

دانشگاه محقق اردبیلی

دانشکده علوم

گروه فیزیک

عنوان:

## بررسی تقارن و قوانین پایستگی در فیزیک ذرات

استاد راهنما:

دکتر قادر نجارباشی

استاد مشاور:

دکتر صدیف احدپور

توسط:

فروزان میرمسعودی

تابستان ۱۳۸۹

نام خانوادگی : میرمسعودی	نام : فروزان
عنوان پایان نامه : بررسی تقارن و قوانین پایستگی در فیزیک ذرات.	
استاد راهنما : دکتر قادر نجارباشی اساتید مشاور : دکتر صدیف احدپور	
مقطع تحصیلی: کارشناسی ارشد	رشته: فیزیک – بنیادی دانشگاه: محقق اردبیلی دانشکده: علوم تاریخ فارغ التحصیلی: ۱۳۸۹/۶/۲۵ تعداد صفحه: ۱۵۱
واژه‌های کلیدی : تقارن، پاریته، ذرات بنیادی، قوانین پایستگی، همیوگی بار، وارونی زمانی.	
<p style="text-align: right;"><b>چکیده:</b></p> <p>در این پایان نامه، ابتدا تقارن‌های ذرات بنیادی که شامل تقارن‌های گسسته و پیوسته می‌باشد، بررسی می‌شود. سپس با شناخت ذرات بنیادی معروف، طبقه‌بندی آن‌ها را بر حسب مدل کوآرکی بیان می‌کنیم. در ادامه به بررسی تقارن CP در سیستم کائون می‌پردازیم. سپس با یک نگاه اجمالی درباره نظریه میدان، میدان‌های دو خطی دیراک را تحت تقارن‌های گسسته ( پاریته، همیوگی بار، وارونی زمانی، CP و CPT ناوردایی ) مطالعه می‌کنیم. همچنین به مرور قضیه نوتر که در قلب تقارن جای دارد می‌پردازیم.</p>	

# فهرست مندرجات

## ۱ ذرات بنیادی و تقارن‌ها

۲	..... مقدمه‌ای بر ذرات بنیادی	۱,۱
۳	..... طبقه‌بندی ذرات بنیادی	۲,۱
۴	..... مدل کوآرکی	۳,۱
۶	..... قوانین بقا	۴,۱
۱۲	..... پاریته	۵,۱
۱۵	..... همیوگی ذره-پادذره	۶,۱
۱۷	..... پاریته پائون	۷,۱
۱۸	..... واپاشی پائون	۸,۱
۲۲	..... مجموع دو آیزواسپین : حاصل ضرب دو نمایش	۹,۱
۲۵	..... G-پاریته	۱۰,۱

## ۲ نقض CP در واپاشی $K^0$

۲۸	..... ویژه حالت‌های عملگر شگفتی $K^0, \bar{K}^0$	۱,۲
----	--	-----

۳۰	.....	$K_1^0, K_2^0$ ویژه حالت‌های عملگر CP	۲,۲
۳۳	.....	نوسان شگفتی	۳,۲
۳۷	.....	اختلاف جرم $K_2^0 - K_1^0$	۴,۲
۴۰	.....	بازتولید کائون $K_1^0$	۵,۲
۴۳	.....	مفهوم پدیدارشناسی از واپاشی $K_2^0 \rightarrow 2\pi$	۶,۲
۵۱	.....	یکانی بودن، ناوردایی CPT و نقض T	۷,۲
۵۶	.....	مقایسه‌ای بین کائون‌های خنثی	۸,۲
۵۷	.....	آیزواسپین $K_{L,S}^0 \rightarrow 2\pi$	۹,۲
۶۰	.....	خواص CP در واپاشی $K^0 \rightarrow 2\pi$ و $K^0 \rightarrow 3\pi$	۱۰,۲
۶۳	.....	عملگر وارونی زمانی و نقض CPT	۱۱,۲

### ۳ میدان‌های دیراک و قضیه CPT

۶۹	.....	مقدمه‌ای بر نظریه میدان کوانتومی	۱,۳
۷۰	.....	معادله شرودینگر	۱,۱.۳
۷۱	.....	معادله کلاین-گوردن	۲,۱.۳
۷۱	.....	معادله دیراک	۳,۱.۳
۷۳	.....	ذرات به عنوان کوانتای میدان	۴,۱.۳
۷۹	.....	اندرکنش‌ها	۵,۱.۳
۸۰	.....	عملگر پاریتته	۲,۳

۸۵	.....	۳,۳ همیوگی بار
۹۰	.....	۴,۳ عملگر وارونی زمانی
۹۶	.....	۱,۴.۳ تبهگنی کرامرز
۹۸	.....	۵,۳ خواص تبدیلی دیراک دوخطی
۱۰۱	.....	۶,۳ تقارن CPT و هم‌ارزی جرم و نیمه‌عمر
۱۰۱	.....	۱,۶.۳ تعریف تقارن
۱۰۲	.....	۲,۶.۳ اثبات هم‌ارزی جرم
۱۰۴	.....	۳,۶.۳ اثبات هم‌ارزی نیمه‌عمر

## ۴ تقارن‌های پیوسته

۱۰۷	.....	۱,۴ مقدمه
۱۰۹	.....	۲,۴ نمایش تانسوری تبدیلات لورنتس
۱۱۰	.....	۳,۴ تجزیه تانسور لورنتس تحت گروه $SO(3)$
۱۱۲	.....	۴,۴ طبقه‌بندی تبدیلات لورنتس حقیقی تحت پارینه و وارونی زمانی
۱۱۴	.....	۵,۴ آیزواسپین
۱۱۵	.....	۶,۴ عملگرهای تولیدکننده
۱۱۶	.....	۷,۴ آیزواسپین دوترون
۱۱۷	.....	۸,۴ آیزواسپین برای ذرات دیگر

۱۱۸	.....	۹,۴ تقارن کایرال
۱۱۹	.....	۱.۹,۴ قضیه نوتر
۱۲۳	.....	۲,۹.۴ حالت‌های کایرال
۱۲۶	.....	۳,۹.۴ فرمیون‌های بدون جرم
۱۲۹	.....	۱۰,۴ شکست خودبه‌خودی تقارن کایرال
۱۲۹	.....	۱.۱۰,۴ نظریه نامبو-گلدستون
۱۳۱	.....	۲,۱۰.۴ واپاشی پائون و PCAC
۱۳۲	.....	۳,۱۰.۴ رابطه گلدبرگر- تریمن
۱۳۵	.....	پیوست
۱۴۶	.....	واژه‌نامه
۱۴۹	.....	مراجع

فصل اول

**ذرات بنیادی و تقارن‌ها**

## مقدمه

در فیزیک می‌خواهیم بدانیم چرا جهان ظاهراً پیچیده ما این چنین عمل می‌کند. برای رسیدن به پاسخ، باید ذهنمان را روی جزء کوچکی از جهان متمرکز کنیم. با نگاهی دقیق‌تر معلوم شد آنچه که روزی ذرات بنیادی به نظر می‌رسیدند در واقع مجموعه‌ایی از ساختارهای بنیادی دیگرند. اندک اندک این باور به وجود آمد که جهان متشکل از اتم‌ها باشد، اتم‌هایی که به نظر می‌رسد از دهها گونه متفاوت‌اند که عناصر نامیده می‌شوند. بعداً با این کشف که همه این عناصر ظاهراً از سه نوع ذرات بنیادی، پروتون‌ها، الکترون‌ها و نوترون‌ها تشکیل یافته‌اند بازگشتی قاطع به جهانی کوچکتر صورت گرفت. با دسترسی دانشمندان به انرژی‌های زیاد، تعدادی ذرات زیر اتمی جدید به نام کوارک‌ها کشف شدند که معلوم شد ذراتی نظیر پروتون و نوترون و بسیاری از ذرات دیگر دارای ساختار درونی هستند و ذره بنیادی محسوب نمی‌شوند [۲۱].

تا قرن بیستم، تقارن نقش کوچکی را در فیزیک نظری بازی می‌کرد. اما در فیزیک نوین تقارن نقش بسیار مهمی دارد و معمولاً تقارن در فیزیک، به شکل قوانین در فیزیک مطرح می‌شود. قوانین پایستگی خصوصاً پایستگی تکانه و انرژی از اساسی‌ترین آن شمرده می‌شد و جزء قوانین دینامیکی طبیعت محسوب می‌شدند. شاید درک صریح تقارن با دقت در مادلات ماکسول شروع شده باشد. از آن پس در مباحث گوناگون فیزیک، در بسیاری از مدل‌سازی‌ها، تقارن خاصی را به عنوان فرض پذیرفته‌اند. زبان ریاضی که برای بیان تقارن‌های یک سیستم از ذرات بسیلر مفید واقع شد نظریه گروه و به ویژه گروه‌های لی می‌باشد.

البته مدت‌ها طول کشید تا نظریه گروه جای خود را در فیزیک پیدا کند در واقع با کشف مکانیک کوانتومی عده‌ایی از فیزیک دانان مانند ویگنر از این ابزار جدید برای حل بعضی از مسائل مهم فیزیکی استفاده کردند. این بهره‌گیری از نظریه گروه به قدری گسترش یافت که در بعضی حوزه‌ها مانند ذرات بنیادی به عنوان بخش انکارناپذیر مورد توجه قرار گرفت. ویگنر در کتاب Group Theory. E.P. Wigner. 1959 از ریاضیات و گروه برای رسیدن به این هدف استفاده کرد.



برای مثال مورای گلמן توانست اوضاع نابسامان چند ذره بنیادی کشف شده که به ظاهر هیچ ارتباطی با هم نداشتند را بهبود بخشد و همه آن‌ها را در گروه‌های خاصی جای دهد، به عبارتی دیگر مورای گلמן، مندلیف ذرات بنیادی است [۲۴].

تقارن نقش بسیار مهمی در فیزیک دارد اگر مسئله‌ای دارای تقارن باشد آن مسئله راحت‌تر حل می‌شود. معنی تقارن در فیزیک چیست؟ تقارن در سیستم فیزیکی بدین معنی است که سیستم مورد نظر و یا به عبارتی دیگر مشاهده پذیرهای آن تحت یک تبدیل که روی آن انجام می‌شود، تغییر نکند. در هر شاخه از فیزیک، تغییر نکردن حالت یک سیستم را به کمک ناوردایی کمیت فیزیکی بیان می‌کنند. بهترین تعریف برای تقارن با مراجعه به کتاب وایل به صورت زیر است [۲۳]:

*"Symmetry ... is an idea which has guided man thought the centuries to the understanding and the creation of order, beauty and perfection."*

ناوردایی هامیلتونین تحت هر تبدیل، وجود تقارن را نشان می‌دهد و تقارن یک مسئله وجود ثابت حرکت را ایجاب می‌کند، مثلاً ناوردایی تحت انتقالات فضا-زمانی منجر به پایستگی تکانه-انرژی می‌شود. ارتباط بین تقارن و قوانین پایستگی تحت قضیه معروف نوتر بیان می‌شود، به طوریکه هر تقارن پیوسته لاگرانژین یک کمیت پیوسته را ایجاب می‌کند [۶].

تقارن  $\longleftrightarrow$  قوانین پایستگی

تقارن می‌تواند پیوسته یا گسسته باشد. عملگرهای پاریته، همیوگی بار و وارونی زمانی جزء تقارن-های گسسته و انتقال و دوران جزء تبدیلات فضا-زمانی پیوسته و آیزواسپین جزء تقارن‌های داخلی پیوسته می‌باشد. قانونی که امکان تبدیل حالت اولیه به حالت دیگر را در فرایند کوانتومی محدود می‌کند به اصطلاح قوانین پایستگی نامیده می‌شوند که برحسب اعداد کوانتومی آن حالت‌ها بیان می‌شود. به انواع اعداد کوانتومی در پایین اشاره خواهیم کرد.

**اعداد گسسته جمعی:** اگر اعداد کوانتومی جمعی باشد، که در واقع عدد کوانتومی کل یک سیستم جمع اعداد کوانتومی مولفه‌هایش است. مثل انواع بارها در اندرکنش‌های مهم: بارهای الکتریکی، بارهای رنگی، بارهای ضعیف که ظاهراً پایسته هستند. پایستگی آن‌ها مطابق با ناوردایی

لاگرانژین اندرکنشی است که تحت تبدیلات گروه یکانی هستند و گروه به اصطلاح گروه پیمانهای و نوردایی به اصطلاح نوردایی پیمانهای است. به طوریکه: گروه پیمانهای اندرکنش الکترومغناطیسی  $U(1)$ ، اندرکنش قوی  $SU(3)$  و الکترومغناطیسی  $U(1) \otimes SU(2)$  است.

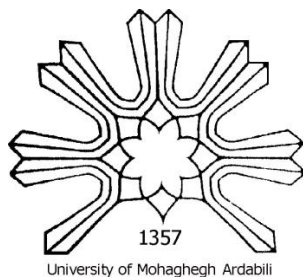
اعداد کوانتومی دیگر از قبیل: طعم کوارک و عدد باریونی، طعمهای لپتونی می باشد که این اعداد در برخی اندرکنشها پایسته نیست.

**تقارنهای داخلی:** تبدیلها، پیوسته هستند و در یک فضای یکانی رخ می دهد که توسط گروه تقارن معین می شوند و به مختصات فضا-زمان وابسته نمی باشد. آن تقارنها ما را مجاز می سازند تا یک تعدادی از ذرات به صورت حاصل ضرب، که اعضای آنها رفتار مشابهی دارند تقسیم بندی کنیم. یک نمونه بار مستقل هسته ای است. تقارن مربوطه تحت تبدیلات گروه  $SU(2)$  و آیزواسپین پایسته است.

**اعداد گسسته ضربی:** این تبدیلات، نمی تواند از تبدیلات بینهایت کوچک ساخته شود. مهمترین این تبدیلات پارته، همیوگی بار و وارونی زمانی هستند. در برخی اندرکنشها تقارنها شکسته می شود که پایستگی یا عدم پایستگی اعداد کوانتومی به طور تجربی معین می شود [۱]. این پایان نامه شامل چهار بخش است:

- در فصل اول ابتدا با معرفی و طبقه بندی ذرات، انواع اعداد کوانتومی را معرفی کرده و سپس به قوانین بقا اشاره می کنیم. با معرفی عملگرهای گسسته پارته و همیوگی بار برای سیستمهای مختلف مثل سیستمی شامل دو ذره، دو فرمیون-پاد فرمیون، دو مزون و فوتون پارته و همیوگی بار مربوط به آنها را تعیین می کنیم. نشان می دهیم که لاگرانژی اندرکنش-های ضعیف شامل جریانهای برداری و محوری هستند که برای نشان دادن آنها، واپاشی پایون را در نظر می گیریم. با در نظر گرفتن مفهوم آیزواسپین امکان انجام واکنشهای قوی، الکترومغناطیسی و ضعیف را بررسی می کنیم و هادرونها را با بکارگیری این مفهوم تقسیم بندی می کنیم و در نهایت به معرفی عملگر جدیدی به نام  $G$ -پارته که فقط اندرکنشهای قوی تحت آن پایسته هستند، را معرفی می کنیم.

- پدیده نقض CP در سال ۱۹۶۴ با مشاهده واپاشی ضعیف  $K_L \rightarrow 2\pi$  کشف گردید. به دنبال این کشف آزمایشات تجربی و تحقیقات نظری دامنه‌داری آغاز شد. در آزمایشات تجربی از قضیه CPT استفاده می‌شود چون طبق این قضیه نقض CP با نقض T ارتباط دارد لذا شکست تقارن CP ایجاب می‌کند که نوردایی و ارونی زمانی بشکند. در فصل دوم به چگونگی نقض تقارن CP در سیستم کائون خنثی می‌پردازیم و پارامترهای نقض CP را معرفی می‌کنیم.
- پیدایش بحث میدان در فیزیک امری قدیمی و ریشه‌دار است، زیرا از همان ابتدای فرمول-بندی فیزیک کلاسیک، مخصوصاً الکتریسیته و مغناطیس دانسته شد که اندرکنش ذرات نمی‌تواند مستقیماً صورت گیرد. در فصل سوم با یک توضیح مختصر درباره پیدایش نظریه میدان کوانتومی و معرفی میدان‌های فرمیونی و بوزونی، میدان‌های مربوطه را تحت تقارن-های P, T, C, CP, CPT را مورد بررسی قرار می‌دهیم.
- در نهایت در فصل آخر به بررسی تقارن‌های پیوسته می‌پردازیم. تبدیل لورنتس را که ارتباط دهنده بین مختصات فضا-زمانی است را معرفی می‌کنیم. سپس بر حسب عملگرهای و ارونی زمانی و پاریته به دسته بندی آن‌ها می‌پردازیم. در ادامه آیزواسپین به عنوان تقارن پیوسته را معرفی می‌کنیم. در انتهای این بخش یک تقارن داخلی به نام کایرال معرفی می‌شود و مشاهده می‌کنیم که در حد بدون جرم کایرالیته با هلیسیتی یکسان است و چند دلیل نظری سازگار با نتایج تجربی را معرفی می‌کنیم که بیانگر شکست خودبه‌خودی تقارن کایرال است.



Faculty of Sciences  
Department of Physics

Title

# **Investigation of Symmetry and Conservation Laws in Particle Physics**

Supervisor

**Dr. Ghader Najarbashi**

Advisor

**Dr. Sodeyf Ahadpour**

By

**Forouzan Mirmasoudi**

University of Mohagheh Ardabili

September 2010