به نام خدا

۱۰۲۵۵٤

دانشگاه شهید بهشتی
دانشکده علوم
گروه فیزیک

رساله دوره دکتری فیزیک نظری
(شاخه گرانش و ذرات بنیادی)

شکست تقارن لورنتس و Microcausality

نگارش:
رضا رشیدی

استاد راهنما:
دکتر هادی صالحی

شهریور ۱۳۸۶

۳۸۶ /۱۲/ ۲۵

۱۰۲۵۵۴

تاریخ .....
شماره .....
پیوست.....

دانشگاه شهید بهشتی بسمه تعالی

« صورتجلسه دفاع از رساله دکترا »

****

تهران ۱۹۸۳۹۶۳۱۱۳ اوین
تلفن: ۲۹۹۰۱

جلسه ارزیابی رساله آقای رضا رشیدی فرزند نصرت اله دارای شناسنامه شماره ۴۳۱۳۳ صادره از اهواز متولد ۱۳۵۵دانشجوی دوره دکترای رشته فیزیک باعنوان:

شکست تقارن لورنتس و Microcausality

****

به راهنمایی آقای دکترهادی صالحی کرمانی طبق دعوت قبلی درتاریخ ۸۶/۶/۳۱ تشکیل گردید وبراساس رای هیات داوران وباعنایت به ماده ۲۱، ۲۳،۲۲ ، تبصره های مربوطه مندرج درآزین نامه دوره دکترای مورخ ۱۳۷۲/۱۲/۸، رساله مزبور با نمره ۱۹..... ودرجه .....عالی.....مورد تصویب قرارگرفت .

[اعضای هیات داوران]

	نام ونام خانوادگی	درجه دانشگاهی	امضاء
۱-استاد راهنما :	آقای دکتر هادی صالحی کرمانی	دانشیار	
۲- استاد مشاور :			
۳- استاد داورداخل دانشگاه:	آقای دکترمهردادفرهودی	استادیار	
۴- داورداخل دانشگاه :	آقای دکتر حمیدرضاسپنجی	استاد	
۵- داورخارج از دانشگاه :	آقای دکتر حسام الدین ارفعی	استاد	
۶- داورخارج ازدانشگاه :	آقای دکتر محمدنوری زنوز	دانشیار	
۷- نماینده شورای تحصیلات تکمیلی :	آقای دکتر مهرداد فرهودی	استادیار	

۳۸۶ /۱۲/ ۲۰

ناظر تحصیلات تکمیلی

سپاسگزاری

از استاد ارجمندم جناب آقای دکتر هادی صالحی که با راهنمایی‌های ارزنده خویش مرا در به سرانجام رسانیدن این پایان‌نامه یاری نمودند سپاسگزارم. همچنین از اساتید محترم آقایان دکتر حمیدرضا سپنجی، دکتر کراسوس غفوری، دکتر مهرداد فرهودی و دکتر سیامک گوشه به خاطر پشتیبانی‌ها و راهنمای‌های بی‌دریغشان تشکر می‌نمایم.

تقدیم به

پدر و مادرم و همه کوشندگان راه دانش

چکیده

در این پایان‌نامه مدلی کلی برای شکست تقارن لورنتس بر روی فضا—زمان تحت مینکوفسکی معرفی می‌کنیم. سپس به اهمیت شرط مثبت بودن انرژی (energy positivity) برای پایداری این مدل‌ها در سطح کوانتومی خواهیم پرداخت. پس از آن با توجه به تقارن‌های باقی مانده در سیستم (یعنی تقارن تحت تبدیلات انتقال در فضا—زمان) روشی کلی برای کوانتش چنین مدل‌هایی معرفی می‌کنیم. در ادامه به نقش شرط کوچک‌تر بودن سرعت گروه از سرعت نور در جایگاه‌های مختلف می‌پردازیم و نشان خواهیم داد که برآورده کردن این شرط به همراه شرط مثبت بودن انرژی تنها هنگامی امکان پذیر است که لاگرانژی مدل غیرموضعی (nonlocal) باشد. آنگاه نشان خواهیم داد، در سطح کوانتومی، برای مدل‌هایی که شرط مثبت بودن انرژی و سرعت گروه را برآورده می‌کنند می‌توان یک تناظر یک به یک و یکانی میان نمایش‌های فضای فوک (Fock space) این مدل‌ها در چارچوب‌های لخت مختلف برقرار کرد. سپس شرط ریزعلیت (microcausality) را در این مدل‌ها بررسی کرده و ثابت می‌کنیم برای مدل‌هایی که دو شرط مثبت بودن انرژی و سرعت گروه را برآورده می‌کنند نمی‌توان شرط ریزعلیت را برقرار نمود، مگر آنکه مدل دارای تقارن لورنتس باشد. به زبان دیگر تنها مدل‌هایی که لاگرانژی‌های آنها ناوردای لورنتس باشند می‌توانند همزمان سه شرط مثبت بودن انرژی، سرعت گروه و ریزعلیت را برآورده نمایند. در انتها به رابطه میان ریزعلیت و پیوستگی فضا خواهیم پرداخت و نشان خواهیم داد که شرط ریزعلیت در مدل‌هایی که تقارن لورنتس در آنها شکسته است با پیوستگی فضا در تناقض قرار می‌گیرد.

فهرست مندرجات

۱ مقدمه ۵

۲ ملاحظات کلی ۱۰

۱.۲ تعریف شکست تقارن لورنتس ۱۰

۱.۱.۲ شکست تقارن در تئوری میدان ۱۰

۲.۱.۲ گروه لورنتس اصلاح شده ۱۳

۲.۲ سینماتیک در برابر دینامیک ۱۴

۳.۲ نقش تقارن‌های دیگر ۱۵

۱.۳.۲ ناوردایی CPT ۱۶

۲.۳.۲ ابرتقارن ۱۶

۳.۳.۲ ناوردایی پوانکاره ۱۷

۴.۲ ناوردایی diffeomorphism و هندسه اولیه (Prior Geometry) ۱۸

۵.۲ شکست تقارن لورنتس و اصل هم ارزی ۲۰

۶.۲ شکست تقارن به گونه سیستماتیک و غیرسیستماتیک ۲۲

۷.۲ علیت و پایداری (Causality and Stability) ۲۲

۱.۷.۲ علیت ۲۲

۲.۷.۲ پایداری ۲۵

۳ سینماتیک شکست تقارن لورنتس ۲۸

۱.۳ رابطه پاشندگی سیستماتیک ۲۸

۲.۳ پاشندگی غیرسیستماتیک ۳۰

۳.۳ چارچوب رابرتسون—منصوری—سکسل ۳۱

۴.۳ چارچوب c^2 . . . . . ۳۳

۵.۳ نسبیت «خاص دوتایی» ۳۴

۴ چارچوب‌های دینامیکی برای شکست تقارن لورنتس ۳۷

۱.۴ تئوری میدان موثر ۳۷

۱.۱.۴ مدل استاندارد گسترش یافته ۳۸

۲.۱.۴ فرم شکل ناوردا ۳۹

۳.۱.۴ چارچوب‌های عملی‌تر ۴۵

۴.۱.۴ شکست تقارن لورنتس در الکترودینامیک کوانتومی ۴۷

۵ بررسی مدل‌های شکست تقارن لورنتس ۵۱

۱.۵ مدل‌های شکست تقارن لورنتس ۵۲

۱.۱.۵ کوانتش میدان‌ها ۶۵

۲.۵ ریز علیت (Microcausality) ۷۷

۳.۵ ریزعلیت (microcausality) در مدل‌های شکست تقارن لورنتس و پیوستگی فضا ۸۷

فصل ۱

مقدمه

"All these fifty years of conscious brooding have brought me no nearer to the answer to the question, 'what are light quanta?' Nowadays every Tom, Dick and Harry thinks he knows it, but he is mistaken." *(Albert Einstein, 1951)*

نسبیت یکی از موفق‌ترین نظریه‌های قرن گذشته و سنگ بنای فیزیک مدرن بوده است. ناوردایی لورنتس یکی از تقارن‌های بنیادین نظریه نسبیت است. در دهه گذشته تلاش‌های بسیاری برای آزمودن این ناوردایی صورت گرفته است. دو عامل را می توان به عنوان انگیزه این تلاش‌ها ذکر کرد. نخست آنکه رهیافت‌های نظری بسیاری پیشنهاد می‌کنند که شاید ناوردایی لورنتس یک تقارن دقیق در همه مقیاس‌های انرژی نباشد. به عنوان مثال درفضا—زمان چهار بعدی امکان نقض تقارن لورنتس در مدل‌های مختلفی از گرانش کوانتومی (شامل نظریه ریسمان [۲ ،۱]، نظریه brane و

گرانش کوانتومی حلقه‌ای [۳]) وجود دارد. هیچکدام ازاین مدل‌های گرانش کوانتومی به طور قطعی نقض تقارن لورنتس را پیش بینی نمی‌کنند؛ ولی مدل‌های دیگری که برای توصیف ساختار فضا—زمان در انرژی‌های بالا در نظر گرفته می‌شوند، مانند تئوری‌های میدان ناجابجایی، نقض این تقارن را به طور دقیق نشان می‌دهند [۴]. نقض ناوردایی لورنتس در انرژی‌های بالا را می توان در نظریه میدان موثر وارد نمود، به گونه‌ای که این ناوردایی همچنان تقارن تقریبی خوبی برای فیزیک در انرژی‌های پایین باشد [۵]. همچنین ایده‌های بسیار دیگری نیز با نقض این ناوردایی ارتباط دارند [۱۷، ۱٦، ۱۵، ۱۴، ۱۳، ۱۲، ۱۱، ۱۰، ۹، ۸، ۷، ٦]، پس سرنوشت نهایی ناوردایی لورنتس می‌تواند موضوعی مهم در فیزیک باشد.

اگر تقارن لورنتس توسط گرانش کوانتومی نقض شود، مقیاس طبیعی که می توان برای نقض آشکار این تقارن انتظار داشت همانا انرژی پلانک خواهد بود؛ یعنی چیزی حدود $۱۰^{۱۹} GeV$. با توجه به گپ بزرگی که میان این مقیاس و انرژی‌های در دسترس مانند انرژی اشعه کیهانی GZK($۱۰^{۱۱} GeV$)، که بسیار بزرگتر از انرژی شتابدهنده‌های ساخت بشر است ($۱ TeV \approx$) وجود دارد نمی‌توان امیدوار بود که بتوان این نقض را به طور مستقیم مشاهده کرد.

خوشبختانه نقض تقارن لورنتس در مقیاس پلانک می‌تواند رد کوچکی از خود در انرژی‌های پایین بگذارد. بنابراین ممکن است بتوان رد کوچکی از این نقض را در دنیای اطراف مشاهده نمود. پیشرفت در فن آوری و روش‌های سنجش توانسته است دقت آزمایش‌ها را تا حدی بهبود ببخشد که بتوان آثار باقیمانده از نقض تقارن

لورنتس را دریافت کرد. این پیشرفت‌های آزمایشگاهی دومین انگیزه برای آزمودن ناوردایی لورنتس هستند. با این حال حتی اگر ردی از نقض تقارن لورنتس در آزمایش‌هایی با انرژی‌های کم مشاهده شود نمی‌توان نبود ناوردایی لورنتس در گرانش کوانتمی (یا همان انرژی‌های بالا) را به گونه‌ای سر راست نتیجه گرفت. به عبارت دیگر ممکن است این آزمایش‌ها تنها نشان دهنده شکست خود به خود تقارن لورنتس در انرژی‌های پایین باشند (مانند شکست خود به خود تقارن در مدل هیگز). پس در صورت مشاهده نقض تقارن لورنتس در انرژی‌های پایین می‌توان نتیجه گرفت که تقارن لورنتس تنها در حالتی (state) که در آن زندگی می‌کنیم شکسته شده است. این بدان معنی است که شاید خود گرانش کوانتمی (یا همان دنیای فیزیک در انرژی‌های بالا) ناوردای لورنتس بوده در حالیکه برای محاسبه مقادیر چشمداشتی خلا کوانتمی در انرژی‌های پایین مجبور به استفاده از میدان‌های تانسوری مشخصی (fixed) به غیر از متریک هستیم که این همان مفهوم شکست خود به خود تقارن است [۲]. بنابراین حتی اگر تقارن لورنتس تقارن خوبی در مقیاس پلانک باشد، آزمایش‌ها می‌توانند ردی از نقض آن را در انرژی‌های پایین نشان دهند. از این رو کشف تجربی نقض تقارن لورنتس می‌تواند نمایان گر فیزیک‌ی فرای مدل استاندارد باشد.

در حال حاضر چارچوب های نظری مختلفی برای اصلاح تقارن لورنتس وجود دارد. از آنجایی که بسیاری از ایده‌های بنیادین آنها از گرانش کوانتومی پدید می آیند و اطلاعات کمی درباره یک نظریه بنیادی گرانش کوانتومی در دست است، دیدگاه های بسیار متفاوتی در این چارچوب ها به چشم می‌خورد. در بسیاری از این مدل‌ها

تقارن لورنتس به طور صریح می‌شکند؛ بدین گونه که میدان های زمینه ای برتری به غیر از متریک در نظریه وجود دارند [۱۸، ۱۷]. با این حال در بعضی دیگر سعی می‌شود که جبر پوانکاره تغییر یابد؛ به این معنی که تبدیلات میان چارچوب‌های لخت چیزی به غیر از تبدیلات لورنتس خواهند بود ولی مانند نسبیت خاص چارچوب برتر لختی وجود نخواهد داشت [۱۹]. در این گونه مدل ها تقارن لورنتس در انرژی‌های پایین به طور «ظاهری» می‌شکند. حتی در بعضی از این چارچوب‌ها پیچیدگی‌های بیشتری ظهور کرده و تقارن‌های دیگری مانند CPT و ناوردایی انتقال نیز به همراه تقارن لورنتس از بین می‌روند. وضعیت تقارن لورنتس و تقارن‌های وابسته، چه شکسته شده باشند و چه تغییر یافته باشند؛ موجب تفاوت در نتایج آزمایشگاهی می شود.

ما در این رساله به آزمون‌های مختلف آزمایشگاهی، که برای ردیابی شکست تقارن لورنتس طراحی شده‌اند، نمی پردازیم. تنها به بیان این نکته بسنده می‌کنیم که این آزمون‌ها در طیف وسیعی از حوزه‌های فیزیک مانند فیزیک اتمی، فیزیک هسته‌ای، فیزیک انرژی بالا، نسبیت و نجوم طراحی شده‌اند. البته در هیچ‌کدام از آزمون‌هایی که تا کنون به مرحله عمل درآمده‌اند ردی از نقض تقارن لورنتس به دست نیامده‌است. برای مطالعه بیشتر در مورد این آزمون‌ها می‌توان به [۲۰] و مراجع درون آن مراجعه کرد.

در این رساله پس از این مقدمه در فصل دوم به ملاحظات کلی درباره شکست تقارن لورنتس، مفهوم آن، ارتباط آن با تقارن‌های دیگر و بقیه حوزه‌های فیزیک

خواهیم پرداخت. در فصل بعد سینماتیک شکست تقارن لورنتس را بررسی کرده و در فصل چهارم برخی مدل‌های دینامیکی مختلف که برای شکست تقارن لورنتس پیشنهاد شده‌اند را مطالعه می‌نماییم. در فصل پنجم که در واقع قسمت اصلی پایان‌نامه است، مدلی کلی برای شکست تقارن لورنتس، در نظریه‌های خطی برای میدان‌های اسکالر موثر بر روی فضا—زمان تحت مینکوفسکی، معرفی می‌کنیم. سپس به مطالعه جنبه‌های مختلف این مدل‌ها از کوانتش آنها گرفته تا پایداری و ریزعلیت (microcausality) خواهیم پرداخت.

فصل ۲

ملاحظات کلی

۱.۲ تعریف شکست تقارن لورنتس

۱.۱.۲ شکست تقارن در تئوری میدان

پیش از توصیف شکست تقارن لورنتس به صورت کلی مفید خواهد بود که با یک مثال این موضوع را بررسی کرده تا بتوان درک مستقیمی از آن داشت. فرض کنید که در چارچوب یک تئوری میدان کار می‌کنیم که شامل یک کنش با دو متریک و دو میدان اسکالر بدون جرم است

$$S = \frac{1}{2}\int \sqrt{-g}\, d^4x (g^{\alpha\beta}\partial_\alpha\phi\,\partial_\beta\phi + (g^{\alpha\beta}+\tau^{\alpha\beta})\partial_\alpha\psi\,\partial_\beta\psi) \qquad (۱-۲)$$

که $\tau^{\alpha\beta}$ یک تانسور متقارن اختیاری به غیر از $g^{\alpha\beta}$ است. هر دوی $g^{\alpha\beta}, \tau^{\alpha\beta}$

میدان‌های زمینه‌ای معلوم هستند. در هر نقطه می‌توان مختصاتی اختیار کرد که $g^{\alpha\beta} = \eta^{\alpha\beta}$ باشد ($\eta^{\alpha\beta}$ متریک مینکوفسکی $(---+)$ است). اکنون عمل تبدیل موضعی لورنتس در این نقطه بر S را در نظر بگیرید (تبدیلاتی که $\eta^{\alpha\beta}$ را ناوردا نگه می‌دارند). کنش S یک اسکالر در فضا—زمان است تا از نظر فیزیکی معنی دار و خوش تعریف باشد. اسکالرها طبق تعریف تحت همه تبدیلات غیر فعال (passive diffeomorphisms) (به معنی تبدیلات مختصات بر روی هر تانسور موجود در کنش) ناوردا هستند. تبدیلات موضعی لورنتس یک زیرگروه از گروه تبدیلات عام مختصات هستند، بنابراین کنش S تحت این تبدیلات غیرفعال (passive) نیز ناوردا است. این موضوع موجب می‌شود که معادلات حرکت میدان شکل تانسوری (tensorial form) خود را حفظ کرده و می‌توان محاسبات خود را در هر دستگاه مختصات دلخواه انجام داد. ناوردایی این مختصات گاهی اوقات به عنوان «ناوردایی مشاهده‌گر لورنتس» (observer Lorentz invariance) نامیده می شود[۲۱]. این ناوردایی معنی واقعی و عملی تقارن لورنتس به عنوان یک تقارن فیزیکی طبیعی را نمی رساند.

پایه و اساس ناوردایی لورنتسِ یک سیستم فیزیکی بر ایده تبدیلات فعال (active) لورنتس که در آن تنها میدان‌های دینامیکی ϕ و ψ تبدیل می‌شوند قرار گرفته است

$$\begin{aligned} \phi'(x) &= \phi((\Lambda^{-1})^{\mu}_{\nu}x^{\nu}) \\ \psi'(x) &= \psi((\Lambda^{-1})^{\mu}_{\nu}x^{\nu}) \end{aligned} \qquad (۲-۲)$$

که در آن Λ^μ_ν ماتریس تبدیل لورنتس است و $x'^\mu = \Lambda^\mu_\nu x^\nu$. مشتق‌ها به صورت زیر تبدیل می شوند

$$\begin{aligned} \partial_\nu \phi'(x) &= (\Lambda^{-1})^\mu_\nu \, \partial_\mu \phi((\Lambda^{-1})^\alpha_\beta x^\beta) \\ \partial_\nu \psi'(x) &= (\Lambda^{-1})^\mu_\nu \, \partial_\mu \psi((\Lambda^{-1})^\alpha_\beta x^\beta) \end{aligned} \qquad (۳-۲)$$

با استفاده از این تبدیلات به راحتی می توان دید که

$$\eta^{\alpha\beta} \, \partial_\alpha \phi'(x) \, \partial_\beta \phi'(x) = \eta^{\alpha\beta} \, \partial_\alpha \phi(x) \, \partial_\beta \phi(x)$$

زیرا طبق تعریف داریم $\eta^{\alpha\beta}(\Lambda^{-1})^\mu_\beta \, (\Lambda^{-1})^\nu_\alpha = \eta^{\mu\nu}$. بنابراین جملات شامل $\eta^{\alpha\beta}$ ناوردای لورنتس هستند. ولی چون $\tau^{\alpha\beta}$ تحت تبدیل Λ^{-1} ناوردا نیست کنش S تقارن لورنتس را می‌شکند. معادلات حرکت، آستانه‌های ذرات (particle threshold) و خصوصیات دیگر هنگامی که در مختصات ناظرهای تبدیل یافته نوشته شوند تغییر می‌کنند.

از آنجایی که به طور معمول در تئوری‌های فیزیکی خوش تعریف کنش باید اسکالر باشد، تنها شکست ناوردایی لورنتس به طور فعال می‌تواند، به عنوان شکست تقارن لورنتس، قابل قبول باشد (یعنی قانون همموردایی عام (General Covariance)

همچنان برقرار است). در بعضی موارد ناوردایی لورنتس فعال را ناوردایی لورنتس ذره (particle Lorentz invariance) می‌نامند [۲۱]. از آنجا که ما در جهانی زندگی می‌کنیم که ناوردایی لورنتس حداقل یک تقارن تقریبی خوب است، بنابراین $\tau^{\alpha\beta}$ باید در چارچوب ما مقدار کوچکی داشته باشد. در رهیافت تئوری میدان به چارچوبی که در آن تمام ضرایب شکست تقارن کوچک باشند چارچوب هم‌آهنگ (concordent) گویند [۲۲].

۲.۱.۲ گروه لورنتس اصلاح شده

بیشتر مدل‌های نقض تقارن لورنتس در محدوده توصیف بالا قرار می‌گیرند بدین معنی که در آنها مجموعه‌ای از چارچوب‌های هم آهنگ، به عنوان چارچوب های برتر، وجود دارد (حتی در مدل‌هایی که مبتنی بر تئوری‌های میدان نباشند). در این نظریه‌ها ناوردایی لورنتس می شکند و مجموعه‌ای از چارچوب های برتر وجود دارند که به طور آزمایشگاهی قابل تعیین هستند. یک روش مهم و قابل توجه دیگر اصلاح چگونگی عمل گروه لورنتس بر روی میدان‌های فیزیکی است.

در توضیحات بالا فرض شده است که همه چیز تحت نمایش مناسبی از گروه لورنتس به طور خطی تبدیل می‌گردد. در این ساختار تانسورهای غیر ناوردای (وردای) لورنتس به طور آشکار تقارن را می‌شکنند، ولی عمل گروه تقارن مانند سابق باقی می‌ماند. درحالی که می توان خود عمل گروه تقارنی را نیز اصلاح نمود. نظریه نسبیت خاص دوتایی (doubly special relativity) تا حدودی توانسته است به درک

ما از این ایده‌ها کمک نماید [۱۹، ۲۳] (DSR). در این سناریو ناوردایی لورنتس همچنان برقرار است، اما عمل گروه لورنتس بر روی کمیت‌های فیزیکی غیر خطی است. دراین دیدگاه علاوه بر وجود یک سرعت ثابت (ناوردا) c (یعنی همان سرعت نور)، یک مقیاس انرژی ناوردا نیز وجود دارد (برای همین آن را نظریه نسبیت خاص «دوتایی» می نامند). معمولا انرژی پلانک را به عنوان مقیاس ناوردای انرژی (λ_{DSR}) در نظر می‌گیرند. در این نظریه هیچگونه ناظر (دستگاه مختصات) برتری وجود ندارد، اما همچنان می‌توان آثار شکست تقارن لورنتس را مشاهده نمود. به عنوان مثال طول موج وابسته به سرعت نور در این نظریه قابل پیش بینی است. این انحراف‌ها در حقیقت نمود شکست ظاهری تقارن لورنتس هستند. در واقع عمل خطی گروه لورنتس بر کمیت‌های فیزیکی است که موجب از دست رفتن ناوردایی می‌گردد.

۲.۲ سینماتیک در برابر دینامیک

یک تئوری کامل فیزیکی باید شامل دینامیک نیز باشد. با این حال برای سال‌هاست که تنها چارچوب‌های سینماتیک برای آزمودن ناوردایی لورنتس؛ بدون در نظر گرفتن دینامیک کامل؛ گسترش یافته‌اند [۲۴، ۲۵، ۲۶، ۲۷]. به علاوه پیشنهاداتی که از گرانش کوانتومی می آیند تنها در قسمت سینماتیک تا حدودی قابل فهم هستند و درک درستی از قسمت دینامیک آنها وجود ندارد (مانند نظریه نسبیت خاص دوتایی [۱۹]). بنابراین تا هنگامی که این مدل‌ها کامل شوند، تنها آزمون‌های