پیشگفتار

از سال ۱۹۳۰ که پاؤلی[1] برای اولین بار برای حفظ قوانین بقاء انرژی و اندازه حرکت حدس شجاعانه ای را مبنی بر وجود ذرات بدون جرم بنام نوترینو را مطرح کرد. تاکنون تحقیقات فراوانی را دربارهٔ جنبه های مختلف این ذره بنیادی صورت گرفته است. به دنبال کشف انواع مختلف نوترینوها و پاد نوترینوها مسأله عامل تفاوت میان انواع (طعم ها) مطرح شد و برای تمایز میان آنها از عدد لپتونی خاص هر طعم استفاده شد. آزمایش های دیویس[2] و همکاران درباره نوترینو خورشیدی که از سال ۱۹۶۸ شروع شد و به مدت دو دهه ادامه یافت ، کاهش چشمگیری را در مقادیر تجربی شار این نوترینوها نسبت به مقادیر پیش بینی شده توسط مدلهای استاندارد خورشیدی نشان می داد. برای توجیه این کاهش، فرضیه های متعددی ارائه شد که در میان آنها نظریه نوسان نوترینوها که از طرف پونته کوروو[3] وگریبف[4] در سال ۱۹۶۹ عرضه شد بیش از فرضیه های دیگر مورد توجه فیزیکدانان ذرات بنیادی و اختر فیزیک قرار گرفت.

طبق این نظریه طعم های مختلف نوترینو می توانند به یکدیگر تبدیل شوند. بررسی نوسان نوترینو بعنوان قوی ترین کاندیدا برای کاهش شار نوترینوهای خورشیدی ، به صورت تئوری و آزمایشگاهی سالها موردتوجه و بررسی دانشمندان فیزیک ذرات و اختر فیزیک قرارگرفت.

بررسی تئوری نوسان نوترینو در حوزه های متفاوت فیزیک نظری مورد بررسی قرار گرفته ومی گیرد از جمله در حوزه کوانتوم مکانیک QM و تئوری میدان های کوانتومی QFT بعنوان جدیدترین و قویترین ابزارجهت بررسی پدیدها و تئوری فازهای هندسی که بعنوان ابزاری عالی برای بررسی آزمایشگاهی و آشکار سازی نوسان نوترینو ها و بررسی ماهیت نوترینوها مورد بررسی قرار می گیرد. بالاخره در سال

[1] pauli
[2] Davis
[3] ponte corvo
[4] Gribov

۱۹۹۸ آزمایش های انجام شده توسط آشکار سازهای نوترینو در نقاط مختلف جهان و بررسی نوترینو های جوی به طور قطع نظریه نوسان نوترینو ها را تایید کردند. در فصل اول پایان نامه به بررسی نحوء پیدایش،و بررسی انواع واقسام نوترینو پرداخته شده است و توضیح مختصری از این که نوترینو چگونه با یک حدس شجاعانه کشف شد وموضوعات متفاوت نوترینو از جمله جرم، نوسان، وبحث در مورد انواع آن مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفته است. فصل دوم به پدیده نوسان نوترینو بعنوان موضوع اصلی که در این پایان نامه مطرح شده، مورد بررسی قرار گرفته ودر آن ساز و کار کوانتوم مکانیکی که بوسیله پونته کوروو معرفی شده، ارائه شده است. فصل سوم مربوط به فازهای هندسی می باشد، که بعنوان کار تئوری جدید وقدرتمند که به کمک آن می توان اقدام به آشکار سازی و بررسی ویژگی ها ومشخصات این ذره ناشناخته معرفی شده است و بررسی زوایای تاریک وروشن آن مورد بررسی قرار گرفته است. که در آن ابتدا تئوری فاز هندسی چرخه ای وغیر چرخه ای معرفی شده است در ادامه بررسی نوسان نوترینو در حالت دو طعمی وسه طعمی بوسیله فاز بری مورد برسی قرار گرفته شده است ودر ادامه فاز غیر چرخه ای که حالت کلی تر ازفاز بری است ارائه شده ، مشاهده می کنیم که در زمان های برابر با دوره تناوب، نتایج فازغیر چرخه ای به همان نتایج فاز بری تبدیل می شود.

در فصل چهارم بحث نوسان نوترینو را به کمک جدید ترین ودقیق ترین تئوریهای حاضر یعنی تئوری میدان های کوانتومی بررسی کرده ایم که در ابتدا به معرفی چار چوب های مورد نیاز تئوری های میدان کوانتومی در این زمینه پرداخته شده سپس بررسی نوسان نوترینو بوسیله کوانتوم مکانیکQM و تئوری میدان های کوانتومیQFT انجام شده و نشان داده شده است که جوابی که در چار چوب تئوری میدان های کوانتومی برای مسئله نوسان نوترینو مطرح می شود جوابی کامل تراست ودامنه نوسان، بوسیله آن تصحیح می شود و وابستگی دامنه نوسان به اندازه حرکت وجرم در آن مطرح می شود. در پایان نشان داده شده است که این نتایج در شرایط خاص به همان نتایج کوانتوم مکانیک منجر می شود بطوریکه در تقریب محدود ویا در حالت های نسبیتی جواب تئوری های میدان های کوانتومی برابر جواب کوانتوم مکانیک می با شد و

این برتری تئوری های جدید ولزوم بکار گیری آن را در شناخت هر چه بهتر پدیده های اطراف مان را متذکر می شود.ودر پایان بحث و نتیجه گیری انجام شده است.

فصل اول

مقدمه : تاریخچه، انواع و منابع

نوترینو

هیچ کشف بزرگی بوجود نیامده مگر اینکه حدس شجاعانه ای زده شده است. «اسحاق نیوتن»

۱-۱ مقدمه تاریخی

نوترینو در ۴ دسامبر ۱۹۳۰ ، با پیشنهاد پائولی[1] ، برای حل مشکل ایجاد شده بعلت نقض اصل پایستگی انرژی وتکانه خطی در واپاشی بتا معرفی شد .وی در نامه خود به کنفرانس فیزیک در تورین گن[2] این ذره جدید را دارای اسپین $\frac{1}{2}$ و جرم ناچیزو بدون بار،معرفی کرد. در آن نامه خاطر نشان کرد ، که این یک علاج سخت ، برای حفظ قانون بقای انرژی و اندازه حرکت بود. قصه از آنجا شروع می شود که درایده قدیمی درباره واپاشی بتازا، یک الکترون یا پوزیترون گسیل می شود . توزیع پیوسته تابش بتا در سالهای دهۀ ۱۹۲۰یک نتیجه غیر قابل قبول بود. چرا که ذرات آلفا، با انرژی های مشخص و خوش تعریف که برابر تفاوت انرژی جرمی حالات اولیه و نهایی (منهای تصحیح پس زنی) است گسیل می شوند. کلیه واپاشی های آلفا زایی که حالت اولیه و نهایی یکسانی دارند، انرژی جنبشی کاملاً یکسانی دارند. ولی ذرات بتا توزیع انرژی پیوسته ای دارند که از صفر تا حد بالایی (انرژی نقطه پایانی) که برابر تفاوت انرژی حالات اولیه و نهایی است تغییر می کند. از طرفی دیگر برای حفظ پایستگی انرژی و اندازه حرکت خطی و برای توجیه پیوستگی تابش بتا، در سال ۱۹۳۰ پاؤلی گسیل ذره دومی را علاوه بر اشعه بتا در فرایند واپاشی مطرح کرد که بعدها فرمی آن را نوترینو نامید، همانطور که پایستگی بار الکتریکی ایجاب می کرد. نوترینوذره ای بدون بار است و بنابر پایستگی تکانه زاویه ای و ملاحظات آماری در فرآیند واپاشی اسپین آن (مانند الکترون)باید $\frac{1}{2}$ باشد.

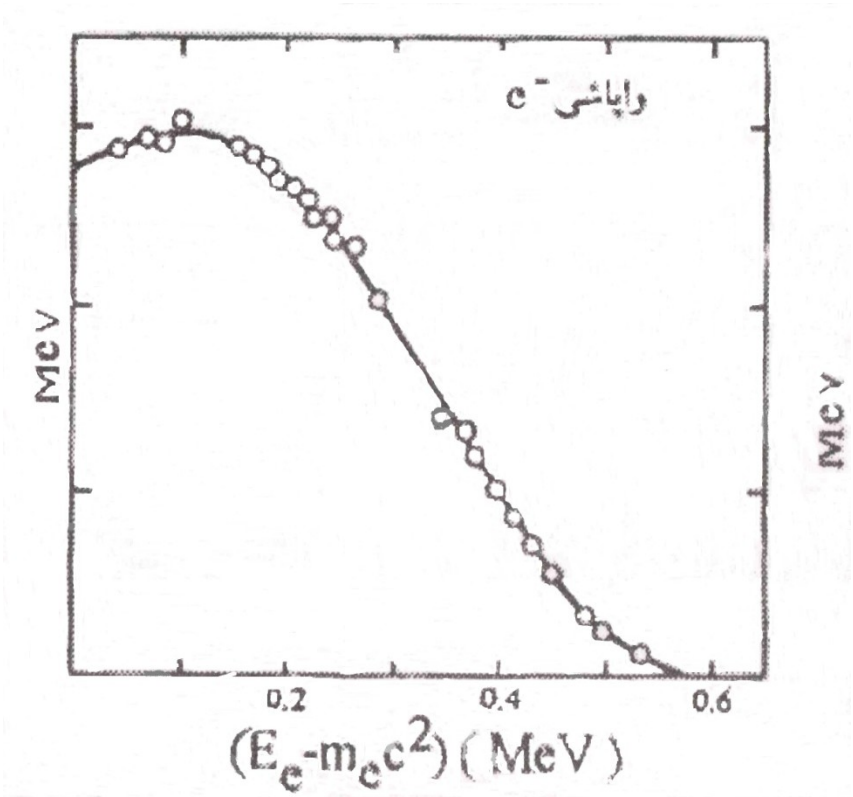
در سال ۱۹۳۴ ، فرمی بر مبنای فرضیه پاؤلی دایر بر حضور نوترینو نظریه ای موفق را برای واپاشی بتازا پیشنهاد کرد [1,2]. هر چند این نظریه ناکامل است (مثلاً ، نقض پارتیه را مجاز نمی دارد) ، امامی تواند طیف انرژی بتا (شکل ۱-۱)را توصیف کند و درک کیفی از گستره طول عمر واپاشی های بتازا را ارائه دهد.

[1] pauli
[2] Tübingen

مهمترین ویژگیهای واپاشی را از عبارت اساسی احتمال گذار (قاعده طلایی فرمی) ، در اثر بر هم کنشی که در مقایسه با بر هم کنش تشکیل حالات شبه پایدار ضعیف است می توان بدست آورد.

آهنگ گذار برای یک فرایند معین،λ را دامنه و فضای فازطبق «قاعده طلایی فرمی» تعیین می کند :

$$\lambda = \frac{2\pi}{\hbar}|v_{Fi}|^2 p(E_f) \qquad (1-1)$$



شکل ۱-۱ طیف انرژی الکترون حاصل از واپاشی β زای ^{64}CU ، که توزیعهای احتمال بر حسب انرژی (به واحد بهنجار شده است) حاصل از واپاشی نمونه ای بزرگ را ، به دست می دهد. نقاط تجربی از مرجع [۳] گرفته شده اند.

بعد از آن بنیان اتحاد واکنش الکترومغناطیس و الکتروضعیف توسط گلاشو- و اینبرگ- سلام (GWS) نهاده شد [4-6] .محاسبات اولیه سطح مقطع برهم کنش نوترینو بوسیله بته[1]و پی یرز[2] [7] در سال ۱۹۳۴ با استفاده از تئوری واپاشی بتای فرمی انجام شده بود.

نتایج اولیه محاسبات سطح مقطع آنقدر کوچک بود که بیشتر فیزیکدانان شک کردند که نوترینو را بتوان آشکارسازی کرد. به طور مثال برای نوترینو فرودی با انرژی 2.5MeV ، سطح مقطع حاصل برابراست با $1.2\times10^{-19}\mathrm{b} = 1.2 \times 10^{-43}\mathrm{cm}^2$ با برآورد احتمال گیر اندازی نوترینو در عبور از جسم جامدی که حاوی 10^{24}پروتون در cm^3 است ، و با توجه به اینکه سطح مقطع واکنش نوترینو با هر پروتون در حدود 10^{-43}است وعنایت به اینکه نوترینو در عبور از $1\mathrm{cm}^3$ ماده با حدود 10^{24} پروتون روبرو می شود ، سطح مقطع واکنش در حجم $1\mathrm{cm}^3$ از جسم جامد برابر است با

$(10^{-43}\mathrm{cm}^2) \times (10^{24}\mathrm{cm}^{-3}) = 10^{-19}\mathrm{cm}^{-1}$ بدست آمد. بنابراین برای اینکه نوترینو گیر بیفتد، باید از $10^{19}\mathrm{cm}$ ماده که قطری در حدود ۱۰ سال نوری دارد عبور کند.

در حقیقت مشهور است که پاؤلی ، اعلام کردکه " اشتباه وحشتناکی" با معرفی یک ذره که آن را نمی توان آشکار کرد کرده است. با آن که سطح مقطع بر هم کنش نوترینو کوچک است ، پونته کوروو[3] درسال ۱۹۴۶ [8]پیشنهاد کرد که نوترینو را بوسیله فرایند زیر می توان آشکار سازی کرد،

$$\nu_e + {}^{37}CL \longrightarrow {}^{37}Ar + \bar{e} \qquad (2-1)$$

بطوریکه با بمباران کلر بوسیله نوترینو و تبدیل هسته کلر به آرگون در اثر تبدیل یک نوترون به پروتون و ایجاد اشعه بتا می توان مشاهده کرد.در ۴۱ ژوئن ، ۱۹۵۶ تقریباً ۲۶ سال بعد از پیشنهاد پاؤلی ، کوان[1] و راینز[2]

[1] Bethe
[2] peierls
[3] pontecorvo

[9,10] تلگرافی به پاؤلی زدند و او را از موفقیتشان در آشکار سازی نوترینو با استفاده از واکنش معکوس بتا $\bar{\nu} + p \longrightarrow n + e^{+}$ آگاه کردند. از پاد نوترینوی حاصل از یک راکتور هسته ای برای آشکار سازی نوترینو استفاده کردند، زیرا محصولات شکافت که سرشار از نوترون اند ، در اثر واپاشی بتای منفی ، پاد نوترینو، $\bar{\nu}$ گسیل می کنند. آهنگ متوسط ایجاد پاد نوترینو $\bar{\nu}$ ، 6 عدد در هر شکافت است ، بنا بر این شار خالص $\bar{\nu}$ در این آزمایشها به حدود 10^{13} پاد نوترینو در هر سانتی متر مربع در ثانیه می رسد. راینز و کوان از یک آشکار ساز سوسو سوزن مایع، که سرشار از پروتونهای آزاد بود با ترکیبی ازکادمیوم، بعنوان آشکار سازپاد نوترینو استفاده کردند.

گیراندازی پاد نوترینو توسط پروتون به تولید یک نوترون و یک پوزیترون منجر می شود ؛ پوزیترون در مادهٔ سوسو سوزن به سرعت نابود می شود ($\bar{e} + \overset{+}{e} \longrightarrow 2\gamma$) و درخششی نورانی بوجود می آورد. نوترون تولید شده در محلول به حرکت در می آید و به تدریج کند می شود تا اینکه سرانجام جذب هسته کادمیوم ، که سطح مقطع گیراندازی بزرگی برای نوترون دارد ، می شود. پس از گیراندازی نوترون هسته $^{114}\mathrm{cd}$ در یک حالت بسیار برانگیخته قرار می گیرد پاد نوترینو که یک پرتو گامای با انرژی 9.1Mev از خود گسیل می کند. بنابراین علامت مشخصه پادنوترینو وجود یک علامت نورانی حاصل از نابودی پوزیترون (فوتونهای 0.511Mev) و متعاقب آن گسیل یک پرتو گامای 9.1Mev پس از گذشت حدود 10μs (زمان لازم برای کند شدن و گیر افتادن نوترون) است. کووان و راینز در هر ساعت با چند واقعه که می توانند حاکی از گیراندازی پادنوترینو باشد را آشکار سازی کردند. برای قطعی کردن ارتباط این وقایع با گیراندازی پاد نوترینو، آزمایشات زیادی انجام گرفت. که به دنبال آنها این نتیجه اجتناب ناپذیر حاصل شد که : نوترینو یک ذره واقعی است و نه مخلوق ذهنی که فقط از خیال پردازیهای بارور پاؤلی و فرمی ناشی شده باشد[11,12] .

[1] Cowan
[2] Reines

برای نمایش امکان ناپذیر بودن گیر اندازی پاد نوترینو توسط نوترون ها، دیویس و همکارانش آزمایشی انجام دادند. آنها برای مشاهده واکنش $\bar{\nu} + {}^{31}cl \rightarrow \bar{e} + {}^{31}Ar$ از یک مخزن بزرگ تتراکلرید کربن CCL_4و یک راکتور به منظور تولید پادنوترینو استفاده کردند. دیویس با تخلیه دوره ای مخزن و جستجوی هسته های رادیو اکتیو ${}^{37}Ar$ در گاز تخلیه شده ، نتیجه گرفت که واکنش انجام نگرفته است. نتیجه منفی این آزمایش نشان داد که ذرات نوترینو ν ،پاد نوترینو، $\bar{\nu}$ ،ذرات متفاوتی هستند.

در سال ۱۹۷۵ گلدهبر[1] و گرادزینس[2] و سان یار[3] دریافتند که نوترینورها باید چپگرد باشد (یعنی مؤلفه اسپین آنها در جهت حرکت آنهاست)بطوریکه هلیسیتی آنها ۱- است و طبعاً پادنوترینو ها راستگرد خواهند بود (هلیسیتی آنها ۱+ است)وجود نوترینونوع دوم ، نوترینو میونی ν_μ، بوسیله آزمایشگاه بین المللی بروکهاون[4] در برکهاون آمریکا درسال ۱۹۶۲ [13]تأیید شد.

وقتی که سومین لپتون باردار ، بنام تاو ، درسال ۱۹۵۷ [14] کشف شد، طبیعی بود که فرض شود که این لپتون باید یک همزاد نوترینویی داشته باشد، چنانکه در سال ۲۰۰۰ ، نوترینو تاو ν_τ واقعاً بوسیله همکاری آزمایشگاه دونات[5] [15] آشکار سازی شد. و مجموعه سومین فرمیون در مدل استاندارد فیزیک ذرات تکمیل شد.

$$\begin{matrix} \begin{pmatrix} e \\ \nu_e \end{pmatrix} & \begin{pmatrix} \mu \\ \nu_\mu \end{pmatrix} & \begin{pmatrix} \tau \\ \nu_\tau \end{pmatrix} \\ 1965 & 1962 & 2000 \end{matrix}$$

[1] Goldhaber
[2] Gradzins
[3] sunyar
[4] Brokhhaven
[5] Donut

۱-۲-نوسان نوترینو

یکی از انگیزه های اولیه برای مطالعهٔ نوسان نوترینوها، مسأله نوترینوهای خورشیدی است. نظریه دینامیک خورشید مدتهاست که شناخته شده و به شکل مدل استاندارد خورشیدی در آمده است. مدلهای استاندارد خورشیدی شار معینی از نوترینوی خورشیدی را پیش بینی می کنند. از سال ۱۹۶۸ با شروع که آزمایشات دیویس[1] و همکارانش انجام گرفت، تاکنون آزمایشات زیادی توسط گروه های مختلف پژوهشی در نقاط مختلف جهان انجام شده است.این آزمایشات مقدار بسیار کمتری از شار پیش بینی شده راتایید می کنند. از طرفی مدل استاندارد خورشیدی مبتنی بر نظریه های کاملاً شناخته شده ای در فیزیک هسته ای می باشد و توانسته است با موفقیت رابطه ای میان جرم و ترکیب شیمیایی خورشیدی و نیز درخشندگی و طول عمر آن برقرار کند. بنابراین برای این کاهش تجربی باید دلایلی غیر از تغییر در مدل استاندارد جستجو کرد.

نوسان نوترینو اولین بار بوسیله پونته کوروو در ۱۹۵۷ مطرح شده ، هر چند تا آن زمان فقط یکی از طعم های نوترینو شناخته شده بود. در طرح ارائه شده بوسیله پونته کوروو شامل نوسان بین نوترینو – پاد نوترینو مشابه با نوسان بین کائون، K^0 و پاد کائون، $\bar{\mathrm{k}}^0$ [16] بود.

بعد از کشف نوترینوی میونی ، مخلوط دو جرمی نوترینو بوسیله ماکی[2] و ساکاتا[3] درسال ۱۹۶۲ [17]مطرح شد که و بوسیله ناکاگاوا[4] در ۱۹۶۳ [18] تکمیل شد. و اولین نوسان نوترینو بین ۲ طعم بوسیله پونته کوروو در ۱۹۶۷ [19]مطرح شد. ۲ سال بعد پونته کوروو و گریبف مقاله ای را چاپ کردند [20] که در آن یک تئوری پدیده شناسی برای نوسان بین نوترینوی الکترونی، ν_e نوترینوی میونی، ν_μ مطرح شده بود.

[1] Davis
[2] Maki
[3] Sakata
[4] Nakagawa

طول نوسان اولین بار بوسیله فریتز[1] و مینکوسکی[2]در سال ۱۹۷۶ [21] ارائه شد. و اولین مطالعات نوسان ۳ طعمی نوترینو بوسیله بیلنکی[3] در ۱۹۸۷ [22] مطرح شد. یک بخش مهم درشناخت نوترینو مربوط به نوسان نوترینو در ماده و چگونگی اندر کنش آن با ماده است که این کار اولین بار بوسیله ولفنشتاین[4] [23] و با جزئیات بیشتر بوسیله میخیف[5] و سمیرنف [6] [24,25]مورد بررسی قرار گرفت. این مطالعات نقش عمده ای در تحلیل آزمایشگاهی نوترینوی خورشیدی بازی می کنند . آزمایشات بسیاری در آزمایشگاهها برای اثبات وجود نوسان نوترینو بکار رفته که از آن دست می توان به آزمایشاتی اشاره کرد که با توجه به انرژی آستانه و ماکزیمم انرژی طرح ریزی شده اند . مثلاً برای انرژی آستانه واکنش 0.2Mev تا انرژی بیشینه 0.42Mev که از واکنش پروتون-پروتون خورشیدی ناشی می شود، تنها اندرکنش نوترینو با گالیوم این گستره انرژی را می پوشانند.

$$\nu_e + {}^{71}_{31}\mathrm{Ga} + 0.23\mathrm{Mev} \rightarrow {}^{71}_{32}\mathrm{Ge} + \bar{e} \qquad (3-1)$$

همانگونه که تحلیل طیف های نوترینوی خورشیدی بر اساس مدل استاندارد خورشیدی رخ می دهد ، بیش از ۹۹٪ همه نوترینوهای خورشیدی در این گسترهٔ انرژی قرار دارند. سطح مقطع این نوترینوها بسیار کوچک است. از جمله آزمایشگاههایی که آزمایشات در آنها انجام می گیرد از آزمایشگاه گالکس[7] در ایتالیارا می توان نام برد که در آن از ۳۰ تن گالیوم در محلول $\mathrm{Ga\,cL_3 - HcL}$ برای آشکار سازی نوترینو استفاده

[1] Fritzsch
[2] Minkowski
[3] Bilenky
[4] wolfenstein
[5] Mikheve
[6] Smirnov
[7] GALLEX

می شود. یا آزمایشگاهی در معدن هُمِستک[1] در ایالات متحده که از ۶۱۵ تن تتراکلرو اتیلن c_2cL_4 مایع تشکیل شده است بر اساس واکنش زیر

$$\upsilon_e + {}^{37}_{17}\mathrm{CL} + 0.81\mathrm{Mev} \rightarrow \bar{e} + {}^{37}_{18}\mathrm{Ar} \qquad (4-1)$$

این آشکار ساز به نوترینوهای پر انرژی حاصل از واپاشی بتازای، ${}^{8}\mathrm{B}$ حساس است. آزمایشگاه سوپر کمیوکند[2] [26-28]که در آن از حدود ۵۰ کیلوتن آب خالص برای آشکار سازی استفاده می شود و انرژی آستانه آن برای آشکار سازی β^- حاصل از ${}^{16}_{8}\mathrm{O}$ برابر با 14.9Mevکه برای همه ذرات بجز اندکی از نوترینوهای خورشیدی مقدار آن زیاد است. بنابراین پراکندگی کشسان الکترونها ، واکنش برتر نوترینوهای خورشیدی در آب است.

تقریبا برای همه نوترینوها ، آهنگ رویدادها بسیار پایین است(از مرتبه یک رویداد در روز) ، در نتیجه برای جمع آوری مجموعهای از داده های معنادار باید بسیار صبور بود. اما ، پس از سالها گردآوری داده ها، همه آشکار سازها داستانی مهم و همساز با هم را بازگو می کنند که خورشید یک منبع نوترینو است [27-28]. همه این آزمایشات کسری از شار نوترینوهای مورد انتظار را آشکار ساز می کنند[29-30]. اولین مدرک برای نوسان نوترینو بوسیله سوپرکمیوکند در سال ۱۹۹۸ [31] ارائه شد. این مدرک از تحلیل شار نوترینوی اتمسفری که از جهت های مختلفی می آید،بدست آمد.

[1] Homestake
[2] super kamiokande

۱-۳- جرم نوترینو

در نظریه وحدت یافته استاندارد ، جرم نوترینو برابر با صفر فرض می شود. روشن است که آزمودن تجربی این فرض اهمیت زیادی دارد. چرا این همه کوشش صرف پیگیری این اندازه گیریها شده است؟ جواب این مساله این است که جرم نوترینو در دو حوزه ظاهراً نامرتبط فیزیک تأثیر انکار ناپذیری دارد.

اگر نوترینو جرم داشته باشد ، بنابر فرمولبندی نظری « الکترو ضعیف» که بر هم کنشهای ضعیف و الکترو مغناطیسی را جنبه های مختلف نیروی اساسی می داند ، تبدیل نوترینوهای الکترونی یعنی نوترینوهایی که در واپاشی بتازا گسیل می شوند ، به سایر نوترینوها که نوترینوهای تاو و میون نامیده می شوند مجاز است. این تبدیل می تواند توجیه کننده این نکته باشد که تعداد نوترینوهای خورشیدی مشاهده شده فقط حدود یک سوم مقدار پیش بینی شده بر مبنای نظریه های فعلی همجوشی خورشیدی است. از سوی دیگر ، به نظر می رسد که مقدار ماده موجود در جهان بیش از آن است که بوسیله قویترین تلسکوپها قابل مشاهده است. این ماده، بی فروغ است ، یعنی هیچ تابشی گسیل نمی کند. بنابر نظریه کیهانشناسی مهبانگ ، که تقریباً تمام پدیده های اختر شناسی مشاهده شده را تبیین می کند جهان حاضر باید پر از نوترینوهای ناشی از جهان آغازین باشد و تراکم کنونی آن باید به حدود $10^8 \frac{\text{عدد}}{m^3}$ برسد[32].

اگر این نوترینوها بدون جرم باشند ، نمی توانند جاذبهٔ گرانشی لازم برای «بسته» شدن جهان را فراهم سازند ، ولی آنها با جرم سکونی به کوچکی 5ev می توانند چگالی جرم – انرژی مورد نیاز را تأمین کنند.

بعبارتی دیگر، اگر جرم خوشه های کهکشانی را یکبار با استفاده از قضیهٔ ویریال و یک بار با جمع کردن جرم کهکشانهای مختلف درون خوشه به دست آوریم می بینیم با هم تفاوت دارند. به نظر می رسد مادهٔ زیادی به صورت غیر قابل مشاهده (ماده تاریک) درون کهکشان وجود دارد. این ماده تاریک می تواند نوترینوهای جرم

دار باشد[33].برای اینکه چگالی نوترینوهای جرمدار موجب عبور از مرز چگالی بحرانی کیهان نشود فرض شده است ، $\sum m_\nu \leq 40ev$ ، که این جمع روی تمام انواع نوترینو بسته شده است.

در ۲۳ فوریه ۱۹۸۷ انفجار ابر نواختر۱۹۸۷A در ابرهای بزرگ ماژلان مشاهده شد. بخش انبوهی از انرژی گسیل شده از این ابرنواختر به صورت نوترینو بوده است. در آشکار ساز SN1987A منحنی تغییرات انرژی بر حسب زمان گسیل نوترینو نسبت به جرم نوترینو حساس است. آشکار ساز ژاپنی کامیوکند توانست ۱۱ رویداد نوترینویی را ثبت کند با این فرض که مدلهای اختر فیزیکی ما چنان باشند که بتوانند زمان گسیل تمام این ۱۱ رویداد را همساز کند.حد $\sum m_\nu \leq 27ev$ به دست می آید. آشکارسازی نوترینوهای ناشی از SN1987A یکی از مهمترین اکتشافات علمی دهۀ گذشته بوده و نقش مهمی در تایید نظریه های مربوط به ساختار ستارگان دارد. اگر نوترینو جرمدار باشد نوترینو چپگرد ، راستگرد به نظر خواهد آمد. بنابراین مطالعۀ جرم نوترینو نه تنها بر فیزیک هسته ای و ذرات بنیادی ، بلکه بر فیزیک خورشیدی و کیهان شناسی نیز تأثیر مستقیم و فوری خواهد گذاشت. این انگیزه اینجانب در انتخاب این موضوع برای پایان نامه ام بود.

مشاهدات غیر مستقیم حد جرم نوترینوها رابصورت زیر تعیین کرده اند[34] :

$$m_{\nu_e} < 2.2ev$$

$$m_{\nu_\mu} < 170kev$$

$$m_{\nu_\tau} < 15.5\ Mev$$

۱-۴-منابع نوترینوها

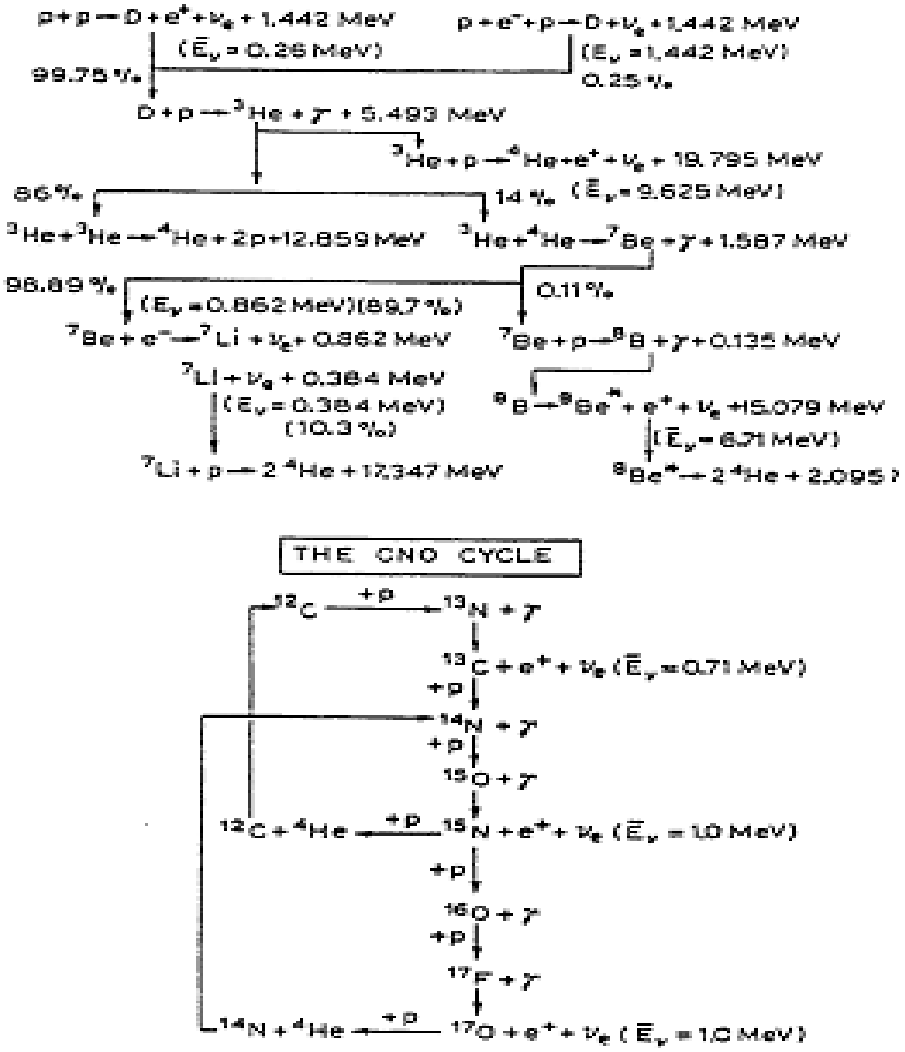
نوترینوهایی کهدرسطح زمین مشاهده می شوند، از منابع متعددی سرچشمه می گیرند. نوترینوهای با انرژی کمتر از حدود 3Mev که بیشترین تعداد نوترینو ها هستند به جز اندکی از آنها که از خورشید ناشی می شوند غالباً پادنوترینوهای الکترون $\bar{\nu}_e$ اند که از فرایند شکافت و واپاشی در زنجیرهٔ واپاشی اورانیوم – توریم $(U-Th)$ منشا می گیرند و شار آن بستگی به موقعیت و محل مشاهده دارد . مثلاً در محلی که راکتور هسته ای وجود دارد این شار بیشتر است.نوترینوهای تاانرژی 15Mev ،عمدتاً ازفرایندهای خورشیدی ناشی می شوند و تصور می شود نوترینوهای الکترونی باشند که از فرایند همجوشی هسته ای که عامل تولید انرژی خورشیدی است حاصل می شوند. مقدار کمی از نوترینوهای این گسترهٔ انرژی و انرژی های بالاتر ممکن است از انفجار یک ابر نواختر super Nova باشند. این گونه انفجارها انواع مختلف نوترینوها و پادنوترینوها را ایجاد می کنند. امکان دارد که مجموعه ای از نوترینوهای توام با اثر انتقال به سرخ، که از ابرنواختر سرچشمه گرفته اند در گستره ای بین Mev ۱۵ تا Mev ۳۰ مشاهده شوند. انرژیهای بالاتر از این گستره ، نوترینوهای جوّی هستند که مخلوطی از $\bar{\nu}_e, \nu_e, \bar{\nu}_\mu, \nu_\mu$ می باشند، و از واپاشی پیوندهای باردار $\pi^{\pm}$ وبرخی از کائونها $k^{\pm}$ در اثر برهمکنش پرتوهای کیهانی با جوّ زمین نتیجه می شوند. فراوانی نوترینوها در اطراف ما به اندازه ای است که تخمین زده می شود در هر ثانیه میلیاردها عدد از آنها از بدن ما عبور می کنند.

۱-۵-نوترینوهای خورشید

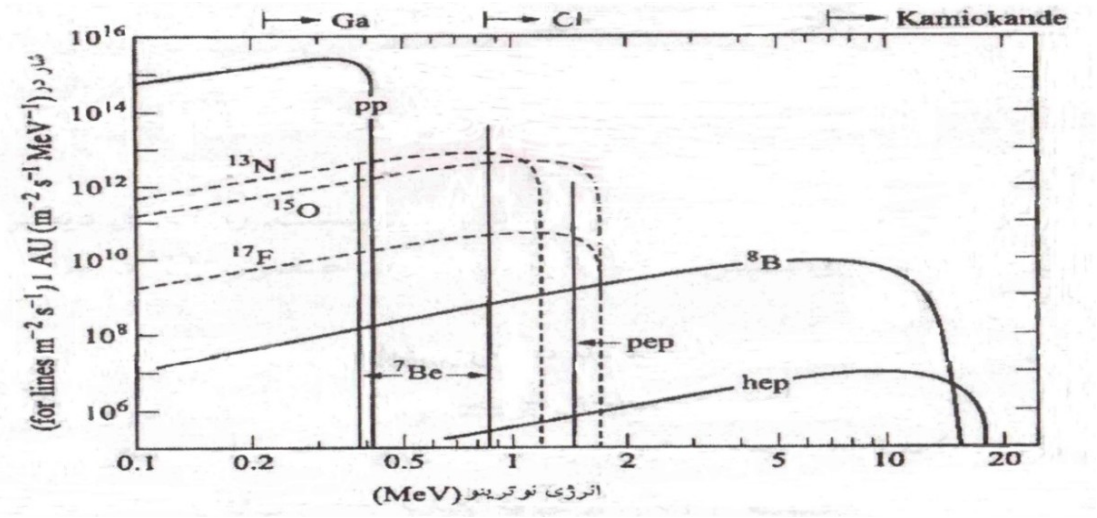
خورشید به عنوان یک منبع پرقدرت از نوترینوهای کم انرژی است که آخرین محصولات فرایند همجوشی زیر می باشند که در اعماق خورشید رخ می دهد :

$$4p \rightarrow {}^4He + 2e^+ + 2\nu_e + 26.7\text{Mev} \qquad (5-1)$$

فرایندهای میانی ممکن برای این تبدیل و تحول همراه با نتایج نظری مدل استاندارد خورشیدی (solar standard model ≡ SSM)در نمودار ۳ نشان داده شده است در خورشید دو چرخهٔ همجوشی برای تولید انرژی وجود دارد، یکی چرخه کربن است که اهمیت کمتری دارد و دیگری که مهمتر است چرخه پروتون-پروتون است، که در نهایت مطابق با واکنش بالا باعث تولید انرژی در خورشید می شود. چنانکه مشاهده می شود نوترینوهای تولیدی در خورشید از نوع نوترینوهای الکترونی هستند[35]. طیف انرژی نوترینوهای خورشیدی در نمودار ۳ ، نشان داده شده است .



نمودار ۱-۲ : فرایندهای اصلی همجوشی در خورشید



نمودار۱-۳ : طیفهای نوترینوی خورشیدی که مدل استاندارد خورشیدی پیش بینی می کند.طیفهای زنجیره p-p باخطوط تو پر،وطیفهای زنجیره CNO باخط چین نشان داده شده اند. این تصویر از مرجع [36] گرفته شده است.

لازم به توضیح است که که نوترینوها با توجه به قدرت نفوذ بالایشان می توانند اطلاعات بی واسطه ای در مورد فرایندهای تولید انرژی در اعماق خورشید ارائه دهند . براین اساس حتی پیشنهاد ساخت تلسکوپهای نوترینویی برای مشاهده اعماق خورشید و کرانه های کهکشان نیز مطرح شده است. مطالعه نوترینو های خورشیدی تاثیر مهمی بر فیزیک ذرات بنیادی نیز دارد. چون فاصله میان تولید و آشکار سازی نوترینوها نسبت به فاصله های آزمایشهای زمینی بسیار بزرگ است، و امکان نوسان نوترینوها را به نحو قاطعتری می توان در آنها مشاهده کرد.

بررسی نوترینوهای خورشیدی از سال ۱۹۶۸ به وسیله دیویس و با استفاده از $^{37}\mathrm{CL}$ بعنوان آشکار ساز از طریق واکنش $\nu_e + {}^{37}\mathrm{CL} \rightarrow {}^{37}\mathrm{Ar} + \bar{e}$ آغاز شد. به هر حال میانگین مشاهدات دیویس و همکاران وی در طول بیش از ۲ سال مقدار $2.5 \pm 0.3\ SNU$ را نشان می دهد ،که این مقدار کمتر از $\frac{1}{3}$ شار پیش بینی شده برای نوترینوهای خورشیدی توسط مدل های استاندارد خورشیدی می باشد. این مطلب که بعدها تحت عنوان

مساله نوترینوهای خورشیدی شهرت پیدا کرد، یکی از معماهای تحقیقات دهه های اخیر در زمینه فیزیک نجومی و فیزیک ذرات بنیادی بوده است.

۱-۶-نوترینوهای جوی

نوترینوهای جوی حوزهٔ متفاوت دیگری برای پژوهش بر روی نوسانهای نوترینو هستند. زمین بطور پیوسته با پرتوهای کیهانی بمباران می شود ، که بخش اعظم این پرتوها شامل پروتونها و الکترونهای پرانرژی می باشند. پروتونها برخورد با هسته های موجود در طبقات بالایی جو ، مزونهای π را تولید می کنند. این مزونها هنگامی که در طبقات بالای جو هستند با زنجیره های زیر وامی پاشند:

$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$$
$$\downarrow$$
$$e^+ + \nu_e + \bar{\nu}_\mu$$

$$\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu$$
$$\downarrow$$
$$\bar{e} + \bar{\nu}_e + \nu_\mu$$

نوترینوها و پادنوترینوها در ارتفاع میانگین H~20Km با انرژی متجاوز از چند گیگا الکترون ولت، آفریده می شوند.سطح مقطع پراکندگی نوترینوها و پادنوترینوها با انرژی افزایش می یابد ، بطوریکه آشکارسازی لپتونهای

باردارحاصل از اندرکنش آنها در انرژیهای بالاتر آسانتر می گردد. در آشکار سازهای آبی همچون سوپرکمیوکند ، اساساً لپتونهای باردار با واکنشهایی به شکل زیر آفریده می شوند:

$$\upsilon_e + n \rightarrow \bar{e} + p \qquad \bar{\nu}_e + p \rightarrow p^+ + n$$

$$\upsilon_\mu + n \rightarrow \bar{\mu} + p \qquad \bar{\nu}_\mu + p \rightarrow \mu^+ + n$$

لپتونهای باردار تولید شده منجر به تابش چرنکوف می شوند که اطلاعات زیادی در مورد انرژی ، راستا و هویت نوترینوها وپاد نوترینوهای فرودی فراهم می آورد.

مشاهده می شود که در فیزیک نوترینو ، همه شاخه های فیزیک از جمله فیزیک هسته ای ، اختر فیزیک، فیزیک ذرات و کیهانشناسی درگیر می شوند و مسائل چالش برانگیز نظری و تجربی را به همراه می آورند.

فصل دوم

نوسان نوترینو