

فیزیک ذرات و کیهان‌شناسی



تصاویر ساخته شده با استفاده از طیف موج‌های مادون قرمز و پرتو x که در هم ترکیب شده و این تصویر را از مرکز فعال کهکشان راه شیری ما ایجاد کرده‌اند. تصویر اتمهای ایزوله شده را در حالات مختلف نظیر برافروخته شدن، ابرهای پراکنده گازی (به رنگ آبی)، انبوه اتم‌ها و مولکولهای پهناور ابرهای سرد شده (به رنگ قرمز) توده‌های چگال که ما آنها را ستاره می‌نامیم، نشان می‌دهد. چه بخشی از ماده و انرژی در جهان بنیادی‌ترین ماده جهان اتم‌ها و مواد تشکیل‌دهنده آنها را ساخته است؟

اهداف آموزشی این فصل

با مطالعه این فصل خواهید آموخت:

- مبانی تنوع کلیدی ذرات پایه و چگونگی کشف آنها
- فیزیکدانان چگونه از شتابگرها و آشکارسازها برای جستجوی ذرات پایه اتمی استفاده می‌کنند.
- چهار روش برهم‌کنش ذرات پایه اتمی
- چگونه می‌توان ساختار پروتون‌ها، نوترون‌ها و دیگر ذرات را با ضوابط کوآرک‌ها تبیین کرد.
- چگونه فیزیکدانان حدود مدل استاندارد ذرات و برهم‌کنش آنها را تعیین می‌کنند.
- مدارکی دال بر انبساط جهان و سرعت گرفتن آن
- تاریخچه جهان سیصد و هشتاد هزار سال پس از انفجار بزرگ

مقدمه

جهان از چه ساخته شده است؟ بنیادی‌ترین اجزای ماده کدامند؟ 2500 سال است که فلاسفه و دانشمندان همواره این پرسشها را مطرح کرده‌اند هرچند تا این تاریخ به پاسخی که بتوان آن را نهائی نامید دست نیافته‌اند ولی همانگونه که در این فصل خواهیم دید در این زمینه راهی بس طولانی را پیموده‌اند.

ممکن است انتخاب عنوان «فیزیک ذرات بنیادین و کیهان‌شناسی» برای این فصل تعجب برانگیز باشد زیرا ذرات بنیادین کوچکترین موجودات در جهان هستند و کیهان‌شناسی به بزرگترین یعنی خود جهان می‌پردازد با این حال در این فصل خواهیم دید که فیزیک این ذرات کوچک رل مهم را در تعیین کردن ماهیت جهان در بزرگترین مقیاس‌ها دارد.

خواهیم دید که ذرات بنیادین ذرات جاودانه نیستند و می‌توانند تولید شده و ویران گردند. اختراع شتاب‌گرهای ذرات و آشکارسازهای مناسب آنها در پیدایش ادراک ما از ذرات نقش بسزائی داشته‌اند. می‌توان ذرات بنیادی و برهم‌کنش آنها را بر پایه قوانین پایستگی و تقارن به راههای مختلفی دسته‌بندی کرد که بعضی مطلق و برخی منحصر در برهم‌کنش‌های خاصی صادق‌اند. در این زمینه ما درباره دانسته‌های کنونی خود از ماهیت و تکامل جهان بجا خواهیم کرد.

1-44 ذرات بنیادی- تاریخچه

ایده اینکه جهان از ذرات بنیادین تشکیل شده است تاریخی طولانی دارد. در حدود 400 سال پیش از میلاد مسیح، فیلسوفان یونانی، دموکریتوس و لوسیپوس نظر دادند که ماده از اجزای تجزیه ناپذیری تشکیل شده است و آن را اتم نامیدند، (کلمه ای مرکب از α به معنی not و tomos به معنی تقسیم، به معنی تجزیه ناپذیر) این ایده تا سال 1804 هنوز حاکم بود تا اینکه در آن سال دالتون (1766-1844) دانشمند انگلیسی که اغلب به نام پدر علم شیمی نوین خوانده می شود، کشف جدیدی کرد که بسیاری از پدیده های شیمیایی قابل توضیح اند مشروط بر اینکه اتمهای هر عنصر سنگ بنای تجزیه ناپذیر ماده باشند.

الکترون و پروتون

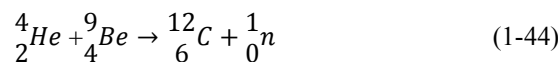
در اواخر سده نوزدهم معلوم شد که اتم ها غیر قابل تجزیه نیستند. وجود طیف های مشخصه هر عنصر مشخص ساخت که اتم ها دارای ساختمانهای درونی اند. در 1897، کشف الکترون توسط ج. تامسون نشان داد که اتم را می توان مرکب از ذرات باردار فرض کرد. هسته هیدروژن را به عنوان پروتون شناختند و در 1911 رادرفورد، آشکار ساخت که یک بار مثبت در یک هسته چگال کوچک مستقر است. در 1919 رادرفورد کشف جدیدی کرد: هرگاه ذرات آلفا به صورت نیتروژن می سوزند یکی از محصولات آن گاز هیدروژن می باشد. او استدلال کرد هسته هیدروژن بایستی بخشی از اتم سنگین تر نیتروژن باشد و یک تصادم ذرات آلفا میتواند آن را یکی از هسته های هیدروژن را جابجا کند که رادرفورد آن را پروتون نامید. در دهه های بعدی مکانیک کوانتمی، شامل معادله شرودینگر، در 15 سال بعد به بار نشست. دانشمندان در راه شناخت ذراتی قرار گرفتند که ساختار اتمی را مشخص می کرد هر چند هنوز می بایست تلاشها برای دستیابی به تفصیل بیشتر ادامه یابد.

فوتون

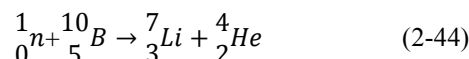
انیشیتین در سال 1905 اثر فوتوالکتریک را بر پایه کوانتس انرژی امواج الکترومغناطیسی بیان کرد. بر اساس این نظریه، انرژی امواج مذکور به صورت بسته هایی موسوم به فوتون photons با انرژی $E = hf$ در فضا منتشر می شوند. اتمها و هسته ها می توانند فوتون را گسیل (ایجاد) و یا جذب (ویران) کنند. فوتون به عنوان ذره فاقد بار الکتریکی و جرم سکون است. (توجه کنید که هر جا در این فصل صحبت از جرم ذره شد منظور جرم سکون آن است) در فیزیک ذرات فوتون را با حرف یونانی γ نشان می دهند.

نوترون

کشف نوترون سرآغاز مرحله مهمی در فیزیک است. در 1930 دو فیزیک دان آلمانی والتر بوتته و هربرت بکر مشاهده کردند که اگر بریلیم، بور و لیتیم را با ذره آلفا بمباران کنند، ذره ای از ماده هدف گسیل می شود که قدرت نفوذ آن به مراتب از ذره اولیه α بیشتر است. آزمایشهای چادویک (James Chadwick) در سال 1932 نشان داد که ذره گسیلی از نظر الکتریکی خنثی و جرم تقریبی آن برابر جرم پروتون است. چادویک این ذره را **نوترون (نشانه n یا 1_0n)** نامید. یک نمونه از آزمایشی که بوسیله بوتته و بکر با استفاده از بریلیم انجام شد به صورت زیر است:



ذرات بنیادی معمولا با اثرات الکترومغناطیسی آن ها شناخته می گردند، به عنوان مثال با یونیزه کردن ماده در حین عبور از آن. (این از خصوصیات اتاقک ابری است که در زیر توضیح داده می شود) از آنجا که نوترون فاقد بار الکتریکی است، آنها به سختی فعالیت کرده و بمانند الکترون در هنگام عبور از ماده ایجاد یونیزاسیون نمی کنند به سختی آشکار می گردند. به هر حال نوترون ها در فرایند پراکندگی کند شده اغلب در هسته نفوذ می کنند. نوترون کند شده را می توان از طریق واکنشی که در آن نوارون جذب یک هسته شده و ذره α تولید می کند، آشکار کرد. مثلا:



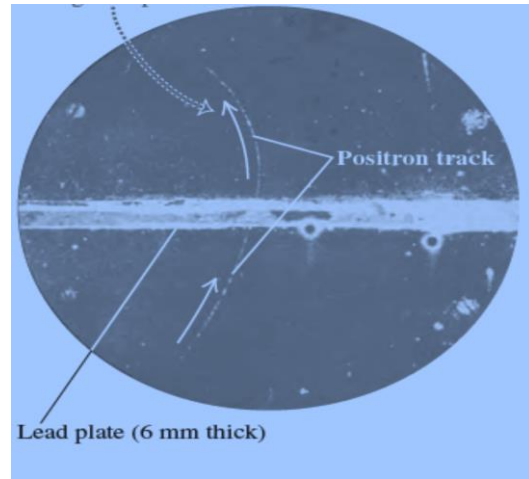
ذره آلفا به راحتی آشکار می گردد زیرا ذره باردار است. تجربیات بعدی نشان داد که نوترون به مانند الکترون و پروتون دارای اسپین 1/2 است (بخش 1-43 را ببینید)

کشف نوترون اسراری را در باره محتویات هسته برملا کرد. پیش از 1930 تصور می رفت که جرم هسته در اثر پروتون های موجود در آن است، اما هیچکس نمی فهمید چرا نسبت بار به جرم برای تمام هسته ها یکسان نیست. بزودی فهمیدند که تمامی اتمها هم دارای پروتون و هم دارای نوترون هستند (بجز اتم هیدروژن ${}^1_1\text{H}$) در حقیقت پروتون، نوترون و الکترون اجزای ساختاری اتم اند. ممکن است تصور گردد که این پایان داستان است ولی برعکس این آغاز ماجراست. این ذرات تنها ذرات بنیادی نیستند و کارهایی فراتر از ساخت اتم می توانند انجام دهند.

پوزیترون

الکترون مثبت یا پوزیترون توسط فیزیک دان امریکائی، کارل د. اندرسون در سال 1932 در حین مطالعه ذراتی که زمین را از فضا بمباران می کنند کشف شد. شکل 1-44 یک عکس تاریخی ساخته شده توسط اتاقک ابری (ابزاری برای ردیابی ذرات باردار) را نشان می دهد. فضای اتاق از یک بخار سرد شده (*super cooled vapor*) پر شده است. در مسیر عبور ذره باردار یونهایی به وجود می آیند که باعث پیدایش هسته های میعان و قطره های بسیار ریز مایع می شوند و این قطره ها مسیر ذره را ابرگون و قابل رویت می کنند.

شکل 1-44 عکسی که در سال 1932 توسط کارل د. اندرسون در اتاق ابری از پوزیترونی که برای نخستین بار شناخته شده بود برداشته شد. پوزیترون یک مسیر منحنی را در حضور یک میدان مغناطیسی طی می‌کند و نشان می‌دهد که پوزیترون در حال عبور به سمت بالا است و در هنگام عبور انرژی و سرعت خود را از دست می‌دهد. ضخامت لایه سرب 6 mm بود.



اتاقک ابری شکل 1-44 در یک میدان مغناطیسی قرار دارد که بر صفحه تصویر عمود و رو به داخل آن است. ذره از یک ورقه نازک سربی واقع در درون اتاقک عبور می‌کند (اثر آن روی عکس از چپ به راست است). انحناى مسیر در قسمت بالا بیشتر از پائین آن است که نمایشگر آن است که تندی ذره در بالا ی صفحه کمتر از پائین آن است پس ذره باید رو به بالا حرکت کند. ره در حین عبور از ورقه سربی نمی‌تواند انرژی بدست آورد. ضخامت و میزان انحناى مسیر بر این امر دلالت دارند که جرم ذره و اندازه بار الکتریکی آن نظیر الکترون است. اما با در نظر گرفتن جهت های میدان مغناطیسی و سرعت در رابطه $\vec{F} = q \vec{v} \times \vec{B}$ نیروی مغناطیسی نتیجه می‌گیریم که بار ذره مثبت است. اندرسون نام این ذره را **پوزیترون** نامید.

کشف پوزیترون از دید نظریه پردازان پیشرفته مسرت بخش بود. در سال 1928 فیزیک دان انگلیسی **پل دیراک** Paul Dirac تعمیمی نسبیتی معادله شرودینگر را برای الکترون ارائه کرد. در بخش 41-5 ما شرح دادیم که چگونه ایده دیراک در بیان گشتاور مغناطیسی اسپین یک الکترون کمک کرد.

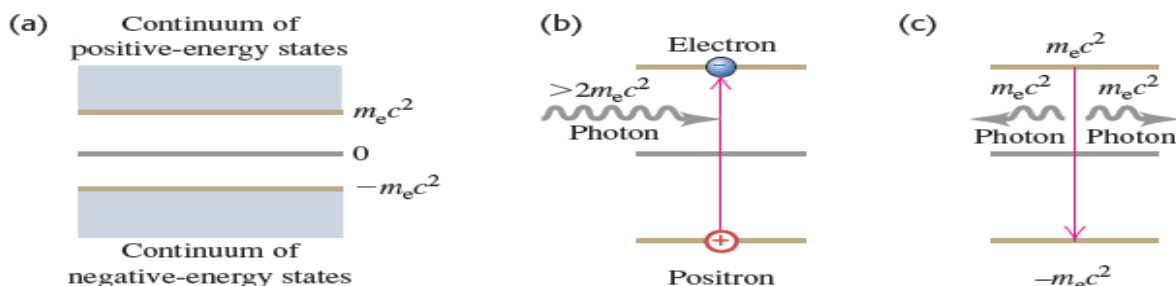
یکی از جنبه های ابهام افزین رابطه دیراک این بود که برای الکترون آزاد علاوه بر گستره مثبت حالتهای پیوسته انرژی بیشتر از $m_e c^2$ ، گستره مشابهی با علامت منفی کمتر از $-m_e c^2$ نیز پیش بینی می‌کرد (شکل 2-44 a). این امر پرسش برانگیز بود چه عاملی مانع گسیل فوتون با انرژی $2m_e c^2$ یا بیشتر حاصل از پرش الکترون از حالت مثبت به حالت منفی می‌شد؟ معنی این گستره منفی حالت های انرژی نامعلوم و راه رهائی از آن ناشناخته بود. تفسیر هوشمندانه ولی توجیه ناپذیر دیراک این بود که همه حالتهای منفی انرژی (که توسط الکترونها اشغال شده اند) به دلایلی قابل مشاهده نیستند. بنابر این طبق **اصل طرد exclusion principle** (بخش 41-6) انتقال به این حالت های قبلا اشغال شده، ممنوع است.

یک جای خالی واقع در حالتی با انرژی منفی، همانند حفره در نوار ظرفیت در نیم رسانا ها (بخش 42-6) مثل بار مثبت عمل می‌کند. در ابتدا دیراک استدلال می‌کرد که این جای خالی پروتون است ولی پس از کشف اندرسون معلوم شد که **پوزیترون** است.

علاوه بر این مدل پیشنهادی دیراک ساز و کار افزینش پوزیترون را در دسترس قرار داد. هرگاه الکترونی واقع در حالتی با انرژی منفی، فوتونی با انرژی $2m_e c^2$ را جذب کند به حالتی با انرژی مثبت منتقل می‌شود (شکل 2-44 b). که در آنجا قابل مشاهده است. جای خالی به جای مانده از این الکترون، پوزیترون است و به این ترتیب یک جفت الکترون-پوزیترون آفریده شده است. هم چنین اگر یک الکترون واقع در حالتی با انرژی مثبت، به درون یک جای خالی سقوط کند هم الکترون و هم جای خالی (همان پوزیترون)، ناپدید شده و فوتون هائی گسیل می‌شوند (شکل 2-44 c).

به این ترتیب نتیجه منطقی نظریه دیراک این شد که، همانند فوتون ها **الکترونها** را نیز می‌توان تولید و یا نابود کرد. تولید و یا نابودی فوتون ها به صورت منفرد، کاملاً ممکن است در حالی که الکترون-پوزیترون فقط به صورت جفت، تولید یا نابود می‌شوند.

(تولید و یا نابودی یک الکترون به تنهایی به معنی تولید و یا نابودی یک بار الکترون منفی $-e$ است که این نقض پایستگی بار الکتریکی است)



شکل 2-44 a) حالت های انرژی برای الکترون آزاد پیش بینی شده با فرمول دیراک. به موجب این نظریه مجموعه پیوسته ای از حالت ها، با انرژی بیشتر از $m_e c^2$ و نیز مجموعه پیوسته دیگری از حالت ها با انرژی کمتر از $-m_e c^2$ وجود دارند. (b) صعود الکترون از حالت منفی به حالت مثبت انرژی منطبق با تولید جفت الکترون - پوزیترون است. (c) سقوط الکترون از حالت مثبت به حالت منفی انرژی منطبق بر نابودی جفت الکترون پوزیترون است.

در سال 1949 **ریچارد فاین من Richard Feynman**، فیزیکدان آمریکایی نشان داد که از نظر ریاضی می توان پوزیترون را به صورت الکترونی که در بعد زمان به عقب بازگشته است شرح داد. این بازنویسی فرمول نظری دیراک، محاسبات مشکل ناشی از فرض دریای بیکران حالتی با انرژی منفی را از سر راه برداشت و الکترون و پوزیترون را بر جایگاه های یکسان نشانده. اما تولید و نابودی الکترون-پوزیترون به صورت جفت به قوت خود باقی است. نظریه دیراک ذاتا یک نظریه **چند ذره ای** است و آغازگر طرح چارچوبی برای تولید و نابودی ذرات بنیادی به شمار می آید.

نظریه ها و آزمایش ها تاکید دارند که اندازه بارهای پوزیترون و الکترون، و نیز جرم آن دو مساوی یکدیگر، اما علامت بارهای آن دو مخالفند. تکانه زاویه ای اسپین \rightarrow_S و گشتاور مغناطیسی \rightarrow_μ در پوزیترون، موازی و هم جهت و در الکترون، موازی و مخالف اند. اما چون اسپین هر دو یکسان است اندازه های \rightarrow_S و \rightarrow_μ به ترتیب در هر دو برابرند. هرگاه دو ذره نسبت به یک دیگر مثل پوزیترون و الکترون باشند هر یک را **پادذره antiparticle** دیگری می نامند هر ذره یک پادذره نظیر دارد. در تعدادی از ذره ها (که الزاما خنثی هستند) ذره و پادذره بر هم منطبق اند و می توان گفت که آنها پادذره خود نیز هستند. فوتون از این نوع است و راهی برای متمایز کردن فوتون و پادفوتون وجود ندارد. الکترون را با e^- و پوزیترون را با e^+ نشان می دهند و مفهوم عام الکترون، هم الکترون و هم پوزیترون را شامل می شود. معمولا پادذره را با علامت ذره با خطی بر بالای آن نشان می دهند مثلا \bar{p} علامت پادپروتون است. نمونه های دیگری از پادذره را بعدا خواهیم دید.

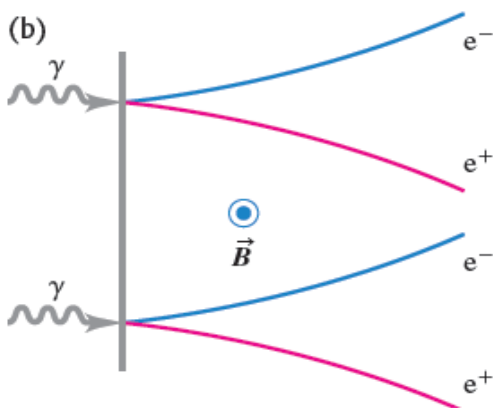
پوزیترون در ماده معمولی ظاهر نمی شود. جفت الکترون-پوزیترون هنگام برخورد ذرات باردار پر انرژی با برخورد فوتون های γ با ماده (نظیر فرایند شکل 3-44، موسوم به **تولید جفت** e^+e^-) تولید می شوند. بار الکتریکی، پایسته است و انرژی E اولیه باید $2m_e c^2$ (جرم سکین دو ذره) باشد. مینیمم انرژی لازم برای تولید جفت الکترون-پوزیترون برابر است با:

$$E_{min} = 2m_e c^2 = 2(9.101 \times 10^{-31} kg)(2.998 \times \frac{10^8 m}{s})^2$$

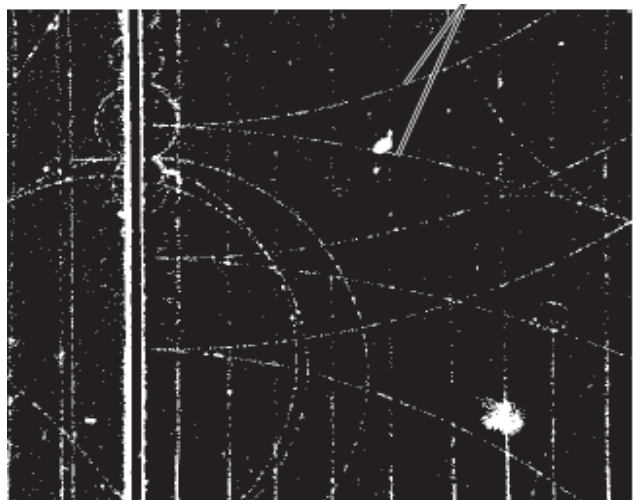
$$= 1.637 \times 10^{-13} j = 1.022 MeV$$

فرایند معکوس، نابودی جفت e^+e^- است و در حین برخورد پوزیترون با الکترون رخ می دهد. دو (و یا به ندرت سه) فوتون، امکان ظهور دارند که انرژی کل آنها برابر $2m_e c^2 = 1.022 MeV$ است. فروپاشی به یک فوتون منفرد غیر ممکن است. زیرا در چنین فرایندی پایستگی توان و تکانه، امکان ندارد. آسانترین راه بررسی فرایند نابودی در دستگاه موسوم دستگاه مرجع مرکز تکانه است که در آن تکانه کل صفر است. این همان تعمیم نسبیتی دستگاه مرکز جرم است که در بخش 6-8 بررسی شد.

پوزیترون ها در حین فروپاشی بعضی از هسته های ناپایدار نیز گسیل، و در این حال، ذرات بتای مثبت β^+ نامیده می شوند. در بخش 3-43 درباره گسیل β^+ بحث شد. اغلب مناسب است جرم ذرات را با یکای انرژی سکون معادل و استفاده از $m = E/c^2$ سنجید. نگاه یکا MeV/c^2 خواهد بود. برای مثال جرم الکترون یا پوزیترون برابر $0.511 MeV/c^2$ می باشد. ما این یکا را اغلب اوقات در این فصل بکار خواهیم برد.

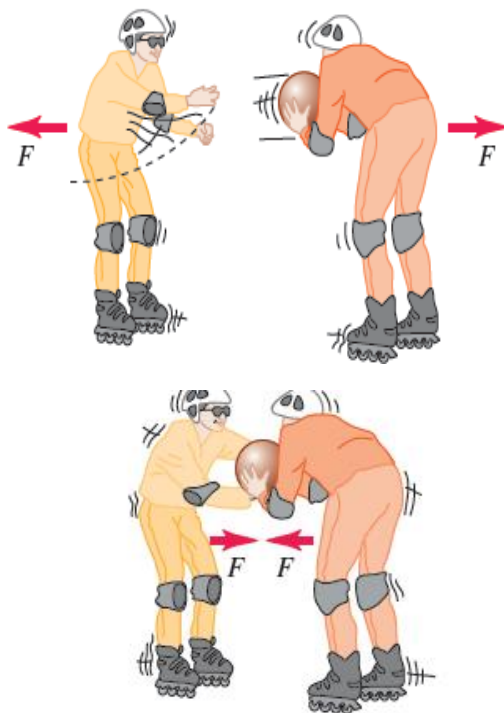


پوزیترون مخالف یکدیگر شوند b) - نمودار نشان دهنده فرایند تولید یک جفت محصول برای دو تا از فوتون ها.



شکل 3-44 a) - عکسی از مسیر جفت الکترون-پوزیترون در اتاقک حباب، که ضمن برخورد فوتون های $300 MeV$ با ورقه ای از سرب برداشته شده است. یک میدان مغناطیسی که جهت آن رو به خارج صفحه تصویر باشد، باعث می شود که جهت های انحراف الکترون-

ذرات در نقش میانجی نیرو Particles as Force Mediator



در فیزیک کلاسیک، بر هم کنش ذرات باردار با نیروهای تابع قانون کولن بیان می شود. در فیزیک کوانتمی می توان این بر هم کنش را بر پایه جذب و گسیل فوتون ها چنین بیان داشت: دو الکترون یکدیگر را دفع می کنند زیرا یکی از آنها فوتونی گسیل داشته و دیگری آنرا جذب می کند. این گسیل و جذب، شبیه پرتاب توپ بین دو اسکیت باز به صورت رفت و برگشت است (شکل 4-44). در مورد الکترون و پروتون، گسیل و جذب، مشابه رفت و برگشت توپی است که هر اسکیت باز از دست نفر مقابل می رباید و عمل به صورت متناوب تکرار می شود (شکل 4-44 b). نیروی مغناطیسی با میانجیگری فوتون ها مبادله می شود.

شکل 4-44 الف) دو اسکیت باز با پرتاب توپ به دستهای یکدیگر به عقب رفته از هم دور می شوند. ب) دو اسکیت باز با زبودن توپ از دست یکدیگر نیروی جاذبه بر هم وارد می کنند.

اگر بر هم کنش ذرات بار دار با میانجیگری فوتون ها صورت می گیرد پس انرژی فوتون ها از کجا تامین می گردد. با رجوع به بحثمان در باره اصل عدم قطعیت (بخش های 4-38 و 6-39) که بیان می داشت دوام یک حالت به مدت Δt با عدم قطعیت ΔE در انرژی همراه است و می توان نوشت:

$$\Delta E \Delta t \geq \hbar \quad (3-44)$$

این عدم قطعیت اجازه می دهد فوتونی با انرژی ΔE به وجود آید به شرط اینکه دوام آن بیشتر از Δt در رابطه (3-44) نباشد. فوتونی که به دلیل این محدودیت فقط به مدت کوتاهی می تواند وجود داشته باشد فوتون مجازی نامیده می شود. این امر شبیه «وام گرفتن» از «بانک انرژی» است. می توان از بانک وام گرفت به شرط اینکه در محدوده زمان مقرر، آن را بازپرداخت کرد. بنابر رابطه 3-44 هر چه اندازه وام بیشتر باشد باید زودتر بازپرداخت شود. بعدها درباره ذرات مجازی دیگر که به مدت کوتاه بر پایه «وام گیری انرژی» وجود دارند بحث می کنیم.

مزون ها Mesons

آیا ذره ای وجود دارد که میانجی نیروی هسته ای باشد؟ در سال 1935 به نظر می رسید که نیروی هسته ای بین دو نوکلئون (نوترون و پروتون) با انرژی پتانسیلی با فرمول کلی زیر مشخص می شود:

$$U(r) = -f^2 \cdot \frac{e^{-r/r_0}}{r} \quad (4-44) \text{ (انرژی پتانسیل هسته ای)}$$

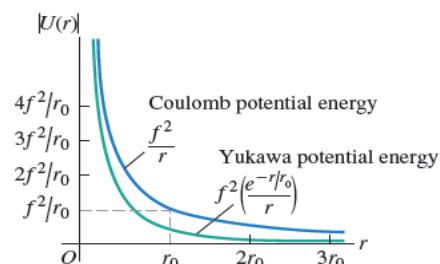
ثابت f شاخص شدت بر هم کنش و r_0 معیار سنجش برد آن است. در شکل 4-45 نمودار قدر مطلق این تابع و مقایسه آن با تابع f^2/r_0 که مشابه بر هم کنش الکتریکی دو پروتون است نشان داده شده است:

$$U(r) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{e^2}{r} \quad (5-44) \text{ (انرژی پتانسیل الکتریکی)}$$

شکل 4-45 منحنی اندازه تابع انرژی پتانسیل یوکاوا برای نیروهای

هسته ای. برای مقادیر $r > r_0$ تابع

$-f^2 \cdot \frac{e^{-r/r_0}}{r}$ به کندی به سمت صفر میل می کند. برای مقایسه



ولی تابع پتانسیل یوکاوا به ازای r های بزرگتر به تندی به سمت صفر میل می کند.

نمودار $|U(r)| = \frac{f^2}{r}$ انرژی پتانسیل نیروی کولن رسم شده است. به ازای مقادیر کوچک r_0 دو تابع تفاوت چندانی با هم ندارند

در سال 1935 هیدکی یوکاوا فیزیکدان ژاپنی، ذره ای فرضی که خود آن را مزون می نامید به عنوان میانجی نیروی هسته ای معرفی کرد. وی ادعا کرد که برد نیرو با جرم این ذره ارتباط دارد. این ادعا به این صورت مطرح شد: عمر Δt این ذره باید آنقدر دوام آورد که ذره بتواند فاصله ای در حد برد نیروی هسته ای را در این مدت بپیماید. با معلوم بودن ابعاد هسته و سایر داده ها اندازه این فاصله در حدود $r_0 = m = 1.5 \text{ fm}$ برآورد شد. اگر تندی ذره با تندی c انتشار نور در خلا قابل قیاس باشد، و در حدود نیمی از برد را طی کند، حدود عمر Δt برابر است با:

$$\Delta t = \frac{r_0}{2c} = \frac{1.5 \times 10^{-15} \text{ m}}{2 \times 3 \times 10^8 \text{ m/s}} = 2.5 \times 10^{-24} \text{ s}$$

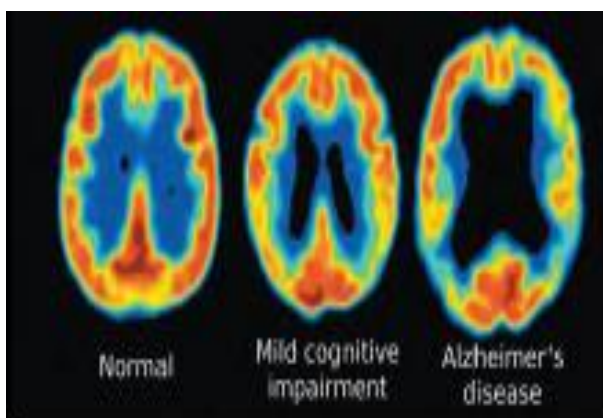
از معادله 3-44 مینیمم عدم قطعیت انرژی ΔE مورد نیاز برابر است با:

$$\Delta E = \frac{\hbar}{2\Delta t} = \frac{1.05 \times 10^{-34}}{2(2.5 \times 10^{-24})} = 2.1 \times 10^{-11} \text{ J} = 130 \text{ MeV}$$

این مقدار انرژی برابر است با Δm جرم معادل

$$\Delta m = \frac{\Delta E}{c^2} = \frac{2.1 \times 10^{-11}}{(3 \times 10^8 \text{ m/s})^2} = 2.3 \times 10^{-28} \text{ kg} = 130 \text{ MeV}/c^2$$

کاربرد نابودی زوج در تشخیص پزشکی



تکنیکی بنام توموگرافی گسیل پوزیترون (PET) برای مشخص کردن مراحل اولیه بیماری آلزایمر به کار میرود. به بیمار محلولی گلوکز مانند بنام FDG که در آن یک اتم اکسیژن با رادیواکتیو ^{18}F جایگزین شده است می خوراند. FDG در ناحیه فعال مغز جمع می گردد (جایی که متابولیسم گلوکز بالا است) آنگاه ^{18}F با ارسال ذره β^+ (گسیل پوزیترون) با نیم عمر 110 دقیقه فرومی پاشد. پوزیترون ارسال شده دفعتاً با یک الکترون نابود شده و دو فوتون پرتو گاما تولید می کند. یک اسکتر هر دوی فوتون ها را آشکار می سازد. سپس محلی را که نابود شدن در آن ناحیه رخ داده محاسبه می کند و محل تجمع FDG را نمایش می دهد. تصاویر PET که نواحی گسیل های قوی را نشان میدهد که معرف بالاترین میزان متابولیسم گلوکز است به رنگ قرمز است. در تصویر مقایسه ای بین وضعیت معمولی و یک تخریب ملایم در مغز و مغز بیمار مبتلا به بیماری آلزایمر نشان داده شده است.

که در حدود 259 برابر جرم الکترون است. یوکاوا نظر داد که ذره ای با این جرم به عنوان میانجی نیروی هسته ای عمل می کند.

یک سال بعد، اندرسون و ندرمایر در پرتو کیهانی دو ذره جدید کشف کردند که امروزه آنها را **مونون muons** می نامند. مونون منفی μ^- دارای بار الکتریکی برابر بار الکتریکی الکترون، و پاد ذره آن یا مونون مثبت (μ^+) دارای بار مثبت با همین اندازه است. هر دو ذره دارای جرمی یکسان و 297 برابر جرم الکترون دارند. کمی بعد معلوم شد که این ذره، ذره یوکاوا نیست زیرا برهم کنش آن با هسته بسیار ضعیف است.

در سال 1947 خانواده ای از سه ذره، موسوم به مزون π یا پیون (π mesons or pions) کشف شدند. بار آنها $+e$ و $-e$ و یا صفر و جرم آنها 270 برابر جرم الکترون است. برهم کنش پیوندها با هسته قوی است، لذا آنها همان ذره مورد نظر یوکاوا هستند. مزونهای سنگین تر ω و ρ نیز به عنوان میانجی های کوتاه برد تر نیروهای هسته ای عمل می کنند. شرح بالا تا حدی پیچیده است و باید بیان ساده تری در تاکید آن ارائه شود. در این بیان که در بخش 4-44 شرح داده خواهد شد **کوارکها quarks** و **گلوئونها gluons** وارد می شوند. اما پیش از طرح بحث مفصلتر در باره مزون ها، لازم است شتابگر ها و آشکار سازهای ذرات را شرح داد تا چگونگی تولید کنترل شده مزونها و ذرات دیگر و راه های مشاهده این ذرات روشن شود.

آموخته های خود را از بخش 44-1 آزمایش کنید

هر یک از این ذرات می توانند به عنوان نیروی هسته ای بین دو پروتون، دو نوترون و یا یک نوترون و یک پروتون جایگزین شوند. میزان برهم کنش هر یک را بر حسب میزانی که به عنوان میانجی عمل می کنند را از بزرگترین به کوچکترین درجه بندی کنید:

- (1) π^+ با جرم $140 \text{ MeV}/c^2$
- (2) ρ^+ با جرم $776 \text{ MeV}/c^2$
- (3) η^0 با جرم $548 \text{ MeV}/c^2$
- (4) ω^0 با جرم $783 \text{ MeV}/c^2$

پاسخ: به ترتیب ذرات 1، 3، 2 و 4 بزرگترین جرم واقعی، کوتاه ترین زمان عمر و کوتاه ترین فاصله ای را که می تواند در زمان حیات خود ببیند.

2-44 شتابگرها و آشکارسازهای ذرات Particle Accelerators and Detectors

در آزمایشهای فیزیک هسته ای آغازین، ذرات آلفا و بتای گسیل شده از عناصر پرتوزای طبیعی، با انرژی حدود چند MeV قابل وصول از این فروپاشی های کاتوره ای به کار گرفته می شد. اما شتابگرهای امروزی می توانند باریکه های دقیقاً کنترل شده ای را از ذرات از الکترون و پوزیترون گرفته تا یون های سنگین با گستره دلخواه و وسیعی از انرژی تولید کنند. این باریکه ها سه نوع مصرف دارند: نخست می توان از برخورد ذرات پر انرژی ذرات جدید تولید کرد. مثلاً برخورد الکترون و پوزیترون، فوتون های گاما تولید می کند. دوم طول موجهای دبروی ذرات پر انرژی کوتاه اند و بنابراین می توانند ساختار ریز مقیاس درون ذرات دیگر را در معرض دید قرار دهند، و به همان گونه که میکروسکپ الکترونی (بخش 39-1) با توان تفکیکی به مراتب بیشتر از میکروسکپ های اپتیکی تصویر می دهد، عمل کند. سوم، در ایجاد واکنش های هسته ای مورد نیاز علوم و پزشکی مورد استفاده اند.

شتابگر های خطی

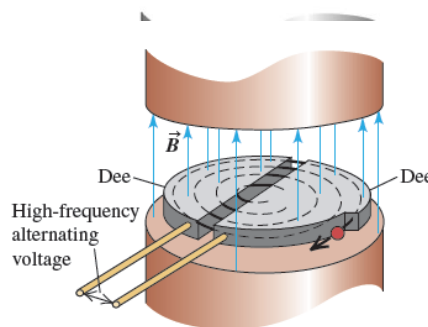
در شتابگر های ذرات، با استفاده از میدانهای الکتریکی و مغناطیسی، به ذرات باردار به گونه کنترل شده شتاب می دهند. با **شتابگر خطی (linear accelerator)** به ذرات در امتداد خط راست، شتاب می دهند. لوله پرتو کاتدی ح. تامسون و لوله پرتو ایکس ویلیام کولنج از این نمونه شتابگرها هستند. در انواع پیچیده تر شتابگرهای خطی، تعدادی الکتروود که با فواصل خالی بینابینی از یک دیگر جدا هستند در مسیر باریکه ذرات مستقرند و بر ذرات ضربه های متناوبی وارد می کنند. جدیدترین نوع شتابگر های خطی، به گونه ای که موج سواران بر موج آب اقیانوس سوار شده و جابجا می گردند، ذرات باردار «سوار بر» یک موج الکترومغناطیسی پیش رونده شده، با آن پیش می روند. در شتابگر خطی اسلاگورد SLAG که بزرگترین شتاب دهنده جهان است، الکترون و پوزیترون را در لوله ای به طول 3 km تا مرز رسیدن به 50 GeV شتاب می دهند. طول موج دبروی ذره با این انرژی برابر 0.025 fm یعنی به مراتب کوچکتر از ابعاد یک پروتون یا یک نوترون است.

سیکلوترون Cyclotron

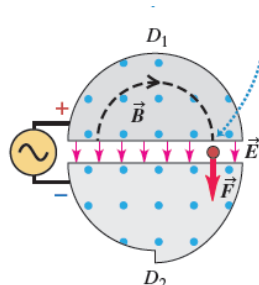
در بسیاری از شتابگر ها به کمک یک آهنربا، ذرات بار دار را روی یک مسیر دایره ای قرار می دهند. نخستین اینها به نام **سیکلوترون** در 1931 در دانشگاه کالیفرنیا توسط ای. او، لاورنس (E.O. Lawrence) و م، استانلی لیوینگستون (M. Stanle. Livingston) اختراع شد.

44.6 Layout and operation of a cyclotron.

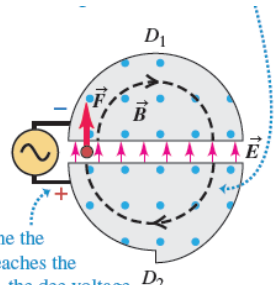
(a) Schematic diagram of a cyclotron



(b) As the positive particle reaches the gap, it is accelerated by the electric-field force ...



(c) ... and the next semicircular orbit has a larger radius.



By the time the particle reaches the gap again, the dee voltage has reversed and the particle is again accelerated.

شکل 44-6 (a) طرحواره سیکلوترون (b) همین که ذره بار مثبت به شکاف رسید، با میدان الکتریکی به آن شتاب می دهند و ذره در نیم دایره دیگر مسیر، شعاع بیشتری دارد. (c) پس از رسیدن مجدد ذره به شکاف، ولتاژ «دی» وارون می شود و ذره مجدداً شتاب می گیرد.

در این دستگاه که طرح واره آن در شکل 6-44 داده شده است، ذراتی با جرم m و بار q درون یک اتاقک خلاء، واقع در میدان مغناطیسی یکنواخت \vec{B} عمود بر صفحه تصویر، بر مسیر خود به حرکت در می آیند. قبلا در بخش 4-27 دیدیم که در چنین میدانی شعاع دایره مسیر ذره ای با تندی v برابر است با:

$$r = \frac{mv}{|q|B} \quad (6-44)$$

و تندی زاویه ای ذره از رابطه زیر بدست می آید:

$$\omega = \frac{v}{r} = \frac{|q|B}{m} \quad (7-44)$$

یک ولتاژ متناوب بین دو الکترود توخالی D_1 و D_2 (که دی *dees* نامیده می شوند) باعث پیدایش میدان الکتریکی در شکاف بین آنها می شود. قطبیت ولتاژ و میدان الکتریکی، دقیقاً دو بار در هر دور تغییر می کند (شکل های 6-44 b و 6-44 c) لذا میدان الکتریکی در هر عبور ذره از شکاف آن را به جلو هل می دهد. این هل دادن تندی و انرژی جنبشی ذره را افزایش داده و آن را به مداری با شعاع بیشتر پرت می کند. ماکزیمم های تندی v_{max} و انرژی جنبشی K_{max} را بزرگترین شعاع R مسیر مشخص می کند. با استخراج (v) از رابطه (6-44) خواهیم داشت:

$$v_{mx} = |q| \cdot BR/m$$

$$v = |q|Br/m$$

به فرض غیر نسبیاتی بودن سرعت ها خواهیم داشت:

$$K_{max} = \frac{1}{2}mv_{max}^2 = \frac{q^2B^2R^2}{2m} \quad (8-44)$$

مثال 1-44 - سیکلوترون پروتون

در سالهای دهه 1930 سیکلوترونی ساخته شد که شعاع ماکزیمم آن 0.500 m و میدان 1.50 T بود. اگر از آن برای شتاب دادن به پروتون استفاده شود (مطلوبست: a) فرکانس ولتاژ متناوب بین دی ها و b) ماکزیمم انرژی ذره.

حل

فرکانس f ولتاژ اعمال شده بایستی برابر فرکانس حرکت مداری پروتون باشد. معادله 7-44 فرکانس زاویه ای ω حرکت مداری پروتون را می دهد. از رابطه $f = \omega/2\pi$ فرکانسی بدست می آید که پروتون به مقدار ماکزیمم انرژی K_{max} خود می رسد که توسط معادله 8-44 داده شده و این زمانی است که شعاع مداری برابر شعاع دی ها باشد.

محاسبه

a) برای پروتون داریم

$$q = 1.60 \times 10^{-19} C$$

و جرم آن

$$m = 1.67 \times 10^{-27} kg$$

از معادله 7-44 داریم

$$f = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{|q|B}{2\pi m} = \frac{1.60 \times 10^{-19} C \times 1.5 T}{2\pi(1.67 \times 10^{-27} kg)} = 2.3 \times 10^7 Hz = 23 MHz$$

از معادله 8-44 ماکزیمم انرژی جنبشی برابر است با:

$$K_{max} = \frac{(1.60 \times 10^{-19} C)^2 * (1.50)^2 * (0.5)^2}{2(1.67 \times 10^{-27} Kg)} = 4.3 \times 10^{-12} J = 2.7 \times 10^7 eV = 27 MeV$$

این مقدار انرژی جنبشی بسیار بیشتر از انرژی موجود در منابع طبیعی رادیو اکتیو می باشد.

با استفاده از روابط 6-44 و 7-44 تندی پروتون برابر $v = 7.2 \times 10^7 m/s$ به دست می آید که حدوداً 25 درصد تندی انتشار نور است. در چنین سرعت هائی به تدریج اثرات نسبیتی اهمیت پیدا می کنند. در محاسبات بالا از این اثر ها صرف نظر شده است و پاسخهای بدست آمده برای f و K_{max} با چند درصد خطا همراه اند و به همین دلیل پاسخ ها فقط با در رقم معنی دار نوشته شده اند.

ماکزیم انرژی قابل حصول در سیکلوترون با اثرات نسبیتی محدود می شود. صورت نسبیتی معادله 44-7 چنین است:

$$\omega = \frac{|q| \cdot B}{m} * \sqrt{1 - v^2/c^2}$$

با افزایش تندی ذره، فرکانس زاویه ای ω آن کاهش می یابد و تعادل فاز بین حرکت ذره و ولتاژ متناوب دی ها به هم می خورد. در **سنکروسیکلوترون ها**، ذرات به صورت جهشی شتاب می گیرند. در هر جهش، فرکانس ولتاژ متناوب کاهش یافته و صورت هماهنگ رابطه فازی این ولتاژ با چرخش ذره حفظ می شود.

مشکل دیگری که بر سر راه ساختن سیکلوترون ها وجود دارد، ساختن آهن رباهای الکتریکی بزرگ است. قطر اتاقک خلاء بزرگترین سنکروسیکلوترونی که تاکنون ساخته شده است، در حدود 8 m است و به پروتون 600 MeV انرژی می دهد.

سنکروترون Synchrotron

برای حصول انرژی بیشتر، ماشین دیگری به نام **سنکروترون** عملی تر است. ذرات در داخل یک محفظه حلقه ای شکل بنام **حلقه شتاب دهنده accelerating ring** حرکت می کنند. حرکت باریکه ذرات با تعبیه تعدادی آهن ربا در دورتادور حلقه محدود می شود. همزمان با سرعت گرفتن ذرات، میدان مغناطیسی افزایش می یابد تا ذرات را همواره مجبور به متابعت از

b)



a)



شکل 44-7 a) شتاب دهنده بزرگ هادرون در مرکز تحقیقات هسته ای اروپا (CERN) حلقه شتاب دهنده زیر زمینی که در شکل با دایره قرمز نشان داده شده است در فاصله 100 متری زیر زمین و به قطر 8.5 کیلومتر ساخته شده است، به اندازه ای بزرگ که اسپین آن در مرز سویس و فرانسه قرار گرفته است (به کوه های آلپ در زمینه عکس توجه کنید) در زمان شتابدار شدن تا 7 TeV پروتون در حول رینگ 11000 بار در ثانیه حرکت می کند (b) یک مهندس در حال کار بر روی آهنربای ابر رسانائی که دورتادور LHC تعبیه شده است.

مداری ثابت نماید. شتاب دهنده بزرگ هادرون (LHC) نزدیک شهر ژنو در کشور سویس بزرگترین شتابدهنده پرنرژی جهان است که به گونه ای طراحی شده است که می تواند به پروتون تا 7 TeV (یا 7×10^{12} eV) انرژی دهد. (در بخش 3-44 در باره هادرون ها که دسته ای از عناصر ذره ای مرکب از پروتون و نوترون هستند صحبت خواهیم کرد)

همانطوریکه در بخش 1-32 گفته شد، بارهای شتابدار انرژی الکترومغناطیسی می تابند. نمونه این تابش ها، تابش ترمزی و تابش امواج از آنتن فرستنده های رادیو و تلویزیون است. در شتاب دهنده ها ی پرنرژی ذرات روی مسیر دایره ای می چرخند و این تابش ها را **تابش سنکروترون** (Synchrotron Radiation) می نامند.

شتاب دهنده های پرنرژی نوعا به منظور حفاظت در مقابل تابش در زیر زمین ساخته می شوند از دیدگاه شتابدهی این تابش ها ناخواسته اند زیرا بخشی از انرژی بجای شتاب دادن به ذره به بیرون تابیده و تلف می شود. این اتلاف انرژی را با بزرگ تر کردن شعاع حلقه r مینیمم می کنند بطوریکه شتاب مرکز گرا v^2/r کوچک می گردد. در دیدگاه مثبت، تابش سنکروترون به منزله منبع بسیار خوبی برای امواج الکترومغناطیسی پرنفرکانس کنترل شده می باشند.

انرژی قابل دسترسی Available Energy

وقتی باریکه ای از ذرات پرنرژی با یک هدف تصادم می کند، همه انرژی ذرات وارده برای تشکیل حالت جدیدی از ذرات جدید قابل دسترس نیست. چون باید حتما تکانه پایسته بماند، ذرات حاصل از برخورد باید حتما حرکت و بنابراین انرژی جنبشی داشته باشند. بحثی که در مثال 43-11 (بخش 43-6) ارائه شد، نمونه غیر نسبیتی این اصل است. ماکزیم انرژی قابل حصول، انرژی جنبشی در دستگاه مرجعی است که ذرات آن تکانه کل صفر است. این

دستگاه همان دستگاه مرجع مرکز تکانه مورد بحث در بخش 8-5 است. در این دستگاه انرژی جنبشی کل پس از برخورد می تواند صفر باشد بنابراین ماگزیم مقدار انرژی جنبشی اولیه برای انجام واکنش مورد مطالعه قابل حصول است.

دستگاه مرجع آزمایشگاه را در نظر بگیرید که در آن یک ذره هدف با جرم M در حالت اولیه در حالت سکون است و بوسیله ذره ای به جرم m و کل انرژی (شامل انرژی سکون E_m) بمباران می شود. کل انرژی قابل حصول E_a در سیستم مرکز تکانه (شامل انرژی سکون همه ذرات) را می توان با معادله زیر داده شود:

$$E_a^2 = 2.M_c^2 * E_m + (M_c^2)^2 + (m_c^2)^2 \quad (9-44) \quad \text{انرژی قابل حصول}$$

چنانچه اجرام ذرات پرتابه و هدف یکسان باشند، رابطه بالا را به صورت زیر ساده می کنیم:

$$E_a^2 = 2.m_c^2 * (E_m + (m_c^2)) \quad (10-44) \quad \text{(انرژی قابل وصول با دو جرم مساوی)}$$

اگر E_m بسیار بزرگتر از mc^2 باشد، می توانیم از جمله دوم داخل پرانتز صرف نظر کنیم پس معادله 10-44 به صورت زیر خلاصه می شود:

$$E_a = \sqrt{2.m_c^2.E_m} \quad (E_m \gg mc^2) \quad (11-44) \quad \text{(انرژی قابل حصول با جرم های مساوی)}$$

وجود ریشه دوم در معادله 11-44 یک نتیجه نا امید کننده برای طراح شتاب دهنده است. دو برابر کردن E_m ذره بمباران کننده انرژی قابل حصول E_a تنها به اندازه $\sqrt{2} = 1.414$ برابر افزایش می دهد. مثال های 2-44 و 3-44 محدودیت های ذرات هدف را نشان می دهند.

مثال 2-44- انرژی آستانه برای تولید پيون

یک پروتون (انرژی سکون 938 MeV) با نری جنبشی k با یک پرتون در حالت سکون برخورد می کند. هر دو ذره پس از برخورد باقی می مانند ضمن اینکه یک ذره پيون (π^0 با انرژی سکون 135 MeV) نیز تولید می شود. مقدار انرژی آستانه ای (مینیم k) را برای این فرایند حساب کنید.

حل

حالت نهائی شامل دو ذره پروتون اصلی (با جرم m) و یک پيون (با جرم m_π) است. انرژی آستانه بستگی به مینیم انرژی در حالتی است که در هر سه ذره در دستگاه مرکز تکانه در حال سکون باشند. مجموع انرژی قابل حصول در این حالت حداقل برابر انرژی سکون یعنی $2 * mc^2 + m_\pi.c^2$ است. از این رابطه برای محاسبه مجموع انرژی E_m بمباران پروتون (رابطه 10-44) استفاده کرده و انگاه انرژی جنبشی (متغیر مورد نظر ما) K برابر است با E_m منهای انرژی حالت سکون پروتون (mc^2).

محاسبه

با جایگزینی $2 * mc^2 + m_\pi.c^2$ در رابطه 10-44 به راحتی E_m را محاسبه می کنیم

$$4 * m^2.c^4 + 4.m.m_\pi.c^4 + m_\pi^2.c^4 = 2 * mc^2 E_m + 2.(m.c^2)^2$$

$$E_m = mc^2 + m_\pi.c^2 \left(2 + \frac{m_\pi}{2m} \right) = mc^2 + K$$

$$K = m_\pi.c^2 * \left(2 + \frac{m_\pi}{2m} \right)$$

می بینیم که انرژی جنبشی مورد بمباران پروتون K قدری بیشتر از دو برابر $m_\pi.c^2$ انرژی سکون ذره پيونی است که باید تولید شود. با قرار دادن $mc^2 = 938 \text{ MeV}$ و $m_\pi.c^2 = 135 \text{ MeV}$ خواهیم داشت:

$$\frac{m_\pi}{2m} = 0.072$$

و

$$K = (135 \text{ MeV})(2 + 0.072) = 280 \text{ MeV}$$

ارزیابی

این نتیجه را با نتیجه مثال 37-11 (بخش 8-37) مقایسه کنید. جانی که ما دیدیم که پيون می تواند از برخورد دو پروتون بوجود آید. در انجا انرژی جنبشی مورد نیاز برای هر یک از دو پروتون فقط 67.5 MeV است. در مورد مزایای انرژی چنین برخوردی در بخش بعدی بحث خواهیم کرد.

مثال 3-44. افزایش انرژی قابل حصول

شتابگر فرمی لب در ایلینویز برای بمباران ذرات هدف با انرژی 800 GeV طراحی شده بود. (a) انرژی قابل حصول در برخورد پروتون-پروتون را بدست آورید (b) اگر انرژی باریکه پروتون به 980 GeV افزایش داده شود انرژی قابل حصول چقدر است؟

حل

متغیر هدف ما انرژی قابل دسترسی E_a در یک برخورد بین دو ذره است. در هر دو حالت a و b باریکه انرژی E_m بسیار بزرگتر از انرژی سکون پروتون 938 MeV یا 0.938 GeV است. پس می توانیم با یک تقریب خوب از معادله 44-11 استفاده کنیم.

محاسبه

(a) برای $E_m = 800 \text{ GeV}$ داریم:

$$E_a = \sqrt{2 \cdot (0.938 \text{ GeV})(800 \text{ GeV})} = 38.7 \text{ GeV}$$

(b) برای $E_m = 980 \text{ GeV}$ داریم:

$$E_a = \sqrt{2 \cdot (0.938 \text{ GeV})(980 \text{ GeV})} = 42.9 \text{ GeV}$$

ارزیابی

اگر هدف پروتون ساکن باشد افزایش انرژی به میزان 180 MeV انرژی قابل وصول را فقط به اندازه 4.2 GeV افزایش می دهد. این نتیجه محدودیت بزرگ آزمایش را برای ذرات برخوردی که در حالت اولیه در حال سکون باشند را نشان می دهد. در زیر در باره اینکه فیزیکدانها بر این محدودیت غلبه می کنند بحث خواهیم کرد.

باریکه های برخورد Colliding Beams

محدودیت نشان داده شده در مثال 44-3 با ترفند آزمایش باریکه های برخوردکننده قابل پیش گیری است. در این آزمایش ها هدف ساکن وجود ندارد؛ در عوض باریکه های ذرات در جهات مخالف در حرکت بوده و به درون یک دیگر متمرکز اند و امکان برخورد در رو بین آنها بوجود می آید. معمولاً تکانه های دو دسته ذرات برخورد کننده مساوی و مخالفند. لذا هم جمع تکانه ها صفر است و هم آزمایشگاه دستگاه مرجع مرکز تکانه به شمار می آید و انرژی قابل وصول، ماکزیم می شود.

بزرگترین انرژی قابل دسترسی باریکه های برخورد کننده در عمل در برخورد کننده های بزرگ هادرون (شکل 44-7) بدست آمده است. 2808 دسته از پروتون 7 TeV در حول یک حلقه گردش می کنند، نیمی در یک جهت و نیم دیگر در سوی مخالف. هر دسته حاوی 10^7 پروتون می باشند. آهن ربا های قوی دو دسته باریکه با جهات مخالف را به نقطه واکنش هدایت می کنند. انرژی قابل دستیابی E_a حاصل از برخورد دو ذره برابر است با $E_a = 2 \times 7 \text{ TeV} = 14 \text{ TeV}$ (دقیقاً) برابر است با 14 TeV منهای انرژی سکون دو ذره پروتون برخورد کننده. اما این انرژی سکون فقط برابر است با

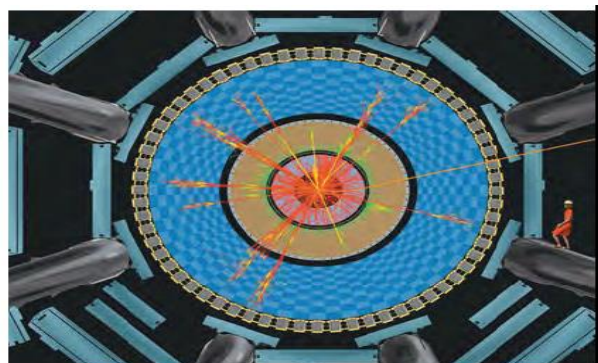
$$2(938 \text{ MeV}) = 1.876 \times 10^{-3} \text{ TeV}$$

که در مقایسه با 14 TeV بسیار کوچک و قابل اغماض است. فیزیکدانها توقع دارند که منابع انرژی بسیار بزرگی را در مرکز تحقیقات LHC تولید کنند که پیش از آن نظیر نداشته است.

آشکارسازها Detectors

در عمل نمی توان ذرات زیر اتمی یا فوتون ها را مشاهده کرد پس چگونه می توان خصوصیات آنها را اندازه گیری کرد؟ طیف گسترده ای از ابزار ها طراحی شده اند. بسیاری از آشکارسازها از خاصیت یونیزاسیون تولید شده از عبور ذرات باردار درون گاز ها، مایعات و جامدات استفاده می کنند. یون ها در امتداد مسیر حرکت ذرات (شکل 44-1) قطرات مایع در بخار فوق اشباع درون اتاقک ابری عمل می کنند و یا بصورت بخار در مایع فوق اشباع اتاقک حباب (شکل 44-2) می شوند و مسیر را قابل رویت می کنند. درون یک جامد نیم رسانا یونیزاسیون می تواند به صورت تشکیل جفت های الکترون-حفره ظاهر شوند. مادر باره این نحوه آشکار شدن این جفت ها در بخش (42-7) صحبت کردیم.

شکل 44-8 این تصویر تولید شده توسط کامپیوتر نتیجه یک برخورد بین دو ذره پروتون (نشان داده نشده) را در ناحیه برهم کنش در مرکز (Large Hadron Collider) شبیه سازی می کند. تصویر در امتداد یک لوله باریکه است. رنگ مختلف دنباله ها نشاندهنده تفاوت نوع ذرات بیرون آمده از تصادم است. مجموعه های گوناگونی از آشکار ساز ها ناحیه تصادم را احاطه کرده اند. (به تصویر زنی با لباس قرمز برای نشان دادن مقیاس توجه کنید)



اتفاق سیم به صورت آرایه هایی از سیم هائی است که به فواصل کم از یکدیگر قرار دارند و یونها را آشکار می کنند بارهای جمع شده وزمان پیدایش آنها در هر یک از سیم ها توسط رایانه پردازش شده و مسیر پرتابه را مشخص می کند. (شکل 44-8). تصویر سولونوئیدی که در اولین شکل فصل 38 می بینید از قلب این ردیف های آشکار کننده می باشد. شدت میدان مغناطیسی سولونوئید کمک می کند تا ذرات تازه تولید شده در جهات مختلفی از لوله مسیر و در امتداد مسیر در شعاع های مختلف بسته به بار الکتریکی و انرژی آنها آشکار شوند.

آزمایش های پرتو کیهانی Cosmic-Ray Experiments

تعداد بیشماری ذره، موسوم به پرتو های کیهانی (منتشر از چشمه هائی واقع در درون و یا بیرون کهکشان ما) پیوسته زمین ما را بمباران می کنند. این ذرات اغلب از نوترون، پروتون، و هسته های سنگین تر تشکیل شده اند و انرژی آنها بین 1 MeV تا بیشتر از 10^{20} eV در تغییر است. جو زمین و میدان مغناطیسی آن ما را بسیاری از این اشعه های زیان آور محفوظ می دارند. این بدان معنی است که آزمایشهای اشعه کیهانی باید در طبقات بالای جو یا خارج از آن توسط راکتها و بالنها انجام پذیرد.

برعکس آشکار ساز های نوترینو را در تونلها، معادن متروک در زیر سطح زمین و یا در اعماق آب اقیانوس ها جای می دهند تا اثرات مزاحم ذرات دیگر حذف شوند و فقط نوترینوها که با ماده برهم کنش ضعیفی دارند، به آشکار ساز ها برسند. برای جذب کسر قابل اندازه از باریکه نوترینو، به دیوارهای سربی به ضخامت یک سال نوری نیاز است پس آشکار ساز های نوترینو حاوی مقدار متناهی از ماده است. در نوعی آشکار ساز بنام سوپرکامیوکانده برای مشاهده نور ساطع شده از برهم کنش یک نوترینو به یک منبع آب محتوی 5×10^7 kg آب نیاز است. (بخش 44-5)

پرتو های کیهانی در روز های آغازین تحقیقات در زمینه فیزیک ذرات دارای اهمیت ویژه بودند و امروزه نیز در دستیابی به اطلاعات از بقیه جهان هستی مورد استفاده اند. پرتوهای کیهانی چشمه ذرات پر انرژی زیادی است که نیاز به شتابگرهای گرانبها ندارد. اما به دلیل کمی تعداد ذرات مورد نظر و توزیع کاتوره ای آنها در پرتو، فیزیکدان ها شتابگرها را برای تحقیق در زمینه فیزیک ذرات ترجیح دارند.

آموخته های خود را از بخش 44-2 آزمایش کنید

در یک آزمایش برخورد باریکه، یک الکترون 90 GeV با یک پوزیترون 90 GeV برخورد می کنند. الکترون و پروتون یک دیگر را نابود می کنند و یک پروتون مجازی را شکل می دهند که به نوبه خود به ذرات دیگر تبدیل می شود. آیا پروتون مجازی هم از رابطه $E = pc$ پروتون حقیقی پیروی می کند؟

پاسخ: خیر در یک برخورد روبرو (شاخ به شاخ) بین یک الکترون و یک پوزیترون با انرژی مساوی تکانه خالص برابر صفر است. در حالیکه هردوی تکانه و انرژی در برخورد پایسته هستند، فوتون مجازی دارای تکانه $P=0$ است اما انرژی آن برابر است با $90 \text{ GeV} + 90 \text{ GeV}$ است. بنابراین رابطه $E = pc$ برای فوتون مجازی صادق نمی باشد.

3-44 ذرات و برهم کنش ها

ما به آرایه های ذرات زیراتمی مانند فوتونها، الکترونها، پروتونها، نوترون ها و موئون ها و پيون ها که تا سال 1947 شناسائی شدند اشاره کردیم. پس از آن لفظا صدها ذره اضافه بر اینها در آزمایش شتابگرها کشف گردیده اند. بسیاری از ذرات شناخته شده ناپایدارند و با فروپاشی خود بخودی به دیگر ذرات تبدیل می شوند. ذراتی از همه نوع، چه پایدار چه ناپایدار، در برهم کنش بین ذرات می توانند بوجود آیند و یا نابود گردند. هر یک از این برهم کنش ها شامل تعبیر و تبدیل ذرات مجازی که انرژی تحقق و یا عدم خود را از اصل عدم قطعیت می گیرند.

گرچه جهان ذرات زیراتم و برهم کنش آنها بسیار پیچیده است، بعضی نتایج کلیدی نظم و ترتیبی به بینظمی ظاهری آنها می بخشد. یکی از کلید های ساده سازی این است که تمام آنها فقط از چهار نوع برهم کنش پیروی می کنند. بعلاوه همه ذرات به هر چهار نوع برهم کنش پاسخ نمی دهند. در این بخش ما روابط اساسی برهم کنش ها را بیشتر بررسی می کنیم و خواهیم دید که چگونه فیزیکدانها ذرات را برحسب روش و راه برهم کنش آنها طبقه بندی می کنند.

Four Forces and Their Mediating Particles چهار نوع نیرو و ذرات واسطه آنها

در بخش 5-5 ما ابتدا چهار نوع نیروی اساسی یا برهم کنش را توصیف کردیم (شکل 44-9) آنها به ترتیب نزولی شدن اثرشان عبارتند از:

- 1- برهم کنش قوی
- 2- برهم کنش الکترو مغناطیسی
- 3- برهم کنش ضعیف
- 4- برهم کنش گرانشی

با برهم کنش های الکترومغناطیسی و گرانشی در فیزیک کلاسیک آشنا شده ایم. هردو با فاصله $1/r^2$ متناسبند. در این طرح واره ذرات واسطه برای هردوی برهم کنش ها دارای جرم صفر و ذره از نوع پایدار است. ذره واسطه برای برهم کنش الکترومغناطیسی، ذره **فوتون** مشهور است که دارای اسپین 1 (به این معنی که عدد اسپین کوانتم آن $s=1$ است) بنابراین قدر مطلق اسپین تکانه زاویه ای آن برابر است با $s = \sqrt{s(s+1)} \cdot \hbar = \sqrt{2} \hbar$. ذره واسطه در برهم کنش گرانشی، **گراویتون** $graviton$ با اسپین 2 است ($s=2$) که قدر مطلق اسپین تکانه زاویه ای آن برابر است با $s = \sqrt{s(s+1)} \cdot \hbar = \sqrt{6} \hbar$. گراویتون عملاً تاکنون مشاهده نشده است زیرا نیروی گرانشی به مراتب ضعیفتر از نیروی الکترومغناطیسی است. به عنوان مثال مثال نیروی جاذبه گرانشی بین دو پروتون 10^{36} بار از دافعه الکتریکی آنها کمتر است. اهمیت اولیه

نیروی گرانشی در برهم کنش های بین ستارگان و اجرام بزرگ جهان مشهود است ولی بنظر نمی رسد که نقش جندانی در برهم کنش ذرات و انرژی های قابل دسترسی در آنها داشته باشد.

دو نیروی دیگر کمتر مشهورند. یکی از آنها **برهم کنش قوی Strong interaction** است که هم عامل ایجاد نیروی هسته ای است و هم عامل ایجاد پیوندها و چند نوع ذره دیگر در برخوردهای پر انرژی است. در بالاترین درجه اهمیت ذره واسطه برای برهم کنش قوی **گلوئون gluon** نامیده می شود. به هر حال نیروی بین هسته ها بر حسب مزون ها به عنوان ذرات واسطه قادر به شرح واکنش ها هستند. در مورد اسپین-1 و بدون جرم گلوئون در بخش 4-44 صحبت می کنیم.

رابطه 4-44 تابع انرژی پتانسیل مناسبی برای نیروی هسته ای است ثابت f^2 با دیمانسیون انرژی ضربدر فاصله، معرف شدت برهم کنش است. برای مقایسه با سایر نیرو ها نسبت بدون دیمانسیون $f^2/\hbar c$ موسوم به **ثابت جفت شدگی** برهم کنش **Coupling constant** مناسب تر است. از شما می خواهیم تا نشان دهید که این نسبت بدون دیمانسیون بوده و عددی که اندازه آن در دستگاه های مختلف یکا ثابت است مشاهده رفتار نیروی هسته ای نشان می دهد که این ضریب تقریباً برابر است با $f^2/\hbar c \approx 1$. همین ضریب برای برهم کنش الکترومغناطیسی برابر است با:

$$\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0\hbar c} = 7.297 \times 10^{-3} = \frac{1}{137} \quad (12-44)$$

بنابر این برهم کنش قوی، به تقریب صد بار قویتر از برهم کنش الکترومغناطیسی است، اما با افزایش فاصله با نسبتی تندتر از $1/r^2$ افت می کند.

چهارمین نیروی واکنشی بنام برهم کنش **ضعیف weak** است. کار آن برای فروپاشی ذره بتا است، مانند تبدیل یک نوترینو به یک پروتون، یک الکترون و یک پادنوترینو است و نیز برای فروپاشی ذرات ناپایدار (مثل پيون ها به موئون ها، موئون ها به الکترون ها و امثال آن) نقش دارد. ذرات واسطه در این موارد ذرات کم عمر نظیر w^+ و w^- و Z^0 هستند. موجودیت این ذرات طی آزمایشاتی در CERN به سال 1983 اثبات شد و به ازای این کشف جایزه نوبل در سال 1984 به کارلو روبیا Carlo Rubbia و سیمون واندرمیر Simon van der Meer تعلق گرفت. ذرات w^+ و Z^0 مانند فوتون و گلوئون دارای اسپین 1 هستند ولی جرم آنها عظیم است این جرم ها به ترتیب $80.8 GeV/c^2$ برای ذرات w و $91.2 GeV/c^2$ برای ذره Z^0 است. با چنین ذرات واسطه سنگینی برد برهم کنش های ضعیف بسیار کوتاه تر از برد برهم کنش های قوی است. چنانچه از نامگذاری پیداست، با ضریب 10^9 برابر از واکنش های قوی ضعیف ترند.

در جدول 1-44 جنبه های اصلی این چهار نوع برهم کنش مقایسه شده اند.

Table 44.1 Four Fundamental Interactions

Interaction	Relative Strength	Range	Mediating Particle			
			Name	Mass	Charge	Spin
Strong	1	Short (~1 fm)	Gluon	0	0	1
Electromagnetic	$\frac{1}{137}$	Long ($1/r^2$)	Photon	0	0	1
Weak	10^{-9}	Short (~0.001 fm)	w^\pm, Z^0	80.4, 91.2 GeV/c^2	$\pm e, 0$	1
Gravitational	10^{-38}	Long ($1/r^2$)	Graviton	0	0	2

ذرات دیگر More Particles

در بخش 1-44 از اکتشاف ذرات موئون در 1937 و پيون باردار در سال 1947 صحبت کردیم. بارالکتريکی موئون و پيون باردار هر یک برابر e بارالکترون است. موئون مثبت μ^+ ، پادذره موئون منفی μ^- است. اسپین هر یک $1/2$ جرم هر یک در حدود $207m_e = 106 MeV/c^2$ است. موئون ها ناپایدارند هر فرآیندی با طول عمر $2.2 \times 10^{-6} s$ است و پس از آن به یک الکترون هم علامت خود یک نوترینو و یک پادنوترینو فرو می پاشند.

سه نوع پيون همگی با اسپین 0 وجود دارند. جرم π^+ و π^- هر یک برابر $273m_e = 140 MeV/c^2$ است. آنها ذراتی ناپایدارند و با طول عمر $2.6 \times 10^{-8} s$ به موئون هم علامت خود، یک نوترینو برای π^+ و یک پادنوترینو برای π^- فرومی پاشند. جرم π^0 کمتر از دو پيون دیگر یعنی برابر $264m_e = 135 MeV/c^2$ است و طول عمر آن برابر $8.4 \times 10^{-17} s$ است و سپس به دو فوتون فروپاشیده می شود. ذره π^+ و π^- پادذره یکدیگرند حال آنکه π^0 پادذره خود است و در این مورد وجه تمایزی بین ذره و پادذره وجود ندارد.

ایده وجود انتی پروتون \bar{p} با کشف پوزیترون به صورت تردید امین شکل گرفت. ذره \bar{p} در سال 1955 کشف گردید و این زمانی بود که جفت پروتون-پادپروتون ($p\bar{p}$) با استفاده از یک باریکه پروتون $6 GeV$ در بوآتون دانشگاه برکلی کالیفرنیا پا به عرصه ظهور نهاد. پس از مدتی پادنوترینو \bar{n} کشف گردید و پس از 1960 که شتابگر های پر انرژی تر و آشکارساز های با ساختار پیچیده تکمیل گردیدند، خیل عظیمی از ذرات به واقع ناپایدار شناخته شدند که دسته بندی و نامگذاری آنها مستلزم وضع شمار زیادی اصطلاح جدید است.

در ابتدا ذرات را بر حسب جرم به سه گروه تقسیم (1) لپتون ها (ذرات سبک نظیر الکترون ها) (2) مزون ها (با جرم متوسط نظیر پيونها) و (3) باریونها (سنگین ها نظیر نوکلئون ها و ذرات با جرم زیاد). اما بعداً تقسیم بندی مناسب تر جدیدی، که در آن ذرات بر حسب نوع برهم کنش جایگزین این روش شد. برای مثال هادرون *Hadrons* (شامل مزونها و باریون ها) دارای برهم کنش قوی هستند ولی لپتون ها نه.

در بحث زیرین ما بین **فرمیون ها (Fermions)** با اسپین 1/2 و **بوزون ها (bosons)** با اسپین صفر یا یک، تمایز قائل می شویم. فرمیون ها از قانون اصل طرد پیروی می کنند که پایه تابع توزیع فرمی دیراک به شمار می آید. بوزون ها از این اصل پیروی نمی کنند و تابع توزیع آنها متفاوت بوده و تابع توزیع آنها تابع بوز-اینشتین است.

لپتون ها Leptons

لپتون ها، که بر هم کنش قوی ندارند، شامل شش ذره زیرند: الکترون (e^-) و نوترینوی الکترون (ν_e)، موئون (μ^-) و نوترینوی موئون (ν_μ) و سرانجام ذره تاو (τ^-) و نوترینوی تاو (ν_τ). هر یک از این ذرات پادذره خود را دارد. تمام لپتون ها دارای اسپین 1/2 و بنابراین فرمیون هستند. در جدول 44-2 خانواده لپتون ها مشاهده می شوند. جرم ذرات تاو (τ) برابر $1777 \text{ MeV}/c^2 = 3478 m_e$ است. تاو ها و موئون ها ناپایدارند؛ یک ذره (τ^-) معمولاً به یک (μ^-) و یک نوترینوی تاو τ و یک پادنوترینوی موئون و یک (μ^-) به یک الکترون و پادنوترینو الکترون و یک نوترینوی تاو فرو می پاشند.

این ذرات طول عمر نسبتاً طولانی دارند زیرا فروپاشی آنها بوسیله برهم کنش های ضعیف صورت می گیرد. علیرغم بار صفر آنها، تمایز یک نوترینو از آنتی نوترینو قابل تشخیص است؛ اسپین تکانه زاویه ای یک نوترینو و تکانه خطی دارای مولفه های خلاف جهت هم و موازی اند ولی در پادنوترینو ها این دو مولفه موازی و هم جهت می باشند. از آنجا که نوترینو ها بسیار فرار هستند، فیزیک دانها تنها قادر بودند که آنها را کمی بیشتر از جرم حالت سکون ν_e و ν_μ و ν_τ قرار می دادند، تا همین اواخر تصور می شد که جرم سکون نوترینو ها صفر است، اما شواهدی اکنون در دست است که این ذرات جرم ناچیزی دارند ولی این مقدار صفر نیست. ما بعداً به این مطلب باز می گردیم.

لپتون ها تابع اصل پایستگی اند، متناظر با جفت های لپتون سه عدد لپتون L_e ، L_μ ، L_τ وجود دارند. برای الکترون e^- و نوترینوی الکترون ν_e داریم $L_e=1$ و برای پادذره های آنها یعنی e^+ و $\bar{\nu}_e$ داریم $L_e=-1$ و به طور مشابه برای μ و τ اعداد L_τ و L_μ وجود دارند. در تمام

Table 44.2 The Six Leptons

Particle Name	Symbol	Anti-particle	Mass (MeV/c ²)	Lifetimes (s)			Principal Decay Modes
				L_e	L_μ	L_τ	
Electron	e^-	e^+	0.511	+1	0	0	Stable
Electron neutrino	ν_e	$\bar{\nu}_e$	$< 3 \times 10^{-6}$	+1	0	0	Stable
Muon	μ^-	μ^+	105.7	0	+1	0	2.20×10^{-6}
Muon neutrino	ν_μ	$\bar{\nu}_\mu$	<0.19	0	+1	0	Stable
Tau	τ^-	τ^+	1777	0	0	+1	2.9×10^{-13}
Tau neutrino	ν_τ	$\bar{\nu}_\tau$	<18.2	0	0	+1	Stable

بر هم کنشها، هر عدد لپتون به طور مجزا پایسته است. برای مثال، در واپاشی ذره μ^- اعداد لپتون عبارتند از:

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

$$L_\mu = 1 \quad L_e = 1 \quad L_e = -1 \quad L_\mu = 1$$

مشابه این پایستگی در فیزیک کلاسیک وجود ندارد.

مثال 4-44 پایستگی عدد لپتون

پایستگی عدد لپتون را در واکنشهای زیر بیازمائید:

- $\mu^+ \rightarrow e^+ + \nu_e + \bar{\nu}_\mu$
- $\pi^+ \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu$
- $\pi^0 \rightarrow \mu^- + e^+ + \nu_e$

حل

پایستگی عدد لپتون ایجاب می کند که L_e و L_μ و L_τ (داده شده در جدول 44-2) به طور مجزا دارای حاصل جمعی یکسان قبل و بعد از فروپاشی داشته باشند باشند.

محاسبه

برای هر طرح واره فروپاشی مقادیر L_e و L_μ را فهرست می کنیم. یک پادزره دارای عدد لپتون مخالف از ذره نظیر خود است که در جدول 44-2 مقادیر آن داده شده است. هیچ ذره τ یا نوترون τ در طرح ظاهر نمی شود پس $L_\tau = 0$ است و در پیش و بعد از فرایند L_τ پایسته است.

- a) $\mu^+ \rightarrow e^+ + \nu_e + \bar{\nu}_\mu$
 $L_e: 0 = -1 + 1 + 0$
 $L_\mu: -1 = 0 + 0 + (-1)$
- b) $\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu$
 $L_e: 0 = 0 + 0$
 $L_\mu: 0 = 1 + (-1)$
- c) $\pi^0 \rightarrow \mu^- + e^+ + \nu_e$
 $L_e: 0 = 0 + (-1) + 1$
 $L_\mu: 0 \neq 1 + 0 + 0$

ارزیابی

فروپاشی های a و b با پایستگی اعداد لپتون مشاهده شده پایسته اند. و فرپاشی c با عدم انطباق پایستگی L_μ همراه است و هرگز مشاهده نشده است. فیزیکدانان با استفاده از این و دیگر نتایج این خصوصیت را که هر سه عدد لپتون به طور مجرد پایسته اند را استنباط می کنند

هادرون ها Hadrons

هادرون ها، ذراتی با برهم کنش قوی، و خانواده ای پیچیده تر از لپتون ها هستند. هر هادرون یک پادزره دارد و با خطی بالای علامت ذره نمایش داده می شوندمانند پادزره \bar{p} . هادرون ها دارای دو زیر گروه هستند **مزون ها Mesons** و **باریون ها Baryons**. جدول 44-3 بعضی از تعداد بیشمار هادرون ها را که تاکنون شناخته شده اند را نشان میدهد. (از این میان **ذرات شگفتی Strangeness** و **کوآرک ها Quarks** را در همین بخش توضیح خواهیم داد.)

مزون ها شامل پيون ها که قبلا به آنها اشاره گردید، K مزون هایی یا کائون ها (kaons) و مزون های η و تعدادی دیگر هستند که درباره آنها بعدا صحبت خواهیم کرد. مزون ها دارای اسپین 0 یا یک هستند و بنابراین جزو بوزون ها هستند. هیچ مزون پایداری وجود ندارد تمامی آنها می توانند با پیروی از قوانین پایستگی به ذرات با جرم کمتر فرو پاشند.

Table 44.3 Some Hadrons and Their Properties

Particle	Mass (MeV/c ²)	Charge Ratio, Q/e	Spin	Baryon Number, B	Strangeness, S	Mean Lifetime (s)	Typical Decay Modes	Quark Content
<i>Mesons</i>								
π^0	135.0	0	0	0	0	8.4×10^{-17}	$\gamma \gamma$	$u\bar{u}, d\bar{d}$
π^+	139.6	+1	0	0	0	2.60×10^{-8}	$\mu^+ \nu_\mu$	$u\bar{d}$
π^-	139.6	-1	0	0	0	2.60×10^{-8}	$\mu^- \bar{\nu}_\mu$	$\bar{u}d$
K^+	493.7	+1	0	0	+1	1.24×10^{-8}	$\mu^+ \nu_\mu$	$u\bar{s}$
K^-	493.7	-1	0	0	-1	1.24×10^{-8}	$\mu^- \bar{\nu}_\mu$	$\bar{u}s$
η^0	547.3	0	0	0	0	$\approx 10^{-18}$	$\gamma \gamma$	$u\bar{u}, d\bar{d}, s\bar{s}$
<i>Baryons</i>								
p	938.3	+1	$\frac{1}{2}$	1	0	Stable	—	uud
n	939.6	0	$\frac{1}{2}$	1	0	886	$p e^- \bar{\nu}_e$	udd
Λ^0	1116	0	$\frac{1}{2}$	1	-1	2.63×10^{-10}	$p\pi^-$ or $n\pi^0$	uds
Σ^+	1189	+1	$\frac{1}{2}$	1	-1	8.02×10^{-11}	$p\pi^0$ or $n\pi^+$	uus
Σ^0	1193	0	$\frac{1}{2}$	1	-1	7.4×10^{-20}	$\Lambda^0 \gamma$	uds
Σ^-	1197	-1	$\frac{1}{2}$	1	-1	1.48×10^{-10}	$n\pi^-$	dds
Ξ^0	1315	0	$\frac{1}{2}$	1	-2	2.90×10^{-10}	$\Lambda^0 \pi^0$	uss
Ξ^-	1321	-1	$\frac{1}{2}$	1	-2	1.64×10^{-10}	$\Lambda^0 \pi^-$	dss
Δ^{++}	1232	+2	$\frac{3}{2}$	1	0	$\approx 10^{-23}$	$p\pi^+$	uuu
Ω^-	1672	-1	$\frac{3}{2}$	1	-3	8.2×10^{-11}	$\Lambda^0 K^-$	sss
Λ_c^+	2285	+1	$\frac{1}{2}$	1	0	2.0×10^{-13}	$pK^- \pi^+$	udc

باریون ها (Baryons) شامل نوکلئون ها و چندین ذره با نام هیپرون ها ($\Omega, \Sigma, \Xi, \Lambda$) (hyperons). این ها شبیه نوکلئون ها هستند ولی بسیار سنگین تر از آنها هستند. باریون دارای اسپین 1/2 هستند و بنابراین همگی فرمیون هستند. تنها باریون پایدار پروتون است، یک

نوترون آزاد، به پروتون و هیپرون ها از طریق فرایند های مختلفی به هیپرونهاى دیگر و یا نوکلئون ها فرو می پاشند. باریون ها مانند پایستگی عدد لبتون ها از قوانین پایستگی عدد باریون **baryon number** تبعیت می کنند. ما عدد باریون $B=1$ را به باریون ها (مانند $\Lambda, \Sigma, \Xi, \Omega, p$ و n و نظایر آنها) و عدد $B=-1$ را به پادذره های آنها (\bar{p} و \bar{n} و $\bar{\Lambda}$ و $\bar{\Sigma}$ و نظایر آنها) نسبت می دهیم. **عدد باریون در همه بر هم کنش ها، پایسته می ماند.** دلیل اینکه عدد جرم A در همه واکنش های هسته ای که در فصل 43 مطالعه کردیم پایسته است همین است.

مثال 44-5. پایستگی عدد باریون

پایستگی عدد باریون را برای واکنش های زیر بیازمائید

$$a) n + p \rightarrow n + p + p + \bar{p}$$

$$b) n + p \rightarrow n + p + \bar{p}$$

حل:

این مثال مانند مثال 44-4 است. با استفاده از اطلاعات جدول 44-3 اعداد باریون را قبل و بعد از واکنش بررسی می کنیم

محاسبه

با توجه به داده های جدول و توجه به اینکه یک باریون دارای $B=1$ و برای پاد باریون دارای $B=-1$ است خواهیم داشت

$$n + p \rightarrow n + p + p + \bar{p}; 1 + 1 = 1 + 1 + 1 + (-1)$$

این واکنش با اصل بقای اعداد باریون سازگاری دارد. و هرگاه انرژی لازم در برخورد $n+p$ موجود باشد رخ خواهد داد.

$$n + p \rightarrow n + p + \bar{p}; 1 + 1 \neq 1 + 1 + (-1)$$

اندازه نهائی عدد باریون پایسته نیست و این واکنش هرگز مشاهده نشده است.

مثال 44-6 تولید پادپروتون

حداقل انرژی لازم برای تولید پادپروتون در یک برخورد با پروتون ساکن چقدر است؟

حل

واکنش پایستی در انرژی، بار و عدد باریون پایسته باشد. از آنجا که ذره هدف و پروتون بمباران شده دارای جرم مساوی هستند و هدف در حالت سکون است، مینیمم انرژی E_m را با استفاده از معادله 44-10 حساب می کنیم.

محاسبه

پایستگی بار و عدد باریون مانع از تولید خود بخودی یک پادپروتون می باشد؛ این می تواند در ایجاد جفت پروتون-پادپروتون ایجاد شود. واکنش کامل عبارت است از:

$$p + p \rightarrow p + p + p + \bar{p}$$

برای انجام این واکنش مینیمم انرژی قابل دسترسی E_a در معادله 44-10 همان انرژی سکون $4mc^2$ (شامل سه ذره پروتون و یک پاد پروتون) است. با قراردادن این عدد در معادله 44-10 خواهیم داشت:

$$(4mc^2)^2 = 2mc^2(E_m + mc^2) \rightarrow E_m = 7mc^2$$

ارزیابی

انرژی E_m بمباران پروتون شامل انرژی حالت سکون mc^2 ان نیز هست بنابراین این مینیمم انرژی جنبشی آن باید برابر $5.63 \text{ GeV} = (938) * 6 \text{ mc}^2$ باشد. جستجو برای پادپروتون دلیل اصلی ساختن دستگاه بوآترون Bevatron در دانشگاه برکلی کالیفرنیا بود که باریکه ای از انرژی 6 GeV را برای تولید پروتون می سازد. این تلاش در سال 1959 به نتیجه رسید و امیلیو سگره و اوئن چمبرلین به خاطر این کشف جایزه نوبل گرفتند.

شگفتی

مزون های K و هیپرون های Λ و Σ در سالهای دهه 1950 کشف شدند و بدیل رفتار غیر عادی اشان **ذرات شگفت Strange particles** نامیدند. در یک برخورد پراانرژی نظیر π^- و p و یک مزون K و یک هیپرون همیشه با هم تولید تولید شدند. این بر هم کنش ها به علت نرخ تولید نسبتاً بالا به فرایند های برهم کنش قوی (**strong interaction**) شبیه اند ولی از نظر طول عمر نسبتاً بالایشان به برهم کنش های

ضعیف (weak interaction) شبیه اند. به نظر می آید که ذره K^0 دو طول عمر متفاوت دارد، یکی در حدود $10^{-11} \times 9$ و دیگری در حدود 600 بار بیشتر. آیا مزون K با هیدرون ها برهم کنش قوی دارند؟

جستجو برای یافتن پاسخ به این سؤال فیزیکدانها را به معرفی کمیتی جدیدی بنام **شگفتی Strangeness** رهنمون ساخت. به هیپرون های Λ^0 و $\Sigma^{\pm,0}$ عدد کوانتومی $s = -1$ و به نظیر مزون های K^0 و K^+ عدد کوانتومی $s = +1$ نسبت داده شد. یاد ذره های دو عدد شگفتی دارای قرینه بودند $s = +1$ برای $\bar{\Lambda}^0$ و $\bar{\Sigma}^{\pm,0}$ و $s = -1$ برای \bar{K}^0 و \bar{K}^- . شگفتی در فرایندهای زیر پایسته می ماند:

$$p + \pi^- \rightarrow \Sigma^0 + K^0$$

$$p + \pi^- \rightarrow \Lambda^- + K^-$$

در فرایند

$$p + \pi^- \rightarrow p + K^-$$

شگفتی پایسته نیست و این فرایند هیچگاه انجام نمی شود.

هرگاه ذره شگفتی به طور انفرادی فروپاشیده شود، شگفتی معمولاً پایسته نیست این ها نمونه های این فرایند ها هستند:

$$\Sigma^+ \rightarrow n + \pi^+$$

$$\Lambda^0 \rightarrow p + \pi^-$$

$$K^- \rightarrow \pi^+ + \pi^- + \pi^-$$

در هر یک از فروپاشی ها شگفتی اولیه $|s| = 1$ است و مقدار نهائی صفر است. تمام مشاهدات این ذرات به این نتیجه می انجامد که **شگفتی ها در برهم کنش های قوی پایسته اند ولی در برهم کنشهای ضعیف می توانند به اعداد صفر یا یک تغییر نمایند.** در فیزیک کلاسیک هیچ همسانی برای عدد کوانتومی شگفتی وجود ندارد.

احتیاط: شگفتی بر علیه اسپین

دقت کنید که سمبول S برای شگفتی را با نشانه بردار اسپین تکانه زاویه ای اشتباه نگیرید.

قوانین پایستگی Conservation Laws

فروپاشی ذرات شگفت، اولین نمونه یک **قانون پایستگی شرطی** هستند. که بعضی از برهم کنشها تابع آن هستند و بعضی دیگر نیستند. چندین قانون پایستگی وجود دارد که تمام برهم کنشها از آنها تبعیت می کنند. این قوانین عبارتند از قوانین پایستگی انرژی، تکانه، تکانه زاویه ای و بارهای الکتریکی. این قوانین، **قوانین پایستگی مطلق (absolute conservation laws)** نامیده می شوند. اعداد باریون و اعداد لپتون در تمامی برهم کنشها پایسته اند و شگفتی در برهم کنش های قوی و الکترو مغناطیسی پایسته است و در برهم کنشهای ضعیف پایسته نیست.

دو کمیت دیگر نیز هستند که در بعضی از واکنشها و نه در همه پایسته اند و در طبقه بندی ذرات و برهم کنش آنها مفیدند. یکی از آنها **ایزوسپین (Isospin)** است که در شرح استقلال بارو برهم کنش قوی آنها بکار می رود و دیگری **پاریته (parity)** است که رفتار نسبی دو دستگاه را که آئینه یکدیگرند مشخص می سازد. ایزوسپین در برهم کنش هایی قوی بار پایسته است که بار مستقل است اما نه در برهم کنشهای الکترومغناطیس و یا برهم کنش های ضعیف (برهم کنشهای الکترومغناطیس مسلماً مستقل از بار نیستند). پاریته نیز در برهم کنش های الکترومغناطیس و قوی پایسته است ولی در برهم کنش های ضعیف چنین نیست. دو فیزیکدانان امریکائی چینی تبار پروفیسور **تی-دی لی (T. D. Lee)** و **سی-ان-یانگ (C. N. Yang)** در سال 1957 به پاسداشت پیریزی پایه های نظری پایسته نبودن پاریته در برهم کنش های ضعیف جایزه نوبل گرفتند.

این بحث نشان می دهد که قوانین پایستگی در طبقه بندی برهم کنش ذرات پایه های مناسبی به شمار می آیند. هر یک از قوانین پایستگی هم چنین با یک خاصیت تقارن دستگاه همراه است. یک مثال آشنا تکانه زاویه ای است. چنانچه یک دستگاه در محیطی که دارای تقارن کروی است قرار بگیرد، هیچ گشتاوری بر آن عمل نمی کند زیرا که جهت بردار گشتاور نشان دهنده عدول از تقارن است. در چنین سیستمی در حالیکه قانون پایستگی نقض شده است، تکانه زاویه ای کل پایسته است. این نوع برهم کنش اغلب به نام **برهم کنش تقارن شکن (Symmetry-breaking interaction)** نامیده می شود.

آموخته های خود را از بخش 3-44 آزمایش کنید

از قانون پایستگی انرژی نتیجه می شود که یک ذره با جرم m و انرژی سکون mc^2 تنها زمانی فرو می پاشد که محصول فروپاشی دارای جرم کل کمتری از m باشد. (مابقی انرژی صرف انرژی جنبشی محصولات فروپاشی می گردد) آیا یک پروتون می تواند به مزونهایی با جرم کمتر فرو پاشد؟

پاسخ

تمامی مزون ها دارای عدد باریون هستند در حالیکه پروتون برای واپاشی یک پروتون به ذرات مزون لازم است که عدد باریون پایسته نباشد. باچنین تناقضی این فرایند هرگز مشاهده نشده است و لذا امکان واپاشی فرضی وجود ندارد.

4-44. کوارکها و راه هشت تابه Quarks and Eightfold way

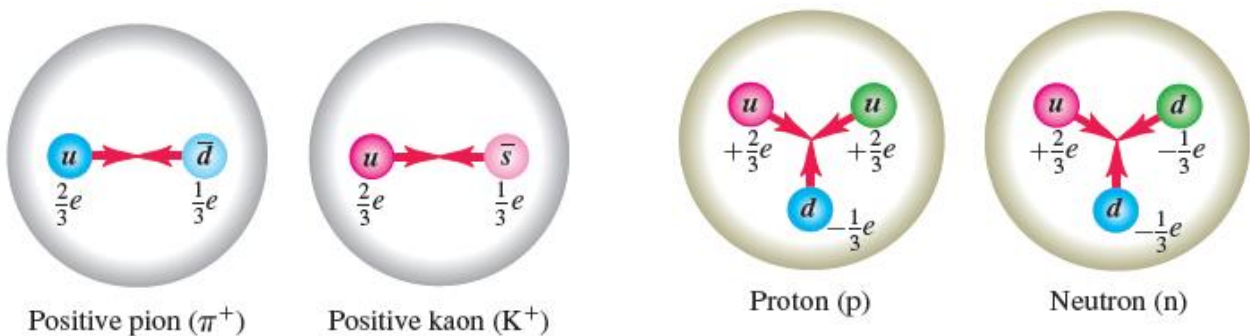
لپتون ها یک بسته نسبتا مرتب را تشکیل می دهند سه ذره و سه نوترینو، هر یک به همراه پادذره نظیر و یک قانون پایستگی که تعداد آنها را به هم ربط می دهند. فیزیک ثنائ معتقدند که لپتونها ذرات بنیادین واقعی اند. خانواده هادرون ها، در مقایسه مظهر بی نظمی اند. در جدول 3-44 فقط نمونه ای از تعداد کمی از 100 هادرون از سال 1960 تاکنون کشف گردیده است ثبت شده اند و روشن شده است که این ذرات بنیادی ترین ذرات تشکیل دهنده ماده نیستند.

تصورات زمان حال ما از ساختار هادرونها بر مبنای فرض پیشنهادی سال 1964 فیزیک دان آمریکائی مورای گلمان و همکاران وی است. در این فرضیه، هادرون ها ذرات بنیادی نیستند ولی مرکب از فرمیون هایی با اسپین 1/2 با نام کوارکها هستند. (این نام گذاری از کتابی با عنوان three quarks for master Mark نوشته جیمز جویس آمده است) هر باریون مرکب از سه کوارک (qqq) و هر پاد باریون از سه پاد کوارک (q̄q̄q̄) و هر مزون از ترکیب یک کوارک و یک پاد کوارک (q̄q) تشکیل شده اند. جدول 3-44 بخش قبلی محتوای کوارکی تعدادی از هادرونها را می دهد.

به نظر نمی رسد نوع دیگری از ترکیب لازم باشد. به موجب این طرح نیاز است که کوارک ها دارای بار الکتریکی با قدر مطلق 1/3، 2/3 بار الکتریکی e باشند که پیش از این فرض می شد کوچکترین واحد بار باشند. عدد باریون B نیز برای هر کوارک و پادکوارک به ترتیب 1/3 و -1/3 اند. یک مزون از ترکیب یک کوارک و یک پادکوارک با عدد باریون صفر حاصل می شود. چنانچه مولفه های تکانه زاویه ای اسپین کوارکها موازی و هم سو باشد مزونهای با اسپین 1 و اگر موازی و مخالف باشند مزونهای با اسپین صفر تشکیل می دهند. هر باریون نیز حاصل ترکیب سه کوارک با تکانه کل 1 است. اسپین باریون ممکن است 1/2 و یا 3/2 باشد.

سه کوارک اصلی The Three Original Quarks

بنابر نخستین نظریه کوارک در سال 1964 سه نوع کوارک (سه طعم flavors) با نشانه های u (بالا) و d (پائین) و s (شگفت) با خواص اصلی نشان داده شده در جدول 4-44 وجود دارند. پادکوارکهای نظیر \bar{u} و \bar{d} و \bar{s} و مقادیر بار Q و عدد باریون B و عدد شگفتی S در کوارکها و پادکوارک ها مخالف یکدیگر هستند. این کوارک ها در ساختار پروتون، نوترون، مزونهای π و K و چندین هیبرون شرکت دارند. بطور مثال پروتون از کوارکهای uud ساخته شده است. با بررسی جدول 4-44 می بینیم که مقادیر Q/e و نیز اندازه کل B مطابق انتظار برابر 1 است. ساختار نوترون از کوارکهای udd تشکیل میشود. که در آن Q = 0 و B = 1 است. مزون π^+ از کوارکهای u \bar{d} و با $\frac{Q}{e} = 1$ و B = 0 و مزون K^+ از $u\bar{s}$ تشکیل شده اند. با آزمون مقادیر شگفتی s محتوای کوارکی خواهیم دید که فوتون، نوترون و π^+ صفر و در k^+ برابر 1 یعنی موافق با داده های جدول 3-44 می باشند. پادپروتون $\bar{p} = \bar{u}\bar{u}\bar{d}$ و پیون منفی $\pi^- = \bar{u}d$ است و امثال ان محتوای کوارکی را می توان در شناخت خواص دینامیکی هادرون ها، نظیر حالت برانگیختگی و گشتاور مغناطیسی مورد استفاده قرار داد. شکل 4-44-10 محتوای کوارکی دو باریون و دو مزون را نشان میدهد.



شکل 4-44-10 محتوای کوارکی چهار هادرون مختلف. ترکیب رنگ های مختلف که برای مشخص کردن حثی بودن رنگ لازم است نشان داده نشده است.

Table 44.4 Properties of the Three Original Quarks

Symbol	Q/e	Spin	Baryon Number, B	Strangeness, S	Charm, C	Bottomness, B'	Topness, T
u	$\frac{2}{3}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{3}$	0	0	0	0
d	$-\frac{1}{3}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{3}$	0	0	0	0
s	$-\frac{1}{3}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{3}$	-1	0	0	0

مثال 44-7. محاسبه محتوای کوارکی باریون ها

اگر فقط محتوای کوارکی شامل $u, d, s, \bar{u}, \bar{d}$ و یا \bar{s} باشد، با استفاده از جدول 4-44 محتوای کوارکی دو ذره Σ^+ و $\bar{\Lambda}^0$ را پیدا کنید ذرات Σ^+ و Λ^0 هر دو باریون با شگفتی $S = -1$ هستند.

حل

از این ایده استفاده می کنیم که کل بار هر باریون برابر است با بارهای هر کوارک به تنهایی، بطور مشابه برای اعداد باریون و شگفتی. از داده های جدول 4-44 در مورد خصوصیات کوارک ها استفاده می کنیم.

محاسبه

باریون دارای سه محتوای کوارکی است. چنانچه $S = -1$ باشد دقیقاً یکی از این سه محتوا بایستی کوارک s باشد که دارای $S = -1$ و $Q/e = -1/3$ می باشد.

1) در Σ^+ داریم $Q/e = +1$ پس دو کوارک دیگر باید هر دو u باشند که محتوای کوارکی آنها برابر $Q/e = 2/3$ است. بنابراین محتوای کوارکی Σ^+ عبارت است از uus

2) ابتدا محتوای کوارکی Λ^0 را پیدا می کنیم. برای اینکه مجموع بار صفر باشد، دو محتوای کوارکی دیگر باید u با $Q/e = +2/3$ و d با $Q/e = -1/3$ باشند بنابراین محتوای کوارکی Λ^0 ، uds می شود و از آنجا نتیجه می گیریم که محتوای کوارکی $\bar{\Lambda}^0$ برابر است با $\bar{u}\bar{d}\bar{s}$

ارزیابی

گرچه هر دو ذره Λ^0 و $\bar{\Lambda}^0$ هر دو خنثی و ناری جرم یکسان هستند ولی با هم متفاوت اند. در Λ^0 داریم $S = 1, B = -1$ درحالیکه برعکس برای $\bar{\Lambda}^0$ داریم $S = 1, B = -1$

برانگیختن کوارک ها Motivating the Quark Model

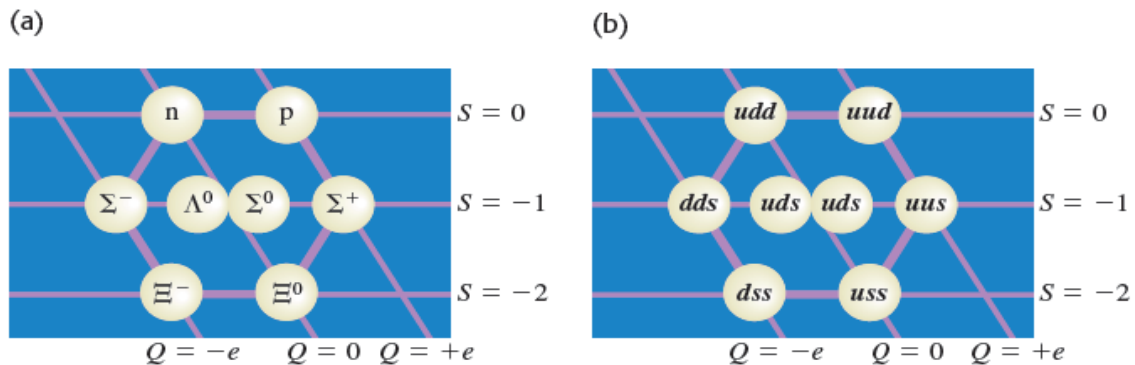
چه چیزی باعث گردید که فیزیک دانان به این نتیجه برسند که هادرون ها را ترکیبی از ذرات کوچکتر بدانند؟ اولین دلیل وجود گشتاور مغناطیسی نوترون (بخش 1-43) بود. در بخش (7-27) اموختیم که یک گشتاور مغناطیسی در نتیجه جریانات دوار (جنبش بار الکتریکی) است. اما نوترون فاقد بار الکتریکی است و به بیان دیگر دارای بارکل الکتریکی صفر است، پس می تواند از ذرات ریزتری تشکیل شده باشد که مجموعه بار الکتریکی آنها صفر است. جنبش کوانتمی این ذرات ریز تردرون نوترون می تواند این نتیجه شگفت اور را ایجاد نماید که گشتاور مغناطیسی آنها صفر نیست. برای تحقیق درباره این فرضیه ما (با دیدن) به یک ردیاب نیاز داریم که طول موج ان اندازه ای بسیار کوچکتر از نوترون(در حدود چند فمتومتر) باشد و این ردیاب نبایستی تحت تاثیر برهم کنش های قوی قرار گیرد و با نوترون برهم کنش داشته باشد، ولی باید بتواند به داخل نوترون نفوذ کرده و بر ذرات باردار فرضی داخل نوترون برهم کنش داشته باشد. چنین ردیابی با این خصوصیات، یک ذره الکترون است که دارای انرژی 10GeV باشد. یک آزمایش در SLAC به عمل آمد که چنین الکترونیهای از نوترون و پروتون پراکنده شدند تا نشان دهند که برآستی نوکلئون ها از چنین ذرات نقطه ای با بار کسری و اسپین 1/2 تشکیل شده اند.

راه هشت تاییه The Eightfold Way

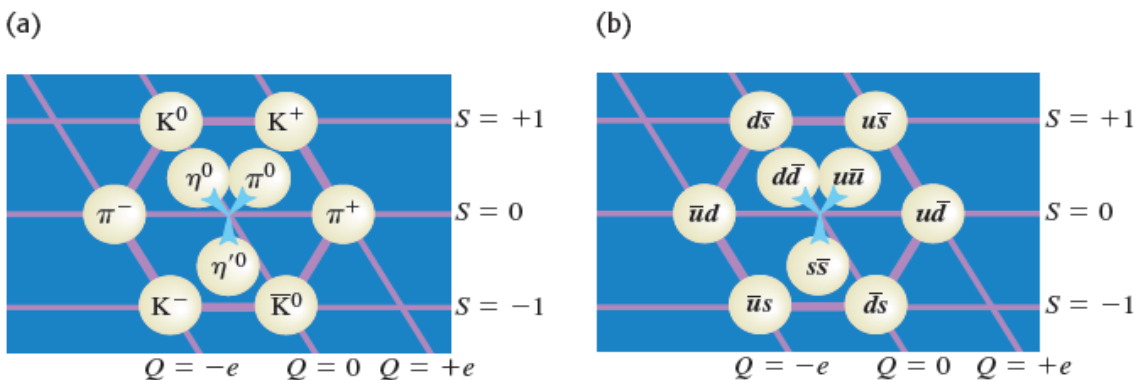
ملاحظات تقارنی نقش مهمی در نظریه ذرات دارند. برای نشان دادن این نقش دو مثال ذکر می کنیم. هشت باریون با اسپین 1/2 را که در جدول 3-44 به آنها اشاره کردیم یعنی ذرات آشنای پروتون و نوترون و چهار ذره شگفت شامل $\Sigma^+, \Sigma^0, \Sigma^-, \Lambda^0$ و دو ذره با شگفتی مضاعف Ξ^0, Ξ^- و $\bar{\Xi}^-$ را در نظر بگیرید. برای هر یک از این ذرات مامقادیبر شگفت S را در مقابل بار الکتریکی Q در شکل 11-44 ترسیم کرده ایم.

در نتیجه یک شش ضلعی منتظم حاصل شده است(قسمت اول خود ذرات و قسمت دوم محتوای کوارکی آنها را نشان می دهد) رسم مشابهی برای 9 مزون با اسپین صفر (شش تایی آنها در جدول 12-44 نشان داده شده اند و سه تایی دیگر ثبت نشده اند) در شکل 12-44 ترسیم شده اند ذرات بطور کامل به صورت شش گوش منتظمیدر این اشکال به دست آمده اند. در هر یک از گستره ها اختلاف جرم تمام ذرات واقع در

گوشه ها با ذره های وسط در گستره $\pm 200 MeV/c^2$ است. این اختلاف به تفاوت جرم کوآرکها و تفاوت انرژی پتانسیل درونی مربوط می شود.



شکل 44-11 (a) ترسیم مقادیر S و Q برای باریون های با اسپین $\frac{1}{2}$ تقارن راه هشت تایه را نشان میدهد. (b) محتوای کوآرکی هر باریون با اسپین $1/2$. محتوای کوآرکی Σ^0 و Λ^0 یکسان اند و Σ^0 حالت برانگیخته ای از Λ^0 است و می تواند با گسیل یک فوتون γ فروپاشد.



شکل 44-12 (a) ترسیم مقادیر S و Q برای 9 مزون با اسپین صفر تقارن هشت راهه را نشان میدهد. هر ذره در جهت مخالف فرم شش وجهی پادذره خود قرار دارد. هر یک از سه ذره در مرکز پادذره خود است. (b) محتوای کوآرکی هر یک از مزون ها با اسپین صفر. ذرات در مرکز دارای اختلاطی متفاوت از سه جفت کوآرک و پادکوآرک نشان داده شده هستند.

تقارنی که به این طرح های مشابه می انجامد **راه هشت تایه eightfold way** نامیده می شود. این ها بوسیله مورای گل-مان Murray Gell-Mann و بطور مستقل از او بوسیله یووال نومان Yu'val Ne'eman در 1961 کشف گردیدند. (این نام برگرفته از راه هشت تایه مقدس است که اصول زندگی درست بودایی بر پایه آنها استوار است) نقشی مشابه برای باریون های با اسپین $3/2$ حاوی ده ذره است، که در یک مثلث متساوی الاضلاع قرار گرفته اند. اولین بار که این طرح کشف شد یکی از ذرات ناشناخته بود و به هر حال گامان آن را Ω^- نامید. با پیش بینی خواص آن چه که محققان بایستی در پی آن باشند مشخص کرد. سه سال بعد طی آزمایشی در آزمایشگاه ملی بروک هاون این ذره نیز کشف و نظریه گل-مان اثبات گردید. مجموعه این حوادث به راهی شباهت داشت که مندیلف در حین تنظیم جدول تناوبی عناصر پیمود و جای عناصر ناشناخته را خالی گذاشت تا دیگر شیمی دانان آنها را پر کنند.

چه چیزی کوآرکها را به هم متصل می سازد؟ ذره واسطه برهم کنش جاذبه ای بین کوآرکها یک بوزون با اسپین 1 و جرم صفر است موسوم به **گلوئون gluons**. مشابه فوتون که ذره واسطه در برهم کنش نوکلئون - نوکلئون در نظریه قدیمی یوکاواست.

رنگ color

کوآرکها، با داشتن اسپین $1/2$ فرمیون هستند و بنابراین تابع اصل طردند. بنظر می رسد که همین موضوع مانع از آن است که یک باریون با داشتن 2 یا 3 کوآرک دارای طعم و مولفه اسپین یکسان باشند برای اجتناب از این مشکل، فرض بر این است که هر کوآرک دارای سه نوع متمایز (یا سه رنگ متمایز) هستند. قرمز، سبز و آبی رنگ های انتخاب شده معمولی هستند. خصوصیات طرد بطور جداگانه به هر رنگ اعمال می گردد. یک باریون معمولاً دارای یک کوآرک قرمز، سبز و آبی هست. بنابراین خود باریون رنگ فاقد رنگ است. هر گلوئون ترکیبی از یک رنگ. یک پادرنک است (بطور مثال آبی-پادقرمز) که اجازه انتقال رنگ در حین تغییر را میدهد. و این رنگ در هنگام گسیل و یا جذب

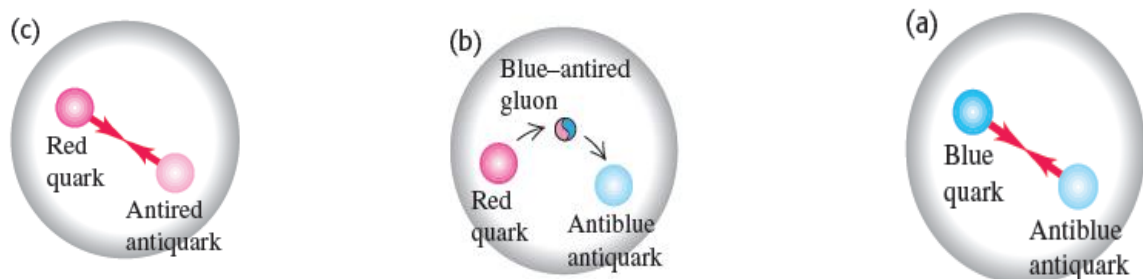
گلوئون توسط کوارک پایسته است. فرایند تغییر گلوئون طوری است که همیشه یک کوارک از هر رنگ در هر باریون موجود است. رنگ یک کوارک منفرد هنگام مبادله گلوئون بطور دائم تغییر می کند.

فرایند مشابهی در مزونها، نظیر پیون ها انجام می شود. جفت کوارک-پادکوارک مزونها دارای رنگ خنثی کننده یکدیگرند (مثلا آبی-پاد آبی)، لذا مزون ها نیز مانند کوارکها رنگ مشخصی ندارند. فرض کنید یک پیون در حالت اولیه دارای یک کوارک آبی و یک پاد کوارک پاد آبی باشد. کوارک آبی می تواند با گسیل یک گلوئون آبی-پاد سرخ مجازی به کوارک سرخ تبدیل شود. سپس گلوئون جذب پادکوارک آبی شده ان را به پادکوارک پاد سرخ تبدیل می کند. (شکل 44-13). رنگ در هر یک از گسیل و جذب پایسته است اما یک جفت آبی-پاد آبی تبدیل به یک جفت سرخ-پاد سرخ تبدیل شده است.

این نوع تغییرات پیوسته در حال وقوع است. لذا باید پیونی را تصور کنیم که یک انطباق سه حالت کوانتم یعنی تبدیل آبی-پاد آبی، سبز-پاد سبز و سرخ-پاد سرخ در ان صورت می گیرد. در بخش 44-4 در یک مقیاس

بزرگ، برهم کنش قوی بین نوکلئون ها به صورت مبادله مزون های مجازی بیان شد. اما بر پایه مفهوم کوارک ها و گلوئون ها مزون های مجازی واسطه مذکور، همین دستگاه های کوارک-پاد کوارک اند که با مبادله گلوئون ها به هم پیوند یافته اند.

نتوری برهم کنش های قوی بنام کوانتم کرومودینامیک (QCD) quantum chromo dynamics نامیده می شود. تاکنون کسی موفق به منفرد کردن یک کوارک مجرد نشده است پدیده هائی که اساس نظریه های QCD را تشکیل می دهند، دستیابی به کوارک آزاد را غیر ممکن نشان می دهند. شواهد قانع کننده متعددی در تائید درستی ساختار کوارکی و اینکه نظریه کوانتم کرومودینامیک کلید فهم برهم کنش های قوی است بدست آمده است



شکل 44-13. (a) یک پیون حاوی یک کوارک آبی و یک پادکوارک پاد آبی است. (b) کوارک آبی یک گلوئون آبی-پاد سرخ گسیل می کند و به کوارک سرخ تبدیل می شود. (c) کوارک سرخ بوسیله یک پاد کوارک پاد آبی جذب می شود و تبدیل به پاد کوارک پاد سرخ می شود. اینک پیون شامل یک جفت کوارک-پادکوارک سرخ-پاد سرخ است. حالت کوانتمی واقعی پیون سه برهم نهی یکسان سرخ-پاد سرخ، سبز-پاد سبز و آبی-پاد آبی است.

سه کوارک دیگر Three More Quarks

پیش از آنکه ذرات ناو کشف گردند، فقط چهار لپتون شناسائی شده بودند. این واقعیت، وبعلاوه تعدادی فروپاشی حیرت انگیز این فکر را برانگیخت که امکان دارد طعم کوارک چهارمی نیز وجود داشته باشد. این کوارک را با نام **افسون شده charmed** نامگذاری کردند و با c نشان میدهند. در این کوارک $Q/e = 2/3$ و $B = 1/3$ و $S = 0$ و عدد کوانتمی جدید **افسون charm** $C = +1$ است. در هر دو مرکز SLAC و آزمایشگاه ملی بروک هاون در 1974 با مشاهده یک مزون با جرم $3097 \text{ MeV}/c^2$ که اکنون ψ نامیده می شود، صحت این نظر تائید شد. معلوم گردید که این مزون چندین مدل فروپاشی دارد و به e^+e^- و $\mu^+\mu^-$ و هادرون ها فرو می پاشد. عمر میانگین ان حدودا 10^{-20} s بر آورد شد.

این نتایج نشان دادند که مزون ψ با دستگاه $c\bar{c}$ با اسپین 1 مطابقت دارد. تقریبا بلافاصله بعد از این، مزونهائی با جرم های بیشتر به صورت حالت برانگیخته $c\bar{c}$ نیز مشاهده شدند. چند سال بعد مزون های منفردی شناسائی شدند که عدد کوانتمی افسون انها مخالف صفر بود. $D^0 (c\bar{u})$ و $D^+ (c\bar{d})$ و یک باریون افسون شده $\Lambda^0 (udc)$ مشاهده شدند.

در سال 1977 در بروک هاون یک مزون دیگر با جرم $9460 \text{ MeV}/c^2$ بنام اسپیلیون Y کشف شد. از آنجا که این مزون خصوصیات شبیه به ψ داشت، حدس زده شده که این مزون باید از پیوند یک کوارک جدید b (کوارک پائین) با پادکوارک ته (\bar{b}) آن تشکیل شده باشد. کوارک پائین دارای عدد کوانتمی جدید B' موسوم به پائینی برابر 1 است (با B عدد باریون اشتباه نشود) بزودی با مشاهده حالت برانگیخته Y، وجود مزون های برانگیخته $B^0 (b\bar{d})$ و $B^+ (b\bar{u})$ محقق شد.

با پنج چاشنی کوارک (b, c, s, d, u) و شش چاشنی ($\nu_\mu, \nu_\tau, \nu_e, \tau, \mu, e$) این گمان تقویت شد که سنگ بنای اولیه طبیعت باید متقارن بوده و در نتیجه باید یک کوارک ششمی نیز وجود داشته باشد. در این کوارک که به آن برچسب t (حرف اول top به معنی بالا) زده اند، $Q/e=2/3$ و $B=1/3$ و عدد کوانتمی جدید T=1 است. در سال 1955 گروههائی که از دو آشکارساز متفاوت در تواترون فرمی لب استفاده می کردند، کشف کوارک بالا را اعلان کردند. این گروه ها پروتون هائی را با 0.9 TeV با پادپروتون های 0.9 TeV برخورد دادند. اما حتی با 1.8 TeV

انرژی قابل دسترس جفت نوک-پادنوک $t\bar{t}$ به میزان کمتر از 2 در 10^{11} برخورد نیز آشکار گردیدند. جدول 44-5 تعدادی از خصوصیات این شش کوارک ثبت شده اند. هر یک از آنها دارای پاد کوارک با اعدادی قرینه Q, B, S, C, T, B' یک دیگر هستند.

Table 44.5 Properties of the Six Quarks

Symbol	Q/e	Spin	Baryon Number, B	Strangeness, S	Charm, C	Bottomness, B'	Topness, T
u	$\frac{2}{3}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{3}$	0	0	0	0
d	$-\frac{1}{3}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{3}$	0	0	0	0
s	$-\frac{1}{3}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{3}$	-1	0	0	0
c	$\frac{2}{3}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{3}$	0	+1	0	0
b	$-\frac{1}{3}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{3}$	0	0	+1	0
t	$\frac{2}{3}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{3}$	0	0	0	+1

آموخته های خود را از بخش 4-44 آزمایش کنید.

آیا امکان وجود باریونی با بار $Q = +e$ و شگفت $S = -2$ هست؟

پاسخ

خیر فقط کوارک s دارای $S = -1$ و شگفت غیر صفر است. برای یک باریونی که دارای $S = -2$ باشد، بایستی دارای دو کوارک s و یک کوارک با طعم متفاوت بود. از آنجائی که هر کوارک S دارای بار $-\frac{1}{3}e$ ، کوارک غیر شگفت بایستی دارای بار $+\frac{5}{3}e$ باشد تا اینکه مجموع بار برابر $+e$ گردد. اما هیچ کوارکی دارای بار $+\frac{5}{3}e$ نیست و بنابراین امکان تولید چنین باریون فرضی غیر ممکن است.

5-44. مدل استاندارد و فراسوی آن The Standard Model and Beyond

ذرات مورد بحث در این فصل و بر هم کنشهای آن ها، تصویر نسبتاً جامعی از اجزای بنیادی طبیعت را در اختیار می گذارد. صحت اساس این تصویر بنیادی، که **مدل استاندارد standard Model** نامیده شده است، به قدر کافی، مورد اعتماد است.

مدل استاندارد به سه گروه ذره شامل می شود: (1) شش لپتون که بر هم کنش قوی ندارند. (2) شش کوارک که تمامی هادرون ها از آنها ساخته شده اند (3) ذرات واسطه برهم کنش های مختلف را سبب می گردند. این واسطه ها عبارتند از: گلوئون ها در بر هم کنش قوی بین کوارکها، فوتون ها در برهم کنش الکترومغناطیسی، W^\pm و Z^0 و گرایون در بر هم کنش گرانشی.

وحدت الکترو ضعیف Electroweak Unification

فیزیک نظری زمان ذرایی را در رویای ترکیب بر هم کنشهای طبیعی و بیان آنها به صورت یک نظریه واحد گذرانیده است. در اولین گام اینشتین بخش بزرگی از آخرین روزهای زندگی خود را صرف تکمیل یک نظریه میدان کرد تا میدانهای الکترو مغناطیسی و گرانش را وحدت بخشد و در این زمینه فقط به موفقیت نسبی و نه کامل دست یافت.

بین سالهای 1961 تا 1967 شلدون گلاشو، عبدالسلام، و استیون وین برگ نظریه ای را بنیان نهادند که نیرو های الکترو مغناطیسی و ضعیف را وحدت بخشید. یکی از دستاوردهای این نظریه موسوم به **نظریه الکترو ضعیف** پیش بینی وجود W^\pm و Z^0 بوزون های واسطه نیروهای ضعیف و نیز جرم آنها بود. اساس نظریه بر این استوار است که اختلاف جرم بین فوتون (با جرم صفر) و بوزون ضعیف ($\approx 100 GeV/c^2$) باعث می شود که رفتار دو نوع بر هم کنش الکترومغناطیسی و ضعیف در انرژی های پائین، به طرز فاحشی با هم اختلاف داشته باشند. به هر حال در انرژی های بالا (به قدر کافی بالاتر از 100 GeV) این اختلاف محو گردیده، و دو واکنش در هم ادغام و به یک برهم کنش تبدیل می شود.

این پیشگویی در سال 1983 طی آزمایشی در CERN که در سال 1983 توسط یک گروه بر روی برخورد پروتون-پادپروتون انجام شد به اثبات رسید. بوزون های ضعیف باز هم به دنبال ارائه یک نظریه کشف شدند و جرم های مشاهده شده آنها با پیش بینی الکتروضعیف مطابقت داشت نظریه الکتروضعیف و کرومودینامیک کوانتمی با هم شالوده مدل استاندارد را پی ریزی کردند و به واسطه آن جایزه نوبل در سال 1979 به گلاشو، عبدالسلام و وین برگ اعطا شد.

تنها مشکل بر جای مانده در تئوری الکترو ضعیف این است که فوتون ها بی وزن اند ولی بوزون های ضعیف بسار سنگین هستند به منظور جبران این عدم تقارن این ذرات واسطه بر هم کنش، ذره ای موسوم به هیگس Higgs با جرم بالغ بر $1 TeV/c^2$ پیشنهاد شده است. اما تولید این ذره در آزمایشگاه نیازمند انرژی قابل وصول بیشتر از این است. بخشی از مأموریت برخورد دهنده هادرون های بزرگ در CERN جستجو برای تولید ذره هیگس است.

نظریه وحدت بزرگ Grand Unified Theories

شاید در انرژی های بسیار بالا بر هم کنش های قوی و الکترو ضعیف به یک همگرایی، نظیر آنچه که بین برهم کنش های ضعیف و الکترو مغناطیسی وجود دارد برسند. اگر چنین شود، می توان بین این سه بر هم کنش یک نظریه جامع برهم کنش های ضعیف، قوی و الکترومغناطیسی بوجود آورد. چنین طرحی که بنام **نظریه وحدت بزرگ** خوانده می شود فعلا در تصور وجود دارد.

یکی از وجوه جالب نظریه و این است که واپاشی پروتون با طول عمر تخمینی 10^{28} سال را پیش بینی می کنند (که در تضاد با پایداری عدد باریون است) (برای مقایسه کافی است بدانید که طول عمر جهان هستی در حدود 1.37×10^{10} سال برآورد شده است). با 10^{28} سال حجم عظیم شش تن پروتون باید انتظار داشت آنها یک واپاشی در روز داشته باشد. آزمون چنین حجم بزرگی از پروتون دور از حد انتظار است. بعضی از آشکار ساز های نوترینو که در بخش 44-2 توضیح دادیم کارشان به منظور مشاهده فروپاشی پروتون است که تاکنون ناموفق بوده اند. با این وجود، آزمایشات همچنان ادامه دارد، در حال حاضر عمر پروتون را 10^{33} پیش بینی کرده اند. بعضی از نظریه های وحدت بزرگ، وجود تک قطبی مغناطیسی (مذکور در فصل 27) را پیش بینی می کنند. در حال حاضر هیچ گونه آزمایشی وجود آن را تایید نکرده است

در مدل استاندارد، جرم نوترینو صفر فرض شده است. فرض جرم غیر صفر برای نوترینو جدال بر انگیز است برای اینکه انجام آزمایش برای اعیان جرم و نیز تجزیه و تحلیل آن کار بسیار مشکلی است. در اغلب نظریه های وحدت بزرگ، نوترینو بایستی جرم ناصفر باشد. چنانچه نوترینو ها دارای جرم باشند، بایستی انتقالی بنام **نوسان نوترینو** (*neutrino Oscillation*) یعنی تبدیل یکی از انواع نوترینو ها (ν_e, ν_μ, ν_τ) به دیگری بوقوع پیوندند. اما آزمایشهای انجام شده تاکنون چنین موردی را تایید نکرده اند.

در 1998، دانشمندان با استفاده از آشکار ساز سوپر-کامیوکانده در ژاپن (شکل 44-14) از کشف نوسان بین نوترینو های موئون و نوترینو های تاوخیبر دادند. اندازه گیری های ثانویه در رصد خانه نوترینو سودبری (Sudbury neutrino observatory) در کانادا موجودیت نوسان نوترینو را تایید کردند. این کشف رویدادی مهیج در دنیای فیزیک و ماورای پیش بینی های مدل استاندارد است.

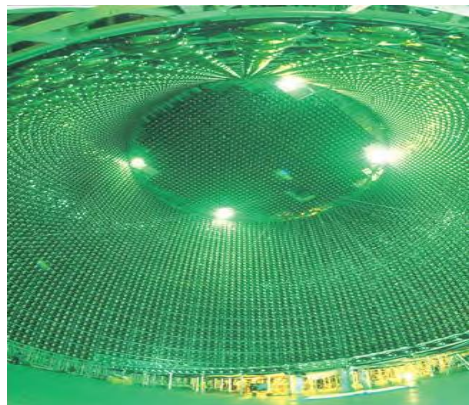
کشف نوسان های نوترینو. رمز و راز کهن در باره خورشید را شفاف ساخت. از سال 1960 فیزیک دانان با استفاده از آشکار ساز های بسیار حساس به دنبال مشاهده نوترینوی الکترون تولید شده بوسیله واکنش های گداخت هسته ای در هسته خورشید بوده اند (بخش 43-8) بهر حال، شار مشاهده شده در میزان نوترینوی الکترون فقط یک سوم میزان پیش بینی شده است. توجهات لازم در سال 2002 بوسیله رصد خانه نوترینوی سودبری کانادا ارائه گردید که در آن نوترینو های هر سه طعم می توانند آشکار گردند.

این نتایج نشان داد که شار ترکیبی نوترینوی خورشیدی تمامی طعم ها از نظر تئوری برابر شار مورد انتظار نوترینوی الکترون است. توضیح اینکه خورشید برآستی نوترینوی الکترون تولیدی در حد و اندازه مقدار پیش بینی شده است، لیکن در طی مسیر از هسته خورشید تا آشکار ساز های روی زمین فقط دو سوم آنها به نوترینو های موئون و تاو تبدیل می شوند.

نظریه های فوق تقارن و نظریه همه چیز Super symmetric and TOES

روبای غائی نظریه پردازان این است که تمامی برهم کنش های اساسی را با افزودن نیروی گرانشی به برهم کنش های ضعیف و قوی و الکترومغناطیسی در نظریه GUT وحدت بخشند. چنین وحدت بخشی با نام غریب **نظریه همه چیز** (*Theory of Everything*) خوانده می شود. روشن است که عنصر سازنده این تئوری ها یک گستره فضا-زمان با بیش از چهار بعد است که شامل «رویم انباشتن» در داخل سازه های بسیار ریز است که ما معمولا به آنها توجه نمی کنیم. بسته به مقیاس این سازه ها، امکان دارد برای نسل بعدی شتاب دهنده های ذرات وجود فوق ابعاد ها آشکار گردد.

عنصر سازنده دیگر بسیاری از تئوری ها عبارت از **فوق تقارن** (*super symmetry*) است که به هر ذره بوزون و فرمیون یک «فوق همراه» با نوع دیگری از اسپین است. برای مثال همراه فوق تقارن پیشنهادی اسپین 1/2 الکترون ذره ای با اسپین صفر است با نام **سلکترون** (*Selectron*) و برای فوتون با اسپین 1- فوتینو *photino* نام دارد. تا به حال هیچ یک از ذرات فوق همراه کشف نگردیده اند شاید بدیل اینکه تولید چنین ذرات سنگینی با نسل فعل شتابگر ها امکان پذیر نیست. در خلال چند سال آینده، داده های جدید اخذ شده از برخورد دهنده هادرون بزرگ و دیگر شتابگر ها به ما در اتخاذ تصمیم اینکه کدام فرضیه شایسته تر است کمک کند.



شکل 44-14. این عکس، بخش درونی آشکار ساز نوترینوی سوپر-کامیو کاند در ژاپن را نشان میدهد، در هنگامکار دستگاه را با 5×10^7 کیلوگرم آب پر می کنند یک نوترینو در زمان عبور از این دستگاه تولید چشمکی از نور می کند که با 13000 لوله تقویت کننده تعبیه شده در دیوار دستگاه تقویت می شود و اطلاعات ارائه شده توسط این آشکار ساز برای اولین بار نشان دادند که نوترینو ها دارای جرم هستند

آموخته های خود را از بخش 44-5 آزمایش کنید

یکی از وجوه مدل استاندارد این است که یک کوارک نوع d بوسیله برهم کنش ضعیف می تواند به یک کوارک u ، یک الکترون و یک پادنوترینو تبدیل گردد. اگر این اتفاق درون کوارک d یک نوترینورخ دهد، چه نوع ذره ای پس از اضافه شدن الکترون و پادنوترینو باقی می ماند؟ (1) یک پروتون (2) یک Σ^- (3) یک Σ^+ (4) یک Λ^0 یا یک Σ^0 (5) هر یک از این ذرات

اگر یک کوارک d در یک نوترون (کوارک شامل udd) طی فرایند $d \rightarrow u + e^- + \bar{\nu}_e$ فروپاشد، باریون باقی مانده حاوی uud است و بنابراین این ذره باقی مانده یک پروتون (شکل 44-11) خواهد بود. یک الکترون به طور مشابه به عنوان یک ذره β^- است بنابراین نتیجه نهایی واپاشی بنای منفی $n \rightarrow p + \beta^- + \bar{\nu}_e$ خواهد بود

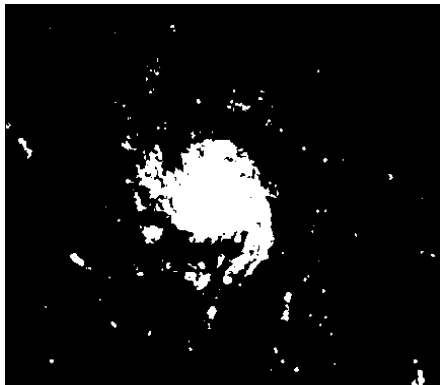
6-44. جهان در حال گسترش The Expanding Universe

در دو بخش آخر این فصل به طور اختصار ارتباط بین تاریخ آغازین جهان و برهم کنش های موجود بین ذرات را بررسی می کنیم. قابل توجه است که چنین ارتباط نزدیکی بین فیزیک در کوچکترین مقیاس مکتشف که به طریق تجربی به آن دست یافته اند (با ابعادی در گستره بر هم کنش ضعیف یعنی $10^{-18}m$) با فیزیک در بزرگترین مقیاس (خود جهان هستی با ابعاد حدود $10^{26}m$) وجود داشته باشد.

شکل 44-15 (a) کهکشان M101 یکی از بزرگترین مجموعه های راه شیری که منظومه شمسی نیز جزء آن است. نظیر دیگر کهکشانها، M101 نیز جاذبه گرانشی متقابل ستارگان، گازها، گرد و غبار و دیگر مواد به هم بر آمده است. تمامی این مواد بر حول مرکز جرم کهکشان می چرخند. پهناوری M101 25 میلیون سال نوری است.



(b) این تصویری از یک ستاره دنباله دار است. مجموعه ای عظیم که شامل بیش از 1000 کهکشان بوده و 300 میلیون سال نوری از ما فاصله دارد. تمامی کهکشان های این ستاره دنباله دار در حال حرکت هستند و نیروی گرانشی بین اجزاء این مجموعه مانع از فرار کهکشان ها گردیده است.



بر هم کنش های گرانشی در رفتار بزرگ مقیاس جهان نقشی اساسی ایفا می نمایند. یکی از موفقیت های بزرگ مکانیک نیوتونی (شامل قانون گرانش) درک چگونگی حرکت سیارات در منظومه شمسی بود. اما شواهد نجومی نشان میدهند که نیروهای گرانشی بر مجموعه بزرگ نجومی شامل ستارگان کهکشانها و سحابی ها نیز حاکم اند. (شکل 44-15)

تا اوایل قرن بیستم بر این باور بودند که جهان ایستا است. ستاره ها ممکن است نسبت به هم حرکت کنند اما این تفکر که در جهان تراکم یا انبساط کلی رخ می دهد مطرح نبود اگر از ابتدا هر جرمی در جای مشخصی قرار گرفته است پس چرا گرانش با جذب آنها به یکدیگر همه را به توده انبوه بزرگی تبدیل نکرده؟ نیوتون خود نیز به این پرسش مشکل افزین واقف بود.

اندازه گیری هائی را که در 1912 وستو اسلیفر Vesto Slipher در رصد خانه لاول در آریزونا آغاز کرد، توسط ادوین هابل Edvin Hubble و کمک میلتون هوماسون Milton Humason در بالهای 1920 در مونت ولسون کالیفرنیا ادامه یافت. این اندازه گیری ها نشان

دادند که جهان ایستا نیست. حرکت کهکشان ها نسبت به زمین را می توان با مشاهده جابجائی طول موج های طیف منتشر از کهکشان ها اندازه گرفت. برای کهکشان های دورتر این سمت گیری همواره به طرف طول موج های بلندتر است لذا به نظر می رسد این کهکشانها نسبت به و نیز از یکدیگر دور و دورتر می شوند. منجمان در آغاز تصور می کردند که این جابجائی ها همان جابجائی داپلر هستند و از رابطه بین λ_0 (طول موج نوگسلی از یک چشمه که با تندی v از ناظر دور می شود) و λ_s (طول موج نور در دستگاه مرجع ساکن نسبت به چشمه) استفاده کردند. با تغییر زیر نویس و استفاده از رابطه $\lambda = c/f$ در دستگاه صورت و ارون شده رابطه (25-37) برای اثر دوپلر نتیجه می شود که:

$$(13-44) \lambda_0 = \lambda_s \sqrt{\frac{c+v}{c-v}}$$

طول موجهای گسیل شده از چشمه دورشونده همواره بطرف طول موجهای بلندتر است؛ این افزایش λ را انتقال به سرخ RedShift می نامند. می توانیم با حل معادله 13-44 برای v بدست آوریم:

$$v = \frac{\left(\frac{\lambda_0}{\lambda_s}\right)^2 - 1}{\left(\frac{\lambda_0}{\lambda_s}\right)^2 + 1} * c \quad (14-44)$$

احتیاط: انتقال به سرخ اثر دوپلر نیست: معادلات 13-44 و 14-44 از تئوری ویژه نسبیت نتیجه می شوند و به اثر دوپلر ارجاع داده می شوند. بعدا خواهیم دید که انتقال به سرخ برای کهکشان های دور نتیجه تأثیری است که از تئوری نسبیت عام نتیجه می شوند و جابجائی دوپلر نیستند. به هر حال هرگاه نسبت v/c و نسبت طول موج تغییرات $(\lambda_0 - \lambda_s)/\lambda_s$ کوچک گردند، معادلات نسبیت عام به سوی روابط 13-44 و 14-44 خواهند رفت و این معادلات را می توان بکاربرد.

مثال 8-44 تندی دور شدن یک کهکشان

خطوط طیف عناصر شیمیائی مختلف موجود در نور منتشر از یک کهکشان واقع در صورت فلکی دب اکبر را بررسی کرده اند. طیف فرابنفش منتشر از کلسیم یک بار یونیده (که در آزمایشگاه برابر $\lambda_s = 393nm$ است) برابر $\lambda_0 = 414nm$ مشاهده است. به این ترتیب یک موج فرابنفش با انتقال بهسرخ به درون طیف مرئی انتقال یافته است. تندی دور شدن کهکشان از زمین چقدر است؟

حل:

این مثال رابطه بین انتقال به سرخ و سرعت دور شدن یک کهکشان دور را نشان می دهد. می توانیم از طول موج های λ_s که در آن نور گسیل می شود و λ_0 که بر روی زمین دریافت می شود را برای محاسبه سرعت دور شدن v استفاده می کنیم. (در جایی که نسبت طول موج انتقالی زیاد بزرگ نباشد)

محاسبه انتقال به سرخ نشان می دهد که $\lambda_0/\lambda_s = 414nm/393nm = 1.053$ را حساب می کنیم. چون میزان افزایش فقط 5.3% است پس می توانیم از معادله 14-44 استفاده کنیم با دقت قابل توجهی خواهیم داشت:

$$v = \frac{(1.053)^2 - 1}{(1.053)^2 + 1} * c = 1.55 \times 10^7 \text{ m/s}$$

ارزیابی

این کهکشان با سرعت 5.16% سرعت سیر نور از زمین دور می شود. با تعمق بیشتر منجمین اغلب اذعان می دارند که انتقال سرخ برابر است با

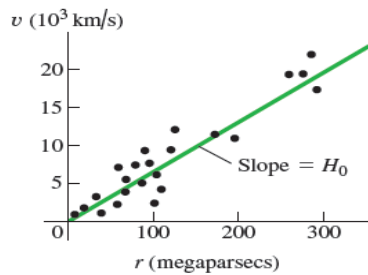
$$z = \frac{(\lambda_0 - \lambda_s)}{\lambda_s} = \left(\frac{\lambda_0}{\lambda_s}\right) - 1$$

انتقال به سرخ این کهکشان برابر است با $z = 0.053$

قانون هابل The Hubble Law

بررسی انتقال به سرخ بسیاری از کهکشان های دور ادوین هابل را به نتیجه گیری قابل توجهی رهنمون ساخت ، سرعت v دور شدن یک کهکشان متناسب با فاصله r از زمین است. (شکل 16-44) این ارتباط اینک به نام قانون هابل معروف است و به شکل رابطه زیر بیان می گردد.

$$v = H_0 * r \quad (15-44)$$



شکل 44-16 نمودار سرعت دور شدن به صورت فاصله چندین کهکشان را نشان می دهد. مناسب ترین خط راست منطبق بر این تغییرات نشان دهنده رابطه هابل است و شیب این خط مستقیم برابر ثابت هابل H_0 است.

که در آن H_0 کمیتی تجربی موسوم به ثابت هابل Hubble Constant است. زیرا مقدار آن در هر زمان دلخواه ثابت است. تعیین H_0 مقدار یکی از اهداف کلیدی تلسکوپ فضایی هابل است که قادر به اندازه گیری فواصل کهکشانی، با نامعلوم بودن میزان دقت است. بهترین مقدار این ثابت در حال حاضر باریب $2.3 \times 10^{-18} s$ با عدم قطعیت 5% است.

فواصل نجومی را معمولاً بر حسب پارسک (**parsec**(pc)) اندازه گیری می کنند. یک پارسک فاصله نجومی است که در آن یک کمان یک ثانیه (برابر $1/3600^\circ$) زاویه جدائی بین دو شی $1.50 \times 10^{11} m$ است (فاصله متوسط زمین از خورشید) فاصله یک پارسک برابر است با 3.26 سال نوری و یک سال نوری برابر است با

$$1ly = 9.46 \times 10^{12} km$$

و این مسافتی است که نور در یک سال طی می نماید. پس ثابت هابل اغلب به صورت واحد های مختلط $\frac{km}{s Mpc}$ بیان می شود (کیلومتر بر ثانیه بر مگاپارسک) و یک مگاپارسک نیز برابر $10^6 pc$ است:

$$H_0 = (2.3 \times 10^{-18} s^{-1}) \left(\frac{9.46 \times 10^{12} km}{1ly} \right) * \left(\frac{3.26 ly}{1pc} \right) * \left(\frac{10^6 pc}{1Mpc} \right) = 71 \frac{km}{s Mpc}$$

مثال 44-9 محاسبه فاصله دوری یک کهکشان با استفاده از قانون هابل

فاصله کهکشان مثال 44-8 را با استفاده از قانون هابل محاسبه کنید.

حل:

قانون هابل انتقال به سرخ یک کهکشان دور را بر حسب فاصله r از زمین مرتبط می سازد. معادله 44-15 را بر حسب r با جایگزینی سرعت دور شدن v در مثال 44-8 حل می کنیم:

محاسبه:

با استفاده از

$$H_0 = 71 \frac{km}{s Mpc} = 7.1 \times 10^4 \left(\frac{m}{s} \right) / Mpc$$

خواهیم داشت:

$$r = \frac{v}{H_0} = \frac{1.55 \times 10^7 m/s}{7.1 \times 10^4 \left(\frac{m}{s} \right) / Mpc} = 220 Mpc$$

$$= 2.2 \times 10^8 pc = 7.1 \times 10^4 Mly = 6.7 \times 10^{24} m$$

ارزیابی

فاصله ای برابر 220 میلیون پارسک (710 میلیون سال نوری) براستی اعجاب اور است، اما بسیاری از کهکشانها بسیار دورتر نیز وجود دارند. برای نقد و ارزیابی چنین فاصله ای کافی است در نظر داشته باشید دورترین فاصله ای که یک فضاپیما بدون سرنشین از زمین دور شده است در حدود 0.001 ly است.

مورد دیگر از مشاهدات هابل این بود که کهکشانهای دور در **همه جهت ها** از ما دور می شوند. دلیل خاصی وجود ندارد که تصور کنیم که کهکشان ما در مرکز جهان هستی قرار دارد. اگر ما در کهکشان دیگری نیز زندگی می کردیم، باز هم به نظر می رسید که تمام اجرام آسمانی

از ما دور می شوند. به بیان دیگر، در هر لحظه، جهان هستی کم و بیش یکسان بوده و اینکه در جای این جهان هستی قرار داریم اهمیتی ندارد.

این ایده مهم **اصل کیهان شناسی Cosmologic principle** نام دارد. نوساناتی در چگالی جهان از نقطه ای به نقطه دیگر وجود دارد، اما به طور متوسط، جهان هستی در در تمامی پهنه آن یکسان می باشد. به این ترتیب ثابت هابل در مکان ثابت است (نه لزوماً در زمان) و قوانین فیزیک در همه جا یکسان اند.

مه بانگ The Big Bang

قانون هابل این نظریه را عرضه می دارد که در گذشته ای بس دور، تمامی مواد جهان هستی بسیار متمرکز تر از امروز بوده است. سپس در اثر یک انفجار عظیم، موسوم به **مه بانگ Big Bang** تمامی مواد قابل رویت کمابیش دارای سرعتی که امروز مشاهده می کنیم گردیده اند. زمان این حادثه کی بوده است؟ بر مبنای قانون هابل، ماده ای که در فاصله r از ما در حال دور شدن است با سرعت $v = H_0 \cdot r$ حرکت می کند. زمان t لازم برای طی مسافت r برابر است با:

$$t = \frac{r}{v} = \frac{r}{H_0 \cdot r} = \frac{1}{H_0} = 4.3 \times 10^{17} s = 1.4 \times 10^{10} \text{ years}$$

با این فرض، مه بانگ در حدود 14 میلیارد سال قبل اتفاق افتاده است. سرعت دور شدن را پس از مه بانگ در همه زمان ثابت فرض می کنیم این یعنی اینکه اثر جاذبه گرانشی را ناچیز می انگاریم. بعداً به این موضوع باز می گردیم. حالا به عمر کره زمین توجه می کنیم که بر اساس محاسبات طول عمر رادیو اکتیو (بخش 4-43) برابر 4.54 میلیارد سال تخمین زده می شود. با این حساب به جرات می توان گفت که جهان هستی بسیار قدیم تر از عمر کره زمین است.

فضای در حال انبساط Expanding Space

نظریه نسبیتی عام؛ در باره گسترش جهان دیدگاهی اساساً متفاوت با گفته های بالا دارد. بر اساس این نظریه، افزایش طول موج، بر اثر انتقال دوپلر ناشی از انبساط جهان به درون خلاء نیست بلکه این انبساط ناشی از انبساط خود فضا و همه چیز در درون فضای بین کهکشانها شامل طول موج نور دریافتی ما از چشمه های دور دست است. به آسانی این مفهومی قابل درک نیست. و چنانچه شما از قبل با آن مواجه نشده باشید، ممکن است مفهومی دوپلهو داشته باشد.

در اینجا یک مقایسه ای وجود دارد که می تواند به درک شهودی این مطلب کمک کند. فرض کنید ما همه حشراتی در حال خزیدن بر روی یک سطح افقی هستیم. ما نمی توانیم سطح را ترک کنیم به این معنی که فقط در امتداد سطح قادر به بدیدن همه چیز در گستره افقی و نه در امتداد بالا و پائین هستیم. در این صورت فضای ما یک فضای دو بعدی است بقول بعضی نویسندگان زمین تخت است. چنانچه سطح یک صفحه باشد، ما می توانیم جهت موقعیت خود را با دو مختصات کارتزین (x, y) بیان کنیم. حال چنانچه این سطح تا بینهایت در امتداد محور x و y گسترش یابد، و یا به کلامی دیگر بی انتها باشد، ما هرگز به لبه یک مرز انتهائی نخواهیم رسید.

زیستگاه جایگزین دیگر برای ما حشرات زمینی، سطح یک کره به شعاع R است. فضا همچنان به نظر نامتناهی می رسد زیرا با خزیدن، هرگز به مرز یا انتهائی آن نخواهیم رسید. در این فضا نیز وضعیت ما با نقطه ای در فضا قابل توصیف است، همچنان می توانیم از دو مختصات استفاده کنیم، طول و عرض جغرافیائی یا مختصات کروی θ و φ نشان داده شده در شکل 4-15

حال فرض کنید سطح اخیر سطح یک بالن باشد (شکل 4-17) هر چه ما بالن را باد کنیم، با افزایش شعاع R ، مختصات یک نقطه تغییر نخواهد کرد، در حالیکه فاصله بین هر دو نقطه بزرگتر و بزرگتر خواهد شد. همچنین با افزایش R نرخ تغییر فاصله بین دو نقطه (سرعت دور شدن آنها از یک دیگر) نیز متناسب با فاصله آنها افزایش می یابد. سرعت دور شدن متناسب با فاصله همانند قانون هابل خواهد بود. برای مثال فاصله بین شهرهای پیتسبورگ و میامی دو برابر فاصله شهر های پیتسبورگ و بوستون است. چنانچه کره زمین شروع به باد شدن نماید آهنگ تغییر فاصله میامی از پیتسبورگ دو برابر آهنگ تغییر فاصله پیتسبورگ بوستون خواهد بود.



شکل 4-17 (1) نقاط روی سطح یک بالن کروی نمونه (معرف وضعیت جرم های فضائی) با مختصات کروی و عرض و طول کروی مشخص می شود.

2) شعاع R بالان افزایش یافته است. مختصات کروی نقاط، همانند قبل از انبساط اند اما فاصله بین این نقاط، افزایش یافته است. آهنگ افزایش فاصله بین دو نقطه، متناسب با فاصله آن دو نقطه از یک دیگر است.

می بینیم که کمیت R اگرچه یکی از دو مولفه داده شده برای تعیین وضعیت یک نقطه روی سطح بالان نیست، اما در بحث مربوط به فاصله، نقشی اساسی دارد. این کمیت شعاع انحنا فضای دو بعدی ما و در عین حال یک عامل قیاس متغیر است که با گسترش فضای دو بعدی تغییر می کند.

تعمیم این تصویر برای سه بعد چندان آسان نیست. بایستی فضای سه بعدی را درون یک فضای چهار بعدی یا بیشتر تصور کنیم (مشابه فضای کروی دو بعدی که درون یک فضای دو بعدی قرار دارد و تخت می شود) این فضای سه بعدی واقعی ما دکارتی نیست و بیان مشخصات یک ناحیه کوچک آن نیازمند حد اقل به یک پارامتر دیگر انحنا فضای سه بعدی که شبیه شعاع کره در مورد قبلی است. نیاز داریم. این عامل قیاس که ما همچنان آن را R می نامیم اندازه جهان را توصیف می کند. (همان طور که شعاع کره اندازه جهان دو بعدی کروی را توصیف می کرد). بعداً به این بحث که آیا جهان محدودیت پذیر است یا خیر بازمی گردیم

هر طول اندازه گیری شده در فضای بین کهکشان واز آن جمله طول موج نوری که از کهکشان دور به سوی ما می آید، متناسب با انبساط R، انبساط می یابد. یعنی:

$$\frac{\lambda_0}{\lambda} = \frac{R_0}{R} \quad (16-44)$$

اندیس صفر به مقادیر طول موج و مقیاس در زمان حال و H_0 مقدار ضریب ثابت هابل در زمان حاضر است. مقادیر λ و R بدون اندیس معرف طول موج و عامل قیاس در هر زمان دلخواه گذشته، حال و آینده هستند. در وضعیت توصیف شده در مثال 44-8 داریم $\lambda_0 = 414 \text{ nm}$ و $\lambda = 393 \text{ nm}$ برابر این از رابطه 44-16 داریم $\frac{R_0}{R} = 1.053$ ، یعنی ضریب مقیاس کنونی R_0 5.3 درصد از مقدار آن در 780 میلیون سال پیش زمانی که نور از کهکشان دب اکبر ساطع شده بیشتر است. این افزایش زمانی طول موج که با افزایش عامل قیاس در جهان در حال انبساط رخ می دهد **انتقال به سرخ کیهانی Cosmological redshift** نام دارد. هر چه یک جرم نجومی دورتر باشد، زمان بیشتری طول می کشد تا نور آن به ما برسد و تغییر R و λ نیز بیشتر است. بزرگترین نسبت طول موج $\frac{R_0}{R}$ در حال حاضر در حدود 7 است این بدان معنی است که حجم فعلی خود فضا در حدود $7^3 \approx 340$ بار بزرگتر از حجم آن در زمان گسیل اولیه نور است. تلاش نکنید که در معادله 44-14 برای یافتن سرعت دور شدن مقدار $\frac{R_0}{R} \approx 7$ را جایگزین نمایند این مقدار تنها به ازای مقادیر انتقال به سرخ کیهانی کوچک و $c > v$ اعتبار دارد. مقدار واقعی v را در حال حاضر فقط می توان تخمین زد زیرا مقدار آن تابع چگالی جهان اندازه H_0 و تاریخ توسعه جهان هستی است.

این برای شما اعجاب انگیز است: اگر فاصله r در رابطه قانون هابل به اندازه کافی بزرگ باشد، انگاه سرعت پس رفت بزرگتر از سرعت انتشار نور خواهد شد! این نقض قانون نسبیت خاص نخواهد بود زیرا سرعت پس رفت معلول حرکت یک جسم نجومی نسبت به یک دستگاه مختصات واقع در قراگاه جرم نیست رابطه $v > c$ می تواند درست باشد. اگر دو دستگاه مختصات با سرعتی برابر سرعت انبساط خود فضا از یک دیگر دور شوند. به بیان دیگر اجرامی وجود دارند که سرعت دور شدن دستگاه مختصات آنها از دستگاه مختصات ما آنقدر باشد که نور گسیلی از آنها در طول تاریخ جهان هرگز زمان کافی برای رسیدن به ما را نداشته باشند. آنچه را که می بینیم فقط **جهان قابل مشاهده** است. ما هیچ گونه اطلاعی از ماورای این جهان قابل رویت نداریم.

احتیاط: جهان به سوی پوچی در حال انبساط نیست. بالنی که در شکل 44-17 نشان دادیم به سوی فضای تهی اطراف خود انبساط می یافت. یک تصور غلط رایج از به تصویر کشیدن جهان با راهی مشابه این است که جهان را به اندازه ای بزرگ ولی تجمع متناهی از کهکشان ها در نظر آوریم که به سوی یک فضای پوچ انبساط می یابد. واقعیت کاملاً برعکس است! تمامی شواهد جمع آوری شده نشان می دهند که جهان نامتناهی است. هیچ حد و مرزی وجود ندارد، بنابراین این هیچ چیز "خارج" از آن وجود ندارد و جهان "در حال توسعه بدون" همه چیز نیست. انبساط جهان به زبان ساده به معنی آن است که فاکتور مقیاس جهان در حال انبساط است. تشبیه دو بعدی خوب تصور جهانی مسطح به صورت یک صفحه لاستیکی بزرگ است که در حال اتساع و انبساط است که مانند سطح بالون شکل 44-17 است به بیان دیگر جهان لایپتاهی در حال نامتناهی شدن بیشتر است.

چگالی بحرانی Critical Density

اشاره کردیم که قانون گرانش با جهان ایستا سازگار نیست. نیاز داریم به نقش گرانش در جهان در حال توسعه توجه کنیم. جاذبه گرانشی باید باعث کند شدن انبساط جهان شود اما چقدر؟ اگر این جاذبه ها بقدر کافی قوی باشند، انبساط جهان رفته رفته بایستی آهسته تر گردد و سرانجام از حرکت بازایستند. سپس تراکم مجدد خود را آغاز کند و شاید به مسیری افتد که **تخریب بزرگ Big Crunch** نامیده می شود. به بیان دیگر، اگر نیروهای گرانشی بسیار ضعیف باشند، این نیروها فقط کمی از سرعت انبساط می کاهند و جهان بایستی تا ابد به توسعه خود ادامه دهد.

این وضعیت مشابه سرعت فرار پرتابه از سطح زمین است. ما این مسئله را در مثال 13-5 (بخش 13-3) بررسی کردیم؛ حال زمان مناسبی است که آن بحث را مجدداً مرور کنیم. انرژی کل $E = K + U$ یک پرتابه به جرم m و سرعت v در فاصله r از مرکز زمین (با جرم M_E) برابر است با:

$$E = \frac{1}{2}mv^2 - \frac{Gmm_E}{r}$$

اگر E مثبت باشد، پرتابه انرژی کافی برای بینهایت دور شدن از زمین را دارد ($r \rightarrow \infty$) و در نهایت، مقداری انرژی هم از آن باقی می ماند. اگر E منفی باشد، انرژی جنبشی $K = \frac{1}{2}mv^2$ صفر شده و پرتابه در فاصله $r = -\frac{Gmm_E}{r}$ متوقف می گردد. در چنین وضعی صعود پرتابه بیشتر از r ممکن نیست و پرتابه نمی تواند از گرانش زمین فرار کند.

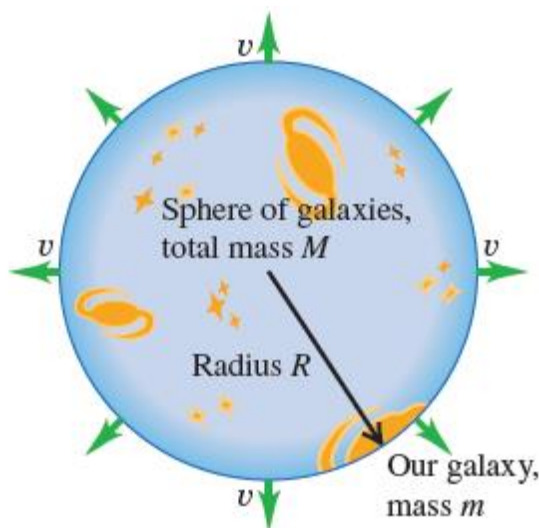
تحلیل مشابهی را می توان برای جهان ارائه کرد. اینکه جهان به انبساط خود ادامه می دهد یا خیر بستگی به میانگین چگالی ماده دارد. چنانچه ماده به حد کافی چگال باشد، نیروی جاذبه به اندازه ای هست که موجب کندگی و سرانجام باز ایستادن جهان گردیده و تراکم مجدد آن را باعث گردد. در غیر این صورت انبساط بایستی تا ابد ادامه یابد. می توانیم برای چگالی بحرانی ρ_c برای رسیدن به آستانه توقف رابطه ای بدست آورد.

اینک بر اساس مکانیک نیوتونی محاسبه ای انجام می دهیم؛ این محاسبه بر اساس سنجیتی درست نیست ولیکن یک بینشی را به تصویر می کشد. فرض کنید یک کره بزرگ با شعاع R موجود است که حاوی کهکشان های زیادی است که جرم کل آن M است (شکل 18-44) فرض نمائید جرم کهکشان ما m باشد و در سطح این کره مستقر باشد. بر اساس خصوصیات کیهانی، میانگین توزیع ماده درون کره یکنواخت است.

نیروی گرانشی کل بر کهکشان ما نیرویی است که بر اثر جرم M ماده درون کره وارد می گردد. نیروی وارد بر کهکشان ما و انرژی پتانسیل U بر اثر این توزیع متقارن نیروی یک سان خواهد بود در صورتی که m و M هر دو نقطه ای فرض گردند بنابراین مشابه بخش 13-3 $U = -GmM/R$. نیروی خالص از طرف توزیع متقارن خارج کره برابر صفر است، و بنابراین ما از آن صرف نظر می کنیم.

انرژی کل E (جنبشی به اضافه پتانسیل) برای کهکشان ما برابر است با:

$$E = \frac{1}{2}mv^2 - \frac{GmM}{R} \quad (17-44)$$



شکل 18-44 یک کره فرضی کهکشانی. نیروی جاذبه خالص وارد بر کهکشان ما (واقع بر سطح این کره) از جانب کهکشان های دیگر چنانچه کل جرم آنها در مرکز کره فرض گردد، از آنجا که جهان نامتناهی است و هم چنین بی نهایت کهکشان در خارج این کره قرار دارند، یکسان است

اگر E مثبت باشد، کهکشان ما انرژی کافی برای فرار از اثر گرانش جرم M منتشر در درون کره را دارد و در این صورت جهان همواره به انبساط خود ادامه می دهد. چنانچه E منفی باشد، کهکشان ما نمی تواند بگریزد و اجزای جهان به تدریج به سوی یکدیگر جذب می شوند. مرز بین این دو حالت با $E = 0$ تعریف می شود و در این حالت داریم:

$$\frac{1}{2}mv^2 = \frac{GmM}{R} \quad (18-44)$$

جرم کل M درون کره برابر حجم $4\pi R^3/3$ ضربدر چگالی ρ_c است:

$$M = 4\pi R^3/3 \times \rho_c$$

فرض می کنیم که سرعت v کهکشان ما بستگی به مرکز این کره با رابطه قانون هابل $v = H_0 \cdot R$ داشته باشد. با جایگزینی برای m و v در رابطه 18-44 خواهیم داشت:

$$\frac{1}{2}m(H_0 R)^2 = \frac{Gm}{R} \left(\frac{4\pi R^3}{3} \times \rho_c \right)$$

$$\rho_c = \frac{3H_0^2}{8\pi G}$$

این چگالی بحرانی است. اگر چگالی متوسط کمتر از ρ_c باشد، انبساط جهان ادامه می یابد و نامحدود خواهد بود و اگر بیشتر از این مقدار باشد انبساط به تدریج کند شده و شروع به تراکم می کند و احتمالاً به تخریب بزرگ می انجامد و سپس مه بانگ دیگری به وقوع خواهد پیوست.

با قرار دادن اعداد در رابطه چگالی بحرانی خواهیم داشت:

$$\rho_c = \frac{3H_0^2}{8\pi G} = \frac{3(2.3 \times 10^{-18})^2}{8\pi(6.67 \times 10^{-11})} = 9.5 \times 10^{-27} \text{ kg/m}^3$$

جرم یک اتم هیدروژن برابر $1.67 \times 10^{-27} \text{ kg}$ است و این چگالی معادل حدود پنج اتم هیدروژن بر متر مکعب است.

ماده سیاه، انرژی سیاه و شتاب جهانی

Dark Matter, Dark Energy, and the Accelerating Universe

اختر شناسان کوشش زیادی به عمل آورده اند تا چگالی میانگین ماده را در جهان تخمین بزنند. یک راه برای این محاسبه آن است که تعداد کهکشان ها را در یک محدوده از آسمان را بشمارند. بر مبنای جرم میانگین یک ستاره و تعداد ستارگان در یک کهکشان میانگین، این تقلا تخمینی از چگالی میانگین ماده درخشان (Luminous) جهان را بدست می دهد و آن ماده ای است که تابش الکترومغناطیسی را گسیل می نماید. (شما خود یک ماده درخشان هستید زیرا تابش مادون قرمز را بر مبنای درجه حرارت بدنانتان گسیل می کنید بخش های 7-17 و 39-5 را ببینید). همچنین لازم است که ماده درخشان در حصار یک کهکشان را محاسبه کنیم (شامل گاز های رقیق و گرد و عبار بین ستارگان)

روش دیگر مطالعه حرکت کهکشان ها در درون یک مجموعه کهکشان است (شکل 19-44 و b15-44 را ببینید) جنبش این کهکشانیها به اندازه ای کند است که حقیقتاً قادر به مشاهده تغییر وضعیت ها در درون مجموعه نیستیم. به هر حال مشاهدات نشان می دهد که کهکشان های مختلف در درون یک مجموعه تا حدودی انتقال به سرخ های مختلفی دارند که نشان می دهد که نشاندهنده این است که کهکشانیها دارای حرکتی نسبی به مرکز جرم ستاره دنباله دار هستند. سرعت این جنبش ها وابسته به نیروی گرانشی اعمال شده بر هر کهکشان از سوی دیگر اعضای آن مجموعه است، که در چرخش بستگی به مجموع جرم ستاره دنباله دار است. بوسیله اندازه گیری این سرعت ها، اختر شناسان می توانند مقدار میانگین چگالی تمام انواع ماده درون ستاره دنباله دار را محاسبه کنند چه این ماده تابش الکترومغناطیسی داشته باشد و یا نداشته باشد.

مشاهدات با استفاده از این روش ها و یا روش های دیگر نشان می دهد که میانگین چگالی تمامی مواد در جهان برابر 27.4% چگالی بحرانی است، حال اینکه میانگین چگالی ماده درخشان تنها 4.6% چگالی بحرانی است. به بیان دیگر، بیشتر مواد تشکیل دهنده جهان درخشان نیست: یعنی هیچ تابش الکترومغناطیسی از خود ساطع نمی کنند. در حال حاضر ماهیت **ماده سیاه Dark Matter** به عنوان یک راز باقی است. بعضی از نظریه های پیشنهادی برای ماهیت ماده تاریک **WIMPs** (برهم کنش ضعیف ذرات سنگین weakly interacting massive particles) که بطور فرضی ذرات ریز اتمی بسیار سنگین تر از محصولات شتاب دهنده های آزمایشگاهی هستند) و **MACHOs**

شکل 19-44 نقاط درخشان در این تصویر ستارگان نیستند، بلکه یک مجموعه کامل ستارگان دنباله دار هستند. آنها بخشی از مجموعه کهکشانی هستند که در حدود 10.2 بیلیون سال نوری (معادل 3.13 بیلیون pc یا 3130 مگا پارسک) از ما دورترند. تابش آبی رنگ تابش x است که از گازهای داغ درون مجموعه ساطع گردیده است. آن زمانی که کهکشان ها این نور را ساطع کردند فاکتور مقیاس جهان فقط در حدود 35 درصد زمان فعلی بوده است. با مقایسه ما نسبیتی در نزدیکی ستاره دنباله دار را مشاهده می کنیم که در حدود 300 میلیون سال نوری قبل بوده است یعنی زمانی که فاکتور مقیاس 98% مقدار کنونی بوده است.



(اجرام هاله مانند فشرده سنگین massive compact halo objects که شامل اجرامی مانند سیاه چاله ها که امکان دارد سازنده هاله های اطراف کهکشان ها باشند). ماهیت واقعی ماده سیاه هر چه که باشد؛ بسیار دور تر از شکل غالب ماده جهان است.

به ازای هر کیلو گرم از ماده معمولی که موضوع اصلی کتاب ما بوده است (شامل الکترون ها ، پروتون ها،اتم ها،مولکولها و بلوک ها در سیارات ، سیارات و ستارگان) پنج کیلوگرم ماده سیاه وجود دارد.

از آنجا که میانگین چگالی ماده در جهان کمتر از چگالی بحرانی است، بنظر منطقی می آید که بگوئیم جهان به طور نامحدودهمچنان به انبساط خود ادامه میدهد، و جاذبه گرانشی بین ماده در قسمت های مختلف جهان باعث کند شدن انبساط آن می گردد(اگرچه کافی برای توقف آن نیست). یک راه آزمایش این پیش بینی آن است که انتقال به سرخ اجرام بسیار دور را بررسی کنیم. زمانی که اختر شناسان به یک کهکشان در فاصله 10^9 سال نوری می نگرند، تابش دریافتی آنها متعلق به 10^9 سال پیش بوده است که پس از طی یک سفر طولانی به زمین رسیده است. در حقیقت آنها دارند به پدیده ای مر بوط به 10^9 پیش می نگرند. اگر انبساط جهان در حال کند شدن بوده است، انبساط می بایستی در زمان گذشته بسیار سریعتر بوده باشد. بنابراین ما باید انتظار داشته باشیم که کهکشان های بسیار دور دارای انتقال به سرخ بزرگتری از آنچه که قانون هابل(معادله 44-15) پیش بینی می کند باشند

فقط در دهه 1990 بود که اندازه گیری دقیق هر دو مورد فاصله و انتقال به سرخ کهکشان های بسیار دور میسر شد. نتایج کسب شده در مجموع شگفت آور بود: کهکشان های بسیار دور در حقیقت دارای انتقال به سرخ **کوچکنر** از مقدار پیش بینی شده توسط قانون هابل هستند!

این بدان مفهوم است که انبساط جهان در گذشته کمتر از زمان حاضر بوده است،بنابراین انبساط در حال سرعت گرفتن است نه کند شدن

چنانچه جاذبه گرانشی انبساط را کند می سازد، پس چرا سرعت آن رو به افزایش است؟ توضیحی که عموماً مورد قبول اخترشناسان و فیزیکدانان است این است که فضا با نوعی از انرژی اشباع گردیده است که هیچ نوع اثر گرانشی نداشته و از آن تابش الکترومغناطیسی ساطع نمی گردد،بلکه مانند یک «ضد گرانشی» عمل کرده و نوعی **عقب زنی repulsion** جهانی دارد. این انرژی غیر مادی نامرئی **انرژی سیاه** Dark Energy نامیده می شود. بطوریکه از این نام متبادر می گردد، ماهیت انرژی سیاه بسیار کم شناخته شده است ولیکن موضوعی است که پیگیرانه مورد بررسی و تحقیق است.

مشاهدات نشان میدهند که چگالی انرژی انرژی تاریک (بر حسب ژول بر متر مکعب) برابر 72.6% چگالی بحرانی ضریب c^2 (مجذور سرعت نور) است که برابر است با $0.726 \cdot \rho_c \cdot c^2$ است. همانطور که در بالا توضیح دادیم، میانگین چگالی ماده از همه نوع برابر 27.4% چگالی بحرانی جهان است. از معادله انیشتین $E = mc^2$ ، چگالی انرژی میانگین ماده در جهان برابر می شود با $0.274 \cdot \rho_c \cdot c^2$. خواهد شد. از آنجا که چگالی انرژی انرژی سیاه در حدود سه برابر ماده است، انبساط جهان بسوی شتاب گرفتن است. این انبساط هرگز متوقف نمی شود و جهان هرگز منهدم نمی گردد.

کاربرد یک فسیل هم باستانی هم جدید

این فسیل یک تریلوبیت، یک نمونه از جانوران مفصل دار دریایی است که در اقیانوسهای زمین بین 540 تا 250 میلیون سال قبل میزیسته است. (در مقایسه اولین دیناسور ها زودتر از 230 میلیون سال قبل ظهور نکردند)از منظر ما تریلوبیت ها به دورانی بسیار کهن تعلق دارند اما در مقایسه با زمان سپری شده از حادثه مه بانگ در 13.7 بیلیون سال پیش حتی این موجودات نیز پدیده ای جدید هستند. آنها اولین بار در هنگامی که زمین 96% عمر فعلی را داشت ظهور کردند.



اگر تمامی انواع انرژی را محاسبه کنیم، چگالی انرژی میانگین برابر است با

$$0.726 \cdot \rho_c \cdot c^2 + 0.274 \rho_c \cdot c^2 = 1.00 \cdot \rho_c \cdot c^2$$

که از این مقدار، 72.6% مربوط به انرژی سیاه اسرار امیز، 22.8% مربوط به انرژی های کمتر شناخته شده اسرار امیز و فقط 4.6% مربوط به انرژی های مواد شناخته شده عرفی است. با این حساب ، اطلاعات ما در باره محتویات جهان چقدر اندک است! هرگاه ما شروع به محاسبه

چگالی انرژی سیاه (که باعث سرعت گرفتن انبساط جهان می گردد) نمایم، عمر جهان برابر 13.7 بلیون سال (1.37×10^{10} years) خواهد شد.

اهمیت نتایج در خلال اشتباهات مشاهده در چیست؟ چگالی انرژی میانگین جهان برابر $\rho_c \cdot c^2$ است؟ این بما می گوید که جهان نامتناهی و بدون مرز است، اما این با اشکال روبروست. اگر حتی چگالی میانگین انرژی کمی بیشتر از $\rho_c \cdot c^2$ بود، جهان متناهی بود درست مانند سطح آن کره ای که در شکل 17-44 شرح آن رفت. تا زمان نوشتن این کتاب، خطای مشاهده در دانسیته انرژی میانگین همچنان به حد کافی بزرگ است (در حدود 1%) بطوریکه ما کاملاً مطمئن نیستیم که آیا جهان نامتناهی هست یا خیر. تصحیح این اندازه گیری گام مهمی برای فیزیکدانان و اخترشناسان در سال های پیش رو است.

آموخته های خود را از بخش 44-6 بیازمانید.

آیا صحیح است که بگوئیم بدن ما از مواد معمولی ساخته شده است؟

7-44 آغاز زمان The Beginning of Time

چه عنوان عجیبی برای آخرین بخش این کتاب! بطور کلی بعضی از نظریه های جدید مطرح دربار تاریخ آغازین جهان و رابطه آنها با برهم کنش ذرات بنیادین رابه اختصار شرح خواهیم داد. درخواهیم یافت که بسیاری از حوادث حیرت انگیز در نخستین لحظات اتفاق افتاده است. بسیاری از بحث ها بی نتیجه رها شده اند و بسیاری از پرسش ها بدون پاسخ مانده اند. به هر حال این یکی از جبهه های فیزیک است.

دما ها Temperatures

جهان آغازین بسیار چگال و داغ و انرژی میانگین ذرات بسیار زیاد و خارج از حد متعارف در جهان معاصر بوده است. با استفاده از رابطه اصل هم بخشی (the equipartition principle) می توانیم رابطه انرژی E هر ذره و دمای مطلق T آن را بیان کنیم:

$$E = \frac{3}{2}KT \quad (20-44)$$

در این معادله K ثابت بولتزمن است که ما اغلب اوقات آن را بر حسب eV/K بیان می کنیم و برابر است با:

$$K = 8.617 \times 10^{-5} eV/K$$

اگر چه ما می توانیم معادله 20-44 را هرگاه بحث حدود اندازه مطرح است با مقدار تقریبی $T = \left(\frac{10^{-13} GeV}{K}\right)$ ، $T = \left(\frac{10^{-4} eV}{K}\right)$ تعویض نماییم

مثال 10-44 دما و انرژی

الف) مقدار متوسط انرژی جنبشی E ذرات را (برحسب eV) در دمای معمولی اتاق ($T = 290K$) و در سطح خورشید ($T = 5800K$) را پیدا کنید. ب) مقدار دمای تقریبی مربوط به یونیزاسیون اتم هیدروژن و انرژی سکون الکترون و پروتون چقدر است؟

حل:

در این مثال از اصل هم بخشی استفاده می کنیم. لذا از رابطه 20-44 برای مربوط ساختن دما و انرژی استفاده خواهیم کرد.

محاسبه

الف) در دمای اتاق معادله 20-44 نتیجه می دهد:

$$E = \frac{3}{2} (8.67 \times 10^{-5}) (290) = 0.0375 eV$$

دمای سطح خورشید با ضریب $\frac{(5800K)}{(290K)} = 20$ از دمای اتاق بزرگتر است بنابراین میانگین انرژی جنبشی بیست برابر اتاق خواهد بود

$$E = 20 * 0.0375 = 0.75 eV$$

ب) انرژی یونیزاسیون هیدروژن برابر $13.6 eV$ است. با استفاده از مقدار تقریبی E خواهیم داشت.

$$T \approx \frac{E}{\frac{3}{2}K} = \frac{13.6}{\frac{3}{2} * 8.67 \times 10^{-5}} = \frac{13.6}{1.25 \times 10^{-4}} \approx 10^5 K$$

با تکرار این محاسبه برای انرژی سکون الکترون $E = 0.511 MeV$ و پروتون $E = 938 MeV$ دماهای نظیر را می یابیم:

$$T \approx \frac{E}{10^{-4}} = \frac{0.511 \times 10^6}{10^{-4}} \approx 10^{10} K$$

$$T \approx \frac{E}{10^{-4}} = \frac{938 \times 10^6}{10^{-4}} \approx 10^{13} K$$

ارزیابی

دماهای با افزونی $10^5 K$ فقط در لایه های داخلی خورسید وجود دارد و در انجا هیدروژن به حالت یونیده می باشد. دماهایی نظیر $10^{10} K$ و یا $10^{13} K$ در هیچ نقطه ای در منظومه شمسی یافت نمی گردد و تنها در نخستین روز های تاریخ جهان وجود داشته است.

تمایز برهم کنش ها **Uncoupling of Interactions**

ما انبساط جهانی را با یک افزایش دائمی فاکتور مقیاس R توصیف کردیم که آنرا می توانیم به عنوان توصیف اندازه جهان تصور نماییم که با یک کاهش چگالی میانگین متناظر همراه است. همگام با افزایش انرژی پتانسیل گرانشی در هنگام انبساط، شاهد کاهش دما و انرژی متوسط ذره بوده ایم. در هنگام وقوع این رویدادها، برهم کنش های اساسی بیشتر و بیشتر متمایز می گردند.

برای درک پدیده تمایز به پیدایش وحدت بین برهم کنش های الکترو مغناطیسی و ضعیف توجه کمید. تحقق این وحدت مسلزم بالا رفتن انرژی ذرات به میزانی بسیار بالاست، به طوریکه اختلاف جرم بین بوزون های با اسپین 1، یعنی ذرات واسطه برهم کنش ها، در برابر جرم آنها قابل اغماض شود. ذرات واسطه در برهم کنشهای الکترو مغناطیسی، فوتونهای بدون جرم و در برهم کنشهای ضعیف، بوزون های ضعیف W^\pm و Z^0 با جرمی حدود $100 GeV/c^2$ هستند. در انرژی های بسیار کمتر از $100 GeV$ این دو برهم کنش کاملا متمایز از یک دیگرند ولی در انرژی های به مراتب بیشتر از $100 GeV$ این دو تبدیل به برهم کنشی یکسان می گردند.

نظریه وحدت بزرگ (GUTs) رفتاری مشابه را برای برهم کنشهای قوی قائل است. برهم کنشهای الکتروضعیف و قوی در انرژی های به بزرگی $10^{14} GeV$ وحدت می یابند، اما در انرژی های کمتر از این دو برهم کنش کاملا متمایز از یک دیگرند. جنبه ذهنی و نظری نظریه وحدت بزرگ همچنان قوی است زیرا انجام آزمایش در گستره ای به این بزرگی از انرژی (حدود 10^{11} برابر انرژی های قابل وصول در شتاب دهنده های عصر حاضر) فعلا امکان ندارد.

سرانجام، در انرژی های بقدر کافی بالا و مسافت های کوتاه، فرض بر این است که گرانش نیز با سه نوع دیگر برهم کنش یکی شود. فاصله ای که در آن این موضوع محقق می گردد در حدود $10^{-35} m$ بوده و این فاصله **طول پلانک** *Planck length* نامیده می شود و با l_p نشان داده می شود، این فاصله با c سرعت انتشار نور، ثابت اساسی مکانیک کوانتمی \hbar و ثابت گرانشی G متناسب بوده و بوسیله رابطه زیر با هم مربوطند:

$$l_p = \sqrt{\frac{\hbar G}{c^3}} = 1.616 \times 10^{-35} m \quad (21-44)$$

تحقیق کنید که ترکیب مقادیر ثابت به صورت فرمول بالا، **زمان پلانک** یا $t_p = l_p/c$ زمان لازم برای پیمودن l_p با سرعت نور است و خواهیم داشت:

$$t_p = \frac{l_p}{c} = \sqrt{\frac{\hbar G}{c^5}} = 0.539 \times 10^{-43} s \quad (22-44)$$

اگر در عالم خیال به زمان گذشته بازگردیم، بایستی به زمان $t = 10^{-43} s$ برسیم ناگزیر از توقف هستیم زیرا هیچ گونه نظریه مناسبی که بتواند این چهار برهم کنش را متحد سازد وجود ندارد. بنابراین تا کنون هیچ راهی برای دانستن اینکه پیش از آن چه رخ داده است و یا اینکه رفتار جهان در زمان های پیش از زمان پلانک چگونه بوده است را نداریم.

مدل استاندارد تاریخ جهان **The Standard Model of the History of the Universe**

شرحی که در آتی می آید، **مدل استاندارد** *Standard Model* تاریخ جهان نام دارد. این عنوان نشان می دهد که نظریه فوق بر اساس قلمروی معتبری از تنوری ها و بر پایه تجربه محض بنا شده و کاملا مورد قبول عام قرار دارند. اشکال صفحات آتی این نظریه را با ابعاد مشخصه، انرژی ذرات و دماهای را در زمان های مختلف به تصویر کشیده اند. که گاه به این اشکال مراجعه کنید آنها شما را در فهم بحث زیر کمک می کنند.

در این مدل استاندارد، دمای جهان در زمان $t = 10^{-43} s$ (زمان پلانک) در حدود $10^{32} K$ بوده است و انرژی میانگین هر ذره تقریبا برابر

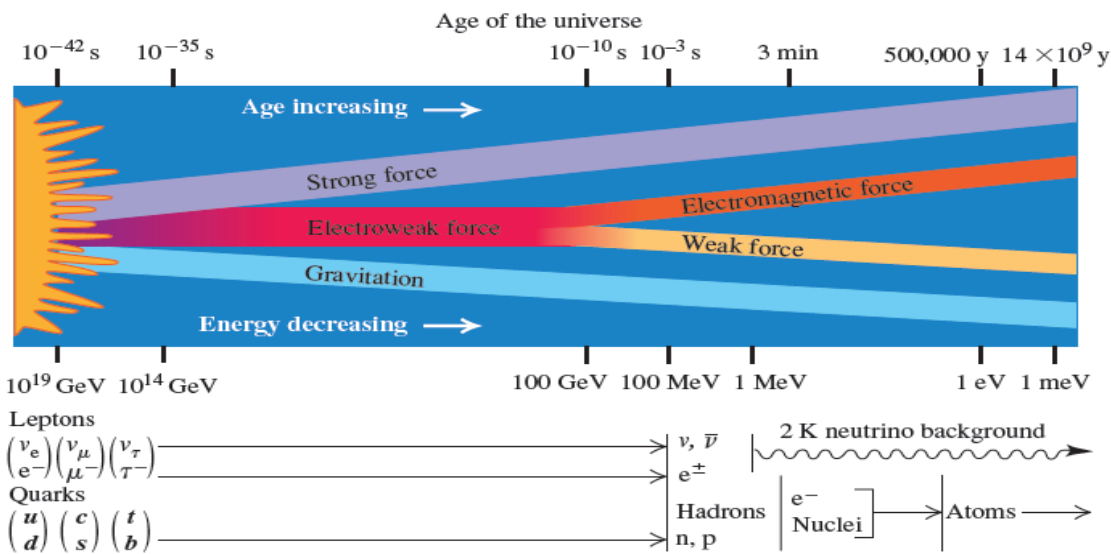
$$E \approx (10^{-13} GeV/K)(10^{32} K) = 10^{19} GeV$$

بنا بر نظریه وحدت کامل در دماهای پائین تر از این حد انرژی، گرانش به یک برهم کنش مستقل می گراید. لذا این زمان لحظه انتقال از دوره حاکمیت نظریه همه چیز (TOE) به دوره نظریه وحدت بزرگ (GUT) را مشخص می کند.

در دوره GUT ، به تقریب بین $t = 10^{-43} s$ تا زمان $t = 10^{-35} s$ ، هنوز وحدت نیروهای قوی و الکتروضعیف برقرار بوده است و جهان شبیه آشی یا بشن هائی از خانواده کوآرک ها و لپتون ها بود که آزادانه به هم تبدیل می شدند و تمایز این ذرات از یک دیگر اسان نبود. امکان ایجاد و ویرانی های سریع ذره های سنگین تر نیز وجود داشته است.

یکی از مشخصه های مهم دوران GUT این بود که در انرژی های بقدر کافی بالا، عدد باریون پایسته نیست. (قبلا در باره فروپاشی پروتون که تاکنون مشاهده نشده است صحبت کرده ایم) بنابراین در پایان دوره GUT تعداد کوآرک ها و پادکوآرک ها احتمالا برابر نبوده است. این امر، پیامدهای مهمی دارد که در پایان این بخش به آن باز می گردیم.

در زمان $t = 10^{-35} s$ دما به حدود $10^{27} K$ و میانگین انرژی به حدود $10^{14} GeV$ کاهش یافته بود. در این انرژی، نیروی قوی از الکتروضعیف جدا شد (شکل 20-44) و پایداری عدد باریون و عدد لپتون به صورت جدا از هم آغاز شد. این جدائی نیروی مشابه تغییر فاز (نظیر جوشیدن یک مایع که با گرمای نهان تبخیر همراه است) فرض گردید. تصور کنید که مشابه مدل تورمی هسته های سنگین در حال جوشیدن بوده و ذرات به خارج از گستره برد کوتاه نیرو های هسته ای پرتاب شده باشند. نتیجه آن این بوده است که جهان به سوی یک انبساط دراماتیک، (بسیار فراتر از سرعت نرخ انبساط جهان امروز) بنام **تورم کیهانی cosmic inflation** رفته است. عامل قیاس R با ضریب 10^{50} در $10^{-32} s$ افزایش یافت.

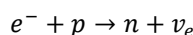


شکل 20-44 نمودار نشانگر زمان و انرژی که به ازای آنها بر هم کنش ها از یک دیگر متمایز گردیده اند. مقیاس انرژی در این نمودار وارون است زیرا میانگین انرژی با افزایش سن جهان کاهش یافته است.

در زمان $t = 10^{-32} s$ جهان را مخلوطی از کوآرک ها، لپتون ها، و ذرات واسطه (نظیر گلوئون ها، فوتونها، و بوزون های ضعیف W^\pm و Z^0) تشکیل می داده اند. فرایند های انبساط و سرد شدن، از دوره تورمی تا $t = 10^{-6} s$ یعنی زمانی که به حدود $10^{13} K$ کاهش یافت و انرژی به $1 GeV$ (در حد قیاس با انرژی سکون نوکلئون مثال 11-44 را ببینید) ادامه یافت. از این پس کوآرک ها شروع به پیوند با یکدیگر و تشکیل نوکلئون و پاد نوکلئون نمودند. همچنان هنوز تعداد فوتون های با انرژی کافی آنقدر زیاد بود که با تولید جفت نوکلئون-پادنوکلئون فرایند نابودی این جفت را جبران کنند. به هر حال در حدود $t = 10^{-2} s$ انرژی بسیاری از فوتون ها به زیر آستانه انرژی لازم برای تولید این جفت رسید و فزونی تعداد نوکلئونها بر پادنوکلئون ها به مقدار ناچیزی رسید. در نتیجه همه پادنوکلئون ها و اکثر نوکلئون ها یک دیگر را نابود کردند. کمی بعد، با فرایندی مشابه، تولید جفت الکترون-پوزیترون از یک طرف و نابودی آنها از سوی دیگر با هم متعادل شد.

در زمان حدود $t = 14 s$ انرژی به حدود $1 MeV$ ، یعنی به زیر آستانه تولید جفت e^+e^- تنزل یافت. با توقف تولید جفت، بقیه پوزیترون ها نیز عملا نابود شدند و جهان با تعداد الکترون و پروتون هایی به مراتب بیشتر از پادذره های این دو باقی ماند.

تا حدود $t = 1 s$ ، نوترون ها و نوترینو ها از طریق این واکنش انرژی گیر تا رسیدن به زمان $t = 1 s$ امکان تولید شدن داشتند:



پس از این زمان الکترون ها دیگر انرژی کافی برای ادامه این واکنش را نداشتند. انرژی میانگین نوترینو ها نیز کاهش یافت و همراه با انبساط جهان، واکنش های تعادلی نظیر جذب نوترینو ها (که با احتمال رو به کاهش رخ داد) بی اثر شدند. در این زمان، شار نوترینو ها و پادنوترینو ها از بقیه جهان متمایز گردید. به دلیل احتمال بسیار کم جذب نوترینو، بسیاری از این شار علیرغم کاهش دما در اثر انبساط تا زمان حاضر موجود است. مدل استاندارد جهان، نمای کنونی نوترینو را $2K$ پیش بینی می کند، لسکن تاکنون هیچ آزمایشی قادر به اثبات این پیش بینی نبوده است.

سننر هسته ای Nucleosynthesis

در حدود $t=1$ s، نسبت پروتون به نوترون با ضریب توزیع بولتزمن $e^{-\Delta E/kT}$ مشخص می‌شود. جاییکه ΔE تفاوت انرژی سکون نوترینو و پروتون و برابر 1.294 MeV در دمای 10^{10} K ، با محاسبه به کمک این عامل، تعداد پروتون‌ها حدود 4.5 برابر نوترون‌ها به دست می‌آید. به هر حال، همانگونه که بحث گردید، نوترون‌های آزاد (با نیم عمری برابر 887 s) به پروتون فروپاشیده می‌شوند. این فروپاشی باعث می‌گردد تا نسبت پروتون-نوترون تا حدود $t=226\text{s}$ افزایش یابد. در این زمان، دما حدود 10^{10} K و انرژی میانگین زیر 2 MeV بوده است.

این توزیع انرژی بحرانی است زیرا انرژی بستگی دوتریون (جاصل از پیوند یک پروتون و یک نوترون) 2.22 MeV است (بخش 2-43 را ببینید). نوترون موجود در پیوند دوتریون خود به خود دستخوش فروپاشی نمی‌شود. با کاهش انرژی میانگین باز هم پیوند یک پروتون و یک نوترون و تشکیل دوتریون ادامه می‌یافت، اما با گذشت زمان، تعداد فوتون‌های انرژی 2.22 MeV یا بیشتر که با شکستن دوتریون و باز تولید پروتون و نوترون، تولید دوتریون را جبران می‌کند کم و کمتر می‌شود. به این ترتیب پیوند یافتن پروتون و نوترون و تشکیل دوتریون، فروپاشی نوترون‌های آزاد را متوقف می‌کرد.

آغاز تشکیل دوتریون‌ها در $t=225\text{s}$ ، آغاز دوره تشکیل هسته‌ها، با به اصطلاح سنتز هسته ای nucleosynthesis نیز می‌باشد. در این زمان در برابر هر نوترون، هفت پروتون وجود داشت. دوتریون (^2H) توانست با جذب یک نوترون به تری تون (^3H) و یا با جذب یک پروتون به ^3He تبدیل شود. سپس ^3H با جذب یک پروتون و نیز ^3He با جذب یک نوترون، هر یک توانستند به یک ^4He (ذره آلفا) تبدیل شوند. تعداد ناچیزی هسته ^7Li از گداخت ^3H و ^4He به وجود آمدند.

بر طبق این نظریه، همه ^1H و ^4He موجود در جهان کنونی در این دوره بوجود آمده اند و سپس تولید هسته تقریباً به یک حالت توقف رسیده است به این دلیل که هیچ هسته ای با $A=5$ نیمه عم بیشتر از 10^{-21}s را ندارد. ذرات آلفا نوترون و یا پروتون را بطور دائم جذب نمی‌کنند. هسته ناپایدار ^8Be ، با نیم عمر کوتاه $7 \times 10^{-17}\text{s}$ از گداخت دو ^4He حاصل شده است. توجه کنید در این زمان هنوز انرژی ذرات بسیار زیاد بوده بطوریکه امکان پیوند الکترون‌ها و هسته‌ها وجود نداشت و هنوز اتم بوجود نیامده بود.

مثال مفهومی 11-44. وفور نسبی هیدروژن و هلیم در جهان

در زمان $t=225\text{s}$ نسبت پروتون به نوترون در جهان 7، به یک بود و تقریباً همه آنها به ^4He و یا به ^1H تبدیل شدند. پس از این زمان فراوانی نسبی ^4He و ^1H (بر حسب جرم) چقدر بوده است.

حل:

هسته ^4He دارای دو پروتون و دو نوترون می‌باشد. برای هر دو نوترون موجود در زمان $t=225\text{s}$ 14 پروتون موجود بوده است. دو نوترون و دو پروتون از 14 پروتون یک هسته ^4He ایجاد می‌کردند. دوازده پروتون باقی مانده به ^1H تبدیل می‌شدند. پس سرانجام 12 هسته ^1H به ازای یک هسته ^4He موجود بوده است. جرم هسته ^1H و ^4He به ترتیب 1u و 4u است، بنابراین به ازای 12u از ^1H ، 4u از ^4He موجود بوده است. بنابراین وفور نسبی بر حسب جرم، 75% ^1H و 25% ^4He بوده است. این تناسب با تخمین زمان حاضر از وفور نسبی H-He در جهان است

سنتز هسته ای بیشتری تا زمان $t = 10^{13}\text{s}$ حدود 380000 سال بعد رخ نداد. در آن زمان، دما به حدود 3000 درجه کلوین و انرژی میانگین در حدود چند دهم الکترون ولت کاهش یافت. چون انرژی یونیزاسیون اتم‌های هیدروژن و هلیم به ترتیب برابر 13.6eV و 24.5 eV است، تقریباً تمامی هسته‌های هیدروژن و هلیم از نظر الکتریکی خنثی بودند (نه یونیزه). با حذف جاذبه الکتریکی بین هسته‌ها در اثر تبدیل به اتم خنثی، جاذبه گرانشی وارد عمل شد، آنها به تدریج به هم نزدیک شده ابرها و ستاره‌ها شکل گرفتند. بر این باورند که هسته‌های سنگین در اثر واکنش‌های گرما هسته ای در ستارگان بوجود آمدند. در بخش 8-43 در باره یک چرخه واکنش ترموهسته ای بحث گردید که سرچشمه انرژی تابشی ستاره‌ها است و در آن ^1H به ^4He تبدیل می‌شود.

برای ستارگانی با جرم 40% جرم خورشید و یا بیشتر، در هنگامی که هیدروژن مصرف می‌گردد هسته ستاره شروع به متراکم شدن می‌کند فشار گرانشی درونی بر فشار تابشی و گازهای خروجی غلبه می‌یابد. انرژی پتانسیل گرانشی همزمان با متراکم شدن هسته کاهش می‌یابد و بنابراین انرژی جنبشی آنها در هسته ستاره افزایش می‌یابد. سرانجام دمای هسته بقدر کافی زیاد می‌شود تا فرایند دیگری بنام گداخت هلیم (helium fusion) آغاز گردد. ابتدا دو ^4He نوب شده و یک ^8Be ایجاد می‌شود. گرچه طول عمر این هسته ناپایدار کوتاه است اما چگالی زیاد هسته و احتمال برخورد بین هسته‌ها اغلب رخ می‌دهد، احتمال غیر صفری وجود دارد که هسته ^4He سومی با هسته ^8Be پیش از واپاشی آن در هم گداخته گردند. نتیجه این فرایند به منزله گداخت سه هسته ^4He و پیدایش یک هسته پایدار ^{12}C خواهد بود. این فرایند **فرایند سه گانه آلفا triple-alpha process** نام دارد. گداخت‌های متوالی هسته‌های ^4He ، هسته‌های سنگین تر ^{16}O ، ^{20}Ne

تاریخ مختصر جهان

عصر یونها

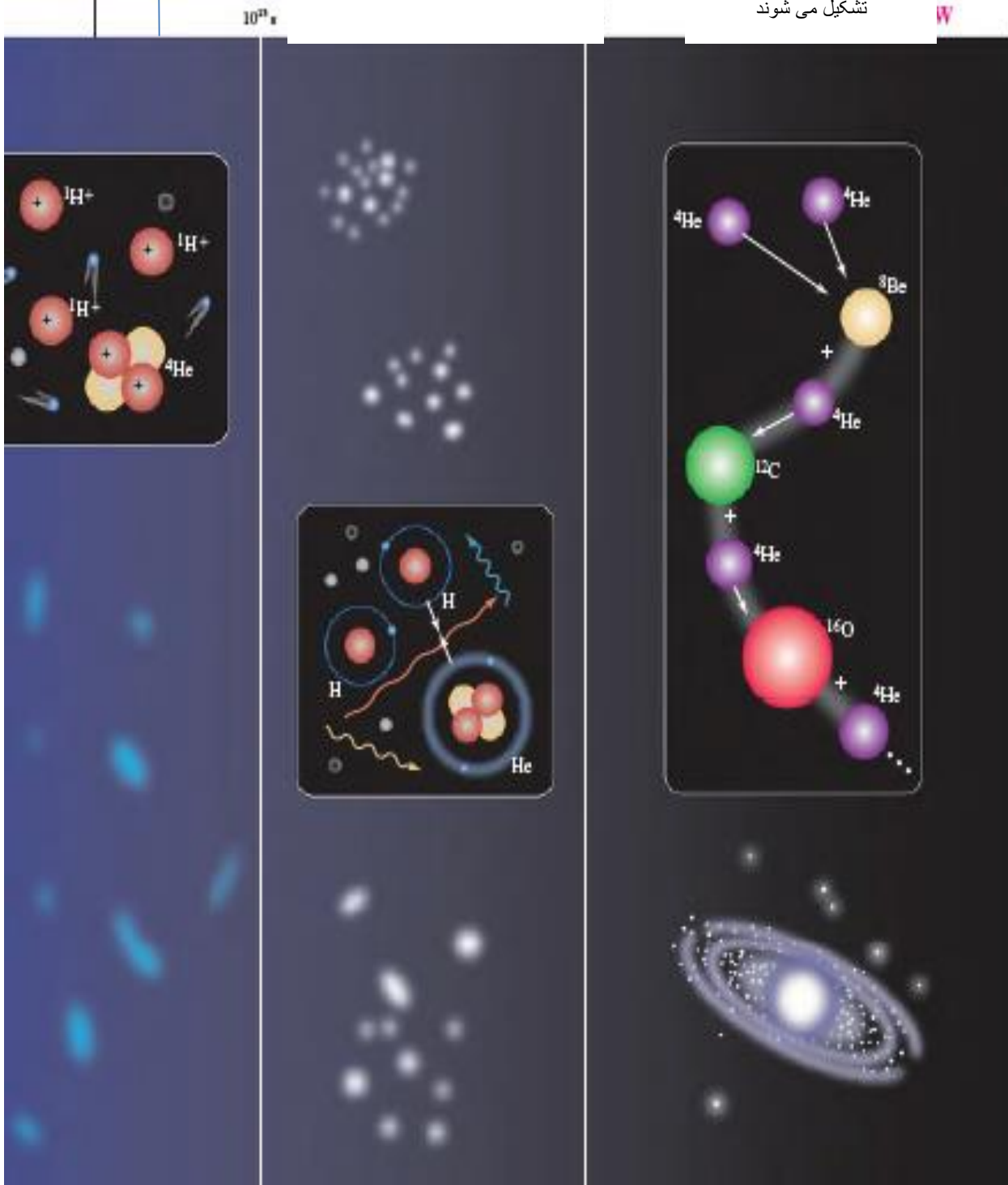
گاز های H و He در حال انبساط و سرد شدن

عصر اتمها

اتمهای خنثی شکل گرفته و با گرانش به سوی هم گرد می آیند
جهان برای اغلب نورها شفاف است

عصر ستارگان و کهکشان ها

گداخت گرما هسته ای ستارگان آغاز و هسته های سنگین تر تشکیل می شوند



عصر نوکلئون ها و پادنوکلئون ها

عصر کوآرک ها و گلوئون ها (دوره GUT)

کوآرکها با هم پیوند یافته ن. کلنوم ها و پاد نوکلئون ها را شکل می دهند.

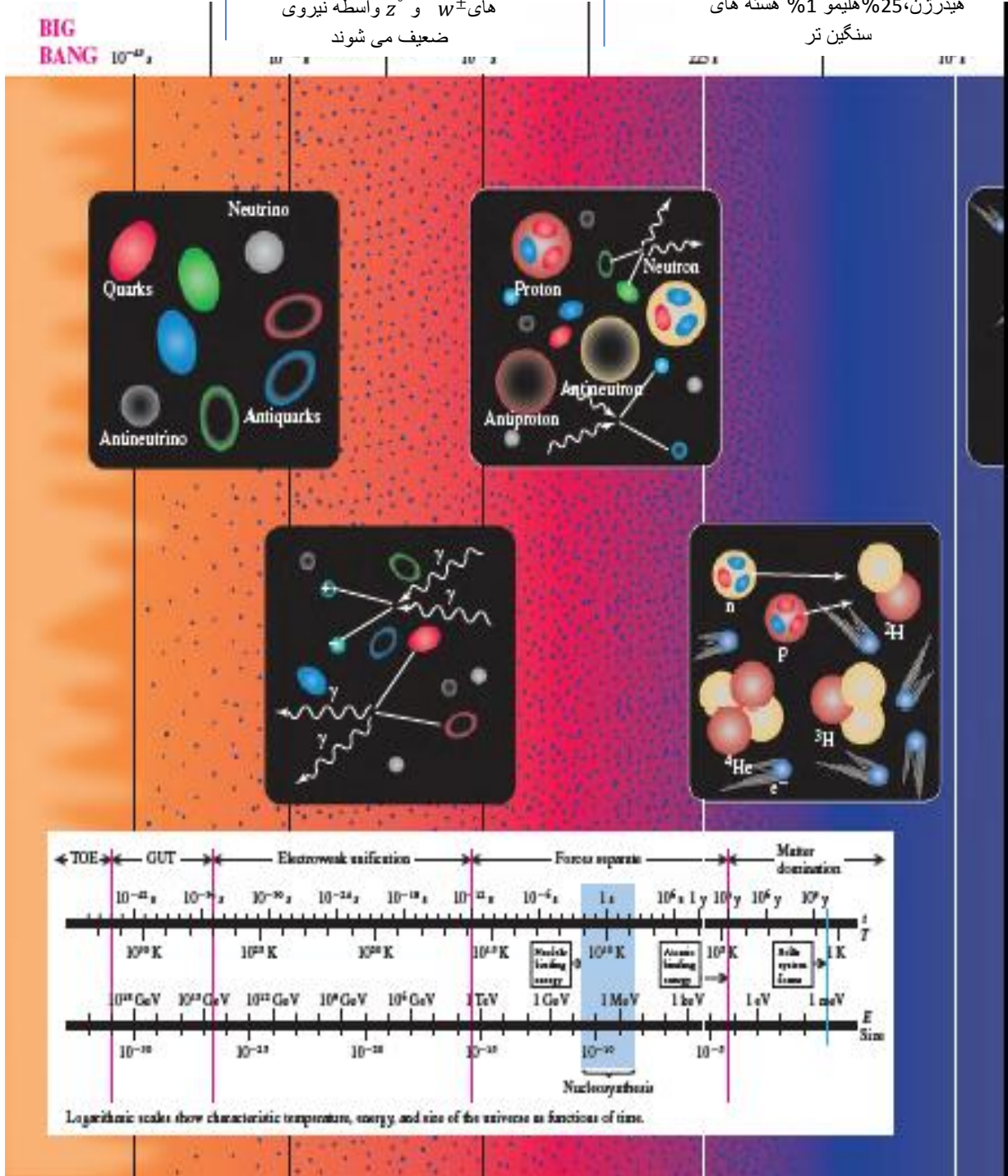
تراکم چگال ماده و پادماده گراتش، نیروئی مجزا کوآرکها بیشتر از پادکوآرکها دوره تورم (10^{-35} s) انبساط سریع نیزوی قوی از روضعیف متمایز و مجزا می شد

د. 10^{-2} s. از مه بانگ اند؟ ی لازم برای جفت نوکلئون-پادنوکلئون م بوده است

عصر سنتز هسته ها

دوترون پایدار درصد اختلاط مواد 74% هیژرن، 25% هلیوم، 1% هسته های سنگین تر

لپتونها از حورجها منمیر شده بوزون های Z^0 و W^\pm واسطه نیروی ضعیف می شوند



و ^{24}Mg را بوجود می آورند. همه این واکنش ها انرژی ده هستند. انرژی آزاد شده این واکنشها باعث گرم شدن ستاره می شوند، و گداخت ^{16}O و ^{12}C نیز موجب شکل گیری عناصری با عدد اتمی بالاتر و بالا تر می گردند.

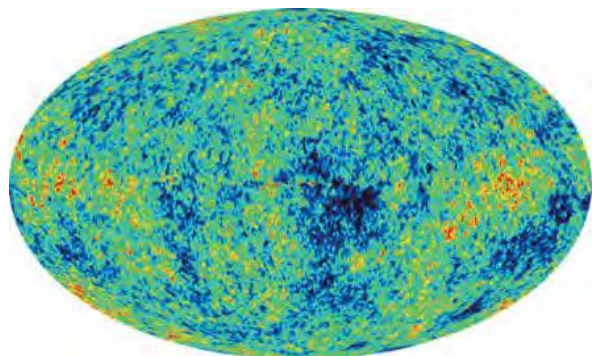
برای هسته هائی که به این ترتیب شکل می گیرند به ازای عدد اتمی $A=56$ یعنی ^{56}Fe انرژی بستگی بر هسته ماگزیم می شود. بنابر این واکنش های گداخت هسته ای انرژی ده در Fe متوقف می شود. اما گیر اندازی های متوالی نوترون های حاصل از فروپاشی های بتا امکان سنتز هسته های سنگین تر را ایجاد می کند. اگر جرم ستاره به حد کافی زیاد باشد به تدریج به صورت ابر نو اختر supernova منفجر شده و موادسنگین تشکیل یافته از فرایند های پیشین را به فضا پرتاب می کند(شکل 44-21 ؛ همچنین شکل 37-3 را ببینید). اثر گرانش میتواند پس مانده های مواد حاصل از انفجارها و ماده بین ستاره ای در فضا را گرد آورده، نسل جدیدی از ستاره ها و سیاره ها را به وجود آورد. خورشید یکی از همین ستارگان «نسل دوم» است. این بدان معنی است سارات خورشید و هر چیزی درون آنها (شامل خود شما هم می شود) مدتها قبل در فضا به همراه یک ابر نو اخترمنفجر شده است. زمین ما هم به همین ترتیب شکل گرفته است.

شکل 44-21 سحابی پرده (veil Nebula) در صورت فلکی صلیب شمالی، بازمانده انفجار یک ابر اختر در 20000 سال قبل بوده است. گاز تزریقی از ابر اختر همچنان به سرعت در حرکت است. اصادم بین این گاز با حرکت سریع و مواد رقیق موجود در خلاء فضا گاز را تحریک کرده و باعث برافروختن ان می گردد. قسمت نشان داده شده این ابر گازی در تصویر 40 سال نوری (12 Pc) طول دارد.



تابش زمینه ای Background Radiation

در 1965 آرنو پنزیاس و روبرت ویلسون در آزمایشگاه تلفن بل در نیوجرسی هنگامی که در زمینه ارتباطات ماهواره ای کار می کردند، با قرار دادن آنتن میکروموج به سوی آسمان، گروهی از تب موجهای تابشی زمینه ای را دریافت کردند که انتشار آنها جهت مشخصی نداشت (این سیگنالها تولید 1% برفکی که روی صفحه تلویزیون در هنگامی که روی کانال مشخصی نیست مشاهده می شود را می نمایند) تحقیقات بیشتر نشان داد که فرکانس های این تب ها در فرمول پلانک برای جسم سیاه (رابطه 39-24 در بخش 39-5) صادق اند. طول موج نظیر بیشترین شدت برابر 1.063mm (واقع در گستره میکروموج) و قابل انطباق بر دمای مطلق $T=2.728\text{ K}$ است. پنزیاس و ویلسن با گروه فیزیکدانان دانشگاه پرینستون تماس گرفتند. این گروه در حال طراحی آنتنی بودند که با آن بتوان تابش های باقی مانده از تحولات جهان را ردیابی کرد. قبلا گفتیم که وقتی دما در حدود 3000 K بود(در حدود $t=380000$) اتمها شکل گرفتند. با شکل گرفتن اتمها تعداد ذرات باردار در ان زمان (نسبت به قبل) کاهش چشمگیر یافته بود و جهان در برابر میکروموجهای با طول موج زیاد شفاف شد. بنابر این تابش جسم سیاه 3000 K ادامه یافت و همراه با افت دما در اثر انبساط جهان، تا دمای کنونی (2.728K) سرد شد.



شکل 44-22 نقشه ای بارنگ مجازی تابش میکروموج را از داخل یک تخم مرغ تشنان می دهد. زمانی که این تابش گسیل می شد از عصر جهان 380000 سال می گذشت ناحیه ای که با رنگ آبی است بسیار سردتر و جگال تر بوده است. در درون این ناحیه سرد کهکشان ها شامل کهکشان راه شیری که درون ان منظومه شمسی زمین ما و خودما بخشی از ان هستیم شکل گرفته است.

تابش میکروموج زمینه ای، از مهمترین دلایل تجربی موبد نظریه مه بانگ است. شکل 44-22 یک نقشه مدرن از تابش زمینه ای کیهان است.

مثال 44-12 گسترش جهان

پس از $t=380000y$ ، حجم جهان چند برابر شده است؟

حل:

از ایده ای که جهان و تمامی طول موج های همراه آن که گسترش یافته اند استفاده می کنیم. قانون جابجایی وین، معادله (39-21)، طول موج ماگزیم λ_m در تابش جسم سیاه را با دمای T مرتبط می سازد. با داشتن دمای تابش زمینه ای کیهان در عصر حاضر (2.725 k) و در $t=380000y$ که برابر 3000K بوده است، می توانیم با دستیابی به این ضریب و از این روفاکتوری را که جهان گسترش یافته است را محاسبه کنیم.

محاسبه

بازنویسی معادله 39-21 نتیجه می دهد:

$$\lambda_m = \frac{2.9 \times 10^{-3} m \cdot K}{T}$$

از آنجا که طول موج ماگزیم با T نسبت عکس دارد، همزمان با انبساط جهان تمامی طول موج های بین کیهانی (شامل λ_m) متناسب با عامل مقیاس R افزایش یافته اند. دما به نسبت $1100 \approx 3000k/2.725k$ کاهش یافته است پس عامل قیاس باید به همین نسبت افزایش یافته باشد. بنابراین بین زمان $t=380000y$ و زمان حاضر جهان با ضریبی تقریباً برابر 1100 بار انبساط یافته است.

ارزیابی

نتیجه بدست آمده نشان میدهد که از زمان $t=380000y$ ، حجم بین کهکشانی با ضریبی برابر $1.3 \times 10^9 = (1100^3)$ افزایش یافته است. این نتایج همچنین نشان میدهد در هنگام گسیل تابش زمینه ای، ستیغ طول موج ان برابر $\frac{1}{1100}$ زمان فعلی آن یعنی 1.063mm یا 967 nm بوده است. این مقدار در رنج طیف نور مادون قرمز است.

ماده و ضد ماده Matter and Antimatter

یکی از مهم ترین جنبه های جهان ما، عدم تقارن بین ماده و پادماده است. ممکن است تصور شود که جهان بایستی دارای تعداد مساوی پروتون و پادپروتون و یا الکترون و پوزیترون باشد، اما بنظر نمی رسد که این موضوع صحیح باشد. نظریه های مربوط به جهان کهن بایستی این عدم تقارن را توضیح دهد.

اشاره کردیم که در اغلب نظریه های وحدت بزرگ، به عدول از پایداری عدد باریون در انرژی های بالا معتقدند، که نیروهای قوی و الکترو ضعیف به وحدت گرانیده اند. چنانچه از تقارن ذره-پادذره نیز عدول شود، مکانیزمی ایجاد می شود که در آن تعداد کوارک از پادکوارک، لپتون از پادلپتون و در نتیجه مقدار ماده از پادماده بیشتر خواهد شد. یک مسئله جدی این است که هرگونه عدم تقارنی که بدین نحو در دوره GUT ایجاد می شده است بایستی در پایان این دوره برطرف شود. اگر چنین باشد می بایست سازو کاری نیز باشد که بار دیگر عدم تقارن ذره-پادذره را در زمانی دیرتر ایجاد کند. موضوع پیچیده عدم تقارن ماده-پادماده همچنان حل نشده باقی مانده است.

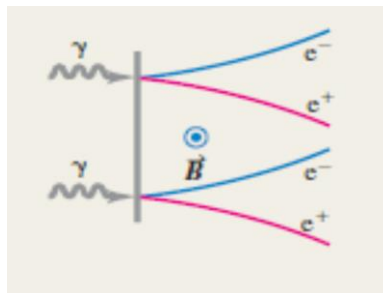
هنوز هم تعداد بیشماری از سئوالات در زمینه فیزیک ذرات و کیهان شناسی بی پاسخ مانده اند. مثلاً اینکه آیا چگالی انرژی جهان دقیقاً برابر $\rho_c c^2$ است و یا اینکه تفاوت کوچک ولی بسیار مهمی وجود دارد؟ انرژی سیاه چیست؟ آیا چگالی انرژی سیاه در طول تاریخ جهان ثابت مانده یا تغییر کرده است؟ ماده سیاه چیست؟ در طول دوره $10^{-43}s$ پس از مه بانگ چه حوادثی روی داده است؟ آیا می توانیم به مدتی که نشان دهد برهم کنش های قوی و الکترو ضعیف در انرژی های بالا به وحدت می رسند دست یابیم؟ تحقیقات برای یافتن پاسخ این سئوالات و بسیاری از ابهامات دیگر در جهان فیزیک ادامه دارد و یکی از ماجراجوئی های هیجان انگیز ذهن بشر است.

آموخته های خود را از بخش 44-7 آزمایش کنید

ایا با داشتن یک تلسکوپ بسیار قوی می توانیم فوتون های گسیل شده را زودتر از $t=380000y$ مشاهده کنیم؟

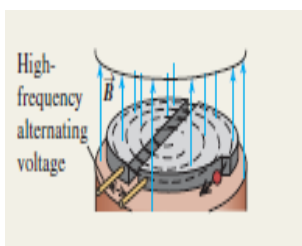
44 خلاصه فصل

مبنای پایه: هر ذره دارای یک پادذره است بعضی از ذرات، پادذره خود هستند. ذرات می توانند ایجاد شده و نابود شوند. بعضی از ذرات (و از جمله الکترون و پوزیترون) فقط به صورت جفت و یا در رابطه با ذره یا پادذره های دیگر تولید می شوند.



در بر هم کنش های اساسی، ذرات به عنوان واسطه عمل می کنند. واسطه بر هم کنش الکترومغناطیسی فوتون است. یوکاوا، وجود ذره مزون را حدس زد که به باور وی، واسطه برهمکنشهای هسته ای استو ذرات واسطه ای را که دلیل موجودیت آنها فقط اصل عدم قطعیت انرژی است، ذرات مجازی نامیده اند.

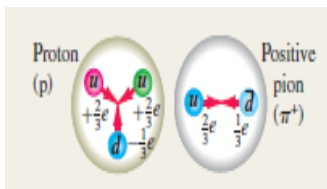
شتاب دهنده ذره و اشکارساز ها: سیکلوترون، سنکروترون و شتاب دهنده های خطی را برای شتاب دادن به ذرات باردار تا رسیدن به انرژی های بسیار بالا و کافی برای انجام بر هم کنش به کار می گیرند. اگر ذره هدف ساکن باشد فقط بخش کمی از انرژی باریکه صرف انجام واکنش می شود. اما این نقص در آزمایش ها برطرف شده است.



ذرات و بر هم کنش ها: در طبیعت چهار بر هم کنش اصلی مشاهده شده اند: قوی، الکترومغناطیسی، ضعیف، و گرانشی. می توان ذرات را بر حسب بر هم کنش آنها و کمیت هائی که در این بر هم کنش پایسته می مانند، دسته بندی کرد.

عدد اسپین در فرمیون ها مضرب فرد $1/2$ و در بوزون ها عدد صحیح است. لپتون ها بر هم کنش قوی ندارند. ذرات با بر هم کنش قوی را هادرون می نامند. هادرونها شامل مزون ها (که بوزون اند) و باریونها (که فرمیون اند) هستند. قانون پایستگی برای سه نوع متفاوت عدد لپتون و نیز عدد باریون صادق است (مثال های 4-44 و 6-44 را ببینید)

کوارک ها: هادرون ها از کوارک ها، مزون ها از کوارک-پاد کوارک و باریون ها از سه کوارک ترکیب شده اند. شش چاشنی کوارک وجود دارد. گلوئون ها واسطه بر هم کنش کوارک ها هستند. کوارک ها و گلوئون ها صفت دیگری موسوم به رنگ نیز دارند



تقارن و وحدت بر هم کنش ها: ملاحظات تقارن یک نقش محوری در تمام نظریه های مبانی ذره دارد. بر هم کنش های الکترومغناطیس و ضعیف در انرژی های بالا به بر هم کنش ضعیف تبدیل می شوند. در نظریه وحدت بزرگ، نیروی قوی نیز در انرژی های بسیار بالاتر از با بر هم کنش ضعیف وحدت می یابد



انبساط جهان و ترکیب آن بنا بر اصل هابل نشان می دهد که کهکشان ها از یک دیگر دور شده و جهان در حال انبساط است. ملاحظات نشان می دهند که رشد این انبساط بر اثر وجود انرژی تاریک افزایش می یابد که در حدود 72.6% انرژی جهان است. فقط 4.6% انرژی در جهان به شکلی است که ماده را تشکیل دهد، باقی 22.8% ماده تاریک است، که درباره ماهیت آن خیلی کم می دانیم (مثال 8-44 و 9-44 را ببینید)

بحث و پرسش

- 1-44 آیا این امکان وجود دارد که بخشی از جهان هستی حاوی ضد ماده باشد که در آن اتم‌ها دارای هسته‌ای باشند که از پاد پروتون و پاد نوترون تشکیل گردند و با پوزیترون‌ها احاطه شده باشند؟ چگونه می‌توان بدون پا گذاشتن به چنین جهانی در مورد وجود آن تحقیق کرد؟ آیا می‌توان این پاد اتم‌ها را با نور گسیل شده از آنها شناسایی کرد؟ توضیح دهید. اگر به این جهان برویم با چه فرایندهایی روبرو خواهیم شد؟
- 2-44 بر اساس اصل عدم قطعیت هایزنبرگ، آیا ممکن است جفت‌های ذره-پاد ذره را برای یک زمان بسیار کوتاه پیش از نابود کردن یک دیگر ایجاد کرد؟ آیا این به این معنی است که فضای خالی به راستی خالی است؟
- 3-44 در هنگام کشف ذرات موئون و پیون در دهه‌های 1930 و 1840 در تمایز این دو ذره از یک دیگر ابهاماتی وجود داشت، وجوه مشترک. افتراق آنها را شرح دهید.
- 4-44 نیروی گرانشی در بین دو الکترون 10^{-40} بار ضعیف‌تر از نیروی الکتریکی بین آن دو است. اما تجزیه و تحلیل برهم‌کنش‌های گرانشی بسیار زودتر از کشف برهم‌کنش الکتریکی کشف گردید. چرا؟
- 5-44 در هنگام واپاشی π^0 به دو فوتون چه بر سر کوارک‌های تشکیل‌دهنده آن می‌رود؟
- 6-44 چرا یک الکترون نمی‌تواند به دو فوتون تجزیه گردد و یا به دو نوترینو؟
- 7-44 بر طبق مدل استاندارد مبانی ذره، چه تشابهاتی بین باریون‌ها و لپتون‌ها هست؟ تفاوت‌های بارز آنها چیستند؟
- 8-44 بر طبق مدل استاندارد مبانی ذره، چه تشابهاتی بین کوارک‌ها و لپتون‌ها هست؟ تفاوت‌های بارز آنها چیستند؟
- 9-44 مهمترین مزایا و معایب شتاب‌دهنده با باریکه تصادم‌کننده در مقایسه با شتابگر‌های با هدف ثابت کدامند؟
- 10-44 آیا جهان مرکزی دارد؟ توضیح دهید.
- 11-44 آیا معنایی دارد که بپرسیم "اگر جهان در حال انبساط است این انبساط به کدام سمت و سو هست؟"
- 12-44 فرض کنید که جهان دارای یک لبه است. در یک آزمایش فکری خود را در این لبه قرار دهید، توضیح دهید چرا این فرض با اصل کیهان‌شناسی مابینت دارد؟
- 13-44 چرا اصل کیهان‌شناسی نیازمند آن است که در همه جای فضا H_0 مقداری یکسان داشته باشد ولی لزومی ندارد در زمان ثابت باشد؟

تمرینات

بخش 1-44 ذرات بنیادی - تاریخچه

- 1-44 یک پیون خنثی در حال سکون به دو فوتون فرو می‌پاشد. انرژی، بسامد و طول موج هر فوتون را بیابید. در کدام قسمت طیف مغناطیسی هر فوتون قرار می‌گیرد؟ (جرم پیون را برحسب جرم الکترون داده شده در بخش 1-44 حساب کنید)
- 2-44 دو فوتون با انرژی مساوی با یکدیگر برخورد کرده و یک دیگر را نابود کرده و یک جفت ذره μ^+ و μ^- تولید می‌کنند. جرم موئون در بخش 1-44 بر حسب جرم الکترون داده شده است. (a) ماکزیمم طول موج فوتون‌ها برای این اتفاق چقدر است؟ اگر فوتون دارای این طول موج باشد، حرکت μ^+ و μ^- بلافاصله پس از تولید چگونه است؟ (b) اگر طول موج هر یک از فوتون‌ها نصف مقدار محاسبه شده در قسمت (a) باشد، تندی هر موئون پس از آنکه از هم جدا می‌شوند چقدر است؟ از رابطه نسبیتی برای تکانه و انرژی استفاده کنید.
- 3-44 یک پیون مثبت در حال سکون به یک موئون مثبت و یک نوترینو فرو می‌پاشد. (a) به طور تقریبی چقدر انرژی در این واپاشی آزاد می‌شود؟ (فرض کنید دارای جرم سکون صفر است. جرم‌های موئون و پیون بر حسب جرم الکترون در بخش 1-44 آمده است) (b) چرا واپاشی یک موئون مثبت نمی‌تواند منجر به تولید یک پیون مثبت گردد؟
- 4-44 یک پروتون و یک پاد پروتون نابود شده و تولید دو فوتون می‌نمایند. انرژی، بسامد و طول موج هر فوتون را حساب کنید در صورتی که (a) p و \bar{p} در حالت اولیه در حال سکون باشند و (b) p و \bar{p} با یک دیگر با انرژی جنبشی اولیه 830 MeV برخورد کنند.
- 5-44 برای واکنش هسته‌ای داده شده در معادله (2-44) فرض کنید که انرژی جنبشی اولیه انرژی جنبشی و تکانه واکنش ذرات قابل اغماض است. تندی ذره α را بلافاصله پس از خارج شدت از گستره واکنش حساب کنید.

6-44 گستره نیروی واسط یک ذره مزون ω که دارای جرم $783\text{MeV}/c^2$ است را تخمین بزنید.

7-44 سوخت سفینه مشهور اینتر پرایز تلویزیون و سینما، ترکیبی از ماده و پاد ماده است. اگر 400kg همه سوخت پاد ماده با سوخت ترکیب شود چقدر انرژی آزاد می شود؟ این مقدار انرژی چگونه با انرژی مصرفی سالانه ایالات متحده آمریکا به میزان $1.0 \times 10^{20}\text{J}$ مقایسه می گردد؟

بخش 2-44 شتاب دهنده های ذرات و آشکار کننده ها

8-44 الکترونی با انرژی کل 20.0GeV با یک پوزیترون پایدار برخورد می کند. (a) انرژی موجود چقدر است؟ (b) اگر الکترون و پوزیترون در داخل یک تصادم گر شتاب گیرند، چه مقدار انرژی کل متناظر با انرژی مساوی با انرژی قسمت (a) چقدر است؟

7-44 دوترون ها لحظه پیش از خروج از دی های یک سیکلوترون، روی دایره ای به شعاع 32.0cm می چرخند. فرکانس ولتاژ متناوب به کار رفته 9.00MHz است. مطلوب است: (a) شدت میدان مغناطیسی و (b) انرژی و تندی دوترون هنگام خروج

10-44 میدان مغناطیسی در سیکلوترونی که به پروتون ها شتاب می دهد 1.30T است. (a) باید در هر ثانیه چند بار پتانسیل «دی ها» تغییر جهت دهد؟ (این عدد دو برابر تعداد چرخش پروتون در ثانیه است). (b) ماکزیم شعاع سیکلوترون 0.250m است. ماکزیم تندی پروتون چقدر است؟ (c) باید پروتون را با چه اختلاف پتانسیلی شتاب دهند تا به تندی مذکور در بخش (a) برسد؟

11-44 (a) یک باریکه پروتون آلفا با یک اتم هلیوم ساکن هدف برخورد دارد. اگر انرژی قابل حصول در برخورد یک ذره 16GeV باشد. انرژی کل هر ذره از باریکه چقدر است؟ (b) اگر به جای این، ذرات آلفا با یک باریکه دیگر تصادم کند، انرژی هر یک از دو باریکه در آزمایش برخورد باریکه ها را به دست آورید.

12-44 (a) تندی پروتونی با انرژی کل 1000GeV چقدر است؟ (b) فرکانس زاویه ای ω پروتونی با تندی محاسبه شده در قسمت (a) در یک میدان مغناطیسی 4.00T چقدر خواهد شد؟ از هر دو رابطه غیر نسبیتی و نسبیتی استفاده کرده و این دو نتیجه را با هم مقایسه کنید.

13-44 در مثال 3-44 دیدیم که انرژی قابل وصول از باریکه پروتونی با انرژی 800GeV در برخورد به هدف ساکن 38.7GeV است. (a) از شما خواسته شده است تا یک شتاب دهنده بهتر که انرژی قابل وصول در برخورد به هدف ثابت را دو برابر کند، طراحی کنید. انرژی باریکه مورد نیاز چقدر است؟ (b) در آزمایش باریکه های برخورد کننده انرژی هر باریکه چقدر باشد تا انرژی قابل وصول برابر $77.4\text{GeV} = 2(38.7\text{GeV})$ شود؟

14-44 مینیم باریکه انرژی در یک تصادم پروتون-پروتون در واکنش $p + p \rightarrow p + p + \eta^0$ را حساب کنید. انرژی سکون ذره η^0 برابر 547.3MeV است (جدول 3-44 را ببینید)

بخش 3-44 ذرات و بر هم کنش ها

15-44 یک ذره مزون K^+ در حال سکون به دو ذره مزون π و پاشیده می شود. (a) ترکیبات مجاز π^+ ، π^- و π^0 به عنوان محصول واپاشی کدام است؟ (b) انرژی جنبشی مزون π را پیدا کنید.

16-44 وقتی یک موئون μ^- در حال سکون به یک الکترون و دو نوترینو فر می پاشد چقدر انرژی آزاد می شود؟ از جرم کوچک نوترینو صرف نظر کنید.

17-44 جرم (بر حسب کیلو گرم) ذره Z^0 چقدر است؟ نسبت جرم Z^0 به جرم پروتون چقدر است؟

18-44 جدول 3-44 نشان می دهد که یک Σ^0 به یک Λ^0 و یک فوتون واپاشی می شود. (a) اگر Λ^0 در حال سکون باشد، انرژی فوتون گسیل شده در این واپاشی را حساب کنید. (b) اندازه تکانه فوتون چقدر است؟ آیا منطقی است که از گشتاور نهائی و انرژی جنبشی Λ^0 صرف نظر کنیم؟

19-44 اگر یک Σ^+ در حال سکون به یک پروتون و یک π^0 متلاشی گردد، انرژی جنبشی کل محصولات واپاشی چقدر است؟

20-44 اکتشاف ذره Ω^- کمک کرد که هشت راهه جل مان تائید گردد. اگر یک واپاشی Ω^- به یک Λ^0 و یک K^- صورت گیرد، انرژی جنبشی کلی محصولات واپاشی چقدر است؟

21-44 در کدامیک از این واپاشی ها سه لپتون نگهداری می شوند؟ در هر حالت، دلایل خود را شرح دهید.

$$(a) \mu^- \rightarrow e^- + \nu_e + \bar{\nu}_e$$

$$(b) \tau^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\tau$$

$$(c) \pi^+ \rightarrow e^+ + \gamma$$

$$(d) n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$$

22-44 کدامیک از واکنش های زیر حفظ عدد باریون را متابعت می کنند؟

$$(a) p + p \rightarrow p + e^+$$

$$(b) p + n \rightarrow 2e^+ + e^-$$

$$(c) p \rightarrow n + e^- + \bar{\nu}_e$$

$$(d) p + \bar{p} \rightarrow 2\gamma$$

23-44 در کدامیک از واکنش ها یا واپاشی ها ی زیر عدد شگفتی پایدار می ماند؟

$$(a) K^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$$

$$(b) n + K^+ \rightarrow p + \pi^0$$

$$(c) K^+ + K^- \rightarrow \pi^0 + \pi^0$$

$$(d) p + K^- \rightarrow \Lambda^0 + \pi^0$$

24-44 (a) نشان دهید که ثابت جفت شدگی برای برهم کنش الکترومغناطیسی $e^2/4\pi\epsilon_0\hbar c$ بدون دیمانسیون است و دارای مقدار عددی $1/137.0$ می باشد. (b) نشان دهید در مدل بور تندی مداری یک الکترون در مدار $n = 1$ برابر c برابر ثابت جفت شدگی $e^2/4\pi\epsilon_0\hbar c$ است.

25-44 نشان دهید که ثابت جفت شدگی نیروی هسته ای $f^2/\hbar c$ بدون دیمانسیون است.

بخش 4-44 کوارک ها و هشت راهه

26-44 نه باریون با اسپین $3/2$ عبارتند از: چهار ذره Δ ، سه ذره Σ^* و دو ذره Ξ^* . مشخصات هر باریون چنین است: جرم هر یک از چهار ذره Δ برابر $1232 \text{ MeV}/c^2$ ، شگفتی هر یک صفر، بارهای آنها $(+2e, +e, -e)$ ، سه ذره Σ^* هر یک به جرم $1385 \text{ MeV}/c^2$ ، شگفتی 1- بارهای $(+e, -e)$ ، سرانجام دو ذره Ξ^* هر یک به جرم $1530 \text{ MeV}/c^2$ ، شگفتی 2-، بارهای (صفر و $-e$) این ذرات را بر روی نموداری که در آن s تابع Q باشد بریزید. مقادیر s و Q را برای ذره دهم دارای اسپین $3/2$ Ω^- تخمین زده و آن را روی نمودار خود جا دهید. همچنین ذرات را با جرم آنها بر چسب بزنید. جرم Ω^- برابر با $1672 \text{ MeV}/c^2$ است. این عدد با نمودار شما هم خوانی دارد یا نه؟ (b) ترکیب سه کوارکی (s, d, u) هر یک از این ده ذره را با نتیجه گیری منطقی تخمین بزنید. به هر یک از ذرات برچسب ساختار کوارکی زده سپس نمودار S بر حسب Q بخش (a) را مجددا رسم کنید. چه نوع قاعده و نظمی را مشاهده می کنید؟

27-44 بار الکتریکی، اعداد باریون، شگفتی، عدد کوانتمی و عدد افسون را برای کوارک های زیر تعیین کنید: (a) uds ؛ (b) $c\bar{u}$ ؛ (c) ddd و $d\bar{c}$ و دلایل خود را شرح دهید

28-44 بار الکتریکی و نیز اعداد کوانتمی: باریون شگفتی و افسون را برای ترکیب های کوارکی مقابل به دست آورید: (a) uus ؛ (b) $c\bar{s}$ ؛ (c) $d\bar{d}u$ و (d) $\bar{c}b$ استدلال خود را مشروحا بیان کنید.

29-44 نیروی ضعیف ممکن است در یک برهم کنش مزه کوارک را تغییر دهد. توضیح دهید واپاشی β^+ چگونه باعث تغییر مزه کوارک می شود. اگر یک پروتون تحت تاثیر واپاشی β^+ قرار گیرد واکنش واپاشی را مشخص کنید.

30-44 انرژی جنبشی کلی محصولات واپاشی وقتی یک ذره اسیلون در حال سکون فروپاشی می کند چقدر است؟

31-44 محتوای کوارکی نوترون udd است. (a) محتوای کوارکی پاد نوترون چیست؟ استدلال خود را شرح دهید؟ (b) آیا نوترون پاد ذره خود است؟ چرا آری یا چرا نه؟ (c) محتوای کوارکی ψ ، $c\bar{c}$ است. آیا پاد ذره خود است؟ دلیل خود را شرح دهید.

32-44 با فرض اینکه هر ذره ای فقط شامل ترکیباتی از $u, d, s, \bar{u}, \bar{d}, \bar{s}$ است، با استفاده از روش مثال 44-7 نتیجه بگیرید که کوارک شامل: (a) یک ذره با بار $+e$ عدد باریون 0 و عدد شگفتی $+1$ است؛ (b) ذره ای است با بار $+e$ ، عدد باریون -1 و عدد شگفتی $+1$ ؛ (c) ذره ای است با بار 0، عدد باریون $+1$ و عدد شگفتی -2 .

بخش 6-44 جهان در حال گسترش

33-44 طیف سدیم در نور منتشر از یک کهکشان مشاهده شده است. (a) اگر در اثر انتقال به سرخ طول موج 590.0 nm سدیم به 658.5 nm تبدیل می شود، سرعت دور شدن کهکشان از زمین، و (b) با استفاده از قانون هابل فاصله کهکشان از زمین را حساب کنید.

34-44 پارامتر انتقال به سرخ. تعریف پارامتر انتقال به سرخ z در مثال 44-8 داده شده است. (a) نشان دهید که معادله (44-13) را می توان به صورت $1+z = ([1+\beta]/[1-\beta])^{1/2}$ نیز نوشت. که در آن $\beta = v/c$. (b) پارامتر انتقال به سرخ مشاهده شده برای یک کهکشان برابر با $z = 0.500$ است. تندی کهکشان را نسبت به زمین پیدا کنید، اگر انتقال به سرخ ناشی از انتقال دوپلر باشد. (c) قانون هابل را به کار برده و فاصله این کهکشان را از زمین حساب کنید.

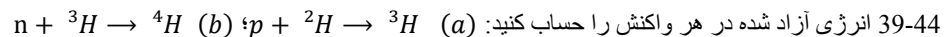
35-44 فاصله یک کهکشان واقع در صورت فلکی حوت جنوبی از زمین 5210 Mly ($= \text{Mly}$ = میلیون سال نوری) است. (a) با به کار گیری قانون هابل تندی دور شدن این کهکشان از زمین را به دست آورید. (b) برای نسبت λ_0/λ_s انتقال به سرخ نوری که از این کهکشان گسیل می شود چه عددی به دست می آید؟

36-44 (a) بر اساس قانون هابل، فاصله r یک کهکشان که با تندی c انتشار نور از زمین دور می شود چقدر است؟ (b) توضیح دهید چرا فاصله محاسبه شده در قسمت (a) در ابعاد جهان قابل رویت است؟ (از اثر کند شدن انبساط جهان ناشی از اثر گرانش صرف نظر می شود)

37-44 چگالی بحرانی جهان برابر $9.5 \times 10^{-27} \text{ kg/m}^3$ است. (a) با فرض اینکه جهان تماماً از هیدروژن است، چگالی بحرانی را بر حسب تعداد اتمهای H بر سانتی متر مکعب بیان کنید. (b) اگر چگالی جهان برابر با چگالی بحرانی باشد، چه تعداد اتم به طور متوسط، انتظار دارید در یک اتاق با ابعاد $3m \times 4m \times 7m$ یافت شود؟ (c) پاسخ خود را در بخش (b) با تعداد اتمی که در اتاق مشابهی با شرایط طبیعی روی زمین یافت می گردد مقایسه کنید.

بخش 7-44 آغاز زمان

38-44 (a) نشان دهید که رابطه طول پلانک $\sqrt{\hbar G/c^3}$ ، دارای بعد طول است. (b) مقدار عددی $\sqrt{\hbar G/c^3}$ را پیدا کرده و اندازه داده شده را در رابطه (44-21) بیازمائید.



40-44 انرژی آزاد شده (بر حسب MeV) در فرایند سه گانه آلفا $3 {}^4\text{He} \rightarrow {}^{12}\text{C}$ را حساب کنید.

41-44 انرژی واکنش Q (بر حسب MeV) را برای واکنش $e^- + p \rightarrow n + \nu_e$ حساب کنید. آیا این واکنش انرژی خواه است یا انرژی زا؟

42-44 انرژی واکنش Q (بر حسب MeV) را برای واکنش ترکیب هسته ای ${}^4_2\text{He} + {}^{12}_6\text{C} \rightarrow {}^{16}_8\text{O}$ حساب کنید. آیا واکنش انرژی زا است یا انرژی خواه؟

43-44 بیشترین طول موج تابشی جسم سیاه در دمای 2.728 K برابر 1.062 mm است. بیشترین طول موج در $t = 700000 \text{ y}$ که دما 3000 k بوده است را به دست آورید.

مسائل

44-44 اتم پوزیترونیم دارای یک الکترون و یک پوزیترون است. در مدل بور دو ذره بر گرد مرکز جرم مشترک شان می چرخند. در مدل بور، انرژی یونیزاسیون برای یک پوزیترون وقتی در حالت پایه خود قرار دارد چقدر است؟

45-44 در LHC می بایست هر الکترون را تا رسیدن به انرژی جنبشی 7.0 TeV شتاب دهند. (a) در هر برخورد در باریکه های برخورد کننده، انرژی قابل وصول E_a چقدر است؟ (b) در آزمایش با هدف ساکن که در آن باریکه پروتون را به یک پروتون ساکن (هدف) برخورد می دهند، انرژی کل ذرات در باریکه چند TeV باشد تا انرژی قابل وصول به اندازه مقدار محاسبه شده در (a) را ایجاد کند؟

46-44 یک پروتون و یک پاد پروتون با انرژی جنبشی یکسان با هم برخورد رو در رو می کنند. در دستگاه مرجع مرکز تکانه دو فوتون گاما با طول موج 0.780 fm تولید می شوند. انرژی جنبشی پروتون تابشی را به دست آورید.

44-47 پرتو درمانی با مزون π^- . باریکه های π^- مزون برای پرتو درمانی بعضی از انواع سرطان به کار می روند. انرژی از واپاشی کامل π^- به ذرات پایدار به دست می آید. (a) رابطه واپاشی یک ذره π^- مزون به ذرات پایدار را بنویسید. این ذرات چه هستند؟ (b) چه مقدار انرژی از واپاشی کامل یک مزون π^- منفرد به ذرات پایدار می ناید؟ (از جرم کوچک ذرات نوترینو صرف نظر کنید) (c) به چه تعداد مزون π^- نیاز است واپاشی گردند تا دوزی برابر با 50.0 Gy به یک تومور 10.0 گرمی منتقل نمایند؟ (d) دوز معادل این انرژی در قسمت (c) بر حسب Sv و rem چقدر است؟ از جدول 3-43 کمک گرفته و بزرگترین RBE مناسب را برای ذرات درگیر در این واپاشی را استفاده کنید.

44-48 اگر باریکه π^- بر یک هدف ساکن بتابد، انرژی جنبشی استانه را برای واکنش $\pi^- + p \rightarrow \Sigma^0 + K^0$ حساب کنید. جرم K^0 برابر با $497.7 \text{ MeV}/c^2$

44-49 انرژی جنبشی استانه را برای انجام واکنش $p + p \rightarrow p + K^+ + K^-$ در صورتی محاسبه کنید که یک باریکه پروتون بر یک پروتون ساکن هدف بتابد.

44-50 یک مزون η^0 ساکن در حال سکون به سه مزون π فرو پاشیده می شود. (a) در این واپاشی صورت های مجاز π^+ و π^- کدامند؟ (b) انرژی جنبشی کل مزون π را در هر یک از فروپاشی ها حساب کنید.

44-51 هر یک از واکنش های زیر یک ذره واحد را از دست می دهد. عدد باریون، بار، شگفتی و سه عدد لپتون (هر جا که لازم است) ذره از دست رفته را به دست آورده و از آن ذره را مشخص کنید:

$$(a) p + p \rightarrow p + \Lambda^0 + ?$$

$$(b) K^- + n \rightarrow \Lambda^0 + ?$$

$$(c) p + \bar{p} \rightarrow n + ?$$

$$(d) \bar{\nu}_\mu + p \rightarrow n + ?$$

44-52 در صورتی که طول عمر میانگین $7.6 \times 10^{-21} \text{ s}$ باشد، مقدار پهنای انرژی (عدم قطعیت انرژی) ψ را حساب کنید. چه کسری از این مقدار انرژی مربوط به انرژی سکون است؟

44-53 مزون ϕ دارای جرمی برابر 1019.4 MeV و یک پهنای انرژی $4.4 \text{ MeV}/c^2$ است. با استفاده از اصل عدم قطعیت، طول عمر مزون ϕ را تخمین بزنید.

44-54 یک مزون ϕ (مسئله 44-53 را ببینید) در حال سکون به صورت $\phi \rightarrow K^+ + K^-$ واپاشی می گردد دارای شگفتی 0 است. (a) انرژی جنبشی مزون K^+ را حساب کنید (فرض کنید که دو واپاشی انرژی جنبشی یکسانی را تولید می کنند، زیرا جرم های آنها مساوی است). (b) دلیلی بیاورید که واپاشی $\phi \rightarrow K^+ + K^- + \pi^0$ مشاهده نشده است. (c) دلیلی بیاورید که واکنش های $\phi \rightarrow K^+ + \pi^-$ و $\phi \rightarrow K^+ + \mu^-$ مشاهده نمی شوند.

44-55 یک واپاشی پیشنهادی پروتون عبارت است از $p^+ \rightarrow e^+ + \pi^0$ است که آشکارا هر دو پایستگی عدد لپتون و باریون را نقض می کند، زیرا انتظار می رود که طول عمر پروتون طولانی باشد. فرض کنید نیم عمر پروتون برابر $1.0 \times 10^{18} \text{ y}$ باشد. (a) انرژی ذخیره شده بر کیلوگرم بافت بدن (بر حسب rad) بر اثر واپاشی پروتون ها در بدنشان را در عرض یک سال حساب کنید. بدن خود را به صورت تماما آب مدل کنید. فقط دو پروتون در اتم های هیدروژن در هر مولکول آب H_2O به قسمی که گفته شد فروپاشی خواهند کرد. آیا می دانید چرا؟ فرض کنید فرض کنید π^0 به دو فوتون γ واپاشی نماید، که در آن پوزیترون با یک الکترون نابود می گردد، و تمام انرژی حاصله از واپاشی اول و این واپاشی های ثانویه در بدن شما باقی می ماند. (b) دوز معادل را (بر حسب rem) با فرض اینکه 1.0 RBE برای تمام محصولات تشعشع باشد، و آن را با 0.1 rem برای سوابق طبیعی و 5.0 rem برای کارکنان صنعتی مقایسه کنید. بر مبنای محاسبات شما، آیا طول عمر پروتون می تواند به اندازه $1.0 \times 10^{18} \text{ y}$ کوتاه شود؟

44-56 یک ذره Ξ^- در حال سکون به یک ذره Λ^0 و یک π^- واپاشیده می شود. (a) انرژی جنبشی کلی محصولات فروپاشی را حساب کنید. (b) چه کسری از انرژی به وسیله هر ذره تولید می شود؟ (از رابطه نسبیتی تکانه و انرژی استفاده کنید)

44-57 مدل کروی یک بالن را که انبساط دو بعدی جهان را مجسم می کند، در نظر بگیرید (شکل 44-17 در بخش 44-6 را ببینید) کوتاهترین فاصله بین دو نقطه روی این سطح کمانی به طول r است، که در آن $r = R\theta$ است. وقتی بالن انبساط می یابد، شعاع R افزایش می یابد، اما زاویه θ بین دو نقطه ثابت می ماند. (a) توضیح دهید چرا، در هر زمانی $(dR/dt)/R$ برای تمام نقاط روی بالن ثابت می ماند. (b) نشان دهید در تمام لحظات $v = dr/dt$ مستقیما متناظر با r است. (c) از پاسخ تان به قسمت (b) رابطه برای ثابت هابل H_0 بر حسب R و

dr/dt چیست؟ (d) رابطه ای که برای H_0 در قسمت (d) یافته شد در فضا ثابت است. R چه مقداری باید داشته باشد تا H_0 در زمان نیز ثابت بماند؟ (e) آیا پاسخ شما به قسمت (d) با نسبت مشاهده شده برای انبساط جهان انطباق دارد؟

58-44 فرض کنید تمامی وضعیت ها در مسئله 44-57 با یک دیگر یکسان هستند مگر که $v = dr/dt$ برای یک θ مفروض، بزرگتر از H_0 در زمان ثابت است. نشان دهید مه ثابت هابل برابر است با $H_0 = 1/t$ و بنابراین مقدار جریان برابر $1/T$ است، در جایی که T سن جهان است.

59-44 **انقباض کیهانی.** دانسیته های ماده معمولی و ماده تاریک با انبساط جهان کاهش یافته است، زیرا مقدار یکسانی از جرم یک حجم از هر سو توسعه یافته را اشغال می کند. این در حالیتی که تاکنون مشاهدات ما این بوده که مقدار چگالی انرژی تاریک در تمام تاریخ شکل گیری جهان هستی ثابت مانده است. (a) توضیح دهید چرا انبساط جهان حقیقتاً در ابتدای تاریخ کاهش یافته اما اکنون سرعت گرفته است. "انقباض" عبارتی است که برای یک تغییر در شتاب به کار می رود، بنابراین انبساط کیهانی از کاهش یافتن به افزایش یافتن را انقباض کیهانی می نامیم. (b) محاسبات نشان می دهند که تغییر در شتاب گرفتن زمانی رخ داد که چگالی ترکیب ماده از تمام انواع دوبرابر چگالی انرژی تاریک بوده است. در مقایسه با ضریب مقیاس امروزه، مقدار ضریب مقیاس در آن زمان چه بوده است؟ (c) خوشه کهکشان را در شکل 15-44 و b-19-44 را آن طوری که در 300 میلیون سال و 1.2 بیلیون سال قبل بوده اند را مشاهده کردیم. در این زمان ها آیا سرعت انبساط جهان کاهش یافته یا افزایش یافته است؟ (تذکر: عنوان شکل 19-44 را ببینید)

60-44 مزون K^0 دارای انرژی سکون 497.7 MeV است. یک ذره مزون K^0 در جهت محور $+x$ با انرژی جنبشی 225 MeV به یک π^+ و یک π^- وا پاشیده می شود که با زاویه ای یکسان در بالای و پائین محور $+x$ منتقل می شوند. انرژی جنبشی π^+ و زاویه ای که با محور $+x$ می سازد را حساب کنید. از روابط نسبیتی برای انرژی و تکانه استفاده کنید.

61-44 یک ذره Σ^- در جهت $+x$ با انرژی جنبشی 180 MeV به یک ذره π^- و یک نوترون وا پاشیده می شود. ذره π^- در جهت $+y$ حرکت می کند. مقدار انرژی جنبشی نوترون چقدر است؟ و جهت حرکت تندی آن چیست؟ از تعریف نسبیتی برای انرژی و تکانه استفاده کنید.

مسائل چالشی

62-44 برخوردی را در نظر بگیرید که در آن ذره ساکنی به جرم M با ذره دیگری به جرم m ؛ تندی v_0 و انرژی کل E_m (شامل انرژی سکون) بمباران میشود. (a) با استفاده از دستور تبدیل لورنتس مقادیر تندی v_m و v_M ذره های m و M را برحسب v_{cm} مرکز تکانه حساب کنید. (b) با در نظر گرفتن این واقعیت که تکانه کل در دستگاه مرجع مرکز تکانه صفر است، رابطه ای برای v_{cm} بر حسب m و M و v پیدا کنید. (c) از ترکیب پاسخ های (a) و (b) رابطه (9-44) را برای انرژی کل در دستگاه مرجع مرکز تکانه به دست آورید.