بسم الله الرحمن الرحيم

دانشگاه سمنان

دانشکده علوم پایه

گروه فیزیک

پایان نامه کارشناسی ارشد

شکست تقارن الکتروضعیف در ابعاد اضافی

توسط:

فاطمه میرزابابازاده

استاد راهنما

دکتر مهرداد قمی‌نژاد

استاد مشاور

دکتر علی توفیقی

مهر۱۳۹۰

دانشگاه سمنان

دانشکده علوم پایه

گروه فیزیک

پایان نامه کارشناسی ارشد فیزیک

تحت عنوان

شکست تقارن الکتروضعیف در ابعاد اضافی

ارائه شده توسط:

فاطمه میرزابابازاده

در تاریخ ۲۰ مهر ماه ۱۳۹۰ توسط کمیته تخصصی زیر مورد بررسی و تصویب نهایی قرار گرفت:

۱ –استاد راهنما	دکتر مهرداد قمی‌نژاد
۲ –استاد مشاور	دکتر علی توفیقی
۳ –استاد داور داخلی	دکتر حسین مهربان
٤ –استاد مدعو	دکتر مجید واعظ زاده

پاسخ هر سؤالی را بخواهید بدانید در طبیعت یافت می‌شود

تمامی‌آنچه‌که باید بدانید این است‌که چگونه سؤال را طرح‌کنید

و چگونه پاسخ را تشخیص دهید،

پس به آنچه پیش روی توست با اعجاب بنگر.

(فلورانس اسکاول‌شین)

قدردانی:

از تمامی کسانیکه در راه کسب علم و دانش همواره همراه و مشوقم بوده اند بخصوص جناب آقای دکتر قمی‌نژاد و دکتر توفیقی کمال تشکر را دارم و از خداوند منان موفقیت روز افزون این عزیزان را خواستارم.

تقدیم به :

پدر و مادر عزیزم

آنهاکه وجودم برایشان همه رنج بود و وجودشان برایم همه عمر

توانشان رفت تا به توانایی برسم

مویشان سفیدگشت تا رویم سفید بماند

آنهاکه فروغ نگاهشان،گرمی‌کلامشان و روشنی رویشان ثرمایه‌های جاودانی من است

آنهاکه راستی قامتم، در شکست قامتشان تجلی یافت

در برابر وجودگرامیشان زانوی ادب بر زمین می‌نهم و با دلی مملو از

عشق و محبت و

خضوع بر دستشان بوسه می‌زنم

و برادران مهربانم

که بی‌یاری آنان پیمودن این راه برایم بسی دشوار بود.

شکست تقارن الکتروضعیف در ابعاد اضافی

چکیده

مدل استاندارد فیزیک ذرات در دهه‌ی ۱۹۷۰ فرمولبندی شد ودر اوایل دهه‌ی ۱۹۸۰ آزمایش‌ها بطور نسبی درست بودن آن را نشان دادند. این نظریه نزدیک به سه دهه با آزمایشات تست شده و پیش‌بینی‌های آن در زمینه‌ی وجود بوزون‌های W ، Z ، گلوئون و دو کوارک سنگین‌تر درست بوده است.

امروزه مدل استاندارد یک تئوری رایج وکاربردی است‌که علی رغم تمام موفقیت‌های بی‌شمار یک بخش از آن بخوبی پایه‌گذاری نشده است. ما نمی‌دانیم چه عاملی باعث جرم‌دار شدن ذرات بنیادی می‌گردد ساده‌ترین ایده در جرم‌دادن به ذرات بنیادی استفاده از مکانیزم هیگز می‌باشد لذا در فصل اوّل به بررسی این مکانیزم و مباحث وابسته به آن می‌پردازیم. از آنجایی‌که مدل استاندارد پاسخگوی بسیاری از سؤالات نمی‌باشد فیزیکدانان را بر این عقیده استوارکرده است‌که باید نظریه‌ای‌کامل‌تر جانشین این مدل شود از مهمترین کاندیداها، مدل ابر ریسمان، ابرتقارنی، هیگزکوچک، مدل‌هایی با چند هیگز دوگان، ابعاد اضافی و... هستندکه در این پایان نامه به بررسی مکانیزم هیگز (شکست تقارن الکتروضعیف) در ابعاد اضافی خواهیم پرداخت لذا در فصل دوّم مقدماتی از ابعاد اضافی را بیان می‌کنیم. در فصل سوّم میدان هیگز دوگان را در

مدل ابعاد اضافی جهانی (UED) ، که بوسیله‌ی اوربیفلد $\frac{S^1}{Z_2}$ در بازه‌ی $[0, L]$ فشرده شده است بهمراه خلاء یکنواخت با شرط مرزی (D, D) و (N, N) مورد مطالعه قرار می‌دهیم.

برای محاسبات مربوط به فصل چهارم برای سادگی فقط پتانسیل مربوط به هیگز دوگان در درون $bulk$ لحاظ می‌گردد. ما حالتی را در نظر می‌گیریم‌که خلاء تابعیتش به بعد اضافی را حفظ‌کرده در نتیجه دارای شکلی غیر یکنواخت است، همین امر باعث‌گردیده تا معادلات ویژه‌مقداری بدست آمده در فصل سوم فرمی بسیار پیچیده ای بخود بگیرندکه حل آنها فقط بوسیله‌ی توابع ژاکوبی بیضوی مقدور است در ادامه کمترین مرتبه‌ی مد مربوط به هیگز فیزیکی، هیگز باردار و بوزون‌گلدستون را به ازای خلاء غیر یکنواخت بدست می‌آوریم و در نهایت در بخش پدیده شناسی، انحراف یوکاوایی‌کوارک top را مورد بررسی قرار می‌دهیم.

لازم به ذکر است، محاسبات این فصل برای اولین بار انجام شده و نتایج بدست آمده برای مدل خلاء غیر یکنواخت‌کاملاً منحصر به فرد می‌باشد.

واژه‌های‌کلیدی: مدل استاندارد، بوزون هیگز، میدان‌های اسکالر، ابعاد اضافی، خلاء غیر یکنواخت، توابع و انتگرال بیضوی، جفت‌شدگی‌کوارک top.

فهرست مندرجات

فصل ۱ : مروری بر فیزیک ذرات و مکانیزم هیگز در مدل استاندارد

۱-۱ مقدمه ۱

۱-۲ مدل استاندارد ۲

۱-۳ ناوردایی پیمانه‌ای ۵

۱-۳-۱ ناوردایی پیمانه‌ای کلی و موضعی الکترودینامیک کوانتومی ۵

۱-۳-۲ ناوردایی پیمانه‌ای کلی و موضعی کرومودینامیک کوانتومی ۷

۱-٤ شکست خود به خودی تقارن و مکانیزم هیگز ۱۰

۱-۵ تشخیص جمله‌ی جرمی در لاگرانژین ۱۲

۱-٦ قضیه گلدستون ۱۳

۱-۷ چگالی لاگرانژین ۱۳

۱-۷-۱ شکست تقارن $SU(2)_L \times U(1)_Y$ و تولید جرم برای بوزون‌های پیمانه‌ای و ذرات نسل اوّل.....۱۵

۱-۸ جستجو برای‌کشف ذره‌ی هیگز.....۱۸

۱-۹ ماورای مدل استاندارد.....۱۹

فصل ۲ : مقدماتی بر ابعاد اضافی ۲۱

۲-۱ مقدمه.....۲۱

۲-۲ بعد اضافی از نوع مکانی یا زمانی؟.....۲۳

۲-۳ مفهوم $brane$ و $bulk$.....۲٤

۲-٤ تئوری‌کالوزا-کلاین و بسط میدان‌ها.....۲۵

۲-۵ روش اوربیفلد.....۲۷

۲-٦ انواع مختلف ابعاد اضافی.....۲۹

۲-٦-۱ مدل ADD.....۲۹

۲-٦-۲ مدل RS.....۳۱

۲-٦-۳ مدل UED.....۳۲

۲-٦-۳-۱ لاگرانژین مدل.....۳۳

فصل ۳ : شکست تقارن الکترو ضعیف در ابعاد اضافی ۳۵

۳-۱ مقدمه..... ۳۵

۳-۲ خلاء میدان‌کلاسیکی..... ۳۶

۳-۳ طیف مربوط به افت‌وخیزهای‌کوانتومی..... ۳۸

۳-٤ هیگز دیریکله در ابعاد اضافی..... ۳۹

۳-٤-۱ مقدار انتظاری خلاء..... ۳۹

۳-٤-۲ طیف بخش اسکالری و مشخصات هیگز..... ٤۱

۳-۵ هیگز نیومن در ابعاد اضافی..... ٤۳

۳-۵-۱ مقدار انتظاری خلاء..... ٤۳

۳-۵-۲ مشخصات مربوط به افت‌وخیزهای‌کوانتومی..... ٤۵

فصل ٤ : شکست تقارن الکترو ضعیف در ابعاد اضافی به‌همراه شکل غیر یکنواخت مقدار انتظاری خلاء ٤۸

٤-۱ مقدمه..... ٤۸

٤-۲ خلاء غیر یکنواخت..... ٤۹

٤-٣ طیف بخش اسکالری و مشخصات هیگز فیزیکی.....٥١

٤-٤ مشخصات بوزون‌گلدستون و هیگز باردار.....٥٤

٤-٥ انحراف یوکاوایی top.....٥٥

نتیجه‌گیری و پیشنهادات.....٦٢

پیوست ٦٦

پیوست (الف) معرفی انتگرال بیضوی و توابع ژاکوبی بیضوی.....٦٦

پیوست (ب) معادله دیفرانسیل‌های حاکم بر توابع ژاکوبی بیضوی.....٦٩

پیوست (پ) انتگرال‌های مربوط به توابع ژاکوبی بیضوی $Sn\,,Dn$ و Cn.....٧٠

پیوست (ت) تابع موج مربوط به هیگز فیزیکی.....٧١

پیوست (ث) تابع موج مربوط به بوزون‌گلدستون و هیگز فیزیکی.....٧٤

پیوست (ج) نحوه‌ی محاسبه‌ی ضریب بهنجارش مربوط به تابع موج فرمیونی.....٧٦

منابع و مآخذ.....٧٧

فهرست اشکال

شکل ۱-۱ : دسته‌بندی فرمیون‌های مدل استاندارد در سه نسل.....۲

شکل ۱-۲ : رأس‌های برهمکنشی در لاگرانژین QCD.....۹

شکل ۱-۳ : پتانسیل میدان اسکالری برای $\mu^2 > 0$.....۱۱

شکل ۱-٤ : پتانسیل میدان اسکالری برای $\mu^2 < 0$.....۱۲

شکل ۲-۱ : بعد فضایی فشرده شده روی دایره‌ای به شعاع R ۲۵

شکل ۲-۲ : نحوه‌ی دستیابی به یک فرآیند اوربیفلدی ۲۸

شکل ۲-۳ : تجزیه‌کالوزا- کلاین یک اسکالر ۵ بعدی.....۲۹

شکل ۲-٤ : نمایش میدان‌ها در مدل ADD ۳۰

شکل ۲-۵ : شمایی از مدل RS.....۳۰

شکل ٤-۱ :کمترین مرتبه مد مربوط به خلاء ۵۰

شکل ٤-۲ :کمترین مرتبه مد مربوط به میدان هیگز فیزیکی.....۵۲

شکل ٤-۳ : تغییرات طول اوربیفلد برحسب پارامتر مدول.....۵۳

شکل ٤-٤ :کمترین مرتبه‌ی مد مربوط به میدان‌های بوزون‌گلدستون و هیگز باردار.....۵۵

شکل ٤-٥ :کمترین مرتبه‌ی مد مربوط به تابع موج فرمیونی.....۵۸

شکل ٤-٦ : این شکل انحراف از مدل استاندارد به ازای $k = 0.77$ را نشان می‌دهد.....٦٠

شکل ٤-٧ : این شکل تغییرات $r,\ y_{t,5}$ و $10^{-5}v_0$ نسبت به λ_{E} و انحراف از مدل استاندارد به ازای $k = 0.1$ را نشان می‌دهد.....٦٠

شکل الف-١ : توابع ژاکوبی بیضوی.....٦٨

فهرست جداول

جدول ۱-۱ :کوارک‌های نسل اوّل، دوّم وسوّم به ترتیب دو تا دو تا از بالا به پایین به همراه بار و جرم آنها.....۳

جدول ۱-۲ : لپتون‌های نسل اوّل، دوّم وسوّم به ترتیب از بالا به پایین به همراه بار و جرم آنها.....۳

جدول ۱-۳ : بوزون‌های مدل استاندارد به همراه بار و جرم آنها.....٤

جدول ٤-۱ : جدول ٤-۱ : داده‌های مربوط به رابطه‌ی (٤-۲۲) و (٤-۲٤) به ازای $\Lambda = 10\ TeV,\ \ m_t = 172$و $m_h = 114$ و k های متغیر.....٥٩

جدول ٤-۲ : جدول ٤-۲ : داده‌های مربوط به رابطه‌ی (٤-۲۲) و (٤-۲٤) به ازای..
$\Lambda = 10\ TeV,\ \ m_t = 172,\ \ k = 0.$و m_hهای متغییر.....٦١

جدول ٤-۳ : داده‌های مربوط به رابطه‌ی (٤-۲۲) و (٤-۲٤) به ازای $\Lambda = 10\ TeV,$
$m_t = 172,\ \ k = 0.9$ و m_h های متغییر.....٦۲

جدول ج-۱: مربوط به مقادیر مختلف α و N_f به ازای k های مختلف و m_h معین.....۷٦

فصل اوّل

مروری بر فیزیک ذرات و مکانیزم هیگز در مدل استاندارد

۱-۱ مقدمه

جهان ما بر پایه چهار نیرو و یا برهمکنش استوار است. نیروی‌گرانش، نیروی الکترومغناطیس، نیروی هسته‌ای ضعیف و نیروی هسته‌ای قوی. عامل وقوع این برهمکنش‌هاگروهی از ذرات بنام بوزون‌ها هستندکه در بین ذرات تشکیل دهنده مواد مبادله می‌شوند. فیزیکدانان در تلاشند تا نشان دهند این چهار نیرو در واقع از یک نیروی بنیادی سرچشمه می‌گیرند. ماکسول، الکتریسیته و مغناطیس را در غالب یک نظریه‌ی نهایی بنام الکترو مغناطیس قرار داد همچنین گلاشو[۱]، واینبرگ[۲] و سلام[۳] برای ادغام نیروهای ضعیف و الکترومغناطیس

---

[۱] Glashow
[۲] Weinberg
[۳] Salam

تلاش‌های زیادی انجام دادند، نظریه آنها با چهار واسطه‌ی بدون جرم آغاز شد اما در روندی‌کاملاً تکاملی سه تا از این واسطه‌ها (با توجه به سازوکار شکست خود به خودی تقارن[٤] و مکانیزم هیگز، که در بخش‌های بعد مورد مطالعه قرار می‌گیرد) جرمدار شدند و فوتون تنها واسطه‌ای بودکه بدون جرم باقی ماند [۱].

مدل استاندارد[٥] نیروهای هسته‌ای قوی و الکتروضعیف را در غالب یک نظریه واحد بنام نظریه وحدت بزرگ[٦] (GUT) با یکدیگرتلفیق می‌کند، اگرچه تاکنون یکی بودن منشاء این نیروها به اثبات نرسیده است وگام نهایی‌گرانش را نیز شامل می‌شود آنگاه یک ابرنیروی واحد خواهیم داشت‌که در شرایط مختلف به شکل‌های متفاوتی ظاهر می‌شودکه همه‌ی نیروها جلوه‌ای از همان یک نیرو خواهد بود.

۱-۲ مدل استاندارد

مدل استاندارد [۲] نظریه‌ای درباره‌ی ذرات بنیادی سازنده‌ی ماده و نحوه‌ی برهمکنش بین آنهاست. در واقع این نظریه سنگ بنای جهان را مورد مطالعه قرار می‌دهد. ذرات این مدل به دو دسته‌ی ذرات مادی (فرمیون‌ها با اسپین نیم صحیح) و ذرات واسطه‌ی برهمکنشی (بوزون‌ها با اسپین صحیح) تقسیم می‌شوند. فرمیون‌ها را در سه نسل طبقه‌بندی می‌کنند:

$$1^{st}\ familly: \left\{\begin{pmatrix}\nu_e\\ e\end{pmatrix}_L, e_R, \begin{pmatrix}u\\ d\end{pmatrix}_L, u_R, d_R\right\}$$

$$2^{nd}\ familly: \left\{\begin{pmatrix}\nu_\mu\\ \mu\end{pmatrix}_L, \mu_R, \begin{pmatrix}c\\ s\end{pmatrix}_L, c_R, s_R\right\}$$

$$3^{rd}\ familly: \left\{\begin{pmatrix}\nu_\tau\\ \tau\end{pmatrix}_L, \tau_R, \begin{pmatrix}t\\ b\end{pmatrix}_L, t_R, b_R\right\}$$

شکل ۱-۱ : دسته‌بندی فرمیون‌های مدل استاندارد در سه نسل [٤]

نسل اوّل شامل الکترون، کوارک بالا و پایین و نوترینوی الکترون به اضافه‌ی پاد ماده‌ی آنها است‌که میدان‌های چپگرد و راستگرد بصورت $e_L^- = \frac{1}{2}(1-\gamma_5)e^-, e_R^- = \frac{1}{2}(1+\gamma_5)e^-$ تبدیل می‌شوند. ذرات این نسل در مقایسه با دو نسل دیگر طول عمر بیشتر و جرم‌کمتری دارند، ذرات نسل دوّم و سوّم

---

[٤] Spontaneous Symmetry Breaking
[٥] Standard Model
[٦] Grand Unification Theory

مشابه نسل اوّل بوده با این تفاوت‌که طول عمرکمتر و جرم بیشتری داشته همین امر باعث‌گردیده تا به سرعت به ذرات نسل اوّل واپاشی کنند به خاطر همین است آنچه‌که ما مشاهده می‌کنیم همگی متشکل از ذرات نسل اوّل هستند. در دو جدول زیرکوارک‌ها و لپتون‌ها را مشاهده می‌کنید. جداول از بالا به ترتیب، ذرات نسل اوّل، دوّم و سوّم را نشان می‌دهند.

جدول ۱-۱ : کوارک‌های نسل اوّل، دوّم و سوّم به ترتیب دو تا دو تا از بالا به پایین به همراه بار و جرم آنها

Particle	Symbol	Charge	Mass(MeV/c^2)
up	*u*	+2/3	1.5-5
down	*d*	-1/3	3-9
charm	*c*	+2/3	1100-1400
strange	*s*	-1/3	505
top	*t*	+2/3	173800
bottom	*b*	-1/3	4100-4400

جدول ۱-۲ : لپتون‌های نسل اوّل، دوّم و سوّم به ترتیب از بالا به پایین به همراه بار و جرم آنها

Particle	Symbol	Charge	Mass(MeV/c^2)
electron	e	-1	0.511
Electron neutrino	ν_e	0	$<5.10^{-6}$
muon	μ	-1	105.7
muon neutrino	ν_μ	0	<0.17
tau	τ	-1	1777
tau neutrino	ν_τ	0	<18.2

جدول ۱-۳ : بوزون‌های مدل استاندارد به همراه بار و جرم آنها

Boson	Symbol	Force	Electric Charge	Mass(MeV/c^2)
photon	γ	*Electromagnetic*	0	0
W	*w*	*Weak*	+1, -1	80410
Z	*z*	*Weak*	0	91187
gluon	*g*	*Strong*	0	0
Higgs	*h*	*Electroweak*	0	؟

بوزون‌های مدل استاندارد عبارتند از:

۱. فوتون،که واسطه‌ی برهمکنش الکترومغناطیس است.
۲. بوزون W و Z که مسئول برهمکنش‌های ضعیف هستند.
۳. گلوئون‌ها، که در برهمکنش‌های قوی شرکت می‌کنند.
٤. بوزون هیگز،که شامل شکست خود به خودی تقارن درگروه پیمانه‌ای الکتروضعیف و مسئول جرم دادن به ذرات بنیادی است.

این چهار نیرو و ذرات حامل آنها در جدول ۱-۳ آمده‌اند.

با وجود تمام موفّقیت‌های مدل استاندارد، این مدل یک نظریه‌ی‌کامل در حوزه‌ی فیزیک ذرات نیست چونکه پاسخگوی بسیاری از سؤالات نمی‌باشد از مهمترین سؤالات، عدم آگاهی ما نسبت به نحوه‌ی جرمدار شدن ذرات بنیادی است چونکه ذرات بنیادی (کوارک‌ها و لپتون‌ها) برخلاف پروتون‌ها و نوترون‌ها از اجزای کوچکتری تشکیل نشده‌اند، شرح چگونگی‌کسب جرم در این ذره‌ها به یکی از اصلی‌ترین مسائل در مورد منشاء جرم تبدیل شده‌است، تفسیرهای ارائه شده بوسیله‌ی فیزیک نظری براساس مکانیزم شکست خود به خودی تقارن است. این مکانیزم میدان اسکالری هیگز را معرفی می‌کندکه جرم ذرات بنیادی از برهمکنش با این میدان ناشی می‌شود. میدان هیگز یک میدان‌کوانتومی است اما به سه دلیل با تمام میدان‌های‌کوانتومی دیگر متفاوت است:

۱. تفاوت اوّل این است‌که تمام میدان‌ها خاصّیتی بنام اسپین دارند اما اسپین میدان هیگز صفر است.
۲. دوّمین خاصّیت میدان هیگز توضیح می‌دهدکه چرا قدرت این میدان در سرتاسر جهان غیر صفر است، هر سامانه‌ای از جمله جهان در پایین‌ترین سطح انرژی قرار می‌گیرد، در میدان معمولی همانند میدان‌های الکترومغناطیسی پایین‌ترین سطح انرژی آنجایی است‌که میدان مقدار صفر دارد یعنی جایی‌که میدان از **بین** می‌رود، اما برای میدان هیگز، ته درّه (یعنی میدان صفر) تپه‌ای در مرکز خود دارد و پایین‌ترین نقطه‌ی درّه، دایره‌ای حول این تپه است جهان مثل یک توپ در جایی در این چاله‌ی حلقوی‌که با مقدار غیر صفر میدان متناظر است، ساکن می‌شود. این‌گفته بدان معناست‌که جهان در حالت معمولی و در پایین‌ترین سطح، آکنده از میدان هیگز غیر صفر است.
۳. آخرین ویژگی قابل توجه میدان هیگز شکل برهمکنش آن با ذرات دیگر است، ذراتی‌که با این میدان برهمکنش دارند، طوری رفتار می‌کنندکه انگار جرم دارند و جرم آنها متناسب با شدت برهمکنش آنهاست.

این مکانیزم شامل یک ذره‌ی اضافی بنام بوزون هیگز است بوزون هیگز یک ذره‌ی بنیادی فرضی است‌که وجودش توسط مدل‌استاندارد پیش‌بینی شده ولی با توجه به تمام تلاش‌های انجام‌گرفته، تنها ذره‌ی این مدل است‌که هنوز بصورت تجربی مشاهده نشده است. شاید مشاهده‌ی تجربی این ذره بتواند توضیحی برای تفاوت جرم بین فوتون و بوزون‌های پیمانه‌ای و نحوه‌ی‌کسب جرم ذرات مادی ارائه‌کند. از اینرو بسیاری از فیزیکدانان براین باورندکه بزرگترین چالش فیزیک در قرن ۲۱ به تحقیقات روی مکانیزم شکست خود به خودی تقارن و ذره‌ی هیگز مربوط می‌شود.

۱-۳ ناوردایی پیمانه‌ای

نظریه‌های پیمانه‌ای زیر بنای تمام اندرکنش‌های ذرات بنیادی است بدین منظور الکترودینامیک وکرومودینامیک‌کوانتومی را مورد مطالعه قرار می‌دهیم.