بەنام خدا

دانشگاه صنعتی اصفهان
دانشکدهٔ فیزیک

پایان‌نامهٔ کارشناسی ارشد رشتهٔ فیزیک

بررسی نقض تقارن لورنتس

وحید عامری

استاد راهنما :

دکتر منصور حقیقت

مهر ۸۶

دانشگاه صنعتی اصفهان

دانشکدهٔ فیزیک

پایان‌نامهٔ کارشناسی ارشد رشتهٔ فیزیک

تحت عنوان

بررسی نقض تقارن لورنتس

توسط

وحید عامری

در تاریخ ۱۳۸٦/۷/۲۸ توسط کمیته تخصصی زیر مورد بررسی و تصویب نهایی قرار گرفت.

۱ــاستاد راهنمای پایان‌نامه	دکتر منصور حقیقت
۲ــاستاد مشاور پایان‌نامه	دکتر مهدی بارزی
۳ــاستاد ممتحن	دکتر بهروز میرزا
۴ــاستاد ممتحن	دکتر کیوان آقابابایی سامانی
سرپرست تحصیلات تکمیلی	دکتر سیّد ظفراللّه کلانتری

تشکر و قدر دانی

استاد گرامی جناب آقای دکتر حقیقت از زحمات بی‌وقفهٔ جناب عالی جهت به ثمر نشستن این پایان‌نامه و همراهی بنده برای گام نهادن در مسیر تحقیق و پژوهش **سپاس‌گزارم**.

کلیهٔ حقوق مادی مترتب بر نتایج مطالعات،
ابتکارات و نو آوری‌های ناشی از تحقیق موضوع این
پایان‌نامه متعلق به دانشگاه صنعتی اصفهان است.

تقدیم به

پدر و مادر عزیزم

فهرست مندرجات

۱ **مقدمه** ۲

۱—۱ نسبیت خاص ۲

۱—۲ تقارن لورنتس و CPT ۴

۱—۲—۱ قضیهٔ CPT ۵

۱—۳ واحدهای طبیعی ٦

۱—۴ چالش‌های پیش‌روی تقارن لورنتس ۷

۲ **آزمایش‌ها** ۱۰

۲—۱ ساعت‌های اتمی در فضا ۱۰

۲—۲ شکست مضاعف نور در خلا ۱۱

۲–۳ اثر چرخش اسپین ۱۲

۲–۴ انواع آزمایش‌های اشترن–گرلاخ ۱۳

۲–۴–۱ آزمایش اشترن–گرلاخ طولی ۱۵

۲–۴–۲ آزمایش اشترن–گرلاخ پیوسته ۱۶

۲–۵ آزمایش تله ۲۰

۳ مکانیزم شکست تقارن ۲۲

۳–۱ تقارن فضا–زمان ۲۳

۳–۲ شکست خود به خودی تقارن لورنتس وCPT ۲۴

۳–۲–۱ الکترودینامیک کلاسیک ۲۴

۳–۲–۲ میدان هیگز ۲۵

۳–۲–۳ میدان‌های برداری ۲۷

۳–۲–۴ اسکالرهای وابسته به فضا–زمان ۲۸

۳–۳ مدل استاندارد تعمیم یافته ۲۹

۴ هامیلتونی ذره آزاد ۳۲

۴–۱ نمایش فولدی–وات‌هاوزن ۳۲

۴–۱–۱ مشخصات کلی نمایش FW ۳۳
۴–۱–۲ تبدیل فولدی–وات‌هاوزن ۳۵

۴–۲ هامیلتونی نقض لورنتس وCPT برای ذرهٔ آزاد ۳۸

۵ اثرات نقض لورنتس برای ذره در میدان الکترومغناطیس ۴۴

۵–۱ هامیلتونی ذره در حضور میدان الکترومغناطیس ۴۴
۵–۱–۱ هامیلتونی غیرنسبیتی ۴۶

۵–۲ تعیین حد برای پارامترهای نقض ۵۶
۵–۲–۱ برهمکنش پتانسیل برداری و اسپین $(A.S)$ ۵۷
۵–۲–۲ برهمکنش میدان الکتریکی با اسپین $(E.S)$ ۵۷
۵–۲–۳ تعیین حد برای پارامتر$(g_{۳۳۰}+g_{۳۰۳})$ ۵۹

۵–۳ بحث و نتیجه‌گیری ۶۰

چکیده

در این پایان نامه ابتدابه بررسی مکانیزم‌های مختلف نقض لورنتس می پردازیم و در ادامه اثر نقض تقارن لورنتس را بر حرکت یک الکترون در تله مورد بررسی قرار می‌دهیم.برای این کار با استفاده از لاگرانژی نسبیتی نقض لورنتس در مدل استاندارد تعمیم یافته و تبدیل فولدی وات‌هاوزن و همچنین استفاده از جفت‌شدگی کمینه، هامیلتونی یک فرمیون جرم‌دار در میدان الکترومغناطیس را بدست می آوریم.برخلاف کارهای قبلی که از جملات شامل میدان‌های الکترومغناطیس صرف‌نظر می‌کردند در اینجا ما نشان خواهیم داد که برخی از این جملات می‌توانند باعث تشدید دامنهٔ نوسان ذره شده و لذا حدود خوبی را برای پارامترهای نقض پیش‌بینی کنند.

فصل ۱

مقدمه

دراین بخش در ابتدا مروری مقدماتی بر مفاهیم نسبیت خاص و تقارن لورنتس و CPT خواهیم داشت و در ادامه به ارائهٔ تاریخچهٔ مختصری از بررسی نقض تقارن لورنتس و CPT می‌پردازیم.

۱–۱ نسبیت خاص

کشف نسبیت خاص توسط اینشتین[۱] در سال ۱۹۰۵ در واقع نقطهٔ آغاز فیزیک جدید بود.اینشتین توانست سینماتیک فضا–زمانی را کشف کند که قادر بود تقارن‌هایی را که قبلاً در طبیعت دیده بودیم، حفظ کند و البته دامنهٔ اعتبار آنها را افزایش دهد[۱]. در حقیقت او نسبیت خاص را ارتقاء یافتهٔ چهارچوب نیوتنی معرفی نمود. اینشتین نسبیت را بر دو فرض زیر که بسیار واضح و قابل قبول بود، بنا نهاد.

۱) قوانین فیزیک از دید تمام مشاهده‌گرهای لخت(اینرسی) یکسان است.

---

[۱] Enstein

۲) سرعت نور در تمام چهارچوب‌های مرجع ثابت است.

فرض اول در مکانیک نیوتنی نیز صادق بود. بر اساس این فرض قوانین فیزیک تحت یک گروه ده بعدی که با یک تحول زمانی، سه انتقال، سه چرخش و سه خیز[۲] ساخته می‌شود، ناوردا می‌ماند.(این گروه را گروه پوانکاره[۳] می‌نامیم.) در مکانیک نیوتنی خیزها گالیله‌ای[۴] هستند، حال آنکه در نسبیت خاص خیزها لورنتسی اند.تفاوت این دو در این است که در حالت نسبیتی، یک سرعت بیشینه (سرعت نور) داریم. که البته این موضوع هیچ محدودیتی برای اصول قبلی فیزیک بوجود نمی‌آورد. فرض دوم نسبیت خاص، همانطور که مشاهده شد، در فرض اول هم به نوعی وجود دارد و به سرعت نور بازمی‌گردد. این فرض در مکانیک نیوتنی وجود ندارد. در مکانیک نیوتنی سرعت نور با سرعت منبع و سرعت مشاهده‌گر رابطه دارد ولی بنا به گفتهٔ اینشتین سرعت نور باید در تمام چهارچوب‌ها، با هر سرعتی، یکسان باشد. این نظریهٔ توانست یک دسته از آثار شناخته‌شده را پیش‌بینی کند که از میان آنها می‌توان به کند شدن ساعت‌های در حال حرکت ، کوتاه شدن طول اجسام متحرک و هم ارزی جرم و انرژی ($E = mc^2$) اشاره کرد. آزمایش‌های بسیار دقیق این نتایج را تائید می‌کنند. نسبیت اکنون یک پایه و ابزار مهم و روزمره برای فیزیکدانان تجربی است. شتاب‌دهنده‌های ذرات از مزایای افزایش جرم و طول عمر ذرات پرسرعت به خوبی بهره می‌برند و آزمایش با ایزوتوپ‌های رادیواکتیو نشان‌دهندهٔ تبدیل جرم به انرژی است. حتی کاربران دستگاه‌های الکترونیک نیز تحت تأثیر این پدیده‌ها هستند. در سیستم‌های مکان‌یابی جهانی باید تصحیح مربوط به تأخیر زمانی را در نظر گرفت و از طرفی در فیزیک نظری اصول نسبیت خاص نقشی اساسی در نظریهٔ میدان‌های کوانتونی ایفا می‌کنند و مدل استاندارد با تعداد محدودی پارامتر، یک نظریهٔ میدان کوانتومی بهنجارپذیر است. محدود بودن تعداد این کمیت‌ها نتیجهٔ مستقیم استفاده از ناوردایی لورنتس است. چنین نظریه‌هایی بدون در نظر گرفتن ناوردایی لورنتس، شامل تعداد بیشماری اختلال خواهند شد، که در این صورت کارایی خود را تقریباً از دست خواهند داد.

---

[۲] Boost

[۳] Poancare

[۴] Galilian

۱ — ۲ تقارن لورنتس و CPT

ناوردایی قوانین فیزیک برای مشاهده‌گرهای مختلف نشان‌دهندهٔ تقارنی در فضا—زمان است که تقارن لورنتس نامیده می‌شود.هنریش آنتوان لورنتس[۵] فیزیکدان هلندی است که برای نخستین بار در دههٔ ۹۰ در این باره به تحقیق پرداخت. کره کامل نمایش دهندهٔ تقارنی است که به عنوان تقارن تحت دوران(چرخش) شناخته می‌شود. کره را در هر جهت و به هر میزان که بچرخانید کاملاً مشابه به نظر می‌رسد.تقارن لورنتس اینگونه بر روی تشابه اشیاء بنا نشده، بلکه مبنای آن یکی بودن قوانین فیزیک تحت تبدیلات دورانی و خیز است. مشاهده‌گرهای لخت، مستقل از اینکه دارای چه جهت و چه سرعت ثابتی هستند، قوانین فیزیک را یکی می‌بینند. هنگامی که تقارن لورنتس درنظر گرفته‌شود،فضا—زمان همسانگرد به نظر می‌رسد، بدین معنی که همهٔ جهت‌هاو حرکت‌های ثابت هم ارز هستند و هیچ کدام بر دیگری برتری ندارند.

تقارن فضا—زمان لورنتس، هستهٔ اصلی نظریهٔ نسبیت را تشکیل می‌دهد. با دانستن قواعد تبدیلات لورنتس می‌توان تمام پیش‌بینی‌های شناخته‌شدهٔ نسبیت را بدست آورد. تا قبل از مقالهٔ ۱۹۰۵ اینشتین، معادلات مربوط به این پدیده‌ها توسط محققان دیگری از جمله خود لورنتس بدست آمده‌بود. اما آنها این معادلات را به عنوان تغییرات فیزیکی در اشیاء تعبیر می‌کردند. به عنوان مثال پدیده انقباض طول با کاهش طول پیوند بین اتم‌ها، توجیه می‌شد. سهم بزرگ اینشتین این بود که او تمام قطعات را به هم پیوند داد و نشان داد که طول‌ها و آهنگ کار ساعت‌ها ارتباط تنگاتنگی با یکدیگر دارند و بدین ترتیب تصور فضا و زمان در مفهوم جدیدی به نام فضا—زمان یکی گشتند. تبدیلات CPT از آمیخته شدن سه تبدیل زیر ساخته شده است:

۱) همیوغی بار[۶]

۲) پاریته[۷]

---

[۵] Henrich Antuan Lorentz

[۶] Charge conjugation

[۷] Parity

۳) وارونی زمان[۸]

که:

تبدیل همیوغی بار ذره را به پاد ذره‌اش تبدیل می‌کند.

تبدیل پاریته، یک شی را به تصویر آیینه‌ایش و علاوه بر آن جهت بالا را به پایین تصویر می‌کند.

تبدیل وارونی زمان، جهت حرکت زمان را تغییر می‌دهد.

سیستمی که تحت مجموع هر سه تبدیل فوق ناوردا باقی بماند تقارن CPT دارد. همیوغی بار، پاریته و وارونی زمان به طور جداگانه در طبیعت تقارن ندارند و در بعضی آزمایش‌هانقض می‌شوند، اما تمام ازمایش‌هایی که تاکنون انجام شده صحت تقارن CPT را تائید نموده‌اند.

۱–۲–۱ قضیهٔ CPT

قضیهٔ CPT یک قضیهٔ بسیار عام و نظری است که توسط بل[۹]، لودر[۱۰] و پائولی[۱۱] ارائه‌شد. این قضیه تقارن لورنتس و CPT را به هم مربوط می‌کند و نشان‌می‌دهد، نظریه‌هایی که تقارن لورنتس دارند، حتماً تقارن CPT هم دارند، لذا نظریه‌هایی که در آنها تقارن CPT شکسته‌می‌شود، حتماً شامل نقض تقارن لورنتس نیز خواهندبود. اما عکس این قضیه درست نیست. با استفاده از قضیهٔ CPT می‌توان نشان‌داد، ذره و پادذره باید مشخصاتی چون جرم، طول عمر، اندازه بار الکتریکی و ممان مغناطیسی یکسان داشته‌باشند.

---

[۸] Time reversal

[۹] Bell

[۱۰] Luder

[۱۱] Pauli

۱—۳ واحدهای طبیعی

در فیزیک ذرات بنیادی و هسته‌ای هرگاه کوانتوم و نسبیت با هم اهمیت پیدا کنند و قرار باشد از کوانتوم نسبیتی استفاده کنیم، نوشتن سرعت نور(c) و ثابت پلانک ($\hbar$) در روابط، مزاحمت زیادی را به وجود می‌آورد. مرسوم است که در این مواقع، سرعت نور و ثابت پلانک را مساوی یک قرار دهیم و بدین شکل این ثابت‌ها را از معادلات حذف می‌کنیم.

در دستگاه cgs (و همچنین MKS) سه کمیت بنیادی طول[۱۲]، جرم[۱۳] و زمان[۱۴] داشتیم و بعد[۱۵] تمام کمیت‌های دیگر را بر حسب ابعاد این کمیت‌ها می‌نوشتیم. حال سه کمیت بنیادی را در نظر می‌گیریم، ما می‌توانیم این کمیت‌ها را بر حسب یکدیگر بنویسیم. برای مثال، طول را می‌توان با استفاده از سرعت نور، که بعدش LT^{-1} است، در واحد زمان اندازه گرفت. در زندگی روزمره، به هیچ وجه بیان طول به صورت ۳۳ پیکو ثانیه[۱۶] به جای یک سانتی‌متر، معمول نیست. اما در دنیای فیزیک ذرات بنیادی، بیان چنین شکلی از طول به هیچ وجه غیر معمول نیست. با این روش، طول و زمان با هم، هم بعدند.

مشابه عملیات فوق را این بار برای ثابت پلانک با بعد $L^{2}MT^{-1}$ انجام می‌دهیم. با استفاده از ثابت پلانک می‌توانیم، بعد جرم را به دو بعد دیگر مربوط کنیم. بدین شکل با استفاده از سرعت نور و ثابت پلانک می‌توانیم، تمام ابعاد را بر حسب یک بعد بنیادی (یکی از ابعاد پذیرفته شدهٔ قبلی) بنویسیم. این سیستم یکاها را، سیستم یکاهای طبیعی[۱۷] می‌نامیم.

در ادامه و در فصل‌های بعد، از این سیستم برای کمیت‌ها و معادلات استفاده می‌کنیم.

---

[۱۲] Length

[۱۳] Mass

[۱۴] Time

[۱۵] Dimension

[۱۶] Pico-second

[۱۷] Natural Unit

۱ — ۴ چالش‌های پیش‌روی تقارن لورنتس

شواهدی برای شکست تقارن لورنتس، حداقل در ابعاد پلانک[۱۸]، وجود دارد. در این قسمت به بررسی برخی از این شواهد می‌پردازیم[۲].

جهان ما دارای حداقل‌ها و حداکثرهایی است. به عنوان مثال برای طول و بازهٔ زمانی دارای یک حد پایین و برای انرژی دارای یک حد بالاست و این حدود در تمام مراجع و چهارچوب‌ها باید یکسان باشد، ولی تبدیلات لورنتس قادر به ثابت نگه‌داشتن این حدود در چهارچوب‌های مختلف نیست و این موضوع می‌تواند مدرکی بر علیه نظریهٔ نسبیت باشد. البته در مورد نظریهٔ نسبیت باید این نکته را یادآور شد که تمام آزمایش‌هایی که تاکنون انجام شده، صحت این نظریه را تائید کرده است.

تمام ذرات بنیادی و برهمکنش‌های غیر گرانشیشان توسط نظریه‌ای که مدل استاندارد[۱۹] فیزیک ذرات نامیده می‌شود، توصیف می‌شوند.در سطح کلاسیک، گرانش هم با نسبیت عام بخوبی داده می‌شود. هر دو نظریهٔ فوق به صورت موضعی[۲۰] تقارن لورنتس دارند. ترکیب مدل استاندارد و نسبیت عام به طور حیرت انگیزی در توصیف طبیعت موفق است. اما در شرایطی مانند آزمایش کلاسیک حرکت نوترون‌های سرد برخلاف میدان گرانشی زمین که باید هم گرانش و هم فیزیک کوانتومی را در نظر گرفت، نیروی گرانش به عنوان یک نیروی خارجی به توصیف کوانتومی اضافه می‌شود. این کار ممکن است که از دید آزمایشگاهی کارآمد باشد. اما بسیاری از فیزیکدانان معتقدند که فرمول‌بندی یک نظریهٔ نهایی که در آن گرانش بصورت کوانتومی توصیف شده باشد و نظریه هر چهار نوع نیرو را شامل شود، امکان پذیر است. یکی از نخستین فیزیکدانانی که بر روی این مسئله کار کرد خود اینشتین بود که سال‌های پایانی عمر خود را صرف این مسئله کرد.

یک رهیافت فراگیر و امید بخش به چنین نظریهٔ نهایی، نظریهٔ ریسمان[۲۱] است. این نظریه بر این

---

[۱۸] Plank scale

[۱۹] Standard Model

[۲۰] Local

[۲۱] String Theory

ایده بنا شده که تمام ذرات و نیروها را می‌توان براساس اشیایی یک بعدی (ریسمان‌ها) به همراه رویه‌های دوبعدی و بالاتر که به آنها ابر رویه می‌گویند، توصیف کرد. رهیافت شناخته شده دیگر گرانش کوانتومی حلقه‌ای [۲۲] است که به دنبال یک تصویر سازگار کوانتومی از نسبیت عام است وپیش‌بینی می‌کند که فضا—زمان از قطعات جدای(کوانتوم‌ها) حجم و سطح ساخته شده است.شکل نظریهٔ نهایی هرگونه که باشد این انتظار وجود دارد که فیزیک کوانتومی و گرانش در ابعاد پلانک به طور جداناپذیری در هم تافته شوند و از آنجا که ابعاد پلانک با ابعادی که ما در آزمایشگاهها مورد بررسی قرار می‌دهیم، فاصلهٔ زیادی دارند، علاوه بر ارائهٔ نظریهٔ نهایی، انجام مشاهدات مستقیم تجربی برای آزمودن پیش‌بینی‌های چنین نظریه‌هایی نیز عملاً یک چالش جدی است[۳] ، [۴] [۷].

با وجود چنین سدهایی باز هم ممکن است راههایی برای کسب اطلاعات آزمایشگاهی از نظریهٔ نهایی در مقیاس پلانک وجود داشته باشد. شاید در آزمایش‌هایی که به اندازه کافی حساس هستند، پدیده‌هایی که به طور غیر مستقیم بازتابندهٔ فیزیکی جدید در نظریهٔ نهایی است، مشاهده شود[۵]،[٦]. به عنوان مثال، تصاویر روی نمایشگر تلویزیون یا کامپیوتر از تعداد زیادی نقطهٔ روشن [۲۳] تشکیل شده‌است. این نقاط در مقایسه با فاصله تماشایی نمایشگر به حدی کوچک است که تصویر از دید چشم کاملاً یکنواخت به نظر می‌رسد. اما در بعضی شرایط خاص این نقاط مشاهده می‌شوند. مثلاً هنگامی که مجری کرواتی راه راه با نوارهای باریک بپوشد باعث ایجاد طرحی می‌شود که به طرح « موير» معروف است.

هیچ کس نمی‌تواند در مورد اینکه کدام آزمایش بهترین آزمایش برای بررسی نقض تقارن لورنتس و CPT است حرفی بزند. چرا که نظریه شامل انواع مختلفی از ثابت‌هاست که هر کدام به آزمایش‌های خاصی حساس هستند. برای مثال مقید کردن ضرایب نقض CPT با اندازه‌گیری اختلاف جرم کاهش یافته بین کائون و پادکائون و بین هیدروژن و پاد هیدروژن به مجموعه ضرایب کاملاً متفاوتی حساس است. تعدادی از این آزمایش‌ها در ذیل نام برده شده است:

---

[۲۲] Loop Quantum Gravity

[۲۳] Pixle

۱) مقایسهٔ ساعت‌های اتمی در زمین و فضا[۲۴][۹]،[۱۰]،[۱۱].

۲) طیف سنجی هیدروژن و پادهیدروژن[۸].

۳) تله [۲۵][۱۲]،[۱۳].

۴) محاسبهٔ خواص میوان[۲۶][۱۴].

۵) محاسبات کیهانشناسی[۱۵]،[۱۶].

۶) مشاهدهٔ تقارن باریونی

۷) مشاهدهٔ نوسانات نوترینوها[۲۷][۱۷].

۸) مشاهدهٔ نوسانات مزون‌های[۲۸] خنثی [۱۸]،[۱۹].

در فصل بعد به بررسی برخی از این آزمایش‌ها می‌پردازیم. در ادامه و در فصل سوم، مکانیزم شکست تقارن را با بیان چند مثال ساده، توضیح خواهیم داد و در فصل چهارم، هامیلتونی یک ذرهٔ آزاد را با در نظر گرفتن شکست تقارن لورنتس و CPT، مورد محاسبه قرار می‌دهیم. در نهایت، در فصل پنجم، اثرات نقض لورنتس را برای یک ذره در میدان الکترومغناطیس، مورد بررسی قرار داده و از این رهیافت، برای برخی پارامترهای نقض لورنتس و CPT، حد تعیین می‌کنیم.

---

[۲۴] Clock Comparison

[۲۵] Penning Trap

[۲۶] Muon

[۲۷] Neutrino

[۲۸] Meson

فصل ۲

آزمایش‌ها

در حال حاضر بخش عمده‌ای از تحقیقات نظری در راستای جستجوی نظریه‌ای برای توصیف گرانش کوانتومی است، اما آزمایش‌هایی که به بررسی چنین ایده‌هایی می‌پردازند، با موانع عمده‌ای مواجه هستند. از جمله اینکه در تمام مدل‌های کاندیدای گرانش کوانتومی انتظار می‌رود اثرات به شدت کوچک و در حدود مقیاس پلانک باشد. به عنوان مثال اندازه‌گیری‌های ما در انرژی پایین باید دقتی، حداقل از مرتبهٔ یک در $۱۰^{۱۷}$ داشته باشند.

دراین بخش به بررسی برخی آزمایشهای متداول و دقیق برای بررسی نقض تقارن لورنتس و CPT می‌پردازیم.

۲—۱ ساعت‌های اتمی در فضا

آزمایش‌هایی که در فضا انجام می‌شوند معمولاً با دقت بسیار بالایی تقارن لورنتس را نشان می‌دهند. یکی از این آزمایش‌ها مقایسه دو ساعت اتمی در جهت‌گیری‌های متفاوت است، در این حالت می‌توان

یکی از ساعت‌ها را روی زمین قرار داد و ساعت دیگر را روی یک ماهواره که به دور زمین می‌چرخد. در فصل بعد نشان خواهیم داد یکی از مکانیزم‌های شکست تقارن، شکست خود به خودی تقارن است. یعنی به عنوان مثال یک میدان زمینه را عامل شکست تقارن در نظر بگیریم. که در این صورت ساعتی که روی زمین است نسبت به ساعتی که روی ماهواره است، جهت‌گیری متفاوتی نسبت به میدان زمینه دارد. پس می‌توان انتظار داشت این ساعت‌ها زمان‌های متفاوتی را نشان دهند. لازم به ذکر است که در این نوع از ساعت‌ها، بازه‌های زمانی با دقت بسیار بالایی قابل اندازه‌گیری است. در نتیجه این آزمایش می‌تواند یکی از گزینه‌های مناسب برای بررسی صحت تقارن لورنتس باشد[۲۰].

۲–۲ شکست مضاعف نور در خلا

در الکترودینامیک معمولی یک پرتو نور که در خلاء منتشر می‌شود از دو میدان الکتریکی و مغناطیسی که عمود بر راستای انتشار نوسان می‌کنند تشکیل شده است. قطبش نور بوسیلهٔ جهت‌گیری میدان الکتریکی تعیین می‌شود و دو مولفهٔ قطبش مستقل دارد که این مولفه‌ها با سرعت یکسان در خلاء حرکت می‌کنند به همین دلیل قطبش خالص پرتو نور، هنگام انتشار ثابت می‌ماند. هنگامی که تقارن فضا تحت دوران شکسته شود، نور هنوز دو مولفهٔ قطبش دارد اما آنها با سرعت‌های متفاوت حرکت می‌کنند. در نتیجه قطبش خالص نور در هنگام انتشار تغییر خواهد کرد. این اثر شکست مضاعف نور[۱] نامیده می‌شود.

محاسبات بر روی فوتون‌ها در مدل استاندارد تعمیم[۲] یافته نشان می‌دهد که تغییرات قطبش ممکن است با فرکانس نور نیز مرتبط باشد(شکل ۲–۱).

---

[۱] Birefringence of light

[۲] Standard Model Extension