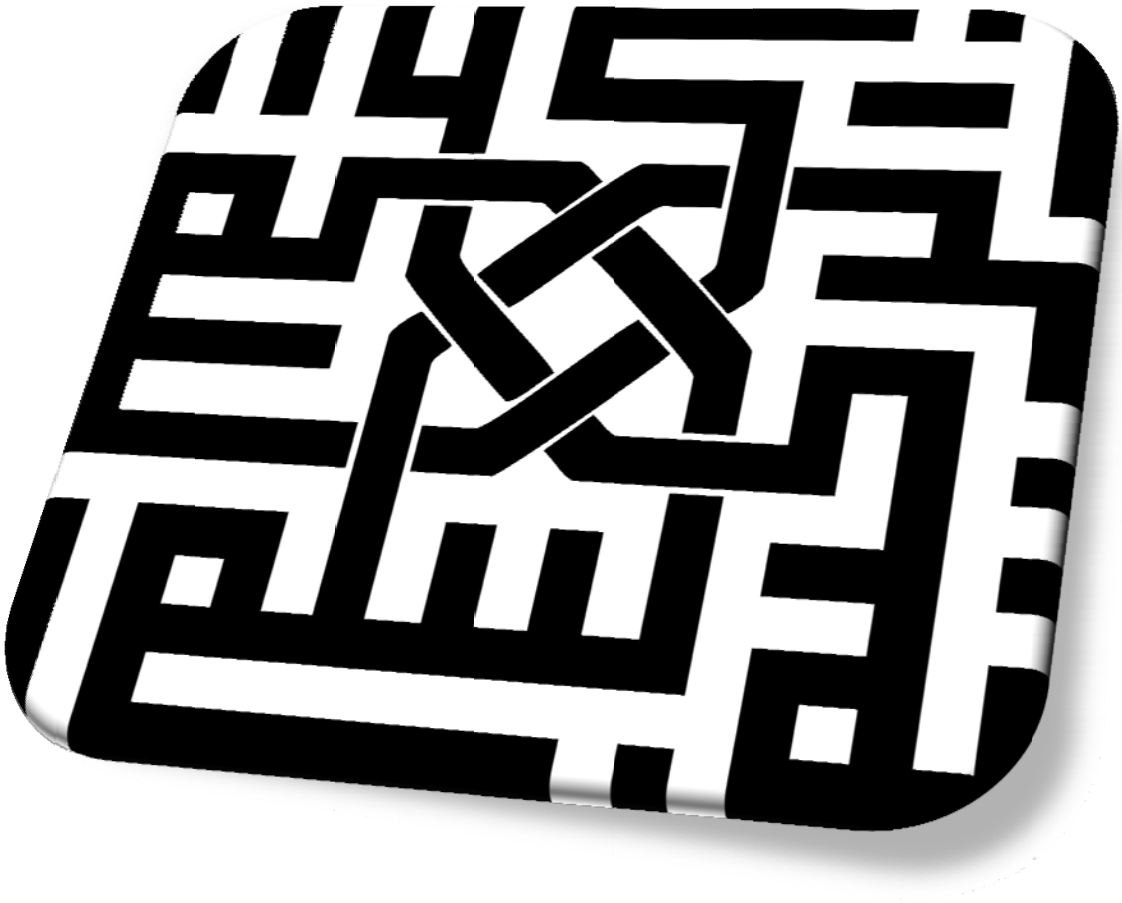


دانشکده علوم پایه

پایان نامه دوره کارشناسی ارشد

رشته فیزیک (ذرات بنیادی)

مطالعه پدیده $FCNC$ در واپاشی کوارک تاپ

نگارنده

سپیده حسینی سنوان

استاد راهنمای اول

دکتر احمد مشاعی

استاد راهنمای دوم

دکتر مجتبی محمدی نجف‌آبادی

بهمن ۸۸

دانشگاه تربیت مدرس

دانشکده علوم پایه

بسمه تعالی

تاییدیه اعضای هیات داوران حاضر در جلسه دفاع از پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد

اعضای هیئت داوران نسخهٔ نهایی پایان‌نامه خانم **سپیده حسینی** رشته **فیزیک** تحت عنوان:«**مطالعه پدیده FCNC در واپاشیهای کوارک تاپ**» از نظر فرم و محتوا بررسی نموده و آنرا برای اخذ درجهٔ کارشناسی‌ارشد مورد تائید قرار دادند.

اعضای هیأت داوران	نام و نام خانوادگی	رتبه علمی	امضاء
۱- استاد راهنما	دکتر احمد مشاعی	استادیار	
۲- استاد راهنمای دوم	دکتر مجتبی محمدی نجف آبادی	استادیار	
۳- استاد ناظر داخلی	دکتر احمد یزدانی	دانشیار	
٤- استاد ناظر داخلی	دکتر محمدرضا ابوالحسنی	استادیار	
٥- استاد ناظر خارجی	دکتر سعید پاک طینت	استادیار	
٦- نماینده تحصیلات تکمیلی	دکتر احمد یزدانی	دانشیار	

۸۸/۱۱/۶

آیین نامه چاپ پایان‌نامه (رساله)های دانشجویان دانشگاه تربیت مدرس

نظر به اینکه چاپ و انتشار پایان نامه (رساله)های تحصیلی دانشجویان دانشگاه تربیت مدرس، مبین بخشی از فعالیتهای علمی - پژوهشی دانشگاه است بنابراین به منظور آگاهی و رعایت حقوق دانشگاه،دانش آموختگان این دانشگاه نسبت به رعایت موارد ذیل متعهد می‌شوند:

ماده ۱: در صورت اقدام به چاپ پایان نامه (رساله)ی خود، مراتب را قبلاً به طور کتبی به «دفتر نشر آثارعلمی» دانشگاه اطلاع دهد.

ماده ۲: در صفحه سوم کتاب (پس از برگ شناسنامه) عبارت ذیل را چاپ کند:

«کتاب حاضر، حاصل پایان نامه کارشناسی ارشد نگارنده سپیده حسینی سنوان در رشته فیزیک است که در سال۱۳۸۸در دانشکده علوم پایه ی دانشگاه تربیت مدرس به راهنمایی جناب آقای دکتر احمد مشاعی و جناب آقای دکتر مجتبی محمدی نجف آبادی از آن دفاع شده است.»

ماده ۳: به منظور جبران بخشی از هزینه‌های انتشارات دانشگاه، تعداد یک درصد شمارگان کتاب (در هر نوبت‌چاپ) را به «دفتر نشر آثارعلمی» دانشگاه اهدا کند. دانشگاه می‌تواند مازاد نیاز خود را به نفع مرکز نشر درمعرض فروش قرار دهد.

ماده ۴: در صورت عدم رعایت ماده ۳، ۵۰٪ بهای شمارگان چاپ شده را به عنوان خسارت به دانشگاه تربیت‌مدرس، تأدیه کند.

ماده ۵: دانشجو تعهد و قبول می کند در صورت خودداری از پرداخت بهای خسارت، دانشگاه می‌تواند خسارت مذکور را از طریق مراجع قضایی مطالبه و وصول کند؛ به علاوه به دانشگاه حق می‌دهد به منظور استیفای حقوق خود، از طریق دادگاه، معادل وجه مذکور در ماده ۴ را از محل توقیف کتابهای عرضه شده نگارنده برای فروش، تامین نماید.

ماده ۶: اینجانب سپیده حسینی سنوان دانشجوی رشته فیزیک مقطع کارشناسی ارشد تعهد فوق وضمانت اجرایی آن را قبول کرده، به آن ملتزم می شوم.

نام و نام خانوادگی: سپیده حسینی سنوان

تاریخ و امضا:۸۸/۱۱/۶

آیین نامه حق مالکیت مادی و معنوی در مورد نتایج پژوهشهای علمی دانشگاه تربیت مدرس

مقدمه:

با عنایت به سیاست‌های پژوهشی و فناوری دانشگاه در راستای تحقق عدالت و کرامت انسانها که لازمه شکوفایی علمی و فنی است و رعایت حقوق مادی و معنوی دانشگاه و پژوهشگران، لازم است اعضای هیأت علمی، دانشجویان، دانش‌آموختگان و دیگر همکاران طرح، در مورد نتایج پژوهشهای علمی که تحت عناوین پایان‌نامه، رساله و طرحهای تحقیقاتی با هماهنگی دانشگاه انجام شده است، موارد زیر را رعایت نمایند:

ماده ۱- حق نشر و تکثیر پایان‌نامه/رساله و در آمدهای حاصل از آنها متعلق به دانشگاه می‌باشد ولی حقوق معنوی پدیدآورندگان محفوظ خواهد بود.

ماده ۲- انتشار مقاله یا مقالات مستخرج از پایان‌نامه/رساله به صورت چاپ در نشریات علمی و یا ارائه در مجامع علمی باید به نام دانشگاه بوده و با تایید استاد راهنمای اصلی، یکی از اساتید راهنما، مشاور و یا دانشجوی مسئول مکاتبات مقاله باشد. ولی مسئولیت علمی مقاله مستخرج از پایان‌نامه و رساله به عهده اساتید راهنما و دانشجو می‌باشد.

تبصره: در مقالاتی که پس از دانش‌آموختگی بصورت ترکیبی از اطلاعات جدید و نتایج حاصل از پایان‌نامه/رساله نیز منتشر می‌شود نیز باید نام دانشگاه درج شود.

ماده ۳- انتشار کتاب و یا نرم‌افزار و یا آثار ویژه حاصل از نتایج پایان‌نامه/رساله و تمامی طرحهای تحقیقاتی کلیه واحدهای دانشگاه اعم از دانشکده‌ها، مراکز تحقیقاتی، پژوهشکده‌ها، پارک علم و فناوری و دیگر واحدها باید با مجوز کتبی صادره از معاونت پژوهشی دانشگاه و بر اساس آیین‌نامه‌های مصوب انجام شود.

ماده ۴- ثبت اختراع و تدوین دانش فنی و یا ارائه یافته‌ها در جشنواره‌های ملی، منطقه‌ای و بین‌المللی که حاصل نتایج مستخرج از پایان‌نامه/رساله و تمامی طرح‌های تحقیقاتی دانشگاه باید با هماهنگی استاد راهنما یا مجری طرح از طریق معاونت پژوهشی دانشگاه انجام گیرد.

ماده ۵- این آیین نامه در ۵ ماده در یک تبصره در تاریخ ۸۷/۴/۱ در شورای پژوهشی و در تاریخ ۸۷/۴/۲۳ در هیأت رئیسه دانشگاه به تایید رسید و در جلسه ۸۷/۷/۱۵ شورای دانشگاه به تصویب رسیده و از تاریخ تصویب در شورای دانشگاه لازو الاجرا است.

((اینجانب **سپیده حسینی سنوان** دانشجوی **رشته فیزیک** ورودی سال **۸۶** مقطع **ارشد** دانشکده **علوم پایه** متعهد می‌شوم کلیه نکات مندرج در آئین نامه حق مالکیت مادی و معنوی در مورد نتایج مادی و معنوی در مورد نتایج پژوهش‌های علمی دانشگاه تربیت مدرس را در انتشار یافته‌های علمی مستخرج از پایان‌نامه/رساله تحصیلی خود را رعایت نمایم.در صورت تخلف از مفاد آیین‌نامه فوق الاشعار به دانشگاه وکالت و نمایندگی می‌دهم که از طرف اینجانب نسبت به لغو امتیاز ثبت اختراع بنام بنده و یا هرگونه امتیاز دیگر و تغییر آن به نام دانشگاه اقدام نماید.و ضمنا نسبت به جبران فوری ضرر و یا زیان حاصله براساس برآورد دانشگاه اقدام خواهم نمود و بدینوسیله حق هرگونه اعتراض را از خود سلب نمودم))

تاریخ و امضا:

یاسر جان:

دانشماز بلبل شیدا گلستان اولمیان یرده

کونول شاد اولماز هرگز، باغِ گلستان اولمیان یرده

آتام:

او دا داغلار کیمی شأنینده نه یازسام یاراشاندیر

آنام:

او قارانلیقلارا مشعل او ایشیقلیقلارا هادی
حققه ایمانه مونادی

ستار:

منه جان-جان دییه رک، دوشمنه قان-قان دئدی قارداش

سحر:

جوشقونون دا قانی داشدی، منه بیر هایلی سس اولدو

هر سسسیز بیر نفس اولدو

هانیه:

یئنه قارداش سایاغی سؤزلریمیز بیر سایاق اولدو

امیر علی:

او بیر اوغلان کی، پری لر سو ایچه رلر چاناغیندا

یاد اولسون صفیه آبام:

خان ننه، هایاندا قالدین بئله باشیوا دولانیم نئجه من سنی ایتیردیم دا سنین تایین تاپیلماز.

تقدیر و تشکر

احتراماً، از زحمات و راهنمایی‌های ارزشمند اساتید گرامی، جناب آقای **دکتر احمد مشاعی** و جناب آقای **دکتر مجتبی محمدی نجف‌آبادی** تشکر می‌نمایم. لحظه لحظه حضور بنده در کنار ایشان برایم سرشار از آموخته‌هاست. از جناب آقایان دکتر محمد رضا ابوالحسنی و دکتر احمد یزدانی از دانشگاه تربیت مدرس و جناب آقای دکتر سعید پاک‌طینت از مرکز پژوهشهای دانشهای بنیادی که زحمت داوری این پایان‌نامه را تقبل فرمودند، قدردانی می‌نمایم.

همچنین از **همسر عزیزم** که همیشه در کنارم مرا یاری نمود و هرگز تنهایم نگذاشت، از خانواده مهربانم مخصوصا پدرم که مشوقم بودند و از خانواده محترم همسرم سپاسگزارم.

چکیده

در مدل استاندارد ذرات بنیادی، واپاشی کوارک تاپ به صورت $FCNC$[1] (تغییر طعم از طریق جریان خنثی) مثل $t \to cH$ در حد نمودارهای درختی حضور ندارند. با این وجود چنین واپاشی‌ها در حد نمودار تک حلقه در مدل استاندارد می‌توانند ظاهر شوند، ولی دارای نسبت شاخه‌ای بسیار کمی می‌باشد ($m_H = 115\ GeV$, $BR(t \to cH) \leq 10^{-15}$). این مقدار در آزمایشگاه قابل اندازه‌گیری نمی‌باشد. در مدل ماورای مدل استاندارد ابر تقارنی کمینه ($MSSM$) این نسبت شاخه‌ای بسیار بزرگتر خواهد شد (10^{-5})، به طوری که در آزمایشگاه (LHC[2]) قابل اندازه‌گیری است. در این پایان‌نامه هدف ما مطالعه پدیده $FCNC$ در بخش کوارک تاپ در راس tcH با استفاده از دو قطبی الکتریکی کوارک‌های سنگین (تاپ و افسون)، در یک چارچوب مستقل از مدل می-باشد.

واژگان کلیدی: مدل استاندارد؛ کوارک تاپ؛ بزون هیگز؛ مدل استاندارد ابر تقارنی کمینه ($MSSM$)

---

[1] *Flavor Changing Neutral Current*

[2] *Large Hadron Collider*

فهرست مطالب

فصل اول: مدل استاندارد ذرات بنیادی ۱

۱ – ۱ مقدمه ۱

۱ – ۱ – ۱ انواع ذرات و اندرکنش‌ها ۱

۱ – ۲ توصیف میدانی ذرات و اندرکنش‌ها ۳

۱ – ۲ – ۱ معادله *Klein-Gordon* و معادله دیراک ۳

۱ – ۳ نظریه *QED* ۴

۱ – ۳ – ۱ ناوردائی پیمانه‌ای و *QED* ۵

۱ – ۴ تئوری الکتروضعیف ۸

۱ – ۴ – ۱ اسپینورهای راستگرد و چپگرد ۸

۱ – ۴ – ۲ بارهای اندرکنش‌های الکتروضعیف ۱۰

۱ – ۴ – ۳ تئوری میدان‌های پیمانه‌ای ۱۲

۱ – ۴ – ۴ تئوری واینبرگ-سلام ۱۷

۱ – ۴ – ۵ شکست تقارن ۱۷

۱ – ۴ – ۶ بوزون گلدستون ۱۹

۱ - ۴ - ۷ مکانیزم هیگز ۲۱

۱ – ۴ – ۸ میدانهای پیمانه‌ای جرم‌دار ۲۵

۱ – ۵ اندرکنش الکتروضعیف کوارکها ۲۷

۱ – ۵ – ۱ ماتریس CKM ۲۷

۱ – ۶ واپاشی هادرونی برای Z و $W^{\pm}$ ۳۰

فصل دوم: کوارک تاپ ۳۳

۲-۱ مقدمه ۳۳

۲-۲ کوارک تاپ در مدل استاندارد ۳۴

۲-۳ تولید کوارک تاپ ۳۶
۲-۴ واپاشی کوارک تاپ ۳۸
۲-۴-۱ عناصر ماتریس CKM مربوط به کوارک تاپ ۳۸
۲-۴-۲ پهنای واپاشی کوارک تاپ ۳۹
۲-۵ اسپین کوارک تاپ ۳۹
۲-۶ مکانیزم G.I.M. ۴۱
فصل سوم: پدیده‌ی FCNC در کوارک تاپ ۴۴
۳-۱ مقدمه ۴۴
۳-۲ پدیده FCNC ۴۵
۳-۳ لاگرانژی FCNC در چارچوب مستقل از مدل ۴۶
۳-۴ نسبت شاخه‌ای $t \to c + H$ ۵۳
فصل چهارم: نتیجه گیری ۵۵
مراجع ۵۶

فهرست جداول

۱-۱ بار اندرکنش‌های الکتروضعیف ۱۰

۱-۲ مقادیر آنالیزور اسپین مربوط به محصولات مختلف از واپاشی کوارک تاپ ۴۰

فهرست اشکال

۱-۱ سه نسل کوارک ها و لپتون ها به ترتیب افزایش جرم ۲

۱-۲ دیاگرام فاینمن برای یک راس در QED ۵

۱-۳ یک فرآیند اساسی در QED: پس زنی الکترونها ۵

۱-۴ شکست خودبخودی تقارن ۱۹

۱-۵ زاویه واینبرگ بر حسب ثابتهای جفت‌شدگی ۲۶

۱-۶ نمونه‌هائی از فرآیندهای تغییر طعم برای کوارک u ۳۱

۱-۷ نمونه‌هائی از فرآیندهای تغییر طعم برای کوارک c ۳۱

۲-۱ ناهنجاری محوری ۳۵

۲-۲ واپاشی‌های منجر به تولید کوارک تاپ ۳۷

۲-۳ واپاشی لپتونی کوارک تاپ در چارچوب سکون کوارک تاپ ۴۰

۲-۴ سهم تک حلقه در واپاشی $K^o \to \mu^+ + \mu^-$ در یک نظریه سه کوارکی ۴۲

۲-۵ سهم کوارک charm در واپاشی $K^o \to \mu^+ + \mu^-$ ۴۲

۳-۱ فرآیندهای FCNC ۴۴

۳-۲ راس tcH ۴۶

۳-۳ راس tcH در فضای اندازه حرکت و فضای آرایش ۴۷

۳-۴ بکارگیری قواعد فاینمن در تصحیحات تک حلقه‌ی راس tcH ۴۷

فصل اول

مدل استاندارد ذرات بنیادی

۱ – ۱ مقدمه

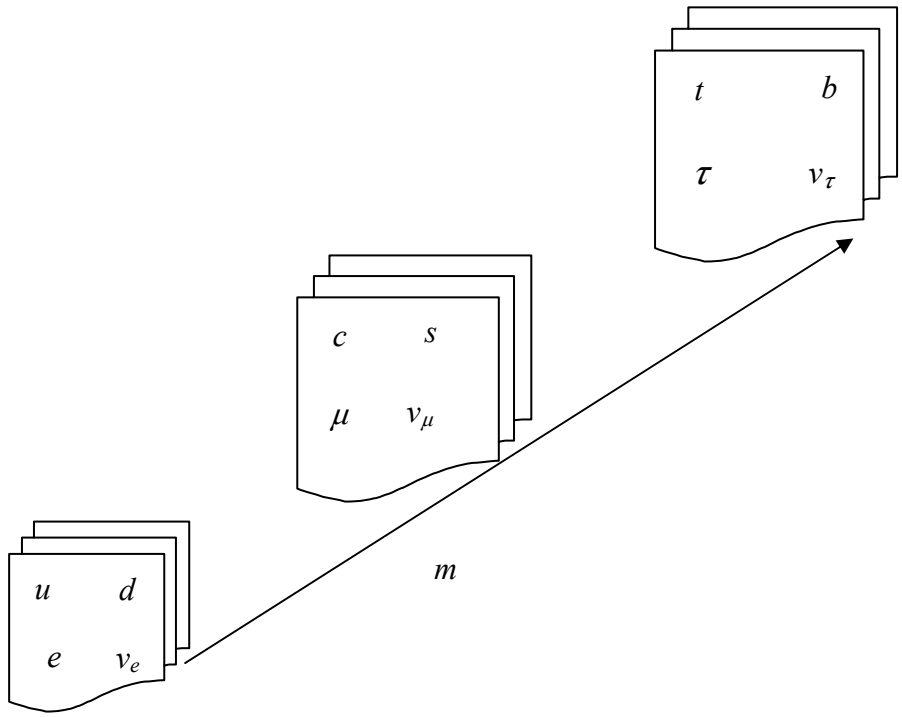
مدل استاندارد یک توصیف برای اندرکنش های بین ذرات با هم است . این مدل یک تئوری میدان کوانتومی است که تئوری‌های الکتروضعیف و کرومودینامیک کوانتومی را در بر دارد. در مدل استاندارد ۱۶ ذره وجود دارد که ۱۲ ذره‌ی مادی و ۴ ذره، حامل نیرو هستند.

۱ – ۱ – ۱ انواع ذرات و اندرکنش‌ها

تمام مواد اطراف ما از سه نوع ذره‌ی بنیادی ساخته شده اند: لپتون‌ها، کوارک‌ها و واسطه‌ها. شش لپتون وجود دارد که بر حسب بار (Q)، عدد الکترونی (L_e)، عدد میونی (L_μ)، و عدد تائو (L_τ) رده-بندی می‌شود. براین اساس لپتونها به سه نسل تقسیم می شوند. همچنین شش آنتی لپتون وجود دارد که تمامی علامتها برعکس است. به همین ترتیب شش طعم کوارک وجود دارد که بسته به بار بالا (u)، پایین (d)، شگفتی (s)، افسون (c)، زیبایی (b) و حقیقت (t) رده بندی شده‌اند. برای آنتی کوارک تمامی علامت‌ها به علامت مخالف خود تبدیل می‌شود در ضمن هر کوارک و ضدکوارک به سه نسل یافت می‌شود. سه نسل کوارک‌ها و لپتون‌ها به ترتیب جرم در شکل(۱-۱) نشان داده شده است. سرانجام هر اندرکنشی دارای واسطه‌ی مخصوص به خود است: فوتون برای نیروی الکترومغناطیسی، دو

W و یک Z برای نیروی ضعیف و گلئون (که در مدل استاندارد هشت تا از آن وجود دارد) برای نیروی قوی و گراویتون برای نیروی گرانش[۵].

تئوری گلاشو- واینبرگ – سلام نیز یک ذره هیگز را پیش بینی می کند که رویهم ۶۱ ذره وجود خواهد داشت که عبارتند از ۳۶ کوارک و آنتی‌کوارک (با سه رنگ مختلف)، ۱۲ لپتون و ضدلپتون، یک فوتون، سه ذره‌ی (Z و$W^{\pm}$)، ۸ گلئون و در نهایت یک ذره هیگز. مدل استاندارد یک مدل پیمانه‌ای با گروه پیمانه‌ای $SU(3) \otimes SU(2) \otimes U(1)$ است که اندرکنش بین لپتون‌ها و کوارک‌ها را تعریف می‌کند. تعیین کننده‌ترین مسئله در این نظریه مفهوم شکست خودبخودی تقارن است.



شکل (۱-۱) سه نسل کوارک ها و لپتون ها به ترتیب افزایش جرم

۱ – ۲ توصیف میدانی ذرات و اندرکنش‌ها

۱ – ۲ – ۱ معادله *Klein-Gordon* و معادله دیراک

معادله کلاین گوردون، حالت نسبی معادله شرودینگر است و برای توصیف ذرات کوانتومی با اسپین صفر به کار می‌رود. در اصل این معادله از این جهت جایگزین معادله شرودینگر شد، که معادله‌ی توصیف کننده‌ی ذرات باید ناوردای لورنتزی باشد، در حالیکه معادله‌ی شرودینگر فقط تحت تبدیلات گالیله‌ای ناوردا باقی می‌ماند. این معادله به اسم دو فیزیکدان به نام‌های اسکار کلاین و والتر گوردون نامگذاری شده‌است. معادله کلاین-گوردون برای یک ذره آزاد با اسپین صفر به صورت زیر است:

$$\nabla^2\psi - \frac{1}{c^2}\frac{\partial^2}{\partial t^2}\psi = \frac{m^2c^2}{\hbar^2}\psi \qquad (۱\text{-}۱)$$

ایراد اصلی معادله‌ی کلاین-گوردون در وجود جوابهائی با انرژیهای منفی است. اولا اینکه با وجود چنین جوابهائی احتمال گذار به انرژیهای پائین تر همچنان وجود دارد و این گذار می‌تواند تا انرژی $-\infty$ ادامه یابد، که یک نکته مبهم در مورد این معادله است. ثانیا، جوابهای با انرژی منفی متناظر با یک چگالی انرژی منفی هستند که نادرست به نظر می‌رسد، زیرا در این حالت جوابهائی با چگالی احتمال منفی بدست می‌آیند. نکته‌ی مهم این است که نمی‌توان جوابهای با انرژی منفی را نادیده گرفت. زیرا در این حالت، کامل بودن مجموعه حالتهای جواب معادله‌ی کلاین-گوردون نقض می‌شود. بنابراین نیاز به معادله‌ی کاملتری برای ذرات با اسپین نیمه صحیح است، که معادله‌ی دیراک می‌باشد.

در پی یافتن معادله ای که اندازه مثبت داشته باشد و هامیلتونی ظاهر شده در معادله موج هرمیتی باشد به معادله دیراک دست می یابیم که نسبت به مکان و زمان، مرتبه یک می باشد. معادله دیراک، تابع موجی ذرّات با اسپین نیمه یعنی فرمیون‌ها را (مانند الکترون‌ها) توجیه می‌کند، در حالی که معادله کلاین-گوردون برای ذرّات با اسپین صفر (مانند مزون‌ها) در نظر گرفته می‌شود. دیراک همچنین توانست با معادله‌اش، موجودیت ضدماده به خصوص پوزیترون را سه سال قبل از کشف آنها

توسط آزمایش نشان دهد. معادله دیراک در صورتی که هیچ نیروی خارجی وجود نداشته باشد به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\left(i\gamma^{\mu}\partial_{\mu}-\frac{mc}{\hbar}\right)\psi=0 \qquad (۲-۱)$$

در اینجا $\gamma^{\mu}\partial_{\mu}$ توسط قاعده جمع اینشتین جمع‌بندی می‌شود و γ^{μ}، ماتریس‌های ۴×۴ هستند که به ماتریس‌های دیراک مشهور هستند.

$$\gamma_0=\ \beta=\begin{pmatrix}1 & 0\\ 0 & -1\end{pmatrix};\ \ \gamma_k=\beta\alpha_k=\begin{pmatrix}0 & \sigma_n\\ -\sigma_n & 0\end{pmatrix} \qquad (۳-۱)$$

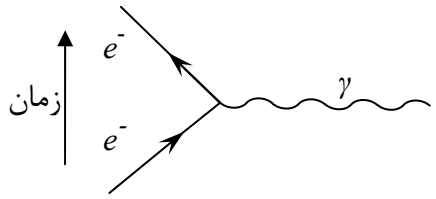
که σ_n ماتریس‌های پائولی است.

۱ – ۳ نظریه *QED*

کوانتوم الکترودینامیک یا *QED* اولین تئوری میدان کوانتومی درستی است که توسعه یافته است. این نام اشاره به این دارد که یک تئوری اندرکنش های کوانتمی، اندرکنش الکترومغناطیس را توصیف می‌کند. تئوری الکترودینامیک کوانتومی بصورت خلاصه، توصیف نیروهای بین ذرات، با مبادله فوتونی آنها می‌باشد. در الکترودینامیک کوانتومی، نیروی الکترومغناطیسی نتیجه تبادل فوتون مجازی است. ما می گوییم «فوتون مجازی» زیرا مستقیم مشاهده نمی‌شوند. فوتون بین دو ذره باردار مبادله می شود. اندازه حرکت حمل شده توسط فوتونها، یک پس زدگی بین الکترون‌ها را موجب می‌شود که بوسیله‌ی آن، یک نیروی دافعه اتفاق می‌افتد. ما چنین فرایندهایی را با دیاگرام‌های فاینمن توصیف می‌کنیم. ثابت جفت شدگی در دیاگرام‌های فاینمن برای فرایند های *QED*، ثابت ساختار ریز است که با α نشان داده می‌شود و مقدار زیر را دارد:

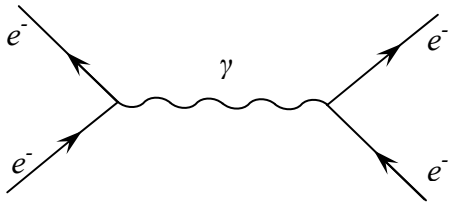
$$\alpha=\frac{e^2}{\hbar c}=\frac{1}{137} \qquad (۴-۱)$$

تمامی پدیده های الکترومغناطیسی سرانجام به مرحله اصلی زیر تبدیل می شوند:



شکل (۱-۲) دیاگرام فاینمن برای یک راس در QED

شکل(۱-۲) بیان می‌کند: ذره‌ی باردار e وارد می‌شود و فوتون را جذب یا دفع می کند و سپس خارج می‌شود. برای توضیح در مورد مراحل پیچیده تر ما دو یا چند گره راس اولیه را به هم وصل می کنیم. به عنوان مثال شکل زیر را در نظر می‌گیریم:



شکل (۱-۳) یک فرآیند اساسی در QED: پس زنی الکترونها

در QED این فرایند پراکندگی مولر نام دارد. اکنون بر این باور هستیم که برهمکنش، بر اثر تبادل یک فوتون است. هر گره در QED معرف یک فاکتور α می‌باشد[۵].

۱ – ۳ – ۱ ناوردائی پیمانه‌ای و QED

ناوردایی پیمانه‌ای ایجاب می‌کند تا لاگرانژینی را بررسی کنیم که شامل سه جمله است: یک جمله، لاگرانژین مربوط به میدان الکترومغناطیسی، یک جمله مربوط به لاگرانژین دیراک، که شامل دو جمله (جمله انرژی جنبشی و جمله جرم) است و جمله سوم مربوط به اندرکنش میدان‌های

الکترومغناطیس و دیراک می‌باشد. قسمت انرژی جنبشی لاگرانژین برای میدان الکترومغناطیس به شکل زیر است:

$$L_{EM} = -\frac{1}{4}F_{\mu\nu}F^{\mu\nu} \quad (۵-۱)$$

از معادله دیراک برای لاگرانژین داریم:

$$L_{Dirac} = i\bar{\psi}\gamma^{\mu}\partial_{\mu}\psi - m\bar{\psi}\psi \quad (۶-۱)$$

لاگرانژین مربوط به اندرکنش یک ذره‌ی باردار با بار q، با میدان الکترومغناطیسی به صورت زیر است:

$$L_{int} = -q\bar{\psi}\gamma^{\mu}\psi A_{\mu} \quad (۷-۱)$$

با قرار دادن تمام این جملات با هم، می‌توانیم لاگرانژین کلی را بسازیم که توصیف کننده‌ی میدان الکترومغناطیسی و اندرکنش آن با میدان دیراک یک ذره، مثل الکترون باشد.

$$L = L_{EM} + L_{Dirac} + L_{int} = -\frac{1}{4}F_{\mu\nu}F^{\mu\nu} + i\bar{\psi}\gamma^{\mu}\partial_{\mu}\psi - m\bar{\psi}\psi - q\bar{\psi}\gamma^{\mu}\psi A_{\mu} \quad (۸-۱)$$

قسمت دیراک لاگرانژین نسبت به تقارن *U(1)* سراسری، ناوردا است. اما نسبت به تقارن *U(1)* موضعی ناوردا نیست. اما ما علاقه‌مند به ناوردایی تحت یک تبدیل موضعی هستیم، تا تئوری میدان کوانتومی، فرضیه نسبیت را برقرار نگه دارد. بطور کلی، مدل استاندارد ذرات بنیادی باید تحت تبدیلات موضعی ناوردا باشد. قسمت انرژی جنبشی نسبت به تقارن موضعی ناوردا نیست:

$$i\bar{\psi}\gamma^{\mu}\partial_{\mu}\psi \rightarrow ie^{-i\theta(x)}\bar{\psi}(x)\gamma^{\mu}\partial_{\mu}\left[e^{i\theta(x)}\psi(x)\right] \neq i\bar{\psi}\gamma^{\mu}\partial_{\mu}\psi \quad (۹-۱)$$

از لحاظ فیزیکی (و از لحاظ تجربی) ما در طبیعت ناوردایی را یافته‌ایم و بنابراین بر ناوردایی نظریه خود پافشاری می‌کنیم. حال بحث این است که چگونه می‌توان ناوردایی را تحت یک تبدیل پیمانه‌ای

موضعی برقرار کرد. یک راه برای این کار، ساختن یک تبدیل از میدان الکترومغناطیسی به شکلی شبیه زیر است:

$$A^{\mu} \to A^{\mu} - \frac{1}{q}\partial^{\mu}\theta \qquad (۱۰-۱)$$

این تبدیل جملاتی از انرژی جنبشی را که از ناوردایی پیمانه‌ای موضعی انحراف دارند، حذف می‌کند و قسمت لاگرانژین اندرکنش به صورت زیر در می‌آید:

$$L_{int} = L_{int} + \bar{\psi}\gamma^{\mu}\psi\partial_{\mu}\theta \qquad (۱۱-۱)$$

ما دو تبدیل دیگر را انجام می دهیم: تبدیل پیمانه‌ای موضعی $U(1)$ بصورت زیر:

$$\psi(x) \to e^{i\theta(x)}\psi(x) \qquad (۱۲-۱)$$

و تبدیل جدیدی که ناوردایی را نگه می‌داشت، رابطه‌ی (۱-۱۰) است.

ما ناوردایی را با تبدیلات بالا حفظ می‌کنیم، البته به شرطی که مشتق هموردا را به صورت زیر معرفی کنیم:

$$D_{\mu} = \partial_{\mu} + iqA_{\mu} \qquad (۱۳-۱)$$

این اصلاح عملگر مشتق، به نام دستور جفت‌شدگی کمینه خوانده می‌شود. از اینرو جمله زیر تحت یک تبدیل $U(1)$ موضعی، ناوردا است:

$$\bar{\psi}\gamma^{\mu}D_{\mu}\psi \qquad (۱۴-۱)$$

با در نظر گرفتن نحوه تبدیل A_{μ} تحت یک تبدیل پیمانه‌ای لورنتز، می‌توان به منشا اصلی مشتق هموردا پی برد. این دلیل علاقه‌ی ما به حفظ ناوردایی تحت تبدیلی به شکل رابطه‌ی (۱-۱۰) است: این تبدیل لاگرانژینی را بدست می‌دهد که تحت یک تبدیل لورنتز پیمانه‌ای ناوردا خواهد بود[۸].

۱ – ۴ تئوری الکتروضعیف

۱ – ۴ – ۱ اسپینورهای راستگرد و چپگرد

ابتدا مفهوم اسپینورهای راستگرد و چپگرد را بررسی می‌کنیم. ما اسپینور دیراک را به صورت دو مولفه در نظر می‌گیریم. مولفه بالا، اسپینور راستگرد و مولفه پایین، اسپینور چپگرد می‌باشد.

$$\psi = \begin{pmatrix} \psi_R \\ \psi_L \end{pmatrix} \qquad (۱۵-۱)$$

هر کدام از مولفه‌های ψ_R و ψ_L، خودشان دو مولفه‌ای هستند. می‌توان مولفه‌های راستگرد و چپگرد میدان دیراک ψ را با استفاده از عملگر مرکب از ماتریس یکانی و ماتریس γ_5 از هم جدا کرد. این عملگر یک ماتریس $4x4$ به صورت زیر است:

$$\gamma_5 = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \end{pmatrix} \qquad (۱۶-۱)$$

مولفه‌های راستگرد و چپگرد ψ را از هم جدا می کنیم:

$$\frac{1}{2}(1-\gamma_5) = \frac{1}{2}\left[\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix}\right] = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \qquad (۱۷-۱)$$

$$\frac{1}{2}(1-\gamma_5)\psi = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}\begin{pmatrix} \psi_R \\ \psi_L \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ \psi_L \end{pmatrix} = \psi_L \qquad (۱۸-۱)$$

$$\frac{1}{2}(1+\gamma_5)\psi = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}\begin{pmatrix} \psi_R \\ \psi_L \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \psi_R \\ 0 \end{pmatrix} = \psi_R \qquad (۱۹-۱)$$

مولفه‌های میدان دیراک به صورت زیر بدست می‌آید:

$$\psi = \begin{pmatrix} \psi_R \\ \psi_L \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ \psi_L \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \psi_R \\ 0 \end{pmatrix} = \psi_L + \psi_R \qquad (۲۰-۱)$$