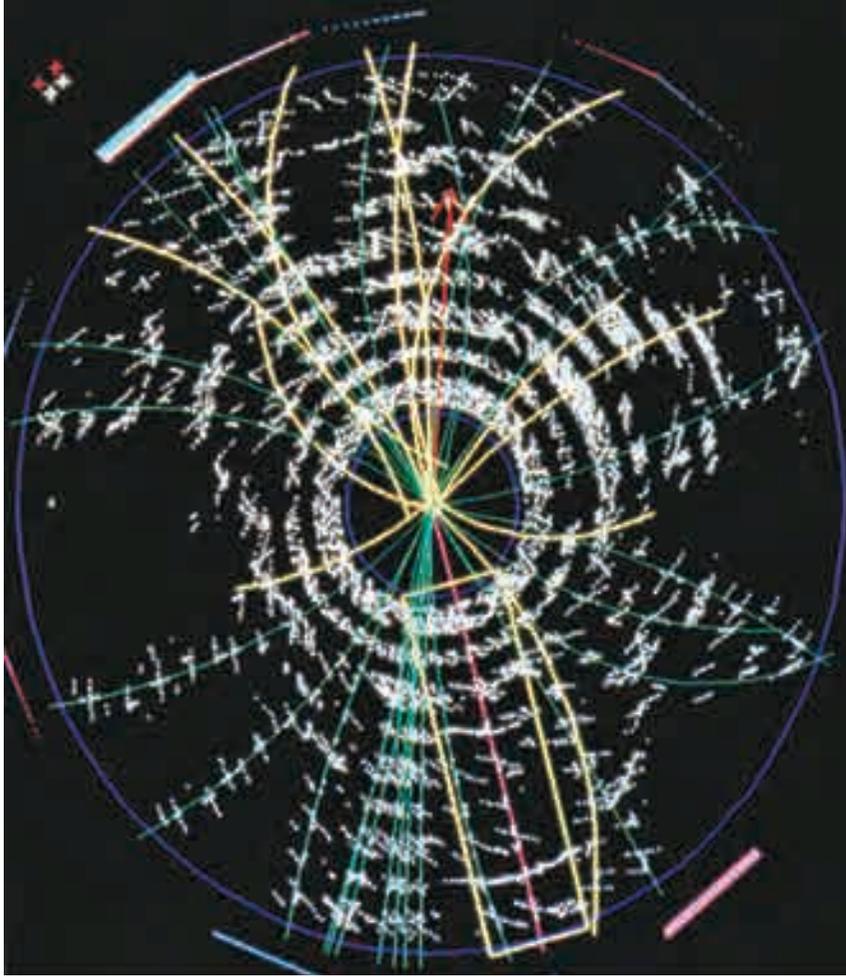
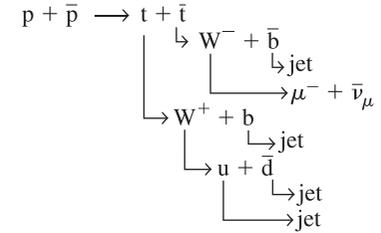


تمثل هذه الصورة التي أُعيد بناؤها حاسوبياً تصادم البروتون مع ضديد البروتون الذي حدث في مختبر فيرمي (الشكل 32-3) عند طاقة مشتركة تساوي 2 TeV تقريباً. يُعدّ هذا التصادم أحد الوقائع التي تعطي دليلاً على وجود الكوارك الذي يُسمّى قمة (1995)



. توضع الغرفة الانسيابية نحو السلك (البند 13-30) في مجال مغناطيسي. ويمثل نصف قطر الانحناء لمسارات الجسيم المشحون مقياساً لكمية التحرك لكل جسيم (الفصل 20). في حين تمثل النقاط البيضاء الأسلاك الكهربائية للغرفة الانسيابية (-16 V). أما الخطوط الملونة فهي مسارات الجسيم. إنّ مدة حياة كوارك قمة (t) قصيرة جداً ($\approx 10^{-23}$ s) وبالتالي يصعب كشفها مباشرة. لذا، علينا البحث عن النواج المحتملة للاضمحلال. تشير عملية التحليل إلى التفاعل التالي والاضمحلال المتعاقب للنواج.



تتضمن الصورة أيضاً على فيض من الجسيمات (مجموعات من الجسيمات تتحرك تقريباً بالاتجاه نفسه) وميون (μ^-) مساره هو الأحمر الوردى المحصور بمستطيل أصفر كي يكون بارزاً. بعد قراءة هذا الفصل، حاول تسمية كل رمز من الرموز أعلاه. وعلق على قوانين الحفظ جميعها؛ هل حققت أم لا.

32 الفصل

الجسيمات الأولية

سنناقش في هذا الفصل والذي يليه في هذا الكتاب موضوعين من أكثر المواضيع إثارة في الفيزياء المعاصرة هما: الجسيمات الأولية في هذا الفصل، والكونيات وفيزياء الفلك في (الفصل 33). ويعدّ هذان الفصلان في مقدمة المعارف الإنسانية؛ حيث تعالج الجسيمات الأولية أصغر الأجسام في الكون، في حين تعالج الكونيات أكبر (وأقدم) ميزات الكون. إنّ القارئ الذي يريد فهم الجماليات العظيمة للعلوم المعاصرة - و/أو يريد أن يكون مواطناً صالحاً - سوف يرغب بقراءة هذين الفصلين حتى لو لم يكن هناك وقت لقراءتهما ضمن منهج الفيزياء.

سنناقش في هذا الفصل - قبل الأخير- من الكتاب فيزياء الجسيمات الأولية التي تمثل محاولة الجنس البشري في فهم لبنات البناء الأساسية للمادة. لقد كان معروفاً في منتصف ثلاثينيات القرن الماضي أنّ الذرات جميعها يمكن أن تكون مكونة من نيوترونات، وبروتونات، وإلكترونات. كما أنّ المكونات الأساسية للكون لم تعد تعتبر الذرات ولكنها بالأحرى البروتون والنيوترون والإلكترون. إضافة إلى هذه الجسيمات الأولية الثلاثة، هناك أيضاً جسيمات عديدة أخرى معروفة هي: البوزيترون (إلكترون موجب)، والنيوترينو، وجسيم γ (أو الفوتون) لتشكل ما مجموعه ستة جسيمات أولية.

وفي خمسينيات وستينيات القرن الماضي، تم اكتشاف أنواع جديدة وكثيرة من الجسيمات التي تشبه النيوترون والبروتون، بالإضافة إلى جسيمات كثيرة متوسطة الحجم تُسمى *ميزونات*، والتي كتلتها في الأغلب أقل من كتل النيوكليونات ولكنها أكثر من كتلة الإلكترون. شعر الفيزيائيون أنه لا يمكن أن تكون هذه الجسيمات كلها أساسية، ويجب أن تكون مؤلفة من مكونات أصغر منها بكثير، سُميت *كواركات*.

في الوقت الحاضر، تعدّ الكواركات المكونات الأساسية للمادة (تتكون كل من البروتونات، والنيوترونات والأنيوية الذرية، والميزونات من كواركات) بالإضافة إلى الليبتونات (مجموعة تشتمل على الإلكترونات، والبوزيترونات والنيوترينات)، إلى جانب أن هناك أيضًا حاملات القوة التي تضم *الغلونات* والفوتونات. تُسمى النظرية التي تصف نظرتنا الحالية بـ "النموذج المعياري". إنَّ كيفية التوصل إلى فهمنا الحاضر للجسيمات الأولية هو موضوع هذا الفصل. أحد التطورات الحديثة والمثيرة التي ظهرت خلال السنوات القليلة الماضية هو التركيب الذي نشأ بين دراسة الجسيمات الأولية وفيزياء الفلك (الفصل 33). في الحقيقة، تشير المشاهدات الحديثة في فيزياء الفلك إلى نتيجة مفادها أن الجزء الأكبر من محتوى الكون من "الكتلة - الطاقة" ليس المادة العادية، ولكنه مكون من شكلين غامضين ومخفيين هما: المادة المعتمة والطاقة المعتمة اللتين لا يمكن شرحهما من خلال النموذج المعياري في شكله الحالي.

1-32 جسيمات الطاقة العالية والمسارات

في السنوات التي تلت الحرب العالمية الثانية، وجد أنه إذا كان للجسم الساقط في تفاعل نووي طاقة كافية، فإنَّ أنواعًا جديدة من الجسيمات يمكن أن تنتج. استخدمت في التجارب المبكرة *الإشعاعات الكونية*، وهي جسيمات تصطدم بالأرض من الفضاء الخارجي. أما في المختبر، فقد بُنيت مسارعات لتعجيل البروتونات والإلكترونات، على الرغم من أنَّ الأيونات الثقيلة قادرة على التعجيل أيضًا. استخدمت مسارعات الطاقة هذه في سير النواة بشكل أكثر عمقًا، وفي إنتاج جسيمات جديدة ودراستها للحصول على معلومات عن القوى الأساسية ومكونات الطبيعة. وبما أنَّ طاقات الجسيمات المقذوفة عالية، فإنَّ هذا المجال يُسمى أحيانًا *فيزياء الطاقة العالية*.

طول الموجة والتحليل

يمكن للجسيمات المعجلة إلى طاقة عالية سبر ما في داخل الأنوية والنيوكليونات التي تصطدم بها. وهناك عامل مهم، وهو أنَّ المقذوفات التي تتحرك بسرعات عالية يمكن أن توحى بتفاصيل أكثر. يعطى طول الموجة للجسيمات المقذوفة بصيغة دي برولي للطول الموجي (المعادلة 27-8).

$$(1-32) \quad \lambda = \frac{h}{p}$$

طول موجة دي برولي

أي أنه كلما زادت كمية التحرك p للجسيم المقذوف قلَّ طول الموجة. ناقشنا في (الفصل 25) الأجهزة البصرية، ولاحظنا أنَّ تحليل تفاصيل الصور يحدده طول الموجة: كلما قلَّ الطول الموجي، يمكن الحصول على تفاصيل أدق. هذا سبب واحد، تم في السنوات الماضية، من أسباب بناء مسارعات جسيمات الطاقة العالية للوصول إلى عمق أكثر في تركيب المادة، إلى الحجم الأصغر فالأصغر.

المثال 1-32 دقة تحليل حزمة من الإلكترونات

ما الطول الموجي لحزمة من الإلكترونات طاقتها 1.3-GeV، وما التحليل المتوقع لها؟
النهج: بما أنَّ الطاقة 1.3 GeV أكبر بكثير من كتلة السكون للإلكترون، فيجب أن نتعامل مع سرعات نسبية. نجد كمية التحرك للإلكترونات من (المعادلة 26-10)، والطول الموجي $\lambda = h/p$.

الحل: يمتلك كل إلكترون طاقة حركية تساوي $KE = 1.3 \text{ GeV} = 1300 \text{ MeV}$. وهي أكبر بحوالي 2500 من طاقة كتلة السكون للإلكترون ($0.51 \text{ MeV}/c^2$). لذا، يمكننا إهمال الحد $(m_0c^2)^2$ في المعادلة (10-26). $E^2 = p^2c^2 + m_0^2c^4$. ونحلّها بالنسبة إلى p . لنحصل على:

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

وعليه، فإنّ طول موجة دي برولي يساوي

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{hc}{E}$$

حيث $E = 1.3 \text{ GeV}$. وهكذا فإنّ

$$\lambda = \frac{(6.63 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s})(3.0 \times 10^8 \text{ m/s})}{(1.3 \times 10^9 \text{ eV})(1.6 \times 10^{-19} \text{ J/eV})} = 0.96 \times 10^{-15} \text{ m}$$

أو تساوي 0.96 fm . هذا التحليل يساوي تقريبًا 1 fm . وهو من الرتبة نفسها لحجم الأنوية (انظر إلى المعادلة 1-30).

ملحوظة: إنّ القيمة القصوى للتحليل المحتمل لهذه الحزمة من الإلكترونات أكبر بكثير من حزمة ضوئية في الميكروسكوب الضوئي ($\lambda \approx 500 \text{ nm}$).

التمرين أ: ما طول موجة بروتون طاقته الحركية $KE = 1.00 \text{ TeV}$ ؟

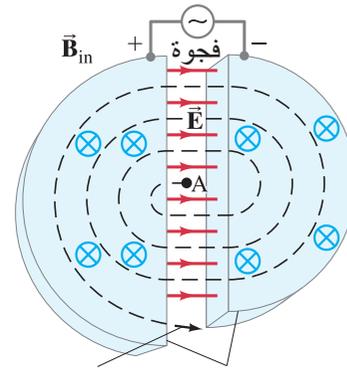
وهناك سبب رئيس آخر لبناء مسارعات الطاقة العالية هو أنّ جسيمات جديدة كتلتها أكبر يمكن أن تُنتج عند طاقات عالية. وتحوّل الطاقة الحركية للجسيمات المتصادمة إلى جسيمات أثقل عن طريق $E = mc^2$. كما سنرى لاحقًا. أمّا الآن، فسنناقش مسارعات الجسيمات.



الشكل 1-32 أرنست لورنس عام 1930 يمسك بأول سيكلوترون (نلاحظ أنّ غرفة الفراغ تحيط به).

السيكلوترون

لقد تمّ تطوير السيكلوترون في عام 1930 من قبل العالم أرنست لورنس (1901 – 1958، الشكل 1-32) في جامعة كاليفورنيا. يستخدم في السيكلوترون مجال مغناطيسي يجعل الأيونات المشحونة – عادة بروتونات – تتحرك في مسارات دائرية. وعلى الرغم من أنّ السيكلوترون البسيط لم يعد يستخدم من قبل علماء فيزياء الجسيمات، إلا أنه يستخدم بشكل واسع في الطب لعلاج السرطان. كما أنّ مبدأ تشغيله مفيد لفهم السيكلوترون الحديث. تتحرك البروتونات في فراغ داخل جوييفين على شكل حرف D- كما هو موضح في (الشكل 2-32). تتسارع البروتونات في كل مرة تمرّ فيها خلال الفجوة التي بين التجوييفين بسبب فرق الجهد بينهما (القوة الكهربائية) مما يؤدي إلى زيادة سرعة البروتونات. وبالتالي زيادة نصف قطر انحناء مساراتها في المجال المغناطيسي. وبعد دورات كثيرة، تكتسب البروتونات طاقة حركية عالية، وتصل إلى الحافة الخارجية للسيكلوترون حيث تصطدم بالهدف. تزداد سرعة البروتونات فقط عندما تكون في الفجوة التي بين التجوييفين. حيث يجب أن يكون الجهد مترددًا. عندما تتحرك البروتونات إلى اليمين عبر الفجوة التي في (الشكل 2-32). فإنّ التجوييف الأيمن يجب أن يكون سالبًا كهربائيًا. أمّا التجوييف الأيسر فيجب أن يكون موجبًا. وبعد نصف دورة، تتحرك البروتونات نحو التجوييف الأيسر الذي يجب أن يكون سالبًا حتى يتمكن من تعجيلها.



"الحجرتان الشبيهتان الشعاع الخارج بحرف 'D'"

الشكل 2-32 مخطط للسيكلوترون. يؤثر مجال مغناطيسي (داخل الصفحة) بواسطة مغناطيس كهربائي كبير. تبدأ البروتونات من النقطة A حيث مصدر الأيونات. إنّ خطوط المجال الموضحة في الشكل هي لمجال كهربائي متردد في الفجوة عند لحظة معينة.

تردد السيكلوترون

يجب أن يكون التردد f للجهد المؤثر مساوياً لذاك الذي للبروتونات التي تدور في المسار الدائري. عندما تدور أيونات شحناتها q في التجويف، فإن القوة المحصلة F التي تؤثر في كل واحد منها تنشأ من المجال المغناطيسي B . لذا، فإن $F = qvB$. حيث v سرعة الأيون في لحظة ما (المعادلة 20-4). إن القوة المغناطيسية عمودية على كل من \vec{v} و \vec{B} مما يجعل الأيونات تتحرك في مسارات دائرية. وهكذا، فإن التسارع داخل التجويفين يكون مركزياً ويساوي v^2/r . حيث r نصف قطر المسار الذي يتحرك فيه الأيون عند لحظة ما. وباستخدام قانون نيوتن الثاني $F = ma$ سنجد أن:

$$F = ma$$

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

وذلك عندما تكون البروتونات داخل التجويفين (وليست في الفجوة). وعليه

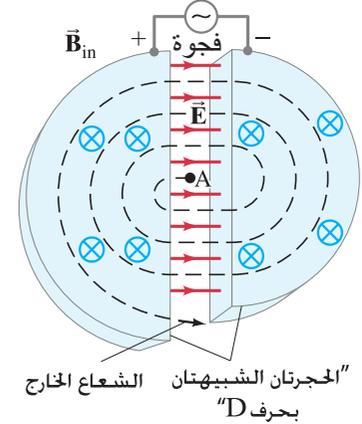
$$v = \frac{qBr}{m}$$

يُسمّى الزمن اللازم لإتمام دورة واحدة الزمن الدوري T ويساوي

$$T = \frac{\text{المسافة}}{\text{السرعة}} = \frac{2\pi r}{qBr/m} = \frac{2\pi m}{qB}$$

$$(2-32) \quad f = \frac{1}{T} = \frac{qB}{2\pi m}$$

وهذا هو ما يُسمّى بتردد السيكلوترون



الشكل 2-32 (مكرر)
مخطط للسيكلوترون

المثال 2-32 السيكلوترون

يعمل سيكلوترون صغير القيمة القصوى لنصف قطره $R = 0.25 \text{ m}$ على تعجيل بروتونات في مجال مغناطيسي شدته 1.7 T . احسب: (أ) التردد اللازم للجهد المتردد المؤثر. (ب) طاقة حركة البروتونات عندما تغادر السيكلوترون. **النهج:** إن تردد البروتونات التي تدور داخل التجويفين (المعادلة 2-32) يجب أن تساوي تردد الجهد المؤثر عبر الفجوة لتزداد سرعة البروتونات. **الحل:** (أ) من (المعادلة 2-32). نحصل على

$$f = \frac{qB}{2\pi m}$$

$$= \frac{(1.6 \times 10^{-19} \text{ C})(1.7 \text{ T})}{(6.28)(1.67 \times 10^{-27} \text{ kg})} = 2.6 \times 10^7 \text{ Hz} = 26 \text{ MHz}$$

وتقع هذه القيمة ضمن منطقة أمواج الراديو من الطيف الكهرومغناطيسي (الشكل 2-22). (ب) تغادر البروتونات السيكلوترون عند $r = R = 0.25 \text{ m}$. من العلاقة $qvB = mv^2/r$ نحصل على $v = qBr/m$ وبالتالي نجد أن

$$\text{KE} = \frac{1}{2} mv^2 = \frac{1}{2} m \frac{q^2 B^2 R^2}{m^2} = \frac{q^2 B^2 R^2}{2m}$$

$$= \frac{(1.6 \times 10^{-19} \text{ C})^2 (1.7 \text{ T})^2 (0.25 \text{ m})^2}{(2)(1.67 \times 10^{-27} \text{ kg})} = 1.4 \times 10^{-12} \text{ J} = 8.7 \text{ MeV}$$

أي أن طاقة الحركة أقل بكثير من طاقة كتلة السكون للبروتون (938 MeV) ولسنا بحاجة إلى تطبيق نظرية النسبية.

ملحوظة: لا يؤثر مقدار الجهد المؤثر بين التجويفين في الطاقة النهائية. ولكن، كلما زاد هذا الجهد، قل عدد الدورات اللازمة لإعطاء البروتونات الطاقة الكاملة.

الميزة المهمة للسيكلوترون هي أن تردد الجهد المؤثر- كما في (المعادلة 2-32)، لا يعتمد على نصف قطر r المسار الدائري للجسيم. ولهذا فإن التردد لا يتغير عندما تخرج البروتونات أو الأيونات من المصدر، ثم تتسارع في مسارات تتزايد أنصاف أقطارها أكبر فأكبر.

ولكن هذا صحيح فقط بالنسبة إلى الطاقات التي لا تخضع لنظرية النسبية. أما عند السرعات العالية، فإن كمية التحرك (المعادلة 4-26) تساوي $p = m_0 v / \sqrt{1 - v^2/c^2}$ لذا، نضع مكان m التي في المعادلة 2-32 الكمية γm_0 ويعتمد تردد السيكلوترون f (المعادلة 2-32) على السرعة v . ولجعل الجسيمات متزامنة؛ تستخدم آلة تُسمى سنكروترون لتقليل التردد، بموازاة زيادة الكتلة لنحصل على حزمة من الجسيمات المشحونة تزداد سرعتها وكتلتها في المدارات الكبيرة.

السنكروتون

السنكروتون

هناك طريقة أخرى لتسريع الجسيمات النسبية بزيادة المجال المغناطيسي B مع الزمن حتى يبقى التردد f (المعادلة 2-32) ثابتاً كلما زادت سرعة الجسيمات. تُسمى مثل هذه الأجهزة السنكروتون، وهي في الوقت الحاضر يمكن أن تكون ضخمة.

في المركز الأوروبي للأبحاث النووية (CERN) في جنيف، سويسرا، سيكون نصف قطر السنكروتون الجديد (2007) حوالي 4.3 km. ويعجل البروتونات إلى طاقة 7 TeV. أما نصف قطر مسارع تيفاترون في مختبر فيرمي (مختبر فيرمي القومي) فهو 1.0 km. يستخدم مسارع تيفاترون مغناط فائقة التوصيلية لتعجيل البروتونات إلى طاقة تصل إلى حوالي $1 \text{ TeV} = 1000 \text{ GeV}$ (ومن هنا جاء الاسم) حيث $1 \text{ TeV} = 10^{12} \text{ eV}$. يستخدم هذا السنكروتون الكبير حلقة ضيقة من المغناط (انظر إلى الشكل 3-32) حيث يوضع كل مغناطيس عند نصف القطر نفسه من مركز الدائرة. تفصل بين المغناط فجوات، حيث يعمل الجهد المرتفع على تعجيل الجسيمات. وهناك طريقة أخرى لوصف التعجيل هي أن الجسيمات تطفو مثل زبد على موجة كهرومغناطيسية تتحرك داخل جيوفيات تردد الراديو (RF).

الشكل 3-32 (أ) منظر جوي لمختبر فيرمي في بتافيا، إلينوي، المسارع الرئيس عبارة عن حلقة دائرية نصف قطرها 1.0 km. (ب) نفق المسارع الرئيس في مختبر فيرمي من الداخل. حلقة المغناط العلوية هي للمسارع 500-GeV القديم. في الأسفل، حلقة مغناط فائقة التوصيلية لمسارع تيفاترون 1-TeV.



(ب)



(أ)

يجب أن تتحرك الجسيمات المشحونة في مسار دائري نصف قطره ثابت عندما تحقن. ويتم إنجاز ذلك بتزويد الجسيمات بطاقة كبيرة بداية في مسارع أصغر (يُسمى مُحَقِّن). ثم يزداد المجال المغناطيسي ببطء عندما تزداد سرعته في السنكروتون الكبير.

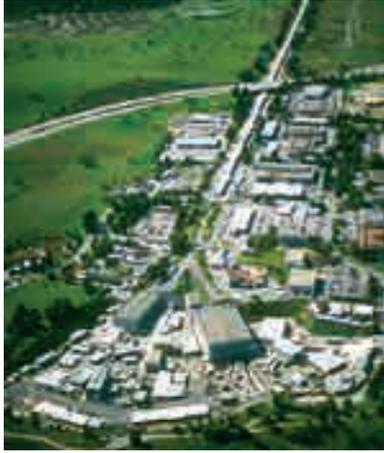
المشكلة الوحيدة في أي مسارع هو أن الشحنات الكهربائية المتسارعة تُشعّ طاقة كهرومغناطيسية (النظر إلى الفصل 22). وبما أن الأيونات والإلكترونات تعجل في المسارع، فإننا نتوقع فقدان مقدار كبير من الطاقة عن طريق الإشعاع. يزداد هذا التأثير مع زيادة الطاقة، ويكون مهماً خصوصاً في المسارعات الدائرية حيث يؤثر التسارع المركزي. كما في السنكروتون، ولذلك تُسمى إشعاع السنكروتون. وعلى أي حال، قد يكون إشعاع السنكروتون مفيداً. أحياناً، تكون هناك حاجة إلى حزم مركزة من الفوتونات، يتم الحصول عليها من تعجيل الإلكترون بواسطة السنكروتون.

إشعاع السنكروتون

المسارعات الخطية

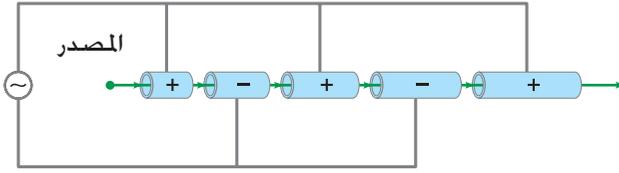
لينك

تعجل الإلكترونات أو الأيونات في المسارعات الخطية في مسار أو خط مستقيم مارة خلال موصلات أنبوبية كما في (الشكل 4-32 أ). الجهد المؤثر في الأنابيب متردد بحيث عندما تصل الإلكترونات (مثلاً) إلى فجوة ما، فإن الأنبوب الذي أمامها يكون موجياً، في حين يكون الأنبوب الذي غادرته للتو سالباً. وعند السرعات المنخفضة، تقطع الجسيمات مسافة أقل خلال الفترة الزمنية نفسها، لذا، تكون الأنابيب في البداية قصيرة. وبما أن كتلة الإلكترونات قليلة، فإنها تقترب من سرعة الضوء $v \approx c$ بشكل سريع. وتكون الأنابيب متساوية تقريباً في الطول. وتعدّ المسارعات الخطية مهمة خصوصاً لتعجيل الإلكترونات بسبب غياب إشعاع السنكروترون. إن أكبر مسارع خطي للإلكترونات موجود في ستانفورد (مركز المسارعات الخطي في ستانفورد، أو SLAC) كما في (الشكل 4-32 ب). يبلغ طول هذا المسارع حوالي 3 km (2 mi)، ويمكنه تعجيل الإلكترونات إلى طاقة تصل 50 GeV. وتحتوي العديد من المستشفيات على مسارعات خطية للإلكترونات التي تسقط بطاقة 10-MeV على شريحة فلزية لتنتج فوتونات أشعة جاما لتشعع بها الأورام.



(ب)

الشكل 4-32 (أ) مخطط بياني لمسارع خطي بسيط. (ب) صورة للمسارع الخطي في ستانفورد (SLAC) / كاليفورنيا.



(i)

الحزم المتصادمة

المصادمات

يمكن إجراء تجارب فيزياء الطاقة العالية عن طريق السماح لحزمة من الجسيمات بالارتطام بهدف ثابت. وللحصول على القيمة القصوى لطاقة التصادم المحتملة من مسارع ما، يتم تعجيل حزمين من الجسيمات إلى طاقة عالية جداً، ثم توجهان ليحدث لهما تصادم رأسي مباشر. وهناك طريقة واحدة للحصول على حزمتي التصادم من مسارع واحد باستعمال حلقات التخزين، التي يمكن من خلالها جعل الحزم التي تدور عكس بعضهما أن تصادم بشكل متكرر عند نقطة معينة. على سبيل المثال، في التجارب التي أعطت الدليل القوي على وجود كوارك قمة (انظر إلى الصورة الافتتاحية للفصل والبند 9-32) تم في مختبر فيرمي تعجيل كل من البروتونات والبروتونات المضادة إلى طاقة 900 GeV للبحيث تصل الطاقة المشتركة الناتجة من التصادم الرأسي المباشر بينهما إلى 1.8 TeV. وقريباً، سيكون أكبر جهاز من هذا النوع هو مصادم هادرون الكبير (LHC)، في سيرن CERN قرب جنيف، حيث يبلغ محيطه 26.7 km (الشكل 5-32) ومن المتوقع أن يكتمل العمل به في عام 2007 تقريباً. كل من الشعاعين المتصادمين يحمل بروتونات ذات طاقة 7 تيرا إلكترون فولت 7-TeV ليكون إجمالي طاقة التفاعل يساوي 14 TeV.



(الشكل 5-32) تمثل الدائرة الكبيرة موضع النفق الذي يقع على عمق 100 m تحت الأرض في سيرن (قرب جنيف) على الحدود بين فرنسا وسويسرا، والذي سيكون مقر LHC. توضح الدائرة الأصغر موضع السنكروترون العملاق للبروتون الذي سيستخدم لتعجيل البروتونات قبل حقنها في LHC.

المثال 3-32 سرعة بروتون طاقته 1.0-TeV

ما سرعة بروتون ينتج بطاقة 1.0-TeV في مختبر فيرمي؟
النهج: الطاقة الحركية $KE = 1.0 \text{ TeV} = 1.0 \times 10^{12} \text{ eV}$ وهي أكبر بكثير من طاقة كتلة السكون للبروتون التي تساوي $0.938 \times 10^9 \text{ eV}$. لذا، يجب استخدام الحسابات النسبية. وبشكل خاص، سنستخدم (المعادلة 6-26).

$$KE = (\gamma - 1)m_0c^2 = \frac{m_0c^2}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} - m_0c^2$$

الحل: مقارنة مع الطاقة الحركية $KE = 1.0 \times 10^{12} \text{ eV}$ للبروتون، يمكن إهمال طاقة كتلة السكون ($\approx 10^{-3} \text{ TeV}$)، وعليه، يمكننا كتابة

$$KE = \frac{m_0c^2}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$

$$1 - \frac{v^2}{c^2} = \left(\frac{m_0c^2}{KE} \right)^2$$

ثم

$$\frac{v}{c} = \sqrt{1 - \left(\frac{m_0c^2}{KE} \right)^2} = \sqrt{1 - \left(\frac{938 \times 10^6 \text{ eV}}{1.0 \times 10^{12} \text{ eV}} \right)^2}$$

أو

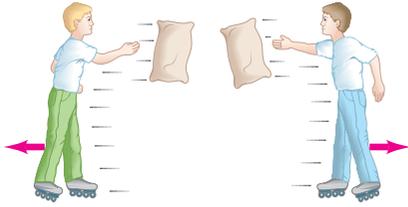
$$v = 0.9999996c$$

أي أنّ البروتون ينتقل بسرعة قريبة جدًا من سرعة الضوء c .

2-32 بدايات فيزياء الجسيمات الأولية – تبادل الجسيم

2-32

الشكل 6-32 قوى مكافئة لتبادل الجسيم. (أ) قوة تنافر (يرمي طفلان الوسادات على بعضهما). (ب) قوة تجاذب (يلتقط الطفلان الوسادات من أيدي بعضهما).



(أ) قوة تنافر (يرمي الطفلان الوسادات)



(ب) قوة تجاذب (يلتقط الطفلان الوسادات من أيدي بعضهما).

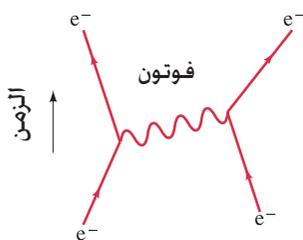
يُعتبر نموذج الجسيمات الأولية المتفق عليه حاليًا أنّ الكواركات والليبتونات هي المكونات الأساسية للمادة العادية. ولكي نفهم هذه الفكرة، سنحتاج إلى البدء بالأفكار التي أدت إلى صياغتها.*
 يمكن القول بأنّ فيزياء الجسيمات الأولية قد بدأت بالظهور في عام 1935 عندما تنبأ الفيزيائي الياباني يوكاوا (1907-1981) بوجود جسيم جديد يقوم بطريقة ما بدور الوسيط بالنسبة للقوة النووية القوية. ولفهم فكرة يوكاوا؛ سنتناول أولاً القوة الكهرومغناطيسية. رأينا عند دراستنا للكهرباء أنّ القوة الكهربائية تؤثر عن بعد دون حدوث تلامس. وحتى تدرك كيف تؤثر القوة عن بعد؛ فقد استخدمنا فكرة المجال الكهربائي. فالقوة الكهربائية التي يؤثر بها جسيم مشحون في آخر تنتج بسبب المجال الكهربائي الذي يشكله الجسيم الأول. وبصورة مشابهة تمامًا، يمكن القول بأنّ المجال المغناطيسي يحمل القوة المغناطيسية. ثم رأينا لاحقًا (الفصل 22) أنّ المجال الكهرومغناطيسي ينتقل خلال الفراغ على شكل موجات. وأخيرًا في (الفصل 27). أوضحنا أنّ الإشعاع الكهرومغناطيسي (الضوء) يمكن اعتباره موجة أو مجموعة من الجسيمات تُسمى فوتونات. وبسبب ازدواجية الموجة - جسيم هذه، يمكن أن نتخيل بأنّ القوة الكهرومغناطيسية بين الجسيمات المشحونة تنشأ بسبب ما يلي:

- (1) المجال المغناطيسي الذي ينشأ من أحد الجسيمات وتتاثر به الجسيمات الأخرى.
- (2) تبادل الفوتونات (جسيمات γ) فيما بينها.

والنقطة (2) هي التي نريد التركيز عليها هنا. يبين التناظر المقترح في (الشكل 6-32)، كيف يؤدي تبادل الجسيمات إلى نشوء القوة؛ ففي الجزء (أ)، يبدأ الطفلان برمي وسادات ثقيلة على بعضهما، كلّ رمية وكلّ التقاط يؤدي إلى تراجع الطفل نحو الخلف بسبب الدفع، وهذا يكافئ قوة التنافر. ومن جهة أخرى، إذا تبادل الطفلان الوسادات بالتقاطها من يد الشخص الآخر، فإنّهما سينجذبان نحو بعضهما، تمامًا كتأثير قوة التجاذب.

* ما أقوله اليوم لن يكون مناقشة علمية؛ ولكن تساعد على الفهم - انظر حاشية صفحة 769.

الشكل 7-32 يبين مخطط فايمان فوتون الذي يعمل كناقل للقوة الكهرومغناطيسية بين إلكترونين. هذا النوع من الرسم البياني يمثل x مقابل t مع ازدياد t في الاتجاه الرأسي. ابدأ من الأسفل، حيث يدنو إلكترونان من بعضهما بعضاً (تقل المسافة بينهما مع مرور الزمن). وعندما يقتربان من بعضهما، يحدث تبادل للطاقة ولكمية التحرك من أحدهما إلى الآخر بواسطة فوتون (أو ربما بواسطة أكثر من فوتون) ويرتدان عن بعضهما بعضاً.



بالنسبة للقوة الكهرومغناطيسية فإنّ الفوتونات هي التي يتم تبادلها بين جسيمين مشحونين. وتؤدي إلى ظهور القوة بينهما. المخطط البسيط الذي يصف عملية تبادل الفوتون هذه موضح في (الشكل 7-32). ويُسمّى مثل هذا المخطط "مخطط فايمان" نسبة إلى مبتدعه. الفيزيائي الأمريكي ريتشارد فايمان (1918 – 1988). بناء على نظرية الكهروديناميكا الكمية (QED).

يمثل (الشكل 7-32) الحالة الأسهل في نظرية الـ QED حيث يتم تبادل فوتون واحد. يصدر أحد الجسيمين المشحونين الفوتون ويرتد نتيجة لذلك. في حين يقوم الجسيم الآخر بامتصاص هذا الفوتون. في أيّ تفاعل أو تصادم يحدث انتقال للطاقة ولكمية التحرك من أحد الجسيمين إلى الآخر عن طريق الفوتون. يُمتص الفوتون من قبل الجسيم الثاني مباشرة بعد أن يصدر من الجسيم الأول ولا يمكن مشاهدته بعد ذلك. لذا، فإنه يُسمّى فوتوناً/فتراضياً. على عكس الفوتون الحرّ الذي يمكن الكشف عنه بواسطة الأجهزة. وهكذا يقال إنّ الفوتون وسيط، أو ينقل القوة الكهرومغناطيسية.

وبطريقة ماثلة لتبادل الفوتون كوسيط للقوة الكهرومغناطيسية. اقترح يوكاوا في النظرية التي أنشأنا إليها سابقاً أنه يجب أن يكون هناك جسيم وسيطاً للقوة النووية القوية. أي القوة التي تجعل النيوكليونات داخل النواة متماسكة. أطلق يوكاوا على هذا الجسيم اسم ميزون (تعني كتلة متوسطة). يبين (الشكل 8-32) مخطط فايمان الذي يوضح تبادل الميزون: ينقل الميزون القوة النووية بين نيوترون وبروتون.

يمكننا عمل تقدير تقريبي لكتلة الميزون كما يلي: افترض أنّ البروتون الذي إلى الجهة اليسرى في (الشكل 8-32) ساكناً. حتى يُصدر هذا البروتون ميزوناً فإنه يحتاج إلى طاقة (لعمل كتلة الميزون) تأتي من لا مكان. ما يؤدي إلى انتهاك قانون حفظ الطاقة. ولكن مبدأ عدم التحديد يسمح بعدم الحفظ للطاقة بمقدار ΔE إذا حدث فقط خلال الفترة Δt . كما في العلاقة: $(\Delta E)(\Delta t) \approx h/2\pi$. نضع ΔE مساوية للطاقة اللازمة لخلق الكتلة m للميزون: $\Delta E = mc^2$. إنّ قانون حفظ الطاقة ينتهك خلال الفترة الزمنية التي يكون فيها الميزون موجوداً. والتي تمثل الزمن Δt الذي يحتاج إليه الميزون ليتمر من نيوكليون إلى آخر. حيث يُمتص ويختفي. إذا افترضنا أنّ الميزون ينتقل بسرعة نسبية. قريبة من سرعة الضوء c . فإنّ Δt على الأغلب تكون حوالي $\Delta t = d/c$ حيث d أقصى مسافة يمكن أن تفصل بين النيوكليونات المتفاعلة.

وهكذا يمكن أن نكتب

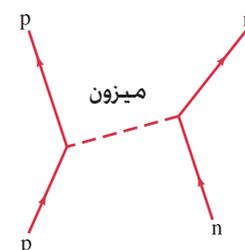
$$\Delta E \Delta t \approx \frac{h}{2\pi}$$

$$mc^2 \left(\frac{d}{c} \right) \approx \frac{h}{2\pi}$$

الجزئيات التي تتوسط أو تحمل القوى.

تقدير كتلة الجسيمات المتبادلة.

(الشكل 8-32) تبادل الميزون عندما يتفاعل بروتون ونيوترون من خلال القوة النووية القوية.



أو

كتلة الجسيم المتبادل

إنّ مدى القوة النووية القوية (أقصى مسافة بعيدة تؤثر عندها) صغير. - ليس أكبر بكثير من حجم النيوكليون أو النواة الصغيرة (انظر المعادلة 1-30) - لذا، دعنا نأخذ $d \approx 1.5 \times 10^{-15} \text{ m}$. بالتالي من (المعادلة 3-32)، نجد أنّ

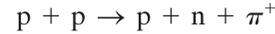
$$mc^2 \approx \frac{hc}{2\pi d} = \frac{(6.6 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s})(3.0 \times 10^8 \text{ m/s})}{(6.28)(1.5 \times 10^{-15} \text{ m})} \approx 2.1 \times 10^{-11} \text{ J} = 130 \text{ MeV}$$

أي أنّ كتلة الميزون المتنبأ به $130 \text{ MeV}/c^2$ تقريباً. وتساوي حوالي 250 ضعف كتلة الإلكترون $0.51 \text{ MeV}/c^2$.*

* لاحظ أنّ مدى القوة الكهرومغناطيسية غير محدود. وبوضع $d = \infty$ في (المعادلة 3-32) فإنها تخبرنا إنّ كتلة سكون جسيم التبادل بالنسبة إلى القوة الكهرومغناطيسية - الفوتون - يجب أن تكون صفراً. وهو ما يحققه الفوتون.

إنَّ الجُسيم الذي تنبأ به يوكاوا اكتشف في الأشعة الكونية بواسطة العالمين باول واوسشيلاني في عام 1947. وقد أُطلق عليه اسم "π" أو باي ميزون. أو ببساطة بيون. يظهر هذا الجُسيم في ثلاث حالات للشحنة هي: +، أو -، أو 0. إنَّ كتلة كلِّ من الجُسيمين π^+ و π^- تساوي $139.6 \text{ MeV}/c^2$. أما كتلة π^0 فتساوي $135.0 \text{ MeV}/c^2$. وجميعها قريبة مما تنبأ به يوكاوا. وهذه الجُسيمات الثلاثة تتفاعل بقوة مع المادة. وقد اشتملت التفاعلات التي شوهدت في المختبر. باستعمال مسارع الجُسيمات على ما يلي:

(4-32)

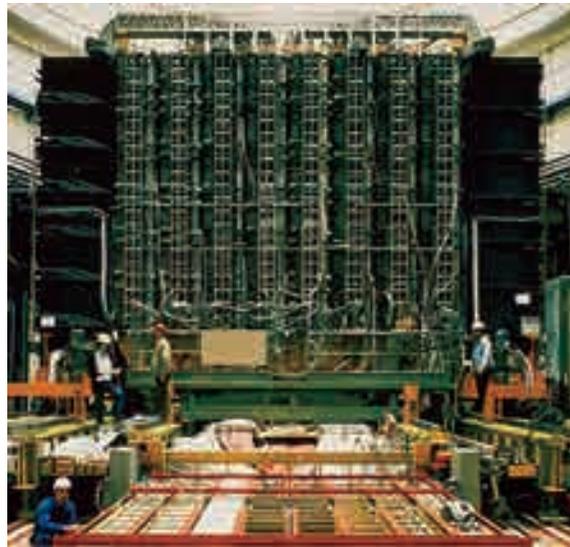


تنقل القوى بواسطة جُسيمات حتى في النموذج المعياري.

حيث يجب أن تكون طاقة البروتون الساقط من المسارع كافية لإنتاج الكتلة الإضافية للبيون الحر. لقد أصبحت نظرية يوكاوا في تبادل البيون كناقل للقوة النووية القوية قديمة الآن. وقد حلَّت مكانها ديناميكا اللون الكمية التي ترى أنَّ الكيانات الأساسية الكواركات. والنواقل الأساسية للقوة النووية هي الغلونات كما سنرى قريبًا. ولكن تبقى الفكرة الأساسية للنظرية القديمة صحيحة؛ وهي أنَّ القوى يمكن أن تفهم على أنها تبادل للجُسيمات.

هناك أربعة أنواع معروفة من القوى أو التفاعلات في الطبيعة هي: القوة الكهرومغناطيسية التي تنقل بواسطة الفوتون. والقوة النووية القوية التي تنقل بواسطة الغلونات. ولكن ماذا عن القوتين الأخرين: القوة النووية الضعيفة وقوة الجاذبية؟ يعتقد أيضًا بأنهما تنقلان بواسطة جُسيمين. ويرمز للجُسيمات التي تنقل القوة النووية الضعيفة بالرموز W^- و W^+ و Z^0 حيث تم اكتشافها في عام 1983 (الشكل 9-32).

الشكل 9-32 (أ) تمثل هذه الصورة التي عولجت حاسوبيًا اضمحلال جُسيم Z إلى إلكترون وبوزيترون ($Z^0 \rightarrow e^+ + e^-$) التي تظهر مساراتهما باللون الأبيض حيث تم كشفها بواسطة الكاشف UA1 في سيرن (CERN). (ب) صورة الكاشف UA1 في سيرن (CERN) كما تم بناؤه.



(ب)

(أ)

غرافتون

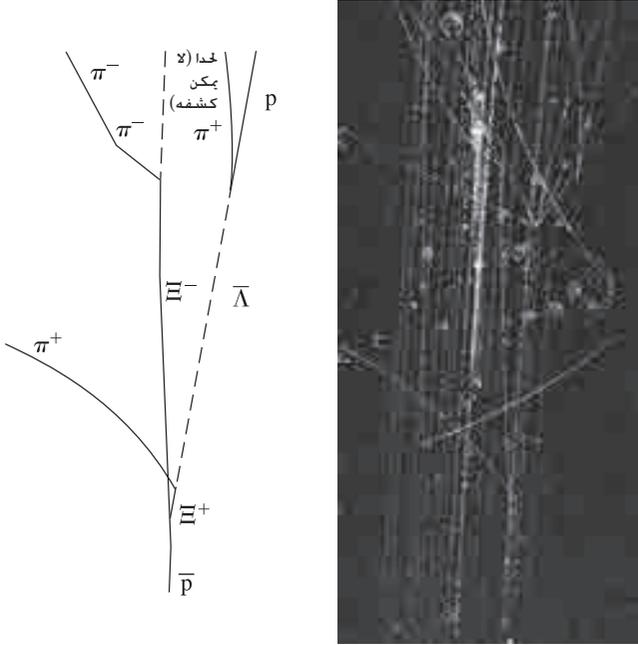
أما الجُسيم الكمي (أو الناقل) لقوة الجاذبية فيُسمَّى غرافتونا. وإذا كان موجودًا، فإنَّه لم يشاهد بعد. يبين (الجدول 1-32) مقارنة بين هذه القوى الأربع. حيث تم ترتيبها حسب شدتها النسبية التقريبية. لاحظ أنه بالرغم من أنَّ قوة الجاذبية ربما تكون القوة الأكثر وضوحًا في حياتنا اليومية (بسبب الكتلة الضخمة للأرض) إلا أنها الأضعف بين القوى الأربع على المقياس النووي. ويمكن إهمال تأثيرها على مستوى الجُسيم دائمًا.

الجدول 1-32 القوى الأربع في الطبيعة.		
النوع	الشدة النسبية (لبروتونين داخل النواة)	جسيم المجال
النوية القوية	1	غلونات * (ميزونات)
الكهرومغناطيسية	10^{-2}	فوتون
النوية الضعيفة	10^{-6}	Z^0 و W^\pm
الجاذبية	10^{-38}	غرافتون (؟)

* حتى عام 1970 كان يعتقد بأنها ميزونات، ولكنها تعد الآن غلونات (انظر إلى البند 10-32).

3-32 الجسيمات والجسيمات المضادة

رأينا في (الفصلين 27 و 30) أنّ البوزيترون إلكترون موجب الشحنة أساسًا. أي أنّ العديد من خصائصه هي تلك التي للإلكترونات نفسها، مثل الكتلة، ولكن شحنته متعاكسة. كما أنّ هناك أعدادًا كمية أخرى للجسيمات تكون متعاكسة بالنسبة إلى الجسيمات المضادة، وهو ما سندرسه لاحقًا، وعليه، يقال إنّ البوزيترون هو الجسيم المضاد للإلكترون. بعد أن اكتشف البوزيترون في عام 1932، كان يُتنبأ بأنّ الجسيمات الأخرى يجب أن يكون لها أيضًا جسيمات مضادة. وفي عام 1955 تم اكتشاف الجسيم المضاد للبروتون وهو ضد البروتون (\bar{p}) الذي يحمل شحنة سالبة. انظر إلى (الشكل 10-32). (يشير الخط الذي فوق الحرف P إلى ضد الجسيم). وبعد ذلك بوقت قصير اكتشف ضد النيوترون (\bar{n}) إنّ الجسيمات جميعها لها جسيمات مضادة، ولكن القليل منها مثل الفوتون و π^0 ليس له جسيمات مضادة مميزة: وهنا نقول إنها جسيمات مضادة لنفسها* .



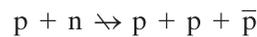
الشكل 10-32 صورة غرفة فقاعية (يستعمل فيها الهيدروجين السائل) توضح عملية تصادم ضد البروتون (\bar{p}) مع بروتون ساكن لينتج زوج Xi- ضد Xi+ ضد $\bar{p} + p \rightarrow \Xi^- + \Xi^+$ والتي تضمحل إلى جسيمات أخرى. أما الرسم، فيشير إلى تحديد جسيمات كلّ مسار على أساس كيفية اضمحلال الجسيم والكتل التي تم تقديرها من كمية التحرك المقيسة (انحناء المسار في مجال مغناطيسي) والطاقة (على سبيل المثال سمك المسار). توضح الخطوط المتقطعة مسارات الجسيم المتبادل؛ لأنّ الجسيمات المتعادلة لا تنتج فقاعات. لذا، لا يوجد لها مسارات.

تنتج الجسيمات المضادة في التفاعلات النووية عندما تتوافر طاقة كافية، ولكن مدة حياتها ليست طويلة جدًا بوجود المادة. فعلى سبيل المثال، فإنّ البوزيترون مستقر عندما يكون لوحده، ولكنه إذا واجه إلكترونًا، فإنّ كلا منهما يفني الآخر. تتحول الطاقة التي تنتج من اختفاء كتليهما إضافة إلى أيّ طاقة حركية يمتلكانها إلى طاقة لأشعة γ أو أيّ جسيمات أخرى. يحدث الفناء أيضًا لأزواج "الجسيم - ضد الجسيم" الأخرى جميعها.

4-32 تفاعلات الجسيم وقوانين الحفظ

إنّ أحد أهم استعمالات مسارات الطاقة العالية هو دراسة تفاعلات الجسيمات الأولية مع بعضها. ولترتيب هذا العالم دون النووي، فإنّ قوانين الحفظ أساسية في هذا المجال. ولقد وجد أنّ قوانين حفظ الطاقة، وكمية التحرك، وكمية التحرك الزاوية، والشحنة الكهربائية، تتحقق بشكل دقيق في تفاعلات الجسيم كلّها.

لقد دلت تفاعلات الجسيم على وجود قوانين حفظ جديدة (تمامًا كالقديمة) والتي هي مبادئ ترتيب، تساعد على تفسير إمكانية حدوث بعض التفاعلات وعدم حدوث تفاعلات أخرى. فعلى سبيل المثال، التفاعل التالي لم يحدث مطلقًا.



على الرغم من أنّ الشحنة والطاقة وغيرهما محفوظة (يعني الرمز \bar{p} البروتون المضاد، أما الرمز \Rightarrow فيعني أنّ التفاعل لن يحدث). ولفهم السبب في عدم حدوث هذا التفاعل: افترض الفيزيائيون قانون حفظ جديد، حفظ عدد الباريون.

* لاحظ على سبيل المثال أنّ الشحنة المعاكسة لـ $Q = 0$ ما تزال صفرًا.

عدد الباريون

(عدد الباريون هو تعميم لعدد النيوكليون الذي تبين لنا أنه محافظ في التفاعلات النووية والاضمحلال النووي أيضًا). تملك النيوكليونات جميعها عدد باريون $B = +1$. في حين تملك النيوكليونات المضادة (ضديد كل من البروتون والنيوترون) عدد باريون $B = -1$. أما الأنواع الأخرى جميعها من الجسيمات، كالفتونات، والميزونات، والإلكترونات، بالإضافة إلى الليبتونات الأخرى فتمتلك عدد باريون $B = 0$. لذا، نجد أن التفاعل الذي في بداية هذه الفقرة لا يحفظ عدد الباريون لأن الجهة اليسرى للتفاعل تمتلك

$$\text{عدد باريون } B = (+1) + (+1) = +2 \text{ في حين أن الجهة اليمنى}$$

$$\text{تمتلك } B = (+1) + (+1) + (-1) = +1 \text{ ومن جهة أخرى، نجد أن التفاعل التالي يحفظ عدد}$$

$$\text{الباريون } B \text{، أي أنه يحدث إذا كانت طاقة الجسيم الساقط كافية.}$$

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

$$B = +1 + 1 = +1 + 1 - 1 + 1$$

وكما بينا أعلاه، نجد أن $B = +2$ على جانبي هذه المعادلة. ومن هذه التفاعلات وغيرها، فقد أثبت أن حفظ عدد الباريون مبدأ أساسي في الفيزياء.

كما أنه من المفيد أيضًا دراسة قوانين الحفظ لأعداد الليبتون الثلاثة المرتبطة بالتفاعلات الضعيفة والاضمحلال النووي. وفي الاضمحلال العادي لجسيم β ، ينبعث إلكترون أو بوزيترون إلى جانب النيوتريون أو ضديد النيوتريون. وفي نوع مشابه لهذا الاضمحلال، يمكن أن ينبعث جسيم يُسمى "μ"، أو ميزون ميو، أو ميون بدلًا من الإلكترون. يبدو أن الميون (اكتشف عام 1937) يشبه الإلكترون إلى حد كبير باستثناء كتلته التي هي أكبر بحوالي 207 مرات ($106 \text{ MeV}/c^2$) كتلة الإلكترون. أما النيوتريون (ν_e) الذي يصاحب الإلكترون المنبعث، فقد وجد أنه يختلف عن النيوتريون (ν_μ) الذي يصاحب الميون المنبعث. ولكل نيوتريون ν_μ

منها جسيم مضاد: $\bar{\nu}_\mu$ و $\bar{\nu}_e$. فعلى سبيل المثال في اضمحلال β الاعتيادي، نجد أن

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

وليس التفاعل $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_\mu$. ولتفسير عدم حدوث هذا التفاعل: فقد ظهرت فكرة عدد الليبتون الإلكتروني L_e . فإذا كان $L_e = +1$ للإلكترون (e^-) والنيوتريون الإلكتروني (ν_e)، وكان $L_e = +1$ لكل من e^+ و $\bar{\nu}_e$ ، في حين أن $L_e = -1$ للجسيمات الأخرى جميعها، فإن كل اضمحلال تمت مشاهدته يحقق مبدأ حفظ L_e . على سبيل المثال، في التفاعل $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$ ، $L_e = 0$ نجد أن $L_e = 0$ بداية، و $L_e = 0 + (+1) + (-1) = 0$ بعد الاضمحلال. كل اضمحلال لا يحفظ L_e ، حتى لو حقق قوانين الحفظ الأخرى، لا يحدث أبدًا.

في الاضمحلال الذي يشتمل على الميونات، مثل

$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$$

هناك عدد كمي آخر يجب أن يكون محفوظًا وهو عدد الليبتون ميون (L_μ)، $L_\mu = +1$ لكل من μ^- و ν_μ و $L_\mu = -1$ لكل من μ^+ و $\bar{\nu}_\mu$. أما لبقيّة الجسيمات الأخرى، فإن $L_\mu = 0$. يجب أن يكون محفوظًا في أي تفاعل أو اضمحلال. ويمكن بطريقة مشابهة أيضًا تعيين عدد الليبتون تاو L_τ الذي يرتبط مع الليبتون τ (اكتشف عام 1976 وكتلته أكبر من كتلة الإلكترون بحوالي 3000 مرة) ونيوتريون تاو ν_τ .

تذكر أن الجسيمات المضادة ليس لها فقط شحنة كهربائية معاكسة لتلك التي لجسيماتها، ولكنها أيضًا معاكسة في أعداد B ، و L_μ ، L_τ ، و L_e . على سبيل المثال، نجد أن $B = +1$ للنيوتريون، ولكن $B = -1$ بالنسبة إلى ضديد النيوتريون (أعداد الليبتون جميعها تساوي صفرًا).

المثال المفاهيمي 4-32 عدد الليبتون في اضمحلال الميون

أي من مخططات الاضمحلال التالية متوقع حدوثه بالنسبة لاضمحلال الميون:

$$(أ) \mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e \quad (ب) \mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu \quad (ج) \mu^- \rightarrow e^- + \nu_e \quad ؟ \text{ تمتلك الجسيمات جميعها}$$

$$L_\tau = 0$$

الإجابة: يمتلك μ^- في الحالة الابتدائية $L_\mu = +1$ و $L_e = 0$ ، ويجب أن يكون له أيضًا $L_\mu = +1$ ، و

$L_e = 0$ في الحالة النهائية (بعد الاضمحلال). في (أ) في الحالة النهائية نجد أن $L_\mu = 0 + 0 = 0$ و $L_e = 0 + 0 = 0$ ،

و $L_e = +1 - 1 = 0$ ؛ أي أن L_μ غير محفوظ. وبالفعل، فإنه لم يشاهد حدوث هذا الاضمحلال.

تشتمل الحالة النهائية في (ب) على $L_\mu = 0 + 0 + 1 = +1$ و $L_e = +1 - 1 + 0 = 0$ ؛ أي أن

كلاهما محفوظ. وفي الحقيقة، فإن هذا الاضمحلال هو النوع الأكثر شيوعًا بالنسبة إلى μ^- وأخيرًا، فإن

التفاعل في (ج) لا يحدث لأن $(= +2)$ في الحالة النهائية غير محفوظ وكذلك الحال بالنسبة إلى L_μ .

حفظ عدد الباريون

أعداد الليبتون

تنويه:

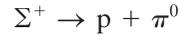
الأنواع المختلفة من النيوتريونات ليست متطابقة

حفظ أعداد الليبتون

تمتلك الجسيمات المضادة Q, B, L معاكسة.

المثال 5-32 حفظ الطاقة وكمية التحرك

بالإضافة إلى قوانين حفظ الأعداد التي تساعد في تفسير مخططات اضمحلال الجسيمات. يمكننا أيضًا تطبيق قوانين حفظ الطاقة وكمية التحرك. ينتج من اضمحلال جسيم Σ^+ الساكن وكتلة سكونه $1189 \text{ MeV}/c^2$ (الجدول 2-32 في الصفحة التالية) بروتون (كتلة سكونه $938 \text{ MeV}/c^2$) وبيون متعادل π^0 (كتلة سكونه $135 \text{ MeV}/c^2$).



جد الطاقة الحركية لكل ناتج من نواتج الاضمحلال. على فرض أن الجسيم الأم Σ^+ كان ساكنًا. النهج: جد الطاقة المتحررة من تحول الكتلة ($E = mc^2$) كما قمنا بذلك بالنسبة للعمليات النووية (المعادلة 2-30 أو 1-31). ونطبق قانون حفظ الطاقة وكمية التحرك.

الحل: الطاقة المتحررة أو قيمة Q . عبارة عن الكتلة المتحولة مضروبة في c^2 .

$$Q = [m_{\Sigma^+} - (m_p + m_{\pi^0})]c^2 = [1189 - (938 + 135)] \text{ MeV} = 116 \text{ MeV}$$

وتصبح هذه الطاقة طاقةً حركية للجسيمات الناتجة من الاضمحلال. $\pi^0 + p$

$$Q = KE_p + KE_{\pi^0}$$

وترتبط الطاقة الحركية لكل جسيم مع كمية التحرك الخاصة به بالعلاقة (المعادلتان 7-26 و 10-26):

$$KE_p = E_p - m_p c^2 = \sqrt{(p_p c)^2 + (m_p c^2)^2} - m_p c^2$$

وينطبق هذا أيضًا على البيون. ومن قانون حفظ كمية التحرك. نجد أن البروتون والبيون لهما المقدار نفسه لكمية التحرك: لأن الجسيم الأصلي كان ساكنًا. $P_p = P_{\pi^0} = P$. وعليه. نجد أن

$$Q = 116 \text{ MeV} = [\sqrt{(pc)^2 + (938 \text{ MeV})^2} - 938 \text{ MeV}] \\ + [\sqrt{(pc)^2 + (135 \text{ MeV})^2} - 135 \text{ MeV}]$$

وبحل هذه العلاقة بالنسبة إلى pc نجد أن $pc = 189 \text{ MeV}$. وبالتعويض في العلاقة التي للطاقة الحركية. بالنسبة إلى البروتون أولاً، ثم للبيون نحصل على $KE_p = 19 \text{ MeV}$ و $KE_{\pi^0} = 97 \text{ MeV}$.

5-32 النيوتريونات – نتائج حديثة

تعدّ دراسة النيوتريينو من المواضيع المهمة في الوقت الحاضر. جرى التجارب في مختبرات تحت أرضية عميقة. وأحيانًا في فوهات مناجم عميقة. إن الهدف من الطبقة السميكة للأرض هو ترشيح الجسيمات الأخرى كلها والناتجة من الخلفية الإشعاعية. بحيث يصل إلى الكواشف بشكل رئيس نيوتريونات التفاعل الضعيف.

هناك نتيجتان مهمتان تمّ التوصل إليهما في بداية القرن الحادي والعشرين: الأولى هي أن النيوتريونات الثلاثة ν_e و ν_μ و ν_τ يمكن أن تتغير من حين إلى آخر من أحد الأنواع إلى نوع آخر في ظروف معينة. وتسمى هذه الظاهرة اهتزاز الصفة المميزة للنيوتريينو (كلّ نوع من الأنواع الثلاثة سمي بصفة مميزة مختلفة). وتقتصر هذه النتيجة أن أعداد الليبتون L_e, L_μ, L_τ ليست محفوظة بشكل تام. ولكن يعتقد بأن مجموع هذه الأعداد $L_e + L_\mu + L_\tau$ محفوظ دائمًا. أما النتيجة الاستثنائية الثانية التي كانت موضع تخمين منذ فترة طويلة فهي: هل النيوتريينو عديم الكتلة كما كان يعتقد في الأصل؟ أم أن كتلة السكون له لا تساوي صفرًا؟ وقد أجريت حسابات على الحدود العليا للكتل. ولكن في عام 2002 أظهرت تجارب فيزياء فلكية أن مجموع كتل الأنواع الثلاثة للنيوتريونات يجب أن تكون أقل من حوالي $1 \text{ eV}/c^2$. ولكن هل يمكن أن تكون الكتل صفرًا؟ الجواب لا: إذا كانت هناك اهتزازات الصفة المميزة التي ناقشناها سابقًا. وعلى الأرجح. يبدو أن نوعًا واحدًا على الأقل من هذه الأنواع له كتلة سكون تساوي 0.05 eV على الأقل: وهذه نتيجة رائعة.

اهتزازات النيوتريينو

خلال العقود التي تلت اكتشاف π ميزون في أواخر أربعينيات القرن الماضي، تم اكتشاف مئات أخرى من الجسيمات دون النووية. ويمكن ترتيب هذه الجسيمات في مجموعات حسب تفاعلاتها؛ لأنّ هذه الجسيمات لا تتفاعل جميعها من خلال القوى الأربع المعروفة في الطبيعة (على الرغم من أنّها جميعها تتفاعل من خلال الجاذبية). يشتمل (الجدول 2-32) على أكثر هذه الجسيمات شيوعاً مصنفة حسب طريقة التفاعل. إلى جانب العديد من خصائصها. إنّ الجسيمات المدرجة في الجدول هي تلك المستقرة إضافة إلى جسيمات أخرى غير مستقرة. ويشتمل الجزء العلوي من الجدول على **بوزونات القياس** (سميت بذلك نسبة إلى النظرية التي تصفها وهي نظرية القياس) التي تضم الغلونات، والفوتون، وجسيم W ، و Z ، وهذه هي الجسيمات التي تقوم بدور الوسيط في التفاعلات القوية، الكهرومغناطيسية والضعيفة. على الترتيب. ثم يأتي في (الجدول 2-32) مجموعة الليبتونات، وهي جسيمات لا تتفاعل من خلال القوة النووية القوية. ولكنها تتفاعل من خلال القوة النووية الضعيفة. كما أنّ الليبتونات التي تحمل شحنة كهربائية أيضاً تتفاعل من خلال القوة الكهرومغناطيسية. وتضم الليبتونات كلاً من الإلكترون، والميون، والتاو، والأنواع الثلاثة للنيوترينات: إلكترون نيوترينو (ν_e)، وميون نيوترينو (ν_μ)، وتاونيونيوني (ν_τ). وكلّ منها له جسيم مضاد.

مقياس البوزونات

الليبتونات

هادرونات

البريونات
الميزونات

أما المجموعة الثالثة من الجسيمات في (الجدول 2-32) فهي **الهادرونات**، وهي الجسيمات التي تتفاعل من خلال القوة النووية القوية. لذلك، يقال إنّها جسيمات تتفاعل بقوة. كما تتفاعل هذه الجسيمات أيضاً من خلال القوى الأخرى. ولكن القوة النووية القوية هي الشائعة عند المسافات القصيرة. تضم الهادرونات كلاً من البروتون، والنيوترون، والبيون، ومجموعة كبيرة من الجسيمات الأخرى. وتقسّم هذه الهادرونات إلى مجموعتين جزئيتين هما: **الباريونات**، وهي الجسيمات التي يكون عدد البريون لها $+1$ (أو -1 بالنسبة إلى الجسيمات المضادة)، و**الميزونات**، وهي الجسيمات التي يكون لها عدد البريون $= 0$.

الجدول 2-32 جسيمات (مستقرة في ظل الاضمحلال القوي) *

نمط الاضمحلال الرئيسي	فترة الحياة (s)	S	L_τ	L_μ	L_e	B	الكتلة السكونية (MeV) ² /c ²	المغزلية	ضديد الجسيم	الرمز	اسم الجسيم	القوى العاملة	التصنيف
$e\nu_e, \mu\nu_\mu, \tau\nu_\tau, \text{ hadrons}$ $e^+e^-, \mu^+\mu^-, \tau^+\tau^-, \text{ hadrons}$	Stable	0	0	0	0	0	0	1	Self	g	Glucos	g	مقياس البوزونات
	Stable	0	0	0	0	0	0	1	Self	γ	Photon	em	ناقل القوة
	3×10^{-25}	0	0	0	0	0	80.41×10^3	1	W^-	W^+	W	w, em	
	3×10^{-25}	0	0	0	0	0	91.19×10^3	1	Self	Z^0	Z	w	
$e^-\bar{\nu}_e\nu_\mu$ $\mu^-\bar{\nu}_\mu\nu_\tau, e^-\bar{\nu}_e\nu_\tau, \text{ hadrons} + \nu_\tau$	Stable	0	0	0	+1	0	0.511	$\frac{1}{2}$	e^+	e^-	Electron	w, em **	الليبتونات
	Stable	0	0	0	+1	0	$0 (<0.6 \text{ eV})^\ddagger$	$\frac{1}{2}$	$\bar{\nu}_e$	ν_e	Neutrino (e)		
	2.20×10^{-6}	0	0	+1	0	0	105.7	$\frac{1}{2}$	μ^+	μ^-	Muon		
	Stable	0	0	+1	0	0	$0 (<0.6 \text{ eV})^\ddagger$	$\frac{1}{2}$	$\bar{\nu}_\mu$	ν_μ	Neutrino (μ)		
	2.91×10^{-13}	0	+1	0	0	0	1777	$\frac{1}{2}$	τ^+	τ^-	Tau		
Stable	0	+1	0	0	0	$0 (<0.6 \text{ eV})^\ddagger$	$\frac{1}{2}$	$\bar{\nu}_\tau$	ν_τ	Neutrino (τ)			
$\mu^+\nu_\mu$ 2γ $\mu^+\nu_\mu, \pi^+\pi^0$ $\pi^+\pi^-, 2\pi^0$ $\pi^\pm e^\mp(\bar{\nu}_e), \pi^\pm\mu^\mp(\bar{\nu}_\mu), 3\pi$ $2\gamma, 3\pi^0, \pi^+\pi^-\pi^0$	2.60×10^{-8}	0	0	0	0	0	139.6	0	π^-	π^+	Pion	s, em, w	مسارح الدقائق النووية الميزونات
	0.84×10^{-16}	0	0	0	0	0	135.0	0	Self	π^0			
	1.24×10^{-8}	+1	0	0	0	0	493.7	0	K^-	K^+	Kaon		
	0.89×10^{-10}	+1	0	0	0	0	497.7	0	\bar{K}_S^0	K_S^0			
	5.17×10^{-8}	+1	0	0	0	0	497.7	0	\bar{K}_L^0	K_L^0			
	5×10^{-19}	0	0	0	0	0	547.3	0	Self	η^0	Eta and others		
	Stable	0	0	0	0	+1	938.3	$\frac{1}{2}$	\bar{p}	p	Proton	s, em, w	الباريونات
887	0	0	0	0	+1	939.6	$\frac{1}{2}$	\bar{n}	n	Neutron			
2.63×10^{-10}	-1	0	0	0	+1	1115.7	$\frac{1}{2}$	$\bar{\Lambda}^0$	Λ^0	Lambda			
0.80×10^{-10}	-1	0	0	0	+1	1189.4	$\frac{1}{2}$	$\bar{\Sigma}^-$	Σ^+	Sigma			
7.4×10^{-20}	-1	0	0	0	+1	1192.6	$\frac{1}{2}$	$\bar{\Sigma}^0$	Σ^0				
1.48×10^{-10}	-1	0	0	0	+1	1197.4	$\frac{1}{2}$	$\bar{\Sigma}^+$	Σ^-				
2.90×10^{-10}	-2	0	0	0	+1	1314.9	$\frac{1}{2}$	$\bar{\Xi}^0$	Ξ^0	Xi			
1.64×10^{-10}	-2	0	0	0	+1	1321.3	$\frac{1}{2}$	$\bar{\Xi}^+$	Ξ^-				
0.82×10^{-10}	-3	0	0	0	+1	1672.5	$\frac{3}{2}$	$\bar{\Omega}^+$	Ω^-	Omega and others			

* انظر الجدول 4-32 حول دقائق الشارم والبوتوميزون.
** تتدخل النيوترونات في التفاعلات الضعيفة. اعطيت الحدود العليا لكل النيوترونات في بعض الاقواس ($\bar{\nu}$)، كما تم الحصول عليها من بحث WMAP (الفصل 33). اظهر الكشف عن تحول النيوترونات الى دقائق اخرى ان على الأقل نيوترون واحد له كتلة اكبر من 0.05 eV.

يشتمل (الجدول 2-32) على عدد قليل فقط من مئات الهادرونات التي تم اكتشافها. لاحظ أن البريونات Λ , Σ , Ξ و Ω تضمحل جميعها إلى باريونات أقل كتلة. وفي النهاية إلى بروتون أو نيوترون. وفي هذه العمليات جميعها يكون عدد الباريون محفوظًا. وبما أنه لا يوجد جسيم أخف من البروتون، فإن عدد الباريون له $B = +1$. وعليه، إذا كان عدد الباريون محافظًا، فإن البروتون نفسه لا يمكن أن يضمحل. وبالتالي فإنه مستقر. (لكن انظر إلى البند 11-32).

إن أعداد الباريون والليبتون (B, L_e, L_μ, L_τ) بالإضافة إلى الغرابة S (البند 8-32) المعروضة في (الجدول 2-32) هي للجسيمات، أما جسيماتها المضادة فتكون إشارة هذه الأعداد معكوسة.

7-32 استقرار الجسيم والرنين

إن العديد من الجسيمات المدرجة في (الجدول 2-32) غير مستقرة. تعتمد مدة حياة الجسيم غير المستقر على القوة التي تكون أكثر فاعلية في التسبب بحدوث الاضمحلال. وكلما كانت القوة المؤثرة في الاضمحلال أقوى زادت سرعة حدوثه. وتبلغ مدة حياة الاضمحلال الذي يحدث بسبب القوة النووية الضعيفة 10^{-13} s أو أطول (باستثناء W و Z). أما الاضمحلال بواسطة القوة الكهرومغناطيسية فمدة حياته أقل من ذلك، أي حوالي 10^{-19} - 10^{-16} s. ويشتمل عادة على أشعة جاما (فوتون). إن الجسيمات غير المستقرة المدرجة في (الجدول 2-32) تضمحل بواسطة القوة النووية الضعيفة أو التفاعل الكهرومغناطيسي.

لقد وجد أن هناك العديد من الجسيمات التي تضمحل من خلال التفاعل النووي القوي. إن مدة حياة هذه الجسيمات قصيرة جدًا. حيث تبلغ حوالي 10^{-23} s وهي غير مدرجة في (الجدول 2-32). ويُستدل على مثل هذه الجسيمات التي مدة حياتها قصيرة جدًا من خلال الجسيمات التي تنتج من اضمحلالها. وسنتناول الآن أول هذه الجسيمات الذي اكتشف (بواسطة فيرمي) باستعمال حزمة من π^+ توجه بكميات متغيرة من الطاقة خلال هدف من الهيدروجين (بروتونات). يوضح (الشكل 11-32) رسمًا بيانيًا لعدد التفاعلات (تبعثر π^+) مقابل الطاقة الحركية للبيون.

إن العدد الكبير من التفاعلات حول قيمة الطاقة 200 MeV جعل فيرمي يستنتج أن البروتون وجسيم π^+ يتحدان مع بعضهما لحظيًا لتشكيل جسيم مدّة حياته قصيرة قبل أن ينفصلا عن بعضهما مرة أخرى. أو على الأقل أن رنينهما يحدث بشكل متزامن لفترة قصيرة جدًا. وفي الحقيقة، فإنّ القمة الكبيرة التي في (الشكل 11-32) تشبه منحني الرنين (انظر إلى الشكلين 11-18 و 11-21) وهذا "الجسيم" الجديد - يُسمّى الآن Δ^- - يعرف بـ "الرنين". لقد وجد أن هناك مئات أخرى من الرنين. وقد عدّ كل منها على أنه حالة إثارة لجسيم أقل كتلة مثل النيوكلون.

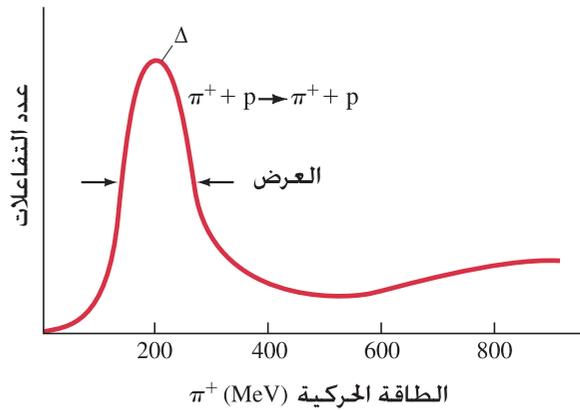
بعد عرض الرنين - في (الشكل 11-32) عرض قمة Δ حوالي 100 MeV - تطبيقًا مهمًا لمبدأ عدم التحديد. إذا دامت فترة حياة جسيم مدة 10^{-23} s فقط، فإنّ مقدار عدم التحديد في كتلته (طاقة سكونه) يساوي $100 \text{ MeV} \approx 10^{-11} \text{ J} \approx (6.6 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}) / (6)(10^{-23} \text{ s}) \approx h / (2\pi \Delta t) \approx \Delta E$ وهذا ما تمت مشاهدته. وفي الحقيقة، فإنّ مدة الحياة $\approx 10^{-23}$ s استنتجت بواسطة العملية العكسية: من عرض القمة الذي تم قياسه ليكون $\approx 100 \text{ MeV}$

تعتمد مدة الحياة على نوع القوة المؤثرة.

يستدل على الجسيمات التي مدة حياتها قصيرة جدًا من خلال الجسيمات التي تنتج من اضمحلالها.

الرنين

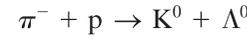
يربط مبدأ عدم اليقين مدى الحياة والكتلة



الشكل 11-32 عدد جسيمات π^+ التي تبعثرت من هدف البروتون كدالة في الطاقة الحركية لجسيمات π^+ الساقطة. يعطي شكل الرنين معلومات عن جسيم مدة حياته قصيرة - وهو جسيم Δ^- ، وشحنته في هذه الحالة $+2e$ (Δ^{++}).

الجسيمات الغريبة؟ السّاحرة؟ ربما تكون هناك حاجة إلى نموذج جديد!

لقد وُجِدَ في بداية خمسينيات القرن الماضي أنّ الجسيمات الجديدة التي اكتشفت مثل K ، Λ و Σ تتصرف بطريقة غريبة من حيث إنها: 1- تُنتج دائماً على شكل أزواج. فعلى سبيل المثال. نجد أنّ احتمالية حدوث التفاعل الآتي كبيرة:



في حين أنّ التفاعل المشابه $\pi^- + p \rightarrow K^0 + n$ لم يشاهد حدوثه مطلقاً. بالرغم من عدم انتهاكه لأيّ من قوانين الحفظ المعروفة. 2- تنتج من خلال التفاعل النووي القوي (بمعدل مرتفع). ولكنها لا تضمحل بالمعدل الذي يميز التفاعل القوي (على الرّغم من أنها تضمحل إلى جسيمات شديدة التفاعل).

الغرابية وحفظها

ولتوضيح هذه المشاهدات؛ فقد تمّ تعريف عدد كمّي جديد ألا وهو الغرابية، وقانون حفظ جديد يُسمّى حفظ الغرابية. وبتحديد أعداد الغرابية (S) المشار إليها في (الجدول 2-32) يتم تفسير إنتاج الجسيمات الغريبة على شكل أزواج. على سبيل المثال. في التفاعل $\pi^- + p \rightarrow K^0 + \Lambda^0$ نجد أنّ الغرابية للجسيمات الداخلة في التفاعل $\pi^- + p \rightarrow K^0 + n$ تساوي $S = 0 + 0 = 0$. أما للجسيمات الناجمة. فنجد أنّها $S = +1 - 1 = 0$. أي أنّ الغرابية محفوظة. وفي التفاعل فإنّ $S = 0$ للحالة الابتدائية. ولكن للحالة النهائية للتفاعل نجدها $S = +1 + 0 = +1$. أي أنّ الغرابية غير محفوظة. وبالتالي لم يشاهد حدوث هذا التفاعل مطلقاً.

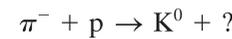
الغرابية محفوظة في التفاعلات القوية و ليس في التفاعلات الضعيفة.

ولتفسير عملية اضمحلال الجسيمات الغريبة؛ فقد افترض أنّ الغرابية محفوظة في التفاعل القوي وليس في التفاعل الضعيف. لذلك. فإنّ مبدأ حفظ الغرابية يمنع اضمحلال الجسيمات الغريبة من خلال التفاعل القوي إلى جسيمات غير غريبة كتلتها أقل. ولكنها قد تضمحل من خلال التفاعل الضعيف الذي يميز بدة حياة أطول من 10^{-8} s إلى 10^{-10} s.

لقد كان مبدأ حفظ الغرابية المثال الأول على كمية محافظة جزئياً. في هذه الحالة. حفظ كمية الغرابية بواسطة التفاعلات القوية وليس الضعيفة.

المثال المفاهيمي 6-32 خمن الجسيم المفقود

استعمل قوانين الحفظ لتفاعلات الجسيمات لتحديد الجسيم المفقود في التفاعل الآتي:



بالإضافة إلى $K^0 + \Lambda^0$.

الإجابة: نكتب المعادلات الخاصة بالأعداد المحفوظة لهذا التفاعل. والتي تشمل على الجاهيل B ، و L_e ، و S ، و Q والتي إذا ما تمّ تحديدها فإنها تدلّ على الجسيم المفقود.

$$\text{عدد الباريون: } 0 + 1 = 0 + B$$

$$\text{عدد الليبتون: } 0 + 0 = 0 + L_e$$

$$\text{الشحنة: } -1 + 1 = 0 + Q$$

$$\text{الغرابية: } 0 + 0 = 1 + S$$

لذا. فإنّ الجسيم المجهول الناتج من التفاعل يجب أن يكون له الخصائص التالية:

$$B = +1 \quad L_e = 0 \quad Q = 0 \quad S = -1$$

بالإضافة إلى Λ^0 . فإنّ جسيم سيجما المتعادل Σ^0 تنطبق عليه هذه الأعداد.

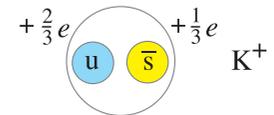
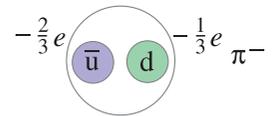
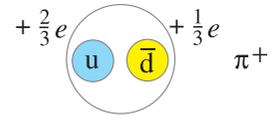
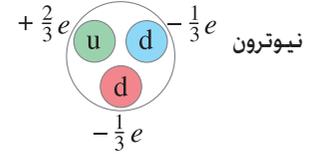
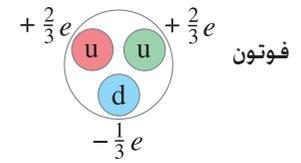
في البند القادم. سنناقش كمية أخرى محفوظة جزئياً. وقد أعطيت اسم السّاحر. لقد ساعد اكتشاف الجسيم السّاحر في عام 1974 على تقديم نظرية جديدة تشمل الكواركات التي سندرسها الآن.

9-32 الكواركات

تُعدّ الجسيمات جميعها - باستثناء بوزونات القياس- ليببتونات أو هادرونات. إنّ الفرق الرئيس بين هاتين المجموعتين هو أنّ الهادرونات تتفاعل من خلال التفاعل القوي. أما الليبتونات فلا يحدث لها هذا التفاعل. إنّ الليبتونات الستة ($e^- \cdot \mu^- \cdot \tau \cdot \nu_e \cdot \nu_\mu \cdot \nu_\tau$) جسيمات أولية حقًا؛ لأنها لا تظهر أيّ تركيب داخلي. كما أنّ حجمها لا يمكن قياسه (تشير محاولات تحديد حجم الليبتونات إلى حد أعلى يبلغ حوالي 10^{-18} m). ومن جهة أخرى. هناك المئات من الهادرونات التي تدل التجارب على وجود تركيب داخلي لها. في عام 1963. اقترح جلمان و زويغ أنّ أيًا من الهادرونات. ولا حتى البروتون والنيوترون جسيمًا أوليًا. ولكنه بدلا من ذلك مكون من ثلاثة كيانات نقطية أكثر أساسية تُسمّى. على نحو غريب الأطوار. كواركات*. إنّ نظرية الكواركات مقبولة بشكل جيد في الوقت الحاضر. وتعدّ الكواركات حقًا جسيمات أولية مثل الليبتونات. يرمز إلى الكواركات الثلاثة الأصلية التي تم اقتراحها بـ u. d. s. اختصارًا لكلّ من: علويّ (*up*). وسفليّ (*down*). وغريب (*strange*). في الوقت الحاضر. تضم النظرية ستة كواركات. وهي كعدد الليبتونات تماما. تستند إلى تماثل مفترض في الطبيعة. تُسمّى الكواركات الثلاثة الأخرى كما يلي: ساحر (*charmed*). وقاع (*bottom*). وقمة (*top*). تستعمل هذه الأسماء أيضًا لتدل على الخصائص الجديدة لكلّ منها (الأعداد الكمية c. t. b) التي تميز الكواركات الجديدة عن تلك القديمة (انظر إلى الجدول 3-32) وهي محفوظة (مثل الغرابة) في التفاعلات القوية. ولكنها غير محفوظة في التفاعلات الضعيفة. مغزلية الكواركات جميعها $\frac{1}{2}$ وشحنتها الكهربائية $+\frac{2}{3}e$ أو $-\frac{1}{3}e$ (أي أنها جزء ما كان يعتقد بأنها الشحنة الأصغر e). أمّا بالنسبة إلى الكواركات المضادة. فإنّ إشارة الشحنة الكهربائية Q . وعدد الباريون B . والغرابة S . والسّاحر c . والقاع b . والقمة t . عكس تلك التي للكواركات. ويبين (الجدول 3-32) خصائص أخرى للكواركات.

كواركات

الشكل 12-32 التركيب الكواركي لعدد من الجسيمات



ميزون = كوارك + كوارك مضاد

الباريون = 3 كواركات

الجدول 3-32 خصائص الكواركات (تمتلك الكواركات المضادة إشارة عكس تلك لكلّ من: Q, B, S, c, t, b)

الكواركات							
الاسم	الزّرم	الشّحنة Q	عدد الباريون B	الغرابة S	السّاحر c	القاع b	القمة t
علويّ	u	$+\frac{2}{3}e$	$\frac{1}{3}$	0	0	0	0
سفليّ	d	$-\frac{1}{3}e$	$\frac{1}{3}$	0	0	0	0
غريب	s	$-\frac{1}{3}e$	$\frac{1}{3}$	-1	0	0	0
ساحر	c	$+\frac{2}{3}e$	$\frac{1}{3}$	0	+1	0	0
قاع	b	$-\frac{1}{3}e$	$\frac{1}{3}$	0	0	-1	0
قمة	t	$+\frac{2}{3}e$	$\frac{1}{3}$	0	0	0	+1

تتكون الهادرونات جميعها من مجموعات من الكواركات. وبالتالي يتم وصف خصائصها بالنظر إلى مكوناتها من الكواركات. تحتوي الميزونات على زوج من كوارك - كوارك المضاد. على سبيل المثال π^+ هو عبارة عن مجموعة $u\bar{d}$: لاحظ أنّ للزوج $u\bar{d}$ شحنة كهربائية $Q = \frac{2}{3}e + \frac{1}{3}e = +1e$, $B = \frac{1}{3} - \frac{1}{3} = 0$ و $S = 0 + 0 = 0$ تمامًا كما يجب أن تكون بالنسبة إلى π^+ . كما أنّ $K^+ = u\bar{s}$ حيث إنّ $Q = +1$ و $B = 0$ و $S = +1$.

من جهة أخرى. نجد أنّ الباريونات تتكون من ثلاثة كواركات. فعلى سبيل المثال. النيوترون $n = ddu$. أمّا البروتون المضاد $\bar{p} = \bar{u}\bar{u}\bar{d}$. انظر إلى (الشكل 12-32). تحتوي الجسيمات الغريبة جميعها على كوارك c أو \bar{c} . في حين تحتوي الجسيمات السّاحرة على كوارك s أو \bar{s} . ويحتوي (الجدول 4-32) على عدد قليل من هذه الهادرونات.

بعد أن اقترحت نظرية الكوارك. بدأ الفيزيائيون بالبحث عن هذه الجسيمات المشحونة جزئيًا. ولكن الكشف المباشر عنها لم يكن ناجحًا. تقترح النماذج الحديثة أنّ الكواركات ربما تكون متماسكة مع بعضها بعضا بحيث إنها قد لا توجد بصورة منفردة في حالة حرة. إلا أنّ مشاهدات إلكترونات الطاقة العالية المبعثرة من بروتونات تدلّ على أنّ البروتونات لها في الحقيقة مكونات.

* لقد اختار جلين -مان الكلمة من عبارة في قصة جلمس جويس فينجان وبكس (James Joyce's Finnegans Wake).

الجدول 4-32 قائمة جزئية من الهادرونات الثقيلة بالإضافة إلى الساحر والقاع ($L_e = L_\mu = L_\tau = 0$)

نوع الاضلال الرئيس	مدة الحياة	قاع b	التناحر c	الغرابية S	عدد الباريون B	كتلة الشكون (MeV/c ²)	الغزلية	الجسيم المضاد	النوع
أخرى e^+ , أخرى k^+	10.6×10^{-13}	0	+1	0	0	1869.4	0	D^-	D^+ Mesons
أخرى e^+ , أخرى k^+	4.2×10^{-13}	0	+1	0	0	1864.6	0	\bar{D}^0	D^0
أخرى k^+	4.7×10^{-13}	0	+1	+1	0	1969	0	D_s^-	D_s^+
هادرونات $\mu^- \mu^+$, $e^- e^+$	0.8×10^{-20}	0	0	0	0	3096.9	1	نفسه	J/ψ (3097)
هادرونات $\mu^- \mu^+$, $e^- e^+$, $\tau^- \tau^+$	1.3×10^{-20}	0	0	0	0	9460.4	1	نفسه	Y (9460)
أخرى D^0	1.5×10^{-12}	-1	0	0	0	5279	0	B^+	B^-
أخرى D^0	1.5×10^{-12}	-1	0	0	0	5279	0	\bar{B}^0	B^0
(هادرونات (أخرى + Λ))	2.0×10^{-13}	0	+1	0	+1	2285	$\frac{1}{2}$	Λ_c^-	Λ_c^+ باريونات
$\Lambda_c^+ \pi^+$?	0	+1	0	+1	2453	$\frac{1}{2}$	Σ_c^{++}	Σ_c^{++}
$\Lambda_c^+ \pi^0$?	0	+1	0	+1	2454	$\frac{1}{2}$	Σ_c^+	Σ_c^+
$\Lambda_c^+ \pi^-$?	0	+1	0	+1	2452	$\frac{1}{2}$	Σ_c^0	Σ_c^0
$J/\psi \Lambda^0$, $p D^0 \pi^-$, $\Lambda_c^+ \pi^+ \pi^- \pi^-$	1.1×10^{-12}	-1	0	0	+1	5640	$\frac{1}{2}$	Λ_b^0	Λ_b^0

الجسيمات البدائية هي كواركات وليبتونات وبيوزونات القياس

في الوقت الحاضر. الجسيمات التي تُعدّ أوليّة حقًا هي الكواركات الستة والليبتونات الستة. بالإضافة إلى ميزونات القياس التي تنقل القوى الأساسية. انظر إلى (الجدول 5-32) حيث تم ترتيب الكواركات والليبتونات في ثلاثة "أجيال"! يضم الجيل الأول المادة العادية. أي الذرات التي تتكون من بروتونات ونيوترونات وإلكترونات. أما الجيل الثاني والثالث. فيعتقد بأنهما كانا موجودين في بداية تشكّل الكون. ولكن يمكننا رؤيتهما في الوقت الحاضر بواسطة مسارعات قوية أو في الأشعة الكونية. أما المئات الأخرى من الهادرونات. فيمكن أن تفسر بدلالة مجموعات من الكواركات الستة والكواركات المضادة لها.

الجدول 5-32 الجسيمات الأولية* كما ترى في الوقت الحاضر

الجيل الثالث	الجيل الثاني	الجيل الأول	كواركات	ليبتونات	القوة	بوزونات القياس
b, t	s, c	u, d	كواركات	ليبتونات	قوية	غلونات
τ, ν_τ	μ, ν_μ	e, ν_e	ليبتونات		ضعيفة	W^\pm, Z_0
						γ (فوتون) كهرومغناطيسية

* لاحظ أنّ الكواركات والليبتونات تم ترتيب كلّ منها في ثلاثة أجيال.

المثال المفاهيمي 7-32 مجموعات الكوارك

جد عدد كلّ من الباريون. والشحنة. والغرابية لمجموعات الكوارك التالية. وحدد جسيم الهادرون الذي يتكون من مجموعات الكوارك هذه: (أ) udd. (ب) uū. (ج) uss. (د) sdd. (هـ) bū. الإجابة: نستعمل الجدول 3-32 للحصول على خصائص الكواركات. ثم (الجدول 2-32) أو (الجدول 4-32) لنجد الجسيم الذي له هذه الخصائص.

(أ) بالنسبة إلى udd. نجد أنّ

$$Q = +\frac{2}{3}e - \frac{1}{3}e - \frac{1}{3}e = 0$$

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

$$S = 0 + 0 + 0 = 0$$

بالإضافة إلى $c = 0$ و $b = 0$ و $t = 0$ الباريون الوحيد ($B = +1$) الذي له $Q = 0$ و $S = 0$... إلخ هو النيوترون (الجدول 2-32)

(ب) بالنسبة إلى uū. نجد أنّ $Q = \frac{2}{3}e - \frac{2}{3}e = 0$ و $B = 0$. بالإضافة إلى أنّ الأعداد الكمية الأخرى جميعها = صفرا. (يبدو أنّ هذا الجسيم π^0 . وهكذا نقول إنّ π^0 يساوي $u\bar{u} + d\bar{d}$).

(ج) بالنسبة إلى uss. نجد أنّ $Q = 0$, $B = +1$, $S = -2$. وهذا الجسيم هو Ξ^0

(د) بالنسبة إلى sdd. نجد أنّ $Q = -1$, $B = +1$, $S = -1$. وهذا الجسيم يجب أن يكون Σ^- .

(هـ): بالنسبة إلى bū. نجد أنّ $Q = -1$, $B = 0$, $S = 0$, $c = 0$. كما أنّ $b = -1$ و $t = 0$. وهذا الجسيم يجب أن يكون B^- ميزون (انظر إلى الجدول 4-32).

التمرين ب: ما التركيب الكواركي للجسيم K^- ميزون؟

10-32 "النموذج العياري" ديناميكا اللون الكمية والنظرية الكهروضعيفة

بعد فترة قصيرة من اكتشاف نظرية الكوارك. اقترح العلماء أنّ الكواركات لها خاصية (أو نوعية) أخرى تُسمّى لونًا. أو شحنة لونية (مماثلة للشحنة الكهربائية). والفرق بين الكواركات الستة (u, d, s, c, b, t) يعرف بـ "النكهة".

واستنادًا إلى هذه النظرية. فإنّ كلّ نكهة يمكن أن يكون لها ثلاثة ألوان. تصنف عادة إلى الأحمر. والأخضر. والأزرق. (هذه هي الألوان الأساسية الثلاثة التي عندما تُمزج مع بعضها بكميات متساوية- كما في شاشة التلفاز- تنتج اللون الأبيض). لاحظ أنّ مصطلحي "لون" و"نكهة" ليس لهما علاقة بحواسنا. وهي مجرد نزوات. ولكنها كالأسماء الأخرى. مثل ساحر. في هذا التخصص الجديد. على أيّ حال. فقد تمّ تلوين الكواركات كما في (الشكل 12-32). أما الكواركات المضادة فقد أعطيت ألوانًا مضادة هي: ضد الأحمر. وضد الأخضر. وضد الأزرق. تتكون الباريونات من ثلاثة كواركات. لكلّ منها لون خاص. أمّا الميزونات. فتتكون من زوج كوارك - وكوارك مضاد: أي أنّها تتكون من لون محدد وضد هذا اللون. وهكذا. فإنّ الباريونات والميزونات إمّا أن تكون عديمة اللون أو بيضاء.

لقد اقترحت فكرة لون الكوارك في الأصل للإبقاء على مبدأ الاستبعاد لباولي (البند 7-28). لا تخضع الجسيمات كلها لمبدأ الاستبعاد: فالجسيمات التي تخضع لهذا المبدأ كالإلكترونات. والبروتونات. والنيوترونات تُسمّى فيرميونات. أما الجسيمات التي لا تخضع لهذا المبدأ فتُسمّى بوزونات. وهذان النوعان من الجسيمات يميزان أيضًا من حيث المغزلية (البند 6-28). فمغزلية البوزونات عدد صحيح (0, 1, 2, ...). أمّا مغزلية الفيرميونات فهي نصف عدد صحيح ($\frac{1}{2}, \frac{3}{2}, \frac{5}{2}, \dots$). إنّ المادة تتشكل أساسًا من فيرميونات. إلا أنّ ناقلات القوى (γ, W, Z , غلونات) كلّها بوزونات.

وبما أنّ الكواركات فيرميونات (مغزليتها) فيجب إذن أن تخضع لمبدأ الاستبعاد. ولكن هناك ثلاثة باريونات محددة (uuu, ddd, sss) يجب أن تكون الكواركات الثلاثة التي تتكون منها لها الأعداد الكمية نفسها. واثنتان من الكواركات الثلاثة على الأقل يجب أن تكون مغزليتها بالاتجاه نفسه (لأنّ هناك اختياريين فقط: إما أن تكون المغزلية إلى الأعلى [$m_s = -\frac{1}{2}$] أو إلى الأسفل [$m_s = +\frac{1}{2}$]). ويبدو من ذلك أنّ هناك خرقًا لمبدأ الاستبعاد. ولكن إذا كان للكواركات عدد كميّ إضافيّ (لون) بحيث يختلف من كوارك إلى آخر. فإنه يميزها عن بعضها. ويسمح بتحقيق مبدأ الاستبعاد على الرغم من أنّ لون الكوارك. والزيادة ثلاثية الأضعاف الناتجة في عدد الكواركات كانت في الأصل فكرة خاصة. إلا أنّها جعلت النظرية أكثر اتفًا مع التجربة. مثل التنبؤ بالمدّة الصحيحة لحياة الجسيم π^0 ميزون. وفي الحال. أصبحت فكرة اللون الصفة المركزية في النظرية لتحديد القوة التي تجعل الكواركات متماسكة مع بعضها في الهادرون.

لقد افترض العلماء أنّ كلّ كوارك يحمل شحنة لونية⁺ مماثلة للشحنة الكهربائية. والقوة القوية بين الكواركات تُسمّى القوة اللونية. وقد سميت هذه النظرية للقوة القوية بـ ديناميكا اللون الكمية (كرومات لون في اللغة اليونانية القديمة) أو اختصارًا QCD. لتشير إلى القوة التي تؤثر بين الشحنتات اللونية (وليس بين الشحنتات الكهربائية). إنّ القوة القوية بين هادرونين هي القوة التي بين الكواركات المكونة لهما. كما هو مقترح في (الشكل 13-32). تُسمّى الجسيمات التي تنقل القوة اللونية (مماثل للفوتون في القوة الكهرومغناطيسية) غالونات. وهي مدرجة في (الجدول 5-32). هناك 8 غلونات. وجميعها حسب النظرية عديمة الكتلة وكلّ منها له شحنة لونية*. وهكذا. فإنّ الغلونات حلت مكان الميزونات (الجدول 1-32) كجسيمات مسؤولة عن القوة القوية (اللونية).

ربّما تسأل: ما الذي سيحدث إذا حاولنا رؤية كوارك وحيد ملون عن طريق الوصول إلى العمق داخل هادرون. واقتلاع كوارك وحيد. الكواركات متماسكة جدًا مع الكواركات الأخرى. بحيث إنّ اقتلاع واحد منها يتطلب مقدارًا هائلًا من الطاقة إلى الحدّ الذي يكون كافيًا لخلق كواركات أكثر ($E = mc^2$). وبالفعل. فإنّ مثل هذه التجارب قد أجريت في المصادمات الحديثة للجسيمات. وكلّ ما تمّ الحصول عليه هو هادرونات أكثر (أزواج من كوارك - كوارك مضاد. أو ثلاثية) وليس كواركا معزولة. تُسمّى هذه الخاصية للكواركات-تتماسك مع بعضها في مجموعات عديمة اللون- بـ "حجز".

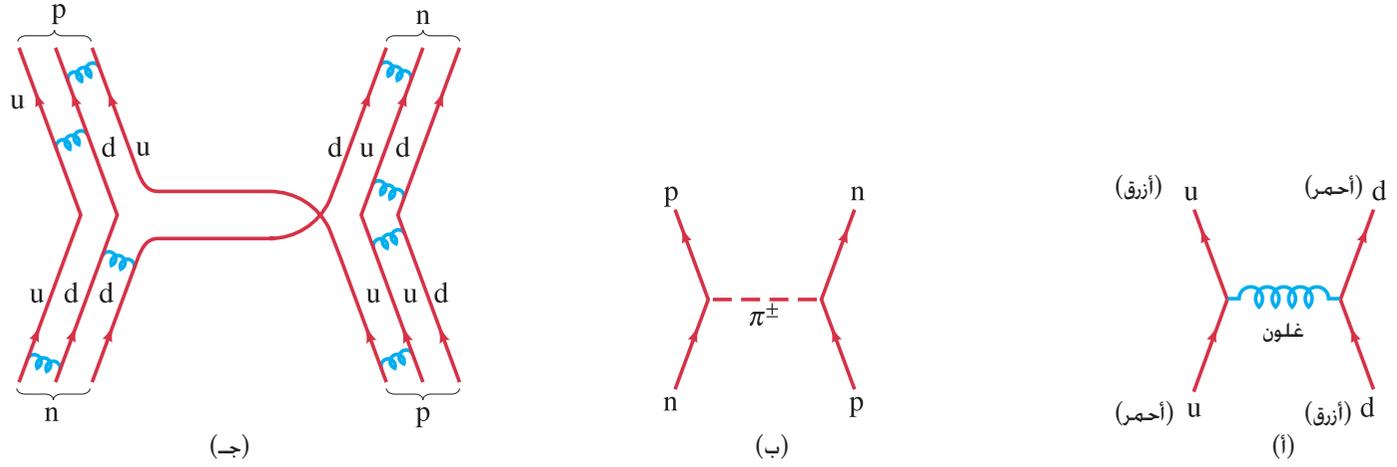
* مقارنة مع التفاعل الكهرومغناطيسي. حيث لا يحمل الفوتون شحنة كهربائية. بما أنّ الفوتونات لها شحنة لونية. فإنها تستطيع أن تجذب بعضها بعضًا وتكون جسيمات مركبة (لا تستطيع الفوتونات القيام بذلك). وما زال البحث جاريًا عن مثل هذه "الكرات الغريبة"

فيرميونات
بوزونات

QCD

غلونات

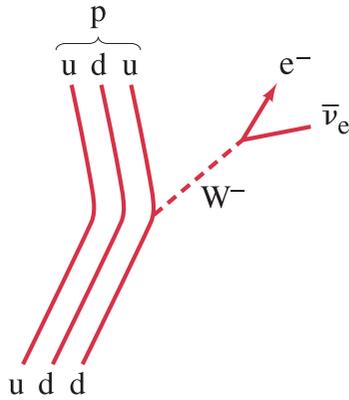
حجز



الشكل 31-32 (أ) القوة بين كواركين تجعلهما متماسكين مع بعضهما كجزء من البروتون، على سبيل المثال، وتنقل بواسطة غلون يشتمل في هذه الحالة على شحنة لونية. (ب) تفاعل قوي $n + p \rightarrow n + p$ من خلال تبادل جسيم π ميزون مشحون (+ أو -، اعتماداً على فيما إذا تحرك إلى اليمين أو إلى اليسار) (ج) التمثيل الكواركي للتفاعل نفسه $n + p \rightarrow n + p$. تمثل الخطوط الزرقاء التي على شكل ملف بين الكواركات تبادل الغلون الذي يجعل الهادرونات متماسكة مع بعضها.

وللقوة اللونية خاصية مهمة، وهي أنه كلما اقترب كواركان من بعضهما كثيراً (أو بشكل مكافئ: إذا كان لهما طاقة عالية) فإن القوة بينهما تصبح أصغر. وتدعى هذه الميزة حرية التقارب. رأينا فيما سبق أن القوة الضعيفة يعتقد بأنها تُنقل بواسطة الجسيمات W^+ ، W^- و Z^0 . تؤثر هذه القوة بين الشحنات الضعيفة التي يمتلكها كل جسيم. وهكذا، فإن كل جسيم أولي يمكن أن يكون له: شحنة كهربائية، وشحنة ضعيفة، وشحنة لونية، وكتلة الجاذبية الأرضية. على الرغم من أن واحدة أو أكثر من هذه الصفات يمكن أن تكون صفراً. على سبيل المثال، فإن الشحنة اللونية لليبتونات جميعها تساوي صفراً، وبالتالي لا تتفاعل من خلال القوة القوية.

الليبتونات والقوة الضعيفة



الشكل 14-32 مخطط فايمان يوضح التمثيل الكواركي β لاضمحلال النيوترون إلى بروتون بإصدار جسيم بيتا.

المثال المفاهيمي 8-32 اضمحلال بيتا

ارسم مخطط فايمان، موضحاً ماذا يحدث في اضمحلال بيتا باستعمال الكواركات. الإجابة: إن اضمحلال بيتا هو نتيجة للتفاعل الضعيف، حيث يكون الجسيم الناقل W^+ أو Z^0 . إن ما يحدث بشكل جزئي هو أن النيوترون (تركيبه الكواركي udd) يضمحل إلى بروتون (udd). ظاهرياً، يتحول كوارك d (شحنته $+\frac{2}{3}e$) إلى كوارك u (شحنته $-\frac{1}{3}e$). وهذا يعني من مبدأ حفظ الشحنة أن جسيماً مشحوناً بشحنة سالبة، يُدعى W^- ، قد صدر عن الكوارك d . وبما أن الحالة النهائية للتفاعل تشتمل على إلكترون ونيوترينو مضاد، فلا بد أن يكونا نتيجة للاضمحلال الافتراضي W^- . كما هو موضح في (الشكل 14-32).

وخلاصة هذا، فإن النموذج المعياري ينص على أن الجسيمات الأولية حقاً (جدول 5-32) هي الليبتونات، والكواركات، وبوزونات القياس (فوتون، Z و W ، والغلونات). وهناك بعض النظريات التي تقترح وجود بوزونات أخرى. جذر الإشارة إلى أن الفوتون، والليبتونات، و W^+ ، W^- و Z^0 قد تمت مشاهدتها في تجارب مختلفة. ولكن حتى الآن، تمت مشاهدة مجموعات الكواركات (الباريونات والميزونات). ويبدو من المرجح أن الكواركات الحرة والغلونات لا يمكن مشاهدتها.

توحيد

تكمّن الميزة المهمة لأيّ دراسة نظرية جديدة في محاولة إيجاد قاعدة موحدة للقوى المختلفة في الطبيعة. وكان هذا هو أمل أينشتاين لأمد طويل، ولكنه لم يتمكن من تحقيقه. إن ما يُسمّى **بنظرية القياس** التي توحد التفاعلات الضعيفة والكهرومغناطيسية قد قدمت في ستينيات القرن الماضي من قبل العلماء: وينبرغ، وغلاشو، وعبد السلام. في هذه **النظرية الكهروضعيفة**، ينظر للقوتين الضعيفة والكهرومغناطيسية على أنهما مظهران مختلفان لتفاعل وحيد أكثر أساسية يُسمّى الكهروضعيف. لقد كان للنظرية الكهروضعيفة عدة نجاحات بما فيها التنبؤ بوجود الجسيمات W^\pm كناقل للقوة الضعيفة، بكتل تساوي $81 \pm 2 \text{ GeV}/c^2$ ، والتي تتفق تماماً مع القيم التي تم قياسها وتساوي $80.41 \pm 0.10 \text{ GeV}/c^2$ (وبدقة مماثلة بالنسبة إلى الجسيم Z^0).

النظرية الكهروضعيفة

النموذج العياري

في الوقت الحاضر، غالباً ما تُسمّى المجموعة التي تشتمل على النظرية الكهروضعيفة زائد QCD بالنسبة إلى التفاعل القوي باسم **النموذج العياري**.

لقد تساءل علماء الفيزياء النظرية عن سبب امتلاك جسيمات W و Z كتلاً كبيرة بدلاً من أن تكون عديمة الكتلة كالفوتون. قدمت النظرية الكهروضعيفة تفسيراً مقترحاً لذلك بواسطة مجال هيغز الجديد وجسيمه "بوزون هيغز" الذي يتفاعل مع W و Z لإبطائها. ولأنها مجبرة على الحركة بسرعة أقل من سرعة الضوء، فيجب عليها أن تكتسب كتلة. وسيكون البحث عن بوزون هيغز من أولويات علماء فيزياء الجسيمات الأولية عندما يبدأ العمل في مسارع تصادم الهادرون الكبير (البند 32-12) في سيرن. حتى الآن استنتجت الأبحاث وجود جسيم هيغز أخف من $115 \text{ GeV}/c^2$. وعلى الرغم من ذلك، فمن المتوقع ألا تكون كتلته أكبر من $200 \text{ GeV}/c^2$ ، فنحن نضيقها.

هيغز

11-32 النظريات الموحدة الكبرى

مع نجاح النظرية الكهروضعيفة الموحدة جرت محاولات لدمجها مع QCD بالنسبة للقوة (اللونية) القوية فيما يسمّى بالنظرية الموحدة الكبرى (GUT). لقد تحقق في نوع مثل النظرية الموحدة الكبرى توحيد القوى الكهرومغناطيسية والضعيفة والقوية. وينتمي فيها نوع واحد من الجسيمات أي الليبتونات والكواركات إلى العائلة نفسها. ويمكنها أن تتغير بحرية من نوع إلى آخر. والقوى الثلاث عبارة عن صفات مختلفة لقوة أساسية وحيدة. وعلى أي حال، يتنبأ بحدوث التوحيد فقط على مقياس أقل من حوالي 10^{-32} m الذي يقابل طاقة عالية جداً تصل إلى 10^{16} GeV تقريباً. فإذا اقترب جسيمان أوليان (ليبتونات أو كواركات) من بعضهما على مقياس التوحيد هذا، فإنّ الصفة الأساسية الظاهرية التي تفرقهما عن بعضهما تختفي على هذا المستوى. ويمكن أن يتحول الكوارك بسهولة إلى ليبتون، أو العكس. وعليه، لن تكون أعداد الباريون والليبتون محفوظة. كما أنّ القوى الضعيفة، والكهرومغناطيسية، والقوية تمزج في قوة وحيدة شدتها وحيدة أيضاً.

GUT

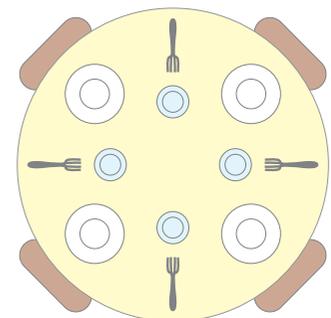
توحيد القوى

أما ما يحدث بين المسافة الموحدة البالغة 10^{-32} m والمسافات العادية (الكبيرة) فيسمى خرقاً للتماثل. لتوضيح ذلك؛ افترض ذرة في بلورة ما. داخل عمق الذرة هناك تماثل كبير؛ تكون الغيمة الإلكترونية في المناطق الأعمق متماثلةً كروياً (فصل 28). كلما ابتعدنا نحو الخارج، ينهار هذا التماثل؛ تتوزع الغيوم الإلكترونية بشكل مميز على طول الخطوط (الروابط) التي تربط الذرات في البلورة. وبطريقة مشابهة، فإنّه عند الحد 10^{-32} m تكون القوة بين الجسيمات الأولية نظرياً قوةً وحيدة؛ إنها متماثلة، ولا ينفرد نوع من الشحنة على آخر. ولكن عند المسافات الكبيرة، ينهار هذا التماثل. ونرى ثلاث قوى مميزة. (في النموذج المعياري للتفاعلات الكهروضعيفة، (البند 32-10). يحدث انهيار للتماثل بين التفاعلات الكهرومغناطيسية والضعيفة عند حوالي 10^{-18} m).

فرق التماثل

المثال المفاهيمي 9-32 التماثل

هناك أربعة أماكن متماثلة يمكن الجلوس عليها إلى الطاولة المبنية في (الشكل 32 - 15). جلوس أربعة أشخاص لتناول الطعام صف تماثل هذه الطاولة، وما يحدث له عندما يبدأ أحد الأشخاص بتناول الطعام. الإجابة: هذه الطاولة لها أنواع عديدة من التماثل. فهي متماثلة بالنسبة للدوران بزوايا 90° ؛ أي أنّ الطاولة تظهر كما هي إذا حرك كل شخص كرسيه واحداً إلى اليسار أو إلى اليمين. كما أنها متماثلة أيضاً شمالاً - جنوباً وشرقاً - غرباً. بحيث إنّ تبادل الطعام عبر الطاولة لن يؤثر في الهيئة التي تظهر فيها. ولا يؤثر أيضاً فيما إذا أخذ أي شخص الشوكة التي إلى يمين الصحن أو الشوكة التي إلى يساره، ولكن حالما يأخذ الشخص الأول أياً من الشوكتين، فإنه يحدّد أيضاً الاختيار بالنسبة لبقية الأشخاص الذين يجلسون إلى الطاولة. وينهار التماثل. إنّ التماثل الأساسي ما زال قائماً؛ حيث يمكن اختيار الزجاجات الزرقاء بأي من الطريقتين، ولكن يجب أن يحصل اختياراً ما، وعند هذه اللحظة ينهار التماثل في تناول الطعام.



الشكل 15-32 التماثل حول طاولة. (المثال 9-32).

بما أن التوحيد يحدث عند مثل هذه المسافات الدقيقة والطاقات الهائلة، فمن الصعب اختبار النظرية تجريبياً. ولكنه ليس مستحيلًا تمامًا. أحد التنبؤات القابلة للاختبار هي فكرة اضمحلال البروتون (على سبيل المثال، من خلال $p \rightarrow \pi^0 + e^+$)، وخرق مبدأ حفظ عدد الباريون. ويمكن حدوث ذلك إذا اقترب كواركان من بعضهما بعضًا ضمن مسافة 10^{-31} m. ولكنه غير مرجح تمامًا عند درجة الحرارة والطاقة الطبيعيين. لذا، فإن اضمحلال البروتون يمكن أن يكون عملية غير مرجحة الحدوث فقط. في الشكل البسيط لنظرية GUT قدر علماء الفيزياء النظرية أن مدة حياة البروتون في نوع الاضمحلال $p \rightarrow \pi^0 + e^+$ يساوي حوالي 10^{31} سنة. وقد جاء هذا فقط ضمن نطاق قابلية الاختبار*. ما زال اضمحلال البروتون غير مشاهد. على الرغم من أن التجارب وضعت حدًا أدنى لمدة حياة البروتون في نمط الاضمحلال المشار إليه أعلاه ليكون 10^{33} سنة. أكبر إلى حد ما مما تنبأ به العلماء. قد يبدو هذا محبطًا، ولكنه من جهة أخرى، يقدم نوعًا من التحدي. وبالفعل، فإن النظريات الموحدة الكبرى الأكثر تعقيدًا لم تتأثر بهذه النتيجة.

المثال 10-32 اضمحلال بروتون.

يستعمل في تجربة 3300 طن من الماء بهدف الانتظار لرؤية اضمحلال البروتون من النوع $p \rightarrow \pi^0 + e^+$. إذا دام تشغيل التجربة أربع سنوات دون الكشف عن الاضمحلال، فقدّر الحد الأدنى لعمر النصف للبروتون. النهج: كما وضحنا في موضوع الاضمحلال الإشعاعي، فإن عدد الاضمحلال يتناسب مع عدد الجسيمات الأم (N)، والفترة الزمنية (Δt) وثابت الاضمحلال (λ) الذي يرتبط مع عمر النصف $T_{1/2}$ من خلال العلاقة (انظر إلى المعادلتين 3-30 و 6-30):

$$\Delta N = -\lambda N \Delta t = -\frac{\ln 2}{T_{1/2}} N \Delta t$$

الحل: بما أننا نتعامل مع مقادير فقط، فإننا سنحلّ المعادلة بالنسبة إلى $T_{1/2}$:

$$T_{1/2} = \frac{N}{\Delta N} \Delta t \ln 2$$

لأن $\Delta N < 1$ خلال المحاولة التي تدوم أربع سنوات، فإن

$$T_{1/2} > N(4 \text{ yr})(0.693)$$

حيث N عدد البروتونات الموجودة في كمية الماء البالغة 3300 طن. ولتحديد N ، يجب ملاحظة أن جزيء الماء H_2O يحتوي على 10 (= 2 + 8) بروتونات. لذا، فإن مولا واحدا من الماء $10^3 \times 6 \times 10^{23}$ يحتوي على 6×10^{23} بروتون في 18 g من الماء، أو حوالي 3×10^{26} بروتون لكل كيلوجرام. كل طن يساوي 10^3 kg. لذا، فإن الغرفة تحتوي على 1×10^{33} protons $\approx (3 \times 10^{26} \text{ protons/kg})(3.3 \times 10^6 \text{ kg})$ وأنّ تقديرنا التقريبي للحد الأدنى لعمر النصف للبروتون هو $3 \times 10^{33} \text{ yr} \approx (10^{33})(4 \text{ yr})(0.7)$. $T_{1/2} >$

الربط مع علم الكونيات

وهناك تنبؤ مثير للنظريات الموحدة يرتبط بعلم الكونيات (الفصل 33). حيث يعتقد أنه خلال أول 10^{-35} s بعد الانفجار العظيم الذي أدى إلى خلق الكون، كانت درجة الحرارة عالية جدًا، بحيث إنّ طاقة الجسيمات تناظر تلك التي لقياس التوحيد. عدد الباريون لم يكن محفوظًا. وربما سمح ذلك بعدم التوازن الذي نشاهده في الكون والمتمثل في سيطرة المادة ($B > 0$) على ضد المادة ($B < 0$). هذا المثال الأخير مهمٌّ؛ لأنه يوضح الترابط العميق بين الدراسات عند أيّ من طرفي مقياس الحجم. إنّ النظريات حول الأجسام الدقيقة (الجسيمات الأولية) لها تأثير قوي في فهم الكون على نطاق واسع. وسوف ندرس هذا بالتفصيل في الفصل القادم.

* هذا أكبر بكثير من عمر الكون ($14 \times 10^9 \text{ yr}$). ولكن ليس من الضروري أن ننتظر 10^{31} سنة لمشاهدته. وبدلاً من ذلك، يمكن أن ننتظر اضمحلال واحد من 10^{31} بروتون خلال سنة. (انظر إلى المعادلتين 3-30 و 6-30، $\Delta N = \lambda N \Delta t = 0.693 N \Delta t / T_{1/2}$)

12-32 الأوتار والتماثل الفائق

إنّ الطموح أكثر من النظريات الموحدة الكبرى. لذا، فإنّ هناك محاولات لدمج الجاذبية. وبذلك تتوحد القوى الأربع في الطبيعة في نظرية واحدة (مثل هذه النظريات، تُسمّى أحيانًا بطريقة مضللة نظريات كل شيء). وهناك نظريات متوافقة مع بعضها حاول توحيد القوى الأربع جميعها تُسمّى نظريات الأوتار. وفيها لا تُصوّر الجسيمات الأولية (الجدول 32 - 5) على أنّها نقط. بل أوتار ذات بعد واحد ربّما يصل طولها إلى 10^{-35} m.

نظرية الأوتار

هناك فكرة أخرى أيضًا ذات صلة. وهي التماثل الفائق التي تطبق على الأوتار لتتشكل بذلك نظرية الأوتار الفائقة. تنبأ فكرة التماثل الفائق بوجود التفاعلات التي تغير الفيرميونات إلى بوزونات وبالعكس. وأنّ الفيرميونات المعروفة جميعها لها بوزونات شريكة التماثل الفائق. لذلك، فإنّ لكل كوارك (فيرميون) معروف كواركًا فائق التماثل (بوزون). كما أنّ لكل ليبتون ليبتونًا فائق التماثل. وعلى النوال نفسه. سيكون لكل بوزون معروف (على سبيل المثال، الفوتونات والغلونات) فيرميون فائق التماثل (فوتينات وغلونينات).

التماثل الفائق

تنبأ فكرة التماثل الفائق أيضًا بأنّ الجسيم الذي ينقل قوة الجاذبية "غرافيتون له شريك يُسمّى غرافيتينو. ربما تكون جسيمات التماثل الفائق مرشحة للمادة المظلمة في الكون (سيناقش في الفصل 33). ولكن لماذا لم يكتشف هذا الجزء المفقود من الكون مطلقًا؟ إنّ أفضل تخمين هو أنّ جسيمات التماثل الفائق ربما تكون أثقل من نظيراتها التقليدية. وربما تكون ثقيلة جدًا إلى الحد الذي لا يسمح بإنتاجها في المسارعات الموجودة حاليًا. وحتى يتم اكتشاف جسيم فائق التماثل. قد يكون ذلك ممكنًا في مسارع تصادم الهادرون الكبير في سيرن. ومع ذلك، تبقى هذه الفكرة- التماثل الفائق - مجرد تخمين رائع. وهكذا، فإنّ عالم الجسيمات الأولية يفتح آفاقًا جديدة. ومن المؤكد أنّ ما سيحدث في المستقبل سيكون مثيرًا.

ملخص

• يمكن أن تُصنّف الجسيمات الأخرى إلى ليبتونات أو هادرونات. تشارك الليبتونات في التفاعلات الضعيفة والكهرومغناطيسية المشحونة كهربائيًا. ينظر للهادرونات حاليًا على أنّها مكونة من كواركات. تشارك أيضًا في التفاعلات القوية. يمكن أن تصنف الهادرونات إلى ميزونات. عدد الباريون لها صفر. وإلى باريونات عدد الباريون لها غير الصفر.

• تضمحل الجسيمات جميعها باستثناء الفوتون، والإلكترون، والنيوترونات والبروتون بأعمار نصف يمكن قياسها. حيث تتراوح بين 10^{-25} s و 10^3 s. يعتمد عمر النصف على القوة التي تسود عملية الاضمحلال. يتميز الاضمحلال الضعيف بأعمار نصف أكبر من حوالي 10^{-13} s. أما الاضمحلال الكهرومغناطيسي، فيتميز بأعمار نصف من رتبة 10^{-16} s إلى 10^{-19} s. تُسمّى الجسيمات الأقل حياة رنينًا. تضمحل من خلال التفاعل القوي وتعيش مدة 10^{-23} s فقط.

• في الوقت الحاضر، يرى النموذج المعياري للجسيمات الأولية أنّ الكواركات هي لبنات البناء الأساسية للهادرونات. تُسمّى الكواركات الستة "نكهات" وهي: علويّ، وسفليّ، وغريب، وساحر. وقاع. وقمة. لقد توقع العلماء أنّ عدد الكواركات هو عدد الليبتونات نفسه (ستة لكل منهما). وأنّ الكواركات والليبتونات هي الجسيمات الأولية الفعلية إضافة إلى بوزونات القياس (γ, W, Z , غلونات). يقال إنّ للكواركات لونًا. وحسب نظرية ديناميكا اللون الكمية (QCD) فإنّ قوة اللون القوية تؤثر بين شحناتها اللونية، وتنقل بواسطة غلونات. ترى النظرية الكهروضعيفة أنّ الفوتين الكهرومغناطيسية والضعيفة ميزتان لتفاعل أساسي وحيد. تُسمّى نظرية QCD زائد النظرية الكهروضعيفة بالنموذج المعياري.

تقترح النظريات الموحدة الكبرى للقوى بأنّه عند المسافات القصيرة جدًا (10^{-32} m) والطاقة العالية جدًا تبدو القوى الضعيفة، والكهرومغناطيسية، والقوية جميعها قوةً وحيدة. وأنّ الاختلاف الأساس بين الكواركات والليبتونات يختفي.

تُستخدم مسارعات الجسيمات في تعجيل الجسيمات المشحونة. مثل الإلكترونات والبروتونات إلى طاقة عالية جدًا. إنّ الطول الموجيّ لجسيمات الطاقة العالية قصير. وبالتالي يمكن استخدامها في سبر تركيب المادة عند مسافات صغيرة جدًا بدقة. تسمح الطاقة الحركية العالية لهذه الجسيمات أيضًا بإنتاج جسيمات جديدة خلال التصادم (بواسطة $E = mc^2$)

• يُستخدم في السيكلوترون والسنكروترون مجال مغناطيسي يجعل الجسيمات تتحرك في مسار دائري بحيث يتم تعجيلها على فترات بواسطة جهد مرتفع. تعمل المسارعات الخطيّة على تعجيل الجسيمات على طول خط مستقيم. تسمح الحزم المتصادمة بإنتاج طاقة تفاعل عالية.

• الجسيم المضاد له كتلة الجسيم نفسها، ولكن شحنته معاكسة. ربما تكون بعض الخصائص الأخرى أيضًا معاكسة: فعلى سبيل المثال، عدد الباريون (عدد النيوكلون) للبروتون المضاد معاكس لذلك الذي للبروتون.

• في التفاعلات النووية والجسيمية جميعها، يجب أن تتحقق قوانين الحفظ التالية: كمية التحرك الخطية، وكمية التحرك الزاوية، والكتلة - الطاقة، والشحنة الكهربائية، وعدد الباريون، وأعداد الليبتون.

• بعض الجسيمات لها خاصية تُسمّى الغرابة، وهي محفوظة بواسطة القوة القوية وليس القوة الضعيفة. كما أنّ الخصائص التالية: ساحر، وقاع، وقمة محفوظة بواسطة القوة القوية وليس بواسطة القوة الضعيفة.

• تمامًا كما يقال بأنّ القوة الكهرومغناطيسية تنتج من تبادل الفوتونات، فإنّ القوة النووية القوية كان يعتقد في البداية أنّها تنقل بواسطة ميزونات لها كتلة سكون. ولكن النظرية الحديثة تقول إنّ القوة تنقل بواسطة غلونات عديمة الكتلة. تنقل جسيمات W و Z القوة الضعيفة. تُسمّى ناقلات القوى الأساسية بوزونات القياس، وتشمل كلا من الفوتون، والغلونات، و W ، و Z .

11. بواسطة أيّ تفاعل يضمحل كلٌّ من Σ^+ و Σ^0 إلى Λ^0 ، ولماذا؟
12. يمتلك الباريون Δ مغزلية $\frac{3}{2}$ عدد باريون 1 وشحنة كهربائية $Q = +2, +1, 0$ أو -1. لماذا لا تكون هناك شحنة $Q = -2$ ؟
13. أيّ من الجسيمات الواردة في (الجدول 4-32) يضمحل من خلال التفاعل الكهرومغناطيسي؟
14. أيّ من الجسيمات الواردة في (الجدول 4-32) يضمحل من خلال التفاعل الضعيف.
15. تمتلك الكواركات مغزلية تساوي $\frac{1}{2}$. كيف تفسر حقيقة أنّ مغزلية الباريونات $\frac{1}{2}$ أو $\frac{3}{2}$ ومغزلية الميزونات 0 أو 1؟
16. افترض أنّ هناك نوعاً من النيوتريونو عديم الكتلة، وليس له شحنة لونية ولا كهربائية. ولا يتأثر بالقوة الضعيفة. هل يمكنك القول بأنّ هذا الجسيم موجود؟
17. هل يمكن جسيم ما أن يكون: (أ) ليببتونا وباريونا؟ (ب) باريونا وهادرونا؟ (ج) ميزونا وكواركا؟ (د) هادرونا وليبتونا؟ فسّر إجابتك.
18. استخدم أفكار نظرية ديناميكا اللون الكمية. هل سيكون ممكناً إيجاد جسيمات مكونة من كواركين دون كواركات مضادة؟ ماذا عن كواركين وكواركين مضادين؟
19. لماذا تضمحل النيوترونات عندما تكون حرّة. ولا تضمحل وهي داخل النواة؟
20. هل يمكن حدوث التفاعل $e^- + p \rightarrow n + \bar{\nu}_e$ ؟ فسّر إجابتك.
21. أحياناً، يضمحل الجسيم Λ حسب التفاعل الآتي:
 $\Lambda^0 \rightarrow p^+ + e^- + \bar{\nu}_e$ أيّ من القوى الأربع في الطبيعة مسؤولة عن هذا الاضمحلال؟ كيف عرفت ذلك؟

1. اعط تفاعلاً بين نيوكلونين، مشابه لما في (المعادلة 32 - 4)، والذي يمكنه إنتاج π^- .
2. إذا تحرك بروتون بسرعة عالية جداً بحيث إنّ طاقته الحركية أكبر بكثير من طاقة سكونه (m_0c^2). هل يمكنه بالتالي الاضمحلال عن طريق $p \rightarrow n + \pi^+$ ؟
3. ما الذي ستحتويه ذرة مضادة مكونة من الجسيمات المضادة للمكونات الطبيعية للذرات؟ ما الذي قد يحدث إذا تمّ اتصال بين مادة مضادة، مكونة من مثل هذه الذرات المضادة مع عالمنا الطبيعي للمادة؟
4. ما الجسيم الذي يشير في اضمحلال ما إلى التفاعل الكهرومغناطيسي؟
5. هل وجود النيوتريونو بين نواج اضمحلال جسيم ما يعني بالضرورة أنّ هذا الاضمحلال يحدث من خلال التفاعل الضعيف؟ هل كلّ اضمحلال يحدث من خلال التفاعل الضعيف ينتج منه نيوتريونو؟ فسّر ذلك.
6. لماذا يضمحل النيوترون من خلال التفاعل الضعيف بالرغم من أنّ النيوترون واحد نواج اضمحلاله (البروتون) يتفاعلان بشكل قوي؟
7. أيّ من التفاعلات الأربعة (القوي، والكهرومغناطيسي، والضعيف، والجاذبية) يشارك فيه الإلكترون؟ البروتون؟ النيوتريونو؟
8. تحقّق من حفظ الشحنة، وكذلك من عدد الباريون في كلّ اضمحلال موجود في (الجدول 32 - 2).
9. أيّ اضمحلال في (الجدول 2-32) يحدث من خلال التفاعل الكهرومغناطيسي؟
10. أيّ اضمحلال في (الجدول 2-32) يحدث من خلال التفاعل الضعيف؟

مسائل

32 - 1 الجسيمات والمسارات

10. (II) يستخدم سيكلوترون نصف قطره 1.0 m لتعجيل ديوترونات (${}^2\text{H}$) إلى طاقة 12 MeV. (i) ما المجال المغناطيسي اللازم؟ (ب) ما تردد الجهد الذي يؤثر بين طرفي الفجوة؟ (ج) إذا كان الفرق في الجهد بين طرفي الفجوة يساوي في المعدل 22 kV، كم عدد الدورات التي تعملها الجسيمات قبل الخروج؟ كم الزمن الذي يحتاج إليه ديوترون واحد حتى يصل من نقطة البداية إلى المخرج؟ (ج) قدر المسافة التي يقطعها خلال هذا الزمن.
11. (II) يبلغ نصف قطر النفق الذي سيستخدم لتوضع فيه مغناط مسارع تصادم الهادرون الكبير (LHC) حوالي 4.25-km والذي سيعجل حزم البروتون إلى طاقة 7.0 TeV. ما المجال المغناطيسي الذي يُحتاج إليه؟
12. (II) يحتاج مسارع تيفاترون في مختبر فيرمي البالغ نصف قطره 1.0-km إلى حوالي 20 s حتى يعجل البروتونات المحزنة من 150 GeV إلى 1.0 TeV. يتم التعجيل مرة في كلّ دورة. قدر الطاقة الممنوحة للبروتونات في كلّ دورة. (يمكن الافتراض بأنّ سرعة البروتونات تصل إلى سرعة الضوء c خلال الزمن اللازم لهذا التعجيل).
13. (III) أثبت أنّ طاقة جسيم ما (شحنة e) في السنكروترون في الحدّ النسبي ($v \approx c$) يعطى بالعلاقة $E \text{ (in eV)} = Brc$ حيث B شدة المجال المغناطيسي، و r نصف قطر المدار الدائري (وحدات SI).
14. (III) ما شدة المجال المغناطيسي اللازمة لتعجيل البروتونات إلى 1.0-TeV في سنكروترون مختبر فيرمي البالغ نصف قطره 1.0-km؟

1. (I) ما الطاقة الكلية لبروتون طاقته الحركية تساوي 6.35 GeV؟
2. (I) احسب الطول الموجي لإلكترونات طاقتها 35-GeV.
3. (I) ما شدة المجال المغناطيسي في السيكلوترون الذي تعمل فيه البروتونات 2.8×10^7 دورة في الثانية؟
4. (I) ما الزمن الذي يحتاج إليه بروتون طاقته عالية جداً لإتمام دورة واحدة في مسارع مختبر فيرمي الذي يبلغ نصف قطره 1.0 km؟
5. (I) إذا تمّ تعجيل جسيمات α في السيكلوترون الوارد في (مثال 2-32)، كم يجب أن يكون تردد الجهد المؤثر بين طرفي الفجوة؟
6. (II) (i) إذا عجل السيكلوترون الوارد في (مثال 2-32) جسيمات α ، فما الطاقة القصوى التي تكتسبها؟ كم ستكون سرعة هذه الجسيمات؟
- (ب) أعد الحّل بالنسبة للديوترونات (${}^2\text{H}$). (ج) كم التردد المطلوب للجهد في كلّ حالة؟
7. أيهما أفضل لمعرفة تفاصيل النواة: بروتونات بقوة 30 MeV أول دقائق ألف بقوة 30 MeV؟ قارن بين طولي موجتيهما مع حجم مركز نواة النواة
8. (II) إذا كان الجهد المؤثر بين طرفي فجوة سيكلوترون 55 kV، فكم عدد الدورات التي تعملها البروتونات لتصل طاقتها الحركية إلى 25 MeV؟
9. (II) ما الطول الموجي (أقصى مسافة قابلة للتحليل) لبروتونات طاقتها 7.0 TeV؟

29. (II) احسب الطاقة الحركية لكل ناخج من ناخجي الاضمحلال $\Xi^- \rightarrow \Lambda^0 + \pi^-$. افرض أنّ الجسيم Ξ^- يضمحل من السكون.
30. (III) هل يمكن للجسيم π^+ ميزون أن يُنتج إذا تصادم بروتون طاقته 100-MeV مع بروتون ساكن؟ ما أقل طاقة حركية يجب أن يمتلكها البروتون الساقط؟
31. (III) احسب الطاقة الحركية القصوى للإلكترون في الاضمحلال $\mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu$. [مساعدة: في أي اتجاه يجب أن يتحرك النيوترونان بالنسبة إلى الإلكترون لكي يُعطي هذا الأخير الطاقة الحركية القصوى؟] الطاقة وكمية التحرك كلاهما محافظ. استخدم الصيغ النسبية
- 7-32 - 11-32 الرنين، النموذج المعياري، الكواركات، QCD، GUT
32. (I) استخدم (الشكل 11-32) لتقدير عرض الطاقة. ثم مدة حياة الرنين Δ مستخدماً مبدأ عدم التحديد.
33. (I) إذا علم أنّ عرض الطاقة الذي تم قياسه لميزون J/ψ يساوي 88 keV. فقدر مدة حياته.
34. (I) إذا علم أنّ عرض الطاقة الذي تم قياسه لميزون ψ (3685) هو 277 keV. فقدر مدة حياته.
35. (I) ما عرض الطاقة (أو عدم التحديد) لكل من (أ) η^0 (ب) Σ^0 ؟ انظر إلى (الجدول 2-32).
36. (I) يتشكل ميزون B^- من كواركين هما $b\bar{u}$. (أ) أثبت أنّ ذلك يتوافق مع الأعداد الكمية كلها. (ب) ما مجموعات الكوارك لكل من B^+ و B^0 و \bar{B}^0 ؟
37. (II) أيّ اضمحلال ما يلي ممكن الحدوث؟ أما بالنسبة إلى الاضمحلال الذي لا يمكن حدوثه. فوضّح أيّ القوانين التي لم تتحقق.
- (أ) $\Xi^0 \rightarrow \Sigma^+ + \pi^-$
- (ب) $\Omega^- \rightarrow \Sigma^0 + \pi^- + \nu$
- (ج) $\Sigma^0 \rightarrow \Lambda^0 + \gamma + \gamma$
38. (II) ما مجموعات الكوارك التي يمكن أن تتشكل (أ) النيوترون؟ (ب) النيوترون المضاد؟ (ج) Λ^0 ؟ (د) $\bar{\Sigma}^0$ ؟
39. (II) ما الجسيمات التي تنتجها مجموعات الكوارك التالية: (أ) uud ؟ (ب) $\bar{u}\bar{u}\bar{s}$ ؟ (ج) $\bar{u}\bar{s}$ ؟ (د) $d\bar{u}$ ؟ (هـ) $\bar{c}\bar{s}$ ؟
40. (II) ما مجموعة الكوارك اللازمة لإنتاج ميزون D^0 ؟ (أ) $Q = B = S = 0, c = +1$ ؟
41. (II) يمتلك ميزون D_s^+ $S = c = +1, B = 0$. ما مجموعة الكوارك التي ستنتجها؟
42. (II) باستعمال الكواركات. ارسم مخطط فايمن المحتمل للتفاعل $\pi^- + p \rightarrow \pi^0 + n$ (كما في الشكل 13-32 ج).
43. ارسم مخطط فايمن للتفاعل $n + \nu_\mu \rightarrow p + \mu^-$

15. (I) كم كمية الطاقة التي تنطلق في الاضمحلال $\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$ ؟ انظر إلى (الجدول 2-32).
16. (I) تقريباً. كم كمية الطاقة التي تنطلق عند اضمحلال Λ^0 إلى $n + \pi^0$ (انظر إلى الجدول 2-32).
17. (I) كم كمية الطاقة اللازمة لإنتاج زوج نيوترون - نيوترون مضاد؟
18. (I) قدر مدى القوة القوية إذا كان الجسيم الوسيط هو الكيون بدلاً من البيون.
19. (II) يقترب بروتونان نحو بعضهما بسرعات متساوية. ما أقل طاقة حركية يجب أن يمتلك كل منهما حتى يتم خلق جسيم π^0 ميزون في العملية (انظر إلى الجدول 2-32).
20. (II) ما أقل طاقة حركية يجب أن يمتلك كل نيوترون من نيوترين إذا سارا بالسرعة نفسها نحو بعضهما بعضاً. وتصادما وانتجا زوج K^+K^- بالإضافة إلى نفسيهما؟ (انظر إلى الجدول 2-32).
21. (II) قدر مدى القوة الضعيفة مستخدماً (المعادلة 3-32). مع العلم أنّ كتل الجسيمين W و Z هي من 80 إلى 90 GeV/c² تقريباً.
22. (II) ما الأطوال الموجية للفوتونين الناتجين من فناء بروتون ونيوترون مضاد من السكون؟
23. (II) لا يمكن للجسيم Λ الاضمحلال بواسطة التفاعلات التالية. ما قانون الحفظ الذي لا يتحقق في كل تفاعل من منها:
- (أ) $\Lambda^0 \rightarrow n + \pi^-$
- (ب) $\Lambda^0 \rightarrow p + K^-$
- (ج) $\Lambda^0 \rightarrow \pi^+ + \pi^-$
24. (II) للاضمحلال $\Lambda^0 \rightarrow p + \pi^-$. احسب: (أ) قيمة Q (الطاقة التي تنطلق من التفاعل). (ب) الطاقة الحركية لكل من p و π^- . مفترضاً أنّ Λ^0 يضمحل من السكون. (استخدم الصيغ النسبية).
25. (II) (أ) أثبت من خلال حفظ كمية التحرك والطاقة. أنه من غير الممكن أن يشع إلكترون معزول فوتوناً وحيداً فقط. (ب) بأخذ هذه النتيجة بالحسبان. كيف يمكنك الدفاع عن مخطط تبادل الفوتون الذي في (الشكل 7-32)؟
26. (II) ما الأطوال الموجية للبروتونين اللذين ينتجان عند فناء إلكترون ونيوترون يسيران نحو بعضهما بطاقة تبلغ 420 keV ويتصادمان رأساً برأس؟
27. (II) في الاضمحلال النادر $\pi^+ + e^+ \rightarrow \nu_e$. ما الطاقة الحركية للنيوترون؟ افرض أنّ π^+ تضمحل من السكون.
28. (II) أيّ اضمحلال وتفاعل ما يلي ممكن الحدوث؟ أما بالنسبة إلى الاضمحلال أو التفاعل الذي لا يمكن حدوثه. فوضّح أيّ القوانين التي لم تتحقق.
- (أ) $\pi^- + p \rightarrow n + \eta^0$
- (ب) $\pi^+ + p \rightarrow n + \pi^0$
- (ج) $\pi^+ + p \rightarrow p + e^+$
- (د) $p \rightarrow e^+ + \nu_e$
- (هـ) $\mu^+ \rightarrow e^+ + \bar{\nu}_\mu$
- (و) $p \rightarrow n + e^+ + \nu_e$

53. احسب قيمة Q لكل تفاعل من تفاعلات (معادلة 32-4) إنتاج البيون.

54. احسب قيمة Q للتفاعل $\Lambda^0 + K^0 \rightarrow \pi^- + p$ عندما يصطدم بليون سالب مع بروتون ساكن. قدر أقل طاقة حركية يحتاج إليها البيون لينتج هذا التفاعل. [مساعدة: افرض أن Λ^0 و K^0 ينطلقان بالسرعة نفسها].

55. كم عدد الفيرمونات الأساسية الموجودة في جزيء الماء.

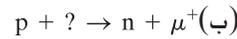
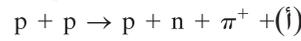
56. يُفني بروتون وبروتون مضاد بعضهما بعضًا من السكون. وينتج منهما البيونان π^+ و π^- . ما الطاقة الحركية لكل بيون؟

57. (أ) أثبت أن ما يُسمى المسافة الموحدة وبالبالغة 10^{16} GeV في النظرية الموحدة الكبرى تعادل طاقة تبلغ حوالي 10^{-32} m. استخدم مبدأ عدم التحديد وصيغة دي برولي للطول الموجي. ووضح كيف يتم تطبيقهما. (ب) احسب درجة الحرارة التي تقابل الطاقة 10^{16} GeV.

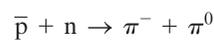
58. للتفاعل $p + p \rightarrow 3p + \bar{p}$ حيث يكون أحد البروتونين الداخلين في التفاعل ساكن. استخدم صيغة النظرية النسبية لإثبات أن طاقة حد العتبة تساوي $6m_p c^2$. أي أنها تساوي ثلاثة أضعاف قيمة Q لهذا التفاعل. حيث تمثل m_p كتلة البروتون. [مساعدة: افرض أن الجسيمات الناجمة من التفاعل جميعها لها السرعة نفسها].

59. إن أعمار الجسيمات المدرجة في (الجدول 32-2) هي بدلالة الزمن المناسب. وهي مقيسة في إطار مرجعي حيث يكون الجسيم ساكنًا. إذا تم خلق جسيم تاوولبتون بحيث إن طاقته الحركية 450 MeV كم سيكون معدل طول مساره عندما يتم قياسه في المختبر؟ أهمل أي تصادمات أخرى.

60. حدّد الجسيم المفقود في التفاعلين الآتيين:



61. استخدم نموذج الكوارك لوصف التفاعل الآتي:



62. ما الكسر من سرعة الضوء c الذي تمثله سرعة بروتون طاقته 7.0 TeV

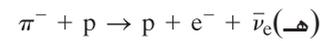
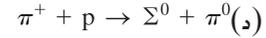
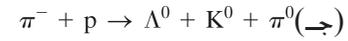
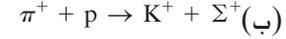
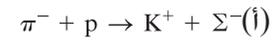
44. ما الطاقة الكلية لبروتون طاقته الحركية 25 GeV؟ ما طول الموجي؟

45. افرض أن هناك 5.0×10^{13} بروتون مخزنة عند طاقة 1.0 TeV في حلقة مسارع تيفاترون التي نصف قطرها 1.0 km. (أ) كم التيار (بالأمبير) الذي حمله هذه الحزمة؟ (ب) كم السرعة التي يجب أن تتحرك بها سيارة كتلتها 1500 kg حتى تكون طاقتها الحركية مساوية لتلك التي لهذه الحزمة؟

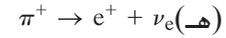
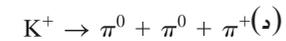
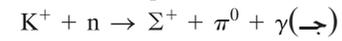
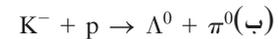
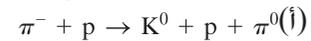
46. تخزن البروتونات في مسارع تيفاترون الذي نصف قطره 1.0 km عند طاقة 150 GeV. إذا تمّ تعجيلها بواسطة فرق جهد مقداره 2.5 MV في كل دورة. فكم المسافة التي سوف تقطعها؟ وكم الزمن الذي تحتاج إليه تقريبًا حتى تصل طاقتها 1.0 TeV

47. (أ) كم الطاقة التي تنبعث عندما يُفني إلكترون وبوزيترون بعضهما بعضًا؟ (ب) كم الطاقة التي تنبعث عندما يُفني بروتون وبروتون مضاد بعضهما بعضًا؟ (الطاقة الحركية للجسيمات جميعها صفر).

48. أيّ من التفاعلات التالية ممكنة الحدوث؟ وبواسطة أيّ تفاعل يتم ذلك؟ أما التفاعلات التي لا يسمح بحدوثها. ففسّر سبب عدم حدوثها.



49. أيّ التفاعلات التالية ممكنة الحدوث. وبواسطة أيّ تفاعل يتم ذلك؟ أما التفاعلات التي لا يسمح بحدوثها. ففسّر لم لا تحدث.



50. أحد أنماط الاضمحلال للجسيم π^+ هو $\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$. ماذا سيكون الاضمحلال المكافئ للجسيم π^- ؟ تحقق من قواعد الحفظ.

51. يحدث انهيار التماثل في النظرية الكهروضعيفة عند حوالي 10^{-18} m. أثبت أن ذلك يقابل الطاقة التي لها رتبة كتلة W^\pm .

52. يمكن قياس كتلة الجسيم π^0 من ملاحظة التفاعل $\pi^- + p \rightarrow \pi^0 + n$ عند طاقة حركية منخفضة جدًا للجسيم الساقط π^- (افرضها صفرًا). لوحظ أن النيوترون ينبعث بطاقة حركية مقدارها 0.60 MeV. استخدم حفظ الطاقة وكمية التحرك لتحديد كتلة الجسيم π^0 .