

بیشتر بدانیم!

فهرست مطالب

۱	نظریه نسبیت	۱
۱	نسبیت خاص	۱.۱
۱	نسبیت عام	۲.۱
۲	منابع	۳.۱
۳	نسبیت خاص	۲
۳	اصول	۱.۲
۴	نبود چارچوب مرجع مطلق	۲.۲
۴	چارچوب‌های مرجع، مختصات‌ها و تبدیلات لورنتس	۳.۲
۵	پیامدهای ناشی از تبدیلات لورنتس	۴.۲
۶	نسبی بودن هم‌زمانی	۱.۴.۲
۶	انقباض طول	۲.۴.۲
۶	اتساع زمان	۳.۴.۲
۶	ترکیب سرعتها	۴.۴.۲
۷	سایر پیامدها	۵.۲
۷	چرخش توماس	۱.۵.۲
۷	هم‌ارزی جرم و انرژی	۲.۵.۲
۷	یک انسان تا چه اندازه می‌تواند از زمین دور گردد؟	۳.۵.۲
۸	علیت و ممنوعیت حرکت سریعتر از نور	۶.۲
۸	هندسه فضا-زمان	۷.۲
۸	مقایسه بین فضای تخت اقلیدسی و فضای مینکوفسکی	۱.۷.۲
۹	فضا-زمان سه بعدی	۲.۷.۲
۹	فضا-زمان چهار بعدی	۳.۷.۲
۹	فیزیک در فضا-زمان	۸.۲
۹	تبدیلات کمیتهای فیزیکی بین چارچوب‌های مرجع	۱.۸.۲
۱۰	متریک	۲.۸.۲
۱۰	ناوردایی	۳.۸.۲
۱۰	سرعت و شتاب در فضای چهاربعدی	۴.۸.۲
۱۰	تکانه در فضای چهاربعدی	۵.۸.۲
۱۱	نیرو در فضای چهاربعدی	۶.۸.۲
۱۱	مکانیک کوانتومی نسبیتی	۹.۲
۱۱	وضعیت نظریه	۱۰.۲
۱۲	جستارهای وابسته	۱۱.۲

۱۲	.....	پیوند به بیرون	۱۲.۲
۱۲	.....	آثار اصلی	۱.۱۲.۲
۱۲	.....	کلاس درس و جزوه‌های دانشگاهی	۲.۱۲.۲
۱۲	.....	نسبیت خاص برای مخاطبین عام (بدون نیاز به دانستن دانش ریاضی)	۳.۱۲.۲
۱۲	.....	توضیح نظریه نسبیت خاص (با کمک ریاضیات ساده و پیشرفته)	۴.۱۲.۲
۱۲	.....	تصویر سازی	۵.۱۲.۲
۱۳	.....	منابع	۱۳.۲
۱۴	.....	کتاب‌ها	۱.۱۳.۲
۱۵	.....	مقالات ژورنال	۲.۱۳.۲
۱۶	.....	۳ نسبیت عام	
۱۶	.....	تاریخچه	۱.۳
۱۷	.....	از مکانیک کلاسیک تا نسبیت عام	۲.۳
۱۷	.....	هندسه گرانش نیوتنی	۱.۲.۳
۱۸	.....	تعمیم نسبیتی	۲.۲.۳
۱۸	.....	معادلات میدان اینشتین	۳.۲.۳
۱۹	.....	تعریف و کاربردهای پایه‌ای	۳.۳
۱۹	.....	تعریف و ویژگی‌های پایه‌ای	۱.۳.۳
۱۹	.....	مدل سازی	۲.۳.۳
۲۰	.....	پیامدهای نظریه اینشتین	۴.۳
۲۰	.....	اتساع زمان گرانشی و انتقال بسامد	۱.۴.۳
۲۰	.....	شکست نور و تأخیر زمانی گرانشی	۲.۴.۳
۲۰	.....	امواج گرانشی	۳.۴.۳
۲۱	.....	تأثیرات مداری و نسبیت جهت	۴.۴.۳
۲۲	.....	کاربردهای اخترفیزیکی	۵.۳
۲۲	.....	همگرایی گرانشی	۱.۵.۳
۲۲	.....	اخترشناسی امواج گرانشی	۲.۵.۳
۲۳	.....	سیاهچاله‌ها و سایر اجسام پرجرم	۳.۵.۳
۲۳	.....	کیهان‌شناسی	۴.۵.۳
۲۴	.....	مفاهیم پیشرفته	۶.۳
۲۴	.....	ساختار سیبی و هندسه سراسری	۱.۶.۳
۲۴	.....	افق‌ها	۲.۶.۳
۲۵	.....	تکینگی‌ها	۳.۶.۳
۲۵	.....	معادلات تکامل	۴.۶.۳
۲۵	.....	کمیت‌های شبه محلی و سراسری	۵.۶.۳
۲۵	.....	رابطه با نظریه کوانتومی	۷.۳
۲۶	.....	نظریه میدان کوانتومی در فضا-زمان خمیده	۱.۷.۳
۲۶	.....	گرانش کوانتومی	۲.۷.۳
۲۷	.....	وضعیت کنونی	۸.۳
۲۷	.....	جستارهای وابسته	۹.۳
۲۷	.....	یادداشت‌ها	۱۰.۳
۲۸	.....	پانویس	۱۱.۳

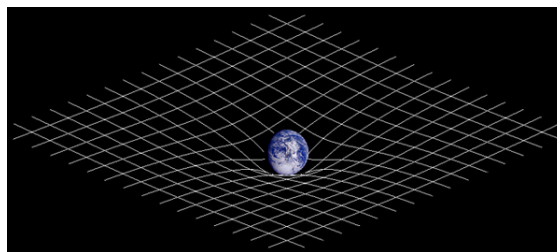
۳۱	منابع	۱۲.۳
۴۱	جستارهای وابسته	۱۳.۳
۴۲	پیوند به بیرون	۱۴.۳
۴۳	سیاه چاله	۴
۴۳	تاریخچه	۱.۴
۴۴	نسبیت عام	۱.۱.۴
۴۴	عصر طلایی	۲.۱.۴
۴۴	ویژگی‌ها و ساختار	۲.۴
۴۵	خواص فیزیکی	۱.۲.۴
۴۵	افق رویداد	۲.۲.۴
۴۵	تکینگی	۳.۲.۴
۴۶	کره فوتونی	۴.۲.۴
۴۶	ارگوسفر	۵.۲.۴
۴۶	ذخیره اطلاعات	۶.۲.۴
۴۷	شکل‌گیری و تکامل	۳.۴
۴۷	رمبش گرانشی	۱.۳.۴
۴۷	سیاهچاله‌های نخستین در مهبانگ	۲.۳.۴
۴۷	برخوردهای پرانرژی	۳.۳.۴
۴۷	رشد	۴.۳.۴
۴۸	تبخیر	۵.۳.۴
۴۸	طبقه‌بندی بر اساس جرم	۴.۴
۴۸	سیاه چاله‌های کلان جرم	۱.۴.۴
۴۸	سیاهچاله‌های جرم متوسط	۲.۴.۴
۴۸	سیاهچاله‌های ستاره‌وار	۳.۴.۴
۴۹	ریزسیاهچاله‌ها	۴.۴.۴
۴۹	شواهد تجربی	۵.۴
۴۹	بر افزایش ماده	۱.۵.۴
۴۹	دوتایی‌های پرتو ایکس	۲.۵.۴
۵۰	نوسان‌های نیمه متناوب	۳.۵.۴
۵۰	هسته کهکشانی	۴.۵.۴
۵۰	همگرایی گرانشی	۵.۵.۴
۵۱	امواج گرانشی	۶.۵.۴
۵۱	امکان‌های دیگر	۷.۵.۴
۵۱	پرسش‌های باز	۶.۴
۵۱	آنتروپی و ترمودینامیک	۱.۶.۴
۵۲	یگانگی سیاهچاله‌ها	۲.۶.۴
۵۲	شمار سیاهچاله‌ها در جهان	۷.۴
۵۲	نظریه جهان‌های درون سیاهچالگان	۸.۴
۵۲	تصورات اشتباه	۹.۴
۵۲	پانویس	۱۰.۴
۵۲	منابع	۱۱.۴

۵	سفر در زمان	۵۸
۱.۵	راه‌های پیشنهاد شده برای سفر در زمان	۵۸
۱.۱.۵	حرکت با سرعت نور	۵۸
۲.۱.۵	کرم‌چاله	۵۸
۳.۱.۵	تئوری کورت گودل	۵۸
۲.۵	شبیه‌سازی برای فوتون‌ها	۵۸
۳.۵	پارادوکس پدربزرگ یا مادربزرگ	۵۹
۴.۵	پارادوکس سفر در زمان گذشته	۵۹
۵.۵	جستارهای وابسته	۵۹
۶.۵	پیوند به بیرون	۵۹
۷.۵	پانویس و منابع	۵۹
۶	مکانیک کوانتومی	۶۰
۱.۶	آشنایی	۶۰
۲.۶	مکتب‌های فکری مکانیک کوانتومی	۶۱
۳.۶	مکانیک کوانتومی و فیزیک کلاسیک	۶۱
۴.۶	کوشش برای نظریه وحدت‌یافته	۶۱
۵.۶	مکانیک کوانتومی و زیست‌شناسی	۶۱
۶.۶	جستارهای وابسته	۶۱
۷.۶	منابع	۶۱
۷	واپاشی هسته‌ای	۶۳
۱.۷	دسته‌بندی واپاشی‌های هسته‌ای	۶۳
۲.۷	پایداری و ناپایداری ایزوتوپ‌ها	۶۳
۳.۷	جستارهای وابسته	۶۴
۴.۷	منابع	۶۴
۵.۷	پیوند به بیرون	۶۴
۸	پادماده	۶۵
۱.۸	تاریخچه	۶۵
۲.۸	محل یافت پادماده	۶۵
۳.۸	طول عمر پادماده	۶۵
۴.۸	هزینه	۶۵
۵.۸	پادماده در فرهنگ مردمی	۶۵
۶.۸	منابع	۶۶
۹	دی‌ان‌ای	۶۷
۱.۹	کار دی‌ان‌ای در سلول‌ها	۶۷
۲.۹	ویژگی‌ها	۶۸
۱.۲.۹	باز آلی	۶۸
۳.۹	همانندسازی دنا	۶۹
۴.۹	منابع	۶۹
۹.۵	منابع متن و تصویر، مشارکت‌کنندگان و مجوزها	۷۰

۷۰	..... متن	۹.۵.۱
۷۱	..... تصاویر	۹.۵.۲
۷۳	..... محتوای مجوز	۹.۵.۳

فصل ۱

نظریه نسبیت



افکنش فضای دوبعدی یک خمیدگی فضا-زمان در فضای سه‌بعدی که در نظریه نسبیت عام مطرح می‌شود

نظریه یا نگره نسبی یا همان **نسبی** دو نظریه اصلی و معروف نسبیت خاص و نسبیت عام از آلبرت اینشتین را در بر می‌گیرد. ایده اصلی در پشت این نظریه آن است که زمان و فضا با هم مرتبط هستند و نه جدای از هم و ثابت.

آغاز به کار بردن واژه «نگره نسبیت» به ۱۹۰۶ بر می‌گردد؛ هنگامی که ماکس پلانک ترکیب «نظریه نسبی» (در آلمانی: *Relativtheorie*) را به کار برد و بر چگونگی به کار برده شدن اصل نسبیت توسط این نظریه تأکید کرد. اما این آلفرد بوخزر بود که در بخش بحث مقاله پلانک، برای نخستین بار ترکیب «نظریه نسبیت» (در آلمانی: *Relativitätstheorie*) را به کار برد.

۱.۱ نسبیت خاص

نوشتار اصلی: نسبیت خاص

نسبیت خاص نگره‌ای بر روی ساختار فضا-زمان است. این نگره در سال ۱۹۰۵ توسط اینشتین و در مقاله‌ای به نام «درباره الکترودینامیک اجسام در حال حرکت» ارائه شد. این نگره بر پایه دو فرضی است که در تناقض با مکانیک کلاسیک هستند:

۱. قوانین فیزیک برای همه ناظران در دستگاه مرجع لخت نسبت به یکدیگر ثابت هستند (اصل نسبیت).

۲. سرعت نور در خلا برای همه ناظران، صرف‌نظر از حرکت نسبیشان و یا حرکت منبع تولید کننده نور، ثابت است.

چنین نگره‌ای همخوانی بهتری با آزمایش‌های تجربی نشان می‌دهد. برای نمونه، آزمایش مایکلسون-مورلی نه تنها تأکید کننده فرض دوم است که نتایج جالب دیگری را نیز به همراه داشت:

• نسبیت هم‌زمانی: دو رویداد که برای یک ناظر هم‌زمان هستند، ممکن است برای ناظر دیگری که نسبت به ناظر نخست در حال حرکت است هم‌زمان نباشند.

- اتساع زمانی: ساعت‌های در حال حرکت گذر زمان کمتری را نسبت به ساعت‌های ساکن تجربه می‌کنند و نشان می‌دهند.
- انقباض طول: اشیاء متحرک، در جهت حرکتشان از دید یک ناظر ایستا کوتاهتر اندازه‌گیری می‌شوند.
- هم‌ارزی جرم و انرژی: $E = mc^2$ جرم و انرژی با هم هم‌ارز هستند و به هم تبدیل می‌شوند.
- نور بیشترین سرعت ممکن را دارد: هیچ جسم مادی و یا پیامی نمی‌تواند با سرعتی بیشتر از سرعت نور در خلا سفر کند.
- جاذبه در فضا با سرعت نور حرکت میکند، نه سریعتر یا بلادرنگ.

ویژگی تعریف کننده نسبیت خاص در جایجایی ترادوسی‌های گالیله مورد استفاده در مکانیک کلاسیک با تبدیلات لورنتس است.

۲.۱ نسبیت عام

نوشتار اصلی: نسبیت عام

نسبیت عام، نظریه‌ای هندسی برای گرانش است که در سال ۱۹۱۶ توسط آلبرت اینشتین مطرح گردید و تصویر کنونی فیزیک جدید از گرانش را تشکیل می‌دهد. نسبیت عام، نظریه نسبیت خاص و قانون جهانی گرانش نیوتن را تعمیم می‌دهد و توصیفی یکتا از گرانش به عنوان یک ویژگی هندسی فضا و زمان، یا فضا-زمان ارائه می‌کند. به خصوص در این نظریه، انحنا فضا-زمان، به طور مستقیم به انرژی و تکانه هر ماده و تابشی که موجود باشد مربوط است. این رابطه توسط معادلات میدان اینشتین مشخص می‌گردد، که یک دستگاه معادلات مشتقات پاره‌ای را تشکیل می‌دهند.

برخی از پیش‌بینی‌های نظریه نسبیت عام، که خصوص موارد مرتبط با گذشت زمان، هندسه‌ی فضا، حرکت اجسام هنگام سقوط آزاد و انتشار نور، با پیش‌بینی‌های نظریه‌های فیزیک کلاسیک تفاوت بسیاری دارند. برای نمونه از چنین تفاوت‌هایی، می‌توان به اتساع گرانشی زمان، هم‌گرایی گرانشی، انتقال به سرخ گرانشی نور و تاخیر زمانی گرانشی اشاره کرد. پیش‌بینی‌های نظریه نسبیت عام در همه آزمون‌ها تا به امروز تأیید شده‌اند. هرچند نسبیت عام تنها نظریه نسبیتی نور نیست، ساده‌ترین نظریه‌ای است که با آزمایش‌ها مطابقت دارد. البته پرسش‌های بدون پاسخی باقی مانده‌اند، که بنیادی‌ترین آن‌ها چگونگی آشتی دادن نسبیت عام با فیزیک کوانتومی برای ایجاد یک نظریه خود-سازگار و کامل از گرانش کوانتومی می‌باشد.

نظریه اینشتین نتایج اخت‌فیزیکی مهمی به دنبال دارد. برای مثال، وجود سیاه‌چاله‌ها را نشان می‌دهد (مکان‌هایی در فضا که در آن فضا و زمان طوری ناهموار شده‌اند که هیچ چیز، حتی نور نمی‌تواند از آن فرار کند)، حالتی که در پایان عمر برای ستاره‌های پر جرم ایجاد می‌گردد. شواهد فراوانی وجود دارد که نشان می‌دهد تابش‌های شدید گسیل شده از برخی اجسام نجومی،

مربوط به سیاه‌چاله‌ها است. برای مثال، ریزاخترش‌ها و یا هسته کهکشانی فعال نتیجه حضور سیاه‌چاله‌های ستاره‌وار و سیاه‌چاله‌هایی با جرم‌های بسیار بسیار بیشتر هستند. خم‌شدن نور توسط گرانش می‌تواند منجر به پدیده‌ای موسوم به همگرایی گرانشی گردد که موجب دیده شدن چند تصویر از یک شیء نجومی دور، در آسمان می‌شود. نسبیت عام همچنین وجود امواج گرانشی را پیش‌بینی می‌کند. مشاهده و اندازه‌گیری مستقیم آن‌ها هدف پروژه‌هایی نظیر لیگو، آنتن فضایی تداخل‌سنج لیزری ناسا/اسا و آرایه‌های گوناگون زمان‌سنجی تپاختر است. در ۱۱ فوریه ۲۰۱۶ پژوهشگران در LIGO موفق به مشاهده مستقیم امواج گرانشی برای نخستین بار شدند. همچنین، نسبیت عام اساس مدل‌های کنونی کیهان‌شناختی از یک جهان در حال انبساط است.

۳.۱ منابع

- Bergmann, Peter G.. *Introduction to the Theory of Relativity*. Dover Publications, ۱۹۷۶. شابک-۴۸۶-۰-۶۳۲۸۲-۲.

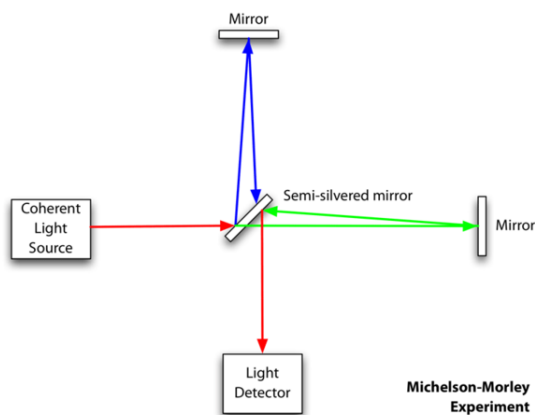
فصل ۲

نسبیت خاص

صادق باشد. این نظریه تأثیرات گرانشی را هم در نظر می‌گیرد.

این واژه امروزه کاربرد کلی تری پیدا کرده و برای ارجاع به هر موردی که در آن گرانش ناچیز است استفاده می‌شود. نسبیت عام تعمیمی بر نسبیت خاص است که گرانش را نادیده نمی‌گیرد. در نسبیت عام گرانش توسط هندسه ناقلیدسی توصیف می‌شود؛ به گونه‌ای که تأثیرات گرانشی با خمش فضا زمان نمایش داده می‌شوند. نسبیت خاص تنها به فضاهای تخت محدود است. همانگونه که خمش زمین در زندگی روزمره ناچیز به نظر می‌رسد خمش فضا زمان نیز در مقیاسهای کوچک قابل نظر کردن است و بنا بر این به صورت محلی نسبیت خاص تقریب قابل قبولی از نسبیت عام است.^[8]

۱.۲ اصول



آزمایش مایکلسون-مورلی

اینشتین دو پنداشت پایه‌ای مطرح نمود که به نظر می‌رسید که بدون توجه به اعتبار قوانین شناخته شده - که در آن زمان یا مکانیکی و یا الکتروپدینامیکی بودند - قابل اطمینان باشند. این پنداشتها ثابت بودن سرعت نور و دیگری استقلال قوانین فیزیکی (مخصوصاً ثابت بودن سرعت نور) از دستگاه لخت انتخاب شده بود. در اولین ارائه نسبیت خاص در سال ۱۹۰۵، وی این اصول را به صورت زیر مطرح نمود:^[1]

• اصل نسبیت

نوشتار اصلی: اصل نسبیت

قوانین فیزیک در تمام چارچوب‌های لخت یکسان هستند و هیچ چارچوب لخت مرجعی وجود ندارد.

نسبیت خاص (به انگلیسی: Special Relativity (SR)) نظریه‌ای فیزیکی دربارهٔ اندازه‌گیری در چارچوب مرجع لخت است که در سال ۱۹۰۵ میلادی توسط آلبرت اینشتین در نوشتاری با نام «در باب الکتروپدینامیک اجسام متحرک» مطرح شد.^[1]

گالیلئو گالیله قبلاً چنین اصلی را بیان نموده بود که تمام حرکات یکنواخت نسبی هستند و هیچ حالت سکون مطلق و تعریف شده‌ای وجود ندارد (چارچوب مرجع برتر وجود ندارد). این اصل امروزه اصل نسبیت گالیله خوانده می‌شود. اینشتین این اصل را با در نظر گرفتن پدیده سرعت ثابت نور گسترش داد؛ پدیده‌ای که به تازگی در آزمایش مایکلسون-مورلی مشاهده شده بود.^[2] او همچنین بیان نمود که این اصل برای تمام قوانین فیزیک صادق است که در آن زمان شامل قوانین مکانیک و الکتروپدینامیک می‌شد.^[3] این نظریه پیامدهای گسترده‌ای دارد که مورد تأیید داده‌های تجربی قرار گرفته‌اند^[4] و شامل موضوعاتی غیر شهودی همچون انقباض طول، اتساع زمان و نسبیت همزمانی است. او مفهوم کلاسیک بازه زمانی را برودا برای دو رویداد را با مفهوم ناوردایی بازه فضا زمان تعویض کرد. می‌توان با استفاده از دو اصل نسبیت خاص و ترکیب آنها با سایر قوانین فیزیک به هم‌ارزی جرم و انرژی بر طبق اصل هم‌ارزی جرم و انرژی ($E = mc^2$) رسید که c در آن برابر با سرعت نور در خلأ است.^{[5][6]} پیش‌بینی‌های نسبیت خاص با مکانیک نیوتنی در قلمرو مشترکشان همخوانی دارند. به ویژه در مورد سرعت‌هایی که از سرعت نور بسیار کوچکتر هستند. تأثیر نسبیت خاص هنگام بررسی اجسام در حال حرکت با سرعت‌های بسیار زیاد (نزدیک به سرعت نور) قابل توجه می‌شود. بنابر این نظریه نسبیت همان‌طور که اصل همخوانی فیزیک ایجاب می‌کند باید نتایج مشاهدات قبلی را به شکل کامل تری بیان کند. مقایسه رابطه بین مکانیک نیوتنی و مکانیک نسبیتی همانند مقایسه بین تبدیلات لورنتس و تبدیلات گالیله است و می‌توان مطلب فوق را به بیان ریاضی به شکل زیر نمایش داد:

$$\lim_{c \rightarrow \infty} (\text{تبدیلات لورنتس}) = (\text{تبدیلات گالیله})$$

البته در نظر داشته باشید که هنگامی که c به سمت بی‌نهایت میل می‌کند (همانگونه که پیش از اثبات متناهی بودن سرعت نور پنداشته می‌شد) کسر v/c به سمت صفر می‌رود. این بدان معناست که تبدیلات لورنتس که اساس نظریه نسبیت خاص هستند در سرعت‌های بسیار کم نسبت به نور، نتایج یکسانی را با معادلات گالیله که اساس نسبیت نیوتونی هستند به دست می‌دهند. نظریه نسبیت خاص به ما می‌گوید که c تنها سرعت یک پدیده مشخص نیست بلکه یکی از ویژگیهای بنیادی شیوه‌ای است که فضا و زمان با یکدیگر به شکل فضا زمان یکپارچه گشته‌اند. یکی از پیامدهای این نظریه است که ذره‌ای که جرم لختی دارد هرگز سرعتش به سرعت نور نمی‌رسد.

واژه خاص در نسبیت خاص به نشانگر حالت خاصی است که این نظریه در آن صادق است. این نظریه اصل نسبیت را تنها در مورد ویژه چارچوب‌های مرجع لخت به کار برده است. به عبارت دیگر این طور پنداشته شده است که چارچوب‌های مرجع نسبت به یکدیگر با سرعت یکنواختی حرکت می‌کنند.^[7] اینشتین نسبیت عام را معرفی نمود و اصل نسبیت را در حالت کلی تری به کار گرفت تا برای هر چارچوبی که قادر به تغییر مختصات عمومی است،

بینش پایه‌ای در نظریه نسبیت خاص این است: پنداشتهای نسبیت و ناوردایی سرعت نور در صورتی سازگار هستند که اصولی که برای تغییر مختصاتها و زمانهای رخدادها بنا می‌شوند وابطی از یک نوع جدید ("تبدیلات لورنتس") باشند... از اصل جهانی نظریه خاص نسبیت درون این اصل قرار دارد: قوانین فیزیک نسبت به تبدیلات لورنتس ناوردا هستند (برای انتقال از یک دستگاه لخت به هر دستگاه لخت دلخواه دیگری که مورد نظر باشد). این یک اصل محدود کننده برای قوانین طبیعی است...^[9]

از این روی بسیاری از شکلهای امروزی نظریه نسبیت تنها آن را بر پایه اصل جهانی هم وردایی لورنتس و یا هم ارز آن یعنی اصل فضای مینکوفسکی، بنا می‌نهند.^{[13][14]}

با استفاده از اصل نسبیت به تنهایی و بدون فرض ثابت بودن سرعت نور (یعنی با استفاده از همسانگردی فضا و تقارنی که از اصل نسبیت خاص نتیجه می‌شود) می‌توان نشان داد که تبدیلات فضا-زمان بین چارچوبهای لخت یکی از سه نوع اقلیدسی، گالیله‌ای و یا لورنتسی هستند. در مورد تبدیلات لورنتسی می‌توان به پایستگی بازه نسبیتی و یک محدودیت سرعت متناهی به دست آورد. آزمایشها نشان می‌دهند که این حد سرعت برابر سرعت نور در خلأ می‌باشد.^{[15][16]}

انگیزه‌هایی که اندیشه ثابت بودن سرعت نور را به ارمغان آوردند، نظریه الکترومغناطیس ماکسول و نبود شواهد تجربی برای وجود اثر بودند. شواهد متناقضی در مورد اینکه تا چه حد انیشتین از نتیجه آزمایش آزمایش مایکلسون-مورلی تأثیر گرفته در دست است.^{[17][18]} به هر ترتیب نتیجه آزمایش مایکلسون-مورلی کمک کرد تا مفهوم ثابت بودن سرعت نور مورد پذیرش گسترده و سریعی قرار گیرد.

۲.۲ نبود چارچوب مرجع مطلق

اصل نسبیت که بیان می‌دارد هیچ دستگاه مرجع لخت برتری وجود ندارد، در حقیقت به زمان گالیله برمی‌گردد و درون فیزیک نیوتنی نیز راه داشته است. اما در اواخر قرن نوزدهم وجود امواج الکترومغناطیسی فیزیکدانان را برآن داشت تا پیشنهاد دهند که جهان از ماده‌ای به نام اثر پر شده است که همچون رسانه‌ای عمل می‌کند که امواج و ارتعاشات از آن می‌گذرند. گمان می‌شد که اثر چارچوب مرجع مطلق است که سرعتها را می‌توان بر اساس آن اندازه گرفت و خود آن بدون حرکت و ثابت است. خواص جالبی برای اثر پنداشته می‌شد: به اندازه کافی کشسان بود که بتواند امواج الکترومغناطیسی را پشتیبانی کند و این امواج می‌توانستند با ماده برهم کنش داشته باشند، با این وجود اثر در مقابل گذر اجسام از خود مقاومتی نشان نمی‌داد. نتایج آزمایشهای مختلف و از جمله آزمایش مایکلسون-مورلی گویای این بودند که زمین همواره نسبت به اثر ثابت می‌ماند. چیزی که توضیح آن مشکل بود زیرا زمین در مداری به دور خورشید می‌گردد. راه حل انیشتین این بود که مفهوم اثر و حالت سکون مطلق را کنار بگذارد. نسبیت خاص به گونه‌ای فرمولبندی شده هیچ چارچوب مرجعی را ویژه نمی‌داند؛ بلکه در نسبیت هر چارچوب مرجعی که با سرعت یکنواخت حرکت کند همین قوانین فیزیک را مشاهده خواهد کرد. به طور ویژه سرعت نور در خلأ همواره در اندازه‌گیری‌ها برابر c است، حتی وقتی که توسط چندین دستگاه مختلف که با سرعتهای متفاوت اما یکنواختی حرکت می‌کنند.

۳.۲ چارچوبهای مرجع، مختصاتها و تبدیلات لورنتس

نوشتار اصلی: تبدیلات لورنتس

این اصل که پیش از نسبیت خاص در نسبیت نیوتونی نیز بوده است بیان می‌کند که تمامی چارچوبهایی که با سرعتی ثابت (بدون شتاب) حرکت می‌کنند هم ارز و یکسان هستند، بدین ترتیب هیچ چارچوب لختی بر چارچوب دیگر برتری یا با دیگری تفاوت ندارد.

به سخنی دیگر اصل نسبیت (با در نظر گرفتن یک شرایط ایده‌آل) می‌گوید که اگر شما در آزمایشگاه سرپشته‌ای قرار داشته باشید و آن آزمایشگاه با سرعت ثابتی نسبت به زمین حرکت کند، شما با هیچ روشی نمی‌توانید تعیین کنید که سرعتتان نسبت به زمین چقدر است. در این بیان از اصل نسبیت فرض شده است که زمین یک چارچوب لخت است (این موضوع درباره زمین به تقریب صادق است)، همچنین فرض شده است که شما نسبت به زمین به نرمی حرکت می‌کنید و آزمایشگاه هیچ لرزش و تکانی ندارد.

• اصل سرعت ثابت نور

نوشتار اصلی: سرعت جهانی نور

"نور همواره در فضای خالی با سرعت مشخص c منتشر می‌شود که مستقل از وضعیت حرکتی جسم منتشرکننده نور است" (از پیشگفتار).^[1] این بدان معنی است که نور در خلأ، حداقل در یک دستگاه مختصات لخت (دستگاه ثابت) با سرعت c (مقداری ثابت که مستقل از جهت است) و بدون توجه به وضعیت حرکتی منبع نور منتشر می‌شود. سرعت نور در خلأ برای تمام ناظران لخت ثابت و برابر c است و به حرکت چشمه نور یا حرکت ناظر بستگی ندارد.

به سخنی دیگر اگر شما سوار اتومبیلی باشید که با سرعت ۵۰ کیلومتر بر ساعت حرکت می‌کند و اتومبیل دیگری با سرعت ۲۰ کیلومتر بر ساعت به شما نزدیک شود، سرعت نسبی اتومبیل شما و اتومبیل مقابل تقریباً برابر با ۷۰ کیلومتر بر ساعت خواهد بود، اما بر طبق این اصل اگر چشمه نوری با سرعت دلخواهی به شما نزدیک شود و شما هم با سرعت متفاوتی به سمت آن چشمه حرکت کنید باز هم سرعت نور شما همان c خواهد بود. چنین چیزی کاملاً مخالف شهود روزمره ماست.

نسبیت خاص نه تنها بر این دو اصل آشکار بلکه بر چندین پنداشت ضمنی دیگر نیز وابسته است. از جمله این پنداشتها می‌توان به همسانگردی و یکنواختی فضا و استقلال ساعتها و میله‌های اندازه‌گیری از تاریخ گذشته‌شان اشاره نمود.^[10]

به دنبال ارائه نخستین نسبیت خاص توسط انیشتین در سال ۱۹۰۵ مجموعه‌های متعددی از اصول پیشنهاد شده است.^[10] اما رایج‌ترین مجموعه اصول همچنان همان اصولی هستند که توسط انیشتین در مقاله اصلی منتشر شدند. یک نسخه ریاضی از اصل نسبیت که بعدها توسط انیشتین ارائه شد عبارت است از:

اصل نسبیت خاص: اگر سیستم مختصات K برگزیده شود به گونه‌ای که در ارتباط با آن قوانین فیزیک در ساده‌ترین حالت خود به خوبی برقرار باشند، همان قوانین در ارتباط با هر دستگاه مختصات K' دیگری نیز که در انتقال یکنواختی نسبت به K حرکت می‌کنند به خوبی صادق خواهند بود.^[11]

آزری پوانکاره با اثبات اینکه تبدیلات لورنتس زیرمجموعه‌ای از گروه پوانکاره در تبدیلات تقارنی هستند، چارچوبی ریاضیاتی برای نظریه نسبیت ارائه داد. بعدها انیشتین این تبدیلات را از اصولی که ارائه داده بود استنتاج کرد.

بسیاری از مقالات انیشتین مشتقاتی از تبدیلات لورنتس بر پایه این دو اصل را نمایش می‌دهند.^[12]

انیشتین همواره استنتاج ناوردایی لورنتس (هسته اصلی نسبیت خاص) را تنها برپایه دو اصل نسبیت و ثابت بودن سرعت نور بنا نهاده است. او اینچنین می‌نویسد:

$$\begin{cases} x' = \gamma(x - vt) \\ y' = y \\ z' = z \\ t' = \gamma\left(t - \frac{vx}{c^2}\right) \end{cases}$$

که در آن $\gamma = \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}}$ را فاکتور لورنتس می‌نامند و $\beta = \frac{v}{c}$. سرعت نور در خلأ است و سرعت v دستگاه S' در راستای محور x است. مختصات (x, y, z) تغییر نمی‌کند و تنها مختصات t ، x تبدیل می‌شوند. این تبدیلات لورنتس یک گروه تک پارامتر از نگاشت‌های خطی تشکیل می‌دهند که به آن پارامتر تندی (به انگلیسی: rapidity) می‌گویند. کمیتی که نسبت به تبدیلات لورنتس ناورد است را کمیت نرده‌ای لورنتس می‌نامند.

چنانچه تبدیلات لورنتس و معکوسشان را برحسب اختلاف مختصات بنویسیم به گونه‌ای که مثلاً مختصات یک رویداد (x_1, t_1) و (x'_1, t'_1) and باشد، مختصات رویداد دیگر (x_2, t_2) خواهد بود و (x'_2, t'_2) و اختلافها را به صورت زیر تعریف کنیم

$$\Delta x' = x'_2 - x'_1, \quad \Delta x = x_2 - x_1, \\ \Delta t' = t'_2 - t'_1, \quad \Delta t = t_2 - t_1,$$

به روابط زیر می‌رسیم

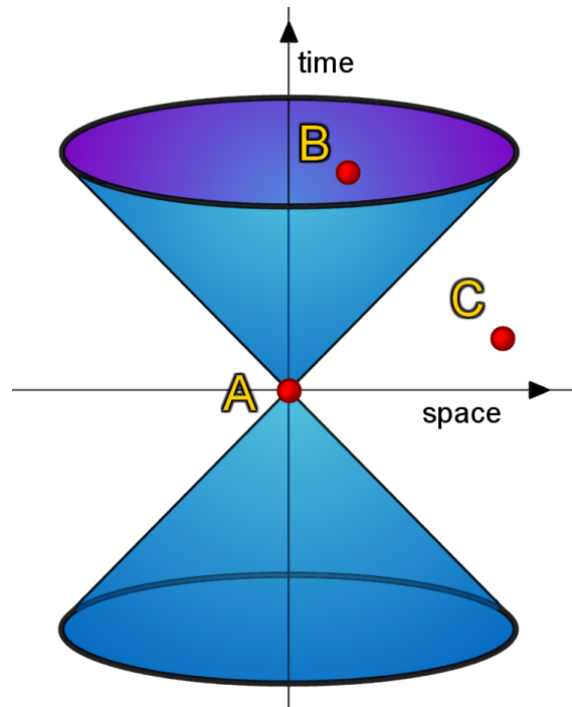
$$\Delta x' = \gamma(\Delta x - v \Delta t), \quad \Delta x = \gamma(\Delta x' + v \Delta t'), \\ \Delta t' = \gamma\left(\Delta t - \frac{v \Delta x}{c^2}\right), \quad \Delta t = \gamma\left(\Delta t' + \frac{v \Delta x'}{c^2}\right),$$

تبدیلات لورنتس که توسط ریاضیدان و فیزیکدان آلمانی هندریک لورنتس با استفاده از روابط هندسی و دو فرض همسانگرد و همگن بودن فضا برای توجیه نظریه اتر به دست آمد اساس نظریه نسبیت خاص می‌باشد. همسانگرد بودن فضا بدین معناست که خواص آن در تمامی جهات یکسان است. همگن بودن فضا بدین معناست که خواص فضا به نقطه‌ای که شما در آن قرار دارید بستگی ندارد. فرض همسانگرد بودن فضا به ما اجازه می‌دهد که بتوانیم حرکت ذره را در راستای محور x ها بررسی کنیم (یعنی از راستاهای y و z برای خلاصه سازی چشم پوشی کنیم)، فرض همگن بودن فضا تضمین می‌کند که این معادلات حتماً درجه اول هستند، یعنی تنها توان اول متغیرهای ما می‌توانند دخالت داشته باشند. (چون اگر به توان دوم یا درجات بالاتر بستگی داشته باشند اثبات می‌شود که آنگاه طول یک میله بستگی به نقطه‌ای از فضا که میله در آن قرار گرفته است دارد، یعنی مثلاً یک میله که بدون حرکت در ارتفاع ۵ متری قرار دارد با هنگامی که همان میله بدون حرکت در ارتفاع ۳ متری قرار دارد طول متفاوتی دارد و این خلاف شهود ماست)

نکته جالب توجه این است که این معادلات پیش از چاپ مقاله آلبرت اینشتین در رابطه با الکترودینامیک در اجسام متحرک به دست آمده بود اما فرض وجود اتر و فضایی برای انتشار امواج الکترومغناطیس به قدری قوی بود که این تبدیلات به عنوان تلاشی برای اصلاح آن فرضیه عنوان شد. چند سال بعد اینشتین به گونه دیگری با استفاده از دو پنداشتی که در پیش گفته شد به تبدیلات لورنتس رسید! همانگونه که خود اینشتین نیز گفته است: «تمامی نتایج نسبیت خاص می‌توانند از تبدیلات لورنتس به دست آیند.»

۴.۲ پیامدهای ناشی از تبدیلات لورنتس

دو اصل موضوع نسبیت خاص به همراه فرض‌های دیگری، مانند همگن و همسانگرد بودن فضا، منجر به نتایجی می‌شوند که همانند خود این اصل موضوع‌ها خلاف شهود و تجربه‌های روزمره ما هستند. با وجود این، این پیامدها بارها در آزمایش‌های گوناگون آزموده شده و مورد تأیید قرار



ترسیمی از یک مخروط نوری

نسبیت بر پایه مفهوم «چارچوب‌های مرجع» استوار است. در اینجا منظور از واژه چارچوب مرجع، یک ژرفانمایی (پرسپکتیو) مشاهده‌ای در فضا است که تغییری در حرکت آن رخ نمی‌دهد (شتاب ندارد) که از طریق آن می‌توان یک موقعیت را در امتداد سه محور فضایی اندازه گرفت. افزون بر این یک چارچوب مرجع توانایی تعیین زمان رویدادها از طریق یک ساعت (هر دستگاه مرجعی با تناوب یکنواخت) را دارد.

یک رویداد اتفاقی است که می‌توان یک زمان یکتا و مکانی در فضا نسبت به یک چارچوب مرجع نسبت داد: «نقطه» ای در فضا-زمان. از آنجاییکه سرعت نور در نسبیت در همه چارچوب‌های مرجع ثابت است، می‌توان از پالس‌های نور برای اندازه‌گیری مطمئن فاصله‌ها و ارجاع به زمانهای که رویدادها برای ساعت اتفاق افتاده‌اند استفاده نمود. اگرچه که برای نور هم‌زمانی پس از شروع رویداد طول خواهد کشید تا به ساعت برسد.

مثلاً انفجار یک ترقه را می‌توان یک «رویداد» در نظر گرفت. می‌توان یک رویداد را به طور با استفاده از چهار مختصات فضا-زمان آن مشخص نمود. زمان رویداد و مکان فضایی سه بعدی اش یک نقطه مرجع می‌سازند. این چارچوب مرجع را S می‌نامیم. در نسبیت اغلب به محاسبه موقعیت یک نقطه از یک نقطه مرجع دیگر علاقه‌مندیم. فرض کنید که چارچوب مرجع دومی به نام S' داریم که محورهای فضایی و ساعتش با محورهای فضایی و ساعت S در زمان صفر هم‌زمان و هم‌مکان بوده‌اند، اما با سرعت ثابت v نسبت به S در امتداد محور x ها حرکت می‌کند.

از آنجا که در نظریه نسبیت هیچ چارچوب مرجع مطلق وجود ندارد، مفهوم مؤکدی از «حرکت» نیز وجود ندارد زیرا همه چیز همواره نسبت به چارچوب مرجع دیگری در حرکت است. به جای آن هرگاه دو چارچوب مرجع که با سرعت یکسان در جهت یکسان حرکت کنند، به آن حرکت همراه گفته می‌شود؛ بنابراین S' و S حرکت همراه ندارند. برای رویدادها مختصات فضا-زمان (t, x, y, z) در دستگاه S و (t', x', y', z') در دستگاه S' تعریف می‌کنیم. تبدیل لورنتس بیان می‌کند که این دو مختصات به شیوه زیر در ارتباط هستند:

شده Δx است. برای اندازه‌گیری طول این میله در دستگاه S' که در آن ساعت در حال حرکت است، فواصل Δx تا نقاط انتهایی میله باید همزمان اندازه‌گیری شوند. به عبارت دیگر ویژگی اندازه‌گیری این است که $\Delta t' = 0$ که می‌توان آن را با معادله چهارم ترکیب کرد و رابطه بین Δx و $\Delta x'$ را به دست آورد

$$\Delta x' = \frac{\Delta x}{\gamma} \quad \text{برای رویدادهایی که } \Delta t' = 0$$

نتیجه می‌شود که یک میله که در راستای طول خود در حرکت است، به چشم یک ناظر ساکن، کوتاه‌تر به نظر می‌رسد. به زبان ریاضی:

$$l' = l \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

l' طول میله از دید ناظر S' است که با سرعت v نسبت به چارچوب S که میله در آن ساکن است، حرکت می‌کند. l طول میله در چارچوب سکون S است.

۳.۴.۲ اتساع زمان

مقاله اصلی: اتساع زمان

بازه زمانی بین دو رویداد از یک ناظر به ناظر دیگر ثابت نیست. بلکه به سرعت نسبی چارچوبهای مرجع ناظرها بستگی دارد.

ساعتی را در نظر بگیرید که در دستگاه غیر ویژه S در حالت سکون قرار دارد. بنا بر این بین دو تیک متوالی ساعت $\Delta x = 0$ خواهد بود. برای اینکه رابطه بین زمانهای اندازه‌گیری شده بین تیک‌ها در هر دستگاه را بیابیم، می‌توانیم از معادله اول استفاده کنیم:

$$\Delta x = 0 \quad \Delta t' = \gamma \Delta t$$

این نشان می‌دهد که زمان ($\Delta t'$) بین دو تیک در دستگاهی که در آن ساعت حرکت می‌کند (S') طولانی‌تر از زمان (Δt) بین تیک‌ها که با ساعت چارچوب در حال سکون (S) اندازه‌گیری شده، خواهد بود. اتساع زمان شماری از پدیده‌های فیزیکی را توضیح می‌دهد. متلاً می‌توان به کاهش نرخ میون‌های تولید شده توسط پرتوهای کیهانی در برخورد با جو زمین اشاره کرد.^[20]

اگر ناظر S یک بازه زمانی τ اندازه بگیرد، ناظر S' همان بازه زمانی τ' اندازه می‌گیرد:

$$\tau' = \frac{\tau}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

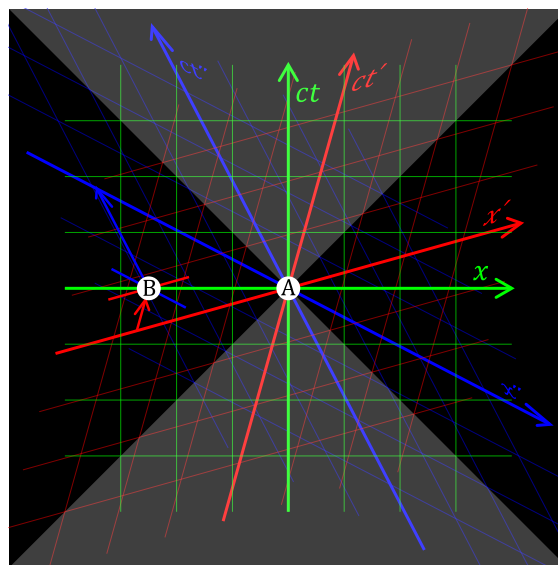
یعنی ناظر متحرک آن بازه را طولانی‌تر می‌بیند.

۴.۴.۲ ترکیب سرعتها

افزودن سرعتها چندان ساده نیست. اگر ناظر در S جسمی را در حال حرکت در امتداد محور x با سرعت u اندازه‌گیری نماید، ناظری که در دستگاه S' (چارچوب مرجعی که نسبت به S با سرعت v در امتداد محور x حرکت می‌کند) قرار دارد جسم را در حال حرکت با سرعت u' اندازه‌گیری خواهد کرد که با استفاده از تبدیلات لورنتس برای چارچوب S' داریم

گرفته‌اند. امروزه نسبیت خاص کاملاً پذیرفته شده است و جزئی از دانش عملی هر فیزیکدانی به شمار می‌آید. پیامدهای نسبیت خاص از تبدیلات لورنتس نتیجه می‌شوند.^[19] این تبدیلات و پیرو آن نظریه نسبیت خاص در مواردی که سرعتهای نسبی با سرعت نور قابل مقایسه می‌شوند نتایجی متفاوت با مکانیک نیوتنی تولید می‌کنند. سرعت نور بسیار بزرگتر از هر چیزی است که انسانها با آن سر و کار دارند از این رو آثاری که توسط نسبیت خاص پیش بینی شده‌اند در آغاز خلاف شهود به نظر می‌رسند.

۱.۴.۲ نسبی بودن همزمانی



رویداد A با B در چارچوب مرجع سبز همزمان است، اما در چارچوب آبی قبل و در چارچوب قرمز بعد از B رخ می‌دهد.

دو رویداد در مکانهای متفاوت که در چارچوب مرجع یک ناظر لخت همزمان رخ می‌دهند، ممکن است در چارچوب مرجع یک ناظر لخت دیگر غیر همزمان باشند. (نبود همزمانی مطلق) اگر یک ناظر لخت دو پدیده A و B را همزمان ببیند، ناظر لخت دیگری که با سرعت نسبت به ناظر اول حرکت می‌کند، بسته به شرایط ممکن است پدیده A را زودتر، همزمان، یا دیرتر از پدیده B ببیند. همزمانی در نسبیت خاص معنای مطلق و نیوتنی خود را از دست می‌دهد و پدیده‌ای نسبی می‌شود.

از معادله اول تبدیلات لورنتس بر حسب تغییر مختصاتها داریم:

$$\Delta t' = \gamma \left(\Delta t - \frac{v \Delta x}{c^2} \right)$$

واضح است که دو رویداد که در چارچوب S همزمان هستند (شرط $\Delta t = 0$ صادق است)، الزاماً در دستگاه لخت دیگر S' همزمان نیستند. تنها در صورتی که این رویدادها در چارچوب S هم مکان باشند (شرط $\Delta x = 0$ صادق باشد) در در دستگاه لخت دیگر S' نیز همزمان خواهند بود.

۲.۴.۲ انقباض طول

مقاله اصلی: انقباض طول ابعاد (مانند طول) یک شیء که توسط یک ناظر اندازه‌گیری می‌شوند ممکن است از نتایج اندازه‌گیری یک ناظر دیگر کوچکتر باشند.

مثلاً در نظر بگیرید که میله‌ای در یک سیستم نامشخص S در حال سکون و در امتداد محور x قرار گرفته است. در این دستگاه طول میله اندازه‌گیری

انرژی-تکانه عبارت است از $(E, 0, 0, 0)$: یک مولفه زمان دارد که انرژی است و سه مولفه مکان که صفر هستند با تغییر چارچوب از طریق تبدیل لورنتز در جهت x با سرعت کوچک v چهار-بردار انرژی-تکانه برابر $(E, 0, 0, 0)$ می‌گردد. تکانه برابر است با انرژی ضربدر سرعت تقسیم بر c^2 . به این ترتیب جرم نیوتنی یک جسم که نسبت تکانه به سرعت است برابر با E/c^2 خواهد بود.

تکانه و انرژی از ویژگیهای ماده و تابش هستند و غیرممکن است که بتوانیم تنها با استفاده از دو اصل نسبیت خاص بتوانیم نتیجه بگیریم که این دو تشکیل یک چهار-بردار می‌دهند. زیرا این اصول در مورد ماده و تابش حرفی نمی‌زند و تنها از زمان و فضا سخن می‌گویند؛ بنابراین برای رسیدن به این نتیجه به استدلال فیزیکی بیشتری نیازمندیم. در مقاله سال ۱۹۰۵ خود انیشتین از اصول اضافی استفاده کرد که در مکانیک نیوتنی هم برای سرعتهای پایین صادق هستند، مثل اینکه در سرعتهای پایین تنها یک کمیت زنده‌های انرژی و سه بردار تکانه وجود دارند و قانون پایستگی انرژی و تکانه دقیقاً در نسبیت صادق است. علاوه بر این او فرض نمود که انرژی نور نیز مانند بسامدش با همان فاکتور انتقال دوبرابر تغییر می‌کند که قبلاً درستی آن را با استفاده از معادلات ماکسول نشان داده بود.^[1] نخستین مقاله انیشتین در این موضوع، مقاله "آیا لختی یک جسم به محتوای انرژی اش وابسته است؟" بود که در سال ۱۹۰۵ منتشر گردید.^[21] گرچه بحثهای انیشتین در این مقاله تقریباً مورد پذیرش همگانی فیزیکدانان قرار گرفته است، اما نویسندگان بسیاری نیز در طول سالها پیشنهاد داده‌اند که ممکن است این بحثها نادرست باشند.^[22] سایر نویسندگان نیز بر این باورند که چون این بحثها بر پایه فرضهای ضمنی بنا شده‌اند، بی‌نتیجه‌اند.^[23]

انیشتین وجود اختلاف نظر در مورد نتیجه گیریهایش را در مقاله‌ای در مورد نسبیت خاص در سال ۱۹۰۷ پذیرفته بود. در این مقاله او عنوان می‌کند که تکیه بر معادلات ماکسول برای بحث اکتشافی جرم انرژی مشکل زاست. بحث او در مقاله سال ۱۹۰۵ می‌تواند در مورد تابش هر ذره بدون جرمی برقرار باشد اما معادلات ماکسول به طور ضمنی مورد استفاده قرار گرفته‌اند تا مشخص شود که تابش نور می‌تواند تنها با انجام کار صورت گیرد. برای تابش امواج الکترومغناطیس تنها چیزی که باید انجام شود تکان دادن یک ذره بار دار است و این همان انجام کار است و در نتیجه تابش ناشی از انرژی است.^{[24][25]}

۳.۵.۲ یک انسان تا چه اندازه می‌تواند از زمین دور گردد؟

از آنجا که هیچ‌کس نمی‌تواند سریعتر از نور حرکت کند، ممکن است این گونه نتیجه‌گیری کنیم که اگر عمر مفید انسان را بین ۲۰ تا ۶۰ سال در نظر بگیریم، یک انسان نمی‌تواند بیشتر از ۴۰ سال نوری از زمین دور شود. اما این نتیجه‌گیری اشتباه است. به دلیل اتساع زمان یک سفینه خیالی می‌تواند در طول عمر مفید خلبان آن هزاران سال نوری را بپیماید. اگر سفینه طوری ساخته شود که با شتاب ثابت g حرکت کند، در کمتر از یک سال سرعت آن برای ناظر زمینی تقریباً به سرعت نور می‌رسد. اتساع زمان عمر فرد را از دید ناظر زمینی افزایش می‌دهد اما ساعتی که با خلبان سفر می‌کند چنین تغییری نخواهد داشت. مردم روی زمین زمان بیشتری را نسبت به وی تجربه خواهند کرد یک سفر ۵ ساله وی ۶ سال در زمین به طول می‌انجامد و مسافتی برابر ۶ سال نوری را طی خواهد کرد. یک سفر ۲۰ ساله برای وی (۵ سال شتاب گرفتن و ۵ سال کاهش سرعت، هر کدام دوبار) ۳۵۵ سال زمینی به طول می‌انجامد و در این مدت مسافت ۳۳۱ سال نوری را طی خواهد نمود.^[26] یک سفر ۴۰ ساله کامل با شتاب g در روی زمین ۵۸۰۰۰ سال به طول می‌انجامد و ۵۵۰۰۰ سال نوری را پوشش می‌دهد. یک سفر ۴۰ ساله با شتاب g ۱٫۱ به مدت ۱۴۸۰۰۰ سال زمینی به طول می‌انجامد و مسافتی برابر ۱۴۰۰۰۰ سال نوری را پوشش خواهد داد. دلیل اینکه می‌تواند به نزدیک به سرعت نور حرکت می‌کند مسافتی بیشتر از c ضربدر نیمه‌عمر آن طی می‌کند نیز همین پدیده اتساع زمان است.^[27]

$$u' = \frac{dx'}{dt'} = \frac{\gamma(dx - vdt)}{\gamma(dt - vdx/c^2)} = \frac{(dx/dt) - v}{1 - (v/c^2)(dx/dt)} = \frac{u - v}{1 - uv/c^2}$$

و در چارچوب S:

$$u = \frac{dx}{dt} = \frac{\gamma(dx' + vdt')}{\gamma(dt' + vdx'/c^2)} = \frac{(dx'/dt') + v}{1 + (v/c^2)(dx'/dt')} = \frac{u' + v}{1 + u'v/c^2}$$

در نظر داشته باشید که اگر اجسام در چارچوب S در حال حرکت با سرعت نور بودند ($u = c$) در چارچوب دیگر S' نیز با سرعت نور حرکت می‌کردند. همچنین اگر هر دو سرعت u و v نسبت به سرعت نور کوچک باشند به تبدیل شهودی تر گالیلهای برای سرعتها برمی‌گردیم.

$$u' \approx u - v.$$

مثالی که معمولاً در این مورد زده می‌شود مثال قطاری است (چارچوب S در بالا) که با سرعت v نسبت به ریلها (چارچوب S) حرکت می‌کند. کودکی درون قطار توپ بیسبالی را به سمت شرق با سرعت u نسبت به قطار پرتاب می‌کند. در فیزیک کلاسیک ناظری که در حال سکون روی ریلها قرار دارد سرعت توپ بیسبال را

$$u = u' + v$$

اندازه‌گیری خواهد نمود. در حالیکه در نسبیت خاص این درست نیست بلکه سرعت توپ بیسبال از معادله دوم به دست می‌آید:

$$(u = (u' + v)/(1 + u'v/c^2)$$

۵.۲ سایر پیامدها

۱.۵.۲ چرخش توماس

جهت گیری یک جسم (یعنی امتداد محورهایش نسبت به محورهای ناظر) برای ناظرین مختلف ممکن است متفاوت باشد. بر خلاف سایر آثار نسبیتی این پدیده در سرعتهای نسبتاً پایین هم مشخص می‌شود همان‌طور که در چرخش ذرات متحرک مشاهده می‌شود.

۲.۵.۲ هم‌ارزی جرم و انرژی

مقاله اصلی: هم‌ارزی جرم و انرژی چنانچه سرعت یک جسم از دید یک ناظر به سرعت نور نزدیک گردد، جرم نسبیتی آن افزایش می‌یابد و از دید چارچوب مرجع ناظر، شتاب گرفتن جسم هر لحظه دشوارتر و دشوارتر به نظر خواهد رسید.

محتوای انرژی جسمی در حال سکون با جرم m برابر با mc^2 است. پایستگی انرژی ایجاب می‌نماید که در هر واکنشی کاهش در مجموع جرم ذرات باید با افزایش در انرژی جنبشی ذرات پس از واکنش همراه باشد؛ و متشابها با کاهش انرژی جنبشی، جرم ذرات افزایش می‌یابد.

افزون بر مقالاتی که در بالا به آنها ارجاع داده شد، انیشتین حداقل چهار مقاله دیگر هم در مورد مباحث اکتشافی در مورد هم‌ارزی جرم و انرژی با رابطه $E = mc^2$ منتشر نمود.

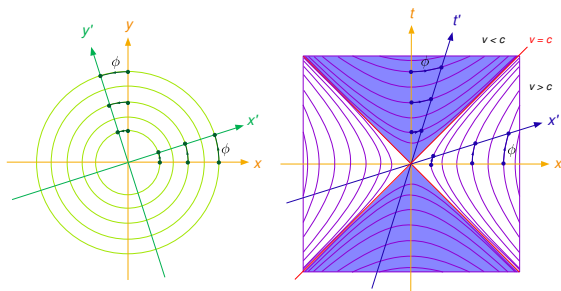
هم‌ارزی جرم و انرژی از نتایج نسبیت خاص است. انرژی و تکانه که در مکانیک نیوتنی مجزا هستند، در نسبیت یک چهار-بردار تشکیل می‌دهند و بدین ترتیب مولفه زمان (انرژی) و مولفه مکان (تکانه) رابطه‌ای غیر بدیهی با یکدیگر خواهند داشت. برای شیئی که در حال سکون است، چهار-بردار

نسبیت خاص سرعت‌های بیشتر از نور ممنوع است وجود دارد. مثلاً اگر نیروی ثابتی برای مدت نامحدودی به جسمی وارد شود، اگر از $F = dp/dt$ انتگرال بگیریم، تکانه‌ای به دست می‌آوریم که بدون مرز رشد می‌کند. دلیل این امر این است که وقتی v به c میل می‌کند، $p = m\gamma v$ به بی‌نهایت میل خواهد کرد. از دید ناظری که در حرکت شتابدار نیست، به نظر خواهد رسید که لختی جسم در حال افزایش است و از این رو همان نیرو شتاب کمتری ایجاد می‌نماید. این رفتار در شتاب دهنده‌های ذرات مشاهده شده است.

گوئنر نیمتز و پترسا اکل در مطالعات تجربی و نظری در مورد تونل‌زنی کوانتومی ادعا نمودند که سیگنالها ممکن است تحت شرایط خاصی سریعتر از نور حرکت کنند.^{[34][33][32][31]} مشاهده شد که سیگنالهای دیجیتال فیبری با سرعتی در حدود پنج برابر سرعت نور و یک الکترون در تونلی با زمان صفر اطلاعات یونیزه شدن را منتقل نمود به گونه‌ای که فوتون‌ها، فونون‌ها و الکترون‌ها زمان صفر را در مانع تونل زنی گذراندند. بنا بر نیمتز و اکل، این فرایند تنها علیت انیشتین و نسبیت خاص را نقض می‌کند و علیت پایه‌ای را نقض نمی‌کند: انتشار با سرعت بیشتر از نور باعث سفر در زمان نمی‌شود.^{[36][35]} ادعای نیمتز توسط بسیاری از دانشمندان رد یا مورد بحث قرار گرفته است.^{[40][39][38][37]}

۷.۲ هندسه فضا زمان

۱.۷.۲ مقایسه بین فضای تخت اقلیدسی و فضای مینکوفسکی



مقایسه تعامد و چرخش در دستگاه‌های مختصات بین چپ: فضای اقلیدسی از طریق زاویه چرخشی ϕ راست: im فضا زمان مینکوفسکی از طریق زاویه هایپربولیک ϕ (خطوط قرمز یا برچسب C جهان خط‌های سیگنال نور را مشخص می‌کنند، یک بردار بر خودش عمود است اگر روی این خطوط قرار گیرد).^[41]

نسبیت خاص از یک فضای مینکوفسکی تخت چهاربعدي - مثالی از یک فضا زمان - استفاده می‌کند. فضای مینکوفسکی بسیار به فضای اقلیدسی سه بعدی استاندارد شبیه است اما در مورد زمان یک تفاوت اساسی با آن دارد.

در فضای سه بعدی دیفرانسیل فاصله (عنصر خط) ds در رابطه زیر تعریف می‌شود

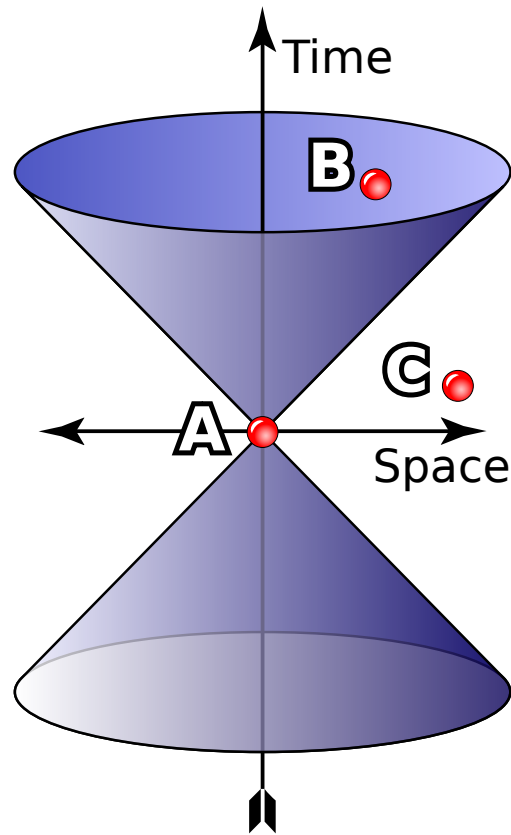
$$ds^2 = d\mathbf{x} \cdot d\mathbf{x} = dx_1^2 + dx_2^2 + dx_3^2,$$

که در آن $d\mathbf{x} = (dx_1, dx_2, dx_3)$ دیفرانسیل‌های سه بعد فضای هستند. در هندسه مینکوفسکی یک بعد اضافه با مختصات x^0 دارد که از زمان ناشی می‌شود، به گونه‌ای که دیفرانسیل فاصله در رابطه زیر صدق کند

$$ds^2 = -dx_0^2 + dx_1^2 + dx_2^2 + dx_3^2,$$

که در آن $d\mathbf{x} = (dx_0, dx_1, dx_2, dx_3)$ دیفرانسیل‌های چهار بعد فضا زمان هستند. این موضوع بینش نظری عمیقی در بردار: نسبیت خاص به سادگی

۶.۲ علیت و ممنوعیت حرکت سریعتر از نور



مخروط نور

در نمودار شکل مخروط نور، بازه AB یک 'زمان واره' است؛ یعنی چارچوب مرجعی وجود دارد که در آن A و B در یک نقطه مکانی از فضا رخ می‌دهند و تنها از طریق رخ دادن در زمانهای مختلف از هم جدا می‌گردند. اگر در آن چارچوب A پیش از B رخ دهد در تمام چارچوب‌ها A پیش از B رخ خواهد داد. به صورت فرضی، ماده (یا اطلاعات) می‌تواند از A به B حرکت کند پس می‌تواند رابطه علیتی بین A و B وجود داشته باشد. (علت A و معلول)

بازه AC در همان شکل یک 'فضاواره' است؛ یعنی چارچوب مرجعی وجود دارد که در آن A و C در یک زمان رخ می‌دهند و تنها از نظر مکان از هم جدا هستند. در برخی چارچوب‌ها A پیش از C رخ می‌دهد و در برخی A پس از C رخ می‌دهد. اگر امکان این بود که رابطه علیتی بین A و C بوجود آید، با پارادوکس‌های علیت برخورد می‌کردیم. مثلاً اگر A علت باشد و C معلول، چارچوب‌های مرجعی وجود خواهند داشت که در آنها معلول از علت از نظر زمانی پیشی می‌گیرد. اگر چه این به خودی خود پارادوکسی را پدید نمی‌آورد، اما می‌توان نشان داد^{[29][28]} که سیگنالهایی که سریعتر از نور فرستاده شوند می‌توانند به گذشته فرد برگردند. اگر فرد سیگنال را تنها در صورتی بفرستد که هیچ سیگنالی در گذشته دریافت نکرده باشد به یک پارادوکس علیتی می‌رسیم.

بنابراین برای حفظ علیت، یکی از پیامدهای نسبیت خاص این است که هیچ سیگنال اطلاعاتی و یا جسم مادی نمی‌تواند سریعتر از سرعت نور در خلاء حرکت کند. با این حال برخی «چیزها» می‌توانند سریعتر از نور حرکت کنند. مثلاً مکانی که پرتو یک نورافکن به پایین ابرها برخورد می‌کند وقتی که نورافکن سریع می‌گردد می‌تواند سریعتر از نور حرکت کند.^[30]

حتی بدون در نظر گرفتن علیت هم دلایل دیگری نیز برای اینکه چرا در

۲.۷.۲ فضا زمان چهار بعدی

اگر آن را به سه بعد فضایی افزایش دهیم، ژئودزیک‌های پوچ مخروط‌های چهاربعدی هستند.

$$ds^2 = 0 = dx_1^2 + dx_2^2 + dx_3^2 - c^2 dt^2$$

بنابراین

$$dx_1^2 + dx_2^2 + dx_3^2 = c^2 dt^2.$$

این مخروط دوتایی پوچ «خط دید» را در نقطه‌ای از فضا مشخص می‌کند، به این معنی که وقتی به ستارگان نگاه می‌کنیم و می‌گوییم «نوری که از ستاره به من می‌رسد X سال عمر دارد»، در واقع ما در امتداد این خط دید را نگاه می‌کنیم: یک ژئودزیک پوچ. ما به رویدادی در فاصله $d = \sqrt{x_1^2 + x_2^2 + x_3^2}$ در یک زمان d/c در گذشته می‌نگریم. به همین دلیل مخروط دوتایی پوچ «مخروط نور» نیز نامیده می‌شود.

مخروط در ناحیه t -اطلاعاتی است که نقطه دریافت می‌کند و مخروط ناحیه t +اطلاعاتی است که نقطه می‌فرستد.

فضای مینکوفسکی را می‌توان با استفاده از نمودارهای مینکوفسکی نمایش داد که در فهمیدن بسیاری از آزمایشهای فکری در نسبیت خاص نیز کارساز هستند.

۸.۲ فیزیک در فضا زمان

معادلات نسبیت خاص را می‌توان به شکل هم وردای آشکار (به انگلیسی: Manifestly Covariant) نوشت (که در آن همه عبارتها تانسور هستند). موقعیت یک رویداد در فضا زمان را توسط یک چهار-بردار پادورد (به انگلیسی: Contravariant four vector) با مولفه‌های

$$x^\nu = (x^0, x^1, x^2, x^3) = (ct, x, y, z).$$

نمایش می‌دهند. ما $x^* = ct$ را تعریف می‌کنیم تا مختصات زمانهمان بعد فاصله‌ای را داشته باشد که سایر ابعاد فضایی دارند تا بدین وسیله برخورد یکسانی با فضا و زمان داشته باشیم.^{[43][44][45]} بالانویس‌ها در این بخش نمایشگر اندیس‌های پادورداها هستند و نه توان؛ مگر در مواردی که مربع یک عبارت را مشخص می‌نمایند. زیرنویس‌ها نمایشگر اندیس‌های همورداها هستند که مقادیری از ۰ تا ۳ می‌گیرند، مانند چهار-گرادیان میدان نرده‌ای \square .

$$\partial_\mu \phi = (\partial_0, \partial_1, \partial_2, \partial_3) \phi = \left(\frac{1}{c} \frac{\partial \phi}{\partial t}, \frac{\partial \phi}{\partial x}, \frac{\partial \phi}{\partial y}, \frac{\partial \phi}{\partial z} \right).$$

۱.۸.۲ تبدیلات کمیت‌های فیزیکی بین چارچوب‌های مرجع

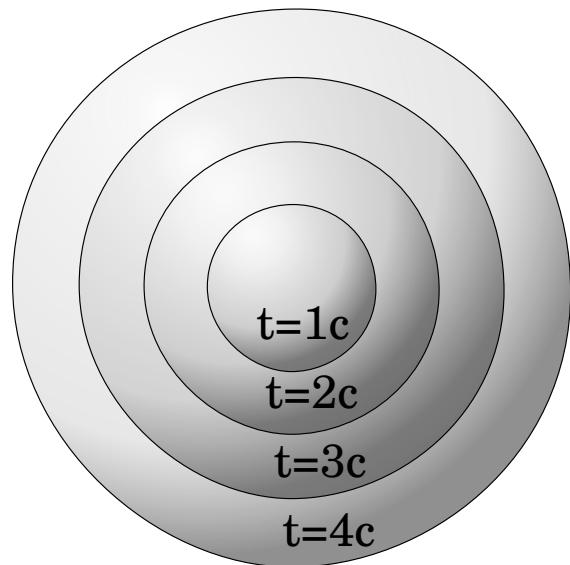
تبدیلات مختصات بین چارچوب‌های مرجع لخت توسط تانسور تبدیلات لورنتس \square به دست می‌آید. برای مورد خاص حرکت در امتداد محور x :

$$\Lambda^{\mu'}_{\nu} = \begin{pmatrix} \gamma & -\beta\gamma & 0 & 0 \\ -\beta\gamma & \gamma & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

یک تقارن چرخشی از فضا زمان ماست که قابل مقایسه با تقارن چرخشی در فضای اقلیدسی است.^[42] همان‌طور که فضای اقلیدسی از متریک اقلیدسی استفاده می‌کند، فضا زمان نیز از یک متریک مینکوفسکی استفاده می‌کند. اساساً می‌توان نسبت خاص را نوردایی هر بازه فضا زمان (که در واقع فاصله چهاربعدی بین دو رویداد در فضا زمان است) از دید ناظری در هر چارچوب مرجع لخت دلخواه تعریف کرد. تمام معادلات و تأثیرات نسبیت خاص را می‌توان از تقارن چرخشی (گروه پوانکاره) فضا زمان مینکوفسکی نتیجه گرفت.

شکل واقعی ds به متریک و مختصات x^* انتخاب شده بستگی دارد. برای اینکه مختصات را شبیه مختصات فضا بکنیم می‌توان آن را به عنوان یک عدد موهومی در نظر گرفت: $x_0 = ict$. میستر، تورن و ویلر در کتاب «گرنش» (۱۹۷۱، §۲,۳) خود چنین می‌نویسند که سرانجام درک ژرف تری از هر دو نظریه نسبیت عام و خاص از طریق متریک مینکوفسکی و با در نظر گرفتن $x^* = ct$ به جای یک متریک اقلیدسی نقاب زده با مقدار ict به عنوان مختصات زمان، حاصل خواهد شد.

۲.۷.۲ فضا زمان سه بعدی



کره فضایی پوچ.

اگر یکی از ابعاد فضایی را کاهش دهیم تا بتوانیم فیزیک را فضای سه بعدی نمایش دهیم

$$ds^2 = dx_1^2 + dx_2^2 - c^2 dt^2,$$

خواهیم دید که ژئودزیک‌های پوچ در امتداد یک مخروط دو تایی (در شکل سمت راست) به معادله زیر قرار می‌گیرند

$$ds^2 = dx_1^2 + dx_2^2 - c^2 dt^2,$$

و یا به سادگی

$$dx_1^2 + dx_2^2 = c^2 dt^2,$$

که معادله یک دایره به شعاع $c dt$ است.

۳.۸.۲ ناوردایی

که به سادگی ماتریس یک بالابردن (مانند چرخش) بین مختصات‌های x و ct است که در آن $\Lambda^{\mu'}_{\nu}$ ردیف و $\Lambda^{\mu'}_{\nu}$ ستون را نشان می‌دهند و

مجدور طول دیفرانسیل چهار-بردار موقعیت dx^{μ} که به صورت زیر به دست می‌آید،

$$\beta = \frac{v}{c}, \quad \gamma = \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}}.$$

$$d\mathbf{x}^2 = \eta_{\mu\nu} dx^{\mu} dx^{\nu} = -(c dt)^2 + (dx)^2 + (dy)^2 + (dz)^2$$

تبدیل یک چهار-بردار از یک چارچوب لخت به دیگری (برای سادگی انتقال‌ها را نادیده می‌گیریم) با تبدیلات لورنتس به دست می‌آید:

یک ناوردا است. ناوردا بودن به این معناست که مقدار آن در تمام چارچوب‌ها یکسان است، زیرا یک کمیت نرده‌ای (تانسور با مرتبه صفر) است و از این رو در تبدیلات بدیهی‌اش عبارت \square ظاهر نمی‌شود. توجه کنید که هرگاه عنصر خط، $d\mathbf{x}^2$ ، منفی باشد،

$$T^{\mu'} = \Lambda^{\mu'}_{\nu} T^{\nu}$$

در جاییکه یک جمع زدن ضمنی \square و \square از \bullet تا \bullet نیز موجود باشد. تبدیل معکوس به صورت زیر خواهد بود:

$$d\tau = \sqrt{-d\mathbf{x}^2}/c$$

دیفرانسیل زمان ویژه است و اگر $d\mathbf{x}^2$ مثبت باشد، \square دیفرانسیل فاصله ویژه خواهد بود.

$$\Lambda_{\mu'}^{\nu} T^{\mu'} = T^{\nu}$$

که در آن $\Lambda_{\mu'}^{\nu}$ ماتریس دوجانبه $\Lambda^{\mu'}_{\nu}$ است.

در ورد تبدیلات لورنتس بالا در راستای x :

۴.۸.۲ سرعت و شتاب در فضای چهاربعدی

در نظر گرفتن کمیت‌های فیزیکی به عنوان تانسور قوانین تبدیلیشان را نیز ساده‌تر می‌سازد. چهار-سرعت U^{μ} به گونه زیر به دست می‌آید

$$U^{\mu} = \frac{dx^{\mu}}{d\tau} = \begin{pmatrix} \gamma c \\ \gamma v_x \\ \gamma v_y \\ \gamma v_z \end{pmatrix}.$$

با در دست داشتن این رابطه می‌توان قانون پیچیده ترکیب سرعتها را به رابطه ساده‌ای برای تبدیل چهار-بردار سرعت یک ذره از یک چارچوب به چارچوب دیگر تبدیل نمود. U^{μ} یک شکل ناوردا نیز دارد:

$$U^2 = \eta_{\mu\nu} U^{\nu} U^{\mu} = -c^2.$$

بنابراین تمام چهاربردارهای سرعت اندازه‌ای برابر c دارند. این به گونه‌ای بیانگر این واقعیت است که در نسبیت، مختصات در حال سکون وجود ندارد: حداقل شما همیشه در حال حرکت در زمان هستید. چهار-شتاب نیز از رابطه

$$A^{\mu} = \frac{dU^{\mu}}{d\tau}.$$

اگر از این معادله بوسیله \square ، دیفرانسیل بگیریم معادله زیر حاصل می‌شود

$$2\eta_{\mu\nu} A^{\mu} U^{\nu} = 0.$$

بنابراین در نسبیت چهار-بردارهای سرعت و شتاب برهم عمودند.

۵.۸.۲ تکانه در فضای چهاربعدی

تکانه و انرژی در یک چهار-بردار هم وردا با هم ترکیب می‌شوند

$$\begin{pmatrix} ct' \\ x' \\ y' \\ z' \end{pmatrix} = x^{\mu'} = \Lambda^{\mu'}_{\nu} x^{\nu} = \begin{pmatrix} \gamma & -\beta\gamma & 0 & 0 \\ -\beta\gamma & \gamma & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} ct \\ x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \gamma ct - \beta\gamma x \\ \gamma x - \beta\gamma ct \\ y \\ z \end{pmatrix}$$

به صورت عمومی تر بیشتر کمیت‌های فیزیکی به بهترین شکل توسط (مولفه‌های) تانسورها توصیف می‌شوند؛ بنابراین برای تبدیل از یک چارچوب به دیگری از قانون مشهور تبدیل تانسور استفاده می‌کنیم.^[46]

$$T^{\alpha'\beta'\dots\zeta'}_{\theta'\nu'\dots\kappa'} = \Lambda^{\alpha'}_{\mu} \Lambda^{\beta'}_{\nu} \dots \Lambda^{\zeta'}_{\rho} \Lambda_{\theta'}^{\sigma} \Lambda_{\nu'}^{\tau} \dots \Lambda_{\kappa'}^{\phi} T^{\mu\nu\dots\rho}_{\sigma\tau\dots\phi}$$

که $\Lambda_{\chi'}^{\psi}$ ماتریس معکوس $\Lambda^{\chi'}$ است. تمام تانسورها با همین قانون تبدیل می‌شوند.

۲.۸.۲ متریک

از آنجا که فضا-زمان ماهیتی چهاربعدی دارد، متریک مینکوفسکی از مولفه‌هایی دارد که می‌توان آن‌ها را در یک ماتریس 4×4 نمایش داد.

$$\eta_{\alpha\beta} = \begin{pmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

که با معکوس خود برابر است، $\eta^{\alpha\beta}$

گروه پوانکاره کلی‌ترین گروه تبدیلات است که متریک مینکوفسکی را حفظ می‌کند.

واین تقارن فیزیکی سنگ بنای نسبیت خاص است.

در چارچوب سکون جسم، مولفه زمان چهار-نیرو برابر صفر خواهد بود مگر آنکه "جرم ناوردا" جسم در حال تغییر باشد؛ که در آن صورت برابر با منفی نرخ تغییر جرم ضربدر c خواهد بود. به طور کلی مولفه‌های چهار-نیرو با مولفه‌های سه-نیرو برابر نیستند زیرا سه نیرو به صورت نرخ تغییر تکانه نسبت به مختصات زمان تعریف می‌شود (dp/dt)، در حالیکه چهار-نیرو را نرخ تغییر تکانه نسبت به زمان ویژه تعریف می‌کنیم ($dp/d\tau$)

$$p_\nu = m \eta_{\nu\mu} U^\mu = \begin{pmatrix} -E/c \\ p_x \\ p_y \\ p_z \end{pmatrix}.$$

که در آن m جرم ناوردا است.

اندازه ناوردا چارچوب چهار-بردار تکانه رابطه انرژی-تکانه را نتیجه می‌دهد:

۹.۲ مکانیک کوانتومی نسبیتی

ترکیب و یکپارچه سازی نسبیت خاص با مکانیک کوانتومی برای ایجاد مکانیک کوانتومی نسبیتی یکی از مسئله‌های حل نشده فیزیک است. گرانش کوانتومی و نظریه همه‌چیز شاخه‌های فعال مورد پژوهش هستند.

در سال ۱۹۲۸ پل دیراک، یک معادله موج نسبیتی ارائه داد که امروزه به نام وی معادله دیراک خوانده می‌شود^[47] و کاملاً با نسبیت خاص و نسخه نهایی نظریه کوانتومی سازگاری داشت. این نظریه نه تنها تکانه زاویه‌ای ذاتی الکترون (اسپین) را توضیح می‌داد بلکه به پیش بینی وجود پادذره الکترون (پوزیترون) انجامید.^{[47][48]} ساختار ریز را تنها با نسبیت خاص می‌توان به طور کامل توضیح داد. در مکانیک کوانتومی غیر نسبیتی، اسپین قابل توضیح نیست.

از سوی دیگر وجود پادذره‌ها به این نتیجه می‌انجامد که یکپارچه سازی خام نسبیت و مکانیک کوانتوم امکانپذیر نیست در عوض یک نظریه میدان‌های کوانتومی مورد نیاز است که در آن ذرات می‌توانند در تمام فضا بوجود آیند و نابود شوند. (مانند الکتروپنایمیک کوانتومی و یا کرومودینامیک کوانتومی). این عناصر با مدل استاندارد فیزیک ذرات آمیخته می‌شوند.

۱۰.۲ وضعیت نظریه

نسبیت خاص در فضای مینکوفسکی تنها هنگامی دقیق است که قدرمطلق پتانسیل گرانشی در ناحیه مورد نظر بسیار کمتر از c^2 باشد.^[49] در میدان گرانشی قوی باید از نسبیت عام یاری جست. نسبیت عام در محدوده میدان‌های ضعیف به نسبیت خاص تبدیل می‌گردد. در مقیاس‌های خیلی کوچک، مثلاً در طول پلانک و کمتر باید آثار کوانتومی را در نظر گرفت که گرانش کوانتومی را نتیجه می‌دهد. اما در مقیاس‌های ماکروسکوپی و در غیاب مادیات گرانشی قوی نسبیت خاص در آزمایش‌های تجربی دقت بالایی (10^{-10}) را به نمایش می‌گذارد^[50] و از این رو از سوی جامعه فیزیک مورد پذیرش قرار گرفته است.

مکانیک نیوتنی از نظر ریاضی در سرعت‌های کوچک از نسبیت خاص پیروی می‌کند و از این رو مکانیک کوانتومی را می‌توان مکانیک اجسام متحرک با سرعت پایین دانست. چندین آزمایش که پیش از مقاله ۱۹۰۵ انیشتین انجام شدند اکنون به عنوان گواهی بر درستی این نظریه به شمار می‌روند. از میان این آزمایش‌ها، این آگاهی در دسترس است که انیشتین پیش از ۱۹۰۵ از آزمایش فیزو باخبر بود.^[51] برخی از تاریخ نگاران بر این باورند که انیشتین حداقل تا سال ۱۸۹۹ از آزمایش میکلسون-مورلی نیز آگاهی داشته است.^[18]

- آزمایش فیزو (۱۸۵۱) و تکرار آن توسط میکلسون و مورلی در سال ۱۸۸۶ (سرعت نور را در رسانه در حال حرکت اندازه‌گیری کرد که نتایج آن با افزودن سرعت‌های هم خط در نسبیت، همخوانی دارند).

- آزمایش بنام میکلسون-مورلی (۱۸۸۱ و ۱۸۸۷) پشتوانه‌ای برای این اصل بود که سرعت مرجع مطلق وجود ندارد.

شتاب دهنده‌های ذرات، به ذرات شتاب می‌دهند و ویژگی‌های ذرات را در سرعت‌های بالا نزدیک به سرعت نور اندازه می‌گیرند. در این سرعت‌ها رفتار ذرات کاملاً با نظریه نسبیت همخوانی دارد و با مکانیک نیوتنی ناسازگار است.

$$\mathbf{p}^2 = \eta^{\mu\nu} p_\mu p_\nu = -(E/c)^2 + p^2.$$

این ناوردا یک کمیت نرده‌ای است پس اهمیتی ندارد که در کدام چارچوب محاسبه می‌شود پس می‌توانیم آن را به چارچوبی تبدیل کنیم که در آن تکانه کل برابر صفر است.

$$\mathbf{p}^2 = -(E_{\text{rest}}/c)^2 = -(m \cdot c)^2.$$

می‌بینیم که انرژی سکون یک ناوردا مستقل است. انرژی سکون را می‌توان حتی برای ذرات و دستگاه‌های در حال حرکت نیز با انتقال آنها به چارچوبی که در آن تکانه صفر است، محاسبه کرد.

انرژی سکون طبق رابطه بنامی که قبلاً به آن اشاره شد، با جرم مرتبط است:

$$E_{\text{rest}} = mc^2.$$

توجه کنید که جرم سامانه‌هایی که در مرکز چارچوب تکانه‌شان (که در آن تکانه صفر است) اندازه‌گیری می‌شوند برابر با انرژی کل سامانه در این چارچوب است. این مقدار ممکن است با مجموع جرم هریک از سیستمها که در چارچوبهای دیگر اندازه‌گیری شده‌اند برابر نباشد.

۶.۸.۲ نیرو در فضای چهاربعدی

قانون دوم حرکت نیوتن بیان می‌کند که کل نیروی وارد بر یک ذره با نرخ تغییر تکانه اش برابر است. همین شکل از قانون دوم نیوتن در مکانیک نسبیتی نیز صادق است. سه-نیروی نسبیتی از رابطه زیر به دست می‌آید

$$\mathbf{f} = d\mathbf{p}/dt$$

اگر از جرم نسبیتی استفاده شود:

$$\frac{d\mathbf{p}}{dt} = \frac{d(m\mathbf{u})}{dt}$$

با استفاده از قانون لایب نیتز $d(xy) = xdy + ydx$:

$$\mathbf{f} = \frac{d\mathbf{p}}{dt} = m \frac{d\mathbf{u}}{dt} + \mathbf{u} \frac{dm}{dt}$$

اگر ذره با سرعت c حرکت نکند، می‌توان نیروی سه بعدی از چارچوب مرجع هم حرکت ذره به چارچوب مرجع ناظر تبدیل نمود. در نتیجه چهار-بردار نیرو خواهیم داشت که چهار-نیرو نامیده می‌شود و برابر است با نرخ تغییر چهار-بردار انرژی تکانه نسبت به زمان ویژه. شکل هم وردای چهارنیرو به صورت زیر است:

$$F_\nu = \frac{dp_\nu}{d\tau} = \begin{pmatrix} -d(E/c)/d\tau \\ dp_x/d\tau \\ dp_y/d\tau \\ dp_z/d\tau \end{pmatrix},$$

که در آن τ زمان ویژه است.

- جزوه‌های نسبیت خاص مقدمه‌ای استاندارد برای نسبیت خاص شامل تصاویر و توضیحات و نمودارهای فضا-زمان از دانشگاه پلی تکنیک ویرجینیا.
- جزوه‌های نسبیت خاص توسط جی دی کرسر از دانشگاه مک کوئری استرالیا.

۳.۱۲.۲ نسبیت خاص برای مخاطبین عام (بدون نیاز به دانستن دانش ریاضی)

- Wikibooks: Special Relativity
- Einstein Light ، مقدمه‌ای غیر تخصصی (فیلم و نمایش‌هایی که با بسیاری از صفحات حاوی توضیحات مفصل تر برای سطوح مختلف بدون استفاده از ریاضیات و با استفاده از آن همراه شده) .
- Einstein Online مقدمه‌ای بر نظریه نسبیت، از انستیتوی فیزیک گرانشی ماکس پلانک
- شنیداری: Astronomy Cast (2006) - Cain/Gay. نظریه نسبیت خاص انیشتین

۴.۱۲.۲ توضیح نظریه نسبیت خاص (با کمک ریاضیات ساده و پیشرفته)

- مفاهیم بنیادی نوشته گرگ ایگان.
- یادداشت‌های هاگ در نسبیت خاص مقدمه‌ای خوب بر نسبیت عام در سطح کارشناسی با استفاده از حساب دیفرانسیل و انتگرال.
- ماشین حساب نسبیت: نسبیت خاص - نتیجه‌گیری $E = mc^2$ با استفاده از حساب انتگرال و جبر.
- Motion Mountain, Volume II مقدمه‌ای پیشرفته بر نسبیت خاص همراه با تأثیرات دیداری آن .
- MathPages بازتاب‌هایی از نسبیت یک کتاب آنلاین کامل در مورد نسبیت با منبع شناسی بسیار گسترده .
- Relativity مقدمه بر نسبیت خاص در سطح کارشناسی بدون استفاده از حساب دیفرانسیل و انتگرال .
- کتاب الکترونیکی رایگان *Relativity: the Special and General Theory* در پروژه گوتنبرگ، از آلبرت انیشتین
- فهمیدن نسبیت خاص نظریه نسبیت خاص به صورتی که به آسانی فهمیده می‌شود.
- An Introduction to the Special Theory of Relativity (۱۹۶۴) نوشته «Robert Katz» مقدمه‌ای که برای دانشجویانی که آشنایی مقدماتی با فیزیک و حساب دیفرانسیل دارند سودمند خواهد بود) «۱۳۰». pp; pdf format

۵.۱۲.۲ تصویر سازی

- نورپردازی نسبیت خاص نرم‌افزاری که سناریوهای مختلفی را تحت تأثیر نسبیت خاص تصویر سازی می‌کند.
- نسبیت بی درنگ دانشگاه ملی استرالیا. ویژگی‌های دیداری تجربه شده توسط نسبیت خاص.

اگر این ماشینها بر اساس اصول نسبیتی مهندسی نشده بودند، نمی‌توانستند کار کنند. افزون بر این شمار زیادی از آزمایشهای جدید نیز برای آزمودن نظریه نسبیت انجام شده‌اند. از این دسته آزمایشها می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

- آزمونهای انرژی و تکانه نسبیتی - آزمودن حد سرعت ذرات
- آزمایش آیوس-استیلول - آزمودن اثر دوپلر نسبیتی و اتساع زمان
- اتساع زمان ذرات متحرک - آثار نسبیتی در نیمه عمر ذرات با سرعت بالا
- آزمایش کندی-تورندایک - اتساع زمان بر پایه تبدیلات لورنتس
- آزمایش هیوز-درور - آزمودن همسانگردی جرم و فضا
- جستجوهای جدید برای نقض لورنتس - آزمون‌های جدید گوناگون

انتقادات علیه نسبیت خاص اکثراً در سالهای نخستین انتشار نظریه در دهه ۱۹۰۰ وارد شدند و این نظریه را از دیدگاه‌های علمی، شبه علمی، فلسفی و ایدئولوژیک مورد انتقاد قرار دادند. با وجود اینکه برخی از این انتقادات از پشتیبانی دانشمندان بنام نیز برخوردار شدند، نظریه نسبیت امروزه به عنوان یک نظریه قائم بالذات و سازگار با شواهد تجربی شناخته می‌شود و پایه برخی از نظریات موفق از جمله الکترودینامیک کوانتومی می‌باشد

۱۱.۲ جستارهای وابسته

- تبدیلات لورنتس
- برابری جرم و انرژی
- فضای مینکوفسکی
- نسبیت عام
- پارادوکس‌های دوقلو
- پارادوکس نردبان

۱۲.۲ پیوند به بیرون

۱.۱۲.۲ آثار اصلی

- *Zur Elektrodynamik bewegter Körper* مقاله اصلی انیشتین به زبان آلمانی، سالنامه فیزیک، برن ۱۹۰۵
- *On the Electrodynamics of Moving Bodies* ترجمه انگلیسی مطابق آنچه در سال ۱۹۲۳ در کتاب *The Principle of Relativity* به چاپ رسید.

۲.۱۲.۲ کلاس درس و جزوه‌های دانشگاهی

- دوره فیزیک مدرن: نسبیت خاص (دانشگاه استنفورد) مجموعه کلاسهای درسی پروفیسور لئونارد ساسکیند متشکل از هشت جلسه کلاس در مورد نسبیت خاص
- جزوه‌های کلاس نسبیت خاص پروفیسور ساسکیند

- [12] Einstein, On the Relativity Principle and the Conclusions Drawn from It, 1907; "The Principle of Relativity and Its Consequences in Modern Physics", 1910; "The Theory of Relativity", 1911; Manuscript on the Special Theory of Relativity, 1912; Theory of Relativity, 1913; Einstein, Relativity, the Special and General Theory, 1916; The Principle Ideas of the Theory of Relativity, 1916; What Is The Theory of Relativity?, 1919; The Principle of Relativity (Princeton Lectures), 1921; Physics and Reality, 1936; The Theory of Relativity, 1949.
- [13] Das, A., The Special Theory of Relativity, A Mathematical Exposition, Springer, 1993.
- [14] Schutz, J., Independent Axioms for Minkowski Spacetime, 1997.
- [15] Yaakov Friedman, *Physical Applications of Homogeneous Balls*, Progress in Mathematical Physics 40 Birkhäuser, Boston, 2004, pages 1-21.
- [16] David Morin, *Introduction to Classical Mechanics*, Cambridge University Press, Cambridge, 2007, chapter 11, Appendix I
- [17] مایکل پولانی، *Personal Knowledge: Towards a Post-Critical Philosophy*, 1974, ISBN 0-226-67288-3, footnote page 10-11: انیشتین از طریق دکتر بالزاس و در پاسخ به پرسش پولانی اعلام نمود که "آزمایش میکلسون مورلی هیچ نقشی در پایه ریزی این نظریه نداشته است." و "نظریه نسبیت به هیچ وجه برای توجیه نتیجه این آزمایش وجود نیامد."
- [18] Dongen, Jeroen van (2009). "On the role of the Michelson–Morley experiment: Einstein in Chicago". *Eprint arXiv:0908.1545* **0908**: 1545. arXiv:0908.1545. Bibcode:2009arXiv0908.1545V.
- [19] Resnick, Robert (1968). *Introduction to special relativity*. Wiley. pp. 62–63.
- [20] Kleppner, Daniel; Kolenkow, David (1973). *An Introduction to Mechanics*. pp. 468–70.
- [21] Does the inertia of a body depend upon its energy content? A. Einstein, *Annalen der Physik*. **18**:639, 1905 (ترجمه انگلیسی از W. Perrett و G.B. Jeffery)
- [22] Max Jammer (1997). *Concepts of Mass in Classical and Modern Physics*. Courier Dover Publications. pp. 177–178. ISBN 0-486-29998-8.
- [23] John J. Stachel (2002). *Einstein from B to Z*. Springer. p. 221. ISBN 0-8176-4143-2.
- [24] *On the Inertia of Energy Required by the Relativity Principle*, A. Einstein, *Annalen der Physik* 23 (1907): 371-384
- [25] در نامه‌ای به کارل سیلینگ در سال ۱۹۵۵، انیشتین چنین می‌نویسد که «من قبلاً فهمیده بودم که نظریه ماکسول ریزساختار تابش را در نظر نگرفته است و در نتیجه اعتبار عمومی ندارد.» letter to Carl Seelig, 1955.
- [26] Gibbs, Philip; Koks, Don. "The Relativistic Rocket". Retrieved 30 August 2012.
- [27] <http://library.thinkquest.org/C0116043/specialtheorytext.htm> Thinkquest org
- [28] R. C. Tolman, *The theory of the Relativity of Motion*, (Berkeley 1917), p. 54
- سفر در فضا زمان مجموعه‌ای متنوع از تصویر سازیهای پدیده‌های نسبیتی از حرکت نسبیتی به سوی سیاهچاله.
- از دید انیشتین دانشگاه ملی استرالیا. توضیح آثار دیداری نسبیتی با فیلم و عکس.
- Warp Special Relativity Simulator برنامه‌ای رایانه‌ای برای نمایش آثار نزدیک شدن به سرعت نور .
- کلیپ‌های انیمیشن تصویر سازی تبدیلات لورنتس.
- انیمیشن‌های فلش تعاملی به تصویر کشیدن چارچوبهای لورنتسی و گالیله‌ای، پارادوکس قطار و تونل، پارادوکس دوقلوها، انتشار موج، همزمانی ساعتها و غیره.
- نورشناسی نسبیتی در دانشگاه ملی استرالیا
- برنامه‌ای بر پایه OpenGL که آثار نسبیت خاص را در ظاهر اجسام متحرک نشان می‌دهد.

۱۳.۲ منابع

[1] آلبرت انیشتین (1905) "Zur Elektrodynamik bewegter Körper", *Annalen der Physik* 17: 891 ترجمه انگلیسی توسط جرج بارکر جفری و ویلفرید پرت (1923)، یک ترجمه انگلیسی دیگر *On the Electrodynamics of Moving Bodies* از مق ند ساها (1920).

[2] Edwin F. Taylor and John Archibald Wheeler (1992). *Spacetime Physics: Introduction to Special Relativity*. W. H. Freeman. ISBN 0-7167-2327-1.

[3] Wolfgang Rindler (1977). *Essential Relativity*. Birkhäuser. p. §1,11 p. 7. ISBN 3-540-07970-X.

[4] Tom Roberts and Siegmund Schleif (October 2007). "What is the experimental basis of Special Relativity?". *Usenet Physics FAQ*. Retrieved 2008-09-17.

[5] Albert Einstein (2001). *Relativity: The Special and the General Theory* (Reprint of 1920 translation by Robert W. Lawson ed.). Routledge. p. 48. ISBN 0-415-25384-5.

[6] Richard Phillips Feynman (1998). *Six Not-so-easy Pieces: Einstein's relativity, symmetry, and space-time* (Reprint of 1995 ed.). Basic Books. p. 68. ISBN 0-201-32842-9.

[7] Albert Einstein, Relativity — The Special and General Theory, chapter 18

[8] چارلز میسنر، کیپ تورن & جان ویلر، *The Gravitation*, pg 172, 6.6 *local coordinate system of an accelerated observer*, ISBN 0-7167-0344-0

[9] Einstein, *Autobiographical Notes*, 1949.

[10] Einstein, "Fundamental Ideas and Methods of the Theory of Relativity", 1920

[11] Einstein, A., Lorentz, H. A., Minkowski, H., & Weyl, H. (1952). *The Principle of Relativity: a collection of original memoirs on the special and general theory of relativity*. Courier Dover Publications. p. 111. ISBN 0-486-60081-5.

- C.D. Anderson: *The Positive Electron*. Phys. Rev. **43**, [48] 491-494 (1933)
- G. A. Benford, D. L. Book, and W. A. Newcomb, *The Tachyonic Antitelephone*, Phys. Rev. D **2**, 263-265 (1970) article [29]
- Grøn, Øyvind; Hervik, Sigbjørn (2007). *Einstein's general theory of relativity: with modern applications in cosmology*. Springer. p. 195. ISBN 0-387-69199-5., Extract of page 195 (with units where $c=1$) [49]
- Salmon, Wesley C. (2006). *Four Decades of Scientific Explanation*. University of Pittsburgh. p. 107. ISBN 0-8229-5926-7., Section 3.7 page 107 [30]
- The number of works is vast, see as example: [50] Sidney Coleman, Sheldon L. Glashow, *Cosmic Ray and Neutrino Tests of Special Relativity*, Phys. Lett. B405 (1997) 249-252, online An overview can be found on this page [51]
- F. Low and P. Mende, A Note on the Tunneling Time Problem, Ann. Phys. NY, 210, 380-387 (1991) [31]
- A. Enders and G. Nimtz, On superluminal barrier traversal, J. Phys. I, France 2, 1693-1698 (1992) [32]
- Norton, John D., John D. (2004), "Einstein's Investigations of Galilean Covariant Electrodynamics prior to 1905", *Archive for History of Exact Sciences* **59**: 45-105, Bibcode:2004AHES...59...45N, doi:10.1007/s00407-004-0085-6 [51]
- S. Longhi et al. , Measurement of superluminal optical tunneling times in double-barrier photonic band gaps, Phys.Rev. E, 65, 06610 1-6 (2002) [33]
- P. Eckle et al. , Attosecond Ionization and Tunneling Delay Time Measurements in Helium, Science, 322, 1525-1529 (2008) [34]
- G. Nimtz, Do Evanescent Modes Violate Relativistic Causality?, Lect.Notes Phys. 702, 506-531 (2006) [35]
- G. Nimtz, Tunneling Violates Special Relativity, arXiv: 1003.3944v1 [36]
- Herbert Winful (2007-09-18). "Comment on "Macroscopic violation of special relativity" by Nimtz and Stahlhofen". arXiv:0709.2736 [quant-ph]. [37]
- Chris Lee (2007-08-16). "Latest "faster than the speed of light" claims wrong (again)". [38]
- Winful, Herbert G. (December 2006). "Tunneling time, the Hartman effect, and superluminality: A proposed resolution of an old paradox". *Physics Reports* **436** (1-2): 1-69. Bibcode:2006PhR...436....1W. doi:10.1016/j.physrep.2006.09.002. [39]
- تعدادی از مقالات در زمینه آزمایشهای تونل زنی سریعتر از نور لیست شده‌اند [40]
- J.A. Wheeler, C. Misner, K.S. Thorne (1973). *Gravitation*. W.H. Freeman & Co. p. 58. ISBN 0-7167-0344-0. [41]
- J.R. Forshaw, A.G. Smith (2009). *Dynamics and Relativity*. Wiley. p. 247. ISBN 978-0-470-01460-8. [42]
- Jean-Bernard Zuber & Claude Itzykson, *Quantum Field Theory*, pg 5 , ISBN 0-07-032071-3 [43]
- Charles W. Misner, Kip S. Thorne & John A. Wheeler, *Gravitation*, pg 51, ISBN 0-7167-0344-0 [44]
- George Sterman, *An Introduction to Quantum Field Theory*, pg 4 , ISBN 0-521-31132-2 [45]
- M. Carroll, Sean (2004). *Spacetime and Geometry: An Introduction to General Relativity* (illustrated ed.). Addison Wesley. p. 22. ISBN 0-8053-8732-3. [46]
- Dirac, P.A.M. (1930). "A Theory of Electrons and Protons". *Proc. R. Soc. A* **126**: 360. Bibcode:1930RSPSA.126..360D. doi:10.1098/rspa.1930.0013. JSTOR 95359. [47]
- ۱.۱۳.۲ کتابها
- Einstein, Albert (1920). *Relativity: The Special and General Theory*. •
- Einstein, Albert (1996). *The Meaning of Relativity*. • Fine Communications. ISBN 1-56731-136-9
- Freund, Jürgen (2008) *Special Relativity for Beginners - A Textbook for Undergraduates* World Scientific. ISBN 981-277-160-3 •
- Logunov, Anatoly A. (۲۰۰۵) *Henri Poincaré and the Relativity Theory* (transl. from Russian by G. Pontocorvo and V. O. Soleviev, edited by V. A. Petrov) Nauka, Moscow. •
- Gravitation*. W. (۱۹۷۱) چارلز مینسر، کیپ تورن، و جان ویلر (۱۹۷۱) H. Freeman & Co. ISBN 0-7167-0334-3 •
- Post, E.J. , ۱۹۹۷ (1962) *Formal Structure of Electromagnetics: General Covariance and Electromagnetics*. Dover Publications. •
- Wolfgang Rindler (1991). *Introduction to Special Relativity* (2nd ed.), Oxford University Press. ISBN 978-0-19-853952-0; ISBN 0-19-853952-5 •
- Harvey R. Brown (2005). *Physical relativity: space-time structure from a dynamical perspective*, Oxford University Press, ISBN 0-19-927583-1; ISBN 978-0-19-927583-0 •
- Qadir, Asghar (1989). *Relativity: An Introduction to the Special Theory*. Singapore: World Scientific Publications. p. 128. ISBN 9971-5-0612-2. •
- Silberstein, Ludwik (1914) *The Theory of Relativity*. •
- Lawrence Sklar (1977). *Space, Time and Spacetime*. • University of California Press. ISBN 0-520-03174-1.

- Lawrence Sklar (1992). *Philosophy of Physics*. Westview Press. ISBN 0-8133-0625-6.
- Richard A. Mould, *Basic Relativity*, Springer, 1994, ISBN 0-387-94188-6
- Taylor, Edwin, and John Archibald Wheeler (1992) *Spacetime Physics* (2nd ed.). W.H. Freeman & Co. ISBN 0-7167-2327-1
- Tipler, Paul, and Llewellyn, Ralph (2002). *Modern Physics* (4th ed.). W. H. Freeman & Co. ISBN 0-7167-4345-0
- کلیفورد ام. ویل، آیا اینشتین درست می‌گفت؟: آزمون نسبیت عام، ترجمه احمد شریعتی، انتشارات وزارت فرهنگ و ارشاد اسلامی، ۱۳۸۳.
- دانیل کلینر و رابرت کلنکو، آشنایی با مکانیک، ترجمه هوشنگ سپهری، محمد علی مقیمی، ولی‌الله ناصری، چاپ چهارم، مرکز نشر دانشگاهی، ۱۳۸۴.

۲.۱۳.۲ مقالات ژورنال

- Alvager, *et al.* ; Farley, F. J. M.; Kjellman, J.; Wallin, L. (1964). "Test of the Second Postulate of Special Relativity in the GeV region". *Physics Letters* **12** (3): 260. Bibcode:1964PhL....12..260A. doi:10.1016/0031-9163(64)91095-9.
- Darrigol, Olivier (2004). "The Mystery of the Poincaré-Einstein Connection". *Isis* **95** (4): 614–26. doi:10.1086/430652. PMID 16011297.
- Wolf, Peter; Petit, Gerard (1997). "Satellite test of Special Relativity using the Global Positioning System". *Physical Review A* **56** (6): 4405–09. Bibcode:1997PhRvA..56.4405W. doi:10.1103/PhysRevA.56.4405.

فصل ۳

نسبیت عام

برخی از پیش‌بینی‌های نسبیت عام به میزان قابل توجهی با پیش‌بینی‌های فیزیک کلاسیک تفاوت دارند؛ به‌ویژه آن‌هایی که مرتبط با گذر زمان، هندسه فضا، حرکت اجسام در سقوط آزاد و انتشار نور هستند. پدیده‌هایی چون اتساع زمان گرانشی، انتقال به سرخ گرانشی نور و تأخیر زمانی گرانشی که ناشی از کندتر بودن گذر زمان در نزدیکی میدان‌های گرانشی قوی است، همگرایی گرانشی که به خمیده شدن نور در یک میدان گرانشی قوی اشاره دارد و حرکت تقدیمی مدار سیارات نمونه‌هایی از این تفاوت‌ها هستند. همچنین تعریف جرم در نسبیت عام به سادگی فیزیک کلاسیک و حتی نسبیت خاص نیست، در واقع در نسبیت عام نمی‌توان تعریفی کلی برای جرم یک سامانه ارائه داد و تعریف‌های گوناگونی همچون جرم ای‌دی‌ام، جرم گمار و جرم بوندی پدید آمده‌اند.

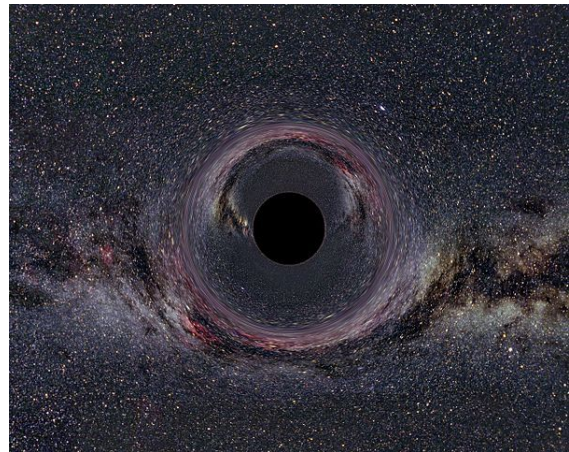
محدودیت سرعت اجسام مادی به سرعت نور در نسبیت عام، پیامدهایی در مورد ساختار سببی فضا-زمان در بردارد، زیرا تأثیر رویدادها و در نتیجه علیت نیز محدود به سرعت نور می‌باشند. این محدودیت در نسبیت عام به تعریف افق‌ها می‌انجامد که مرزبندی‌هایی در فضا-زمان هستند. از جمله افق‌ها می‌توان به افق ذره و افق رویداد اشاره کرد که به ترتیب برخی نواحی از گذشته و آینده را غیرقابل دسترسی می‌نمایند.

یکی از ویژگی‌های ابهام‌آمیز نسبیت عام تکینگی‌ها هستند که در آن‌ها هندسه فضا-زمان تعریف نشده‌است. برخی از پاسخ‌های معادلات میدان اینشتین، مانند پاسخ شوارتزشیلد و پاسخ کر تکینگی‌های آینده (تکینگی‌های سیاهچاله‌ها) و برخی دیگر مانند پاسخ فریدمان-لومتر رابرتسون-واکر تکینگی‌های گذشته (تکینگی میهانگ) را مشخص می‌کنند. ماهیت تکینگی‌ها همچنان در هاله ابهام قرار دارد، هرچند که تلاش‌هایی در زمینه توصیف ساختار آنها صورت گرفته‌است.

پیش‌بینی‌های نسبیت عام در تمام مشاهدات و آزمایش‌هایی که تا به امروز انجام گرفته‌است، تأیید شده‌اند. نسبیت عام تنها نظریه نسبیتی موجود برای گرانش نیست، بلکه ساده‌ترین نظریه‌ای است که با داده‌های تجربی همخوانی دارد. هرچند که پرسش‌هایی هستند که هنوز بی‌پاسخ مانده‌اند و شاید پایه‌ای‌ترین آن‌ها این باشد که چگونه می‌توان نسبیت عام را با قوانین فیزیک کوانتومی آشتی داد تا بتوان به نظریه‌ای کامل و خودسازگار برای گرانش کوانتومی دست یافت.

۱.۳ تاریخچه

اندکی پس از انتشار نظریه نسبیت خاص در سال ۱۹۰۵، اینشتین در این اندیشه بود که چگونه می‌تواند گرانش را در چارچوب نسبیتی جدیدش جای دهد. در سال ۱۹۰۷ با شروع از یک آزمایش فکری شامل یک مشاهده‌گر در سقوط آزاد، جستجویی هشت ساله برای دستیابی به نظریه‌ای نسبیتی برای گرانش را آغاز کرد. پس از اشتباهات و انحرافات متعدد سرانجام کار او در قالب آنچه امروزه معادلات میدان اینشتین می‌خوانیم، حاصل داد و در نوامبر ۱۹۱۵ به آکادمی علوم پروشن ارائه شد. این معادلات بیان می‌کنند که چگونه هندسه فضا و زمان از کل ماده و تابش موجود تأثیر می‌پذیرد و

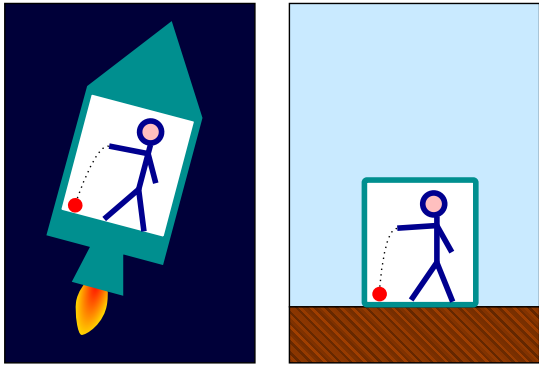


یک سیاهچاله شبیه‌سازی شده با ۱۰ جرم خورشیدی که از فاصله ۶۰۰ کیلومتری دیده می‌شود و در زمینه هم کهکشان راه شیری قرار دارد

نسبیت عام (به انگلیسی: General relativity) نظریه‌ای هندسی برای گرانش است که در سال ۱۹۱۶^[1] توسط آلبرت اینشتین منتشر شد و توصیف کنونی گرانش در فیزیک نوین است. این نظریه تعمیمی بر نظریه نسبیت خاص و قانون جهانی گرانش نیوتون است که توصیف یکپارچه‌ای از گرانش به‌عنوان یک ویژگی هندسی فضا و زمان یا فضا-زمان ارائه می‌دهد.

این نظریه، گرانش را به‌عنوان یک عامل هندسی و نه یک نیرو بررسی می‌کند. در این نظریه فضا-زمان توسط هندسه ریمانی بررسی می‌شود. خمش فضا-زمان مستقیماً با انرژی و تکانه کل ماده و تابش موجود متناسب است. این رابطه توسط سیستمی از معادلات دیفرانسیل با مشتقات پاره‌ای به نام معادلات میدان اینشتین نمایش داده می‌شوند. پایه نظری گرانش در کیهان‌شناسی، این نظریه و تعمیم‌های آن است.

نظریه اینشتین جنبه‌های اخت‌فیزیکی مهمی دارد. مثلاً این نظریه وجود سیاهچاله‌ها را به‌عنوان وضعیت پایانی ستاره‌های بزرگ پیش‌بینی می‌کند. شواهد گسترده‌ای موجود است که تابش بسیار شدید منتشرشده از برخی انواع اجسام اخت‌فیزیکی ناشی از وجود سیاهچاله‌ها است. مثلاً ریزاخترش‌ها و هسته کهکشانی فعال، به‌ترتیب نتیجه وجود سیاهچاله‌های ستاره‌وار و سیاهچاله‌های کلان‌جرم هستند. خم شدن نور بر اثر گرانش می‌تواند منجر به پدیده همگرایی گرانشی شود که بر اثر آن چندین تصویر از یک جسم اخت‌فیزیکی دور‌دست در آسمان دیده می‌شود. نسبیت عام همچنین وجود امواج گرانشی را پیش‌بینی می‌کند که مشاهده آن‌ها برای نخستین بار در سال ۲۰۱۶ و پس از گذشت صد سال از پیش‌بینی اینشتین در مورد وجود این امواج، به کمک تأسیسات لایگو (LIGO) صورت پذیرفت،^{[2][3]} هرچند قبلاً وجود این امواج به‌طور غیرمستقیم تأیید شده بود.^[4] پروژه‌هایی همچون لایگو و پروژه لیسای ناسا با هدف مشاهده مستقیم این امواج گرانشی راه‌اندازی شده‌اند. افزون بر این، نسبیت عام پایه مدل‌های رایج کنونی کیهان‌شناسی، که بر مبنای جهان در حال انبساط هستند، را تشکیل می‌دهد.



بنا بر نسبیت عام، اجسام در یک میدان گرانشی همانند اجسام در یک محفظه بسته شتابدار رفتار می‌کنند. مثلاً اگر شتاب موشک به اندازه‌ای باشد که همان نیروی نسبی گرانش زمین را داشته باشد، افتادن یک توپ در درون یک موشک (چپ) همانند افتادن یک توپ در نقطه‌ای روی زمین (راست) خواهد بود.

کلاسیک حرکت لخت اجسام در خط مستقیم و با سرعت ثابت انجام می‌شود. در ادبیات فیزیک مدرن مسیرهای حرکت لخت اجسام ژئودزیک نامیده می‌شوند که تعمیمی از مفهوم خط راست در هندسه فیزیک کلاسیک هستند، جهان‌خط‌های مستقیم در فضا-زمان خمیده.^[16]

در روندی معکوس ممکن است این انتظار وجود داشته باشد که با مشخص کردن حرکت لخت اجسام از طریق مشاهده حرکت واقعی و حذف انحراف‌های مربوط به نیروهای خارجی (مانند الکترومغناطیس و اصطکاک)، می‌توان هندسه فضا و همچنین مختصات زمان را تعریف کرد، اما وقتی پای گرانش به میان می‌آید این موضوع کمی ابهام‌آمیز می‌شود. بر طبق قانون گرانش نیوتن و تأیید آزمایش‌های مستقلی مانند آزمایش لورند اوتوو و سایرین، سقوط آزاد جهان‌شمول است (این قانون همچنین با نام اصل ضعیف هم‌ارزی و یا قانون جهانی برابری جرم لختی و جرم غیرفعال گرانشی شناخته می‌شود): مسیر حرکت ذره آزمون در سقوط آزاد تنها به مکان و سرعت اولیه اش بستگی دارد و به هیچ‌یک از ویژگی‌های مادی اش وابسته نیست.^[17] نسخه‌ای ساده شده از این مفهوم را می‌توان در آزمایش آسانسور انیشتین یافت که در تصویر سمت چپ دیده می‌شود: ناظری که در یک اتاق بسته کوچک قرار گرفته غیرممکن است که تنها با بررسی مسیر سقوط آزاد جسمی مانند یک توپ بتواند بفهمد که آیا محفظه، در حال سکون و در یک میدان گرانشی قرار دارد یا اینکه در فضای آزاد سوار بر موشکی شتابدار است که نیرویی به اندازه گرانش ایجاد می‌کند.^[18]

با توجه به جهان‌شمول بودن گرانش، تمایز قابل مشاهده‌ای بین حرکت لخت و حرکت ناشی از نیروی گرانشی وجود ندارد. این موضوع ما را بر آن می‌دارد که کلاس جدیدی از حرکت لخت برای اجسام در حال سقوط آزاد تحت تأثیر نیروی گرانش تعریف کنیم. این کلاس جدید نیز، به نوبه خود، هندسه‌ای از فضا و زمان به زبان ریاضی تعریف می‌کند که عبارت است از حرکت ژئودزیک متناظر با یک اتصال خاص که به گرادبان پتانسیل گرانشی بستگی دارد. در اینجا فضا هنوز هندسه اقلیدسی معمولی دارد. اما فضا-زمان، به‌عنوان یک کل، پیچیده‌تر است. همان‌طور که می‌توان با آزمایش‌های فکری ساده در مورد مسیرهای سقوط آزاد ذرات آزمون مختلف نشان داد، نتیجه جابجایی بردارهای فضا-زمان که بیانگر سرعت ذره هستند به مسیر ذره بستگی دارد؛ به زبان ریاضی، می‌توان گفت که اتصال نیوتنی انتگرال‌پذیر نیست. از این می‌توان نتیجه گرفت که فضا-زمان خمیده است. نتیجه، یک فرمول‌بندی هندسی از گرانش نیوتنی تنها با استفاده از مفاهیم هموردا است؛ یعنی توصیفی که در هر دستگاه مختصاتی معتبر است.^[19] در این توصیف هندسی اثرات کشندی شتاب نسبی اجسام در سقوط آزاد با مشتق اتصال مرتبط است که نشان می‌دهد چگونه تغییر شکل هندسی، برآمده از وجود جرم است.^[20]

هسته نسبیت عام اینشتین را تشکیل می‌دهند.^[5]

معادلات میدان اینشتین غیرخطی هستند و از این رو یافتن پاسخ برای آنها بسیار دشوار است. در حل مسائل مربوط به اولین پیش‌بینی‌های نظریه اش، اینشتین از روش‌های تقریبی استفاده نمود. اما دبری نیابید که در سال ۱۹۱۶ اخترفیزیکدانی به نام کارل شوارتزشیلد نخستین پاسخ غیربدیهی برای معادلات اینشتین را پیدا کرد که با نام متریک شوارتزشیلد شناخته می‌شود. این پاسخ امکان توصیف مراحل نهایی رمیش گرانشی و تشکیل اجسامی که امروزه به نام سیاهچاله می‌شناسیم، را فراهم نمود. در همان سال نخستین گام‌ها برای تعمیم پاسخ شوارتزشیلد به اجسام باردار آغاز شد. نتیجه این تلاش‌ها متریک رایسنر-نوردستروم بود که امروزه با سیاهچاله‌های دارای بار الکتریکی مرتبط است.^[6] در سال ۱۹۱۷ اینشتین نظریه‌اش را در مورد جهان به‌عنوان یک کل به کار گرفت و شاخه کیهان‌شناسی نسبیتی را پایه‌گذاری نمود. در آن زمان اینشتین در راستای اندیشه غالب عصر خود جهان را ایستا می‌پنداشت و به همین دلیل پارامتر جدیدی ثابت کیهانی را با معادلات اولیه خود افزود تا بتواند آن مشاهده را در نظریه‌اش تکرار نماید.^[7] اما تا سال ۱۹۲۹ در نتیجه کار هابل و سایرین مشخص شده بود که جهان ما در حال انبساط است. انبساط جهان به خوبی توسط بسط جواب‌های کیهانی که توسط الکساندر فریدمان در سال ۱۹۲۲ ارائه شد و نیازی به ثابت کیهانی ندارند، قابل توضیح است. با استفاده از این جوابها لومتر اولین نسخه از نظریه مهبانگ را فرمول‌بندی کرد که در آن جهان از یک حالت بی‌نهایت داغ و چگال اولیه بوجود آمده است.^[8] بعدها اینشتین ثابت کیهانی را بزرگترین اشتباه زندگی خود خواند.^[9]

در خلال آن دوران، نسبیت عام کینجکاو بسیاری از فیزیکدانان نظری را برانگیخته بود. این نظریه به وضوح از گرانش نیوتن برتر بود زیرا با نسبیت خاص سازگار بود و از عهده توضیح بسیاری از پدیده‌هایی برمی‌آمد که نظریه نیوتنی از توضیح آنها ناتوان بود. خود اینشتین در سال ۱۹۱۵ نشان داد که چگونه نظریه‌اش حرکت تقدیمی غیرعادی حضيض خورشیدی سیاره تیر را بدون استفاده از هیچ‌گونه پارامتر اختیاری توجیه می‌کند.^[10] به طور مشابهی در سال ۱۹۱۹، طی اکتشافی که توسط ادینگتون صورت گرفت، پیش‌بینی نسبیت عام در مورد انحراف نور ستاره‌ها در طی خورشیدگرفتگی ۲۹ مه ۱۹۱۹، تأیید گردید.^[11] و باعث شهرت فوری اینشتین شد.^[12] اما تنها با گسترش‌هایی که بین سالهای ۱۹۶۰ تا ۱۹۷۵ صورت گرفت این نظریه وارد جریان اصلی فیزیک نظری و اخترفیزیک شد و از این رو، این دوره را عصر طلایی نسبیت عام می‌خوانند.^[13] به تدریج فیزیکدانان مفهوم سیاهچاله را درک نمودند و اختروش‌ها را به‌عنوان نمونه‌ای از تجلی اخترفیزیکی این مفهوم شناسایی کردند.^[14] آزمایش‌هایی دقیق‌تر از همیشه بر روی منظومه شمسی قدرت پیش‌بینی نظریه را تأیید کردند^[1 notes] و گرایش‌هایی برای استفاده از کیهان‌شناسی نسبیتی برای هدایت آزمایش‌های مشاهده‌ای به‌وجود آمد.^[2 notes]

۲.۳ از مکانیک کلاسیک تا نسبیت عام

نسبیت عام را می‌توان با بررسی شباهت‌ها و تفاوت‌های فیزیک کلاسیک درک نمود. نخستین گام این است که متوجه شویم که مکانیک کلاسیک و قانون گرانش نیوتن به طور ضمنی یک توصیف هندسی را می‌پذیرند. با ترکیب این توصیف با قوانین نسبیت خاص به نسبیت عام می‌رسیم.^[3 notes]

۱.۲.۳ هندسه گرانش نیوتنی

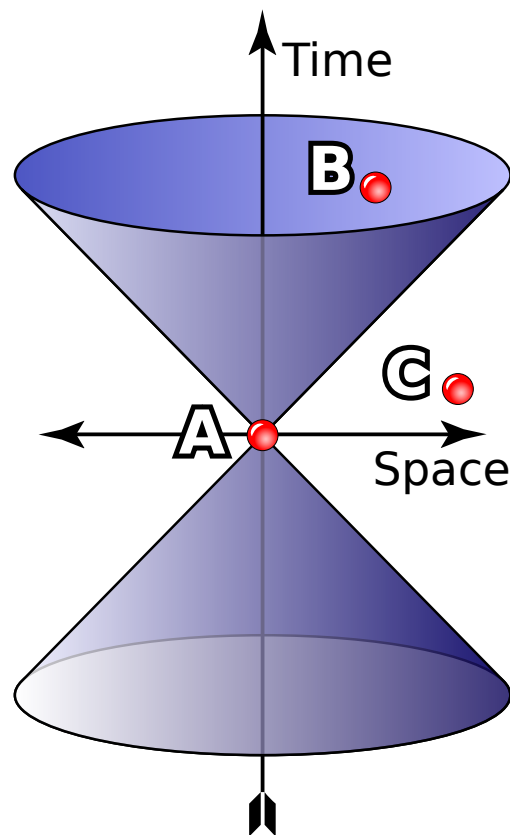
بنیان فیزیک کلاسیک بر این مفهوم استوار است که حرکت یک جسم را می‌توان ترکیبی از حرکت آزاد جسم (یا حرکت لخت) و انحراف‌هایی از این حرکت لخت دانست. این انحراف‌ها ناشی از نیروهای خارجی است که بر جسم وارد می‌شوند و بر طبق قانون حرکت دوم نیوتن عمل می‌کنند. قانون دوم نیوتن بیان می‌کند که نیروی خالص وارد بر یک جسم برابر با جرم (لختی) آن ضرب در شتاب جسم است.^[15] نوع حرکت لخت جسم با هندسه فضا و زمان مرتبط است: در چارچوب‌های مرجع استاندارد فیزیک

۲.۲.۳ تعمیم نسبیتی

شکل داده و نسبت به یکدیگر خمیدگی پیدا می‌کنند و ما را به سوی این پندار رهنمون می‌سازد که افزودن گرانش نیاز به تغییر در هندسه فضا-زمان دارد.^[23]

از پیش مشخص نیست که این چارچوب‌های جدید در حال سقوط آزاد همان چارچوب‌های مرجعی باشند که نسبیت خاص در آنها حکم فرماست. اما با استفاده از پنداشت‌های متفاوت در مورد چارچوب‌های نسبیت خاص می‌توان به پیش‌بینی‌های متفاوتی در مورد پدیده انتقال به سرخ گرانشی، یعنی چگونگی تغییر بسامد نور در میدان گرانشی رسید. اندازه‌گیری‌های واقعی نشان داده‌اند که نور در چارچوب‌های در حال سقوط آزاد نیز مانند چارچوب‌های نسبیت خاص منتشر می‌گردد.^[24] تعمیم این عبارت اصل هم‌ارزی خوانده می‌شود: قوانین نسبیت خاص با تقریب خوبی در چارچوب‌های مرجع در حال سقوط آزاد (غیرچرخان) برقرارند. این اصل یک اصل هدایت‌گر مهم برای گسترش نسبیت خاص با در نظر گرفتن گرانش است.^[25]

همین داده‌های تجربی گواهی می‌دهند که زمانی که توسط ساعت‌های قرار گرفته در یک میدان گرانشی اندازه‌گیری می‌شود Δ اصطلاح تخصصی آن زمان ویژه است Δ ، از قوانین نسبیت خاص پیروی نمی‌کند و با به بیان هندسه فضا-زمان، با متریک مینکوفسکی قابل اندازه‌گیری نمی‌باشند. همان‌گونه که در مورد مکانیک نیوتنی اتفاق افتاد در اینجا نیز نیازمند هندسه کلی‌تری هستیم. در مقیاس‌های کوچک، تمام چارچوب‌های مرجع در حال سقوط آزاد هم‌ارز و تقریباً مینکوفسکی وار هستند. متعاقباً ما با تعمیمی خمیده از فضای مینکوفسکی روبه‌رو هستیم. تانسور متریک که هندسه را تعریف می‌کند Δ به بیان دقیق‌تر چگونگی اندازه‌گیری طول‌ها و زاویه‌ها Δ ، متریک مینکوفسکی نسبیت خاص نیست؛ بلکه تعمیم یافته آن است که به نام متریک شبه-ریمانی شناخته می‌شود. همچنین هر متریک ریمانی به طور طبیعی با یک نوع خاص اتصال به نام اتصال لوی Δ چیهیوتا مرتبط است و این اتصال در واقع اتصالی است که اصل هم‌ارزی را ارضا کرده و فضا را به طور محلی، مینکوفسکی وار می‌سازد (یعنی در چارچوب‌های محلی لخت مناسب، متریک، مینکوفسکی وار است و مشتقات جزئی مرتبه اول آن و نیز ضرایب اتصال صفر هستند).^[26]



مخروط نوری

۳.۲.۳ معادلات میدان اینشتین

نوشته‌های اصلی: معادلات میدان اینشتین و ریاضیات نسبیت عام

با وجود فرمول‌بندی نسخه نسبیتی و هندسی آثار گرانش، پرسش دربارهٔ سرچشمه گرانش همچنان پابرجاست. در گرانش نیوتنی سرچشمه گرانش، جرم است. در نسبیت خاص، جرم پاره‌ای از کمیتی بزرگتر به نام تانسور انرژی-تنگانه است که شامل چگالی‌های انرژی و تکانه و تنش (که عبارت است از فشار و برش) می‌شود.^[27] با استفاده از اصل هم‌ارزی می‌توان این تانسور را به فضا-زمان خمیده تعمیم داد. چنانچه با گرانش هندسی نیوتنی مقایسه کنیم، طبیعی خواهد بود که بپنداریم معادله میدان گرانش، این تانسور را به تانسور ریچی مرتبط سازد. تانسور ریچی رده ویژه‌ای از اثرات کشندی را توصیف می‌کند: تغییر در حجم ابرهای کوچکی از ذرات آزمون که ابتدا ساکن هستند و سپس سقوط آزاد می‌کنند. در نسبیت خاص پایستگی انرژی-تنگانه متناظر با این عبارت است که تانسور انرژی-تنگانه بدون واگرایی است. این فرمول را نیز می‌توان با جایگزینی مشتقات پاره‌ای با خمینه‌های هم‌تابشان یعنی مشتقات هم‌وردای هندسه دیفرانسیل، به سادگی به فضا-زمان خمیده تعمیم داد. با این شرط اضافی Δ واگرایی هم‌وردای تانسور انرژی-تنگانه صفر است و در نتیجه هرآنچه در سوی دیگر معادله است نیز صفر خواهد شد Δ ساده‌ترین مجموعه معادلات، معادلاتی هستند که به نام معادلات میدان اینشتین خوانده می‌شوند.

$$R_{ab} - \frac{1}{2}Rg_{ab} = \frac{8\pi G}{c^4}T_{ab}.$$

عبارت سمت چپ تانسور اینشتین است، ترکیب ویژه بدون واگرایی از تانسور

بیان هندسی گرانش نیوتنی هرچند هم که جذاب باشد، اساس آن مکانیک کلاسیک، یعنی تنها حالتی حدی از مکانیک نسبیتی است.^[notes 4] به زبان تقارن: در جایی که بتوان گرانش را نادیده گرفت فیزیک دارای ناوردایی لورنتز است، مانند نسبیت خاص در مقایسه با مکانیک کلاسیک که دارای ناوردایی گالیله‌ای است (تقارن تعریف‌شده در نسبیت خاص گروه پوانکاره است که انتقال و چرخش را نیز شامل می‌شود). تفاوت این دو هنگامی اهمیت می‌یابد که با سرعت‌های بالا و نزدیک به سرعت نور و پدیده‌های پراثری سروکار داریم.^[notes 5]

ساختارهای دیگری نیز با تقارن لورنتز به میان می‌آیند. این ساختارها توسط تعدادی مخروط نور تعریف می‌گردند. مخروط‌های نور ساختاری علیتی را تعریف می‌کنند: به ازای هر رویداد A ، مجموعه‌ای از رویدادها وجود دارند که می‌توانند از طریق سیگنال‌ها و برهم‌کنش‌هایی که نیاز به سرعت بیشتر از نور ندارند، روی A تأثیر گذاشته یا از آن تأثیر بگیرند (مانند B) و مجموعه رویدادهایی که این نوع برهم‌کنش با A (با سرعت پایین‌تر از سرعت نور) برایشان امکان‌پذیر نیست (مانند C). این مجموعه‌ها مستقل از ناظر هستند.^[21] در ارتباط با جهان‌خط‌های ذرات در حال سقوط آزاد، مخروط‌های نوری را می‌توان برای بازسازی متریک شبه‌ریمانی فضا-زمان استفاده نمود. به زبان ریاضی این یک ساختار همدیس است.^[22]

نسبیت خاص در غیاب گرانش تعریف می‌شود و به همین دلیل در کاربردهایی عملی در مواردی که بتوان گرانش را نادیده گرفت، مدل مناسبی خواهد بود. با ورود گرانش به صحنه و با فرض اصل هم‌ارزی ضعیف، می‌توان استدلالی مانند بخش پیشین ارائه داد: چارچوب مرجع لخت جهانی وجود ندارد. به جای آن چارچوب‌های تقریباً لختی وجود دارند که در راستای ذرات در حال سقوط آزاد حرکت می‌کنند. به زبان فضا-زمان: خطوط زمان‌واره مستقیمی که یک چارچوب لخت بدون گرانش را تعریف می‌کنند، تغییر

نسبیت عام فرمول‌بندی می‌شوند □ در همه دستگاه‌های مختصات یک شکل خواهند داشت.^[34] علاوه بر این، نظریه شامل هیچ ساختار پس زمینه‌ای هندسی نوردایی نیست، یعنی مستقل از پس زمینه است. از این رو از اصل قوی تری به نام اصل نسبیت عام پیروی می‌نماید؛ این اصل بیان می‌کند که قوانین فیزیکی برای همه ناظرها یکسان هستند.^[7 notes] در مورد ساختارهای محلی، همان‌گونه که در اصل هم‌ارزی اشاره شد، فضا-زمان مینکوفسکی وار است و قوانین فیزیکی دارای نوردایی محلی لورنتس هستند.^[35]

ریچی R_{ab} و متریک، به طور خاص:

$$R = R_{cd}g^{cd}$$

خمش نرده‌ای است. خود تانسور ریچی نیز با تانسور کلی‌تر خمش ریمان به شکل زیر در ارتباط است

$$R_{ab} = R^d{}_{adb}$$

در سمت راست T_{ab} تانسور انرژی-تکانه است. تمام تانسورها در شکل نمادگذاری نمایه انتزاعی نوشته شده‌اند.^[28] برای اینکه پیش‌بینی‌های نظریه با نتایج تجربی مشاهدات مدارهای سیاره‌ها، سازگار باشند، ثابت تناسب را می‌توان به شکل $\Lambda = \Lambda G/c^4$ اصلاح نمود که در آن G ثابت گرانش و c سرعت نور است.^[29] هرگاه هیچ ماده‌ای موجود نباشد، به گونه‌ای که تانسور انرژی تکانه ناپدید گردد، معادلات خلاء اینشتین به دست می‌آیند:

$$R_{ab} = 0.$$

نظریه‌های جایگزینی برای نسبیت عام بر پایه پندارهای یکسان شکل گرفته‌اند. این نظریه‌ها شامل قوانین و محدودیت‌های اضافی‌ای هستند که باعث به‌وجود آمدن شکل‌های دیگری از معادلات میدان می‌شوند. برای نمونه می‌توان به نظریه برانس دیکی، دورهمسانی و یا نظریه اینشتین □ کارتان اشاره کرد.^[30]

۲.۳.۳ مدل‌سازی

هدف اصلی در مدل‌سازی با استفاده از نسبیت عام، یافتن پاسخی برای معادلات میدان اینشتین می‌باشد. با داشتن معادلات اینشتین و همچنین معادلات مناسب دیگر برای توصیف ویژگی‌های ماده، پاسخ معادلات یک خمینه شبه ریمانی (که معمولاً با استفاده از یک متریک در یک مختصات خاص تعریف می‌شود) به همراه میدان‌های ماده‌ی خاصی روی آن خمینه خواهد بود. ماده و هندسه باید در معادلات اینشتین صدق کنند، پس به طور خاص تانسور انرژی-تکانه باید بدون واگرایی باشد. البته ماده باید در معادلات دیگری که از طریق ویژگی‌هایش تحمیل می‌شوند نیز صدق کند. در مجموع چنین پاسخی برای این معادلات در حقیقت مدلی از جهان را نمایش خواهد داد که نسبیت عام و قوانین محتمل دیگری که بر ماده موجود حاکمند را ارضا می‌نماید.^[36]

معادلات اینشتین معادلات دیفرانسیل غیرخطی با مشتقات پاره‌ای هستند و به همین سبب یافتن پاسخ دقیق برای این معادلات دشوار است.^[8 notes] با این حال چند پاسخ دقیق برای این معادلات پیدا شده است؛ اگر چه که تنها برخی از این پاسخ‌ها کاربرد مستقیم فیزیکی دارند.^[9 notes] بهترین پاسخ‌های دقیق کشف شده که از دیدگاه فیزیکی نیز جالب‌ترند، عبارتند از: پاسخ شوارزشیلد، پاسخ رایسنر □ نورده‌شتروم و متریک کر که هر کدام با یک نوع خاص سیاه‌چاله در جهانی که تنها شامل این سیاه‌چاله است، در تناظر هستند،^[37] و متریک فریدمان □ لومتر □ رابرتسون □ اوکر و جهان دو سیت که هر دو جهان در حال انبساط را توصیف می‌کنند.^[38] پاسخ‌هایی که اهمیت نظری دارند عبارتند از متریک گودل (که احتمال سفر در زمان در فضا-زمان خمیده را مطرح می‌کند)، پاسخ تاب □ نات (مدلی از جهان که همگن است اما همسانگرد نیست) و فضای پاد □ دوسیت (که به تازگی در زمینه حدس مالداسنا مورد توجه قرار گرفته است).^[10 notes]

به دلیل دشواری یافتن پاسخ‌های دقیق، معادلات میدان اینشتین را اغلب با استفاده از انتگرال‌گیری عددی به کمک رایانه و یا با استفاده از روش‌های اختلالی با ایجاد انحرافات کوچک از جواب اصلی حل می‌کنند. در شاخه «نسبیت عددی»، رایانه‌های توانمندی به خدمت گرفته می‌شوند تا معادلات اینشتین را برای شرایط خاصی مثل برخورد سیاه‌چاله‌ها حل کنند.^[39] در اصل، چنین روش‌هایی را با در دست داشتن توان پردازشی کافی می‌توان برای هر سامانه‌ای به کار برد و به دنبال پاسخ برای پرسش‌هایی بنیادی همچون تکینگی‌های برهنه بود. جواب‌های تقریبی را همچنین می‌توان از طریق نظریه‌های اختلال یافت، مانند گرانش خطی شده^[40] و تعمیم آن، بسط پسانیوتنی که هردو توسط اینشتین به‌وجود آمده‌اند. بسط پسانیوتنی روش حلی سیستماتیک برای فضا-زمانی ارائه می‌کند که شامل توزیعی از ماده در حال حرکت با سرعتی کم نسبت به سرعت نور می‌باشد. این بسط شامل یک سری از جملات است که جمله اول نماینده گرانش نیوتنی است و جمله‌های بعدی نماینده اصلاحاتی هستند که به واسطه نسبیت عام بر گرانش نیوتنی وارد می‌شوند که مقدارشان در جملات متوالی کاهش می‌یابد.^[41] نسخه گسترش‌یافته این بسط، صورت‌گرایی پسانیوتنی پارامتری است که امکان مقایسه کمی بین پیش‌بینی‌های نسبیت عام و نظریه‌های جایگزین را به‌وجود می‌آورد.^[42]

۳.۳ تعریف و کاربردهای پایه‌ای

نتیجه‌گیری‌های بخش قبلی همه اطلاعات لازم برای تعریف و توصیف ویژگی‌های کلیدی نسبیت عام را شامل می‌شود و اکنون می‌توان به سراغ چگونگی استفاده از این نظریه برای مدل‌سازی پدیده‌های فیزیکی رفت.

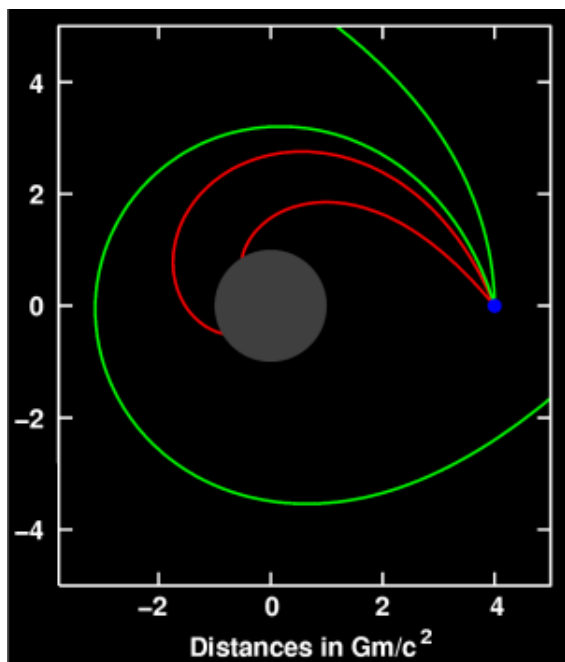
۱.۳.۳ تعریف و ویژگی‌های پایه‌ای

نظریه نسبیت، یک نظریه متریک برای گرانش است. در هسته این نظریه معادلات اینشتین قرار می‌گیرند که رابطه بین هندسه یک خمینه شبه-ریمانی چهاربعدي به‌عنوان فضا-زمان و انرژی-تکانه موجود در آن فضا-زمان را توصیف می‌کنند.^[31]

پدیده‌هایی که در مکانیک کلاسیک به عملکرد نیروی گرانش تعبیر می‌شوند (مانند سقوط آزاد، حرکت مداری، مسیر حرکت فضاپیما)، در نسبیت عام به حرکت‌های لخت در هندسه خمیده فضا-زمان نسبت داده می‌شوند. در نسبیت عام، گرانش نیرویی نیست که اجسام را از مسیر مستقیم طبیعی‌شان منحرف می‌کند، بلکه تغییری در ویژگی‌های فضا و زمان است که باعث تغییر مستقیم‌ترین مسیرهایی که اجسام به طور طبیعی انتخاب می‌کنند می‌شود.^[6 notes] خمش به نوبه خود توسط انرژی-تکانه ماده به‌وجود می‌آید. جان ویلر این موضوع را این‌گونه بیان می‌کند که فضا-زمان به ماده می‌گوید که چه‌طور حرکت کند و ماده نیز به فضا-زمان می‌گوید که چگونه خمیده شود.^[32]

با وجود اینکه نسبیت عام، پتانسیل گرانشی نرده‌ای فیزیک کلاسیک را با یک تانسور مرتبه دو جایگزین می‌کند، در برخی شرایط محدودتر، تانسور به میدان نرده‌ای کاهش می‌یابد. برای میدان‌های گرانشی ضعیف و سرعت‌های پایین (نسبت به سرعت نور)، پیش‌بینی‌های این نظریه به پیش‌بینی‌های قانون جهانی گرانش نیوتن همگرا می‌شوند.^[33]

از آنجایی که نسبیت عام برپایه تانسورها بنا شده است، هموردایی عام را به نمایش می‌گذارد: یعنی قوانین آن □ و دیگر قوانینی که در چارچوب



شکست نور (فرستاده شده از مکان آبی رنگ) نزدیک یک جسم فشرده (به رنگ خاکستری)

ناوردایی سرعت نور در نسبیت خاص هستند. [notes 15] چنانچه مدل‌های فضا-زمان را بررسی کنیم (چه مدل خارجی جواب شوارتزشیلد، چه مدل‌هایی که بیش از یک جرم دارند مثل بسط پسانیوتنی) [49] آثار متعددی از گرانش بر نور جلوه خواهند نمود. اگرچه می‌توان خمش نور را از تعمیم جهانشمول بودن سقوط آزاد به نور نتیجه گرفت، [50] زاویه شکستی که از نتیجه چنین محاسباتی به دست می‌آید تنها نیمی از مقداری است که از نسبیت عام به دست می‌آید. [51]

تأخیر زمانی گرانشی (یا تأخیر شاپیرو) ارتباط تنگاتنگی با شکست گرانشی نور دارد. تأخیر زمانی گرانشی به پدیده‌ای اشاره دارد که طی آن گذر نور در یک میدان گرانشی مدت زمان بیشتری از گذر نور در غیاب آن میدان به طول می‌انجامد. آزمون‌های موفق بی‌شماری برای این پیش‌بینی انجام شده‌اند. [notes 16] در صورت‌گرایی پارامتری پسانیوتنی (PPN)، اندازه‌گیری هر دو پدیده شکست نور و تأخیر زمانی گرانشی پارامتری به نام γ را مشخص می‌سازد، که تأثیر گرانش بر هندسه فضا-زمان در آن به رمز درآمده است. [52]

۳.۴.۳ امواج گرانشی

نوشتار اصلی: موج گرانشی

یکی از تشابه‌های متعدد میدان گرانشی ضعیف و میدان الکترومغناطیس این است که همانند امواج الکترومغناطیسی، امواج گرانشی نیز وجود دارند: امواجی در متریک فضا-زمان که با سرعت نور منتشر می‌شوند. [notes 17]

ساده‌ترین نوع چنین موجی را می‌توان با عمل آن بر روی حلقه‌ای از ذرات که آزادانه شناورند نمایش داد. موج سینوسی که از درون چنین حلقه‌ای به سمت خواننده منتشر می‌شود به صورت ریتمیک حلقه را دچار اعوجاج می‌نماید (شکل سمت چپ را ببینید). [notes 18] از آنجا که معادلات اینشتین غیرخطی هستند، امواج گرانشی که به اندازه کافی قوی باشند، از اصل برهم‌نهی پیروی نمی‌کند و این باعث دشواری توصیف آنها می‌شود؛ درحالی‌که برای میدان‌های ضعیف می‌توان از یک تقریب خطی استفاده نمود. اینگونه امواج گرانشی خطی شده از دقت کافی برای توصیف امواج گرانشی بسیار ضعیفی را که انتظار می‌رود از رویدادهای کیهانی بسیار دور به ما برسد، برخوردار هستند. در روش‌های تحلیل داده‌های مربوط به این امواج، استفاده‌های فراوانی از این واقعیت می‌شود که می‌توان امواج گرانشی خطی

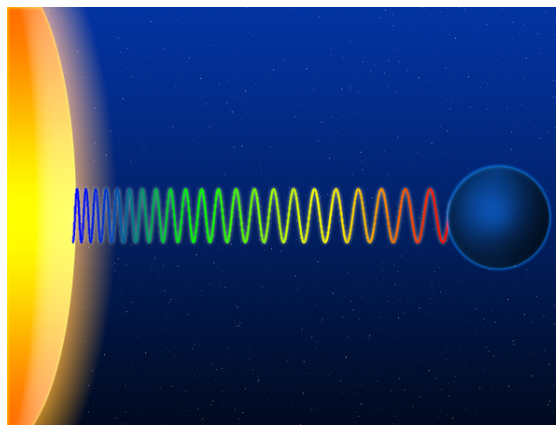
۴.۳ پیامدهای نظریه اینشتین

نسبیت عام پیامدهای فیزیکی چندی را به دنبال دارد. برخی از آنها مستقیماً از اصول نظریه ناشی می‌شوند در حالیکه سایر آنها تنها در طول نود سال پژوهشی که به دنبال انتشار نخستین نظریه توسط اینشتین آغاز شد، مشخص گشته‌اند.

۱.۴.۳ اتساع زمان گرانشی و انتقال بسامد

نوشتار اصلی: اتساع زمان گرانشی

بافرض درستی اصل هم‌ارزی، [43] گرانش بر گذر زمان اثر می‌گذارد. نوری



نمایش شماتیک انتقال به سرخ یک موج نور که از سطح یک جسم بسیار پرجرم می‌گریزد.

که به درون یک چاه گرانش فرستاده می‌شود، منتقل به آبی می‌گردد. در حالی‌که نوری که در جهت مخالف فرستاده می‌شود؛ یعنی از چاه گرانش بالا می‌آید منتقل به سرخ می‌گردد. این پدیده‌ها را انتقال بسامد گرانشی می‌نامند. به طور کلی، فرایندهایی که در نزدیکی یک جسم پرجرم صورت می‌گیرند کندتر از فرایندهایی که در فواصل دورتر قرار دارند پیش می‌روند. این پدیده را اتساع زمان گرانشی می‌گویند. [44]

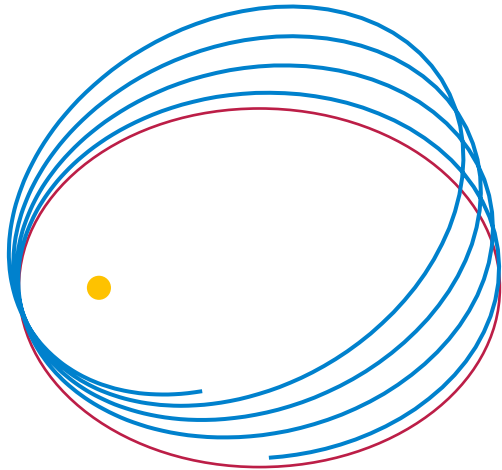
انتقال به سرخ گرانشی در آزمایشگاه [notes 11] و با بهره‌گیری از مشاهدات اخترفیزیکی [45] اندازه‌گیری شده است. اتساع زمان گرانشی در میدان گرانشی زمین دفعات زیادی با بهره‌گیری از ساعت‌های اتمی بررسی شده است. [notes 12] و به‌عنوان کاربردی جانبی برای پروژه سامانه موقعیت‌یاب جهانی (GPS) این نتایج پیوسته در حال ارزیابی هستند. [46] آزمونی در میدان گرانشی قوی‌تر را می‌توان با استفاده از مشاهدات تپاخترهای دوتایی انجام داد. [47] تمام نتایج با نسبیت عام همخوانی دارند [notes 13] اما در سطح دقت کنونی این آزمایش‌ها نمی‌توانند بین نسبیت عام و سایر نظریه‌هایی که در آنها اصل هم‌ارزی معتبر است تمایزی قائل شوند. [48]

۲.۴.۳ شکست نور و تأخیر زمانی گرانشی

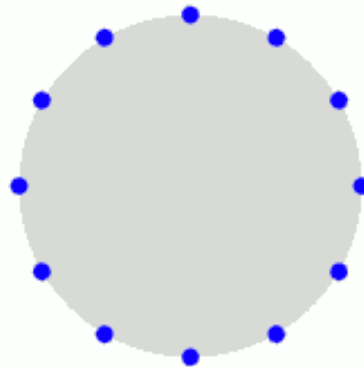
نوشتارهای اصلی: همگرایی گرانشی و تأخیر شاپیرو

نسبیت عام پیش‌بینی می‌کند که مسیر نور در میدان گرانشی خم می‌شود. نوری که از نزدیکی یک جسم پرجرم می‌گذرد به سوی آن جسم خمیده می‌شود. این اثر با مشاهده نور ستارگان دور و اختروش‌ها که با گذر از کنار خورشید خمیده می‌شود، تأیید شده است. [notes 14]

این پیش‌بینی و پیش‌بینی‌های مرتبط از این واقعیت پیروی می‌کنند که نور مسیری را که به آن نوراره (نورمانند) یا ژئودزیک پوچ (که تعمیمی بر خطوط مستقیمی در فیزیک کلاسیک هستند که نور در راستای آنها منتشر می‌شود) می‌گویند، دنبال می‌کند. چنان ژئودزیک‌هایی در واقع تعمیم



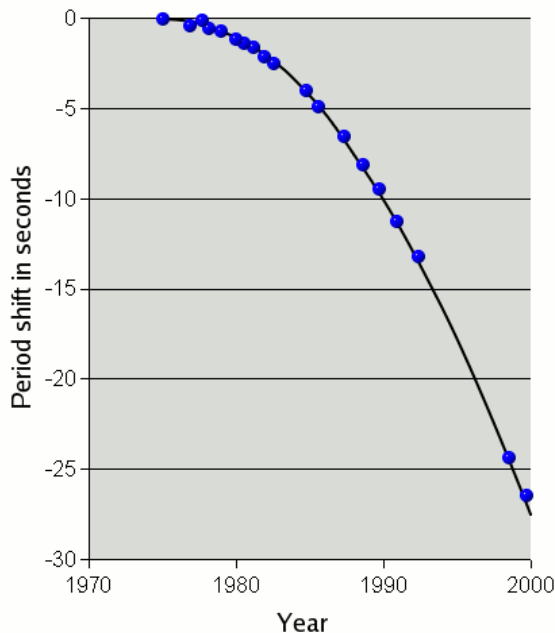
مدار نیوتنی (قرمز) در مقابل مدار اینشتینی (آبی) یک سیاره تنها که به دور ستاره‌ای می‌گردد



حلقه ذرات آزمون تحت تأثیر گرانش

سیاراتی که می‌توان در آنها به دقت حرکت تقدیمی را اندازه گرفت (تیر، ناهید و زمین)، مشاهده شده‌اند. [notes 20] حرکت تقدیمی در تپاخترهای دوتایی نیز اندازه‌گیری شده است که مقدار آن به اندازه پنج مرتبه بزرگی بیشتر است. [60]

افت مداری



افت مداری برای پی‌اس‌آر بی ۱۹۱۳+۱۶: تغییر زمان برحسب ثانیه که در طول سه دهه ردگیری شده است. [notes 21]

بنابر نظریه نسبیت عام یک منظومه دوتایی امواج گرانشی منتشر می‌کند و از این رو انرژی از دست خواهد داد. در نتیجه این کاهش انرژی فاصله بین دو جسم در حال چرخش کاهش می‌یابد؛ و بنابراین دوره تناوب چرخش آنها نیز کاهش می‌یابد. در درون منظومه شمسی یا برای جفت ستاره‌های معمولی این اثر آنقدر کوچک است که قابل مشاهده نیست. اما برای یک

شده را با استفاده از سری فوریه بسط داد. [53]

برخی از پاسخ‌های دقیق معادلات اینشتین امواج گرانشی را بدون هیچ تقریبی توصیف می‌کنند، مثلاً قطار موجی که در فضای خالی سفر می‌کند [54] یا آنچه به نام جهانهای گودی شناخته می‌شود که نسخه‌های مختلفی از یک کیهان در حال انبساط پر شده با امواج گرانشی است. [55] اما برای امواج گرانشی که در موارد مربوط به اخت‌فیزیک، مانند ادغام دو سیاه‌چاله تولید می‌شوند، تنها راه ساخت مدل‌های مناسب در حال حاضر روشهای عددی هستند. [56]

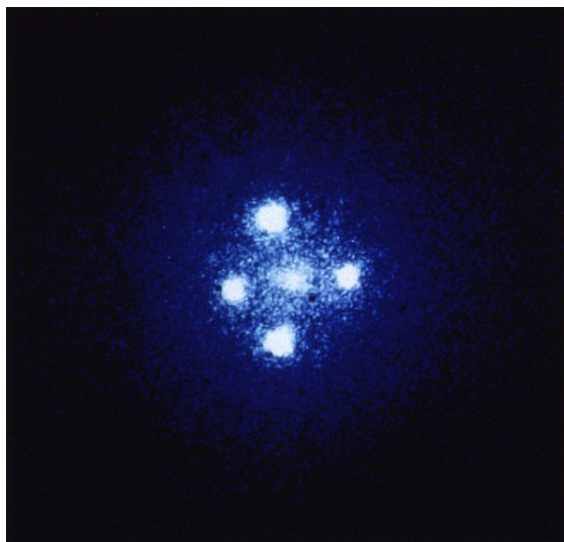
۴.۴.۳ تأثیرات مداری و نسبیت جهت

نسبیت عام و مکانیک کلاسیک در شماری از پیش‌بینی‌هایشان در مورد اجسام در حرکت مداری، با یکدیگر تفاوت دارند. نسبیت عام یک چرخش کلی (حرکت تقدیمی) مدار سیارات، کاهش یافتن مدار در نتیجه منتشر کردن امواج گرانشی و نیز آثار مربوط به نسبیت جهت را در مورد این مدارها پیش‌بینی می‌کند.

حرکت تقدیمی نقاط حضیض

در نسبیت عام، نقطه حضیض هر مدار (یعنی نقطه‌ای که در آن، جسم در حرکت مداری نزدیکترین فاصله را با گرانیگاه سامانه دارد) حرکتی تقدیمی خواهد داشت □ همان‌طور که در شکل مشخص است، شکل مدار بیضی نیست بلکه شبیه به بیضی است که روی کانونش می‌چرخد و یک منحنی رز پدید می‌آورد □ اینشتین برای نخستین بار این نتیجه را با استفاده از یک متریک تقریبی به‌عنوان نماینده حد نیوتنی و یک ذره آزمون به‌عنوان جسم در حرکت مداری استنتاج نمود. برای او دانستن این واقعیت که نظریه‌اش توضیح مستقیمی درباره حرکت تقدیمی حضیض خورشیدی سیاره تیر □ که در سال ۱۸۵۹ توسط اوربن لاوریه کشف شده بود □ ارائه می‌کند، گواه مهمی بود بر اینکه او شکل درستی از معادلات میدان گرانشی را یافته‌است. [57]

این اثر را می‌توان با استفاده از متریک دقیق شوارتزشیلد (که فضا-زمان اطراف یک جسم کروی را توصیف می‌کند). [58] و یا صورت‌گرایی پس‌انیوتنی نیز استنتاج نمود. [59] این پدیده ناشی از تأثیر گرانش بر هندسه فضا و نقش خود □ انرژی در گرانش یک جسم (که نمود آن را در غیرخطی بودن معادلات اینشتین می‌توان دید) می‌باشد. [notes 19] حرکت تقدیمی نسبیتی برای تمام

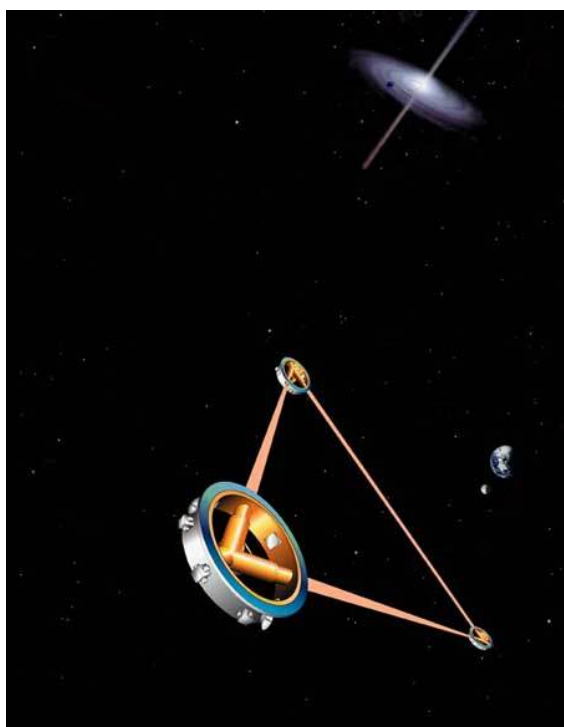


صلیب اینشتین: چهار تصویر از یک جسم نجومی که بر اثر همگرایی گرانشی بوجود آمده‌اند.

همگرایی گرانشی به صورت ابزاری برای ستاره‌شناسی رصدی درآمده است. از همگرایی گرانشی در آشکارسازی حضور و توزیع ماده تاریک، به‌عنوان «تلسکوپ طبیعی» برای مشاهده کپکشانهای دور و به‌دست‌آوردن تخمین مستقلی از ثابت هابل استفاده می‌کنند. ارزیابی آماری داده‌های همگرایی، بینش‌های ارزشمندی در مورد تکامل ساختاری کپکشانها عرضه می‌دارد.^[75]

۲.۵.۳ اخترشناسی امواج گرانشی

نوشتار اصلی: امواج گرانشی
مشاهدات تپاخترهای دوتایی شواهد غیرمستقیم محکمی برای وجود امواج



تصویر هنری از آشکارساز موج گرانشی فضایی لیسا

تپاختر دوتایی که در فاصله نزدیکی قرار دارد، وضعیت این‌گونه نیست. یک تپاختر دوتایی از دو ستاره نوترونی در حرکت مداری هستند تشکیل شده است که یکی از آنها تپاختر است. ناظرین روی زمین، سری منظمی از پالس‌های رادیویی از یک تپاختر دریافت می‌کنند که می‌توان از آنها به‌عنوان یک ساعت بسیار دقیق استفاده نمود و بدین وسیله دوره تناوب مداری را اندازه گرفت. از آنجا که ستاره‌های نوترونی بسیار فشرده هستند انرژی قابل توجهی از آنها به‌صورت تابش گرانشی منتشر می‌شود.^[61]

اولین مشاهده کاهش در دوره تناوب مداری بر اثر انتشار امواج گرانشی توسط هالس و تیلور، با استفاده از تپاختر دوتایی پی‌اس‌آر بی ۱۹۱۳+۱۶ که در سال ۱۹۷۴ کشف کرده بودند، انجام شد. این نخستین آشکارسازی امواج گرانشی بود که البته غیرمستقیم بود. آن‌ها به خاطر این مشاهده در سال ۱۹۹۳ موفق به کسب جایزه نوبل فیزیک شدند.^[62] از آن زمان به بعد تپاخترهای دوتایی متعددی مانند پی‌اس‌آر جی ۰۷۳۷+۳۰۳۹ کشف شده‌اند که در آن هر دو ستاره تپاختر هستند.^[63]

حرکت تقدیمی ژئودتیک و کشش چارچوب

نوشتارهای اصلی: کشش چارچوب و اثر ژئودتیک

شماری از آثار نسبیتی مستقیماً به نسبت جهت مربوط می‌شوند.^[64] یکی از آنها حرکت تقدیمی ژئودتیک است: محور جهت یک ژيروسکوپ در حال سقوط آزاد در فضا زمان خمیده، وقتی که مثلاً با جهت نور دریافت شده از ستاره‌های دوردست مقایسه می‌شود تغییر می‌کند حتی با اینکه در اینجا ژيروسکوپ در واقع به‌عنوان نماینده روشی برای ثابت نگه‌داشتن جهت (انتقال موازی) در نظر گرفته شده است.^[65] برای سیستم ماه‌زمین، این اثر با کمک محدوده بندی لیزری قمری اندازه‌گیری شده است.^[66] به تازگی برای جرم‌های آزمون سوار بر ماهواره حسگر گرانش بی با دقتی بهتر از ۰٫۳٪ اندازه‌گیری شده است.^{[67][22 notes]}

در نزدیکی یک جسم چرخنده آثاری که به نام گرانش مغناطیسی یا کشش چارچوب نامیده می‌شوند، وجود دارند. یک ناظر دور خواهد دید که اجسام نزدیک به جرم چرخنده کشیده می‌شوند. این اثر در مورد سیاهچاله‌های چرخان پررنگ‌تر است، زیرا در آنها برای هر جسمی که وارد ناحیه‌ای به نام ارگوسفر می‌شود، چرخش اجتناب‌ناپذیر است.^[68] چنین آثاری را می‌توان با تاثیرشان بر جهت گیری ژيروسکوپ در حال سقوط، آزمود.^[69] آزمونهای تاحدودی بحث‌انگیز نیز توسط ماهواره‌های ژئودینامیک لیزری نیز پیش‌بینی‌های نسبیت را تأیید می‌کنند.^[70] همچنین کاوش‌های نقشه‌بردار سراسر مریخ در اطراف مریخ نیز مورد استفاده قرار گرفته‌اند.^{[71][72]}

۵.۳ کاربردهای اخترفیزیکی

۱.۵.۳ همگرایی گرانشی

نوشتار اصلی: همگرایی گرانشی

شکست نور توسط گرانش مسبب رده جدیدی از پدیده‌های اخترفیزیکی است. اگر یک جسم پرجرم بین اخترشناس و یک شی هدف در دوردست با جرم و فاصله نسبی مناسب قرار گیرد، اخترشناس چندین تصویر موج از آن را می‌بیند. چنین آثاری را همگرایی گرانشی می‌خوانند.^[23 notes] بسته به پیکربندی، مقیاس و توزیع جرم، ممکن است دو تصویر یا بیشتر، یک حلقه روشن به نام حلقه اینشتین و یا چندین حلقه جزئی به نام کمان دیده شوند.^[24 notes] اولین نمونه همگرایی گرانشی اختروش دوقلو بود که در سال ۱۹۷۹ کشف شد.^[73] از آن پس بیش از صد مورد همگرایی گرانشی مشاهده شده است.^[25 notes] حتی اگر تصاویر ایجاد شده آنقدر به هم نزدیک باشند که قابل تشخیص نباشند نیز می‌توان این تأثیر را اندازه گرفت، مثلاً روشن شدن کلی جسم دور؛ چندین نمونه از این ریزهمگرایی‌های گرانشی نیز مشاهده شده‌اند.^[74]

از دید اخترشناسی مهمترین ویژگی اجسام فشرده این است که مکانیزم بسیار کارایی برای تبدیل انرژی گرانشی به تابش الکترومغناطیسی ارائه می‌دهند.^[86] گمان می‌رود که برافزایش ماده، یعنی افتادن غبار یا مواد گازی به درون سیاهچاله‌های ستاره‌ای و یا سیاهچاله‌های پرجرم؛ مسبب پیدایش اجسام فوق‌العاده درخشان نجومی مانند هسته‌های کهکشانی فعال در مقیاس کهکشانی و اجسام در مقیاس ستاره‌ای مانند ریزاخترها، هستند.^[87] به طور خاص، برافزایش ماده می‌تواند منجر به پیدایش پدیده فواره‌های نسبیتی شود؛ پرتوهای بسیار پرانرژی از ذرات با سرعت‌هایی تقریباً برابر با سرعت نور به فضا پرتاب می‌شوند.^[88] نسبت عام نقشی محوری در مدلسازی این پدیده‌ها دارد.^[89] و مشاهدات تجربی نیز مدارک مستحکمی برای وجود سیاهچاله‌ها با خصوصیات پیش بینی شده در نسبیت عام، ارائه می‌کنند.^[90]

سیاهچاله‌ها یکی از اهدافی هستند که در کنکاش برای آشکارسازی امواج گرانشی مورد جستجو قرار می‌گیرند. ادغام سیاهچاله‌های دوتایی می‌بایست منجر به تولید امواج گرانشی بسیار قوی شود که توسط آشکارسازها در زمین قابل دریافت باشند و از فازی که دقیقاً پیش از ادغام رخ می‌دهد نیز می‌توان به‌عنوان یک شمع استاندارد استفاده نمود تا فاصله با محل رویداد ادغام به‌دست آید و بدین ترتیب می‌توان انبساط کیهانی را در فواصل بزرگ سنجید.^[91] امواج گرانشی تولید شده در هنگام فرورفتن یک سیاهچاله ستاره‌ای در یک سیاهچاله پرجرم، می‌تواند اطلاعات مستقیمی دربارهٔ هندسهٔ سیاهچاله‌های پرجرم ارائه دهند.^[92]

۴.۵.۳ کیهان‌شناسی



این نعل اسب آبی رنگ، یک کهکشان دور است که توسط کشش گرانشی بسیار قوی کهکشان قرمز درخشان زمینه بزرگ‌نمایی شده و به صورت یک حلقه تقریباً کامل درآمده است.

مدل‌های کنونی کیهان‌شناسی برپایهٔ آن دسته از معادلات میدان اینشتین که شامل ثابت کیهانی Λ هستند، بنا می‌شوند؛ زیرا ثابت کیهانی اثر مهمی در دینامیک بزرگ‌مقیاس کیهان دارد.

$$R_{ab} - \frac{1}{2}R g_{ab} + \Lambda g_{ab} = \kappa T_{ab}$$

که در آن g_{ab} متریک فضا-زمان است.^[93] پاسخ‌های همگن و همسانگرد این معادلات بهبودیافته (متریک فریدمان-لومتر-رابرتسون-واکر) به فیزیکدان‌ها اجازه می‌دهد که جهانی را مدل کنند که در طول ۱۴ میلیارد سال گذشته از یک حالت بسیار داغ و چگال اولیه طی مرحله مه‌بانگ پدید آمده و تکامل یافته‌است.^[94] هرگاه اندکی از پارامترها را (مثلاً میانگین چگالی ماده در جهان) با استفاده از داده‌های مشاهدات اخترشناسی^{[26] notes} ثابت نگه داریم، می‌توان از دیگر داده‌های مشاهداتی برای آزمودن مدل‌ها بهره

گرانشی به دست می‌دهند. مشاهدهٔ مستقیم امواج گرانشی یکی از اهداف اصلی پژوهش‌های نسبیتی کنونی است.^[76] تعداد زیادی از آشکارسازهای موج گرانشی واقع بر روی زمین، هم اکنون در حال کار هستند که مهمترین آنها آشکارسازهای تداخل سنجی ژئو ۶۰۰، لیگو (۳ آشکارساز)، تاما ۳۰۰ و ویرگو هستند.^[77] آرایه‌های زمان سنجی تپاختر مختلفی با بهره‌گیری از تپاخترهای میلی‌ثانیه‌ای برای آشکارسازی امواج گرانشی در طیف 10^{-9} تا 10^{-6} هرتز (که از سیاهچاله‌های پرجرم دوتایی سرچشمه می‌گیرند) ساخته شده‌اند.^[78] آشکارساز فضایی اروپایی، لیسا / ان جی اُ هم اکنون در حال ساخت است^[79] و یک مأموریت آزمایشی (رهیاب لیسا) برای این پروژه نیز قرار است در سال ۲۰۱۵ به فضا پرتاب شود.^[80]

مشاهدهٔ امواج گرانشی در سال ۲۰۱۶

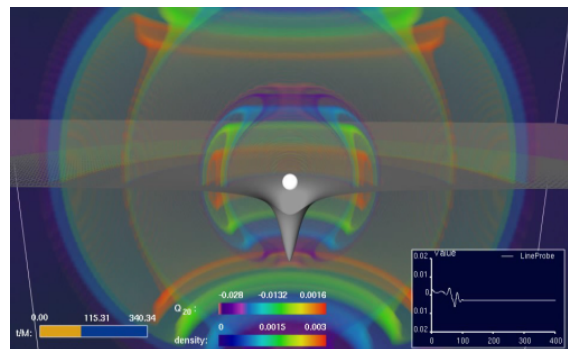
در ۱۱ فوریه ۲۰۱۶ پژوهشگران در LIGO موفق به مشاهده مستقیم امواج گرانشی برای نخستین بار شدند.^[3] موج مشاهده شده ناشی از ترکیب دو سیاهچاله با جرم‌های تقریبی ۳۶ و ۲۹ برابر جرم خورشید، و در فاصلهٔ تقریبی ۴۱۰ مگاپارسک (حدود ۱/۳ میلیارد سال نوری) از زمین بود.^[2] موج گرانشی ناشی از تبدیل جرمی معادل با سه برابر جرم خورشید به انرژی در هنگام ترکیب دو سیاهچاله با یکدیگر بود. این اولین مشاهده از ترکیب دو سیاهچاله با یکدیگر نیز به حساب می‌آید.

مشاهدات امواج گرانشی نویدبخش تکمیل مشاهدات مربوط به طیف الکترومغناطیسی هستند.^[81] انتظار می‌رود این مشاهدات بتوانند در مورد سیاهچاله‌ها و سایر اجسام چگال مانند ستاره‌های نوترونی و کوتوله‌های سفید، انواع خاصی از انفجارهای آبرنواختری و همچنین فرایندهایی در جهان بسیار جوان اولیه مانند امضاهای انواع خاصی از رشته‌های کیهانی فرضی، اطلاعاتی به ما بدهند.^[82]

۳.۵.۳ سیاهچاله‌ها و سایر اجسام پرجرم

نوشتار اصلی: سیاهچاله

هرگاه نسبت جرم یک جسم به شعاعش به اندازه کافی بزرگ شود، بنا بر پیش‌بینی نسبیت عام، یک سیاهچاله تشکیل می‌شود. منطقه‌ای از فضا که هیچ چیز، حتی نور نمی‌تواند از آن بگریزد. در مدل‌های پذیرفته‌شدهٔ کنونی تکامل ستارگان، گمان می‌رود که حالت پایانی تکامل ستارگان بزرگ، ستاره‌های نوترونی با جرمی در حدود ۱٫۴ جرم خورشیدی و یا سیاهچاله‌های ستاره‌ای با جرمی بین چند تا چند دوجین جرم خورشیدی هستند.^[83] معمولاً هر کهکشان در مرکز خود یک سیاهچاله پرجرم با جرمی از چند میلیون تا چند میلیارد جرم خورشیدی دارد^[84] و گمان می‌رود که حضور آنها نقش مهمی در شکل‌گیری کهکشانها و ساختارهای کیهانی بزرگ‌تر داشته است.^[85]



شبهه‌سازی برپایه معادلات نسبیت عام: یک ستاره در حالی که امواج گرانشی منتشر می‌کند فرو می‌ریزد (ریمبش گرانشی) و به سیاهچاله تبدیل می‌شود

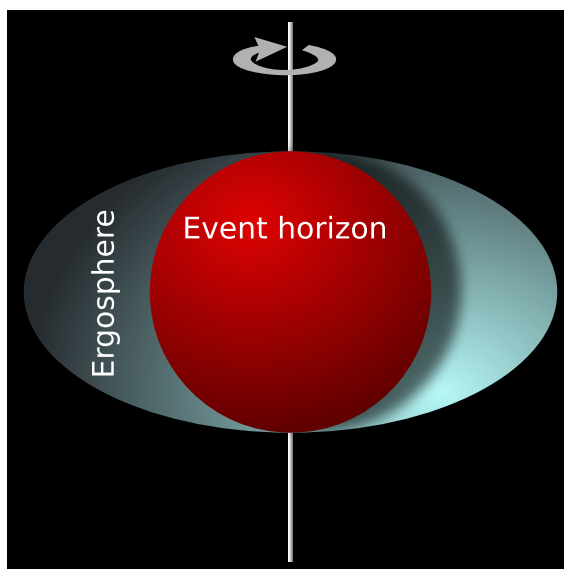
X دیگری برسد، مگر آنکه قبلاً نوری از A به X رفته باشد. در نتیجه این امر، بررسی جهان خط‌های نور (ژئودزیک‌های پوچ) اطلاعات کلیدی را در مورد ساختار سببی فضا-زمان در اختیارمان قرار می‌دهد. این ساختار را با نمودارهای پنروز [کارت‌ر] نمایش می‌دهند که در آن نواحی بینهایت بزرگ و بازه‌های زمانی بینهایت فشرده می‌شوند تا در یک نقشه متناهی جای گیرند. اما نور همانند نمودارهای استاندارد فضا-زمان، در راستای قطرها حرکت می‌کند.^[104]

با آگاهی از اهمیت ساختار سببی، راجر پنروز و دیگران آنچه را که امروز مهندسه سراسری خوانده می‌شود بنا نهادند. در هندسه سراسری موضوع مطالعه یک پاسخ یا خانواده‌ای از پاسخ‌ها برای معادلات اینشتین نیست بلکه یافتن روابطی است که برای تمام ژئودزیک‌ها صادق اند، مانند معادله ریچادوری؛ و فرضیات غیر مشخص اضافی درباره‌ی ماهیت ماده (معمولاً در شکل آنچه شرایط انرژی خوانده می‌شود) برای تولید نتایج مورد استفاده قرار می‌گیرند.^[105]

۲.۶.۳ افق‌ها

نوشتارهای اصلی: ترمودینامیک سیاهچاله، نظریه بدون مو و افق (نسبیت عام)

با استفاده از هندسه سراسری می‌توان نشان داد که برخی از فضا-زمانها شامل افق هستند که یک ناحیه را از بقیه فضا-زمان جدا می‌کند. بهترین مثال شناخته شده سیاهچاله‌ها هستند: اگر جرم در ناحیه‌ای از فضا به اندازه کافی فشرده شود (آن گونه که در حدس حلقه مشخص شده است، مقیاس طول مرتبط، شعاع شوارتزشیلد است^[106]) هیچ نوری از داخل نمی‌تواند به بیرون بگریزد و چون هیچ جسمی نمی‌تواند از یک پالس نوری سبقت بگیرد تمام ماده داخل افق نیز در آن محبوس اند. گذر از بیرون به درون هنوز امکانپذیر است که نشان می‌دهد افق سیاهچاله یک مانع فیزیکی نیست.^[107]



کارکره یک سیاهچاله چرخان

مطالعات اولیه در زمینه سیاهچاله‌ها بر پاسخهای کامل معادلات اینشتین تکیه داشتند. مثلاً می‌توان به پاسخ متقارن کروی شوارتزشیلد (برای توصیف یک سیاهچاله ایستا) و پاسخ متقارن محوری کر (برای توصیف سیاهچاله‌های ثابت چرخان و معرفی ویژگی‌های جالبی مانند کارکره) اشاره نمود. مطالعات بعدی با بهره‌گیری از هندسه سراسری، ویژگی‌های عمومی تری از سیاهچاله‌ها را آشکار ساخت. در دراز مدت آنها اجسام نسبتاً ساده‌ای هستند که می‌توان آنها را با یازده پارامتر که مشخص کننده انرژی، تکانه

بجوییم.^[notes 27] پیش‌بینی‌هایی که همه درست از آب درآمدند عبارتند از: فراوانی اولیه عناصر شیمیایی که در جریان هسته زایی نخستین به‌وجود آمده‌اند،^[95] ساختار بزرگ‌مقیاس جهان^[96] و وجود ویژگی‌های یک «اکوی گرمایی» از کیهان اولیه به نام تابش زمینه کیهانی.^[97]

مشاهدات نجومی مربوط به نرخ انبساط کیهانی اجازه می‌دهند که کل مقدار ماده موجود در جهان را به دست آوریم، البته ماهیت این ماده تا حدودی اسرارآمیز است. به نظر می‌رسد که در حدود ۹۰٪ از کل ماده، از آنچه ماده تاریک خوانده می‌شود تشکیل شده است که جرم (یا هم ارز آن، تأثیر گرانشی) دارد اما برهمکنش الکترومغناطیسی ندارد و از این روی نمی‌توان آن را مستقیماً مشاهده نمود.^[notes 28] در چارچوب فیزیک ذرات و یا هرشاخه دیگری، هیچ توصیفی از این نوع جدید ماده که مورد پذیرش عموم باشد، وجود ندارد.^[notes 29] علاوه بر این، شواهد تجربی از انتقال به سرخ‌های ابرنواخترهای دور دست و اندازه‌گیری‌های تابش زمینه کیهانی نشان می‌دهند که تکامل جهان ما به میزان قابل توجهی متأثر از یک ثابت کیهانی است که باعث شتاب‌دار بودن انبساط کیهان می‌شود. ویا به طور معادل می‌توان گفت که تکامل جهان متأثر از شکلی از انرژی با معادله حالت غیر معمول به نام انرژی تاریک است که ماهیت آن نامعلوم است.^[99]

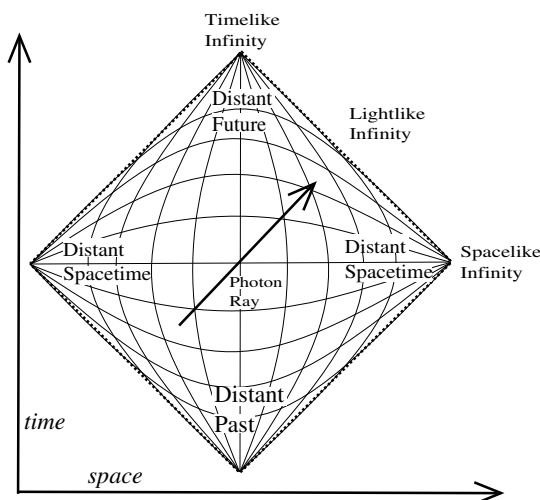
در سال ۱۹۸۰ فرضیه‌ای به نام تورم کیهانی مطرح گردید که یک دوره انبساط بسیار پرشتاب در زمان کیهانی حدود 10^{-33} ثانیه را برای جهان در نظر می‌گرفت.^[100] این فرضیه به این دلیل ارائه شد که توجیه کننده بسیاری از مشاهدات گیج کننده‌ای باشد که توسط مدل‌های کیهان‌شناسی کلاسیک قابل توضیح نبودند؛ مانند همگنی کامل تابش زمینه کیهانی.^[30] اندازه‌گیری‌های جدید تابش زمینه کیهانی اولین مدرک برای این سناریو است.^[101] هرچند که تعداد بسیار متنوعی از سناریوهای تورمی ممکن موجود است که نمی‌توان بر مبنای مشاهدات کنونی آنها را محدود نمود.^[102] فیزیک جهان اولیه پیش از فاز تورمی و نزدیک به زمانی که بنا بر پیش‌بینی‌های مدل‌های کلاسیک، در آن با تکینگی گرانشی مهیبانگ روبه رو می‌شویم، خود پرسش بزرگتری است. یافتن یک جواب قطعی در گرو وجود یک نظریه کامل گرانش کوانتومی است که هنوز ایجاد نشده است.^[103]

۶.۳ مفاهیم پیشرفته

۱.۶.۳ ساختار سببی و هندسه سراسری

نوشتار اصلی: ساختار سببی

در نسبیت عام هیچ جسم مادی نمی‌تواند به سرعت نور برسد یا از آن



دیگرام پنروز [کارت‌ر] جهان مینوکوفسکی بی‌نیهایت.

پیشی بگیرد. از طرفی هیچ تأثیری از رویداد A نمی‌تواند به هیچ مکان

خطی، تکانه زاویه‌ای، مکان در زمان مشخص شده و بار الکتریکی هستند تعریف می‌گردند. نظریه بدون مو بیان می‌کند که «سیاهچاله‌ها مو ندارند»، این عبارت کنایه از این دارد که یک سیاهچاله هیچ علامت مشخصه‌ای مانند مدل مو در انسان ندارد. با وجود پیچیدگی رمبش گرانشی یک جسم که منجر به تشکیل سیاهچاله می‌شود، سیاهچاله ایجاد شده جسم بسیار ساده‌ای است.^[108]

مجموعه عمومی از قوانین به نام مکانیک سیاهچاله‌ها موجودند که مشابه قوانین ترمودینامیک هستند. مثلاً بنا بر قانون دوم مکانیک سیاهچاله‌ها، مساحت افق رویداد هرگز با زمان کاهش نمی‌یابد که قابل مقایسه با آنتروپی یک سیستم ترمودینامیکی است. این موضوع میزان انرژی را که می‌توان با روشهای کلاسیک از یک سیاهچاله چرخان استخراج نمود (مثلاً از راه فرایند پنروز) محدود می‌سازد.^[109] شواهد قوی در دسترس است که قوانین مکانیک سیاهچاله‌ها در حقیقت زیرمجموعه‌ای از قوانین ترمودینامیک هستند و مساحت سیاهچاله با آنتروپی اش مرتبط است.^[110] این منجر به تغییراتی در قوانین اصلی مکانیک سیاهچاله‌ها می‌شود: مثلاً چنان که قانون دوم مکانیک سیاهچاله‌ها بخشی از قانون دوم ترمودینامیک می‌شود، مساحت سیاهچاله می‌تواند کاهش یابد به شرط آنکه فرایندهای دیگری اطمینان حاصل کنند که آنتروپی کل افزایش می‌یابد. مانند تمام اجسام ترمودینامیکی که دمای غیر صفر دارند، سیاهچاله‌ها نیز باید تابش گرمایی داشته باشند. محاسبات نیمه کلاسیک نشان می‌دهند که در حقیقت سیاهچاله‌ها تابش دارند و گرانش سطحی نقش دما را در قانون پلانک به عهده دارد. این تابش را به نام تابش هاوکینگ می‌خوانند.^[111]

انواع دیگری از افق‌ها نیز موجودند. در یک جهان در حال انبساط یک ناظر ممکن است نواحی از گذشته را غیرقابل مشاهده بباید ("افق ذره")، و همچنین بعضی از نواحی آینده را نیز نمی‌توان تحت تأثیر قرارداد (افق رویداد)^[112] حتی در فضای تخت مینکوفسکی، وقتی که از دید ناظر شتابداری توصیف شود (فضای ریندلر)، افق‌هایی وجود خواهند داشت که با یک تابش نیمه کلاسیک به نام تابش اوتروه مرتبط اند.^[113]

در یک جهان در حال انبساط یک ناظر ممکن است نواحی از گذشته را غیرقابل مشاهده بباید ("افق ذره")، و همچنین بعضی از نواحی آینده را نیز نمی‌توان تحت تأثیر قرارداد (افق رویداد)^[112] حتی در فضای تخت مینکوفسکی، وقتی که از دید ناظر شتابداری توصیف شود (فضای ریندلر)، افق‌هایی وجود خواهند داشت که با یک تابش نیمه کلاسیک به نام تابش اوتروه مرتبط اند.^[113]

۴.۶.۳ معادلات تکامل

هر پاسخ به معادلات اینشتین دربرگیرنده تاریخ کامل یک جهان است و حالت ماده و هندسه را در هر جایی و هر زمانی در آن جهان توصیف می‌کند. نظریه اینشتین به دلیل هموردایی عام آن، به تنهایی برای مشخص کردن تکامل زمانی تانسور متریک کافی نیست بلکه باید با یک شرط مختصات (که قابل مقایسه با تثبیت پیمانده در سایر نظریه‌های میدان است) ترکیب شود.^[122]

برای کمک در فهمیدن معادلات اینشتین به‌عنوان معادلات دیفرانسیل پاره‌های می‌توان آنها را به گونه‌ای فرمول‌بندی کرد که تکامل جهان در طول زمان را نشان دهند. این کار را به روش فرمول‌بندی که به نام "۱+۳" شناخته می‌شود انجام می‌دهند که در آن سه بُعد فضا و یک بُعد زمان وجود دارد. بهترین مثال شناخته‌شده صورت‌گیری ای دی ام است.^[123] این تجزیه‌ها نشان می‌دهد که معادلات تکامل فضا-زمان در نسبیت عام به درستی رفتار می‌کنند: پاسخ‌ها همواره موجودند و اگر شرایط اولیه مشخص شوند به گونه منحصر به فردی تعریف می‌شوند.^[124] این‌طور فرمول‌بندی های معادلات اینشتین اساس نسبیت عددی را تشکیل می‌دهند.^[125]

۵.۶.۳ کمیت‌های شبه محلی و سراسری

مفهوم معادلات تکامل با یکی دیگر از جنبه‌های نسبیت عام گره خورده است. در نظریه اینشتین مشخص می‌گردد که غیرممکن است که بتوان یک تعریف عمومی برای ویژگی ظاهراً ساده‌ای مانند جرم (انرژی) کل یک سیستم ارائه داد. دلیل این امر آن است که میدان گرانشی □ مانند هر میدان فیزیکی دیگری □ باید به یک انرژی خاص نسبت داده شود اما ثابت شده که اساساً غیرممکن است که بتوان آن انرژی را محلی کرد.^[126]

با این وجود هنوز راه‌هایی برای تعریف جرم کل یک سیستم وجود دارد، مثلاً از طریق یک ناظر فرضی بی‌نهایت دور (جرم ای دی ام) و یا از طریق تقارن‌های مناسب (جرم گمار).^[127] اگر انرژی که از طریق امواج گرانشی به بی‌نهایت منتقل می‌شود را از جرم کل سیستم کم کنیم، حاصل آن جرم بوندی در بی‌نهایت پوچ نامیده می‌شود.^[128] همانند فیزیک کلاسیک می‌توان نشان داد که این جرم‌ها مثبت هستند. تعاریف عمومی متناظری نیز برای تکانه و تکانه زاویه‌ای وجود دارند.^[130] همچنین تلاش‌هایی در زمینه تعریف کمیت‌های شبه محلی صورت گرفته است، مثلاً جرم یک سیستم منزوی، تنها با استفاده از کمیت‌هایی که در یک ناحیه متناهی از فضای دربرگیرنده آن سیستم تعریف می‌شود، فرمول‌بندی می‌گردد. امید آن می‌رود که کمیتی به دست آید که برای بیان گزاره‌های عمومی در مورد سیستم‌های منزوی سودمند باشد، مانند یک فرمول‌بندی دقیقتر برای حدس حلقه^[31 notes]

۷.۳ رابطه با نظریه کوانتومی

اگر نسبیت عام را به‌عنوان یکی از دو ستون فیزیک نوین بدانیم، ستون دیگر نظریه کوانتومی است که پایه فهمیدن ماده، از ذرات بنیادی تا فیزیک جامدات است.^[32 notes] اما اینکه چگونه می‌توان مفاهیم فیزیک کوانتومی را با نسبیت عام سازش داد، پرسشی است که هنوز بی‌پاسخ مانده است.

۳.۶.۳ تکینگی‌ها

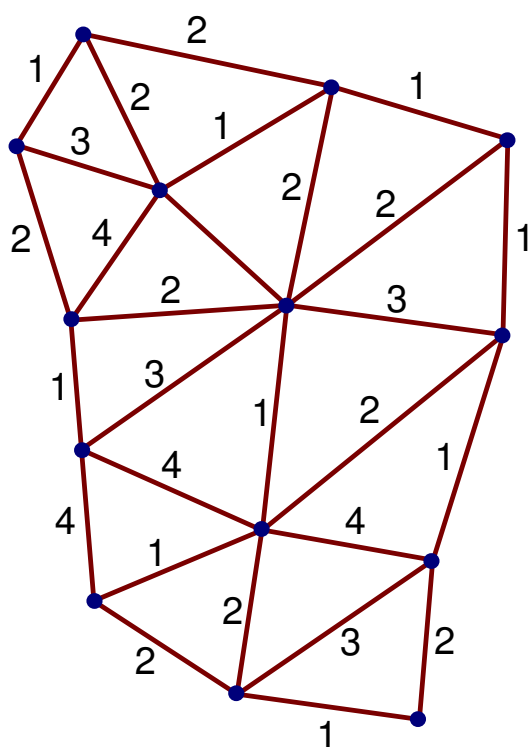
نوشتار اصلی: تکینگی گرانشی

یکی از ویژگی‌های عمومی نسبیت عام پیدایش مرزهایی در فضا-زمان به نام تکینگی است. فضا-زمان را می‌توان با دنبال کردن ژئودزیک‌های زمان‌واره و نورواره اکتشاف کرد □ تمام مسیرهای ممکن که نور و ذرات در سقوط آزاد می‌توانند بپیمایند. اما برخی از پاسخهای معادلات اینشتین "لبه‌های پاره‌پاره" دارند □ نواحی‌ای که به نام تکینگی‌های فضا-زمان شناخته می‌شوند و در آنها مسیرهای نور و ذرات در حال سقوط به طور ناگهانی به پایان می‌رسد و هندسه تعریف نشده است. در موارد جالبتر این تکینگی‌ها، "تکینگی‌های خمش" هستند که در آنها کمیت‌های هندسی که ویژگی‌های خمش فضا-زمان را توصیف می‌کنند (مانند کمیت نرده‌ای ریچی) مقدار بی‌نهایت می‌گیرند.^[114] مثال‌های شناخته شده از فضا-زمان‌های دارای تکینگی آینده □ که در آن جهان‌خط‌ها به پایان می‌رسند □ عبارتند از پاسخ شوارتزشیلد که یک تکینگی را در درون یک سیاهچاله ایستا توصیف می‌کند،^[115] و یا پاسخ کر که یک تکینگی حلقوی را در درون یک سیاهچاله چرخان توصیف می‌کند.^[116] پاسخ فریدمان □ لومتر □ ابرتسون □ اواکر و سایر فضا-زمان‌هایی که جهان‌ها را توصیف می‌کنند، تکینگی‌های گذشته دارند که در آنها جهان‌خط‌ها آغاز می‌شوند مانند تکینگی مه بانگ. برخی تکینگی‌های آینده نیز دارند (مانند مه‌رمب).^[117]

با دانستن اینکه این مثال‌ها همه بسیار متقارن هستند کاملاً وسوسه برانگیز است که نتیجه بگیریم که تکینگی مصنوع ایده‌آل گرایی است، اما نظریه‌های مشهور تکینگی که با استفاده از روشهای هندسه سراسری ثابت می‌شوند نظر دیگری دارند: تکینگی‌ها ویژگی عمومی نسبیت عام هستند و در مواردی که رمبش اجسام با ویژگی‌های مادی واقعی از حدی فراتر رود^[118] و یا در ابتدای بسیاری از جهان‌های در حال انبساط^[119] اجتناب‌ناپذیر هستند. اما

بازیهنجارسازی ("). [notes 36]

۱.۷.۳ نظریه میدان کوانتومی در فضا زمان خمیده



گونه‌ای از شبکه اسپین ساده که در گرانث کوانتومی حلقه استفاده می‌شود.

یکی از تلاش‌ها برای غلبه بر این محدودیت‌ها نظریه ریسمان است، یک نظریه کوانتومی که درباره ذرات نقطه‌ای نیست بلکه از اجسام یک بعدی دراز بسیار ریز سخن می‌گوید. [notes 37] این نظریه نوید آن را می‌دهد که می‌تواند یک توصیف یکپارچه برای همه ذرات و برهمکنش‌ها (از جمله گرانث) باشد. [notes 38] بهایی که باید در این راه پرداخت شود، پذیرش ویژگی‌های غیرمعمولی مانند شش بعد اضافی برای فضا در کنار سه بعد موجود است. [137] در خلال دوران انقلاب دوم آبریسمان گمان بر آن رفت که نظریه ریسمان و یک نظریه درباره یکپارچه‌سازی نسبت عام و آبرتقارن به نام آبرگرانث، [138] هر دو بخشی از یک مدل پیشنهادی یازده بعدی به نام نظریه ام هستند که سرانجام یک نظریه سازگار و از نظر تعریفی یکتا از گرانث کوانتومی را ارائه خواهد داد. [139]

دیدگاه دیگری نیز وجود دارد که از روش‌های کوانتیزه کردن کانونیک نظریه کوانتومی آغاز می‌شود. با استفاده از فرمول بندی مقدار اولیه نسبت عام (به معادلات تکامل در بالا مراجعه کنید) معادله ویلر-دوگانگی (نظیر معادله شرودینگر) حاصل می‌شود که متأسفانه مشخص شده که به درستی تعریف نشده است. [140] اما با معرفی آنچه امروز به نام متغیر آشتکار شناخته می‌شود، [141] این معادله به مدلی نویدبخش به نام گرانث کوانتومی حلقه منجر می‌شود. فضا با ساختاری تارنکیوت مانند به نام شبکه اسپین نمایش داده می‌شود که در گام‌های گسسته با گذر زمان تکامل می‌یابد. [142]

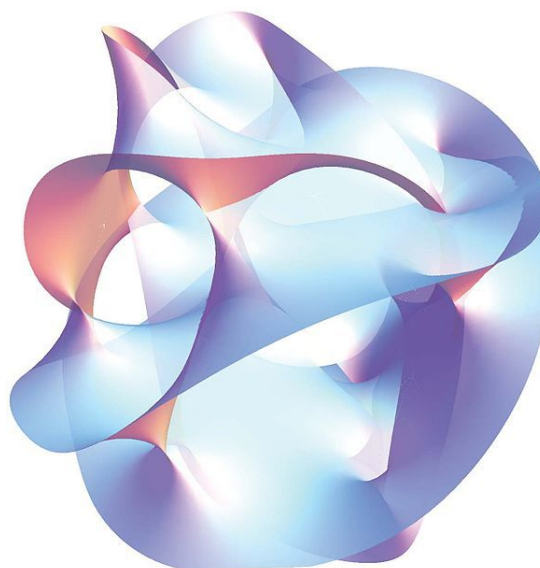
با اختلاف در اینکه کدام یک از ویژگی‌های نسبت عام و نظریه کوانتومی بدون تغییر پذیرفته شوند و اینکه تغییرات در چه سطحی اعمال شوند، تلاش‌های متعدد مختلفی برای رسیدن که یک نظریه قابل قبول گرانث کوانتومی صورت گرفته‌اند که برخی نمونه‌های آنها مثلثی سازی دینامیکی، [143] مجموعه‌های سببی، [144] مدل‌های توئیستر [145] یا مدل‌های کیهان‌شناسی‌های کوانتومی بر پایه انتگرال مسیر هستند. [146]

تمام نظریه‌های نامزد همچنان مشکلات صوری و مفهومی دارند که باید بر آن فایق آیند. این نظریه‌ها از این مشکل عمومی نیز برخوردارند که هنوز هیچ راهی برای آزمودن پیش‌بینی‌های گرانث کوانتومی وجود ندارد، هر چند

نظریه‌های میدان‌های کوانتومی معمولی، که پایه فیزیک ذرات بنیادی مدرن را تشکیل می‌دهند همگی در فضای تخت مینکوفسکی تعریف می‌شوند که تقریب بسیار مناسبی برای موردی است که بخواهیم رفتار ذرات میکروسکوپی را در میدان‌های گرانث ضعیف مانند میدان‌های موجود در روی زمین مطالعه کنیم. [131] برای توصیف شرایطی که در آن گرانث به اندازه‌ای نیرومند هست که بر ماده تأثیر داشته باشد اما نه تا اندازه‌ای که خود نیاز به کوانتایی سازی داشته باشد، فیزیکدانان نظریه‌های میدان کوانتومی برای فضا زمان خمیده را پیشنهاد داده‌اند. این نظریه‌ها با بهره‌گیری از نسبت عام، یک فضای پس زمینه خمیده را توصیف می‌کنند و نظریه میدان کوانتومی تعمیم یافته‌ای را تعریف می‌کنند که رفتار ماده کوانتومی را در آن فضا زمان بررسی می‌کند. [132] با بهره‌گیری از این صورت‌گرایی [notes 33] می‌توان نشان داد که سیاهچاله‌ها یک طیف جسم سیاه از ذرات منتشر می‌کنند که تابش هاوکینگ نامیده می‌شود و به تبخیر سیاهچاله در گذر زمان می‌انجامد. [notes 34] همان‌طور که به اختصار در بالا اشاره شد، این تبخیر نقش مهمی در ترمودینامیک سیاهچاله‌ها بازی می‌کند. [133]

۲.۷.۳ گرانث کوانتومی

نیاز به سازگاری بین یک توصیف کوانتومی از ماده و یک توصیف هندسی از فضا، [notes 35] و همچنین بروز تکینگی‌ها (در جاهایی که مقیاس طول خمش میکروسکوپی می‌شود)، از جمله دلایل نیاز به وجود یک نظریه کامل گرانث کوانتومی هستند: برای توضیح کافی در مورد ساختار داخلی سیاهچاله‌ها و جهان بسیار جوان نخستین، یک نظریه مورد نیاز است که در آن گرانث و هندسه فضا زمان مرتبط با آن به زبان فیزیک کوانتومی بیان گردند. [134] با وجود تلاش‌های فراوان، هنوز هیچ نظریه کامل و سازگاری برای گرانث کوانتومی به دست نیامده است. اگرچه چند نامزد بالقوه برای چنین نظریه‌ای موجود است. [135]



تصویرسازی از یک خمینه کلاسیک یائو، یکی از راه‌های فشرده‌سازی ابعاد اضافی که توسط نظریه ریسمان عرضه می‌شود.

تلاش‌ها برای تعمیم نظریه‌های میدان کوانتومی معمولی □ که برای توصیف برهمکنش‌های بنیادی در فیزیک بنیادی کاربرد دارند □، از طریق گنجاندن گرانث در این نظریه‌ها با مشکلات جدی روبه رو شده‌اند. در انرژی‌های پایین این دیدگاه موفق است و این نظریه‌ها در این شرایط نظریه‌های میدانی مؤثری برای گرانث هستند. [136] اما در انرژی‌های بالا نتایج دست‌یافته، مدل‌هایی هستند که فاقد هرگونه قدرت پیش‌بینی می‌باشند (غیرقابل

- [6] حداقل به طور تقریبی. با 2004 Poisson مقایسه کنید
- [7] برای مشکلات مفهومی و تاریخی تعریف یک «اصل نسبیت عام» و جداسازی آن از مفهوم هموردایی عام، Giulini 2006b را ببینید.

[8] Geroch ۱۹۹۶

[9] برای اطلاعات جانبی و لیستی از پاسخ‌ها، Stephani et al. ۲۰۰۳ را ببینید؛ یک بررسی جدیدتر نیز در MacCallum ۲۰۰۶ یافت می‌شود.

[10] توصیف مختصری از این پاسخ‌ها و پاسخ‌های جالب دیگر را می‌توان در Hawking & Ellis ۱۹۷۳, ch. 5 یافت.

[11] آزمایش پوند/ربکا را ببینید Pound & Rebka ۱۹۵۹، Pound & Rebka ۱۹۶۰، Pound & Snider ۱۹۶۴، فهرستی از آزمایش‌های بیشتری نیز در Ohanian & Ruffini ۱۹۹۴، جدول ۴٫۱ در صفحه ۱۸۶ آمده است.

[12] با شروع از آزمایش هیفل-کیتینگ، Hafele & Keating 1972a و Hafele & Keating 1972b، و شکوفایی در کاوشگر گرانشی آزمایش مروری بر آزمایش‌ها را در Ohanian & Ruffini ۱۹۹۴، جدول ۴٫۱ در ص. ۱۸۶ ببینید

[13] بررسی‌های عمومی در بخش ۲٫۱ از Will 2006; Will 2003، ص. 36-32؛ Ohanian & Ruffini ۱۹۹۴، بخش ۴٫۲.

[14] برای اندازه‌گیریهای کلاسیک اولیه توسط اکتشافات ادینگتون Kennefick ۲۰۰۵ را ببینید؛ برای مرور اندازه‌گیریهای جدیدتر، Ohanian & Ruffini ۱۹۹۴، ch. 4.3 را ببینید. برای دقیق‌ترین مشاهدات مستقیم مدرن توسط اخترشناسان، Shapiro et al. ۲۰۰۴ را ببینید.

[15] این یک اصل مستقل نیست؛ می‌توان آن را از معادلات اینشتین و لاگرانژین ماکسول با استفاده از یک تقریب دلبیو کی بی به دست آورد، ببینید Ehlers ۱۹۷۳, sec. 5

[16] برای میدان گرانشی خورشید با استفاده از سیگنال‌های رادار بازتابیده شده از سیاراتی چون ناهید و تیر، Shapiro ۱۹۶۴ را ببینید، Weinberg ۱۹۷۲, ch. 8, sec. 7؛ برای سیگنال‌هایی که توسط کاوشگرهای فضایی فرستاده شده‌اند (اندازه‌گیریهای ترانسپوندر)، Bertotti, Iess & Tortora ۲۰۰۳ را ببینید؛ برای مرور کلی، Ohanian & Ruffini ۱۹۹۴، table 4.4 on p. ۲۰۰. برای اندازه‌گیریهای جدیدتر با استفاده از سیگنال‌های دریافت شده از یک تپاختر که بخشی از یک منظومه دوتایی است، میدان گرانش باعث تأخیر زمانی می‌شود، Stairs ۲۰۰۳, sec. ۴٫۴.

[17] این امواج به طور غیرمستقیم از طریق انرژی گمشده در منظومه‌های دوتایی تپاخترهایی مانند دوتایی هالس-تیلور [موضوع جایزه نوبل ۱۹۹۳ در فیزیک] مشاهده شده‌اند، پروژه‌هایی برای مشاهده مستقیم آنها نیز در راه‌اند. برای یک مرور کلی Misner, Thorne & Wheeler ۱۹۷۳, part VIII را ببینید. برخلاف امواج الکترومغناطیسی، منشأ امواج گرانشی دوقطبی نیست، بلکه چهار قطبی است؛ Schutz ۲۰۰۱ را ببینید

[18] بیشتر کتب پیشرفته درباره نسبیت عام چنین ویژگی‌هایی را توصیف نموده‌اند، مثلاً Schutz ۱۹۸۵, ch. 9

[19] در نتیجه، در صورت‌گرایی پسا-نیوتنی پارامتری، اندازه‌گیری‌های این اثر ترکیبی خطی از عبارتهای \square و \square را مشخص می‌کند، Will ۲۰۰۶, sec. 3.5 و Will ۱۹۹۳, sec. 7.3 را ببینید

[20] دقیقترین اندازه‌گیری‌ها، اندازه‌گیری‌های VLBI موقعیت‌های سیاره‌هاست؛ ببینید Anderson, Will ۲۰۰۶, sec. 3.5، Will ۱۹۹۳, ch. 5، Ohanian & Ruffini ۱۹۹۴, pp. ۴۰۶-۴۰۷

[21] شکلی که شامل میله‌های خطا نیز می‌باشد را در شکل ۷ در Will ۲۰۰۶، بخش ۵٫۱ ببینید

که امید است این امر با داده‌های آینده درباره مشاهدات کیهان‌شناسی و آزمایش‌های فیزیک ذرات میسر شود.^[147]

۸.۳ وضعیت کنونی

نسبیت عام به‌عنوان نظریه‌ای بسیار موفق پدیدار شده و آزمون‌های مشخص آزمایشگاهی و مشاهداتی بسیاری را پشت سر گذارده است، اما شواهد محکمی نیز حاکی از آنند که این نظریه کامل نیست.^[148] مسئله گرانش کوانتومی و واقعیت تکینگی‌های فضا-زمان هنوز بدون پاسخ مانده‌اند.^{[39] notes} شواهدی در داده‌های مشاهداتی که به‌عنوان گواهی برای وجود انرژی تاریک و ماده تاریک در نظر گرفته می‌شوند ممکن است در حقیقت شواهدی برای نیاز به دانشی جدید در فیزیک باشند.^{[40] notes} حتی اگر نسبیت را همان‌گونه که هست بپذیریم، این نظریه پر از احتمالات اکتشاف بیشتر است. پژوهشگران نسبیت ریاضیاتی در جستجوی فهم ماهیت تکینگی‌ها و ویژگی‌های اصلی معادلات اینشتین هستند.^[149] و شبیه‌سازی‌های رایانه‌ای با قدرت روزافزون (مانند آنهایی که ادغام سیاهچاله‌ها را شبیه‌سازی می‌کنند) در حال اجرا هستند.^[150] با مشاهده‌ی امواج گرانشی در سال ۲۰۱۶، تلاش‌ها برای مطالعه‌ی کیهان به کمک امواج گرانشی شتاب گرفته است.^{[41] notes} تا امکان آزمون نظریه در میدان‌های گرانشی بسیار قوی تر فراهم آید.^{[42] notes} با وجود گذشت بیش از نود سال از انتشار، نسبیت عام هنوز به‌عنوان زمینه‌ای فعال در پژوهش به شمار می‌رود.^[151]

۹.۳ جستارهای وابسته

- معادلات میدان اینشتین
- نسبیت خاص
- اصل نسبیت
- برابری جرم و انرژی
- علایم مورد استفاده در نسبیت عام
- ریاضیات نسبیت عام
- هندسه ریمانی
- آزمون‌های نسبیت عام
- مسئله دو جسم در نسبیت عام

۱۰.۳ یادداشت‌ها

- [1] بخش‌های اثرات مداری و نسبیت جهت، اتساع زمان گرانشی و انتقال بسامد و انحراف نور و تأخیر زمانی گرانشی،
- [2] بخش کیهان‌شناسی و مراجع معرفی شده؛ تکامل تاریخی در Overbye ۱۹۹۹
- [3] شرح زیر ردگیری مجدد آنچه در 1، Ehlers ۱۹۷۳, sec. آمده است می‌باشد
- [4] مقدمه‌های خوبی به ترتیب افزایش دانش ریاضی مورد نیاز عبارتند از، Mermin ۲۰۰۵، Giulini ۲۰۰۵ و Rindler ۱۹۹۱؛ بخش چهارم Ehlers & Lämmerzahl ۲۰۰۶ برای آزمایش‌های دقت
- [5] مقایسه‌ای ژرف بین دو گروه تقارن را در Giulini 2006a ببینید

- [22] توصیف مأموریت را در ۲۰۰۱ Everitt et al. ببینید؛ یک ارزیابی اولیه بعد از پرواز در ۲۰۰۷ Everitt, Parkinson & Kahn آمده است؛ به روز رسانی‌های جدیدتر را در وبگاه مأموریت ببینید ۲۰۱۲-۱۹۹۶ Kahn.
- [23] برای مرور همگرایی گرانشی و کاربردهایش، Ehlert, Falco & Schneider ۱۹۹۲ و Wambsganss ۱۹۹۸ را ببینید.
- [24] برای یک نتیجه‌گیری ساده Schutz ۲۰۰۳, ch. 23 را ببینید؛ مراجعه کنید به Narayan & Bartelmann ۱۹۹۷, sec. 3.
- [25] تصاویر همه همگرایی‌های شناخته شده را می‌توان در صفحات پروژه CASTLES پیدا نمود ۲۰۰۷ Kocharnikar et al.
- [26] مثلاً با داده‌های دبلیومپ، اینجا را ببینید Spergel et al. ۲۰۰۳.
- [27] این آزمون‌ها شامل مشاهدات مجزایی هستند که شرح جزئیات آنها در شکل دو در ۲۰۰۳ Bridle et al. آمده است.
- [28] شواهدی برای این موضوع را می‌توان با تعیین پارامترهای کیهانی و مشاهدات بیشتر کهکشان‌ها و خوشه‌های کهکشانی یافت، Peebles ۱۹۹۳, ch. 18 را ببینید، شواهدی برای همگرایی گرانشی، رجوع کنید به Peacock ۱۹۹۹, و شبیه‌سازیهای ساختار بزرگ مقیاس، اینجا را ببینید Springel et al. ۲۰۰۵.
- [29] برخی از فیزیکدان‌ها به این اندیشیده‌اند که ممکن است شواهد دال بر وجود ماده تاریک در حقیقت شواهدی بر ناتوانی مکانیک نسبیتی و نیوتنی در توصیف گرانش باشد. مرور کلی در ۲۰۰۶ Mannheim sec. 9.
- [30] به طور دقیق‌تر این‌ها مسائل تخت بودن مسئله افق، و مسئله تک قطبی هستند؛ مقدمه‌ای در ۱۹۹۳ Narlikar, sec. 6.4 موجود است. همچنین Börner ۱۹۹۳, sec. 9.1 را ببینید.
- [31] نمونه چنین تعریف‌های شبه محلی جرم انرژی عبارتند از انرژی هاوکینگ، انرژی گراچ، یا انرژی پرنور انرژی تکانه شبه محلی براساس روش‌های تویسترت؛ مرور مقاله Szabados ۲۰۰۴ را ببینید.
- [32] مروری بر فیزیک کوانتومی را می‌توان در کتاب‌های مرجع کلاسیک مانند Hey & Walters ۱۹۹۹ Messiah یافت؛ ویا در سطح مقدماتی تر در ۲۰۰۳ ببینید.
- [33] (به انگلیسی: formalism)
- [34] برای تابش هاوکینگ ۱۹۷۵ Hawking را ببینید، Wald ۱۹۷۵؛ مقدمه‌ای قابل فهم در مورد تبخیر سیاهچاله‌ها را می‌توان در Traschen ۲۰۰۰ یافت.
- [35] به زبان ساده ماده منشأ خمش فضا زمان است، و اگر ماده خواص کوانتومی داشته باشد، می‌توانیم انتظار داشته باشیم که فضا زمان هم همین‌گونه است. Carlip ۲۰۰۱, sec. 2 را ببینید.
- [36] به طور خاص، تکنیکی به نام بازه‌هنجارسازی، که توزیع‌های پرنورتر را در نظر می‌گیرد، رجوع شود به 17, 18 Weinberg ۱۹۹۶, ch. در این دسته قرار می‌گیرد؛ Goroff & Sagnotti ۱۹۸۵ را ببینید.
- [37] مقدمه‌ای قابل فهم در سطح کارشناسی را در ۲۰۰۴ Zwiebach ببینید؛ بررسی‌های کامل‌تر در Polchinski 1998a و Polchinski 1998b.
- [38] در انرژی‌های قابل دستیابی در آزمایش‌های کنونی، این رشته‌ها از ذرات نقطه‌ای غیرقابل تشخیص هستند، اما مدهای نوسان مختلف یک نوع رشته بنیادی به صورت ذراتی با بارهای مختلف پدیدار می‌شوند. مثلاً Ibanez ۲۰۰۰. نظریه در این زمینه موفق بوده است که یکی از مدها همیشه با گرانش متناظر است، ذره پیام رسان گرانش، مثلاً Green, Schwarz & Witten ۱۹۸۷, sec. 2.3, 5.3 را ببینید.
- [39] بخش گرانش کوانتومی را در بالا ببینید.
- [40] بخش کیهان‌شناسی را در بالا ببینید.
- [41] Bartusiak ۲۰۰۰ برای موارد تا آن سال؛ اخبار به روز را در وبسایت‌هایی چون GEO 600 و LIGO ببینید.
- [42] برای مقالات تازه‌تر در قطبش امواج گرانشی دوتایی‌های فشرده Blanchet ۲۰۰۸ et al. و Arun et al. ۲۰۰۷؛ برای مرور کارهای روی دوتایی‌های فشرده Blanchet ۲۰۰۶ and Futamase & Itoh ۲۰۰۶؛ برای مرور عمومی آزمون‌های تجربی نسبیت عام ۲۰۰۶ Will را ببینید.

۱۱.۳ پانویس

- [1] «تاریخچه جوایز نوبل». تاریخچه جوایز نوبل. جایزه نوبل. بایگانی شده از نسخه اصلی در ۲۲ اوت ۲۰۱۳. بازبینی شده در ۱ ژوئن ۲۰۱۳.
- [2] «Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger». American Physical Society. نسخه اصلی در February 11 2016.
- [3] «Gravitational Waves Are the Ringing of Spacetime». American Physical Society, February 11 2016. از نسخه اصلی در February 11 2016.
- [4] «Gravitational waves discovery: 'We have a first tantalising glimpse of the cosmic birth pangs'». از نسخه اصلی در ۳۰ آوریل ۲۰۱۴.
- [5] Pais 1982 فصل‌های ۹ تا ۱۵ Janssen 2005؛ Renn 2007؛ مجموعه‌ای به‌روز از پژوهش‌های کنونی است که شامل بازنشر بسیاری از مقالات اصلی نیز می‌باشد؛ مروری قابل فهم را می‌توان در Renn 2005, pp. 110ff یافت. مقاله Einstein 1907 یکی از مقاله‌های کلیدی نخستین است، را با 9 Pais 1982, ch. مقایسه کنید. مقاله Einstein 1915 مقاله‌ای است که در آن معادلات میدان ارائه شدند، آن را با Pais 1982, ch. 11-15 مقایسه کنید.
- [6] Schwarzschild 1916a و Schwarzschild 1916b؛ Nordström ۱۹۱۸ تکمیل شد (۱۹۱۶ بعدها در ۱۹۱۸).
- [7] Einstein ۱۹۱۷، آن را با Pais ۱۹۸۲, ch. 15e مقایسه کنید.
- [8] مقاله اصلی هابل، ۱۹۲۹ Hubble است؛ که بررسی کلی آن در Singh ۲۰۰۴, ch. 2-4 قابل دسترسی است.
- [9] Gamow ۱۹۷۰.
- [10] Pais ۱۹۸۲, pp. ۲۵۴-۲۵۳.
- [11] Kennefick ۲۰۰۷، Kennefick ۲۰۰۵.
- [12] Pais ۱۹۸۲, ch. 16.
- [13] «Warping spacetime». Thorne, Kip. *The future of theoretical physics and cosmology: celebrating Stephen Hawking's 60th birthday* [بزرگداشت ۶۰ سالگی هاوکینگ، Cambridge University Press]. ۲۰۰۳. شابک ۰-۵۲۱-۸۲۰۸۱-۲. بایگانی شده از نسخه اصلی در ۲۳ می ۲۰۱۳. Extract of page 74۲۰۱۳.
- [14] Israel ۱۹۸۷, ch. 7.8-7.10, Thorne ۱۹۹۴, ch. 3-9.
- [15] Arnold ۱۹۸۹, ch. 1.
- [16] Ehlert, Falco & Schneider ۱۹۹۲, pp. 5f.
- [17] Will ۱۹۹۳, sec. 2.4, Will ۲۰۰۶, sec. 2.
- [18] Wheeler ۱۹۹۰, ch. 2.

- [43] Rindler ۲۰۰۱, pp. 24–26 vs. pp. 236–237 and Ohanian ۱۹۹۴, pp. ۱۶۴–۱۷۲. این آثار را از اصل هم‌ارزی نتیجه گرفت Einstein ۱۹۰۷. را ببینید و توصیف آن در ۱۹۸–۱۹۶ Pais ۱۹۸۲, pp. نیز آمده است
- [44] Rindler ۲۰۰۱, pp. ۲۴–۲۶; Misner, Thorne & Wheeler ۱۹۷۳, § ۳۸, ۵
- [45] Greenstein, Oke & Shipman ۱۹۷۱; اندازه‌گیری‌های شباهنگ (شعراى یمانی) در Barstow, Bond et al. ۲۰۰۵ منتشر شده‌اند.
- [46] GPS با استفاده از مقایسه ساعت‌های اتمی ماهواره‌ها پیوسته در حال آزموده شدن است؛ برای مبحث آثار نسبیتی Ashby ۲۰۰۲ و Ashby ۲۰۰۳ را ببینید.
- [47] Kramer ۲۰۰۴, Stairs ۲۰۰۳
- [48] Ohanian & Ruffini ۱۹۹۴
- [49] Blanchet ۲۰۰۶, sec. 1.3
- [50] Rindler ۲۰۰۱, sec. 1.16؛ برای مثالهای تاریخی، Israel ۱۹۸۷، pp. ۲۰۲–۲۰۴؛ در حقیقت اینشتین یک نمونه از این گونه نتیجه‌گیری را منتشر نمود Einstein ۱۹۰۷. چنین محاسباتی به طور ضمنی می‌گمارند که هندسه فضا اقلیدسی است، ببینید Ehlers & Rindler ۱۹۹۷
- [51] از دید نظریه اینشتین، این نتیجه‌گیریها اثر گرانش بر زمان را نیز در نظر می‌گیرند، اما پیامدهایش در پیچ و تاب دادن به فضا را در نظر نمی‌گیرند، ببینید Rindler ۲۰۰۱, sec. 11.11
- [52] Will ۱۹۹۳, sec. 7.1 and 7.2
- [53] Jaranowski & Królak ۲۰۰۵ مثلاً
- [54] Rindler ۲۰۰۱, ch. 13
- [55] Gowdy ۱۹۷۱, Gowdy ۱۹۷۴
- [56] Lehner ۲۰۰۲ را برای مقدمه مختصری در مورد روش‌های نسبیت عددی، و Seidel ۱۹۹۸ برای ارتباط با اخترشناسی امواج گرانشی.
- [57] Schutz ۲۰۰۳, pp. ۴۸–۴۹, Pais ۱۹۸۲, pp. ۲۵۳–۲۵۴
- [58] Rindler ۲۰۰۱, sec. 11.9
- [59] Will ۱۹۹۳, pp. ۱۷۷–۱۸۱
- [60] Kramer et al. ۲۰۰۶
- [61] Stairs ۲۰۰۳, Schutz ۲۰۰۳, pp. ۳۱۷–۳۲۱, Bartusiak ۲۰۰۰, pp. ۷۰–۸۶
- [62] Weisberg & Taylor ۲۰۰۳؛ برای کشف تپ‌اختر Hulse & Taylor ۱۹۷۵ را ببینید؛ برای شواهد اولیه تابش گرانشی Taylor ۱۹۹۴، را ببینید
- [63] Kramer ۲۰۰۴
- [64] Misner, Thorne & Wheeler ۱۹۷۳, Penrose ۲۰۰۴, § ۱۴, ۵, ۴, § ۱۱
- [65] Weinberg ۱۹۷۲, sec. 9.6, Ohanian & Ruffini ۱۹۹۴, sec. 7.8
- [66] Bertotti, Ciufolini & Bender ۱۹۸۷, Nordtvedt ۲۰۰۳
- [67] Kahn ۲۰۰۷
- [19] Ehlers ۱۹۷۳, sec. 1.2, Havas ۱۹۶۴, Künzle ۱۹۷۲. فکری ساده مورد سؤال اولین بار در ۱۹۵۹ Heckmann & Schücking توصیف شد.
- [20] Ehlers ۱۹۷۳, pp. 10f
- [21] Rindler ۱۹۹۱, بخش ۲۲, Synge ۱۹۷۲, فصل ۲و۱
- [22] Ehlers ۱۹۷۳, sec. 2.3
- [23] Ehlers ۱۹۷۳, sec. 1.4, Schutz ۱۹۸۵, sec. 5.1
- [24] Mermin ۲۰۰۵؛ Ehlers ۱۹۷۳, pp. 17ff؛ یک نتیجه‌گیری در، فصل ۱۲ یافت می‌شود. برای شواهد تجربی، بخش نسبیت عام#تساع زمان گرانشی و انتقال بسامد رادر زیر ببینید
- [25] Rindler ۲۰۰۱, بخش ۱۳, ۱؛ برای یک مرجع مقدماتی Wheeler ۱۹۹۰, فصل دوم؛ هر چند که تفاوت‌هایی بین نسخه جدید و مفهوم‌هایی اصلی اینشتین در تاریخ شکل‌گیری نسبیت عام وجود دارد Norton ۱۹۸۵
- [26] Ehlers ۱۹۷۳, sec. 1.4؛ برای شواهد تجربی مجدداً بخش نسبیت عام#تساع زمان گرانشی و انتقال بسامد را ببینید. انتخاب یک اتصال متفاوت با پیش به نظریه متفاوتی به نام نظریه اینشتین [کارتان می‌انجامد
- [27] Kenyon ۱۹۹۰, p. ۱۶, Ehlers ۱۹۷۳, بخش ۲, Weinberg ۱۹۷۲, بخش ۲, ۸
- [28] Ehlers ۱۹۷۳, pp. ۱۹–۲۲؛ دو از فصل هفتم Weinberg ۱۹۷۲ را ببینید. تانسور اینشتین تنها تانسور بدون واگرایی است که تابعی از ضرایب متریک و مشتقات اول ویا حداکثر دومشان است، و اجاز می‌دهد که در غیاب منبع گرانش فضا زمان نسبیت خاص راه حل مناسبی باشد Lovelock ۱۹۷۲. تانسورها در هر دو طرف از مرتبه دوم هستند، یعنی می‌توان آنها را به صورت ماتریس‌های ۴×۴ بنویشت که هر کدام شامل ۱۰ عبارت مستقل هستند و بنابراین ده معادله جفت شده به دست می‌آید. البته در نتیجه روابطی هندسی به نام «اتحادهای بیانچی»، تانسور اینشتین چهار معادله دیگر را ارضا می‌نماید و بنابراین، معادلات میدان به شش معادله مستقل کاهش می‌یابند، مثلاً Schutz ۱۹۸۵, sec. 8.3
- [29] Kenyon ۱۹۹۰, sec. 7.4
- [30] Brans & Dicke ۱۹۶۱, Weinberg ۱۹۷۲, بخش ۳ در فصل ۷، Goenner ۲۰۰۴, بخش ۲, ۷, و ۲۰۰۶، Trautman به ترتیب
- [31] Wald ۱۹۸۴, ch. 4, Weinberg ۱۹۷۲, ch. 7 یا در واقع هر کتاب دانشگاهی دیگری در مورد نسبیت عام
- [32] Wheeler ۱۹۹۰, p. xi
- [33] Wald ۱۹۸۴, sec. 4.4
- [34] Wald ۱۹۸۴, sec. 4.1
- [35] بخش ۵ در فصل ۱۲ از Weinberg ۱۹۷۲
- [36] فصل‌های مقدماتی Stephani et al. ۲۰۰۳
- [37] Chandrasekhar ۱۹۸۳, ch. 3,5,6
- [38] Narlikar ۱۹۹۳, ch. 4, sec. 3.3
- [39] Lehner ۲۰۰۲
- [40] مثلاً Wald ۱۹۸۴, sec. 4.4
- [41] Will ۱۹۹۳, sec. 4.1 and 4.2
- [42] Will ۲۰۰۶, sec. 3.2, Will ۱۹۹۳, ch. 4

- [108] برای نخستین گامها، Israel ۱۹۷۱ را ببینید؛ Hawking & Ellis ۱۹۷۳، sec. 9.3 یا ۱۹۷۳، ch. 9 and 10 Heusler ۱۹۹۶، برای یک استنتاج ۱۹۹۸ Heusler و همچنین ۲۰۰۶ Beig & Chruściel به‌عنوان مرور کلی نتایج جدیدتر
- [109] قوانین مکانیک سیاهچاله‌ها نخستین بار در Bardeen، Carter & Hawking ۱۹۷۳ توصیف شدند؛ ارائه‌ای در این زمینه را می‌توان در Carter ۱۹۷۹ یافت؛ برای مروری تازه تر 2 Wald ۲۰۰۱، ch. 1 را ببینید. مقدمه‌ای کامل شامل مقدمه‌ای بر ریاضیات مورد نیاز در Poisson ۲۰۰۴ موجود است. برای فرایند پنروز Penrose ۱۹۶۹ را ببینید.
- [110] Bekenstein ۱۹۷۳، Bekenstein ۱۹۷۴
- [111] این واقعیت که سیاهچاله‌ها تابش دارند، نخستین بار از روش کوانتوم مکانیکی در Hawking ۱۹۷۵ استنتاج شد؛ استنتاج کامل‌تری را در Wald ۱۹۷۵ ببینید. یک مرور در 3 Wald ۲۰۰۱، ch. 3 موجود است.
- [112] Narlikar ۱۹۹۳، sec. 4.4.4, 4.4.5
- [113] افق‌ها: cf. Rindler ۲۰۰۱، sec. 12.4. اثر اونروه: Unruh ۱۹۷۶، Wald ۲۰۰۱، ch. 3
- [114] Hawking & Ellis ۱۹۷۳، sec. 8.1، Wald ۱۹۸۴، sec. 9.1
- [115] Townsend ۱۹۹۷، ch. 2؛ بررسی گسترده‌تر این پاسخ در Chandrasekhar ۱۹۸۳، ch. 3 موجود است.
- [116] Townsend ۱۹۹۷، ch. 4؛ برای بررسی گسترده‌تر Chandrasekhar ۱۹۸۳، ch. 6
- [117] Ellis & van Elst ۱۹۹۹؛ نگاه دقیق‌تری به خود تکینگی در Börner ۱۹۹۳، sec. 1.2 آمده است
- [118] Penrose ۱۹۶۵
- [119] Hawking ۱۹۶۶
- [120] این فرضیه نخستین بار در Belinskii، Khalatnikov & Lifschitz ۱۹۷۱ مطرح شد؛ برای مروری تازه‌تر Berger ۲۰۰۲ را ببینید. Garfinkle ۲۰۰۷
- [121] فرضیه سانسور کیهانی نخستین بار در Penrose ۱۹۶۹ مطرح شد؛ در حد یک کتاب درسی در Wald ۱۹۸۴، pp. ۳۰۲-۳۰۵. برای نتایج عددی در Berger ۲۰۰۲، sec. 2.1 را ببینید
- [122] Hawking & Ellis ۱۹۷۳، sec. 7.1
- [123] Misner، Arnowitt، Deser & Misner ۱۹۶۲؛ برای مقدمه، Thorne & Wheeler ۱۹۷۳، §۲۱، ۷، ۴
- [124] Wald ۱۹۶۲؛ Fourès-Bruhat ۱۹۵۲ and Bruhat ۱۹۶۲؛ برای مقدمه Wald ۱۹۸۴، ch. 10 را ببینید؛ بررسی آنلاین در Reula ۱۹۹۸
- [125] Gourgoulhon ۲۰۰۷؛ برای مرور مبانی نسبیت عددی، شامل مسائلی که از معادلات اینشتین سرچشمه می‌گیرند Lehner ۲۰۰۱.
- [126] Misner، Thorne & Wheeler ۱۹۷۳، §۲۰، ۴
- [127] Komar ۱۹۵۹؛ برای یک مقدمه آموزنده Wald ۱۹۸۴، sec. 11.2؛ اگرچه به طریق کاملاً متفاوتی تعریف شده اما می‌توان نشان داد که برای فضا-زمانهای ثابت معادل جرم ای ام است Ashtekar & Magnon-Ashtekar ۱۹۷۹ را ببینید.
- [128] برای مقدمه‌ای آموزنده Wald ۱۹۸۴، sec. 11.2 را ببینید.
- [129] Wald ۱۹۸۴، p. ۲۹۵ و مراجع آن؛ این در پرسش پایداری حائز اهمیت است اگر جرم منفی وجود داشت، فضای خالی و تخت مینکوفسکی که جرم صفر دارد ممکن بود از این حالت تغییر کند و جرم مثبت یا منفی بگیرد.
- [130] Townsend ۱۹۹۷، ch. 5
- [131] Ramond ۱۹۹۰، Weinberg ۱۹۹۵، Peskin & Schroeder ۱۹۹۵؛ مرور قابل فهم تری در Auyang ۱۹۹۵ موجود است.
- [132] Wald ۱۹۹۴، Birrell & Davies ۱۹۸۴
- [133] Wald ۲۰۰۱، ch. 3
- [134] Schutz ۲۰۰۳، p. ۴۰۷
- [135] یک گاه‌شمار و بررسی کلی را می‌توان در Rovelli ۲۰۰۰ یافت.
- [136] Donoghue ۱۹۹۵
- [137] Green، Schwarz & Witten ۱۹۸۷، sec. 4.2
- [138] Weinberg ۲۰۰۰، ch. 31
- [139] Townsend ۱۹۹۶، Duff ۱۹۹۶
- [140] Kuchař ۱۹۷۳، sec. 3
- [141] Ashtekar ۱۹۸۶، Ashtekar ۱۹۸۷
- [142] برای مرور Thiemann ۲۰۰۶ را ببینید؛ بحث‌های مفصل‌تر در Rovelli ۱۹۹۸ یافت می‌شود. Ashtekar & Lewandowski ۲۰۰۴ و همچنین در جزوه‌های Thiemann ۲۰۰۳
- [143] Loll ۱۹۹۸
- [144] Sorkin ۲۰۰۵
- [145] Penrose ۲۰۰۴، ch. 33 and refs therein
- [146] Hawking ۱۹۸۷
- [147] Ashtekar ۲۰۰۷، Schwarz ۲۰۰۷
- [148] Maddox ۱۹۹۸، pp. ۵۲-۵۹، ۹۸-۱۲۲؛ Penrose ۲۰۰۴، sec. 34.1، ch. 30
- [149] Friedrich ۲۰۰۵
- [150] مروری بر مسائل مختلف و روش‌های حل آن‌ها، Lehner ۲۰۰۲ را ببینید.
- [151] مثلاً مجله الکترونیکی مرورها را ببینید. Living Reviews in Relativity

۱۲.۳ منابع

>□□ توجه: این بخش شامل متونی است که در نگارش این نوشتار از آنها استفاده شده‌است. سایر متون، وبسایت‌ها و منابع در بخش منابع نسبیت عام لیست شده‌اند □□<

• Alpher, R. A. and R. C. Herman. "Evolution of the universe". *Nature* 162, no. 4124 (1948): 774-775. Bibcode: 1948Natur.162..774A. doi:10.1038/162774b0.

• Anderson, J. D., J. K. Campbell, R. F. Jurgens and = Lau. H. Sato. ed. *Proceedings of the Sixth Marcel Großmann Meeting on General Relativity*. World Scientific, 1992. 353-355. ISBN 981-02-0950-9.

• Arnold, V. I. *Mathematical Methods of Classical Mechanics*. Springer, 1989. ISBN 3-540-96890-3.

- Bania, T. M., R. T. Rood and D. S. Balse. “The cosmological density of baryons from observations of 3He+ in the Milky Way”. *Nature* 415, no. 6867 (2002): 54–57. Bibcode: 2002Natur.415...54B. doi:10.1038/415054a. PMID 11780112.
- Barack, Leor and Curt Cutler. “LISA Capture Sources: Approximate Waveforms, Signal-to-Noise Ratios, and Parameter Estimation Accuracy”. *Phys. Rev. D* 69, no. 8 (2004): 082005. arXiv:gr-qc/031012. Bibcode: 2004PhRvD..69h2005B. doi:10.1103/PhysRevD.69.082005.
- Bardeen, J. M., B. Carter and S. W. Hawking. “The Four Laws of Black Hole Mechanics”. *Comm. Math. Phys.* 31, no. 2 (1973): 161–170. Bibcode: 1973CMaPh..31..161B. doi:10.1007/BF01645742. Archived from the original on ٢٣ ٢٠١٣.
- Barish, Barry. P. Florides. ed. *General Relativity and Gravitation. Proceedings of the 17th International Conference*. World Scientific, 2005. 24–34. ISBN 981-256-424-1.
- Barstow, M, Howard E. Bond, J. B. Holberg, = Burleigh, Hubeny and Koester. “Hubble Space Telescope Spectroscopy of the Balmer lines in Sirius B”. *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* 362, no. 4 (2005): 1134–1142. arXiv:astro-ph/0506600. Bibcode: 2005MNRAS.362.1134B. doi:10.1111/j.1365-2966.2005.09359.x.
- Bartusiak, Marcia. *Einstein’s Unfinished Symphony: Listening to the Sounds of Space-Time*. Berkley, 2000. ISBN 978-0-425-18620-6.
- Begelman, Mitchell C., Roger D. Blandford and Martin J. Rees. “Theory of extragalactic radio sources”. *Rev. Mod. Phys.* 56, no. 2 (1984): 255–351. Bibcode: 1984RvMP...56..255B. doi:10.1103/RevModPhys.56.255.
- Beig, Robert and Piotr T. Chruściel. J. -P. Francoise. ed. *Encyclopedia of Mathematical Physics, Volume 2*. Elsevier, 2006. arXiv:gr-qc/0502041. Bibcode: 2005gr.qc.....2041B. ISBN 0-12-512660-3.
- Bekenstein, Jacob D.. “Black Holes and Entropy”. *Phys. Rev. D* 7, no. 8 (1973): 2333–2346. Bibcode: 1973PhRvD...7.2333B. doi:10.1103/PhysRevD.7.2333.
- Bekenstein, Jacob D.. “Generalized Second Law of Thermodynamics in Black-Hole Physics”. *Phys. Rev. D* 9, no. 12 (1974): 3292–3300. Bibcode: 1974PhRvD...9.3292B. doi:10.1103/PhysRevD.9.3292.
- Belinskii, V. A., I. M. Khalatnikov and E. M. Lifschitz. “Oscillatory approach to the Arnowitz, Richard, Stanley Deser and Charles W. Misner. Louis Witten. ed. *Gravitation: An Introduction to Current Research*. Wiley, 1962. 227–265.
- Arun, K.G., L. Blanchet, B. R. Iyer and = Qusailah. *Inspiralling compact binaries in quasi-elliptical orbits: The complete 3PN energy flux*. 2007. arXiv:0711.0302. Bibcode: 2008PhRvD..77f4035A. doi:10.1103/PhysRevD.77.064035.
- Ashby, Neil. “Relativity and the Global Positioning System”. *Physics Today* 55, no. 5 (2002): 41–47. Bibcode: 2002PhT...55e.41A. doi:10.1063/1.1485583. Archived from the original on May 23 2013.
- Ashby, Neil. “Relativity in the Global Positioning System”. *Living Reviews in Relativity* 6 (2003). Archived from the original on ٢٣ ٢٠١٣. Retrieved ٢٠٠٧-٠٧-٠٩.
- Ashtekar, Abhay. “New variables for classical and quantum gravity”. *Phys. Rev. Lett.* 57, no. 18 (1986): 2244–2247. Bibcode: 1986PhRvL...57.2244A. doi:10.1103/PhysRevLett.57.2244. PMID 10033673.
- Ashtekar, Abhay. “New Hamiltonian formulation of general relativity”. *Phys. Rev. D* 36, no. 6 (1987): 1587–1602. Bibcode: 1987PhRvD...36.1587A. doi:10.1103/PhysRevD.36.1587.
- Ashtekar, Abhay. *Loop Quantum Gravity: Four Recent Advances and a Dozen Frequently Asked Questions*. 2007. arXiv:0705.2222. Bibcode: 2008mgm..conf..126A. doi:10.1142/9789812834300_0008.
- Ashtekar, Abhay and Badri Krishnan. “Isolated and Dynamical Horizons and Their Applications”. *Living Rev. Relativity* 7 (2004). Archived from the original on ٢٣ ٢٠٠٧-٠٨-٢٨. Retrieved ٢٠١٣.
- Ashtekar, Abhay and Jerzy Lewandowski. “Background Independent Quantum Gravity: A Status Report”. *Class. Quant. Grav.* 21, no. 15 (2004): R53–R152. arXiv:gr-qc/0404018. Bibcode: 2004CQGra..21R..53A. doi:10.1088/0264-9381/21/15/R01.
- Ashtekar, Abhay and Anne Magnon–Ashtekar. “On conserved quantities in general relativity”. *Journal of Mathematical Physics* 20, no. 5 (1979): 793–800. Bibcode: 1979JMP...20..793A. doi:10.1063/1.524151.
- Auyang, Sunny Y.. *How is Quantum Field Theory Possible?*. Oxford University Press, 1995. ISBN 0-19-509345-3.

modes for inspiralling compact binaries in quasi-circular orbits. 2008. arXiv:0802.1249. Bibcode: 2008CQGra...25p5003B. doi:10.1088/0264-9381/25/16/165003.

Blanchet, Luc. "Gravitational Radiation from Post-Newtonian Sources and Inspiralling Compact Binaries". *Living Rev. Relativity* 9 (2006). Archived . Retrieved ٢٠٠٧-٢٠١٣ from the original on ٢٣ . ٠٨-٠٧.

Blandford, R. D.. Stephen W. Hawking. ed. ٣٠٠ . *Years of Gravitation*. Cambridge University Press, 1987. 277-329. ISBN 0-521-37976-8.

Börner, Gerhard. *The Early Universe. Facts and Fiction*. Springer, 1993. ISBN 0-387-56729-1.

Brandenberger, Robert H.. *Conceptual Problems of Inflationary Cosmology and a New Approach to Cosmological Structure Formation*. 2007. arXiv:hep-th/0701111. Bibcode: 2008LNP...738..393B. doi:10.1007/978-3-540-74353-8_11.

Brans, C. H. and R. H. Dicke. "Mach's Principle and a Relativistic Theory of Gravitation". *Physical Review* 124, no. 3 (1961): 925-935. Bibcode: 1961PhRv..124..925B. doi:10.1103/PhysRev.124.925.

Bridle, Sarah L., Ofer Lahav, Jeremiah P. Ostriker and =Steinhardt. "Precision Cosmology? Not Just Yet". *Science* 299, no. 5612 (2003): 1532-1533. arXiv:astro-ph/0303180. Bibcode: 2003Sci...299.1532B. doi:10.1126/science.1082158. PMID 12624255.

Bruhat, Yvonne. Louis Witten. ed. *Gravitation: An Introduction to Current Research*. Wiley, 1962. 130. ISBN 978-1-114-29166-9.

Buchert, Thomas. "Dark Energy from Structure—A Status Report". *General Relativity and Gravitation* 40, no. 2-3 (2007): 467-527. arXiv:0707.2153. Bibcode: 2008GRGr..40..467B. doi:10.1007/s10714-007-0554-8.

Buras, R., M. Rampp, H. -Th. Janka and = Kifonidis. "Improved Models of Stellar Core Collapse and Still no Explosions: What is Missing?". *Phys. Rev. Lett.* 90, no. 24 (2003): 241101. arXiv:astro-ph/0303171. Bibcode: 2003PhRvL..90x1101B. doi:10.1103/PhysRevLett.90.241101. PMID 12857181.

Caldwell, Robert R. "Dark Energy". *Physics World* 17, no. 5 (2004): 37-42.

Carlip, Steven. "Quantum Gravity: a Progress Report". *Rept. Prog. Phys.* 64, no. 8 (2001):

singular point in relativistic cosmology". *Advances in Physics* 19, no. 80 (1971): 525-573. Bibcode: 1970AdPhy..19..525B. doi:10.1080/00018737000101171.

Belinsky, V. A., I. M. Khalatnikov and E. M. Lifshitz. "Свойства решений уравнений Эйнштейна в космологии". *Uspekhi Fizicheskikh Nauk* (Современная физика) 102(3) (11) (1970): 463-500. Bibcode: 1970UsFiN.102..463B.

Bennett, C. L., M. Halpern, G. Hinshaw, = Jarosik, Kogut, Limon, S. S. Meyer et al. "First Year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) Observations: Preliminary Maps and Basic Results". *Astrophys. J. Suppl.* 148, no. 1 (2003): 1-27. arXiv:astro-ph/0302207. Bibcode: 2003ApJS..148....1B. doi:10.1086/377253.

Berger, Beverly K.. "Numerical Approaches to Spacetime Singularities". *Living Rev. Relativity'* ٥5 (2002). Archived from the original on ٢٣ . Retrieved ٢٠٠٧-٠٨-٠٤. ٢٠١٣

Bergström, Lars and Ariel Goobar. *Cosmology and Particle Astrophysics*. Wiley & Sons, 2003. ISBN 3-540-43128-4.

Bertotti, Bruno, Ignazio Ciufolini and Peter L. Bender. "New test of general relativity: Measurement of de Sitter geodetic precession rate for lunar perigee". *Physical Review Letters* 58, no. 11 (1987): 1062-1065. Bibcode: 1987PhRvL..58.1062B. doi:10.1103/PhysRevLett.58.1062. PMID 10034329.

Bertotti, Bruno, L. Iess and P. Tortora. "A test of general relativity using radio links with the Cassini spacecraft". *Nature* 425, no. 6956 (2003): 374-376. Bibcode: 2003Natur.425..374B. doi:10.1038/nature01997. PMID 14508481.

Bertschinger, Edmund. "Simulations of structure formation in the universe". *Annu. Rev. Astron. Astrophys.* 36, no. 1 (1998): 599-654. Bibcode: 1998ARA&A..36..599B. doi:10.1146/annurev.astro.36.1.599.

Birrell, N. D. and P. C. Davies. *Quantum Fields in Curved Space*. Cambridge University Press, 1984. ISBN 0-521-27858-9.

Blair, David and Geoff McNamara. *Ripples on a Cosmic Sea. The Search for Gravitational Waves*. Perseus, 1997. ISBN 0-7382-0137-5.

Blanchet, L., G. Faye, B. R. Iyer and = Sinha. *The third post-Newtonian gravitational wave polarisations and associated spherical harmonic*

- “LISA Technology—Concepts, Status, Prospects”. •
Class. Quant. Grav. 20, no. 10
(2003): S1–S9. Bibcode: 2003CQGra..20S...1D.
doi:10.1088/0264-9381/20/10/301. Archived
from the original on ٢٣ مه ٢٠١٣ .
- Dirac, Paul. *General Theory of Relativity*. Princeton •
University Press, 1996. ISBN 0-691-01146-X.
- Donoghue, John F. Fernando Cornet. ed. •
*Effective Theories: Proceedings of the Advanced School,
Almunecar, Spain, 26 June–1 July 1995*. World
Scientific, 1995. arXiv:gr-qc/9512024. Bibcode:
1995gr.qc....12024D. ISBN 981-02-2908-9.
- Duff, Michael. “M-Theory (the Theory Formerly •
Known as Strings)”. *Int. J. Mod. Phys. A* 11,
no. 32 (1996): 5623–5641. arXiv:hep-
th/9608117. Bibcode: 1996IJMPA..11.5623D.
doi:10.1142/S0217751X96002583.
- Ehlers, Jürgen. Werner Israel. ed. *Relativity, •
Astrophysics and Cosmology*. D. Reidel, 1973. 1–
125. ISBN 90-277-0369-8.
- Gravitational lenses*. Springer, 1992. ISBN 3-540- •
66506-4.
- Ehlers, Jürgen, ed. *Special Relativity—Will it Survive •
the Next 101 Years?*. Springer, 2006. ISBN 3-540-
34522-1.
- Ehlers, Jürgen and Wolfgang Rindler. “Local •
and Global Light Bending in Einstein’s
and other Gravitational Theories”. *General
Relativity and Gravitation*, no. 4 (1997):
519–529. Bibcode: 1997GReGr..29..519E.
doi:10.1023/A:1018843001842.
- Einstein, Albert. “Über das Relativitätsprinzip •
und die aus demselben gezogene Folgerungen”.
Jahrbuch der Radioaktivität und Elektronik 4 (1907):
411. Archived from the original on ٢٣ مه ٢٠١٣ .
Retrieved ٢٠٠٨-٠٥-٠٥.
- Einstein, Albert. “Die Feldgleichungen der •
Gravitation”. *Sitzungsberichte der Preussischen
Akademie der Wissenschaften zu Berlin*, 1915, 844–
847. Archived from the original on ٢٣ مه ٢٠١٣ .
Retrieved ٢٠٠٩-٠٩-١٢.
- Einstein, Albert. “Die Grundlage der allgemeinen •
Relativitätstheorie”. *Annalen der Physik* 49 (1916):
899–923. Archived from the original on ٢٣ مه ٢٠١٣ .
Retrieved ٢٠٠٩-٠٩-٠٣.
- Einstein, Albert. “Kosmologische Betrachtungen •
zur allgemeinen Relativitätstheorie”.
*Sitzungsberichte der Preussischen Akademie der
Wissenschaften*, 1917, 142.
- 885–942. arXiv:gr-qc/0108040. Bibcode: •
2001RPPh...64..885C. doi:10.1088/0034-
4885/64/8/301.
- Carroll, Bradley W. and Dale A. Ostlie. *An •
Introduction to Modern Astrophysics*. Addison-
Wesley, 1996. ISBN 0-201-54730-9.
- Carroll, Sean M.. “The Cosmological Constant”. •
Living Rev. Relativity 4 (2001). Archived from the
original on ٢٣ مه ٢٠١٣ . Retrieved ٢٠٠٧-٠٧-٢١.
- Carter, Brandon. *General Relativity, an Einstein •
Centenary Survey*. Cambridge University Press,
1979. 294–369 and 860–863. ISBN 0-521-
29928-4.
- “Astrophysical evidence for the existence of black •
holes”. *Class. Quant. Grav.* 16, no. 12A
(1999): A3–A21. arXiv:astro-ph/9912186.
doi:10.1088/0264-9381/16/12A/301.
- Chandrasekhar, Subrahmanyan. *The Mathematical •
Theory of Black Holes*. Oxford University Press,
1983. ISBN 0-19-850370-9.
- “The Lithium Content of the Galactic Halo Stars”. •
Astronomy & Astrophysics 442, no. 3 (2005):
961–992. arXiv:astro-ph/0505247. Bibcode:
2005A&A...442..961C. doi:10.1051/0004-
6361:20042491.
- “A confirmation of the general relativistic •
prediction of the Lense–Thirring effect”. *Nature*
431, no. 7011 (2004): 958–960. Bibcode:
2004Natur.431..958C. doi:10.1038/nature03007.
PMID 15496915.
- “Determination of frame-dragging using •
Earth gravity models from CHAMP and
GRACE”. *New Astron.* 11, no. 8 (2006):
527–550. Bibcode: 2006NewA...11..527C.
doi:10.1016/j.newast.2006.02.001.
- Coc, A., Elisabeth Vangioni-Flam, Pierre •
Descouvemont, = Adahchour and Angulo.
“Updated Big Bang Nucleosynthesis confronted to
WMAP observations and to the Abundance of Light
Elements”. *Astrophysical Journal* 600, no. 2 (2004):
544–552. arXiv:astro-ph/0309480. Bibcode:
2004ApJ...600..544C. doi:10.1086/380121.
- Proceedings of 16th International Conference on •
General Relativity and Gravitation (GR16)*. World
Scientific, 2002. arXiv:gr-qc/0204090. Bibcode:
2002gr.qc....4090C. ISBN 981-238-171-6.
- Dalal, Neal, Daniel E. Holz, Scott A. Hughes and •
=Jain. “Short GRB and binary black hole standard
sirens as a probe of dark energy”. *Phys.Rev.*
D74, no. 6 (2006): 063006. arXiv:astro-
ph/0601275. Bibcode: 2006PhRvD..74f3006D.
doi:10.1103/PhysRevD.74.063006.

- Giulini, Domenico. *Special Relativity: A First Encounter*. Oxford University Press, 2005. ISBN 0-19-856746-4.
- Giulini, Domenico. Jürgen Ehlers. ed. *Special Relativity—Will it Survive the Next 101 Years?*. Springer, 2006a. 45–111. arXiv:math-ph/0602018. Bibcode: 2006math.ph...2018G. ISBN 3-540-34522-1.
- Giulini, Domenico. I. O. Stamatescu. ed. *An assessment of current paradigms in the physics of fundamental interactions*. Springer, 2006b. arXiv:gr-qc/0603087. Bibcode: 2007LNP...721..105G.
- Gnedin, Nickolay Y.. “Digitizing the Universe”. *Nature* 435, no. 7042 (2005): 572–573. Bibcode: 2005Natur.435..572G. doi:10.1038/435572a. PMID 15931201.
- Goenner, Hubert F. M.. “On the History of Unified Field Theories”. *Living Rev. Relativity* 7 (2004). Archived from the original on ۲۳ مه ۲۰۰۸-۰۲-۲۸. ۲۰۱۳ Retrieved ۲۰۰۸-۰۲-۲۸. ۲۰۱۳
- Goroff, Marc H. and Augusto Sagnotti. “Quantum gravity at two loops”. *Phys. Lett.* 160B, no. 1–3 (1985): 81–86. Bibcode: 1985PhLB..160...81G. doi:10.1016/0370-2693(85)91470-4.
- A bot will complete this citation soon. Click here to jump the queue arXiv:gr-qc/۰۷۰۳۰۳۵ [gr-qc].
- Gowdy, Robert H.. “Gravitational Waves in Closed Universes”. *Phys. Rev. Lett.* 27, no. 12 (1971): 826–829. Bibcode: 1971PhRvL..27..826G. doi:10.1103/PhysRevLett.27.826.
- Gowdy, Robert H.. “Vacuum spacetimes with two-parameter spacelike isometry groups and compact invariant hypersurfaces: Topologies and boundary conditions”. *Ann. Phys. (N.Y.)* 83, no. 1 (1974): 203–241. Bibcode: 1974AnPhy..83..203G. doi:10.1016/0003-4916(74)90384-4.
- Green, M. B., J. H. Schwarz and E. Witten. *Superstring theory. Volume 1: Introduction*. Cambridge University Press, 1987. ISBN 0-521-35752-7.
- Greenstein, J. L., J. B. Oke and H. L. Shipman. “Effective Temperature, Radius, and Gravitational Redshift of Sirius B”. *Astrophysical Journal* 169 (1971): 563. Bibcode: 1971ApJ...169..563G. doi:10.1086/151174.
- ۱۶۶,۴۰۴۴,doi:10.۱۱۲۶/science.۱۷۷
- این یادکرد به طور خودکار درست خواهد شد می‌توانید به صف بپردازید یا خودتان دستی درست کنید
- Lachièze-Rey, Marc, ed. *Theoretical and Observational Cosmology*. Kluwer, 1999. 1–116. arXiv:gr-qc/9812046. Bibcode: 1999toc..conf....1E.
- Lämmerzahl, C., ed. *Gyros, Clocks, and Interferometers: Testing Relativistic Gravity in Space (Lecture Notes in Physics 562)*. Springer, 2001. 52–82. ISBN 3-540-41236-0.
- The Gravity Probe B experiment. Post Flight Analysis—Final Report (Preface and Executive Summary)*. Project Report: NASA, Stanford University and Lockheed Martin, 2007. Archived from the . Retrieved ۲۰۰۷-۰۸-۰۵. ۲۰۱۳ مه original on ۲۳
- Falcke, Heino, Fulvio Melia and Eric Agol. “Viewing the Shadow of the Black Hole at the Galactic Center”. *Astrophysical Journal* 528, no. 1 (2000): L13–L16. arXiv:astro-ph/9912263. Bibcode: 2000ApJ...528L..13F. doi:10.1086/312423. PMID 10587484.
- “The basics of gravitational wave theory”. *New J.Phys.* 7 (2005): 204. arXiv:gr-qc/0501041. Bibcode: 2005NJPh....7..204F. doi:10.1088/1367-2630/7/1/204.
- Font, José A.. “Numerical Hydrodynamics in General Relativity”. *Living Rev. Relativity* 6 (2003). Archived from the original on ۲۳ مه ۲۰۰۷-۰۸-۱۹. ۲۰۱۳ Retrieved ۲۰۰۷-۰۸-۱۹. ۲۰۱۳
- Fourès-Bruhat, Yvonne. “Théorème d'existence pour certains systèmes d'équations aux dérivées partielles non linéaires”. *Acta Mathematica* 88, no. 1 (1952): 141–225. doi:10.1007/BF02392131.
- Frauenfelder, Jörg. “Conformal Infinity”. *Living Rev. Relativity* 7 (2004). Archived from the . Retrieved ۲۰۰۷-۰۷-۲۱. ۲۰۱۳ مه original on ۲۳
- Friedrich, Helmut. “Is general relativity `essentially understood?’”. *Annalen Phys.* 15, no. 1–2 (2005): 84–108. arXiv:gr-qc/0508016. Bibcode: 2006AnP...518..84F. doi:10.1002/andp.200510173.
- Futamase, T. and Y. Itoh. “The Post-Newtonian Approximation for Relativistic Compact Binaries”. *Living Rev. Relativity* 10 (2006). Archived from the . Retrieved ۲۰۰۸-۰۲-۲۹. ۲۰۱۳ مه original on ۲۳
- Gamow, George. *My World Line*. Viking Press, 1970. ISBN 0-670-50376-2.
- Garfinkle, David. “Of singularities and breadmaking”. *Einstein Online*, 2007. Archived . Retrieved ۲۰۱۳ مه from the original on ۲۳ ۲۰۰۷-۰۸-۰۳.
- A bot will complete this citation soon. Click here to jump the queue arXiv:gr-qc/۹۶۰۲۰۵۵ [gr-qc].

- Ibanez, L. E.. "The second string (phenomenology) revolution". *Class. Quant. Grav.* 17, no. 5 (2000): 1117–1128. arXiv:hep-ph/9911499. Bibcode: 2000CQGr..17.1117I. doi:10.1088/0264-9381/17/5/321.
- "An Assessment of the Systematic Uncertainty in Present and Future Tests of the Lense–Thirring Effect with Satellite Laser Ranging". *Space Sci. Rev.* 148, no. 1–4 (2009): 363. arXiv:0809.1373. Bibcode: 2009SSRv..148..363I. doi:10.1007/s11214-008-9478-1.
- Isham, Christopher J.. Jürgen Ehlers. ed. *Canonical Gravity: From Classical to Quantum*. Springer, 1994. ISBN 3-540-58339-4.
- Israel, Werner. "Event Horizons and Gravitational Collapse". *General Relativity and Gravitation* 2, no. 1 (1971): 53–59. Bibcode: 1971GRGr...2...53I. doi:10.1007/BF02450518.
- Israel, Werner. *۳۰۰ Years of Gravitation*. Cambridge University Press, 1987. 199–276. ISBN 0-521-37976-8.
- Janssen, Michel. "Of pots and holes: Einstein's bumpy road to general relativity". *Ann. Phys. (Leipzig)* 14, no. S1 (2005): 58–85. Bibcode: 2005AnP...517S..58J. doi:10.1002/andp.200410130. Archived from the original on ۲۳ مه ۲۰۱۳.
- "Gravitational–Wave Data Analysis. Formalism and Sample Applications: The Gaussian Case". *Living Rev. Relativity* 8 (2005). Archived from the original on ۲۰۰۷-۰۷-۳۰. Retrieved ۲۰۱۳. Archived from the original on ۲۳ مه ۲۰۱۳.
- Kahn, Bob. *Gravity Probe B Website*. Stanford University, 1996–2012. Archived from the original on ۲۰۱۲-۰۴-۲۰. Retrieved ۲۰۱۳. Archived from the original on ۲۳ مه ۲۰۱۳.
- Kahn, Bob. *Was Einstein right? Scientists provide first public peek at Gravity Probe B results (Stanford University Press Release)*. Stanford University News Service. Archived from the original on ۲۳ مه ۲۰۱۳.
- Kamionkowski, Marc, Arthur Kosowsky and Albert Stebbins. "Statistics of Cosmic Microwave Background Polarization". *Phys. Rev. D* 55, no. 12 (1997): 7368–7388. arXiv:astro-ph/9611125. Bibcode: 1997PhRvD..55.7368K. doi:10.1103/PhysRevD.55.7368.
- Kennefick, Daniel. Jürgen Renn. ed. *One hundred authors for Einstein*. Wiley–VCH, 2005. 178–181. ISBN 3-527-40574-7.
- Kennefick, Daniel. *Proceedings of the 7th Conference on the History of General Relativity, Tenerife, 2005*. 2007. arXiv:0709.0685. Bibcode: 2007arXiv0709.0685K.
- ۱۶۸,۴۰۴۴,doi:10.۱۱۲۶/science.۱۷۷ • این یادکرد به طور خودکار درست خواهد شد می‌توانید به صف بیرید یا خودتان دستی درست کنید
- Havas, P.. "Four–Dimensional Formulation of Newtonian Mechanics and Their Relation to the Special and the General Theory of Relativity". *Rev. Mod. Phys.* 36, no. 4 (1964): 938–965. Bibcode: 1964RvMP...36..938H. doi:10.1103/RevModPhys.36.938.
- Hawking, Stephen W.. "The occurrence of singularities in cosmology". *Proceedings of the Royal Society of London A* 294, no. 1439 (1966): 511–521. Archived from the original on ۲۳ مه ۲۰۱۳.
- Hawking, S. W.. "Particle Creation by Black Holes". *Communications in Mathematical Physics* 43, no. 3 (1975): 199–220. Bibcode: 1975CMaPh..43..199H. doi:10.1007/BF02345020.
- Hawking, Stephen W.. *۳۰۰ Years of Gravitation*. Cambridge University Press, 1987. ISBN 0-521-37976-8.
- The large scale structure of space–time*. Cambridge University Press, 1973. ISBN 0-521-09906-4.
- Heckmann, O. H. L. and E. Schücking. S. Flügge. ed. *Encyclopedia of Physics*. vol. 53. 1959. 489.
- Heusler, Markus. "Stationary Black Holes: Uniqueness and Beyond". *Living Rev. Relativity* 1 (1998). Archived from the original on ۲۳ مه ۲۰۰۷-۰۸-۰۴. Retrieved ۲۰۱۳.
- Heusler, Markus. *Black Hole Uniqueness Theorems*. Cambridge University Press, 1996. ISBN 0-521-56735-1.
- Hey, Tony and Patrick Walters. *The new quantum universe*. Cambridge University Press, 2003. ISBN 0-521-56457-3.
- "Gravitational Wave Detection by Interferometry (Ground and Space)". *Living Rev. Relativity* 3 (2000). Archived from the original on ۲۳ مه ۲۰۰۷-۰۷-۲۱. Retrieved ۲۰۰۷-۰۷-۲۱.
- Hubble, Edwin. "A Relation between Distance and Radial Velocity among Extra–Galactic Nebulae". *Proc. Nat. Acad. Sci.* 15, no. 3 (1929): 168–173. Bibcode: 1929PNAS...15..168H. doi:10.1073/pnas.15.3.168. PMC 522427. PMID 16577160. Archived from the original on ۲۳ مه ۲۰۱۳.
- "Discovery of a pulsar in a binary system". *Astrophys. J.* 195 (1975): L51–L55. Bibcode: 1975ApJ...195L..51H. doi:10.1086/181708.

- Linde, Andrei. *Particle Physics and Inflationary Cosmology*. Harwood, 1990. arXiv:hep-th/0503203. Bibcode: 2005hep.th....3203L. ISBN 3-7186-0489-2.
- Linde, Andrei. "Towards inflation in string theory". *J. Phys. Conf. Ser.* 24 (2005): 151–160. arXiv:hep-th/0503195. Bibcode: 2005JPhCS..24..151L. doi:10.1088/1742-6596/24/1/018.
- Loll, Renate. "Discrete Approaches to Quantum Gravity in Four Dimensions". *Living Rev. Relativity* 1 (1998). Archived from the original on ٢٣ ١٣ ٢٠٠٨-٠٣-٠٩. Retrieved ٢٠١٣ ٠٩-٠٣-٠٩.
- Lovelock, David. "The Four-Dimensionality of Space and the Einstein Tensor". *J. Math. Phys.* 13, no. 6 (1972): 874–876. Bibcode: 1972JMP...13..874L. doi:10.1063/1.1666069.
- MacCallum, M. L. Mornas. ed. *A Century of Relativity Physics (ERE05, the XXVIII Spanish Relativity Meeting)*. American Institute of Physics, 2006. arXiv:gr-qc/0601102. Bibcode: 2006AIPC..841..129M. doi:10.1063/1.2218172.
- Maddox, John. *What Remains To Be Discovered*. Macmillan, 1998. ISBN 0-684-82292-X.
- Mannheim, Philip D.. "Alternatives to Dark Matter and Dark Energy". *Prog. Part. Nucl. Phys.* 56, no. 2 (2006): 340–445. arXiv:astro-ph/0505266. Bibcode: 2006PrPNP..56..340M. doi:10.1016/j.pnpnp.2005.08.001.
- Mather, J. C., E. S. Cheng, D. A. Cottingham, =Eplee, Fixsen, Hewagama, R. B. Isaacman et al. "Measurement of the cosmic microwave spectrum by the COBE FIRAS instrument". *Astrophysical Journal* 420 (1994): 439–444. Bibcode: 1994ApJ...420..439M. doi:10.1086/173574.
- Mermin, N. David. *It's About Time. Understanding Einstein's Relativity*. Princeton University Press, 2005. ISBN 0-691-12201-6.
- Messiah, Albert. *Quantum Mechanics*. Dover Publications, 1999. ISBN 0-486-40924-4.
- Miller, Cole. *Stellar Structure and Evolution (Lecture notes for Astronomy 606)*. University of Maryland, 2002. Archived from the original on ٢٣ ١٣ ٢٠٠٧-٠٧-٢٥. Retrieved ٢٠٠٧-٠٧-٢٥.
- Misner, Charles W., Kip. S. Thorne and John A. Wheeler. *Gravitation*. W. H. Freeman, 1973. ISBN 0-7167-0344-0.
- Møller, Christian. *The Theory of Relativity*. Oxford University Press, 1952. Archived from the original on ٢٣ ١٣ ٢٠٠٧-٠٧-٢٥. Retrieved ٢٠٠٧-٠٧-٢٥.
- Kenyon, I. R.. *General Relativity*. Oxford University Press, 1990. ISBN 0-19-851996-6.
- Kochanek, C.S., E.E. Falco, C. Impey and =Lehar. *CASTLES Survey Website*. Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics, 2007. Archived from the original on ٢٣ ١٣ ٢٠٠٧-٠٨-٢١. Retrieved ٢٠٠٧-٠٨-٢١.
- Komar, Arthur. "Covariant Conservation Laws in General Relativity". *Phys. Rev.* 113, no. 3 (1959): 934–936. Bibcode: 1959PhRv..113..934K. doi:10.1103/PhysRev.113.934.
- Kramer, Michael. S. G. Karshenboim. ed. *Astrophysics, Clocks and Fundamental Constants (Lecture Notes in Physics Vol. 648)*. Springer, 2004. 33–54. arXiv:astro-ph/0405178. Bibcode: 2004LNP...648...33K.
- Kramer, M., I. H. Stairs, R. N. Manchester, =McLaughlin, Lyne, Ferdman, M. Burgay et al. "Tests of general relativity from timing the double pulsar". *Science* 314, no. 5796 (2006): 97–102. arXiv:astro-ph/0609417. Bibcode: 2006Sci...314...97K. doi:10.1126/science.1132305. PMID 16973838.
- Kraus, Ute. *Relativistic Astrophysics*. Vieweg, 1998. 66–81. ISBN 3-528-06909-0.
- Kuchař, Karel. Werner Israel. ed. *Relativity, Astrophysics and Cosmology*. D. Reidel, 1973. 237–288. ISBN 90-277-0369-8.
- Künzle, H. P.. "Galilei and Lorentz Structures on spacetime: comparison of the corresponding geometry and physics". *Ann. Inst. Henri Poincaré a* 17 (1972): 337–362. Archived from the original on ٢٣ ١٣ ٢٠٠٧-٠٧-٢٥. Retrieved ٢٠٠٧-٠٧-٢٥.
- Lahav, Ofer and Yasushi Suto. "Measuring our Universe from Galaxy Redshift Surveys". *Living Rev. Relativity* 7 (2004). Archived from the original on ٢٣ ١٣ ٢٠٠٧-٠٨-١٩. Retrieved ٢٠٠٧-٠٨-١٩.
- Landgraf, M., M. Hechler and S. Kemble. "Mission design for LISA Pathfinder". *Class. Quant. Grav.* 22, no. 10 (2005): S487–S492. arXiv:gr-qc/0411071. Bibcode: 2005CQGra..22S.487L. doi:10.1088/0264-9381/22/10/048.
- Lehner, Luis. *Numerical Relativity: A review*. vol. 18. 2001. R25–R86. arXiv:gr-qc/0106072. Bibcode: 2001CQGra..18R..25L. doi:10.1088/0264-9381/18/17/202.
- Lehner, Luis. *Numerical Relativity: Status and Prospects*. 2002. arXiv:gr-qc/0202055. Bibcode: 2002grg.conf..210L. doi:10.1142/9789812776556_0010.

- Pais, Abraham. 'Subtle is the Lord... ' *The Science and life of Albert Einstein*. Oxford University Press, 1982. ISBN 0-19-853907-X.
- Peacock, John A.. *Cosmological Physics*. Cambridge University Press, 1999. ISBN 0-521-41072-X.
- Peebles, P. J. E.. "Primordial Helium abundance and primordial fireball II". *Astrophysical Journal* 146 (1966): 542-552. Bibcode: 1966ApJ...146..542P. doi:10.1086/148918.
- Peebles, P. J. E.. *Principles of physical cosmology*. Princeton University Press, 1993. ISBN 0-691-01933-9.
- Peebles, P.J.E., D.N. Schramm, E.L. Turner and =Kron. "The case for the relativistic hot Big Bang cosmology". *Nature* 352, no. 6338 (1991): 769-776. Bibcode: 1991Natur.352..769P. doi:10.1038/352769a0.
- Penrose, Roger. "Gravitational collapse and spacetime singularities". *Physical Review Letters* 14, no. 3 (1965): 57-59. Bibcode: 1965PhRvL..14...57P. doi:10.1103/PhysRevLett.14.57.
- Penrose, Roger. "Gravitational collapse: the role of general relativity". *Rivista del Nuovo Cimento* 1 (1969): 252-276. Bibcode: 1969NCimR...1..252P.
- Penrose, Roger. *The Road to Reality*. A. A. Knopf, 2004. ISBN 0-679-45443-8.
- Penzias, A. A. and R. W. Wilson. "A measurement of excess antenna temperature at 4080 Mc/s". *Astrophysical Journal* 142 (1965): 419-421. Bibcode: 1965ApJ...142..419P. doi:10.1086/148307.
- Peskin, Michael E. and Daniel V. Schroeder. *An Introduction to Quantum Field Theory*. Addison-Wesley, 1995. ISBN 0-201-50397-2.
- Peskin, Michael E.. *Dark Matter and Particle Physics*. 2007. arXiv:0707.1536. Bibcode: 2007JPSJ...76k1017P. doi:10.1143/JPSJ.76.111017.
- Poisson, Eric. "The Motion of Point Particles in Curved Spacetime". *Living Rev. Relativity* 7 (2004). Archived from the original on ٢٣ مه ٢٠٠٧. Retrieved ٢٠٠٧-٠٦-١٣. ٢٠١٣
- Poisson, Eric. *A Relativist's Toolkit. The Mathematics of Black-Hole Mechanics*. Cambridge University Press, 2004. ISBN 0-521-83091-5.
- Polchinski, Joseph. *String Theory Vol. I: An Introduction to the Bosonic String*. Cambridge University Press, 1998a. ISBN 0-521-63303-6.
- Narayan, Ramesh. "Black holes in astrophysics". *New Journal of Physics* 7 (2006): 199. arXiv:gr-qc/0506078. Bibcode: 2005NJPh...7..199N. doi:10.1088/1367-2630/7/1/199.
- A bot will complete this citation soon. Click here to jump the queue Narayan, Ramesh. arXiv:astro-ph/٩٦٠٦٠٠١ [astro-ph].
- Narlikar, Jayant V.. *Introduction to Cosmology*. Cambridge University Press, 1993. ISBN 0-521-41250-1.
- Nieto, Michael Martin. "The quest to understand the Pioneer anomaly". *Europhysics News* 37, no. 6 (2006): 30-34. Archived from the original on ٢٣ مه ٢٠١٣.
- Nordström, Gunnar. "On the Energy of the Gravitational Field in Einstein's Theory". *Verhandl. Koninkl. Ned. Akad. Wetenschap.* , 26 (1918): ١238-1245. Archived from the original on ٢٣ مه ٢٠١٣.
- A bot will complete this citation soon. Click here to jump the queue arXiv:gr-qc/٠٣٠١٠٢٤ [gr-qc].
- Norton, John D.. "What was Einstein's principle of equivalence?". *Studies in History and Philosophy of Science* 16, no. 3 (1985): 203-246. doi:10.1016/0039-3681(85)90002-0. Archived . Retrieved ٢٠٠٧-٢٠١٣ from the original on ٢٣ مه ٠٦-١١.
- Ohanian, Hans C. and Remo Ruffini. *Gravitation and Spacetime*. W. W. Norton & Company, 1994. ISBN 0-393-96501-5.
- Olive, K. A. and E. A. Skillman. "A Realistic Determination of the Error on the Primordial Helium Abundance". *Astrophysical Journal* 617, no. 1 (2004): 29-49. arXiv:astro-ph/0405588. Bibcode: 2004ApJ...617...29O. doi:10.1086/425170.
- O'Meara, John M., David Tytler, David Kirkman, = Suzuki, Prochaska, Lubin and Arthur M. Wolfe. "The Deuterium to Hydrogen Abundance Ratio Towards a Fourth QSO: HS٠١٠٥+١٦١٩". *Astrophysical Journal* 552, no. 2 (2001): 718-730. arXiv:astro-ph/0011179. Bibcode: 2001ApJ...552..718O. doi:10.1086/320579.
- Oppenheimer, J. Robert and H. Snyder. "On continued gravitational contraction". *Physical Review* 56, no. 5 (1939): 455-459. Bibcode: 1939PhRv...56..455O. doi:10.1103/PhysRev.56.455.
- Overbye, Dennis. *Lonely Hearts of the Cosmos: the story of the scientific quest for the secret of the Universe*. Back Bay, 1999. ISBN 0-316-64896-5.

- Robson, Ian. *Active galactic nuclei*. John Wiley, 1996. ISBN 0-471-95853-0.
- Roulet, E. and S. Mollerach. "Microlensing". *Physics Reports* 279, no. 2 (1997): 67-118. arXiv:astro-ph/9603119. Bibcode: 1997PhR...279...67R. doi:10.1016/S0370-1573(96)00020-8.
- A bot will complete this citation soon. Click here to jump the queue arXiv:gr-qc/0006061 [gr-qc].
- Rovelli, Carlo. "Loop Quantum Gravity". *Living Rev. Relativity* 1 (1998). Archived from the . Retrieved ٢٠٠٨-٠٣-١٣. ٢٠١٣ original on ٢٣
- Schäfer, Gerhard. "Gravitomagnetic Effects". *General Relativity and Gravitation* 36, no. 10 (2004): 2223-2235. arXiv:gr-qc/0407116. Bibcode: 2004GRGr...36.2223S. doi:10.1023/B:GERG.0000046180.97877.32.
- Schödel, R., T. Ott, R. Genzel, = Eckart, Mouawad and Alexander. "Stellar Dynamics in the Central Arcsecond of Our Galaxy". *Astrophysical Journal* 596, no. 2 (2003): 1015-1034. arXiv:astro-ph/0306214. Bibcode: 2003ApJ...596.1015S. doi:10.1086/378122.
- Schutz, Bernard F. *A first course in general relativity*. Cambridge University Press, 1985. ISBN 0-521-27703-5.
- Schutz, Bernard F., Paul Murdin, ed. *Encyclopedia of Astronomy and Astrophysics*. Grove's Dictionaries, 2001. ISBN 1-56159-268-4.
- Schutz, Bernard F. *Gravity from the ground up*. Cambridge University Press, 2003. ISBN 0-521-45506-5.
- Schwarz, John H.. *String Theory: Progress and Problems*. 2007. arXiv:hep-th/0702219. Bibcode: 2007PThPS.170..214S. doi:10.1143/PTPS.170.214.
- Schwarzschild, Karl. "Über das Gravitationsfeld eines Massenpunktes nach der Einsteinschen Theorie". *Sitzungsber. Preuss. Akad. D. Wiss.*, 1916a, 189-196.
- Schwarzschild, Karl. "Über das Gravitationsfeld eines Kugel aus inkompressibler Flüssigkeit nach der Einsteinschen Theorie". *Sitzungsber. Preuss. Akad. D. Wiss.*, 1916b, 424-434.
- Seidel, Edward. J. V. Narlikar, ed. *Gravitation and Relativity: At the turn of the millennium (Proceedings of the GR-15 Conference, held at IUCAA, Pune, India, December ١٩-٢١, ١٩٩٧)*. IUCAA, 1998. arXiv:gr-qc/9806088. Bibcode: 1998gr.qc.....6088S. ISBN 81-900378-3-8.
- Polchinski, Joseph. *String Theory Vol. II: Superstring Theory and Beyond*. Cambridge University Press, 1998b. ISBN 0-521-63304-4.
- Pound, R. V. and G. A. Rebka. "Gravitational Red-Shift in Nuclear Resonance". *Physical Review Letters* 3, no. 9 (1959): 439-441. Bibcode: 1959PhRvL...3..439P. doi:10.1103/PhysRevLett.3.439.
- Pound, R. V. and G. A. Rebka. "Apparent weight of photons". *Phys. Rev. Lett.* 4, no. 7 (1960): 337-341. Bibcode: 1960PhRvL...4..337P. doi:10.1103/PhysRevLett.4.337.
- Pound, R. V. and J. L. Snider. "Effect of Gravity on Nuclear Resonance". *Phys. Rev. Lett.* 13, no. 18 (1964): 539-540. Bibcode: 1964PhRvL..13..539P. doi:10.1103/PhysRevLett.13.539.
- Ramond, Pierre. *Field Theory: A Modern Primer*. Addison-Wesley, 1990. ISBN 0-201-54611-6.
- Rees, Martin. "Appearance of Relativistically Expanding Radio Sources". *Nature* 211, no. 5048 (1966): 468-470. Bibcode: 1966Natur.211..468R. doi:10.1038/211468a0.
- Reissner, H.. "Über die Eigengravitation des elektrischen Feldes nach der Einsteinschen Theorie". *Annalen der Physik* 355, no. 9 (1916): 106-120. Bibcode: 1916AnP...355..106R. doi:10.1002/andp.19163550905.
- Remillard, Ronald A., Dacheng Lin, Randall L. Cooper and = Narayan. "The Rates of Type I X-Ray Bursts from Transients Observed with RXTE: Evidence for Black Hole Event Horizons". *Astrophysical Journal* 646, no. 1 (2006): 407-419. arXiv:astro-ph/0509758. Bibcode: 2006ApJ...646..407R. doi:10.1086/504862.
- Renn, Jürgen, ed. *The Genesis of General Relativity (4 Volumes)*. Dordrecht: Springer, 2007. ISBN 1-4020-3999-9.
- Renn, Jürgen, ed. *Albert Einstein—Chief Engineer of the Universe: Einstein's Life and Work in Context*. Berlin: Wiley-VCH, 2005. ISBN 3-527-40571-2.
- Reula, Oscar A.. "Hyperbolic Methods for Einstein's Equations". *Living Rev. Relativity* 1 (1998). Archived from the original on ٢٣ . Retrieved ٢٠٠٧-٠٨-٢٩. ٢٠١٣
- Rindler, Wolfgang. *Relativity. Special, General and Cosmological*. Oxford University Press, 2001. ISBN 0-19-850836-0.
- Rindler, Wolfgang. *Introduction to Special Relativity*. Clarendon Press, Oxford, 1991. ISBN 0-19-853952-5.

- al. "Simulations of the formation, evolution and clustering of galaxies and quasars". *Nature* 435, no. 7042 (2005): 629–636. arXiv:astro-ph/0504097. Bibcode: 2005Natur.435..629S. doi:10.1038/nature03597. PMID 15931216.
- Stairs, Ingrid H.. "Testing General Relativity with Pulsar Timing". *Living Rev. Relativity* 6 (2003). Archived from the original on ٢٣ مه (2003). Retrieved ٢٠٠٧-٠٧-٢١. ٢٠١٣
- Stephani, H., D. Kramer, M. MacCallum, = Hoenselaers and Herlt. *Exact Solutions of Einstein's Field Equations*. Cambridge University Press, 2003. ISBN 0-521-46136-7.
- Synge, J. L.. *Relativity: The Special Theory*. North-Holland Publishing Company, 1972. ISBN 0-7204-0064-3.
- Szabados, László B.. "Quasi-Local Energy-Momentum and Angular Momentum in GR". *Living Rev. Relativity* 7 (2004). Archived from the . Retrieved ٢٠٠٧-٠٨-٢٣. ٢٠١٣ original on ٢٣
- Taylor, Joseph H.. "Binary pulsars and relativistic gravity". *Rev. Mod. Phys.* 66, no. 3 (1994): 711–719. Bibcode: 1994RvMP..66..711T. doi:10.1103/RevModPhys.66.711.
- A bot will complete this citation soon. Click here to jump the queue arXiv:hep-th/٠٦٠٨٢١٠. Bibcode ٢٠٠٧LNP...٧٢١..١٨٥T.
- Thiemann, Thomas. "Lectures on Loop Quantum Gravity". *Lect. Notes Phys.* 631 (2003): 41–135.
- Thorne, Kip S.. J. Klauder. ed. *Magic without Magic*. W. H. Freeman, 1972. 231–258.
- Thorne, Kip S.. *Black Holes and Time Warps: Einstein's Outrageous Legacy*. W W Norton & Company, 1994. ISBN 0-393-31276-3.
- Thorne, Kip S.. *Gravitational radiation*. 1995. arXiv:gr-qc/9506086. Bibcode: 1995pnac.conf..160T. ISBN 0-521-36853-7.
- A bot will complete this citation soon. Click here to jump the queue arXiv:gr-qc/٩٧٠٧٠١٢ [gr-qc].
- A bot will complete this citation soon. Click here to jump the queue arXiv:hep-th/٩٦١٢١٢١. Bibcode ١٩٩٧hepconf..٣٨٥T.
- Traschen, Jenny. A. Bytsenko. ed. *Mathematical Methods of Physics (Proceedings of the 1999 Londrina Winter School)*. World Scientific, 2000. arXiv:gr-qc/0010055. Bibcode: 2000mmp..conf..180T.
- Trautman, Andrzej. J. -P. Francoise. ed. *Encyclopedia of Mathematical Physics, Vol. ٢*. Elsevier, 2006. 189–195. arXiv:gr-qc/0606062. Bibcode: 2006gr.qc.....6062T.
- Seljak, Uroš and Matias Zaldarriaga. "Signature of Gravity Waves in the Polarization of the Microwave Background". *Phys. Rev. Lett.* 78, no. 11 (1997): 2054–2057. arXiv:astro-ph/9609169. Bibcode: 1997PhRvL..78.2054S. doi:10.1103/PhysRevLett.78.2054.
- Shapiro, S. S., J. L. Davis, D. E. Lebach and = Gregory. "Measurement of the solar gravitational deflection of radio waves using geodetic very-long-baseline interferometry data, ١٩٧٩–١٩٩٩". *Phys. Rev. Lett.* 92, no. 12 (2004): 121101. Bibcode: 2004PhRvL..9211101S. doi:10.1103/PhysRevLett.92.121101. PMID 15089661.
- Shapiro, Irwin I.. "Fourth test of general relativity". *Phys. Rev. Lett.* 13, no. 26 (1964): 789–791. Bibcode: 1964PhRvL..13..789S. doi:10.1103/PhysRevLett.13.789.
- Shapiro, I. I., Gordon Pettengill, Michael Ash, = Stone, Smith, Ingalls and Richard Brockelman. "Fourth test of general relativity: preliminary results". *Phys. Rev. Lett.* 20, no. 22 (1968): 1265–1269. Bibcode: 1968PhRvL..20.1265S. doi:10.1103/PhysRevLett.20.1265.
- Singh, Simon. *Big Bang: The Origin of the Universe*. Fourth Estate, 2004. ISBN 0-00-715251-5.
- Sorkin, Rafael D.. Andres Gomberoff. ed. *Lectures on Quantum Gravity*. Springer, 2005. arXiv:gr-qc/0309009. Bibcode: 2003gr.qc.....9009S. ISBN 0-387-23995-2.
- Sorkin, Rafael D.. "Forks in the Road, on the Way to Quantum Gravity". *Int. J. Theor. Phys.* 36, no. 12 (1997): 2759–2781. arXiv:gr-qc/9706002. Bibcode: 1997IJTP...36.2759S. doi:10.1007/BF02435709.
- Spergel, D. N., L. Verde, H. V. Peiris, =Komatsu, Nolta, Bennett, M. Halpern et al. "First Year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) Observations: Determination of Cosmological Parameters". *Astrophys. J. Suppl.* 148, no. 1 (2003): 175–194. arXiv:astro-ph/0302209. Bibcode: 2003ApJS..148..175S. doi:10.1086/377226.
- Spergel, D. N., R. Bean, O. Doré, =Nolta, Bennett, Dunkley, G. Hinshaw et al. "Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) Three Year Results: Implications for Cosmology". *Astrophysical Journal Supplement* 170, no. 2 (2007): 377–408. arXiv:astro-ph/0603449. Bibcode: 2007ApJS..170..377S. doi:10.1086/513700.
- Springel, Volker, Simon D. M. White, Adrian Jenkins, =Frenk, Yoshida, Gao, Julio Navarro et

۲۰۱۳. Archived from the original on ۲۳ Retrieved ۲۰۰۷-۰۲-۲۴.
- Wheeler, John A.. *A Journey Into Gravity and Spacetime*. Scientific American Library. San Francisco: W. H. Freeman, 1990. ISBN 0-7167-6034-7.
- Will, Clifford M.. *Theory and experiment in gravitational physics*. Cambridge University Press, 1993. ISBN 0-521-43973-6.
- Will, Clifford M.. "The Confrontation between General Relativity and Experiment". *Living Rev. Relativity*, 2006. Archived from the original on ۲۳ مه ۲۰۱۳. Retrieved ۲۰۰۷-۰۶-۱۲. ۲۰۱۳.
- Zwiebach, Barton. *A First Course in String Theory*. Cambridge University Press, 2004. ISBN 0-521-83143-1.
- Unruh, W. G.. "Notes on Black Hole Evaporation". *Phys. Rev. D* 14, no. 4 (1976): 870-892. Bibcode: 1976PhRvD..14..870U. doi:10.1103/PhysRevD.14.870.
- Valtonen, M. J., H. J. Lehto, K. Nilsson, = Heidt, Takalo, Sillanpää, C. Villforth et al. "A massive binary black-hole system in OJ 287 and a test of general relativity". *Nature* 452, no. 7189 (2008): 851-853. arXiv:0809.1280. Bibcode: 2008Natur.452..851V. doi:10.1038/nature06896. PMID 18421348.
- Wald, Robert M.. "On Particle Creation by Black Holes". *Commun. Math. Phys.* 45, no. 3 (1975): 9-34. Bibcode: 1975CMaPh..45....9W. doi:10.1007/BF01609863.
- Wald, Robert M.. *General Relativity*. University of Chicago Press, 1984. ISBN 0-226-87033-2.
- Wald, Robert M.. *Quantum field theory in curved spacetime and black hole thermodynamics*. University of Chicago Press, 1994. ISBN 0-226-87027-8.
- Wald, Robert M.. "The Thermodynamics of Black Holes". *Living Rev. Relativity* 4 (2001). Archived . Retrieved ۲۰۰۷-۲۰۱۳ from the original on ۲۳ ۰۸-۰۸.
- Walsh, D., R. F. Carswell and R. J. Weymann. "0.957 + 561 A, B: twin quasistellar objects or gravitational lens?". *Nature* 279, no. 5712 (1979): 381. Bibcode: 1979Natur.279..381W. doi:10.1038/279381a0. PMID 16068158.
- Wambsganss, Joachim. "Gravitational Lensing in Astronomy". *Living Rev. Relativity* 1 (1998). Archived from the original on ۲۳ مه ۲۰۱۳. Retrieved ۲۰۰۷-۰۷-۲۰.
- Weinberg, Steven. *Gravitation and Cosmology*. John Wiley, 1972. ISBN 0-471-92567-5.
- Weinberg, Steven. *The Quantum Theory of Fields I: Foundations*. Cambridge University Press, 1995. ISBN 0-521-55001-7.
- Weinberg, Steven. *The Quantum Theory of Fields II: Modern Applications*. Cambridge University Press, 1996. ISBN 0-521-55002-5.
- Weinberg, Steven. *The Quantum Theory of Fields III: Supersymmetry*. Cambridge University Press, 2000. ISBN 0-521-66000-9.
- Weisberg, Joel M. and Joseph H. Taylor. M. Bailes. ed. *Proceedings of "Radio Pulsars," Chania, Crete, August, 2002*. ASP Conference Series, 2003.
- Weiss, Achim. "Elements of the past: Big Bang Nucleosynthesis and observation". *Einstein Online* (Max Planck Institute for Gravitational Physics),

۱۳.۳ جستارهای وابسته

کتاب‌های مشهور

- Geroch, R. *General Relativity from A to B* [از ای تا بی]. Chicago: University of Chicago Press, ۱۹۸۱ شابک ۰-۲۲۶-۲۸۸۶۴-۱.
- Lieber, Lillian. *The Einstein Theory of Relativity: A Trip to the Fourth Dimension* [نظریه نسبیت اینشتین: سفری به بعد چهارم]. Philadelphia: Paul Dry Books, Inc., ۲۰۰۸ شابک ۹۷۸-۱-۵۸۹۸۸-۰۴۴-۳.
- Wald, Robert M.. *Space, Time, and Gravity: the Theory of the Big Bang and Black Holes* [گرانش: نظریه مهبانگ و سیاهچاله‌ها]. Chicago: University of Chicago Press, ۱۹۹۲. شابک ۰-۲۲۶-۸۷۰۲۹-۴.
- Kenneth Ford. *Geons, Black Holes, and Wheeler*, John Wheeler, *Quantum Foam: a life in physics* [و کف کوانتومی: یک زندگی در فیزیک]. New York: W. W. Norton, ۱۹۹۸. شابک ۰-۳۹۳-۳۱۹۹۱-۱.
- Callahan, James J.. *The Geometry of Spacetime: an Introduction to Special and General Relativity* [فضا زمان: مقدمه‌ای بر نسبیت خاص و عام]. New York: Springer, ۲۰۰۰. شابک ۰-۳۸۷-۹۸۶۴۱-۳.
- Taylor, Edwin F. ; Wheeler, John Archibald. *Exploring Black Holes: Introduction to General Relativity* [اکتشاف سیاهچاله‌ها: مقدمه‌ای بر نسبیت عام]. Addison Wesley, ۲۰۰۰. شابک ۰-۲۰۱-۳۸۴۲۳-X.

کتاب‌های در سطح کارشناسی پیشرفته

۱۴.۳ پیوند به بیرون

- B. F. Schutz. *A first Course in General Relativity* (Second Edition) [یک دوره اولیه در نسبیت عام (ویرایش دوم)]. Cambridge University Press، شابک-۰۰-۹۷۸-۰۵-۲۰-۸۸۷۰۵-۲۰-۵۲۱.
- Cheng, Ta-Pei. *Relativity, Gravitation and Cosmology: a Basic Introduction* [کیهان‌شناسی: مقدمه ابتدایی]. Oxford and New York: Oxford University Press، شابک-۰۰-۱۹-۲۰۰۵-۸۵۲۹۵۷-۰۰.
- S. Hervik. *Einstein's General theory of Relativity* [نسبیت نظریه نسبیت عام اینشتین]. Springer، شابک-۰۰-۳۸۷-۶۹۱۹۹-۲-۹۷۸.
- Hartle, James B.. *Gravity: an Introduction to Einstein's General Relativity* [آشنایی با نسبیت عام]. San Francisco: Addison-Wesley، شابک-۰۰-۳-۸۰۵۳-۸۶۶۲-۹.
- Hughston, L. P. & Tod, K. P.. *Introduction to General Relativity* [آشنایی با نسبیت عام]. Cambridge: Cambridge University Press، شابک-۰۰-۵۲۱-۳۳۹۴۳-X.
- d'Inverno, Ray. *Introducing Einstein's Relativity* [مرفی نسبیت اینشتین]. Oxford: Oxford University Press، شابک-۰۰-۱۹-۸۵۹۶۸۶-۳-۱۹۹۲.
- Carroll, Sean M.. *Spacetime and Geometry: An Introduction to General Relativity*. San Francisco: Addison-Wesley، شابک-۰۰-۸۰۵۳-۸۷۳۲-۳-۲۰۰۴. بایگانی‌شده از نسخه اصلی در ۲۳ مه ۲۰۱۳.
- Grøn, Øyvind. *Einstein's General Theory of Relativity* [نظریه نسبیت عام اینشتین]. New York: Springer، شابک-۰۰-۳۸۷-۶۹۱۹۹-۲-۹۷۸.
- Lifshitz, Evgeny F. و Landau, Lev D. *The Classical Theory of Fields (4th ed.)* [نظریه میدانهای کلاسیک]. London: Butterworth-Heinemann، شابک-۰۰-۱۹۸۰-۷۵۰۶-۲۷۶۸-۹.
- John A. Wheeler، Charles W. Misner و S. Thorne. *Gravitation* [گرانش]. W. H. Freeman، شابک-۰۰-۷۱۶۷-۰۳۴۴-۰-۱۹۷۳.
- Stephani, Hans. *General Relativity: An Introduction to the Theory of the Gravitational Field* [آشنایی با نظریه میدان گرانشی]. Cambridge: Cambridge University Press، شابک-۰۰-۵۲۱-۳۷۹۴۱-۵-۱۹۹۰.
- Wald, Robert M.. *General Relativity* [نسبیت عام]. University of Chicago Press، شابک-۰۰-۲۲۶-۱۹۸۴-۸۷۰۳۳-۲.
- نسبت: نظریه‌های خاص و عام (انگلیسی) (PDF)
- Einstein Online - مقاله‌هایی در مورد جنبه‌های متنوعی از فیزیک نسبیتی برای مخاطب عام (انگلیسی)؛ میزبانی شده توسط انستیتوی فیزیک گرانشی ماکس پلانک
- NCSA چروکهای فضا: زمان تولید شده توسط گروه نسبیت عددی در مرکز ملی کاربردهای آبرایانش (NCSA) با مقدمه‌ای ابتدایی در مورد نسبیت عام (انگلیسی)
- دوره‌ها/کلاس‌ها/خودآموزها
- کلاس نسبیت عام در یوتیوب [۱۰ کلاس درس نسبیت عام در دانشگاه استنفورد توسط پروفیسور لئونارد ساسکیند به زبان انگلیسی؛ پاییز ۲۰۱۲.
- کلاس نسبیت عام در یوتیوب [۱۲ کلاس درس نسبیت عام در دانشگاه استنفورد توسط پروفیسور لئونارد ساسکیند به زبان انگلیسی؛ پاییز ۲۰۰۸.
- مجموعه کلاسهای نسبیت عام برگزار شده در انستیتوی آنری پوانکاره در سال ۲۰۰۶ (دوره‌های مقدماتی و پیشرفته) (انگلیسی).
- خودآموزهای نسبیت عام (انگلیسی)
- براون، کوین. «بازتابی از نسبیت (انگلیسی)». *Mathpages.com* بایگانی‌شده از نسخه اصلی در ۲۳ می ۲۰۱۳. بازبینی‌شده در ۲ می ۲۰۱۳.
- شان کارول. «جزوه‌های نسبیت عام (انگلیسی)» (en). بایگانی‌شده از نسخه اصلی در ۲۳ می ۲۰۱۳. بازبینی‌شده در ۲ می ۲۰۱۳.
- رافی مور. «فهمیدن نسبیت عام (انگلیسی)» (en). بایگانی‌شده از نسخه اصلی در ۲۳ می ۲۰۱۳. بازبینی‌شده در ۲ می ۲۰۱۳.
- استفان وارنر. «مقدمه‌ای بر هندسه دیفرانسیل و نسبیت عام (انگلیسی)» (PDF) (en). بایگانی‌شده از نسخه اصلی در ۲۳ می ۲۰۱۳. بازبینی‌شده در ۲ می ۲۰۱۳.

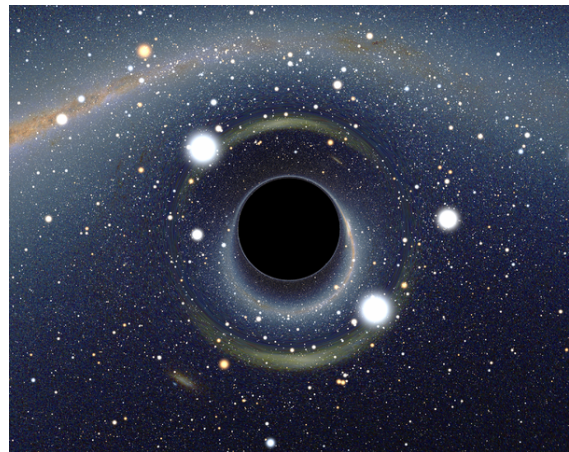
کتاب‌های در سطح کارشناسی ارشد

فصل ۴

سیاهچاله

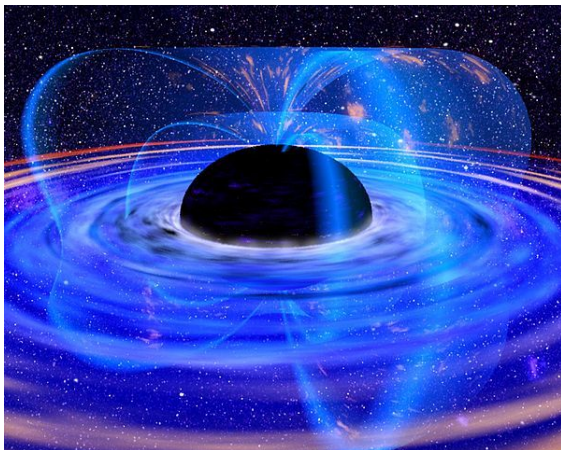
جرم یک سیاهچاله پس از شکل گیری می‌تواند با دریافت جرم از پیرامونش افزایش یابد. با جذب ستارگان پیرامون و بهم پیوستن سیاهچاله‌های گوناگون، سیاهچاله‌های کلان جرم با جرمی میلیونها برابر خورشید تشکیل می‌شوند.^[7]

یک سیاهچاله به دلیل اینکه نوری از آن خارج نمی‌گردد نادیدنی است، اما می‌تواند بودن خود را از راه کنش و واکنش با ماده از پیرامون خود نشان دهد. از راه بررسی برهمکنش میان ستاره‌های دوتایی با همدم نامرئیشان، اخترشناسان نامزدهای احتمالی بسیاری برای سیاهچاله بودن در این منظومه‌ها شناسایی کرده‌اند. این باور جمعی در میان دانشمندان رو به گسترش است که در مرکز بیشتر کهکشان‌ها یک سیاهچاله کلان جرم وجود دارد. برای نمونه، دستاوردهای ارزشمندی بازگویی این واقعیت است که در مرکز کهکشان راه شیری ما نیز یک سیاهچاله کلان جرم با جرمی بیش از چهار میلیون برابر جرم خورشید وجود دارد.^[8]



نمایش شبیه‌سازی شده از یک سیاه چاله در برابر ابر ماژلانی بزرگ.

۱.۴ تاریخچه



نگاره‌ای تخیلی از صفحه تجمع پلاسمای داغ بر گرد یک سیاهچاله (برگرفته از ناسا).

ابداع واژه «کرم‌چاله»^[9] و «سیاهچاله فضایی»^[10] به جان ویلر نسبت داده شده‌است. با این حال، این مفهوم از مدت‌ها قبل به صورت‌های متفاوتی مطرح بوده‌است.

مفهوم جسمی که آن قدر پر جرم است که حتی نور هم نمی‌تواند از آن بگریزد، نخستین بار از سوی زمین‌شناسی به نام جان میشل در سال ۱۷۸۳ در نامه‌ای که برای هنری کاوندیش از انجمن سلطنتی نوشته بود، مطرح شد. در آن زمان مفهوم نظریه گرانش نیوتن و مفهوم سرعت گریز شناخته شده بودند. طبق محاسبات میشل جسمی با شعاع خورشید و چگالی ۵۰۰ برابر در سطح خود سرعت گریزی بیش از سرعت نور خواهد داشت و بنابراین

سیاهچاله ناحیه‌ای از فضا-زمان است که آثار گرانشی آن، چنان نیرومند است که هیچ چیز - حتی ذرات و تابش‌های الکترومغناطیسی مثل نور - نمی‌توانند از میدان گرانش آن بگریزد.^[1] نظریه نسبیت عام آلبرت اینشتین پیش بینی می‌کند که یک جرم به اندازه کافی فشرده شده، می‌تواند سبب تغییر شکل و خمیدگی فضا-زمان و تشکیل سیاهچاله شود. مرز این ناحیه از فضا-زمان که هیچ چیزی پس از عبور از آن نمی‌تواند به بیرون برگردد را افق رویداد می‌نامند. صفت «سیاه» در نام سیاهچاله برگرفته از این واقعیت است که همه نوری که از افق رویداد آن می‌گذرد را به دام می‌اندازد که از این دیدگاه سیاه چاله رفتاری شبیه به جسم سیاه در ترمودینامیک دارد.^{[2][3]} از سوی دیگر نیز، نظریه میدانهای کوانتومی در فضا-زمان خمیده پیش‌بینی می‌کند که افق‌های رویداد نیز تابشی به نام تابش هاوکینگ گسیل می‌کنند که طیف آن همانند طیف جسم سیاهی است که دمای آن با جرمش نسبت وارونه دارد. میزان دما در مورد سیاهچاله‌های ستاره‌ای در حد چند میلیاردم کلوین است و از این رو ردیابی آن دشوار است.

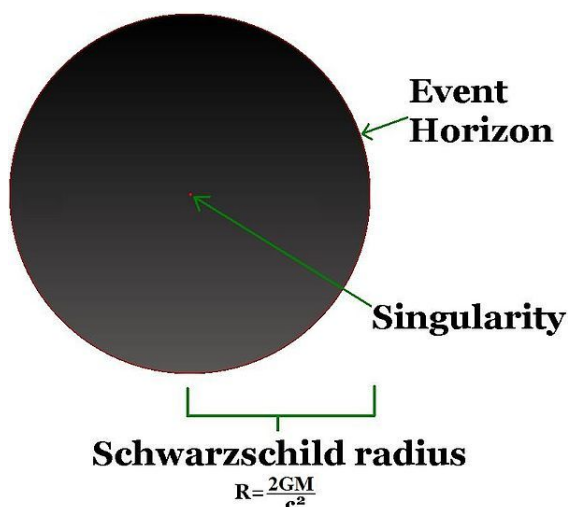
اجسامی که به دلیل میدان گرانشی بسیار قوی اجازه گریز به نور نمی‌دهند برای اولین بار در سده ۱۸ (میلادی) توسط جان میشل و پیر سیمون لاپلاس مورد توجه قرار گرفتند. نخستین راه حل نوین نسبیت عام که در واقع ویژگی‌های یک سیاهچاله را توصیف می‌نمود در سال ۱۹۱۶ میلادی توسط کارل شوارزشیلد کشف شد.^{[4][5]} هر چند که تعبیر آن به صورت ناحیه‌ای از فضا که هیچ چیزی نمی‌تواند از آن بگریزد، تا چهار دهه بعد به خوبی درک نشد. برای دوره‌های طولانی این چالش مورد کنجکاوی ریاضیدانان بود تا اینکه در میانه دهه ۱۹۶۰، پژوهش‌های نظری نشان داد که سیاهچاله‌ها به راستی یکی از پیش‌بینی‌های ژنریک نسبیت عام هستند. یافتن ستارگان نوترونی باعث شد تا وجود اجرام فشرده شده بر اثر رمبش گرانشی به عنوان یک واقعیت امکان‌پذیر فیزیکی مورد علاقه دانشمندان قرار گیرد.^[6] اینگونه پنداشته می‌شود که سیاهچاله‌های ستاره‌ای در جریان فروپاشی ستاره‌های بزرگ در یک انفجار ابرنواختری در پایان چرخه زندگی‌شان بوجود می‌آیند.

در سال ۱۹۵۸، دیوید فینکلشتین سطح شوارتز شیلد را به عنوان یک افق رویداد معرفی نمود، «یک غشای کاملاً یک جهته که تأثیرات سببی تنها از یک سو از آن عبور می‌کنند».^[21] این مطلب تناقض صریحی با نتایج اوپنهایمر ندارد بلکه آن را گسترش می‌دهد تا ناظرین در حال سقوط به سیاهچاله را نیز شامل شود.^[22]

این نتایج مقارن بود با آغاز عصر طلایی نسبیت عام که در آن تحقیقات درباره نسبیت عام و سیاهچاله‌ها رونق فراوان یافت. کشف تپ اخترها در سال ۱۹۶۷ که در سال ۱۹۶۹ نشان داده شد که ستاره‌های نوترونی چرخنده با سرعت چرخش بالا هستند،^[23] به این فرایند کمک کرد.^[24]^[25] تا آن زمان ستارگان نوترونی مانند سیاهچاله‌ها تنها در حوزه تئوری مطرح بودند، اما کشف تپ اخترها نشان داد که واقعیت فیزیکی نیز دارند و باعث شد تا علاقه شدیدی به انواع اجسام فشرده‌ای که ممکن است بر اثر رمبش گرانشی تشکیل شوند برانگیخته شود. کشف اختروش (کوزار)ها که انرژی خروجی بسیار بزرگی آنها این احتمال را مطرح نمود که ممکن است مکانیزم بوجود آورنده این انرژی، رمبش گرانشی باشد.^[26]

در این دوره جوابهای کلی تری نیز برای معادله سیاهچاله پیدا شد. روی کر جواب دقیقی برای یک سیاه چاله چرخان به دست آورد. دو سال بعد از آن نیومن یک جواب متقارن محوری برای سیاهچاله‌ای که هم چرخان باشد و هم دارای بار الکتریکی باشد کشف نمود.^[27] در نتیجه کارهای ورنر اسرائیل،^[28] براندون کارتر^[29]^[30] و دیوید رایبسون^[31] نظریه بدون مو ظهور کرد که با استفاده از پارامترهای متریک کر-نیومن، جرم، تکانه زاویه‌ای و بار الکتریکی یک سیاهچاله ثابت را توصیف نمود.^[32]

۲.۴ ویژگی‌ها و ساختار



تصویری ساده از یک سیاهچاله غیر چرخان

نظریه «بدون مو» ی جان ویلر بیان می‌کند که هر سیاهچاله پس از اینکه تشکیل شد و به وضعیت پایداری رسید، تنها سه خاصیت فیزیکی مستقل دارد: جرم، بار الکتریکی، و اندازه حرکت زاویه‌ای. از نظر مکانیک کلاسیک (غیر کوانتومی)^[32] دو سیاهچاله که دارای مقادیر یکسانی برای سه ویژگی یاد شده باشند، نامتمايز اند.

این سه ویژگی، ویژگی‌های خاصی هستند زیرا از بیرون سیاهچاله قابل مشاهده‌اند. مثلاً یک سیاهچاله باردار همچون هر جسم باردار دیگری بارهای همنام را دفع می‌کند. به طریق مشابهی مجموع جرم درون کره‌ای که یک سیاهچاله را در برمی‌گیرد از طریق هماتی قانون گاوس در مورد نیروهای گرانشی یعنی جرم ای. دی. ام نسبیت عام از فواصل بسیار دور اندازه‌گیری نمود.^[33] به همین ترتیب تکانه زاویه‌ای یک سیاهچاله را نیز می‌توان از راه کشش چارچوب توسط میدان مغناطیس گرانشی به دست آورد.

این غیرقابل مشاهده خواهد بود. به بیان او:

اگر شعاع کره‌ای مشابه خورشید قرار باشد که با چگالی ۵۰۰ بار از آن بزرگ‌تر باشد، جسمی که از ارتفاع بینهایت به سمت آن سقوط می‌کند در سطح آن سرعتی بیش از سرعت نور به دست می‌آورد، و اگر فرض کنیم نور با نیروی مشابهی به سمت ستاره کشیده شود، آنگاه همه نوری که از چنین جسمی ساطع می‌شود به ناچار به وسیله گرانش آن به سمت خود ستاره بازمی‌گردد.
□ جان میشل

[11]

در سال ۱۷۹۶ پیر سیمون لاپلاس، ریاضی‌دان فرانسوی همان ایده را در ویرایش اول و دوم کتاب خود به نام آشکارسازی نظام جهان مطرح کرد. این مطالب در ویرایش‌های بعدی کتاب حذف شد.^[12]^[13] مفهوم این ستاره‌های تاریک در سده ۱۹ (میلادی) توجه چندانی را به خود جلب نکرد زیرا فیزیک دانان نمی‌توانستند درک کنند که نور که یک موج و بدون جرم است چگونه ممکن است تحت تأثیر نیروی گرانش قرار گیرد.

۱.۱.۴ نسبیت عام

در سال ۱۹۱۵ آلبرت اینشتین که پیش تر نشان داده بود که گرانش، نور را تحت تأثیر قرار می‌دهد، نظریه گرانش خود به نام نسبیت عام را مطرح کرد. چند ماه بعد کارل شوارتز شیلد پاسخی برای معادلات میدان اینشتین ارائه نمود که میدان گرانشی ذرات نقطه‌ای و کروی را توصیف می‌کرد.^[14] چند ماه پس از شوارتز شیلد، ژوهانس دروست - که از شاگردان هندریک لورنتز بود - به صورت جداگانه همان پاسخ را برای ذرات نقطه‌ای به دست آورد و بحث مفصل تری در مورد ویژگیهای آن نمود.^[15] این پاسخ در شعاعی که امروزه شعاع شوارتز شیلد نامیده می‌شود رفتاری غیرعادی نمایش می‌دهد. زیرا در این شعاع، معادله تکینه می‌شود و برخی از اجزای آن مقدار بی‌نهایت خواهند داشت. در آن زمان ماهیت این سطح به درستی فهمیده نشده بود. در سال ۱۹۲۴ آرتور استنلی ادینگتون نشان داد که با تغییر مختصات می‌توان تکینگی را بر طرف نمود. هر چند که تا سال ۱۹۳۳ طول کشید تا ژرژ لومتر متوجه شد که مقدار بی‌نهایت این معادله در شعاع شوارتز شیلد در واقع یک تکینگی ریاضی است و جنبه فیزیکی ندارد.^[16] این شعاع امروزه به عنوان شعاع افق رویداد یک سیاهچاله غیر چرخشی شناخته می‌شود.

در سال ۱۹۳۰ سوپرامانیان چاندراسخار، اختر فیزیک دان هندی محاسبه نمود که یک جسم الکترون تباهیده غیر چرخنده که جرم آن از حدی که بعدها به نام حد چاندراسخار نامیده شد و ۱٫۴ برابر جرم خورشید است، بیشتر باشد هیچ جواب پایداری ندارد.^[17] ادعای وی از سوی هم دوره‌ای‌های وی همچون ادینگتون و لو لاندائو مورد مخالفت قرار گرفت. آنها ادعا می‌کردند که مکانیزمی ناشناخته وجود دارد که از فروپاشی این اجرام جلوگیری می‌کند.^[18] ادعای آنها تا حدودی درست بود زیرا یک کوتوله سفید که جرم آن اندکی از حد چاندراسخار بزرگتر باشد پس از فروپاشی به یک ستاره نوترونی تبدیل می‌شود^[19] که بنا بر اصل طرد پاولی، وضعیتی پایدار دارد، اما در سال ۱۹۳۹ روبرت اوپنهایمر و دیگران پیش بینی کردند که ستاره‌های نوترونی که جرمی بیشتر از سه برابر جرم خورشید دارند به دلایلی که توسط چاندراسخار ارائه شد، به سیاهچاله فروپاشی می‌شوند و نتیجه‌گیری کردند که هیچ سازوکار فیزیکی نمی‌تواند از فروپاشی برخی ستارگان به سیاهچاله جلوگیری نماید.^[20]

۲.۱.۴ عصر طلایی

نوشتار(های) وابسته: عصر طلایی نسبیت عام

نقطه مرکزی سیاهچاله است. این کره ناحیه‌ای از فضا زمان است که عبور نور و ماده از آن تنها در یک جهت و به طرف درون آن ممکن است. درون این کره سرعت گریز از سرعت نور بیشتر خواهد بود، و از آنجاییکه هیچ جسمی توانایی حرکت با سرعت بیشتر از سرعت نور را ندارد، هیچ جسمی توانایی گریز از این منطقه را ندارد. هر جرم یا انرژی که به یک سیاه چاله نزدیک شود، در داخل فاصله معینی که افق رویداد آن خوانده می‌شود، به طور مقاومت ناپذیری به درون سیاه چاله کشیده می‌شود. نوری که از اطراف یک سیاه چاله عبور می‌کند، اگر به افق رویداد نرسد، روی مسیری منحنی شکل از کنار آن می‌گذرد و اگر به افق رویداد برسد، در سیاه چاله سقوط می‌کند. افق رویداد را از این رو به این نام می‌خوانند که از درون آن اطلاعات راجع به آن رخداد به مشاهده کننده نمی‌رسد و مشاهده کننده نمی‌تواند یقین حاصل کند که این اتفاق رخ داده است.^[42]

آنگونه که در نسبیت عام پیش بینی می‌شود، حضور یک جسم باعث خمش فضا-زمان می‌شود به گونه‌ای که مسیرهایی که ذرات طی می‌کنند به سمت جرم خمیده می‌شوند.^[43] در افق رویداد یک سیاهچاله این تغییر شکل به اندازه‌ای قوی می‌شود که هیچ مسیری که از سیاهچاله دور شود وجود نخواهد داشت.

از دید یک ناظر دور زمان در نزدیکی سیاهچاله کندتر از نقاط دورتر خواهد گذشت.^[44] این پدیده به نام اتساع زمان نامیده می‌شود. شیئی که به افق رویداد نزدیک شود به نظر خواهد رسید که هر چه نزدیکتر می‌گردد از سرعت آن کاسته می‌شود و زمانی بی‌نهایت طول خواهد کشید تا به آن برسد.^[45] و چون تمام فرایندهای این ذره کندتر می‌شود، نوری که منتشر می‌کند تاریکتر و قرمزتر خواهد شد که این اثر به نام انتقال به سرخ گرانشی نامیده می‌شود.^[46] سرانجام در نقطه‌ای که به افق رویداد می‌رسد این جسم کاملاً تاریک و غیرقابل مشاهده می‌شود.

از سوی دیگر ناظری که به درون سیاهچاله سقوط می‌کند، در زمانی که افق رویداد را رد می‌کند، متوجه هیچ‌کدام از این تأثیرات نخواهد شد. طبق ساعت خودش افق رویداد را در زمانی متناهی رد می‌کند. اگرچه هرگز نمی‌تواند بفهمد که دقیقاً در چه زمانی از افق رویداد رد شده است. زیرا غیرممکن است که بتوان با مشاهدات محلی، موقعیت افق رویداد را تعیین کرد.^[47]

افق رویداد یک سطح جامد نیست و مانع ورود ماده یا تابشی که به سمت ناحیه داخل آن در حرکت است نمی‌شود. در واقع افق رویداد یک ویژگی تعریف شده سیاهچاله است که حدود سیاهچاله را مشخص می‌کند. علت سیاه بودن افق رویداد هم این است که هیچ پرتوی نور یا تابش دیگری نمی‌تواند از آن بگریزد. از این رو افق رویداد هر آنچه را که درون آن اتفاق می‌افتد از دید دیگران پنهان نگه می‌دارد.

شکل افق رویداد یک سیاهچاله همیشه تقریباً کروی است.^[50] [Note 2] برای سیاهچاله‌های ایستای غیرچرخان این شکل کاملاً کروی است و برای سیاهچاله‌های چرخان کمی بیضی است.

۳.۲.۴ تکنیکی

نوشتار اصلی: تکنیکی گرانشی

بر اساس نسبیت عام، مرکز یک سیاهچاله یک نقطه تکنیکی گرانشی است، ناحیه‌ای که در آن خمیدگی فضا زمان بی‌نهایت می‌شود.^[51] برای یک سیاهچاله غیر چرخان این ناحیه به شکل یک نقطه منفرد و برای یک سیاهچاله چرخان به شکل یک تکنیکی حلقوی روی صفحه چرخش خواهد بود.^[52] در هردوی موارد حجم ناحیه تکنیکی صفر است.^[53] به همین دلیل چگالی ناحیه تکنیکی، بی‌نهایت خواهد بود.

ناظری که به درون یک سیاهچاله شوارتزشیلد سقوط می‌کند (یعنی بدون بار و تکانه زاویه‌ای) به محض اینکه از افق رویداد بگذرد دیگر نمی‌تواند در مقابل سرازیر شدن به سوی نقطه تکنیکی جلوگیری کند. این ناظر می‌تواند تنها تا میزان محدودی زمان سقوطش را با سرعت گرفتن در جهت مخالف

وقتی جسمی به درون سیاهچاله‌ای سقوط می‌کند تمام اطلاعات فیزیکی مربوط به شکل جرم یا توزیع بار سطحی آن به طور یکنواخت در امتداد افق رویداد توزیع می‌شود و از دید ناظر خارجی گم می‌شود. این رفتار افق رویداد به عنوان سیستم پراکنده ساز نامیده می‌شود و به آنچه در یک غشای کنشی رسانا با اصطکاک و مقاومت الکتریکی رخ می‌دهد شباهت بسیار دارد.^[34] این تفاوت از آن دسته نظریه‌های میدانی مانند الکترو مغناطیس است که به دلیلی معکوس پذیری در زمان هیچ اصطکاک یا مقاومتی در سطح میکروسکوپی ندارند. زیرا یک سیاهچاله در نهایت با سه پارامتر به حالت پایدار می‌رسد و هیچ راهی وجود ندارد که از گم شدن اطلاعات مربوط به شرایط اولیه اجتناب نمود: میدان‌های گرانشی و الکتریکی سیاهچاله اطلاعات بسیار اندکی در باره آنچه وارد سیاهچاله شده است می‌دهند. اطلاعات گم شده شامل هر کمیتی است که از فاصله دور از افق رویداد یک سیاهچاله قابل اندازه‌گیری نیستند. از جمله می‌توان از عدد باریونی و عدد لپتونی کل نام برد. این موضوع تا اندازه‌ای گیج‌کننده است که از آن به پارادوکس گم شدن اطلاعات سیاهچاله یاد می‌شود.^[35]^[36]

۱.۲.۴ خواص فیزیکی

ساده‌ترین نوع سیاهچاله‌ها آنهایی هستند که تنها جرم دارند و بار الکتریکی و تکانه زاویه‌ای ندارند. این سیاهچاله‌ها را اغلب با نام سیاهچاله‌های شوارتزشیلد می‌نامند که بر گرفته از نام کارل شوارتزشیلد است که جوابی برای معادلات میدانی انیشتین در سال ۱۹۱۶ ارائه نمود.^[14] بنا بر قضیه بیرخوف در نسبیت عام، تنها جواب خلأ است که متقارن کروی است. این بدان معنی است که تفاوتی میان میدان گرانشی یک سیاهچاله و یک جسم کروی با همان جرم وجود ندارد؛ بنابراین سیاهچاله تنها در محدوده نزدیک به افق آن است که همه چیز حتی نور را به درون می‌کشد و در فواصل دورتر کاملاً مانند هر جسم دیگری با همان میزان جرم رفتار می‌کند.^[37]

راه حل‌هایی برای معادلات انیشتین که سیاهچاله‌های کلی تری را توصیف می‌کنند نیز وجود دارند. مثلاً متریک رایسنر-نوردشتروم سیاهچاله‌های باردار و متریک کر سیاهچاله‌های چرخان را توصیف می‌کنند. کلی‌ترین جواب موجود برای سیاهچاله‌های ثابت متریک کر-نیومن است که سیاهچاله‌هایی را توصیف می‌کند که هم بار الکتریکی و هم تکانه زاویه‌ای دارند.^[38]

در حالیکه جرم سیاهچاله می‌تواند هر مقداری داشته باشد، بار و تکانه زاویه‌ای آن توسط جرم محدود می‌شوند. چنانچه واحدهای پلانک را بکار ببریم، کل بار الکتریکی Q و مجموع تکانه زاویه‌ای J در این رابطه صدق می‌کنند (M جرم سیاهچاله است): $Q^2 + \left(\frac{J}{M}\right)^2 \leq M^2$. سیاهچاله‌هایی که نابرابری فوق را اشیاع می‌کنند، سیاهچاله‌های اکستریمال نامیده می‌شوند. جواب‌هایی نیز برای معادلات انیشتین موجودند که این نابرابری را نقض می‌کنند اما این جواب‌ها افق رویداد ندارند. این جوابها را تکنیکی‌های برهنه می‌نامند که از بیرون قابل مشاهده‌اند و در نتیجه نمی‌توانند فیزیکی باشند. فرضیه سانسور کیهانی شکل گیری چنین تکنیکی‌هایی را در جریان رمبش نامحتمل می‌شمرد.^[39]

به دلیل قدرت نسبی الکترومغناطیس سیاهچاله‌هایی که از رمبش ستارگان تشکیل می‌شوند تمایل دارند که بار تقریباً خنثی ستاره را حفظ کنند. اما انتظار می‌رود که چرخش یک ویژگی مشترک در اجسام فشرده باشد. نامزد سیاهچاله قرار گرفته در دوتایی پرتو ایکس جی‌آراس ۱۰۵+۱۹۱۵^[40] به نظر می‌رسد که تکانه زاویه‌ای نزدیک به حداکثر مقدار مجاز داشته باشد.

۲.۲.۴ افق رویداد

نوشتار اصلی: افق رویداد

مهمترین ویژگی که یک سیاهچاله را تعریف می‌کند پیدایش افق رویداد است. افق رویداد به شکل کروی یا تقریباً کروی با شعاع شوارتزشیلد حول

بنابراین نوری که از درون کره فوتونی به ما می‌رسد باید از اجسامی تأیید شده باشد که درون کره فوتونی هستند اما هنوز به افق رویداد نرسیده‌اند.^[62]

سایر اجرام فشرده همچون ستاره‌های نوترونی نیز می‌توانند کره‌های فوتونی داشته باشند.^[63] این امر ناشی از این حقیقت است که میدان گرانشی یک شی به اندازه واقعی آن بستگی ندارد، از این رو هر جسم که کوچکتر از ۱٫۵ برابر شعاع شوارتزشیلد متناظر با جرمش باشد می‌تواند کره فوتونی داشته باشد.

۵.۲.۴ ارگوسفر

سیاهچاله‌های چرخان در درون ناحیه‌ای از فضا و زمان محصورند که در آن ثابت ماندن غیرممکن است. این ناحیه را ارگوسفر می‌نامند. این پدیده ناشی از فرایندی به نام کشش چارچوب است. تئوری نسبیت عام پیش بینی می‌کند که هر جسم در حال چرخش تمایل دارد که فضا-زمان اطراف نزدیک خود را بکشد. هر جسم نزدیک به جسم چرخان تمایل خواهد داشت که در جهت چرخش حرکت کند. برای یک سیاهچاله چرخان در نزدیکی افق رویدادش این اثر به اندازه‌ای قدرتمند می‌شود که جسم مجبور است که با سرعتی بالاتر از سرعت نور در جهت مخالف بچرخد تا تنها بتواند ثابت بماند.^[64]

ارگوسفر یک سیاهچاله از درون به افق رویداد می‌رسد و از بیرون به یک کره بیضوی که در قطبش با کره افق رویداد مماس می‌شود و قسمت استوایی آن بسیار پهن‌تر از سایر قسمت‌ها است پایان می‌یابد. این مرز خارجی ارگوسفر را گاهی سطح ارگو می‌نامند.

اجسام و تابش می‌توانند به طور عادی از ارگوسفر بگریزند. بنا بر فرایند پنبروز اجسامی که از ارگوسفر خارج می‌شوند ممکن است انرژی بیشتری از انرژی ورودشان داشته باشند. این انرژی از انرژی چرخشی سیاهچاله گرفته می‌شود و باعث کندتر شدن سرعت آن می‌شود.^[65]

۶.۲.۴ ذخیره اطلاعات

پروفیسور استیون هاوکینگ فیزیکیان ممتاز بریتانیایی در اوت ۲۰۱۵ گفت که سیاهچاله‌ها اطلاعات مربوط به چیزهایی که در درون آنها سقوط می‌کند را ذخیره می‌کنند. ابتدا تصور می‌شد که این اطلاعات از بین می‌رود، اما معلوم شد که این ناقص قوانین فیزیک کوانتوم خواهد بود. همزمان، قوانین مکانیک کوانتومی حکم می‌کند که همه چیز در جهان ما می‌تواند به اطلاعات تجزیه شود، برای مثال، به یک رشته صفر و یک. پروفیسور هاوکینگ که این اطلاعات ممکن است اصلاً وارد سیاهچاله نشود، بلکه در سرحد آن باقی بماند. براساس این قوانین، این اطلاعات هرگز محو نمی‌شود، نه حتی وقتی توسط سیاهچاله بلعیده می‌شود. او گفت: "برخلاف آنچه انتظار می‌رود این اطلاعات در داخل سیاهچاله ذخیره نمی‌شود، بلکه در سرحد آن، یعنی همان افق رویداد، ذخیره می‌شود. این اطلاعات در افق رویداد به یک هولوگرام دو بعدی بدل می‌شود (پدیده‌ای که به ابربرگردان (super translation) موسوم است). هاوکینگ گفت: "ایده ما این است که ابربرگردان‌ها، هولوگرام ذرات وارد شونده هستند. بنابراین، شامل همه اطلاعاتی هستند که در غیر این صورت از میان خواهد رفت."^[66]

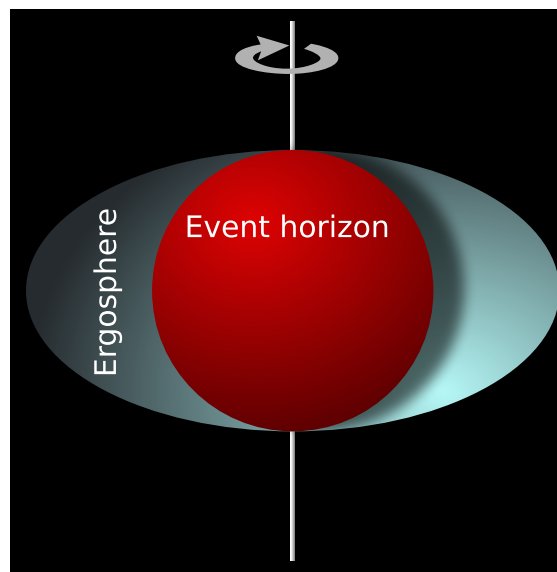
اما براساس نظریه نسبیت عام اینشتین، این اطلاعات باید نابود شود. این معما به پارادوکس اطلاعات معروف است. نظریه اینشتین می‌گوید که ماده به درون سیاهچاله بلعیده می‌شود، و در آن سوی افق رویداد می‌افتد. هولوگرام ظاهراً نشان می‌دهد که تصویر اینشتین از سیاهچاله درست نیست. به ویژه اینکه، اصلاً معلوم نیست که سیاهچاله‌ها دارای 'بخش درونی' باشند (ماده‌ای که مکیده می‌شود ممکن است در افق رویداد گیر کند و به عنوان هولوگرام آنجا حفظ شود).^[67]

طولانی‌تر کند اما سرانجام به نقطه تکینگی سقوط خواهد کرد.^[54] زمانی که به این نقطه برسد به چگالی بی‌نهایت برخورد می‌کند و جرم آن به جرم سیاهچاله افزوده می‌شود. البته پیش از این اتفاق در طی فرایندی که به اسپاگتی سازی و یا اثر نودلی معروف است، اجزای وی بر اثر نیروهای جزر و مدی در حال گسترش از هم گسیخته می‌شود.^[55]

در مورد یک سیاهچاله باردار (راه حل رایسنر-نوردستروم) و یا چرخان (راه حل کر) می‌توان از تکینگی اجتناب نمود. چنانچه این جواب‌ها را تا حد امکان گسترش دهیم امکان فرضی خروج از سیاهچاله به یک فضا-زمان متفاوت خود را نمایان می‌سازد. در این صورت سیاهچاله به صورت یک کرم‌چاله عمل می‌کند.^[56] اما فرضیه سفر به دنیاهای دیگر تنها به صورت فرضیه می‌ماند زیرا آشفتگی امکان آن را از بین می‌برد.^[57] همچنین این فرضیه مطرح می‌شود که منحنی‌های زمان گونه بسته را در اطراف تکینگی دنبال کرد و به گذشته خود فرد سفر کرد که در نهایت به طرح مشکلاتی در قانون علیت مانند پارادوکس پدربزرگ می‌انجامد.^[58]

پیدایش تکینگی هاگی در نسبیت عام را عموماً نشانه‌ای از شکست این نظریه می‌پندارند،^[59] اما این شکست بر خلاف انتظار نیست. این شکست در مواردی رخ می‌دهد که بخواهیم این کنش‌ها را با استفاده از تأثیرات مکانیک کوانتومی، ناشی از چگالی بسیار بالا و سرانجام تعامل ذرات توصیف کنیم. تا کنون این امر میسر نشده‌است که بتوانیم تأثیرات گرانشی و کوانتومی را در یک تئوری با هم ترکیب نمود. مورد انتظار عموم این است که یک تئوری گرانش کوانتومی خواهد توانست ویژگی سیاهچاله‌ها را بدون تکینگی بیان کند.^{[60][61]}

۴.۲.۴ کره فوتونی



ارگوسفر ناحیه‌ای به شکل کره بیضوی خارج از افق رویداد است که اجسام نمی‌توانند در آن ثابت بمانند.

کره فوتونی، محدوده‌ای کروی با ضخامت صفر است. فوتون‌هایی که در طول مسیر مماس (در امتداد تانژانت‌ها) بر این کره حرکت می‌کنند در مداری دایره‌ای گرد آن به دام می‌افتند. در سیاهچاله‌های غیرچرخشی شعاع فوتون کره یک و نیم برابر شعاع افق رویداد (شوارتزشیلد) است. این مدارها از نظر دینامیکی ناپایدار اند و به همین جهت هر آشفتگی کوچکی (مثل سقوط یک ذره مادی) در طول زمان گسترش می‌یابد و به صورت حرکت پرتابی به خارج سیاهچاله و یا به شکل حلزونی در نهایت از افق رویداد می‌گذرد.^[62]

در حالیکه نور هنوز می‌تواند از داخل کره فوتونی بگریزد، هر نوری که از کره فوتونی عبور کند در یک حرکت پرتابی به داخل سیاهچاله کشیده می‌شود؛

۳.۴ شکل گیری و تکامل

می‌توانند بذرهایی برای سیاهچاله‌های کلان جرمی بوده باشند که امروزه در مرکز بسیاری از کهکشان‌ها یافت می‌شوند.^[72]

در حالیکه بیشتر انرژی آزاد شده در خلال یک رمبش گرانشی به سرعت پخش می‌شود یک ناظر خارجی در واقع پایان این فرایند را نمی‌بیند. اگرچه این رمبش در چارچوب مرجع ماده در حال فروپاشی در زمان محدودی صورت می‌گیرد اما برای یک ناظر دور ماده در حال فروپاشی کندتر می‌شود و در بالای افق رویداد متوقف می‌شود. دلیل این پدیده اتساع زمان گرانشی است. برای نور بیشتر و بیشتر طول می‌کشد تا از ناه در حال رمبش به ناظر برسد؛ و نوری که درست قبل از تشکیل افق رویداد منتشر می‌شود با تأخیر بی‌نهایت به ناظر می‌رسد. از این رو ناظر خارجی هرگز تشکیل افق رویداد را نخواهد دید؛ در عوض ماده در حال رمبش تاریک تر. تاریک تر می‌شود و انتقال به سرخ رو به افزایشی خوانده داشت و سرانجام کاملاً محو می‌شود.^[73]

۲.۳.۴ سیاهچاله‌های نخستین در مهبانگ

رمبش گرانشی نیاز به چگالی بالا دارد. در دوره کنونی جهان، چگالی‌های بالا تنها در ستارگان یافت می‌شود. اما در جهان نخستین اندکی پس از مهبانگ چگالی‌ها بسیار بیشتر بودند، که احتمال تشکیل سیاهچاله را فراهم می‌نمود. چگالی بالا به تنهایی برای بوجود آمدن سیاهچاله کافی نیست زیرا یک توزیع جرم یکنواخت اجازه تجمع جرم را نمی‌دهد برای اینکه سیاهچاله‌های نخستین در چنین رسانه چگالی امکان پیدایش داشته باشند باید آشفتگی‌های اولیه‌ای در چگالی بوجود آمده باشند که بتوانند پس از آن تحت گرانش خودشان رشد کنند. مدل‌های مختلف از جهان اولیه، از لحاظ اندازه‌ای که برای این آشفتگی‌ها پیش بینی کرده‌اند با هم بسیار متفاوتند. این مدل‌های متفاوت جرم سیاهچاله‌های نخستین را از یک واحد پلانک تا صدها هزار جرم خورشیدی پیش بینی کرده‌اند.^[74] سیاهچاله‌های نخستین عامل پیدایش همه سیاهچاله‌های دیگر شمرده می‌شوند.

۳.۳.۴ برخورد‌های پرنرژری

رمبش گرانشی تنها فرایندی نیست که سیاهچاله را بوجود می‌آورد. در اصل سیاهچاله‌ها می‌توانند از برخورد‌های پرنرژری که چگالی کافی ایجاد می‌کنند نیز بوجود آیند؛ اما تا به امروز ردی از چنین رویدادی چه به صورت مستقیم و چه به صورت غیر مستقیم از روی کسری در موازنه جرم در آزمایش‌های شتاب دهنده ذرات، کشف نشده‌است.^[75] این واقعیت پیشنهاد می‌کند که باید حد پایینی برای جرم سیاهچاله‌ها وجود داشته باشد. از لحاظ نظری این حد باید پیرامون جرم پلانک باشد که در آن انتظار می‌رود که تأثیرات کوانتومی باعث شکست تئوری نسبیت عام بشوند.^[76] این امر سبب می‌شود که ایجاد سیاهچاله‌ها از دسترس هر برخورد پرنرژری که در روی زمین یا نزدیک به آن رخ می‌دهد، دور باشد. اما برخی از توسعه‌ها اخیر در گرانش کوانتومی پیشنهاد می‌دهند که جرم پلانک ممکن است بسیار کمتر از این باشد. مثلاً برخی از سناریوهای جهان غشایی مقداری بسیار کمتر برای این ثابت در نظر می‌گیرند.^[77] این امر امکان ایجاد ریزسیاهچاله‌ها را در برخورد‌های پرنرژری مانند برخورد اشعه‌های کیهانی با جو زمین و یا احتمالاً در برخورددهنده هادرونی بزرگ در سن را امکان‌پذیر می‌سازد. هر چند که این نظریه‌ها بسیار گمانی هستند و به نظر بسیاری از متخصصین تشکیل ریزسیاهچاله‌ها در چنین برخورد‌های نامحتمل می‌آید.^[78] حتی اگر ریز سیاهچاله‌ها در اثر این برخوردها تشکیل شوند انتظار می‌رود که در 10^{25} ثانیه تبخیر شوند و تهدیدی برای زمین به شمار نمی‌آیند.^[79]

۴.۳.۴ رشد

وقتی که یک سیاهچاله تشکیل شد می‌تواند با جذب ماده اضافی به رشد خود ادامه دهد. هر سیاهچاله‌ای به طور پیوسته گاز و غبار میان ستاره‌ای را از محیط مستقیم اطرافش و تابش زمینه کیهانی که در همه جا حضور دارد، جذب می‌کند. این فرایند اولیه‌ای است که به نظر می‌رسد

با در نظر گرفتن ماهیت عجیب سیاهچاله‌ها شاید طبیعی باشد، که این سؤال به ذهن خطور کند که آیا چنین اجسام عجیبی می‌توانند در طبیعت وجود داشته باشند، یا اینکه این اجسام تنها جواب‌های پاتولوژیکی برای معادلات انیشتین هستند. خود انیشتین به اشتباه گمان می‌کرد که سیاهچاله‌ها نمی‌توانند تشکیل شوند زیرا او بر این باور بود که تکانه زاویه‌ای ذرات در حال سقوط حرکت آنها را در شعاع خاصی پایدار می‌نمود.^[68] این باعث شد که جامعه نسبیت عام تا مدت‌ها نتایج مخالف را از دست بدهد. "Frontiers And Controversies In Astrophysics Transcript 9". Yale University. Retrieved April 26, 2011. هر چند که گروه کمتری از نسبیت پردازان همچنان بر این باور بودند که سیاهچاله‌ها اجسام فیزیکی واقعی هستند^[69] و این گروه تا پایان دهه ۱۹۶۰ اکثر پژوهشگران این زمینه را متقاعد کرده بودند که هیچ مانعی برای بوجود آمدن افق رویداد وجود ندارد.

زمانی که یک افق رویداد تشکیل می‌شود، پرنور ثابت نمود که یک تکینگی در نقطه‌ای درون آن بوجود می‌آید.^[70] مدت کوتاهی پس از وی هاوکینگ نشان داد که بسیاری از راه حل‌های کیهان شناسی که مهبانگ را توصیف می‌کنند نقاط تکینهای بدون میدان‌های اسکالر یا مواد عجیب دیگر دارند. راه حل کر، قضیه بدون مو و قوانین ترمودینامیک سیاهچاله‌ها نشان دادند که خواص فیزیکی سیاهچاله‌ها ساده و قابل فهم هستند و این اجسام موضوعات مناسبی برای پژوهش هستند. ابتدایی‌ترین فرایندی که انتظار می‌رود به تشکیل سیاهچاله‌ها بینجامد، رمبش گرانشی اجسام بسیار سنگین همچون ستاره هاست. البته فرایندهای عجیب تری نیز هستند که ممکن است به تولید سیاهچاله‌ها بینجامد.^[70]

۱.۳.۴ رمبش گرانشی

رمبش گرانشی زمانی رخ می‌دهد که فشار داخلی یک جسم برای مقاومت در برابر نیروی گرانشی خود جسم کافی نباشد. برای ستارگان این حادثه زمانی اتفاق می‌افتد که یا به دلیل کم شدن سوخت ستاره برای تولید انرژی از طریق سنتزهای هسته‌ای قادر به حفظ دمای خود نباشد و یا اینکه یک ستاره پایدار ماده اضافه‌ای دریافت کند به گونه‌ای که دمای هسته آن بالاتر نرود. در هردوی این موارد دمای ستاره به اندازه کافی زیاد نخواهد بود که از فروپاشی آن زیر وزن خودش جلوگیری کند (قانون گازهای ایده‌آل ارتباط بین فشار، دما و حجم را توضیح می‌دهد).^[71]

این رمبش ممکن است بر اثر فشار تباہیدگی اجزای تشکیل دهنده ستاره متوقف گردد و باعث فشرده شدن ماده به ماده‌ای که به اندازه شگفت‌انگیزی چگال تر است بشود. حاصل این اتفاق یکی از انواع ستارگان فشرده است که نوع ستاره فشرده به وجود آمده به جرم ماده باقی‌مانده بستگی دارد. ستاره در هنگام تغییرات نشات گرفته از رمبش گرانشی (مانند یک ابرنواختر و یا سحابی سیاره‌نما) بخش قابل توجهی از جرم خود را از لایه‌های خارجی به فضای اطراف پرتاب می‌کند. اگر جرم مواد باقی‌مانده ۵ جرم خورشیدی باشد جرم ستاره اولیه پیش از فروپاشی احتمالاً بیش از ۲۰ جرم خورشیدی بوده‌است.^[71]

اگر جرم مواد باقی‌مانده بیش از ۳ الی ۴ برابر جرم خورشید باشد (حد تولمن-اپنهایمر-ولکوف) - چه به دلیل سنگین بودن ستاره اصلی چه به دلیل اینکه ماده باقی‌مانده جرم اضافه‌ای را از طریق تجمع ماده گردآوری کرده باشد - حتی فشار تباہیدگی نوترون‌ها برای متوقف سازی فروپاشی کافی نخواهد بود. پس از این هیچ مکانیزم شناخته شده‌ای (شاید به جز تباہیدگی کوارکها در ستاره‌های کوارکی) قدرت کافی برای متوقف سازی فروپاشی را ندارد و جسم ناگزیر به یک سیاهچاله فروپاشیده می‌شود.^[71]

گمان می‌رود که این رمبش گرانشی ستارگان سنگین عامل پیدایش سیاهچاله‌های ستاره وار است. زایش ستارگان در جهان جوان احتمالاً به ایجاد ستارگانی بسیار سنگین انجامیده‌است که در هنگام رمبش سیاهچاله‌هایی تا هزار برابر جرم خورشید بوجود آورده‌اند. این سیاهچاله

$$r_{sh} = \frac{2GM}{c^2} \approx 2.95 \frac{M}{M_{sun}} \text{ km},$$

این رابطه تنها در مورد سیاه‌چاله‌هایی با تکانه زاویه‌ای و بار الکتریکی صفر دقیق خواهد بود و در مورد سیاه‌چاله‌های کلی تر به صورت تقریبی و با اختلافی تا حتی دو برابر در برخی موارد، صادق است

۱.۴.۴ سیاه‌چاله‌های کلان جرم

جرمی بین چندمیلیون تا چند میلیارد برابر جرم خورشید دارند و بیش‌بینی می‌شود که در مرکز همه کهکشان‌ها از جمله کهکشان راه شیری وجود داشته باشند.^{[91][90]}

کهکشان نزدیک زن برزنجیر در فاصله ۲٫۵ میلیون سال نوری سیاه‌چاله مرکزی به جرم $1.08 \times 10^6 (1.1 \times 10^6)$ جرم خورشیدی دارد که از سیاه‌چاله کهکشان راه شیری بزرگتر است.^[92] به نظر می‌رسد که بزرگترین سیاه‌چاله کلان جرم در نزدیکی راه شیری سیاه‌چاله مرکزی کهکشان مسیه ۸۷ است که جرمی برابر با $1.09 \times 10^6 (6.4 \times 10^5)$ جرم خورشیدی دارد که به فاصله ۵۳٫۵ میلیون سال نوری از ما قرار گرفته‌است.^{[94][93]} بزرگ‌ترین سیاه‌چاله شناخته شده تا تاریخ نوامبر ۲۰۰۸، سیاه‌چاله 287 OJ در صورت فلکی خرچنگ است که در فاصله ۳٫۵ میلیارد سال نوری واقع شده‌است و جرم آن ۱۸ میلیارد برابر جرم خورشید است.^[95]

۲.۴.۴ سیاه‌چاله‌های جرم متوسط

شکاف بین جرم سیاه‌چاله‌های معمولی و سیاه‌چاله‌های کلان جرم، اخترشناسان را بر آن داشت که به جستجوی سیاه‌چاله‌هایی با جرم صد تا صد هزار برابر جرم خورشید بپردازند. یکی از روش‌های مشاهده این گونه سیاه‌چاله‌ها یافتن منابع اشعه با شدت زیاد است. منابع فوق درخشان پرتو ایکس در کهکشان‌های نزدیک ممکن است سیاه‌چاله جرم متوسط باشند.^{[96][97]} این منابع فوق درخشان پرتو ایکس در نواحی شکل‌گیری ستاره‌ها (مانند مسیه ۸۲) مشاهده شده‌است و به نظر می‌رسد که با خوشه‌های ستاره‌ای جوانی که در آن نواحی یافت می‌شوند مرتبط اند. روش دیگر تشخیص آنها ممکن است مشاهده تابش گرانشی منتشر شده از جسم فشرده باقی‌مانده‌ای است که به دور سیاه‌چاله جرم متوسط می‌گردد.^[98] رابطه‌ام-سیگما نیز وجود سیاه‌چاله‌هایی به اندازه 10^4 تا 10^6 جرم خورشیدی را در کهکشان‌های کم نور پیش‌بینی می‌کند. هیچ راه مستقیمی برای شکل‌گیری آنان شناخته نشده‌است اما گمان می‌رود این نوع از برخورد سیاه‌چاله‌های با جرم کمتر شکل می‌گیرد. نظریه دیگری نیز آنها را سیاه‌چاله‌های نخستینی می‌داند که در مه بانگ شکل گرفته‌اند. نظریه سومی نیز آنها را حاصل از برخورد ستارگان بزرگ در خوشه‌های ستاره‌ای متراکم می‌داند که حاصل این برخورد به یک سیاه‌چاله میان جرم رمبش می‌کند

۳.۴.۴ سیاه‌چاله‌های ستاره‌وار

این سیاه‌چاله‌ها از رمبش گرانشی ستاره‌های بزرگ بوجود می‌آیند.^[99] این سیاه‌چاله‌ها جرمی بین سه تا چند ده برابر جرم خورشید دارند.^[100] بهترین نامزدهای احتمالی برای این دسته از سیاه‌چاله‌ها، منظومه‌های دوتایی گسیل‌کننده اشعه X هستند که در اوایل دهه هفتاد مورد توجه قرار گرفتند. یکی از دو جسم در این منظومه‌ها قابل مشاهده نیست که نامزد سیاه‌چاله بودن است. ماده از ستاره ندیم به سیاه‌چاله می‌ریزد و پرتو ایکس تابش می‌کند.^{[101][102][103]}

نمونه‌ای از این منظومه‌های دو تایی، ماکیان ایکس یک (Cygnus X-1) است که از یک ستاره ابرغول آبی با جرمی در حدود بیست برابر جرم خورشید و یک ندیم نامرئی با جرم تقریبی چهل برابر جرم خورشید است. در این سیستم دوتایی، جرم از ستاره قابل رویت دوتایی به درون سیاه‌چاله وارد می‌شود ولی به دلیل سرعت زاویه‌ای، این جرم به صورت شعاعی وارد

سیاه‌چاله‌های کلان جرم طی آن شکل می‌گیرند.^[72] فرایندی مشابه نیز برای تشکیل سیاه‌چاله‌های جرم متوسط در خوشه‌های ستاره‌ای کروی پیشنهاد شده‌است.^[80]

امکان دیگر برای رشد یک سیاه‌چاله آمیختن با اجرام دیگر مانند ستارگان یا سایر سیاه‌چاله‌هاست. این نظریه به خصوص برای سیاه‌چاله‌های کلان جرم نخستین که منشأ پیدایش بسیاری از اجسام کوچکتر بوده‌اند اهمیت پیدا می‌کند.^[72] این فرایند همچنین به عنوان مبدأ پیدایش برخی از سیاه‌چاله‌های با جرم متوسط پیشنهاد شده‌است.^{[81][82]}

۵.۳.۴ تبخیر

نوشتار اصلی: تابش هاوکینگ

در سال ۱۹۷۴ هاوکینگ نشان داد که سیاه‌چاله‌ها کاملاً سیاه نیستند بلکه مقادیر اندکی تابش گرمایی دارند.^[83] او این نتیجه را از بکارگیری نظریه میدان‌های کوانتومی در یک زمینه سیاه‌چاله‌ای ایستا به دست آورد. نتیجه این محاسبات این بود که سیاه‌چاله‌ها باید ذراتی را در جسم سیاه کامل منتشر کنند. این اثر به نام تابش هاوکینگ نامیده شده‌است. از زمانی که هاوکینگ این نتایج را منتشر نمود بسیاری درستی این نظریه را از روشهای مختلف سنجیده‌اند.^[84] چنانچه این نظریه تابش سیاه‌چاله‌ها درست باشد انتظار می‌رود که سیاه‌چاله‌ها یک طیف گرمایی ساطع کنند که منجر به کاهش جرم آنها می‌شود. این کاهش جرم مربوط به جرم فوتون‌ها و ذراتی است که تابیده می‌شوند. سیاه‌چاله‌ها در طول زمان تبخیر می‌شوند و کوچکتر می‌گردند. دمای این طیف (دمای هاوکینگ) با گرانش سطحی یک سیاه‌چاله مرتبط است که در مورد سیاه‌چاله‌های شوارتزشیلد نسبت معکوسی با جرم دارند و در نتیجه سیاه‌چاله‌های بزرگتر تابش کمتری از سیاه‌چاله‌های کوچکتر دارند.^[85]

یک سیاه‌چاله ستاره‌وار با جرمی برابر یک جرم خورشیدی، دمای هاوکینگی در حدود ۱۰۰ نانو کلوین دارد. "Frontiers And Controversies In Astrophysics Transcript 9". Yale University. Retrieved April 26, 2011. این دما بسیار کمتر از دمای ۲٫۷ کلوینی تابش زمینه کیهانی است. سیاه‌چاله‌های ستاره‌ای و سیاه‌چاله‌های بزرگتر از آنها بیش از آنکه از طریق تابش هاوکینگ جرم از دست بدهند، از تابش زمینه کیهانی جرم به دست می‌آورند. در نتیجه به جای کوچکتر شدن رشد می‌کنند. برای اینکه یک سیاه‌چاله بتواند تبخیر شود باید دمای تابش هاوکینگ آن بیشتر از ۲٫۷ کلوین باشد و این بدان معنی است که می‌بایست از ماه سبکتر باشد و نتیجتاً قطری کمتر از یک دهم میلیمتر داشته باشد.^[86]

از سوی دیگر اگر سیاه‌چاله‌ای کوچک باشد انتظار می‌رود که تابش آن بسیار قویتر باشد. حتی سیاه‌چاله‌ای که نسبت به انسان سنگین محسوب شود باید در یک دم تبخیر شود. یک سیاه‌چاله با وزن یک ماشین باید در مدت چند نانوثانیه تبخیر شود و طی این مدت اندک درخششی به اندازه ۲۰۰ برابر خورشید خواهد داشت. سیاه‌چاله‌های کوچکتر حتی با سرعت بیشتری تبخیر می‌شوند. البته برای چنین سیاه‌چاله کوچکی اثرات گرانش کوانتومی نقش مهمی ایفا می‌کنند و ممکن است (هرچند که از دانسته‌های فعلی در مورد گرانش کوانتومی چنین امری محتمل به نظر نمی‌رسد)^[87] به صورت فرضی چنین سیاه‌چاله کوچکی را پایدار سازند.^[88]

۴.۴ طبقه‌بندی بر اساس جرم

سیاه‌چاله‌ها را عموماً بر مبنای جرمشان و مستقل از بار و تکانه زاویه‌ای دسته‌بندی می‌کنند. براین اساس سیاه‌چاله‌ها را می‌توان به چهار دسته تقسیم نمود. اندازه یک سیاه‌چاله که با شعاع افق رویداد (شعاع شوارتزشیلد) آن سنجیده می‌شود با جرم آن برپایه رابطه زیر به طور تقریبی متناسب است.^[89]

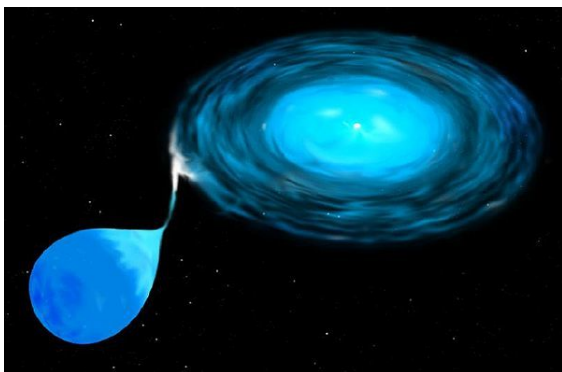
ایجاد می‌کنند. اصطکاک درون قرص سبب می‌شود تا تکانه زاویه‌ای به سوی بیرون منتقل شود و ماده بیشتر به سمت داخل سقوط می‌کند و انرژی پتانسیلی آزاد می‌کند که دمای گاز را افزایش می‌دهد.^[108] در مورد اجرام فشرده همچون کوتوله‌های سفید، ستاره‌های نوترونی و سیاهچاله‌ها، گاز در نواحی داخلی به اندازه‌ای داغ می‌شود که تابش بسیاری (عمدتاً پرتو ایکس) از خود گسیل می‌کند که توسط تلسکوپ‌ها قابل ردیابی است. این فرایند برافزایش یکی از کاراترین فرایندهای تولید انرژی است که تاکنون شناخته شده‌است. تا ۴۰٪ باقی‌مانده ماده برافزوده ممکن است از طریق تابش منتشر شود^[108] (در یک همجوشی هسته‌ای تنها ۷٪ از باقی جرم به صورت انرژی منتشر می‌شود). در بسیاری از موارد این قرص با فواره‌های نسبیتی همراه است که در امتداد قطب‌ها منتشر می‌شوند و انرژی بسیاری در خود دارند. مکانیزم تشکیل این فواره‌ها هنوز به درستی فهمیده نشده‌است.

بسیاری از پدیده‌های پراثری تر در جهان به برافزایش ماده در سیاهچاله‌ها نسبت داده می‌شود. به طور خاص، هسته کهکشانی فعال و اختروش‌ها گمان می‌شود که قرص‌های برافزایشی سیاهچاله‌های کلان جرم باشند. به همین ترتیب گمان می‌رود که دوتایی‌های پرتو ایکس منظومه‌های دوتایی هستند که یکی از این دو ستاره جسمی فشرده‌است که ماده را از ستاره ندیم برافزایش می‌کند. همچنین پیشنهاد شده‌است که برخی از منابع فوق درخشان پرتو ایکس ممکن است قرص‌های برافزایشی سیاهچاله‌های جرم متوسط باشند.^[109]

۲.۵.۴ دوتایی‌های پرتو ایکس

نوشتار اصلی: دوتایی پرتو ایکس

دوتایی‌های پرتو ایکس یا ستاره‌های دوتایی که در قسمت پرتو ایکس طیف، روشن هستند. این تابش‌های پرتو ایکس گمان می‌رود که توسط یکی از ستاره‌ها ایجاد می‌شود که جسمی فشرده‌است و ماده را از ستاره معمولی همراهش برافزایش می‌کند. حضور یک ستاره معمولی در این منظومه‌های دوتایی موقعیتی منحصره‌فرد برای مطالعه جسم دیگر و بررسی سیاهچاله بودن آن در اختیار می‌گذارد.



برداشتی هنری از یک منظومه دوتایی با یک قرص برافزایشی که از ماده ستاره ندیم تغذیه می‌شود.

اگر چنین منظومه‌ای سیگنال‌هایی منتشر کند که رد آن مستقیماً به جسم فشرده برسد، این جسم نمی‌تواند سیاهچاله باشد؛ هرچند که نبودن این سیگنال نیز احتمال ستاره نوترونی بودن جسم فشرده را از بین نمی‌برد. با مطالعه ستاره ندیم (همراه) اغلب می‌توان پارامترهای مداری منظومه را بدست آورده و تخمینی برای جرم جسم فشرده ارائه کرد. اگر این جرم به میزان قابل توجهی از حد تولمن-اوپنهاইمر-وولکوف (که در واقع بیشینه جرم ممکن برای یک ستاره نوترونی پیش از رمیش است) بیشتر باشد، دیگر این جسم نمی‌تواند ستاره نوترونی باشد و پندار عمومی بر سیاهچاله بودن آن است.^[99]

سیاهچاله نشده بلکه گازها تشکیل یک دیسک داده که قرص برافزایشی نامیده می‌شود.

۴.۴.۴ ریزسیاهچاله‌ها

این سیاهچاله‌ها سیاهچاله‌های بسیار کوچکی هستند. جرم این سیاهچاله‌ها به اندازه‌ای کوچک است که در آنها اثرات مکانیک کوانتومی اهمیت زیادی پیدا می‌کند و از این رو به نام سیاهچاله‌های مکانیم کوانتومی نیز شناخته می‌شوند.^[104] محاسبات هاوکینگ نشان می‌دهد که هرچه سیاهچاله کوچکتر باشد سرعت تبخیر آن بیشتر است و در نتیجه ریزسیاهچاله‌ها در صورت وجود آمدن احتمالاً در لحظه‌ای تبخیر شده و منفجر می‌گردند.^[105]

۵.۴ شواهد تجربی

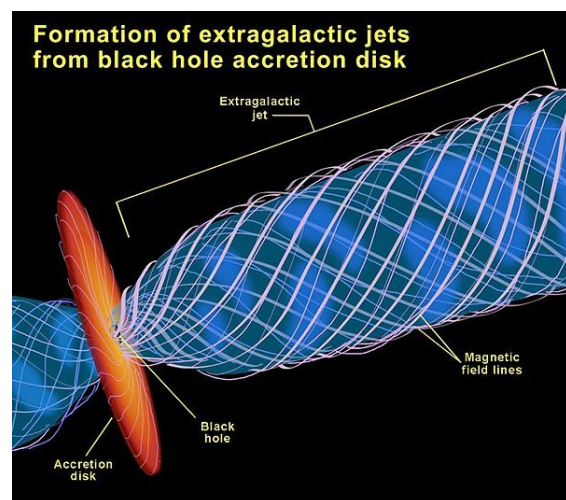
سیاهچاله‌ها به خودی خود هیچ سیگنالی به جز تابش فرضی هاوکینگ از خود منتشر نمی‌کنند و از آنجاییکه این تابش در مورد یک سیاهچاله اختر فیزیکی بسیار ضعیف است هیچ راهی وجود ندارد که بتوان مستقیماً از روی زمین سیاهچاله‌های اختر فیزیکی را ردیابی نمود. تنها استثنایی که ممکن است تابش هاوکینگ ضعیفی نداشته باشد، آخرین مرحله تبخیر سیاهچاله‌های کم جرم نخستین است. جستجو برای یافتن چنین تابش‌هایی در گذشته ناموفق بوده‌است و این موضوع محدودیت‌هایی بر امکان وجود سیاهچاله‌های نخستین با جرم کم وارد می‌کند.^[106] تلسکوپ فضایی پرتوی گامای فرمی ناسا که در سال ۲۰۰۸ به فضا فرستاده شد به جستجو برای وجود این نشانه‌ها ادامه خواهد داد.^[107]

از این رو اختر فیزیکدانان برای جستجوی سیاهچاله‌ها باید به مشاهدات غیر مستقیم روی آورند. وجود یک سیاهچاله را گاهی می‌توان از برهمکنش‌های گرانشی آن با محیط اطرافش استنباط نمود.

۱.۵.۴ برافزایش ماده

نوشتار اصلی: قرص برافزایشی

قرص برافزایشی بسیار داغ و چرخان پیرامون یک سیاهچاله که متشکل



شکل گیری جتهای برون کهکشانی درقرص برافزایشی یک سیاهچاله

از مواد در حال سقوط به درون می‌باشد، آشکارترین نشانه برای شناسایی سیاهچاله‌ها است. به خاطر حفظ تکانه زاویه‌ای گازهایی که به چاه گرانشی یک جسم پر جرم سقوط می‌کنند ساختاری قرص مانند در اطراف جسم

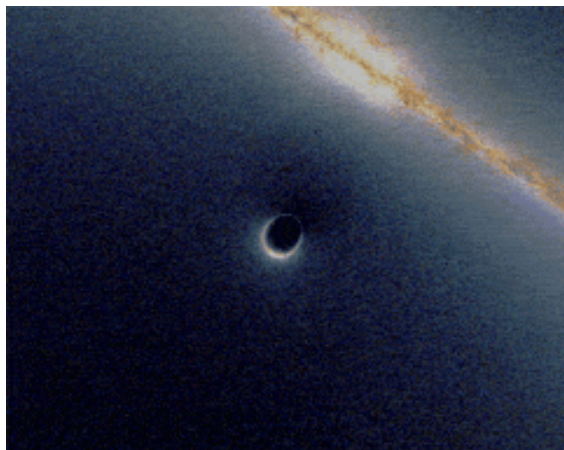
کهکشانی فعال حضور داشته باشند؛ اما تنها برخی از هسته‌های کهکشانی مورد مطالعه دقیق برای شناسایی و اندازه‌گیری جرم واقعی این نامزدهای سیاهچاله کلان جرم، قرار گرفته‌اند. برخی از مهمترین کهکشان‌ها با نامزدهایی برای سیاهچاله کلان جرم عبارتند از: کهکشان زن برزنجیر، مسیه ۳۲، مسیه ۸۷، ان‌جی‌سی ۳۱۱۵، ان‌جی‌سی ۳۳۷۷، ان‌جی‌سی ۴۲۵۸ و کهکشان کلاه‌مکزیک.^[117]

امروزه به گستردگی پذیرفته شده‌است که در مرکز همه (تقریباً) کهکشان‌ها (نه تنها کهکشان‌های فعال) یک سیاهچاله کلان جرم قرار گرفته‌است.^[90] همبستگی تجربی نزدیک بین جرم این چاله و پراکندگی سرعت در بخش برآمده خود کهکشان که به رابطه‌ام-سیگما (M-Sigma) معروف است، قویا پیشنهاد می‌کند که ارتباطی بین شکل گیری سیاهچاله و شکل گیری خود کهکشان وجود دارد.^[118]

در حال حاضر بهترین گواه برای یک سیاهچاله کلان جرم از مطالعه حرکات خاص ستارگان در نزدیکی مرکز کهکشان راه شیری خودمان به دست می‌آید.^[119] از سال ۱۹۹۵ اخترشناسان حرکت ۹۰ ستاره را در ناحیه‌ای به نام کمان ای* ردیابی نموده‌اند. با تطبیق حرکت این ستارگان بر مدارهای کپلری در سال ۱۹۹۸ به این نتیجه رسیدند که باید جرمی برابر ۲٫۶ میلیون جرم خورشیدی در حجمی به شعاع ۰٫۲ سال نوری قرار گرفته باشند.^[120] از آن زمان تا کنون یکی از این ستارگان - به نام اس-۲ - یک مدار کامل را پیموده‌است. آنها موفق شدند از روی داده‌های مداری، محدودیت‌های مناسبتری برای جرم و اندازه این شی- که باعث حرکت مداری ستارگان ناحیه کمان ای* می‌شود- وضع کنند. آنها دریافتند که یک جرم کروی برابر ۴٫۳ میلیون جرم خورشیدی در ناحیه‌ای به شعاع ۰٫۰۲ سال نوری قرار گرفته‌است.^[119] اگرچه این شعاع تقریباً ۳۰۰۰ برابر شعاع شوارتزشیلد متناظر با این جرم است، اما دست کم با این حقیقت که جسم مرکزی یک سیاهچاله کلان جرم باشد سازگار است.^[120]

۵.۵.۴ همگرایی گرانشی

نوشتار اصلی: همگرایی گرانشی
تغییر شکل فضا زمان در اطراف یک جسم سنگین سبب می‌شود که پروهای



شبه‌سازی همگرایی گرانشی توسط یک سیاهچاله که سبب کج‌نمایی (اعوجاج) تصویر کهکشان پس زمینه شده‌است.

نور شبیه به آنچه که در یک عدسی نوری رخ می‌دهد، همگرا شوند. این پدیده به نام همگرایی گرانشی خوانده می‌شود. مشاهداتی از یک همگرایی گرانشی بسیار ضعیف صورت گرفته‌است که فوتونها را تنها به اندازه چند ثانیه قوسی خم می‌کند. هرچند که این پدیده هرگز مستقیماً برای یک سیاهچاله مشاهده نشده‌است.^[121] یک راه ممکن برای مشاهده همگرایی گرانشی توسط یک سیاهچاله می‌تواند مشاهده ستاره‌ها در مدار پیرامون سیاهچاله باشد. چندین نامزد مختلف برای چنین مشاهداتی در ناحیه کمان-

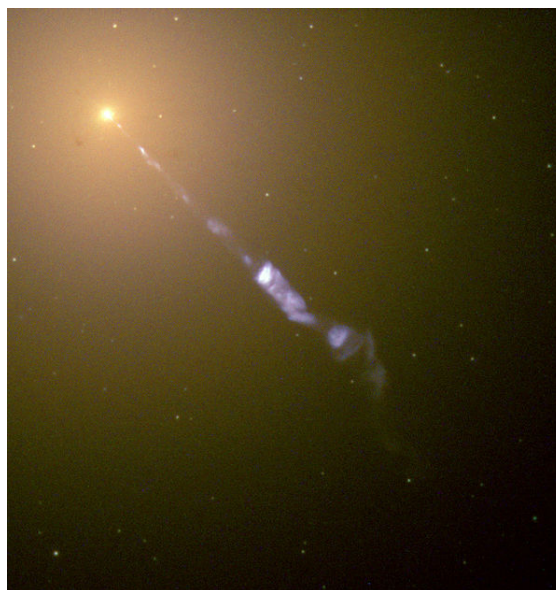
ماکیان ایکس-یک، اولین نامزد قوی برای سیاهچاله بودن، در سال ۱۹۷۲ به همین روش توسط چارلز توماس بولتون، لوییس وبستر و پل مردین کشف شد.^{[110][111][112][113]} هرچند که تردیدهایی در مورد سیاهچاله بودن آن وجود دارد زیرا ستاره ندیم از ستاره‌ای که نامزد سیاهچاله بودن است بسیار سنگین تر است.^[99] اکنون نامزدهای بهتری برای سیاهچاله بودن در رده دوتایی‌های پرتو ایکس شناخته شده‌اند که متغیرهای پرتو ایکس نرم نامیده می‌شوند.^[99] در این منظومه‌ها ستاره ندیم نسبتاً کم جرم است و اجازه تخمین دقیقتری برای جرم سیاهچاله می‌دهد. افزون بر این، این منظومه‌ها تنها چند ماه در هر ۱۰ تا ۵۰ سال منبع فعال پرتو ایکس هستند. در طول دوره تابش کم پرتو ایکس (دوره خاموشی)، قرص برافزایشی کم نور است و امکان مشاهده جزئیات ستاره ندیم در این دوره را فراهم می‌سازد. یکی از بهترین این دسته از نامزدها سیگنی وی-۴۰۴ (V404 Cygni) است.

۳.۵.۴ نوسان‌های نیمه متناوب

انتشار پرتو ایکس از قرص‌های برافزایشی در بسامدهای مشخصی دچار سوسو زدن می‌شود. این سیگنال‌ها را نوسان‌های نیمه متناوب می‌نامند. گمان می‌رود که این سیگنال‌ها ناشی از حرکت ماده در لبه داخلی قرص برافزایشی باشند (درونی‌ترین مدار دایره‌ای پایدار) و به همین دلیل با جرم جسم فشرده مرتبط اند. از این رو گاهی به عنوان راه جایگزینی برای تعیین جرم سیاهچاله‌های احتمالی به کار می‌روند.^[114]

۴.۵.۴ هسته کهکشانی

نوشتار (های) وابسته: هسته کهکشانی فعال
اخترشناسان برای توصیف کهکشان‌هایی که ویژگی‌های غیرمعمولی مانند



فواره‌های برآمده از مرکز مسیه ۸۷ در این تصویر نشات گرفته از یک هسته کهکشانی فعال است که ممکن است در برگیرنده یک سیاهچاله کلان جرم باشد. منبع: تلسکوپ فضایی هابل/ناسا/سازمان فضایی اروپا.

خط طیفی غیرمعمولی و یا تابش‌های رادیوی بسیار قوی دارند، از واژه کهکشان فعال استفاده می‌کنند. مطالعات نظری و تجربی نشان داده‌اند که فعالیت این هسته‌های کهکشانی فعال (AGN) را می‌توان با استفاده از سیاهچاله‌های کلان جرم توضیح داد. این گونه مدل‌های هسته‌های کهکشانی فعال از یک سیاهچاله کلان جرم، یک قرص برافزایشی و دو فواره عمود بر قرص برافزایشی تشکیل می‌شوند.^{[115][116]}

اگرچه انتظار می‌رود که سیاهچاله‌های کلان جرم در مرکز همه هسته‌های

۱.۶.۴ آنتروپی و ترمودینامیک

ای وجود دارند.^[121]

نوشتار اصلی: آنتروپی سیاهچاله

در سال ۱۹۷۱ هاوکینگ نشان داد که در شرایط عمومی^[3] مساحت

$$S = \frac{\pi A k c^3}{2 h G}$$

فرمول آنتروپی (S) هاوکینگ-بکنشتین برای سیاهچاله، که به مساحت (A) سیاهچاله بستگی دارد. ثابت‌ها عبارتند از سرعت نور (c), the ثابت بولتزمن (k), ثابت نیوتن (G), و ثابت پلانک (h).

کل افق‌های رویداد هر مجموعه‌ای از سیاهچاله‌ها هرگز نمی‌تواند کاهش یابد حتی اگر با یکدیگر برخورد و در هم ادغام شوند.^[128] این نتیجه که امروزه به عنوان قانون دوم مکانیک سیاهچاله‌ها شناخته می‌شود شباهت قابل توجهی با قانون دوم ترمودینامیک دارد که بیان می‌کند که آنتروپی کل سیستم هرگز کاهش نمی‌یابد. تصور می‌شد که سیاهچاله‌ها هم همچون اجسام کلاسیکی که در دمای صفر مطلق هستند، آنتروپی صفر دارند. پذیرش این تصور سبب نقض قانون دوم ترمودینامیک می‌شود زیرا با ورود ماده دارای آنتروپی به سیاهچاله بدون آنتروپی، آنتروپی کل در جهان به اندازه آنتروپی ماده‌ای که جذب سیاهچاله شده کاهش می‌یابد. از این رو بکنشتین پیشنهاد داد که یک سیاهچاله باید آنتروپی داشته باشد و آنتروپی آن با مساحت افق رویدادش متناسب است.^[129]

پیوند با قوانین ترمودینامیک وقتی قویتر شد که هاوکینگ کشف کرد که طبق نظریه میدان‌های کوانتومی یک سیاهچاله باید تابش جسم سیاه در دمای ثابت را گسیل کند. به نظر می‌رسد که این به معنای نقض قانون دوم مکانیک سیاهچاله‌ها باشد زیرا این تابش انرژی را از سیاهچاله می‌گیرد و باعث انقباض آن می‌شود. هرچند که این تابش مقداری از آنتروپی را نیز به بیرون منتقل می‌کند و زیر شرایط کلی می‌توان اثبات نمود که مجموع آنتروپی ماده‌ای که سیاهچاله و یک چارم افق رویداد آن را فرارگرفته‌است دائماً رو به افزایش است. این موضوع اجازه فرمولبندی قانون اول مکانیک سیاهچاله‌ها را می‌دهد که همسنگ قانون اول ترمودینامیک است با این تفاوت که به جای انرژی، جرم به جای دما، گرانش سطحی و به جای آنتروپی، مساحت قرار می‌گیرد.^[129]

یکی از ویژگی‌های گیج کننده این است که آنتروپی یک سیاهچاله با مساحت آن تغییر می‌کند تا حجم آن، حال آنکه آنتروپی کمیته وابسته به حجم است که به صورت خطی با تغییر حجم تغییر می‌کند. این ویژگی عجیب، جرارد توفت و لئونارد ساسکیند را بر آن داشت تا اصل هولوگرافیک را ارائه دهند که پیشنهاد می‌کند که هر چیزی که درون حجمی از فضا-زمان رخ می‌دهد را می‌توان با داده‌های روی مرز آن حجم توصیف نمود.^[130]

اگرچه می‌توان از نسبیت عام برای محاسباتی نیمه کلاسیک آنتروپی سیاهچاله‌ها استفاده نمود، اما این شرایط از لحاظ نظری رضایت بخش نیست. در مکانیک آماری آنتروپی عبارت است از شمار پیکربندهای میکروسکوپی یک سیستم که خواص میکروسکوپی یکسانی (مانند جرم، بار، دما و...) دارند. بدون یک نظریه قابل قبول برای گرانش کوانتومی انجام چنین محاسباتی برای سیاهچاله‌ها امکانپذیر نیست. پیشرفت‌هایی در برخی دیدگاه‌ها نسبت به گرانش کوانتومی صورت گرفته‌است. در سال ۱۹۹۵ اندرو اشترومینگر و کامران وفا نشان دادند که با شمارش تعداد حالات کوانتومی یک سیاهچاله ابرمتقارن در نظریه ریسمن می‌توان فرمول آنتروپی هاوکینگ-بکنشتین را دوباره به دست آورد.^[131] از آن زمان تاکنون

۶.۵.۴ امواج گرانشی

یکی از راه‌های کشف سیاهچاله‌ها استفاده از امواج گرانشی است که هنگام فروپاشی گسیل می‌دارند. هر جرم اختری از دید شکل نامتقارن تشعشع ممکن است یک منبع قابل اکتشاف مشخص به وجود آورد. جوزف وبر از دانشگاه مرلند، پیشکسوت رشته تشعشع گرانشی، رویدادهای زیادی را کشف کرده‌است که نمایانگر ویرانی وسیع ماده در جهان، از راه فروپاشی گرانشی است. کارافزار او عبارت است از آنتن‌های آلومینیومی، ابزاری که به‌وسیله سیم‌هایی در داخل اتاق‌های حفاظ‌داری آویزانند. این کارافزار او قادر به کشف سیاهچاله‌است، اما این کار را نمی‌تواند به دقت انجام دهد.^[122]

۷.۵.۴ امکان‌های دیگر

شاهد تجربی سیاهچاله‌های ستاره‌ای بر این قانون استوار است که حد بالایی برای جرم یک ستاره نوترونی وجود دارد. اندازه این حد نیز به میزان زیادی به فرضیاتی که در مورد خواص یک ماده چگال در نظر گرفته شده‌اند بستگی دارد. فازهای جدید و عجیب ماده ممکن است این حد را بالاتر ببرند.^[99] فازی از ماده که دارای کوارک‌های آزاد یا چگالی بالا ممکن است اجازه وجود ستاره‌های کوارکی چگال را بدهد.^[123] و برخی مدل‌های ابرتقارنی نیز وجود ستارگان کیو را پیش بینی می‌کنند.^[124] برخی از گسترش‌های مدل استاندارد ادعای وجود ذراتی به نام پرتون را دارند که از اجزای بنیادی سازنده کوارک‌ها و لپتون‌ها هستند که به طور فرضی ممکن است تشکیل ستاره‌های پرتونی را بدهند.^[125] این مدل‌های فرضی پتانسیل آن را دارند که گروهی از مشاهدات مربوط به نامزدهای سیاهچاله‌های ستاره‌ای را توضیح دهند، هر چند که گفتگوهای همگانی نسبت عام نشان می‌دهد که هر گونه‌ای از این ستاره‌های فرضی نیز جرم بیشینه‌ای خواهند داشت.^[99]

از آنجا که چگالی متوسط یک سیاهچاله در درون شعاع شوارتزشیلدش با مربع جرم آن نسبت معکوس دارد. چگالی سیاهچاله‌های کلان جرم بسیار کمتر از چگالی سیاهچاله‌های ستاره‌ای است (چگالی متوسط سیاهچاله‌ای به جرم 10^8 جرم خورشیدی با چگالی آب قابل مقایسه‌است). پس از این فیزیک ماده تشکیل دهنده یک سیاهچاله کلان جرم بسیار بهتر فهمیده شده‌است و گاهی از مدل‌های جایگزینی برای توضیح مشاهدات مربوط به سیاهچاله‌های کلان جرم استفاده می‌شود که دنیوی تر هستند. برای نمونه می‌توان یک سیاهچاله کلان جرم را به عنوان دسته‌ای از اجسام بسیار تاریک در نظر گرفت هرچند که این گونه مدل‌های توضیحی جایگزینی به اندازه کافی استوار نیستند که بتوانند نامزدهای سیاهچاله‌های کلان جرم را توضیح دهند.^[99]

شواهد موجود در مورد سیاهچاله‌های ستاره‌ای و کلان جرم نشانگر آن هستند که برای اینکه سیاهچاله‌ها تشکیل نشوند، باید تئوری نسبیت عام به عنوان یک تئوری گرانش شکست بخورد. شاید این شکست در مقابل هجوم اصلاحات مکانیک کوانتومی باشد. یکی از ویژگی‌های پیش بینی شده در مورد یک تئوری گرانش کوانتومی این است که نقطه تکینگی نخواهد داشت (و در نتیجه سیاهچاله‌ای وجود نخواهد داشت).^[126] در سال‌های اخیر مدل فائبال در نظریه ریسمن بیشترین توجه را به خود جلب نموده‌است. برپایه محاسبات انجام شده در شرایط بخصوص در نظریه ریسمن این گونه پیشنهاد می‌شود که وضعیت‌های منفرد یک سیاهچاله، افق رویداد یا تکینگی ندارند اما برای یک ناظر کلاسیک/نیمه کلاسیک، میانگین آماری این وضعیت‌های منفرد همچون سیاهچاله‌ای معمولی در نسبیت عام به نظر می‌رسد.^[127]

۶.۴ پرسش‌های باز

۱۰.۴ پانویس

[1] [41] مجموعه مسیرهای ممکن یا به عبارت دقیقتر قیف نور آینده که شامل همه خط‌های جهانی ممکن (در این نمودار با شبکه‌های زرد-آبی نمایش داده شده‌اند)، بدین شکل در مختصات ادینگتون-فینکلشتین خم می‌شوند (نمودار یک نسخه کارتونی از نمودار مختصات فینکلشتین-ادینگتون است). اما در سایر مختصات قیف‌های نوری بدین شکل خم نمی‌شوند. مثلاً در مختصات شوارزشیلد چنانچه به افق رویداد نزدیک شویم، نازک می‌شوند اما خم نمی‌گردند، و در مختصات کروسکال-سزکرس قیف‌های نوری شکل یا جهت گیریشان را تغییر نمی‌دهند.

[2] این تنها در مورد فضاهای چهار بعدی صادق است. در ابعاد بالاتر امکان توپولوژی‌های پیچیده تری مانند حلقه سیاه پدید می‌آید. [49][48]

[3] به طور خاص او در نظر گرفت که شرط انرژی ضعیف برای تمام مواد صادق است

۱۱.۴ منابع

[1] Robert M., Wald. "Black Holes". In *General Relativity*. The University of Chicago Press, 1984. ISBN 0226870332. Retrieved 09 Nov 2011.

[2] Davies, P. C. W.. "Thermodynamics of Black Holes". *Reports on Progress in Physics* (IOP Publishing) 41, no. 8 (1978): 1355–1313. Bibcode: 1978RPPH...41.1313D.

[3] Schutz, Bernard. *Gravity from the Ground Up: An Introductory Guide to Gravity and General Relativity*. Cambridge University Press, 2003-12-04. ISBN 9780521455060.

[4] Eisenstaedt, "The Early Interpretation of the Schwarzschild Solution," in D. Howard and J. Stachel (eds), *Einstein and the History of General Relativity: Einstein Studies*, Vol. 1, pp. 213-234. Boston: Birkhauser, 1989.

[5] Letter from K Schwarzschild to A Einstein dated 22 December 1915, in "The Collected Papers of Albert Einstein", vol.8a, doc. #169, (Transcript of Schwarzschild's letter to Einstein of 22 Dec. 1915).

[6] «What is a black hole?» بازبینی شده در ۲۰۱۱۰۹۰۹.

[7] «supermassive black holes» انگلیسی. www.nasa.gov. بازبینی شده در ۱۶ نوامبر ۲۰۱۱.

[8] «How Big Are Black Holes?» بازبینی شده در ۲۰۱۱۰۹۰۹.

[9] Paul Sukys. Rowman & Littlefield. *Lifting the scientific veil: science appreciation for the nonscientist*. 1999. 227. ISBN 0-8476-9600-6.

[10] "John Wheeler: 1911-2008 - physicsworld.com". Apr 14, 2008. Retrieved Dec 12, 2011.

[11] Michell, J. «On the Means of Discovering the Distance, Magnitude, &c. of the Fixed Stars, in Consequence of the Diminution of the Velocity of Their Light, in Case Such a Diminution Should be Found to Take Place in any of Them, and Such Other Data Should be Procured from Observations, as Would be Farther Necessary for That Purpose». *Philosophical Transactions of the Royal Society*. 74. Bibcode: ۱۷۸۴RSPT...۷۴...۳۵.35-37. (1784) 0. doi:10.1098/rstl.1784.0008. JSTOR ۱۰۶۵۷۶۶.

نتایج مشابهی برای سیاهچاله‌های متفاوت هم در نظریه ریسمان و هم در سایر دیدگاه‌ها به گرانش کوانتومی (مانند گرانش کوانتومی حلقه) گزارش شده‌اند. [132]

۲.۶.۴ یگانگی سیاهچاله‌ها

یکی از پرسش‌های باز در فیزیک پایه، پارادوکس اطلاعات گمشده و یا پارادوکس یگانگی سیاهچاله‌هاست. به طور کلاسیک قوانین فیزیک در هر دو جهت مستقیم و معکوس یکسان عمل می‌کنند. نظریه لیوویل (هامیلتونی) نگهداری حجم فضای فاز را - که می‌توان از آن به نگهداری اطلاعات تعبیر نمود - ضروری می‌داند، در نتیجه حتی در فیزیک کلاسیک هم مشکلاتی وجود دارد. در مکانیک کوانتومی این مسئله متناظر با با یکی از خواص اساسی به نام یگانگی است که با نگهداری احتمالات مرتبط است. آن را می‌توان به عنوان نگهداری حجم فضای فاز کوانتومی، همانگونه که در ماتریس چگالی توصیف می‌شوند نیز در نظر گرفت. [133]

۷.۴ شمار سیاهچاله‌ها در جهان

شمار سیاهچاله‌ها در جهان به قدری زیاد است که شمردن آنها امکانپذیر نیست. کهکشان راه شیری به تنهایی در حدود صد میلیارد ستاره دارد که از هر هزار ستاره تقریباً یکی به اندازه‌ای بزرگ هست که به سیاهچاله تبدیل شود. پس کهکشان ما باید در حدود صد میلیون سیاهچاله ستاره‌ای داشته باشد. اما تاکنون تنها یک دوجین از آنها شناسایی شده‌اند. از آنجا که در محدوده‌ای از جهان که از زمین قابل مشاهده‌است در حدود صد میلیارد کهکشان وجود دارد و سیاهچاله‌های کلان جرم نیز در مرکز این کهکشان‌ها قرار دارند پس باید در حدود صد میلیارد سیاهچاله کلان جرم در این ناحیه از جهان وجود داشته باشد. [134]

۸.۴ نظریه جهان‌های درون سیاهچالگان

نیکدوم پاپلوسکی، فیزیک‌دان نظری از دانشگاه ایندیانا پیشنهاد کرده‌است که ممکن است جهان ما درون سیاهچاله‌ای قرار گرفته باشد که خود آن در جهانی بزرگتر واقع شده‌است. [135][136][137][138][139][140][141] نظریه پاپلوسکی جایگزینی برای نظریه وجود تکینگی گرانشی در سیاهچاله هاست. او توضیحی نظری بر مبنای پیچش فضا زمان ارائه می‌دهد. [142] پاپلوسکی پیشنهاد می‌کند که اگر چگالی ماده در یک سیاهچاله به $۱۰^{۵۰}$ کیلوگرم بر متر مکعب برسد، پیچش به عنوان نیرویی به مقابله با گرانش تبدیل می‌شود و به جای تشکیل تکینگی برود همچون فنر فشرده‌ای که به آن فشار وارد شده‌است باز می‌شود. [143][144] او عنوان نموده‌است که میزان بسیار بالای پیچش ممکن است دلیل انبساط کیهانی باشد. [145]

علاوه بر این این نظریه پیشنهاد می‌دهد که هر سیاهچاله‌ای یک کرم‌چاله می‌شود که دربرگیرنده جهان در حال انبساط جدیدی است که از یک جهش بزرگ در سیاهچاله بوجود آمده‌است؛ بنابراین سیاهچاله‌های مرکز کهکشان‌ها ممکن است پل‌هایی به جهان‌های دیگر باشند. [146][147][148] بنابراین جهان خود ما نیز ممکن است درون سیاهچاله‌ای باشد که خود در جهانی بزرگتر قرار گرفته‌است که پیش تر از این توسط راج پاتیرا مطرح شده بود. [149]

۹.۴ تصورات اشتباه

• سیاهچاله‌ها برخلاف تصور نادرست ایجاد شده از آنها، هر آنچه در اطراف آنهاست را به درون خود نمی‌مکند. [150] برای مثال اگر خورشید با یک سیاهچاله با همین جرم جایگزین می‌شد، شعاع مدارهای سیارات تغییری نمی‌کرد. [151] به شرطی که جرم ثابت باشد [152]

- [25] Gillispie, C. C. *Pierre-Simon Laplace, 1749-1827: a life in exact science*. Princeton paperbacks. Princeton University Press, 2000. 175. ISBN 0691050279.
- [12] Israel, W. "Dark stars: the evolution of an idea". S. W Hawking and W Israel. In *Three Hundred Years of Gravitation*. انتشارات دانشگاه کمبریج، 1989. ISBN 9780521379762.
- [13] Schwarzschild, K. «Über das Gravitationsfeld eines Kugel aus inkompressibler Flüssigkeit nach der Einsteinschen Theorie». *Sitzungsberichte der Königlich Preussischen Akademie der Wissenschaften* 7 (1916): 196-189. Schwarzschild, 20/12/2011 بازبینی شده در K. «Über das Gravitationsfeld eines Kugel aus inkompressibler Flüssigkeit nach der Einsteinschen Theorie». *Sitzungsberichte der Königlich Preussischen Akademie der Wissenschaften* 18 (1916): 424-434. بازبینی شده در 20/12/2011.
- [14] Droste, J. «On the field of a single centre in Einstein's theory of gravitation». *Koninklijke Nederlandsche Akademie van Wetenschappen Proceedings* 17, 3 (1915): 1011-998.
- [15] Hooft, G. «Introduction to the theory of black holes». *Spinoza Institute*, 2009. 48-47. بازبینی شده در 20/12/2011.
- [16] Chandrasekhar, G. *Chandrasekhar and his limit*. Universities Press. 89. doi:10.1119/1.12686. و حد او. شابک ۸۱۷۳۷۱۰۳۵X
- [17] Detweiler, S. «Resource letter BH-1: Black holes». *American Journal of Physics* 49, 5 (1981): 394-400. Bibcode: 1981AmJPh..49..394D. doi:10.1119/1.12686. بازبینی شده در 20/12/2011.
- [18] Peters, A. K., Harpaz, A. *Stellar evolution*. Ltd, 1994. 105. شابک ۱-۵۶۸-۸۱۰۱۲-۱.
- [19] Oppenheimer, J. R. «On Massive Neutron Cores». *Physical Review* 55, 4 (1939): 374-374. Bibcode: 1939PhRv...55..374O. doi:10.1103/PhysRev.55.374.
- [20] Finkelstein, D. «Past-Future Asymmetry of the Gravitational Field of a Point Particle». *Physical Review* 110, 4 (1958): 965-965. Bibcode: 1958PhRv...110..965F. doi:10.1103/PhysRev.110.965.
- [21] Kruskal, M. «Maximal Extension of Schwarzschild Metric». *Physical Review* 119, 5 (1960): 1743-1743. Bibcode: 1960PhRv...119..1743K. doi:10.1103/PhysRev.119.1743.
- [22] Hewish, A. «Pulsars». *Annual Review of Astronomy and Astrophysics* 8, 1 (1970): 265-265. Bibcode: 1970ARA&A...8..265H. doi:10.1146/annurev.aa.08.090170.001405.
- [23] Hewish, A. «Observation of a Rapidly Pulsating Radio Source». *Nature (journal)* 217, 5130 (1968): 709-709. Bibcode: 1968Natur...217..709H. doi:10.1038/217709a0.
- [24] Israel, W. «Event Horizons in Static Vacuum Space-Times». *Physical Review* 164, 5 (1967): 1776-1776. Bibcode: 1967PhRv...164..1776I. doi:10.1103/PhysRev.164.1776.
- [25] Carter, B. «Axisymmetric Black Hole Has Only Two Degrees of Freedom». *Physical Review Letters* 26, 6 (1971): 331-331. Bibcode: 1971PhRvL...26..331C. doi:10.1103/PhysRevLett.26.331.
- [26] Carter, B. «The vacuum black hole uniqueness theorem and its conceivable generalisations». *1st Marcel Grossmann meeting on general relativity*. 1977. 243-254.
- [27] Robinson, D. «Uniqueness of the Kerr Black Hole». *Physical Review Letters* 34, 14 (1975): 905-905. Bibcode: 1975PhRvL...34..905R. doi:10.1103/PhysRevLett.34.905.
- [28] Heusler, M. «Stationary Black Holes: Uniqueness and Beyond». *Living Reviews in Relativity* 1, 6 (1998): 6.
- [29] Hawking, Stephen W. *General Relativity: an Einstein centenary survey*. Cambridge University Press, 1979. 454. شابک ۰۵۲۱۲۲۲۸۵۰.
- [30] Carter, B. «Axisymmetric Black Hole Has Only Two Degrees of Freedom». *Physical Review Letters* 26, 6 (1971): 331-331. Bibcode: 1971PhRvL...26..331C. doi:10.1103/PhysRevLett.26.331.
- [31] Carter, B. «The vacuum black hole uniqueness theorem and its conceivable generalisations». *1st Marcel Grossmann meeting on general relativity*. 1977. 243-254.
- [32] Robinson, D. «Uniqueness of the Kerr Black Hole». *Physical Review Letters* 34, 14 (1975): 905-905. Bibcode: 1975PhRvL...34..905R. doi:10.1103/PhysRevLett.34.905.
- [33] Heusler, M. «Stationary Black Holes: Uniqueness and Beyond». *Living Reviews in Relativity* 1, 6 (1998): 6.

- Carroll ۲۰۰۴, pp. 257–259 and 265–266 [56]
- S. M. Morsink. «Black Holes: The Inside Story». *Physics World* ۹۴ (1996). Bibcode: 1996PhyW...۹...۳۴D.۳۷۰۳۴ [57]
- Carroll ۲۰۰۴, p. ۲۶۶ [58]
- Wald ۱۹۸۴, p. ۲۱۲ [59]
- Hamade. «Black Holes and Quantum Gravity». *Cambridge Relativity and Cosmology*. University of Cambridge, ۱۹۹۶. Cambridge بازبینی شده در ۲۰۰۹-۰۳-۲۶ [60]
- Palmer, D. «Ask an Astrophysicist: Quantum Gravity and Black Holes». NASA. بازبینی شده در ۲۰۰۹-۰۳-۲۶ [61]
- Naoshi, Nitta, Daisuke, Takeshi Chiba, Sugiyama. «Shadows of colliding black holes». *Physical Review D* ۸۴ (September ۲۰۱۱). Bibcode: 2011PhRvD..۸۴f۳۰۰۸N. doi:10.1103/PhysRevD.84.063008. [62]
- Nemiroff, R. J. «Visual distortions near a neutron star and black hole». *American Journal of Physics* ۶۱ (1993). arXiv:astro-ph/۹۳۱۲۰۰۳. Bibcode: 1993AmJPh...۶۱..۶۱۹N. doi:10.1119/1.17224. [63]
- Carroll ۲۰۰۴, Ch. 6.6 [64]
- Carroll ۲۰۰۴, Ch. 6.7 [65]
- هاو کینگ: سیاهچاله ها اطلاعات را ذخیره می کنند بی بی سی فارسی [66]
- <http://www.ariamoons.com/?p=38630> [67]
- Einstein, A. «On A Stationary System With Spherical Symmetry Consisting of Many Gravitating Masses». *Annals of Mathematics* ۴۰ (1939). Bibcode: 1939AnnM...۴۰...۹۳۶E. doi:10.2307/1968902. [68]
- Kerr, R. P. «The Kerr and Kerr-Schild metrics». *The Kerr Spacetime*. Cambridge University Press, ۲۰۰۹. arXiv:0706.1109. Bibcode: 2009PhRvD..۷۹...۵۷۷K. doi:10.1103/PhysRevD.79.064002. [69]
- Penrose, R. «Gravitational Collapse and Space-Time Singularities». *Physical Review Letters* ۱۴ (1965). Bibcode: 1965PhRvL..۱۴...۵۷۷P. doi:10.1103/PhysRevLett.14.57. [70]
- Carroll ۲۰۰۴, Section 5.8 [71]
- M. Volonteri. «Massive black holes: formation and evolution». *Black Holes from Stars to Galaxies—Across the Range of Masses*. Cambridge University Press, ۲۰۰۷. arXiv:astro-ph/0701512. Bibcode: 2007PhRvL..۱۴...۵۷۷P. doi:10.1103/PhysRevLett.14.57. [72]
- Penrose, R. «"Golden Oldie": Gravitational Collapse: The Role of General Relativity». *General Relativity and Gravitation* ۳۴ (2002). Bibcode: 2002GrGr...۳۴..۱۱۴P. doi:10.1023/A:1016578408204. [73]
- Carr, B. J. «Primordial Black Holes: Do They Exist and Are They Useful?». *Astrophysics and Cosmology*. Universal Academy Press, ۲۰۰۵. arXiv:astro-ph/0511433. Bibcode: 2005PhRvL..۱۴...۵۷۷P. doi:10.1103/PhysRevLett.14.57. [74]
- Carroll ۲۰۰۴, p. ۲۵۳ [33]
- R. H. Price. *Black holes: the membrane paradigm*. Yale University Press, ۱۹۸۶. Bibcode: 1986PhyW...۹...۳۴D.۳۷۰۳۴ [34]
- Anderson, Warren G. «The Black Hole Information Loss Problem». *Usenet Physics FAQ* [35]
- Preskill, J. «Black holes and information: A crisis in quantum physics». [36]
- Dana E. Backman. *Perspectives on Seeds*, Michael A. [37]
- S. A. Teukolsky. *Black holes, white dwarfs, and neutron stars: the physics of compact objects*. John Wiley and Sons, ۲۰۰۷. Bibcode: 2007PhRvD..۷۹...۵۷۷P. doi:10.1103/PhysRevD.79.064002. [38]
- Wald, R. M. *Gravitational Collapse and Cosmic Censorship*. [39]
- R. A. McClintock, J. E. R. Shafee, R. Narayan, Remillard. «The Spin of the Near-Extreme Kerr Black Hole GRS 1915+105». *Astrophysical Journal* ۶۵۲ (2006). arXiv:astro-ph/0606076. Bibcode: 2006ApJ...۶۵۲..۵۱۸M. doi:10.1086/508457. [40]
- Thorne, Misner & Wheeler ۱۹۷۳, p. ۸۴۸ [41]
- Wheeler ۲۰۰۷, p. ۱۷۹ [42]
- Carroll ۲۰۰۴, Ch. 5.4 and 7.3 [43]
- Carroll ۲۰۰۴, p. ۲۱۷ [44]
- Carroll ۲۰۰۴, p. ۲۱۸ [45]
- «Inside a black hole». *Knowing the universe and its secrets*. [46]
- Carroll ۲۰۰۴, p. ۲۲۲ [47]
- H. S. Reall. «Black Holes in Higher Dimensions». *Living Reviews in Relativity* ۱۱ (2008). Bibcode: 2008LRR...۱۱...۶E. arXiv:0801208. [48]
- Obers, N. A., Eleftherios Papantonopoulos. «Black Holes in Higher-Dimensional Gravity». *Lecture Notes in Physics* ۷۶۹ (2009): ۲۱۱–۲۵۸. arXiv:0802.5199. doi:10.1007/978-3-540-88460-6. [49]
- hawking & ellis ۱۹۷۳, Ch. 9.3 [50]
- Carroll ۲۰۰۴, p. ۲۰۵ [51]
- Carroll ۲۰۰۴, pp. ۲۶۴–۲۶۵ [52]
- Carroll ۲۰۰۴, p. ۲۵۲ [53]
- J. Kwan. «No Way Back: Maximizing Survival Time Below the Schwarzschild Event Horizon». *Publications of the Astronomical Society of Australia* ۲۴ (2007). Bibcode: 2007PASA...۲۴...۴۶L. doi:10.1071/AS07012. [54]
- Wheeler ۲۰۰۷, p. ۱۸۲ [55]

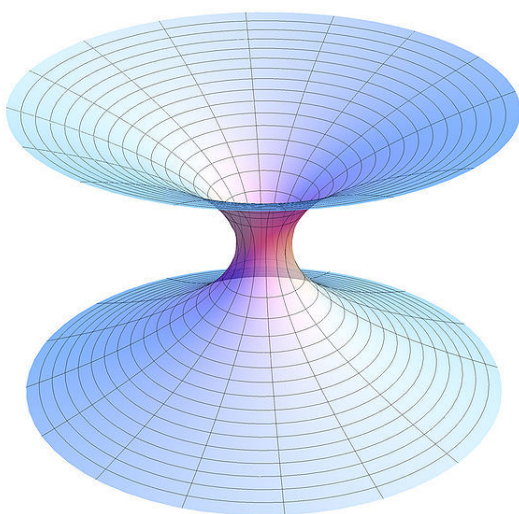
- Peskin, M. E. (2008). "The end of the world at the Large Hadron Collider?". *Physics* **1**: 14. Bibcode:2008PhyOJ...1...14P. doi:10.1103/Physics.1.14.
- Wald ۱۹۸۴, pp. ۱۲۴-۱۲۵ [89]
- King, Andrew (2003-09-15). "Black Holes, Galaxy Formation, and the MBH- σ Relation". *The Astrophysical Journal Letters* **596**: L27-L29. arXiv:astro-ph/0308342. Bibcode:2003ApJ...596L..27K. doi:10.1086/379143. Check |doi= value (help).
- Richstone, D. *et al.* (January 13, 1997). "Massive Black Holes Dwell in Most Galaxies, According to Hubble Census". 189th Meeting of the American Astronomical Society. Retrieved 2009-05-17.
- Bender, Ralf; *et al.* (2005-09-20). "HST STIS Spectroscopy of the Triple Nucleus of M31: Two Nested Disks in Keplerian Rotation around a Supermassive Black Hole". *Black Hole*. 300-280 (1): 631. arXiv:astro-ph/0509839. Bibcode:2005ApJ...631..280B. doi:10.1086/432434. Check |doi= value (help).
- Gebhardt, Karl; Thomas, Jens (August 2009). "The Black Hole Mass, Stellar Mass-to-Light Ratio, and Dark Halo in M87". *The Astrophysical Journal* **700** (2): 1690-1701. Bibcode:2009ApJ...700.1690G. doi:10.1088/0004-637X/700/2/1690.
- Macchetto, F.; Marconi, A.; Axon, D. J.; Capetti, A.; Sparks, W.; Crane, P. (November 1997). "The Supermassive Black Hole of M87 and the Kinematics of Its Associated Gaseous Disk". *Astrophysical Journal* **489** (2): 579. arXiv:astro-ph/9706252. Bibcode:1997ApJ...489..579M. doi:10.1086/304823. Check |doi= value (help).
- Shiga, David (10 January 2008). "Biggest black hole in the cosmos discovered". NewScientist.com news service.
- "Black Hole Boldly Goes Where No Black Hole Has Gone Before". ESA News. January 3, 2007. Retrieved 2006-05-24.
- Maccarone, T.J.; *et al.*, A; Zepf, SE; Rhode, KL (2007). "A black hole in a globular cluster". *Nature* **455** (7124): 183-185. arXiv:astro-ph/0701310. Bibcode:2007Natur.445..183M. doi:10.1038/nature05434. PMID 17203062. Check |pmid= value (help).
- Hopman, Clovis; Simon Portegies Zwart (2005). "Gravitational waves from remnants of ultraluminous X-ray sources". *Mon.Not.Roy.Astron.Soc.Lett.* **363** (1): L56-L60. arXiv:astro-ph/0506181. Bibcode:2005MNRAS.363L..56H. doi:10.1111/j.1745-3933.2005.00083.x.
- Celotti, A.; Miller, J.C.; Sciama, D.W. (1999). "Astrophysical evidence for the existence of black holes". *Classical and Quantum Gravity* **16** (12A): A3-A21. arXiv:astro-ph/9912186. doi:10.1088/0264-9381/16/12A/301.
- Hughes, Scott A. (۲۰۰۵). "Trust but verify: The case for astrophysical black holes". arXiv:hep-ph/0511217 [hep-ph].
- S. Thomas. «High energy colliders as black hole factories: The end of short distance physics». *Physical Review D* **۶۵**, ۰۵۶۰۱۰ (۲۰۰۲). arXiv:hep-ph/۰۱۰۶۲۱۹. Bibcode: ۲۰۰۲PhRvD..۶۵۶۰۱۰G. doi:10.1103/PhysRevD.65.056010.
- Harada, T. «Is there a black hole minimum mass?». *Physical Review D* **۷۴**, ۰۶۰۹۰۵۵ (۲۰۰۶). arXiv:gr-qc/۰۶۰۹۰۵۵. Bibcode: ۲۰۰۶PhRvD..۷۴۰۹۰۵۵H. doi:10.1103/PhysRevD.74.084004.
- G. Dvali. «The Arkani-Hamed, N. S. Dimopoulos hierarchy problem and new dimensions at a millimeter». *Physics Letters B* **۴۲۹**, ۰۳۳۱۵ (۱۹۹۸). arXiv:hep-ph/۹۸۰۳۳۱۵. Bibcode: ۱۹۹۸PhLB..۴۲۹..۳۳۱۵D. doi:10.1016/S0370-2693(98)00466-3.
- LHC Safety Assessment Group. «Review of the Safety of LHC Collisions». CERN.
- Cavaglià, M. «Particle accelerators as black hole factories?». *Einstein-Online* (Max Planck Institute for Gravitational Physics (Albert Einstein Institute)) **۴** (۲۰۱۰): ۱۰۱۰.
- Vesperini, E.; S. L. W. McMillan; A. D'Ercole (2010). «Intermediate-Mass Black Holes in Early Globular Clusters». *The Astrophysical Journal Letters* : L41-L44. arXiv:۱۰۰۳.۳۴۷۰. (2010) 1. Bibcode: ۲۰۱۰ApJ...۷۱۳L..۴۱V. doi:10.1088/2041-8205/713/1/L41.
- Zwart, S. F. P.; H. Baumgardt; P. Hut (2004). «Formation of massive black holes through runaway collisions in dense young star clusters». *Nature* **428**, ۲۶۲۲ (2004) 6984. arXiv:astro-ph/۰۴۰۲۶۲۲. Bibcode:(2004) 6984. doi:10.1038/nature02448. PMID ۱۵۰۸۵۱۲۴.
- O'leary, R. M.; Rasio, F. A.; Fregeau, J. M. *et al.* (2006). «Binary Mergers and Growth of Black Holes in Dense Star Clusters». *The Astrophysical Journal* **637** (2): 937. arXiv:astro-ph/0508224. Bibcode:2006ApJ...637..937O. doi:10.1086/498446.
- Hawking, S. W. (1974). "Black hole explosions?". *Nature* **248** (5443): 30-31. Bibcode:1974Natur.248...30H. doi:10.1038/248030a0.
- Page, D. N. (2005). "Hawking radiation and black hole thermodynamics". *New Journal of Physics* **7**: 203. arXiv:hep-th/0409024. Bibcode:2005NJPh...7..203P. doi:10.1088/1367-2630/7/1/203. Check |doi= value (help).
- Carroll ۲۰۰۴, Ch. 9.6 [85]
- "Evaporating black holes?". *Einstein online*. Max Planck Institute for Gravitational Physics. 2010. Retrieved 2010-12-12.
- Giddings, S. B.; Mangano, M. L. (2008). "Astrophysical implications of hypothetical stable TeV-scale black holes". *Physical Review D* **78** (3): 035009. arXiv:0806.3381. Bibcode:2008PhRvD..78c5009G. doi:10.1103/PhysRevD.78.035009.

- Kormendy, J.; Richstone, D. (1995). "Inward Bound— [117] J. Casares: *Observational evidence for stellar mass black [101]*
The Search For Supermassive Black Holes In Galactic holes. Preprint
Nuclei". *Annual Reviews of Astronomy and Astrophysics*
33 (1): 581–624. Bibcode:1995ARA&A..33..581K.
doi:10.1146/annurev.aa.33.090195.003053.
- Ferrarese, L.; Merritt, D. (2000). "A Fundamental [118] J.E. McClintock and R.A. Remillard: *Black Hole Binaries.* [103]
Relation Between Supermassive Black Holes and Preprint
their Host Galaxies". *The Astrophysical Journal*
Letters 539 (1): 9–12. arXiv:astro-ph/0006053.
Bibcode:2000ApJ...539L...9F. doi:10.1086/312838
- Gillessen, S.; Eisenhauer, F.; Trippe, S. et al. [119] B.J. Carr and S.B. Giddings, "Quantum black [104]
(2009). "Monitoring Stellar Orbits around the holes,"*Scientific American* 292N5 (2005) 30.
Massive Black Hole in the Galactic Center". *The*
Astrophysical Journal 692 (2): 1075. arXiv:0810.4674.
Bibcode:2009ApJ...692.1075G. doi:10.1088/0004-
637X/692/2/1075.
- Ghez, A. M.; Klein, B. L.; Morris, M. et al. (1998). "High [120] Hawking, S. W. (1975). "Particle Creation by [105]
Proper-Motion Stars in the Vicinity of Sagittarius A*: Black Holes". *Commun. Math. Phys.* 43
Evidence for a Supermassive Black Hole at the Center (3): 199–220. Bibcode:1975CMaPh..43..199H.
of Our Galaxy". *The Astrophysical Journal* 509 (2): 678. doi:10.1007/BF02345020.
arXiv:astro-ph/9807210. Bibcode:1998ApJ...509..678G.
doi:10.1086/306528.
- Bozza, Valerio (۲۰۰۹). "Gravitational Lensing by Black [121] Fichtel, C. E.; Bertsch, D. L.; Dingus, B. L. et al. (1994). [106]
Holes". arXiv:۰۹۱۱۲۱۸۷ [gr-qc].,Holes". arXiv:۰۹۱۱
- Preparata, Giuliano (1995). *QED Coherence in Matter.* [122] Winter, L. M.; Mushotzky, R. F.; Reynolds, C. S. (2006). [109]
Princeton paperbacks. World Scientific Pub Co Inc. p. "XMM-Newton Archival Study of the Ultraluminous
145. ISBN 9810222491 (help).
- Kovacs, Z.; Cheng, K. S.; Harko, T. (2009). "Can [123] X-Ray Population in Nearby Galaxies". *The Astrophysical*
stellar mass black holes be quark stars?". *Monthly Journal* 649 (2): 730. arXiv:astro-ph/0512480.
Notices of the Royal Astronomical Society 400 (3): 1632– Bibcode:2006ApJ...649..730W. doi:10.1086/506579
1642. arXiv:0908.2672 Check |arxiv= value (help).
Bibcode:2009MNRAS.400.1632K. doi:10.1111/j.1365-
2966.2009.15571.x.
- Kusenko, A. (۲۰۰۶). "Properties and signatures of [124] Webster, B. L.; Murdin, P. (1972). "Cygnus X-1—a [111]
supersymmetric Q-balls". arXiv:hep-ph/0612159 [hep- Spectroscopic Binary with a Heavy Companion?". *Nature*
ph]. 235 (5332): 37–38. Bibcode:1972Natur.235...37W.
doi:10.1038/235037a0.
- Hansson, J.; Sandin, F. (2005). "Preon [125] Rolston, B. (10 November 1997). "The First Black [112]
stars: a new class of cosmic compact objects". *The bulletin.* University of Toronto. Archived from
Physics Letters B 616 (1–2): 1. arXiv:astro- the original on 2008–05–02. Retrieved 2008–03–11.
ph/0410417. Bibcode:2005PhLB..616....1H.
doi:10.1016/j.physletb.2005.04.034.
- Kiefer, C. (2006). "Quantum gravity: [126] Shipman, H. L. (1 January 1975). "The implausible [113]
general introduction and recent developments". history of triple star models for Cygnus X-1 Evidence
Annalen der Physik 15 (1–2): 129. arXiv:gr- for a black hole". *Astrophysical Letters* 16 (1): 9–
qc/0508120. Bibcode:2006AnP...518..129K. 12. Bibcode:1975ApL....16....9S. doi:10.1016/S0304-
doi:10.1002/andp.200510175. 8853(99)00384-4.
- Skenderis, K.; Taylor, M. (2008). "The fuzzball [127] "NASA scientists identify smallest known black hole" [114]
proposal for black holes". *Physics Reports* 467 مرکز پرواز فضایی گاردرد. .01۰04۰2008 (Press release).
(4–5): 117. arXiv:0804.0552 Check |arxiv= Retrieved 2009–03–14.
value (help). Bibcode:2008PhR...467..117S.
doi:10.1016/j.physrep.2008.08.001.
- Hawking, S. W. (1971). "Gravitational Radiation [128] Krolik, J. H. (1999). *Active Galactic Nuclei.* Princeton [115]
from Colliding Black Holes". *Physical Review Letters* University Press. Ch. 1.2. ISBN 0–691–01151–6
26 (21): 1344–1346. Bibcode:1971PhRvL..26.1344H. (help).
doi:10.1103/PhysRevLett.26.1344.
- Sparke, L. S.; Gallagher, J. S. (2000). *Galaxies in the [116]*
Universe: An Introduction. Cambridge University Press.
Ch. 9.1. ISBN 0–521–59704–4 (help).

- Telegraph: "A universe could exist 'inside every black hole,' claims scientist" [148]
- Pathria, R. K. (1972). "The Universe as a Black Hole". [149] *Nature* **240** (5379): 298. doi:10.1038/240298a0.
- Wolfson, Richard (2002). [150] "black+hole"+"misconception"+"cosmic+vacuum+cleaner"+-wikipedia *Simply Einstein: relativity demystified*. W. W. Norton & Company. p. 261. ISBN 0-393-05154-4 (help).
- "Frontiers And Controversies In Astrophysics Transcript [151] 9". Yale University. Retrieved April 26, 2011.
- "Frontiers And Controversies In Astrophysics Transcript [152] 9". Yale University. Retrieved April 26, 2011.
- Wald, R. M. (2001). "The Thermodynamics of Black [129] Holes". *Living Reviews in Relativity* **4** (6). arXiv:gr-qc/9912119. Bibcode:1999gr.qc....12119W. Retrieved 2011-02-10.
- 't Hooft, G. (2001). "The Holographic Principle". In [130] Zichichi, A. *Basics and highlights in fundamental physics*. Subnuclear series 37. World Scientific. arXiv:hep-th/0003004. ISBN 9789810245368 (help).
- Strominger, A.; Vafa, C. (1996). "Microscopic [131] origin of the Bekenstein-Hawking entropy". *Physics Letters B* **379** (1-4): 99. arXiv:hep-th/9601029. Bibcode:1996PhLB..379...99S. doi:10.1016/0370-2693(96)00345-0 Check |doi= value (help).
- Carlip, S. (2009). "Black Hole Thermodynamics [132] and Statistical Mechanics". *Lecture Notes in Physics* **769**: 89. arXiv:0807.4520 Check |arxiv= value (help). doi:10.1007/978-3-540-88460-6_3 Check |doi= value (help).
- Hawking, S. W. "Does God Play Dice?". *www.hawking.org*. [133] *uk*. Retrieved 2009-03-14.
- HubbleSite: "How many black holes are there?" [134]
- Poplawski, N. J. (2010). "Radial motion into [135] an Einstein-Rosen bridge". *Physics Letters B* **687**: 110. Bibcode:2010PhLB..687..110P. doi:10.1016/j.physletb.2010.03.029.
- Indiana University Newsroom: "Our universe at home [136] within a larger universe? So suggests IU theoretical physicist's wormhole research"
- National Geographic Daily News: "Every Black Hole [137] Contains Another Universe?"
- Science Now: "Does Our Universe Live Inside a [138] Wormhole?"
- Space.com: "Our Universe Was Born in a Black Hole, [139] Theory Says"
- National Geographic Daily News: "Top Ten Discoveries [140] of 2010: Nat Geo News's Most Popular"
- Science Now: "Top 10 ScienceNOWs of 2010" [141]
- Smolin, L. (1992). "Did the Universe evolve?". *Classical [142] and Quantum Gravity* **9**: 173. doi:10.1088/0264-9381/9/1/016 Check |doi= value (help).
- New Scientist, Vol. 207, No. 2770, p. 9 (2010): "Every [143] black hole may hold a hidden universe"
- Washington Post: "Cosmologist's theory about black [144] holes puts a new spin on the universe"
- Poplawski, N. J. (2010). "Cosmology with torsion: An [145] alternative to cosmic inflation". *Physics Letters B* **694**: 181. doi:10.1016/j.physletb.2010.09.056.
- Popular Science: "Are We Living Inside a Black Hole?" [146]
- National Post: "We may exist inside a black hole, scientist [147] says"

فصل ۵

سفر در زمان



نمودار یک کرمچاله

سفر در زمان، به ایده حرکت بین لحظه‌های مختلف در زمان گفته می‌شود که مشابه حرکت بین مکان‌های مختلف در فضا صورت می‌گیرد، و در آن امکان ارسال اشیاء (و در بعضی حالت‌ها فقط اطلاعات) به زمان گذشته و آینده وجود دارد.

با این که از قرن نوزدهم، سفر در زمان همواره موضوع داستان‌های علمی-تخیلی بسیاری بوده است، و نیز سفر یک طرفه در فضا با استناد به پدیده پارادوکس زمانی مبتنی بر سرعت در تئوری نسبیت خاص (که در پارادوکس‌های دوقلو تشریح شده است) و نیز پارادوکس زمانی جاذبه‌ای در نسبیت عام، تقریباً امکان‌پذیر است، اما هنوز این که قوانین فیزیک امکان بازگشت به زمان گذشته را می‌دهند یا نه مجهول مانده است. تاکنون امکان‌پذیر بودن یا نبودن سفر در زمان به اثبات نرسیده است. به هر وسیله‌ای - چه تخیلی و چه فرضی - که برای سفر در زمان به کار رود عموماً ماشین زمان گفته می‌شود.

۱.۵ راه‌های پیشنهاد شده برای سفر در زمان

۱.۱.۵ حرکت با سرعت نور

بر پایه نظریه نسبیت، با افزایش سرعت یک جسم، زمان برای آن جسم کندتر می‌گذرد. اگر با سرعت نزدیک به نور با قطار حرکت کنیم زمان خیلی دیرتر می‌گذرد مثل این است که داریم دور سیاه چالهای بزرگ می‌چرخیم و با این کار زمان بسیار دیرتر می‌گذرد و اگر با سرعت نزدیک به نور یک هفته حرکت کنیم به ۱۰۰ سال بعد می‌رویم.

هر ماشین متحرکی حتی اتومبیل شخصی شما هم می‌تواند به عنوان یک ماشین زمان عمل کند. هر جسم دارای حرکت، زمان مخصوص به خود را دارا خواهد بود پس وقتی یک جسم بتواند با سرعت بیشتر حرکت کند نحوه گذر زمان نیز برای آن متفاوت از بقیه اجسام خواهد بود. مثلاً ما می‌توانیم با سوار شدن به یک ماهواره و گردش با سرعت بالا دور زمین روزی چند میلیونوم ثانیه این پدیده را در زندگی مان حس کنیم. زمان در این حالت برای ما کندتر از حالتی که در روی زمین هستیم می‌گذرد. حالا هر چه قدر سرعت بیشتر شود و نزدیک به سرعت نور شویم این پدیده بیشتر قابل دریافت خواهد بود به صورتی که مثلاً اگر با سرعت نزدیک به نور ساعتی حرکت کنیم بعد از سکون متوجه اختلاف فاحش میان زمان گذشته برای ما (چه از لحاظ فیزیکی و چه از لحاظ فیزیولوژی) خواهیم شد. پس ما با این کار به نوعی زمان را برای خود کندتر کرده و به آینده سفر خواهیم کرد.^[1]

دیگری سفر کنیم. کرمچاله‌ها تاکنون به صورت تجربی مشاهده نشده‌اند. همچنین بسیار ناپایدارند و تقریباً بلافاصله پس از تشکیل فرومی‌ریزند و از بین می‌روند در نتیجه امکان ورود به آن غیرممکن به نظر می‌رسد (علت آن هم فید بک است).

۳.۱.۵ تئوری کورت گودل

کورت گودل در ۱۹۴۴ میلادی، توضیحی از جهان یافت که در معادلات میدان اینشتین صدق می‌کند و از نظر تئوریک می‌توان در آن به عقب برگشت. تمام استدلال‌هایی که برای رد الگوی گودل، چه بر پایه ریاضیات و چه بر پایه فلسفه، بیان شده است شکست خورده‌اند.^[2]

۲.۵ شبیه‌سازی برای فوتون‌ها

در ژوئن ۲۰۱۴ (خرداد ۱۳۹۳) فیزیکدانان دانشگاه کوئینزلند استرالیا توانستند پدیده «سفر در زمان» را برای ذرات نور (فوتون) شبیه‌سازی کنند. آنها با استفاده از فوتون توانستند این پدیده شگفت‌انگیز که از خواص کوانتومی ذرات است را برای نخستین بار شبیه‌سازی کنند.^{[3][4]}

۲.۱.۵ کرمچاله

نوشتار اصلی: کرمچاله
کرمچاله‌ها پدیده‌هایی نظری هستند که بین دو نقطه از فضا و زمان پیوند ایجاد می‌کنند. برخی باور دارند که اگر بتوان کرمچاله‌ای یافت و در آن وارد شد و به سوی دیگر آن رفت، قادر خواهیم بود تا به مکان و یا زمان

۳.۵ پارادوکس پدربزرگ یا مادربزرگ

نوشتار اصلی: پارادوکس پدربزرگ

گذشته را زیر سؤال می‌برد. البته برای رفع این تناقض، راه‌حلهایی نیز پیشنهاد شده‌است، که دنیا‌های موازی یکی از آنهاست. اما جهان‌های موازی زمانی می‌تواند پاسخ مناسبی به این پرسش باشد که به طور کامل بتوان به ساخته شدن ماشین زمان پاسخ منفی داد.

با کمی تفکر به عمق این متن پی می‌برید پس کاملاً با دقت مطالعه کنید: نظریه پیچ و خم فضایی. اول اینکه کرم چاله چه موقع به وجود می‌آید یعنی اگر ما در زمان حال هستیم کرم چاله وجود داشته یا اکنون به وجود می‌آید اگر اکنون به وجود می‌آید پس دهانه متحرک آن به ده سال بعد می‌رود و اگر ما از دهانه متحرک وارد آن شویم به همان زمان می‌رویم نه ده سال قبل چون کرم چاله اکنون ساخته شده و دهانه ثابت در حال است اگر چه فضا در آن جا بجا شده است و ما بدون گذشت زمان در فضا سفر کرده‌ایم اما در زمان سفر نکرده‌ایم در حالی که در زمان سفر کرده‌ایم چون فضای اطراف ما تغییر کرده‌اند و فضا و اجرام که همان پیچ و خم‌های فضا هستند برای تغییر نسبت به هر پیچ و خمی نیاز به گذر زمان دارند چون زمان خود جزئی از فضا است و پیچ و خم تکمیل کننده فضا است که به صورت‌های مختلف درمیاید که جاذبه، شتاب، سرعت، نور و... مواردی از صورت‌های زمان است. اجرام نیز جزئی از زمان است که پیچ و خم‌های زمان را داراست و جاذبه دارد. پس ما اگر در فضا سفر کنیم در زمان هم سفر کرده‌ایم.

یکی از پرسش‌هایی است که همیشه دربارهٔ امکان سفر در زمان مطرح بوده است این بوده که اگر کسی به گذشته سفر کند و یکی از عامل‌های وجود خودش را از بین ببرد (برای مثال پدربزرگش را) در آن صورت او دیگر وجود نخواهد داشت تا به گذشته برود و آن کار را انجام دهد.

۴.۵ پارادوکس سفر در زمان گذشته

روایای سفر کردن در زمان، به گذشته و آینده، شاید به قدمت تصور و خیال انسان باشد. زمانی که اچ.جی. ولز، رمان «ماشین زمان» را در سال ۱۸۹۵ منتشر کرد، آن را رمان علمی‌تخیلی نامید چرا که هیچ‌کس نمی‌دانست سفر زمان امکان دارد یا خیر! تنها ۱۰ سال بعد، آلبرت انیشتین نظریه چهارم نسبیت خصوصی‌اش را ارائه کرد و بخشی از این پرسش با شگفتی و حیرت بسیار پاسخ داده شد: پاسخ مثبت بود. یکی از پیش‌بینی‌های انیشتین که امروزه با آزمایش‌های بی‌شمار بررسی و معلوم شده است، با مثالی از دوقلوها به بهترین شکل روشن می‌شود. یکی از دوقلوها در خانه می‌ماند، در حالی که دیگری با سرعتی نزدیک به سرعت نور به مدت ۱۰ سال به فضا سفر می‌کند. زمانی که مسافر بازمی‌گردد، دیگری در خانه وی را ۱۰ سال مسن‌تر می‌یابد، در حالی که خودش کاملاً پیر شده است. در واقع مسافر فضا ۱۰ سال به درون آینده جهش زده است. «پارادوکس زمانی» نسبیت خصوصی است و گرچه موقعی که سرعت‌های بی‌نهایت مورد بحث است قابل توجه‌ترین مسئله به‌شمار می‌رود، همواره در اطراف ما روی می‌دهد. همچنان که ما نسبت به یکدیگر جابه‌جا شده و حرکت می‌کنیم، همگی در حال سفر کردن به آینده هستیم؛ اما با سرعت و آهنگ‌های متفاوت. اختلاف‌های این درجات و سرعت‌ها بسیار کوچکند، اما واقعی هستند. سفر زمان به آینده، اجتناب‌ناپذیر است و پیامد ساختار عالم و جهان کیهان محسوب می‌شود. تا چند دهه پیش، این موضوع به داستان‌های علمی‌تخیلی سپرده می‌شد. در حقیقت، پرس و جویی از نخستین نویسنده داستان‌های علمی‌تخیلی، آغاز نخستین تحقیق و مطالعه جدی و مداوم در این زمینه را دامن زد. در سال ۱۹۸۵ کارل ساگان، اخترشناس روی داستان خود با عنوان «برخورد» کار می‌کرد. قهرمان زن این کتاب به چند وسیله برای عبور و مرور سریع بین ستاره‌ای نیاز داشت و چون ساگان درگیر قوانین فیزیک می‌شد، از دوستش تورن که یک فیزیکدان نظری بود درخواست مشورت و راهنمایی کرد. وی نیز استفاده از یک کرم چاله را توصیه کرد؛ یعنی همان میانبر تونل مانند در میان فضا و زمان پیش‌بینی شده توسط انیشتین را که در بین هواداران داستان‌های علمی‌تخیلی مشهور است. ساگان هم از روی وظیفه‌شناسی این پیشنهاد را در کتابش به کار برد. در همان سال تورن مشخص کرد اگر شما (همانند مسئله دوقلوها) در مواجهه با دو دهانه یک کرم چاله، یک دهانه را ثابت نگاه دارید و دیگری با سرعتی نزدیک به سرعت نور حرکت کند و سپس به مجاورت دهانه ثابت شده بازگردد، در این صورت می‌توانید یک ماشین زمان خلق کنید. اگر این دهانه رونده بر حسب اندازه‌گیری دهانه ثابت ۱۰ سالی در حرکت بوده است، پس تورن می‌تواند به داخل دهانه سفر کننده پریده و از دهانه ثابت بیرون آید در حالی که ۱۰ سال به سمت گذشته رفته است.

پارادوکس پدربزرگ یا پارادوکس سفر به زمان، که اولین بار توسط یک نویسنده فرانسوی در سال ۱۹۴۳ مطرح شد به شرح زیر است:

- فرض کنید شما بتوانید به گذشته دور سفر کنید و در آنجا پدربزرگ فعلی خود را قبل از اینکه با مادربزرگتان آشنا شود بکشید، این به این معنی است که شما نمی‌توانید وجود داشته باشید؛ و طبعاً نیز نمی‌توانستید به گذشته سفر کنید و پدربزرگتان را بکشید.

این یک نمونهٔ کلاسیک پارادوکس محسوب می‌شود، که امکان سفر به

۵.۵ جستارهای وابسته

- نسبیت خاص
- نسبیت عام
- سیاهچاله
- کرم‌چاله
- آشناپنداری
- طی‌الزمان

۶.۵ پیوند به بیرون

- سفر در زمان چطور انجام می‌شود؟
- مقاله زمان بزرگترین راز هستی (گرین آنلاین)
- سفر در زمان
- مقاله «سفر در زمان چگونه انجام می‌گیرد» در وبگاه <http://howstuffworks.com>
- ویدئو توضیح سفر در زمان یوتیوب

۷.۵ پانویس و منابع

- [1] Hawking, Stephen (April 27, 2010). "STEPHEN HAWKING: How to build a time machine". Retrieved October 19, 2016.
- [2] نگاه کنید به Howard Stein, On the paradoxical time-structures of Godel, Journal of Philosophy of Science, Dec. 1970
- [3] Experimental simulation of closed timelike curves مقاله در ژورنال Nature (journal)
- [4] Simulating time travel: Doctor Who meets Professor Heisenberg

فصل ۶

مکانیک کوانتومی

مکانیک کوانتومی شاخه‌ای بنیادی از فیزیک نظری است که با پدیده‌های فیزیکی در مقیاس میکروسکوپی سر و کار دارد. در این مقیاس، کینش‌های فیزیکی در حد و اندازه‌های ثابت پلانک هستند. مقدار عددی ثابت پلانک نیز بسیار کوچک و برابر است با ۶.۶۲۶×۱۰^{-۳۴}

بنیادی‌ترین تفاوت مکانیک کوانتومی با مکانیک کلاسیک در قلمرو کوانتومی است که به ذرات در اندازه‌های اتمی و زیراتمی می‌پردازد. مکانیک کوانتومی بنیادی‌تر از مکانیک نیوتنی و الکترومغناطیس کلاسیک است، زیرا در مقیاس‌های اتمی و زیراتمی که این نظریه‌ها با شکست مواجه می‌شوند، می‌تواند با دقت زیادی بسیاری از پدیده‌ها را توصیف کند. مکانیک کوانتومی به همراه نسبیت پایه‌های فیزیک جدید را تشکیل می‌دهند.

مکانیک کوانتومی که به عنوان نظریه کوانتومی نیز شناخته شده است، شامل نظریه‌ای دربارهٔ ماده، تابش الکترومغناطیسی و برهمکنش میان ماده و تابش است.^[۱]

۱.۶ آشنایی

واژهٔ کوانتوم (به معنی «بسته» یا «دانه») در مکانیک کوانتومی از اینجا می‌آید که این نظریه به بعضی از کمیت‌های فیزیکی (مانند انرژی یک اتم در حال سکون) تحت شرایط خاص، مقدارهای گسسته‌ای نسبت می‌دهد. پایه‌های مکانیک کوانتومی در نیمهٔ اول قرن بیستم به وسیلهٔ ورنر هایزنبرگ، ماکس پلانک، آلبرت اینشتین، لویی دوبروی، نیلز بور، اروین شرودینگر، ماکس بورن، جان فون نویمان، پاول دیراک، ولفگانگ پاولی و دیگران ساخته شد. بعضی از جنبه‌های بنیادی این نظریه هنوز هم در حال پیشرفت است.

در ابتدای قرن بیستم، کشفیات و تجربه‌های زیادی نشان می‌دادند که در مقیاس اتمی نظریه‌های کلاسیک نمی‌توانند توصیف کاملی از پدیده‌ها ارائه دهند. وجود همین نارسایی‌ها موجب نخستین ایده‌ها و ابداع‌ها در مسیر ایجاد نظریه کوانتومی شدند. بعنوان یکی از مثال‌های بسیار مشهور اگر قرار بود مکانیک نیوتنی و الکترومغناطیس کلاسیک بر رفتار یک اتم حاکم باشند، الکترون‌ها بایستی به سرعت به سمت هسته اتم حرکت کرده و بر روی آن سقوط می‌کردند و در نتیجه اتم‌ها ناپایدار می‌شدند؛ ولی در دنیای واقعی الکترون‌ها در نواحی خاصی دور اتم‌ها باقی می‌مانند و چنین سقوطی مشاهده نمی‌شود. تلاش اولیه برای حل این تناقض توسط نیلز بور با پیشنهاد فرضیه اش دایر بر وجود مدارهای مانا رخ داد، که موفقیت‌هایی هم در توصیف طیف اتم هیدروژن داشت.

پدیدهٔ دیگری که در این مسیر جلب توجه می‌کرد، مطالعه رفتار امواج الکترومغناطیسی مانند نور در برهمکنش با ماده بودند. ماکس پلانک در سال ۱۹۰۰ هنگام مطالعه بر روی تابش جسم سیاه پیشنهاد کرد که برای توصیف صحیح مسئله تابش جسم سیاه، می‌توان انرژی این امواج را به شکل بسته‌های کوچکی (کوانتا یا کوانتوم) در نظر گرفت. آلبرت اینشتین از این فکر بهره برد و نشان داد که امواجی مثل نور را می‌توان با ذره‌ای به نام فوتون که انرژی‌اش به بسامد موج بستگی دارد توصیف کرد.

$$E = h\nu$$

در ادامه، با نظریه دوبروی دایر بر امکان توصیف حرکت ذرات به وسیله امواج، این نظریه‌ها به دیدگاهی به نام دوگانگی موج-ذره برای ذرات و امواج الکترومغناطیسی منجر شدند که برطبق آن، ذرات دو نوع رفتار (موجی و ذره‌ای) را از خود نشان می‌دهند. نظریه کوانتوم در ابتدا با کشف نظری فوتون توسط «ماکس پلانک» در ۱۹۰۰ م آغاز شد و با کارهای «نیلز بور» به پیشرفت چشمگیری رسید. گرچه هنوز نظریه منسجمی نبود بلکه مجموعه‌ای بود از فرضیات، اصول و قضایا و دستورالعمل‌های محاسبه‌ای. در واقع هر مسئله کوانتومی را ابتدا به روش مکانیک کلاسیک حل می‌کردند و سپس جواب را یا با شرایط کوانتومی وفق می‌دادند یا با اصل تطابق به زبان کوانتومی درمی‌آوردند. به عبارت دیگر تلاش‌ها بیشتر بر اساس حدس‌های زیرکانه بود تا استدلال‌های منطقی

تلاش‌ها برای تبیین تناقضات و ایجاد رهیافت‌های جدید، منجر به تکوین ساختار جدیدی موسوم به مکانیک کوانتومی شد که توسط دو فرمولبندی جداگانه (که بعداً معلوم شد هم‌ارزند) موسوم به مکانیک ماتریسی (عمدتاً توسط هایزنبرگ) و مکانیک موجی (بیشتر توسط شرودینگر) توصیف می‌شد. به عنوان مثال، ایدهٔ توصیف ذرات با امواج، مولد ابداع مفهوم بسته‌های موج همبسته ذرات شد. به نوبهٔ خود، تلاش برای یافتن معادلات حاکم بر تحول زمانی این بسته‌های موج به معادله موج یا معادله شرودینگر منتهی شد.

در تعبیری که توصیف شرودینگر از مکانیک کوانتومی بدست می‌دهد، حالت هر سیستم فیزیکی در هر لحظه به وسیلهٔ یک تابع موج مختلط توصیف می‌شود. چون تابع موج یک کمیت مختلط است، خود مستقیماً مبین یک کمیت فیزیکی نیست، اما با استفاده از این تابع می‌توان احتمال بدست آمدن مقادیر مختلف حاصل از اندازه‌گیری یک کمیت فیزیکی را پیش‌بینی کرد. در حقیقت این احتمال با ضریبی از مربع قدرمطلق تابع موج (که کمیت اخیر حقیقی است) برابر است. به‌عنوان مثال از کاربرد این تابع احتمال، با آن می‌توان احتمال یافتن الکترون در ناحیهٔ خاصی در اطراف هسته در یک زمان مشخص؛ یا احتمال بدست آمدن مقدار خاصی برای کمیت تکانه زاویه‌ای سیستم را محاسبه کرد. یا مثلاً به کمک تابع موج و توزیع احتمال بدست آمده از آن، می‌توان محتمل‌ترین مکان (یا مکان‌های) حضور یک ذره در فضا را یافت (که در مورد الکترون‌های یک اتم گاهی به آن آربیتال می‌گویند). البته معنی این حرف این نیست که الکترون در تمام ناحیه پخش شده‌است، و الکترون در یک ناحیه از فضا یا هست و یا نیست.

در مکانیک کلاسیک پیش‌بینی تحول زمانی مقادیر کمیت‌ها و اندازه‌گیری مقادیر کمیت‌ها در نظریه با هر دقت دلخواه ممکن است و تنها محدودیت موجود، خطای متعارف آزمایش و آزمایشگر، یا فقدان داده‌های اولیه کافی است. اما در مکانیک کوانتومی فرایند اندازه‌گیری یک محدودیت ذاتی به همراه خود دارد. در واقع نمی‌توان برخی کمیت‌ها (کمیت‌های مزدوج) را هم‌زمان و با هر دقت دلخواه اندازه‌گیری کرد؛ مانند مکان و تکانه. اندازه‌گیری دقیق تر هریک از این کمیت‌ها، منجر به از دست رفتن هرچه بیشتر داده‌های مربوط به کمیت دیگر می‌شود. این مفهوم که به اصل عدم قطعیت هایزنبرگ مشهور است، از مفاهیم بسیار مهم در مکانیک کوانتومی بوده و با مفهوم بنیادین «تأثیر فرایند اندازه‌گیری بر حالت سیستم» که از ابداعات اختصاصی مکانیک کوانتومی (در برابر مکانیک کلاسیک است) همبسته است.

۴.۶ کوشش برای نظریه وحدت یافته

وقتی می‌خواهیم مکانیک کوانتومی را با نظریه نسبیت عام (که توصیف‌گر فضا-زمان در حضور گرانش است) ترکیب کنیم، به ناسازگاری‌هایی برمی‌خوریم که این کار را ناممکن می‌کند. حل این ناسازگاری‌ها هدف بزرگ فیزیکدانان قرن بیستم و بیست‌ویکم است. فیزیکدانان بزرگی همچون استیون هاوکینگ در راه رسیدن به نظریه وحدت یافته نهایی تلاش می‌کنند؛ نظریه‌ای که نه تنها مدل‌های مختلف فیزیک زیراتمی را یکی کند، بلکه چهار نیروی بنیادی طبیعت - نیروی قوی، نیروی ضعیف، الکترومغناطیس و گرانش - را نیز به شکل جلوه‌های مختلفی از یک نیرو یا پدیده نشان دهد.

توصیف مکانیک کوانتومی از رفتار سامانه‌های فیزیکی اهمیت زیادی دارد، و بسیاری از شاخه‌های دیگر فیزیک و شیمی از مکانیک کوانتومی به عنوان چهارچوب خود استفاده می‌کنند؛ مانند فیزیک ماده چگال، فیزیک حالت جامد، فیزیک اتمی، فیزیک مولکولی، شیمی محاسباتی، شیمی کوانتومی، فیزیک ذرات بنیادی، و فیزیک هسته‌ای. مکانیک کوانتومی علاوه بر این که دنیای ذرات بسیار ریز را توصیف می‌کند، برای توضیح برخی از پدیده‌های بزرگ‌مقیاس (ماکروسکوپی) هم کاربرد دارد، مانند ابررسانایی و ابرشاره. همچنین کاربردهای وسیعی در حوزه فناوری‌های کاربردی، بر مفاهیم و دستاوردهای مکانیک کوانتومی استوار هستند.

۵.۶ مکانیک کوانتومی و زیست‌شناسی

تحقیقات چند مؤسسه در آمریکا و هلند نشان داده است که بسیاری از فرایندهای زیستی از مکانیک کوانتومی بهره می‌برند. قبلاً تصور می‌شد فتوسنتز گیاهان فرایندی بر پایه بیوشیمی است اما تحقیقات پروفیسور فلمینگ و همکارانش در دانشگاه برکلی و دانشگاه واشنگتن در سنت لوییس به کشف یک مرحله کلیدی از فرایند فتوسنتز منجر شده که بر مکانیک کوانتومی استوار است. همچنین پژوهش‌های کریستوفر آلمن، پژوهشگری از مؤسسه دانش نانوی کاولی در هلند، حاکی از آن است که نحوه کارکرد سلول‌های عصبی خصوصاً در مغز که تا مدت‌ها فرایندی بر پایه فعالیت‌های الکتریکی و بیوشیمی پنداشته می‌شد و محل بحث ساختارگرایان و ماتریالیست‌ها و زیست‌شناس‌ها بود، شامل سیستم‌های کوانتومی بسیاری است. این پژوهش‌ها نشان می‌دهد که سلول عصبی یک حلزون دریایی می‌تواند از نیروهای کوانتومی برای پردازش اطلاعات استفاده کند. در انسان نیز، فیزیک کوانتومی احتمالاً در فرایند تفکر دخیل است.^[3]

۲.۶ مکتب‌های فکری مکانیک کوانتومی

نظریه‌های گوناگونی درباره مسئله اندازه‌گیری در مکانیک کوانتومی مطرح شده است. از این میان، سه دیدگاه شایان ذکرند: دیدگاه واقع‌گرایانه که اینشتین طرفدار آن بود، دیدگاه سنتی که به تفسیر کپنهاگی هم معروف است و نیلز بور از آن حمایت می‌کرد، دیدگاه ندانم‌گرایانه یا آگنوستیک که طرفداران آن از اظهارنظر به طور کلی خودداری می‌کردند.^[2]

۳.۶ مکانیک کوانتومی و فیزیک کلاسیک

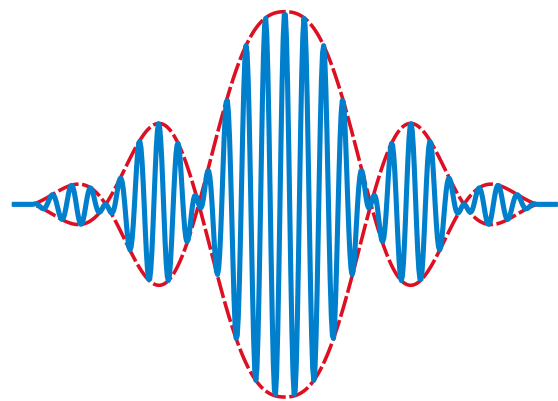
نوشتار اصلی: گربه شرودینگر
نوشتار اصلی: آزمایش دوشکاف
اثرات و پدیده‌هایی که در مکانیک کوانتومی و نسبیت پیش‌بینی می‌شوند،

۶.۶ جستارهای وابسته

- نظریه عمل‌گرها
- شیمی کوانتوم
- تونل‌زنی کوانتومی
- اصل عدم قطعیت
- مکانیک نسبیتی
- فیزیک امواج
- مکانیک کلاسیک
- نظریه میدان‌های کوانتومی
- نظریه آشوب
- کوانتیزه‌کردن

۷.۶ منابع

- David J. Griffiths, *Introduction to Quantum Mechanics*, Prentice Hall, 1995. ISBN 0-13-124405-1
- Shankar, R. , *Principles of Quantum Mechanics*, 2nd edition (Plenum, 1994)



نمایش دوگانگی موج-ذره با یک بسته موج فوتونی

فقط برای اجسام بسیار ریز یا در سرعت‌های بسیار بالا آشکار می‌شوند. تقریباً همه پدیده‌هایی که انسان در زندگی روزمره با آن‌ها سروکار دارد به طور کاملاً دقیقی توسط فیزیک نیوتنی قابل پیش‌بینی است.

در مقادیر بسیار کم ماده، یا در انرژی‌های بسیار پایین، مکانیک کوانتومی اثرهایی را پیش‌بینی می‌کند که فیزیک کلاسیک از پیش‌بینی آن ناتوان است؛ ولی اگر مقدار ماده یا سطح انرژی را افزایش دهیم، به حدی می‌رسیم که می‌توانیم قوانین فیزیک کلاسیک را بدون این که خطای قابل ملاحظه‌ای مرتکب شده باشیم، برای توصیف پدیده‌ها به کار ببریم. به این «حد» که در آن قوانین فیزیک کلاسیک (که معمولاً ساده‌تر هستند) می‌توانند به جای مکانیک کوانتومی پدیده‌ها را به درستی توصیف کنند، حد کلاسیک گفته می‌شود.

• Sakurai, J. J. (1967). *Advanced Quantum Mechanics*. Addison Wesley. ISBN 0-201-06710-2.

[1] هالیدی، دیوید. رزنیگ، رابرت. واکر، جرج. -مبانی فیزیک. تهران، انتشارات مبتکران، 1386. ISBN 978-964-395-951-7

[2] گریفیث، دیوید. جی، آشنایی با مکانیک کوانتومی، ویراست دوم، ترجمه حمیدرضا مشفق، سعید واشهری، فرشاد نژادستاری، تهران، نشر کتاب دانشگاهی، 1388

[3] آیا افکار ما توسط مکانیک کوانتم کنترل می‌شود؟ ترجمه‌ای از مقاله مجله DiscoverMagazine.com , January 13, 2009

فصل ۷

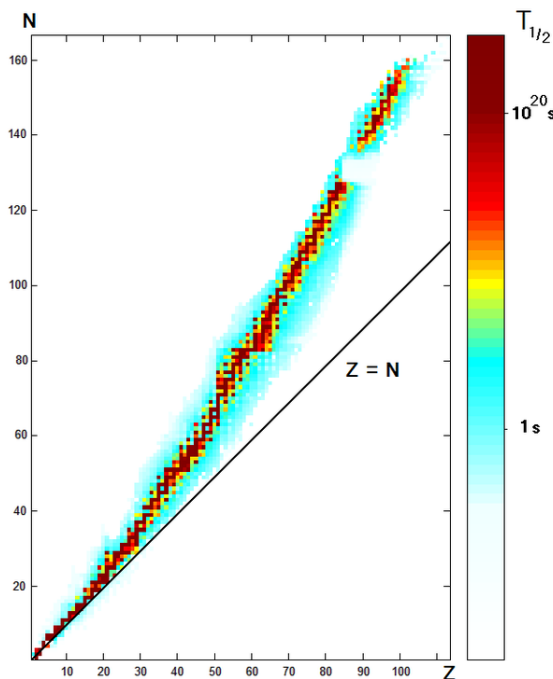
واپاشی هسته‌ای

گاهی این انرژی را می‌توان به صورت نیروی هسته‌ای مهار کرد یا می‌تواند به وسیله آلودگی پرتوزایی در زیست بوم رها شود که بسیار مخاطره آمیز خواهد بود.

هسته‌هایی که ترکیب نوترونها و پروتونهایشان پایدار نیست دست‌خوش واپاشی می‌شوند. این گونه هسته‌ها به طور ذاتی ناپایدار بوده و با گذشت زمان تغییر نموده و به هسته‌های جدیدی تبدیل می‌شوند. به این فرایند شکافت هسته‌ای می‌گویند که ضمن تبدیل به هسته یا هسته‌هایی کوچک تر و پایدارتر پرتوهای پرنرژی به اطراف پراکنده می‌شود. چنین هسته‌ای را پرتوزا یا رادیواکتیو می‌گویند. ناپایداری هسته می‌تواند به دلیل فزونی نوترون‌ها، پروتون‌ها و یا هر دو باشد.

۲.۷ پایداری و ناپایداری ایزوتوپ‌ها

اگر ۱۳ پروتون را با ۱۴ نوترون ترکیب کنیم هسته‌ای خواهیم داشت که اگر ۱۳ الکترون در اطراف آن گردش کنند یک اتم آلومینیوم را می‌سازند. حال اگر میلیاردها از این اتم‌ها را در کنار هم قرار دهیم فلز آلومینیوم (AL_{27}) را داریم که با آن انواع وسایل نظیر قوطی نوشابه و در و پنجره و غیره... را می‌توان ساخت.



واپاشی هسته‌ای (فروپاشی هسته‌ای) به مجموعه فرایندهای مختلفی گفته می‌شود که در هسته‌های ناپایدار پرتوزا رخ می‌دهد و منجر به تولید ذرات زیراتمی می‌شود. به این ذرات زیراتمی که از واپاشی تدریجی اتم‌های ناپایدار حاصل می‌شوند، پرتوهای رادیواکتیو می‌گویند. در اثر واپاشی هسته‌ای پس از یک زمان تصادفی، هسته‌های بزرگ به هسته‌های کوچک‌تر و معمولاً پایدارتر تجزیه می‌شوند و ماده اولیه به تدریج از بین می‌رود. البته جرم مواد جدید تنها به میزان اندکی کمتر از ماده اولیه خواهد بود و انرژی آزاد می‌شود. این فرایند یک پیشامد است، یعنی نمی‌توان زمان دقیق واپاشی یک اتم مشخص را پیش‌بینی کرد، البته نیمه‌عمر آن قابل تعیین است.

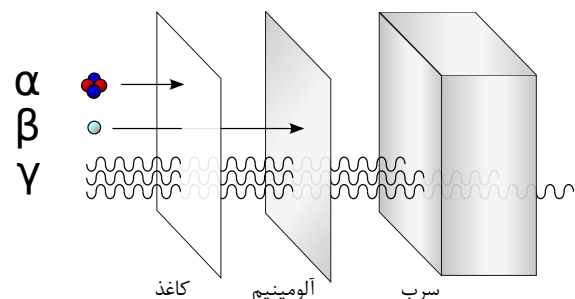
در مانسنگی یا الکتروپینامیک کلاسیک انتظار داریم که باید فقط ذرات باردار تشعشع کنند. در واقع گذارهای نوترونی نیز می‌توانند تولید تشعشع کنند زیرا اولا پروتون‌ها در هسته مجبور به تغییر مکان هستند تا مرکز جرم ثابت بماند، ثانياً نوترون‌ها نیز مانند پروتون‌ها، به علت داشتن گشتاورهای مغناطیسی تشعشع می‌کند.^[1]

۱.۷ دسته‌بندی واپاشی‌های هسته‌ای

● دسته اول: واپاشی آلفا که یک ذره آلفا (هسته هلیوم، شامل دو پروتون و دو نوترون) را گسیل می‌کند.

● دسته دوم: واپاشی بتا که یک ذره بتا (الکترون یا پوزیترون) گسیل می‌کند.

● دسته سوم: واپاشی گاما که فوتون (موج الکترومغناطیسی) گسیل می‌کند.



در مواد پرتوزا یا رادیواکتیو فرایند پرتوزایی رخ می‌دهد.

پرتوزایی (رادیواکتیویته) به فرایندی گفته می‌شود که به وسیله آن هسته‌های ناپایدار اتمی دچار واپاشی هسته‌ای می‌شوند. چنین فرایندی معمولاً یک پرتو یون ساز با مقدار بالایی انرژی (کار مایه) پدید می‌آورد.

- مهندسی هسته‌ای
- پزشکی هسته‌ای
- داروسازی هسته‌ای

• فیزیک هسته‌ای

• انرژی اتمی

• واپاشی ذره

• فرایند پواسون

• پرتو

• پرتودرمانی

• آلودگی هسته‌ای

• Radioactivity in biology

• زمان سنجی رادیومتری

• ایزوتوپ پرتوزا

• تعادل پایدار

• تعادل گذرا

۴.۷ منابع

[1] مبانی فیزیک هسته‌ای. والتر می یرهوف. ویرایش هفتم. ترجمه: محمدفرهاد رحیمی. انتشارات دانشگاه فردوسی مشهد. شابک: 964-5782-07-4

- گیائی نژاد، مهدی، و مهران کاتوزی. درس عمومی حفاظت در برابر اشعه، ویژه آموزش دوره‌های مقدماتی - کتاب (۱)، چاپ چهارم، تهران: نشر دربید، ۱۳۸۵. ISBN 964-06-2857-3

۵.۷ پیوند به بیرون

اگر همین آلومینیوم را در شیشه‌ای قرار دهیم و چند میلیون سال دیگر به سراغ آن بیاییم این آلومینیوم هیچ تغییری نخواهد داشت. یعنی آلومینیوم عنصری پایدار است. تا حدود یک قرن پیش تصور بر این بود که تمام عناصر پایدار هستند.

بسیاری از اتم‌ها در اشکال متفاوتی دیده می‌شوند. برای مثال مس دو شکل پایدار دارد: مس ۶۳ و مس ۶۵. به این دو نوع ایزوتوپ گفته می‌شود. هر دوی آنها ۲۹ پروتون (عدد اتمی آنها یکسان است). دارند اما چون در جرم اتمی ۲ واحد فرق دارند به سادگی می‌توان فهمید که تعداد نوترون‌های اولی ۳۴ و دیگری ۳۶ است. هر دوی آنها پایدار هستند. در حدود یک قرن پیش دانشمندان متوجه شدند که بعضی عناصر ایزوتوپ‌هایی دارند که رادیواکتیو (پرتوزا) هستند. مثلاً هیدروژن را در نظر بگیرید، درباره این عنصر سه ایزوتوپ شناخته شده‌است:

۱. هیدروژن معمولی (H_1) در هسته اتم خود یک پروتون دارد و بدون هیچ نوترونی. البته واضح است چون نیازی نیست تا خاصیت چسبندگی خود را نشان دهد چرا که پروتون دیگری وجود ندارد.

۲. هیدروژن دوتریم (D) که یک پروتون و یک نوترون دارد و در طبیعت بسیار نادر است. اگرچه عمل آن بسیار شبیه هیدروژن نوع اول است برای مثال می‌توان از آن آب ساخت اما میزان بالای آن سمی است. هر دو ایزوتوپ یاد شده پایدار هستند اما ایزوتوپ دیگری از هیدروژن وجود دارد که ناپایدار است!

۳. ایزوتوپ سوم هیدروژن (تری‌تیوم) (T) که شامل دو نوترون و یک پروتون است. همان طور که قبلاً گفته شد این نوع هیدروژن ناپایدار است. یعنی اگر با هم ظرفی برداریم و این بار درون آن را با این نوع از هیدروژن پر کنیم و یک میلیون سال دیگر به سراغ آن بیاییم متوجه می‌شویم که دیگر هیدروژنی نداریم و همه آن به هلیم ۳ تبدیل شده‌است (۲ پروتون و یک نوترون).

می‌توان گفت که هر چه هسته اتم سنگین‌تر شود تعداد ایزوتوپ‌ها بیشتر می‌شود و هر چه تعداد ایزوتوپ‌ها بیشتر شود امکان بوجود آمدن هسته‌های ناپایدار نیز بیشتر خواهد شد و در نتیجه احتمال وجود نوع رادیواکتیو نیز بیشتر می‌شود.

در طبیعت عناصر خاصی را می‌توان یافت که همه ایزوتوپ‌هایشان رادیواکتیو باشند. برای مثال دو عنصر سنگین اورانیوم و پلوتونیوم که در بمب‌ها و نیروگاه‌های هسته‌ای از آنها استفاده می‌شود.

۳.۷ جستارهای وابسته

• Actinides in the environment

• تابش زمینه

• پرتوساخت (رادیوسنتز)

• حادثه چرنوبیل

• Crimes involving radioactive substances

• زنجیره واپاشی

• Fallout shelter

• نیمه‌عمر

• Lists of nuclear disasters and radioactive incidents

• National Council on Radiation Protection and Measurements

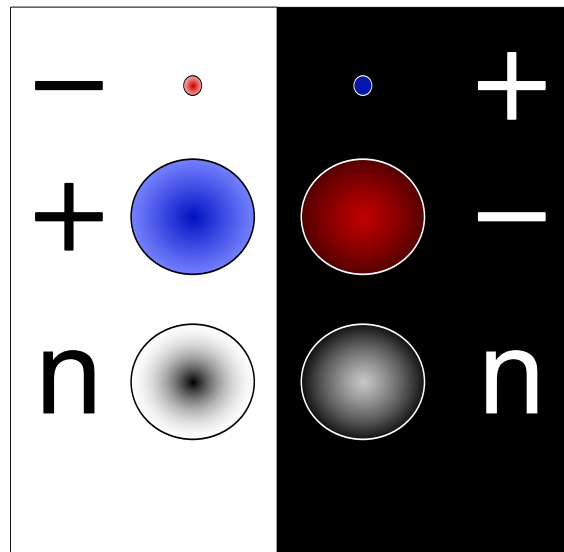
فصل ۸

پادماده

۱۹۳۲ ضد الکترون و یا پوزیترون را کشف کرد. پس از اکتشاف دیراک و اندرسون، سرانجام در اکتبر ۱۹۵۵ ایی لوگسler، فیزیکدان اهل ایتالیا توانست در شتاب دهنده بیوترون در آزمایشگاهی در کالیفرنیا، پاد پروتون و یک سال بعد ۱۹۵۶ پاد نوترون را آشکار کند. اما دانشمندان پارا فراتر گذاشته و در پی ساخت پاد اتم و پاد مولکول برآمدند.

۲.۸ محل یافت پادماده

پادماده به طور طبیعی در زمین یافت نمی‌شود، به غیر از خیلی به ندرت و با عمر بسیار کوتاهی که از نتیجه تباهی هسته‌ای و پرتوهای کیهانی به وجود می‌آیند. زیرا پادماده‌هایی که در زمین و خارج از آزمایشگاه‌های خاصی موجود می‌باشند با برخورد با مواد معمولی، نابود می‌شوند. پادذره‌ها و بعضی از پادماده‌های پایدار (مانند ضد هیدروژن)، می‌توانند به مقدار بسیار اندکی تولید شوند، ولی نه به اندازه‌ای که تمام خواص فیزیک-نظری آنها را مورد آزمایش بتوان قرار داد.



۳.۸ طول عمر پادماده

پادماده (به انگلیسی: Antimatter) مانند ماده از ذراتی به نام ضدذره تشکیل شده‌است، که با ذرات معمولی فرق دارند. در ضد ماده بار هسته منفی و بار ذرات مداری مثبت است که معکوس ماده‌است. به عنوان مثال ذره‌ای به نام پوزیترون وجود دارد که تمام ویژگی‌هایش به جز بار الکتریکی مشابه الکترون است. پوزیترون حامل بار مثبت است در حالی که بار الکترون منفی است. (البته نباید پوزیترون را با ذره باردار مثبت دیگر، یعنی پروتون، اشتباه گرفت. پروتون تقریباً ۲۰۰۰ بار سنگین تر از الکترون است. به علاوه پروتون دارای زیر ساختارهایی است به نام کوارک. از طرف دیگر، پوزیترون هم جرم الکترون است و تا آنجا که می‌دانیم پوزیترون و الکترون هیچ کدام دارای زیر ساختار نیستند) فیزیکدانان ذرات، پوزیترون را پادماده الکترون می‌دانند.

در برخورد انرژی بالا، بخشی از انرژی جنبشی به ماده تبدیل می‌شود و می‌توان با انتخاب مناسب ذرات برخورد کننده، پادذرات را تولید کرد.

به دلایلی که خیلی روشن نیست، عدم تقارن عظیمی بین ماده و پادماده عالم اطراف ما وجود دارد. به بیان ساده‌تر، مقدار زیادی ماده می‌بینیم ولی هیچ پادماده قابل توجهی مشاهده نمی‌شود.

۴.۸ هزینه

با بهای تخمینی ۲۵ میلیارد دلار برای هر گرم پوزیترون و ۶۲٫۵ تریلیون دلار برای هر گرم پادهیدروژن، گفته می‌شود که پادماده پرهزینه‌ترین ماده موجود می‌باشد. در نتیجه می‌توان گفت که گران‌ترین ماده روی زمین، پاد ماده است که حتی از چندین تریلیون کیلوگرم الماس هم بیشتر ارزش دارد.

۱.۸ تاریخچه

۵.۸ پادماده در فرهنگ مردمی

به عنوان نمونه در فیلم فرشتگان و شیاطین و کتاب آن به موضوع پادماده اشاره شده‌است.

دیراک فیزیکدان معروف در ۱۹۲۸ چنین استنباط کرد که همه مواد می‌توانند در دو حالت وجود داشته باشند. وی در آغاز نظریه خود را در مورد الکترون بیان کرد و اظهار داشت که باید ذراتی به نام ضد الکترون هم وجود داشته باشد. این گفته تحقق یافت و فیزیکدان آمریکایی کارل اندرسون در

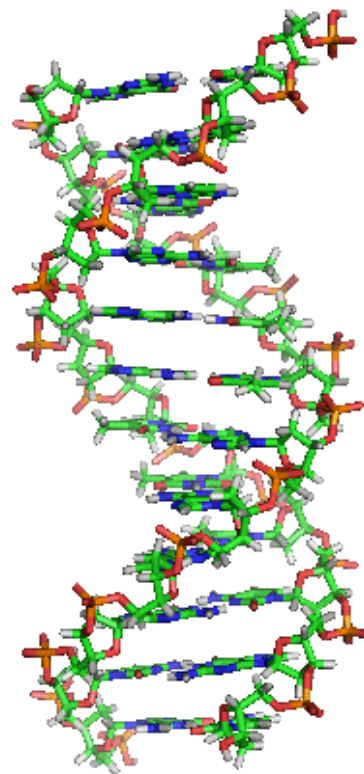
۶.۸ منابع

- Tipler, Paul; Ralph Llewellyn (2002). *Modern Physics*, 4th ed. , W. H. Freeman. ISBN 0-7167-4345-0.
- Dieter B. Herrmann: Antimaterie. *Auf der Suche nach der Gegenwelt*. 2. Auflage. Beck, München 2004, ISBN 3-406-44504-7

فصل ۹

دی ان ای

شده که برای زندگی همه گونه‌های شناخته شده ضروری می‌باشد. اکثر مولکول دی ان ای از دو رشته پلیمری زیستی که به صورت حلقه دور هم پیچ خورده و به شکل یک مارپیچ دوگانه درآمده است. دو رشته دی ان ای به عنوان پلی نوکلئوتید شناخته شده، که از واحدهای ساده تری به نام نوکلئوتید ساخته شده است. هر نوکلئوتید از یک باز آلی، گوانین (G)، یا سیتوزین (C)، یا آدنین (A)، یا تیمین (T)، و از یک قند مونوساکاریدی به نام دئوکسی ریبوز و یک گروه فسفات تشکیل شده است. نوکلئوتیدها به وسیله پیوند کوالانسی به صورت زنجیره‌ای به هم متصل می‌شوند، نوکلئوتیدها از محل قند یک نوکلئوتید با فسفات نوکلئوتید دیگر پیوند ایجاد کرده و ساختاری شبیه ستون فقرات (رشته بلند) قند و فسفاتی را ایجاد می‌کنند.



۱.۹ کار دی ان ای در سلول‌ها

پیام‌های ژنتیکی موجودی در مولکول دنا در نهایت برای مواردی چون ساخت پروتئین و مولکول‌های آران ای یا رنا^[2] (RNA) در یاخته، مورد استفاده قرار می‌گیرد. قطعه‌هایی از دنا که پیام‌های ژنتیکی را با خود حمل می‌کنند ژن نامیده می‌شوند؛ ولی دنا توالی‌های دیگری نیز دارد که برای ساخت خود دنا یا تنظیم استفاده از اطلاعات ژنتیکی موجود در ژن، مورد استفاده قرار می‌گیرند. از لحاظ شیمیایی، دنا از دو رشته طولانی پلیمری با واحدهای ساختاری از جنس نوکلئوتید تشکیل شده است که شامل ستون‌هایی از گروه‌های قند و فسفات هستند. اتصال نوکلئوتیدها به هم در زنجیره توسط گروه‌های هیدروکسیل کربن ۳' قند و ۲' ریبوز است به این اتصال فسفودی استر می‌گویند؛ که در نهایت اسکلت دنا ساخته می‌شود. این دو رشته دنا با هم موازی هستند. مولکول‌های قند از طریق چهار نوع باز آلی به یکدیگر متصل می‌باشند. توالی این چهار باز آلی باعث رمزگذاری رشته ژنتیکی می‌شود که این رمزها برای ساخت اسید آمینه که واحدهای سازنده پروتئین می‌باشند مورد استفاده قرار می‌گیرد. این رمز ژنتیکی توسط مولکول رنا در مرحله برگردان خوانده می‌شود و برای ساخت اسید آمینه مورد استفاده قرار می‌گیرد. دنا در داخل یاخته به شکل سازه‌هایی به نام فام تن^[3] می‌باشد. دو نسخه از هر فام تن در زمان تقسیم یاخته ساخته می‌شود. فرایند تکثیر به دو نسخه را نسخه برداری دنا می‌نامند. فام تن در هوسته‌های^[4] (جانوران، گیاهان، قارچ‌ها، آغازیان) در بخشی به نام هسته یاخته قرار می‌گیرد در حالیکه در پیش هسته‌های^[5] (باکتری و آرکی‌ها) در سیتوپلاسم یاخته قرار دارد و جایگاه مشخصی ندارد. در داخل فام تن پروتئین‌های کروماتینی (کروماتین واحد سازنده دنا می‌باشد) مانند هیستون وجود دارد که وظیفه فشرده سازی دنا و تنظیم بیان ژنها را برعهده دارند. هیستونها تحت تأثیر عوامل گوناگون از جمله استیل‌اسیون یا دزاستیل‌اسیون هیستونی بسته یا باز می‌شوند و بدین ترتیب رونویسی از ژنهای ناحیه مربوط به آنها متوقف یا آغاز می‌شود.

ساختار DNA

دی ان ای (DNA) یا دنا^[1] سرنام عبارت **دئوکسی ریبونوکلئیک اسید** (به انگلیسی: Deoxyribonucleic acid) نوعی اسید نوکلئیک است که دارای دستورالعمل‌های ژنتیکی است که برای کارکرد و توسعه بیولوژیکی موجودات زنده و ویروس مورد استفاده قرار می‌گیرد. نقش اصلی مولکول دنا ذخیره سازی طولانی مدت اطلاعات ژنتیکی است. آزمایش‌هایی نظیر آزمایش گریفیت و آزمایش ایوری آزمایش‌هایی انقلابی و سرآغازی در شناسایی و مطالعه دنا، به عنوان ماده ژنتیک بودند. تا سال ۱۹۴۴ و انتشار نتایج آزمایش ایوری، این که کدام یک از مواد آلی درون سلول، ماده وراثتی است، مشخص نبود.

دی ان ای مولکولی است که دستورالعمل‌های ژنتیکی مورد استفاده در توسعه و عملکرد تمام موجودات زنده شناخته شده و بسیاری از ویروس‌ها را کدگذاری می‌کند. دی ان ای اسید نوکلئیکی است که شامل پروتئین و کربوهیدرات‌هاست. اسیدهای نوکلئیک از سه ماکرو مولکول اصلی تشکیل

۲.۹ ویژگی‌ها

بازسرشته شدن دنا موقعی ایجاد می‌شود که ۲ رشته‌ی واسرشته شده در شرایط مناسب دوباره به یکدیگر متصل شوند. یکی از دلایل ناهمگنی ژنی در هوهسته‌ها این است که بعد از واسرشته شدن با سرعت‌های متفاوتی به سمت باز سرشته شدن می‌روند بعضی بسیار سریع (این قطعه‌ها تعدادشان زیاد است) و بعضی بسیار کند هستند. (این قطعه‌ها تعدادشان کم است)

هیبریدشدگی به معنای این است که ۲ رشته از ۲ منبع مختلف به یکدیگر متصل شوند حتی یکی از رشته‌ها می‌تواند رنا باشد.

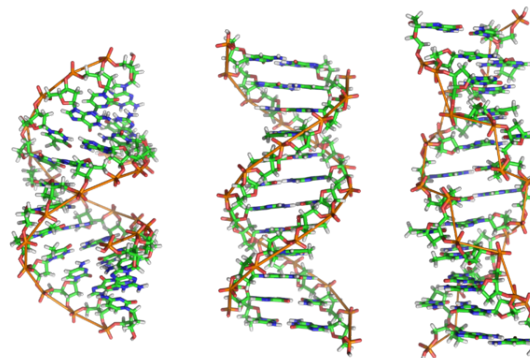
افزایش جذب حالتی است که در آن میزان جذب نوری دنا افزایش می‌یابد. بیشترین میزان جذب در ۲۶۰ nm دیده می‌شود که در آن بازها مسئول هستند. با باز سرشته شدن دنا پدیده **کاهش جذب** رخ خواهد داد. کاهش جذب به علت روی هم قرار گیری بازهاست. اگر دمای محلول دنا تا دمای آب جوش بالا رود چگالی نوری که جذب می‌شود به طور قابل توجهی بالا می‌رود. **نقطه ذوب دنا** که آن را با T_m نشان می‌دهند دمایی است که در آن دنا مشابه یخ ذوب می‌شود و از ساختار نظم دار مارپیچ به ساختار تک رشته‌ای با نظم کمتر تبدیل می‌شود. نقطه ذوب بستگی به درصد C:G و قدرت یونی محلول دارد؛ که هر چه بیشتر باشد دما هم افزایش می‌یابد ذوب شدن پدیده‌ای تعاونی است.

ابرمارپیچ مثبت و منفی: میزان ابرمارپیچ با اندازه‌گیری اختلاف بین LK و LK محاسبه می‌شود که تفاوت اتصال نامیده می‌شود. اگر مقدار آن برای یک $cccDNA$ به طور معنی داری غیر از صفر باشد این دنا تحت فشار پیچشی قرار دارد؛ و گفته می‌شود این مولکول دارای ابر مارپیچ منفی است و بر عکس اگر $LK > LK$ باشد دارای ابر مارپیچ منفی است. ۶

دنا پلیمری است که از رشته‌های تکرار شونده شامل واحدهای سازنده‌ای از جنس نوکلئوتید می‌باشد. طول رشته زنجیرهای دنا ۲۲ تا ۲۶ آنگستروم (۲٫۲ تا ۲٫۶ نانومتر) و عرض آن ۳٫۳ آنگستروم یا (۰٫۳۳ نانومتر) می‌باشد اگرچه هر واحد تکرار شونده دنا بسیار کوچک می‌باشد ولی رشته پلیمری دنا ممکن است از میلیون‌ها نوکلئوتید تشکیل شده باشد. برای مثال بزرگترین فام تن انسان، فام تن شماره یک دارای طولی به اندازه ۲۲۰ میلیون باز آلی مکمل می‌باشد. ۳ دو رشته سازنده دنا ساختار در هم پیچیده‌ای همچون درخت انگور به شکل مارپیچ دارند. یک باز آلی پیوند داده شده به قند نوکلئوزید گفته می‌شود و اگر نوکلئوزید از طریق باز خود به گروه فسفات متصل شود نوکلئوتید تشکیل می‌شود. اگر چندین نوکلئوتید با یکدیگر پیوند داده شده باشند به طور مثال در دنا به آن پلی نوکلئوتید گفته می‌شود. ۴.

رشته‌های دنا از واحدهایی متشکل از قند و گروه فسفات می‌باشد که به صورت متناوب و تکراری در طول رشته قرار گرفتند. ۵ قند مورد استفاده در دنا دئوکسی ریبوز که نوعی پنتوز (قند پنج کربنی) است تشکیل شده است. قندها توسط گروه‌های فسفری به یکدیگر پیوند داده شده‌اند.

دنا می‌تواند در شرایط متفاوت به یکی از حالت‌های زیر دیده شود.



از راست به چپ به ترتیب A و B و Z

حالت B فرم عادی داخل یاخته است.

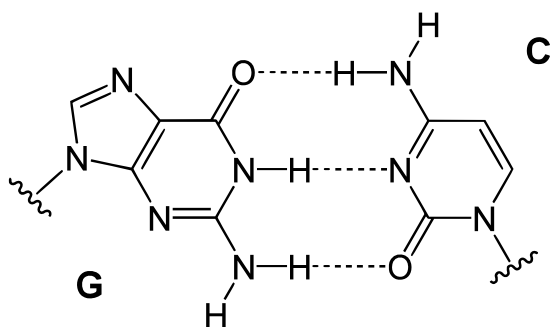
دنا یک **مارپیچ راست گردان** است. اگر دست راست را بالای مولکول دنا قرار داده به طوریکه انگشت شصت به سمت بالا و در طول محور بلند مارپیچ باشند و انگشتان شیارها را در مارپیچ دنبال کنند یکی از رشته‌ها را در جهتی دنبال کنید که انگشت شصت شما اشاره می‌کند هر جفت باز نسبت به قبلی ۳۶ درجه دور می‌زند.

جابه‌جایی شدگی باز موقعی رخ می‌دهد که یک باز از زنجیره خارج شود. این امر باعث متیله شدن باز یا حذف بازهای آسیب دیده می‌شود. به نظر می‌رسد زی مایه دخیل در نوترکیبی هم ساخت^[6] و هم چنین ترمیم دنا برای یافتن مکان‌های هم ساخت یا آسیب دیده شروع به بررسی مولکول دنا و خارج کردن تک تک بازها می‌کنند. این عمل انرژی زیادی نیاز ندارد.

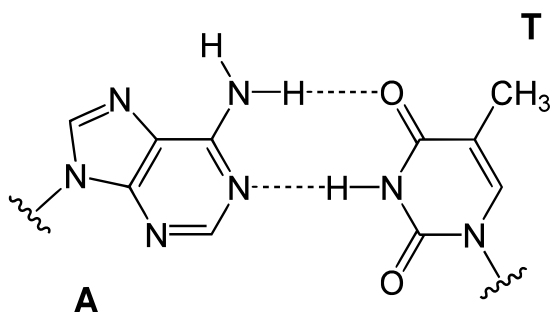
چرخش پروانه‌ای حالتی است که باز نسبت به محور بزرگ می‌چرخد. به طوریکه ۲ عضو شرکت کننده در یک جفت باز، همیشه به طور دقیق در یک صفحه نیستند؛ آن‌ها می‌توانند یک نظم چرخش پروانه‌ای به خود بگیرند در این نظم ۲ باز در جهت عکس هم حول محور بزرگ جفت باز چرخیده و به جفت باز ویژگی شبیه پروانه می‌دهد.

واسرشته شدن دنا حالتی است که وقتی دنا در دمایی بیش از دمای بدن قرار می‌گیرد یا در PH بالا قرار دارد حاصل می‌شود و نیروهای ضعیف بین ۲ رشته از بین رفته و ۲ رشته باز می‌شود. ۲ رشته دنا از آن جایی که به وسیله نیروهای ضعیف به هم وصل هستند با حرارت دادن محلول تا دمایی بیش از دمای بدن یا تحت شرایط پی هاش بالا می‌تواند واسرشته شود.

۱.۲.۹ باز آلی



سیتوزین-گوانین



آدنین-تیمیندر

دانوکلئوتید هر رشته از طریق بازهای آلی در هر دو رشته به یکدیگر متصل می‌شوند. این اتصال بین دو باز آلی نوکلئوتیدهای دو طرف رشته می‌باشد به این بازهای متصل به هم باز مکمل گفته می‌شود. بازهای آلی به چهار شکل آدنین، باز تیمین، باز سیتوزین و باز گوانین

- [4] این واژه مطابق با واژگان گردآوری شده فرهنگستان زبان و ادب فارسی بر گردان یوکاریوت است.
- [5] این واژه مطابق با واژگان گردآوری شده فرهنگستان زبان و ادب فارسی بر گردان پروکاریوت است.
- [6] این واژه مطابق با واژگان گردآوری شده فرهنگستان زبان و ادب فارسی بر گردان همولوگ است.
- [7] کتاب اصول زیست‌شناسی و ژنتیک (دانشگاه آزاد) مؤلفین: سید محمود طباطبایی - محمد رضا عبداللهی

1Alberts, Bruce; Alexander Johnson, Julian Lewis, Martin Raff, Keith Roberts, and Peter Walters (2002). *Molecular Biology of the Cell; Fourth Edition*. New York and London: Garland Science. ISBN 0-8153-3218-1

2Mandelkern M, Elias J, Eden D, Crothers D. (۱۹۸۱) «The dimensions of DNA in solution». *J Mol Biol* ۱۵۲ (۱): ۶۱-۱۵۳ doi:۱۰.۱۰۱۶/۰۰۲۲۸۳۶(۸۱)۹۰۰۹۹۰۱. PMID 733890

3Gregory S, et al. (۲۰۰۶) «The DNA sequence and biological annotation of human chromosome Nature ۴۴۱ (۷۰۹۱): ۲۱۱-۳۱۵ doi:10.1038/nature04727. PMID 16710414

4http://www.chem.qmul.ac.uk/iupac/misc/naabb.html
Abbreviations and Symbols for Nucleic Acids, Polynucleotides and their Constituents|IUPAC-IUB Commission on Biochemical Nomenclature (CBN), Accessed 0۳ ژانویه ۲۰۰۶

5Ghosh A, Bansal M. (۲۰۰۳) «A glossary of DNA structures from A to Z». *Acta Crystallogr D Biol Crystallogr* 59 (Pt :4): ۶۲۰-۶۲۰. doi:10.1107/S0907444903003251. PMID 12657780

ژنتیک مولکولی واتسون، نویسنده جیمز واتسون و دیگران، گروه مترجمین خانه زیست‌شناسی، ناشر خانه زیست‌شناسی، چاپ اول

7Ponnuswamy P, Gromiha M. (۱۹۹۴) «On the conformational stability of oligonucleotide duplexes and tRNA molecules». *J Theor Biol* ۱۶۹ (۴): ۳۲۱-۳۲۹ doi:10.1006/jtbi.1994.1163. PMID 7526075

8Clausen-Schaumann H, Rief M, Tolksdorf C, Gaub H (۲۰۰۰) «Mechanical stability of single DNA molecules *Biophys J* ۷۸ (۴): ۲۰۰۷-۲۰۱۹ PMID 10733978

9Chalikian T, Vliker J, Plum G, Breslauer K (۱۹۹۹) «A more unified picture for the thermodynamics of nucleic acid duplex melting: a characterization by calorimetric and volumetric techniques *Proc Natl Acad Sci USA* ۹۶ (۱۴): ۷۸۵۳-۷۸۵۸ doi:10.1073/pnas.96.14.7853. PMID 10393911

- سال سوم متوسطه، نظری (رشته علوم زیست‌شناسی و آزمایشگاه)، دفتر برنامه‌ریزی و تألیف کتب درسی (۱۳۹۱ تجربی)، چاپ دوازدهم: ۹۶۴-۹۸۰-۰۰۵-۹۸۰ وزارت آموزش و پرورش. شابک:

وجود دارند که از این میان، باز آدنین مکمل تیمین، و باز گوانین مکمل سیتوزین می‌باشد. این توالی دورشته‌ای غیر قطبی و نامحلول در آب می‌باشد. پیوند بازهای مکمل با یکدیگر از طریق پیوند بین هیدروژن یک باز با مولکول نیتروژن یا اکسیژن باز مکمل حاصل می‌شود. این پیوند از نوع قوی کووالانسی نمی‌باشد و در نتیجه به راحتی شکسته می‌شود و قابل جایگزینی می‌باشد. به همین سبب زنجیره دو رشته‌ای دنا را به زیپ لباس تشبیه کرده‌اند که به راحتی در اثر فشار یا گرمای بالا از یکدیگر جدا می‌شوند. پیوند مولکول هیدروژن بین دو باز مکمل آدنین-تیمین یا گوانین-سیتوزین متفاوت می‌باشد. در گوانین-سیتوزین سه مولکول هیدروژن پیوندی وجود دارد در حالیکه در آدنین-تیمین دو مولکول هیدروژن پیوندی وجود دارد در نتیجه میزان تعداد بازهای مکمل گوانین-سیتوزین تعیین کننده استحکام دنا می‌باشد بطوریکه هرچه مقدار آن بیشتر باشد دنا مستحکم‌تر است ۹.

۳.۹ همانندسازی دنا

همانند سازی برای انجام گرفتن تقسیمات سلولی یا همان میتوز و میوز می‌باشد. در این اعمال سلولی با ۴۶ فام تن به دو سلول ۴۶ فام تنی دیگر تقسیم می‌شود که باید هر فام تن قبل از تقسیم، فام تنی مانند خود را پدید آورد. ابتدا آنزیمی به نام هلیکاز (helicase) دو رشته به هم پیچیده دنا را از هم جدا می‌کند (علت نام گذاری این آنزیم به این دلیل است که پیوند بین دو رشته، از نوع پیوند هیدروژنی می‌باشد)؛ سپس چند پروتیین بنام SSBP به دو رشته می‌چسبند و به آن‌ها اجازه به هم پیوستن دوباره را نمی‌دهند. در دو طرف هر رشته اعدادی گذاشته شده‌است که یک طرف ۵' و طرف دیگر ۳' است و در رشته مقابل هم برعکس رشته دیگری می‌باشد؛ یعنی یک طرف از یک رشته از هر دو طرف خود (عمودی-افقی) به عدد دیگر می‌رسد. مسیر همانند سازی هم همواره از ۵' به ۳' می‌باشد. آنزیم دیگری به نام دنا پلیمرز ۱ (DNA Polymerase I) می‌آید و همانند سازی را در یکی از رشته‌هایی که انتهای ۳' آزاد دارد، انجام می‌دهد ولی در یکی از رشته‌ها که انتهای ۳' آزاد ندارد آنزیمی به نام دنا پلیمرز ۳ (DNA Polymerase III) می‌آید و همانند سازی را با روش دیگری انجام می‌دهد. ابتدا آنزیم دیگری به نام رنا پلیمرز (RNA Polymerase) می‌آید و قطعه‌های رنا را قرار می‌دهد و سپس دنا پلیمرز ۳ در کنار این قطعه می‌نشیند و همانند سازی را از جای مشخص شده‌ای ادامه می‌دهد (زیرا انرژی زیاد و جای باز ندارد). سپس دو باره این عمل کمی آن طرف‌تر یعنی به طرف ۵' انجام می‌گیرد؛ البته اینجا ۲ مشکل به وجود می‌آید: در همانند سازی دنا قطعه‌هایی از رنا وجود دارد-رشته دنا کیبی شده به قطعه‌های رنا نمی‌چسبد و فاصله ایجاد می‌شود که به این فواصل، قطعات اوکازاکی گفته می‌شود. برای رفع اشکال اول، آنزیمی به نام RNase H قطعات رنا را برمی‌دارد و به جای آن‌ها دنا می‌گذارد که این نیاز به یون منیزیم دارد. برای رفع اشکال دوم، آنزیمی بنام آنزیم دی‌ان‌ای لیگاز می‌آید و در قطعات اوکازاکی می‌نشیند و آن‌ها را پر می‌کند.

جانوران یوکاریوتی: جانورانی مانند انسان که سلول‌های آنان دارای هسته می‌باشد و همانند سازی در دو جهت انجام می‌گیرد. جانوران پروکاریوتی: جانورانی مانند باکتری‌ها که سلول آن‌ها هسته ندارد و کروموزوم‌ها در سیتوپلاسم پخش شده‌اند و همانند سازی در آن‌ها یک سویه می‌باشد که کروموزوم‌های آنان به شکل حلقه می‌باشد.^[7]

۴.۹ منابع

- [1] واژه مصوب فرهنگستان زبان و ادب فارسی، دفتر نخست تا چهارم، ۱۳۷۶ تا ۱۳۸۵
- [2] این واژه مطابق با واژگان گردآوری شده فرهنگستان زبان و ادب فارسی بر گردان آر ان ای است.
- [3] این واژه مطابق با واژگان گردآوری شده فرهنگستان زبان و ادب فارسی بر گردان کروموزوم است.

۹.۵ مجوزها و مشارکت‌کنندگان تصویر، و متن منابع

۹.۵.۱ متن

- منبع: https://fa.wikipedia.org/wiki/%D9%86%D8%B8%D8%B1%DB%8C%D9%87_%D9%86%D8%B3%D8%A8%DB%8C%D8%AA?oldid=18860126، مانی، مشارکت‌کنندگان: JAnDbot، Cobain، حامد، Xqbot، میرزاحسینی، Mdd 2007، Jariteh، Rezabot، MerllwBot، AvicBot، Masoud 75، Physicsch، یاس، DarafshBot، DbBot، Dexbot، Dahf، Fatemibot، سیمک، Ali78v، Sharaky، 11 ناشناس: و Joker for ever، آرتا، Ehssaan، وهمن،
- منبع: https://fa.wikipedia.org/wiki/%D9%86%D8%B3%D8%A8%DB%8C%D8%AA_%D8%AE%D8%A7%D8%B5?oldid=18197336، مانی، مشارکت‌کنندگان: 18197336، Elessar، Zرشک، Meisam، Behaafarid، Peymanpi، روسام، سعی، Nim2a، ظهیری، YurikBot، Mosaffa، دانیل، مانی، مشارکت‌کنندگان: Msaremf، JhsBot، محمد، Ladsgroup، امیرمسعود، Thijs!bot، JAnDbot، CommonsDelinker، Iranbiz، Hajiahmadagha، Wayiran، Ebrahim، TXiKiBoT، VolkovBot، Sanchooli، Farhood، OKBot، AlnoktaBOT، BotMultichill، SieBot، Kashk-fawiki، Synthebot، PixelBot، Aura.d، Carl، Tanhabot، MelancholieBot، CarsracBot، WikiDreamer Bot، Soroushn، Amirobot، Ehsan aslani، Amirreza، Lucas-bot، ArthurBot، قلی، Adler.f، Xqbot، Jjmajid، Schekinov Alexey Victorovich، نوژن، Gharouni، Adlerbot، TobeBot، Mahtabshadi، RedBot، Dinamik-bot، Calak، KamikazeBot، EmausBot، Ebrambot، AliBot، ChuispastonBot، WikitanvirBot، Mjbmrbot، Rezabot، Ripchip Bot، MerllwBot، Pouyan shaker، طاه، Mahdy Saffar، Wow21، Physicsch، DbBot، JYBot، Dexbot، S.rastegar، سیتوس، Mohammad.rustae، ODanialO، Pedixray، Behzadnabavi، Mpi7، Babaksaeidpour، F.derakhshan، Amirzeinaali، KasparBot، Modern Sciences، Elsa165، YamahaBot و 28 ناشناس:
- منبع: https://fa.wikipedia.org/wiki/%D9%86%D8%B3%D8%A8%DB%8C%D8%AA_%D8%B9%D8%A7%D9%85?oldid=18612841، مانی، مشارکت‌کنندگان: 18612841، Elessar، Escarbot، JhsBot، Kave، Ladsgroup، Thijs!bot، JAnDbot، Senemmar، Soulbot، CommonsDelinker، Taranet، WikiGlobal، Ebrahim، Solmaaz، Kalpase، TXiKiBoT، VolkovBot، Snazeeram، Alireza koh، Mathnews، SieBot، Farhadix، Tanhabot، MelancholieBot، Amirobot، Ehsan aslani، Amirreza، Lucas-bot، Darafsh، Parvazbato59، Rhoza، Saeidpourbabak، زادگان، قلی، Xqbot، GhalyBot، Kasir، نوژن، Gharouni، Adlerbot، Dalba، RedBot، Hamid Hassani، Roozita، EmausBot، ZéroBot، Fjalil، Shervin، AliBot، MSDousti، Mjbmrbot، میلاد، WikitanvirBot، Mjbmrbot، Manubot، Rezabot، Ripchip Bot، MerllwBot، Farvartish، Metrónomo، Arminale، طاه، Mahan، Physicsch، DbBot، PersianEagle، JYBot، Dexbot، YasBot، Freshman404، Yamaha5، FarbodBot، Mafia30، M.m.razzaghi، علیرضا، SAmirRezaH، Babri123، Babaksaeidpour، KasparBot، YamahaBot، GRelativist و 24 ناشناس:
- منبع: <https://fa.wikipedia.org/wiki/%D8%B3%DB%8C%D8%A7%D9%87%E2%80%8C%DA%86%D8%A7%D9%84%D9%87?oldid=18870725>، مانی، مشارکت‌کنندگان: 18870725، Mehran، ÆON، Nim2a، Bidabadi، ظهیری، YurikBot، Mosaffa، دانیل، میثم، Shervinafshar، Mardetanha، Elessar، Escarbot، Kave، Ladsgroup، Thijs!bot، JAnDbot، Senemmar، M samadi، Taranet، Nimaryn، Raamin، Meisam، زرشک، محمد، Kave، Ladsgroup، Thijs!bot، JAnDbot، Senemmar، M samadi، Taranet، Saeedfar h، Wayiran، Kamix، Ebrahim، Abtin، TXiKiBoT، VolkovBot، Saba68، OKBot، AlnoktaBOT، Mamad 1384، SieBot، PipepBot، Idioma-bot، Balashpersia، Tanhabot، MelancholieBot، Famizban، SilvonenBot، Amirobot، Ehsan aslani، دوستدار، Lucas-bot، Iliamagnetar، LaaknorBot، قلی، Xqbot، Almabot، Kasir، DSisyphBot، ایلینا، 2010، Atalay، Arfo58، Adlerbot، Mehran4ever، TobeBot، Alistudent، FoxBot، KamikazeBot، Arash45، ZxxZxxZ، Alirezatousi، Optional، EmausBot، همنشین، Soorena1، Aminshan، Ebrambot، Mdd 2007، Ahura21، Whiteprince، AliBot، Farzadcat، میلاد، WikitanvirBot، Faramarz، Börnstein، Börnstein، بختیاری، محمدعلی، Rezabot، AliReza، Ebrahim50، MerllwBot، Pediaeditor، Mazandar، Seyedhasantaghavi، Seiavoshy، Black tornado، JYBot، Dexbot، FawikiPatroller، Gshahali، Yamaha5، Addbot، RAHA68، Alirezamim، Salemsalamat، Mtreeks، Sharaky، Babaksaeidpour، Fatranslator، Modern Sciences، YamahaBot، Mehran Tarif، Aqajanim و 45 ناشناس:
- منبع: https://fa.wikipedia.org/wiki/%D8%B3%D9%81%D8%B1_%D8%AF%D8%B1_%D8%B2%D9%85%D8%A7%D9%86?oldid=19063295، مانی، مشارکت‌کنندگان: 19063295، Robbot، Savakilian، BodhisattvaBot، Tanhabot، Amirobot، Irony، Eskandar57، Lucas-bot، Gerakibot، Xqbot، Soheil-Green، Gharouni، Gire 3pich2005، Dalba، Ali Abbasi7، Arash.pt، Pouyana، Polyoarium، EmausBot، ZéroBot، Soorena1، Ebrambot، MostafaBigham، AliBot، میلاد، WikitanvirBot، Rezabot، MerllwBot، Managermd، Naderkhan، Mahdy Saffar، Mahan، Ehsaneghbaly1206، Zhilbert، DarafshBot، MahdiBot، JYBot، Dexbot، Reymaj، سیتوس، Artemis-Fowl-3، Addbot، Mehdiabakhani90، Eligold، Fatemibot، Ahmad sohani، Peredhil، Sharaky، مهرنگار، Arian، F.derakhshan، Modern Sciences، Sephrkiller، Metagalaxy، A.M.Z.A، در ایستاده، شب، Masbesh، Kh.maroufi، Farmanieh، MohammadGoudarzi و 28 ناشناس:
- منبع: https://fa.wikipedia.org/wiki/%D9%85%DA%A9%D8%A7%D9%86%DB%8C%DA%A9_%DA%A9%D9%88%D8%A7%D9%86%D8%AA%D9%88%D9%85%DB%8C?oldid=18868242، مانی، مشارکت‌کنندگان: 18868242، Mehranshargh، Mosaffa، YurikBot، Akbari، روسام، سعی، Peymanpi، Raamin، Behaafarid، Meisam، زرشک، Elessar، Msaremf، Escarbot، JhsBot، امیرمسعود، Ladsgroup، Thijs!bot، JAnDbot، Senemmar، TXiKiBoT، YonaBot، BotMultichill، AlleborgoBot، SieBot، Idioma-bot، Synthebot، Hermion، مهرداد، BodhisattvaBot، Tanhabot، MelancholieBot، همان، Amirobot، Ayda، دوستدار، Lucas-bot، Amin rajae، Jotterbot، Xqbot، Sahehco، Almabot، Adlerbot، TobeBot، Sunshinebahman، Dalba، FoxBot، KamikazeBot، Signal89، EmausBot، ZéroBot، Egha، Ebrambot، AliBot، ChuispastonBot، WikitanvirBot، Rezabot، In twilight، CocuBot، Mina ghodsi، Ariaveeg، Alirezah314، Dexbot، Purplearc، Xyzt، RAHA68، Parsapak، علیرضا، Peredhil، Maghalehs، Babaksaeidpour، نفر، پروفیسور، F.derakhshan، Amirzeinaali، میم میم، Modern Sciences، Aran.zahra، Mohammad a.sh25، A.M.Z.A، Curiosity7919، Amir00lr، و کاکس برایان، 22 ناشناس:
- منبع: https://fa.wikipedia.org/wiki/%D9%88%D8%A7%D9%BE%D8%A7%D8%B4%DB%8C_%D9%87%D8%B3%D8%AA%D9%87%E2%80%8C%D8%A7%DB%8C?oldid=18275702، مانی، روزبه، مشارکت‌کنندگان: 18275702، Aliparsa، Robbot، Bidabadi، ظهیری، Peymanpi، Meisam، زرشک، Elessar، Kave، Ladsgroup، Thijs!bot، JAnDbot، Senemmar، Irnavash، Mhdf، Taranet، Paiamshadi، آسا، Ebrahim، TXiKiBoT، VolkovBot، SieBot، Idioma-bot، بهنام، Synthebot، M.Fanavar، Tanhabot، MelancholieBot، Amirobot، MystBot، Lucas-bot، Cobain، LaaknorBot، Jotterbot، قلی، Xqbot، Sahehco، ایلینا، 2010، Gire 3pich2005، Adlerbot، TobeBot، TjBot، Pro translator، EmausBot، Ebrambot، ChuispastonBot، Rmashhadi، WikitanvirBot، Mjbmrbot، Maadikhah، Rezabot، CocuBot، MerllwBot، BendelacBOT، ارتزگ، DbBot، JYBot، Dexbot، YasBot، مسعود، Yamaha5، Addbot، RAHA68، Xpluto، Sharaky، KasparBot، YamahaBot، Nasim1328، ArminBot و 17 ناشناس:
- منبع: <https://fa.wikipedia.org/wiki/%D9%BE%D8%A7%D8%AF%D9%85%D8%A7%D8%AF%D9%87?oldid=18813470>، مانی، مشارکت‌کنندگان: 18813470، Elessar، Zرشک، Meisam، Behzaad، Peymanpi، روسام، ظهیری، Kian، Maziarpazade، YurikBot، Tgeik، Kian، Peymanpi، Behzaad، Meisam، Nefrin، Escarbot، امیرمسعود، Ladsgroup، Sdfhkjdbhoppiozcxzcvxvdbdfk، Saeid jumpto2222، Thijs!bot، Senemmar، Ahmad87، Sardar248، TXiKiBoT، VolkovBot، Godisnowhere، OKBot، AlnoktaBOT، SieBot، Wikilastab، Behzad39، Shantiaster، Tanhabot، MelancholieBot، همان، Amirobot، Lucas-bot، LaaknorBot، قلی، زادگان، Dalba، Leyth، EmausBot، Ebrambot، Amolbot، AliBot، WikitanvirBot، Mjbmrbot، 21 ناشناس: و Rezabot، Mina ghodsi، MahdiBot، Dexbot، P211074، Derakhshan، Babaksaeidpour و 21 ناشناس:
- منبع: <https://fa.wikipedia.org/wiki/%D8%AF%DB%8C%E2%80%8C%D8%A7%D9%86%E2%80%8C%D8%A7%DB%8C?oldid=18516439>، مانی، مشارکت‌کنندگان: 18516439، Elessar، Escarbot، ترانه، زرشک، Behaafarid، Raamin، روسام، Chobot، Khazaei، Mardetanha، و 1 ناشناس:

R0stam، RetiredUser، Thijs!bot، JAnDbot، Senemmar، CommonsDelinker، TXiKiBoT، VolkovBot، OKBot، AlnoktaBOT، BotMultichill، AlleborgoBot، Reza luke، SieBot، Navid rabiee، Idioma-bot، Dernhelm، Synthebot، Aura.d، Asimo، Alexbot، BodhisattvaBot، Ali20 wiki، Elmju، Mehdiabbasi، Tanhabot، MelancholieBot، همان، WikiDreamer Bot، Zorrobot، SilvonenBot، Amirobot، Amirreza، Luckas-bot، Jotterbot، ArthurBot، Sara.foroughi، Xqbot، JWBE، Niavarani، Acartoonist، Adlerbot، TobeBot، Dalba، ورنندیش، RedBot، Dinamik-bot، KamikazeBot، Hosein، EmausBot، Ebrambot، Afzayeshe rank، HRoestBot، Alborzagros، Arfarshchi، WikitanvirBot، Mjbmrbot، Movyn، Maadikhah، برسام، Rezabot، Sasan Geranmehr، AvocatoBot، Hajar parvizian، Mahdy Saffar، Min.neel، Mahya1، Farhad95، Samkian، DarafshBot، DbBot، MahdiBot، Mamad khz، Dexbot، FawikiPatroller، Azadi68، Addbot، RAHA68، Fatemibot، 32 ناشناس، و محمدجواددرویشی، Masoudrs، Userwikifa، مهرنگار، Mpj7، جلالی، محمدرضا، Arash.mz، Peredhil، Wikimostafa، عسکری، مهدی

۹.۵.۲ تصاویر

- منبع: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/b/b1/A-DNA%2C_B-DNA_and_Z-DNA.png **A-DNA، B-DNA and Z-DNA.png** پرونده: مشارکت‌کنندگان: GFDL مجوز: Originally from en.wikipedia; description page is/was here. هنرمند: Original uploader was Richard Wheeler (Zephyris) at en.wikipedia
- منبع: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/0/0c/Accretion_Disk_Binary_System.jpg **Accretion_Disk_Binary_System.jpg** پرونده: اصلی: هنرمند? مشارکت‌کنندگان: Public domain مجوز: ?
- منبع: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/a/a1/Alfa_beta_gamma_radiation_penetration_fa.svg **Alfa_beta_gamma_radiation_penetration_fa.svg** پرونده: مشارکت‌کنندگان: file:Alfa_beta_gamma_radiation_penetration.svg مجوز: CC BY-SA 3.0 هنرمند: user:Ehamberg
- منبع: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/f/fb/Atom_editor_logo_black.svg **Atom_editor_logo_black.svg** پرونده: CC BY 4.0 مجوز: File:Atom editor logo.svg مشارکت‌کنندگان: هنرمند: https://commons.wikimedia.org/w/index.php?title=File:Atom_editor_logo.svg&action=history
- منبع: <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/5/55/BH-no-escape-1.svg> **BH-no-escape-1.svg** پرونده: CC BY-SA 3.0 مجوز: اصلی: هنرمند? مشارکت‌کنندگان: ?
- منبع: <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/1/10/BH-no-escape-2.svg> **BH-no-escape-2.svg** پرونده: CC BY-SA 3.0 مجوز: اصلی: هنرمند? مشارکت‌کنندگان: ?
- منبع: <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/8/87/BH-no-escape-3.svg> **BH-no-escape-3.svg** پرونده: CC BY-SA 3.0 مجوز: اصلی: هنرمند? مشارکت‌کنندگان: ?
- منبع: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/5/5e/BH_LMC.png **BH_LMC.png** پرونده: اثر مشارکت‌کنندگان: CC BY-SA 2.5 مجوز: User:Alain r اصلی: هنرمند شخصی
- منبع: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/d/db/Base_pair_AT.svg **Base_pair_AT.svg** پرونده: Public domain مجوز: Yikrazuul اصلی: هنرمند شخصی اثر مشارکت‌کنندگان: ?
- منبع: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/6/64/Base_pair_GC.svg **Base_pair_GC.svg** پرونده: Public domain مجوز: Yikrazuul اصلی: هنرمند شخصی اثر مشارکت‌کنندگان: ?
- منبع: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/5/51/Bekenstein%E2%80%93Hawking_entropy_formula.png **Bekenstein–Hawking_entropy_formula.png** پرونده: اثر مشارکت‌کنندگان: CC0 مجوز: Fuhghettaaboutit اصلی: هنرمند شخصی اثر مشارکت‌کنندگان: ?
- منبع: <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/d/d4/BlackHole.jpg> **BlackHole.jpg** پرونده: مشارکت‌کنندگان: Public domain مجوز: <http://web.archive.org/web/20100416132936/http://www.gsfc.nasa.gov/topstory/20011015blackhole.html> (direct link) <http://earthsky.org/space/comparing-theory-to-observation-in-eating-habits-of-giant-black-holes> (direct link) هنرمند: XMM-Newton، ESA، NASA
- منبع: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/c/cd/Black_Hole_Milkyway.jpg **Black_Hole_Milkyway.jpg** پرونده: CC BY-SA 2.5 مجوز: Ute Kraus، Physics education group Kraus، Universität Hildesheim، Space Time Travel، (background image of the milky way: Axel Mellinger) اصلی: هنرمند مشارکت‌کنندگان: ?
- منبع: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/b/b6/Black_hole_details.JPG **Black_hole_details.JPG** پرونده: CC BY-SA 4.0 مجوز: Tetra quark اصلی: هنرمند شخصی اثر مشارکت‌کنندگان: ?
- منبع: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/a/ab/Black_hole_jet_diagram.jpg **Black_hole_jet_diagram.jpg** پرونده: Public domain مجوز: اصلی: هنرمند? مشارکت‌کنندگان: ?
- منبع: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/0/03/Black_hole_lensing_web.gif **Black_hole_lensing_web.gif** پرونده: CC-BY-SA-3.0 مجوز: Urbane Legend (optimised for web use by Alain r) اصلی: هنرمند مشارکت‌کنندگان: en:Image:BlackHole_Lensing_2.gif
- منبع: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/5/57/CNO_Cycle_fa.png **CNO_Cycle_fa.png** پرونده: CC BY-SA 4.0 مجوز: F.derakhshan اصلی: هنرمند شخصی اثر مشارکت‌کنندگان: ?
- منبع: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/f/f3/Calabi_yau.jpg **Calabi_yau.jpg** پرونده: مشارکت‌کنندگان: Public domain مجوز: bourjai اصلی: هنرمند Mathematica output، created by author
- منبع: <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/4/4a/Commons-logo.svg> **Commons-logo.svg** پرونده: Public domain مجوز: This version created by Pumbaa، using a proper partial circle and SVG geometry features. (Former versions used to be slightly warped.) هنرمند: SVG version was created by User:Grunt and cleaned up by 3247، based on the earlier PNG version، created by Reidab.
- منبع: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/0/00/Crab_Nebula.jpg **Crab_Nebula.jpg** پرونده: مشارکت‌کنندگان: Public domain مجوز: HubbleSite: gallery، release. هنرمند: NASA، ESA، J. Hester and A. Loll (Arizona State University)
- منبع: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/1/16/DNA_orbit_animated.gif **DNA_orbit_animated.gif** پرونده: CC-BY-SA-3.0 مجوز: Originally from en.wikipedia; description page is/was here. هنرمند: Original uploader was Richard Wheeler (Zephyris) at en.wikipedia
- منبع: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/c/c8/Einstein_cross.jpg **Einstein_cross.jpg** پرونده: Public domain مجوز: NASA، ESA، and STScI اصلی: هنرمند <http://hubblesite.org/newscenter/archive/releases/1990/20/image/a/> مشارکت‌کنندگان: ?

- **Elevator_gravity.svg**: منبع: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/1/11/Elevator_gravity.svg مجوز: CC BY-SA 3.0 مشارکت‌کنندگان:
- **Elevator_gravity2.png**: اصلی هنرمند
- **derivative work: Pbroks13 (talk)**
- **Ergosphere.svg**: منبع: <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/0/0c/Ergosphere.svg> مجوز: CC-BY-SA-3.0 اثر مشارکت‌کنندگان: MesserWoland اصلی: هنرمند on the graphic uploaded by IMeowbot بر شخصی
- **Folder_Hexagonal_Icon.svg**: منبع: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/4/48/Folder_Hexagonal_Icon.svg مجوز: CC-BY-SA-3.0 John Cross اصلی: هنرمند Folder.gif پایه: بر شخصی اثر مشارکت‌کنندگان: Shazz برداری‌سازی:
- **Gravitational_red-shifting.png**: منبع: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/5/5c/Gravitational_red-shifting.png مجوز: CC-BY-SA-3.0 اصلی: هنرمند? مشارکت‌کنندگان:
- **Gravwav.gif**: منبع: <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/5/5c/Gravwav.gif> مجوز: CC-BY-SA-3.0 self-made, using standard (TT-gauge) description of linearized sinusoidal gravitational wave مشارکت‌کنندگان: اصلی: هنرمند Mapos
- **Isotopes_and_half-life_1.PNG**: منبع: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/d/d7/Isotopes_and_half-life_1.PNG مجوز: Public domain اصلی: هنرمند? مشارکت‌کنندگان:
- **LISA.jpg**: منبع: <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/b/b5/LISA.jpg> مجوز: Public domain اصلی: هنرمند? مشارکت‌کنندگان:
- **Lensshoe_hubble.jpg**: منبع: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/a/a9/Lensshoe_hubble.jpg مجوز: Public domain ESA/Hubble & NASA اصلی: هنرمند http://apod.nasa.gov/apod/image/1112/lensshoe_hubble_3235.jpg مشارکت‌کنندگان:
- **Light_cone.png**: منبع: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/2/24/Light_cone.png مجوز: Public domain اثر مشارکت‌کنندگان: اصلی: هنرمند شخصی Fredrik
- **Light_cone.svg**: منبع: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/2/27/Light_cone.svg مجوز: Public domain اثر مشارکت‌کنندگان: اصلی: هنرمند شخصی Sakurambo
- **Light_deflection.png**: منبع: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/c/c2/Light_deflection.png مجوز: CC BY-SA 3.0 self-made, using numerical integration methods to solve the geodetic equation for light near a spherical massive object (Schwarzschild metric) مشارکت‌کنندگان: اصلی: هنرمند Markus Poessel (Mapos)
- **LorentzianWormhole.jpg**: منبع: <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/d/d7/LorentzianWormhole.jpg> مجوز: CC BY-SA 3.0 اصلی: هنرمند شخصی اثر مشارکت‌کنندگان: AllenMcC
- **M87_jet.jpg**: منبع: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/3/39/M87_jet.jpg مجوز: Public domain مشارکت‌کنندگان: HubbleSite: gallery, release, اصلی: هنرمند NASA and The Hubble Heritage Team (STScI/AURA)
- **Michelson-morley.png**: منبع: <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/9/94/Michelson-morley.png> مجوز: CC-BY-SA-3.0 اصلی: هنرمند? مشارکت‌کنندگان:
- **Orthogonality_and_rotation.svg**: منبع: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/5/5e/Orthogonality_and_rotation.svg مجوز: CC0 اصلی: هنرمند شخصی اثر مشارکت‌کنندگان: Maschen
- **Particles_and_antiparticles.svg**: منبع: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/c/cd/Particles_and_antiparticles.svg مجوز: CC BY-SA 3.0 لطفاً شده‌است. ذخیره اضافی امکانات تعدادی با Inkscape SVG قالب در اس‌وی‌جی این شده‌است. ساخته اینک‌اسکیپ با برداری گرافیک این مشارکت‌کنندگان: CC BY-SA 3.0 Help:Inkscape دیگر نرم‌افزارهای با آن ویرایش از قبل
- **Penrose.svg**: منبع: <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/a/a8/Penrose.svg> مجوز: Public domain مشارکت‌کنندگان: Transferred from en.wikipedia to Commons by Andrei Stroe using CommonsHelper. انگلیسی ویکی‌پدیا در Cronholm144 اصلی: هنرمند
- **People_icon.svg**: منبع: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/3/37/People_icon.svg مجوز: CC0 مشارکت‌کنندگان: اصلی: هنرمند OpenClipart
- **Portal-puzzle.svg**: منبع: <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/f/fd/Portal-puzzle.svg> مجوز: Public domain مشارکت‌کنندگان: User:Eubulides. Created with Inkscape 0.47pre4 r22446 (Oct 14 2009). This image was created from scratch and is not a derivative of any other work in the copyright sense, as it shares only nonprotectible ideas with other works. Its idea came from *File:Portal icon.svg* by User:Michiel1972, which in turn was inspired by *File:Portal.svg* by User:Pepetps and User:Ed g2s, which in turn was inspired by *File:Portal.gif* by User:Ausir, User:Kyle the hacker and User:HereToHelp, which was reportedly from *he:File:Portal.gif* (since superseded or replaced?) by User:Naama m. It is not known where User:Naama m. got the idea from. اصلی: هنرمند User:Eubulides
- **PositronDiscovery.jpg**: منبع: <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/6/69/PositronDiscovery.jpg> مجوز: Public domain مشارکت‌کنندگان: Anderson, Carl D. (1933). "The Positive Electron". *Physical Review* **43** (6): 491–494. DOI:10.1103/PhysRev.43.491. اصلی: هنرمند Carl D. Anderson (1905–1991)
- **Psr1913+16-weisberg_en.png**: منبع: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/7/79/Psr1913%2B16-weisberg_en.png مجوز: Public domain مشارکت‌کنندگان: M. Haynes et Lorimer (2001) (redrawn by Dantor as Image:Psr1913+16-weisberg.png, English labels added by mapos) اصلی: هنرمند
- **Qm_template_pic_4.svg**: منبع: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/f/fe/Qm_template_pic_4.svg مجوز: CC0 اصلی: هنرمند شخصی اثر مشارکت‌کنندگان: Maschen
- **Question_book-new.svg**: منبع: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/9/99/Question_book-new.svg مجوز: CC-BY-SA-3.0 مشارکت‌کنندگان: Transferred from en.wikipedia to Commons. Created from scratch in Adobe Illustrator. Based on Image:Question book.png created by User:Equazcion اصلی: هنرمند Tkgd2007
- **Radioactive.svg**: منبع: <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/b/b5/Radioactive.svg> مجوز: Public domain مشارکت‌کنندگان: Created by Cary Bass using Adobe Illustrator on January 19, 2006. اصلی: هنرمند Cary Bass
- **Relativistic_precession.svg**: منبع: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/2/28/Relativistic_precession.svg مجوز: CC-BY-SA-3.0 self-made using gnuplot with manual alterations اثر مشارکت‌کنندگان: اصلی: هنرمند KSmrq
- **Relativity_of_Simultaneity.svg**: منبع: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/b/b1/Relativity_of_Simultaneity.svg مجوز: CC BY-SA 3.0 مشارکت‌کنندگان: Derivative work of en:File:Relativity_of_simultaneity_(color).png اصلی: هنرمند User:Army1987 created the original PNG file; Cdx converted it to SVG.

- **Spacetime_curvature.png** پرونده: منبع: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/2/22/Spacetime_curvature.png مجوز: CC-BY-SA-3.0: مشارکت‌کنندگان: اصلی: هنرمند ? مشارکت‌کنندگان: اصلی: هنرمند ? مشارکت‌کنندگان: اصلی: هنرمند ?
- **Spin_network.svg** پرونده: منبع: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/5/52/Spin_network.svg مجوز: CC BY-SA 3.0: مشارکت‌کنندگان: Markus Poessel (Mapos) اصلی: هنرمند شخصی اثر مشارکت‌کنندگان:
- **Sr3.svg** پرونده: منبع: <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/7/78/Sr3.svg> مجوز: CC-BY-SA-3.0: مشارکت‌کنندگان: اصلی: هنرمند Sr3.jpg: user:Kevin Baas
- **Star_collapse_to_black_hole.png** پرونده: منبع: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/2/20/Star_collapse_to_black_hole.png مجوز: CC BY-SA 2.5: مشارکت‌کنندگان: اصلی: هنرمند ? مشارکت‌کنندگان: اصلی: هنرمند ?
- **Stylised_Lithium_Atom.svg** پرونده: منبع: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/6/6f/Stylised_atom_with_three_Bohr_model_orbits_and_stylised_nucleus.svg مجوز: CC-BY-SA-3.0: مشارکت‌کنندگان: based off of Image:Stylised Lithium Atom.png by Halfdan. SVG by Indolences. Recoloring and ironing out some glitches done by Rainer Klute. اصلی: هنرمند
- **Symbol_star2.svg** پرونده: منبع: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/3/3a/Symbol_star2.svg مجوز: Public domain: اصلی: Anjoe هنرمند شخصی اثر مشارکت‌کنندگان:
- **Wave_packet.svg** پرونده: منبع: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/f/ff/Wave_packet.svg مجوز: Public domain: مشارکت‌کنندگان: Self made, based on Image:Photon paquet onde.png. Released in the public domain. اصلی: Oleg Alexandrov هنرمند
- **Wooden_hourglass_3.jpg** پرونده: منبع: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/7/70/Wooden_hourglass_3.jpg مجوز: CC-BY-SA-3.0: مشارکت‌کنندگان: اصلی: User:S Sepp هنرمند شخصی اثر مشارکت‌کنندگان:
- **World_line.svg** پرونده: منبع: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/1/16/World_line.svg مجوز: CC-BY-SA-3.0: مشارکت‌کنندگان: Transferred from en.wikipedia to Commons. اصلی: SVG version: K. Aainsqatsi at en.wikipedia هنرمند

۹.۵.۳ مجوز محتوای

- Creative Commons Attribution-Share Alike 3.0