

آزمایش - دیویس

احمد شریعتی

چکیده: $\frac{1}{4}$ - جایزه ای- نوبل- سال- 2002 به ریموند دیویس داده شد، زیرا دیویس سهم- به سزا بی در آشکارسازی ای- نوترینوها ای- خورشیدی داشته، و نتیجه ای- آزمایش اش منجر به درک- عمیق تری از فیزیک- ذره‌ها ای- بنیادی شده. آزمایش- دیویس، که نام- رسمی اش «آزمایش- نوترینوها ای- خورشیدی ای- بروکهون» است، آزمایش ای است بسیار زیبا، که هر چه بیشتر به جزئیات- آن دقّت کنیم؛ بیشتر به این نکته پی می‌بریم که بخش‌های- مختلف- فیزیک چه‌گونه به هم تبینده اند. این مقاله ای- آموزشی مرور- مختصری است برای آزمایش.

۱ مقدمه

در طبیعت ذره‌ها بی هست با جرم- تقریباً صفر، اسپین $2/\hbar$ ، بدون- بار- الکترونیکی، که با ذره‌ها ای- دیگر (مثلًا الکترون و پروتون و نوترون) فقط برهم‌کنش- ضعیف دارند. این ذره‌ها نوترینونام دارند. ابتدا گمان می‌رفت که فقط یک جور نوترینو در طبیعت هست، بعد معلوم شد که دست‌کم سه جور نوترینو در طبیعت هست: نوترینوی- الکترون (ν_e)، نوترینوی- میون (μ)، و نوترینوی- تاؤ (ν_τ). برا ای- مرور- مختصری در این زمینه، رجوع کنید به مقاله‌های ۱ و ۲ که به فارسی هم ترجمه شده اند. در بسیاری از واکنش‌های- هسته‌ای، از جمله در واکنش‌های ای که در درون- خورشید روی می‌دهد، نوترینو تولید می‌شود. در واقع، در هر تانیه حدود- ۶۰ میلیارد نوترینو از هر سانتی‌متر- مربع از بدن- ما می‌گذرد (چه روز چه شب)، و با این حال احتمال- این که این نوترینوها به اتم‌ها ای- بدن- ما برخورد کنند آن قدر ناچیز است که در عمر ما احتمالاً تنها یک بار چنین اتفاق ای خواهد افتاد. علی‌رغم- این برهم‌کنش- بسیار ضعیف- نوترینوها با بقیه ای- مواد، پژوهش‌گران توانسته اند آن‌ها را آشکار کنند، طوری که امروزه جای- شک ای باقی نمانده که وجود دارند. از این هم بیشتر، با شمردن- نوترینوها ای- خورشیدی اطلاعات- بسیار گران‌بها بی در مورد- این ذره‌ها ای- گریزیا به دست

آمده است. در این مقاله آزمایش‌ی را معرفی می‌کنیم که برای نخستین بار نوترینوها‌ی خورشیدی را شمرد.

2 آشکارسازی‌ی نوترینو به کمک ^{37}Cl

کلر (Cl) با عدد اتمی ۱۷ چندین ایزوتوپ دارد که دو تای آن‌ها پایدارند: ^{35}Cl و ^{37}Cl . کلری که در طبیعت یافته می‌شود ^{35}Cl ۷۵.۷۷٪، ^{37}Cl ۲۴.۲۳٪ است. آرگون (Ar) با عدد اتمی ۱۸ هم چندین ایزوتوپ دارد. ایزوتوپ‌های ^{36}Ar و ^{40}Ar پایدارند. آرگونی که در طبیعت یافته می‌شود ^{36}Ar ۰.۳۴٪، ^{40}Ar ۹۹.۶٪ است. ^{37}Ar نایاب دار است با نیمه‌عمر ۳۵ روز. اتفاقی که برای ^{37}Ar می‌افتد این است که با گیرانداختن یک الکترون تبدیل می‌شود به Cl^- .



منظور از * بر بالا Cl این است که اتم کلر به دست آمده در یک حالت برانگیخته است. بگذارید این مطلب را بیشتر باز کنیم.

اتم Ar دقیقاً ۱۸ پروتون و ۱۸ الکترون دارد. آرایش الکترونی Ar این است:



اریتال‌ها $1s$ و $2s$ و $3s$ کروی متقارن‌اند و در مبدأ صفر نیستند. به یاد بیاوریم که معنی i اریتال این است: احتمال حضور الکترون در فضا. از این که اریتال‌ها s در مبدأ صفر نیستند نتیجه می‌گیریم که برای الکترون‌ها i . این اریتال‌ها همواره یک احتمال کوچکی هست که الکترون در مرکز، یعنی در هسته i - اتم باشد؛ یعنی این احتمال هست که یک الکترون با هسته در یک نقطه باشد، و به این ترتیب این احتمال هست که یکی از الکترون‌ها i با یکی از پروتون‌ها i هسته ترکیب شود و واکنش زیر روی دهد:



این واکنش هرگز برای اتم هیدروژن روی نمی‌دهد، زیرا $(m_e + m_p) > m_n$ ، و بنابراین قانون پایسته‌گی i - انرژی مانع این برهم‌کنش می‌شود. اما در مورد هسته‌های ^{37}Ar و ^{37}Cl داریم

$$(m(^{37}\text{Ar}) - m(^{37}\text{Cl})) c^2 = 0.813 \text{ MeV}. \quad (4)$$

^۱ توجه: در این فرمول اختلاف جرم اتم‌ها نوشته شده

پس پایسته‌گی‌ی انرژی مانع این برهمکنش نمی‌شود، و این امکان هست که یک اتم ^{37}Ar ، که ۱۸ الکترون دارد، با گیرافتادن یکی از الکترون‌ها‌ی یکی از اربیتال‌ها‌ی s اش، تبدیل بشود به یک اتم کلربه علاوه‌ی یک نوتريون که به سرعت نور از اتم دور می‌شود. فرض کنید الکترون گیرافتاده از اربیتال s باشد. در این صورت آرایش اتمی‌ی کلر حاصل چنین است:

$$1s^1 \ 2s^2 \ 2p^6 \ 3s^2 \ 3p^6. \quad (5)$$

این کلربه وضوح در یک حالت برانگیخته است (زیرا یکی از ترازها‌ی پایین اش ناکامل است، در عوض یکی از ترازها‌ی بالاتر اش کامل شده). چنین اتم برانگیخته‌ای با گسیل یک فتون می‌تواند به حالت پایه برود. فرض کنید الکترون از اربیتال $3s$ به اربیتال $1s$ برود. انرژی‌ی این دو تراز (در تقریب اتم هیدروژن‌گونه، یعنی با چشمپوشی از برهمکنش الکترون‌ها) هست

$$E_n = -\frac{1}{2} \left(\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0\hbar c} \right)^2 Z^2 m_e c^2 \frac{1}{n^2}, \quad (6)$$

که در اینجا $Z = 17$ تعداد پروتون‌ها‌ی هسته است. می‌بینیم

$$E_3 = -437 \text{ eV}, \quad E_1 = -3934 \text{ eV} \Rightarrow E_3 - E_1 = 3497 \text{ eV} \Rightarrow \lambda = 3.5 \text{ Å}. \quad (7)$$

یعنی این فتون در گستره‌ی پرتوها‌ی ایکس است.

یک احتمال دیگر هم هست: این که هنگامی که یک الکترون از یکی از ترازها‌ی بالا به اربیتال $1s$ می‌رود، بخشی از انرژی اش را به یک الکترون دیگر بدهد، و این الکترون دیگر از اتم کنده شود و به بیرون پرتاب شود. چنین الکترون‌ی را الکترون اُرژ (Auger) می‌نامند.

خلاصه: اگر یک اتم ^{37}Ar داشته باشیم، این احتمال هست که هسته‌ی آن با گیرانداختن یکی از الکترون‌ها‌ی اتم، تبدیل بشود به هسته‌ی ^{37}Cl ، و به این ترتیب اتم ^{37}Ar تبدیل می‌شود به اتم ^{37}Cl . اتم کلری که به دست می‌آید برانگیخته است. این اتم برانگیخته‌ی پرتوی ایکس می‌گسیلد، یا الکترون اُرژ. نیمه عمر ^{37}Ar ۳۵ روز است، که یعنی اگر N تا ^{37}Ar داشته باشیم، پس از ۳۵ روز برابر $N/2$ شان این اتفاق روی داده.

عکس واکنش را $\nu + ^{37}\text{Cl} \rightarrow ^{37}\text{Ar} + e^-$ می‌تواند روی بدهد، به این ترتیب که اگر نوتريون‌ی با انرژی‌ی بیش از 0.81 MeV به هسته‌ی ^{37}Cl بخورد، این احتمال هست که باعث شود یکی از نوتريون‌ها‌ی ^{37}Cl به پروتون تبدیل شود (که در این صورت هسته می‌شود ^{37}Ar) و یک الکترون هم آزاد شود. یعنی واکنش زیر

$$\nu + ^{37}\text{Cl} \rightarrow ^{37}\text{Ar} + e^- . \quad (8)$$

آرگون یک گاز بی اثر است، یعنی میل ترکیبی ای بسیار کمی با مواد دیگر دارد. فرض کنید این واکنش برای هسته ای یک ^{37}Cl که در یک ملکول است روی بددهد، (مثلاً ملکول C_2Cl_4)، آن وقت بر اثر این واکنش، آرگون ای که درست شده، با کامل شدن اربیتال‌ها یش، از ملکول خارج می‌شود. این اتم ^{37}Ar پس از گذشت زمان ای (با نیمه عمر ۳۵ روز) به ^{37}Cl می‌پاشد، و این ^{37}Cl برانگیخته با گسیل پرتوی ایکس، یا الکترون اُرژ، یا هر دو، به تراز پایه می‌رود. این پرتوها ایکس یا الکترون‌ها ای اُرژ را می‌توان آشکار کرد.

پس با مقدار ای ماده که داشته باشد می‌توان نوترینو را آشکار کرد. این ایده را نخستین بار فیزیک‌پیشه ایتالیایی، برونو پونته کرو در ۱۹۴۶ داد.

3 نوترینوها ای خورشیدی

خورشید کره ای است به شعاع $R_\odot = 7 \times 10^{26} \text{ m}$ که با توان $L_\odot = 3.6 \times 10^{26} \text{ W}$ تابش می‌کند. با استدلال‌ها یی نسبتاً ساده می‌توان قانع شد که منشاء این انرژی نمی‌تواند واکنش‌ها ای شیمیایی یا انقباض گرانشی باشد. در نیمه ای نخست سده ای بیستم، نظریه ای شکل گرفت که می‌گوید منشاء انرژی ای خورشید جوش هسته‌ای است (مقاله ای ۳ را ببینید). به مرور یک «مدل استاندارد خورشیدی» به وجود آمد که نظریه ای است در مورد ساختار خورشید. این مدل می‌گوید که دما (T)، چگالی (ρ)، فشار (P)، ترکیب شیمیایی (یعنی نسبت عناصر)، در هر نقطه از خورشید چه قدر است، و به علاوه، می‌گوید که در چه ناحیه ای از خورشید چه واکنش‌ها ای هسته‌ای ای روی می‌دهد. این مدل کاملاً کمی است، به این معنی که دقیقاً می‌گوید که در هر ثانیه چه واکنش‌ها یی و به چه تعداد در چه جاهایی از خورشید روی می‌دهد. این مدل همه ای خصوصیات ای را که از خورشید می‌بینیم به دقیق توصیف می‌کند.

در واکنش‌ها ای که در هسته ای خورشید روی می‌دهد، تعداد ای نوترینو هم آزاد می‌شود. عمده‌ترین فرایندها ای مولد نوترینو این‌ها است.

$p + p \rightarrow d + e^+ + \nu_e$	$E_\nu < 0.42 \text{ MeV}$
$p + e + p \rightarrow d + \nu_e$	$E_\nu = 1.44 \text{ MeV}$
$e + {}^7\text{Be} \rightarrow {}^7\text{Li} + \nu_e$	$E_\nu = 0.86 \text{ MeV (90\%)}, \quad 0.38 \text{ MeV (10\%)}$
${}^8\text{B} \rightarrow {}^8\text{Be}^* + e^+ + \nu_e$	$E_\nu < 15 \text{ MeV}$
${}^3\text{He} + p \rightarrow {}^4\text{He} + e^+ + \nu_e$	$E_\nu < 18.8 \text{ MeV}$

همان طور که می‌بینید، در بعضی از این فرایندها نوترینوها یی تک انرژی گسیل می‌شود (مثلاً در

واپاشی Be^7 ، و در بعضی دیگر نوترینوها یک طیف پیوسته‌ی انرژی دارند.

4 آشکارساز دیویس

آزمایش دیویس نخستین آزمایش‌ی بود که برخی از این نوترینوها خورشیدی را آشکار کرد. در عمق 1490 متری زمین، در معدن طلای همسنیک در ایالت داکوتای جنوی، وسیله‌ای که طرح آن را در شکل ۱ می‌بینید قرار داده شده است. این آشکارساز عبارت است از تانکی به ظرفیت 380 m^3 که از پرکلراتیلن (C_2Cl_4) پرشده است (قطر مقطع تانک 6.2 m و طول تانک 14.8 m است). این ماده همان ماده‌ای است که در خشک‌شویی از آن استفاده می‌شود. چگالی‌ی پرکلراتیلن 1.62 g/cm^3 است، و به این ترتیب 380 m^3 معادل است با 10^5 kg ماده. جرم ملکولی‌ی پرکلراتیلن 165.8 g/Mol است. به این ترتیب در این تانک $3.7 \times 10^6 \text{ Mol}$ یعنی 2.23×10^{30} ملکول پرکلراتیلن هست، یعنی $10^{30} \times 8.93 \text{ Atm}$ ، که از این تعداد، ۲۴.۲۳٪، یعنی 2.16×10^{30} تا هسته‌ی Cl^{37} است.

از نوترینوها خورشیدی، تنها آن‌ها بی‌ی که انرژی شان بیش از 0.81 MeV است، می‌توانند باعث واکنش $\nu + {}^{37}\text{Ar} + e^- \rightarrow {}^{37}\text{Cl}$ شوند. سطح مقطع این واکنش، که بسته‌گی به انرژی‌ی نوترینوی فرودی دارد، بسیار کوچک است (براً توضیح مختصری راجع به سطح مقطع واکنش، رجوع کنید به انتهاهای این مقاله). مثلاً اگر انرژی نوترینوی فرودی 10 MeV باشد، سطح مقطع این واکنش $1.4 \times 10^{-42} \text{ cm}^2$ است. این سطح مقطع‌ها را مدل استاندارد ذره‌های بنیادی به ما می‌گوید، مدل‌ی که با آزمایش‌های بسیار زیاد روی زمین با دقّت بسیار خوبی تأیید شده است. شار نوترینوها خورشیدی را مدل استاندارد خورشیدی به ما می‌دهد، مدل‌ی که در توصیف خورشید بسیار موفق بوده است.

اگر شار نوترینوها خورشیدی روی زمین (در یک انرژی‌ی خاص) $(E)\Phi$ باشد، و سطح مقطع برهم‌کنش فوق $(E)\sigma$ باشد، آهنگ روی دادن برهم‌کنش $(E)\sigma(E)\Phi$ است. به این ترتیب می‌توانیم حساب کنیم که آهنگ روی دادن برهم‌کنش فوق چه قدر است. چون در تانک آزمایش‌گاه دیویس $2.16 \times 10^{30} \text{ s}^{-1}$ هسته‌ی Cl^{37} هست، اگر این آهنگ $5 \times 10^{-36} \text{ s}^{-1}$ باشد، می‌شود 0.93 روی داد در هر روز. دیویس آهنگ 10^{-36} s^{-1} را 1 SNU نامیده است. مخفف Solar Neutrino Unit است.

$$1 \text{ SNU} := 10^{-36} \frac{\text{روی داد}}{\text{s}} \quad (9)$$

جدول - زیر از یکی از گزارش‌های دیویس در سال ۱۹۷۸ (مرجع ۱۰) برداشته شده.

واکنش	E/MeV	$\Phi/(\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1})$	σ/cm^2	$\Phi \sigma/\text{SNU}$
pp	۰ - ۰.۴۲	6.1×10^{10}	۰	۰
pep	۱.۴۴	1.5×10^8	1.54×10^{-45}	۰.۲۳
${}^7\text{Be}$	۰.۸۶	3.4×10^9	2.4×10^{-46}	۰.۸۰
${}^8\text{B}$	۰ - ۱۴	3.2×10^6	1.08×10^{-42}	۳.۴۶
${}^{15}\text{O}$	۰ - ۱.۷۴	1.8×10^8	6.6×10^{-46}	۰.۱۲
${}^{13}\text{N}$	۰ - ۱.۱۹	2.6×10^8	1.6×10^{-46}	۰.۰۴
$\sum \Phi \sigma = 4.65$				

می‌بینیم که دیویس انتظار داشته شار نوترون‌ها را خورشیدی 4.7 SNU باشد، که این معادل است با تقریباً 0.87 d^{-1} ذره در هر روز. خوب به این عددها دقّت کنید: دیویس انتظار داشته در تانک ی بـ حجم 380 m^3 پـر از پـرکلرواتیلن، بر اثر فـرود نـوترونـها رـ خـورـشـیدـیـ، با آـهـنـگ 0.87 d^{-1} اـتمـ ${}^{37}\text{Ar}$ تـولـيدـ شـودـ، و توـانـستـهـ اـینـ اـتمـها رـ بشـمرـدـ!

فرض کنید تعداد هسته‌ها ی ${}^{37}\text{Ar}$ در تانک $N(t)$ باشد. این N با گذشت زمان تغییر می‌کند. از یک طرف با آهنج ثابت $\alpha = 0.87 \text{ d}^{-1}$ زیاد می‌شود، از یک طرف با نیمه عمر $\tau = 35 \text{ d}$ کم می‌شود، یعنی

$$\frac{dN}{dt} = \alpha - \frac{N}{\tau}. \quad (10)$$

حل این معادله با شرط آغازین $N(0) = N_0$ هست

$$N(t) = N_0 e^{-t/\tau} + \alpha \tau (1 - e^{-t/\tau}). \quad (11)$$

آنکه $N(\infty) = \alpha \tau = 30$ باشد، پس از گذشت مدتی طولانی در مقایسه با τ (مثلاً ۱۵۰ تا ۲۰۰ روز) تعداد هسته‌ها ی ${}^{37}\text{Ar}$ در تانک ۳۰ تا خواهد بود. پس اکنون فرض کنید در ابتدا در تانک هیچ هسته ی ${}^{37}\text{Ar}$ نبوده باشد، و فرض کنید که بیش از ۱۵۰ روز صبر کرده باشیم. پس از این مدت، ۳۰ تا ${}^{37}\text{Ar}$ در ۶۱۵ تن پـرکـلـروـاتـیـلنـ هـستـ، کـهـ بـایـدـ آـنـ رـ جـداـ کـردـ وـ شـمرـدـ!

هر دیویس این بوده که توأسته این ۳۰ اتم آرگون را جدا کند. براوی این کار دیویس پیش از آزمایش مقداری ${}^{36}\text{Ar}$ که پـایـدارـ استـ بهـ تـانـکـ مـیـ اـفـزـاـیدـ (دقـتـ کـنـیدـ کـهـ تـنـهـ 0.34% آرگون یـ کـهـ در طبیعت یافت می‌شود ${}^{36}\text{Ar}$ است، $99.6\% {}^{40}\text{Ar}$ است). بعد، پـسـ اـزـ آـنـ کـهـ مـثـلاـ ۲۰۰ روز صبر کرد، ابتدا پـرکـلـروـاتـیـلنـ رـاـ باـ گـازـ هـلـیـمـ جـارـوـ مـیـ کـنـدـ، بـهـ اـینـ معـنـیـ کـهـ مـقـدـارـیـ گـازـ هـلـیـمـ رـاـ اـزـ ۲۰ رـوـزـنـهـ کـهـ درـ لـوـلـهـ اـیـ درـ وـسـطـ تـانـکـ تـعـبـیـهـ شـدـهـ اـنـدـ بـهـ تـانـکـ مـیـ دـمـدـ وـ گـازـ رـاـ اـزـ بالـاـیـ تـانـکـ جـمـعـ مـیـ کـنـدـ. آـهـنـگـ دـمـشـ حدـودـ 150 lit/s است، کـهـ بـاعـثـ تـلاـطـمـ درـ تـانـکـ مـیـ شـودـ. خـودـ

پرکلرواتیلن هم با پمپ‌ی در درون تانک جریان دارد (از پایین جمع می‌شود و به وسط تانک تزریق می‌شود). پس احتمال تماس آرگون با هلیم زیاد است، و به این ترتیب آرگون در هلیم حل می‌شود. دیویس گاز هلیم را جمع می‌کند. سپس گاز جمع آوری شده را سرد می‌کند و از نوعی ذغال عبور می‌دهد. در این فرایند، احتمال این که آرگون، که درشت‌تر از هلیم است، در ذغال گیر بیفتد زیاد است. دیویس بعد آرگون را از ذغال جدا می‌کند. در این مرحله، مقداری آرگون هست که عبارت است از تقریباً $30 \text{~T}_{\text{Ar}}^{37}$ و تعداد زیادی Ar^{36} که دیویس پیش از آزمایش در تانک گذاشته بود. مقدار Ar^{36} هر چند کم است، اما ماکروسکوپیک است (از مرتبه $10^{19} - 10^{17}$ تا). دیویس سپس این آرگون را در کپسول کوچکی (7~mm^2) در درون یک شمارندهٔ الکترون‌ها می‌گذارد و با شمردن الکترون‌ها از اُره (و پرتوها ای ایکس) می‌گذرد و با شمردن الکترون‌ها از اُره (و پرتوها ای ایکس) واپاشی می‌کند.

$$\text{Ar}^{37} \rightarrow \text{Cl}^{37*} + e_{\text{Auger/X-ray}}$$

خوب است به چند تا از جزئیات این آزمایش که خیلی هم مهم اند توجه کنیم. عددہایی که در زیر می‌آید از گزارش دیویس در 1968 است [6]: قاعده‌ای طی می‌شده روش‌ها ای آزمایش و این عددہا تغییر کردنند.

- تانک حاوی پرکلرواتیلن باید کاملاً مسدود باشد، تا هم آرگون‌ها ای توی تانک از تانک خارج نشوند، و هم آرگون ای از هوا وارد تانک نشود (این آرگون‌ها باعث می‌شوند نمونه ای که نهایتاً استخراج می‌شود رقیق شود). دیویس برا ای آن که از بسته بودن سیستم‌ها یش مطمئن شود، ابتدا تانک خالی را به پمپ‌ها ای خلاء وصل کرد و درون آن را خلاء کرد. در این هنگام بیرون تانک را پر از گاز هلیم کرد (به دری که در قسمت بالا ای شکل با عنوان gas tight door مشخص شده دقت کنید). در مسیر پمپ خلاء یک طیفسنج جرمی قرار داد و اتم‌ها ای هلیم را شمرد. به این ترتیب معلوم شد که هلیم با آهنگی کمتر از $10^{-6} \text{~cm}^3 \text{~s}^{-1}$ به درون تانک نشسته می‌کند. آرگون بزرگ‌تر است و آهنگ نشست کردن اش کمتر است. دیویس نتیجه گرفت که آهنگ نشست آرگون از هوا ای اطراف تانک به درون تانک کمتر از آن است که در زمانی حدود چند صد روز خللی در آزمایش به وجود آورد.

- در هنگام جارو کردن آرگون با هلیم، اطراف تانک به جای هوا حدود 20000 lit هلیم است.

- هلیمی که در تانک جریان می‌باید در خروج از تانک ابتدا تا 40°C سرد می‌شود تا پرکلرواتیلن اش جدا شود. بعد از رطوبت‌گیرها بی رد می‌شود تا آب یا پرکلرواتیلن ای در آن باقی نماند و باشد. بعد باز تا 77°C سرد می‌شود و از یک فیلتر ذغالی رد می‌شود تا آرگون اش در فیلتر جذب شود. هلیم دوباره به تانک برگردانده می‌شود. این کار با آهنگ 5~lit/s انجام می‌شود.

- اطراف تانک با آب پر می‌شود (به دری که در پایین با عنوان water tight door مشخص

شده دقّت کنید). این سپر آبی محافظ خوبی در برابر نوترون‌هاست. سریع است که از واپاشی‌هاست پرتوزا در مواد اطراف به وجود می‌آیند.

- برای اطمینان از کل فرآیند، دیویس دوکار می‌کند. یکی این که کمی Ar³⁶ در هلیمی که به تانک تزریق می‌شود حل می‌کند، و با سنجش آن چه استخراج می‌شود می‌بینند که با روش شدن سیستم استخراج، تعداد این Ar³⁶ ها در تانک به صورت نمایی کم می‌شود، طوری که وقتی سیستم در حال جارو شدن است، در تقریباً 1 شبانه روز بیش از 95٪ این آرگون از تانک خارج می‌شود. کار دیگری که دیویس می‌کند این است که در میان تانک (در لوله ای که به همین منظور تعییه شده) یک چشمی دیگری که دیویس می‌گذارد. به این ترتیب در تانک با آهنگی معلوم Ar³⁷ تولید می‌شود. پس از برداشتن چشمی دیگری، دوباره مقداری Ar³⁶ به سیستم اضافه می‌کند و سپس آرگون‌ها را جارو می‌کند.

- در پرکلرواتیلنی که سازنده ساخته است، مقادیری Kr و Xe هم هست. این‌ها هم همراه می‌شوند. باید این‌ها را با کروماتوگرافی گازی جدا کرد. به خصوص Kr⁸⁵ با نیمه عمر 10.8 سال بسیار مزاحم است.

دیویس آزمایش را راه انداخت و مدعی شد که در تانک اش، در هر روز 0.41 ± 0.06 واکنش روی می‌دهد! پیش از مقایسه این عدد با $d^{-1} = 0.87$ که بالاتر آمد، خوب است این را هم در نظر بگیریم که تنها نوترینوهاست خورشیدی نیستند که می‌توانند باعث این واکنش ($^{37}\text{Ar} + \nu_e \rightarrow ^{37}\text{Cl} + e$) شوند. نوترینوهاست که محصول واپاشی مواد پرتوزا در زمین هستند، و از آن مهمتر، نوترینوهاست که محصول برخورد پرتوهاست. کیهانی با جو زمین هستند هم می‌توانند همین کار را بکنند. با سنجش شار پرتوهاست کیهانی، می‌توان حساب کرد که $d^{-1} = 0.03 \pm 0.08$ از این آهنگ مال پرتوهاست کیهانی است. به این ترتیب، اگر به آزمایش دیویس اعتماد کنیم، معلوم می‌شود که شار نوترینوهاست خورشیدی $SNU = 0.07$ است. این تقریباً $\frac{1}{3}$ عددی است که انتظار داشتیم.

دیویس، با چند دهه اجرا این آزمایش، و روزبه روز دقیق تر کردن آن، توانست جامعه ای فیزیک را به مرور قانع کند که عدهای از آزمایش اش به دست آمده قابل اعتماد است. این کار بسیار مهمی بود، زیرا اگر به آزمایش دیویس اعتماد کنیم، باید به نحوی توضیح بدھیم که چرا شار نوترینوهاست ذره‌هاست بنیادی نتیجه می‌شود. یا باید مدل استاندارد خورشیدی را تغییر بدھیم، یا استاندارد ذره‌هاست بنیادی را. اکنون معلوم شده که آن چه باید تغییر کند مدل استاندارد ذره‌هاست بنیادی است، به این ترتیب که باید پذیرفت که نوترینوهاست ν_e ، ν_μ ، ν_τ ، جرم دارند، و این جرم به نحوی است که باعث می‌شود e^+ هایی که در خورشید تولید می‌شوند، وقتی به زمین می‌رسند $\frac{2}{3}$ شان تبدیل شده اند به e^- ، این را نوسان طعم نوترینو می‌گویند [12].

5 سطح مقطع - واکنش

فرض کنید هدف Cl^{37} در نقطه ای ثابت باشد و فرض کنید که ذرهای بی (مثلاً نوترینو) با شار Φ به سمت هدف بروند. شار یعنی تعداد پرتابه‌ها بی که در هر ثانیه از هر متر مربع می‌گذرند، پس واحد اش $\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$ است. برخورد این پرتابه‌ها با هدف گاه باعث بروز یک رویداد خاص می‌شود (مثلاً واکنش $\text{Ar} + e + \text{Cl}^{37} \rightarrow \text{Ar} + \nu_e$). فرض کنید P احتمال این باشد که پس از گذشت زمان T این واکنش خاص روی داده باشد. این P مناسب است با T و با Φ (به عبارت دیگر هر چه T و Φ بیشتر باشند، به همان نسبت احتمال این رویداد بیشتر می‌شود). پس آهنگ دادن این واکنش، یعنی $\frac{P}{T}$ (با واحد s^{-1}) مناسب است با Φ . ضریب تناسب باید از جنس سطح (با واحد m^2) باشد. این ضریب تناسب را سطح مقطع این واکنش خاص می‌گوییم.

$$P = \sigma \Phi T.$$

6 مراجع

متأسفانه درباره نوترینو و اخترفیزیک منابع چندانی به زبان فارسی نیست. توصیه‌ی من به خوانندگان مقاله‌های 1 و 2 و 3 است که ترجمه شان در مجله فیزیک چاپ شده است. کار دیویس مبتنی بوده بر محاسبه‌ای که جان باکال در مورد شار نوترینوها خورشیدی منتشر کرده بود [4] (دققت کنید که مقاله دیویس اصولاً شماره ۲ دوم از یک مجموعه دو مقاله‌ای است که شماره ۱ اش مقاله باکال است، و این دو مقاله به دنبال هم چاپ شده اند). مقاله‌های ۵ تا 8 که همه‌گی نوشته دیویس اند مقاله‌ها بی خواندنی اند. سخنرانی‌ی نیل دیویس [9] هم متنی بسیار خواندنی است که آن را می‌توانید در منزل گاه رسمی‌ی نیل (www.nobel.org) ببایدید. سُرایش‌ی از مقاله‌های ۵ تا 8 را می‌توانید در منزل گاه ۱۱ ببایدید. مقاله‌ی ۱۲ در این مورد است که چه طور ممکن است نوع نوترینوها بی که در خورشید تولید می‌شوند، هنگام پرواز در فضا تغییر کند.

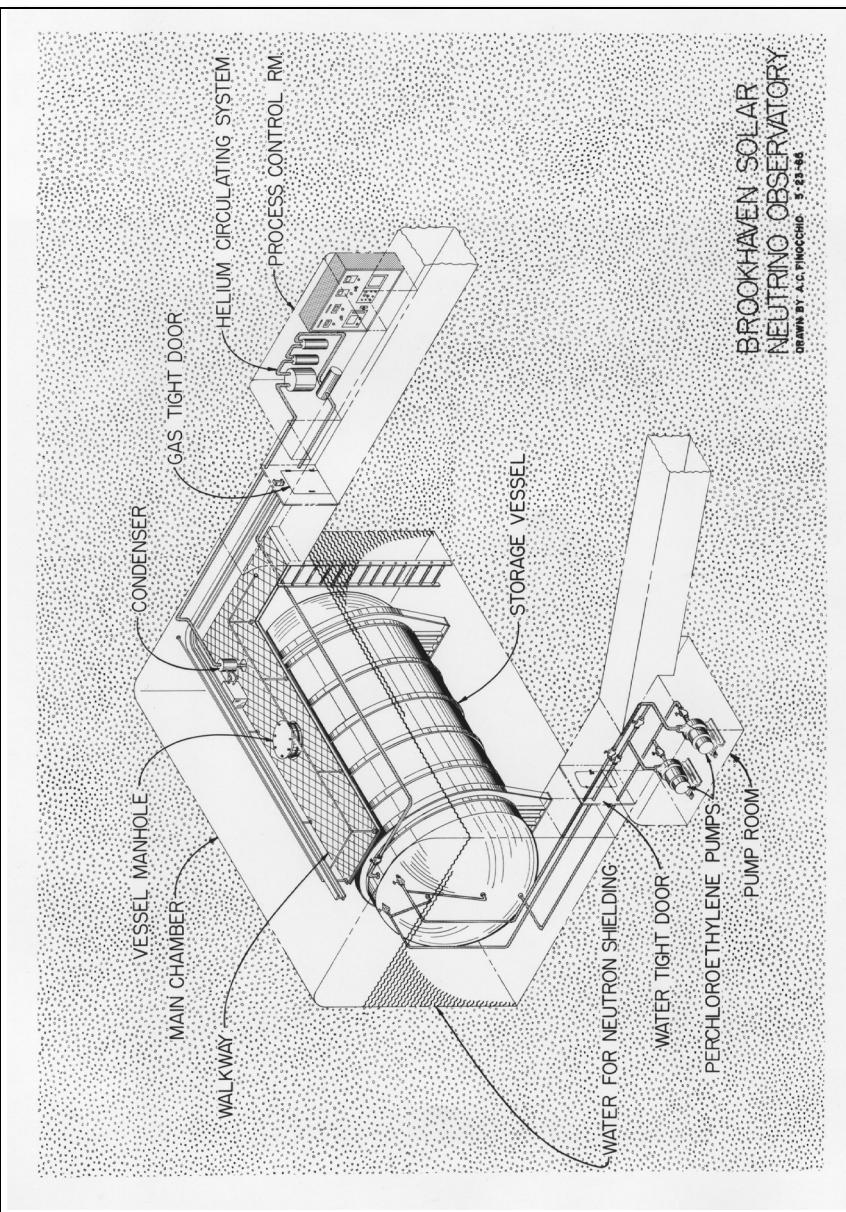
[1] Allan Franklin: "The Road to Neutrinos", *Physics Today*, Feb 2000, pp. 22-28

(مجله فیزیک، سال ۱۸، بهار و تابستان ۱۳۷۹، ص ۱۶ تا ۲۲)

[2] J. Steinberger: "What do we learn from Neutrinos?", *Science*, 26 Mar 1993, vol.

(مجله فیزیک، سال ۱۱، پاییز و زمستان ۱۳۷۲، ص ۷۴ تا ۸۰)

- [3] Martin Harwit “The Growth of Astrophysical Understanding”, *Physics Today*, Nov 2003, pp. 38-43. (۴۱ تا ۲۵ ص ۱۳۸۴، بهار و تابستان، مجله فیزیک)
- [4] John N. Bahcall “Solar Neutrinos. I. Theoretical”, *Physical Review Letters*, vol. 12, pp. 300 - 302 (1964)
- [5] R. Davis “Solar Neutrinos. II. Experimental” *Physical Review Letters*, vol. 12, pp. 303 - 305 (1964)
- [6] R. Davis “Search for Neutrinos from the Sun” *Physical Review Letters*, vol. 20, pp. ?? (1968)
- [7] R. Davis “Report on the Brookhaven Solar Neutrino Experiment”, *Brookhaven National Laboratory Report* BNL 12981, Sep 1976 (این را می‌توانید در ۱۱ پیدا کنید.)
- [8] R. Davis “A search for neutrinos from the Sun”,
- [9] R. Davis “A half-century with solar neutrinos”, Nobel Lecture, 8 Dec 2002
- [10] R. Davis “The Solar Neutrino Problem” *Brookhaven National Laboratory Report* BNL 24629, Apr 1978 (این را می‌توانید در ۱۱ پیدا کنید.)
- [11] <http://www.osti.gov/accomplishments/davis.html>
- [12] احمد شریعتی ”نوسان_طعم_نوترینو“، گاما، ش ۱، زمستان_۱۳۸۲، صص ۴۷ تا ۵۲



Courtesy of Brookhaven National Laboratory (USA)

عکس، با اجازه‌ی آزمایشگاه ملی‌ی بروکهون (آمریکا)