بسم الله الرحمن الرحيم

دانشگاه ارومیه

دانشکده علوم

گروه فیزیک

پایان نامه جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد رشته فیزیک گرایش هسته ای

عنوان

واپاشی بتای معکوس نوترون و تصحیحات زاویه کابیبو

اساتید راهنما

دکتر هادی گودرزی **پروفسور رسول خدابخش**

استاد مشاور

دکتر حسنقلی محمدی

تنظیم ونگارش

امیر موحدی فر

بهمن ۱۳۹۱

تقدیم به:

پدرم به استواری کوه

مادرم به زلالی چشمه

همسرم به صمیمیت باران

سپاس خدای را که سخنوران، در ستودن او بمانند و شمارندگان، شمردن نعمت های او ندانند و کوشندگان، حق او را گزاردن نتوانند. و سلام و درود بر محمّد و خاندان پاک او، طاهران معصوم، هم آنان که وجودمان وامدار وجودشان است؛ و نفرین پیوسته بر دشمنان ایشان تا روز رستاخیز.

بدون شک جایگاه و منزلت معلم، اجلّ از آن است که در مقام قدردانی از زحمات بی شائبه ی او، با زبان قاصر و دست ناتوان، چیزی بنگاریم.

اما از آنجایی که تجلیل از معلم، سپاس از انسانی است که هدف و غایت آفرینش را تامین می کند و سلامت امانت هایی را که به دستش سپرده اند، تضمین؛ بر حسب وظیفه و از باب "**من لم یشکر المنعم من المخلوقین لم یشکر الله عزّ و جلّ**"

از پدر و مادر عزیزم این دو معلم بزرگوارم که همواره بر کوتاهی و درشتی من، قلم عفو کشیده و کریمانه از کنار غفلت هایم گذشته اند و در تمام عرصه های زندگی یار و یاوری بی چشم داشت برای من بوده اند؛

از همسر مهربانم؛ که سایه مهربانیش سایه سار زندگی ام می باشد، او که اسوه صبر و تحمل بوده و مشکلات مسیر را برایم تسهیل نمود؛

از خواهرانم؛ که وجودشان شادی بخش و صفایشان مایه آرامش من است؛

از اساتید با کمالات و شایسته؛ جناب آقایان **دکتر هادی گودرزی** و **پروفسور رسول خدابخش** و استاد مشاور جناب آقای **دکتر حسنعلی محمدی** که در کمال سعه صدر، با حسن خلق و فروتنی، از هیچ کمک و یاری در این عرصه بر من دریغ ننمودند و زحمت راهنمایی این پایان نامه را بر عهده گرفتند؛

کمال تشکر و قدردانی را دارم

باشد که این خرد ترین، بخشی از زحمات آنان را سپاس گوید.

چکیده

واپاشی بتا محصول برهمکنش ضعیف هسته ای است که درآن الکترون با استفاده از انرژی موجود در لحظه واپاشی از هسته خارج می شود. در فصل اول تاریخ شماری تقریباً کامل از کشف ذرات بنیادی و مروری بر مدل استاندارد ذرات بنیادی و برهمکنش میان آنها ذکر شده است. در فصل دوم الکترودینامیک کوانتومی که برهمکنش میان نیروهای الکترومغناطیسی را توضیح می دهد و همچنین قواعد فاینمن برای الکترودینامیک کوانتومی و محاسبه دامنه برای پراکندگی های مولر و باهاباها و کامپتون و... با به کاربردن این قوانین و همچنین دیاگرام فاینمن و معادله دیراک و اسپینورهای آن بررسی شده است و همچنین معادله دیراک برای میدان مغناطیسی ثابت را محاسبه می کنیم. در فصل سوم که زیربنای اصلی برای بخش آخر می باشد به بررسی برهمکنش های ضعیف میان ذرات بنیادی که به واسطه بوزونهای شاخص انجام می گیرد می پردازیم و به نقض پاریته در برهمکنش های ضعیف اشاره می کنیم و برهمکنش های V-A را بررسی می کنیم، همچنین هلیسیتی نوترینو را بدست می آوریم و با ذکر قواعد فاینمن برای برهمکنش های ضعیف روش محاسبه سطح مقطع پراکندگی و محاسبه آهنگ واپاشی را می آموزیم. در فصل چهار با مدل فرمی برای برهمکنش های ضعیف شروع می کنیم و تصحیحات کابیبو را که انتقال بین نسلهای مختلف کوارکها را ممکن می سازد بررسی می کنیم و با این علم به بررسی واپاشی بتای معکوس نوترون در حضور میدان مغناطیسی، با شروع از حل معادله دیراک برای این واپاشی، می پردازیم و سطح مقطع برای فرایند واپاشی بتا معکوس $\nu_e + n \to p + e$ ، در یک میدان مغناطیسی که بسیار کوچکتر از m_p^2 / e را بدست می آوریم. پیدا می کنیم که سطح مقطع به جهت نوترینو بستگی دارد، حتی زمانی که فرض می شود نوترینو اولیه در حال سکون است.

فهرست

چکیده أ

فصل اول : مقدمه ۱

۱-۱ تاریخ شمار کشف ذرات بنیادی ۲

۱-۲ ذرات بنیادی در مدل استاندارد ۴

۱-۳ برهم کنش میان ذرات بنیادی ۸

فصل دوم : دینامیک ذرات بنیادی ۱۱

۲-۱ مختصری از انواع دینامیک ذرات بنیادی ۱۲

۲-۲ الکترودینامیک کوانتومی (QED) ۱۳

۲-۲-۱ نماد گذاری نسبیتی ۱۵

۲-۲-۲ معادله کلاین – گوردون ۱۶

۲-۲-۳ معادله دیراک ۱۸

۲-۲-۴ فوتون ۲۶

۲-۳ قواعد و دیاگرام های فاینمن ۲۸

۲-۴ مثال هایی برای فرایندهای الکترودینامیک با کاربرد قواعد فاینمن ۳۲

۲-۵ شگرد کازیمیر و قضیه رد ماتریس ۳۸

۲-۶ تعریف AMM ۴۲

۲-۶-۱ معادله ی دیراک برای فرمیون های دارای AMM در حضور میدان مغناطیسی ثابت ۴۷

فصل سوم : برهمکنش های ضعیف ۵۴

۳-۱ تعریف برهمکنش ضعیف ۵۵

۳-۲ تئوری فرمی برای برهمکنش ضعیف ۵۵

۳-۳ برهمکنش های ضعیف لپتونی ۵۵

۳-۴ برهمکنش ضعیف کوارکی ۵۶

۳-۵ نقض پاریته در برهمکنش های ضعیف ۵۸

۳-۶ برهمکنش $V-A$ ۶۰

۳-۶-۱ هلیسیتی و کایرالیتی ۶۱

۳-۶-۲ مشاهده هلیسیتی الکترون در واپاشی β ۶۳

۳-۶-۳ تعیین هلیسیتی نوترینو ۶۴

۳-۶-۴ همبستگی زاویه ای میان ν و e^+ ۶۵

۳-۷ قواعد فاینمن برای برهمکنش های ضعیف ۶۶
۳-۸ محاسبه سطح مقطع پراکندگی ۶۶
۳-۹ روش محاسبه آهنگ واپاشی ۶۸
۳-۱۰ واپاشی میون ۷۰
۳-۱۱ برهمکنش نیمه لپتونی ۷۵
۳-۱۲ واپاشی پیون ۷۶
۳-۱۳ لاگرانژین برهمکنشهای الکتروضعیف ۷۸
فصل چهارم : واپاشی بتای معکوس نوترون و تصحیحات زاویه کابیبو ۸۵
۴-۱ مدل فرمی برای واپاشی های ضعیف ۸۶
۴-۲ واپاشی نوترون آزاد ۹۵
۴-۳ تصحیحات کابیبو ۹۸
۴-۴ واپاشی β معکوس در میدان مغناطیسی ۱۰۴
۴-۴-۱ مقدمه ۱۰٤
۴-۴-۲ حل معادله دیراک در میدان مغناطیسی یکنواخت ۱۰۵
۴-۴-۳ عملگر میدان فرمیون ۱۰۹
۴-۴-۴ واپاشی بتا معکوس ۱۱۲
۴-۴-۴-۱ عناصر ماتریس S ۱۱۲
۴-۴-۴-۲ سطح مقطع پراکندگی ۱۱۳
۴-۵ نتیجه گیری و پیشنهادات ۱۱۸
منابع و مأخذ ۱۱۹

فصل اول : مقدمه

۱-۱ تاریخ شمار کشف ذرات بنیادی

در سال ۱۹۶۴، گلمان[۱] و زوویگ[۲] به طور آزمایشی ایده کوارکها را مطرح کردند.آنها پیشنهاد کردند که مزون ها و باریون ها ترکیبی از سه کوارک یا آنتی کوارک، که بالا،پایین، و شگفت (s,d,u) نامیده می شوند و اسپین $\frac{1}{2}$ دارند و به ترتیب دارای بار الکتریکی $-\frac{1}{3},-\frac{1}{3},\frac{2}{3}$ می باشند. از آنجا که بارها هرگز مشاهده نشده بودند، کوارکها بیشتر به عنوان یک توصیف ریاضی از الگوهای طعم ذرات بود تا پذیرش به عنوان یک شیء فیزیکی واقعی. بعدها تحولات تئوری و تجربی به ما اجازه داد تا اکنون به کوارک ها به عنوان اشیاء فیزیکی بنگریم، حتی اگر نتوانیم آنها را جداسازی کنیم. مقالات متعددی کوارک چهارمی را که طعم دیگری دارد پیشنهاد کردند، که در حال حاضر به عنوان نسلی از ماده دیده می شود. تعداد بسیار کمی از فیزیکدانان در زمان این پیشنهاد، آن را به طور جدی پذیرفتند.در همان سال گلاشو[۳] و بجورکن[۴]، کوارک چهارم را به نام کوارک "افسون" برچسب زدند. در سال ۱۹۶۵، گرینبرگ[۵]، هان[۶] و نامبو[۷] خاصیت رنگ بار را معرفی کردند و دریافتند که همه هادرون ها بی رنگ هستند.در سال ۱۹۶۶ مدل کوارک به طور نسبتاً کندی پذیرفته شد، زیرا کوارک ها مشاهده نشده بودند. در سال ۱۹۶۷، واینبرگ[۸] و عبدالسلام[۹] به طور جداگانه نظریه ای را پیشنهاد دادند که برهم کنشهای الکترومغناطیس و ضعیف را در داخل برهم کنش الکتروضعیف وحدت می بخشید. نظریه آنها نیازمند یک بوزون برهم کنشی ضعیف بود (که اکنون Z^0 نامیده می شود) که واسطه برهم کنش های ضعیفی بود که در آن زمان مشاهده نشده بود. آنها همچنین بوزون دیگری به نام هیگز را پیش بینی کردند که هنوز هم شناخته نشده است. در شتابدهنده خطی استنفورد[۱۰] ، در آزمایشی که در آن الکترونها از پروتون پراکنده می شوند، به نظر می رسد که الکترونها از هسته های کوچک سختی از داخل پروتون می جهند. در سالهای ۱۹۶۸ و ۱۹۶۹، عبدالسلام و فاینمن[۱۱] این داده ها را تحلیل کردند و در سال ۱۹۷۰، گلاشو، ایلیوپولوس[۱۲] و مایانی[۱۳] اهمیت حیاتی نوع چهارم از کوارکها را در چارچوب مدل استاندارد شناختند. در سال ۱۹۷۳، پرکینز[۱۴] بعضی از داده های قدیمی به

---

۱ Gell-mann
۲ Zweig
۳ Glashow
٤ Bjorken
٥ Greenberg
٦ Han
۷ Nambu
۸ Weinberg
۹ Abdus Salam
۱۰ Stanford
۱۱ Feynman
۱۲ Iliopoulos
۱۳ Maiani
۱٤ Perkins

دست آمده از سرن[۱۵] را دوباره تحلیل کرد و نشانه هایی از برهم کنش های ضعیف بدون تبادل بار را یافت (اشاره به تبادل Z^0).در همان سال نظریه میدان کوانتومی فرمول بندی شد و در این نظریه کوارکها و گلوئون ها (اکنون بخشی از مدل استاندارد هستند) به طور مشابه در ساختار الکترو دینامیک کوانتومی (QED)[۱۶] بودند. کوارک ها به عنوان ذرات واقعی که رنگ بار دارند تعیین شدند. گلوئون ها هم عامل بدون جرم برهم کنش قوی بودند. این نظریه برهم کنش قوی برای اولین بار توسط فریتش[۱۷] و گلمان پیشنهاد شد. دوباره در همان سال پلیتزر[۱۸]، گراس[۱۹] و ویلزک[۲۰] کشف کردند که نظریه رنگ برهم کنش های قوی خاصیت خاصی دارد، که اکنون "آزادی مجانبی" نامیده می شود. این خاصیت برای توصیف داده های مبتنی بر حالت زمینه فرودی در سال های ۶۹-۱۹۶۸ ضروری بود. در بحثی خلاصه در یک کنفرانس در سال ۱۹۷۴، ایلیوپولوس برای اولین بار گزارشی از دیدگاه فیزیک که اکنون مدل استاندارد نامیده می شود ارائه داد. در ماه نوامبر ۱۹۷۴، ریشتر[۲۱] و تینگ[۲۲] آزمایشهای مستقلی انجام دادند که منجر شد در همان روز اعلام کنند که ذره مشابه جدیدی یافته اند. تینگ و همکارانش در بروکهاون[۲۳] این ذره را "J" نامیدند. در حالی که ریشتر و همکارانش در ایسلک[۲۴] آن را ذره psi نامیدند.از آنجا که کشف آنها وزن مساوی به دست می داد، این ذره معمولا با عنوان J/psi شناخته می شود. ذره J/psi یک مزون است. در سال ۱۹۶۷، گلدهابر[۲۵] **و** پییره[۲۶] مزون J/ψ را یافتند. پیش بینی های تئوری به طور چشمگیری با نتایج آزمایش برای مدل استاندارد به توافق رسیدند. لپتون تاو در همان سال توسط پرل[۲۷] و همکارانش در ایسلک کشف شد. از آنجا که این لپتون اولین ذره ثبت شده از نسل سوم ذرات می باشد، کاملا غیرمنتظره بود. در سال ۱۹۷۷، لدرمن[۲۸] و همکارانش کوارک و آنتی کوارک دیگری را کشف کردند، که این کوارک "ته" نامیده می شود. از آنجا که فیزیکدانان کوارکها را به صورت جفت مجسم می کنند، این کشف انگیزه ای برای جستجوی کوارک ششم "رو" می باشد. در سال ۱۹۷۸، پرسکات[۲۹] و تیلور[۳۰] مشاهده کردند که Z^0 واسطه برهم کنش های ضعیف در پراکندگی الکترونهای قطبیده از دوتریم، نقض پایستگی پاریته را نشان می دهد،

---

[۱۵] Cern
[۱۶] Quantum Electrodynamics
[۱۷] Fritzsch
[۱۸] Politzer
[۱۹] Gross
[۲۰] Wilczek
[۲۱] Richter
[۲۲] Ting
[۲۳] Brookhaven
[۲۴] Islac
[۲۵] Goldhaber
[۲۶] Pierre
[۲۷] Perl
[۲۸] Lederman
[۲۹] Prescott
[۳۰] Taylor

همانگونه که توسط مدل استاندارد پیش بینی شده بود. در سال ۱۹۷۹، شواهدی قوی برای گلوئون تابش شده بوسیله کوارک یا آنتی کوارک اولیه در پترا[۳۱] مشاهده شد. پترا مرکز برخورد پرتو در آزمایشگاه دسی[۳۲] در هامبورگ است. در سال ۱۹۸۳، بوزونهای واسطه $Z^0, \mathrm{W}^{\pm}$ که ضرورت نظریه الکتروضعیف هستند بوسیله دو آزمایش با استفاده از سنکترون سرن و با استفاده از تکنیکهای توسعه یافته بوسیله رابیا[۳۳] و وندرمیر[۳۴] با برخورد پروتون ها و آنتی پروتون ها مشاهده شد. در سال ۱۹۸۹ آزمایشهای انجام شده در ایسلک و سرن به شدت نشان می دهد که سه و تنها سه نسل از ذرات بنیادی وجود دارد. این استنباط بوسیله نشان دادن اینکه طول عمر بوزون Z^0 تنها با وجود دقیقا سه نوترینوی بسیار سبک (یا بدون جرم) سازگار است، بدست می آید.در سال ۱۹۹۵، بعد از ۱۸ سال جستجو در بسیاری از شتابدهنده ها، آزمایشهای سی دی اف[۳۵] و D0[۳۶] در فرمیلب[۳۷] کوارک "سر" را با جرم غیر منتظره $175\ GeV$ کشف کرد.هیچ کس نمی داند که چرا این جرم متفاوت از پنج کوارک دیگر است.

۱-۲ ذرات بنیادی در مدل استاندارد

ذرات بنیادی اساسی ترین بخش ساختمان یک ماده است. هویت ذرات بنیادی در یک دوره طولانی از پیشرفت فیزیک تغییر کرده است. ماده از مولکولها و یا اتمها ساخته شده است، اتمها از هسته ها و الکترون ها ساخته شده است، هسته از نوکلئونها ساخته شده است.یعنی پروتون و نوترون و در نهایت نوکلئونها از کوارکها ساخته شده اند.ذرات بنیادی زمان ما کوارکها و لپتونها هستند. در پیشرفت و توسعه شتابدهنده های بزرگ در ۵۰ سال اخیرذرات بسیاری (بیش از ۳۰۰ ذره) علاوه بر پروتون ها ، نوترونها و پیون ها کشف شده اند که هادرون ها نامیده می شوند. دو نوع از هادرون ها وجود دارد:

۱- باریون ها (مانند پروتون، نوترون و ...) با عدد باریونی $B=1$

۲- مزون ها (مانند پیون، کائون و ...) با عدد باریونی $B=0$

مدل کوارک توسط گلمان و به طور مستقل توسط زوویگ در سال ۱۹۶۴ پیشنهاد شده بود[۱].

---

۳۱ Petra
۳۲ Desy
۳۳ Rubbia
۳۴ Van Der Meer
۳۵ CDF
۳۶ D-zero
۳۷ Fermilab

طبقه بندی هادرون ها بر اساس تقارن داخلی $SU(3)$ برای هادرون های تشکیل شده از سه کوارک نسبتا سبک است، و با موفقیت خواص استاتیک آن ذرات را توضیح می دهد. در مدل کوارک، باریون ها از سه کوارک (qqq) مانند :

$$n=(udd),p=(uud),\Lambda=(uds)$$

و مزون ها از یک کوارک، q و یک پادکوارک، $\bar{q}$ مانند :

$$K^+=(u\bar{s}),\quad K^-=(s\bar{u}),\quad \pi^+=(u\bar{d}),\quad \pi^-=(\bar{u}d)$$

امروزه شش کوارک مختلف u,d,s,c,b,t شناخته شده است و به این ترتیب گفته می شود که کوارک ها دارای ۶ درجه آزادی به نام " طعم " هستند. طعم یک کوارک از طریق واکنشهای ضعیف و بواسطه بوزونهای ضعیف باردار $W^{\pm}$ می تواند به طعم یک کوارک دیگر تبدیل شود، که در مدل استاندارد الکتروضعیف پیش بینی شده است. علاوه بر طعم کوارکها دارای درجه آزادی دیگری به نام " رنگ " میباشند. برهم کنش بین کوارک ها با توجه به رنگ " بار "، که چیزی جز برهم کنش قوی نیست، بواسطه گلوئون ها است و توسط کرومودینامیک کوانتومی توصیف می شود (QCD) [۲].

کرومودینامیک کوانتومی یک تئوری شاخص با تقارن رنگ $SU(3)$ است، در حالی که تقارن طعم بوسیله کوارکهای مختلف شکسته می شود. برای کوارک های سنگین تقارن رنگ تا حد زیادی یک تقارن دقیق است.

نوع دیگری از ذرات بنیادی در طبیعت موجود هستند و لپتون ها نامیده می شوند مانند :

الکترون e , میون μ ، تاو τ و نوترینوهای مربوط به آنها (ν_τ,ν_μ,ν_e)

لپتون ها برهم کنش قوی ندارند و درجه آزادی رنگ ندارند و اصطلاحاً می گوییم لپتون ها بی رنگ هستند. در میان لپتون ها، نوترینوها فقط دارای برهم کنش ضعیف هستند در حالی که e,μ,τ هر دو برهم کنش ضعیف و الکترومغناطیس را دارا میباشند. تولید و واپاشی لپتون ها به خوبی بوسیله مدل استاندارد الکتروضعیف توصیف می شود.

ذرات بنیادی در مدل استاندارد به شرح زیر است :

۱- کوارک ها $\begin{pmatrix}u\\d\end{pmatrix},\begin{pmatrix}c\\d\end{pmatrix},\begin{pmatrix}t\\b\end{pmatrix}$

۲- لپتون ها $\begin{pmatrix} \nu_e \\ e \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} \nu_\mu \\ \nu \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} \nu_\tau \\ \tau \end{pmatrix}$

۳- بوزون های شاخص $W^{\pm}, Z^0$ ضعیف شاخص بوزونهای $\begin{cases} \gamma \text{ فوتون} \\ g \text{ گلوئون} \end{cases}$

۴- بوزون های هیگز H

کوارک ها و لپتون ها اجزای اصلی ساختمان ماده هستند. همه انها فرمیون هستند و دارای اسپین $\frac{1}{2}$ می باشند، که اعداد کوانتومی آنها در جداول ۱.۱ و ۱.۲ نشان داده شده است[۳].

	Q	I_3	S	C	B	T	$mass$
u	$+\frac{2}{3}$	$+\frac{1}{2}$	0	0	0	0	$1.5\sim5\ MeV$
d	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{2}$	0	0	0	0	$3\sim9\ MeV$
s	$-\frac{1}{3}$	0	-1	0	0	0	$60\sim170\ MeV$
c	$+\frac{2}{3}$	0	0	$+1$	0	0	$1.47\sim1.83\ GeV$
b	$-\frac{1}{3}$	0	0	0	-1	0	$4.6\sim5.1\ GeV$
t	$+\frac{2}{3}$	0	0	0	0	$+1$	$174.3 \pm 3.2 \pm 4.0\ GeV$

جدول ۱.۱:کوارک ها (Q : بار الکتریکی ، I_3 : مولفه سوم ایزواسپین ، S : عدد شگفت ، C : عدد افسون ، B : عدد زیبایی ، T : عدد حقیقت.برای آنتی کوارک ها ، علامت اعداد کوانتومی عوض میشود.

	Q	L_e	L_μ	L_τ	$mass$
e	-1	$+1$	0	0	$\cong 0.511\ MeV$
ν_e	0	$+1$	0	0	$< 3\ eV$
μ	-1	0	$+1$	0	$\cong 105.66\ MeV$
ν_μ	0	0	$+1$	0	$< 0.19\ MeV$
τ	-1	0	0	$+1$	$\cong 1777.0\ MeV$
ν_τ	0	0	0	$+1$	$< 18.2\ MeV$

جدول ۱.۲ : لپتون ها (Q : بار الکتریکی ، L_e : عدد الکترون ، L_μ : عدد میون ، L_τ : عدد تاو.برای آنتی لپتون ها ، علامت اعداد کوانتومی عوض می شوند.

جالب است توجه کنیم که هردوی لپتون ها و کوارک ها در سه زوج دوتایی می باشند، اعضای هر یک از دوتایه باهم در فرایند برهم کنش ضعیف تصحیح بار شرکت می کنند. تکرار دوتایه هایی که در اینجا آمده است، سه نسل از کوارک ها و لپتون ها می باشد. متناظر با ذرات در نسل های مختلف ، برای مثال u,c,t دقیقا همین اعداد کوانتومی صدق می کند. تنها خاصیت برای تشخیص نسلهای مختلف، تفاوت جرمهای کوارک ها و لپتون ها است که به نوع نسل آنها بستگی دارد. بارهای الکتریکی مولفه های بالا و پایین دوتایه های کوارک به ترتیب $+\frac{2}{3}$ و $-\frac{1}{3}$ می باشد در حالی که برای دوتایه های لپتون به ترتیب ۰ و ۱- می باشد.در نگاه اول، بار کوانتش عجیب به نظر می رسد. با این حال مشخص شده است که کوانتش برای شرایط ناهنجاری آزاد(غیر عادی آزاد)، مدل استاندارد به خوبی مناسب است.بوزونهای شاخص دارای اسپین ۱ می باشند و واسطه برهم کنش بین کوارک ها و لپتون ها می باشند. قدرت برهم کنش، به انتشار بوزون های شاخص بین کوارک ها و لپتون ها بستگی دارد.برهم کنش های الکترومغناطیس ، ضعیف و قوی به ترتیب به واسطه فوتون ها γ ، بوزونهای ضعیف $W^{\pm},Z^0$ و گلوئون ها g می باشند. یک فوتون نمی تواند با خودش جفت شود، در حالی که گلوئون ها و بوزون های ضعیف می توانند با یکدیگر جفت شوند. این با توجه به این واقعیت است که برهم کنش الکترومغناطیس بوسیله تئوری شاخص آبلی توصیف می شود، در حالی که برهم کنش های ضعیف و قوی بوسیله تئوری های شاخص غیر آبلی توصیف می شوند[۴].

در میان بوزونهای شاخص ، فوتون γ و گلوئون ها g بدون جرم اند و از این جهت برهم کنش آنها در محدوده بی نهایت (نا متناهی) می باشد. بحث درباره برهم کنش های قوی سرراست نیست زیرا طبیعت غیرآبلی برهم کنش های رنگ و کوارک ها به داخل هادرون ها در محدوده $10^{-15}m$ محدود می شود. از سوی دیگر بوزونهای ضعیف $W^{\pm},Z^0$ سنگین هستند و برهم کنش آنها در محدوده بسیار کوتاهی می باشد.مانند $10^{-18}m$.بوزون هیگز با اسپین صفر برای مکانیزم کارکرد هیگز معرفی می شود که در نظریه

های شکست خود به خودی تقارن نقش موثری دارد.در مکانیزم هیگز یک تقارن بزرگ به طور خود به خودی از طریق ارزش انتظاری خلاء میدان هیگز به تقارن کوچکتر شکسته می شود.نه تنها بوزون های شاخص بلکه تمام کوارک ها و لپتون ها در مدل استاندارد از شکست خود به خودی تقارن سرچشمه می گیرد، هر چند نوترینو کمی بحث برانگیز است.درک واقعی از مکانیزم شکست خود به خودی و مکانیزم هیگز هنوز هم مسئله چالش برانگیزی است که باید در نظریه های میدان حل شود.بدیهی است که کشف بوزون هیگز در آزمایشگاه یک راه حل اساسی برای این مشکل خواهد بود[۵].

۱-۳ برهم کنش میان ذرات بنیادی

چهار برهمکنش مشخص میان ذرات بنیادی به خوبی شناخته شده است :

۱- برهم کنش الکترومغناطیس که بواسطه فوتون های بدون جرم $(m_\gamma = 0)$ با اسپین ۱ انجام می گیرد.

۲- برهم کنش ضعیف که بواسطه بوزونهای ضعیف جرم دار

$(m_w \cong 80.4^{GeV}\!/_{c^2}, m_z \cong 91.2^{GeV}\!/_{c^2})$ با اسپین صفر انجام می گیرد.

۳- برهم کنش قوی که به واسطه گلوئون های بدون جرم $(m_g = 0)$ با اسپین ۱ انجام می گیرد.

۴- برهم کنش گرانشی که بواسطه گراویتون های بدون جرم $(m_G = 0)$ و با اسپین ۲ انجام می گیرد.

در میان این برهم کنش ها، برهم کنش گرانشی (جاذبه) معمولا خارج از مبحث فیزیک ذرات است زیرا در مقایسه با برهم کنش های دیگر بسیار ضعیف است و هیچ اثر قابل توجهی روی هیچ یک از برهم کنش های این ذرات ندارد.(مگر اینکه انرژی برهم کنش ذرات خیلی بالا باشد.)برای مثال ، نسبت نیروی گرانشی به نیروی کولمب (الکترومغناطیس) بین ۲ پروتون در فاصله $10^{-15}m$ تا $10^{-36}m$ است[۶].

برهم کنش الکترومغناطیس به واسطه فوتون γ پیشینه تحقیقاتی طولانی دارد که بوسیله الکترودینامیک کوانتومی توصیف می شود. (QED) ، که این نظریه شاخص تقارن آبلی $U(1)$ دارد. QED به زیبایی در چارچوب نظریه میدان کوانتومی فرمول بندی می شود و قابل بازبهنجارش شدن است، یعنی واگرایی های مختلفی که از حلقه انتگرال در قوانین بالاتر از نظریه اختلال سرچشمه می گیرد میتواند در اجرام فیزیکی و تابع موج ذرات، بازبهنجارش شود. ثابت ساختار ریز $\alpha = \frac{e^2}{4\pi} = \frac{1}{137}$ ثابت اختلالی که به خوبی برای QED کار می کند. نظریه برهم کنش های ضعیف برای فرایندهای ضعیف در اصل بوسیله نظریه فرمی فرمول بندی می شود، که در سال ۱۹۵۰ ایجاد شده است و به طور فوق العاده ای توسط برهم کنش جریان - جریان با جریان های $V-A$ توصیف می شود. متاسفانه این تئوری برخلاف ثابت ساختار ریز قابل

بازبهنجارش نیست. این با توجه به این واقعیت است که جفت شدگی فرمی G_F دیمانسیون $[mass]^{-2}$ دارد.بنابراین برهم کنش فرمی باید به عنوان مدل موثر برای فرایندهایی که در منطقه کم انرژی کار می کند در نظر گرفته شود[۷].

در این مطالعه اختصاصی برهم کنش های ضعیف فیزیکی در سال ۱۹۶۰، بسیاری از مشکلات موجود در برهم کنش های ضعیف برطرف شد. در نهایت یک نظریه بازبهنجارش مناسب فرمول بندی شد که بر اساس تصویر واحد و یکپارچه برهم کنش های ضعیف و الکترومغناطیس و در چارچوب نظریه شاخص غیرآبلی با تقارن $SU(2)_L \times U(1)_Y$ (زیر نویس L به معنای زمینه شرکت کننده در برهم کنش چپ گرد است و Y به معنای فوق بار ضعیف) است که اکنون مدل استاندارد الکتروضعیف نامیده می شود.

برهم کنش قوی توسط گلوئون های که بار رنگی دارند انجام می گیرد و از آنجا که کوارک ها نیز بار رنگی دارند ، گلوئون ها می توانند با کوارک ها جفت شوند. نظریه میدان برای برهم کنش های قوی در نظریه شاخص غیرآبلی با تقارن رنگی $SU(3)_c$ فرمول بندی می شود که کرومودینامیک کوانتومی نامیده می شود (QCD).

ثابت جفت شدگی قوی $\alpha_s(Q^2)=\frac{g_s^2}{4\pi}$ با Q^2 تغییر می کند و برای Q^2 های بزرگ ، کوچک است، مانند آنچه در پراکندگی سخت و پراکندگی غیر کشسان عمیق که در آن کوارک ها و گلوئون ها مانند ذرات آزاد رفتار می کنند، که مفهوم ضمنی آن " آزادی مجانب " است و در محدوده هایی از جمله نظریه اختلال به خوبی عمل می کنند.از طرفی، برای محدوده Q^2 های کوچک در حالت ایستای کوارکهای مقید در داخل هادرون ها، ثابت جفت شدگی بزرگ می شود و در این محدوده رفتار اختلالی دیگر معتبر نیست، جایی که کوارک ها در داخل هادرون ها محدود شده اند.(حالات یکتایه رنگی).که این محصورسازی فاز نامیده می شود. QCD باید نظریه ای برای توصیف دینامیک کوارک ها و گلوئون ها در تمامی محدوده های Q^2 از "آزادی مجانب" تا "محصور سازی" فاز باشد[۸].

برهم کنش های الکترومغناطیس و ضعیف بوسیله نظریه شاخص با تقارن $SU(2)_L \times U(1)_Y$ فرمول بندی می شود و علاوه بر این، برهم کنش های قوی بوسیله نظریه شاخص با تقارن رنگی $SU(3)_c$ توصیف می شود.از این رو طبیعتا انتظار می رود که همه این برهم کنش های ذرات بنیادی بوسیله نظریه شاخص با برخی تقارن های داخلی G توصیف شوند، که در آن لاگرانژی تحت تبدیلات شاخص G ناورداست. ساده ترین مثال این است که تقارن گروه G محصول مستقیم هریک از تقارنهای $G = SU(3)_c \times SU(2)_L \times U(1)_Y$ است.

اسپین	واسطه	قدرت جفت شدگی	برهم کنش
1	فوتون	$\alpha = \frac{e^2}{4\pi} \cong \frac{1}{137}$	الکترومغناطیس
1	بوزون ضعیف	$G_F \cong 1.16 \times 10^{-5} GeV^{-2}$	ضعیف
1	گلوئون	$\alpha_s = \frac{{g_s}^2}{4\pi} \cong 0.1$	قوی
2	گراویتون	$G_N \cong 6.71 \times 10^{-39} (GeV/c)^{-2}$	گرانشی

جدول ۱.۳ : برهم کنش های ذرات

نظریه حاصل شده مدل استاندارد فیزیک نامیده می شود و اصول مهم در این فرمول بندی این است که:

۱- نظریه یک نظریه شاخص می باشد.
۲- باید ناهنجار آزاد باشد و قابل باز بهنجارش باشد.
۳- شکست تقارن باید طور خود به خودی باشد.

مدل استاندارد باید برای بسیاری از مسائل حل شود ولی بسیاری از نظریه پردازان بر این باورند که این یک نظریه نهایی نیست.برای حل مشکلات باقی مانده و آینده، باید در جستجوی شواهدی برای ماورای مدل استاندارد فیزیک یعنی "فیزیک جدید" باشیم[۹].

فصل دوم : دینامیک ذرات بنیادی

۲-۱ مختصری از انواع دینامیک ذرات بنیادی

همانگونه که در فصل اول اشاره شد، چهار نیروی بنیادی در طبیعت وجود دارد: قوی، الکترومغناطیس، ضعیف و گرانشی. برای هر یک از این نیروها نظریه فیزیکی جداگانه ای وجود دارد. نظریه کلاسیک گرانی قانون گرانش نیوتن است، که تعمیم نسبیتی آن نظریه عام انیشتین است. که در حال حاضر به علت اینکه نیروی گرانش بسیار ضعیف است و نقش مهمی در فیزیک ذرات بنیادی ندارد، در مورد آن بحث نمی کنیم. نظریه فیزیکی که نیروهای الکترومغناطیس را توصیف می کند، الکترودینامیک نامیده می شود. که فرمول بندی کلاسیک آن را ماکسول انجام داده است، که این نظریه با نسبیت خاص سازگار بود. نظریه الکترودینامیک کوانتومی را توموگا[۳۸]، فاینمن و شوینگر[۳۹] در سال ۱۹۴۰ تکمیل کردند. نیروهای ضعیف که مسئول واپاشی هسته بتازا و همچنین واپاشی پیون، میون و بسیاری ذرات شگفت انگیز دیگر هستند در فیزیک کلاسیک ناشناخته بود. اولین نظریه نیروهای ضعیف را فرمی در ۱۹۳۳ ارائه کرد و لی و یانگ، فاینمن، گلمان و دیگران آن را در دهه پنجاه اصلاح کردند و سرانجام گلاشو، واینبرگ و سلام در دهه شصت آنرا به شکل حاضر درآوردند. به دلایلی نظریه برهم کنشهای ضعیف را گاهی "دینامیک طعم" نیز می نامند[۱۰].

از این به بعد از آن به عنوان نظریه گلاشو-واینبرگ-سلام (GWS) یاد می کنیم. هریک از این نیروها با مبادله یک ذره رد و بدل می شوند. واسطه گرانش گراویتون نامیده می شود، برهمکنش های الکترومغناطیس با فوتون، برهمکنش های قوی با گلوئون و برهمکنش های ضعیف با بوزونهای برداری میانی Z,W رد و بدل می شوند. به طور مثال، نیروی قوی بین دو پروتون باید به صورت برهم کنش پیچیده شش کوارک، که یوکاوا آن را به صورت یک فرایند بنیادی فرض کرده بود در نظر گرفت.

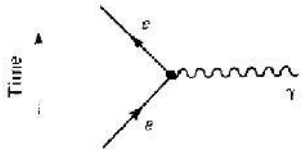
الکترودینامیک کوانتومی، قدیمی ترین، ساده ترین و موفق ترین نظریه دینامیکی است، بقیه نظریه ها به صورت هوشمندانه ای از آن ساخته شده اند. کرومودینامیک کوانتومی، نظریه ای که برای برهمکنش های قوی می باشد شبیه الکترودینامیک است با تفاوت هایی که برجسته ترین تفاوت آن است که در الکترودینامیک یک نوع بار الکتریکی وجود دارد که می تواند مثبت یا منفی باشد، یعنی برای مشخص کردن بار یک ذره، یک عدد کافی است. ولی در کرومودینامیک کوانتومی سه نوع رنگ وجود دارد (قرمز، سبز، آبی) که رنگ کوارک (نه طعم آن) می تواند تغییر کند. مثلا یک کوارک بالای آبی به یک کوارک بالای قرمز تبدیل میشود. چون رنگ (مثل بار) همیشه پایسته است، باید این اختلاف را گلوئون حمل کند[۱۱].

---

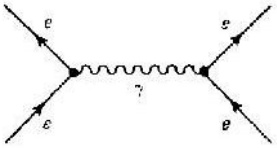
[۳۸] Tomoga
[۳۹] Shwinger

۲-۲ الکترودینامیک کوانتومی (QED)

همه پدیده های الکترومغناطیسی سرانجام به فرایند بنیادی زیر تبدیل می شوند :



این نمودار بیان می کند که : ذره باردار وارد و با جذب یا گسیل فوتون خارج می شود.در ادامه بحث ذره باردار را الکترون در نظر می گیریم، که می تواند درست همانند کوارک یا هر لپتون دیگر، بجز نوترینو باشد(زیرا نوترینو خنثی است). برای توضیح فرایندهای پیچیده تر، برای مثال حالت زیر را در نظر بگیرید :



در اینجا دو الکترون وارد و با رد و بدل کردن یک فوتون، خارج می شوند. بنابراین نمودار بالا برهم کنش بین دو الکترون را بیان می کند. در نظریه کلاسیک این فرایند را دفع کولنی، بارهای همنام می نامیم. در QED این فرایند پراکندگی مولر نامیده می شود و می گوییم برهم کنش با رد و بدل کردن یک فوتون انجام می شود. در QED مجازیم نمودار های فاینمن بچرخانیم. برای مثال نمودار قبل را به صورت زیر می چرخانیم :

قانون این نمودارها اینست که مسیر ذره ای که در زمان به سمت عقب بر میگردد، پاد ذره ای در نظر بگیریم که در جهت زمان حرکت می کند. پس در فرایند نشان داده شده یک الکترون و یک پوزیترون نابود می شوند و یک فوتون گسیل می شود و سپس دوباره یک الکترون-پوزیترون تولید می شود. این برهمکنش جاذبه کولنی دو بار مخالف را نشان می دهد. در QED این فرایند را پراکندگی باهاباها[۴۰] می نامند.

---

[۴۰] Bhabha