



نوترینوی اسرارآمیز

دان لین کوین - تیمی سلی
ترجمه احمد توحیدی

اشاره

می‌کنیم، اما در واقع نمی‌دانیم آن‌ها اصولاً با چه روشی می‌توانند هویتشان را تغییر دهند، درست مثل اینکه یک گربه خانگی پیش از تبدیل دوباره به گربه خانگی به شیر و سپس به ببر تبدیل شود. نوترینوها پژوهشگران را برای مدتی طولانی شگفت‌زده و آن‌ها را نسبت به قانون پایستگی انرژی در قلمروهای میکروسکوپی بدگمان کردند. نوترینوها به آن‌ها نشان دادند که بعضی از ذرات تقارن آینه‌ای ندارند، که این درست یکی از برخی رفتار شگفت‌انگیز نوترینوهاست. نوترینوها همچنان به گیج کردن فیزیکدان‌ها ادامه می‌دهند، به‌طوری که بررسی ویژگی آن‌ها زمینه‌پرشوری برای پژوهش‌های جاری است.

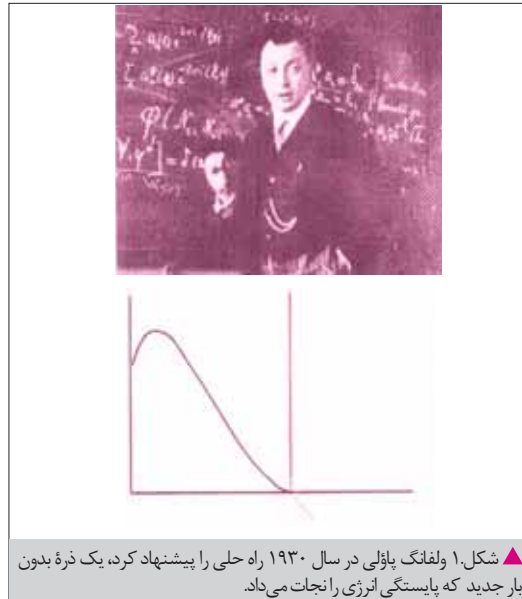
تولد پرتوزای نوترینو

داستان ما از سال‌های ۱۹۱۵ شروع می‌شود وقتی که پرتوزایی موضوع داغ فیزیک و شیمی بود. در سال ۱۹۱۴، سرچادویک^۱ واپاشی تریتم به هلیوم و یک الکترون را بررسی می‌کرد ($T \rightarrow He + e$). برهم‌کنشی که در آن یک نوترون به پروتون تبدیل و یک الکترون گسیل می‌شود واپاشی بتا نام‌گذاری شده بود. این وجه تسمیه تجلی ناآگاهی آزمایشگران اولیه درباره آن است که فکر می‌کردند ذره تولید شده در واپاشی فقط یک الکترون است. در حالی که پژوهش‌های بعدی وضعیت را به وضوح روشن کرد، هنوز هم نام «واپاشی بتا» برای توصیف یک فرایند هسته‌ای به کار می‌رود که در آن یک الکترون گسیل می‌شود. چادویک و همکارانش تکانه الکترون خروجی از واپاشی بتا را اندازه‌گیری کردند. اگر یک ذره در حال سکون به

دیدیم که جایزه نوبل فیزیک امسال برای کشف نوسان‌های نوترینو به دانشمندان فیزیک اعطا شد. تا کنون هیچ یک از ذرات بنیادی به اندازه نوترینو جایزه نوبل^۱ فیزیک را نصیب دانشمندان نکرده است. تلاش در جهت شناخت این ذره و رفتار آن بسیاری از اسرار عالم را آشکار ساخته است و شاید بعد از این نیز آشکار سازد. این مقاله مروری کلی بر چگونگی کشف این ذره و مراحل تکاملی شناخت آن است که مطالب را به زبان ساده و روشن بیان می‌کند. مطالعه آن می‌تواند اطلاعات کلی و سودمندی را در مورد نوترینو در اختیار خوانندگان قرار دهد.

کلیدواژه‌ها: نوترینو، نیروی ضعیف، نوسان نوترینو، واپاشی بتا.

در مدت یک سده فیزیکدان‌ها با کار و تلاش، برای توضیح رفتار همه ذرات بنیادی، نیروهایی که با آن‌ها سروکار دارند و برهم‌کنش‌شان در مقیاس کوچک مدلی را اصلاح و ارائه کرده‌اند. این اثر برجسته علمی مدل استاندارد نام دارد. در حالی که این نظریه فوق‌العاده توانمند است، با این حال دست کم می‌دانیم برخی ذرات رفتارهایی از خود به نمایش می‌گذارند که خارج از محدوده این مدل قرار دارد و تاکنون بدون توضیح باقی مانده است. این ذرات که نوترینو نام دارد اشباح اسرارآمیز جهان کوانتومی‌اند. آن‌ها فقط با نیروی ضعیف برهم‌کنش می‌کنند، در واقع میلیاردها از این ذرات در هر ثانیه و از بدن شما می‌گذرند بدون آنکه آشکارسازی شوند. در حالی که ما رفتار شبیه گونه ویژه نوترینوها را درک



▲ شکل ۱. ولفانگ پاؤلی در سال ۱۹۳۰ راه حلی را پیشنهاد کرد، یک ذرهٔ بدون بار جدید که پایستگی انرژی را نجات می‌داد.

دو ذره دختر واپاشیده شود، انتظار داریم طبق قانون‌های پایستگی، تکانه و انرژی جنبشی ذرات تولید شده کاملاً معین باشند. آزمایش چادویک به حدّ کافی دقیق بود به‌طوری که او توانست انرژی الکترون گسیل شده را به دقت اندازه بگیرد. نتیجه به‌دست آمده گیج‌کننده بود. به‌نظر می‌رسید در آزمایش‌های واپاشی بتازا، قانون پایستگی انرژی و تکانه نقض می‌شوند.

دلیل منطقی برای آن به این قرار است. پیش از واپاشی، اتم تریتیم در حال سکون و دارای انرژی E است، که از معادلهٔ $E=mc^2$ اینشتین به‌دست می‌آید. به‌دلیل پایستگی انرژی این مقدار باید در حالت نهایی ذرات که در آن زمان به‌نظر می‌رسید هلیوم و الکترون باشد موجود بود. چون مجموع جرم‌های هلیوم-۳ و الکترون کمتر از جرم تریتیم است، پس انرژی باقیمانده باید به انرژی جنبشی ذرات نهایی تبدیل شده باشد. افزون بر این، چون تکانه هم مانند انرژی پایسته است، پس اتم هلیوم و الکترون باید تکانه‌های مساوی و در جهت‌های مخالف داشته باشند. ترکیب این واقعیت‌ها ایجاب می‌کند که طیف انرژی الکترون گسیل شده باید یک مقدار معین و برابر $18/59 \text{ keV}$ باشد (شکل ۱). ولی در عوض، چادویک مشاهده کرد که الکترون گسیل شده دارای انرژی‌های گوناگون است و مقدار معینی را که انتظار می‌رفت ندارد. آیا این موضوع حاکی از آن بود که در قلمرو کوانتومی پایستگی انرژی برقرار نیست؟ به مدت ۱۶ سال پس از اندازه‌گیری چادویک، چشم‌انداز شکست پایستگی انرژی در فرایندهای هسته‌ای، جامعه فیزیک را به خود مشغول کرده بود. با توجه به پایستگی انرژی فراگیر مشاهده شده این احتمال با ناخشنودی گسترده‌ای روبه‌رو گردید.

در دسامبر سال ۱۹۳۰، در یک همایش مربوط به پرتوزایی در مونیخ راه‌حل نوآورانه‌ای ارائه شد. ولفانگ پاؤلی^۴ راه‌حلی

را پیشنهاد کرد که آن را «داروی لاعلاجی» نامید. پاؤلی پیشنهاد کرد اگر ذره مشاهده نشده دیگری در واپاشی بتازا گسیل شود که جرمی تقریباً برابر یا کمتر از جرم الکترون داشته باشد، قانون پایستگی انرژی برقرار خواهد بود. او این ذره را نوترون نامید. با معرفی ذرهٔ سوم در حالت نهایی واپاشی، انرژی می‌توانست به شیوه‌های گوناگونی بین سه ذره تقسیم شود. بنابراین در حالت نهایی انرژی ذرات باید انتظار یک توزیع پیوسته را داشته باشیم که به زاویه خروجی هر ذره بستگی دارد.

در سال ۱۹۹۳، انریکوفرمی استفاده از ذره پاؤلی یک مدل بسیار کلیشه‌ای از واپاشی بتازا آن ذره را نوترینو «به زبان ایتالیایی به معنای ذره کوچک خنثی بدون بار» نام‌گذاری کرد. مدل فرمی آهنگ‌های واپاشی مشاهده شده در واپاشی‌های بتازا و موئون را توضیح می‌داد. نظریهٔ فرمی تا انرژی‌های حدود 100 GeV یعنی میلیون‌ها برابر انرژی مربوط به واپاشی بتازای تریتیم معتبر است. در این نقطه آهنگ‌های پیش‌بینی شده به‌طور غیرواقعی زیاد می‌شود. در این نقطه 100 GeV ، نظریه نقض می‌شود و به مدل واقع‌گرایانه‌تری نیاز داریم که اکنون آن را نظریهٔ الکترو ضعیف می‌نامیم. نظریه جدیدی که برهم‌کنش‌های نوترینو را توصیف می‌کند.



▲ شکل ۲. ولفانگ پاؤلی با یک تلگرام از کشف ذره‌ای که پیش‌بینی کرده بود مطلع شد.

به‌دام انداختن نوترینو

در سال ۱۹۵۶ در راکتور هسته‌ای ساوانا ریسور^۶ در کالیفرنیا جنوبی، کلاید کووان^۷ و فردریک رینس^۸ با اشتیاق چشم به‌راه تپ‌های نوری بودند که حاکی از برهم‌کنش یک نوترینو در آشکارسازهایشان بود. نوترینوها یا به بیان دقیق‌تر پادنوترینوها ($\bar{\nu}$)، در نیروگاه هسته‌ای در فرایند شکافت بر اثر واپاشی نوترون تولید می‌شوند $n^+ = p^+ + e^- + \bar{\nu}$. شار پادنوترینوها در آشکارساز $10^{13} / \text{cm}^2 \cdot \text{s}$ برآورد شده بود.

کووان و رینس آزمایش خود را با توجه به افسانهٔ آلمانی «پروژه روح پر سروصدا»^۹ نام نهادند. چون آن‌ها برای تأیید تجربی ذرهٔ گریزپا و شبیح‌گونه پاؤلی بودند. پروژه شامل دو مخزن آب مخلوط با کلرید کادمیم بود که بین دو لایه سوزن

اگر یک
ذرهٔ درحال
سکون به دو
ذرهٔ دختر
واپاشیده
شود، انتظار
داریم طبق
قانون‌های
پایستگی،
تکانه و انرژی
جنبشی ذرات
تولید شده
کاملاً معین
باشند.

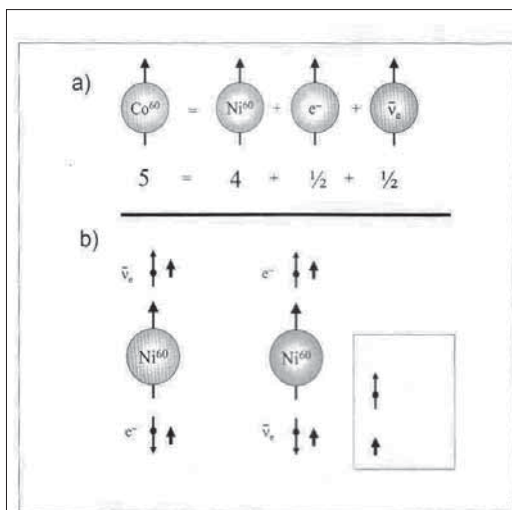
مایع قرار گرفته بودند. پادنوترینوها هنگام ورود به مخزن‌ها می‌توانستند به یک پروتون برخورد کرده و آن را به یک نوترون و یک پوزیترون تبدیل کنند. این واکنش عکس واکنش بتازاست پس آن‌ها چشم به راه واکنش $\bar{\nu} + p^+ \rightarrow n^+ + e^+$ بودند. با ورود پوزیترون به آشکارسازشان، آن‌ها در پی درخشش نوری بودند که بر اثر نابودی سریع پوزیترون با الکترون و تولید پرتوهای گاما در مخزن ظاهر می‌شد و اندکی پس از آن فوران پرتوی گاما با دیگری بر اثر جذب نوترون توسط کادمیم به‌وجود می‌آمد.

وقتی که کووان و رینس نقطه‌های روشن الکترونیکی روی صفحه آشکارسازهای فوتونی خود را دیدند که دلالت آشکارسازی پادنوترینو داشت، فوراً به پاؤلی تلگراف زدند (شکل ۲). در سال ۱۹۳۵، رینس تنها عضو در قید حیات زوج شکار کننده شبح، جایزه نوبل را به خاطر آشکارسازی پادنوترینو دریافت کرد.

نوترینوها چپ دست‌های ضعیف هستند

برای توضیح اینکه چرا نوترینوها تقارن بازتاب ندارند باید مفهوم اسپین را معرفی کنیم، اسپین در واقع یادآور گوی چرخانی است که تکانه زاویه‌ای دارد، در فیزیک ذرات مقدار کوانتیده تکانه زاویه‌ای ذاتی یک ذره است.

بدیهی است که فرایندهای فیزیکی که در آینه ظاهر می‌شوند (یک تبدیل پاریته) به همان اندازه فرایندهای غیرآینه‌ای رخ می‌دهند. برای مثال، الکترون‌ها با احتمال یکسان بدون توجه به چپگردی یا راستگردی اسپین‌شان پراکنده می‌شوند



▲ (شکل ۳، الف) در آزمایش وو، کبالت-۶۰ به نیکل-۶۰، یک الکترون و یک پادنوترینو واپاشیده می‌شود. هسته کبالت دارای اسپین ۵ و نیکل دارای اسپین ۴ است. بنابراین یک اسپین باقیمانده به دولپتون منتقل می‌شود که باید در یک جهت قرار داشته باشند.
(ب) هر دو واپاشی که در شکل نشان داده شده‌اند الزاماً دارای اسپین‌های در یک جهت هستند. فرایند سمت راست هرگز روی نخواهد داد، که دال بر آن است که نوترینوها همواره چپگردند و پادنوترینوها همیشه راستگردند. این آزمایش‌ها نشان دادند فرایندهایی که در آن‌ها نیروی ضعیف دخیل است دارای تقارن پاریته نیستند.

در سال ۱۹۵۶، چی‌ان شوینگ‌وو^{۱۰} به‌طور تجربی نشان داد که نوترینوها، و فرایندهای شامل نوترینوها (به‌ویژه نیروی هسته‌ای ضعیف) جهت چپ را بر راست ترجیح می‌دهند. او در آزمایش خود، نمونه‌ای از اتم‌های کبالت-۶۰ را در میدان مغناطیسی قرار داد، در نتیجه اسپین اتم‌ها در جهت میدان مغناطیسی قرار گرفتند. سپس منتظر ماند تا کبالت-۶۰ پرتوزا با گسیل یک الکترون و پادنوترینو به نیکل-۶۰ واپاشیده شود ($Co^{60} \rightarrow Ni^{60} + e^- + \bar{\nu}$) (شکل ۳-الف). خوش‌باورانه انتظار داریم که الکترون‌ها با احتمال یکسان موازی یا پادموازی اسپین هسته گسیل شوند. با این همه، او دریافت که الکترون همواره در خلاف جهت اسپین هسته گسیل می‌شود و هرگز در جهت آن گسیل نمی‌شود (شکل ۳-ب).

بنابراین نیروی مسئول واپاشی بتازا با ذرات چپگرد یا راستگرد به‌طور متقارن برخورد نمی‌کند. در واقع، در آزمایش او، پاریته در بالاترین حد نقص و به این نتیجه‌گیری مهم‌تر منجر شد که همه نوترینوها چپگرد و همه پادنوترینوها راستگردند.

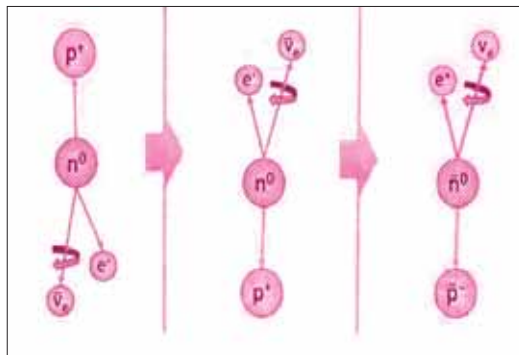
یافته‌های وو به این برداشت رایج ما از نیروی ضعیف انجامید، که در آن فقط ذرات چپگرد و یا ذرات راستگرد شرکت دارند (شکل ۴-). این نتیجه به‌طور جبران‌ناپذیری تصور پاریته (P) به‌عنوان یک تقارن بنیادی را در هم شکست که شکست تقارن ماده و پادماده (موسوم به C برای همیوگی بار) را نیز به‌دنبال داشت. اما نظریه پردازان به سرعت تقارن (CP) را جایگزین آن کردند. در هر فرایند مشاهده شده، اگر پاریته ذره را عوض کنید [یعنی (Z, Y, X) به (-Z, -Y, -X) تبدیل شود] و همه ذرات را با پادذراتشان جایگزین کنیم (و برعکس)، پیکربندی جدید هم مطابق شکل ۵- مشاهده خواهد شد.

شگفتی‌های ناشی از نسل دوم: نوترینوهای موئونی

در سال ۱۹۶۲، در آزمایشگاه ملی بروکهایون^{۱۱} در نیویورک، لئون لدرمن^{۱۲}، ملوین شوارتز و جک^{۱۳} اشتینبرگر^{۱۴} آزمایشی را برای جست‌وجوی نوع دیگر نوترینو انجام دادند. که مبتنی بر این فرض بود که هرگز دیده نشده است که موئون‌ها به الکترون و فوتون واپاشیده شوند. اگر نکته منحصربه‌فردی درباره موئون‌ها در مقایسه با الکترون‌ها وجود نداشت این واپاشی باید روی می‌داد. اما چون این اتفاق روی نمی‌دهد (و چون ارتباطی بین نوترینوها و الکترون‌ها وجود دارد)، بنابراین منطقی به‌نظر می‌رسید که بپذیریم احتمالاً دو نوع نوترینو با طعم‌های مختلف یکی همراه با الکترون و دیگری همراه با موئون وجود دارند.

اولین باریکه نوترینوی مصنوعی با استفاده از سینکروتون با گرادیان متناوب بروکهایون ساخته شد. بدین منظور پروتون‌ها به یک هدف فلزی کوبیده می‌شدند. حاصل این برخورد خروج مخلوطی از ذرات بود. با متمرکز شدن این ذرات باریکه‌ای از پیون‌های باردار به دست می‌آمد. به پیون‌ها فرصت داده می‌شد تا به موئون‌ها و نوترینوها واپاشیده شوند.

موئون‌های محصول واپاشی جدا می‌شدند و می‌گذاشتند تا



▲ شکل ۵- برای هر برهم کنش ضعیف معین، طبیعت تصویر آینه‌ای (با پارینه معکوس) مجاز نیست. با این همه، اگر پادماده جایگزین ماده شود و بر عکس تصویر با پارینه معکوس را طبیعت مجاز می‌شمرد.



▲ شکل ۴- چی ان شونینگ وو در سال ۱۹۵۶ کشف کرد که نوترینوها چپگردند.

برای نگه داری ۳۸۰۰۰ لیتر پر کلرین اتیلن (مایع تمیزکننده در خشک‌شویی‌ها) ساختند. آن‌ها امیدوار بودند با قرار دادن آشکارسازشان در ژرفای زمین مانع نفوذ نوترینوهای پرتوهای کیهانی شوند زیرا فقط نوترینوهای خورشیدی می‌توانند آزادانه از زمین عبور کنند. اگر یک نوترینوی خورشیدی به داخل آشکارساز وارد می‌شد در واکنش $\nu + \text{Cl} \rightarrow \text{Ar} + e$ انجام می‌شد.

گاز هلیوم به‌طور مرتب در پرکلر اتیلن به‌صورت حباب در می‌آمد و اتم‌های آرگون تولید شده را جذب می‌کرد، سپس اتم‌های آرگون شمرده می‌شدند. مخزن حاوی حدود ۱۰۳۰ اتم بود و در طول یک دوره متوالی یک هفته یا بیشتر انتظار می‌رفت که در حدود ۱۰ اتم آرگون تولید شود. اما تعداد اتم‌هایی که آشکارسازی شدند در حدود یک‌سوم آهنگ تعدادی بود که باکال پیش‌بینی کرده بود. کمبود تعداد اتم‌ها را می‌توان به سادگی به علت برداشت ناکافی کارایی آشکارساز دانست. اما دیویس توانسته بود با دقت مقدار تنظیم شده‌ای از آرگون را که به مخزن وارد شده بود اندازه گرفته و نشان داد که او آنچه را انتظار داشت به دست آورده است. آزمایش بی‌عیب و نقص به‌نظر می‌رسید. پژوهشگران به پیش‌بینی‌های باکال توجه کردند که در آن شار نوترینو به توان بیست و پنجم دمای مرکز خورشید بستگی داشت.

با چنین حساسیتی کاملاً امکان داشت که کوچک‌ترین عدم دقت در آزمایش تقویت شده و به اختلاف مشاهده شده منجر گردد. اما هم‌چون آزمایش باکال، محاسبات و اندازه‌گیری‌های اخترشناسی پشتیبان آن هم بی‌عیب و نقص به‌نظر می‌رسیدند. بی‌شک معمایی وجود داشت که باید حل می‌شد. آزمایش‌های بعدی اختلاف به‌دست آمده را تأیید کرد. شار نوترینوهای الکترونی در زمین $\frac{1}{3}$ مقدار پیش‌بینی شده بود.

در حالی که «مسئله نوترینوی خورشیدی» چنانکه نامیده می‌شد می‌توانست ناشی از شناخت نادرست تولید نوترینوهای خورشیدی باشد، اختلاف مشابهی در نوترینوهای جوی زمین (که از پروتون و نوترون تشکیل شده است) مشاهده می‌شود. بر خوردهای پرنرژی پروتون با پروتون یا پروتون با نوترون‌های جو زمین پیون‌های باردار تولید می‌کند. همان‌طور که در توضیح آزمایش لدرمن و دیگران گفته شد پیون‌ها به موئون و نوترینوهای

واپاشیده و با استفاده از حفاظ متوقف شوند، در نتیجه باریکه‌ای از نوترینوها تولید می‌شد که عمدتاً حاصل برهم‌کنش‌های موئونی بودند.

پژوهشگران در پی برهم‌کنش‌های تولید شده ناشی از باریکه نوترینوها بودند. اگر فقط یک نوع نوترینو وجود داشت این برهم‌کنش‌ها باید الکترون و موئون‌های مساوی تولید می‌کردند. اما، آنچه مشاهده شد این بود که فقط موئون‌ها تولید شده بودند.

با توجه به اینکه نوترینوها از برهم‌کنش موئون‌ها تولید شده بودند، پس آن‌ها «هویت موئونی» خود را حفظ کرده بودند. این آزمایش نشان داد که دست‌کم دو نوع نوترینو وجود دارد، یکی الکترون گونه (ν_e) و دیگری موئون گونه (ν_μ). لدرمن، شوارتز و واشیتنبرگر برای کشف نوترینوی موئونی مشترکاً برنده جایزه نوبل سال ۱۹۸۸ شدند.

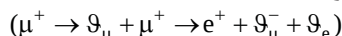
خورشید و نوترینوهای گمشده

در سال‌های ۱۹۶۰، جان باکال^{۱۵} تلاش می‌کرد تا فرایندهای هسته‌ای را که در همجوشی خورشیدی روی می‌دهند محاسبه کند. او پیش‌بینی کرد که در واکنش (ذرات دیگر $H^+ + H^+ \rightarrow H^2e + \nu + \text{تعداد نوترینو}$) $\nu \times 10^{10} \text{ cm}^2$ در روی زمین تولید می‌کند- یا تقریباً در هر ثانیه ۱۰۰ میلیارد نوترینو از ناخن شست شما می‌گذرند- او امیدوار بود که این تعداد نوترینو برای رقابت با نوترینوهای بررسی شده از شکافت هسته‌ای پروژه روح پر سروصدا کافی باشد. او با آزمایشگری به نام ری دیویس^{۱۶}، گروهی را تشکیل داد که تصمیم داشت نوترینوهای را که از خورشید سرچشمه می‌گرفتند آشکارسازی کند. آن‌ها به طرح آزمایشی جدیدی نیاز داشتند تا بتوانند نوترینوها را آشکارسازی کنند. در حالی که در پروژه روح پر سروصدا پادنوترینوهای الکترونی بررسی می‌شدند.

ری دیویس و همکارانش تقریباً در حدود ۲ کیلومتری زیرزمین در معدن طلای هوم استیک^{۱۷} در داکوتای جنوبی مخزنی را

هر ثانیه
۱۰۰ میلیارد
نوترینو از
ناخن شست
شما می‌گذرند
با کال امیدوار
بود که این
تعداد نوترینو
برای رقابت با
نوترینوهای
بررسی شده
از شکافت
هسته‌ای
پروژه روح
پرسروصدا
کافی باشد

موثونی واپاشیده می‌شوند.



در مورد نوترینوهای جوی پیش‌بینی شده بود که برای هر نوترینوی الکترونی باید دو عدد نوترینوی مویونی تولید شود. اما در آزمایش مشابهی مانند آزمایش هوم استیک نسبت یک به یک مشاهده شد که به‌طور آشکاری با آنچه پیش‌بینی شده بود ناسازگاری داشت. اکنون فیزیک‌دان‌ها باید راز دو معمای نوترینو را بگشایند و مردم شگفت‌زده خواهند شد وقتی که معلوم شود هر دو خاستگاه مشترکی دارند. برونو پونته کروو^{۱۸} فیزیک‌دان ایتالیایی فرض کرد که شاید هویت‌های نوترینو ثابت نباشد و دو نوع نوترینو بتوانند از یک نوع به نوع دیگر نوسان کنند.

نوترینوها و عدم توازن ماده- پادماده

احتمالاً نوترینوها سررنخی برای حل یکی از بنیادی‌ترین پرسش‌ها در اختیار می‌گذارند: چگونه است که عالم فقط از ماده ساخته شده است نه پادماده؟ بنا بر فرضیه مهیابگ در آغاز فقط انرژی بود، سپس انرژی به دو بخش مساوی ماده و پادماده تبدیل شد. اگر این درست باشد، پس پادماده تولید شده کجا رفته است؟ چون نیروی ضعیف تفاوت نوترینوهای ماده و نوترینوهای پادماده از یکدیگر را تشخیص می‌دهد، پس شاید بررسی‌های مربوط به نوترینو بتواند چگونگی رجحان ذرات نسبت به پاد ذرات را در طول تحول عالم توضیح دهد. اولین گام در تعیین اینکه آیا نوترینو می‌تواند مسئولیت کامل یا بخشی از عدم توازن ماده- پادماده در عالم مرا بر عهده بگیرد در نوسان‌های نوترینوست. آزمایش‌های جاری با یکدیگر رقابت می‌کنند تا ببینند پارامترهای نوسان نوترینوها به شرایط اولیه آزمایش- مثلاً اینکه آیا با باریکه نوترینو شروع کرده‌ایم یا با باریکه پادنوترینو- بستگی دارد. در ژاپن، آزمایش توکایی تاکامیوکا^{۱۹} (T2K) با استفاده از آب آشکارساز کامیوکا (ک-آبر) برای آشکارسازی نوترینوهایی استفاده می‌کند که در فاصله ۳۰۰ کیلومتری در توکایی تولید شده‌اند در ایالات متحده آمریکا، آزمایشگاه ملی فرمی آزمایش (NOVA) را انجام می‌دهد. NOVA از باریکه نوترینویی استفاده می‌کند که در آزمایشگاه فرمی تولید می‌شود و فاصله ۸۰۰ کیلومتری در زمین را طی می‌کند تا به معدن اشریور^{۲۰} در مینه‌سوتا برسد. در سرن، یک باریکه نوترینو از سوئیس به آزمایشگاه گراند ساسو^{۲۱} در ایتالیا (CNGS) در فاصله ۷۳۲ کیلومتری شلیک می‌شود. رقابت کاملاً شدید است.

نسل دوم نوترینو و خورشید

در سال ۱۹۸۳، یک گروه علمی مستقر در دانشگاه توکیو آزمایش واپاشی نوکلئون کامیوکانده^{۲۲} را ساخت تا در جست‌وجوی واپاشی پروتون به‌عنوان آزمونی برای اعتبار مدل استاندارد از آن استفاده کند. اگرچه کامیوکانده برای بررسی این واکنش ساخته شده بود، اما این واپاشی مشاهده نشد. بلکه در عوض با گذاشتن محدودیت‌های موجود برای واپاشی پروتون به اعتبار مدل استاندارد کمک کرد (با این نتیجه که نیمه عمر پروتون بیشتر از

^{۳۱} ۱۰ سال اندازه‌گیری کرد که این مقدار ۲۱ مرتبه بزرگی از سن عالم بیشتر است! نیمه عمر پروتون پس از آنکه در سال ۱۹۹۶ کامیوکانده بزرگ‌تر شد و به آب کامیوکانده^{۲۳} ارتقا یافت به ^{۳۲} ۱۰ سال افزایش پیدا کرد (جدیدترین محدودیت‌ها از حدود ^{۳۴} ۱۰ بزرگ‌تر است).

اگرچه آب K- واپاشی پروتون را پیدا نکرد، اما معلوم شده که عالی‌ترین آشکارساز نوترینوهای خورشیدی و جوی است. تحلیل‌های اولیه آب- K بررسی‌های قبلی را که ابهامی در تعداد (جمعیت) نوترینوها تشخیص داده بودند تأیید کرد. اما، آشکار ساز آب- K دارای یک امتیاز بود. این آشکارساز می‌توانست جهتی را که نوترینوها از آن سرچشمه می‌گیرند تعیین کند. با مشاهده نوترینوهای ناشی از پرتوهای کیهانی که به بالای جو برخورد می‌کنند (در فاصله حدود ۲۰ کیلومتر) و نوترینوهایی که از طرف دیگر زمین (در فاصله حدود ۱۳۰ کیلومتر) سرچشمه می‌گیرند، پژوهشگران توانستند تعیین کنند که این کسری برای نوترینوهای تولید شده در فاصله نزدیک کمتر از آن‌هایی است که در فاصله دورتر قرار داشتند. بنابراین در سال ۱۹۹۸ اعلام شد که این اندازه‌گیری‌ها اولین دلیل قطعی نوسان نوترینوهاست، اگرچه اندازه‌گیری‌های دیگری لازم بود تا این تصویر را کامل کند.

پاسخ‌های خورشیدی ناشی از نسل سوم:

نوترینوهای تاو^{۲۴}

در سال ۲۰۰۰، نوترینوی با طعم تاو در آزمایش دونات^{۲۴} آزمایشگاه فرمی کشف شد (لپتون تاو سومین عضو از خانواده لپتون‌های باردار شامل الکترون و موئون است). معلوم شد که این کشف آخرین قطعه پازل نوترینوهای خورشیدی است. رصدخانه نوترینو در سادبری^{۲۵}، اونتاریو (SNO) توانست هر سه نوع نوترینوی خورشیدی (الکترون، موئون و تاو) را آشکارسازی کند. در سال ۲۰۰۱، آزمایش SNO اعلام کرد که مجموع شارهای سه طعم نوترینوهای خورشیدی (الکترون، موئون و تاو) کاملاً با محاسبات همجوشی خورشیدی باکال سازگارند. به‌طور خلاصه، باکال شار نوترینوهای خورشیدی را به درستی محاسبه کرده بود، اما نوترینوها هنگام مسافرت به طرف زمین هویت خود را تغییر داده بودند.

نظریه نوسان نوترینوها در پیوست توضیح داده شده است، به هر حال این نظریه اصولاً می‌گوید تعداد نوترینوهای با هویت خاص (مثلاً، نوترینوهای نوع موئون) می‌توانند به انواع دیگر تبدیل شوند. پارامترهایی که میزان اختلاط نوترینوها در یک آشکار دور دست را معین می‌کنند به فاصله بین چشمه تا آشکارساز، انرژی اولیه نوترینوها و اختلاف میان جرم انواع آن‌ها بستگی دارد. به‌طوری که در پیوست گفته خواهد شد، طعم‌های انواع نوترینوهای مشاهده شده جرم معین منحصر به فردی ندارند، به علاوه، آنچه در نوسان نوترینوها اهمیت دارد جرم آن‌ها نیست بلکه اختلاف جرمشان است. بنابراین آب- SNO CK و آزمایش‌های مبتنی بر شتاب‌دهنده‌های بعدی صرفاً اختلاف جرم نوترینوها را اعلام کردند. مقادیر مطلق آن‌ها هنوز معلوم نیست.

نظریه نوسان
نوترینوها
در پیوست
توضیح داده
شده است، به
هر حال این
نظریه اصولاً
می‌گوید تعداد
نوترینوهای
با هویت
خاص (مثلاً،
نوترینوهای
نوع موئون)
می‌توانند به
انواع دیگر
تبدیل شوند

معمای بارز

اگرچه تاریخچه پژوهش درباره نوترینو سرشار از اکتشافات شگفت‌انگیز است، اما هنوز این ذره اسرارآمیز همه اسرار خود را آشکار نکرده است. این رازها گستره وسیع شامل از جرم واقعی نوترینوها تا اختلاف ماده و پادماده انواع نوترینوها و اینکه آیا با شناخت سه طعم نوترینوها ماجرا پایان می‌یابد در برمی‌گیرد.

جرم نوترینوها چقدر است؟

طعم نوترینوها از این رو نوسان می‌کند که آن‌ها جرم دارند. همان‌طور که در پیوست توضیح داده خواهد شد، یک نوترینو با طعم خاص (یعنی، الکترون، موئون و تاؤ) دارای احتمال داشتن یکی از سه حالت طعم با جرم‌های متفاوت ν_e ، ν_μ ، ν_τ است. یک نوترینو با حالت جرم خاص دارای احتمال داشتن یکی از سه حالت طعم مختلف ν_e ، ν_μ ، ν_τ است. نوسان در طعم به جرم یک نوع نوترینوی خاص بستگی ندارد، بلکه تابع مجذور اختلاف جرم طعم‌هاست. آزمایش‌ها تعیین کرده‌اند که نوترینوهای ν_e ، ν_μ جرم‌های مشابهی دارند که ν_τ ذره سنگین‌تر است. اما نمی‌دانیم که ν_τ جرم بسیار بالاتری دارد «سلسله مراتب معمولی» یا جرم بسیار پایین‌تر «سلسله مراتب وارون». همچنین میانگین جرم نوترینو معلوم نیست، اما آزمایش گسترده گوناگونی از بررسی‌های اخترشناسی گرفته تا آزمایش واپاشی بتا، حدود آن‌ها را معین کرده‌اند. رصدهای کیهان‌شناختی با استفاده از زمینه ریز موج کیهانی، داده‌های آب‌نواخت و جنگل آلفای لیمان (جذب هیدروژن در طیف‌های مربوط به کهکشان‌های دوردست) پیش‌بینی می‌کنند که جرم نوترینوها باید کمتر از 0.3 eV باشد. همچنین دیگر رصدهای کیهان‌شناختی مربوط به عدسی گرانشی (خمیده شدن مسیر نور گسیل شده از اجسام بسیار دور دست ناشی از تاب برداشتن فضا زمان ناشی از اجرام بسیار سنگین زمینه نیز جرم نوترینو را به کمتر از $1/5 \text{ eV}$ محدود می‌کند).

آزمایش نوترینوی کارلسروهه (KATRIN) در آلمان داده‌هایی را گردآوری می‌کند تا اندازه‌گیری بسیار دقیقی از طیف انرژی الکترون ناشی از واپاشی بتا را انجام دهد. با تعیین بیشینه انرژی خروجی ممکن الکترون‌ها، دانشمندان کمینه انرژی ممکن پادنوترینوی خروجی را به دست خواهند آورد. گمان می‌رود که کمینه انرژی متشکل از همه انرژی جرم، و انرژی جنبشی صفر است، بنابراین اندازه‌گیری پادنوترینو را ممکن می‌سازد.

- مایورانا یا دیراک

یک ذره مایورانا^{۳۱} ذره‌ای است که نوع ماده و پادماده آن یکسان باشد. ذراتی که ذره و پادذره آن‌ها قابل تشخیص باشند ذره دیراک^{۳۲} نامیده می‌شوند. برای مثال، پادفوتون همان فوتون است، بنابراین فوتون یک ذره مایورانا است. اگر نوترینو ذره مایورانا باشد، نوترینو اولین ذره بنیادی فرمیونی دارای این ویژگی است.

برای آزمودن اینکه آیا نوترینوها ذرات مایورانا هستند آزمایش‌های بسیاری انجام می‌شود. آن‌ها در پی فرایندی هستند که واپاشی دو بتایی بدون نوترینو نام دارد. در این فرایند، نوترینوهای خروجی از هر واپاشی بتا بلافاصله یکدیگر را نابود می‌کنند. آشکارسازهای این آزمایش‌ها در پی یافتن دو الکترون تولید شده بدون نوترینو هستند، هنوز چنین فرایندی مشاهده نشده است. آزمایش‌های جاری در این مورد عبارتند از:

MAJORANA, XMASS, EXO, KAMLAND- ZONE

افزون بر این، آزمایش‌هایی که در برخورددهنده بزرگ هادرونی انجام می‌شود هم این هدف را دنبال می‌کنند. تعیین اینکه نوترینوها مایورانا هستند یا دیراک به ما کمک خواهد کرد که ببینیم آیا جرم نوترینوها از سلسله مراتب معمول پیروی می‌کند یا وارون. همچنین اگر معلوم شود که نوترینوها مایورانا هستند، آزمایش‌های واپاشی دو بتایی بدون نوترینو می‌توانند جرم نوترینو را برآورد کنند. برای مثال، آزمایش EXO-۲۰۰ نشان داد که اگر نوترینو مایورانا باشد، میانگین جرم آن کمتر از $380-140 \text{ meV}$ است.

آیا نوترینوهای بیشتری وجود دارد؟

محور اسپین نوترینوهایی که مثلاً در آزمایش وو مشاهده می‌کنیم در خلاف جهت تکانه آن‌ها است (دستوارگی چپگرد)، در حالی که محور اسپین پادنوترینوها همیشه در جهت تکانه آن‌ها است (دستوارگی راستگرد). تنها راهی که یک ذره می‌تواند همیشه دستوارگی معین داشته باشد آن است که با سرعت نور حرکت کند. اگر ذره‌ای با سرعت کمتر از سرعت نور حرکت کند، می‌توان چارچوب مرجعی انتخاب کرد که در آن ذره در جهت مخالف حرکت کند، اما جهت اسپین آن تغییر نکند. با توجه به نتایج نوسان آزمایش آب کامیوکانده در سال ۱۹۹۸ می‌دانیم که نوترینوها جرم اندکی دارند. بنابراین نوترینوهایی که به‌طور تجربی یافته‌ایم در چارچوب مدل استاندارد فیزیک ذرات بنیادی قرار نمی‌گیرند، زیرا در این مدل نوترینوها باید بدون جرم و همیشه چپگرد و پاد نوترینوها همیشه راستگرد باشند.

چون معلوم شده است که نوترینو دارای جرم است، این پرسش باقی می‌ماند «که نوترینوهای راستگرد یا پاد نوترینوهای چپگرد کجا هستند؟» مدل استاندارد طوری گسترش یافت که به این پرسش پاسخ دهد. نوترینوهای جدیدی در نظر گرفته شدند که سنگین‌ترند و از طریق نیروی گرانی برهم‌کنش می‌کنند نه نیروی ضعیف. این نوترینو را «نوترینوی سترون» می‌نامند. این نوترینوها بخشی از یک «ساز و کار نوسانی/الکلنگی» توصیف می‌شوند که بین جرم نوترینوهای طعم‌دار شناخته شده چه آن‌ها نوترینوهای سترون نظری باشند یا نوترینوهای راستگرد سنگین ارتباط برقرار می‌کند. در مدل الکلنگی با سبک‌تر شدن نوترینوهای طعم‌دار نوترینوهای سترون یا نوترینوهای راستگرد سنگین‌تر می‌شوند. همچنین امکان دارد چند نوترینوی سترون با جرم‌های مختلف وجود داشته باشند.

رصدهای
کیهان‌شناختی
با استفاده از
زمینه ریز موج
کیهانی،
داده‌های
آب‌نواخت و
جنگل آلفای
لیمان (جذب
هیدروژن در
طیف‌های
مربوط به
کهکشان‌های
دوردست)
پیش‌بینی
می‌کنند که جرم
نوترینوها باید
کمتر از 0.3 eV
باشد

(~۱۳۰۰ km) برنامه ریزی کرده است، که اکنون DVNE نامیده می شود (شکل ۶).

هر دو برنامه از فناوری آشکارسازی آرگون مایع استفاده خواهند کرد که اکنون MicroBooNE آن را آزمایش می کند. آزمایش های با خط مبنای کوتاه و خط مبنای بلند مکمل یکدیگرند زیرا برنامه های آن ها نوسان های باریکه نوترینو را در انرژی های مختلف و در فاصله های متفاوت اندازه می گیرند. هر دو آزمایش برای شناخت چگونگی رفتار این ذره عجیب ضروری هستند

از آزمایش های فعلی و آنچه در آینده انجام خواهد گرفت، انتظار شگفتی هایی را داریم و با کشف جزئیات جدیدی از گریز پاترین ذره شاهد پدیدار شدن چشم اندازی تاریخی خواهیم بود. امیدواریم که جرم نوترینو ها را به زودی از آزمایش KATRIN و بررسی های اخترشناختی به دست آوریم. از آزمایش های واپاشی دو بتایی بدون نوترینو معلوم خواهد شد که آیا نوترینوها پادذره خودشان هستند.

شاید در MicroBooNE نوترینوهای جدیدی کشف کنیم. سرانجام، شاید از آزمایش های NOVA, T, K, CNGS چیزهایی درباره عدم توازن ماده و پادماده در عالم یاد بگیریم. مؤسسه های پژوهشی در سراسر جهان اسرار نوترینو را دنبال می کنند. آزمایشگاه فرمی بزرگ ترین مؤسسه فیزیک ذرات آمریکا انتخاب شده است تا در دو دهه آینده عنوان مهم ترین برنامه پژوهش خود را روی بررسی های نوترینو متمرکز کند. مدت هاست که نوترینوها پژوهشگران را شگفت زده کرده اند و به احتمال زیاد شگفتی ها تداوم خواهند داشت و ما از آن ها چیزهای قابل توجه و غیرمنتظره ای درباره عالم خواهیم آموخت.

پیوست الف: جرم های نوترینو و نوسان های طعم

نظریه نوسان نوترینو پیوند محکمی با نظریه مکانیک کوانتومی دارد، و می توان آن را مثال عملی و ساده از چگونگی استفاده از معادله شرودینگر وابسته به زمان دانست. درست مانند بسیاری از مسائل کوانتومی به مؤلفه های غیرمنطقی برخورد می کنیم، برای مثال، این واقعیت که نوترینوها می توانند طعم خود را تغییر دهند،

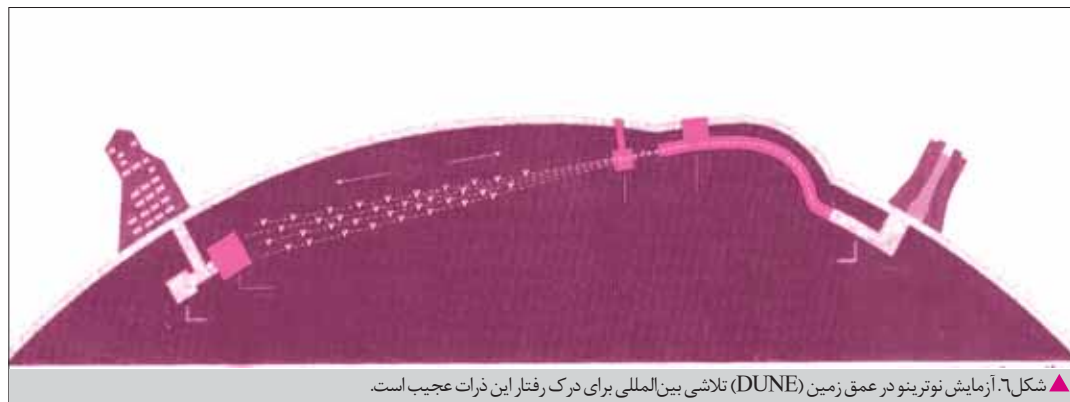
نوترینوهای سترون می توانند نتایج غیرمنتظره آزمایش ها را توضیح دهند. در آشکار ساز MiniBooNE که یک آشکار ساز روغنی چرنکوف در آزمایشگاه شتاب دهنده ملی فرمی در ایالات متحده آمریکا است افزایش غیرمنتظره ای در تعداد نوترینوهای الکترونی نوسانی در باریکه نوترینوی موثونی دیده شد. شاید تولید نوترینوهای سترون سنگین بتواند توضیحی مناسب برای این افزایش باشد.

در آزمایش بعدی MicroBooNE، اندازه گیری روی همان باریکه نوترینو اما با حساسیت بیشتر آشکار ساز برای تعیین سرشت این مقدار اضافی صورت خواهد گرفت. آشکار ساز از آرگون مایع به عنوان محیط آشکارسازی استفاده می کند که تشخیص بهتر الکترون ها از فوتون ها را که محدودیت اصلی در آزمایش MiniBooNE بود امکان پذیر می سازد.

MicroBooNE می تواند انرژی بر جای مانده در طول مسیر اصلی رگبار الکترومغناطیسی را اندازه گیری کند، در حالی که MiniBooNE فقط می تواند انرژی برجا مانده نهایی را اندازه بگیرد. رگبار الکترومغناطیسی ناشی از حرکت الکترون یا فوتون در ابرهای الکترونی اطراف اتم هاست. رگبار الکترومغناطیسی بارش الکترون ها، پوزیترون ها و فوتون ها است. پیش از آنکه یک فوتون، یک رگبار الکترومغناطیسی تولید کند، به یک الکترون و یک پوزیترون تبدیل می شود و انرژی بیشتری در مقایسه با الکترون در واحد طول مسیر بر جای می گذارد. MicroBooNE با اندازه گیری این مسیر منجر به رگبار الکترومغناطیسی می تواند الکترون ها را از فوتون ها تشخیص دهد.

ماجرای نوترینو ادامه دارد.

تعداد زیادی آشکار ساز بسیار پیشرفته آماده گردآوری داده ها و یا اکنون در حال طراحی هستند تا اسرار باقیمانده نوترینوها را کشف کنند. آشکار ساز MicroBooNE در آزمایشگاه فرمی سرشت مقادیر اضافی را در آشکار ساز MimiBooNE بررسی می کند. همچنین آزمایشگاه فرمی یک برنامه گسترده آزمایش نوسان نوترینو با خط مبنای کوتاه (~۱ km) و آزمایش بین المللی نوسان نوترینو با خط مبنای بلند



شکل ۶. آزمایش نوترینو در عمق زمین (DUNE) تلاشی بین المللی برای درک رفتار این ذرات عجیب است.

← پی‌نوشت‌ها

1. Don Lincoln
2. Tia Miceli
3. Chadwick
4. Wolfgang Pauli
5. Enrico Fermi
6. Savannah River
7. Clyde Cowan
8. Frederick Reines
9. Poltergeist
10. Chien Shiung Wu
11. Brookhaven National Laboratory
12. Leon Lederman
13. Melvin Schwartz
14. Jack Steinberger
15. John Bahcall
16. Ray Davis
17. Homestake
18. Bruno Pontecorvo
19. To kai to kamioka (T.K)
20. Ash River
21. Grand sasso
22. Kamioka NPE
23. Super-k
24. Donut
25. Sudbury Neutrino observatory
26. Mayorana
27. Dirac

← منابع

The Enigmatic
Neutrino
DonLincoin
Tiamiceli
The physics Teacher
Vol. 53, september
2015

$$\vartheta_1 - \vartheta_2 = \frac{L}{\hbar} \left[\frac{E_1}{C} - P_1 - \frac{E_2}{C} + P_2 \right] \quad (7)$$

بار دیگر فرض می‌کنیم که در هنگام نوسان، تکانه تغییر نکند بنابراین $p_1 = p_2$ و معادله (7) به صورت زیر خلاصه می‌شود.

$$\vartheta_1 - \vartheta_2 = \frac{1}{\hbar C} (E_1 - E_2) \quad (8)$$

اکنون رابطه نسبیتی انرژی-تکانه را برای E_1 می‌نویسیم $E_1 = \sqrt{p_1^2 c^2 + m_1^2 c^4}$ اگر تکانه بسیار بزرگ‌تر از جرم باشد، می‌توان از بسط دو جمله‌ای استفاده کرد. افزون بر این برای سادگی هر چه بیشتر می‌توان $p \gg mc, P = P_1 = P_2$ فرض کرد، بنابراین $p \sim \frac{E}{C}$

$$E_1 = E + \frac{m_1^2}{2E}, E_2 = E + \frac{m_2^2}{2E} \quad (9)$$

خواهد شد. با قرار دادن معادله (9) در معادله (8) داریم:

$$\vartheta_1 - \vartheta_2 = \frac{Le^2}{\hbar} \frac{m_1^2 - m_2^2}{2E} \quad (10)$$

در فیزیک نوترینو را کمیت مجذور اختلاف جرم‌ها را تعریف می‌کنیم

$$\Delta m_{12}^2 = m_1^2 - m_2^2$$

بنابراین احتمال اینکه یک نوترینو با طعم الکترون به یک نوترینو با طعم الکترون به یک نوترینو با طعم موئون در مخلوط دو نوترینویی نوسان کند برابر است با

$$p(|\nu_e\rangle \rightarrow |\nu_\mu\rangle) = \sin^2 \vartheta \sin^2 \frac{Lc^2 \Delta m_{12}^2}{4\hbar E} \quad (11)$$

معمولاً معادله (11) به شکل ویژه‌ای نشان داده می‌شود. که در آن $E \cdot L \cdot \Delta m_{12}^2$ به ترتیب بر حسب eV^2 ، کیلومتر و GeV است.

$$p(|\nu_e\rangle \rightarrow |\nu_\mu\rangle) = \sin^2 \vartheta \sin^2 \frac{1/2 \Delta m_{12}^2 L}{E} \quad (12)$$

در معادله (12) مشاهده می‌کنیم که احتمال آغاز نوسان یک نوترینو با طعم الکترون و انرژی E و آشکارسازی آن به عنوان یک نوترینو با طعم موئون در فاصله L ، به جرم نوترینوها و زاویه θ بستگی ندارد.

چون نوسان‌های طعم نوترینو را به طور تجربی مشاهده کردیم، می‌دانیم که جرم‌های نوترینو غیر صفر است. اما نمی‌توان از آزمایش‌های نوسان جرم مطلق نوترینوها را تبیین کرد و فقط می‌توان مجذور اختلاف جرم‌ها را اندازه‌گیری کرد. این بدان معناست که شاید جرم نوترینوهای m_1, m_2, m_3 می‌تواند دو پیکری‌بندی ممکن ($m_1 > m_2 > m_3$) را داشته باشند.

رابطه تنگاتنگی با غیر صفر بودن جرم آن دارد. به علاوه، مبنای جرم (ν_e, ν_μ, ν_τ) وجود دارد که با مبنای طعم قابل آشکارسازی (ν_e, ν_μ, ν_τ) اختلاف دارد. به عنوان مثال، نوترینوی الکترونی مخلوط کوانتوم مکانیکی این سه مؤلفه جرم است. برای به دست آوردن احساسی از این رفتار بگذارید مدل ساده دو نوترینویی را انتخاب کنیم و فعلاً نوترینویی سوم را نادیده بگیریم.

کار را با حل معادله شرودینگر برای ذره آزاد شروع می‌کنیم.

$$\psi(x, t) = Ae^{-\frac{i}{\hbar}(Et - \vec{p} \cdot \vec{x})} \quad (1)$$

نماد برا-کتی معادله بالا به صورت زیر است:

$$|\vartheta_\alpha(x, t)\rangle = e^{-i\vartheta_\alpha} |\vartheta_\alpha(0, 0)\rangle$$

که در آن
(2) طعم‌های نوترینو

$$\vartheta_\alpha = \frac{1}{\hbar} (E_\alpha t - \vec{p}_\alpha \cdot \vec{x}), \alpha = e, \mu$$

اگر فرض کنیم ویژه حالت‌های طعم $|x_e\rangle, |x_\mu\rangle$ باشند می‌توان آن‌ها را بر حسب ترکیب خطی ویژه حالت. ویژه جرم‌های $|V_e\rangle, |V_\mu\rangle$ با زاویه اختلاط θ نوشت. بنابراین

$$\begin{aligned} |V_\mu\rangle &= -\sin\theta |x_e\rangle + \cos\theta |V_e\rangle \\ |V_e\rangle &= -\sin\theta |x_\mu\rangle + \cos\theta |V_\mu\rangle \end{aligned} \quad (3)$$

برای محاسبه احتمال یک $|\nu_e\rangle$ در نقطه $(x, t) = (0, 0)$ پس از مدتی به $|\nu_\mu\rangle$ در نقطه اختیاری (x, t) نوسان می‌کند، معمولاً از توصیف مکانیک کوانتومی کت به عنوان حالت نهایت و برا به عنوان حالت اولیه و مجذور کردن آن‌ها می‌توان استفاده کرد. بنابراین

$$P(|\nu_e\rangle \rightarrow |\nu_\mu\rangle) = |\langle \nu_\mu(x, t) | \nu_e(0, 0) \rangle|^2 \quad (4)$$

با قرار دادن معادله (3) و انجام عملیات جبری خواهیم داشت:

$$P(|\nu_e\rangle \rightarrow |\nu_\mu\rangle) = \sin^2 \vartheta \sin^2 \frac{\vartheta_1 - \vartheta_2}{2} \quad (5)$$

برای اینکه وابستگی نوسان طعم به جرم را به روشنی ببینیم $\vartheta_1 - \vartheta_2$ را مستقیماً محاسبه می‌کنیم.

$$\vartheta_1 - \vartheta_2 = \frac{1}{\hbar} (E_1 t - \vec{p}_1 \cdot \vec{x} - E_2 t + \vec{p}_2 \cdot \vec{x}) \quad (6)$$

نوترینوها تقریباً با سرعت نور حرکت می‌کنند، $x = ct = L$ خواهد بود که در آن L فاصله میان چشمه نوترینو تا نقطه آشکارسازی است. پس معادله (6) به صورت زیر در می‌آید.