

کوارکها، لپتونها و انفجار بزرگ

۴۵-۱ زندگی در لبه تیغ



فیزیکدانان اغلب به نظریه‌های نسبیت و مکانیک کوانتومی به عنوان «فیزیک جدید» اشاره دارند تا آنها را از نظریه مکانیک نیوتونی و الکترومغناطیسی ماکسولی که روی هم «فیزیک کلاسیک» را تشکیل می‌دهند، متمایز کنند. همین‌طور که سالها می‌گذرد، لغت «جدید» برای نظریه‌هایی که مبانی آنها در اوایل قرن بیستم ارائه شده‌اند کمتر و کمتر مناسب به نظر می‌رسد. با این وجود، این عنوان همچنان به کار برده می‌شود.

در این فصل انتهایی دو خط واقعاً «جدید» از پژوهشها را مورد بررسی قرار می‌دهیم، که در عین حال دیرینه‌ترین ریشه‌ها را دارند. آنها روی دو پرسش کاملاً ماهرانه و ساده تمرکز دارند:

جهان از چه چیزی ساخته شده است؟

جهان چگونه به شکلی که هست درآمده است؟

پیشرفت در پاسخ دادن به این پرسشها در چند دهه اخیر سرعت زیادی داشته است.

چندین دیدگاه جدید وجود دارند که بر پایه آزمایشهایی که با شتابدهنده‌های بزرگ انجام شده است قرار دارند. اما همین‌طور که فیزیکدانان با به کار بردن شتابدهنده‌های بزرگتر و بزرگتر ذرات با انرژی بیشتر و بیشتر را به هم می‌کوبند، آنها فهمیده‌اند، هیچ شتاب دهنده‌ای روی زمین نمی‌تواند ذراتی را ایجاد کند که دارای انرژی

لازم برای آزمایش کردن نظریه‌های آنها باشد. فقط یک چشمه ذرات با این انرژیها وجود داشته است و آنها خود جهان در چند دقیقه اول پیدایش بوده است. «سوپ کوارکی» که جهان را در چند ثانیه اول ساعت کیهانی تشکیل می‌داد، پایه آزمایش غایی برای نظریه‌های فیزیک ذرات است!

در این فصل به شمار زیادی از اصطلاحهای جدید و انبوهی از ذرات واقعی برمی‌خورید که لزومی ندارد اسامی آنها را به خاطر بسپارید. اگر به طور گذرا سردرگم هستید، شما در سرگردانی فیزیکدانانی سهیم هستید که در میان این پیشرفت زندگی کردند و آنهايي که در طول زمان چیزی جز پیچیدگی بیشتر را ندیدید با این امید که کمی از آنها را درک کنند. با این وجود، اگر شما به این مطلب چسبیده‌اید، شما در هیجان فیزیکدانانی که اطلاعات حیرت آوری از شتابدهنده‌ها به دست آوردند سهیم هستید، در عین اینکه نظریه‌ها یکی پس از دیگری ماندنی ترند و بالاخره به روشنی موانع را پشت سر می‌گذارند.

شما بهتر است با دوباره خوانی بخش ۲-۹ که در آن ابتدا ذرات بنیادی در فیزیک را مورد بحث قرار دادیم شروع کنید.

۴۵-۲ ذرات، ذرات، ذرات

در سالهای ۱۳۰۹/۱۹۳۰ فیزیکدانان زیادی وجود داشتند که فکر می‌کردند مسئله غایی ساختار ماده در حال حل شدن است. اتم

این ذرات جدید معمولاً در برخورد رودرو بین پروتونها یا الکترونیهای ایجاد می‌شوند که در شتابدهنده‌هایی مثلاً در آزمایشگاه فرمی (نزدیک شیکاگو)، CERN (نزدیک ژنو)، SLAC (در استانفورد) و DESY (نزدیک هامبورگ آلمان) تا انرژیهای بالایی شتاب داده شده باشند. آنها با آشکارسازهای ذراتی کشف شده‌اند که تکامل زیادی یافته‌اند (به شکل ۴۵-۱ نگاه کنید) و از نظر اندازه و پیچیدگی فقط در حدود یک دهه رقیب خود شتابدهنده‌ها شده‌اند.

امروزه چند صد ذره شناخته شده وجود دارند. اسامی آنها از حروف یونانی گرفته شده است و اغلب فقط با شماره‌ای که در آثار انتشار یافته به آنها نسبت داده می‌شود شناخته می‌شوند. برای اینکه مفهومی از این دسته ذرات کسب کنیم، باید معیارهای فیزیکی ساده‌ای را جستجو می‌کنیم، که هر یک از آنها به ما امکان می‌دهد که هر ذره را در یکی از دو طبقه‌بندی قرار دهیم. می‌توانیم اولین تقریب جهت جداسازی بین ذرات را با حداقل سه روش زیر انجام دهیم.

فرمیون یا بوزن؟

تمام ذرات دارای اندازه حرکت زاویه‌ای ذاتی هستند که اسپین نامیده می‌شود و بحث آن برای الکترونها، پروتونها و نوترونها در بخش ۳۲-۴ انجام شد. با عمومیت دادن علایم آن بخش می‌توانیم مؤلفه اسپین S_z را در هر جهت (مثلاً جهت محور z) همانند زیر بنویسیم

$$S_z = m_s \hbar \quad (1-45) \quad \text{به ازای } m_s = s, s-1, \dots, -s$$

که در آن \hbar برابر $\frac{h}{2\pi}$ ، m_s عدد کوانتومی مغناطیسی اسپین و s عدد کوانتومی اسپین است. این آخری می‌تواند مقادیر نصف عدد صحیح $(\dots, \frac{3}{2}, \frac{1}{2})$ یا مقادیر صحیح $(\dots, 2, 1, 0)$ را داشته باشد. برای مثال، الکترون دارای اسپین $\frac{1}{2}$ است. از این رو، اسپین الکترون اندازه‌گیری شده در هر جهت می‌تواند دارای مقادیر زیر باشد

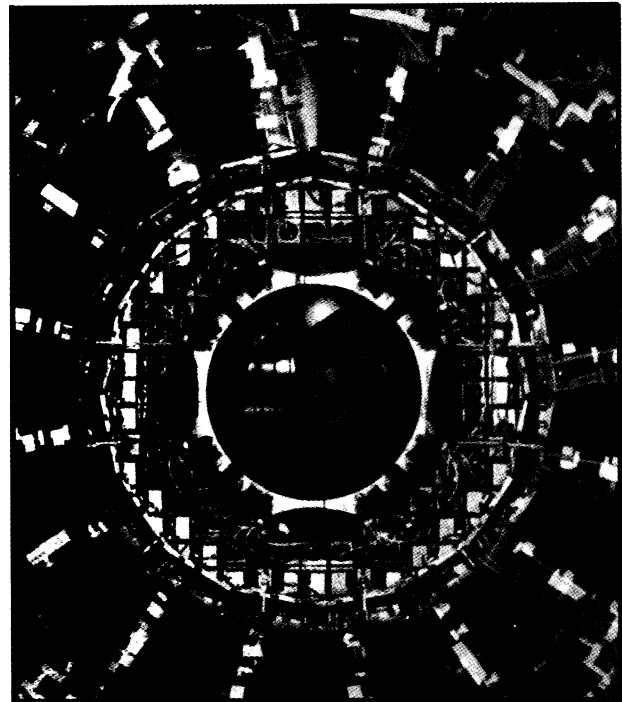
$$s_z = \frac{1}{2}\hbar \quad (\text{اسپین بالا})$$

$$s_z = -\frac{1}{2}\hbar \quad (\text{اسپین پایین})$$

به طور گمراه کننده‌ای، عبارت اسپین در واقع به دو روش به کار می‌رود: کاملاً به معنی اندازه حرکت زاویه‌ای ذاتی S_z ذره و گاهی به طور نادقیق به معنی عدد کوانتومی اسپینی s . برای مثال، در حالت

می‌تواند برحسب فقط سه ذره درک شود - الکترون، پروتون و نوترون. نظریه کوانتومی برای ساختار اتم و برای واپاشی پرتوزای آلفا خیلی مفید واقع شد. اگرچه نوترینو پیش‌بینی شد ولی تا آن موقع مشاهده نشده بود ولی توسط انریکو فرمی در نظریه موفق واپاشی بتا در نظر گرفته شده بود. این امیدواری وجود داشت که نظریه کوانتومی که برای پروتون و نوترون به کار برده شده بود خیلی زود برای ساختار هسته منظور شود. چه چیز دیگری در هسته وجود دارد؟

رضامندی دیری نپایید. پایان آن دهه شاهد آغاز دوره کشف ذرات جدید بود که تا به امروز ادامه دارد. ذرات جدید نامها و نمادهایی همانند میون (μ)، پیون (π)، کائون (K) و سیگما (Σ) دارند. تمام ذرات جدید ناپایدارند و حدود نیم عمر آنها از تقریباً 10^{-16} s تا 10^{-23} s است. این مقدار اخیر آن‌چنان کوچک است که وجود چنین ذراتی فقط به وسیله روشهای غیرمستقیم می‌تواند تأیید شود.



شکل ۴۵-۱ آشکارساز ذره OPAL (وسیله چند منظوره) در CERN آزمایشگاه اروپایی فیزیک ذرات با انرژی بالا در نزدیکی ژنو، سوئیس. OPAL برای اندازه‌گیری انرژی ذرات ایجاد شده در برخورد الکترون - پوزیترون در انرژی 50 GeV طراحی شده است. اگرچه این آشکارساز عظیم است (وزنی بالغ بر ۳۰۰۰ تن) اما نسبت به خود شتابدهنده با حلقه‌ای به پیرامون 27 km کوچک است.

می‌کنند و تمام مجموعه یک دستگاه کوانتومی منفرد می‌شود که **چگالش بوز - اینشتین** نام دارد. شکل ۴۵-۲ آن را نشان می‌دهد، وقتی دمای بخار روبیدیوم کاهش داده شود و تقریباً به $10^{-7} \times 10^7 \text{K}$ برسد، این دستگاه در واقع به یک حالت کاملاً مشخص منفرد مربوط به تقریباً تندی صفر برای اتمهای آن «می‌رمبد».

هادرون یا لپتون؟

ذرات را می‌توان بر حسب نیرویی که به آنها وارد می‌شود نیز طبقه بندی کرد. در بخش ۶-۵ (که ممکن است مایل به مطالعه مجدد آن باشید) در مورد چهار نیروی بنیادی شناخته شده بحث کردیم. **نیروی گرانشی** روی تمام ذرات عمل می‌کند اما اثر آن در سطح ذرات زیر اتمی آنچنان ضعیف است که نیازی به بررسی آن نیست (حداقل در پژوهشهای امروزی). **نیروی الکترومغناطیسی** روی ذرات باردار عمل می‌کند که اثر آن کاملاً شناخته شده است و هر وقت که نیاز داشته باشیم می‌توانیم آن را به حساب آوریم؛ ما عمده در این فصل از این نیرو چشمپوشی می‌کنیم.

باقی می‌ماند **نیروی قوی**، که نیرویی است که ذرات هسته‌ای را به یکدیگر پیوند می‌دهد و **نیروی ضعیف** که در واپاشی بتا و فرایندهای مشابه وارد می‌شود. **نیروی ضعیف** روی تمام ذرات و **نیروی قوی** فقط روی برخی از ذرات اثر می‌کنند.

می‌توانیم به طور تقریبی ذرات را بر پایه اعمال نیروی قوی به آنها طبقه بندی کنیم. ذراتی که نیروی قوی بر آنها وارد می‌شود هادرون نامیده می‌شوند. ذراتی که **نیروی قوی** بر آنها وارد نمی‌شود، و نیروی ضعیف نیروی غالب است لپتون نامیده می‌شوند. پروتونها، نوترونها و پیونها هادرون هستند؛ الکترونها و نوترینوها لپتون هستند. به زودی سایر اعضای هر طبقه را خواهید دید.

می‌توانیم بین هادرونها فرق بیشتری قائل شویم چون برخی از آنها بوزن (ما آنها را مزون می‌نامیم) هستند؛ پیون مثالی از این دست است. سایر هادرونها، فرمیون (ما آنها را باریون می‌نامیم) هستند؛ پروتون مثالی از این قبیل است.

دوم گفته می‌شود که الکترون یک ذره با اسپین $\frac{1}{2}$ - است.

ذرات با عددهای کوانتومی اسپینی نصف عدد صحیح (مثل الکترونها) فرمیون نامیده می‌شوند. این نامگذاری به پاس احترام به فرمی^۱ است، کسی که (به طور همزمان با پل دیراک) قوانین آماری حاکم بر رفتار آنها را کشف کرد. نظیر الکترونها، پروتونها و نوترونها نیز دارای $s = \frac{1}{2}$ هستند و فرمیون‌اند.

ذرات با عددهای کوانتومی اسپینی صحیح (یا صفر) بوزن نامیده می‌شوند، این نامگذاری به پاس احترام به فیزیکدان هندی ساتیندرانات بوز^۲، کسی که قوانین آماری حاکم بر این ذرات را کشف کرد، انجام شده است. فوتونها که $s = 1$ دارند، بوزن هستند. به زودی ذرات دیگری را که در این طبقه بندی قرار دارند مشاهده خواهید کرد.

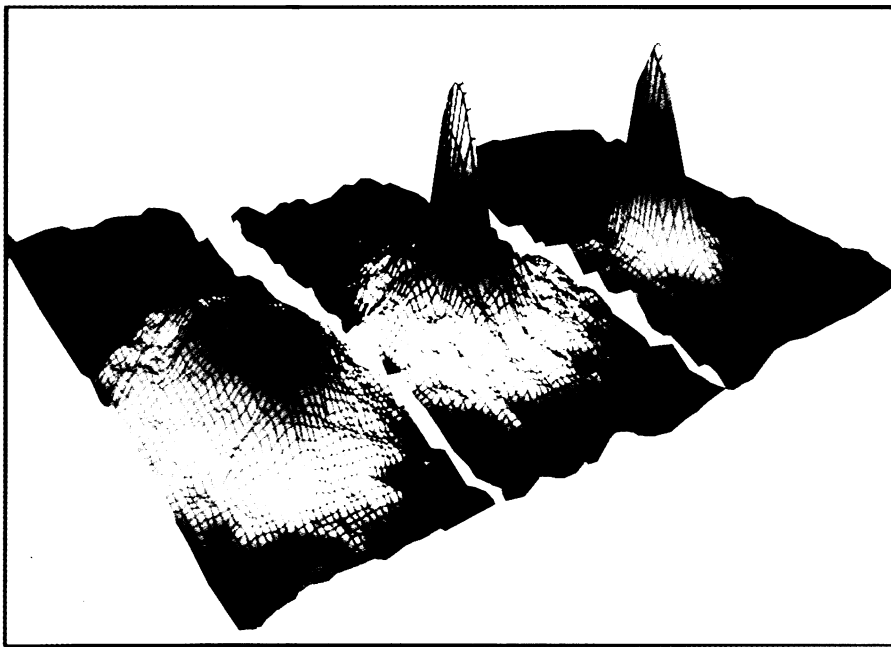
این ممکن است برای طبقه بندی ذرات یک راه سطحی به نظر آید اما این طبقه بندی به خاطر دلیل زیر بسیار مهم است:

فرمیونها از اصل طرد پائولی تبعیت می‌کنند و این حاکی از آن است که فقط یک ذره منفرد می‌تواند به یک حالت کوانتومی نسبت داده شود. بوزنها از این اصل تبعیت نمی‌کنند. هر تعداد بوزن می‌توانند به یک حالت کوانتومی نسبت داده شوند.

پس ایده‌ایم که اصل طرد پائولی در نسبت دادن (اسپین $\frac{1}{2}$ -) الکترونهای یک اتم به حالت‌های کوانتومی منفرد چقدر مهم است. انجام این امر به توصیف کامل ساختار و خواص اتمهای مختلف و جامداتی نظیر فلزات و نیمرساناها می‌انجامد.

چون بوزنها از اصل طرد پائولی تبعیت نمی‌کنند، این ذرات تمایل دارند در حالت کوانتومی با کمترین انرژی تجمع کنند. در سال ۱۹۹۵/۱۳۷۴ گروه بولدر در کلرادو موفق شدند تجمع ۲۰۰۰ اتم روبیدیوم ۸۷ را که بوزن هستند - در یک حالت کوانتومی منفرد و تقریباً با انرژی صفر، ایجاد کنند.

برای انجام این امر، روبیدیوم باید در حالت بخار و در دمای به حد کافی پایین و چگالی به حد کافی زیاد باشد تا طول موج دوبروی اتمهای مجزا بزرگتر از جدایی میانگین بین اتمها باشد. وقتی این شرایط برقرار شد، تابعهای موج اتمهای مجزا همپوشانی



(الف)

(ب)

(پ)

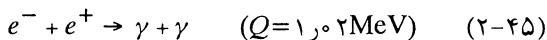
متمرکز شده است. یعنی، تمام اتمها در حالت کوانتومی یکسانی هستند. دستیابی به چنین چگالش بوز - اینشتین که اغلب جام مقدس فیزیک اتمی نامیده می‌شود، نهایتاً در سال ۱۹۹۵/۱۳۷۴ گزارش شد.

شکل ۴۵-۲ سه نمودار ایجاد شده رایانه‌ای از توزیع تندی ذرات در بخار اتمهای روبیدیم ۸۷. دما به طور پی در پی از نمودار (الف) به (ب) کاهش یافته است. نمودار (پ) قله تیزی را نشان می‌دهد که اطراف تندی صفر

ذره یا پاد ذره؟

یکدیگر را نابود کنند. یعنی دو (نوع) ذره ناپدید می‌شوند و انرژی ترکیبی آنها به شکل دیگری دوباره ظاهر می‌گردد. برای نابودی الکترون توسط پوزیترون، این انرژی دوباره به صورت دو فوتون پرتو گاما آشکار می‌شود

در سال ۱۹۲۸/۱۳۰۷ دیراک پیش‌بینی کرد که الکترون e^- باید همتایی با بار مثبت با همان جرم و اسپین داشته باشد. این همتا، پوزیترون e^+ است که در تابش کیهانی در سال ۱۹۳۲/۱۳۱۱ توسط کارل آندرسون کشف شد. سپس فیزیکدانان بتدریج دریافتند که هر ذره دارای یک پاد ذره وابسته است. اعضای چنین زوجهایی دارای جرمها و اسپینهای یکسان هستند ولی بارهایی با علامت مخالف (اگر باردار باشند) و علامتهای مخالف برای سایر عددهای کوانتومی دارند که هنوز بحث نکرده‌ایم.



اگر دو ذره در موقع نابود شدن ساکن باشند، سهم انرژی فوتونها یکسان است و برای پایداری اندازه حرکت و اینکه فوتونها نمی‌توانند ساکن باشند - آنها در جهتهایی خلاف هم به حرکت درمی‌آیند.

در ابتدا، ذره به ذرات معمولی مانند الکترونها، پروتونها و نوترونها و پاد ذره به همتاهای آشکار شده کمیاب آنها اطلاق می‌شد. برای ذراتی که کمتر معمول هستند نامگذاری ذره و پاد ذره به گونه‌ای انجام شد که با قوانین پایداری معینی که بعداً در این فصل مورد بحث قرار خواهند گرفت سازگار باشد. ما اغلب، اما نه همیشه، پاد ذره را با قراردادن یک خط افقی روی نماد مربوط به ذره نمایش می‌دهیم. به این ترتیب، p نماد پروتون و \bar{p} نماد پاد پروتون است.

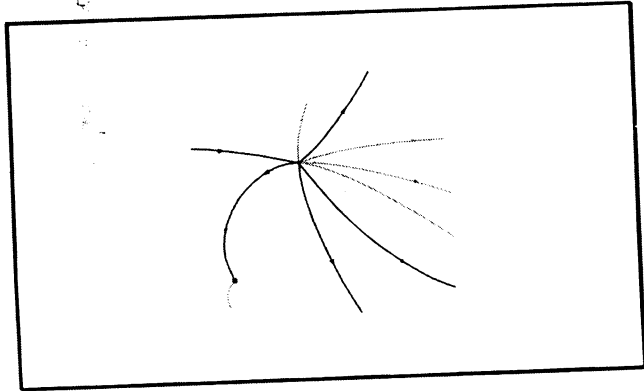
در سال ۱۹۹۶/۱۳۷۵ فیزیکدانان در CEREN برای چند نانو ثانیه زودگذر موفق به تولید معدودی اتم پاد هیدروژن شدند که هر کدام شامل یک پوزیترون و یک پادپروتون وابسته به هم بودند (درست مانند الکترون و پروتون اتم هیدروژن که وابسته به هم‌اند). چنین مجموعه‌ای از پاد ذرات پاد ماده نامیده می‌شود تا از مجموعه ذرات (ماده) قابل تشخیص باشند.

حدس زده می‌شود که کهکشانهایی از پاد ذره وجود دارند، به طور کامل با اتمها، مولکولها و حتی فیزیکدانان. حتی می‌توان فاجعه‌ای را در نظر گرفت که می‌تواند مثلاً از برخورد یک سیارک رها شده از این کهکشان و بخشی از زمین (در نتیجه نابودی) رخ دهد. ولی خوشبختانه دیدگاه فعلی این است که نه تنها کهکشان، بلکه

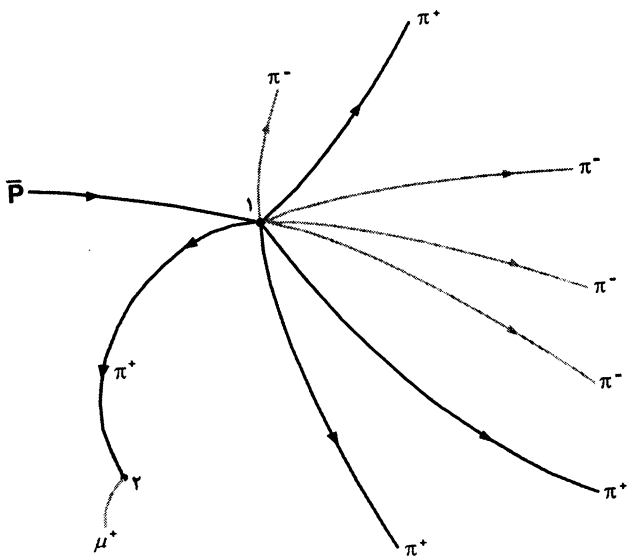
وقتی ذره‌ای با پاد ذره‌اش مواجه می‌شود، دو ذره می‌توانند

انجام می‌پذیرند.

رویداد شکل ۳-۴۵ الف به وسیله یک پاد پروتون \bar{p} پرنانرژی حاصل شده که در شتابدهنده‌ای در آزمایشگاه لورنس برکلین ایجاد و از سمت چپ وارد اتاقک شده است - سه زیر رویداد مجزا نیز وجود دارند؛ دو تا از آنها در نقاط ۱ و ۲ در شکل ۳-۴۵ ب رخ داده‌اند و سومی در خارج از چارچوب شکل داده است.



(الف)



(ب)

شکل ۳-۴۵ الف) تصویر اتاقک حباب از یک دسته رویدادها که به وسیله پاد پروتونی که از سمت چپ وارد اتاقک شده ناشی شده‌اند. (ب) برای وضوح بیشتر مسیرها دو مرتبه رسم شده‌اند. نقاط ۱ و ۲ بیانگر محل رویدادهای ثانویه خاصی است که در متن شرح داده شده‌اند. مسیرها منحنی شکل هستند چون میدان مغناطیسی حاضر در اتاقک یک نیروی منحرف کننده روی هر ذره متحرک اعمال می‌کند.

به طور کلی جهان به جای پاد ماده عمدتاً از ماده تشکیل شده است. (این فقدان تقارن باعث تشویش فیزیکدانانی شده بود که به طور معمول انتظار تقارن را در طبیعت داشتند.)

این بخش را با بیان اینکه اگر شما ذره جدیدی پیدا کردید، باید سه پرسش را مطرح کنید، جمع بندی می‌کنیم:

- این ذره فرمیون است یا بوزن؟
- این ذره لپتون است یا هادرون؟ اگر دومی است، آیا مزون است یا باریون؟
- آیا این ذره است یا پادذره؟

۳-۴۵ میان گفتار

پیش از اینکه روی امر خطیر طبقه بندی ذرات تاکید کنیم، برای لحظه‌ای به جای دیگری نظر می‌اندازیم و سرشت برخی پژوهشهای هسته‌ای را با تحلیل یک رویداد ذره نوعی بررسی می‌کنیم، مثل رویدادی که در عکس اتاقک حباب در شکل ۳-۴۵ الف نشان داده شده است.

مسیرها در این شکل جریانهایی از حبابهای تشکیل شده بر اثر ذرات باردار پرنانرژی هستند که در اتاقک پر شده از هیدروژن مایع حرکت می‌کنند. می‌توانیم ذره‌ای را که مسیر خاصی میان سایر مسیرها برجای می‌گذارد، با اندازه‌گیری فاصله نسبی بین حبابها شناسایی کنیم. یک میدان مغناطیسی برقرار شده در اتاقک، ذرات باردار مثبت را پادساعتگرد و مسیر ذرات باردار منفی را ساعتگرد منحرف می‌کند. با اندازه‌گیری شعاع انحنای مسیر، می‌توانیم اندازه حرکتی را که ذره آن را به وجود آورده است محاسبه کنیم. جدول ۱-۴۵ برخی خواص ذرات و پاد ذراتی را نشان می‌دهد که در رویداد شکل ۳-۴۵ الف حضور دارند. مطابق معمول، جرم ذرات فهرست شده در جدول ۱-۴۵ و تمام دیگر جدولهای این فصل را برحسب یکای MeV/c^2 بیان می‌کنیم. دلیل این امر این است که انرژی سکون ذره بیشتر از جرم آن مورد نیاز است. بنابراین، جرم پروتون نشان داده در جدول ۱-۴۵ برابر $938.3 \text{ MeV}/c^2$ است. برای پیدا کردن انرژی سکون پروتون این جرم را در c^2 ضرب می‌کنیم تا 938.3 MeV به دست آید.

ابزارهای ما برای تحلیل عبارت اند از قوانین پایستگی انرژی، اندازه حرکت، اندازه حرکت زاویه‌ای و بار، به همراه سایر قوانین پایستگی که تاکنون بحث نکرده‌ایم. شکل ۳-۴۵ الف یکی از جفت تصاویر سه بعدی است به طوری که در عمل این تحلیلها در سه بعد

جدول ۱-۴۵ ذرات یا پاد ذرات درگیر در رویداد شکل ۳-۴۵

پادذره	عمر میانگین ^۱ (s)	هویت	اسپین	جرم (MeV/c ^۲)	بار	نما	ذره
$\bar{\nu}$	پایدار	لپتون	$\frac{1}{2}$	۰	۰	ν	نوترینو
e^+	پایدار	لپتون	$\frac{1}{2}$	۰٫۵۱۱	-۱	e^-	الکترون
μ^+	2.2×10^{-6}	لپتون	$\frac{1}{2}$	۱۰۵٫۷	-۱	μ^-	میون
π^-	2.6×10^{-8}	مزون	۰	۱۳۹٫۶	+۱	π^+	پیون
p^-	پایدار	باریون	$\frac{1}{2}$	۹۳۸٫۳	+۱	p	پروتون

* عمر میانگین ($= 1/\lambda$) با نیم عمر $[\ln(2)/\lambda]$ تفاوت دارد؛ به معادله ۴۳-۸ نگاه کنید.

۱- نابودی پروتون - پاد پروتون. در نقطه ۱ در شکل ۳-۴۵، پاد پروتونی وارد شده محکم به پروتونهای هیدروژن مایع زده می شود و نتیجه نابودی متقابل است. می توانیم بگوییم که نابودی در حالی رخ می دهد که پاد پروتون فرودی در حرکت بوده است زیرا بیشتر ذرات ایجاد شده در برخورد به سمت جلو حرکت می کنند، یعنی به سمت راست در شکل ۳-۴۵. از اصل پایستگی اندازه حرکت خطی، پاد پروتون فرودی وقتی نابود می شود باید دارای اندازه حرکتی به سمت جلو بوده باشد.

انرژی کل مربوط به برخورد پاد پروتون و پروتون برابر حاصل جمع انرژی جنبشی پاد پروتون و دو انرژی سکون (یکسان) ذرات $2 \times 938.3 \text{ MeV}$ یا 1876.6 MeV است. این انرژی برای به وجود آوردن تعدادی ذره سبکتر و انرژی جنبشی دادن به آنها کافی است. در این حالت، نابودی چهار ذره پیون مثبت (مسیر پر رنگ) و چهار پیون منفی (مسیر کم رنگ) ایجاد می کند. (برای سادگی، فرض می کنیم که هیچ فوتون پرتوگامایی که به دلیل نداشتن بار الکتریکی مسیری از خود به جا نمی گذارد ایجاد نمی شود.) فرایند عبارت است از

$$p + p^- \rightarrow 4\pi^+ + 4\pi^- \quad (3-45)$$

۲- واپاشی پیون. پیونها ذرات ناپایدارند؛ پیونهای باردار با عمر میانگین $2.6 \times 10^{-8} \text{ s}$ واپاشی می کنند. در نقطه ۲ در شکل ۳-۴۵ ب یکی از پیونهای مثبت در اتاقک ساکن می شود و به طور خود به خود به یک پادمیون μ^+ (مسیر کم رنگ تر) و یک نوترینو و امی باشد

$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu \quad (4-45)$$

نوترینو که باری ندارد، مسیری بر جای نمی گذارد. هم پادمیون و هم نوترینو لپتون هستند؛ یعنی، آنها ذراتی هستند که نیروی قوی به آنها اعمال نمی شود. لذا فرایند واپاشی معادله ۴۵-۴، که نیروی ضعیف بر آن حاکم است، به صورت یک برهم کنش ضعیف بیان می شود. انرژی سکون پادمیون برابر 105.7 MeV است، پس انرژی

از جدول ۱-۴۵ می بینیم که پیونهای مثبت (π^+) ذره و پیونهای منفی (π^-) پادذره هستند. واکنش معادله ۳-۴۵ یک برهم کنش قوی است (با نیروی قوی چون تمام ذرات درگیر در واکنش هادرون هستند. توجه کنید که بار پایسته است. بار ذرات را می توانیم به صورت Q بنویسیم که Q عدد کوانتومی بار است. (این Q را با Q مربوط به

نمایش انرژی در واکنشهایی نظیر معادله ۲-۴۵ اشتباه نگیرید.) مقادیر Q برای برهم کنش معادله ۳-۴۵ عبارت اند از $4 \times (-1) + 4 \times (+1) = 0$ که به ما می گوید بار خالص پیش از برهم کنش و پس از آن صفر است. برای توازن انرژی، از بحث بالا به این نکته توجه کنید که انرژی قابل دسترس از فرایند نابودی $p-p$ حداقل حاصل جمع انرژی سکون پروتون و پاد پروتون یعنی 1876.6 MeV است. انرژی سکون پیون برابر 139.6 MeV است، لذا مقدار انرژیهای هشت پیون، $8 \times 139.6 \text{ MeV}$ یا 1116.8 MeV است. این مقدار انرژی قابل توجهی باقی می گذارد (حداقل حدود 760 MeV) که به صورت انرژی جنبشی بین هشت پیون توزیع می شود. پس الزام پایستگی انرژی به سادگی حاصل می شود.

از جدول ۱-۴۵ می بینیم که پیونهای مثبت (π^+) ذره و پیونهای منفی (π^-) پادذره هستند. واکنش معادله ۳-۴۵ یک برهم کنش قوی است (با نیروی قوی چون تمام ذرات درگیر در واکنش هادرون هستند. توجه کنید که بار پایسته است. بار ذرات را می توانیم به صورت Q بنویسیم که Q عدد کوانتومی بار است. (این Q را با Q مربوط به

آن $9s^{-1} \times 10^{-8}$ است. شدت باریکه کائون در وقتی که ذرات از سنکروترون اتاقک حباب حرکت می‌کردند با چه ضریبی کاهش می‌یافت؟

حل: انرژی جنبشی کائون با رابطه $38-33$ به انرژی سکون مربوط است

$$K = mc^2(\gamma - 1)$$

لذا عامل لورنتس γ برای کائون 5000 MeV برابر است با

$$\gamma = \frac{K}{mc^2} + 1 = \frac{5000 \text{ MeV}}{494 \text{ MeV}} + 1 = 11.1$$

نیم عمر τ این کائونهای متحرک در چارچوب آزمایشگاه به نیم عمر آنها در سکون با ضریب انقباض زمان (معادله $38-8$) به هم مربوطاند

$$\tau = \gamma \tau_0 = (11.1)(8.6 \times 10^{-9} \text{ s}) = 9.55 \times 10^{-8} \text{ s}$$

کائون باریکه اگر تقریباً با تندی نور حرکت کند در زمان τ در چارچوب آزمایشگاه مسافت زیر را طی می‌کند

$$L = c\tau = (3.0 \times 10^8 \text{ m/s})(9.55 \times 10^{-8} \text{ s}) = 28.7 \text{ m}$$

بنابراین، مسافت $L = 28.7 \text{ m}$ در چارچوب آزمایشگاه مربوط به نیم عمر کائون است و انتظار داریم که تعداد کائونهای باریکه در هر چنین طولی نصف شود. پس، در پایان فاصله حرکت 140 m ، تعداد کائونها در باریکه (و در نتیجه شدت باریکه) به کسر زیر نسبت به مقدار اولیه فقط به خاطر واپاشی ذره، کاهش می‌یابد

$$\left(\frac{1}{2}\right)^{(140/28.7)} = 0.34 \quad \text{یا} \quad 34\% \quad \text{(پاسخ)}$$

چنین اتلافی در باریکه - اگرچه خوشایند نیست - قابل قبول است. با این وجود، توجه کنید که اگر انقباض زمان نبود، باریکه به مقدار زیر نسبت به مقدار اولیه اش تضعیف می‌شد

$$\left(\frac{1}{2}\right)^{(140/28.7)(11.1)} \approx 5 \times 10^{-17}$$

(برای تأمل در این مطلب، دلایل ما را در بالا دوباره ملاحظه کنید.) لذا انقباض زمان شدت باریکه را با عامل تقریباً میلیون میلیارد افزایش می‌دهد.

$1.057 \text{ MeV} - 139.6 \text{ MeV}$ یا 33.9 MeV موجود است که به صورت انرژی جنبشی بین پادمیون و نوترینو تقسیم شود.

عدد کوانتومی اسپینی پیون صفر است و عددهای کوانتومی اسپینی برای پادمیون و همچنین برای نوترینو برابر $\frac{1}{2}$ است؛ بنابراین اندازه حرکت زاویه‌ای در معادله $45-4$ در صورتی پایسته است که اسپین پادمیون و نوترینو در خلاف جهت یکدیگر باشد (یکی باید اسپین بالا و دیگری اسپین پایین داشته باشد.)

$$0 = \frac{1}{2} \hbar + \left(-\frac{1}{2} \hbar\right)$$

معادله $45-4$ نیز نشان می‌دهد که بار پایسته است.

۳- واپاشی میون. میونها (چه μ^+ یا μ^-) نیز ناپایدارند، آنها با عمر میانگین $2.2 \times 10^{-6} \text{ s}$ واپاشی می‌کنند. پادمیون حاصل در واکنش معادله $45-4$ در چارچوب شکل $45-3$ که نشان داده نشده است، به حالت سکون درمی‌آید و بنابر معادله زیر خود به خود واپاشیده می‌شود



انرژی سکون میون برابر 105.7 MeV و انرژی سکون پوزیترون فقط برابر 511 MeV است و مقدار 2 MeV باقی می‌ماند که به صورت انرژی جنبشی بین سه ذره ایجاد شده در معادله $45-5$ تقسیم می‌شود.

ممکن است تعجب کنید: چرا دو نوترینو در معادله $45-5$ وجود دارند؟ چرا نه فقط یکی، همانند واپاشی پیون در معادله $45-4$ ؟ یک پاسخ این است که اعداد کوانتومی اسپینی پادمیون، پوزیترون و نوترینو هر یک برابر $\frac{1}{2}$ است؛ فقط با یک نوترینو، اندازه حرکت زاویه‌ای اسپینی در واپاشی پادمیون معادله $45-5$ نمی‌تواند پایسته باشد. دلیل دیگری را در بخش $45-4$ بحث خواهیم کرد.

مسئله نمونه ۴۵-۱

در سال $1964/1343$ بعضی از فیزیکدانان تجربی در آزمایشگاه ملی بروکهاون باریکه متمرکز شده کائون (K^-) را به کار بردند. کائون که انرژی جنبشی اش 5000 MeV بود و در سنکروترون واقع در آنجا تولید شده بود، با تندی نسبتی 140 m را از میان یک لوله باریک تخلیه شده عبور می‌کرد و به اتاقک حباب می‌رسید که در آنجا آزمایش انجام می‌گرفت.

انرژی سکون mc^2 کائون برابر 494 MeV و نیم عمر τ واپاشی

مسئله نمونه ۴۵-۲

یک پیون مثبت ساکن مانند آنچه که در معادله ۴۵-۴ شرح داده شد واپاشی می‌کند

$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu$$

انرژی جنبشی پادمیون μ^+ چقدر است؟ انرژی جنبشی نوترینو چقدر است؟

حل: از جدول ۴۵-۱ انرژیهای سکون پیون و پادمیون به ترتیب عبارت است از 139.6 MeV و 105.7 MeV . اختلاف بین این کمیتها باید به صورت انرژی جنبشی پادمیون و نوترینو ظاهر شود، یعنی $139.6 \text{ MeV} - 105.7 \text{ MeV} = 33.9 \text{ MeV} = K_\mu + K_\nu$ (۴۵-۶) چون پیون موقع واپاشی ساکن بوده است، از اصل پایستگی اندازه حرکت خطی باید داشته باشیم

$$P_\mu = P_\nu$$

که در آن P_μ بزرگی اندازه حرکت خطی پادمیون و P_ν همین کمیت برای نوترینو است. برای راحتی، رابطه بالا را به صورت زیر می‌نویسیم

$$(p_\mu c)^2 = (p_\nu c)^2 \quad (۷-۴۵)$$

معادله ۳۸-۳۷

$$(pc)^2 = K^2 + 2Kmc^2 \quad (۸-۴۵)$$

رابطه نسبیتی بین انرژی جنبشی K ذره و اندازه حرکت p آن را به دست می‌دهد. اگر این رابطه را برای معادله ۴۵-۷ به کار ببریم، داریم $K_\mu^2 + 2K_\mu m_\mu c^2 = K_\nu^2$ (۴۵-۹)

که در آن فرض می‌کنیم برای نوترینو $mc^2 = 0$ است. معادله ۴۵-۶ را برای K_ν حل می‌کنیم و سپس با جایگزینی این مقدار در معادله ۴۵-۹ و حل آن برای K_μ داریم

$$K_\mu = \frac{(33.9 \text{ MeV})^2}{(2)(33.9 \text{ MeV} + m_\mu c^2)} = \frac{(33.9 \text{ MeV})^2}{(2)(33.9 \text{ MeV} + 105.7 \text{ MeV})}$$

$$= 4.12 \text{ MeV} \quad (\text{پاسخ})$$

آنگاه انرژی جنبشی نوترینو، از معادله ۴۵-۶، برابر است با

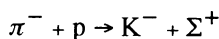
$$K_\nu = 33.9 \text{ MeV} - K_\mu = 33.9 \text{ MeV} - 4.12 \text{ MeV} = 29.8 \text{ MeV} \quad (\text{پاسخ})$$

می‌بینیم که، اگرچه بزرگی اندازه حرکت‌های دو ذره که با هم برخورد

کرده‌اند یکسان است اما نوترینو سهم بیشتری (۸۸٪) از انرژی جنبشی را کسب می‌کند.

مسئله نمونه ۴۵-۳

پروتونها در اتاقک حباب به وسیله پیونهای منفی پرنرزی بمباران می‌شوند و واکنش زیر رخ می‌دهد



انرژیهای سکون این ذرات عبارت اند از

π^-	139.6 MeV	K^-	493.7 MeV
p	938.3 MeV	Σ^+	1189.4 MeV

انرژی فروپاشی واکنش چقدر است؟

حل: انرژی فروپاشی با رابطه زیر داده می‌شود

$$Q = (m_\pi c^2 + m_p c^2) - (m_K c^2 + m_\Sigma c^2)$$

$$= (139.6 \text{ MeV} + 938.3 \text{ MeV})$$

$$- (493.7 \text{ MeV} + 1189.4 \text{ MeV})$$

$$= -6.5 \text{ MeV}$$

(پاسخ)

علامت منها به این معنی است که واکنش گرماگیر است. یعنی، اگر پروتون ساکن باشد، انرژی جنبشی پیون فرودی (π^-) باید از یک مقدار آستانه بیشتر باشد تا واکنش رخ دهد. انرژی آستانه بیشتر از 6.5 MeV است چون اندازه حرکت خطی باید پایسته باشد، که بدین معناست که کائون (K^-) و سیگما (Σ^+) نه تنها باید تولید شوند بلکه باید به آنها مقداری نیز انرژی جنبشی داده شود. محاسبه نسبیتی که جزئیات آن خارج از سطح ماست، نشان می‌دهد که انرژی آستانه برای پیون فرودی برابر 9.0 MeV است.

۴-۴۵ لپتونها

حالا توجه خود را روی برنامه طبقه‌بندی برای ذرات معطوف می‌کنیم. ابتدا به لپتونها می‌پردازیم، ذراتی که نیروی قوی به آنها وارد نمی‌شود.

تاکنون، به عنوان لپتون، ذرات آشنای الکترون و نوترینو را در نظر گرفتیم که در واپاشی بتا شرکت داشتند. میون، که واپاشی آن در معادله ۴۵-۵ شرح داده شد، عنصر دیگری از این خانواده است. فیزیکدانان بتدریج دریافته‌اند که نوترینو که در معادله ۴۵-۴ همراه با میون تولید می‌شود، ذره‌ای یکسان و همانند با نوترینویی که در واپاشی بتا، همراه با ظاهر شدن یک الکترون، تولید می‌شود نیست.

جدول ۲-۴۵ لپتونها^۱

پادذره	بار	جرم (MeV/c ²)	نماد	ذره	خانواده
e ⁺	-۱	۰٫۵۱۱	e ⁻	الکترون	الکترون
$\bar{\nu}_e$	۰	۰	ν_e	نوترینوی الکترون ^۲	
μ^+	-۱	۱۰۵٫۷	μ^-	میون	
$\bar{\nu}_\mu$	۰	۰	ν_μ	نوترینوی میون ^۲	میون
τ^+	-۱	۱۷۷۷	τ^-	تائو	
$\bar{\nu}_\tau$	۰	۰	ν_τ	نوترینوی تائو ^۲	تائو

۱ تمام لپتونها (شامل ذرات و پاد ذرات) دارای اسپین $\frac{1}{2}$ و پس فرمیون هستند.

۲ اگر جرم نوترینوها صفر نباشد، آنها خیلی کوچک اند. از سال ۱۹۹۶/۱۳۷۵ این پرسش مطرح است.

پایستگی عدد لپتونی

به هر یک از سه خانواده لپتونها در جدول ۲-۴۵، می توان یک عدد کوانتومی نسبت داد، عدد لپتونی: به هر ذره $L=+1$ و به هر پاد ذره $L=-1$ نسبت داده می شود. برای ذراتی از نوع دیگر (مانند پروتون) $L=0$ را نسبت می دهیم. این یک واقعیت تجربی است که، در تمام برهم کنش های ذره، عدد لپتونی برای هر خانواده لپتون به طور مجزا پایسته است. پس اعداد لپتونی L_e ، L_μ و L_τ وجود دارند که هر کدام از آنها باید در حین برهم کنش ذره بدون تغییر بمانند.

این مطلب را در بررسی مجدد فرایند واپاشی پادمیون معادله

۴۵-۵ نشان می دهیم و آن را کاملتر بازنویسی می کنیم

$$\mu^+ \rightarrow e^+ + \nu_e + \bar{\nu}_\mu \quad (۱۰-۴۵)$$

این معادله را ابتدا برحسب خانواده میون لپتونها بررسی می کنیم. این μ^+ یک پاد ذره است (به جدول ۲-۴۵ نگاه کنید) و در نتیجه دارای عدد لپتونی میون $L_\mu=-1$ است. دو ذره دیگر e^+ و ν_e به خانواده میون تعلق ندارند و در نتیجه دارای $L_\mu=0$ هستند. این بحث به این منجر می شود که ν_μ در سمت راست، که یک پاد ذره است دارای عدد لپتونی میون $L_\mu=-1$ نیز هست. بنابراین هر دو طرف معادله ۴۵-۱۰ دارای عدد لپتونی میون یکسان یعنی $L_\mu=-1$ هستند؛ اگر چنین نبود، μ^+ با این فرایند واپاشی نمی کرد.

هیچ عضوی از خانواده الکترون در سمت چپ معادله ۴۵-۱۰ ظاهر نشده است، پس عدد لپتونی الکترون باید $L_e=0$ باشد. در

وقتی که لازم است که اینها را از هم تشخیص دهیم، اولی را نوترینوی میون (با نماد ν_μ) و دومی را نوترینوی الکترون (با نماد ν_e) می نامیم.

معلوم شده است که این دو نوع نوترینو ذرات متفاوتی هستند. چون، اگر باریکه ای از نوترینوی میون (ایجاد شده از واپاشی بتا همانند معادله ۴۵-۴) بتواند به هدف جامدی برخورد کند، فقط میونها تولید می شوند - و هرگز الکترونها تولید نمی شوند. از طرف دیگر، اگر نوترینوی الکترون (ایجاد شده به وسیله واپاشی بتا از محصولات شکافت در یک راکتور هسته ای) به هدف جامدی برخورد کند فقط الکترونها تولید می شوند - و هرگز میونها تولید نمی شوند.

لپتون دیگر، تائو است که در SLAC در سال ۱۹۷۵/۱۳۵۴ کشف شده و کاشف آن، مارتین پرل^۱، در سال ۱۹۹۵/۱۳۷۴ جایزه نوبل فیزیک سهمیم شد. تائو دارای نوترینوی مربوط به خودش است که با دو تای دیگر متفاوت است. لپتونهای شناخته شده در جدول ۲-۴۵ فهرست شده اند. برای تقسیم شدن لپتونها به سه خانواده دلایلی وجود دارد، هر یک شامل ذره (الکترون، میون یا تائو) و نوترینوی مربوط به خود هستند. علاوه بر این، دلایلی وجود دارد تا باور کنیم که فقط سه خانواده لپتونهای نشان داده شده در جدول ۲-۴۵ وجود دارند. لپتونها دارای ساختمان داخلی قابل تشخیص و ابعاد قابل اندازه گیری نیستند، بر این باوریم که وقتی آنها با سایر ذرات یا امواج الکترومغناطیسی واکنش می کنند واقعاً یک ذره بنیادی شبه نقطه هستند.

به هر باریون $B=+1$ به هر پاد باریون $B=-1$ و به تمام ذرات از نوع دیگر $B=0$ را نسبت می‌دهیم. اگر در برهم کنش ذره‌ای عدد باریونی خالص تغییر کند، این برهم کنش نمی‌تواند رخ دهد.

پروتون یک باریون است، در حالی که پوزیترون و نوترینو باریون نیستند. بنابراین فرایند معادله $11-45$ نمی‌تواند رخ دهد چون این فرایند قانون پایستگی عدد باریونی را نقض می‌کند، یعنی

$$(0) + (0) \neq (+1)$$

پایستگی عدد باریونی برای توضیح اینکه بسیاری از واپاشیها و واکنشهای ذرات رخ نمی‌دهند در حالی که ممنوع هم نیستند عامل مفیدی است.

نکته واری ۲: این مُد واپاشی برای نوترون مشاهده نشده است

$$n \rightarrow p + e^-$$

این فرایند کدامیک از قوانین پایستگی زیر را نقض می‌کند: (الف) انرژی، (ب) اندازه حرکت زاویه‌ای (پ) اندازه حرکت خطی (ت) بار (ث) عدد لپتونی (ج) عدد باریونی؟ جرماً به قرار زیرند

$$m_p = 938.27 \text{ MeV}/c^2, \quad m_n = 939.57 \text{ MeV}/c^2$$

$$m_e = 0.511 \text{ MeV}/c^2 \quad \text{و}$$

مسئله نمونه ۴-۴۵

واپاشی در نظر گرفته شده برای یک پروتون ساکن مطابق طرح

$$p \rightarrow \pi^+ + \pi^+ \quad (\text{رخ نمی‌دهد!})$$

را با آزمون قوانین پایستگی مختلف تحلیل کنید.

(هر دو پيون، مزون با اسپین و عدد باریونی صفر هستند. انرژی سکون مزون π^0 برابر 135.0 MeV است.)

حل: بلافاصله می‌بینیم که بار پایسته است و اندازه حرکت خطی نیز به سادگی می‌تواند پایسته باشد. برای دومی تمام چیزی که لازم است این است که دو پيون از محل پروتون ساکن در دو جهت مخالف با اندازه حرکتهای یکسان حرکت کنند. علاوه بر این، عدد لپتونی به سادگی پایسته است چون عدد لپتونی هر یک از سه ذره در واپاشی برابر صفر است.

انرژی فروپاشی را می‌توان از تفاضل انرژی سکون ذرات به دست آورد

سمت راست معادله $10-45$ پوزیترون که یک پاد ذره است (دوباره به جدول $2-45$ نگاه کنید) دارای عدد لپتونی الکترون $L_e = -1$ است. نوترینوی الکترون ν_e که یک ذره است دارای عدد الکترونی $L_e = +1$ است. بنابراین عدد لپتونی خالص برای این دو ذره در سمت راست معادله $10-45$ نیز برابر صفر است؛ عدد لپتونی الکترون نیز پایسته است.

هیچ عضوی از خانواده تائو در هیچ سمت معادله $10-45$ ظاهر نشده است، پس در هر طرف باید داشته باشیم $L_e = 0$. بنابراین در حین فرایند واپاشی معادله $10-45$ هیچ یک از عددهای کوانتومی لپتون L_e ، L_μ و L_τ تغییر نمی‌کنند و مقدار ثابت آنها به ترتیب عبارت است از -1 ، 0 و 0 . این مثال نمایشی است از یک قانون کلی به نام پایستگی عدد لپتونی؛ این قانون برای تمام برهم کنشهای ذره‌ای برقرار است.

نکته واری ۱: (الف) مزون π^+ بنابر فرایند $\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu$ واپاشی می‌کند. این نوترینو به کدام خانواده لپتونها تعلق دارد؟ (ب) این نوترینو ذره است یا پاد ذره؟ (پ) عدد لپتونی آن چند است؟

۴۵-۵ یک قانون پایستگی دیگر

اکنون آمادگی بررسی هادرونها (باریونها و مزونها) را داریم، ذراتی که برهم کنشهای آنها با نیروی قوی صورت می‌پذیرد. شروع کار را با افزودن یک قانون پایستگی دیگر به فهرست خود انجام می‌دهیم:

پایستگی عدد باریونی

برای گسترش این قانون پایستگی، فرایند واپاشی پروتون را در نظر می‌گیریم

$$p \rightarrow e^+ + \nu_e \quad (Q = 937.8 \text{ MeV}) \quad (11-45)$$

این فرایند هرگز رخ نمی‌دهد. باید از این مطلب خوشحال باشیم چون در غیراین صورت تمام پروتونها در جهان بتدریج به پوزیترونها تغییر می‌کردند و ثمره آن فاجعه‌آمیز بود. با این وجود این فرایند هیچ کدام از قوانین پایستگی را که تا کنون بحث کرده‌ایم، از جمله پایستگی عدد لپتونی را نقض نمی‌کند.

با معرفی یک عدد کوانتومی جدید یعنی عدد باریونی B و یک قانون پایستگی جدید یعنی پایستگی عدد باریونی، پایداری ظاهری پروتون را در نظر می‌گیریم.

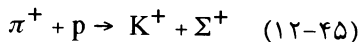
حل: ذره Ξ^- در سمت چپ معادله واپاشی کلی در جدول ۴۵-۲ که تمام لپتونها فهرست شده‌اند، ظاهر نمی‌شود، پس باید دارای عدد لپتونی صفر باشد. سمت راست معادله شامل هشت لپتون است، چهار تا در خانواده الکترون و چهار تا در خانواده میون. در هر خانواده، این لپتونها به صورت جفتهای ذره - پادذره با عددهای لپتونی با علامت مخالف رخ می‌دهند. بنابراین هر دو عدد لپتونی الکترون L_e و لپتونی میون L_μ خالص صفرند و لذا عددهای لپتونی پایسته‌اند.

(ت) در مورد اسپین ذره Ξ^- چه می‌توانید بگویید؟

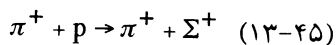
حل: تمام ذره سمت راست معادله واپاشی کلی ذراتی با اسپین $\frac{1}{2}$ هستند. نه مقدار $m_s = \pm \frac{1}{2}$ همیشه طوری ترکیب می‌شوند که حاصل نصف عدد صحیح باشد، البته بدون توجه به اینکه هر مؤلفه مجزای s_z را موازی یا پادموازی محور داده شده در نظر بگیریم. بنابراین عدد کوانتومی اسپین حاصل ذره Ξ^- باید نصف عدد صحیح باشد. (در واقع، عدد کوانتومی $\frac{1}{2}$ است؛ ذره Ξ^- به همراه سایر باریونهای با اسپین $\frac{1}{2}$ در جدول ۳-۴۵ فهرست شده‌اند.)

۴۵-۶ بازهم یک قانون پایستگی دیگر

ذرات علاوه بر خواصی که تاکنون برای آنها ذکر کردیم: جرم، بار، اسپین، عدد لپتونی و عدد باریونی، دارای خواص ذاتی نیز هستند. اولین این خواص اضافی وقتی نمایان شد که پژوهشگران مشاهده کردند که ذرات جدید معینی مانند کائون (K) و سیگما (Σ) به نظر می‌رسد که همیشه به صورت جفت تولید می‌شوند. به نظر غیرممکن می‌رسد که فقط یکی از آنها را در یک لحظه ایجاد کرد. بنابراین اگر باریکه‌ای از پيونهای پرنرژری در یک اتاقک حباب با پروتونها برهم کنش کنند، اغلب واکنش زیر رخ می‌دهد



واکنش زیر



که هیچ قانون پایستگی شناخته‌ای را در روزهای اولیه فیزیک ذرات نقض نمی‌کند، هرگز رخ نمی‌دهد. سرانجام پیشنهاد شد (به وسیله گلמן^۱ در آمریکا و به طور مستقل به وسیله نیشی جیما^۲ در ژاپن) که ذرات معینی دارای

$$Q = (m_p c^2) - (m_\pi c^2 + m_K c^2) \\ = (938.3 \text{ MeV}) - (135.0 \text{ MeV} + 493.6 \text{ MeV}) \\ = 663.7 \text{ MeV}$$

پن واقعیت که Q مثبت است نشان می‌دهد که بر پایه پایستگی انرژی این فرایند نمی‌تواند برقرار شود.

توجه داریم که هر دو پيون دارای اسپین صفر هستند. در حالی که پروتون دارای اسپین $\frac{1}{2}$ است. بنابراین اندازه حرکت زاویه‌ای پایسته نیست - این نقض دلیلی کافی است که فرایند نمی‌تواند رخ دهد.

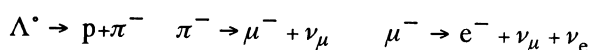
علاوه بر این، عدد باریونی پایسته نیست. برای پروتون داریم $B=+1$ و برای دو پيون داریم $B=0$. پس فرایند به طور مضاعف ممنوع است، دو تا از پنج قانون پایستگی نقض می‌شود.

مسئله نمونه ۴۵-۵

ذره‌ای که کیسای منفی نامیده شده و با نماد Ξ^- نشان داده می‌شود به صورت زیر واپاشی می‌کند

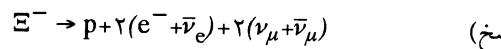


ذره Λ^0 (لاندا صفر نامیده می‌شود) و ذره π^- هر دو ناپایدارند. فرایندهای واپاشی زیر به طور پی‌درپی رخ می‌دهند تا فقط محصولهای پایدار باقی بمانند



(الف) نمای واپاشی کلی را برای ذره Ξ^- بنویسید.

حل: مطالعه معادله‌های واپاشی نشان می‌دهد که نمای واپاشی کلی عبارت است از



تمام محصولهای سمت راست این نمای واپاشی کلی پایدارند. توجه کنید که بار پایسته است، عدد کوانتومی بار خالص در هر طرف ۱- است.

(ب) ذره Ξ^- مزون است یا باریون؟

حل: پروتون در معادله کلی یک باریون است. تمام ذرات دیگر در سمت راست معادله دارای $B=0$ هستند. بنابراین، برای پایستگی عدد باریونی باید عدد باریونی ذره Ξ^- برابر با ۱ باشد. از این رو ذره باریون است. اگر ذره مزون می‌بود، باید عدد باریونی آن صفر می‌شد.

(پ) آیا عددهای لپتونی در نمای واپاشی کلی پایسته‌اند؟

۴۵-۷ راه هشتگانه

هشت باریون وجود دارند - از جمله نوترون و پروتون - که دارای عدد کوانتومی اسپینی $\frac{1}{2}$ هستند. جدول ۴۵-۳ برخی از خواص دیگر آنها را نشان می‌دهد. شکل ۴۵-۴ الف طرح مجذوب کننده‌ای را نشان می‌دهد که وقتی حاصل می‌شود که شگفتی این باریونها را در مقابل عدد کوانتومی بار آنها با به کاربردن محور موربی برای عددهای کوانتومی بار رسم کنیم. شش عدد از این هشت عدد تشکیل یک شش ضلعی را می‌دهند و دو باریون باقیمانده در مرکز آن قرار دارند.

اکنون نظر خود را از هادرونهايي که باریون نامیده می‌شوند به هادرونهايي که مزون نامیده می‌شوند معطوف می‌کنیم. نه مزون با اسپین صفر در جدول ۴۵-۴ آمده‌اند. اگر آنها را روی منحنی شگفتی - بار مورب نظیر شکل ۴۵-۴ ب رسم کنیم، همان شکل مجذوب کننده حاصل می‌شود! اینها و نمودارهای مربوط را راه هشتگانه می‌نامند^۱، که به طور مستقل در سال ۱۹۶۱/۱۳۴۰ توسط مورای گلמן در انستیتوی تکنولوژی ماساچوست و یوال نویمان در امپریال کالج لندن پیشنهاد شد. دو نقش شکل ۴۵-۴ بیانگر تعداد بیشتری از نقشهای متقارن است که در آن گروههایی از باریونها و مزونها می‌توانند نشان داده شوند.

تقارن نقش راه هشتگانه برای باریونها با اسپین $\frac{3}{2}$ (در اینجا نشان داده نشده است) شامل ده ذره است که در نقشی شبیه میله‌های چوبی بطری شکل در بازی بولینگ آرایش یافته‌اند. وقتی این نقش اولین بار پیشنهاد شد، نه عدد از چنین ذرات شناخته شده بودند؛ ولی میله نوک پیدا نبود. در سال ۱۹۶۲/۱۳۴۱ از نظریه و تقارن در نقش، گلמן بر اساس پیش‌بینی چنین گفت:

«باریونی با اسپین $\frac{3}{2}$ وجود دارد با بار ۱-، شگفتی ۳- و انرژی سکون در حدود ۱۶۸۰ MeV. اگر شما دنبال این ذره امگا منفی می‌گردید (که من این نام را برای آن پیشنهاد می‌کنم)، فکر می‌کنم آن را پیدا کنید.»

یک گروه از فیزیکدانان به سرپرستی نیکلای سامیوس^۲ از آزمایشگاه

خاصیت جدیدی هستند که شگفتی نامیده می‌شود، با عدد کوانتومی S مخصوص به خود و قانون پایستگی مخصوص به خود. (مواظب باشید که نماد S در اینجا را با اسپین اشتباه نگیرید.) نام شگفتی از این واقعیت برخاسته است که پیش از مشخص شدن ماهیت این ذرات، آنها به عنوان «ذرات شگفت» شناخته می‌شدند.

پروتون، نوترون و پیون دارای $S=0$ هستند؛ یعنی، آنها «شگفت» نیستند. ولی، پیشنهاد شد که ذره K^+ دارای شگفتی $S=+1$ و Σ^+ دارای $S=-1$ هستند. بنابراین شگفتی در معادله ۴۵-۱۲ پایسته است

$$(0) + (0) = (+1) + (-1) \quad (S \text{ مقدارهای})$$

اما در معادله ۴۵-۱۳ پایسته نیست

$$(0) + (0) \neq (0) + (-1) \quad (S \text{ مقدارهای})$$

واکنش ۴۵-۱۳ نمی‌تواند رخ دهد چون این معادله قانون پایستگی شگفتی را نقض می‌کند:

شگفتی در برهم کنشهای شامل نیروی قوی پایسته است.

ممکن است کمی سخت به نظر آید که خاصیت جدیدی را برای ذره در نظر بگیریم تا معمایی مشابه معمای معادله‌های ۴۵-۱۲ و ۴۵-۱۳ را حل کند. با این وجود، بزودی شگفتی و عدد کوانتومی آن خود را در سایر زمینه‌های فیزیک ذرات آشکار کردند، و امروزه شگفتی به عنوان یک ویژگی منطقی ذره، هم‌تراز با بار و اسپین، پذیرفته شده است. برای کسانی که ذرات را می‌شناسند و آنها را دوست دارند، شگفتی دیگر شگفت نیست.

با خصوصیت عجیب اسم گمراه نشوید. شگفتی دیگر بیش از خاصیت بار ذره اسرارآمیز نیست. هر دو خاصیتی از ذره هستند که ذرات ممکن است دارا باشند (یا نباشند) و هر یک به وسیله عدد کوانتومی مناسبی توصیف می‌شوند. هر یک از قانون پایستگی تبعیت می‌کنند. با این حال خواص دیگری از ذرات کشف شده‌اند و نامهای عجیب بیشتری به آنها داده شده است، همانند افسون و انتهای (ته‌ای)، اما همه آنها خواصی کاملاً منطقی هستند. حال به عنوان مثال مشاهده کنیم که چطور خاصیت جدید شگفتی به وسیله آشکار کردن نظم بسیار مهمی در خواص ذرات «موجودیت خود را حفظ کرد».

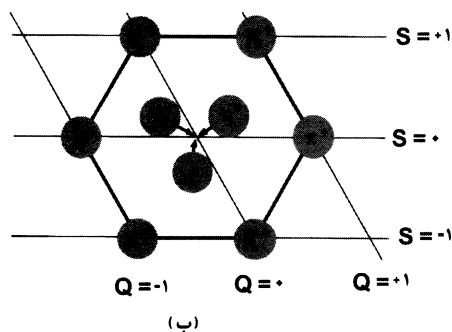
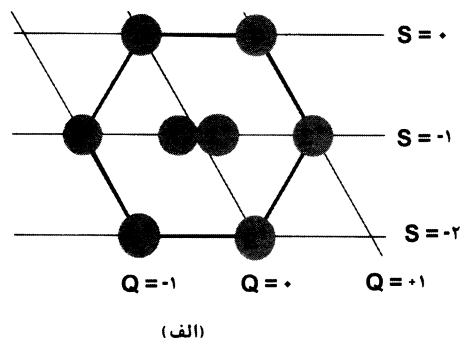
۱- عدد «هشت» به هشت عدد کوانتومی (فقط تعدادی از آنها در اینجا بحث شدند) اشاره دارد که در نظریه پایداری تقارن وارد می‌شوند و وجود نقشها را پیش‌بینی می‌کنند.

نقشهای راه هشتگانه همان رابطه‌ای را با فیزیک ذرات دارد که جدول تناوبی در شیمی دارد. در هر حالت، یک نقش سازماندهی وجود دارد که در آن جاهای خالی (ذرات یا عنصرهای گمشده) فوراً به چشم می‌خورند و باعث هدایت پژوهشگران در پژوهشهای آنها می‌شود. در مورد جدول تناوبی، قویاً وجود این مطلب را پیشنهاد می‌کند که اتمهای عناصر ذرات بنیادی نیستند بلکه دارای ساختار درونی هستند. به همین ترتیب، نقشهای راه هشتگانه قویاً پیشنهاد می‌کند که مزونها و باریونها باید دارای ساختار درونی باشند که بر حسب این ساختارها می‌توان خواص آنها را درک کرد. این ساختار **الگوی کوارک** است، که اکنون درباره آن بحث می‌کنیم.

۴۵-۸ الگوی کوارک

در سال ۱۹۶۴/۱۳۴۳ گل‌مان و جورج تسوایگ به طور مستقل اشاره کردند که اگر مزونها و باریونها از زیر واحدهایی ساخته شده باشند که گلمن آنها را **کوارک** نامید نقشهای راه هشتگانه را می‌توان به راه ساده‌ای درک کرد. ابتدا سه عدد از آنها را بررسی می‌کنیم که **کوارک بالا** (نماد u)، **کوارک پایین** (نماد d)، و **کوارک شگفت** (نماد s) نامیده می‌شوند و به آنها خواصی را نسبت می‌دهیم که در جدول ۴۵-۵ نشان داده شده‌اند. (معنی کوارکها، به همراه نامهایی که به سه کوارک دیگر داده شده‌اند بعداً خواهیم دید که هیچ معنی ندارند و فقط نامهای قراردادی هستند. در جمع، این نامها را **طعم کوارک** می‌نامند. (نام هر یک از شش نوع کوارک). می‌توانیم به جای بالا، پایین و شگفت آنها را بستنی وانیلی، شکلاتی و توت فرنگی بنامیم.

ملی بروکلین با تلاش بسیار این ذره «گمشده» را پیدا کرد و تمام خواص پیشبینی شده آن مورد تأیید قرار گرفت. هیچ چیز نمی‌تواند به تأیید تجربی به موقع برای ایجاد اعتماد به یک نظریه ضربه بزند.



شکل ۴۵-۴ (الف) نقش راه هشتگانه برای هشت باریون با اسپین $\frac{1}{2}$ که در جدول ۴۵-۳ فهرست شده‌اند. ذرات به صورت قرصهایی روی نمودار شگفتی - بار نشان داده شده‌اند، محور مورب برای عدد کوانتومی بار به کار برده شده است. (ب) نقش مشابهی برای نه باریون با اسپین صفر که در جدول ۴۵-۴ فهرست شده‌اند.

جدول ۴۵-۳ هشت باریون با اسپین $\frac{1}{2}$

ذره	نماد	جرم (MeV/c ²)	بار	شگفتی
پروتون	p	۹۳۸٫۳	+۱	۰
نوترون	n	۹۳۹٫۶	۰	۰
لاندا	Λ^0	۱۱۱۵٫۶	۰	-۱
سیگما	Σ^+	۱۱۸۹٫۴	+۱	-۱
سیگما	Σ^0	۱۱۹۲٫۵	۰	-۱
سیگما	Σ^-	۱۱۹۷٫۳	-۱	-۱
کیسا	Ξ^0	۱۳۱۴٫۹	۰	-۲
کیسا	Ξ^-	۱۳۲۱٫۳	-۱	-۲

جدول ۴-۴۵ نه مزون با اسپین صفر^۱

ذره	نماد	جرم (MeV/c ^۲)	اعداد کوانتومی	
			بار	شگفتی
پیون	π^0	۱۳۵٫۰	۰	۰
پیون	π^+	۱۳۹٫۶	+۱	۰
پیون	π^-	۱۳۹٫۶	-۱	۰
کائون	K^+	۴۹۳٫۷	+۱	+۱
کائون	K^-	۴۹۳٫۷	-۱	-۱
کائون	K^0	۴۹۷٫۷	۰	+۱
کائون	\bar{K}^0	۴۹۷٫۷	۰	-۱
اتا	η	۵۴۷٫۵	۰	۰
اتاپریم	η'	۹۵۷٫۸	۰	۰

^۱ تمام مزونها و باریونها دارای اسپینهای ۰، ۱، ۲، هستند.

عددهای کوانتومی کسری بار کوارکها ممکن است شما را یک کمی تکان دهد. به هر حال تا موقعی که ببینید با چه ظرافتی این بارهای کسری برای مشاهده عددهای بار صحیح مزونها و باریونها دخیل هستند زود قضاوت نکنید. کوارکها (تا کنون) به طور مجاب کننده‌ای در آزمایشگاه به عنوان یک ذره آزاد مشاهده نشده‌اند، و نظریه پردازان با دلایلی ظاهراً قابل قبول علت اینکه چرا چنین وضعی وجود دارد را بیان کرده‌اند. در هر رویدادی، الگوی کوارکی چنان مفید است که شکست در مشاهده کوارک آزاد سدی را برای پذیرش جهانی الگوی کوارکی برای فیزیکدانان ایجاد نکرده است.

دیده‌ایم که چطور می‌توانیم با ترکیب الکترونها و هسته‌ها، اتمها را در کنار هم قرار دهیم. حال ببینیم که چطور با ترکیب کوارکها می‌توانیم مزونها و باریونها را در کنار هم قرار دهیم. پیشاپیش اعلام می‌کنیم که در آینده این موفقیت کامل خواهد شد. یعنی، ذرات از کوارکهای بالا، پایین و شگفت تشکیل شده‌اند.

مزون یا باریون شناخته شده‌ای وجود ندارد که خواص آن نتواند برحسب ترکیب مناسبی از کوارکها قابل درک باشد. برعکس، هیچ ترکیب کوارکی ممکن نیست که وجود ندارد که مربوط به مزون یا باریون مشاهده شده‌ای نباشد.

ابتدا نگاهی به باریونها می‌اندازیم.

جدول ۴-۴۵ کوارکها^۱

ذره	نماد	جرم (MeV/c ^۲)	عددهای کوانتومی			پادذره
			بار Q	شگفتی S	عدد باریونی B	
بالا	u	۵	$+\frac{2}{3}$	۰	$+\frac{1}{3}$	\bar{u}
پایین	d	۱۰	$-\frac{1}{3}$	۰	$+\frac{1}{3}$	\bar{d}
افسون	c	۱۵۰۰	$+\frac{2}{3}$	۰	$+\frac{1}{3}$	\bar{c}
شگفتی	d	۲۰۰	$-\frac{1}{3}$	-۱	$+\frac{1}{3}$	\bar{d}
بالا	t	$\approx 180,000$	$+\frac{2}{3}$	۰	$+\frac{1}{3}$	\bar{t}
ته	b	۴۳۰۰	$-\frac{1}{3}$	۰	$+\frac{1}{3}$	\bar{b}

^۱ تمام کوارکها دارای اسپین $\frac{1}{2}$ و بنابراین فرمیون هستند. عددهای کوانتومی S، Q و B برای پادکوارکها مخالف عددهای کوانتومی برای کوارکهای مربوط است.

کوارکها و باریونها

نوترون دارای ترکیب کوارکی udd است و عدد کوانتومی بار آن برابر است با

$$Q(udd) = \left(\frac{2}{3}\right) + \left(-\frac{1}{3}\right) + \left(-\frac{1}{3}\right) = 0$$

ذره Σ^- (سیگمای منفی) دارای ترکیب کوارکی dds و عدد کوانتومی بار آن برابر است با

$$Q(dds) = \left(-\frac{1}{3}\right) + \left(-\frac{1}{3}\right) + \left(-\frac{1}{3}\right) = -1$$

عددهای کوانتومی شگفتی به همین ترتیب برقرارند. با به کار بردن جدول ۳-۴۵ برای Σ^- و جدول ۵-۴۵ برای کوارکها این نتیجه را واریسی کنید.

کوارکها و مزونها

مزونها جفتهای کوارک - پادکوارک هستند؛ ترکیب آنها در شکل ۵-۴۵ ب داده شده است و با این واقعیت که اسپین تمام مزونها نشان داده شده در شکل ۴-۴۵ ب و جدول ۴-۴۵ صفر هستند، توافق دارد. هم کوارک و هم پاد کوارک دارای $s = \frac{1}{2}$ هستند، پس دو ذره‌ای که مزون را تشکیل می‌دهند باید دارای اسپینهای مخالف باشند تا اینکه اسپین صفر را برای مزون به دست دهند.

الگوی کوارک - پاد کوارک همچنین با این واقعیت که مزونها، باریون نیستند سازگار است؛ یعنی، مزونها دارای عدد باریونی $B = 0$ هستند. عدد باریونی برای کوارک برابر $\frac{1}{3}$ + و برای پادکوارک برابر $-\frac{1}{3}$ است؛ بنابراین ترکیب عددهای باریونی در مزون برابر صفر است.

مزون π^+ را در نظر بگیرید، که از یک کوارک بالای u و یک کوارک پاد پایین \bar{d} ساخته شده است. از جدول ۵-۴۵ می‌بینیم که عدد کوانتومی بار کوارک بالا برابر $\frac{2}{3}$ + و عدد کوانتومی بار کوارک پاد پایین برابر $\frac{1}{3}$ + است (علامت مخالف علامت کوارک پایین است). این به خوبی منجر به عدد کوانتومی بار +۱ برای π^+ می‌شود. پس

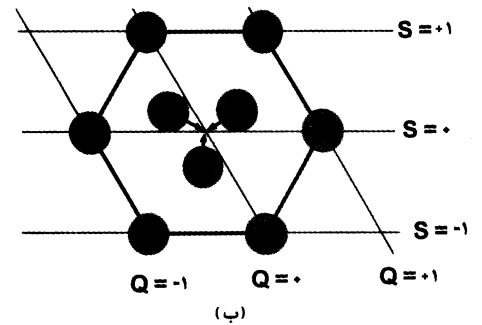
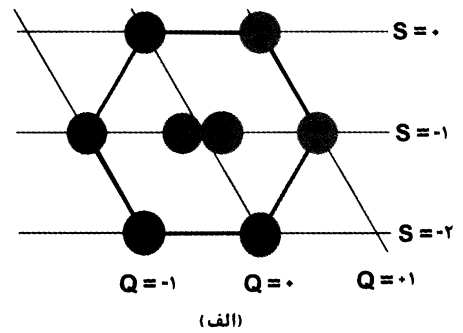
$$Q(u\bar{d}) = \left(\frac{2}{3}\right) + \left(\frac{1}{3}\right) = +1$$

تمام عددهای کوانتومی بار و شگفتی شکل ۵-۴۵ ب با تمام عددهای جدول ۴-۴۵ و شکل ۴-۴۵ ب توافق دارند. خود را قانع کنید که تمام ترکیبهای ممکن بالا، پایین و شگفت کوارک - پاد کوارک به کار برده شده‌اند و اینکه تمام مزونها با اسپین صفر شناخته شده در اینجا به حساب آمده‌اند. همه چیز سر جای خود است.

هر باریون ترکیبی از سه کوارک است؛ این ترکیبها در شکل ۵-۴۵ الف داده شده‌اند. با توجه به عدد باریونی، می‌بینیم که هر سه کوارک (هر یک با $B = +\frac{1}{3}$) یک باریون مناسب (با $B = +1$) را به دست می‌دهند. اسپینها نیز برقرارند. سه عدد کوانتومی اسپینی $\frac{1}{2}$ را که به کار بریم، می‌توانیم آنها را طوری قرار دهیم که دوتای آنها موازی و دیگری پادموازی باشد. این به اسپین خالص $s = \frac{1}{2}$ می‌انجامد که عدد کوانتومی اسپینی تمام باریونهاست که در جدول ۳-۴۵ و شکل ۴-۴۵ الف نشان داده شده‌اند.

بارها نیز، به طوری که از سه مثال می‌توانیم ببینیم، برقرارند. پروتون دارای ترکیب کوارکی uud است، پس عدد کوانتومی بار آن برابر است با

$$Q(uud) = \left(\frac{2}{3}\right) + \left(\frac{2}{3}\right) + \left(-\frac{1}{3}\right) = +1$$

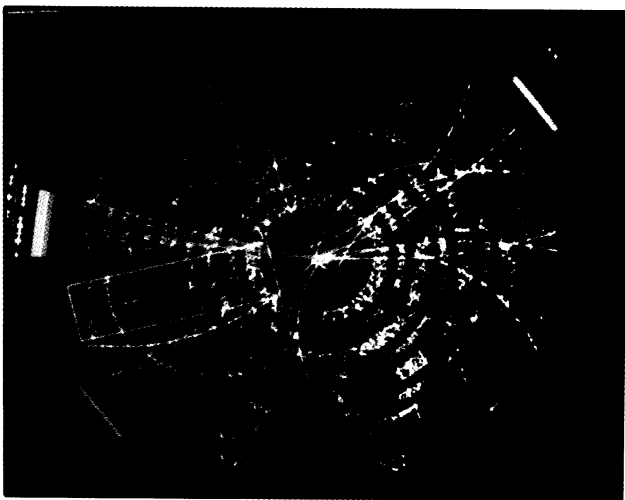


شکل ۵-۴۵ الف) ترکیبهای هشت باریون با اسپین $\frac{1}{2}$ در شکل ۴-۴۵ الف رسم شده است. (اگرچه دو باریون مرکزی دارای سهم یکسانی در ساختار کوارک هستند، سیگما یک حالت برانگیخته لاندست که با تابش فوتون پرتو گاما به لاندای و امی باشد.) (ب) ترکیبهای کوارکی نه مزون با اسپین صفر در شکل ۴-۴۵ ب رسم شده است.

بود، که ساختار کوارکی آن $\bar{c}c$ است. این ذره در سال ۱۹۷۴/۱۳۵۳ توسط گروهی به ریاست ساموئل تینگ^۱ در آزمایشگاه ملی بروکلین و بورتون ریشر^۲ در دانشگاه استنفورد به طور همزمان و به طور مستقل کشف شد.

تمام تلاشها برای تولید کوارک سر تا سال ۱۹۹۵/۱۳۷۴ بی نتیجه بود، در این سال بالاخره وجود آن در تواترون، شتابدهنده ذرات سنگین در آزمایشگاه فرمی، به نمایش درآمد. در این شتابدهنده پروتونها و پاد پروتونها، هر یک با انرژی $(=9 \times 10^{11} \text{ eV})$ 9 TeV به مراکز دو ذره بزرگ آشکارساز برخورد می کنند. در موارد بسیار کمی، پروتونهای فرودی جفت کوارک سر - پادسر ($\bar{t}t$) را ایجاد می کنند، که فوراً به ذراتی با انرژی پایینتر و امی پاشند. شکل ۴۵-۶ نموداری رایانه ای را از مسیرهایی که این محصولات واپاشی ایجاد می کنند نشان می دهد. وجود جفت کوارک سر - پادسر با تحلیل دقیق این «آثار به جا مانده» استخراج می شود. کشف کوارک سر پس از چنان تلاشهایی به عنوان پیروزی برای کل دیدگاه کوارک - لپتون فیزیک ذرات به حساب می آید.

برای لحظه ای به جدول ۴۵-۵ (خانواده کوارک) و جدول

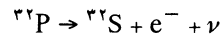


شکل ۴۵-۶ نمای تولید شده رایانه ای از مسیرهایی ایجاد شده به وسیله ذرات تولید شده در واپاشی جفت سر - پادسر. جفت در شتابدهنده تواترون در آزمایشگاه فرمی، به وسیله برخورد رودروی پروتون پرنرزی و پاد پروتون ایجاد شده است.

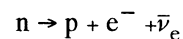
نکته واریسی ۳: ذره ای ترکیبی از کوارک پایین (d) و کوارک پاد بالای (\bar{u}) است. آیا ذره (الف) مزون π^0 ، (ب) پروتون، (پ) مزون π^- (ت) مزون π^+ ، یا (پ) نوترون است؟

نگاهی نو به واپاشی بتا

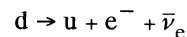
حال ببینیم واپاشی بتا از دیدگاه کوارک چگونه است. در معادله ۴۳-۱، یک مثال نوعی از این فرایند را ارائه کردیم



پس از آنکه نوترون کشف شد و فرمی نظریه خود را در مورد واپاشی بتا بیان کرد، فیزیکدانان به این نتیجه رسیدند که فرایند اساسی واپاشی بتا همانند تغییر نوترون به پروتون در داخل هسته است



که در آن نوترینو به طور کاملتری شناسایی شد. امروز وقتی عمیقتر نگاه می کنیم می بینیم که نوترون (udd) می تواند به وسیله تغییر کوارک پایین به کوارک بالا به یک پروتون (uud) تغییر کند. اکنون ما اساس فرایند واپاشی بتا را به صورت زیر می نگریم



بنابراین وقتی به جایی می رسیم که می خواهیم بیشتر و بیشتر در مورد طبیعت بنیادی ماده بدانیم، می توانیم فرایندهای آشنا را در سطوح عمیقتر و عمیقتر آزمایش کنیم. همچنین خواهیم دید که نه تنها الگوی کوارک به درک ما از ساختار ذرات کمک می کند بلکه راهنمایی برای درک برهم کنشهای آنها نیز هست.

بازهم درباره کوارکها

ذرات دیگر و نقشهای راه هشتگانه دیگری وجود دارند که هنوز بحث نکرده ایم. برای در نظر گرفتن آنها، به سه کوارک دیگر احتیاج داریم که باید پیشنهاد کنیم، کوارکها افسون c، کوارک سر t و کوارک ته b.

در جدول ۴۵-۵ اشاره کردیم که سه کوارک به طور استثنایی سنگین هستند، سنگینترین آنها (سر) تقریباً ۱۷۰ مرتبه سنگینتر از پروتون است. برای تولید ذراتی که شامل چنین کوارکهایی باشند، باید به انرژیهای بالاتر و بالاتر برویم که به همین دلیل بوده است این سه کوارک زودتر کشف نشدند.

اولین ذره مشاهده شده که شامل کوارک افسون است مزون J/ψ

الکترون دیگر را از طریق تبادل فوتون با آن، احساس می‌کند.

این فوتونها را نمی‌توانیم آشکار کنیم چون آنها به وسیله یک الکترون گسیل و سپس در زمان خیلی کوتاهی به وسیله الکترون دیگر جذب می‌شوند. به خاطر این موجودیت زودگذر آنهاست که آنها را **فوتونهای مجازی** می‌نامیم. به خاطر نقش آنها در ارتباط بین دو بار برهم کنش کننده، گاهی این فوتونها را **ذرات پیک** می‌نامیم. اگر الکترون ساکنی یک فوتون گسیل کند و بدون تغییر بماند، انرژی پایسته نیست. ولی، با نوشتن اصل عدم قطعیت به صورت

$$\Delta E \cdot \Delta t \approx \hbar \quad (۱۴-۴۵)$$

این رابطه را این گونه تفسیر می‌کنیم که می‌توانیم با «اضافه برداشت کردن» مقدار انرژی ΔE ، که پایستگی انرژی را نقض می‌کند، مشروط بر «برگرداندن» آن در بازه Δt که با $\hbar/\Delta E$ داده می‌شود، این نقض را برطرف کنیم. فوتونهای مجازی درست همین کار را می‌کنند. یک جفت الکترون برهم کنش کننده را در نظر بگیرید. وقتی، مثلاً، الکترون A یک فوتون مجازی گسیل می‌کند، اضافه برداشت در انرژی وقتی که آن الکترون یک فوتون مجازی از الکترون B دریافت می‌کند به سرعت اصلاح می‌شود، و نقض پایستگی انرژی برای جفت الکترون به وسیله عدم قطعیت ذاتی پنهان می‌ماند.

نیروی ضعیف

نظریه نیروی ضعیف، که بر تمام ذرات عمل می‌کند، به وسیله قیاس با نظریه نیروی الکترومغناطیسی گسترش داده شد. ولی ذرات پیک که نیروی ضعیف را بین ذرات منتقل می‌کنند فوتونها (بدون جرم) نیستند بلکه ذرات سنگینی هستند که با نمادهای W و Z مشخص شده‌اند. نظریه آنچنان موفقیت آمیز بود که نشان داد نیروی الکترومغناطیسی و نیروی ضعیف جلوه‌های متفاوتی از یک نیروی **الکتروضعیف** منفرد هستند. این دستاورد گسترش منطقی از کار ماکسول است، که نشان داد نیروهای الکتریکی و مغناطیسی جلوه‌های متفاوتی از یک نیروی الکترومغناطیسی هستند.

نظریه الکتروضعیف در پیش‌بینی خواص ذرات پیک اثر ویژه‌ای داشت. برای مثال پیش‌بینی شد که بار و جرم آنها مقادیر زیرند

ذره	بار	جرم
W	$\pm e$	$80.6 \text{ GeV}/c^2$
Z	0	$91.2 \text{ GeV}/c^2$

۴۵-۲ (خانواده لپتون) بنگرید و به تقارن ظریف این دو «شش - بسته» ذرات توجه کنید که هر یک به طور طبیعی به سه خانواده دو - ذره‌ای مربوطه تقسیم شده‌اند. بر حسب چیزی که امروزه می‌دانیم، به نظر می‌رسد کوارکها و لپتونها واقعاً ذرات بنیادی بدون ساختار داخلی باشند.

مسئله نمونه ۴۵-۶

ذره Ξ^- دارای عدد کوانتومی اسپین $\frac{1}{2}$ و عددهای کوانتومی $Q = -1$ و $S = -2$ است. مشخص شده که ترکیب این ذره سه - کوارکی و شامل کوارکهای بالا، پایین و شگفت است. این ترکیب چه خواهد بود؟

حل: چون شگفتی آن برابر ۲- است، این ذره باید شامل دو کوارک شگفت باشد که هر یک از آنها (به جدول ۴۵-۵ نگاه کنید) دارای $S = -1$ است. پس کوارک سوم باید یا کوارک بالا باشد یا کوارک پایین (هر دو دارای $S = 0$ هستند). دو کوارک شگفت دارای بار ترکیب شده $(-\frac{1}{3}) + (-\frac{1}{3}) = -\frac{2}{3}$ است. چون برای بار ذره Ξ^- بار ۱- را نیاز داریم، پس باید کوارک سومی را که بار آن $-\frac{1}{3}$ است اضافه کنیم؛ یعنی کوارک پایین. بنابراین ترکیب کوارکی Ξ^- عبارت است از dss .

به عنوان آخرین واری، توجه کنید که جدول ۴۵-۵ نشان می‌دهد که عدد باریونی برای ذره Ξ^- برابر است با

$$B = (\frac{1}{3}) + (\frac{1}{3}) + (\frac{1}{3}) = +1$$

این چیزی است که انتظار داشتیم چون Ξ^- که از سه کوارک (نه پاد کوارک) ساخته شده ذره است (نه پاد ذره). اگر پاد ذره بود باید دارای $B = -1$ می‌بود.

۴۵-۹ نیروهای اساسی و ذرات پیک^۱ (اختیاری)

اکنون از تقسیم بندی ذرات به بررسی نیروهایی که بین آنها اعمال می‌شود می‌پردازیم.

نیروی الکترومغناطیسی

در سطح اتمی، می‌بینیم که دو الکترون بنابر قانون کولن به یکدیگر نیروی الکترومغناطیسی وارد می‌کنند. در سطح عمیقتر، این برهم کنش به وسیله یک نظریه کاملاً موفقیت آمیز به نام الکترودینامیک کوانتومی (QED) شرح داده می‌شود. از این نظر می‌گوییم که هر الکترون حضور

نظریه این است که کوارکها فقط در ترکیبهایی با رنگ خنثی می‌توانند گرد هم جمع شوند. دو راه برای خنثی کردن رنگ وجود دارد. در نظریه رنگهای واقعی، قرمز + زرد + آبی رنگ سفید را به دست می‌دهند که رنگ خنثی دارد؛ بنابراین سه کوارک را گرد هم می‌آوریم و باریون تشکیل می‌دهیم. پادقرمز + پاد زرد + پاد آبی نیز سفید است، به طوری که می‌توانیم سه پاد کوارک را برای تشکیل پاد باریون گرد هم آوریم. سرانجام قرمز + پادقرمز، یا زرد + پاد زرد، یا آبی + پاد آبی نیز رنگ سفید را به دست می‌دهند. بنابراین برای تشکیل مزون می‌توانیم ترکیبهایی از کوارک و پاد کوارک را گرد هم آوریم. قاعده رنگ خنثی، ترکیب دیگری از کوارکها را مجاز ندانسته و هیچ یک از آنها مشاهده نشده‌اند.

نیروی رنگ نه تنها اعمال می‌شود تا کوارکها را پیوند داده و باریونها و مزونها تشکیل شوند بلکه بین چنین ذراتی نیز اعمال می‌شود، که در هر یک از حالتها به طور مرسوم نیروی قوی نامیده شده است. از این رو، نیروی رنگ نه تنها کوارکها را پیوند می‌دهد تا پروتونها و نوترونها تشکیل شوند بلکه پروتونها و نوترونها را نیز پیوند می‌دهد تا هسته‌ها را تشکیل دهند.

رویای اینشتین

تلاش برای یکی کردن نیروهای بنیادی طبیعت - که بیشتر توجه اینشتین را در اواخر عمرش به خود جلب کرد - یکی از مسائل مهم جاری است. جدول ۶-۲ وضعیت موجود را خلاصه کرده است. دیده‌ایم که نیروی ضعیف به طور موفقیت‌آمیزی با الکترومغناطیس ترکیب شده است به طوری که می‌توان ترکیب آنها را به عنوان مفهومی از یک نیروی الکتروضعیف در نظر گرفت. نظریه‌هایی که تلاش دارند نیروی قوی را نیز به این ترکیب اضافه کنند - نظریه‌های وحدت بزرگ (GUT)^۲ نامیده شده‌اند - به طور فعالی دنبال می‌شوند. نظریه‌هایی که در پی تکمیل کار با اضافه کردن گرانش هستند - گاهی نظریه‌های همه چیز (TOE)^۳ نامیده می‌شوند - امیدوارکننده‌اند، ولی فعلاً در مرحله ذهنی قرار دارند.

۴۵-۱۰ تأملی برای اندیشه

حال جای واقعی مطالبی را که فراگرفته‌ایم مطرح می‌کنیم. اگر تمام توجه ما به ساختار دنیای اطرافمان باشد، به خوبی می‌توانیم با

با یادآوری اینکه جرم پروتون فقط $938 \text{ GeV}/c^2$ است؛ اینها ذرات سنگینی هستند! جایزه نوبل فیزیک سال ۱۹۷۹/۱۳۵۸ به شلدون گلاشو، استیون واینبرگ و عبدالسلام به خاطر گسترشی که به نظریه الکتروضعیف داده بودند به آنها تعلق گرفت.

این نظریه در سال ۱۹۸۳/۱۳۶۲ توسط کارلو روبیا^۱ و همکارانش در CERN تایید شد. هر دو ذره پیک مشاهده شدند، جرم آنها با مقدار پیش‌بینی شده توافق داشت. جایزه نوبل فیزیک سال ۱۹۸۴/۱۳۶۳ به روبیا و سایمون و اندرمیر به خاطر کار تجربی درخشانی که انجام داده بودند به آنها تعلق گرفت.

برخی از مفاهیم پیچیده فیزیک ذرات در حال حاضر و گذشته را می‌توان با نگرش بر آزمایش پیشین فیزیک ذرات که برنده جایزه نوبل بود یعنی کشف پروتون، درک کرد. این کشف فوق‌العاده مهم یک آزمایش «گل سرسبد» بود که به ذرات گسیل شده به وسیله مواد پرتوهای طبیعی به عنوان پرتابه مربوط می‌شد؛ این در سال ۱۹۳۲/۱۳۱۱ تحت عنوان «امکان وجود نوترون» به وسیله جیمز چادویک گزارش شد.

کشف ذرات پیک W و Z در سال ۱۹۸۳/۱۳۶۲، از طرف دیگر، در یک شتابدهنده ذرات بزرگ، تقریباً با پیرامون 7 km که در محدوده چند صد میلیارد الکترون ولت عمل می‌کرد، انجام شد. وزن آشکارساز اصلی ذره به تنهایی ۲۰۰۰ تن بود. آزمایش توسط متجاوز از ۱۳۰ فیزیکدان از مؤسسه‌های مختلف از ۸ کشور به کمک کارمندان زیادی انجام شد.

نیروی قوی

نظریه نیروی قوی - یعنی، نیرویی که بین کوارکها عمل می‌کند تا هادرونها را به هم پیوند دهد - نیز گسترش داده شده است. ذرات پیک در این حالت گلوئون نامیده شده‌اند و پیش‌بینی می‌شود که مشابه فوتون بدون جرم باشند. نظریه فرض می‌کند که هر «طعم» کوارک در سه نوع ظاهر می‌شود، برای راحتی، آنها را قرمز، زرد و آبی نامگذاری کرده‌اند. بنابراین سه کوارک بالا هر یک از یک رنگ وجود دارد و نظایر آن. پاد کوارکها نیز سه رنگ دارند که آنها را پادقرمز، پاد زرد و پاد آبی نامیده‌اند. نباید فکر کنید که کوارکها، مشابه دانه‌های ظریف ژله، واقعاً رنگی‌اند. نامها برای راحتی انتخاب شده‌اند اما همین یک بار، همانطور که خواهید دید، دارای یک توجیه اسمی هستند.

نیرویی که بین کوارکها اعمال می‌شود نیروی رنگ نامیده شده است و با قیاس با الکترودینامیک کوانتومی (QED)، کرومودینامیک کوانتومی (QCD) نامیده شده است. پیش‌بینی مهم

1. Carlo Rubbia

2. general unification theories

3. theories of everything

آنها به طور مستقیم متناسب اند. یعنی

$$v = Hr \quad (\text{قانون هابل}) \quad (۱۵-۴۵)$$

که در آن H ضریب تناسب، ثابت هابل نامیده می شود. مقدار آن به خاطر مشکل اندازه گیری فاصله ها تا کهکشانهای دور قدری نامعین است. یک مقدار، بر پایه اندازه گیری انجام شده در سال

۱۹۹۴/۱۳۷۳ با تلسکوپ فضایی هابل، برابر است با

$$H = 80 \pm 17 \text{ km/s.Mpc} \quad (۱۶-۴۵)$$

که در آن Mpc یکای طول برحسب مگا پارسک است

$$1 \text{ Mpc} = 3.084 \times 10^{19} \text{ km} = 3.26 \times 10^7 \text{ ly} \quad (۱۷-۴۵)$$

مقدار دیگر، که بر پایه دسته اندازه گیریهای انجام گرفته زیادی قرار گرفته و در سال ۱۹۹۶/۱۳۷۵ ارائه شده برابر است با 57 km/s.Mpc . این دو اندازه گیری عدم قطعیتی را پیشنهاد می کنند که دور و بر مقدار این عامل مهم است. در محاسبات مقدار $H = 80 \text{ km.s/Mpc}$ را به کار می بریم که معادل 24.5 mm/s.ly است.

توجیه قانون هابل به این معناست که جهان در حال گسترش است. مثل کشمشهای داخل یک کیک که در حین پختن باد می کند. ناظرها روی سایر کهکشانها نیز فاصله کهکشانها را طبق قانون هابل در حال افزایش می بینند. در ارائه قیاس ما هیچ کشمشی (کهکشانی) دارای منظر یگانه یا ترجیح داده شده ای نیست.

قانون هابل به خوبی با این فرضیه که جهان در یک انفجار قدرتمند (انفجار بزرگ) در میلیاردها سال قبل ایجاد شده است همخوانی دارد. کهکشانهای دور شونده پاره های این انفجار جهان آغازین است که ساختار آنها با گذشت زمان تغییر کرده و به خاطر انبساط خود جهان اینها نیز منبسط شده و از هم دور شده اند.

مسئله نمونه ۷-۴۵

اگر قانون هابل برقرار باشد، یک اختروش با پس روی ظاهری $2.8 \times 10^8 \text{ m/s}$ در چه فاصله ای قرار دارد (توجه کنید که این ۹۳٪ تندی نور است).

حل: از قانون هابل (۱۵-۴۵) داریم

$$r = \frac{v}{H} = \frac{2.8 \times 10^8 \text{ m/s}}{80 \text{ km/s.Mpc}} \left(\frac{3.084 \times 10^{19} \text{ km}}{1 \text{ Mpc}} \right) \left(\frac{1 \text{ ly}}{9.46 \times 10^{15} \text{ m}} \right)$$

$$= 11 \times 10^9 \text{ ly} \quad (\text{پاسخ})$$

الکترون، نوترینو، نوترون و پروتون به آن برسیم. همانطور که فردی گفته است، می توانیم «کشتی فضایی زمین» را به خوبی فقط با همین ذرات هدایت کنیم. می توانیم تعدادی از ذرات نا آشنا را با مطالعه پرتوهای کیهانی مشاهده کنیم، اما برای دیدن بیشتر آنها، باید شتابدهنده های سنگین بسازیم و با تلاش بسیار و هزینه زیاد به دنبال آنها بگردیم.

دلیل اینکه چرا باید چنین کنیم این است که - برحسب انرژی اندازه گیری شده - ما در دنیایی با دماهای بسیار پایین زندگی می کنیم. حتی در مرکز خورشید، مقدار kT فقط حدود 1 keV است. برای تولید ذرات نا آشنا، باید قادر باشیم که پروتونها یا الکترونها را به انرژی هایی در ناحیه GeV یا TeV و بالاتر شتاب دهیم. البته، یک زمانی دما (در همه جا) برای ایجاد چنین انرژی هایی و حتی بالاتر به قدر کافی بالا بود. آن زمان وقتی بود که جهان آغاز شد. پس اکنون توجه خود را به آن زمان معطوف می کنیم.

وقتی اخترشناسان به فضای بیرون نگاه می کنند، آنها زمان گذشته را نیز می بینند. بنابراین می توانیم با بررسی اجسام آسمانی دور، کیهان در زمانهای نخستین را نیز مطالعه کنیم. دورترین اجسامی که می توانیم «مشاهده» کنیم اختروشها (اجسام شبه ستاره ای) هستند و تصور بر آن است که آنها مراکز فوق العاده درخشان کهکشانها در فرایند تشکیل اند. همچنان که در ژانویه ۱۹۹۶/۱۳۷۵ دورترین اختروش توسط اخترشناسان در مؤسسه فناوری کالیفرنیا یافته شد که در فاصله 14×10^9 سال نوری از زمین قرار دارد. نور این جسم که اکنون وارد تلسکوپ ما می شود حدود ۱۴ میلیارد سال قبل آن را ترک کرده است، بنابراین جسمی را می بینیم که قبلاً وجود داشته است.

۱۱-۴۵ جهان در حال انبساط است

همانطور که در بخش ۲۲-۹ دیدیم، این امکان وجود دارد که تندی نسبی نزدیک شدن یا دور شدن کهکشانها را به وسیله جابه جایی دوپلری نوری که از آنها گسیل می شود اندازه گیری کنیم. اگر به کهکشانهای دوری که در ورای مجاورهای کهکشانی ما هستند نگاه کنیم، یک واقعیت تعجب انگیزی را می یابیم. همگی آنها در حال دور شدن از ما هستند!

در سال ۱۹۲۹/۱۳۰۸ ادوین هابل ارتباطی بین تندی ظاهری دور شدن یک کهکشان و فاصله r از ما برقرار کرد، به این ترتیب که

۴۵-۱۳ ماده تاریک

در رصدخانه ملی کیت پیک در آریزونا، وراروبین و همکارش کنت فورد آهنگ چرخش تعدادی از کهکشانهای دور را اندازه گیری کردند. آنها این کار را با اندازه گیری انتقالهای دوپلری خوشه های درخشان ستاره های واقع در هر کهکشان در فاصله های مختلف از مرکز کهکشانی انجام دادند. همانطور که شکل ۷-۴۵ نشان می دهد، نتایج آنها تعجب انگیز بود؛ تندی مداری ستاره ها در لبه مرئی بیرونی کهکشان با تندی ستاره های نزدیک به مرکز کهکشان یکسان است. همانطور که منحنی در شکل ۷-۴۵ گواهی می دهد وقتی که تمام جرم کهکشان با نور مرئی نمایانده شود این منحنی چیزی نیست که انتظارش را داشتیم. همچنین نقش یافت شده توسط رابین و فورد چیزی نیست که در منظومه شمسی می یابیم. برای مثال، تندی مداری پلوتو (دورترین سیاره از خورشید) فقط یکدهم تندی عطارد (نزدیکترین سیاره به خورشید) است.

تنها توضیح برای یافته های روبین و فورد که با مکانیک نیوتونی توافق دارد این است که یک کهکشان نوعی جرم خیلی بیشتر از

نتیجه فقط یک تقریب است چون اختروش همیشه با تندی پس روی ظاهری یکسانی نسبت به ما پس روی نمی کند.

مسئله نمونه ۸-۴۵

فرض کنید که اخترنمای مسئله نمونه ۴۵-۷ از زمان انفجار بزرگ تاکنون دارای تندی یکسانی نسبت به ما برابر با مقدار محاسبه شده باشد. این مطلب کدام زمان کمینه ای را به رخداد انفجار بزرگ نسبت می دهد؟ یعنی، عمر کمینه جهان بر پایه این تندی چقدر است؟ حل: زمان را می توانیم از رابطه زیر به دست آوریم

$$t = \frac{r}{v} = \frac{r}{rH} = \frac{1}{H}$$

$$= \frac{1}{8.0 \text{ km/s.Mpc}} \left(\frac{3.0 \times 10^{19} \text{ km}}{1 \text{ Mpc}} \right) \left(\frac{1 \text{ ly}}{3.16 \times 10^5 \text{ s}} \right)$$

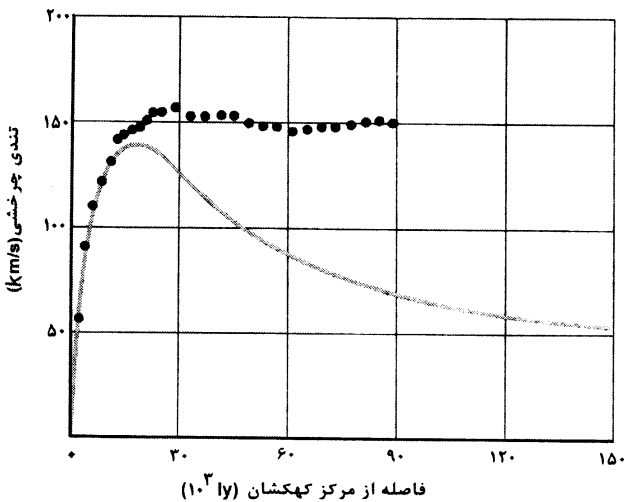
$$= 12 \times 10^9 \text{ y} \quad (\text{پاسخ})$$

نتیجه به مقدار ثابت هابل بستگی دارد. برای مثال، مقدار کوچکتر H به عمر طولانیتر جهان منجر می شود.

۴۵-۱۲ تابش زمینه ای کیهانی

در سال ۱۹۶۵/۱۳۴۴ آرنو پنزیس و رابرت ویلسون در آزمایشگاهی که بعداً آزمایشگاههای بل تلفن شد مشغول آزمایش یک گیرنده میکرو موج حساس برای پژوهشهای مخابراتی بودند. آنها «سوت» زمینه ای ضعیفی را کشف کردند که صرف نظر از اینکه آنتن به کجا متوجه باشد شدتش بدون تغییر باقی می ماند. به زودی روشن شد که پنزیس و ویلسون تابش زمینه ای کیهانی را مشاهده کرده اند که در جهان نخستین ایجاد شده و تقریباً تمام فضا را به طور یکنواخت پر کرده است. این تابش، که بیشترین شدت آن در طول موج ۱.۱ mm قرار دارد، از نظر توزیع طول موجها نظیر تابش در کاواکی است که دیواره هایش در دمای ۲.۷K قرار دارند، در این حالت «کاواک» تمامی کیهان است. به خاطر این کشف جایزه نوبل فیزیک ۱۹۷۸/۱۳۵۷ به پنزیس و ویلسون اهدا شد.

این تابش حدود ۳۰۰۰۰۰۰ سال پس از انفجار بزرگ به وجود آمده است، یعنی در زمانی که کیهان ناگهان برای موجهای الکترومغناطیسی شفاف گردید. در آن زمان این تابش به دمای کاواکی شاید برابر ۱۰^۵K مربوط بود. اما وقتی کیهان منبسط شد، دما به مقدار فعلی ۲.۷K افت کرد، درست نظیر افت دمای گازی که در شرایط بی دررو منبسط می شود.



شکل ۷-۴۵ تندی چرخشی ستاره ها در یک کهکشان نوعی بر حسب تابعی از فاصله آنها تا مرکز کهکشان. منحنی توپر نشان می دهد که اگر تمام جرم در کهکشان قابل رویت باشد، تندی چرخشی در فاصله های دور باید افت کند. نقطه ها داده های تجربی هستند که نشان می دهند که تندی چرخش در فاصله های دور تقریباً ثابت است.

«این مسلم است که جهان با یک انفجار بزرگ تقریباً در ۱۵ میلیارد سال قبل آغاز شده و از همان زمان زمین به دور خورشید می‌چرخد.»

این عبارت محکم حاکی از آن است که نظریه انفجار بزرگ، که ابتدا توسط فیزیکدان بلژیکی جورج لامیتره ارائه شده است، به وسیله افرادی که این مطالب را مطالعه می‌کنند از اعتماد برخوردار است.

نمی‌توان تصور کرد که انفجار بزرگ مانند انفجار یک ترقه عظیم است و اینکه حداقل در اصل در یک طرف ایستاده‌ایم و آن را تماشا می‌کنیم. «یک طرفی» وجود ندارد چون انفجار بزرگ بیانگر شروع خود فضا زمان است. از دیدگاه جهان فعلی ما، هیچ جایی در فضا وجود ندارد که بتوان به آن اشاره کرد و گفت که «انفجار بزرگ در آنجا رخ داده است». انفجار بزرگ در همه جا رخ داده است.

علاوه بر این، «پیش از انفجار بزرگ» وجود ندارد چون زمان با خلق این رویداد، آغاز شده است. در این اوضاع و احوال لغت «پیش» معنی خود را از دست می‌دهد. با این وجود، می‌توان در مورد آنچه که در طی فاصله‌های زمانی متوالی پس از انفجار بزرگ پیش آمده است حدسهایی زد.

$t \approx 10^{-43} s$. این زودترین زمانی است که در آن می‌توانیم چیز معنی داری در مورد تحول جهان بگوییم. در این لحظه است که مفاهیم فضا و زمان معانی فعلی خود را کسب می‌کنند و قوانین فیزیک آن‌طور که می‌دانیم برای آنها قابل کاربرد است. در این لحظه، تمام جهان کوچکتر از یک پروتون است، حالا بگویید نوک دماغتان، و دمای آن $10^{32} K \approx$ است.

$t \approx 10^{-34} s$. تا این لحظه جهان به طور سرسام آوری سریعاً متورم شده و اندازه آن با ضریب تقریبی 10^{40} افزایش یافته است. جهان به صورت سوپ داغی از کوارکها و لپتونها با دمای $10^{27} K \approx$ درآمد است.

$t \approx 10^{-4} s$. اکنون کوارکها برای تشکیل پروتونها و نوترونها و

آنچه که ما واقعاً می‌بینیم دارد. در واقع، قسمت قابل رویت کهکشان فقط تقریباً ۵ تا ۱۰ درصد جرم کل کهکشان است. علاوه بر این مطالعات چرخش کهکشانی بسیاری از مشاهدات دیگر به این نتیجه می‌انجامد که در جهان ماده فراوانی وجود دارد که ما نمی‌توانیم آنها را ببینیم.

بالاخره این ماده تاریک چیست که نفوذ کرده و یک کهکشان نوعی را مانند یک هاله عظیم که قطر آن تقریباً 30 برابر قطر قابل رویت کهکشان است احاطه کرده است؟ چیزهای مناسب برای ماده تاریک در دو دسته قرار می‌گیرند، که با نام عجیب WIMP^۱ها (ذرات سنگین با برهم کنش ضعیف) و MACHO^۲ (اجسام هاله‌ای سنگین) نامیده می‌شوند. اگر نوترینوها دارای جرم بودند، ممکن بود آنها مناسب WIMP باشند. MACHOها می‌توانند شامل اجسامی نظیر سیاهچاله‌ها، ستاره‌های کوتوله سفید و کوتوله‌های قهوه‌ای باشند؛ آخری اجسامی در اندازه مشتری هستند که به قدر کافی سنگین نیستند تا ستاره واقعی باشند و به خاطر همجوشی بدرخشند.

از مطالعات سال ۱۹۹۶/۱۳۷۵ شواهد قانع کننده‌ای وجود دارد که MACHOها در واقع در کهکشان ما وجود دارند. فرض کنید که یک MACHO (نامرئی) به طور تصادفی، در کهکشان ما از جلوی ستاره‌ای در کهکشان مجاور عبور کند. اینشتین، در نظریه نسبیت عام خود، پیش‌بینی کرد که پرتوهای نور که از مجاورت یک جسم سنگین عبور کنند به وسیله جرم آن جسم منحرف می‌شوند (به بخش ۱۸-۹ نگاه کنید). بنابراین، اگر ستاره، MACHO و زمین همدریف شوند، MACHO به صورت یک عدسی گرانشی عمل کرده و پرتوهای نور از ستاره‌ای را که از مجاورت آن عبور می‌کند متمرکز می‌کند و باعث می‌شود در وقتی MACHO در ستاره گرفتگی ایجاد می‌کند تصویر آن نورانی شود.

چنین رویدادهایی به قدر کافی مشاهده شده‌اند تا اخترشناسان را قانع کنند که MACHOها می‌توانند عامل بخش اساسی (چیزی حدود ۵۰٪) از ماده تاریک در کهکشان ما به حساب آیند. مشاهدات همچنان ادامه دارند.

۴۵-۱۴ انفجار بزرگ

در سال ۱۹۸۵/۱۳۷۴ فیزیکدانی در یک گردهمایی علمی این عبارت را بیان کرد:

1. Weakly Intreacting Massive Particles

2. Massive Compact Halo Object

کاشگر زمینه کهکشانی ناسا نشان داد که، در واقع، تابش زمینه کاملاً یکنواخت نیست. تصویر نشان داده در صفحه آغازین فصل از این اندازه‌گیریها ساخته شده و جهان را در وقتی که فقط ۳۰۰۰۰۰ سال سن داشته، نشان می‌دهد. همانطور که دیده می‌شود، مقیاس بزرگی از تجمع ماده قبلاً شروع شده؛ و در نتیجه نظریه انفجار بزرگ، در اصل، در مسیر درستی قرار دارد.

۴۵-۱۵ جمع‌بندی

حال در این پاراگراف پایانی، ببینیم اندوخته دانش به سرعت رو به افزایش ما درباره جهان ما را به کجا هدایت می‌کند. اینکه این امر رضایت خاطر گروه زیادی از فیزیکدانان کنجکاو و با انگیزه را فراهم می‌کند مورد تردید نیست. البته، بعضی‌ها به این امر به صورت رویدادی معمولی نگاه می‌کنند که هر افزایشی در دانش ما، ناچیزی نسبی ما را در طرح عظیم این وضع به طور روشنتری آشکار می‌کند. بنابراین با یک نظم تاریخی تقریبی، ما ابناء بشر باید درک کنیم که زمین ما مرکز منظومه شمسی نیست.

خورشید ما فقط یک ستاره در میان ستاره‌های زیاد دیگر است. کهکشان ما فقط یکی از کهکشانهای زیاد دیگر است و خورشید ما یک ستاره معمولی نزدیک لبه بیرونی آن است.

زمین ما شاید برای فقط یک سوم عمر جهان وجود داشته است و به طور قطع وقتی خورشید ما سوختش به پایان برسد و یک غول قرمز شود، از بین می‌رود.

گونه ما کمتر از میلیون سال روی زمین سکونت داشته است که یک برهم زدن چشم در زمان کیهانی است. آخرین ضربه خردکننده: نوترونها و پروتونهایی که ما از آنها ساخته شده‌ایم شکل غالب ماده در جهان نیستند.

با این وجود، وجه روشن مطلب این است که، این ما نبوده‌ایم که تمام اینها را کشف کرده‌ایم. اگرچه وضعیت ما در جهان ممکن است مهم نباشد، اما قوانین فیزیک که ما کشف کرده‌ایم (پرده از آن برداشته شده است؟) به نظر می‌رسد که در تمام جهان - تا جایی که ما می‌دانیم - برای تمام گذشته و آینده برقرار باشند. حداقل، هیچ دلیلی وجود ندارد که قوانین دیگری در سایر قسمتهای جهان برقرار باشند. بنابراین تا وقتی که کسی ایراد نگیرد ما از قوانین فیزیک «کشف شده روی زمین» استفاده می‌کنیم. چیزهای خیلی بیشتری برای کشف شدن باقی می‌مانند، بنابراین ما این کتاب را با اشاره به

پاد ذره آنها، ترکیب شده‌اند. در این موقع جهان با انبساط پیوسته (اما خیلی آهسته‌تر) تا حدی سرد شده است که فوتونها انرژی لازم برای شکستن این ذرات جدید، را ندارند. ذرات ماده و پاد ماده برخورد کرده همدیگر را نابود می‌کنند. ماده کمی بیشتر است و نمی‌تواند زوجی برای نابودی بیابد، همین بازمانده‌ها هستند که جهان ماده‌ای را که امروزه می‌شناسیم تشکیل می‌دهند.

$t \approx 1 \text{ min}$. در این موقع جهان به قدر کافی سرد شده است به طوری که پروتونها و نوترونها، در برخورد با هم، می‌توانند به هم بچسبند و هسته‌های عناصر کم جرم ${}^2\text{H}$ ، ${}^3\text{He}$ ، ${}^4\text{He}$ و ${}^6\text{Li}$ را تشکیل بدهند. فراوانی نسبی پیش‌بینی شده این هسته‌ها درست همانی است که ما امروز در جهان مشاهده می‌کنیم. مقدار زیادی تابش وجود دارند، اما نور نمی‌تواند پیش از برخورد با هسته مسافت زیادی طی کند. جهان برای تابشهای خود تیره است.

$t \approx 300000 \text{ y}$. در این موقع دما به 10^4 K کاهش یافته و الکترونها می‌توانند وقتی به هسته‌های لخت برخورد می‌کنند به آن چسبیده و اتمها را تشکیل دهند. چون نور برهم کنش زیادی با ذراتی (بدون بار) مانند اتمهای خنثی ندارد، اکنون نور آزاد است که به فاصله‌های دور حرکت کند. این تابش، تابش زمینه کیهانی را تشکیل می‌دهد که در بخش ۴۵-۱۲ بحث شد. اتمهای هیدروژن و هلیوم بر اثر نفوذ گرانش، شروع به جمع شدن می‌کنند و این آغاز تشکیل کهکشانها و ستاره‌هاست.

اندازه‌گیریهای اولیه بر آن دلالت دارند که تابش زمینه کیهانی در تمام جهتها یکنواخت است و این حاکی از آن است که تمام ماده موجود در جهان ۳۰۰۰۰۰ سال پس از انفجار بزرگ به طور یکنواخت توزیع شده است. این یافته بیشتر یک معما بود چون توزیع ماده در جهان حاضر به طور یکنواخت نیست، بلکه در عوض در کهکشانها، خوشه کهکشانها و ابر خوشه‌های کهکشانی جمع شده است. همچنین خلأ عظیمی وجود دارد که در آن نسبتاً ماده کمی موجود است و ناحیه‌های پرجمعیتی از ماده وجود دارند که آنها را دیوار نامیده‌اند. اگر نظریه انفجار بزرگ برای آغاز جهان حتی به طور تقریبی درست باشد، این توزیع نایکنواخت باید پیش از آنکه جهان ۳۰۰۰۰۰ سال سن داشته به وقوع پیوسته باشد و اکنون به صورت توزیع نایکنواختی از تابش زمینه میکروموج نشان داده شود.

در سال ۱۹۹۲/۱۳۷۱، اندازه‌گیریهای انجام شده توسط ماهواره

هادرونها: باریونها و مزونها

کوارکهایی که در برهم کنش قوی ذرات ترکیب می شوند هادرون نامیده شده اند. باریونها هادرونیایی با عددهای کوانتومی اسپینی نصف عدد صحیح ($\frac{1}{2}$ یا $\frac{3}{2}$) هستند. مزونها هادرونیایی با عددهای کوانتومی اسپینی صحیح (۰ یا ۱) هستند. باریونها فرمیون و مزونها بوزن هستند. مزونها دارای عدد باریونی برابر با صفرند؛ باریونها دارای عدد باریونی برابر با +۱ یا -۱ هستند. کرومودینامیک کوانتومی پیش بینی می کند که ترکیبهای ممکن کوارکها یا کوارک با پادکوارک، سه کوارک یا سه پادکوارک باشند (این پیش بینی با آزمایش سازگار است). تمام هادرونها، به جز پروتونها، ناپایدارند.

انبساط جهان

شواهد جاری قویاً حاکی از آن است که جهان در حال انبساط است و فاصله کیهانشانها که از ما با آهنگ ۷ دور می شوند با قانون هابل داده می شود

$$v = Hr \quad (\text{قانون هابل}) \quad (15-45)$$

در اینجا ثابت هابل مقدار زیر است

$$H = 80 \text{ km/s.Mpc} = 24,5 \text{ mm/s.ly} \quad (16-45)$$

تاریخ جهان

انبساط شرح داده شده به وسیله قانون هابل و وجود همیشه حاضر تابش میکروموج زمینه حاکی از آن است که جهان در یک «انفجار بزرگ» در تقریباً ۱۵ میلیارد سال قبل آغاز شده است.

پرسشها

۱- نه تنها ذراتی مانند الکترونها و پروتونها بلکه کل اتمها نیز می توانند به صورت فرمیونها یا بوزونها، طبقه بندی شوند، این بستگی دارد به اینکه عددهای کوانتومی اسپینی کل آنها به ترتیب، نصف عدد صحیح یا عدد صحیح باشد. ایزوتوپهای هلیوم، ^3He و ^4He را در نظر می گیریم. کدامیک از عبارتهای زیر صحیح است؟ (الف) هر دو فرمیون هستند. (ب) هر دو بوزن هستند. (پ) ^4He فرمیون و ^3He بوزن است. (ت) ^3He فرمیون و ^4He بوزن است. (دو الکترون هلیوم تشکیل یک لایه بسته را می دهند و هیچ نقشی در این تعیین ندارند).

۲- آیا جهت میدان مغناطیسی در شکل ۳-۴۵ ب به سمت خارج صفحه است یا داخل آن؟

این کلمات رو به آینده به پایان می بریم: جهان پر از چیزهای سحرانگیز است که صبورانه منتظر رشد بیشتر هوش و ذکاوت ما هستند.

بازنگری و خلاصه درس

لبتونها و کوارکها

پژوهشهای جاری این دیدگاه را حمایت می کنند که ماده از شش نوع لپتون (جدول ۴۵-۲) و شش نوع کوارک (جدول ۴۵-۵) ساخته شده است. تمام این ذرات عدد کوانتومی اسپینی برابر با $\frac{1}{2}$ دارند و در نتیجه فرمیون هستند (ذراتی با عددهای کوانتومی اسپینی نصف عدد صحیح). همچنین ۱۲ پاد ذره وجود دارند که مربوط به هر یک از لبتونها و کوارکها هستند.

برهم کنشها

ذرات با بار الکتریکی با نیروی الکترومغناطیسی برهم کنش می کنند که این عمل با تبادل فوتونهای مجازی انجام می گیرد. لبتونها می توانند با یکدیگر و با کوارکها از طریق نیروی ضعیف برهم کنش کنند که این عمل به وسیله ذرات W و Z سنگین به عنوان پیک صورت می پذیرد. علاوه بر این، کوارکها به وسیله نیروی رنگ با یکدیگر برهم کنش دارند. نیروهای ضعیف و الکترومغناطیسی تجلی متفاوتی از یک نیروی یکسان هستند که نیروی الکتروضعیف نامیده شده است.

لبتونها

سه تا از لبتونها (الکترون، موئون و تائو) دارای بار الکتریکی برابر با -e هستند؛ اینها همچنین دارای جرم غیر صفرند. همچنین سه تا نوترینوی بدون بار (که همچنین لپتون هستند) وجود دارد که هر یک مربوط به یکی از لبتونهای باردارند. نوترینوها دارای جرم خیلی ناچیز، احتمالاً صفر، هستند. پاد ذرات لبتونهای باردار دارای بار مثبت اند.

کوارکها

شش کوارک (به ترتیب افزایش جرم، بالا، پایین، شگفت، افسون، ته و سر) هر یک دارای عدد باریونی $\frac{1}{3}$ + و باری برابر با $(\frac{2}{3})e$ + یا $(\frac{1}{3})e$ - هستند. کوارک شگفت دارای شگفتی ۱- است در حالی که سایر کوارکها همگی دارای شگفتی صفرند. این چهار علامت جبری برای پادکوارکها معکوس می شوند.

فصل ۴۵

کوارکها، لپتونها و انفجار بزرگ

بخش ۳-۴۵ میان گفتار

۱ ت - اختلاف جرم میوتون و پیون مسئله نمونه ۴۵-۲ را برحسب کیلوگرم حساب کنید.

حل. از روی جدول ۴۵ - ۱ جرمهای سکون پیون و میوتون را به ترتیب برابر با $139.6 \text{ MeV}/c^2$ و $105.7 \text{ MeV}/c^2$ در می‌یابیم. پس اختلاف جرمهای سکون این دو ذره برابر می‌شود با:

$$\Delta m = (139.6 - 105.7) \text{ MeV}/c^2 = 33.9 \text{ MeV}/c^2$$

چون $1 \text{ u} = 931.5 \text{ MeV}/c^2$ است، اختلاف جرم را چنین نیز می‌توان نوشت:

$$\begin{aligned} \Delta m &= (33.9 \text{ MeV}/c^2) \left(\frac{1 \text{ u}}{931.5 \text{ MeV}/c^2} \right) = 0.0364 \text{ u} \\ &= (0.0364 \text{ u}) (1.661 \times 10^{-27} \text{ kg/u}) \\ &= 6.04 \times 10^{-29} \text{ kg} \end{aligned}$$

۲ ت - یک پیون خنثی به دو پرتو گاما واپاشی می‌کند: $\pi^0 \rightarrow \gamma + \gamma$. طول موجهای پرتوهای گامای ایجاد شده به وسیله واپاشی پیون خنثی در حال سکون را حساب کنید.

حل. پایستگی اندازه حرکت خطی لازم می‌دارد که ذرات پرتو گاما در خلاف جهت همدیگر، با اندازه حرکتی (از لحاظ مقدار) برابر هم حرکت کنند. چون مقدار اندازه حرکت یک ذره پرتو گاما با رابطه $P = E/c$ به انرژی آن مربوط شده است، ذرات انرژی یکسانی خواهند داشت. از پایستگی انرژی داریم: $m_\pi c^2 = 2E$ ، که در آن m_π جرم پیون خنثی است. طبق جدول ۴۵ - ۴، انرژی سکون پیون خنثی برابر با 135.0 MeV است. بنابراین، برای انرژی E پرتو گاما خواهیم داشت:

$$E = \frac{135.0 \text{ MeV}}{2} = 67.5 \text{ MeV}$$

حال با استفاده از نتیجه تمرین ۱ فصل ۳۹ می‌توانیم طول موج مربوط به پرتو گاما را به دست آوریم:

$$\lambda = \frac{1240 \text{ eV} \cdot \text{nm}}{67.5 \times 10^6 \text{ eV}} = 1.84 \times 10^{-5} \text{ nm} = 1.84 \text{ fm}$$

۳ ت - یک الکترون و یک پوزیترون به فاصله r از هم قرار دارند. نسبت نیروی گرانشی به نیروی الکتریکی بین آنها را به دست آورید. از این نتیجه، در رابطه با نیروهایی که بین ذرات عمل می‌کنند و در اتاقک حباب آشکار می‌شوند چه نتیجه‌ای می‌گیرید.

حل. چون جرم الکترون و پوزیترون با هم برابر است، بنابراین نیروی گرانشی بین آنها چنین می‌شود:

$$\begin{aligned} F_g &= G \frac{m_e^2}{r^2} = (6.67 \times 10^{-11} \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{kg}^2) \frac{(9.11 \times 10^{-31} \text{ kg})^2}{r^2} \\ &= (5.35 \times 10^{-71}) \frac{1}{r^2} \end{aligned}$$

چون اندازه بار الکترون و پوزیترون نیز با هم برابر است، بنابراین نیروی الکتریکی بین آنها چنین می‌شود:

$$\begin{aligned} F_e &= \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{r^2} = (8.99 \times 10^9 \text{ F/m}) \frac{(1.6 \times 10^{-19} \text{ C})^2}{r^2} \\ &= (2.30 \times 10^{-28}) \frac{1}{r^2} \end{aligned}$$

از آنجا خواهیم داشت:

$$\frac{F_g}{F_e} = \frac{5.35 \times 10^{-71}}{2.30 \times 10^{-28}} = 2.33 \times 10^{-43}$$

بنابراین نیروهایی که بین ذرات در اتاقک حباب بر هم وارد می‌شوند یقیناً نیروهای الکتریکی هستند و نیروهای گرانشی نقشی بازی نمی‌کنند.

۴ ت - پیونی که به طور مثبت باردار است با معادله ۴۵-۴ واپاشی می‌کند: $\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu$. طرح واپاشی پیونی که به طور منفی باردار است چگونه است؟ (راهنمایی: π^- پاد ذره π^+ است.)

حل. پایستگی بار لازم می‌دارد که در این صورت μ^- در طرف راست معادله ظاهر شود:

$$\pi^- \rightarrow \mu^- + \nu$$

۵ ت - اگر زمین در برخورد با پادزمین از بین برود چقدر انرژی آزاد می‌شود؟ حل. انرژی آزاد شده دو برابر انرژی سکون زمین خواهد بود. یعنی:

$$\begin{aligned} E &= 2mc^2 = 2(5.98 \times 10^{24} \text{ kg})(3 \times 10^8 \text{ m/s})^2 \\ &= 1.08 \times 10^{42} \text{ J} \end{aligned}$$

که در آن از جرم زمین مندرج در پیوست (پ) استفاده کرده‌ایم. ۶ م - پیون خنثی دارای انرژی سکون 135 MeV و عمر میانگین $2.6 \times 10^{-8} \text{ s}$ است، اگر این پیون با انرژی جنبشی اولیه 80 MeV تولید شود و پس از یک عمر میانگین واپاشی کند، طولانیترین مسیر ممکن که این ذره در اتاقک حباب می‌تواند برجای بگذارد کدام است؟ اتساع زمان نسبیتی را به کار برید. (راهنمایی: به مسئله نمونه ۴۵-۱ نگاه کنید.)

انرژی سکون نوترینوی الکترون به دست می‌دهد. فرض کنید انرژی سکون این نوترینو به جای صفر، در واقع برابر با 20 eV باشد. یک نوترینوی 1.5 MeV اگسیل شده در واپاشی بتا چه مقدار کندتر از تندی نور حرکت خواهد کرد؟

حل. انرژی کل از رابطه $E = E_0 + K$ به دست می‌آید که در آن $E_0 = m_0 c^2$ انرژی سکون نوترینو و K انرژی جنبشی آن است. بنابراین $E = 20 \text{ eV} + 1.5 \times 10^6 \text{ eV} = 1.500020 \text{ eV}$ خیلی خیلی بزرگتر از E_0 است، می‌توانیم رابطه اندازه حرکت نسبی p را به صورت $p = E/c$ بنویسیم. بنابراین اندازه حرکت نوترینو برابر با $1.500020 \text{ eV}/c$ می‌شود. از طرفی $p = m_0 v / \sqrt{1 - v^2/c^2}$ است. در نتیجه خواهیم داشت:

$$1.500020 \frac{\text{eV}}{c} = \frac{(20 \frac{\text{eV}}{c^2})v}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$

و یا

$$75001 = \frac{v/c}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$

و از آنجا پس از کمی عملیات جبری به رابطه زیر می‌رسیم:

$$\frac{v}{c} = (1 + 1.7777303 \times 10^{-10})^{-\frac{1}{2}}$$

با توجه به اینکه جمله دوم داخل پرانتز بسیار کوچک است می‌توانیم از بسط $(1 + \epsilon)^n$ که برابر $1 + n\epsilon$ می‌شود استفاده کنیم:

$$\frac{v}{c} = 1 - \frac{1}{4} (1.7777303 \times 10^{-10})$$

پس v چنین می‌شود:

$$v = c - \frac{1}{4} (1.7777303 \times 10^{-10})c$$

بنابراین جمله دوم همان اختلاف تندی ایجاد شده با تندی نور است:

$$\Delta v = \frac{1}{4} (1.7777303 \times 10^{-10}) (3 \times 10^8 \text{ m/s})$$

$$= 2.67 \times 10^{-2} \text{ m/s} = 2.67 \text{ cm/s}$$

۸ م - نظریه‌های معینی پیش‌بینی می‌کنند که پروتون (با نیم عمر تقریباً 10^{32} سال) ناپایدار است. با فرض اینکه این نظریه درست باشد، تعداد پروتونی را که انتظار دارید در یک سال در آب استخر شنایی با 114000 گالن آب واپاشی کند حساب کنید.

حل. در ویرایش ششم کتاب مبانی فیزیک به جای 114000 گالن مقدار $1.05 \times 10^5 \times 4.32$ آمده است که تقریباً معادل همان 114000 گالن است؛ چرا که هر گالن برابر تقریباً 3.78 لیتر می‌باشد. این را از آن جهت گفتیم که استفاده از لیتر متعارف‌تر و بعلاوه معادل جرمی آن مشخص‌تر است. هر لیتر آب جرمی معادل یک کیلوگرم دارد. چون هر مولکول آب از دو اتم هیدروژن تشکیل شده است، جرم آن برابر با 18.0 u یا $(2.0 \text{ u} + 16.0 \text{ u})$ و یا $3 \times 10^{-26} \text{ kg/u} = 1.8 \times 10^{-27} \text{ kg/u}$ می‌شود. از آنجا تعداد اتم‌های موجود در $4.32 \times 10^5 \text{ L}$ و یا به عبارتی

حل. نخست از رابطه $E^2 = E_0^2 + p^2 c^2$ ، مقدار اندازه حرکت p را محاسبه می‌کنیم:

$$p = \frac{\sqrt{E^2 - m_0^2 c^4}}{c}$$

که در آن m_0 جرم سکون پیون است. انرژی کل از رابطه $E = m_0 c^2$ به دست می‌آید و برابر با $135 + 80 = 215 \text{ MeV}$ می‌شود. حال با جانشاندن E در رابطه p ، اندازه حرکت پیون چنین می‌شود:

$$p = \frac{\sqrt{(215 \text{ MeV})^2 - (135 \text{ MeV})^2}}{c} = \frac{\sqrt{28000} \text{ MeV}}{c}$$

حال با داشتن اندازه حرکت p می‌توانیم تندی v پیون را به دست آوریم. چرا که داریم $p = m_0 v / \sqrt{1 - (v/c)^2}$ و در نتیجه

$$\frac{\sqrt{28000} \text{ MeV}}{c} = \frac{m_0 v}{\sqrt{1 - (v/c)^2}}$$

و یا

$$\frac{\sqrt{28000} \text{ MeV}}{c} = \frac{(135 \frac{\text{MeV}}{c^2})v}{\sqrt{1 - (v/c)^2}}$$

و یا

$$\frac{\sqrt{28000}}{135} = \frac{v/c}{\sqrt{1 - (v/c)^2}}$$

و یا

$$1.24 = \frac{v/c}{\sqrt{1 - (v/c)^2}}$$

حال اگر طرفین را به توان دو برسانیم، پس از کمی محاسبه به رابطه زیر می‌رسیم:

$$\frac{v}{c} = 0.6 \text{ یا } v = 0.6c$$

توجه کنید که ما در اینجا برخلاف مسئله نمونه ۴۵ - ۱ که با یک تقریب خیلی بد تندی ذره نسبتی کائون را به غلط برابر تندی نور گرفته است، تندی واقعی ذره نسبتی پیون خنثی را به دست آوردیم (شاید به همین دلیل است که این مسئله نمونه در ویرایش ششم کتاب مبانی فیزیک حذف شده است). طول مسیر با رابطه $d = vt$ داده می‌شود که t زمان اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه است. طبق معادله انقباض زمان نسبی، t خود برابر با $t = \gamma \tau$ است که در آن عامل لورنتس γ برابر با $\frac{1}{\sqrt{1 - (v/c)^2}}$ و τ نیم عمر است. بنابراین خواهیم داشت:

$$t = \frac{1.3 \times 10^{-17} \text{ s}}{\sqrt{1 - (0.6)^2}} = 1.037 \times 10^{-15} \text{ s}$$

و در نتیجه طول مسیر چنین می‌شود:

$$\begin{aligned} d &= vt = (0.6c)(1.037 \times 10^{-15} \text{ s}) \\ &= (0.6)(3 \times 10^8 \text{ m/s})(1.037 \times 10^{-15} \text{ s}) \\ &= 1.86 \times 10^{-7} \text{ m} = 186.75 \text{ nm} \end{aligned}$$

۷ م - مشاهده نوترینوهای گسیل شده از ابرنواختر SN1987a (شکل ۴۴-۱۲) در ابر ماژلانی بزرگ حد بالای 20 eV را برای

که در آن p اندازه حرکت ذره است که در قسمت (الف) به دست آوردیم. چون بار تائو، یک یکای بار است خواهیم داشت:

$$R = \frac{1.9 \times 10^{-8} \text{ kg} \cdot \text{m/s}}{(1.6 \times 10^{-19} \text{ C})(1.2 \times 10^8 \text{ T})} = 9.9 \text{ m}$$

۱۰ م - انرژی سکون بسیاری از ذرات کم عمر را نمی‌توان مستقیماً اندازه‌گیری کرد بلکه باید آنها را از اندازه حرکت‌های اندازه‌گیری شده و انرژی‌های سکون معلوم محصولات واپاشی به دست آورد. مزون ρ^0 را در نظر بگیرید، که به وسیله واکنش $\rho^0 \rightarrow \pi^+ + \pi^-$ واپاشی می‌کند. انرژی سکون یک مزون ρ^0 را که اندازه حرکت پیوندهای ایجاد شده از آن دارای جهت‌های مخالف و بزرگی $358.3 \text{ MeV}/c$ باشند حساب کنید. در مورد انرژی سکون پیونها به جدول ۴-۴۵ نگاه کنید.

حل. جدول ۴۵ - ۴ کتاب انرژی سکون هر پیون را برابر 139.6 MeV می‌دهد. از طرفی بزرگی اندازه حرکت پیون، طبق فرض برابر با $p_\pi = (358.3 \text{ MeV}/c)$ است. حال با استفاده از رابطه نسبیتی $E = \sqrt{E_0^2 + p^2 c^2}$ ، انرژی کل هر پیون چنین می‌شود:

$$E_\pi = \sqrt{(p_\pi c)^2 + (m_\pi c^2)^2} = \sqrt{(358.3 \text{ MeV})^2 + (139.6 \text{ MeV})^2} = 384.5 \text{ MeV}$$

از آنجا با استفاده از پایستگی انرژی، انرژی سکون مزون ρ^0 را به دست می‌آوریم:

$$m_\rho c^2 = 2E_\pi = 2(384.5 \text{ MeV}) = 769 \text{ MeV}$$

۱۱ - (الف) ذره ساکن m به دو ذره m_1 و m_2 واپاشی می‌کند، که این دو ذره اندازه حرکت یکسان دارند اما در جهت‌های مقابل حرکت می‌کنند. نشان دهید که انرژی جنبشی K_1 ذره m_1 با رابطه زیر داده می‌شود

$$K_1 = \frac{1}{2E_0} [(E_0 - E_1)^2 - E_1^2]$$

که در آن m_0 ، m_1 و m_2 جرمها و E_0 ، E_1 و E_2 انرژی‌های سکون مربوطه هستند.

(راهنمایی: بحث مسئله نمونه ۴۵-۲ را در نظر بگیرید به جز اینکه، در این حالت، هیچ کدام از ذرات ایجاد شده دارای جرم نیستند.) (ب) نشان دهید که نتیجه در (الف) انرژی جنبشی میون را برابر با انرژی جنبشی محاسبه شده در مسئله نمونه ۴۵-۲ به دست می‌دهد.

حل. (الف) پایستگی انرژی منجر به $E_0 = (E_1 + K_1) + (E_2 + K_2)$ می‌شود که در آن E_1 و E_2 انرژی‌های سکون، K_1 و K_2 انرژی‌های جنبشی دو ذره هستند. پایستگی اندازه حرکت به $\vec{P}_1 + \vec{P}_2 = 0$ و یا $|\vec{P}_1| = |\vec{P}_2|$ منجر می‌شود. انرژی‌ها و اندازه حرکت‌های ذرات با رابطه‌های زیر به هم مربوط می‌شوند:

$$(E_1 + K_1)^2 = E_1^2 + (p_1 c)^2, \quad (E_2 + K_2)^2 = E_2^2 + (p_2 c)^2$$

دیگر $4.32 \times 10^5 \text{ kg}$ آب چنین می‌شود:

$$N = \frac{4.32 \times 10^5 \text{ kg}}{3 \times 10^{-26} \text{ kg}} = 1.44 \times 10^{31}$$

این تعداد اتم‌های موجود در استخر آب است. از آنجا که تعداد پروتونهای موجود در یک مولکول آب برابر با ۱۰ عدد می‌باشد، تعداد پروتونهای موجود در استخر آب برابر می‌شود با:

$$N_p = \frac{10}{18} (1.44 \times 10^{31}) = 3 \times 10^{30}$$

حال با استفاده از معادله واپاشی پرتوزا $N = N_0 e^{-\lambda t}$ که در آن $N_0 = N_p$ و λ برابر است با:

$$\lambda = \frac{\ln 2}{T_{1/2}} = \frac{\ln 2}{10^{32} \text{ y}} = 6.93 \times 10^{-33} \text{ y}^{-1}$$

تعداد پروتونها پس از یک سال را به دست می‌آوریم:

$$N = (3 \times 10^{30}) e^{-(6.93 \times 10^{-33})}$$

برای محاسبه $e^{-(6.93 \times 10^{-33})}$ حقه‌ای می‌زنیم و آنرا به صورت زیر می‌نویسیم:

$$\begin{aligned} e^{-(6.93 \times 10^{-33})} &= e^{(-6.93)10^{-33}} = (9.78 \times 10^{-4})^{10^{-33}} \\ &= (9.78 \times 10^{-4})^{(0.001)^{11}} = (0.993093956)^{11} \\ &= 0.926603052 \end{aligned}$$

بنابراین تعداد پروتونها پس از یک سال برابر می‌شود با:

$$N = (3 \times 10^{30})(0.926603052) = 2.78 \times 10^{30}$$

۹ م - یک تائوی مثبت (τ^+ با 1777 MeV انرژی سکون) با انرژی جنبشی 2200 MeV در یک مسیر دایره‌ای عمود بر یک میدان مغناطیسی یکنواخت 1.2 T حرکت می‌کند. (الف) اندازه حرکت تائو را برحسب کیلوگرم متر بر ثانیه حساب کنید. اثرات نسبیتی را در نظر بگیرید. (ب) شعاع مسیر دایره‌ای را به دست آورید.

حل. (الف) اندازه حرکت نسبیتی از رابطه $p = (\sqrt{E^2 - E_0^2})/c$ به دست می‌آید که در آن

$$E = E_0 + K = (1777 + 2200) \text{ MeV} = 3977 \text{ MeV}$$

می‌باشد. بنابراین p چنین می‌شود:

$$\begin{aligned} p &= \frac{\sqrt{(3977 \text{ MeV})^2 - (1777 \text{ MeV})^2}}{c} \\ &= 3.558 \times 10^3 \frac{\text{MeV}}{c} \\ &= (3.558 \times 10^9 \text{ eV}) \frac{(1.6 \times 10^{-19} \text{ J/eV})}{3 \times 10^8 \text{ m/s}} \\ &= 1.9 \times 10^{-8} \text{ kg} \cdot \text{m/s} \end{aligned}$$

(ب) شعاع مسیر از قانون دوم نیوتن به دست می‌آید:

$$qvB = \frac{mv^2}{R}$$

که از آنجا شعاع مسیر R چنین می‌شود:

$$R = \frac{mv}{qB} = \frac{p}{qB}$$

(ت) اسپین پروتون برابر $\bar{n}/2$ ، اسپین پوزیترون برابر $\bar{n}/2$ ، و اسپین نوترینوی الکترون نیز برابر $\bar{n}/2$ است. پس به نظر می‌رسد که این واپاشی امکان‌پذیر نیست و یقیناً در ارائه این واپاشی اشتباه شده است. واپاشی‌ای که باید مدنظر این تمرین (و نیز در متن کتاب) قرار می‌گرفت $e^+ + \gamma \rightarrow p$ است. توجه کنید که این واپاشی نیز هیچکدام از قوانین پایستگی (الف) تا (پ) را تغییر نمی‌دهد و علاوه پایستگی اندازه حرکت زاویه‌ای نیز می‌تواند برای آن برقرار باشد. از آنجا که اسپین ذره گاما برابر با \bar{n} است، اسپین پوزیترون باید حتماً در خلاف جهت اسپین پروتون باشد تا مجموع اسپین طرفین این واپاشی برابر با $\bar{n}/2$ شود، و پایستگی اندازه حرکت زاویه‌ای برقرار بماند. بحث بعدی‌ای که کتاب تحت عنوان نقض عدد باریونی معرفی می‌کند نیز کاملاً برای این واکنش برقرار است.

۱۳ ت - کدام قانون پایستگی در هر یک از این واپاشیهای پیشنهادی نقض می‌شود؟ فرض کنید که ذره اولیه ساکن است و محصولات واپاشی دارای اندازه حرکت مداری صفرند. (الف) $\mu^- \rightarrow e^- + \nu_\mu$ ؛ (ب) $\mu^+ \rightarrow \pi^+ + \nu_\mu$ ؛ (پ) $\mu^- \rightarrow e^+ + \nu_e + \bar{\nu}_\mu$

حل. (الف) قوانین پایستگی‌ای که باید در نظر بگیریم، قوانین پایستگی انرژی، اندازه حرکت خطی، اندازه حرکت زاویه‌ای، بار و عدد باریونی است. انرژی سکون میون 105.7 MeV ، انرژی سکون الکترون 0.511 MeV ، و انرژی سکون نوترینو برابر با صفر است. بنابراین انرژی سکون کل پیش از واپاشی بزرگتر از انرژی سکون کل پس از واپاشی است. انرژی اضافی باقیمانده به انرژی‌های جنبشی محصولات واپاشی تبدیل می‌شود و پایستگی انرژی برقرار می‌ماند. اندازه حرکت خطی در صورتی پایسته است که الکترون و نوترینو پس از واپاشی، در سوی مخالف هم با اندازه حرکتی از لحاظ مقدار برابر، از هم دور شوند. چون اندازه حرکت زاویه‌ای مداری برابر با صفر است، فقط اندازه حرکت زاویه‌ای اسپینی را در نظر می‌گیریم. همه ذرات درگیر این واپاشی اسپین $\bar{n}/2$ دارند. پس اندازه حرکت زاویه‌ای پس از واپاشی باید یا برابر \bar{n} (در صورتی که جهت‌گیری اسپین‌ها یکسان باشد) و یا برابر صفر (برای جهت‌گیری اسپین‌ها در خلاف هم) باشد. چون اسپین پیش از واپاشی برابر با $\bar{n}/2$ است، بنابراین پایستگی اندازه حرکت زاویه‌ای برقرار نمی‌ماند. میون باری برابر با e^- ، الکترون باری برابر e^- ، و نوترینو باری برابر با صفر دارد. بنابراین بار کل پیش از واپاشی برابر با e^- و پس از واپاشی نیز برابر e^- است. پس بار پایسته می‌ماند. تمام ذرات درگیر این واپاشی عدد باریونی صفر دارند. پس پایستگی عدد باریونی نیز برقرار می‌ماند. پس تنها پایستگی‌ای که نقض می‌شود، پایستگی اندازه حرکت زاویه‌ای است.

دومین معادله $(p_\gamma c)^2 = (E_\gamma + K_\gamma)^2 - E_\gamma^2$ را می‌دهد. چون $(p_\gamma c)^2 = (p_\gamma c)^2$ است، معادله اول را نیز می‌توان به صورت $(E_\gamma + K_\gamma)^2 = E_\gamma^2 + (E_\gamma + K_\gamma)^2 - E_\gamma^2$ نوشت. با جانساندن $K_\gamma = E_\gamma - E_1 - K_1 - E_\gamma$ از معادله پایستگی انرژی در معادله اخیر به رابطه زیر می‌رسیم:

$$(E_\gamma + K_\gamma)^2 = E_\gamma^2 + (E_\gamma + E_\gamma - E_1 - K_1 - E_\gamma)^2 - E_\gamma^2 = E_\gamma^2 + [(E_\gamma - E_1) - K_1]^2 - E_\gamma^2$$

حال باید این رابطه را برای K_1 حل کنیم. رابطه بالا را می‌توانیم چنین نیز بنویسیم:

$$E_\gamma^2 + K_1^2 + 2E_\gamma K_1 = E_\gamma^2 + (E_\gamma - E_1)^2 + K_1^2 - 2K_1(E_\gamma - E_1) - E_\gamma^2 = E_\gamma^2 + (E_\gamma - E_1)^2 + K_1^2 - 2K_1 E_\gamma + 2K_1 E_1 - E_\gamma^2$$

و از آنجا با حذف جملات مشترک از طرفین به رابطه زیر می‌رسیم:

$$(E_\gamma - E_1)^2 - 2K_1 E_\gamma - E_\gamma^2 = 0$$

این رابطه، K_1 را چنین می‌دهد:

$$K_1 = \frac{1}{2E_\gamma} [(E_\gamma - E_1)^2 - E_\gamma^2]$$

(ب) m_π را میون، m_p را پروتون و m_n را نوترینو بگیرد. بنابراین $E_\pi = 139.6 \text{ MeV}$ ، $E_p = 938.3 \text{ MeV}$ ، $E_n = 939.6 \text{ MeV}$ و $E_\nu \approx 0$ می‌شود. در نتیجه برای K_1 به دست می‌آوریم:

$$K_1 = \frac{1}{2(139.6 \text{ MeV})} [(139.6 \text{ MeV} - 939.6 \text{ MeV})^2 - 0] = 412 \text{ MeV}$$

که همان مقداری است که برای انرژی میون در مسئله نمونه ۴۵-۲ به دست آمد.

بخش ۴۵-۵ قانون پایستگی دیگر

۱۲ ت - ثابت کنید طرح واپاشی پروتون فرضی که در معادله ۴۵-۱۱ داده شده است قوانین پایستگی زیر را نقض نمی‌کند (الف) بار، (ب) انرژی، (پ) اندازه حرکت خطی و (ت) اندازه حرکت زاویه‌ای. حل. واپاشی مورد نظر $e^+ + \nu_e \rightarrow p$ است. (الف) بار کل سیستم پیش از واپاشی برابر e (بار پروتون) و پس از واپاشی نیز برابر e (بار پوزیترون) (ب) چون جرم پروتون بزرگتر از جرم پوزیترون است، پایستگی انرژی می‌تواند برقرار بماند. انرژی مازاد به صورت انرژی‌های جنبشی پوزیترون و نوترینو ظاهر می‌شود. (پ) واپاشی، دو ذره را می‌دهد. اندازه حرکت‌های خطی این دو ذره از لحاظ مقدار برابر و از لحاظ جهت در خلاف هم هستند. بنابراین مجموع اندازه حرکتها برابر صفر می‌شود که همان اندازه حرکت پروتون ساکن است.

(ب) و (پ) اگر به همان ترتیب که در قسمت (الف) بررسی کردیم، قوانین پایستگی را برای این دو واپاشی نیز بررسی کنید در می‌یابید که برای واپاشی (ب) فقط بار پایسته نمی‌ماند و برای واپاشی (پ) انرژی و اندازه حرکت زاویه‌ای پایسته نخواهد ماند.

$$\begin{aligned}
 14 \text{ م} - \text{ذره } A_1^+ \text{ و محصولات واپاشی آن دارای طرح‌های زیر هستند} \\
 A_1^+ \rightarrow \rho^+ + \pi^+ \quad \mu^+ \rightarrow e^+ + \nu + \bar{\nu} \\
 \rho^+ \rightarrow \pi^+ + \pi^+ \quad \pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu} \\
 \pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu \quad \mu^- \rightarrow e^- + \nu + \bar{\nu}
 \end{aligned}$$

(الف) محصولات واپاشی نهایی پایدار کدام اند؟ (ب) از شواهد، ذره A_1^+ فرمیون است یا بوزن؟ این ذره مزون است یا باریون؟ عدد باریونی چند است؟ (راهنمایی: به مسئله نمونه ۴۵-۵ نگاه کنید) حل. (الف) با اولین واپاشی شروع می‌کنیم و مرحله به مرحله به جای محصولات واپاشی از معادلات واپاشی متناظر استفاده می‌کنیم تا به ذرات پایدار e^+ و e^- و نوترینو برسیم:

$$\begin{aligned}
 A_1^+ \rightarrow \rho^+ + \pi^+ \rightarrow \pi^+ + \pi^- + \pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu + \pi^- + \pi^+ \\
 \rightarrow e^+ + \nu + \bar{\nu} + \nu + \pi^- + \pi^+ \rightarrow e^+ + \nu + \bar{\nu} + \nu + \mu^- + \bar{\nu} \\
 + \mu^+ + \nu \rightarrow e^+ + \nu + \bar{\nu} + \bar{\nu} + e^- + \nu + \bar{\nu} + \bar{\nu} + e^+ + \nu + \bar{\nu} + \nu \\
 \text{و یا} \\
 \rightarrow 2e^+ + e^- + 4\nu + 5\bar{\nu}
 \end{aligned}$$

(ب) همان‌طور که مشاهده می‌کنیم، تمام محصولات واپاشی ذراتی با اسپین $\hbar/2$ هستند و چون تعداد آنها زوج است (۱۲ عدد)، اسپین A_1^+ باید مضرب زوجی از $\hbar/2$ باشد. پس عدد کوانتمی اسپینی A_1^+ باید صحیح باشد و بنابراین A_1^+ یک بوزون است. تمام محصولات واپاشی، لپتون هستند و بنابراین عدد باریونی محصولات واپاشی برابر با صفر است. پس باید عدد باریونی A_1^+ هم صفر باشد و بنابراین A_1^+ یک مزون است.

بخش ۴۵-۷ راه هشگانه

۱۵ ت - واکنش $\pi^+ + p \rightarrow p + p + \bar{n}$ به وسیله برهم کنش قوی ایجاد می‌شود. با به کار بردن قوانین پایستگی؛ بار، عدد باریونی و شگفتی پادنوترون را به دست آورید.

حل. به منظور یافتن خواص پادنوترون، یک پروتون را از طرفین واکنش حذف می‌کنیم و واکنش معادل را چنین می‌نویسیم:

$$\pi^+ \rightarrow p + \bar{n}$$

خواص ذرات را می‌توانیم از جدول‌های ۴۵-۳ و ۴۵-۴ دریا بیم. چون پيون و پروتون هر کدام بار e دارند، پادنوترون باید خنثی باشد. پيون عدد باریونی صفر دارد (چراکه یک بوزون است) و پروتون عدد باریونی $1+$ دارد. بنابراین عدد باریونی پادنوترون باید $1-$ باشد. پيون و پروتون شگفتی‌ای برابر با صفر دارند و بنابراین شگفتی پادنوترون نیز باید برابر با صفر باشد. به‌طور خلاصه، برای پادنوترون $Q=0$ ، $B=-1$ و $S=0$ می‌شود.

۱۶ ت - با بررسی شگفتی، معین کنید کدامیک از واپاشیها یا واکنشها به وسیله برهم کنش قوی حاصل می‌شوند:

$$\begin{aligned}
 \text{(الف)} \quad K^0 \rightarrow \pi^+ + \pi^- \quad ; \quad \text{(ب)} \quad \Lambda^0 + p \rightarrow \Sigma^+ + n \\
 \text{(پ)} \quad \Lambda^0 \rightarrow p + \pi^- \quad ; \quad \text{(ت)} \quad K^- + p \rightarrow \Lambda^0 + \pi^0
 \end{aligned}$$

حل. به این منظور باید شگفتی کلی را پیش و پس از هر واپاشی یا واکنش محاسبه کنیم. اگر مقدار آن تغییر نکند، آنگاه آن واپاشی یا واکنش می‌تواند به وسیله برهم کنش قوی حاصل شده باشد. اگر عدد شگفتی تغییر کند، واپاشی یا واکنش نمی‌تواند به وسیله برهم کنش قوی حاصل شده باشد. برای یافتن شگفتی ذرات باید سراغ جدول‌های ۴۵-۳ و ۴۵-۴ برویم.

(الف) شگفتی K^0 برابر با $1+$ ، شگفتی π^+ برابر با صفر، و شگفتی π^- نیز برابر با صفر است. بنابراین شگفتی پایسته نمی‌ماند و این واپاشی نمی‌تواند بر اثر برهم کنش قوی حاصل شده باشد.

(ب) شگفتی Λ^0 برابر با $1-$ ، شگفتی p برابر با صفر، شگفتی Σ^+ برابر با $1-$ ، و شگفتی n برابر با صفر است. بنابراین شگفتی پایسته می‌ماند و این واکنش می‌تواند بر اثر برهم کنش قوی حاصل شده باشد.

(پ) شگفتی Λ^0 برابر با $1-$ ، شگفتی p برابر با صفر و شگفتی π^- برابر با صفر است. بنابراین شگفتی پایسته نمی‌ماند و این واپاشی نمی‌تواند بر اثر برهم کنش قوی حاصل شده باشد.

(ت) شگفتی K^- برابر با $1-$ ، شگفتی p برابر با صفر، شگفتی Λ^0 برابر با $1-$ ، و شگفتی π^0 برابر با صفر است. بنابراین شگفتی پایسته می‌ماند و این واکنش می‌تواند بر اثر برهم کنش قوی حاصل شده باشد.

۱۷ ت - کدام قانون پایستگی در هر یک از این واکنشها یا واپاشیهای پیشنهادی نقض می‌شود؟ (فرض کنید که محصولات دارای اندازه حرکت زاویه‌ای مداری صفرند.)

$$\begin{aligned}
 \text{(الف)} \quad \Lambda^0 \rightarrow p + K^- \quad ; \quad \text{(ب)} \quad \Omega^- \rightarrow \Sigma^- + \pi^0 \quad (\text{به ازای } \Omega^-) \\
 S = -3, Q = -1 \quad ; \quad \text{(پ)} \quad K^- + p \rightarrow \Lambda^0 + \pi^+
 \end{aligned}$$

حل. (الف) باید علاوه بر قانون‌های پایستگی‌ای که در تمرین ۱۳ در نظر گرفتیم، پایستگی شگفتی را نیز بررسی کنیم. لاندانرژی سکونی برابر با 1115.6 MeV ، پروتون انرژی سکونی برابر با 938.3 MeV ، و کائون انرژی سکونی برابر با 493.7 MeV دارد. انرژی سکون پیش از واپاشی کمتر از مجموع انرژی سکون پس از واپاشی است؛ بنابراین انرژی پایسته نمی‌ماند. ولی اندازه حرکت خطی می‌تواند پایسته بماند. لاندانرژی و پروتون هر دو اسپینی برابر با $\hbar/2$ و کائون اسپینی برابر با صفر دارد. بنابراین اندازه حرکت زاویه‌ای نیز می‌تواند پایسته بماند. بار ذره لاندانرژی برابر با صفر، بار پروتون برابر با $e+$ ، و بار کائون برابر با $e-$ است. بنابراین بار هم پایسته می‌ماند. لاندانرژی و پروتون هر یک

(ب) انرژی فروپاشی از رابطه زیر حاصل می‌شود:

$$Q = (M_K + M_p - M_\Lambda - M_\pi) c^2$$

جرم‌های مورد نیاز را از جدول‌های ۴۵ - ۳ و ۴۵ - ۴ به دست می‌آوریم:

$$Q = (493.7 + 938.3 - 1115.6 - 135) \frac{\text{MeV}}{c^2} c^2 = 181.4 \text{ MeV}$$

۱۹ ت - یک ذره Σ^- که با انرژی جنبشی 220 MeV حرکت می‌کند طبق $\Sigma^- \rightarrow \pi^- + n$ واپاشی می‌کند. انرژی جنبشی کل محصولات واپاشی را محاسبه کنید.

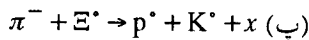
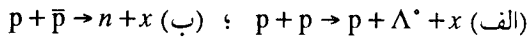
حل. انرژی جنبشی کل محصولات واپاشی برابر با تفاضل انرژی کل Σ^- و انرژی‌های سکون π^- و n است. انرژی کل Σ^- برابر با انرژی سکون و انرژی جنبشی آن است. انرژی سکون Σ^- را از جدول ۴۵ - ۳ برابر 1197.3 MeV به دست می‌آوریم و چون انرژی جنبشی آن برابر با 220 MeV است، انرژی کل آن چنین می‌شود:

$$E = E_0 + K = 220 \text{ MeV} + 1197.3 \text{ MeV} = 1417.3 \text{ MeV}$$

انرژی‌های سکون محصولات واپاشی π^- و n را نیز از جدول‌های ۴۵ - ۳ و ۴۵ - ۴ به ترتیب برابر با 139.6 MeV و 939.6 MeV به دست می‌آوریم. پس مجموع انرژی‌های سکون محصولات واپاشی برابر با 1079.2 MeV می‌شود. بنابراین انرژی جنبشی محصولات واپاشی چنین می‌شود:

$$K' = 1417.3 \text{ MeV} - 1079.2 \text{ MeV} = 338.1 \text{ MeV}$$

۲۰ م - برای شناسایی ذره‌ای که با x مشخص شده از قوانین پایستگی در هر یک از واکنشهای زیر که به وسیله برهم کنش قوی حاصل شده استفاده کنید:



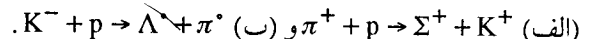
حل. (الف) می‌توانیم بی‌آنکه هیچ پایستگی‌ای را نقض کنیم، یک پروتون را از دو طرف واکنش حذف کنیم و این واکنش را به صورت $p \rightarrow \Lambda^0 + x$ بنویسیم. چون پروتون و لانداهریک اسپینی برابر $\hbar/2$ دارند، اندازه حرکت زاویه‌ای اسپینی x باید یا صفر و یا \hbar باشد. چون بار پروتون $+e$ و لانداهریک x باید باری برابر $+e$ داشته باشد. چون عدد باریونی پروتون و لانداهریک برابر $+1$ است، عدد باریونی x باید برابر صفر باشد. چون شگفتی پروتون صفر و شگفتی لانداهریک -1 است، شگفتی x برابر $+1$ می‌شود. اگر ذره مجهول را مزونی اسپین صفر، بار $+e$ و شگفتی $+1$ در نظر بگیریم، از جدول ۴۵ - ۴ در می‌یابیم که این ذره K^+ است.

عدد باریونی $+1$ دارند و عدد باریونی کائون صفر است. بنابراین عدد باریونی هم پایسته می‌ماند. لانداهریک کائون شگفتی -1 و پروتون شگفتی صفر دارند. بنابراین شگفتی نیز پایسته می‌ماند. پس تنها پایستگی انرژی نمی‌تواند برقرار باشد.

(ب) امگا انرژی سکونی برابر با 1680 MeV ، سیگما انرژی سکونی برابر با 1197.3 MeV ، و پيون انرژی سکونی برابر با 135 MeV دارند. انرژی سکون پيش از واپاشی بزرگتر از مجموع انرژی سکون پس از واپاشی است و بنابراین انرژی می‌تواند پایسته بماند. اندازه حرکت خطی نیز می‌تواند پایسته بماند. ذره امگا و ذره سیگما هریک اسپینی برابر با $\hbar/2$ دارند و اسپین پيون برابر با صفر است. بنابراین اندازه حرکت زاویه‌ای می‌تواند پایسته بماند. امگا بار $-e$ ، سیگما بار $-e$ ، و پيون بار صفر دارد. بنابراین بار هم پایسته می‌ماند. امگا و سیگما عدد باریونی $+1$ و پيون عدد باریونی صفر دارند. بنابراین عدد باریونی نیز پایسته می‌ماند. شگفتی امگا برابر -3 ، شگفتی سیگما برابر -1 ، و شگفتی پيون برابر با صفر است. بنابراین شگفتی در این واپاشی پایسته نمی‌ماند.

(پ) هرچند که انرژی سکون کل پس از برخورد بزرگتر از انرژی سکون کل پیش از برخورد است، با این حال کائون و پروتون می‌توانند انرژی جنبشی لازم برای این واکنش را تدارک ببینند و بنابراین انرژی می‌تواند پایسته بماند. اندازه حرکت خطی هم می‌تواند پایسته بماند. پروتون و لانداهریک اسپینی برابر با $\hbar/2$ و کائون و پيون هریک اسپینی برابر با صفر دارند. بنابراین اندازه حرکت زاویه‌ای می‌تواند پایسته بماند. بار کائون $-e$ ، بار پروتون $+e$ ، بار لانداهریک صفر، و بار پيون $+e$ است. بنابراین پایستگی بار برقرار نمی‌باشد. پروتون و لانداهریک عدد باریونی $+1$ و کائون و پيون عدد باریونی برابر با صفر دارند. بنابراین عدد باریونی پایسته می‌ماند. شگفتی کائون برابر با -1 ، شگفتی پروتون و پيون هریک برابر با صفر، و شگفتی لانداهریک برابر با -1 است. بنابراین شگفتی نیز پایسته می‌ماند. پس در این واکنش فقط بار پایسته نمی‌ماند.

۱۸ ت - انرژی فروپاشی واکنشهای زیر را حساب کنید:



حل. (الف) انرژی فروپاشی از رابطه زیر حاصل می‌شود:

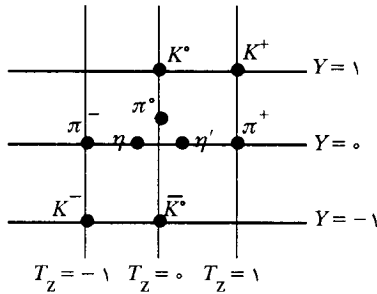
$$Q = (M_\pi + M_p - M_\Sigma - M_K) c^2$$

جرم‌های مورد نیاز را از جدول‌های ۴۵ - ۳ و ۴۵ - ۴ به دست می‌آوریم:

$$Q = (139.6 + 938.3 - 1189.4 - 493.7) \frac{\text{MeV}}{c^2} c^2 = -605.2 \text{ MeV}$$

ذره	$Y=B+S$	$T_z=Q-\frac{B}{2}$
π^0	۰	۰
π^+	۰	+۱
π^-	۰	-۱
K^+	+۱	+۱
K^-	-۱	-۱
K^0	+۱	۰
\bar{K}^0	-۱	۰
η	۰	۰
η'	۰	۰

آنگاه نمایش Y برحسب T_z چنین می‌شود:



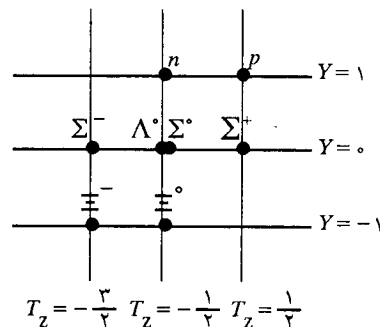
(ب) تحلیلی مشابه آنچه که در قسمت (الف) انجام دادیم، ذره مجهول را پادنوترونی با اسپین $-\hbar/2$ ، بار و شگفتی صفر می‌دهد. با استفاده از جدول ۴۵ - ۳ درمی‌یابیم که این ذره یک پادنوترون است.

(پ) با تحلیلی مشابه درمی‌یابیم که ذره مجهول مزونی با اسپین صفر (یا $-\hbar$)، بار صفر و شگفتی -1 است. با استفاده از جدول ۴۵ - ۴ ذره مجهول را K^0 می‌یابیم.

۲۱ م - نشان دهید که اگر به جای رسم S بر حسب Q برای باریونهای با اسپین $\frac{1}{2}$ در شکل ۴۵-۴ الف و برای مزونهای با اسپین صفر در شکل ۴۵-۴ ب، کمیت $Y=B+S$ را برحسب کمیت $T_z=Q-\frac{1}{2}B$ رسم کنیم، آنگاه نقشهای هشت ضلعی با استفاده از محورهای غیر مورب (عمود) ظاهر می‌شوند. (کمیت Y هیپو بار نام دارد و T_z به کمیتی به نام ایزواسپین مربوط است.) حل. ذرات جدول ۴۵ - ۳ همگی باریون بوده و برای آنها $B=1$ است. حال با استفاده از این جدول آبربار (هیپوبار) و ایزواسپین را برای باریونها تشکیل می‌دهیم:

ذره	$Y=B+S$	$T_z=Q-\frac{B}{2}$
p	۱	$\frac{1}{2}$
n	۱	$-\frac{1}{2}$
Λ^0	۰	$-\frac{1}{2}$
Σ^+	۰	$\frac{1}{2}$
Σ^0	۰	$-\frac{1}{2}$
Σ^-	۰	$-\frac{3}{2}$
Ξ^0	-۱	$-\frac{1}{2}$
Ξ^-	-۱	$-\frac{3}{2}$

آنگاه نمایش Y برحسب T_z چنین می‌شود:



ذرات جدول ۴۵ - ۴ همگی مزون بوده و برای آنها $B=0$ است. حال با استفاده از این جدول آبربار (هیپوبار) و ایزواسپین را برای مزونها تشکیل می‌دهیم.

۲۲ م - واپاشی $\Lambda^0 \rightarrow p + \pi^-$ با Λ^0 ساکن را در نظر بگیرید. (الف) انرژی فروپاشی را حساب کنید. (ب) انرژی جنبشی پروتون را به دست آورید. (پ) انرژی جنبشی پیون چقدر است؟ (راهنمایی: به مسئله ۱۱ نگاه کنید.)

حل. (الف) انرژی فروپاشی با رابطه $Q = (M_\Lambda - M_p - M_\pi)c^2$ داده می‌شود. جرم‌های مورد نیاز را از جدول‌های ۴۵ - ۳ و ۴۵ - ۴ به دست می‌آوریم. در نتیجه Q چنین می‌شود:

$$Q = (1115.6 - 938.3 - 139.6) \frac{\text{MeV}}{c^2} c^2 = -7.3 \text{ MeV}$$

(ب) با استفاده از رابطه‌ای که حل مسئله ۱۱ به دست آوردیم انرژی جنبشی پروتون را به دست می‌آوریم. به این منظور پروتون را ذره ۱ و پیون را ذره ۲ بگیرد. در نتیجه خواهیم داشت:

$$K_1 = \frac{1}{2E_1} [(E_2 - E_1)^2 - E_2^2] = \frac{1}{2(1115.6 \text{ MeV})} [(1115.6 \text{ MeV} - 938.3 \text{ MeV})^2 - (139.6 \text{ MeV})^2] = 5.35 \text{ MeV}$$

که در آن از انرژی‌های مندرج در جدول‌های ۴۵ - ۳ و ۴۵ - ۴ استفاده کردیم.

(ب) بار دیگر از رابطه‌ای که در حل مسئله ۱۱ به دست آوردیم، استفاده می‌کنیم. منتها این بار پیون را ذره ۱ و پروتون را ذره ۲ می‌گیریم. در نتیجه خواهیم داشت:

$$K_1 = \frac{1}{2(1115.6 \text{ MeV})} [(1115.6 \text{ MeV} - 139.6 \text{ MeV})^2 - (938.3 \text{ MeV})^2] = 32.35 \text{ MeV}$$

بخش ۴۵-۸ مدل کوارکی

۲۳ ت - ساختارهای کوارکی پروتون و نوترون به ترتیب، uud و udd هستند. ساختار کوارکی (الف) پاد پروتون و (ب) پادنوترون کدامند؟
حل. (الف) و (ب) بدیهی است که به ترتیب $\bar{u}\bar{u}\bar{d}$ و $\bar{u}\bar{d}\bar{d}$ می شوند.

۲۴ - از جدول ۴۵-۳ و ۴۵-۵ خصیصه های باریون تشکیل شده از ترکیبهای کوارکی زیر را مشخص کنید. جواب خود را با باریون هشتایی نشان داده شده در شکل ۴۵-۴ الف واریسی کنید:
(الف) ddu ; (ب) uus ; (پ) ssd

حل. به این منظور باید عدد باریونی، بار و شگفتی ترکیبهای کوارکی داده شده را با جمع زدن خواص کوارکهای منفرد به دست آوریم. این خاصیتها در جدول ۴۵-۴ یافت می شوند. آنگاه با استفاده از جدول ۴۵-۳ ذره مورد نظر را به دست می آوریم.
(الف) عدد باریونی کوارک u برابر $\frac{1}{3}$ + و عدد باریونی کوارک d نیز برابر $\frac{1}{3}$ + است. بنابراین عدد باریونی ddu برابر ۱ می شود. بار کوارک u برابر $e \frac{2}{3}$ + و بار کوارک d برابر $e \frac{1}{3}$ - است. بنابراین بار ddu برابر صفر می شود. شگفتی کوارکهای u و d هر دو برابر صفر است و بنابراین شگفتی ddu برابر صفر می شود. پس باریونی با بار صفر و شگفتی صفر داریم که طبق جدول ۴۵-۳ نام آن نوترون است.

(ب) عدد باریونی کوارک u برابر $\frac{1}{3}$ +، بار آن برابر $e \frac{2}{3}$ + و شگفتی آن برابر صفر است. عدد باریونی کوارک s برابر $\frac{1}{3}$ +، بار آن برابر $e \frac{1}{3}$ - و شگفتی آن برابر ۱ - است. پس عدد باریونی uus برابر ۱، بار آن برابر e و شگفتی آن برابر ۱ - است. نام این ذره طبق جدول ۴۵-۳، سیگما است.

(پ) عدد باریونی کوارک d برابر $\frac{1}{3}$ +، بار آن برابر $e \frac{1}{3}$ - و شگفتی آن برابر صفر است. عدد باریونی کوارک s برابر $\frac{1}{3}$ +، بار آن برابر $e \frac{1}{3}$ - و شگفتی آن برابر ۲ - است. نام چنین ذره ای طبق جدول ۴۵-۳، کیسی (xi) منفی یا Ξ^- است.

۲۵ ت - چه ترکیبی از کوارکها برای تشکیل (الف) یک Λ^0 و (ب) یک Ξ^0 مورد نیاز است؟

حل. (الف) Λ^0 . چرا که Λ^0 ذره ای با بار صفر و شگفتی ۱ - است. اگر اعداد گوانتمی s ، u و d را از جدول ۴۵-۵ جای گذاری کنیم به همین نتیجه می رسیم.

(ب) Ξ^0 . چرا که Ξ^0 ذره ای با بار صفر و شگفتی ۲ - است. اگر اعداد گوانتمی u و s را از جدول ۴۵-۵ جای گذاری کنیم به همین نتیجه می رسیم.

۲۶ ت - با استفاده از فقط کوارکهای بالا، پایین و شگفت، اگر ممکن باشد، یک باریون را (الف) با $Q = +1$ و $S = -2$ و (ب) با $Q = +2$ و $S = 0$ بسازید.

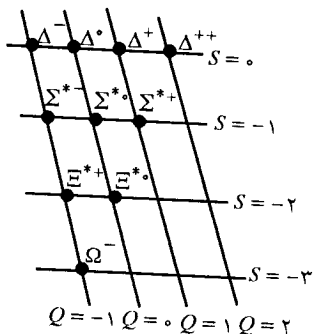
حل. (الف) به سه ردیف اول جدول ۴۵-۵ نگاه کنید. چون ذره یک باریون است، باید از سه کوارک تشکیل شده باشد. برای به دست آوردن شگفتی ۲ -، دو تا از کوارکها باید حتماً کوارک s باشند. هر یک از کوارکهای s باری برابر $\frac{e}{3}$ - دارند که جمع دو تای آنها برابر $e \frac{2}{3}$ - می شود. برای به دست آوردن بار کلی e ، بار کوارک سوم باید $e \frac{5}{3}$ باشد. هیچ کوارکی با این بار وجود ندارد. بنابراین چنین ذره ای نمی تواند ساخته شود. در واقع چنین ذره ای تاکنون دیده نشده است.

(ب) باز ذره شامل سه کوارک (و نه پادکوارک) است. برای به دست آوردن شگفتی صفر، هیچکدام از این سه کوارک نباید کوارک s باشند. ما باید ترکیبی از سه کوارک u و d را طوری اختیار کنیم که بار مجموع آنها e بشود. تنها ترکیب ممکن، شامل سه کوارک u است.
۲۷ ت - ده باریون با اسپین $\frac{1}{2}$ وجود دارند. نماد و عددهای کوانتومی آنها به این قرارند

	S	Q		S	Q
Δ^-	۰	-۱	Σ^{*0}	۰	-۱
Δ^0	۰	۰	Σ^{*+}	+۱	-۱
Δ^+	۰	+۱	Ξ^{*-}	-۱	-۲
Δ^{++}	۰	+۲	Ξ^{*0}	۰	-۲
Σ^-	-۱	-۱	Ω^-	-۱	-۳

یک نمودار بار - شگفتی برای این باریونها، با استفاده از دستگاه مختصات مورب شکل ۴۵-۴، بسازید. نمودار خود را با این شکل مقایسه کنید.

حل. نمودار مورد نظر به قرار زیر می شود:



۲۸ م - مزونی با $Q = +1$ و $S = -1$ یا $Q = -1$ و $S = +1$ مشاهده نشده است. علت را با استفاده از مدل کوارکی توضیح دهید.
حل. $S = -1$ نشان دهنده آن است که مزون مورد نظر حتماً شامل یک کوارک s که بار آن $e \frac{1}{3}$ - است، می باشد. پس برای آنکه مزونی $Q = +e$ و $S = -1$ داشته باشیم، باید بار پادکوارک $e \frac{4}{3}$

حل. از قانون «هابل» (معادله ۴۵ - ۱۵ کتاب) داریم:

$$r = \frac{v}{H} = \left(\frac{3 \times 10^8 \text{ m/s}}{80 \text{ km/s.Mpc}} \right) \left(\frac{3.084 \times 10^{19} \text{ km}}{1 \text{ Mpc}} \right) \left(\frac{1 \text{ ly}}{9.46 \times 10^{15} \text{ m}} \right) = 12.22 \times 10^9 \text{ ly}$$

۳۱ ت - طول موج مشاهده شده خط $H\alpha$ هیدروژن برابر 656.3 nm که به وسیله کپکشانی از فاصله $2.4 \times 10^8 \text{ ly}$ گسیل می‌شود، چقدر است؟

حل. از معادله ۳۴ - ۵۷ کتاب برای انتقال داپلری طول موج استفاده می‌کنیم:

$$\frac{\Delta \lambda}{\lambda} = \frac{v}{c}$$

که در آن v تندی «پس‌روی» کپکشان است (البته توجه کنید که در معادله ۱۸ - ۵۷، تندی با نماد u مشخص شده است). با استفاده از قانون «هابل» تندی پس‌روی را برابر با $v = Hr$ به دست می‌آوریم که در آن r فاصله تا کپکشان و H ثابت هابل یعنی $H = 80 \text{ km/(s.Mpc)} = 2.45 \times 10^{-2} \text{ m/(s.ly)}$ است. بنابراین تندی v چنین می‌شود:

$$v = [2.45 \times 10^{-2} \text{ m/(s.ly)}][2.4 \times 10^8 \text{ ly}] = 5.88 \times 10^6 \text{ m/s}$$

و از آنجا با استفاده از رابطه انتقال طول موج «داپلر»، $\Delta \lambda$ را محاسبه می‌کنیم:

$$\Delta \lambda = \frac{v}{c} \lambda = \left(\frac{5.88 \times 10^6 \text{ m/s}}{3 \times 10^8 \text{ m/s}} \right) (656.3 \text{ nm}) = 12.9 \text{ nm}$$

چون کپکشان در حال پس‌روی است، طول موج مشاهده شده بلندتر از طول موج در چارچوب سکون کپکشان است؛ و مقدار آن چنین می‌شود:

$$\lambda' = \lambda + \Delta \lambda = 656.3 \text{ nm} + 12.9 \text{ nm} = 669.2 \text{ nm}$$

۳۲ ت - در آزمایشگاه، یکی از خطوط سدیم با طول موج 589.0 nm گسیل می‌شود. در نوری از یک کپکشان مشخص، این خط با طول موج 602.0 nm مشاهده می‌شود. با فرض اینکه قانون هابل برقرار است، فاصله کپکشان را حساب کنید.

حل. طول موج مشاهده شده، انتقال داپلری پیدا کرده است و میزان این انتقال برابر است با:

$$\Delta \lambda = \lambda' - \lambda = 602.0 \text{ nm} - 589.0 \text{ nm} = 12 \text{ nm}$$

آنگاه با استفاده از رابطه انتقال طول موج «داپلر»، تندی پس‌روی ظاهری کپکشان را به دست می‌آوریم:

$$v = \left(\frac{\Delta \lambda}{\lambda} \right) c = \left(\frac{12 \text{ nm}}{656.3 \text{ nm}} \right) (3 \times 10^8 \text{ m/s}) = 5.485 \times 10^6 \text{ m/s}$$

و شگفتی آن صفر باشد. با نگاهی به جدول ۴۵ - ۴ کتاب در می‌یابیم که چنین کواری نمی‌تواند وجود داشته باشد.

همچنین $S = +1$ نشان‌دهنده آن است که مزون مورد نظر حتماً شامل یک پادکواریک s که بار آن $+\frac{e}{3}$ است، می‌باشد. پس برای آنکه مزونی با $Q = -1$ و $S = +1$ داشته باشیم، باید بار کواریک e و $-\frac{4}{3}$ و شگفتی آن صفر باشد. با نگاهی به جدول ۴۵ - ۴ کتاب در می‌یابیم که چنین کواریک نمی‌تواند وجود داشته باشد. ۲۹ م - باریون Σ^{*0} با اسپین $\frac{3}{2}$ (به تمرین ۲۷ نگاه کنید) دارای انرژی سکون 1385 MeV (با چشمپوشی از عدم قطعیت ذاتی در اینجا) و باریون Σ^0 با اسپین $\frac{1}{2}$ دارای انرژی 1192.5 MeV است. اگر هر یک از این ذرات دارای انرژی جنبشی 1000 MeV باشند، کدامیک سریعتر حرکت می‌کند و به چه مقدار؟

حل. انرژی جنبشی K و تندی v یک ذره با فرمول نسبیتی زیر به هم مربوط می‌شوند:

$$K = \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1 - (v/c)^2}} - m_0 c^2$$

که در آن m_0 جرم سکون ذره نسبیتی می‌باشد. اگر این معادله را برای v حل کنیم به رابطه زیر می‌رسیم:

$$v = \sqrt{1 - \left(\frac{m_0 c^2}{K + m_0 c^2} \right)^2} c$$

حال باید تندی v را با استفاده از این رابطه Σ^{*0} و Σ^0 محاسبه و مقدار آنها را با هم مقایسه کنیم. توجه کنید که $m_0 c^2$ همان انرژی سکون است. بنابراین برای ذره Σ^{*0} خواهیم داشت:

$$v = \sqrt{1 - \left(\frac{1385 \text{ MeV}}{1000 \text{ MeV} + 1385 \text{ MeV}} \right)^2} c = 0.814 c$$

و برای ذره Σ^0 ، تندی چنین می‌شود:

$$v = \sqrt{1 - \left(\frac{1192.5 \text{ MeV}}{1000 \text{ MeV} + 1192.5 \text{ MeV}} \right)^2} c = 0.839 c$$

پس تندی ذره Σ^0 بیشتر است و اختلاف آن با تندی ذره Σ^{*0} چنین می‌شود:

$$\Delta v = (0.839 c - 0.814 c) = 0.025 c = (0.025)(3 \times 10^8 \text{ m/s}) = 7.513 \times 10^6 \text{ m/s} = 7513 \text{ km/s}$$

بخش ۴۵-۱۱ جهان در حال انبساط

۳۰ ت - اگر بتوان قانون «هابل» را تا فاصله‌های خیلی دور گسترش داد، در چه فاصله‌ای تندی ظاهری پس‌روی برابر تندی نور می‌شود؟

حال با استفاده از قانون «هابل»، فاصله کیهکشان را محاسبه می‌کنیم:

$$r = \frac{v}{H} = \left(\frac{5.485 \times 10^6 \text{ m/s}}{80 \text{ km/s.Mpc}} \right) \left(\frac{3.084 \times 10^{19} \text{ km}}{1 \text{ Mpc}} \right) \left(\frac{1 \text{ ly}}{9.46 \times 10^{15} \text{ m}} \right) = 2.23 \times 10^8 \text{ ly}$$

۳۳ م - تندیهای پس‌روی ظاهری کیهکشانها و اختروشها در فاصله‌های دور به تندی نور نزدیک اند، به طوری که فرمول انتقال دوپلری نسبیتی (معادله ۳۸-۲۵) باید به کار برده شود. انتقال به سرخ به صورت کسر انتقال به سرخ $z = \Delta\lambda/\lambda$ گزارش شده است. (الف) نشان دهید که پارامتر تندی پس‌زنی $\beta = v/c$ ، برحسب z با رابطه زیر داده می‌شود

$$\beta = \frac{z^2 + 2z}{z^2 + 2z + 2}$$

(ب) اختروش آشکار شده‌ای در سال ۱۹۸۷/۱۳۶۶ دارای $z = 4.43$ است. پارامتر تندی آن را حساب کنید. (پ) فاصله اختروش را با فرض اینکه قانون هابل در این فاصله برقرار است، حساب کنید.

حل. (الف) طبق معادله ۳۸ - ۲۵ کتاب، بسامد دریافت شده از چشمه‌ای که از مشاهده‌گر دور می‌شود با رابطه زیر داده می‌شود:

$$f = f_0 \sqrt{\frac{1-\beta}{1+\beta}}$$

بنابراین طول موج دریافت شده چنین می‌شود:

$$\lambda = \lambda_0 \sqrt{\frac{1+\beta}{1-\beta}}$$

حال باید این طول موج را در رابطه $z = \Delta\lambda/\lambda_0$ بنشانیم و آنرا برای β حل کنیم:

$$z = \frac{\lambda_0 \sqrt{\frac{1+\beta}{1-\beta}} - \lambda_0}{\lambda_0} = \sqrt{\frac{1+\beta}{1-\beta}} - 1$$

و از آنجا خواهیم داشت:

$$\frac{1+\beta}{1-\beta} = (z+1)^2$$

و یا

$$1+\beta = (1-\beta)(z+1)^2 = (z+1)^2 - \beta(z+1)^2 = z^2 + 2z + 1 - \beta(z^2 + 2z + 1)$$

و یا

$$\beta(z^2 + 2z + 2) = z^2 + 2z$$

و از آنجا β چنین می‌شود:

$$\beta = \frac{z^2 + 2z}{z^2 + 2z + 2}$$

(ب) کافی است $z = 4.43$ را در نتیجه قسمت (الف) بنشانیم:

$$\beta = \frac{(4.43)^2 + 2(4.43)}{(4.43)^2 + 2(4.43) + 2} = 0.934$$

(پ) حال با توجه به اینکه تندی پس‌روی را داریم

کوارکها، لبتونها و انفجار بزرگ / ۳۲۵

حال با استفاده از قانون «هابل» خواهیم داشت:

$$r = \frac{v}{H} = \left(\frac{0.934 \times 3 \times 10^8 \text{ m/s}}{80 \text{ km/s.Mpc}} \right) \left(\frac{3.084 \times 10^{19} \text{ km}}{1 \text{ Mpc}} \right) \left(\frac{1 \text{ ly}}{9.46 \times 10^{15} \text{ m}} \right) = 1.143 \times 10^9 \text{ ly}$$

۳۴ م - آیا جهان برای همیشه انبساط می‌یابد؟ برای پاسخگویی به این پرسش، فرضی (یا منطقی) را در نظر بگیرید که تندی پس‌روی v کیهکشان در فاصله r از ما فقط به وسیله ماده داخل کره‌ای که مرکز آن به فاصله r از ما قرار دارد، محاسبه می‌شود. اگر جرم کل داخل این کره M باشد، تندی فرار v_e از این کره با رابطه $v_e = \sqrt{2GM/r}$ (معادله ۱۴-۲۶) داده می‌شود. (الف) نشان دهید که برای جلوگیری از انبساط نامحدود، چگالی میانگین ρ داخل کره باید حداقل برابر باشد با

$$\rho = \frac{3H^2}{8\pi G}$$

(ب) این «چگالی بحرانی» را به طور عددی محاسبه کنید؛ پاسخ خود را بر حسب اتمهای هیدروژن در متر مکعب بیان کنید. اندازه‌گیری چگالی واقعی مشکل است و با حضور ماده تاریک پیچیده می‌شود.

حل. (الف) به این منظور باید به جای تندی فرار از رابطه «هابل» $Hr = v$ و به جای جرم از رابطه $m = (4\pi/3)r^3\rho$ بنشانیم. در نتیجه خواهیم داشت:

$$v_e = \sqrt{\frac{2GM}{r}}$$

و از آنجا

$$Hr = \sqrt{\frac{2G \cdot \frac{4\pi}{3} r^3 \rho}{r}}$$

حال با به توان دو رساندن طرفین این معادله به رابطه زیر می‌رسیم:

$$\rho = \frac{3H^2}{8\pi G}$$

(ب) به جای H و G در این رابطه می‌نشانیم و ρ را محاسبه می‌کنیم:

$$\rho = \frac{3 \left[(80 \text{ km/s.Mpc}) \left(\frac{1 \text{ Mpc}}{3.084 \times 10^{19} \text{ km}} \right) \right]^2}{8\pi (6.67 \times 10^{-11} \text{ m}^3/\text{s}^2 \cdot \text{kg})}$$

$$= 1.2 \times 10^{-26} \text{ kg/m}^3$$

جرم یک اتم هیدروژن برابر است با:

$$m_H = (1.007825 \text{ u}) (1.661 \times 10^{-27} \text{ kg/u})$$

$$= 1.674 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

بنابراین «چگالی بحرانی» برحسب تعداد اتمهای هیدروژن بر متر مکعب چنین می‌شود:

$$\rho = \frac{1.2 \times 10^{-26} \text{ kg/m}^3}{1.674 \times 10^{-27} \text{ kg}} = 7.17 \text{ H-atoms/m}^3$$

حال کافی است مقادیر را در این رابطه بنشانیم:

$$E = (-۸,۶۲ \times 10^{-5} \text{ eV/K})(۲,۷\text{K}) \ln \frac{۰,۲۵}{۱-۰,۲۵}$$

$$= ۲,۵۶ \times 10^{-۴} \text{ eV} = ۲۵۶ \mu\text{eV}$$

(ب) انرژی فوتون برابر $E = hf = hc/\lambda$ است. این رابطه را برای λ حل می‌کنیم:

$$\lambda = \frac{hc}{E} = \frac{(۶,۶۳ \times 10^{-۳۴} \text{ J/s})(۳ \times 10^8 \text{ m/s})}{(۲,۵۶ \times 10^{-۴} \text{ eV})(۱,۶ \times 10^{-۱۹} \text{ J/eV})}$$

$$= ۴,۸۶ \times 10^{-۳} \text{ m} = ۴,۸۶ \text{ mm}$$

بخش ۴۵-۱۳ ماده تاریک

۳۶ - اگر پلوتو (خارجی ترین سیاره در بیشتر اوقات) دارای تندی مداری برابر با تندی مداری فعلی عطارد (داخلی ترین سیاره) باشد، جرم خورشید باید چقدر باشد؟ داده‌های پیوست پ را به کار ببرید، و پاسخ خود را برحسب جرم فعلی خورشید M بیان کنید. (فرض کنید مدارها دایره‌ای اند.)

حل. نیروی گرانشی وارد بر یک سیاره با رابطه GMm/r^2 داده می‌شود که در آن M جرم خورشید و m جرم سیاره می‌باشد. برای حرکت دایره‌ای سیاره باید این نیرو برابر با $m v^2/r$ باشد و از آنجا تندی مداری یک سیاره برابر با $v = \sqrt{GM/r}$ می‌شود. در اینجا می‌خواهیم تندی مداری پلوتو با تندی مداری عطارد برابر باشد. یعنی در حالیکه r در رابطه تندی مداری، فاصله سیاره پلوتو از خورشید باشد، تندی مداری حاصل از آن برابر با تندی مداری سیاره عطارد شود. تندی مداری سیاره عطارد (v_m) و فاصله پلوتو از خورشید (v_p) را از پیوست (پ) کتاب به دست می‌آوریم:

$$v_m = ۴۷,۹ \times 10^۳ \text{ m/s}, \quad v_p = ۵۹,۰۰ \times 10^۹ \text{ m}$$

(توجه شود که در پیوست (پ) کتاب ترجمه شده به غلط تندی مداری km/h آمده که در اینجا تصحیح شده است) در نتیجه، با توجه به اینکه $G = ۶,۶۷ \times 10^{-۱۱} \text{ m}^3/\text{s}^2 \cdot \text{kg}$ است، برای جرم خورشید M خواهیم داشت:

$$M = \frac{v_m^2 r_p}{G} = \frac{(۴۷,۹ \times 10^۳ \text{ m/s})^2 (۵۹,۰۰ \times 10^۹ \text{ m})}{۶,۶۷ \times 10^{-۱۱} \text{ m}^3/\text{s}^2 \cdot \text{kg}}$$

$$= ۲ \times 10^{۳۲} \text{ kg}$$

که این $۶,۲ \times 10^۶$ مرتبه از جرم واقعی خورشید بزرگتر است. این تمرین در ورای ظاهر ساده‌اش، بسیار آموزنده است. وقتی که در چنین فواصل کمی (از لحاظ نجومی) برابری تندهای مداری منجر به چنین اختلاف جرم فوق‌العاده‌ای می‌شود، آنگاه یقیناً برابری تندهای مداری ستاره‌ها در لبه خارجی و مرکز یک کهکشان منجر به استنتاج وجود جرم عظیمی می‌شود که برای ما قابل رؤیت نیست و به همین دلیل ما آنرا ماده تاریک می‌نامیم.

* در ویرایش ششم کتاب مبانی فیزیک مقدار توافقی (compromise) برای ثابت «هابل» برابر با $۶۳,۰ \text{ km/s} \cdot \text{Mpc}$ گرفته شده است که با توجه به روزآمدتر بودن این ویرایش، بهتر بود در کلیه مسائل این بخش از این مقدار توافقی استفاده می‌کردیم. ولی چون متن کتاب ترجمه شده براساس داده‌های ویرایش پنجم تنظیم شده است، در حل مسائل این بخش از همان مقدار قدیمی استفاده کردیم. خوب است که در اینجا قسمت (ب) مسئله ۳۴ را با مقدار توافقی جدید نیز بررسی کنیم. در این صورت برای چگالی برحسب kg/m^3 مقدار $۱,۴۶۸ \times 10^{۱۱} \text{ kg/m}^3$ و در نهایت برحسب H-atoms/m^3 مقدار $۴,۴۶۱ \text{ H-atoms/m}^3$ را به دست می‌آوریم.

بخش ۴۵-۱۲ تابش زمینه کیهانی

۳۵ - به خاطر وجود تابش زمینه میکرو موج در همه جا، دمای ممکن کمینه گاز در فضای میان کهکشانی یا میان ستاره‌ای صفر نیست بلکه $۲,۷\text{K}$ است. این حاکی از آن است که کسر مهمی از مولکولها در فضا که می‌توانند حالت‌های برانگیخته شده انرژیهای برانگیخته پایین را اشغال کنند ممکن است، در آن حالت‌های برانگیخته باشند. و انگیختگی بعدی به گسیل تابشی می‌انجامد که می‌تواند آشکار شود. مولکولی را (به طور فرض) درست با یک حالت برانگیخته در نظر بگیرید. (الف) برای اینکه $۰,۲۵\%$ مولکولها در حالت برانگیخته باشند، انرژی برانگیختگی باید چقدر باشد؟ (راهنمایی: به معادله ۴۱ - ۲۱ نگاه کنید.) (ب) طول موج فوتونی که در گذار برگشت به حالت پایه گسیل می‌شود، چقدر است؟

حل. (الف) انرژی حالت پایه را برابر صفر و انرژی حالت برانگیخته را برابر E بگیرید. تعداد مولکولها در حالت برانگیخته با رابطه $N_e = N_0 e^{-(E-E_0)/kT}$ داده می‌شود (معادله ۴۱ - ۲۱ کتاب) که در اینجا $E_0 = 0$ است. در این رابطه N_0 تعداد مولکولها در حالت پایه، k ثابت «بولتزمن» و T دما برحسب کلین است. ما می‌خواهیم کسر $f = N_e / (N_0 + N_e)$ برابر با $۰,۲۵$ شود و از آنجا انرژی مربوط به این f را به دست آوریم. برای f داریم:

$$f = \frac{N_0 e^{-E/kT}}{N_0 + N_0 e^{-E/kT}} = \frac{e^{-E/kT}}{1 + e^{-E/kT}}$$

و از آنجا خواهیم داشت:

$$e^{-E/kT} = f + f e^{-E/kT}$$

و یا

$$(1-f) e^{-E/kT} = f$$

و با حل این معادله برای E به رابطه زیر می‌رسیم:

$$E = -kT \ln \frac{f}{1-f}$$

حل. (الف) بزرگی نیروی وارد به ستاره به جرم m با رابطه GMm/r^2 داده می شود که در آن M' جرم موجود در داخل مدار آن است. چون ستاره به طور یکنواختی در یک مدار دایره ای حرکت می کند، بزرگی شتاب وارد به آن برابر v^2/r می شود و از آنجا از قانون دوم نیوتن: $GMm/r^2 = mv^2/r$ ، خواهیم داشت:

$$v = \sqrt{\frac{GM}{r}}$$

چون جرم کهکشان به طور یکنواختی توزیع شده است، $M' = (r^3/R^3)M$ می شود و با جانساندن M' در رابطه تندی به دست می آوریم:

$$v = \sqrt{\frac{Gr^3M}{rR^3}} = r\sqrt{\frac{GM}{R^3}}$$

و

$$T = \frac{2\pi r}{v} = 2\pi\sqrt{\frac{R^3}{GM}}$$

(ب) حالا نیروی وارد به ستاره برابر با GMm/r^2 می شود و از قانون دوم نیوتن به $v = \sqrt{GM/r}$ می رسیم. در آن صورت دوره چرخش چنین می شود:

$$T = \frac{2\pi r}{v} = 2\pi r\sqrt{\frac{r}{GM}} = 2\pi\sqrt{\frac{r^3}{GM}}$$

بخش ۴۵-۱۴ انفجار بزرگ

۳۹ م- می توان رابطه زیر را بین دمای T یک تابشگر کواکی و طول موج λ_{\max} ، که در آن بیشترین تابش انجام می شود نوشت

$$\lambda_{\max} T = 2898 \mu\text{m} \cdot \text{K}$$

(این قانون وین است.) (الف) قلّه شدت تابش زمینه میکروموج در طول موج 1.1 mm است. این به چه دمایی مربوط است؟ (ب) تقریباً $300,000$ سال پس از انفجار بزرگ، جهان نسبت به تابش الکترو مغناطیس شفاف شده است. در آن موقع دمای آن حدود 10^5 K بوده است. در آن موقع طول موج مربوط به بیشترین شدت تابش زمینه چقدر بوده است؟

حل. (الف) رابطه $\lambda_{\max} T = 2898 \mu\text{m} \cdot \text{K}$ را برای T حل می کنیم:

$$T = \frac{2898 \mu\text{m} \cdot \text{K}}{1.1 \times 10^3 \mu\text{m}} = 263 \text{ K}$$

(ب) این بار قانون «وین» را برای λ_{\max} حل می کنیم:

$$\lambda_{\max} = \frac{2898 \mu\text{m} \cdot \text{K}}{T} = \frac{2898 \mu\text{m} \cdot \text{K}}{10^5 \text{ K}} = 0.02898 \mu\text{m} = 28.98 \text{ nm}$$

۴۰ ت- طول موج فوتونهایی که در آن تابش میدان با دمای T بیشترین شدت را تابش می کند با رابطه $\lambda_{\max} = (2898 \mu\text{m} \cdot \text{K})/T$ داده می شود (به تمرین ۳۹ نگاه کنید). (الف) نشان دهید که انرژی E چنین فوتونی می تواند از رابطه زیر به دست آید

$$E = (4.28 \times 10^{-10} \text{ MeV/K}) T$$

۳۷ م- فرض کنید که شعاع خورشید به $10^{12} \times 590 \text{ m}$ افزایش یابد (شعاع میانگین مدار سیاره پلوتو، خارجی ترین سیاره) و اینکه چگالی این خورشید منبسط شده یکنواخت باشد و سیارات داخل این جسم رقیق می چرخند. (الف) تندی مداری زمین را در ساختار جدید محاسبه کرده و آن را با تندی مداری فعلی اش 28.9 km/s مقایسه کنید. فرض کنید که شعاع مداری زمین بدون تغییر باقی بماند. (ب) دوره تناوب جدید زمین چقدر است؟ (جرم خورشید بدون تغییر باقی می ماند.)

حل. (الف) اگر شعاع مدار زمین، R شعاع خورشید جدید، M_s جرم خورشید و M جرم آن بخشی از خورشید باشد که در داخل مدار زمین قرار می گیرد، به دلیل آنکه توزیع جرم خورشید یکنواخت است خواهیم داشت:

$$M = \left(\frac{r}{R}\right)^3 M_s = \left(\frac{1.5 \times 10^{11} \text{ m}}{5.9 \times 10^{12} \text{ m}}\right)^3 (1.99 \times 10^{30} \text{ kg}) = 3.27 \times 10^{25} \text{ kg}$$

نیروی گرانشی وارد به زمین با رابطه GMm/r^2 داده می شود که m جرم زمین و G ثابت جهانی گرانش است. چون شتاب مرکزگرا با رابطه v^2/r داده می شود، آنگاه از قانون دوم نیوتن: $GMm/r^2 = mv^2/r$ ، خواهیم داشت:

$$v = \sqrt{\frac{GM}{r}} = \sqrt{\frac{(6.67 \times 10^{-11} \text{ m}^3/\text{s}^2 \cdot \text{kg})(3.27 \times 10^{25} \text{ kg})}{1.5 \times 10^{11} \text{ m}}} = 1.21 \times 10^2 \text{ m/s}$$

که این تندی به مراتب کمتر از تندی مداری فعلی زمین یعنی 28.9 km/s است. این تندی 0.004 مرتبه کوچکتر از تندی مداری فعلی زمین است.

(ب) دوره گردش با رابطه زیر به دست می آید:

$$T = \frac{2\pi r}{v} = \frac{2\pi(1.5 \times 10^{11} \text{ m})}{1.21 \times 10^2 \text{ m/s}} = 7.82 \times 10^9 \text{ s} = (7.82 \times 10^9 \text{ s}) \left(\frac{1 \text{ y}}{3.156 \times 10^7 \text{ s}}\right) \cong 248 \text{ y}$$

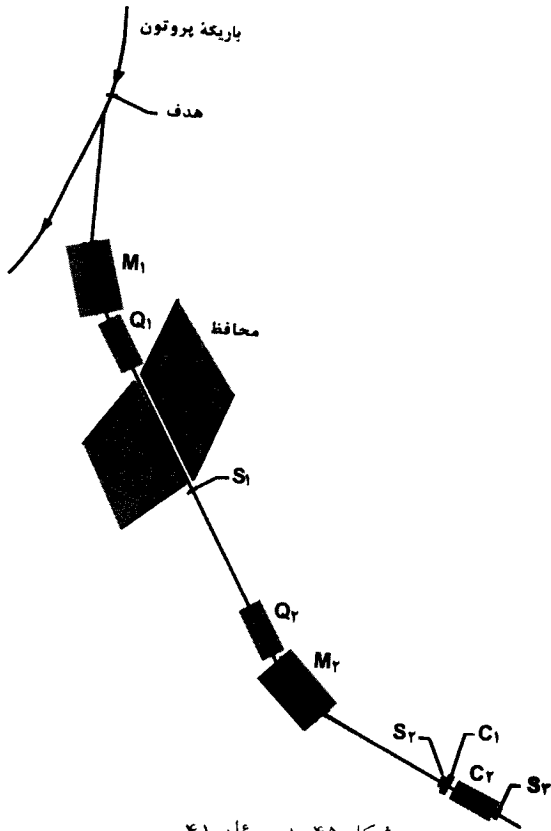
۳۸ م- فرض کنید که ماده (ستاره ها، گاز، غبار) یک کهکشان خاص، با جرم کل M ، به طور یکنواخت در میان کره ای به شعاع R توزیع شده باشد. ستاره ای به جرم m حول مرکز کهکشان روی یک مدار دایره ای به شعاع $r < R$ می چرخد. (الف) نشان دهید که تندی مداری v ستاره با رابطه زیر داده می شود

$$v = r\sqrt{GM/R^3}$$

و بنابراین زمان تناوب T چرخش برابر است با

$$T = 2\pi\sqrt{R^3/GM}$$

و مستقل از r است. از هر نیروی مقاومتی چشمپوشی کنید. (ب) با فرض اینکه جرم کهکشان به شدت به سمت مرکز کهکشان متمرکز شده به طوری که اساساً تمام جرم در فاصله کمتر از r واقع است، فرمول تناوب مداری مربوط چقدر خواهد بود؟



شکل ۴۵-۸ مسئله ۴۱.

بنابراین، بیشتر ذرات تولید شده به وسیله برخورد بین پروتونهای 6.2 GeV و هدف مسی پیونها هستند. برای اثبات اینکه پادپروتونها وجود داشته و به وسیله برخوردها نیز ایجاد شده‌اند، ذراتی که هدف را ترک می‌کردند به داخل یک دسته میدان مغناطیسی و آشکار ساز که در شکل ۴۵-۸ نشان داده شده‌اند ارسال می‌شدند. اولین میدان مغناطیسی $M1$ مسیر هر ذره باردار را که از میان آن می‌گذرد خم می‌کند؛ علاوه بر این، میدان به گونه‌ای ترتیب داده شده بود که فقط ذراتی که از آن خارج می‌شوند و به میدان مغناطیسی دوم ($Q1$) می‌رسیدند باید بار منفی می‌داشتند (π^- یا \bar{p}) و دارای اندازه حرکت $119 \text{ GeV}/c$ بودند. $Q1$ میدان مغناطیسی خاص بود (میدان چهار قطبی) تا ذراتی که به آن می‌رسند در یک باریکه متمرکز شوند و برای رسیدن به شمارنده سوسوزن $S1$ از روزه‌ای که در محافظ ضخیمی وجود دارد بگذرند. حرکت ذره باردار از میان چنین شمارنده‌ای سیگنالی به وجود می‌آورد. (خیلی شبیه صفحه تلویزیونهای معمولی که وقتی الکترون به آن می‌خورد تپهای نورگسیل می‌کند). بنابراین، هر سیگنال بر عبور π^- یا $119 \text{ GeV}/c$ (احتمالاً \bar{p}) $119 \text{ GeV}/c$ دلالت دارد.

پس از آنکه باریکه به وسیله میدان مغناطیسی $Q2$ دوباره متمرکز شد، ذرات به وسیله میدان مغناطیسی $M2$ از میان

(ب) در کدام دمای کمینه‌ای این پروتون می‌تواند یک جفت الکترون - پوزیترون را در یک جفت فرایند تولید، ایجاد کند (که در بخش ۲۲-۶ بحث شد)؟

حل. (الف) $\lambda = (2898 \mu\text{m} \cdot \text{K}) / T$ را در نتیجه تمرین ۱ فصل ۳۹ می‌نشانیم. در نتیجه خواهیم داشت:

$$E = \frac{1240 \text{ nm} \cdot \text{eV}}{\lambda} = \frac{(1240 \times 10^{-3} \text{ nm} \cdot \text{MeV}) T}{2898 \times 10^6 \text{ nm} \cdot \text{K}}$$

$$= (4.28 \times 10^{-10} \text{ MeV/K}) T$$

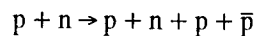
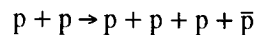
(ب) انرژی کمینه لازم برای آفرینش یک جفت الکترون - پوزیترون دو برابر انرژی سکون یک الکترون یعنی $1.022 \text{ MeV} = 2(0.511 \text{ MeV})$ است. بنابراین خواهیم داشت:

$$T = \frac{E}{4.28 \times 10^{-10} \text{ MeV/K}} = \frac{1.022 \text{ MeV}}{4.28 \times 10^{-10} \text{ MeV/K}}$$

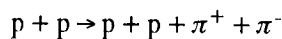
$$= 2.39 \times 10^9 \text{ K}$$

مسئله‌های اضافی

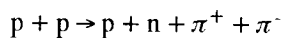
۴۱ - شکل ۴۵-۸ قسمتی از یک آرایش تجربی را نشان می‌دهد که در آن پادپروتونها در سال ۱۳۳۸/۱۹۵۰ کشف شدند. باریکه 6.2 GeV پروتونها که از شتابدهنده ذره خارج می‌شدند با هسته مادر یک هدف مسی برخورد می‌کردند. بنابر پیش‌بینی نظری در آن زمان، برخورد با پروتونها و نوترونها در آن هسته‌ها باید از طریق واکنشهای زیر پاد پروتون نهایی را ایجاد کند



با این وجود، حتی اگر این واکنشها رخ می‌دادند، آنها در مقایسه با واکنشهای زیر نادر هستند



و



پادپروتون و π^- به دست بیاوریم. جرم سکون پادپروتون طبق جدول ۴۵ - ۳ کتاب برابر با $938.3 \text{ MeV}/c^2$ است. بنابراین f برای پادپروتون چنین می شود:

$$f = \frac{1.19 \times 10^3 \text{ MeV}/c}{938.3 \text{ MeV}/c} = 1.268$$

حال با جانشاندن f در رابطه v/c خواهیم داشت:

$$\frac{v}{c} = \frac{1.268}{\sqrt{1+(1.268)^2}} = 0.785$$

پس تندی \bar{p} برابر با $0.785c$ می شود.

بار دیگر v/c را این بار برای π^- محاسبه می کنیم. جرم سکون π^- طبق جدول ۴۵ - ۴ کتاب برابر با $139.6 \text{ MeV}/c^2$ است. بنابراین f برای π^- چنین می شود:

$$f = \frac{p}{m \cdot c} = \frac{1.19 \times 10^3 \text{ MeV}/c}{139.6 \text{ MeV}/c} = 8.524$$

و از آنجا v/c را به دست می آوریم:

$$\frac{v}{c} = \frac{f}{\sqrt{1+f^2}} = \frac{8.524}{\sqrt{1+(8.524)^2}} = 0.993$$

پس تندی π^- برابر با $0.993c$ می شود.

(پ) و (ت) طبق آنچه که در متن صورت مسئله آمده است، شمارنده C_1 توسط ذراتی با تندی بیشتر از $0.79c$ و شمارنده C_2 توسط ذراتی با تندی بین $0.75c$ تا $0.78c$ به کار می افتد. بنابراین π^- شمارنده C_1 و \bar{p} شمارنده C_2 را راه می اندازد. توجه کنید که هرچند تندی \bar{p} کمی از محدوده راه اندازی شمارنده C_2 بزرگتر است ولی همان طور که در صورت مسئله آمده است، چون پادپروتونها کمی انرژی خود را در آشکارسازها از دست می دهند، بنابراین تندی آنها در همان محدوده مورد نظر قرار می گیرد.

(ت) و (ت) بازه زمانی عبور از رابطه $t = L/v$ به دست می آید که L فاصله دو شمارنده سوسوزن S_1 و S_2 ، یعنی 12 m است. بنابراین برای پادپروتون داریم:

$$t = \frac{L}{v} = \frac{12 \text{ m}}{0.785c} = 5.095 \times 10^{-8} \text{ m} = 5.095 \text{ nm}$$

و بازه زمانی عبور برای π^- چنین می شود:

$$t = \frac{L}{v} = \frac{12 \text{ m}}{0.993c} = 4.028 \times 10^{-8} \text{ m} = 4.028 \text{ nm}$$

۴۲ - انتقال به سرخ کیهانشناختی. انبساط جهان غالباً با ترسیم شبیه شکل ۴۵-۹ الف بیان می شود. در این شکل، نماد MW (مخفف کهکشان راه شیری) را در مبدأ محور r قرار داده ایم که به طور شعاعی در تمام جهتها از ما دور می شود. سایر کهکشانهای دورتر نیز نشان داده شده اند. روی نمادها بردار سرعت آنها است که از انتقال به سرخ نوری که از کهکشانهای به ما می رسد، به دست آمده اند. بنابر قانون هابل، سرعت هر کهکشان با فاصله آن از ما متناسب است. چنین ترسیمهایی می توانند گمراه کننده باشند چون آنها

شمارنده سوسوزن دوم S_2 و سپس از میان دو شمارنده چرنکوف C_1 و C_2 می گذشتند. این آشکارسازهای اخیر می توانند به گونه ای ساخته شوند که آنها فقط وقتی ذره با تندی در ناحیه معینی از میانشان بگذرد، سیگنالی را ارسال کنند. در تجربه، ذره ای با تندی بیشتر از $0.79c$ شمارنده C_1 و ذره ای با تندی بین $0.75c$ و $0.78c$ شمارنده C_2 را به کار می انداخت.

برای تشخیص پادپروتونها نادر پیش بینی شده از پیونهای منفی فراوان، دو راه وجود داشت. هر دو راه مبتنی بر این واقعیت اند که تندی ذره \bar{p} مربوط به $1.19 \text{ GeV}/c$ با تندی ذره π^- مربوط به $1.19 \text{ GeV}/c$ تفاوت دارد: (۱) بنابر محاسبات، یک ذره \bar{p} یکی از شمارنده های چرنکوف و یک ذره π^- دیگری را به کار می اندازد. (۲) همچنین، بازه زمانی Δt بین سیگنالهای S_1 و S_2 ، که 12 m از هم فاصله دارند، دارای یک مقدار برای \bar{p} و مقدار دیگری برای π^- خواهد بود. بنابراین، اگر شمارنده چرنکوف مناسب به کار می افتد و بازه زمانی Δt دارای مقدار مناسب باشد، آزمایش وجود پادپروتون را ثابت خواهد کرد.

تندی (الف) پادپروتون با اندازه حرکت $1.19 \text{ GeV}/c$ چقدر است؟ و (ب) تندی پیون منفی با اندازه حرکت $1.19 \text{ GeV}/c$ چقدر است؟ تندی پادپروتون در میان آشکارسازهای چرنکوف در عمل کمی کمتر از مقدار محاسبه شده در اینجا است، چون پادپروتون کمی انرژی در آشکارسازها از دست می دهد. کدام آشکارساز چرنکوف به وسیله (پ) یک پادپروتون و (ت) یک پیون منفی به کار می افتد. کدام بازه زمانی بیانگر عبور (ث) پادپروتون و (ج) پیون منفی است؟ [این مسئله از مقاله «مشاهده پادپروتونها» نوشته چمبرلین، سگره ویگانگ و پوپیسلا تیس که در مجله فیزیکال ریویو شماره ۱۰۰، صفحه های ۹۵ - ۹۴۷ (در سال ۱۳۳۳/۱۹۵۵) چاپ شده، اقتباس شده است.]

حل. (الف) و (ب). از رابطه اندازه حرکت نسبی $p = (m \cdot v) / \sqrt{1 - v^2/c^2}$ که در آن m جرم سکون و v تندی ذره است استفاده می کنیم:

$$p = \frac{m \cdot v}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$

طرفین را بر تندی نور c تقسیم می کنیم و از آنجا به دست می آوریم:

$$\frac{p}{m \cdot c} = \frac{v/c}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$

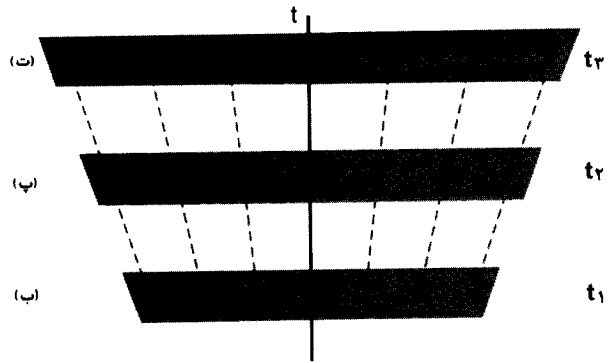
حال اگر این رابطه را با به توان دو رساندن طرفین، برای v/c حل کنیم در نهایت به رابطه زیر می رسیم:

$$\frac{v}{c} = \frac{f}{\sqrt{1+f^2}}$$

که در آن $f = \frac{p}{m \cdot c}$ است. حال باید $\frac{v}{c}$ را به ترتیب برای

در واقع، انبساط جهان و افزایش فاصله کیهانشانها به خاطر دور شدن با شتاب آنها به داخل فضایی که از قبل وجود داشته نیست بلکه به خاطر انبساط خود فضا در سرتاسر جهان است. فضا دنیامیک است و استاتیک نیست.

حاکمی از این هستند که (۱) انتقال به سرخ به خاطر حرکت کیهانشانها نسبت ماست، یعنی موقع دور شدن از ما از میان فضای استاتیک (ساکن) و (۲) ما در مرکز تمام این حرکت هستیم.

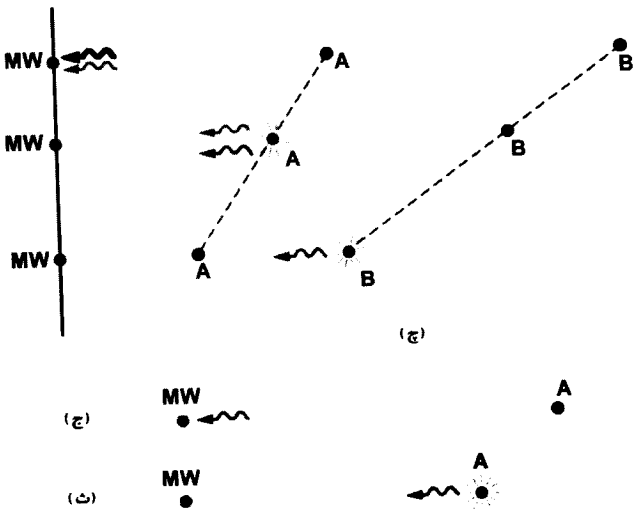


(الف)

شکل ۴۵-۹ مسئله ۴۲

(الف) نشان دهید که

$$\Delta t = \frac{r}{c - r\alpha}$$



شکل ۴۵-۹ ب، پ و ت راههای متفاوت نمایش جهان و انبساط آن را نشان می‌دهد. هر قسمت شکل بخشی از مقطع یک لبه‌ای از جهان را به دست می‌دهد (در امتداد محور r)؛ دو بعد فضایی دیگر جهان نشان داده نشده است. هر یک از سه قسمت شکل راه شیری و شکل کیهانشان دیگر را نشان می‌دهند؛ این قسمتها در امتداد محور زمان واقع اند و زمان به سمت بالا، روبه افزایش است. در قسمت (ب)، در زودترین زمان این سه قسمت، راه شیری و شش کیهانشان دیگر نسبتاً نزدیکتر نشان داده شده‌اند. وقتی زمان به طرف بالا در شکل سیر کند فضا انبساط می‌یابد و باعث دور شدن کیهانشانها از هم می‌شود. توجه کنید که نسبت به راه شیری، تمام کیهانشانهای دیگر به خاطر انبساط از آن دور می‌شوند. با این وجود چیز خاصی در مورد راه شیری وجود ندارد - کیهانشانها از هر نقطه انتخاب دیگری برای مشاهده از هم دور می‌شوند.

شکلهای ۴۵-۹ ت و ج درست روی کیهانشان راه شیری و یکی دیگر از کیهانشانها، کیهانشان A ، در دو زمان معین در حین انبساط تمرکز دارند. در قسمت ت، کیهانشان A در فاصله r از ما در راه شیری قرار دارد و موج نوری باطول موج λ گسیل می‌کند. در قسمت ج، پس از بازه زمانی Δt ، آن موج نوری در زمین آشکار شده است. آهنگ انبساط برای هر واحد طول فضا را با α نشان می‌دهیم و فرض می‌کنیم در حین بازه زمانی Δt ثابت باشد. آنگاه در طی Δt ، هر واحد طول از فضا (مثلاً، هر متر) با رابطه $\alpha \Delta t$ گسترش می‌یابد؛ از این رو فاصله r با رابطه $r \alpha \Delta t$ گسترده می‌شود. موج نوری شکل ۴۵-۹ ت و ج با تندی c از کیهانشان A به زمین حرکت می‌کند.

ادامه شکل ۴۵-۹ مسئله ۴۲

طول موج آشکار شده λ' نور بزرگتر از طول موج λ گسیل شده است چون در طی بازه زمانی Δt فضا انبساط یافته است. این افزایش در طول موج انتقال به سرخ کیهانشانها نامیده شده است و اثر دوپلر نیست. (ب) نشان دهید که تغییر طول موج $\Delta \lambda$ ($\lambda' = -\lambda$) با رابطه زیر داده می‌شود

$$\frac{\Delta \lambda}{\lambda} = \frac{r\alpha}{c - r\alpha}$$

دریافت شده در زمین با سرعت موج در کهکشان A (یعنی c) برابر بود و این انبساط عالم است که از تندی موج نوری می‌کاهد. بنابراین بدیهی است که خواهیم داشت:

$$\Delta t = \frac{r}{v} = \frac{r}{c - r\alpha}$$

(ب) می‌توانیم نسبت طول موجها را برابر با نسبت فواصل طی شده بگیریم (چرا؟). پس خواهیم داشت:

$$\frac{\lambda'}{\lambda} = \frac{\frac{rc}{c - r\alpha}}{r} = \frac{c}{c - r\alpha}$$

حال اگر $\frac{\Delta\lambda}{\lambda}$ را تشکیل دهیم خواهیم داشت:

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{\lambda' - \lambda}{\lambda} = \frac{\lambda'}{\lambda} - 1 = \frac{c}{c - r\alpha} - 1 = \frac{r\alpha}{c - r\alpha}$$

در اینجا خوب است همان‌طور که کتاب اشاره کرده است، من نیز خاطر نشان سازم که این انتقال طول موج، یک انتقال داپلری نیست و معمولاً کتابهای کیهانشناسی از مسیر دیگری که من در پی نوشت این مسئله به آن اشاره خواهم کرد این انتقال را معرفی می‌کنند.

(پ) سمت راست این معادله را می‌توانیم با تقسیم صورت و

مخرج بر c چنین بنویسیم:

$$\frac{\frac{r\alpha}{c}}{1 - \frac{r\alpha}{c}} = \frac{r\alpha}{c} \left(1 - \frac{r\alpha}{c}\right)^{-1}$$

حال $\left(1 - \frac{r\alpha}{c}\right)^{-1}$ را بسط دو جمله‌ای می‌دهیم:

$$\left(1 - \frac{r\alpha}{c}\right)^{-1} = 1 + \frac{r\alpha}{c} + \frac{r^2\alpha^2}{c^2} + \dots$$

بنابراین $\frac{\Delta\lambda}{\lambda}$ چنین می‌شود:

$$\begin{aligned} \frac{\Delta\lambda}{\lambda} &= \frac{r\alpha}{c} \left(1 + \frac{r\alpha}{c} + \frac{r^2\alpha^2}{c^2} + \dots\right) \\ &= \frac{r\alpha}{c} + \left(\frac{r\alpha}{c}\right)^2 + \left(\frac{r\alpha}{c}\right)^3 + \dots \end{aligned}$$

(ت) اگر جمله اول بسط بالا را حفظ کنیم بدیهی است که خواهیم داشت:

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} \cong \frac{r\alpha}{c}$$

(ث) انتقال طول موج داپلری با رابطه $\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{v}{c}$ و انتقال

کیهانشناختی با رابطه تقریبی $\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{r\alpha}{c}$ داده می‌شود.

اگر قانون «هابل» را در طول موج داپلری بنشانیم به رابطه

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{rH}{c}$$

انتقال کیهانشناختی به $\alpha = H$ خواهیم رسید.

(ج) پس مقدار α همان مقدار ثابت هابل است و اگر مقدار

توافقی $H = 63 \text{ km/s.Mpc}$ را که در ویرایش ششم به

جای مقدار معرفی شده آن در ویرایش پنجم آمده است،

بپذیریم می‌توانیم H را چنین نیز بنویسیم:

$$\alpha = (63 \text{ km/s.Mpc}) \left(\frac{1 \text{ Mpc}}{3.084 \times 10^{19} \text{ km}} \right)$$

$$= 2.043 \times 10^{-18} \text{ s}^{-1}$$

(پ) سمت راست این معادله را با استفاده از بسط دو جمله‌ای (در پیوست ث نشان داده شده است) بسط دهید. (ت) در این بسط جمله اول را حفظ کنید. عبارت حاصل برای $\Delta\lambda/\lambda$ کدام است؟

اگر، در عوض، فرض کنیم که شکل ۹-۴۵ الف برقرار است و

$\Delta\lambda$ به خاطر اثر داپلر باشد، آنگاه از معادله ۳۴ - ۵۷ داریم

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{v}{c}$$

که در آن v سرعت شعاعی کهکشان A نسبت به زمین است. (ث) با استفاده از قانون هابل، این نتیجه اثر داپلر را با نتیجه انبساط کیهانشناختی مقایسه کنید و (ج) مقداری برای α به دست آورید. از این تحلیل می‌توانید ببینید که دو نتیجه که با دو الگوی بسیار متفاوت در مورد انتقال به سرخ نور آشکار شده از کهکشانهای دور حاصل شدند با هم سازگارند.

فرض کنید نوری که ما از کهکشان A آشکار می‌کنیم دارای انتقال به سرخ $\Delta\lambda/\lambda = 0.050$ باشد و آهنگ انبساط جهان ثابت بوده و مقدار داده شده در این فصل را داشته باشد. (ح) با استفاده از نتیجه

(ب)، وقتی نور گسیل شده است فاصله کهکشان و زمین را محاسبه کنید. (ح) با استفاده از نتیجه (الف) و (ح) و با فرض اینکه انتقال به سرخ اثر داپلر است، به دست آورید که چه مدت قبل نور به وسیله

کهکشان گسیل شده است. (راه‌نمایی: برای (ح)، زمان درست فاصله در زمان گسیل تقسیم بر تندی نور است، چون اگر انتقال به سرخ درست اثر داپلر باشد، فاصله در حین اینکه نور به سمت ما حرکت می‌کند فاصله تغییر نمی‌کند. اینجا نتایج دو الگو در مورد

انتقال به سرخ نور متفاوت‌اند.) (د) در زمان آشکار سازی، فاصله بین زمین و کهکشان A چقدر است؟ (فرض می‌کنیم که کهکشان A هنوز وجود دارد؛ اگر وجود نداشته باشد، بشر چیزی در مورد مرگ آن نمی‌داند مگر آنکه که آخرین نور گسیل شده از کهکشان به زمین برسد.)

حال فرض کنید نوری که از کهکشان B آشکار می‌کنیم (شکل ۹-۴۵ ج) دارای انتقال به سرخ $\Delta\lambda/\lambda = 0.080$ باشد.

(ذ) با استفاده از نتیجه (ب) وقتی نور گسیل شد فاصله بین کهکشان B و زمین را به دست آورید. (ر) با استفاده از نتیجه (الف) به دست آورید که نور به وسیله کهکشان B چه مدت قبل گسیل شده است؟ (ز) وقتی نوری که ما آشکار می‌کنیم از کهکشان A گسیل شده باشد،

فاصله بین کهکشان A و کهکشان B چقدر بوده است؟

حل. (الف) می‌توانیم رابطه زیر را تشکیل دهیم (چرا مجاز هستیم؟)

سرعت کهکشان A به زمین + سرعت موج به کهکشان A = سرعت موج به زمین می‌دانیم که سرعت موج به کهکشان A برابر c و سرعت کهکشان A به زمین برابر $r\alpha$ می‌شود. علامت منفی را از آنرو نوشتم که بر اثر انبساط عالم، کهکشان A و زمین از هم دور می‌شوند. به عبارتی دیگر اگر عالم ایستا بود بدیهی بود که سرعت موج

(ز) کافی است که نتایج قسمت‌های (ذ) و (چ) را از هم کم کنیم:

$$\Delta r = 1.15 \times 10^9 \text{ly} - 7.4 \times 10^8 \text{ly} = 4.1 \times 10^8 \text{ly}$$

(توجه شود که حروف قسمت‌های حل شده در این مسئله از حرف (چ) به بعد با کتاب ترجمه شده به دلیل اشتباهی که در آن کتاب رخ داده است متفاوت شده است که البته در ترجمه بالا برطرف گردیده است).

پی‌نوشت. طبق اصل هم‌ارزی اینشتین، همه دستگاه‌های

لخت موضعی که بدون چرخش و در حال سقوط آزاد باشند به لحاظ انجام دادن همه آزمایش‌های فیزیکی هم‌ارزند. یکی از شواهدی که برای توجیه اصل هم‌ارزی ارائه می‌شود، انتقال به سرخ نوری است که در خلاف جهت میدان گرانشی حرکت می‌کند. انتقال به سرخ پیش‌بینی شده در آزمایش‌های بسیار حساسی که اساس‌شان مبتنی بر فرو فرستادن نور از برجی به ارتفاع ۲۲٫۵ متر واقع در آزمایشگاه جفرسون دانشگاه هاروارد بود، توسط «پوند» و «ریکا» در سال ۱۹۶۰ و با دقت بیشتری توسط «پوند» و «اشنایدر» در سال ۱۹۶۵ مشاهده شد (نگاه کنید به: (Phy. Rev. B, 140, 788 – 803 (1965) در اینجا سعی می‌شود با ذکر یک مثال ساده منشاء فیزیکی انتقال به سرخ گرانشی و تبع آن اتساع زمان گرانشی تشریح شود.

سقوط آزاد ذره‌ای به جرم سکون m در میدان گرانشی g از نقطه A واقع در ارتفاع h از نقطه مفروض B را در نظر بگیرید. در صورتی که موضع B را مرجع پتانسیل بگیریم، آنگاه انرژی کل ذره در نقطه B چنین خواهد شد:

$$E_B^B = m \cdot c^2 + m \cdot gh \quad (h = 0)$$

حال با فرض اینکه این ذره در نقطه B نابود و به یک فوتون با همان انرژی تبدیل شود و آنگاه به سوی نقطه A حرکت کند، انرژی آن در نقطه A چنین خواهد شد:

$$E_A^A = m \cdot c^2 + m \cdot gh \quad (h \neq 0)$$

که این در واقع نشانی از نقض پایستگی انرژی است. «اینشتین» برای رفع این سوء تفاهم ادعا کرد که فوتون در حین حرکتش انرژی خود را در یک انتقال به سرخ از دست می‌دهد. بدیهی است که:

$$\frac{E_A^A}{E_B^B} = \frac{E^B(1 + gh/c^2)}{E^B} = 1 + gh/c^2 = 1 + z$$

و از طرفی دیگر

$$\frac{E_A^A}{E_B^B} = \frac{hf^A}{hf^B} = \frac{\lambda^B}{\lambda^A}$$

که در آن f و λ به ترتیب بسامد و طول موج فوتون هستند. از قیاس دو رابطه اخیر خواهیم داشت:

$$z = \frac{\Delta \lambda}{\lambda} = \frac{gh}{c^2}$$

که به ازای $h = 22.5 \text{ m}$ مقدارش برابر با 10^{-15} است

(ج) در نتیجه قسمت (ب) به جای $\Delta \lambda / \lambda = 0.050$ و به جای α مقدار ثابت «هابل» را می‌نشانیم و از آنجا r را به دست می‌آوریم. ولی پیش از آن برای راحتی کار، نخست نتیجه قسمت (ب) را برای r حل می‌کنیم:

$$r\alpha = c \left(\frac{\Delta \lambda}{\lambda} \right) - r\alpha \left(\frac{\Delta \lambda}{\lambda} \right)$$

و یا

$$r\alpha \left(1 + \frac{\Delta \lambda}{\lambda} \right) = c \left(\frac{\Delta \lambda}{\lambda} \right)$$

و از آنجا r چنین می‌شود:

$$r = \frac{c \left(\frac{\Delta \lambda}{\lambda} \right)}{\alpha \left(1 + \frac{\Delta \lambda}{\lambda} \right)}$$

$$= \frac{(3 \times 10^8 \text{ m/s})(0.050)}{(2.043 \times 10^{-18} \text{ s}^{-1})(1 + 0.050)} = 7 \times 10^{24} \text{ m}$$

$$= (7 \times 10^{24} \text{ m}) \left(\frac{1 \text{ ly}}{9.46 \times 10^{15} \text{ m}} \right) = 7.4 \times 10^8 \text{ ly}$$

(ح) کافی است که در نتیجه قسمت (الف) مقدار r و α را بنشانیم:

$$\Delta t = \frac{r}{c - r\alpha}$$

$$= \frac{7 \times 10^{24} \text{ m}}{3 \times 10^8 \text{ m/s} - (7 \times 10^{24} \text{ m})(2.043 \times 10^{-18} \text{ s}^{-1})} = 2.45 \times 10^{16} \text{ s}$$

$$= (2.45 \times 10^{16} \text{ s}) \left(\frac{1 \text{ ly}}{3.156 \times 10^7 \text{ s}} \right) = 7.763 \times 10^8 \text{ y}$$

(خ) طبق راهنمایی خواهیم داشت:

$$\Delta t = \frac{r}{c} = \frac{7 \times 10^{24} \text{ m}}{3 \times 10^8 \text{ m/s}} = 2.33 \times 10^{16} \text{ s}$$

$$= (2.33 \times 10^{16} \text{ s}) \left(\frac{1 \text{ ly}}{3.156 \times 10^7 \text{ s}} \right) = 7.393 \times 10^8 \text{ y}$$

(د) باتوجه به نتیجه قسمت (ح) بدیهی است در این صورت فاصله برابر با $L = 7.763 \times 10^8 \text{ ly}$ می‌شود.

(ذ) از نتیجه‌ای که در حل قسمت (پ) به دست آوردیم استفاده می‌کنیم:

$$r = \frac{c \left(\frac{\Delta \lambda}{\lambda} \right)}{\alpha \left(1 + \frac{\Delta \lambda}{\lambda} \right)}$$

$$= \frac{(3 \times 10^8 \text{ m/s})(0.080)}{(2.043 \times 10^{-18} \text{ s}^{-1})(1 + 0.080)} = 1.088 \times 10^{25} \text{ m}$$

$$= (1.088 \times 10^{25} \text{ m}) \left(\frac{1 \text{ ly}}{9.46 \times 10^{15} \text{ m}} \right) = 1.15 \times 10^9 \text{ ly}$$

(ر) کافی است که در نتیجه قسمت (الف) مقدار r و α را بنشانیم:

$$\Delta t = \frac{r}{c - r\alpha}$$

$$= \frac{1.088 \times 10^{25} \text{ m}}{3 \times 10^8 \text{ m/s} - (1.088 \times 10^{25} \text{ m})(2.043 \times 10^{-18} \text{ s}^{-1})} = 3.91 \times 10^{16} \text{ s}$$

$$= (3.91 \times 10^{16} \text{ s}) \left(\frac{1 \text{ ly}}{3.156 \times 10^7 \text{ s}} \right) = 1.24 \times 10^9 \text{ y}$$

حل. این مسئله در ویرایش ششم کتاب مبانی فیزیک حذف شده است و من تنها آن را به این خاطر آوردم که به اشتباه فاحشی که در ترجمه این مسئله روی داده است اشاره کنم. البته صورت این مسئله را در اینجا اصلاح کرده‌ام. فقط دوباره خاطر نشان می‌سازم که در اینجا خواسته شده است مقدار انبساط طول موجی که در $3 \times 10^5 y$ پس از انفجار بزرگ، گسیل شده است (یعنی زمانی که جهان نسبت به تابش الکترومغناطیس شفاف شد) را به دست آوریم. به احتمال زیاد عدم دقت کافی در طرح این مسئله باعث شده است که این مسئله در ویرایش ششم کتاب مبانی فیزیک حذف بشود. چرا که این مسئله شدیداً به اعداد داده شده حساس است که در حل قسمت (الف) به آن اشاره می‌شود.

(الف) با توجه به عدم دقت کافی مقادیر داده شده استفاده از قانون «هابل» و روابط مربوط به آن در اینجا توصیه نمی‌شود. به جای آن سراغ قانون «وین» می‌رویم. عدم دقت مقادیر داده شده در این قانون کمتر از قانون «هابل» جلوه می‌کند. تابش زمینه کیهانی دارای قله‌ای در شدت به ازای طول موج آشکارسازی شده 1.1 mm است که این از نظر توزیع طول موجها نظیر تابش کاواکی است که دمای دیواره‌هایش «تقریباً» برابر 2.7 K است. این تابش «حدود» $3 \times 10^5 y$ پس از انفجار بزرگ به وجود آمده که در آن زمان این تابش به دمای کاواکی «تقریباً» برابر 10^5 K مربوط بوده است. پس طبق قانون «وین» (مسئله ۳۹ کتاب را ببینید) می‌توانیم نسبت طول موجها را برابر با عکس نسبت دماها بگیریم:

$$\frac{\lambda'_{\max}}{\lambda_{\max}} = \frac{T}{T'} \cong \frac{10^5 \text{ K}}{2.7 \text{ K}} = 3.7 \times 10^4$$

توجه شود که کتاب برای این مسئله جواب 4.7×10^4 را داده است که این یا به اشتباه چاپی و یا به آن عدم دقت‌هایی که اشاره کردم باز می‌گردد.

(ب) با فرض آنکه جواب قسمت (الف) 4.7×10^4 باشد، مسئله را حل می‌کنیم. حد سری «لیمان» به ازای $n_{\text{II}} = \infty$ در رابطه «ریدبرگ» یعنی:

$$\frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{n_1} - \frac{1}{n_{\text{II}}} \right)$$

به دست می‌آید که در آن تراز بالایی و n_1 تراز پایینی است. برای سری لیمان $n_1 = 1$ می‌شود و بنابراین طول موج حد سری لیمان برابر با عکس ثابت «ریدبرگ» خواهد شد:

$$\lambda = \frac{1}{R} = \frac{1}{1.0967758 \times 10^7 \text{ m}^{-1}} = 9.11 \times 10^{-8} \text{ m}$$

آنگاه با استفاده از نتیجه قسمت (الف)، λ' چنین می‌شود:

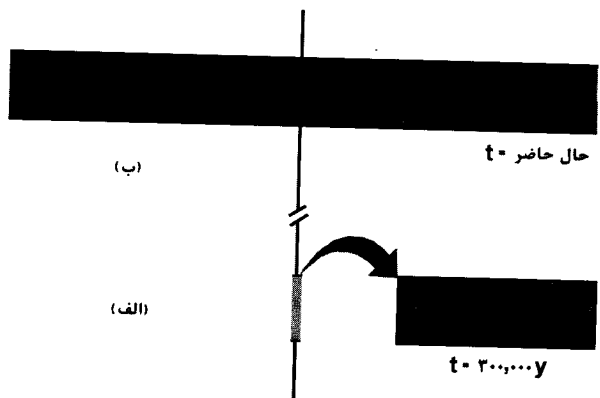
$$\lambda' = (4.7 \times 10^4)(9.11 \times 10^{-8} \text{ m}) = 4.28 \times 10^{-3} \text{ m} \\ = 4.28 \text{ mm}$$

می‌شود و این دقیقاً همان مقداری است که «پوند» و «اشنایدر» با دقتی برابر (0.076 ± 0.9990) به دست آوردند.

حال اگر این فوتونها را ساعت در نظر بگیریم، نتیجه خواهیم گرفت که ساعتی که در پتانسیل‌های پایین‌تر (کمتری) از ساعتی که در پتانسیل‌های بیشتر نصب شده‌اند، کندتر کار می‌کنند. این پدیده «اتساع زمان گرانشی» نام دارد و در واقع به سبب همین پدیده است که ساعت اتمی معیار ایالات متحده آمریکا، واقع در ایالت کلرادو، که در ارتفاع 1620 متری از سطح دریا نگهداری می‌شود از ساعت همانندش در رصدخانه سلطنتی گرینویچ که در ارتفاع 24 متری سطح دریا قرار دارد، هر سال در حدود 5 میلیونیم ثانیه جلو می‌افتد.

۴۳- تابش زمینه کیهانی. شکل ۴۵-۱۰ الف نشان دهنده مقطعی از جهان در وقتی است که جهان 3000000 سال عمر داشته است و شکل ۴۵-۱۰ نشان دهنده در زمان حال است. (به مسئله ۴۲ برای توضیح چنین ترسیم‌هایی نگاه کنید.) در زمان $t = 3000000 y$ ، الکترونهای آزاد و پروتونها برای تشکیل هیدروژن با هم ترکیب شده‌اند، و در تمام جهتها نور گسیل شده است (در شکل ۴۵-۱۰ الف فقط نوری که در امتداد طول مقطع حرکت می‌کند نشان داده شده است). نور گسیل شده‌ای که امروزه در زمین آشکارسازی می‌شود قسمتی از تابش زمینه کیهانی است.

فرض کنید که جهان 14 میلیارد سال عمر دارد و آهنگ انبساط جهان ثابت است. (الف) طول موجهای گسیل شده در $t = 3000000 y$ ، وقتی حالا آشکارسازی شوند، به خاطر انبساط جهان چه مقدار انبساط یافته‌اند؟ (ب) با فرض اینکه اتمهای هیدروژن تشکیل شده در $t = 3000000 y$ با اتمهای هیدروژن در حال حاضر یکسان اند، طول موج آشکارسازی شده مربوط به حد سری «لیمان» در نور گسیل شده کدام است؟ (پ) تابش زمینه کیهانی دارای قله‌ای از نظر شدت در طول موج آشکار سازی شده 1.1 mm است. طول موج گسیل شده مربوط چقدر است؟



(پ) باز با استفاده از نتیجه قسمت (الف)، این بار λ را محاسبه می‌کنیم:

$$\lambda = \frac{\lambda'}{4.7 \times 10^4} = \frac{1.1 \times 10^{-3} \text{ m}}{4.7 \times 10^4} = 2.34 \times 10^{-8} \text{ m} = 23.4 \text{ nm}$$

* مبحث تکمیلی: مسئله افق

در سال ۱۹۶۵ میلادی دو فیزیکدان آمریکایی به نام‌های «آرنو پنزیاس» و «رابرت ویلسون» یک آشکارساز بسیار حساس مایکروویو را آزمایش کردند. آن دو ضمن آزمایش متوجه شدند که آشکارساز آنها بیش از آنچه که انتظار می‌رفت، نوفه دریافت می‌کند. آنها می‌دانستند که نوفه‌ای که منبع آن درون جو باشد، وقتی آشکارساز مستقیماً روبه بالا نباشد، قویتر از هنگامی است که روبه بالاست. ولی آشکارساز را به هر سو که برگرداندند، نوفه اضافی تغییری نمی‌کرد. بنابراین منشاء آن را در خارج جو دانستند. همچنین چون میزان نوفه در طول شب و روز و در سراسر سال ثابت باقی می‌ماند، سرچشمه آن را در خارج از منظومه شمسی و حتی خارج از کهکشان جستجو کردند. چرا که در غیراینصورت، حرکت زمین جهت آشکارساز را تغییر می‌داد و باعث تغییر نوفه می‌شد. تقریباً هم‌زمان با «پنزیاس» و «ویلسون»، «باب دیکی» و «جیم پی بلز» از دانشگاه پرینستون بر روی نظریه‌ای که فیزیکدان روسی «ژرژ گاموف» قریب به یک دهه پیش از آن ارائه کرده بود، کار می‌کردند. به گفته «گاموف»، جهان آغازین باید جهانی بسیار چگال و گداخته می‌بود، چندان که تابش در نهایت شدت باشد. او بنا به محاسبه بسیار ساده‌ای ادعا کرد که ما باید تابش زمینه کیهانی‌ای ناشی از یک تابش جسم سیاه را در دمای ۵ K دریافت داریم. «دیکی» و «پی بلز» نیز ضمن تکرار این ادعا استدلال کردند که هرچند براساس سرگذشت گرمایی عالم، باید بخش‌هایی از آن تابش جهان

آغازین قابل رؤیت باشد، ولی به دلیل انبساط عالم، نور مورد نظر آنچنان انتقال به سرخ می‌یابد، که باید به صورت مایکروویو به نظر برسد. آنها در تدارک جستجوی این تابش مایکروویو بودند که «پنزیاس» و «ویلسون» با آگاهی یافتن از نظریه آنها، به علت آن نوفه اضافی در آشکارسازشان پی بردند. آنها آن نوفه اضافی را مربوط به تابش زمینه‌ای در دمای ۳K دانستند. در اوایل سال ۱۹۹۰ وسیله بسیار دقیقی جهت آشکارسازی تابش مایکروویو تحت عنوان COBE (Cosmic Background Explorer Satellite) ساخته شد. COBE در سال ۱۹۹۳ تابش زمینه‌ای را در $T_0 = 2.726 \text{ K}$ آشکار ساخت. البته COBE به دلیل دقت بسیارش، نکات تازه‌ای را نیز مطرح کرد. از جمله مشاهده یک ناهمسانگردی در شدت تابش زمینه. یعنی در بعضی جهت‌ها به شدت‌های دست می‌یافتند که مقدارشان اندکی با یکدیگر متفاوت بود. این ناهمسانگردی در حدود $\delta T = (30 \pm 5) \mu\text{K}$ بود. برای این ناهمسانگردی سه دلیل عمده مطرح می‌کنند: (۱) پدیده داپلری ناشی از حرکت زمین، (۲) عدم تقارن کروی عالم و (۳) ناهمگن بودن عالم.

حال پرسشی که مطرح می‌شود این است که چرا آشکارسازها برای تابش‌های حاصل از نواحی‌ای که با یکدیگر رابطه علی ندارند، در تمام جهت‌ها دمای نسبتاً یکسانی را ارائه می‌دهند؟ در حالی که می‌دانیم طبق اصل علیت «اینشتین»، در مشاهده‌های هم‌زمان، مشاهده‌پذیرها نباید روی هم اثر بگذارند. برای رفع این مشکل ادعا می‌شود که در لحظات آغازین آفرینش، عالم بشدت یکنواخت بوده و نقاط عالم با یکدیگر روابط علی پیچیده‌ای داشته‌اند و آنگاه مطابق آنچه که مدل‌های تورمی کیهانشناختی پیشگویی می‌کنند، نقاط همبسته عالم به‌طور نمایی از یکدیگر جدا شده و جهانی کنونی را تشکیل داده‌اند. بنابراین همدمایی کنونی عالم ناشی از همدمایی لحظات آغازین آفرینش است.