جرم‌سنج نوترینوی کاترین[1]

امیرحسین فتح‌اللهی

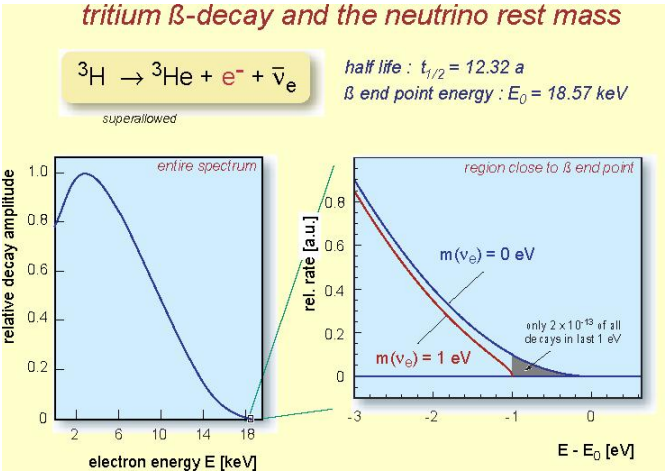
همان‌طور که می‌دانیم نوترینوها[2] ذرات بنیادی هستند که برهم‌کنش بسیار کمی دارند، و از این‌رو مشاهده‌ی مستقیم آن‌ها بسیار مشکل است. هم‌چنین تا همین چند سال پیش، دست‌کم به طور نظری، نوترینوها بدون جرم در نظر گرفته می‌شدند. با کشف پدیده‌ی نوسان طعم نوترینوها [1] معلوم شد که باید جرم نوترینوها را، اگرچه خیلی کم، ولی غیرصفر در نظر گرفت. ولی سؤالی که هم اکنون مطرح است درباره‌ی اندازه‌ی جرم انواع نوترینوها است.

سروکله‌ی نوترینوها اولین بار در همین واپاشی β پیدا شد. در 1930، سال‌ها قبل از 1956 که رَینس[3] و کُوِن[4] نوترینوها را برای اولین بار آشکار کردند، پَئولی[5] وجود نوترینوها را برای حلّ مشکلی که با واپاشی β پیدا شده بود پیش‌نهاد کرد. در آن زمان به نظر می‌آمد که در یک واپاشی β یک هسته با عدد جرمی A و عدد اتمی Z به یک هسته با همان عدد جرمی ولی با عدد اتمی Z+1 تبدیل می‌شود. در طیّ این فرآیند یک الکترون آزاد می‌شود. از آن‌جا که جرم هسته‌ها و الکترون تولیدشده را می‌دانیم، بر اساس قوانین بقای تکانه و انرژی، انتظار می‌رفت که انرژی جنبشی الکترون آزادشده یک مقدار مشخص باشد، مانند آن چه که در مسئله‌ی برخورد کاملاً ناکش‌سان دو جرم داریم. امّا مشکل این‌جا بود که به جای یک مقدار مشخص برای انرژی الکترون‌ها، یک طیف برای انرژی به دست می‌آمد؛ چیزی شبیه یک نمودار که تعداد را بر حسب انرژی می‌دهد. در آن زمان یک پیش‌نهاد این بود که شاید نباید قوانین بقا را در حوزه‌ی اتمی به کار برد. در این جا بود که پئولی پیش‌نهاد کرد که شاید ذره‌ی دیگری، که به آن نوترینو نام دادند، تولید می‌شود که به خاطر انرژی و تکانه‌ای که ممکن است با خود حمل کند، دیگر نمی‌شود مقدار انرژی الکترون را به طور مشخص تعیین کرد.

حالا قرار است تا جرم نوترینوی الکترون، ν_e، به یک روش نسبتاً مستقیم، از تحلیل انرژی الکترون‌های تولیدشده در یک واپاشی β اندازه‌گیری شود. در این واپاشی ترتیوم به هلیوم 3، الکترون و پادنوترینوی الکترون تبدیل می‌شود، یعنی:

$$^3\mathrm{H} \rightarrow {}^3\mathrm{He} + \mathrm{e}^- + \bar{\nu}_\mathrm{e}$$

طیف انرژی که در بالا از آن صحبت شد حاوی اطلاعات زیادی است که بر اساس آن می‌توان



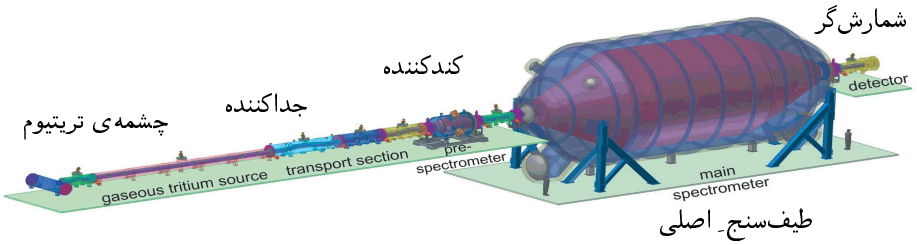
شکل ۱: طیفِ انرژیِ الکترون‌ها در واپاشیِ β ی تریتیوم. نمودارِ طرفِ راست تهِ طیف را در مقیاسِ بزرگ‌تر نشان می‌دهد.

جرمِ نوترینو را به دست آورد. در واقع با داشتنِ شکلِ دقیقِ تهِ این طیف، که به انرژی‌هایِ زیاد مربوط است، می‌توان جرمِ نوترینو را تعیین کرد. مشکل این‌جاست که تعدادِ الکترون‌هائی که در تهِ طیف تولید می‌شوند بسیار کم است؛ به عنوانِ نمونه، در 1 eV تهِ طیف، چیزی حدودِ 10^{-13} برابرِ تعدادِ کلِّ الکترون‌ها تولید می‌شود (شکلِ ۱). همان‌طور که در نمودارِ راست دیده می‌شود، اگر جرمِ نوترینو غیرصفر باشد تهِ طیف پائین‌تر می‌آید، و متفاوت با حالتِ جرمِ صفر است.

اندازه‌گیری‌هایِ از این نوع در دهه‌ی 90 در روسیه و آلمان وجود داشته است. در این آزمایش‌ها حدِّ بالایِ $2.2\ \mathrm{eV}/c^2$ برایِ جرمِ ν_e به دست آمد. در آزمایشِ جدید که کاترین[1] نامیده می‌شود، قرار است تا با افزایشِ شدّتِ چشمه‌ی β ی تریتیوم[6]، و تغییراتِ دیگر حدِّ بالا را تا $0.2\ \mathrm{eV}/c^2$ محک بزنند. این طرح حاصلِ هم‌کاری چندین مؤسسه‌ی اروپائی و آمریکائی است. محلِّ انجامِ طرح کارل‌سروهه‌ی[7] آلمان است؛ جائی که زیرساختارها، از قبیلِ چشمه‌ی تریتیوم از قبل آماده هستند.

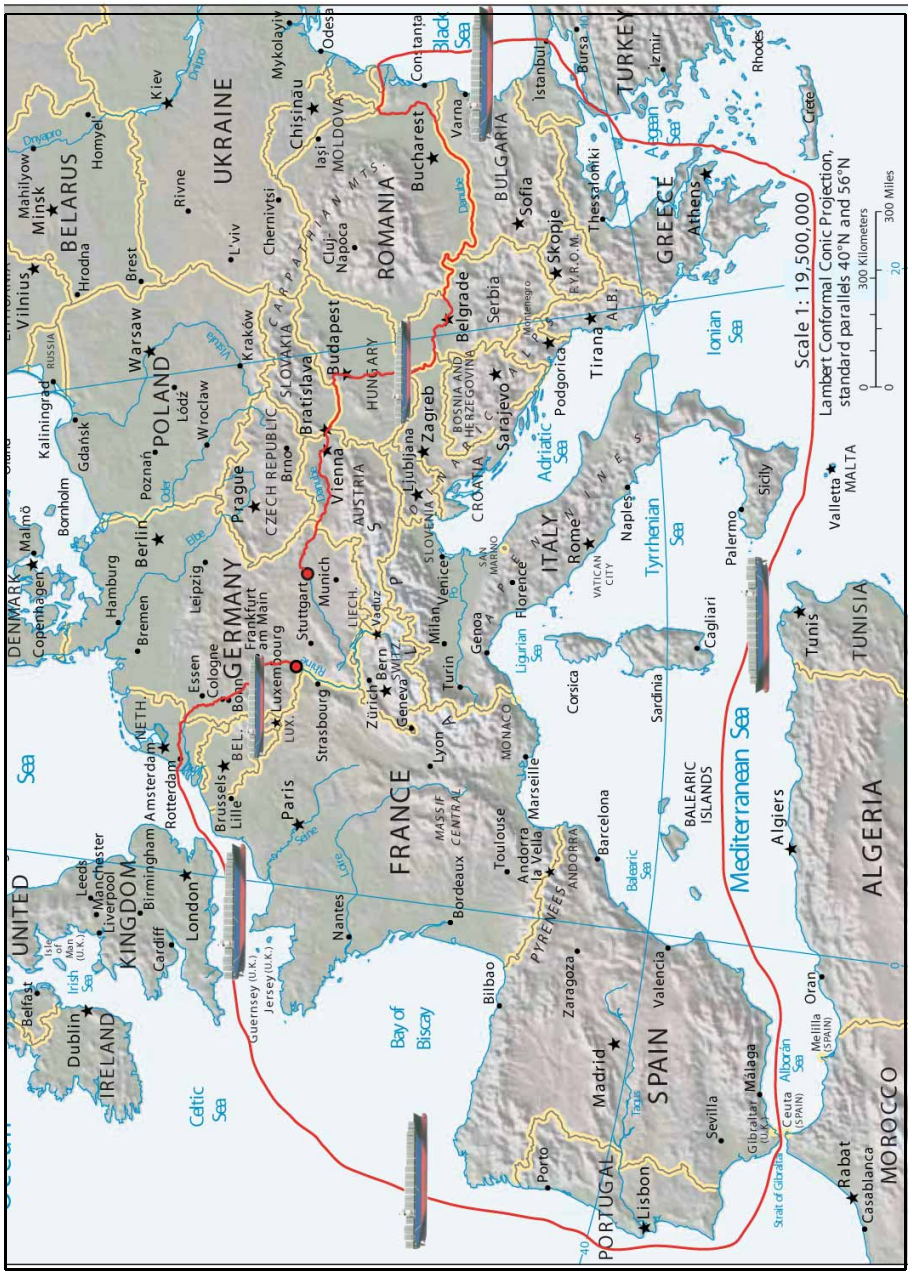
شکلِ ۲ شمایِ کلیِ آزمایش را نشان می‌دهد. شرحِ مختصری از اجزا در شکل داده شده است. طیف‌سنجِ اصلی در مخزنِ بزرگ‌ترِ طرفِ راست قرار دارد. در این مخزن ترکیبِ خاصّی از میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی می‌تواند طوری تنظیم شود تا الکترون‌هایِ با انرژیِ متفاوت را جدا کند. برایِ کم‌کردنِ اثرِ زمینه لازم است تا فشار داخلِ این مخزن تا حدودِ 10^{-11} mmHg کم شود. اندازه‌ی این مخزن در قطر حدودِ 10 m و در درازا حدودِ 23 m است.

از جزئیّاتِ جالبِ مربوط به این طرح مربوط به حمل مخزنِ طیف‌سنجِ اصلی است. این قسمت



شکل ۲: طرح ِ کاترین. الکترون‌های ِ تولید شده از چپ به راست حرکت می‌کنند. چشمه‌ی تریتیوم به طول ِ تقریبی ِ 10 m در چپ قرار دارد. وظیفه‌ی قسمت ِ جداکننده این است که تریتیوم‌های ِ عبورکرده را حذف و به الکترون‌ها اجازه‌ی ورود به مرحله‌ی بعد بدهد. این کار با ترکیبی از پمپ‌های ِ مکانیکی و برودتی انجام می‌شود. وظیفه‌ی قسمت ِ کندکننده این است که الکترون‌ها را به قدری کند نماید تا فقط الکترون‌های با بیش‌ترین انرژی، که مربوط به ته ِ طیف هستند، بتوانند عبور کنند. این کار با یک میدان ِ الکتریکی ِ ایستا انجام می‌شود. طیف‌سنج ِ اصلی در مخزن ِ راست قرار دارد. قسمت ِ شمارش‌گر در انتها قرار دارد.

شکل ۳: عبور ِ مخزن ِ از روستای ِ لِئُپُلدس‌هافِن[11]، نزدیک ِ محلّ ِ نصب. 25 نوامبر 2006.



شکل ۴: مسیرِ آبیِ مخزنِ اصلی از محلِّ ساخت تا محلِّ آزمایش.

در دِگِندورف[8] ساخته شد و باید به کارل‌سروهه، در فاصله‌ی 400 km منتقل می‌شد. از آن جا که امکانِ انتقالِ جاده‌ایِ این مخزن در فاصله‌ی ذکرشده وجود نداشت، به ناچار به راهِ آبیِ به طولِ حدودِ 9000 km روی آورده شد. قسمتِ ابتدایِ این مسیرِ آبی، از محلّ ساخت تا کناره‌ی دریایِ سیاه در رودِ دَنوب[9] قرار داشت. سپس مخزن در یک کشتیِ دریارو بارگیری شد، و پس از عبور از دریاها و تنگه‌ها، به غربِ اروپا رسید. در انتها با استفاده از رودِ راین[10] دوباره مخزن از دریا به قسمتِ خشکی وارد شد. شکلِ ۴ مسیرِ طی‌شده توسطِ مخزن را نشان می‌دهد.

مراجع

[1] ا. شریعتی، نوسانِ طعمِ نوترینو، گاما **1**، ص. 47.

- جزئیّاتِ مربوط به کاترین را می‌توان در منزل‌گاهِ آن به نشانیِ زیر پیدا کرد:

http://www-ik.fzk.de/~katrin/

اسامیِ خاص:

1) KATRIN: Karlsruhe Tritium Neutrino Experiment, 2) Neutrino,

3) Reines, 4) Cowen, 5) Pauli, 6) Tritium, 7) Karlsruhe, 8) Deggendorf,

9) Danube, 10) Rhine, 11) Leopoldshafen.