیدگی..... ۱۰۳
ب-٤) توابع احتمال گسسته ۱۰٤
ب-٤-۱) مفهوم احتمال(P)..... ۱۰٤
ب-۵) توابع احتمال پیوسته..... ۱۰٦
ب-۵-۱) احتمال در توابع پیوسته..... ۱۰٦
ب-۵-۳) میانگین یا اُمید..... ۱۰٦
ب-۵-۵) توزیع نرمال یا گوسی..... ۱۰۸
منابع ۱۱۱

فصل اول؛مقدماتی از کیهان شناسی

مقدمه

در قرون اخیر، فیزیک و ستاره شناسی به وسیلهٔ مشاهدهٔ علمی و آزمایش نقش اصلی را در شکل دادن فهم ما از جهان ایفا می کنند. کلمهٔ جهان برای مشخص کردن کل فضا و تمام محتویات آن به کار می رود و کیهان شناسی در واقع مطالعهٔ کل جهان از ابتدایی ترین زمان(انفجار بزرگ[۱]) و در بزرگ‌ترین مقیاس‌هاست. از ابتدا تا انتهای عالم، تاریخ جهان به وسیلهٔ قوانین فیزیک توصیف شده است و به همین دلیل یکی از شاخه های کیهان شناسی، کیهان شناسی فیزیکی است که به مطالعهٔ ساختارهای بزرگ مقیاس و دینامیک جهان می پردازد و مرتبط با پرسش‌های اساسی ما دربارهٔ نحوهٔ شکل گیری و تحوّل جهان است.

کیهان شناسی به عنوان یک علم از قانون کپرنیک[۲] سرچشمه می‌گیرد، این قانون عنوان می‌کند که اجسام سماوی از مکانیک نیوتنی و قوانین فیزیکی ایده آلی که روی زمین برقرار است پیروی می‌کنند. به این قوانین در حال حاضر "مکانیک سماوی"[۳] گویند. کیهان شناسی فیزیکی از

---

[۱] Big Bang

[۲] Copernicus laws

[۳] Celestial mechanics

قرن بیستم با گسترش نظریهٔ نسبیت عام انیشتین و توانایی مشاهدهٔ اجرام با فاصله‌های بسیار دور آغاز شد.

قسمت عمدهٔ تئوری کیهان شناسی مدرن بر پایهٔ این اصل کیهان شناسی بنا شده است که :

" عالم در مقیاس بزرگ، در تمام جهت ها و از تمام مکان ها کاملاً یکسان است."

البتّه یکسانی جهان به همان شکل یکسانی گاز درک شده است. این قانون برای تمام جهان با جزئیات به کار برده نمی‌شود بلکه فقط برای جهانی با پراکندگی سلولی با میانگین در حد 10^8 تا 10^9 سال نوری که به اندازهٔ کافی بزرگ باشد تا در برگیرنده تعداد زیادی خوشه های کهکشانی باشد، به کار می‌رود. به نظر می‌رسد که جهان اطراف ما تقارن کروی دارد. بنابراین، اصل کیهان شناسی همسان‌گردی (یکنواختی در همه جهات) را شامل می‌شود. دلیل اصلی ما برای پذیرفتن این اصل آن است که به ما اجازه می‌دهد که داده‌های محدود موجود را که توسط مشاهدات نجومی به دست آمده است، استفاده کنیم. اگر ما هر تصوّر ضعیف‌تری را در نظر بگیریم، همان طور که در مدلهای غیرهمسان‌گرد در نظر گرفته شده است، آنگاه متریک معادلات ما شامل توابع نامعین بسیار زیادی می‌شد که داده‌های ما متأسفانه برای اندازه‌گیری متریک کافی نبود. پذیرفتن همگنی و همسان‌گردی جهان ایجاب می‌کند که جهان نه مرزی داشته باشد و نه مرکزی، زیرا وجود مرز ناقض فرض همگنی و وجود مرکز، ناقض فرض همسان‌گردی عالم است.[۱]

در دنیای واقعی این که بتوانیم داده های ارزشمندی از هر نقطهٔ دلخواه ما از فضا تهیه کنیم، غیرممکن است. نتیجهٔ مشاهدات نجومی، آزمایش‌های فیزیکی و شبیه سازی‌های کامپیوتری اغلب بر داده‌هایی در دو یا سه بعد متمرکز است که این داده ها معمولاً شامل میدان چگالی کهکشان، میدان چگالی مادهٔ تاریک یا میدان سرعت خاصه می‌شوند.

برای بررسی این عالم، با توجه به هدف ما از مطالعهٔ روش‌های متفاوتی وجود دارد:

۱- **تحلیل آماری** : در این روش اطلاعات در دسترس به صورت یکسری پارامترها یا توابع محدود می‌شوند، تا بتوانند با پیش بینی‌های تئوری مقایسه شوند.

۲-**شناسایی اجزاء**: شناسایی توزیع ماده در اجزای شبکهٔ کیهانی که شامل خوشه‌ها، رشته‌ها و تهی-جاهاست برای درک ساختار جهان و ارتباط بین مشاهدات و مدل‌های تئوری اهمیت زیادی دارد.

۳-بازسازی ساختار: برای تعیین ساختار کیهان باید بهترین بازسازی را از چگالی کهکشان و میدان‌های سرعت داشته باشیم.

ما در این پایان نامه از روش تحلیل آماری استفاده می‌کنیم.

در بررسی جهان به طور کلی ساختار کهکشان و توزیع جرمی کهکشانی به چهار دسته تقسیم می‌شوند: خوشه های کهکشانی[٤]، رشته های کهکشانی[٥] ، صفحات یا دیوارها[٦]، تهی جاها[٧]. این ساختارها از روی نقشه های انتقال به سرخ به دست آمده است. تا زمانی که از نقشه‌های دو بعدی استفاده می‌شد این امکان وجود نداشت که رشته‌ها و دیوارها را تشخیص دهیم زیرا ممکن بود شاهد هم خطی تصادفی خوشه‌هایی باشیم که بعضی از آن ها نسبت به ما بسیار دورتر از دیگران اند. پس از پیدایش اولین نقشه های انتقال به سرخ این دو نتیجه به دست آمد:[۲]

۱- ساختارهایی بزرگ‌تر از خوشه های کهکشانی وجود دارند.

۲- ساختارهایی به نام تهی جا در عالم وجود دارند.

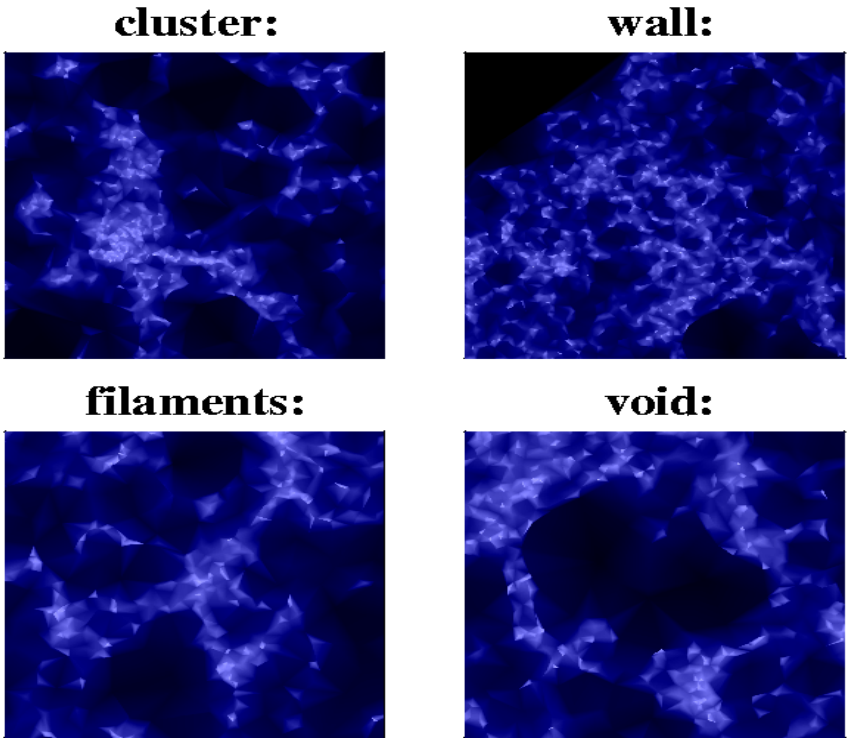
---

[٤] Galaxy clusters

[٥] Galaxy filaments

[٦] walls

[٧] voids



شکل (۱-۱): تصویر خوشه های کهکشانی، رشته ها، دیوارها، تهی جاها

تهی جاها یکی از اجزای مهم و برجسته شبکه کیهانی هستند که یافتن آنها به دو دلیل عمده مشکل است. اولاً ، تعریف یکتایی از تهی جا وجود ندارد. ثانیاً ، برنامه‌های یافتن تهی جا با در نظر گرفتن آنها خارج از سلول‌های مکعبی یا کره‌ها بنا شده‌اند و برای همین با توجه به تعریف برنامه تهی‌جاهای متفاوتی یافت می‌شود.

در این پایان نامه به بررسی خواص آماری تهی‌جاها در بین کهکشان‌ها و خوشه‌های کهکشانی می‌پردازیم.

۱-۱ نسبیت عام

نسبیت عام[۸]،نظریه‌ای است که در سال ۱۹۱۵ توسط انیشتین[۹] مطرح شد. این نظریه تعمیمی بر نظریهٔ نسبیت خاص است که در مورد تمامی ناظرها اعم از لَخت و غیر لَخت صحبت می‌کند. در این

[۸] General relativity

[۹] Einstein

نظریه فضا–زمان توسط هندسهٔ ریمانی بررسی می‌شود،معادلات انیشتین توصیف رابطهٔ هندسهٔ چهاربعدی ، شبه – ریمانی[۱۰] به نمایندگی از فضا زمان ، انرژی و حرکت موجود در آن فضا زمان است. این نظریه،گرانش را به عنوان یک عامل هندسی و نه یک نیرو، بررسی می‌کند. پایهٔ نظری گرانش کیهان‌شناسی، این نظریه و تعمیم‌های آن است.

آزمایش‌ها و مشاهدات نشان داد که توصیف انیشتین از گرانش، رویدادهایی را که قوانین نیوتن نمی‌توانست توضیح دهد (مانند زمان نامتعارف گردش مداری عطارد و بقیهٔ سیاره‌ها) شرح داد. همچنین نسبیت عام،تأثیرات جدید گرانش را پیش‌گویی کرد؛ مانند امواج گرانشی ، عدسی گرانشی و یک تأثیر از گرانش بر زمان که به عنوان انبساط زمانی گرانشی شناخته می‌شود. بسیاری از این پیشگویی‌ها توسط آزمایش تأیید شده است.

در ستاره شناسی مدرن، نسبیت عام به عنوان یک وسیلهٔ ضروری شناخته شده است. نسبیت زیربنای درک سیاهچاله ها(مناطقی از فضا که جاذبهٔ گرانشی آن‌قدر قوی است که حتی نور نمی‌تواند از آن فرار کند) را فراهم کرده است. همچنین نسبیت عام یک قسمت از چهارچوب استاندارد مدل کیهان شناسی انفجار بزرگ است.

البته قابل ذکر است که نسبیت، صورت‌های دیگری هم دارد؛ از جمله نسبیت عام «هرمان وایل»[۱۱]که نه تنها میان گرانش و الکترومغناطیس وحدت ایجاد می‌کند بلکه کل عالم را هندسه می‌دانند: هندسهٔ فضا و زمان . این تعبیر با اصل ماخ بسیار سازگار است. هر چند اصولی که به ابداع این هندسه توسط وایل منجر شد از پدیدارشناسی هوسرل منتج شده بود. جالب این جاست که با وجود ناسازگاری نسبیت عام انیشتین در بسیار کوچک ها و عالم کوانتومی، هنوز هندسهٔ وایل کنار گذاشته شده و این یک واقعیت تلخ است.

[۱۰] Riemann

[۱۱] Hermann Weyl

۱-۲ معادله‌ی انیشتین

با فرموله شدن نسبیت (تفسیر هندسی از تأثیر گرانش) این پرسش که سرچشمه‌ی گرانش چیست باقی ماند. در گرانش نیوتنی،سرچشمه‌ی گرانش،جرم است. در نسبیت خاص، جرم، خود یک قسمت از یک کمیت عام تر به نام تانسور انرژی- تکانه است که خود شامل انرژی و چگالی های تکانه مانند ضربه است، با استفاده از اصل هم ارزی، این تانسور به انحنای فضا- زمان تعمیم می‌یابد.

معادلهٔ اصلی نسبیت عام (معادله میدان) عبارت است از:

$$R_{ab}-\frac{1}{2}Rg_{ab}=8\pi GT_{ab} \qquad \text{یا} \qquad R_{ab}-\frac{1}{2}Rg_{ab}=\kappa T_{ab} \qquad (۱-۱)$$

$$R_{ab}-\frac{1}{2}R_{ab}=8\pi GT_{ab}$$

(در نوشتن معادلهٔ بالا واحدهای طول و زمان طوری اختیار شده اند که c (سرعت نور) برابر با یک باشد.)

در سمت راست معادله، **Tab** تانسور انرژی تکانه است و در سمت چپ معادله، تانسور انیشتین وجود دارد.

اسکالر انحنا:

$$R=R_{ab}g^{ab} \qquad (۲-۱)$$

R_{ab} تانسور ریچی[۱۲] که خود وابسته به تانسور انحنای ریمان[۱۳] است :

$$R_{ab}=R^{d}{}_{adb} \qquad (۳-۱)$$

هنگامی که ماده وجود ندارد تانسور انرژی-تکانه تغییر می‌کند و نتایج آن به معادلهٔ انیشتین در خلاء می‌انجامد:

---

[۱۲] Ricci Tensor

[۱۳] Riemann Curvature Tensor

$$R_{ab} = 0 \qquad (۱-۴)$$

در این معادلات :

- R_{ab} تانسور ریچی
- R اسکالر ریچی یا انحنا
- g_{ab} تانسور متریک
- $\boldsymbol{T_{ab}}$ تانسور انرژی–تکانه
- $\boldsymbol{G}$ ثابت جهانی گرانش

با تعریف G_{ab} تانسور اینشتین به صورت $G_{ab} = R_{ab} - \frac{1}{2}Rg_{ab}$ می‌توان معادله (۱-۱) را به شکل فشردهٔ زیر نوشت:

$$G_{ab} = 8\pi G T_{ab} \qquad (۱-۵)$$

در این معادله تانسور انیشتن G_{ab}، انحنا را اندازه‌گیری می‌کند و T_{ab} ،تانسور انرژی–تکانه را اندازه گیری می‌کند . تابع‌هایی از دستگاه مختصات فضا– زمان مقدار هر کدام از G_{ab}و T_{ab}را مشخص می‌کند و معادلات انیشتین هرکدام از اجزای تابع‌ها را محاسبه می‌کند. هرکدام از این راه حل معادلات، یک هندسهٔ خاص از فضا و زمان را توصیف می کند. مانند حل شوارتز شیلد[۱۴]،که هندسه اطراف یک کره (جرم غیر چرخشی مانند یک ستاره یا سیاه چاله) را توصیف می کند.در حالی‌که حل کِر[۱۵] چرخش سیاه چاله را توصیف می کند. در بقیه راه حل‌ها امواج گرانشی وگسترش جهان توصیف می شود. ساده ترین حل، فضا–زمان بدون انحنا (تخت)مینکوسکی[۱۶] است. فضا–زمانی که با نسبیت خاص توصیف می شود.[۳]

[۱۴] Schwarzschild solution

[۱۵] Roy Kerr

[۱۶] Minkowski space-time

۱-۳ اصول نسبیت عام[۱۷]

اصول نسبیت عام عبارت اند از :

- اصل هم ارزی
- اصل ماخ
- اصل هم وردایی عام
- اصل جفتیدگیِ کمینهٔ گرانشی
- اصل هم‌خوانی

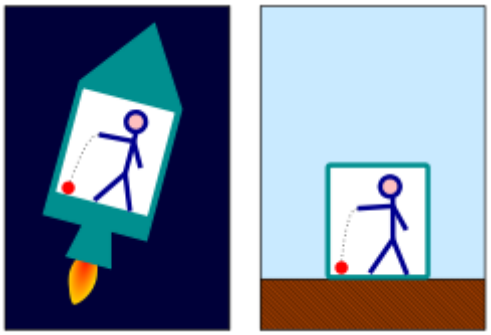
۱-۳-۱ اصل هم‌ارزی

"هیچ ناظری نمی‌تواند فقط با آزمایش موضعی بین شتاب و میدان گرانشی تفاوت قائل شود."

فردی که در یک آسانسور در حال سقوط آزاد است احساس بی وزنی را تجربه می‌کند. درحالی‌که در آسانسور تمام اجسام با هم در حال سقوط آزاد هستند اثر گرانشی مشاهده نمی‌شود. به این ترتیب آزمایش‌های یک ناظردر حال سقوط آزاد از یک ناظردر عمق فضا جایی که از منابع گرانشی بسیار دور است، غیرقابل تشخیص است. چنین ناظرهایی را «*ناظر لخت*» گویند که انیشتین در تئوری نسبیت خاص خود چنین توصیف می کند:" ناظرهایی که برای آنها نور با سرعت ثابت به خط مستقیم سیر می‌کند."

این اصل بیان می کند که یک فرد در آسانسور در حال سقوط آزاد، نمی تواند بگوید که در حال سقوط آزاد است. هر آزمایش، در چنین محیط در حال سقوطی، با ناظری که در حال سکون یا حرکت یکنواخت در فضای بدون گرانش است نتایج یکسان دارد.

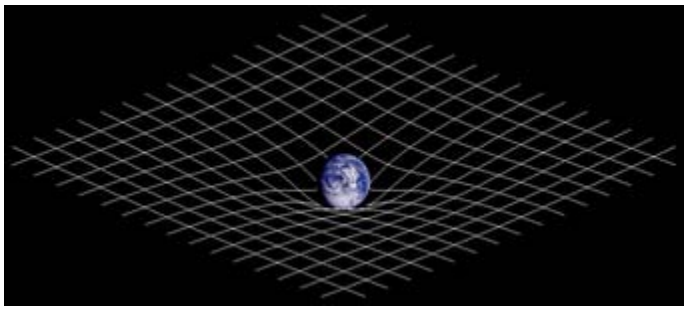
[۱۷] General relativity



شکل(۱-۲): (چپ)توپ در حال سقوط در یک سفینه شتابدار،(راست)توپ در حال سقوط بر روی زمین

بیشترین تأثیرات گرانشی در سقوط آزاد از بین می‌رود. اما تأثیراتی که به نظر می‌آید با گرانش یکسان باشد می‌تواند به وسیله یک چهارچوب مرجع شتاب دار ایجاد شود. یک ناظر در اتاقی در بسته نمی‌تواند بگوید که کدام یک از جملات زیر درست است:

۱) اشیا به روی زمین سقوط می کنند، زیرا اتاقک بر روی زمین ساکن است و با نیروی گرانش به پایین کشیده می شوند .
۲) اشیا به روی زمین سقوط می کنند، زیرا اتاقک با موشکی با شتاب $۹.۸۱\ m/s^2$ به فضایی دور از گرانش حرکت می کند.اشیا توسط نیروی اینرسی، همانند آنچه که رانندهٔ یک ماشین شتابدار را به عقب صندلی فشار می دهد، به سمت زمین کشیده می شوند.



شکل (۱-۳): تصویر دوبعدی از انحنای فضا–زمان. حضور ماده/انرژی فرم هندسی فضا–زمان را تغییر می‌دهد. از این انحنای هندسی به عنوان جاذبه تعبیر می‌شود.