بسم الله الرحمن الرحيم

دانشکده علوم پایه

پایان نامه دوره کارشناسی ارشد در رشته فیزیک گرایش گرانش

موضوع:

برخی از جنبه‌های پدیده شناختی گرانش کوانتومی و نقش آنها در فیزیک سیاه چاله‌ها

استاد راهنما:

دکتر کوروش نوذری

استاد مشاور:

دکتر جعفر صادقی

اساتید داور:

دکتر علی بهاری

دکتر عزیزی

نام دانشجو:

سارا ثقفی

شهریور ۱۳۹۱

سپاسگزاری

منت خدای را عزوجل که طاعتش موجب قربت است و به شکراندرش مزید نعمت. هر نفسی که فرو می رود ممد حیات است و چون بر می آید مفرّح ذات. پس در هر نفسی دو نعمت موجود است و بر هر نعمتی شکری واجب. اکنون در پایان این بی انتها برخود لازم می دانم که افتخار شاگردی دانشمندی با ایمان و فرزانه همچون استاد، دکتر کوروش نوذری را قدر بدانم و از ایشان که راهنمایی پایان‌نامه‌ام را پذیرفتند و افتخار استفاده از اطلاعات و اندوخته های علمی با ارزش شان را نصیبم نمودند، تشکر و سپاسگزاری نمایم و همچنین از کلیه اساتیدی که مرا در طی این دوره پژوهشی راهنمایی و مشاوره کرده‌اند سپاسگزاری می‌کنم.

تقدیم به

آنانی که نور امید را در پرتو مهرشان یافتم

چکیده

در این رساله، تونل‌زنی ذرات بی‌جرم از افق کوانتومی سیاه‌چاله شوارتزشیلد در مقیاس TeV با در نظر گرفتن اثرات گرانش کوانتومی مورد مطالعه قرار گرفته است. این اثرات به صورت وجود برش‌های طبیعی یعنی وجود کمینه طول، کمینه تکانه و بیشینه تکانه که از اصل عدم قطعیت تعمیم یافته استخراج می‌شوند، خود را نشان می‌دهند. ما هم‌بستگی‌های ممکن در فرایند تونل‌زنی ذرات گسیلی را مطالعه می‌کنیم و سعی در برطرف کردن مساله اطلاعات گم شده در افق رویداد سیاه‌چاله داریم. هم‌چنین بر روی نقش این برش‌های طبیعی برنرخ تونل‌زنی از افق رویداد و ترمودینامیک سیاه‌چاله‌های TeV در فاز نهایی تبخیر، تمرکز می‌کنیم.

واژه‌های کلیدی:

تونل‌زنی کوانتومی، تابش هاوکینگ، آنتروپی سیاه‌چاله، مساله اطلاعات گم شده، اصل عدم قطعیت تعمیم یافته، باقی‌مانده سیاه‌چاله، هم‌بستگی مدهای تابشی.

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

مقدمه ۱

فصل اول ـ فیزیک سیاه چاله ها ۵

۱ـ۱ـ تاریخچه فیزیک سیاه چاله ۵

۱ـ۲ـ سیاه چاله شوارتزشیلد و خصوصیات آن ۷

۱ـ۳ـ شکل گیری سیاه چاله ۱۲

۱ـ۴ـ تابش ها وکینگ و مسئله اطلاعات گمشده ۱۳

۱ـ۵ـ ترمودینامیک سیاه چاله ها ۱۶

۱ـ۶ـ مسئله سلسله مراتب و رویکرد ابعاد اضافه ۲۰

فصل دوم ـ پدیده شناختی گرانش کوانتومی ۲۵

۲ـ۱ـ مقدمه ای بر گرانش کوانتومی ۲۵

۲ـ۲ـ مقیاس پلانک ۲۷

۲ـ۳ـ کمینه طول و اصل عدم قطعیت تعمیم یافته ۳۵

۲ـ۴ـ نسبیت خاص دوگان و بیشینه تکانه ۴۴

۲ـ۵ـ برش های مربوط به فرابنفش و فرو سرخ در نظریه میدان کوانتومی و کمینه تکانه ۴۷

فصل سوم ـ نقش برش های طبیعی در ترمودینامیک سیاه چاله ها ۵۱

۳ـ۱ـ ترمودینامیک سیاه چاله ها در چارچوب اصل عدم قطعیت استاندارد ۵۱

۳ـ۲ـ لزوم اصلاح ترمودینامیک سیاه چاله ها در چارچوب گرانش کوانتومی ۵۴

۳ـ۳ـ ترمودینامیک سیاه چاله ها در حضور کمینه طول و بیشینه تکانه ۵۶

۳ـ۴ـ اصلاح ترمودینامیک سیاه چاله ها در حضور شکل کامل‌تری از GUP ۶۴

۳ـ۵ـ مقایسه نتایج رهیافت های مختلف GUP ۶۶

فصل چهارم ـ آهنگ گذار و تونل زنی پاریخ ـ ویلچک از افق رویداد سیاه چاله شوارتزشیلد با اثرات گرانش کوانتومی ۷۰

۴ـ۱ـ تونل زنی کوانتومی پاریخ ـ ویلچک از افق رویداد سیاه چاله ۷۰

۴ـ۲ـ GUP و تونل زنی کوانتومی پاریخ ـ ویلچک ۷۶

۴ـ۲ـ۱ـ کمینه طول، بیشینه تکانه و مکانیسم تونل زنی پاریخ ـ ویلچک ۷۷

۴ـ۲ـ۲ـ تونل زنی کوانتومی پاریخ ـ ویلچک در حضور چارچوب کلی تری از GUP ۸۲

۴ـ۲ـ۳ـ تعمیم به مدل های ابعاد اضافی بزرگ ۸۵

۴ـ۳ـ آهنگ گذار از سیاه چاله های کوچک در حضور اثرات گرانش کوانتومی ۸۸

فصل پنجم ـ نتیجه گیری و پیشنهاداتی برای آینده ۹۳

مراجع و مآخذ ۹۷

فهرست اشکال

عنوان **صفحه**

شکل ۱-۱- سیگنال‌های ارسالی از ناظر در حال سقوط به سمت ناظر خارجی ۱۱
شکل ۱-۲- طبقه بندی ستاره‌ها برحسب میزان جرم و سرنوشت نهایی آن‌ها..... ۱۲
شکل ۱-۳- نمودار شکل‌گیری یک سیاه‌چاله از دید ناظری دور و ناظری که در حال سقوط با ستاره است... ۱۳
شکل ۲-۱- جایگاه گرانش کوانتومی در نظریه سلسله مراتب در فیزیک..... ۲۶
شکل ۲-۲- نمایی از آزمایش ذهنی میکروسکوپ هایزنبرگ ۳۴
شکل ۲-۳- یک پالس نوری از نقطه A فرستاده می‌شود و از B دوباره به A بازتابیده می‌شود..... ۳۸
شکل ۲-۴- فشرده کردن حجمی به جرم M اندازه ℓ..... ۴۱
شکل ۲-۵- ناحیه‌ای از فضا به اندازه ℓ ۴۳
شکل ۳-۱- دمای هاوکینگ سیاه‌چاله بر حسب جرم..... ۵۲
شکل ۳-۲- آنتروپی استاندارد بکنشتاین- هاوکینگ بر حسب جرم..... ۵۳
شکل ۳-۳- دمای سیاه‌چاله در حال تبخیر بر حسب جرم آن..... ۵۸
شکل ۳-۴- آنتروپی تصحیح شده سیاه‌چاله بر حسب جرم ۵۹
شکل ۳-۵- دمای اصلاح شده سیاه‌چاله بر حسب جرم..... ۶۲
شکل ۳-۶- آنتروپی اصلاح شده سیاه‌چاله بر حسب جرم ۶۳
شکل ۳-۷- آنتروپی اصلاح شده بر حسب جرم ۶۶
شکل ۳-۸- آنتروپی سیاه‌چاله برحسب جرم برای ۳ چارچوب متفاوت از GUP ۶۷
شکل ۴-۱- آهنگ گذار سیاه‌چاله در چارچوب GUP بر حسب جرم ۹۰

لیست علائم اختصارات

ارکانی ـ حامد، دیموپولوس و دی والی	ADD
آرنوویت، دسر و میسنر	ADM
تابش زمینه کیهانی	CMB
نسبیت خاص دوگان	DSR
اصل عدم قطعیت تعمیم یافته	GUP
واگرایی فرو سرخ	IR
ابعاد اضافی بزرگ	LEDs
برخورد دهندهٔ بزرگ هادرونی	LHC
نظریه میدان کوانتومی	QFD
راندال و سندرم	RS
اصل عدم قطعیت	UP
واگرایی فرابنفش	UV
ونتزل، کرامرز و بریلوئن	WKB

مقدمه

تلفیق گرانش در نظریه میدان کوانتومی منجر به یک برش موثری در نظریه شده است، یک طول کمینه قابل اندازه‌گیری در محدوده فرابنفش. در واقع انرژی‌های خیلی زیاد که برای جست و جو در فواصل کوچک استفاده می‌شوند، به دلیل اثرات گرانشی قوی ساختار فضازمان را مختل می‌کنند. نظریات متعددی که در زمینه گرانش کوانتومی[۱] وجود دارد، همگی وجود یک طول کمینه[۲] را تایید می‌کنند. وجود این طول کمینه، اصل عدم قطعیت هایزنبرگ[۳] را اصلاح می‌کند و منجر به یک اصل عدم قطعیت تعمیم یافته می‌شود که بر خلاف چارچوب استاندارد که هیچ قیدی بر روی اندازه‌گیری‌های طول نداشت، در این اصل تعمیم یافته یک حدی برای اندازه‌گیری طول وجود دارد. در حقیقت در رژیم گرانش کوانتومی، بین نقاط در فضازمان تفکیک قائل می‌شویم. از طرف دیگر، نظریات نسبیت خاص دوگان(DSR)[۴] پیشنهاد می‌دهد که وجود یک کمینه طول منجر می‌شود تا تکانه یک ذره آزمون نتواند هر مقدار دلخواهی را بپذیرد و محدود به یک حد بیشینه یعنی $p_{\max}$ می‌باشد. به این معنی که بر اساس ساختار فضازمان در مقیاس پلانک یک بیشینه تکانه برای ذرات وجود دارد که بر این اساس می‌توان یک اصل عدم قطعیت تعمیم یافته همراه با عدم قطعیت بیشینه‌ای برای تکانه در نظر گرفت. هم‌چنین اخیرا نشان داده شده است که در مقیاس انرژی‌های خیلی کوچک یعنی در حد فروسرخ، واگرایی‌هایی در نظریه میدان کوانتومی ایجاد شده است که با وجود کمینه تکانه برای ذرات این مشکل حل می‌شود. بنابراین می‌توان GUP را نوشت که شامل تمام برش‌های طبیعی یعنی کمینه طول، کمینه تکانه و بیشینه تکانه باشد.

[1] -Quantum Gravity
[2] -Minimal Length
[3] -Heisenberg Uncertainty Principle
[4] -Doubly Special Relativity

در این رساله با تاثیر این برش‌های طبیعی در ترمودینامیک سیاه‌چاله نتایج قابل توجه و مهمی به‌دست آمده است و نتایج گذشته را اصلاح کرده است. مخصوصا در مراحل نهایی تبخیر سیاه‌چاله، در این چارچوب از گرانش کوانتومی یعنی با در نظر گرفتن این برش‌های طبیعی نتایج پدیده شناختی غنی و پرباری را کسب می‌کنند. هر چند ترمودینامیک سیاه‌چاله‌ها در حضور کمینه طول قبلا مورد بررسی قرار گرفته است [۸۳–۷۶]، در این رساله بیشتر برنقش کمینه و بیشینه تکانه ذرات در فیزیک مراحل نهایی تبخیر سیاه‌چاله تمرکز شده است.

هم‌چنین نقش این برش‌های طبیعی در نرخ تونل‌زنی ذرات از سیاه‌چاله بررسی شده است. پاریخ ویلچک مکانیسمی مبنی بر تونل‌زنی کوانتومی ذرات از افق رویداد سیاه‌چاله در نظر گرفتند که بر پایه اثرات پس‌زنی و خودگرانشی می‌باشد. نتایج حاصل از آن‌ها سازگار با اصل یکانی کوانتوم می‌باشد. به این معنی که با اثبات تابش غیر گرمایی، زمینه‌ای برای حل مسئله اطلاعات گم‌شده ایجاد شد. اما آن‌ها در کار خود نتوانستند هم‌بستگی بین مدهای مختلف تابش را نشان دهند و در حقیقت در تونل‌زنی پاریخ- ویلچک[1]، تابش سیاه‌چاله شامل هیچ‌گونه اطلاعاتی نمی‌باشد. تونل‌زنی پاریخ- ویلچک در حضور کمینه طول بررسی شده است [۸۸]. در این رساله با تعمیم این روش در حضور تمام برش‌های طبیعی ممکن یعنی کمینه طول، کمینه تکانه و بیشینه تکانه توانستیم رابطه نرخ تونل‌زنی تعمیم یافته‌ای را به دست آوریم که انحراف شدیدی از حالت گرمایی دارد. نشان دادیم که در این چارچوب هم‌بستگی بین مدهای تابشی وجود دارد که گویای این واقعیت است که در سطح گرانش کوانتومی اطلاعات به طور پیوسته در طول تبخیر سیاه‌چاله پدیدار می‌شوند. این امر توانایی پاسخ به برخی از سوالات در مورد مسئله اطلاعات گم‌شده از سیاه‌چاله را دارا می‌باشد.

[1] -Parikh-Wilczek

مسئله دیگری که بر روی آن تمرکز کرده‌ایم، تاثیر ابعاد اضافه بر روی هم‌بستگی بین مدهای گسیلی از تابش سیاه‌چاله است. به بیان دیگر می‌خواهیم نشان دهیم که آیا در چارچوب ابعاد اضافه می‌توان بین مدهای گسیلی متفاوت از تابش، هم‌بستگی تولید کرد یا خیر. این سوال مهمی است که در این رساله از طریق روش تونل‌زنی پاریخ- ویلچک و در نظر گرفتن اثرات گرانش کوانتومی به صورت رابطه GUP در فضازمانی با d بعد اضافه به آن پاسخ داده می‌شود.

فصل اول

فیزیک سیاه چاله ها

فصل اول- فیزیک سیاه‌چاله‌ها

۱-۱- تاریخچه فیزیک سیاه‌چاله

سیاه‌چاله، ناحیه‌ای از فضازمان است که میدان گرانشی در آن ناحیه چنان قدرتی دارد که حتی نور نیز نمی‌تواند از آن به بیرون بگریزد. مفهوم جرمی بسیار پرجرم که حتی نور نیز نمی‌تواند از آن بگریزد، نخستین بار در سال ۱۷۸۳، توسط جغرافی‌دان انگلیسی به نام میشل[۱] ارایه شد. او این ستاره‌ها را ستاره سیاه نامید[۱]. در آن زمان تئوری نیوتونی گرانشی و مفهوم سرعت گریز شناخته شده بود. در سال ۱۷۹۶ ریاضی‌دان فرانسوی به نام لاپلاس[۲] همین ایده را در ویرایش اول و دوم کتاب خود ارتقا داد. وی رابطه بین جرم و شعاع ستاره سیاه را به دست آورد[۲]. در سال ۱۹۱۵ اینشتین نظریه گرانش خود را که نسبیت عام نام گرفت منتشر کرد. او پیش از این نشان داده بود که گرانش بر نور تاثیر می‌گذارد. چند ماه بعد کارل شوارتزشیلد[۳] راه‌حلی برای میدان گرانشی جرم نقطه‌ای ارائه داد و به این وسیله نشان داد چیزی که ما

[1] -Michell
[2] -Laplace
[3] -Karl Schwarzchild

امروزه آن را سیاه‌چاله می‌نامیم، از لحاظ نظری امکان وجود دارد[۳]. در حال حاضر شعاع شوارتزشیلد به عنوان شعاع افق رویداد یک سیاه‌چاله غیر چرخشی شناخته می‌شود. چند ماه بعد از شوارتزشیلد، جوهانس درسته یکی از دانشجویان لورنتز[۱]، به طور مستقل جواب‌هایی برای جرم نقطه‌ای نوشت و در مورد خواص آن توضیح داد [۴]. این جواب یک رفتار عجیب در شعاع شوارتزشیلد دارد که تکینه می‌شود. به این معنی که برخی جملات در معادلات اینشتین بی‌نهایت می‌شود. در سال ۱۹۲۴، ادینگتون[۲] نشان داد که این تکینگی پس از تغییر مختصات از بین می‌رود. اگرچه تا سال ۱۹۹۳ طول کشید تا جورج لمیتر[۳] به این نتیجه برسد که این تکینگی در شعاع شوارتزشیلد، تکینگی غیر مختصاتی و غیر فیزیکی بود[۵].

اوپنهایمر[۴] و همکارانش تکینگی در مرز شعاع شوارتزشیلد را به عنوان مرز یک حباب که در آن، زمان متوقف می‌شود، تعبیر کردند. البته این نکته از دید ناظر خارجی صحیح است. در سال ۱۹۸۵، فینکلاشتاین[۵] سطح شوارتزشیلد را به عنوان افق رویداد تعبیر کرد.(r_H)[۶] "یک غشائ یک طرفه: وقایع علی تنها در یک جهت می‌توانند از آن عبور کنند[۶]". جواب‌های فینکلشتاین در حقیقت تعمیم جواب‌های شوارتزشیلد برای آینده یک ناظر در حال سقوط به سیاه‌چاله است. هم‌چنین بسط کامل جواب‌های شوارتز-شیلد توسط **کراسکال**[۷] انجام شد[۷]. در مختصات کراسکال با تغییر مختصات، متریک را به صورت تخت مجانبی تبدیل می‌کنند و به بررسی ساختار علیتی هندسه سیاه‌چاله می‌پردازند. البته جواب‌های کلی‌تری نیز برای سیاه‌چاله به دست آمده است. در سال ۱۹۶۳، کر[۸] جواب‌های دقیق برای یک سیاه‌چاله چرخان را به-

[1] -Lorentz
[2] -Eddington
[3] -Georges Lemitre
[4] -Oppenheimer
[5] -Finkelstein

۴-از این پس در این رساله افق رویداد را با این علامت نشان می‌دهیم، که H مخفف افق است

[7] -Kruskal
[8] -Kerr

دست آورد و ۲ سال بعد نیومن[1] جواب‌های دقیق برای یک سیاچاله چرخان و باردار را به‌دست آورد[۸]. پس از آن توسط تحقیقات کارتر[2] و روبینسون، قضیه "بدون مو" پدید آمد، که بیان می‌کند جواب‌های یک سیاه‌چاله ایستا توسط ۳ پارامتر متریک کر-نیومن توصیف می‌شود: جرم، تکانه زاویه‌ای و بار الکتریکی[۹]. ما در این پایان‌نامه توجه خود را به سیاه‌چاله غیرچرخان و غیر باردار شوارتزشیلد معطوف کرده‌ایم.

۱-۲- سیاه‌چاله شوارتزشیلد و خصوصیات آن

هندسه سیاه‌چاله‌های کلاسیک در دستگاه‌های مختصات مختلفی بررسی شده است. هر دستگاه مختصات مختلف استفاده مخصوص به خود را دارد و نمی‌توان گفت که کدام یک بهترین یا مهم‌ترین دستگاه برای توصیف هندسه سیاه‌چاله است. مختصات مختلف برای توصیف سیاه‌چاله عبارتند از: مختصات شوارتزشیلد، مختصات تورتویز[3]، فضازمان ریندلر[4] و مختصات کراسکال. همانطور که بیان شد در این پایان‌نامه از مختصات شوارتزشیلد که بیان کننده فضازمان اطراف یک سیاه‌چاله متقارن کروی،پایدار و بدون بار می‌باشد، استفاده می‌کنیم.

با استفاده از معادلات اینشتین، جواب‌های شوارتزشیلد میدان گرانشی در فضای بیرونی یک جرم نقطه‌ای بدون بار و غیر چرخشی را توصیف می‌کند. طبق معادلات اینشتین داریم:

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} R g_{\mu\nu} = 8\pi G T_{\mu\nu} \qquad (۱-۱)$$

[1] -Newman
[2] -Carter
[3] -Tortoise coardinate
[4] -Rindler Spacetime

که ثابت کیهان‌شناختی برابر با صفر قرار داده شده است. $R_{\mu\nu}$ تانسور ریچی، R اسکالر ریچی و $T_{\mu\nu}$ تانسور انرژی تکانه و G ثابت نیوتون است. جواب‌های شوارتزشیلد برای فضازمان خلاء متقارن کروی، پایدار و دور از چشمه نقطه‌ای گرانش به فرم زیر به دست می‌آید [۱۰]:

$$ds^2 = \left(1-\frac{2GM}{r}\right)dt^2 + \frac{1}{\left(1-\frac{2GM}{r}\right)}dr^2 + r^2 d\Omega^2 \qquad (۲-۱)$$

که در آن $d\Omega^2 = d\theta^2 + \sin^2\theta d\varphi^2$ است

مختصه t، زمان شوارتزشیلد نامیده می‌شود و زمانی را که توسط ناظر ساکن در فاصله دور از چشمه اندازه‌گیری می‌شود، نشان می‌دهد. مختصه r، شعاع مختصاتی شوارتزشیلد نامیده میشود. زوایای θ,φ، زوایای قطبی و سمتی هستند.

همان‌طور که از فرم متریک مشخص است دارای ۲ تکینگی می‌باشد. یک تکینگی در $r=0$ و دیگری در $r=2GM$ می‌باشد.تکینگی به نقاطی گفته می‌شود که متریک در این نقاط بدرفتار است و خاصیت ۴ بعدی بودن خود را از دست می‌دهد. همان‌طور که از نسبیت عام میدانیم ۲ نوع تکینگی وجود دارد:

۱- تکینگی مختصاتی: این نوع تکینگی به دلیل انتخاب دستگاه مختصات است با تعویض دستگاه مختصات از بین می‌رود.

۲- تکینگی ذاتی: این نوع تکینگی‌ها با هیچ نوع تغییر مختصاتی ازبین نمی‌روند و مختص خود فضازمان است.

یکی از روش‌هایی که می‌توان نوع تکینگی را از آن تشخیص داد، محاسبه اسکالرهای وابسته به متریک است. از آن‌جا که کمیت‌های اسکالر در تمام دستگاه‌های مختصات دارای یک مقدار هستند، چنانچه

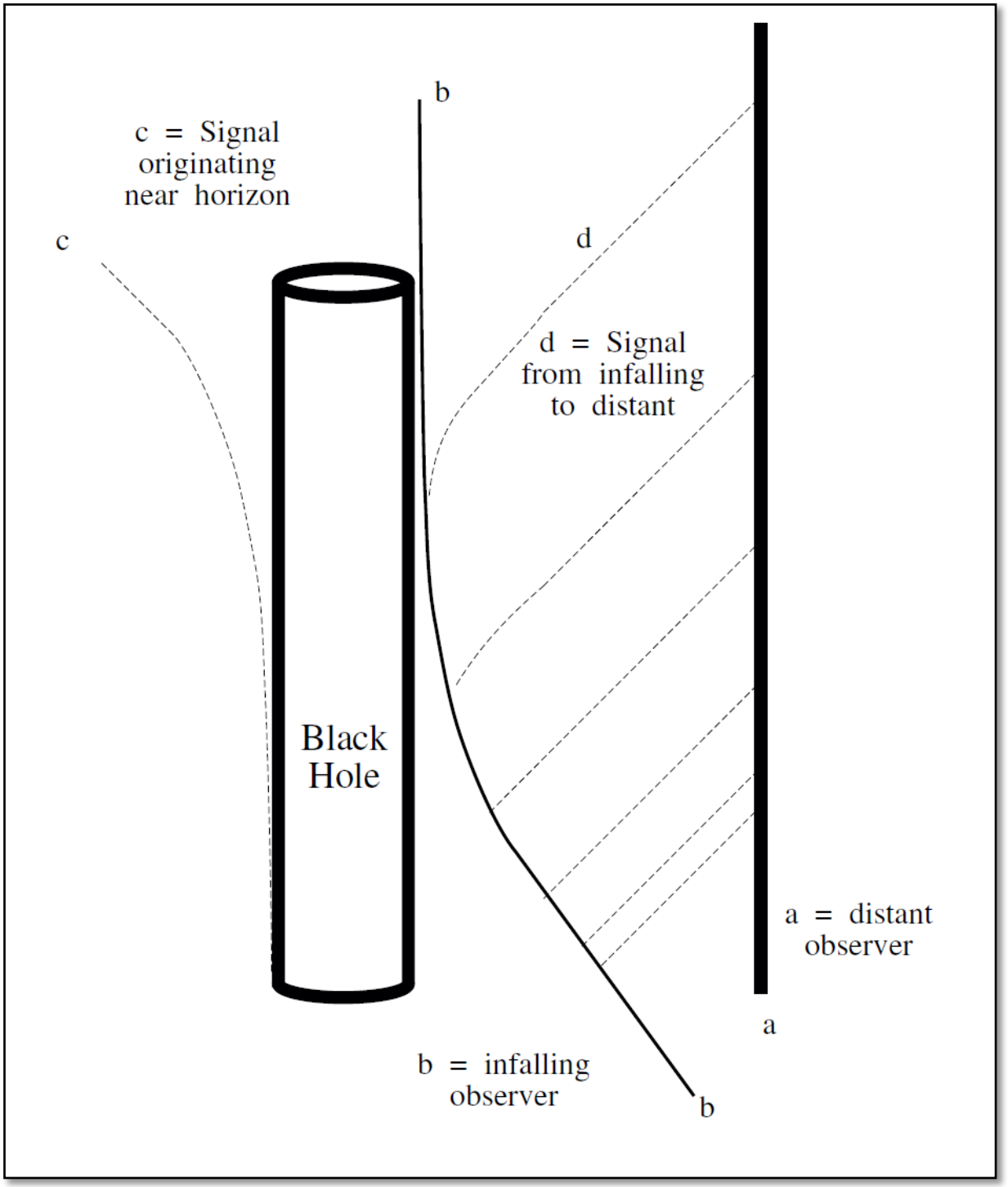
این کمیت‌ها در یک نقطه تکین(بی‌نهایت) شوند، این نقطه یک تکینگی ذاتی خواهد بود. اسکالری که در متریک شوارتزشیلد برای بررسی تکینگی استفاده می‌شود اسکالر کریچمن است که به شکل زیر داده می-شود:

$$R^{abcd}R_{abcd} = \frac{48m^2}{r^6}$$

همان‌طور که مشخص است این اسکالر در شعاع شوارتزشیلد ($r = 2GM$)، مقدار مشخصی دارد بنابراین این تکینگی مختصاتی است. اما در $r = 0$ این اسکالر بینهایت شده پس تکینگی ذاتی است. درک این موضوع طبیعی است چون متریک شوارتزشیلد در حقیقت میدان گرانشی در اطراف یک جرم کروی که در مبدا یا مرکز قرار دارد را توصیف می‌کند و این که همان نقطه‌ای که خود جرم است تکینگی داریم، طبیعی است چون گرانش در آن‌جا بی‌نهایت می‌شود.پس در حقیقت این میدان گرانشی قادر است همه نقاط را توصیف کند به غیر از نقطه $r = 0$ که بد رفتار است. ظهور این تکینگی‌ها در نسبیت عام منجر به شکست نظریه می‌شود. این شکست در موقعیتی اتفاق می‌افتد که اثرات مکانیک کوانتومی باید نقطه‌ای با چگالی خیلی بالا را توصیف کند. امروزه تلاش‌های زیادی برای به هم پیوستن کوانتوم و نظریه گرانش صورت گرفته است. امید است که توسط یک نظریه کاملی از گرانش کوانتومی بتوان سیاه‌چاله را بدون تکینگی توصیف کرد[۱۱].

نکته دیگر در متریک شوارتزشیلد، سطح $r_H = 2GM$ است که به افق رویداد سیاه‌چاله معروف است. افق در تعریف به ناحیه‌ای گفته می‌شود که در زمان بی‌نهایت به آن می‌رسیم. به این معنی که سیگنال-هایی که از سطح افق به چشم ناظر بیرونی می‌رسد، انتقال به سرخ بی‌نهایت را تجربه می‌کند. یعنی به طور عملی اطلاعاتی از سطح افق مشاهده نمی‌کنیم. برای بررسی بیشتر این پدیده، سقوط یک ناظر را به سمت سیاه‌چاله در نظر می‌گیریم. فرض می‌کنیم ناظر در حال سقوط، سیگنال‌هایی را ارسال می‌کند که توسط ناظر

دور از سیاه‌چاله دریافت می‌شود. فرض می‌کنیم این سیگنال‌ها همان اطلاعات فیزیکی ما هستند. اگر معادلات حرکت ناظر در حال سقوط به سیاه‌چاله را یک بار از دید ناظر خارجی (t، زمان شوارتزشیلد) و هم‌چنین از دید خود ناظر در حال سقوط (τ، زمان ویژه) در نظر بگیریم [۱۲]، مشاهده می‌کنیم که زمانی که $r \to 2GM$، در این صورت $t \to \infty$ میل می‌کند، به این معنی که یک سیگنال نوری در افق رویداد نمی‌تواند به هیچ نقطه‌ای در $r \geq 2GM$ دسترسی پیدا کند مگر در یک زمان بی‌نهایت. همان‌طور که در شکل (۱) می‌بینیم، سیگنال‌هایی که با فرکانس ν از ناظر در حال سقوط ارسال می‌شود، توسط ناظر خارجی در حال سکون دریافت می‌شود. و همان‌گونه که مشخص است هرچه ناظر به افق رویداد نزدیک‌تر میشود، بازه زمانی پالس‌های دریافتی مرتبا زیاد می‌شود. تا نهایتا پالس نوری که از $r = 2GM$ فرستاده می‌شود، هیچ وقت به ناظر خارجی نمی‌رسد. در حقیقت بی‌نهایت زمان طول می‌کشد تا ناظر خارجی فرکانس را دریافت کند و از وقایع روی افق و پشت افق بی‌اطلاع می‌ماند و این به معنی از دست دادن یک سری اطلاعات است.



شکل۱-۱- سیگنال‌های ارسالی از ناظر در حال سقوط به سمت ناظر خارجی. (سیگنال‌های که از روی افق ساطع میشود به سمت داخل سیاه‌چاله منحرف میشوند)