

## أصل الكتلة وأسرار الكون

أمين احريش

أستاذ فيزياء الجسيمات الأولية والكونيات، جامعة الشارقة، الإمارات العربية المتحدة

ahriche@sharjah.ac.ae

### مقدمة

عندما نسمع كلمة كتلة، تتبادر إلى أذهاننا مقادير فيزيائية مرادفة، كالحجم أو الوزن أو كمية المادة الموجودة في حيز مكاني ما. ورغم أن هذه المفاهيم ليست متطابقة تماما، لكنّها في مجملها تعبر عن مفهوم واحد، والذي يمكن أن نخصّه في عدد الجزيئات لمادة ما محتواة في حجم مُعرّف، حيث أن الجزيء هو الوحدة الصغرى من المادة التي تعبر عن خصائصها الكيميائية.

وطبيعة الحال، كما هو معلوم فإن الجزيئات تتكوّن من ذرات، بينما تتكوّن الذرة من نواة وإلكترونات ذات شحنة كهربائية سالبة تدور حول النواة بشكل هو أقرب إلى السحابة المحيطة بها منه إلى مدارات محدّدة. وبما أنّ الذرة تحمل شحنة كهربائية متعادلة فإن النواة تحمل عددا من البروتونات (ذات الشحنة الكهربائية المعاكسة لشحنة الإلكترونات) يساوي عدد الإلكترونات، بينما يكون عدد النيوترونات أكبر من عدد البروتونات في الغالب أو يساويه. إذا علمنا أن كتلة البروتون مساوية بالتقريب لكتلة النيوترون وأكبر بـ 2000 مرة من كتلة الإلكترون فإن مجمل كتلة الذرة هي كتلة النواة (أي بالتقريب كتلة البروتونات والنيوترونات).

وإذا أردنا أن نكون أكثر دقة فإن كتلة النواة الذرية هي أقل بقليل من مجموع كتل النيوترونات والبروتونات إذ يُمثّل ذلك الفرق الطفيف طاقة الترابط النووي (Nuclear Binding Energy)، وذلك بحسب المعادلة الفيزيائية الأكثر شهرة التي أتى بها أينشتاين  $E=mc^2$  (حيث تُمثّل  $E$  الطاقة و  $m$  الكتلة و  $c$  سرعة الضوء في الفراغ)، والتي تُكرّس فكرة التكافؤ بين مفهومي الطاقة والكتلة في الفيزياء الحديثة. لقد غيرت هذه المعادلة الأخيرة الكثير في حياة البشرية، مثل الفيزياء الطبية، وتوليد الكهرباء من الطاقة النووية.

ولكن، هل تساءلنا لماذا تحمل البروتونات والنيوترونات كتلة؟ لماذا كتلتها أكبر بكثير من كتلة الإلكترون؟ هل البروتونات والنيوترونات هي جسيمات أولية (أساسية)، أم أنها بدورها تتكوّن من جسيمات أصغر؟ هل توجد أشكال أخرى من المادة تتكوّن من جسيمات مشابهة للإلكترونات ولكوّنات البروتونات والنيوترونات ولكتلتها مختلفة عنها في بعض الخصائص؟ هل المادة المرصودة في كوننا المنظور (أو القابل للرصد حسب إمكانيات البشر الحالية والمستقبلية) تُمثّل كل المادة (أو الطاقة) الموجودة في الكون؟ هل كلّ مكوّنات الكون تتفاعل مع بعضها بالطريقة ذاتها أم أنّها تتفاعل بواسطة قوى مختلفة عن بعضها البعض تماما؟ كيف، ولماذا تولدت كتلة للجسيمات أثناء خلق (أو ولادة) الكون؟

إن الغوص في هذه الأسئلة يجعلنا نطرق أحد أكثر أبواب الفيزياء حداثة وتشويقا واستعمالا للرياضيات المتقدمة، ناهيك عن أنّه الأكثر شغفا على الإطلاق، إنّها فيزياء الجسيمات الأولية التي تهتم بدراسة التفاعلات الأساسية للجسيمات الأولية وعلاقتها بالمراحل الأولى في عمر الكون، أي عندما كان عمر الكون أقل من 380 ألف سنة. لكي نتناول هذه المواضيع، يجب أن نتطرق إلى بعض مفاهيم الفيزياء الحديثة، سنحاول طرحها بطريقة مبسطة وبعيدة عن التعقيدات الرياضية.

من خلال هذا المقال، سنقوم بوصف التفاعلات الأساسية لمختلف الجسيمات الأولية، ثم نُقدّم لمحة عن قصة الكون متطرقين إلى أهم الأحداث المرتبطة بنظريات فيزياء الجسيمات. وبعدها، سنقوم بمناقشة آلية حصول الجسيمات الأولية على كتلتها، وبعدها نناقش علاقة كتلة كلٍّ من البروتون والنيوترون ببنيتهما الداخلية. وفي الأخير، نستعرض مختلف الأسئلة التي ما تزال مفتوحة بالنسبة إلى كلٍّ من فيزياء الجسيمات الأولية والكونيات.

### 1. التفاعلات الأساسية للجسيمات الأولية

تنصُّ النظريات المثبتة حديثاً على أنّ المادة في مجملها تتكوّن من جسيمات أولية تسمى الكواركات (quarks)، وأنّ البروتون والنيوترون يتكوّنان من كواركين اثنين فقط: الكوارك العلوي (u (up) والسفلي (d (down)، حيث  $proton=uud$  و  $neutron=udd$  (الشكل 1).



الشكل 1. مكونات البروتون والنيوترون، حيث أن لكل كوارك لون مختلف (أحمر، أخضر أو أزرق) بسبب أن الهادرونات (مثل البروتون والنيوترون) يجب أن تكون عديمة اللون.

ولكنّ الكواركين u و d ليسا هما الوحيديين في الطبيعة، بل لدينا أربعة كواركات أخرى هي: الساحر (charm c)، الغريب (strange s)، القميّ (top t)، والقعري (bottom b). بالإضافة إلى أنّ الإلكترون لديه أخ عديم الشحنة الكهربائية ومهملة الكتلة (النوترينو الإلكتروني)، ولديه كذلك أبناء عمومة تتشابه معه ومع أخيه في الخصائص وهي الميون  $\mu$  (لديه شحنة الإلكترون ولكنه أثقل بـ 200 مرة) والطاو  $T$  (لديه شحنة الإلكترون كذلك، ولكنه أثقل بـ 3500 مرة) بالإضافة إلى النوترينوهات المرافقة لها.

تسمّى عائلة الإلكترون باللبتونات (leptons)، وهي مع الكواركات تسمّى فرميونات (fermions)، حيث أنّ لديها عزم ذاتي (سبين) نصف صحيح مما يجعلها توصف بالنموذج الإحصائي لفيرمي-ديراك على عكس البوزونات التي توصف بالنموذج الإحصائي لبوز-آينشتاين (انظر الملحق 1). تُصنّف هذه الجسيمات إلى ثلاث عائلات أو أجيال:

1. العائلة الأولى تضم الكواركين u و d، بالإضافة إلى الإلكترون والنيوترينو المرافق له، حيث تتشكّل كل المادة المرصودة من هذه العائلة.

2. العائلة الثانية تضم الكواركين s و c، بالإضافة للميون والنيوترينو المرافق له. ويمكن أن توجد في الطبيعة لمدة قصيرة جداً كناتج لتصادم الأشعة الكونية (جسيمات مشحونة كهربائياً وعالية الطاقة قادمة من الوسط بين النجمي، غالباً بروتونات) مع الطبقات العليا للغلاف الجوي للأرض (غالباً ذرات الأوزون).

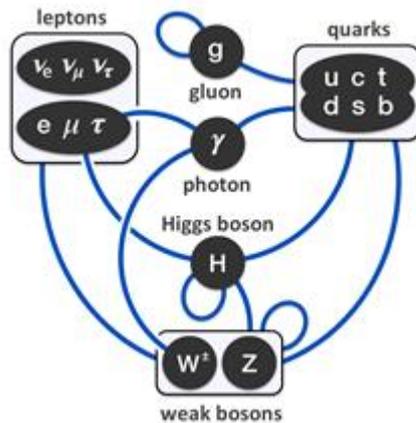
3. العائلة الثالثة تتكوّن من الكواركين t و b، بالإضافة إلى لبتون الطاو وإلكترونه المرافق، ويتمُّ تخليقها فقط في مصادمات الجسيمات عالية الطاقة، كما سنرى لاحقاً.

تخضع الجسيمات الأولية في الطبيعة إلى أربعة تفاعلات متباينة من ناحية الحدة والخصائص: القوة (1) الكهرومغناطيسية التي تصف الكهرباء والمغناطيسية والضوء، (2) الضعيفة، (3) القوية، (4) الجاذبية. هذه الأخيرة تختلف اختلافاً بنويماً عن بقية التفاعلات الأخرى، إذ أن نظرية الجاذبية (النسبية العامة) ذات طابع هندسي وليس

عباري كبقية القوى الأخرى. والمقصود هنا بالطابع الهندسي للنظرية هو أنها تنصُّ ببساطة على التكافؤ بين كمية المادة (أو الطاقة) الموجودة وانحناء نسيج الزمكان (المكان والزمان اللذان يمثلان نسيجا موحدًا حسب النسبية العامة). أما التفاعلات العياريّة فتحدث عبر حاملات تفاعل، والتي هي جسيمات تملك سبين=1، تسمى البوزونات العياريّة.

يعود الفرق بين خواص التفاعلات العياريّة إلى مفهوم رياضي مهم وعميق: التناظرات (symmetries)، الذي وضعت أساسه الرياضياتية الألمانية إيمي نوتر Emmy Noether سنة 1918، والذي ينصُّ ببساطة على أنه إذا وُجدت تناظرات لدى جملة فيزيائية فإن ذلك سيؤدي حتماً إلى وجود كميات فيزيائية محفوظة والعكس صحيح: أي إذا وجدت كميات محفوظة فإن سبب ذلك هو وجود تناظرات (انظر الملحق 2). لهذا فإن القوى العياريّة الثلاث (الكهرومغناطيسية والضعيفة والقوية) تختلف عن بعضها بسبب اختلاف التناظر الذي تملكه كلّ منها.

إن أبسط القوى، من ناحية شكل التناظر الذي تملكه، هي القوة الكهرومغناطيسية التي تملك حاملاً وحيداً لتفاعلها، وهو جسيم الضوء (أو الفوتون). أمّا القوى التي تملك تناظراً أكبر فهي القوى النووية القوية والتي تملك 8 حاملات للتفاعل (وتسمى غليونات gluons). في حين تملك القوى الضعيفة 3 حاملات للتفاعل اثنين مشحونين كهربائياً ( $W^{\pm}$ ) وواحد محايد كهربائياً ( $Z^0$ ). نلاحظ أن كلاً من  $Z^0$  و  $W^{\pm}$  يمثّل جسيمات ثقيلة نسبياً مما يفسّر محدودية مدى تأثير التفاعلات الضعيفة على عكس التفاعلات الكهرومغناطيسية والقوية ذات المدى اللانهائي، كون حاملات تفاعلها عديمة الكتلة.



الشكل 2. التفاعلات الممكنة بين مختلف مكونات النموذج المعياري.

يوضّح الشكل 2 التفاعلات التي يملكها كل جسيم وعبر أيّ قوة (أي بواسطة أيّ حامل تفاعل). تسمى النظرية التي تصف القوى العياريّة الثلاث بالنموذج المعياري (Standard Model) لفيزياء الجسيمات، وقد ساهم في وضعها عديد العلماء بشكل مستقل خلال ستينيات القرن الماضي. وبفضل هذه النظرية التي وصفت معا (وحدت) ثلاث قوى طبيعية تمّ تتويج كل من شيلدون غلاشو Sheldon Glashow، ومحمد عبد السلام وستيفن وينبرغ Steven Weinberg بجائزة نوبل للفيزياء سنة 1979. حتى الآن، تناولنا كلّ المكونات ما عدا جسيمة الهييجز المسؤولة عن حصول كلّ مكّونات النموذج المعياري على كتلتها من خلال ما يسمى آلية الهييجز أو الانكسار التلقائي للتناظر الكهروضعيف.

## 2. الانكسار التلقائي للتناظر الكهروضعيف

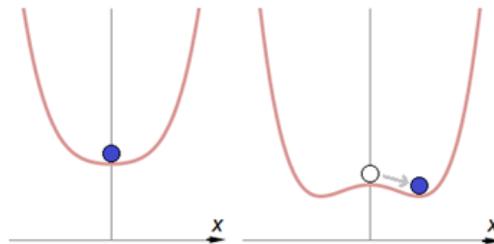
لكي نفهم ظاهرة الانكسار التلقائي للتناظر الكهروضعيف، يجب مناقشتها من خلال سياقها الزمني، إذ أنّ الفوارق بين مختلف التفاعلات تظهر جليا عند الطاقات العالية. حيث أنّ هذه الظروف إمّا يمكن تخليقها فقط في مختبرات مُسرّعات الجسيمات، أو أنّها وجدت أثناء اللحظات الأولى من عمر الكون المبكر حسب نظرية الانفجار العظيم الذي أدّى إلى ولادة الكون بشكله المعروف حاليا.

وحسب النسخة الحديثة من نظرية الانفجار العظيم فإنّ الكون بدأ كنقطة لامتناهية الصغر، ولانهائية الكثافة ولانهائية درجة الحرارة. عند اللحظة  $t = 0$  s، بدأ الكون في التمدّد، وكلما زاد حجمه نقصت كثافته ودرجة حرارته. أثناء الثلاث دقائق الأولى، وقعت أحداث مهمة حدّدت شكل الكون الحالي. نكتفي هنا بذكر بعضها فقط، وسنناقش التفاصيل في مقال منفصل مستقبلا. وتتمثّل هذه المحطات المهمة في:

- التضخم الكوني الذي حدث عندما كان عمر الكون  $10^{-35}$  ثانية،
- انتقال الطور الكهروضعيف عندما كان عمر الكون حوالي  $10^{-10}$  ثانية، حيث انفصلت القوتان الضعيفة والكهرومغناطيسية، وأصبحت كل الجسيمات الأولية ذات كتلة (ماعد الفوتون).
- عندما أصبح عمر الكون 0.001 ثانية، أصبحت حدّة القوّة القوية كبيرة بشكل كاف يسمح لها بحبس الكواركات والغلبيونات داخل جسيمات غير أولية تسمى هادرونات (مثل البروتون والنيوترون).
- عندما برد الكون كثيرا (عند 380 ألف سنة)، تنفصل الإلكترونات عن الحمّام الحراري متحدّة مع النوى مُشكّلة ذرات (وجزيئات) الهيدروجين والهيليوم إذ يُسَمّى الغاز الناتج الغبار الكوني (cosmic dust). وهنا تبدأ دورة حياة النجوم حيث يكون للجاذبية دور أساسي في هذه العملية.

كما أشرنا سابقا، فإنّ انتقال الطور الكهروضعيف حدث عندما كان عمر الكون  $10^{-10}$  ثانية، حين أصبحت كل الجسيمات ذات كتلة بعدما كانت عديمة الكتلة، وانفصلت القوتان الكهرومغناطيسية والضعيفة بعدما كانتا قوة واحدة (القوة الكهروضعيفة). ولكن كيف حدث هذا الانتقال بالضبط؟ وكيف يمكن فهمه ووصف التفاصيل المتعلقة به؟ إنّ ظاهرة انتقال الطور عبر الانكسار التلقائي للتناظر حاضرة في الطبيعة عبر العديد من الظواهر الفيزيائية مثل الناقلية الفائقة (superconductivity)، والمغناطيسية (ferromagnetism)، وتبخّر وتجمد الماء، وغيرها من الأمثلة.

لتوضيح معنى الانكسار التلقائي للتناظر، ينبغي الاستعانة بمثال كلاسيكي بسيط. ليكن الجسيم في الشكل 3 (يسار) إذ أنّ وضعية الجسيم ( $x = 0$ ) تُمثّل الوضعية المفضّلة للجملة الفيزيائية، كونها تعبر عن القيم الأقل للطاقة الكامنة، حيث يمكننا أن نسمّيها القيمة المتوسطة المتوقعة (vacuum expectation value)، أي  $\langle x \rangle = 0$ .



الشكل 3. مثال توضيحي يشرح كيفية انكسار تناظر الانعكاس بسبب أن القيمة المفضلة للكمون تو افق إحدائية غير معدومة  $x \neq 0$ .

هذه الوضعية تجعل الجملة تمتلك تناظر الانعكاس، أي إذا قمنا بعكس اتجاه المحور  $OX$  تبقى الجملة صامدة بالنسبة إلى هذا الانعكاس. وإذا تغيّرت معطيات المسألة يتغيّر المسار الأصلي من الشكل في اليسار إلى الشكل في اليمين. في هذه الحالة يصبح موقع الجسم ( $x = 0$ ) ليس مفضلاً طاقوياً (لأن الجسم لا يملك فيها أقل قيمة للطاقة)، أي  $\langle x \rangle \neq 0$ ، وبالتالي على الجملة أن تنتقل من حالة ذات قيمة متوقعة معدومة  $\langle x \rangle = 0$  إلى حالة ذات قيمة متوقعة غير معدومة  $\langle x \rangle \neq 0$ . وفي هذه الحالة الأخيرة، تكون الجملة قد فقدت خاصية تناظر الانعكاس الذي كانت تملكه. ويسمى هذا انكساراً تلقائياً للتناظر، ويسمى كذلك انتقال الجملة من حالة  $\langle x \rangle = 0$  إلى حالة  $\langle x \rangle \neq 0$  بانتقال الطور.

في النموذج المعياري، لا يسمح تناظر القوة الكهروضعيفة بوجود كتل للجسيمات. وبالتالي يجب كسر هذا التناظر حتى يحصل كل جسيم على كتلته التي حددت قيمتها تجارب مُسرّعات الجسيمات الأولية. المسؤول هنا عن كسر هذا التناظر هو جسيم الهييجز (انظر الملحق 3)، الذي يملك كموناً يختلف شكله حسب درجة حرارة الكون. في درجة الحرارة العالية، يكون شكل كمون الهييجز مشابهاً للشكل 3-يسار. وبالتالي فإن القيمة المتوقعة للهييجز معدومة  $\langle H \rangle = 0$ ، أي تناظر محفوظ.

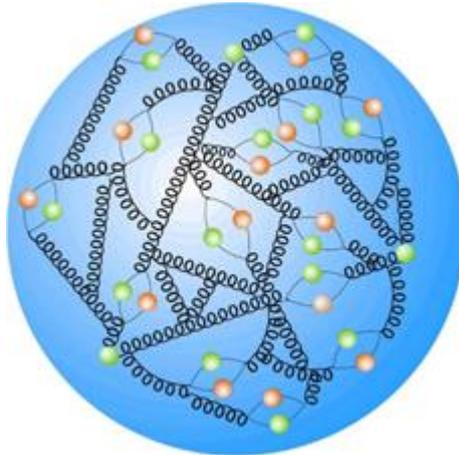
ولكن، عندما كان عمر الكون حوالي  $10^{-10}$  ثانية بدأ كمون الهييجز السلبي في التغير إلى الشكل 3-يمين، حيث أصبحت القيمة المتوقعة للهييجز غير معدومة في هذه الحالة  $\langle H \rangle \neq 0$ ، والتي توافق انكسار التناظر. وبما أنّ هذه الحالة الأخيرة هي المفضّلة طاقوياً فإنّ الانتقال يحدث تلقائياً مما يتسبّب في كسر التناظر الكهروضعيف. وبالتالي تنفصل القوتان الكهرومغناطيسية والضعيفة، في حين تصبح كل جسيمات النموذج المعياري ذات كتلة ماعداً جسيم الضوء (الفوتون).

كلّ كتل الجسيمات الأولية متناسبة مع القيم المتوقعة غير المعدومة للهييجز  $\langle H \rangle \neq 0$ . ولكن اختلاف قيم الكتل يعود إلى اختلاف حدّة تفاعلها مع جسيمات الهييجز. تؤكد كلّ النتائج التجريبية أنّ الجسيم السلبي المكتشف ما هو إلا هييجز النموذج المعياري، أو على الأقل جسيم سلبي مشابه له ينتمي إلى أحد تعميمات النموذج المعياري، أو ما نسميها فيزياء ما وراء النموذج المعياري.

### 3. هل تمّ تفسير كتلة المادة المرئية: ليس بعد؟

خلال كل الشروحات السابقة، حاولنا فهم أصل كتل الجسيمات الأولية. وبما أنّ (تقريباً) كل المادة المحيطة بنا هي بروتونات ونيوترونات، أي جسيمات غير أولية تتكوّن بدورها من كواركات فإنّ ما سبق لا يفسر أصل الكتلة المنظورة في الكون التي تُمثّل الأرض والمجموعة الشمسية ودرب التبانة، وغيرها من المجرات وعناقيد المجرات. صحيح أنه من غير الممكن تجريبياً عزل كواركات منفردة خلال تجارب فيزياء الجسيمات الأولية، ولكن ذلك لم يمنع من قياس العديد من خواصها مثل سبين الكتلة مثلاً. إذن يبدو من البديهي لكلّ منّا أن كتلة كل من البروتون (أو النيوترون) هي مجرد مجموع كتل الكواركات التي يتكوّن منها. ولكن ذلك غير صحيح، إذ أن كتل الكواركات الثلاث مجتمعة لا تمثل إلاّ إثنان من الألف (0.2%) من كتلة البروتون؟ إذن ما هو مصدر 99.8% من كتلة البروتون؟ لا يمكن تفسير هذه الملاحظة دون فهم بعض خصائص التفاعلات القوية التي تصفها نظرية الكروموديناميكا الكمومية (Quantum Chromodynamics). لشرح بعض هذه الخصائص دون الغوص في التعقيدات الرياضية للنظرية، سنقوم بمقارنتها بالتفاعلات الكهرومغناطيسية التي أغلب خصائصها معروفة للجميع. كما أشرنا سابقاً، فإن الاختلاف الجوهرى بين القوتين القوية والكهرومغناطيسية يعود إلى اختلاف تناظر كلّ منها،

والذي بدوره ينعكس على خصائص حاملات التفاعل، أي الفوتون الوحيد بالنسبة إلى القوة الكهرومغناطيسية والغليونات الثمانية بالنسبة إلى القوة القوية.



الشكل 4. البروتون من الداخل حيث يتكوّن من عدد غير محدد من الغليونات والكواركات، فقط ثلاثة منها هي كواركات تكافؤ.

لهذه الأخيرة خصائص فريدة بسبب تناظرها الأوسع مقارنة بالقوة الكهرومغناطيسية حيث يمكن لثلاثة أو أربعة غليونات أن تتفاعل معها خلال نفس اللحظة وفي نفس المكان. هذه الخاصية هي المسؤولة عن ربط الكواركات بداخل البروتون إذ أن حدّة الروابط بين الكواركات تزداد كلما زادت المسافة بينهما، على عكس القوة الكهرومغناطيسية أو الجاذبية.

يتسبب تفاعل الغليونات مع بعضها ومع الكواركات في خلق عدد كبير غير محدد من الغليونات الأخرى، بالإضافة إلى عدد غير محدد من أزواج الكواركات والكواركات المضادة تضاف إلى الكواركات الثلاثة التي يتشكل منها البروتون أساساً، والتي تسمى كواركات التكافؤ (valence quarks). إذن مصدر 99.8% من كتلة البروتون سببه الدور الذي تقوم به الغليونات؟ ولكن ما الذي يجعلنا نثق في هذه الفكرة ونعتقد أن الشكل 4 يمثل فعلاً بنية البروتون؟

إن سبر هذه البنية ممكن فقط بإعطاء البروتونات (أو البروتونات المضادة) طاقة عالية جداً (ملايين أضعاف طاقتها في حالة سكون، كما يحدث في المصادم الهادروني العملاق LHC أو مصادم "تيفاترون" Tevatron في شيكاغو)، ثم مصادمتها رأسياً حيث تكون التصادمات الفعلية بين مكوناتها؛ أو بعبارة أخرى عندما تُصادم بروتونين فإن التصادمات الفعلية هي بين كوارك-كوارك، كوارك-غليون، وغليون-غليون. وبطبيعة الحال، لا يمكن التنبؤ بنتائج التصادمات إذا لم تكن معرفتنا بكيفية توزيع طاقة البروتون الداخل في التصادم على مختلف مكوناته من غليونات كواركات (كلّ الكواركات وليس فقط كواركات التكافؤ الثلاثة)، معرفة دقيقة جداً.

خلال سنوات من القياسات والحسابات، سمحت لنا معرفتنا بنظرية الكروموديناميكا الكمومية أن نُحدّد بالضبط كيفية توزيع طاقة البروتون على مكوناته عبر جداول سُمّيت دوال التوزيعات البارتونية (parton distribution functions). إن دقة هذه الجداول لا تمثل فقط دليل صحة بنية البروتون الموضحة في الشكل 4، بل كذلك دليل دقة نظرية الكروموديناميكا الكمومية.

## 4. أسئلة مفتوحة

لقد حقق النموذج المعياري نجاحات باهرة من خلال تأكيد العديد من تنبؤاته من قِبل مختلف تجارب مُصادمات الجسيمات، بدءاً بالمُسرع العملاق للإلكترون-بوزترون (the Large Electron-Positron (LEP) collider) بجنيف (سويسرا)، ومُصادم تيفاترون بشيكاغو، وحالياً المسرع الهادروني العملاق الذي سيستمر العمل به إلى غاية 2035، وغيرها من عديد التجارب الأقل حجماً في أماكن أخرى من العالم. ولكن في المقابل، ظلَّ النموذج المعياري عاجزاً عن إعطاء أيِّ إجابات للعديد من الأسئلة المفتوحة.

رغم أنه وُجدت منذ زمن بعيد (منذ نهاية السبعينات من القرن الماضي) إرهابات توحى بأن النموذج المعياري ليس نظرية نهائية شاملة، بل هو في أحسن الأحوال نظرية فعلية (effective theory) جيدة في حدود طاقات السلم الكهروضعيف (أي التفاعلات التي تحدث عند مستوى الطاقات المقاربة إلى قيمة كتلة جسيم الهيجز)، وأنَّ النظرية النهائية تكون ذات تناظر أكبر وتستطيع الإجابة عن كل الأسئلة التي عجز النموذج المعياري الإجابة عنها. ولكن أول إشارة تجريبية مؤكدة تثبت أن النموذج المعياري ليس نظرية كاملة جاءت سنة 1998 عندما أعلنت تجربة كاميوكاندي KamiokaNDE باليابان مشاهدة ظاهرات اهتزاز النيوترينوهات، وهي ظاهرة تفسرها غير ممكن إلا إذا كانت للنيوترينوهات كتل صغيرة جداً ولكن غير معدومة. في حين أن النموذج المعياري مبنيٌّ على أن النيوترينوهات عديمة الكتلة. لهذا اعتبرت هذه المشاهدة أول تأكيد تجريبي على ضرورة وجود ما يُسمى فيزياء "ما وراء النموذج المعياري" (Beyond Standard Model).

وبطبيعة الحال، فكيفية الحصول على كتلة صغيرة غير معدومة النيوترينوهات ليس السؤال الوحيد الذي عجز النموذج المعياري عن الإجابة عنه، إذ هناك عديد الأسئلة مثل: تفسير الفرق الشاسع بين كتل الإلكترون والكوارك القمي (fermion mass hierarchy)، كيفية توحيد القوى العيارية الثلاث عند طاقات عالية جداً، كيفية إدراج الجاذبية بشكل مُتسق مع بقية القوى خلال نظرية توحيدية واحدة، وغيرها من الأسئلة.

ولكن هناك أسئلة أخرى هي ليست مشاكل خاصة بفيزياء الجسيمات الأولية فحسب، بل هي مشاكل مشتركة مع الكونيات والفيزياء الفلكية (Astrophysics). نذكر منها: مشاكل المادة المظلمة التي تمثل ربع المادة-الطاقة في الكون، الطاقة المظلمة (التي تمثل سبعة أعشار) المسؤولة عن تمدُّد الكون بشكل متسارع، وتفسير اللاتناظر الحاصل بين المادة والمادة المضادة في كوننا المنظور إذ تشكل المادة العادية 4% فقط من المحتوى المادي-الطاقوي في الكون. تستحق هذه المسائل الأخيرة شرحاً مفصلاً في مقال منفصل.

## ملاحق

في هذا الملاحق، نحاول توضيح بعض المفاهيم الأساسية لتيسير فهم الشروحات السابقة.

1. حتى يمكننا شرح مفهوم السبين يجب توضيح معنى العزم الحركي الكلاسيكي. بفرض أنه يوجد جسم ذو كتلة وسرعة محددتين  $v$  و  $m$ ، يتحرك خلال مسار دائري نصف قطره  $R$ ، يمثل حاصل جداء الاندفاع مع ذراع الحركة ما يسمى العزم الحركي المداري  $L = mvR$ . هذا التعريف غير دقيق تماماً بالنسبة إلى الجمل الكمومية، كحالة جسيمات لامتناهية الصغر أبعادها أقل من جزء من المليون سنتيمتر. ذلك أنه بالإضافة إلى العزم الحركي المداري، توجد مركبة أخرى للعزم لا تنعدم حتى لو كان الجسم ساكناً، تُسمى العزم الحركي الذاتي أو عزم اللف الذاتي أو اختصاراً السبين (spin). هذه المركبة ليس لها مرادف كلاسيكي وتأخذ قيماً مضاعفة صحيحة أو نصف صحيحة لثابت بلانك المختزل  $h/2\pi$ . في الحالة الأولى تسمى الجسيمات بوزونات (نسبة إلى الفيزيائي البنغالي ستيندرا بوز Satyendra Bose)، وفي الحالة الثانية تسمى فرميونات

(نسبة إلى الفيزيائي الإيطالي فيرمي Enrico Fermi). وأهم الفوارق بين الحالتين هي أن الفرميونات على عكس البوزونات لا يمكنها أن تشغل نفس الحالة، وبالتالي لا يمكنها التكثف (condensation) حسب مبدأ الاستبعاد (exclusion principle) لباولي Wolfgang Pauli. وهذا ما يفسر أن كل المادة المرصودة في الكون تتشكل فقط من فرميونات وليس من بوزونات.

2. يعتقد أغلبنا أن صمود شكل القانون الثاني للحركة لنيوتن ( $\vec{F} = m\vec{a}$ )، سواء بالنسبة إلى شخص ثابت أو بالنسبة إلى شخص يركب سيارة تسير بسرعة ثابتة ( $\vec{F}' = m\vec{a}'$ )، هو أمر بديهي. في الحقيقة السبب أعمق من ذلك بكثير، ألا وهو وجود تناظرات (هنا هي التناظرات الانسحابية في كل من المكان والزمان) تبرر هذا الصمود وتؤدي إلى مبدأ انحفاظ كل من الطاقة والاندفاع. إذن، انحفاظ الطاقة والاندفاع كما هو معلوم لدينا، هو ليس صدفة بل نتيجة مباشرة لكون الجملة الفيزيائية تملك تناظرا انسحابيا. بالطريقة ذاتها نعلم أن انحفاظ العزم الحركي هو كذلك نتيجة مباشرة للتناظر الدوراني الذي تملكه الجملة الفيزيائية. يتم وصف هذه التناظرات رياضيا بما يُسمى نظرية الزمر (group theory)، وخاصة ما يسمى بزمر لي (Lie groups) نسبة إلى الرياضي النرويجي ماريوس لي Marius Lie.

3. سُمي هذا الجسيم نسبة إلى الفيزيائي النظري الإسكتلندي بيتر هيگز Peter Higgs، الذي قام سنة 1964 باقتراح وجود جسيم سلمي (لديه سبين معدوم) يُفسر أصل الكتلة للجسيمات الأولية عبر مساهمته في الكسر التلقائي للتناظر. منذ 1964، لم يتم تأكيد وجود هذا الجسيم إلا بتاريخ 4 يوليو 2012 بمختبر المنظمة الأوروبية للأبحاث النووية CERN في سويسرا. بفضل هذا الاكتشاف، حصل بيتر هيگز على جائزة نوبل في الفيزياء مناصفة مع الفيزيائي البلجيكي فرانسوا إنجلرت François Englert سنة 2013.