

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



وزارت علوم، تحقیقات و فناوری
پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پژوهشکده غرب شناسی و علم پژوهی
گروه فلسفه علم و فناوری

رساله دکتری رشته فلسفه علم و فناوری
استلزامات متافیزیکی مناقشه ناموضیعت کوانتومی و نسبیت خاص

استاد راهنما:

دکتر علیرضا منصور

استادان مشاور:

دکتر اکبر فهمی

دکتر امیر احسان کرباسی زاده

پژوهشگر:

سجاد مال میر

شهریور ۱۳۹۶

سپاس‌گزاری

به سرانجام رساندن این رساله، درست مثل هر محصول دیگری، تنها به همت شخصی میسر نمی‌بود. افراد بسیاری، خواسته یا ناخواسته، در این راه یاری‌ام کرده‌اند. جدا از افراد، عللی هم مؤثر بوده‌اند که شمردنشان کار من نیست؛ اقبال مناسب و مشیت‌های پنهان احتمالاً از این امورند. در این جا صرفاً به پاره‌ای از آنچه باید اشاره می‌کنم...

در حین انجام کار با افرادی مشورت کرده‌ام که ذکر اسامی همه آن‌ها ممکن نیست؛ علاوه بر آن - به گمانم - بدون رضایت ایشان مجاز به نام بردنشان نیستم. با این همه عزیزانی به شکل رسمی همراهم بودند که تشکر از آن‌ها را وظیفه خود می‌دانم.

دکتر فهمی با جدیت تمام، و با آداب‌دانی و خوش‌رویی، کار را نقد کردند؛ اشارات ایشان همیشه محل تألم بود است.

دوری مسیر امکان مشورت با دکتر کرباسی‌زاده را محدود می‌کرد. همین تعاملات محدود هم به جهت تجربه‌ای که در حوزه مورد پژوهش دارند مایه دلگرمی است.

اساتید بزرگوار دکتر معصومی، دکتر مختاری و دکتر مقدم‌حیدری در حین مراحل دفاع و پیش از آن چه از جهت معرفتی و چه غیر آن یاری‌گر من بودند. از همگی‌شان بسیار ممنونم.

انجام این رساله به یقین مرهون خوش‌خلقی و سعه صدر استاد راهنمایم دکتر منصوری است و همه این‌ها غیر از راهنمایی‌های حرفه‌ای حین کار و بسیار ارزشمندتر از آن‌ها است. با تمام وجودم قدردان ایشان هستم.

از دوستانم - بعضی بیشتر و بعضی کمتر - متشکرم؛ گفتن سبکی می‌آورد و من - در حین انجام این کار - در بیشتر اوقات گوش‌های شنوایی اطرافم داشته‌ام.

انسان‌ها نیازمند تکیه‌گاه‌هایی به وقت ضرورت هستند و خانواده‌ام، بدون اغراق، همیشه چنین دل‌گرم کرده‌اند. از بیان شایسته دین خودم به ایشان ناتوانم.

جدی‌ترین بازی‌های زندگی ما به پل‌ها مربوط شده‌اند. برای به سرانجام رساندن این پل هم ممنونم...

تقدیم به

به پل‌های پشت سرم

و همهٔ پل‌هایی که از آنها خواهیم گذشت...

چکیده

استدلال‌هایی وجود دارد که نشان می‌دهد نظریات شناخته شده مکانیک کوانتومی ناموضعی هستند و متعهد به آثار علی فوق‌نوری می‌شوند. این ارتباطات علی فوق‌نوری به دلایل مختلف با ساختار فضا-زمانی نسبیت خاص هم‌خوانی ندارند. برای رفع این مشکل و حل مناقشه ناسازگاری دو دسته راه‌حل وجود دارد: یا می‌بایست با ارائه تعابیر و نظریات کوانتومی متفاوت موضعیت را به مکانیک کوانتومی برگردانیم یا اینکه ناموضعیت موجود را به طریقی با نسبیت خاص سازگار کنیم. کار اصلی این رساله بحث روی تبعات متافیزیکی نظریات کوانتومی‌ای است که سعی می‌کنند مناقشه را به طریق دوم رفع و رجوع کنند. سه نظریه یا مدل در این رساله بررسی شده است: مدل تکیونی، نظریه وابستگی ابرصفحه‌ای و برنامه تقلیل دینامیکی.

پدیده تقلیل در مدل تکیونی را تنها در صورتی می‌توانیم نسبیتی کنیم که ارتباطات تکیونی میان تمام ذرات جهان را در هر لحظه بپذیریم: یک شبکه گسترده تبادل اطلاعات. نظریه وابستگی ابرصفحه‌ای، با شرایطی، در حل مناقشه ناسازگاری موفق است ولی ناچار است جدایی‌ناپذیری مکانیک کوانتومی را به نحوی عمیق‌تر بپذیرد؛ تابع حالت یک سیستم روی تمام فضا-زمان گسترده است. تعبیر درخش از نظریه تقلیل دینامیکی تعبیری دو ساحتی است و ناچار است واقعیت مستقل فضای هیلبرت و فضای سه‌بعدی معمولی را بپذیرد. این تعبیر، حتی در سطح محدودش هم، هنوز نتوانسته چیزهای موجود در هر دو فضا را با ساختار فضا-زمانی نسبیت خاص آشتی دهد.

واژه‌های کلیدی: ناموضعیت کوانتومی، نظریه نسبیت خاص، مدل تکیونی، نظریه وابستگی ابرصفحه‌ای، برنامه تقلیل دینامیکی

فهرست مطالب

فصل اول: کلیات.....	۱
۱-۱ درآمد.....	۱
۲-۱ رویکردهای مختلف در حل مناقشه.....	۷۷
۳-۱ رویکرد این رساله.....	۲۴
۴-۱ آیا تبیین موفق‌تری برای پدیده ناموضعی کوانتومی وجود دارد؟.....	۲۹
۵-۱ تعریف مفاهیم و بحث در مورد آنها.....	۳۰
بخش اول: تعابیر موضعی مکانیک کوانتومی.....	۳۴
فصل دوم: قضیه بل و مسأله ناموضعی.....	۳۵
۱-۲ مقدمه.....	۳۵
۲-۲ مکانیک کوانتومی ارتدوکس.....	۳۶
۳-۲ استدلال EPR.....	۴۳
۳-۲ نامساوی بل.....	۵۱
۴-۲ مفهوم موضعی.....	۶۶
۱-۴-۲ تابع موج و فضای هیلبرت.....	۱۱
۲-۴-۲ جدایی ناپذیری/ناموضعی.....	۷۸
۳-۴-۲ ناواقع‌گرایی/ناموضعی.....	۸۲
۵-۲ تعابیر موضعی مکانیک کوانتومی.....	۸۷

۸۷	۱-۵-۲ رویکرد هماهنگی پیشین بنیاد
۹۵	۲-۵-۲ نابهنجی دستگاه‌های اندازه‌گیری
۹۸	۳-۵-۲ تعبیر تبادلی مکانیک کوانتومی
۱۰۶	۴-۵-۲ تعابیر حالت نسبی
۷۲۷	۵-۵-۲ تعبیر تاریخچه‌ها سازگار
۱۴۳	۶-۲ جمع‌بندی و نتیجه‌گیری
۷۴۷	بخش دوم: ناموضعیّت و نسبیّت خاص
۱۴۸	فصل سوم: مکانیک کوانتومی ارتدوکس و نسبیّت خاص
۱۴۸	۱-۳ مقدمه
۱۰۰	۲-۳ سیگنال‌دهی/علیّت فوق نوری
۱۵۶	۳-۳ ناوردایی تحت تبدیلات لورنتس
۱۵۸	۱-۳-۳ مکانیک کوانتومی ارتدوکس و معیار یک‌دستی تبیین
۱۲۲	۴-۳ جمع‌بندی
۱۶۴	فصل چهارم: مدل تکیونی
۱۶۴	۱-۴ مقدمه
۱۶۵	۲-۴ نسبیّت خاص و تکیون‌ها
۱۱۱	۳-۴ ناموضعیّت کوانتومی و مدل تکیونی مادلین
۷۷۷	۴-۴ مدل‌های تکیونی تقویت شده
۱۸۶	۵-۴ آیا مدل تکیونی مدل موفقی است؟

۱۹۶	..... فصل پنجم: نظریه وابستگی ابرصفحه‌ای
۱۹۶	..... ۱-۵ مقدمه
۷۹۷	..... ۲-۵ ابرصفحه‌ها و شرط لازم نظریات نسبیتی
۲۰۰	..... ۳-۵ نظریه وابستگی ابرصفحه‌ای
۲۵۵	..... ۱-۳-۵ تغییرات هستی‌شناسانه رادیکال
۲۰۹	..... ۲-۳-۵ مدل HD و تقدم و تأخر زمانی
۲۱۱	..... ۳-۳-۵ همبستگی‌های غیرقابل توضیح
۶۱۶	..... ۴-۵ فهمی بدیل از مدل HD
۲۷۷	..... ۱-۴-۵ مروری بر نسخه اول
۲۲۰	..... ۲-۴-۵ نسخه دوم
۲۲۴	..... فصل ششم: برنامه تقلیل دینامیکی نسبیتی
۲۲۴	..... ۱-۶ مقدمه
۲۲۷	..... ۲-۶ برنامه تقلیل دینامیکی
۲۳۰	..... ۱-۲-۶ مکانیک کوانتومی با جایگزیدگی خود به خودی
۲۳۸	..... ۲-۲-۶ مدل جایگزیدگی خود به خودی پیوسته
۲۴۱	..... ۳-۶ تعبیر مدل‌های تقلیل دینامیکی
۲۵۳	..... ۴-۶ بحث در تفاوت هستارهای تعبیر درخش و چگالی ماده
۶۶۳	..... ۵-۶ مدل تقلیل دینامیکی نسبیتی
۶۶۳	..... ۱-۵-۶ تقلیل دینامیکی نسبیتی: هستی‌شناسی چگالی جرم یا درخش؟

۲۷۰	..... ۲-۵-۶ تقلیل دینامیکی نسبیتی: نظریه‌های موجود
۲۸۸	..... ۶-۶ جمع‌بندی
۲۹۰	..... فصل هفتم: جمع‌بندی و نتیجه‌گیری
۲۹۰	..... ۱-۷ مقدمه: تبیین‌های فیزیکی موفق
۲۹۱	..... ۱-۱-۷ تعابیر موضعی
۲۹۵	..... ۲-۱-۷ تعابیر ناموضعی مکانیک کوانتومی
۳۰۱	..... ۲-۷ آیا مناقشه‌نا سازگاری حل شده است؟
۳۵۵	..... ۳-۷ چشم‌انداز مناقشه
۳۰۸	..... کتاب‌نامه
۳۰۸	..... منابع فارسی
۳۰۸	..... منابع لاتین

فهرست شکل‌ها

۲	..... شکل ۱-۱ ۱- محدودۀ فیزیک کلاسیک برای جرم‌های روزمره
۳	..... شکل ۲-۱ ۲- محدودۀ فیزیک کلاسیک (نیوتونی)
۵۲	..... شکل ۱-۲ ۱- چیدمان آزمایش بل
۵۴	..... شکل ۲-۲ ۲- چیدمان آزمایش بل
۵۷	..... شکل ۳-۲ ۳- آزمایش بل در زوایای خاص
۶۱	..... شکل ۴-۲ ۴- چیدمان آزمایش بل

- شکل ۲-۵ دستگاه مختصات ۱+۱ بعدی و نقاط فضا-زمانی ۶۷
- شکل ۲-۶ مخروط نوری (در دستگاه مختصات ۱+۲ بعدی)..... ۶۹
- شکل ۲-۷ نقاط فضاگون، نورگون و زمان گون (دستگاه مختصات ۱+۱ بعدی) ۶۹
- شکل ۲-۸ تفاوت توصیفات فضای فیزیکی معمولی و فضای هیلبرت ۷۳
- شکل ۲-۹ هماهنگی پیشین بنیاد بین نتایج دو سوی آزمایش ۹۳
- شکل ۲-۱۰ تقلیل از طریق مخروط نوری جلو و پشت ۹۹
- شکل ۲-۱۱ اندازه گیری اسپین ذره در تعبیر چند-جهانی ۱۱۶
- شکل ۲-۱۲ با اندازه گیری سمت راست آزمایش دو دسته جهان شکل می گیرد ۱۱۸
- شکل ۲-۱۳ با اندازه گیری سمت چپ آزمایش در جهان $W1$ دو دسته جهان شکل می گیرد. ۱۱۹
- شکل ۲-۱۴ ذره در حالت برهم نهی ۱۲۹
- شکل ۳-۱ s و t نتیجه آزمایش و a و b زوایای اندازه گیری هستند ۱۵۳
- شکل ۳-۲ وضعیت ذرات درهم تنیده از دو چارچوب مرجع ۱۶۰
- شکل ۴-۱ مدل تکینونی مادلین؛ ارتباط میان دو طرف آزمایش اسپه با استفاده از تکینون ۷۷۳
- شکل ۴-۲ مدل تکینونی مادلین از چارچوب های مرجع متفاوت ۱۷۴
- شکل ۴-۳ اصل باز تعبیر-رد و بدل شدن تکینون از نگاه دو چارچوب مرجع متفاوت ۷۷۶
- شکل ۴-۴ مدل (ت ۱) و آزمایش اسپه ۷۷۸
- شکل ۴-۵ مدل (ت ۱) از سه چارچوب متفاوت ۱۸۰
- شکل ۴-۶ انرژی و تکانه تکینون های منتشر شده از ذرات در هم تنیده ۱۸۱
- شکل ۴-۷ ناپایداری سیستم در مدل (ت ۱) ۱۸۳
- شکل ۴-۸ مدل (ت ۲) معضل ناپایداری را ندارد ۱۸۴

- شکل ۵-۱ چیدمان آزمایش اسپه - دستگاه‌های اندازه‌گیری هر دو در زاویه ۳۰ درجه تنظیم شده‌اند ۱۹۸
- شکل ۵-۲ توصیف جفت ذره درهم‌تنیده یک پارچوب خاص و دو برگه متفاوت ۲۰۳
- شکل ۵-۳ تقدم و تأخر بین ابرصفحه b و منطقه R از یک پارچوب خاص ۲۱۱
- شکل ۵-۴ جهان خط ذره در حالت برهم‌نهی به سمت چپ و راست ۲۲۱
- شکل ۶-۱ تابع موج و تابع احتمال تک ذره‌ای که در حالت برهم‌نهی قرار دارد ۲۳۳
- شکل ۶-۲ گوسی‌های زنگوله‌ای شکل با عرض گوسی متفاوت ۲۳۴
- شکل ۶-۳ احتمال حضور ذره در اطراف مرکز گوسی ۲۳۵
- شکل ۶-۴ هستارهای هستی‌شناسی درخش برای تک ذره در حالت برهم‌نهی ۲۴۵
- شکل ۶-۵ هستارهای هستی‌شناسی چگالی ماده برای تک‌ذره در حالت برهم‌نهی ۲۴۶
- شکل ۶-۶ تصویر منتسب به گربه شرودینگر ۲۰۰
- شکل ۶-۷ گربه شرودینگری (الف) از دید مشاهده‌گر (ب) در تعبیر چگالی ماده (ج) در تعبیر درخش ۲۵۳
- شکل ۶-۸ نسبت دادن اسپین الکترون به جهت حرکت دورانی آن ۲۵۹
- شکل ۶-۹ هستارهای موجود در فضا-زمان در تعبیر چگالی ماده: ۲۵۹
- شکل ۶-۱۰ توصیف آزمایش اسپه در GRW_m ۲۲۲
- شکل ۶-۱۱ توصیف آزمایش اسپه در GRW_f ۲۶۳
- شکل ۶-۱۲ (الف) GRW_m (ب) GRW_f ۲۶۷
- شکل ۶-۱۳ جفت ذره درهم‌تنیده در تعبیر GRW_f (هر دو حالت ممکن به تصویر کشیده شده است) ۲۶۸
- شکل ۶-۱۴ جفت ذره درهم‌تنیده در تعبیر GRW_m (هر دو حالت ممکن به تصویر کشیده شده است) ۲۶۹
- شکل ۶-۱۵ هستی‌شناسی چگالی جرم از پارچوب‌های متفاوت ۲۷۷
- شکل ۶-۱۶ از دوبار اندازه‌گیری اسپینی یکسان روی یک ذره یک نتیجه مشخص حاصل می‌شود ۲۸۵

فهرست جدول‌ها

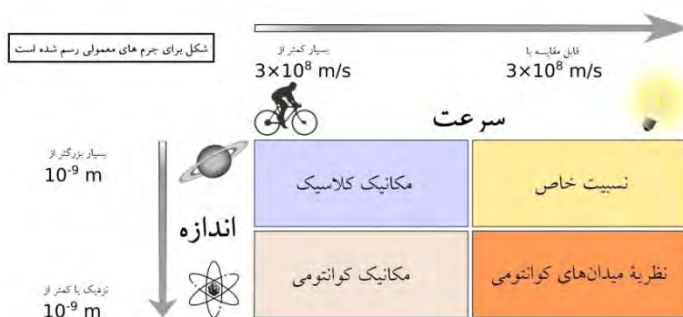
- جدول ۱-۲ نتایج بازجویی از مهدی و حسین ۸۹
- جدول ۲-۲ امواج رد و بدل شده در تعبیر تبادلی؛ زوایای اندازه‌گیری ۳۰ درجه در a و b ۱۰۱
- جدول ۳-۲ امواج رد و بدل شده در تعبیر تبادلی؛ زاویه اندازه‌گیری ۳۰ درجه در a و ۶۰ درجه در b ۱۰۳
- جدول ۴-۲ تعبیر تبادلی با موج‌های پیشنهاد و تأیید متعدد ۱۰۴

فصل اول: کلیات

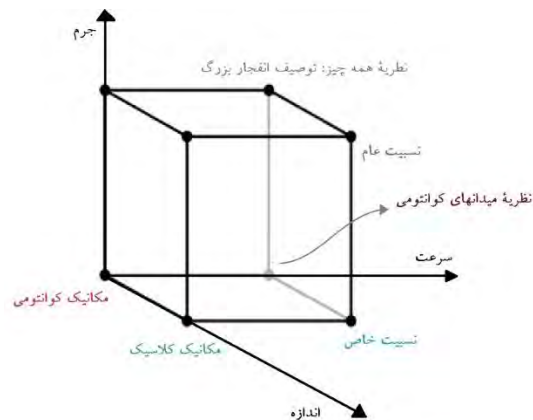
۱-۱ درآمد

در ربع اول قرن بیستم تغییر و تحولات عمیقی در دنیای فیزیک به وقوع پیوست. در این دوره دو نظریه مکانیک کوانتومی و نسبیت (خاص و عام) از جنبه‌هایی علم مستقر قرن نوزدهم میلادی یعنی فیزیک نیوتونی را تغییر دادند. دم‌دستی‌ترین راه فهم این تغییرات توصیف محدوده نظریه نیوتون است. فیزیک نیوتونی در مورد اشیاء روزمره - با اندازه، جرم و سرعت معمول - مثل سنگی که از بالای کوه رها می‌شود یا ماشینی که در جاده حرکت می‌کند، به خوبی کار می‌کند. اما تغییر و تحولات قرن بیستم نشان داد که اشیاء غیرمعمول، فیزیک جدیدی می‌طلبند: در محدوده اندازه‌های کوچکی چون الکترون درون اتم هیدروژن

فیزیک نیوتونی جای خود را به مکانیک کوانتومی می‌دهد، در سرعت‌های بالا و قابل مقایسه با سرعت نور- مثل حرکت بعضی از اجرام سماوی- نسبیت خاص جای فیزیک نیوتونی را می‌گیرد و در مورد اشیائی با جرم زیاد، مثل سیاهچاله‌ها، با نسبیت عام مواجه هستیم و فیزیک نیوتونی جواب‌گو نیست. (شکل‌های (۱-۱) و (۱-۲)) گفتنی است که هر سه نظریه مذکور در محدوده اشیاء معمولی با تقریب خوبی رفتار کلاسیکی- یعنی نیوتونی- دارند.



شکل ۱-۱ محدوده فیزیک کلاسیک برای جرم‌های روزمره



شکل ۱-۲ محدوده فیزیک کلاسیک (نیوتونی)

نسبیت خاص با مقاله‌ای که آلبرت اینشتین^۱ در سال ۱۹۰۵ نوشت، کم و بیش جای خود را نزد فیزیک‌دانان پیدا کرد.^۲ نسبیت عام نیز در سال ۱۹۱۵ توسط اینشتین به طور کامل ارائه شد.^۳ این نظریه پس از آن و با آزمایش‌های ادینگتون^۴ و همکارانش در حین خورشید گرفتگی سال ۱۹۱۹ از سوی جامعه

^۱ Albert Einstein

^۲ مقاله اینشتین با کارهای ریاضیاتی بعدی مینکوفسکی (در سال ۲۰۰۷) محل توجه قرار گرفت. می‌توان ادعا کرد نسبیت خاص تا سال ۱۹۱۱ از سوی جامعه علمی پذیرفته شده بود (یا حداقل اینکه جدی گرفته شده بود). در این سال بیشترین تعداد مقالات (نسبت به سال‌های قبل و بعد) در موضوعات مربوط به نسبیت خاص نوشته شد و از آن سال به بعد توجه‌ها به سمت مکانیک کوانتومی جلب شد. برای آگاهی از تاریخ نسبیت خاص و اتفاقات مربوط به آن رجوع کنید به (Walter 1999: Sec 3).

^۳ (Ryckman, 2016)

^۴ Arthur Eddington

علمی جدی گرفته شد.^۱ در مقایسه با نظریات نسبیت خاص و عام سیر توسعه و استقرار مکانیک کوانتومی بسیار طولانی‌تر بود. تقریباً در اوایل قرن بیستم اعوجاج‌هایی در فیزیک کلاسیک پیدا شد که نظریه نیوتون در توضیح آن‌ها مشکل داشت. این اعوجاج‌ها و تلاش برای ارائه و تکمیل راه‌حل، ربع قرن طول کشید. در دهه سوم قرن بیستم این تلاش‌ها منجر به «مکانیک موجی»^۲ شرودینگر^۳ و «مکانیک ماتریسی»^۴ هایزنبرگ^۵ شد؛ شرودینگر و هایزنبرگ در سال‌های ۱۹۲۵ و ۱۹۲۶ - مستقل از هم - به دو صورت بنی‌رسانند^۶ که بعداً تلاش شد نشان داده شود که این دو از جهت ریاضیاتی معادل‌اند.^۷ در حال

^۱ بررسی‌های تاریخی نشان می‌دهد بعد از این آزمایش‌ها فیزیکدان‌ها از نظریه نسبیت عام چشم‌پوشی نکرده‌اند. حتی مخالفان هم به ناچار آن را جدی گرفتند و محل تأمل قرار دادند. (Brush, 1999:208) سال ۱۹۱۹ و چند سال قبل و بعد از آن - به دلایل مختلف و از جمله کارهای ادینگتون و همکارانش - دوره‌ای است که می‌توان گفت نظریه نسبیت عام نوعی از پذیرش توسط جامعه علمی پیدا کرده است.

^۲ Wave Mechanics

^۳ Erwin Schrödinger

^۴ Matrix Mechanics

^۵ Werner Heisenberg

^۶ (Van der Waerden, 1997)

^۷ (Venezia, 2006)

حاضر ما «صورت‌بندی»^۱ ریاضیاتی مرتبط با فعالیت‌های مستقل هایزنبرگ و شرو دینگر را «مکانیک کوانتومی رایج (استاندارد)»^۲ می‌نامیم.^۳

بعد از استقرار صورت‌بندی رایج مکانیک کوانتومی دو پروژه در علم فیزیک و حواشی آن در جریان بود. اولی بحث داغی در مورد تعبیر مکانیک کوانتومی رایج است که بین دانشمندان پیشرو و مبدع مکانیک کوانتومی، چون هایزنبرگ و بور، با منتقد شناخته شده آن‌ها آلبرت اینشتین در گرفت و تا همین الان هم - لااقل در جامعه فلسفی - به اشکال مختلف پی‌گیری می‌شود. می‌توان از نظرات و تعابیری که بعضاً از فردی به فرد دیگر متفاوت است عبور کرد. از جهت تاریخی

^۱ formalism

^۲ Standard Quantum Mechanics

^۳ اولین صورت‌بندی ریاضیاتی کامل از مکانیک کوانتومی توسط فون نویمان (John Von Neumann) و در سال ۱۹۳۲ ارائه شد. این صورت‌بندی زیربنای بسیاری از رویکردهای بعدی است. مکانیک کوانتومی رایجی که در این رساله در موردش حرف می‌زنیم و در متون درسی آموزش داده می‌شود مبتنی بر کار فون نویمان است.

^۴ Niels Bohr

بحث‌های مربوط به پنجمین کنفرانس سولوی^۱ در سال ۱۹۲۷ موجب شد تعبیری خاص به نام «تعبیر کپنهاگی»^۲ در بین فیزیکدانان پذیرفته شود.^۳

در این تعبیر عنصر تصادفی‌ای وجود دارد که ذاتی طبیعت است. در فهم معمولی از تصادف، وقتی تاس می‌ریزیم مشروط بر اینکه شرایط اولیه و نیروهای وارد بر تاس را بدانیم به دقت می‌توانیم نتیجه را پیش‌بینی کنیم. در فیزیک کلاسیک - به‌طور مشخص در مکانیک آماری - از تصادف، شانس یا احتمال حرف می‌زنیم ولی آن را ناشی از جهل خودمان و پیچیدگی محاسبات می‌دانیم. در تعبیر کپنهاگی تصادف به خاطر جهل ما نیست. برای مثال مکانیک کوانتومی پیش‌بینی می‌کند اسپین اتم هیدروژن پس از اندازه‌گیری در یک زاویه خاص $+1/2$ یا $-1/2$ باشد اما اینکه در حین اندازه‌گیری کدام‌یک از این دو وضعیت اسپینی حاصل شود از نظر تعبیر کپنهاگی کاملاً تصادفی است. تا قبل از اندازه‌گیری به اتم هیدروژن اسپینی نسبت داده نمی‌شود؛ اتم حالت اسپینی ندارد

¹ Solvay Conference

² Copenhagen interpretation

^۳ گفته شده این تعبیر از ۱۹۳۰ تا ۱۹۸۰ بر جهان فیزیک سیطره داشته است. (Gribbin, John, 1998: 87)

یا حالت نامعین «نه پایین ($-1/2$) و نه بالا ($+1/2$)» دارد و به محض اندازه‌گیری و طی تحولی خاص - که آن را «تقلیل»^۱ می‌نامیم - یکی از دو حالت به صورت کاملاً تصادفی محقق می‌شود. در تعبیر کپنهاگی تحول سیستم دو گونه است یا «تحول شرودینگری»^۲ است که «موجیتی»^۳ است و قبل از اندازه‌گیری در جریان است یا تحول غیرشرودینگری یا تقلیلی که غیرموجیتی است و در حین اندازه‌گیری اتفاق می‌افتد. با وجود انتقادات جدی‌ای که به این تعبیر وجود دارد و نمی‌توان آن را بی رقیب دانست، اما هنوز در جامعه علمی تعبیر کپنهاگی تعبیری شناخته شده و کلاسیک است.

پروژه دوم که بیشتر جنبه فیزیکی، و نه فلسفی، دارد یکپارچه کردن این نظریات قرن بیستمی است. گفتیم از دهه چهارم قرن ما سه نظریه پذیرفته شده داریم

¹ Reduction

² Schrodingerian evolution

³ Deterministic

در یک تعریف اولیه می‌توان گفت یک نظریه فیزیکی موجیتی است اگر قوانین و شرایط اولیه بتواند شرایط بعدی سیستم را با قطعیت مشخص کند. با این توضیح تحول شرودینگری تحولی موجیتی است چرا که با داشتن تابع موج اولیه می‌توان تابع موج سیستم را در زمان‌های بعدی با قطعیت تعیین کرد. به بیان دیگر تحول شرودینگری موجیتی است چون با داشتن شرایط اولیه و معادله شرودینگر می‌توان احتمالات بعدی را به قطعیت معین کرد.

مکانیک کوانتومی کلاسیک (که غیرنسبیتی است)، نظریه نسبیت خاص و نظریه نسبیت عام. از این تاریخ به بعد دغدغه فیزیکدان‌ها ترکیب این سه نظریه است: ساخت نظریه مکانیک کوانتومی نسبیتی. تمام تلاش‌های فیزیک از دهه سوم قرن بیست تا همین الان را در معنایی می‌توان تلاشی برای دستیابی به نظریه مکانیک کوانتومی نسبیتی دانست. از میان همه این‌ها آنچه به بحث این رساله مرتبط است نظریاتی است که نسبیت خاص و «مکانیک کوانتومی کلاسیک»^۱ (غیرنسبیتی) را با هم سازگار می‌کند. گروهی فکر می‌کنند چنین کاری با موفقیت انجام شده است: «نظریه میدان‌های کوانتومی» (به اختصار QFT^۲). یکی از اهداف QFT ساخت نظریه‌ای بوده است که بتواند حرکت الکترون‌های آزاد- که بخاطر اندازه‌شان نیازمند توصیف‌های کوانتومی هستند و به خاطر سرعت‌شان توصیف نسبیتی لازم دارند- را توصیف کند.^۳ در حال حاضر غالب فعالیت فیزیکدان‌ها تلاشی برای سازگار کردن مکانیک کوانتومی و نسبیت عام است

^۱ Classical quantum mechanics

^۲ Quantum Field Theory

^۳ شکل (۱-۱) و (۲-۱) در این مورد گویا است.