بسم الله الرحمن الرحيم

٢٠٩٤٤٤ — ١٣٢٢٧٤

دانشکده فیزیک

گروه نظری و اختر فیزیک

پایان نامه

برای دریافت درجه کارشناسی ارشد در رشته فیزیک نظری

عنوان

نوترینوی چهارم و نوسان های آن

اساتید راهنما

دکتر سید کمال الدین سید یعقوبی

دکتر حسین فخری

استاد مشاور

دکتر حسین متولی

۱۳۸۸/۱۲/۲

پژوهشگر

معصومه حدادی هریس

مهر ۱۳۸۸

۱۳۲۲۷۴

تقدیم به

پیشگاه مقدس پیشوای ششم شیعیان

امام جعفرصادق(ع)

تشکر و قدردانی

با حمد و سپاس بیکران الهی که الطاف پیدا و پنهانش در لحظه لحظه زندگی همراه و مددکار من بوده است، از جناب آقای دکتر سید یعقوبی که طی راهنمایی اینجانب در طول مراحل تحقیق و نگارش این رساله متحمل زحمات فراوان شده اند، و همچنین از جناب آقای دکتر فخری و دکتر حسین متولی نهایت تقدیر و تشکر را می نمایم.

جا دارد در اینجا از همسرم و خانواده مهربانم که در این راه پشتوانه واقعی من بودند صمیمانه سپاسگزاری نمایم.

نام خانوادگی: حدادی هریس **نام:** معصومه

عنوان پایان نامه: نوترینوی چهارم و نوسان های آن

اساتید راهنما: دکتر سید کمال الدین سید یعقوبی و دکتر حسین فخری
استاد مشاور: دکتر حسین متولی

مقطع تحصیلی: کارشناسی ارشد **رشته:** فیزیک **گرایش:** نظری **دانشگاه:** تبریز
دانشکده: فیزیک **تاریخ فارغ التحصیلی:** مهر ۸۸ **تعداد صفحات:** ۱۰۱

کلید واژه ها:
نوسان نوترینو، نقض *CP*، نوترینوی خنثی، نقض *CPT*، شعاع بار نوترینو.

چکیده

در فصل اول، ضمن مطالعه ویژگیهای نوترینو، نوسان آنها را در خلا و ماده بررسی می کنیم. در فصل دوم، نتیجه آزمایش آشکارساز جرقه مایع نوترینو(*LSND*) را براساس مدل چهار نوترینویی نمودارهای جرمی (۱+۳) و (۲+۲) بیان می کنیم. از تمام داده های آزمایشهای خورشیدی، اتمسفری، خط پایه کوتاه و *LSND* استفاده می کنیم. چنانچه فقط داده های اتمسفری و خورشیدی ترکیب شوند مدلهای جرمی (۱+۳) ارجحیت خواهند داشت، اما مدلهای (۲+۲) برتری خود را در ترکیب داده های خط پایه کوتاه و اتمسفری نشان می دهند. وقتی تمام داده ها در تجزیه و تحلیل جهانی ترکیب شوند مدل جرمی (۱+۳) نسبت به مورد (۲+۲) برازش بهتری را نشان می دهد. بنابراین، تمام مدلهای جرمی چهار نوترینویی قابل قبول هستند. علاوه بر مدلهای چهار نوترینویی برای نتیجه *LSND*، امکان نقض *CPT* نیز مطرح می شود. چنین نتیجه خواهیم گرفت که نقض *CPT* سازگاری رضایت بخشی به دست نمی دهد و اعداد پاد نوترینوی اتمسفری از اعتبار آن می کاهند. در فصل سوم، ضمن بحث شعاع بار موثر نوترینو ، مجذور شعاع بار موثر نوترینو را در

ادامه چکیده

حد استاتیک انتقال تکانه خطی صفر به دست می آوریم. نشان می دهیم که شعاع بار نوترینو، کمیتی مستقل و مشاهده پذیر است و می تواند از آزمایش پراکندگی فرمیون-نوترینو به دست آید. در انتهای فصل ، مباحث مطرح شده را جمع بندی می کنیم و نتیجه می گیریم که تفسیر قانع کننده ای برای آزمایش *LSND* وجود ندارد و آن به صورت یک معما باقی می ماند. بنابراین، اگر آزمایش مینی بون نتیجه *LSND* را تایید کند، برای حل ابهامات، اطلاعات آزمایشگاهی بیشتر مورد نیاز خواهد بود، مانند اطلاعاتی که توسط آزمایشها با حساسیت بالا برای مولفه خنثی در نوسان نوترینوی خورشیدی و اتمسفری فراهم می شود.

فهرست مطالب

عنوان	صفحه
مقدمه	۱
فصل اول: بررسی منابع (نوسان نوترینو)	
۱-۱ نوترینو چیست؟	۵
۱-۲ تاریخ نوترینو	۶
۱-۲-۱ تولد نوترینو	۸
۱-۲-۲ رقص نوترینو	۱۲
۱-۳ جرم نوترینو	۱۶
۱-۴ اسپین مغناطیسی نوترینو	۱۷
۱-۵ نوترینوی دیراک و مایورانا	۱۸
۱-۶ منابع تولید نوترینو	۱۹
۱-۷ نوسانهای نوترینو	۲۱
۱-۷-۱ نوسان دو طعم نوترینو	۲۳
۱-۷-۲ نوسان سه طعم نوترینو در خلا	۲۸
۱-۷-۳ نوسان نوترینو در ماده	۳۱
۱-۷-۴ تشدید در ماده و اثر میخیف، اسمیرنوف، ولف اشتاین *MSW*	۳۳
۱-۸ سه معمای بزرگ	۳۴
۱-۸-۱ ماده تاریک	۳۵
۱-۸-۲ نوترینوهای خورشیدی گم شده	۳۵
۱-۸-۳ پرتوهای کیهانی با انرژی بسیار بالا	۳۶
۱-۹ نوسانهای نوترینو و نقض T و CP	۳۷

۱-۱۰ تعیین پارامترهای نوسان خورشیدی و اتمسفری ۳۹
۱-۱۱ انبساط جهان ۴۳

فصل دوم: مبانی و روش ها (نوترینوی چهارم)

۲-۱ مقدمه ۴۸
۲-۲ آزمایش *LSND* ۴۹
۲-۳ آزمایش مینی بون (*MB*) ۵۲
۲-۴ تفسیر نوسان چهار نوترینوی *LSND* ۵۳
۲-۵ نوسانهای چهار نوترینو ۵۵
۲-۶ نوسان نوترینوی خورشیدی ۵۷
۲-۷ نوسان نوترینوی اتمسفری ۶۰
۲-۸ اعداد شتابدهنده و راکتور ۶۴
۲-۹ نوسان طیف جرمی (۲+۲) ۶۵
۲-۱۰ مقایسه فرضیه های (۱+۳) و (۲+۲) ۶۷
۲-۱۱ تجزیه و تحلیل جهانی چهار نوترینو ۶۹
۲-۱۲ نقض *CPT*! ۷۳

فصل سوم: بحث و نتیجه گیری

۳-۱ مقدمه ۷۸
۳-۲ استخراج شعاع بار نوترینو ۷۹
۳-۳ آیا *NCR* مشاهده پذیر فیزیکی است؟ ۸۴
۳-۴ استخراج شعاع بار نوترینوی الکترونی توسط آزمایش های پراکندگی ۸۷
۳-۵ نتایج ۹۱
۳-۶ چند نکته پایانی ۹۶
واژه نامه ۹۷
منابع ۱۰۰

مقدمه

در سال ۱۹۳۰ ولفگانگ پائولی[۱] برای حفظ قانون پایستگی انرژی و تکانه خطی در واپاشی بتایی وجود ذره ای به نام نوترینو را پیشنهاد کرد[۱]. نوترینوها ذرات بدون بار هستند و در سه طعم[۲] نوترینوی الکترونی[۳]، نوترینوی میونی[۴] و نوترینوی تائونی[۵] وجود دارند. این ذرات توسط واپاشی ضعیف تولید می شوند. در سال ۱۹۵۷ برونو پونتکوروو[۶] مسئله نوسان نوترینو را برای اولین بار مطرح کرد[۲]. وقتی نوترینوها از یک طعم به طعم دیگر نوسان می کنند، پایستگی عدد لپتونی نقض می شود. نوسان نوترینوها ایجاب می کند که آنها جرم داشته باشند.

آزمایشهای انجام شده برای نوترینوی خورشیدی مانند *SNO*[۷] [۳] نشان داد که تعداد نوترینوی الکترونی آشکارسازی شده کمتر از مقدار پیش بینی شده توسط نظریه واکنشهای هسته ای خورشید است. این کاهش نوترینوها براساس نوسان نوترینوهای الکترونی،به طعم دیگر نوترینوها تفسیر شد. علاوه بر آزمایشهای نوترینوی خورشیدی، در آزمایشهای نوترینوی اتمسفری، مانند سوپرکامیوکند[۸][۴] نیز کاهش نوترینوهای میونی در آشکارساز مشاهده شد. این کاهش، توسط نوسان نوترینوهای میونی به نوع دیگر نوترینوها بیان شد، که آشکارساز سوپرکامیوکند نمی توانست نوع دیگر نوترینوها را آشکارسازی نماید. آزمایش نوترینوی خورشیدی با اختلاف مجذور جرمی $\Delta m^2_{SOL} \sim ۷\times۱۰^{-۵} ev^2$ و آزمایش نوترینوی اتمسفری با $\Delta m^2_{ATM} \sim ۲,۵\times۱۰^{-۳} ev^2$ انجام می گیرد.

علاوه بر آزمایشهای خورشیدی و اتمسفری، در سال ۱۹۹۳ آزمایش *LSND*[۹] [۵] در لوس-

---

[۱] Wolfgang Pauli
[۲] Super- Flavour
[۳] Electron neutrino
[۴] Muon neutrino
[۵] Tau neutrino
[۶] Brono Pontecorvo
[۷] Sudbury Neutrino observatory
[۸] Kamiokande
[۹] Liquid Scintillation Neutrino Detector

آلاموس نوسان $\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_\mu$ را گزارش کرد. این آزمایش با اختلاف مجذور جرمی $\Delta m^2_{LSND} \sim 1ev^2$ انجام شد که متفاوت از Δm^2_{SOL} و Δm^2_{ATM} است. اگر بخواهیم تمام این نتایج را برحسب نوسان نوترینوها تفسیر کنیم، حداقل به چهار نوترینو نیاز داریم تا بتوانیم سه اختلاف مجذور جرمی متفاوت به دست آوریم. نوترینوی چهارم، نوترینوی خنثی (بدون برهمکنش ضعیف) با جرمی با برد ev در نظر گرفته می شود تا پهنای واپاشی نامرئی Z را که در *LEP*[1] به دقت اندازه گیری شده است تحت تاثیر قرار ندهد. آزمایش *LEP* در سرن نشان می دهد که تنها سه طعم نوترینوی سبک وجود دارد.

علاوه بر مدل چهار نوترینویی برای تفسیر سیگنال مشاهده شده در آزمایش *LSND*، امکان نقض *CPT*[۶]، نقض عدد لپتونی در واپاشی میونی[۷]، واپاشی نوترینوی سنگین خنثی[۸]، نوسانهای پنج نوترینویی[۹]، نیز مطرح شده است.

در فصل اول این پایان نامه ضمن مرور ویژگیهای نوترینو، نوسان نوترینوها را بررسی می کنیم و امکان نقض *CP* را در نظر می گیریم. همچنین پارامترهای نوسان نوترینو را به دست می آوریم.

در فصل دوم، پس از مطالعه آزمایش *LSND*، مدلهای چهار نوترینویی (۱+۳) و (۲+۲) را معرفی کرده و سازگاری این مدلها را با اعداد آزمایشهای *LSND*، اتمسفری، خورشیدی و سایر آزمایشهای خط پایه کوتاه بررسی می کنیم. همچنین امکان نقض *CPT* را برای سیگنال مشاهده شده در آزمایش *LSND* در نظر می گیریم.

در فصل سوم بحثی پیرامون شعاع بار موثر نوترینو خواهیم داشت و مجذور شعاع بار نوترینو

---

[1] Large Electron-Positron

را در حد استاتیک ویژه به دست می آوریم. بالاخره، مباحث مطرح شده در فصلهای قبلی را جمع بندی کرده و به این نتیجه می رسیم که برای تفسیر رضایت بخش سیگنال *LSND* راه تحقیق همچنان باز است.

فصل اول

بررسی منابع
(نوسان نوترینو)

۱-۱ نوترینو چیست ؟

نوترینو یکی از ذره های اساسی است که جهان مادی را می سازد. نوترینوها شبیه الکترونهای آشنا هستند اما یک تفاوت جدی دارند: نوترینوها بار الکتریکی حمل نمی کنند. به دلیل اینکه نوترینوها از لحاظ الکتریکی خنثی هستند، تحت تاثیر نیروی الکترو مغناطیسی قرار ندارند و فقط نیروی ضعیف زیر اتمی با برد کوتاهتر نسبت به الکترومغناطیسی بر آنها تاثیر دارند. بنابراین نوترینوها می توانند از میان فاصله های بزرگ در ماده عبور کنند، بدون اینکه با ماده برهمکنش انجام دهند.

در صورت قائل شدن جرم برای نوترینوها آنها می توانند با ذرات سنگین دیگر برهمکنش گرانشی داشته باشند. اما نیروی گرانش در مقایسه با نیروی های شناخته شده دیگر در طبیعت ضعیف است. پس، از بر همکنش گرانشی نوترینو صرف نظر می شود. در نتیجه ارتباط نوترینوها تنها از طریق برهمکنش ضعیف است و به همین دلیل آنها از میان زمین بدون هیچ انحرافی عبور می کنند.

تعداد نوترینوهای شناخته شده سه نوع است: نوترینوی الکترونی، نوترینوی میونی و نوترینوی تائونی. آزمایش تعیین کننده ای که وجود نوترینو از نوع دیگر را تایید کند وجود ندارد. هرکدام از نوع ها یا " طعم های " نوترینو با یک ذره باردار رابطه دارد، بدین ترتیب که نوترینوی الکترونی به الکترون و دو نوترینوی دیگر به ذرات سنگین تر از الکترون یعنی میون و تائون وابسته هستند.

نوترینوها توسط برهمکنش های ضعیف (واپاشی پایون ها و میون ها) ایجاد شده، و از طریق

واپاشی وارونی بتایی و میونی آشکارسازی می شوند. نوترینو ویژگی قابل توجهی دارد: اسپین آن همواره مخالف جهت سرعتش است. به عبارت دیگر، نوترینو دارای هلیسیته[۱] (مولفه اسپین در جهت سرعت) چپ است. پاد نوترینو همیشه هلیسیته راست دارد (اسپین آن در جهت سرعت است). نوترینو همیشه چپ دست و پادنوترینو راست دست است. سطح مقطع نوترینو خیلی کوچک است: فقط یک در تریلیم پرتو نوترینوهای تابشی بر مرکز زمین جذب می شوند. این ویژگی باعث می شود نوترینوها به دشواری پیدا شوند. در حدود ۶۰ میلیارد نوترینوی خورشیدی از میان هر سانتی مترمربع سطح زمین در هر ثانیه عبور می کنند. چون آهنگ برهمکنش نوترینوها خیلی کند است، نوترینوهای تولید شده در هسته خورشید بیرون از لایه های خارجی خورشید واقع شده و فضا را احاطه می کنند. در سال ۱۹۶۸ هنگام آشکارسازی نوترینوی الکترونی گسیل شده توسط خورشید، دانشمندان دریافتند تعداد نوترینوهایی که از نظریه واکنشهای هسته ای در خورشید به دست می آید، به نصف کاهش یافته است. این پدیده به مسئله نوترینوی خورشیدی معروف شد[۳]. سالهای بعد آزمایشها نشان دادند که خورشید تعداد نوترینوی پیش بینی شده توسط نظریه را تولید می کند، اما بعضی از این نوترینوها از هسته خورشید تا آشکارسازهای روی زمین به طعم های دیگر نوسان می کنند.

۱-۲ تاریخ نوترینو

موضوع واپاشی بتایی قبل از پیدایش نوترینو مطرح شد. برای حل این مسئله رادیواکتیویته[۲] کشف شد. هنری بکرل[۳] در سال ۱۸۹۶ پیر و ماری کوری[۴] پیشگامان این امر بودند.

---

[۱] Helicity
[۲] Radioactivity
[۳] Henri Becquerel
[۴] Pierre and Marie Curie

هنری بکرل پرتوهای قوی تابشی از سنگ اورانیوم را کشف کرد، پیر و ماری کوری رادیـوم[۱] را که نسبت به اورانیوم فعال تر بود جداسازی کردند[۱۰].

در سال۱۸۹۹، رادرفورد[۲] نشان داد دو نوع پرتو وجود دارد، و آنها را آلفا و بتا نامید.

در سال ۱۹۰۰ ویلارد[۳] برای نوع سوم پرتوهـا آزمایـشی را ترتیـب داد کـه از رادیـوم گـسیل می شدند، او این پرتو را گاما نامید. در سال۱۹۰۲ پیر و ماری کوری نشان دادند پرتو بتا چیزی جز الکترون نیست.

بعدا سادی[٤] و رادرفورد نشان دادند پرتو آلفا، بتا و گاما انواع متفاوتی از رادیواکتیو هستند. در سال ۱۹۰٤ رادرفورد نشان داد پرتو آلفا از اتم هـای هلیـوم سـاخته مـی شـود. بـالاخره سـه نـوع رادیواکتیویته به طور محدودی اثبات شد:

- رادیواکتیویته الفا: هسته های هلیوم٤ (دو پروتون و دو نوترون) از هسته های رادیواکتیویته خارج می شوند
- رادیواکتیویته بتا: الکترونی که از هسته های رادیواکتیو گسیل می شود.
- رادیواکتیویته گاما: فوتون با انرژی بـزرگ (Mev) از هـسته هـای رادیواکتیویتـه گـسیل می شود

در پرتو بتا (الکترون) فقط ذره با انرژی ثابت گسیل می شود. اما پـس از مطالعـات متفـاوت از پرتو بتا در سال ۱۹۱٤ به وسیله ی میتنر،[٥] اوتو هان[٦] ، ویلسون،[۷] بایر[۸] و چادویک[۹] نشان دادند که طیف انرژی الکترون پیوسته است.

---

[۱] Radium
[۲] Rutherford
[۳] Villard
[٤] Soddy and Marie Curie
[٥] Meitner
[٦] Otto Hahn
[۷] Wilson
[۸] Baeyer
[۹] Chadwick

۱-۲-۱ تولد نوترینو

۱۵ میلیارد سال قبل بلافاصله پس از تولد جهان، نوترینوها متولد شدند. به طور نظری، تعداد نوترینوها در حال حاضر زیاد است و زمینه[۱] پرتو کیهانی را تشکیل داده اند. دمای آن ۱۰۹ درجه کلوین (۲۷۱/۲ C-) است. چگالی نوترینوها در جهان ۱۱۰ بر سانتی متر مکعب می باشد.

نظریه وجود نوترینو به سال ۱۹۳۰ برمی گردد. در آن زمان ولفگانگ پائولی، برای حفظ اصل پایستگی انرژی و تکانه خطی در واپاشی بتای هسته ای وجود ذره ای خنثی به نام نوترینو را در کارگاه فیزیکدانان در تابینگن[۲] پیشنهاد داد[۱].

در فوریه ۱۹۳۳ چادویک نوترون را کشف کرد، اما این ذره سنگین قابل مقایسه با ذره پیشنهادی فرضی (نوترینو) نبود[۱۱].

در اکتبر۱۹۳۳ در کنفرانس سولوی[۳] در بروکسل[۴]، پائولی درباره ذره پیشنهادی اش چنین گفت: *"جرم آن نمی تواند خیلی بیش تر از جرم الکترون باشد، برای تشخیص آن از نوترونهای سنگین، فرمی[۵] پیشنهاد داد آن را نوترینو بنامیم. می تواند بجا باشد که جرم نوترینو را صفر بگیریم. به نظر می رسد نوترینو دارای اسپین $\frac{1}{2}$ است... ما چیزی درباره برهمکنش های نوترینو با ذرات دیگر ماده و با فوتونها نمی دانیم."*

در سال۱۹۳۳ پرین[۶] نشان داد، جرم نوترینو خیلی کمتر از جرم الکترون است. در همان سال اندرسون[۷]، پوزیترون[۸] را به عنوان اولین پاد ذره کشف کرد[۱۲].

---

[۱] Backgroun
[۲] Tubinge
[۳] Solvay
[۴] Bruxelles
[۵] Fermi
[۶] Perrin
[۷] Anderson
[۸] Positron

در پایان سال ۱۹۳۳ فردریک جولیوت[۱] و کوری، رادیواکتیویته مثبت بتا (بـه جـای الکتـرون، پوزیترون گسیل می شود) را کشف کردند. انریکو فرمی فرضیه نوترینو را در نظر گرفت و نظریـه اش را بر پایه واپاشی بتایی (برهمکنش ضعیف) بنا نهاد.

جستجوی نوترینو شروع شد، در سـال ۱۹۳٤ بتـه[۲] و پیرلـز[۳] نـشان دادنـد کـه سـطح مقطـع (احتمال بر همکنش) بین نوترینو و ماده بی نهایت کوچک است : بیلیونها بار کوچکتر از الکترون. این ذره به طور ضعیفی با ماده برهمکنش می کند، پس می تواند از تمام نقـاط زمـین بـدون هـیچ انحرافی عبور کند.

در پایان دهه چهل، فیزیکدانان سعی مـی کردنـد، پـس زنـی هـسته در طـول واپاشـی بتـا را اندازه گیری کنند. همه اندازه گیری ها با فرضیه هایی کـه تنهـا یـک نوترینـو بـا الکتـرون گـسیل می شود، قابل مقایسه بود. اما هیچ مشاهده مستقیمی از نوترینو امکان پذیر نبود. چون پـیش بینـی می شد احتمال بر همکنش برای هرآزمایش خیلی ضعیف باشد، بـه منبـع مولـد نوترینـوی انبـوه، همچنین به آشکارساز عظیم و حساس نیاز بود.

در سال ۱۹۳۹ الوارز[٤] نشان داد که تریتیوم[٥] ، رادیواکتیو است. امروزه از واپاشی بتایی تریتیوم برای به دست آوردن بهترین حد برای جرم نوترینو استفاده می شود[۱۳].

در سال ۱۹٤٥ اولین بمب اتمی منفجرشد. علی رغم ترس و وحشت، فیزیکدانان را بـه منبـع قدرتمندی از نوترینوها ترغیب کرد. رینز[٦] ، که در لوس آلاموس[۷] کار می کـرد، در سـال۱۹۵۱ بـا فرمی درباره پروژه اش صحبت کرد تا یک آشکارساز نوترینو نزدیک محل انفجار اتمی قرار دهند.

---

[۱] Frederic Joliot
[۲] Bethe
[۳] Peierls
[٤] Alvarez
[٥] Tritium
[٦] Reines
[۷] Los Alamos

در سال۱۹۵۲ او کلایدکوان[۱] را ملاقات کرد و بالاخره آنها توافق کردند از منبع "غیر تسلیحاتی" نوترینوها استفاده کنند: دستگاه هسته ای هانفورد[۲] ، واشینگتن[۳] . آشکارساز خیلی سریع ساخته شد. آزمایش آنها در فوریه ۱۹۵۳ انجام شد، و نتایج آن در تابستان ۱۹۵۳ منتشر شد.

اما سیگنال آزمایش متقاعد کننده نبود. آنها دوباره آزمایششان را در سال ۱۹۵٦ با دقت بیشتری نزدیک دستگاه هسته ای ساوانا رایور[٤] ، جنوب کارولینا انجام دادند[١٤]. پیشرفت هایی برای کاهش سیگنالهای زمینه انجام شد. نوترینو در آشکارساز، در بالای زمینه، بمانند سیگنالهای پرتو کیهانی ، برچسب زده شد. نزدیک همان دستگاه هسته ای، فیزیکدانان دیگر، مانند آلوارس و دیویس[٥] ، تلاش کردند تا نوترینوها را با استفاده از محلول کلرید کربنات آشکار سازی کنند. آنها تنها وجود پاد نوترینو را گزارش دادند. در آزمایش رینز و کوان از٤٠٠ لیتر مخلوط آب و کلرید کادمیم به عنوان هدف استفاده شده بود. پاد نوترینوی خارج شده از راکتور هسته ای با پروتون ماده هدف برهمکنش داده و پوزیترون و نوترون تولید می کند. پوزیترون تولید شده با الکترونی که ماده را احاطه کرده است نابود می شود و دو فوتون به طور همزمان و یک نوترون خارج می شود، و سرانجام توسط هسته کادمیم جذب می شود. گسیل فوتونها ۱۵ میکروثانیه پس از نابودی پوزیترون اتفاق می افتد. همه فوتونها آشکارسازی شده و برهمکنش های نوترینو در۱۵ میکرو ثانیه انجام می گیرد، بدین ترتیب اولین آشکارسازی نوترینو انجام شد[۱۵].

نوترینوی (یا به طور دقیق تر پاد نوترینوی) خارج شده از راکتور هسته ای، نوترینوی نوع الکترونی (ν_e) است، چون در واپاشی بتایی همراه با الکترون گسیل می شود. آیا ν_e از نوترینوی میونی (ν_μ) که در پرتوهای کیهانی مشاهده می شود متفاوت است ؟

---

[۱] Clyde Cowan
[۲] Hanford
[۳] Washington
[٤] Savannah River
[٥] Davis

در سال ۱۹۶۰ لی[۱] و یانگ[۲] متقاعد شدند که دلیل مشاهده نشدن واکنشی مانند $\mu^- \to e^- + \gamma$ به خاطر وجود دو نوع نوترینو است.

در ابتدای سال ۱۹۶۲ شتاب دهنده بروکهون[۳] چند صد میلیون نوترینو در ساعت را از میان ۴۰ برهمکنش با آشکارساز گزارش داد[۱۶]. در۶ مورد از ۴۰ برهمکنش، ذرات خارج شده الکترون تشخیص داده شدند و انتظار می رفت که تقریبا زمینه را تشکیل دهند. در۳۴ مورد باقیمانده از ۴۰ برهمکنش، ذرات خارج شده میون تشخیص داده شدند. نتیجه اینکه ν_μ ذره ای متفاوت است، چون با نوترینوهایی که از واپاشی الکترونی تولید می شود رفتار مشابهی ندارند. اگر ν_μ و ν_e نوترینوی مستقل و یکسان باشند، آشکارساز نوترینوها تعداد یکسانی از الکترونها و میونها را به دست می دهد.

در دهه های شصت و هفتاد از الکترون و نوترینوی با انرژی بالا برای بررسی ترکیبات هسته ها (پروتون و نوترون) استفاده می شد. در سال ۱۹۶۸ اولین آزمایش آشکارسازی نوترینوی الکترونی توسط دیویس انجام شد. این آزمایش، کمتر از نیمی از نوترینوهای انتظاری را گزارش داد. این اصل به مسئله نوترینوی خورشیدی معروف شد. به زودی چنین پیشنهاد شد که شاید نوترینوهای الکترونی گم شده به نوع دیگر تبدیل شده اند[۳].

در سرن[۴] در طول دهه هفتاد، به طور ویژه درسالهای ۱۹۷۵و۱۹۷۶ آزمایشهای *CDHS* [۱۷]، چارم[۵] ۱[۱۸] وچارم ۲[۱۹] سپس *BEBC* [۲۰] انجام شد، و نتایج قابل توجهی درباره ساختار کوارکی هسته ها ارائه داد.

---

[۱] Lee
[۲] Yang
[۳] Brookhaven
[۴] CERN
[۵] CHARM

در سال ۱۹۷۰ گلاشو[۱] ، ایلیوپولوس[۲] و مایانا[۳] ، فرضیه وجود دومین خانواده کوارکها را مطرح کردند. در پایان ۱۹۷٤ فرضیاتشان به وسیله دو آزمایش در آمریکا تایید شد. کشف دومین خانواده نوترینوها و دومین خانواده کوارکها پل خوبی بین خانواده لپتونها و کوراکها ترسیم کرد.

در سال ۱۹۷۷ تیم لدرمن[٤] در مرکز شتاب دهنده خطی استانفورد[٥] ، کوارک b را کشف کرد[۱]. در همان زمان، مارتین پرل[٦] ذره تائون را کشف کرد[۱]. تائون سومین خانواده لپتونها است و نسبت به الکترون و میون سنگین تر می باشد. در واپاشی ذره تائون، پایستگی انرژی و تکانه خطی نقض شد و برای حفظ این پایستگی، مطابق پیشنهاد پائولی در سال ۱۹۳۰ وجود نوترینوی تائونی پیش بینی شد. نوترینوی تائونی ν_τوجود دارد: فیزیکدانان می توانستند آن را احساس کنند اما نمی توانستند آن را ببینند!

۱-۲-۲ رقص نوترینو

در دهه هشتاد، برخی فیزیکدانان با توجه به مسئله نوترینوی خورشیدی و امکان تبدیل نوترینوها به یکدیگر بر روی جرم غیر صفر نوترینو توافق کردند[۳]. مکانیک کوانتومی نوسانهای نوترینو را مجاز دانست: ν_eدر طول مسیر در جهان به نوترینوی میونی ν_μتبدیل می شود و برعکس.

در سالهای بعدی این نتایج به وسیله آزمایش های دیگر تصحیح شد. تیم LLI[۷] در گرنوبل[۸] نوسان نوترینو را توسط راکتور هسته ای بررسی کرد. آزمایشهای متعدد دیگری نیز نوسان

---

[۱] Glashow
[۲] Illiopoulos
[۳] Maiani
[٤] Lederman
[٥] Stanford Linear Accelerator Center (SLAC)
[٦] Martin Perl
[۷] Laue Langevin Institute
[۸] Grenoble