بسم الله الرحمن الرحيم

دانشکده علوم پایه

پایان نامه دوره کارشناسی ارشد در رشته فیزیک ذرات بنیادی

موضوع:

نقض ناوردایی لورنتس در نوسانات نوترینو

استاد راهنما:

دکتر علی توفیقی

استاد مشاور:

دکتر کوروش نوذری

اساتید داور:

دکتر محسن نژاد اصغر

دکتر محمد مهدوی

نام دانشجو:

معصومه عرب خزائلی

بهمن ماه ۱۳۸۹

سپاسگزاری

بر خود لازم می‌دانم که از زحماتِ بی‌دریغ، تلاش‌هایِ بی‌وقفه و راهنمایی‌هایِ ارزشمندِ استاد گرانقدر **جناب آقای دکتر توفیقی**، در راستای انجام این پروژه در طول یک سال گذشته تشکر و قدردانی نمایم.

از **همسر مهربانم** که در تمام طول تحصیل یاری‌ام نمود و حضورش مایه دلگرمی و مشوق راهم بود تقدیر و تشکر می‌نمایم.

در پایان از **آقای جعفری** به دلیل کمک‌ها و راهنمایی‌های بی‌چشم‌داشتشان که بسیاری از سختی‌ها را برایم آسان‌تر نمود تقدیر و تشکر می‌نمایم.

تقدیم به:

روح پاک و بلند پدر و مادر عزیزم که فقدان کمک‌های آن‌ها را در فراهم آوردن این پایان نامه به تلخی احساس می‌کنم. همانانی که برایم زندگی و انسان بودن را معنا کردند.

روحشان شاد

چکیده:

ناوردایی لورنتس در نظریات ذرات بنیادی در انرژی‌های بالا مانند نظریه ریسمان نقض می‌شود. مسأله‌ی مورد بررسی در این پایان نامه، بررسی مشاهده‌ی این نقض در انرژی‌های پایین می‌باشد که این امر در نوسانات نوترینو محتمل است. مدل‌های مختلفی که برای روابط پاشندگی اصلاح شده (MDR) گزارش شده، مورد تجزیه و تحلیل دقیق قرار گرفته و بر اساس مدل MDR که در پایان نامه پیشنهاد شده، نوسانات نوترینو به تفصیل مورد بررسی قرار گرفته است. در انتهای پایان نامه مدل جدیدی برای MDR پیشنهاد شده که تعمیم موضوع مورد بحث ما با این مدل یک پروژه جدید و قابل توجه خواهد بود.

واژه‌های کلیدی: مدل استاندارد، نوسانات نوترینو، نقض ناوردایی لورنتس ، روابط پاشندگی اصلاح شده

فهرست مطالب

عنوان.....صفحه

مقدمه **۱**

فصل ۱- مدل استاندارد و فیزیک نوترینو **۵**

۱-۱- تاریخچه نوترینو ۵

۱-۲- تولد نوترینو ۹

۱-۳- تفاوت ν_μ از ν_e ۱۲

۱-۴- خواص نوترینوها ۱۳

۱-۵- نوترینوها در چارچوب مدل استاندارد ۱۳

۱-۶- فیزیک نوترینوی دیراک، وایل و ماجورانا ۱۶

۱-۶- ۱- نوترینوی دیراک ۱۹

۱-۶- ۱- ۱- معادله دیراک ۲۰

۱-۶- ۱- ۲- ماتریس‌های γ در نمایش دیراک ۲۱

۱-۶- ۲- نوترینوی وایل ۲۲

۱-۶- ۲-۱- ماتریس‌های γ در نمایش وایل ۲۴

۱-۶- ۳- نوترینوی ماجورانا ۲۴

۱-۶- ۳-۱- ماتریس‌های γ در نمایش ماجورانا ۲۷

۱-۷- تعمیم مدل استاندارد (از نظر جرمی) ۲۸

فصل ۲- نوسانات نوترینو **۳۲**

۲-۱- مقدمه ۳۲

۲-۲- نوسانات نوترینو در خلاء ۳۲

۲-۲-۱- نوسانات دو طعمی در خلاء ۳۲

۲-۲-۲- نوسانات نوترینو در حالت سه طعمی در خلاء ۳۸

۲-۳- نوسانات نوترینو در ماده ۴۴

فصل ۳- انگیزه های نقض ناوردایی لورنتس و مدل SME **۴۷**

۳-۱- تقارن لورنتس ۴۷

۳-۲- دوران، بوست و تبدیلات لورنتس ۴۸

۳-۳- انگیزه‌های نقض ناوردایی لورنتس ۵۰

۳-۴- مدل SME ۵۱

۳-۵- مدل‌های نوترینو برای نقض لورنتس ۵۵

۳-۵-۱- مدل دوچرخه ۵۵

۳-۵-۲- مدل قطاری ۵۷

فهرست مطالب

عنوان..... صفحه
۳-۵-۳- مدل سه چرخه ۵۷

فصل ۴- روابط پاشندگی ۶۱
۴-۱- مقدمه ۶۱
۴-۲- مدل پاشندگی (۱) ۶۲
۴-۳- مدل پاشندگی (۲) ۶۳
۴-۴- مدل پاشندگی (۳) ۶۵
۴-۵- مدل پاشندگی (۴) ۷۸

نتیجه گیری و پیشنهادات ۸۲
منابع و مآخذ ۸۴

فهرست شکل‌ها

عنوان.....صفحه

شکل ۱-۱ : طرح شماتیکی از آشکار سازی نوترینوها ۱۲
شکل ۴-۱: احتمال نوسان استاندارد نوترینوی جوی ۷۳
شکل ۴-۲: احتمال نوسان نوترینوهای جوی برای$n=1$ ۷۵
شکل ۴-۲: احتمال نوسان نوترینوهای جوی برای$n=2$ ۷۶
شکل ۴-۲: احتمال نوسان نوترینوهای جوی برای$n=3$ ۷۷
شکل ۴-۵: احتمال نوسان نوترینوها بر اساس مدل MDR پیشنهادی ۸۱

فهرست جدول‌ها

جدول ۱-۱ : خواص کوارک و لپتون ۶
جدول ۱-۲ : عدد لپتونی لپتون‌ها ۱۵
جدول ۴-۱: جدول تقیدهای مورد انتظار $\Delta\eta$ برای مقادیر گوناگون n با انرژی کم و انرژی زیاد ۷۲
جدول ۴-۲: تقیدهای روی $\Delta\eta$ با نواحی حساس به مقادیر گوناگون n ۷۴
جدول ۴-۳: مقادیر مربوط به $\Delta\eta$ و $\Delta\xi$ برای نوترینوهای جوی ۸۰

لیست علایم و اختصارات

SM	مدل استاندارد (Standard model)
SME	مدل استاندارد بسط یافته (Standard model extension)
MDR	رابطه پاشندگی اصلاح شده (Modified dispersion relation)
GeV	گیگا الکترون ولت (Giga Electron Volt)
EWSB	شکست تقارن الکتروضعیف (Electro Weak Symmetry Breaking)
KeV	کیلو الکترون ولت (Kilo Electron Volt)
LEP	برخورد دهندی بزرگ الکترون-پوزیترون (Large Electron-Positroncolider)

مقدمه

نوترینو به طرزی غیر عادی وارد علم شد. خواص آن عجیب می‌نمود و بعید نیست که عمیق‌ترین اسرار طبیعت به این ذره بستگی داشته باشد. لازم آمد این ذره را کشف کنند تا شالوده‌ای که بنای فیزیک بر آن استوار است فرو نریزد. یک ربع قرن از این ذره به عنوان موجودی واهی در صفحات کتاب‌ها و مجلات یاد می‌کردند. با این‌که این ذره برای توضیح بسیاری از تبدیل‌های قابل مشاهده کاملاً لازم بود خود آن مدت‌ها دست نیافتنی باقی ماند تا این‌که بالاخره در سال ۱۹۵۶ از راه آزمایش کشف شد. تاریخچه دقیق نوترینو و خواص آن به طور مفصل در فصل اول اشاره شده است.

بنا به مدل استاندارد ذرات بنیادین، نوترینوها ذراتی بدون جرم هستند. این در حالی است که مشاهده‌های نوترینوهای خورشیدی و جوی و هم‌چنین نوترینوهای ساطع شده از نیروگاه‌های اتمی نشان می‌دهند که جرم نوترینوها غیر صفر است. نوترینوها بر اساس ویژه حالت‌های طعمی آشکارسازی می‌شوند اما انتشار آن‌ها بر اساس ویژه حالت‌های جرمی است. این موضوع سبب ایجاد مدل استاندارد جدیدی شد که در آن نوترینوها ذراتی دارای جرم هستند. در ادامه فصل اول این موضوع را بررسی نموده‌ایم.

نوسان نوترینوها بر پایه‌ی ویژه حالت‌های جرمی است. به نوعی نوسان نوترینوها می‌تواند ثابت کند که این ذرات دارای جرم هستند. نوسان نوترینوها برای سیستم‌های شامل دو نوترینو و سیستم‌هایی که حاوی سه نوترینو هستند در فصل دوم محاسبه و بررسی شده است.

تقارن لورنتس، ناوردایی قوانین فیزیک از نگاه مشاهده‌گرهای مختلف است و به نوعی تقارن در فضا و زمان را نشان می‌دهد. یکی از نتایج تقارن لورنتس آن است که جهان باید ایزوتروپیک باشد. یعنی به هر سو مشاهده کنیم یا به هر طرف حرکت کنیم همه‌ی اجسام کاملا هم‌سان به نظر می‌رسند و به طور مشابه رفتار می‌کنند. در توصیف ذرات بنیادی و نیروهای میان آن‌ها تقارن لورنتس یک عنصر کلیدی محسوب می‌شود. نسبیت عام انیشتین که تاکنون بهترین توصیف برای گرانش محسوب می‌شود از تقارن لورنتس تبعیت

می‌کند. با این حال آلن کاستلسکی[1] فیزیکدان دانشگاه ایندیانا در سال ۱۹۸۹ طی مقاله‌ای به تقارن لورنتس حمله می‌کند و تلاش جدی وی و محققان دیگر جهت نقض آن تاکنون ادامه دارد. در فصل سوم ابتدا تقارن لورنتس و تبدیلات مشهور لورنتس مطرح شده و انگیزه‌های نقض آن مورد بررسی قرار گرفته‌اند.

نقطه آغازینِ کوشش‌های محققان در این راستا نظریه‌ی نسبیت و مدل استاندارد است که به راه‌های نقض تقارن لورنتس سوق داده شد. نتیجه تلاش محققان ارائه نظریه‌ای است که به مدل استانداردِ بسط یافته یا SME موسوم است. مدل استاندارد بسط یافته با در برداشتن همه‌ی نیروها و ذراتی که تاکنون شناخته شده و هم‌چنین بیان چگونگی تعامل این ذرات با میدان‌های جدید نیرو (که در این مدل معرفی شده) نشان‌دهنده مجموعه‌ای از پدیده‌های ناشناخته‌ای است که می‌توانند یک نقض قابل مشاهده از تقارن لورنتس را ارائه دهند. مدل استاندارد بسط یافته در فصل سوم به طور کامل تشریح شده و تلاش‌های گوناگونی که در قالب ارائه مدل‌های مختلف مانند دوچرخه و قطاری و سه‌چرخه انجام شده مطرح و بررسی شده است.

در بررسی کلی نقض تقارن لورنتس یکی از روش‌های پیشنهادی اصلاح تبدیلات لورنتس است. عملکرد ساده‌ای از این موضوع اصلاح قوانین پاشندگی ذره است.

ایده اصلی به چالش کشیدن رابطه‌ی ($E^2 = P^2 + m^2$) است که این کار با پیشنهادهای متفاوتی که از انتخاب رابطه‌ی پاشندگی جدید (اصلاح شده) صورت می‌پذیرد انجام می‌شود. در ارتباط با انتخاب اصلاح قوانین پاشندگی بحث‌های گوناگونی وجود دارد. بسیاری از این انتخاب‌ها فیزیکی نیستند بالاخص برخی از محاسبات با قوانین پاشندگی اصلاح شده تغییرات آشکاری از خواص را بدست می‌دهند که در اثبات فیزیکی نقض لورنتس ناتوان هستند. در عین حال بعضی از آن‌ها بسیار مناسب هستند به گونه‌ای که به کمک آن‌ها تحلیل‌های دقیقی در مورد نوسانات نوترینو می‌شود. در فصل چهارم مدل‌های پیشنهادی مختلفی را برای رابطه‌ی پاشندگی اصلاح شده بررسی نموده‌ایم. و نهایتاً با معرفی یک مدل جدید نوسانات نوترینوهای جوی

[1]- A. Kostelecky

را مطالعه نموده‌ایم. نتایج حاصل از محاسبات ما با نتایج تجربی که در مقاله‌های متعدد گزارش شده هم‌خوانی دارد.

در پایان پیشنهادهای مختلفی برای پژوهش‌های بعدی معرفی شده که بررسی آن‌ها می‌تواند به نتایج شگرفی منجر شود.

فصل اول

مدل استاندارد و فیزیک نوترینو

فصل ۱- مدل استاندارد و فیزیک نوترینو

۱-۱- تاریخچه نوترینو

با کشف الکترون در سال ۱۸۹۷ توسط تامسون[۱] دستاورد جدید فیزیک امروز با عنوان فیزیک ذرات بنیادی پا به عرصه می‌گذارد. با نابودی اتم به صورت ساختار بنیادی جسم مانع، این پرسش مطرح شد که چه ذرات دیگری می‌توانند در درون اتم باشند. با اثبات مقیاس‌های طول کوچک‌تر و کوچک‌تر که معادل با انرژی‌های بزرگ‌تر و بزرگ‌تر هستند و به کمک شتاب دهنده‌های انرژی بالا ذرات جدید کشف شدند و همه‌ی این‌ها منجر به پذیرش مدلی به نام مدل استاندارد[۲] در فیزیک ذرات شد. جسم مانع شامل شش کوارک و شش لپتون است که در جدول (۱-۱) نشان داده شده است. همه‌ی آن‌ها فرمیون‌هایی با اسپین $\frac{1}{2}$ هستند. برهم‌کنش هر کدام از آن‌ها با یکدیگر با چهار نیرویِ گرانش، الکترومغناطیس و برهم‌کنش‌های قوی و ضعیف است.

۱-Thomson

۲-Standard model

جدول ۱-۱ : الف) خواص کوارک:

ب) خواص لپتون:

طعم (الف)	اسپین	B	I	I_3	S	C	B^*	T	Q [e]
u	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	0	0	0	0	$\frac{2}{3}$
d	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{3}$	$\frac{1}{2}$	$-\frac{1}{2}$	0	0	0	0	$-\frac{1}{3}$
c	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{3}$	0	0	0	1	0	0	$\frac{2}{3}$
s	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{3}$	0	0	-1	0	0	0	$-\frac{1}{3}$
b	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{3}$	0	0	0	0	-1	0	$-\frac{1}{3}$
t	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{3}$	0	0	0	0	0	1	$\frac{2}{3}$

لپتون (ب)	Q [e]	L_e	L_μ	L_τ	L
e^-	-1	1	0	0	1
ν_e	0	1	0	0	1
μ^-	-1	0	1	0	1
ν_μ	0	0	1	0	1
τ^-	-1	0	0	1	1
ν_τ	0	0	0	1	1

در نظریه‌ی کوانتومیِ میدان این نیروها توسط تبادل بوزون‌ها توصیف می‌شوند. در میان فرمیون‌ها نوترینوهای ویژه‌ای وجود دارد که اطلاعات ما در مورد آن‌ها بسیار محدود است. با حضور لپتون‌ها (که در برهم‌کنش‌های قوی شرکت ندارند) و عدم بار الکتریکی (برهم‌کنش‌هایِ الکترومغناطیسی ندارند) و این‌که آن‌ها تنها از طریق برهم‌کنش‌های ضعیف، برهم‌کنش دارند (مگر این‌که جرم غیر صفر داشته باشند)، بررسی‌های تجربی بسیار دشوار است. با این وجود، نوترینوها ابزار مناسبی برای کاوش در فرآیندهای ضعیف هستند و تاریخچه‌یِ فیزیک نوترینو قویاً به برهم‌کنش‌هایِ ضعیف مرتبط است.

سرآغاز تاریخچه‌یِ نوترینو را می‌توان به کشف پرتوزایی[۱] و بررسیِ واپاشیِ β نسبت داد.

تاریخچه‌یِ نوترینو را می‌توان به صورت زیر خلاصه نمود:

۱۸۹۸ کشف پرتو زایی

۱۹۲۶ معمای پرتوزایی β

۱۹۳۰ پیشنهاد نوترینو توسط پائولی[۲]

۱۹۳۳ نام‌گذاری نوترینو توسط فرمی[۳] و ساخت تئوری برهم کنش ضعیف

۱۹۵۶ کشف نوترینوی الکترونی توسط یک آزمایش، ν_e

۱۹۶۲ کشف نوع دیگر نوترینو، ν_μ

۱۹۷۴ کشف جریان‌های خنثی[۴] در سایه‌ی نوترینوها

۱۹۷۷ کشف τ

۱-Radioactivity

۲-Pauli

۳-Fermi

۴-Neutral current

۱۹۹۰ ظهور رمز ماده تاریک

۱۹۹۱ وجود سه نوترینو سبک در آزمایشات LEP[۱]

۱۹۹۴ اولین مشاهدات نوسانات نوترینوها

۱۹۹۵ معمای نوترینوهای خورشیدی توسط گالِکس[۲]

۱۹۹۸ امکان مشاهده نوسانات نوترینوها در ابر-کامیو کاند[۳]

۲۰۰۲ حل معما نوترینوهای خورشیدی توسط SNO[۴]

به طور کلی نوترینو برای نخستین بار در بروکهاوِن[۵] آمریکا، به لطف یک تسریع کننده عظیم پروتونی کشف گردید و دیده شد. بدین ترتیب پائولی در زمان حیات خود این افتخار را یافت که پیش بینی علمی او از طریق مشاهده و تجربه ثابت شده و تحقق یابد. نوترینو از برهم‌کنش قوی می‌گریزد، یعنی این که این ذره متوجه هسته اتم نمی‌شود مگر این که در مدار کامل خود قرار بگیرد. بنابراین چون ماده در قسمت اعظم خود از خلایی درست شده که اطراف هسته اتم را گرفته است، نوترینو قادر است از قطرهای عظیم ماده بدون این که منحرف شود، عبور کند. طبق محاسبه‌ای که در سال ۱۹۶۴ در دانشگاه پرینستون[۶] انجام شد، به این نتیجه رسیدند که نوترینو از یک چگالی ده میلیارد کیلوگرم در سانتیمتر مکعب عبور می‌کند و پس از این چگالی است که در سی سانتی متری متوقف می‌شود. در مقام مقایسه، خورشیدِ ما دارای چگالی ۱.۴ کیلوگرم در سانتی متر مکعب است. بنابراین نوترینو از هر جرم آسمانی حتی میلیون‌ها برابر خورشیدِ ما به آسانی عبور می‌کند.

۱-Large Electron-Positroncolider

۲- Gallex

۳- Super- Kamiokande

۴- Sudbury neutrino observatory

۵-Brookhaven

۶-Princeton

منابع مصنوعیِ نوترینو تسریع کننده‌های پروتونی موسوم به سینکروترون[۱] هستند. مهم‌ترین آنان در مرکز مطالعات هسته‌ای اروپا در ژنو و بعد در شیکاگو و سپس در هامبورگ آلمان قرار دارد. اما منابع طبیعی تولید نوترینو، ستارگان هستند و خورشید ما، مقدار کمی نوترینو تولید می‌کند. در سال ۱۹۶۵، نخستین نوترینوهای طبیعی توسط یک فیزیکدان آمریکایی به نام فردریک رِینز[۲] ، در اعماق ۳۵۰۰ متری زمین در معدن طلای آفریقای جنوبی مشاهده شد. از آن پس نوترینو بارها توسط دستگاه‌های پیشرفته علمی مشاهده می‌گردد.

۱-۲- تولد نوترینو

پس از مشاهده‌یِ خطوط گسسته در واپاشیِ γ و واپاشیِ α هسته‌یِ اتمی، آن‌چه که شگفت‌انگیز به نظر می‌آمد، کشف طیف انرژیِ پیوسته‌یِ الکترون‌های گسیل شده در واپاشیِ β بود [۴۸]. عموماً دو تفسیر وجود دارد:

یکی این‌که الکترون اولیه با توزیع انرژیِ پیوسته فرض می‌گردد و دیگری این‌که فرآیندهای فرعی فرض شود که در گسستگیِ اولیه انرژی الکترون گسترده شده است. به همین منظور لازم است در میانگین انرژی الکترون و یا ماکزیمم آن، اندازه‌گیری کالری متری انجام شود. این موضوع می‌تواند به صورت زیر استنباط شود:

امروزه واپاشیِ β به صورت زیر توصیف می‌شود:

$$M(A,Z) \rightarrow D(A,Z+1) + e^{-} + \overline{\nu_e} \qquad (۱-۱)$$

[۱]-Synchrotron

[۲]-Frederick Reines

که $M(A,Z)$ هسته‌ی مادر و $D(A,Z+1)$ هسته‌ی دختر را توصیف می‌کند. واپاشی واقعی میان نوترون با پروتون، الکترون و پادنوترینو است. برای واپاشی سکون $M(A,Z)$، انرژی الکترون باید میان:

$$E_{min} = m_e \qquad (۲-۱)$$

و با استفاده از پایستگی انرژی:

$$E_{max} = m_M - m_D \qquad (۳-۱)$$

باشد. در رابطه‌ی فوق انرژی جنبشی کوچک هسته‌های دختر صرف‌نظر می‌شود. (T_{D}) و با فرض $m_\nu = 0$ داریم:

$$m_M - m_D = T_D + E_e + E_\nu = 0 \qquad (۴-۱)$$

اگر در حالت نهایی تنها الکترون‌ها حضور داشته باشند، نتیجه‌ی اندازه‌گیری کالری متری همیشه باید به صورت زیر باشد:

$$E_{max} = m_M - m_D \qquad (۵-۱)$$

آزمایش‌های انجام شده با استفاده از واپاشیِ β روی ایزوتوپ رِی[۱] (امروزه آن را به صورت ^{210}Bi می‌شناسند) بوده است [۴۷].

در توجیه مشاهده‌ی طیف انرژی الکترون دو راه حل ممکن به نظر می‌آمد:

اول این‌که قانون پایستگی انرژی در این قبیل فرآیندها تنها به صورت آماری معتبر است (این عقیده‌ی نیلز بوهر[۲] بود) و دوم این‌که ذره‌ی جدید و غیر قابل آشکاری وجود دارد (عقیده فرمی) که حامل انرژی اضافی و اسپین اضافی است. (عقیده پائولی)

۱- RaE

۲-N. Bohr