دانشگاه حکیم سبزواری

دانشکده علوم پایه

گروه فیزیک

پایان نامه جهت دریافت درجه کارشناسی ارشد

رشته فیزیک گرایش ذرات‌بنیادی

عنوان:

محاسبه تقریب مرتبه اول توابع چهارنقطه‌ای $(\bar{\lambda}\bar{\lambda}\bar{\varphi}\bar{\varphi})$ و تعدادی از توابع سه نقطه‌ای $(A\bar{\varphi}\bar{\varphi})$ در نظریه پیمانه‌ای جرم‌دار ابرتقارنی $N = \frac{1}{2}$

استاد راهنما:

دکتر احمد فرزانه‌کرد

استاد مشاور:

دکتر عبدالرحیم عسکری

پژوهشگر:

رسول گلستانه گلستانی

۱۳۹۲

بسم الله الرحمن الرحیم

سپاس‌بی‌کران پروردگار یکتا را که به ما هستی بخشید و به‌راه علم و دانش رهنمودمان کرد و به همنشینی با رهروان علم مفتخرمان نمود و خوشه‌چینی از علم و معرفت را روزیمان قرار داد.

«من لم‌یشکر المخلوق لم‌یشکر الخالق »

با تشکر و سپاس از همه‌ی اساتید دانشمند و پرمایه‌ام که از محضر پرفیضشان، بهره‌ها برده‌ام.

با درود بی‌کران به روح پدرمرحومم و تقدیر و تشکراز مادر عزیز، و همسر دلسوز و فداکارم که همواره چراغ وجودشان روشنگر راه من در سختی‌ها و مشکلات بوده‌است.

و با تشکر خالصانه خدمت همه‌ی کسانی که مرا در این راه یاری نموده‌اند.

فرم چکیده‌ی پایان‌نامه‌ی دوره‌ی تحصیلات تکمیلی

مدیریت تحصیلات تکمیلی

دانشگاه حکیم سبزواری

نام خانوادگی دانشجو: گلستانه گلستانی	**نام:** رسول	**ش دانشجویی: ۹۰۱۳۷۳۱۰۵۱**
استاد راهنما: دکتر احمد فرزانه کرد	**استاد مشاور:** دکتر عبدالرحیم عسکری	
دانشکده: علوم پایه	**رشته:** فیزیک	**گرایش:** ذرات بنیادی
مقطع: کارشناسی ارشد	**تاریخ دفاع:** ۱۳۹۲/۱۱/۲۰	**تعداد صفحات:** ۸۵

عنوان پایان‌نامه: محاسبه تقریب مرتبه اول توابع چهار نقطه ای $(\bar{\lambda}\bar{\lambda}\bar{\varphi}\bar{\varphi})$ و تعدادی از توابع سه نقطه ای $(A\bar{\varphi}\bar{\varphi})$ در نظریه پیمانه ای جرم دار ابرتقارنی $N = \frac{1}{2}$

کلیدواژه‌ها: ابر تقارن جرم دار $N = \frac{1}{2}$ ، ابر فضای ناجابجایی، نظریه پیمانه ای $U(N)$ ، ابر میدان

چکیده

امروزه کار های زیادی در رابطه با نظریه های پیمانه ای در ابرفضای ناجابجایی انجام شده است. چنین نظریه هایی غیر هرمیتی بوده، و نیمی از ابرتقارن موجود در نظریه ابرتقارنی معمول را دارا هستند. به همین دلیل عبارت "ابرتقارن $N = \frac{1}{2}$" مطرح می شود. در این مقاله محاسبه نمودار های تک حلقه ی کاهش ناپذیر، در چند مورد از برهم کنش های موجود در نظریه جرم دار ابر تقارن $N = \frac{1}{2}$ بررسی شده است. در نهایت مشاهده می شود که رفتار واگرایی ها در تقریب مورد نظر عادی بوده است. نتایج این کار، برای بررسی باز بهنجارپذیری این نظریه ها لازم است.

امضای استاد راهنما

فهرست مطالب

فهرست جدول‌ها	ج
فهرست شکل‌ها	د
مقدمه	۱
فصل اول مدل استاندارد	٤
۱-۱ مقدمه‌ای بر نظریه مدل‌استاندارد	۵
۱-۲ لاگرانژی مدل استاندارد	٦
۱-۳ ضعف‌های مدل استاندارد	۸
فصل دوم ابرتقارن	۱۰
۲-۱ مفهوم تقارن	۱۱
۲-۲ انواع تقارن	۱۱
۲-۳ مقدمه‌ای بر ابرتقارنی	۱۲
۲-٤ جبر ابرتقارنی	۱٦
۲-۵ نمایش اسپینوری درابرتقارن، اسپینورهای ویل، کایرال و مایورانا	۱۹
۲-٦ تبدیلات ابرتقارن	۲۱
۲-٦-۱ ابرفضا	۲۲
۲-٦-۲ ابرانتقال	۲۳
۲-٦-۳ ابرمیدان	۲۸
۲-۷ ابر تقارن در ابر فضای ناجابجایی	۳۵
۲-۸ جبر ابر تقارن در ابر فضای ناجابجایی	۳۷
فصل سوم بررسی لاگرانژی	۳۸
۳-۱ مقدمه	۳۹
۳-۲ لاگرانژی پیمانه‌ای در فضای $N = \frac{1}{2}$	٤۲

۳-۳ بررسی ابرپتانسیل	٤۳
٤-۳ چند لاگرانژی مهم	٤٤
۵-۳ ساده سازی لاگرانژی	٤٤
۳-۵-۱ قواعد فاینمن برای انتشارگرها	٤۸
۳-۵-۲ قواعد فاینمن برای رأس‌ها	۵۲
فصل چهارم محاسبات	۵۵
٤-۱ نمودارهای فاینمن مرتبه اول نظریه	۵٦
٤-۲ محاسبه نمودارها	٦۲
٤-۲-۱ نمودارهای گروه اول	٦۲
٤-۲-۲ نمودارهای گروه سوم	٦۷
٤-۳ **نتیجه‌گیری**	۷٤
پیوست‌ها	۷٦
مقاله‌های استخراج شده	۸۲
مراجع	۸۳

فهرست جدول‌ها

۲-۱	ابرمـیدان‌های مختلف	۳٤
۳-۱	قواعد فاینمن برای انتشارگرها در نظریه $U(N)$ ابرتقارن جرم‌دار $N = \frac{۱}{۲}$	۵۱
۳-۲	قواعد فاینمن برای رأس‌ها در نظریه $\mathrm{U(N)}$ ابرتقارن جرم‌دار $N = \frac{۱}{۲}$	۵٤
٤-۱	نتایج محاسبات نمودارهای گروه اول	٦٦
٤-۲	نتایج محاسبات نمودارهای گروه سوم	۷۳

فهرست شکل‌ها

۱-۲	جدول ذرات مدل استاندارد	۱۳
۲-۲	تقارن بین ذرات مدل استاندارد و ذرات ابرتقارنی	۱۵
۱-۳	نمایش فاینمن میدان برداری (گیج)	٤۹
۲-۳	نمایش فاینمن گیجینو	٤۹
۳-۳	نمایش فاینمن D و F	٤۹
٤-۳	نمایش فاینمن ψ	٤۹
۵-۳	نمایش فاینمن φ	۵۰
٦-۳	انتشارگر جرمی $\langle F-\varphi \rangle$	۵۰
۷-۳	انتشارگر جرمی ψ	۵۰
۸-۳	راس با چهارخط خروجی گیجینو	۵۲
۹-۳	راس با دو خط خروجی گیجینو و دو خط خروجی گیج	۵۲
۱-٤	نمودارهای گروه اول	۵۷
۲-٤	نمودارهای گروه دوم	۵۹
۳-٤	نمودارهای گروه سوم	٦۱
٤-٤	نمودار (۱ − m)	٦۲
۵-٤	نمودار (۳ − aa)	٦۷

مقدمه

نظریه میدان‌های کوانتومی[1] چارچوبی نظری برای بازسازی مدل‌های مکانیک کوانتومی سیستم‌هایی مهیا می‌کند، که در فیزیک کلاسیک با میدان‌ها یا سیستم‌های بس ذره‌ای توصیف می‌شد. در نظریه‌ی میدان‌های کوانتومی نیروهای میان ذرات توسط ذرات دیگر برقرار می‌شوند. برای نمونه، نیروی الکترومغناطیسی میان دو الکترون با رد و بدل فوتون‌ها امکان می‌یابد، با این حال نظریه فوق برای تمام نیروهای بنیادی به کار برده می‌شود. بوزون های برداری نیروی ضعیف، گلوئون‌ها نیروی قوی، و گراویتون‌ها نیروی گرانشی را برقرار می‌سازند. این ذرات حامل نیرو، ذراتی مجازی‌اند و زمانیکه حامل نیرو هستند امکان آشکارشدن‌شان وجود ندارد.

از سال ۱۹۳۰، فیزیکدانان خود را وقف حذف بی‌نهایت‌های نظریه‌ی میدان‌های کوانتومی کرده‌اند. تصویر کلاسیکی از «همه چیز به شکل ذره یا میدان است» در نظریه‌ی میدان‌های کوانتومی به صورت «همه چیز میدان است» در می‌آید. همچنین این نظریه که اولین اتحاد مکانیک کوانتومی و نسبیت شناخته می‌شود، در ابتدا دارای یک رشته نتایج بی‌معنا بود. به عنوان مثال، هرگاه فیزیکدانان سعی می‌کردند رویدادهایی را که در اثر برخورد الکترون‌هایی با سرعت بالا بوجود می‌آیند را بررسی کنند، استفاده از این نظریه، آن‌ها را به مقادیر بی‌نهایتی برای برخی کمیت‌ها مواجه می‌کرد. در سال ۱۹۴۹، فاینمن[2] با استفاده از تقارن های ریاضی که نقش بسیار مهمی در از بین بردن بی‌نهایت‌ها در نظریه میدان کوانتومی دارند، توانست اولین اتحاد موفقیت آمیز نسبیت خاص و مکانیک کوانتومی را که به نظریه «الکترودینامیک کوانتومی»[3] شهرت دارد، به وجود آورد و در سال ۱۹۶۵ جایزه نوبل فیزیک را به خود اختصاص دهد.

الکترودینامیک کوانتومی به طور موفقیت آمیزی توانست با حذف بی‌نهایت های موجود در نظریه میدان کوانتومی، برهم کنش‌های فوتون و الکترون را بررسی کند. در راستای تحقق این نظریه، فاینمن شروع به پیش بینی عددی رویداد برخورد ذراتی مانند الکترون یا اتم‌ها با یکدیگر کرد. در سال ۱۹۴۰، فاینمن با انجام محاسبات مربوط به نمودارهایی که رویداد های برخورد ذرات بنیادی با

[1] Quantum_Field_Theory
[2] Feynman
[3] Quantum electrodynamics

یکدیگر را به صورت سمبولیک نشان می‌داد (نمودارهای فاینمن[۱]) توانست بی‌نهایت‌های موجود در نظریه را حذف کند. تعداد این نمودارها، بینهایت است که هر کدام یک عبارت ریاضی را مشخص می‌کنند. راه حل فاینمن با وجود اینکه با عکس العمل‌های متضادی مواجه شد، کاملا جدید بود. الکترودینامیک کوانتومی، نظریه‌ای دو پارامتری است: بار و جرم الکترون. علاوه بر نسبیت خاص، اکنون معادلات ماکسول تقارن دیگری به نام «تقارن پیمانه‌ای» را دارا می‌شدند که به فاینمن اجازه می داد تا مجموعه بزرگی از نمودارها را مجددا گروه بندی کند. سرانجام او دریافت که می‌تواند به سادگی بار و جرم الکترون را به نحوی بازتعریف کند که بی‌نهایت‌ها جذب یا حذف شوند. (باز بهنجارش[۲]) از دیدگاه منتقدین، استفاده از یک دسته از بی نهایت‌ها (که از حلقه‌ها بر می خیزند) برای حذف یک دسته دیگر از بی‌نهایت‌ها (که از بار و جرم ناشی می شوند) به نظر نامعقول و صرفا یک ترفند به نظر می‌رسید. به نظر دیراک، نظریه بازبهنجارش برای اینکه نمایش یک جهش واقعی عمیق از درک ما از طبیعت باشد، ناهنجار بود، اما نتایج تجربی قابل نفی نبود. در سال ۱۹۵۰، نظریه جدید بازبهنجارش فاینمن به فیزیکدانان اجازه داد که با دقت غیر قابل باور، ترازهای انرژی اتم هیدروژن را محاسبه کنند. هیچ نظریه دیگری، به دقت حیرت انگیز محاسبه با الکترودینامیک کوانتومی حتی نزدیک نشد. با وجود اینکه این نظریه تنها برای الکترون و فوتون کاربرد دارد (نه برای نیروهای ضعیف و قوی)، موفقیت آن بدون شک چشمگیر بود.(این تاثیر متقابل بین تقارن و بازبهنجارش که همواره دیده می شود، یکی از اسرار بزرگ فیزیک است.) [۲۱،۱۷،۱۹،۲۰].

مطالب بالا مقدمه‌ای در مورد پیدایش بازبهنجارش بود. در این پایان‌نامه سعی بر آن است تا اولین گام برای پیش روی به سوی بازبهنجارش نظریه پیمانه ای $U(N)$ ابرتقارن جرم دار $N = \frac{1}{2}$ با در نظر گرفتن میدان‌های فرمیونی، برداشته شود. برای این کار پس از باز کردن کامل لاگرانژی این نظریه، و آوردن روابط مورد نیاز، به محاسبه دو دسته از نمودارهای فاینمن مربوط به این نظریه پرداخته‌ایم.

۱ Feynman diagrams

۲ Renormalization

این پایان‌نامه شامل ٤ فصل می‌باشد. در فصل اول مختصری در مورد مدل استاندارد توضیح داده شده‌است. با همین بررسی جزئی، می‌توان به مشکلات موجود در مدل استاندارد پی‌برد، تا آماده پیش رفتن به سوی ابرتقارن شویم.

در فصل دوم به تشریح خلاصه‌ای ازمفهوم تقارن و ابرتقارن پرداخته شده‌است، بخشی از روابط مورد نیاز را از جبر ابرتقارنی استخراج کرده‌ایم، مفاهیم مورد نیاز برای ادامه کار را تعریف کرده‌ایم، و در پایان اندکی درباره جبر ابرتقارن در ابرفضای ناجابجایی توضیح داده شده است.

در فصل سوم ، ابتدا لاگرانژی نظریه به دقت باز و ساده سازی شده‌است، تا با استفاده از آن روابط مربوط به رأس‌ها و انشارگرها، که برای محاسبه نمودار ها لازم است، استخراج شود.

در فصل چهارم پس از دسته بندی نمودارهای مورد بررسی، مراحل مختلف محاسبه ۲ نمودار، به عنوان نمونه، آورده شده است. ونتیجه محاسبه هر دسته از نمودارها در یک جدول قرار داده شده‌است.

در پایان بسیاری از روابط به کار رفته درمحاسبات به عنوان ضمیمه آورده شده‌است، امید است این پایان‌نامه نیاز خوانندگان را به خوبی برطرف نماید، و پایه صحیحی برای کارهای بعدی باشد.

فصل اول:

مدل استاندارد

۱-۱ مقدمه ای بر نظریه مدل استاندارد

در طبیعت چهار نوع برهم کنش وجود دارد: الکترومغناطیسی، هسته ای ضعیف، هسته ای قوی و گرانش. مدل استاندارد سه برهم کنش اول را باهم اتحاد می‌بخشد. این مدل یکی از دستاورد های بزرگ قرن بیستم محسوب می‌شود.

همه نیروهای طبیعت در مدل استاندارد حول یک اصل مرکزی به نام **تقارن پیمانه ای** موضعی، سازماندهی می شوند. این گروه تقارن در مدل استاندارد به صورت زیر توصیف می شود:

$$SU_c^{1}(3)\otimes SU_l^{2}(2)\otimes U_h^{3}(1)$$

گروه $U(1)$ برهم کنش‌های الکترومغناطیسی را توصیف می کند و دارای یک مولد مستقل است (فوتون)

$(1 = 1 - 2^1)$، ناوردایی تحت این گروه به معنای بقای کمیت ابر بار است.

گروه $SU(2)$ به گروه ایزواسپین معروف است، دارای سه مولد مستقل است $(3 = 1 - 2^2)$ که یکی از این مولدها قطری است. ویژه حالت‌های این مولد، حالت‌های فرمیونی را مشخص می‌کند. این گروه توصیف کننده برهم کنش‌های ضعیف است.$(\mathrm{z}^{\circ}, w^{+}, w^{-})$

گروه $SU(3)$ برهم کنش‌های قوی را توصیف می کند و دارای ۸ مولد مستقل است، $(8 = 1 - 3^2)$ که ۲ تای آنها قطری هستند. ویژه مقادیر مولدهای قطری نشان دهنده‌ی عدد کوانتومی رنگ میدان‌ها است.

سه نوع میدان در این نظریه وجود دارد:

۱- میدان‌های پیمانه‌ای: این میدان‌ها شامل برهم کنش‌هایی بوده که اسپین ۱ دارند، و خود به سه دسته تقسیم می‌شوند:
- میدان‌های گلوئونی که واسطه برهم کنش‌های قوی بین کوارک‌ها هستند.
- بوزون‌های پیمانه‌ای ضعیف که واسطه بر هم کنش‌های ضعیف اند.
- میدان‌های فوتونی که واسطه بر هم کنش‌های الکترومغناطیسی هستند.

[1] c: colour
[2] l: left
[3] h: hypercharge

۲- میدان‌های فرمیونی(ماده)[۱] : این گروه خود به دو دسته کوارک‌ها و لپتون‌ها تقسیم می‌شوند، و همگی دارای اسپین نیمه صحیح هستند. فیزیکدان‌ها لپتون‌ها را به سه نسل تقسیم می کنند، هر سه نسل شامل یک لپتون باردار و یک نوترینو هستند. نسل اول لپتون‌ها شامل الکترون و نوترینوی الکترون، نسل دوم شامل میون و نوترینوی‌میون؛ و نسل سوم شامل تاو و نوترینوی تاو است. ذرات بنیادی سازنده‌ی پروتون‌ها و نوترون‌ها، کوارک نامیده می شوند. همانند لپتون‌ها، کوارک‌ها نیز شش نوع‌اند که به سه نسل تقسیم می شوند. با این حال برخلاف لپتون‌ها، کوارک‌ها هرگز به تنهایی وجود ندارند، بلکه همیشه ترکیبی با دیگر کوارک ها هستند. اولین نسل کوارک‌ها، بالا (up یا u) و پایین (down یا d) نام دارند. دومین نسل افسون (charm یا c) و شگفت (strange یا s)؛ و سومین نسل به، سر (top یا t) و ته (bottom یا b) نام دارند. نام های اطلاقی به کوارک‌ها هیچ جنبه‌ای از این ذرات را توضیح نمی دهند بلکه آنها صرفا نام‌گذاری هستند.

۳- میدان هیگز[۲]: طبق مدل گلاشو- سلام و واینبرگ[۳]، در مدل استاندارد حداقل یک جفت میدان اسکالر(با اسپین صفر) هیگز پیش بینی می‌شود. در فضای تهی میدان هیگز، انرژی خالصی وجود دارد که همواره درتمام جهان نفوذ می‌کند و با شکست خودبخودی تقارن الکتروضعیف، به لپتون‌ها، کوارک‌ها و بوزون های پیمانه‌ای ضعیف واسطه، جرم می‌دهد. در مدل استاندارد، میدان هیگز می تواند مقدار چشم داشتی خلاء غیر صفر داشته باشد. در نتیجه گروه تقارنی مدل استاندارد به گروه برهم کنش الکتروضعیف شکسته می‌شود. این شکست، به شکست خودبخودی تقارن[۴] موسوم است[۷،۱۲،۱۳،۱۸] .

۱-۲ لاگرانژی مدل استاندارد

تمام سیستم ها ونیروها از یک تابع لاگرانژی استخراج می شوند که از اصل تقارن پیمانه ای پیروی می‌کند. لاگرانژی مدل استاندارد دارای مجموعه ای از پارامتر های آزاد زیر است:

- سه ثابت جفت شدگی پیمانه ای $g, g_s, \acute{g}$
- سه ثابت جفت شدگی یوکاوا (ماتریس های یوکاوا[۵]) $y_{\alpha\beta}$
- ثابت جفت شدگی[۶] هیگز λ

[۱] matter field
[۲] Higgs field
[۳] Glashow-salam and Weinberg model
[۴] Spotaneous Symmetry Breaking
[۵] Yukawa matrices
[۶] Coupling constant

- پارامتر جرم هیگز m_H^2

در نظریه‌ی میدان کوانتومی، لاگرانژی مدل استاندارد بصورت زیر توصیف می شود:

$$\mathcal{L} = \mathcal{L}_{\text{پیمانه ای}} + \mathcal{L}_{\text{یوکاوا}} + \mathcal{L}_{\text{هیگز}}$$

$$\mathcal{L}_{\text{پیمانه ای}} = -\frac{1}{4}G^a_{\mu\nu}G^a_{\mu\nu} - \frac{1}{4}W^i_{\mu\nu}W^i_{\mu\nu} - \frac{1}{4}B_{\mu\nu}B_{\mu\nu} + i\bar{L}_\alpha\gamma^\mu D_\mu L_\alpha + i\bar{Q}_\alpha\gamma^\mu D_\mu Q_\alpha$$
$$+i\bar{E}_\alpha\gamma^\mu D_\mu E_\alpha + i\bar{U}_\alpha\gamma^\mu D_\mu U_\alpha + i\bar{D}_\alpha\gamma^\mu D_\mu D_\alpha + (D_\mu H)^\dagger(D_\mu H)$$

$$\mathcal{L}_{\text{یوکاوا}} = Y^L_{ij}\bar{L}_i E_j H + Y^D_{ij}\bar{Q}_i D_j H + Y^U_{ij}\bar{Q}_i U_j \tilde{H}$$

$$\mathcal{L}_{\text{هیگز}} = m^2 H^\dagger H - \frac{\lambda}{2}(H^\dagger H)^2$$

که $\tilde{H} = i\tau_2 H^\dagger$ و $i,j = 1,2,3$ فهرست نسل هستند و D_μ مشتق هموردا است. میدان هیگز H باعث جرم‌دار شدن کوارک پایین و لپتون‌ها[1] می شود و میدان هیگز $\tilde{H}$ به کوارک بالا جرم می‌دهد. در مدل استاندارد، میدان هیگز می تواند مقدار چشم داشتی خلأ غیر صفر داشته باشد. در نتیجه گروه تقارنی مدل استاندارد به گروه برهم کنش الکتروضعیف شکسته می‌شود. همانطور که گفتیم، این شکست ، به شکست خودبه خودی تقارن موسوم است. بعبارتی گروه پیمانه ای مدل استاندارد بطور خودبخودی بصورت زیر شکسته می‌شود:

$$SU_c(3)\otimes SU_l(2)\otimes U_h(1) \rightarrow SU_c(3)\otimes U_{EM}(1)$$

همه‌ی ذرات مدل استاندارد با شکست خودبخودی گروه تقارنی $SU_l(2)$ از میدان هیگز، دارای جرم می شوند. بوزون های پیمانه‌ای برهم کنش‌های ضعیف، جرم دار می‌شوند و میدان فوتونی بدون جرم باقی می ماند. میدان فوتونی و بوزون‌های ضعیف پیمانه‌ای بصورت زیر بدست می‌آید:

$$W^\pm_\mu = \frac{W^1_\mu \mp iW^2_\mu}{\sqrt{2}} \qquad \text{و} \qquad Z_\mu = -Sin\theta_w\beta_\mu + Cos\theta_w W^3_\mu$$
$$\gamma_\mu = Sin\theta_w W^3_\mu + Cos\theta_w\beta_\mu$$

جرم های این میدان های فیزیکی با روابط زیر محاسبه می شوند:

$$m_w = \frac{1}{\sqrt{2}}gv \qquad \text{و} \qquad m_z = \frac{m_w}{Cos\theta_w}$$

و میدان فوتونی γ^μ بدون جرم است. در اینجا $tan\theta_w = \frac{\acute{g}}{g}$ است. همچنین $\acute{g}$ و g به ترتیب جفت شدگی‌های مربوط به گروه $U(1)$ و $SU(2)$ هستند.

[1] Leptons

۱-۳ ضعف‌های مدل استاندارد

موفقیت مدل استاندارد قابل ملاحظه است. پیش بینی های مدل استاندارد در آزمایش‌های متعدد آزموده شده و صحت آن بطور فوق العاده تایید گردیده‌است. با این همه مشکلاتی نیز در این مدل در فیزیک انرژی بالا دیده می‌شود.
اول اینکه تعداد بسیار زیادی پارامترهای آزاد وجود دارد. دوم اینکه مدل استاندارد نمی‌تواند برهم کنش‌های الکتروضعیف و قوی را در مقیاس انرژی بالا متحد کند. توصیفی که مدل استاندارد برای پدیده شکست خودبخودی تقارن الکتروضعیف ارائه می‌دهد، راضی کننده نیست. مشکل بعدی وجود مسئله سلسله مراتب[۱] است، که از تصحیح تابشی جرم هیگز بوجود می‌آید.

دو مقیاس متفاوت در نظریه‌ی وحدت بزرگ[۲] (نظریه‌ی که نیروهای هسته‌ای قوی و الکتروضعیف را در یک نظریه‌ی یگانه متحد می کند)M_w و M_{GUT} (مقیاس جرمی که برهم کنش های قوی و الکترو ضعیف را متحد می‌کند) وجود دارد. در این نظریه منشاء جرم مبهم است.

جواب دادن به این سوال‌ها ماورای مدل استاندارد است. برای گذر به فراسوی مدل استاندارد دو راه حل وجود دارد:

۱. راه حل اول: در نظر گرفتن میدان‌های مشابه ولی با برهم‌کنش‌های جدید. این راه ما را به **ابرتقارن**[۳]، نظریه‌ی وحدت بزرگ (GUT) و نظریه ریسمان[۴] هدایت می‌کند. به نظر می‌رسد این نظریه‌ها با آزمایش‌های مدرن امروزی مطابقت دارند.
۲. راه حل دوم: در نظر گرفتن میدان‌های جدید و برهم‌کنش‌های جدید. این راه ما را به نظریه‌ی ترکیب‌شدگی[۵]، نظریه‌ی فرمیون- ضد فرمیون چگالیده[۶]، پریئان‌ها[۷] و... هدایت می‌کند. هنوز هیچ گواه تجربی برای این نظریه‌ها دیده نشده است.

---
۱ Hierarchy problem
۲ Grand unified theory
۳ Supersymmetry
۴ String Theory
۵ Compositeness
۶ Fermion-Anti fermion condensates
۷ Preons

همچنین راه حل‌های دیگری نظیر گرانش در محدوده انرژی‌های Tev، نظریه‌ی ابعاد اضافی[1] بزرگ و ... وجود دارد، که در اینجا مورد بحث قرار نمی‌گیرند. در اینجا ما راه حل اول را پی‌گیری می‌کنیم که نزدیکترین گزینه به فیزیک جدید در محدوده Tev است.

پاسخ به این مشکلات ما را به سمت مدل ابر تقارن هدایت می‌کند[۱۴،۲۰].

[1] Extra Dimension

فصل دوم:

تقارن و ابر تقارن

۲-۱ مفهوم تقارن

در فیزیک، **تقارن** شامل جنبه‌هایی از یک سامانه فیزیکی می‌شود که ویژگی تقارن را به نمایش بگذارند، یعنی تحت برخی تبدیل‌ها و در یک مشاهده خاص، بعضی ویژگی‌هایشان را حفظ کنند. **یک تقارن در یک** سامانه‌ی فیزیکی، یک خاصیت فیزیکی یا ریاضی سامانه‌است که تحت برخی تغییرات حفظ می‌شود.

تغییرناپذیری یا ناوردایی تحت یک تبدیل منجر به یک قانون پایستگی می‌شود. هر تقارن از طبیعت یک قانون پایستگی را نتیجه می‌دهد، و برعکس هر قانون پایستگی نشان‌دهنده یک تقارن بنیادی طبیعت است[۱]، مثلا اگر دستگاهی تحت انتقال در فضا ناوردا باشد، تکانه پایسته می‌ماند یا اگر دستگاهی تحت دوران حول یک محور ناوردا باشد، تکانه زاویه‌ای پایسته است.

برخی از تبدیلات، مانند چرخش یک دایره، پیوسته و برخی مانند تبدیل بازتاب یک شکلِ دوطرفه‌متقارن و یا چرخش یک چندوجهی گسسته‌اند. هرکدام از این تبدیل‌ها به تقارن متناظر به خود منجر می‌شوند. (تقارن پیوسته و گسسته).

تقارن‌های پیوسته توسط گروه لی و تقارن‌های گسسته توسط گروه‌های متناهی توصیف می‌شوند. تقارن‌ها معمولاً به سادگی توسط روابط ریاضی قابل‌بیان هستند و روش‌های ریاضی، برای مثال نمایش توسط گروه‌ها می‌توانند برای ساده ساختن مسایل به کارگرفته شوند.

۲-۲ انواع تقارن

- **تقارن‌های موضعی [۲] و تقارن‌های سراسری [۳] :**

یک تقارن را جهانی می‌نامند اگر در تمام فضازمان برقرار باشد، درحالی که یک تقارن محلی تقارنی است که در نقاط مختلف فضازمان تبدیل‌های متقارن مختلفی داشته باشد. تقارن‌های محلی نقشی اساسی در نظریه‌های پیمانه‌ای بازی می‌کنند.

---

[۱] این قضیه به قضیه نودر مشهور است (در سال ۱۹۱۷م. امی نودر ارتباط تقارن‌ها وقوانین پایستگی را بیان کرد.).

[۲] Local symmetry

[۳] Global symmetry

➢ **تقارن‌های پیوسته :**

مثالی که در بالا درمورد تقارن چرخشی بیان شد، نمونه‌ای از یک تقارن پیوسته است. این تقارن‌ها در ساختارهایی که پس از یک تغییر پیوسته ناوردا می‌مانند وجود دارند. از نظر ریاضی، تقارن‌های پیوسته توسط توابع پیوسته توصیف می‌شوند. یک زیرمجموعه مهم تقارن‌های پیوسته در فیزیک، تقارن‌های فضازمان هستند.

➢ **تقارن‌های گسسته:**

یک تقارن گسسته تقارنی است که یک تغییر ناپیوسته را در سامانه توصیف می‌کند. برای مثال یک مربع دارای تقارن چرخشی‌گسسته است یعنی مربع تحت چرخش‌هایی که مضرب صحیحی از $\frac{\pi}{۲}$ باشد متقارن است. **ابرتقارن** (یک تقارن گسسته) بر این ایده استوار است که یک تقارن فیزیکی میان بوزون‌ها و فرمیون‌ها، وجود دارد. ابرتقارن بیان می‌کند که برای هر بوزون یک فرمیون به عنوان جفتی ابرمتقارن با نام ابرجفت وجود دارد. ابرتقارن هنوز از نظر آزمایشگاهی ثابت نشده‌است. هیچ ذره‌ی شناخته شده‌ای خواص لازم برای ابرجفت بودن برای ذره‌ای دیگر را دارا نیست. اگر ابرجفت‌ها وجود داشته باشند باید جرمی بیشتر از آنچه شتاب‌دهنده‌های ذرات کنونی قادر به تولید آن هستند داشته باشند.

۲-۳ مقدمه‌ای بر ابرتقارنی

تقارن یک مفهوم اساسی در ساختار یک نظریه است. به همین دلیل برای توسعه ی مدل استاندارد، باید تقارن های موجود در این مدل را توسعه داد. ابرتقارن، تقارن بین فرمیون ها و بوزون هاست.

ایده اساسی پیدایش ابرتقارن به عنوان یک چارچوب جدید در فیزیک ذرات بنیادی مسئله وحدت میان تمام نیروهای طبیعت است. اما این وحدت در فواصلی به کوچکی $l_{pl}\sim ۱۰^{-۳۳}cm$ که شامل آثار کوانتومی گرانشی است رخ می‌دهد. می‌دانیم اسپین بوزون واسطه نیروی گرانش(گراویتون[۱]) ۲ است درحالی که سایر بوزون‌های پیمانه‌ای(فوتون، گلئون و بوزون‌های ضعیف Z وW) اسپین۱ دارند بنابراین تلاش برای وحدت تمامی نیروها تحت یک جبر، مسئله مشکلی است زیرا وحدت میان اسپین ۲ و اسپین۱ (میدان‌های پیمانه‌ای) ممنوع است. تنها راه استفاده از جبر ابرتقارن است. جبری که ابرتقارن را توصیف می‌کند جبر لی تعمیم یافته است که در توافق با نظریه‌ی میدان‌های کوانتوم

[۱] Graviton