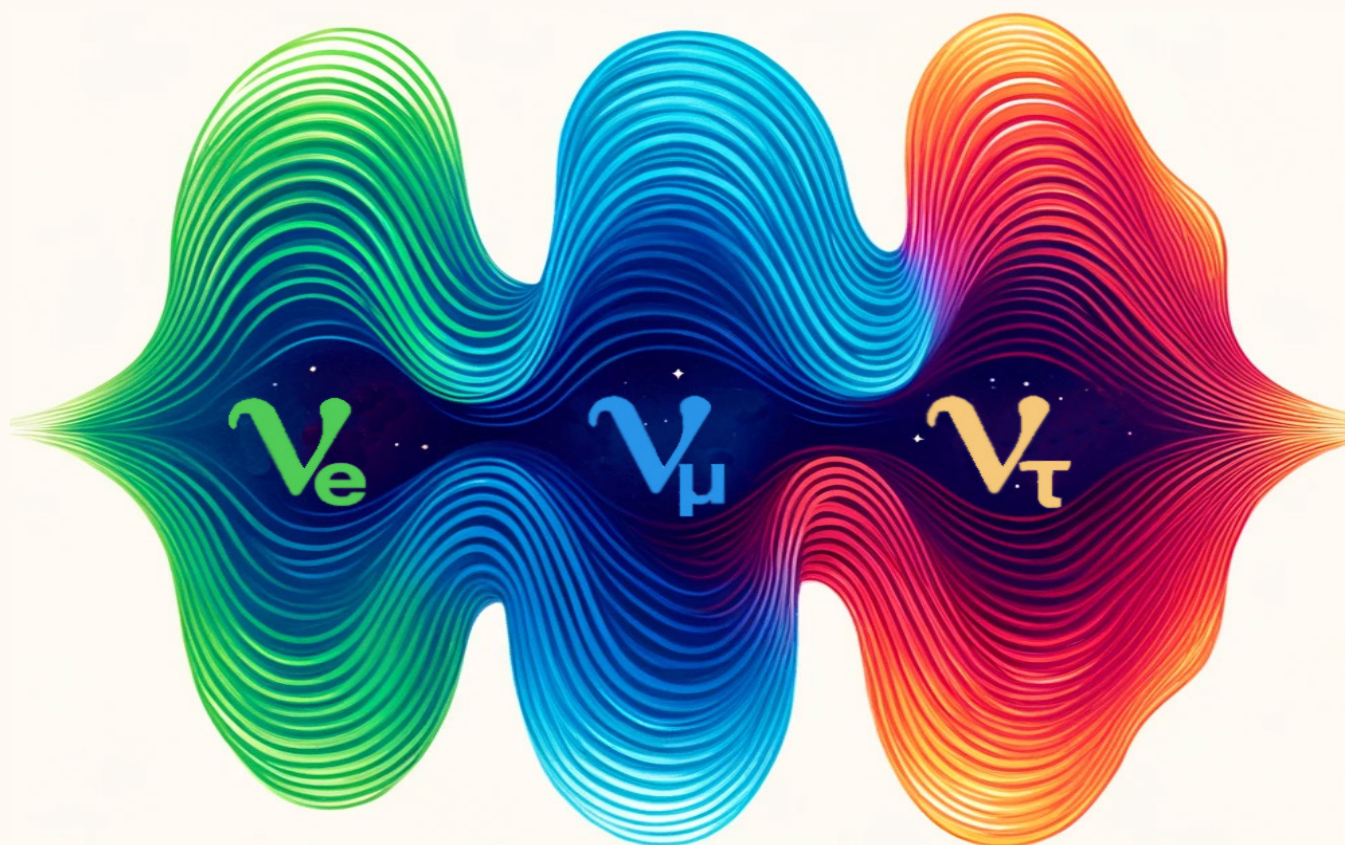


مستارات

فن الفيزياء

البحث عن الجسيم الشبح
النيوترينو



من مصر إلى جائزة الـ Breakthrough:
مقابلة مع العالممة المتميزة ماري بيشاي.

العدد الثاني
يونيو/حزيران 2024

© 2024 الجمعية العربية للفيزياء

مسارات في الفيزياء

رئيس الجمعية الفيزيائية العربية

شعبان خليل

رئيس التحرير

نضال شمعون

فريق التحرير

عادل عوض

شوقي الدلال

أحمد معروف

السيد إبراهيم لاشين

عمار سكجي

محسن زهران

الهيئة التنفيذية

راوية رمضان

إيمان طه

رند الفار

دانا عبد الغني

ريم بري

فريق التصميم

مسار المطيري

أفنان محمد علي

"Trends in Physics", published by the Arab Physical Society, makes what would otherwise be inaccessible, specialist knowledge, accessible to the lay reader in the Arab World. Its articles explain, using simple terms in standard Arabic language, advanced research in the physical/mathematical sciences, including physics/chemistry/mathematics and engineering topics. It is committed to disseminating trustworthy knowledge, enhancing our understanding of the nature, and promoting scientific culture in the Arab World. It also will keep the reader up-to-date with the latest scientific and technological news, innovations and ideas in the exciting, ever-changing world of science. It features interviews with renown scientists and some pedagogical notes useful for university students.

نبذة عن المجلة: تهدف مجلة "مسارات في الفيزياء"، الصادرة عن الجمعية العربية للفيزياء، إلى جعل المعلومات المعرفية العميقة متاحة للقارئ المثقف في العالم العربي. تشرح مقالات المجلة، باستخدام عبارات بسيطة في اللغة العربية الفصحى، الأبحاث المتقدمة في العلوم الفيزيائية/الرياضية، والتي تُغطّي موضوعات في علوم الفيزياء/الكيمياء/الرياضيات والهندسة. المجلة ملتزمة بنشر المعرفة الموثوقة، وتعزيز فهمنا للطبيعة، وبتشجيع الثقافة العلمية في العالم العربي. كما أنها تقي القارئ على اطلاع بأحدث الأخبار العلمية والتقنية والابتكارات والأفكار في عالم العلوم المثير والمتطور دائمًا. تحتوي المجلة على مقابلات مع علماء مشهورين وعلى معلومات إثرائية مفيدة لطلاب المرحلة الجامعية

المحتويات

3	مقدمة رئيس التحرير
5	النيوترينو: الجسيم الشبح
16	المَوْصَلِيَّةُ الفَائِقَةُ ومستقبل التقانة
27	مقابلة مع الأستاذة ماري بيشاي
42	الخلايا الشمسية طاقة المستقبل النظيفة والمستدامة
51	الشوّاش والكسوريات حيث الفيزياء وجاذبها العجيب
65	الضوء الكمومي واختبار أسس ميكانيك الكم
76	كتاب: برّاد أينشتاين Einstein's Fridge
78	كتاب: النظرية المعيارية وفيزياء الجسيمات الأولية
80	أخبار علمية
82	معلومات إثرائية
88	مسألة للطلاب
90	إعلان: مؤتمر النيوترينو والمادة المظلمة

مقدمة رئيس التحرير

نضال شمعون



الجسيم التالي للفوتون وفرّة في الكون، والذي لم يتم الاستدلال على وجود كتلة غير معدومة له إلاّ منذ ربع قرنٍ بالرغم من اقتراح وجوده قبل تسعة عقود والكشف عنه تجريبياً بعد ذلك بعقدين. تُعدّ قصة البحث عنه ملحمةً من ملاحم نضال الإنسان في سبيل الكشف عن أسرار الكون، ومع ذلك فحتى الآن لم نستطع سبره مباشرةً ولا قياس كتلته، بل يتم الاستدلال على وجوده من خلال مساهمته في قوانين المصونية لا غير، وذلك بسبب تأثيراته الضعيفة جداً.

أجرينا في هذا العدد مقابلةً مع العالمّة المصريّة-الأمريكيّة ماري بيشاي المتحدّث الرسمي لتجربة النترينو عميقاً تحت الأرض DUNE، إحدى أضخم مشاريع التعاون العلمي في العالمّ الهادفة

يسرّني أن أرحّب بقراء العدد الثاني -ربيع- 2024 من مجلّة "مسارات في الفيزياء" الصادرة عن الجمعية العربيّة للفيزياء، وأتقدّم بجزيل شكري لمن ساهم وساعد في إتمامه

مرّت ثلاثة أشهر على افتتاح مجلّتنا، وتباينت ردود الفعل إزاءها، وإن كان أغلبها إيجابياً، ونحن لا نزال بانتظار مقترحاتكم حول بنيتها وطبيعة المواضيع المطروحة والسويّة المطلوبة. انضمّ خلال هذه الفترة أربعة باحثين إلى فريق التحرير، ما ساعد في تنظيم وتأطير العمل، وكلّنا أمل بأن هدف المجلّة المنشود سوف يتحقّق مع ازدياد خبرتنا وتفاعلنا مع المشتغلين بالعلم في مجتمعنا العربي.

يركّز العدد الراهن على فيزياء النترينو، هذا

إلى الكشف عن النيترينو وفيزيائه، وهي -حسب اعتقادنا- مقابلة ستُغني القارئ سواءً أكان ذلك في الأفكار الاجتماعية التي تضمّنها أم في المفاهيم العلمية التي نوقشت بطريقة بسيطة ولكن عميقة. تمّ اختيار المقال الرئيس بشكلٍ متوافق ليقدم للقارئ أساسيات فيزياء النيترينو، بينما تناولت مقالات ثلاثة أخرى مواضيع الخلايا والطاقة الشمسية، والموضيعة (الناقلية) الفائقة، والشواش مع الكسوريات. المقال الخامس كتبه باحث شاب في مجال الضوء الكمومي وعلاقته باختبارات أسس ميكانيك الكم، وهي فرصة لأعود وأدعو طلابنا الأعزاء في المرحلة الجامعية والدراسات العليا ألاّ يترددوا في الكتابة إلينا.

يضمّ العدد كالعادة باب أخبار علمية ركزت على آخر تطورات استكشاف الفضاء، أمّا باب المعلومات الإثرائية، المُوجّهة خصيصًا لطلاب المرحلة الجامعية الأولى أو مرحلة الدراسات العليا، فيتضمّن من بين ما يحويه من معارف شرحًا لظاهرتين في فيزياء النيترينو، هما آلية الأرجوحة لتوليد الكتلة وإشعاع الخلفية الكونية النيترينوي، وإعلانًا عن مؤتمر حول النيترينو والمادة المظلمة سيقام قريبًا في مصر، بالإضافة إلى عرض لكتابين -واحدهما تبسيطي والآخر أكاديمي-، وإيراد حلّ مسألة العدد السابق وتقديم مسألة جديدة

في الختام، أعود وأقدم كامل شكري لكلّ من ساهم بإخراج هذا العدد إلى الضوء، وبانتظار مساهماتكم في عدد صيف 2024- اللاحق.

النوترينو: الجسيم الشبح

السيد إبراهيم لاشين، أستاذ فيزياء الطاقة العالية
بكلية العلوم، جامعة عين شمس، مصر

أولاً: تمهيد عن النيوتريينو

يُعدّ النيوتريينو من أكثر الجسيمات الماديّة المعروفة وفرةً في الكون، إذ تفوق أعداؤه جميع الجسيمات الماديّة الأخرى المعروفة وبما يعادل مليارات الأضعاف. النيوتريينو متواجد في كلّ مكان، فالشمس مثلاً تقوم بإنتاج النيوتريينو بحيث أن مليارات منه تعبر كلّ سنتمترٍ مرّيجٍ من مساحة أبداننا خلال الثانية الواحدة. ليس هذا الأمر مقصوراً على الشمس وحدها، بل إن جميع النجوم تقوم مثل الشمس بإنتاج جسيمات النيوتريينو، وإطلاقها في الفضاء المحيط بها. تقوم الشمس بعملها هذا بدأً منذ ما يقرب من خمسة ملياراتٍ من السنين -وهذا هو عمر الشمس- حتى الآن. ليس هذا فحسب، بل توجد نيوتريينوات (نيوتريينوهات) هائلة في الكون يعود أصلها إلى الانفجار العظيم الذي تمّ منذ ما يقرب من أربعة عشر مليار سنة وأدّى إلى نشأة الكون. يبلغ الآن عدد هذه النيوتريينوات التي يعود أصلها إلى الانفجار العظيم ما يقرب من $400/\text{cm}^3$ ، وهو يعادل تقريباً عدد فوتونات الخلفيّة الإشعاعيّة الكونية التي انبثقت من الانفجار العظيم.

يتمّ إنتاج النيوتريينو أيضاً من خلال تفاعلات الأشعّة الكونيّة مع الغلاف الجوّي المحيط بالأرض، فالقشرة الأرضية بصخورها تُنتج جسيمات نيوتريينو من خلال تحلّل العناصر المشعّة بها، وحتى أبداننا نفسها تنتج جسيمات نيوتريينو من خلال تحلّل النظائر المشعّة في أجسادنا من أمثال الكالسيوم واليوتاسيوم. باختصار، جسيمات النيوتريينو موجودةٌ حولنا وفي كلّ مكان وبوفرة، ولو قُدّر لنا أن نرى بواسطة عيوننا جسيمات النيوتريينو لأصبح نهاؤنا سرمدياً، فحمدًا لله على ذلك. أيضًا، يجب ألاّ ينتابنا



مشحونة -أي متعادلة- كهربائياً نعود مرة أخرى للكواركات فنجد أنها تترايط فيما بينها بواسطة القوة القويّة لتشكّل البروتونات والنيوترونات، فمثلاً البرتون يتكوّن من ثلاثة كواركات (uud)، بينما يتكوّن النيوترون من ثلاثة كواركات (ddu)، ويجب أن نلاحظ أن الكواركات لها شحنة كسريّة، بمعنى أن شحنة الكوارك العلوي (u) موجبة وتساوي 2/3 من شحنة الإلكترون وشحنة الكوارك السفلي (d) سالبة وتساوي 1/3 شحنة الإلكترون. تشكّل البروتونات والنيوترونات أنوية (أو نوى) الذرّات، وبالتالي تشكّل معظم ما نراه من المادّة المستقرّة المرئيّة في الكون. أمّا بالنسبة للبتونات المشحونة، فأخفّها من حيث الكتلة هو الإلكترون يليه الميون ثم التاو، والشحنة الكهربائيّة سالبة لكلّ من هذه اللبتونات وتساوي شحنة الإلكترون

وفي سياق النموذج القياسي للجسيمات الأوليّة، توجد أيضاً حاملات القوى، مثل الفوتون (γ) حامل القوة الكهرمغناطيسيّة، وبوزونات W, Z حاملات القوى الضعيفة، والجليونات (g) حاملات القوى القويّة. علاوةً على ذلك، يوجد جسيم هيجز وهو ضروري لكي تكتسب الجسيمات الأوليّة وبوزونات W, Z كتلها المرصودة تجريبياً. أمّا عن كتل النيوتريّنات فهي تُعتبر عديمة الكتلة تماماً في سياق النموذج القياسي للجسيمات الأوليّة. هنا نجد أن النيوتريّنات تُشكّل من حيث العدد ربع الجسيمات الأوليّة، وإضافةً إلى وفرتها الهائلة فإنه يتحدّثم علينا أن نفهم خواصّها من أجل فهم طبيعة الكون حولنا

ثالثاً: ظهور واكتشاف النيوتريّنو

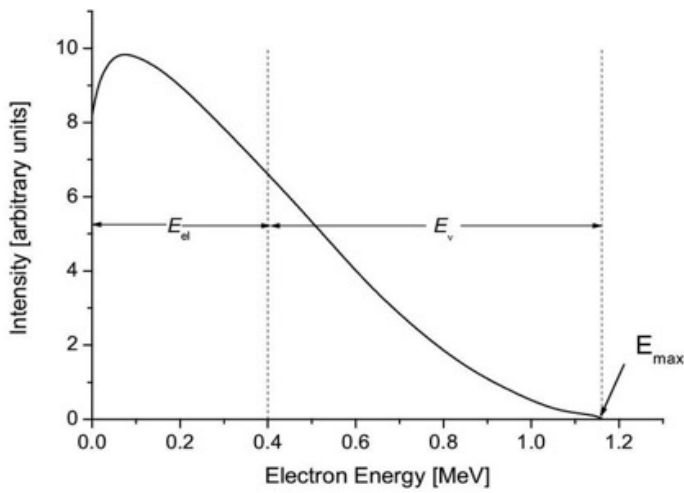
في الواقع إن اكتشاف النيوتريّنو وسبر خصائصه

القلق بشأن جسيمات النيوتريّنو التي تخترق أجسادنا ليلاً ونهاراً، فهي تعبر أجسادنا ولكنها تقريباً لا تتفاعل معها، لأن تفاعلاتها ضعيفة جدّاً كما سنرى لاحقاً. الحياة نفسها نشأت على الأرض في ظلّ هذا الفيض الغامر من جسيمات النيوتريّنو، ولم يلحقها أيّ ضرر. إن تفاعلات جسيمات النيوتريّنو الضعيفة للغاية تجعلها بمثابة شبحٍ لدرجة أنه لو مرّ نيوتريّنو في طبقةٍ من الرصاص سمكها سنة ضوئيّة، فهناك احتماليّة مقدارها خمسون بالمائة أن يصطدم بشيءٍ ما خلال هذه الرحلة.

ثانياً: النيوتريّنو من وجهة نظر النموذج القياسي للجسيمات الأوليّة

النموذج القياسي للجسيمات الأوليّة هو النموذج المقبول لوصف الجسيمات الأوليّة وتفاعلاتها المتبادلة. يحتوي هذا النموذج على اثني عشر جسيماً أوليّاً، وتنقسم هذه الجسيمات إلى مجموعتين من الكواركات واللبتونات. أمّا عن الكواركات فهي تضمّ ستة أنواع وهي علوي (u) وسفلي (d)، ومسحور (c)، وغريب (s)، وقمّة (t)، وقاع (b)، وكلّها تتفاعل من خلال القوى القويّة والضعيفة والكهرمغناطيسيّة والجاذبيّة (الثقاليّة). لا تحمل أسماء الجسيمات هذه أيّ معنى وهي فقط تُستخدم لإيجاد لغة مشتركة بين الفيزيائيين. وأمّا عن مجموعة اللبتونات فهي تضمّ أيضاً ستة أنواعٍ كالتالي، الإلكترون (e) ونيوتريّنو الإلكترون (ν_e)، الميون (μ) ونيوتريّنو الميون (ν_μ)، التاو (τ) ونيوتريّنو التاو (ν_τ). اللبتونات عمومًا لا تتفاعل من خلال القوى القويّة، ولكنها تتفاعل فقط من خلال مجال القوى الضعيفة والكهرمغناطيسيّة والجاذبيّة، وتُستثنى النيوتريّنات بأنها لا تتفاعل من خلال مجال القوة الكهرمغناطيسيّة لأنها غير

جيمس تشادويك عام 1914. تُمَثَّل هذه النتيجة في حدّ ذاتها كارثةً إذ أن طاقة الإلكترون المنبعث يجب أن تكون قيمةً واحدةً وليس طيفاً متّصلاً من القيم كما يحتمُّ بذلك مبدأ حفظ الطاقة¹ الذي يُعدُّ من أحد أهمِّ المبادئ في الفيزياء، ويسري على التحلّلات الإشعاعيّة الأخرى المصحوبة بانبعث أشعة جاما (γ) وجسيمات ألفا (α)، وقد أصبح هذا الأمر لغزاً يحتاج إلى تفسير.



الشكل 2: الطيف المتصل للإلكترون الصادر في تحلل بيتا. [ويكيبيديا](#)

في عام 1930، قدّم باولي عالم الفيزياء النمساوي الشهير حللاً يائساً لهذه الأزمة بافتراض وجود جسيم ثالث في نواتج التحلل غير مرئي، ويشارك الطاقة مع الإلكترون وبالتالي يمكن إنقاذ مبدأ حفظ الطاقة من الانتهاك. هذا الجسيم الافتراضي يجب أن يكون عديم الشحنة الكهربائيّة نتيجةً حتميّة لمبدأ حفظ الشحنة، الذي يُعدُّ أيضاً من المبادئ المهمّة في الفيزياء. يمكن الاستدلال أيضاً بسبب الفرق الصغير بين كتلة كلٍّ من النواتين الأم والابنة ومن قيم الطاقة المرصودة للإلكترون في هذا التحلل على صغر كتلة هذا الجسيم الافتراضي إلى درجة الانعدام. يمكن

1 بالطبع مبدأ مصونيّة كمية الحركة ساّر ولم يكن هناك شك أو جدال حول ذلك.

Standard Model of Elementary Particles

three generations of matter (fermions)			interactions / force carriers (bosons)	
I	II	III		
mass charge spin =2.16 MeV/c ² 2/3 1/2 u up	=1.2730 GeV/c ² 2/3 1/2 c charm	=172.57 GeV/c ² 2/3 1/2 t top	0 1 g gluon	=125.20 GeV/c ² 0 0 H higgs
=4.70 MeV/c ² -1/3 1/2 d down	=93.5 MeV/c ² -1/3 1/2 s strange	=4.183 GeV/c ² -1/3 1/2 b bottom	0 0 1 γ photon	
=0.5110 MeV/c ² -1 1/2 e electron	=105.66 MeV/c ² -1 1/2 μ muon	=1776.93 MeV/c ² -1 1/2 τ tau	0 0 1 Z Z boson	
<0.8 eV/c ² 0 1/2 ν_e electron neutrino	<0.17 MeV/c ² 0 1/2 ν_μ muon neutrino	<18.2 MeV/c ² 0 1/2 ν_τ tau neutrino	=91.1880 GeV/c ² 0 1 W W boson	

الشكل 1: النموذج القياسي للجسيمات الأولية. [ويكيبيديا](#)

لهو من أحد أهم الملاحم العظيمة للفيزياء، والتي استمرّت لما يقرب من مائة عام حتى الآن، ومع ذلك لم يتمّ إسدال الستار على الفصل الأخير من هذه الملحمة، فهي لا زالت مستمرّة، وتحمل في طياتها الكثير من الأسرار والمفاجآت التي ستكشف عنها السنوات المقبلة.

تعود قصة ظهور النيوتريانو إلى دراسة ظاهرة التحلل الإشعاعي المصحوب بجسيمات بيتا (β)، وجسيمات بيتا هنا هي مجرد إلكترونات سالبة الشحنة. في هذا التحلل الإشعاعي المصحوب بجسيمات بيتا تتحوّل نواة العنصر المُشعّ A (النواة الأم) إلى نواة أخرى B (النواة الابنة أو الوليدة) تحمل نفس العدد الكتلي، ولكن العدد الذري يزيد بمقدار الواحد عن ذلك الذي للنواة الأم، حيث يمكن التعبير عن التحلل من خلال التالي $A \rightarrow B + e$. عند دراسة طاقة حركة الإلكترون المنبعث وُجد أنها تمثّل طيفاً من القيم المستمرّة تبدأ من صفر وتنتهي إلى طاقة قصوى تعتمد على الفرق الضئيل بين كتلة كلٍّ من النواة الأم والابنة، وقد تمّ قياس طيف الطاقة المنبعث للإلكترون على يد العالم الإنجليزي

وأطلق عليه اسم النيوتريـنو، وهو ما يعني النيوترون الصغير باللغة الإيطالية. من نظرية فيرمي، يمكن حساب شدة التفاعل وطيف الطاقة للإلكترونات المنبعثة ومقارنتها بالبيانات التجريبية. تستلزم هذه المقارنة أن التفاعل المسؤول عن التحلل الإشعاعي المصحوب بانبعاث جسيمات بيتا يجب أن يكون ضعيفاً للغاية، ودرجة الضعف هذه كانت كفيلاً بالقضاء على أية آمال بمحاولة اكتشاف النيوتريـنو لدرجة أن باولي عبّر سابقاً عن هذا الإحباط في عام 1931 بقوله: "لقد ارتكبت شيئاً فظيئاً بافتراض جسيم لا يمكن اكتشافه والإمساك به"

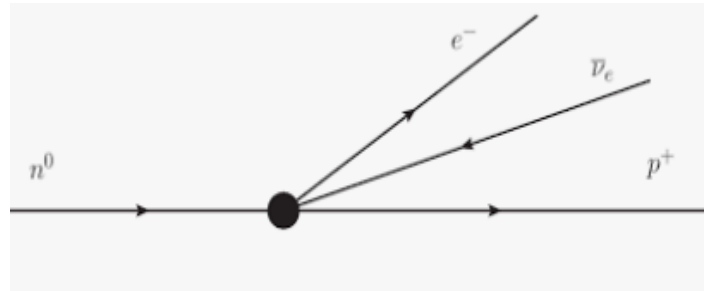
رابعاً: النيوتريـنو والقنبلة النووية، واكتشاف النيوتريـنويات

الإمساك بالنيوتريـنو أمر صعب المنال إلى حدّ بعيد بشكل يدعو إلى اليأس والإحباط. إن تفاعل النيوتريـنو الضعيف للغاية يجعل الإمساك به شيئاً أقرب إلى الاستحالة، ولكن هذه الاستحالة قد تغدو قيد الإمكان إذا تعاملنا مع عددٍ ضخمٍ جدّاً بما فيه الكفاية من النيوتريـنويات. أين يوجد هذا العدد الضخم من النيوتريـنويات؟ يوجد عند تفجير قنبلة نووية، إذ إن عملية الانشطار النووي التي تتم أثناء التفجير النووي تؤدي إلى انبعاث عدد ضخم من النيوتريـنويات. إذن يمكننا الإمساك بكاشفٍ للنيوتريـنويات بالقرب من مكان تفجير قنبلة نووية، وهذا ما فُكّر فيه بالفعل العالمان فريدريك راينز وكليد كوان عام 1953، ولكنهما عدلا عن هذه الفكرة لأن هذه التجربة غير مأمونة، وأيضاً يصعب تكرارها، ووجدوا بعد ذلك أنه من الأنسب والأكثر أماناً أن يتم إجراء التجربة بالقرب من أحد المفاعلات النووية والتي تُدار لأغراض الحصول على الطاقة. يعادل فيض النيوتريـنويات

الآن التعبير عن التحلل الإشعاعي كالتالي $A \rightarrow B + e + \nu$ ، حيث ν يمثل الجسيم المتعادل الذي سوف يشارك الإلكترون في الطاقة وبالتالي يتم حل مشكلة حفظ الطاقة، ويصبح بالإمكان إظيف طاقة الإلكترون المنبعث أن يكون طيفاً مستمراً من الصفر إلى قيمة قصوى معينة.

كان باولي يعتقد أن هذا الجسيم المتعادل ν هو أحد مكونات النواة، وفي ذلك الوقت لم يكن قد تم اكتشاف النيوترون، لكن لاحقاً في عام 1932 تم اكتشاف النيوترون على يد جيمس تشادويك الذي قابلناه سابقاً، وتبين أن له كتلة تقارب كتلة البروتون، وبالتالي فإن النيوترون ليس هو الجسيم ذو الكتلة الصغيرة الصفرية الذي اقترحه باولي في عام 1934، يقوم عالم الفيزياء الإيطالي إنريكو فيرمي بوضع نظرية للتحلل الإشعاعي المصحوب بانبعاث جسيمات بيتا. يكمن فحوى النظرية في أن النيوترون هو الذي يتحلل إلى بروتون وإلكترون وإلى الجسيم المتعادل الذي افترضه باولي من قبل، بحيث يمكن التعبير عن التحلل كالتالي $n \rightarrow p + e + \nu$

وفي نظرية فيرمي يمكن أن تتفاعل الأجسام الأربعة كلها عند نفس النقطة في المكان ونفس اللحظة الزمنية. يمكن التعبير عن ذلك بالرسم التالي



الشكل 3: تحلل بيتا وفق نظرية فيرمي.

وقد صكّ فيرمي اسماً لهذا الجسيم المتعادل

تمّ وضعه على عمق اثني عشر متراً تحت الأرض من أجل حجب تأثير الأشعة الكونية حتى لا تتداخل تفاعلاتها مع تفاعل النيوتريينو.

بهذه الطريقة، تمّ اكتشاف النيوتريينو عام 1956 بواسطة كلّ من راينز وكووان، وقد أبرق كلاهما إلى باولي لإخباره عن اكتشاف الجسيم الذي كان قد افترضه قبل خمسة وعشرين عامًا، فقام باولي بالردّ عليهما بقوله "ينال كلّ الأشياء من إحسن الصبر والانتظار". لقد نال فريدريك راينز جائزة نوبل عن هذا الاكتشاف عام 1995 أي بعد قرابة أربعين عامًا من الاكتشاف، بينما لم ينل كليد كووان الجائزة لأنه كان قد تُوفّي عام 1974 ولم يكن محظوظًا لتطول به الحياة حتى ينال الجائزة

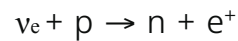


الشكل 4: راينز على اليسار وكووان على اليمين في مركز التحكم بتجربة الكشف عن النيوتريينو. [ويكيبديا](#)

لم يقف الأمر عند هذا الحدّ، فخلال الأعوام التالية بعد عام 1962 تمّ اكتشاف نوع آخر من النيوتريينو وهو نيوتريينو الميون على يد كلّ من ليدرمان وشوارتز وشتاينبرغر، حيث تمّ منحهم جائزة نوبل عام 1988، وأخيرًا في عام 2000 تمّ اكتشاف النوع الثالث من النيوتريينو وهو نيوتريينو التاو بواسطة تعاون ضم

المتدقّ من المفاعلات 10^{13} (أي عشرة آلاف مليار نيوتريينو) لكل سم² في كلّ ثانية، وهذا عدد ضخم يُعزّز فرصة الكشف عن النيوتريينو.

قد يتساءل المرء كيف نمسك بجسيم النيوتريينو وهو متعادل كهربائيًا وعديم الكتلة، إذ أن أساس عمل الكواشف هو الإمساك بالجسيمات المشحونة كهربائيًا. من هنا تأتي فكرة الانحلال العكسي لبيتا والذي يمكن التعبير عنه كالتالي



حيث يتفاعل جسيم النيوتريينو مع البروتون ويؤدي إلى تخليق النيوترون والجسيم المضادّ للإلكترون e^+ (وهو ما يُسمّى بالبوزيترون). يمكن الإمساك بهذا الإلكترون المضادّ ولكنه لا يلبث طويلًا فبمجرّد أن يصادف إلكترونًا عاديًا فإن كلا منهما يفني الآخر ويصدر انبعاث من أشعة جاما. هذه النبضات الضوئية يمكن رصدها باستخدام مُضاعفات ضوئية، وبالتالي يكون هذا دليلًا على وجود النيوتريينو. نحن لا نرى النيوتريينو مباشرة ولكن عند تفاعله مع المادة ينتج لنا اللبتون المشحون المرافق له وهذا ما نمسك به. لقد قام كلّ من راينز وكووان بتنفيذ هذه التجربة، وكان الكاشف المُستخدَم عبارة عن كمّية ضخمة من المياه تعادل أربعة آلاف لترًا من المياه. تُشكّل أنوية الهيدروجين في هذا الماء البروتون الذي سيتفاعل مع جسيم النيوتريينو. بالإضافة لهذا الماء، توجد أيضًا مادة كلوريد الكاديوم التي تكشف عن وجود النيوترون الخارج من تفاعل النيوتريينو مع المادة، ويكون هذا مصحوبًا بومضة ضوئية. هناك إذن ومضتان من الضوء، واحدة مصحوبة بالإلكترون المضادّ والأخرى بالنيوترون، ويوجد ترابط زمنيّ معيّن بينهما. ولا ننسى في هذا الخضمّ أن هذا الكاشف

المُعْتَقَد، ولكن راموند دافيز أُصِرَّ على صحّة النموذج الشمسي المُعْتَقَد بعد إجراء الكثير من المراجعات والتدقيق لهذا النموذج. نحن هنا أمام خيارين، فأما أن يكون النموذج الشمسي المُعْتَقَد خطأً، بينما يُصِرُّ راموند دافيز على صحّته، وإقلاً أن يكون هناك خطأً ما بالنسبة لفهمنا للنيوتريينو. ماذا حدث للنيوتريينو خلال رحلته الطويلة من الشمس حتى يصل إلينا على الأرض؟



الشكل 5: تجربة دافيز ومشكلة النيوتريينو الشمسي. [ويكيبيديا](#)

هناك مصدر سماوي آخر للنيوتريينو، وهو طبقات الغلاف الجوّي للأرض على ارتفاع ما يقرب من خمسة عشر كيلومتراً. عند هذا الارتفاع، تتفاعل الأشعة الكونية -والتي تتكوّن أساساً من بروتونات- مع الأنوية في الغلاف الجوّي وتؤدّي إلى كثيرٍ من جسيمات البيون المشحونة، حيث يتحلّل البيون إلى ميون ونيوتريينو مصاحب له. يتحلّل الميون بدوره إلى إلكترون ونيوتريينو الميون ونيوتريينو الإلكترون، أي أنه لكلّ نيوتريينو إلكترون يوجد اثنان من نيوتريينو الميون، وهذا يعني أن نسبة تواجد نيوتريينو الميون تبلغ ضعف نسبة نيوتريينو الإلكترون في فيض النيوتريينو الآتي من الغلاف الجوّي. وقد تمّ رصد هذه النيوتريينوات بدءاً من منتصف الستينيات في تجارب أُجريت في أعماق المناجم كالمعتاد. ما لم

من خلال تجربة أُجريت في معمل فيرمي في الولايات المتّحدة الأمريكيّة.

خامساً: النيوتريينو من السماء

مما سبق نرى أن النيوتريينو قد تمّ اكتشافه من خلال مصادر أرضيّة، فلماذا لا نتطلّع إلى السماء كمصدر للنيوتريينو مستلهمين قول أمير الشعراء أحمد شوقي

**“واطلبوا المجد على الأرض فإنّ هي
ضاقت فاطلبوه في السماء”**

هذا ما فعله بالضبط راموند دافيز ليس بدافع شاعريّ، ولكن بدافع علميّ، فهو يعلم أن الشمس حسب النموذج الشمسي المُعْتَقَد تُنتج الطاقة والضيء والحرارة من خلال سلسلة من التفاعلات النووية الاندماجية المعقّدة، والتي تؤدّي أيضاً إلى إنتاج نيوتريينو الإلكترون فقط، بمعنى أن الشمس هي مصدر لنيوتريينو الإلكترون. ويمكننا حسب هذا النموذج الشمسي المُعْتَقَد حساب فيض النيوتريينو المُتَوَقَّع والذي يبلغ حوالي 10^{12} لكل سم² في كلّ ثانية. بدأ راموند دافيز عمله في أوائل الستينيات من القرن المنصرم بإعداد التجربة في أعماق أحد المناجم في الولايات المتّحدة الأمريكيّة على بعد حوالي 1.5 كيلومتر تحت الأرض لكي يتجنّب تداخلات الأشعة الكونية، وتمّ استخدام مئات الآلاف من لترات سائل التنظيف كلوريد الكربون الرباعي، موضوعةً في خزّان كبير، كمادّة كاشفة للنيوتريينو من خلال تفاعله مع الكلور. وكانت المفاجأة أن عدد تفاعلات النيوتريينو التي تمّ رصدها هي ثلث القيمة المتوقّعة، وهذا يدلّ على أن عدد النيوتريينوات القادمة من الشمس أقلّ ممّا هو متوقّع حسب النموذج الشمسي

الإشعاع يُسمّى إشعاع تشيرنكوف يصدر عن هذه الجسيمات المشحونة عندما تسير داخل الماء بأعلى من سرعة الضوء خلاله



الشكل 6: نموذج لكاشف كاميوكاندي. [ويكيبيديا](#)

من خلال تعاون دولي عالمي يضمّ كلاً من اليابان والولايات المتحدة الأمريكية وكوريا والصين وبولندا وإسبانيا، تمّ إنشاء تجربة أخرى سمّيت كاميوكاندي الفائقة. وحتى يتمّ رصد عدد أكبر من النيوتريونات مقارنةً مع التجارب السابقة، يتمّ هنا استخدام كمّية أكبر من المياه وعددٍ أكبر من المضاعفات الضوئية، وقد بدأ الإعداد للتجربة منذ أوائل التسعينيات إلى أن أُجريت عام 1996. وفي غضون عام 1998، وأثناء مؤتمر دولي عن النيوتريانو، تمّ الإعلان عن النتائج والتي تؤكّد أن فيض نيوتريانو الميون أقلّ من المتوقع ويساوي فيض نيوتريانو الإلكترون. إن هذه التجارب كما أُكّدت ما هو متعلّق بشأن النيوتريانو الجوّي، فإنها أُكّدت أيضاً ما هو متعلّق بشأن النيوتريانو الشمسي وأكّدت ما تمّ رصده بواسطة راموند دافيز

يكن معتاداً هذه المرّة هو أن هذه التجارب لم تُجرّ في أوروبا أو أمريكا، ولكنها أُجريت في كلّ من الهند وجنوب أفريقيا، وقد وُجد أن نسبة نيوتريانو الميون إلى نيوتريانو الإلكترون أقلّ من المتوقع، ولكن مع أخذ عوامل الخطأ في الاعتبار يمكن التغاضي عن عدم التوافق هذا، وبالتالي كانت النتيجة التجريبية المرصودة متوافقةً مع التوقعات النظرية.

العامل الحاسم في تأكيد هذا التوافق من عدمه أتى من ناحية غير متوقّعة، ومن تجارب كانت مُصمّمة خصيصاً لاكتشاف تحلّل البروتون أُبتدئ بتصميمها منذ بدايات الثمانينيات من القرن المنصرم. بالرغم من أن هذه التجارب لم تكشف أيّ أثر لتحلّل البروتون، ولكنها استطاعت الكشف عن النيوتريونات الجوّية، وذلك لأن الكشف عن الجسيمات الناتجة عن تحلّل البروتون هو نفسه يشابه الكشف عن الجسيمات الناشئة عن تفاعل النيوترينو مع المادة. لقد أُكّدت هذه التجارب أن فيض نيوتريانو الميون أقلّ من المتوقع ويساوي فيض نيوتريانو الإلكترون وليس ضعفه كما هو متوقّع. تمّ ذلك في عام 1986 من خلال إحدى التجارب التي أُجريت في اليابان وتُسمّى تجربة كاميوكاندي. وكالمعتاد، نُصّبت التجربة في أعماق أحد المناجم هناك في اليابان، وكان جهاز الكشف عبارةً عن خزان مياه يحتوي على عشرات الآلاف من أطنان المياه مُحاطة بالآلاف من المضاعفات الضوئية. يعادل جهاز الكشف في ضخامته مبنىً من عدّة طوابق، ويبدو في هيئته وبوجود هذا العدد الضخم من المضاعفات الضوئية ككائن أسطوري خرافي. المضاعفات الضوئية هذه تقوم برصد الإلكترونات أو الميونات الناشئة عن تفاعل النيوترينو مع المادة وذلك عن طريق نوع معيّن من



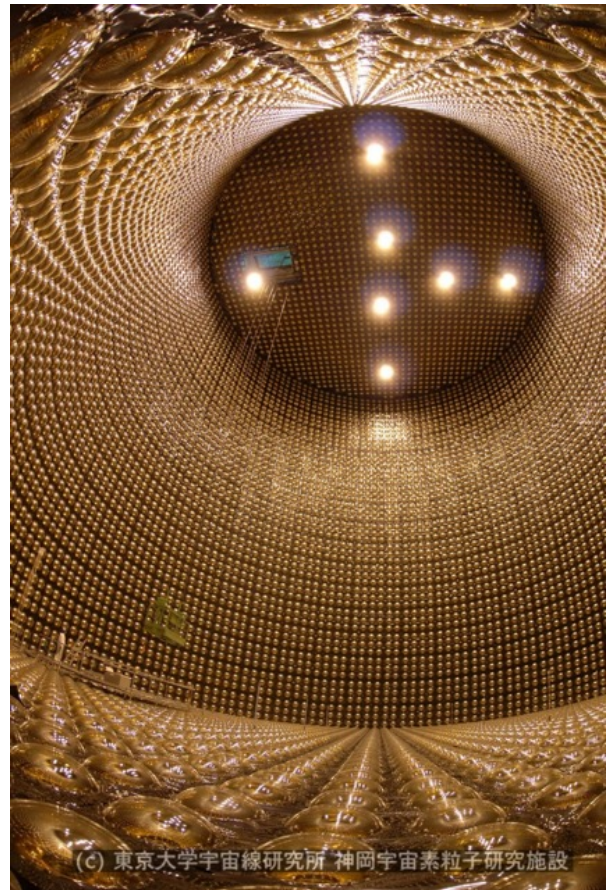
الشكل 8: دافيز عام 2001. [ويكيبيديا](#)

فيها، لذلك نعتذر للقارئ عن عدم الإحاطة الكاملة هذه ونذكّره بأن هذا الإغفال لا يدلّ على عدم الأهميّة بل إنني اضطرّرت لذلك بسبب ضيق المقال.

سادسًا: النيوترينو وتغيير الهوية (النكهة)

كما رأينا ممّا سبق، تبين أن هناك مشكلتين أو مسألتين، تخصّ إحداهما النيوترينو الشمسي، بينما تتعلّق الأخرى بالنيوترينو الجوّي. في حالة نيوترينو الشمس، يكون فيض نيوترينو الإلكترون الذي يصل إلى الأرض صادرًا عن الشمس أقلّ من المتوقّع، بينما في حالة النيوترينو الجوّي يكون أيضًا فيض نيوترينو الميون المرصود على سطح الأرض أقلّ من المتوقّع. ماذا يحدث للنيوترينو عندما يرحل في الفضاء متّجّهًا من الشمس أو من طبقات غلاف الجوّ العليا وصولًا إلى الأرض؟ هل يمكن أن يغيّر النيوترينو من هويّته وهو يرحل في الفضاء، بمعنى أنه يتحوّل من نوع لآخر؟

هذا بالفعل ما اقترحه الفيزيائي الإيطالي برونو بونتيكورفو عام 1969. لتبسيط الفكرة، نفترض أن هناك نوعين من النيوتريونات، أحدهما المُصاحب للإلكترون ونرمز له ν_e والآخر المُصاحب للميون ν_μ ،



الشكل 7: كاشف تجربة كاميوكاندي الفائقة.

[Super-Kamiokande](#)

وفي ضوء تلك الاكتشافات التجريبية تمّ منح راموند دافيز جائزة نوبل في الفيزياء لعام 2002 وكان عمره وقتئذ سبعة وثمانين عامًا، حيث كان محظوظًا أن يطول به العمر إلى هذا الحدّ ويأخذ جائزة نوبل التي شاركه فيها عالم الفيزياء الياباني كوشيبا المسؤول عن تصميم تجربة كاميوكاندي. وفي السنوات التالية، نال الجائزة عالم الفيزياء الياباني كاجيتا تاكاهي وكان رئيس الفريق المسؤول عن تجربة كاميوكاندي الفائقة وشاركه فيها عالم الفيزياء الكندي آرثر ماكدونالد الذي كان يقود فريقًا لتجربة تهدف إلى الكشف عن النيوترينو الشمسي في كندا حيث أُكّدت أيضًا ما تمّ رصده سابقًا بواسطة دافيز

في الواقع، لن أستطيع ولضيق المساحة التحدّث عن جميع التجارب التي أُجريت بشأن النيوترينو الجوّي والشمسي وعن كلّ العلماء الذين ساهموا

قد يختفي ν_e تمامًا ويظهر بدلاً منه ν_μ أو خليط (مزيج) يحتوي على كل من ν_e و ν_μ . وهذا يعتمد على الزمن بطريقة دورية من خلال دوالٍ مثلثية، ولذلك يسمي الفيزيائيون هذه الظاهرة بتذبذب (اهتزاز) النيوتريـنو، وتُحدّد سمات هذه الدوال الدورية من خلال زاوية الاختلاط θ والفروق بين مربّعي الكتلة $m_2^2 - m_1^2$ وطاقة النيوتريـنو. يختفي هذا التذبذب تمامًا في حالة انعدام الاختلاط، أي عندما تكون زاوية الاختلاط مساويةً للصفر $\theta = 0$ ، أو عند تساوي الكتلتين $m_1 = m_2$

يمكن بسهولة تعميم هذا التحليل عندما يكون لدينا ثلاثة أنواع من النيوتريـنو (ν_e, ν_μ, ν_τ)، وبالتبعيّة ثلاث حالات ذات كتلة محدّدة (ν_1, ν_2, ν_3)، وفي هذه الحالة يكون لدينا ثلاث زوايا اختلاط بالإضافة إلى زوايا طور تكون مسؤولة عن الفرق بين سلوك المادّة والمادّة المضادّة في الواقع، إن التجارب التي كانت تُجرى على النيوتريـنو بشأن مشكلتي النيوتريـنو الجويّة والشمسيّة كانت تأخذ بعين الاعتبار اهتزاز النيوتريـنو وتغيير هويّته، ومن بين هذه البيانات التجريبيّة يمكن تعيين زوايا الاختلاط، وبعض زوايا الطور، والفروق بين مربّعات الكتل

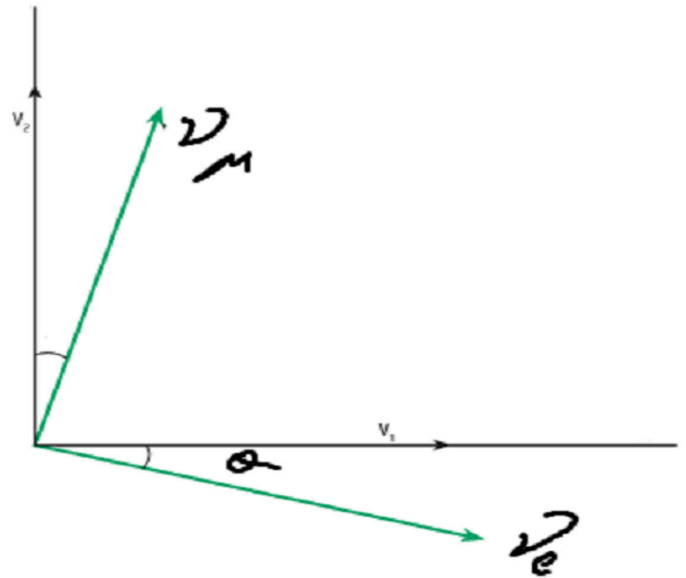
كانت النتائج التجريبيّة تدلّ على أن زوايا الاختلاط كبيرة على النقيض من الاختلاط في قطاع الكواركات، حيث زوايا الاختلاط صغيرة. إن زوايا الاختلاط في النيوتريـنونات يمكن أن تبلغ ثلاثين درجة في حالة مشكلة النيوتريـنو الشمسي، وخمسة وأربعين درجة في حالة مشكلة النيوتريـنو الجوّي أماً عن فروق مربّعات الكتل، فهي بالغة الصغر بحيث أنها مع اعتبارات أخرى تؤدّي إلى امتلاك

وكلاهما ذو هويّة محدّدة. لا تمتلك هذه النيوتريـنونات ذات الهويّة المُحدّدة كتلة مُحدّدة. أمّا عن الحالات ذات الكتلة المُحدّدة القيم فنرمز لها بـ ν_1 للحالة ذات الكتلة m_1 ، و بـ ν_2 للحالة ذات الكتلة m_2 . الحالة مُحدّدة الهويّة هي عبارة عن تركيب خطّي كمومي من الحالات ذات الكتلة المُحدّدة، ويمكن التعبير رياضياً عن ذلك كالتالي

$$\nu_e = \nu_1 \cos\theta + \nu_2 \sin\theta$$

$$\nu_\mu = -\nu_1 \sin\theta + \nu_2 \cos\theta$$

كما يمكن تمثيل هذا "الدوران" بالرسم كما يلي:



هذه الحالات من التراكب الكمومي تسمح بها نظريّة الكمّ، وتؤدّي إلى تأثيرات كمومية خالصة لا تظهر إلّا في نطاق نظريّة الكمّ والنظم الخاضعة لها. من ضمن هذه التأثيرات ما يُعرّف بتغيير الهويّة، فمثلاً نبدأ بالجسيم ν_e وهو حالة تراكب $\nu_1 \cos\theta + \nu_2 \sin\theta$ وعندما ننتظر بعضاً من الوقت فإن كلاً من الحالتين ν_1 و ν_2 تتغيّران مع الزمن بكيفيّتين بسيطتين ولكن غير متطابقتين، وهذا يؤدّي إلى تغيير حالة التراكب ذات الهويّة ν_e إلى حالة تراكب يمكن أن يتواجد فيها كل من ν_e و ν_μ . أي أننا قد نبدأ بحالة ν_e وبمرور الزمن

أكبر حجمًا من سابقاتها، بغرض الإمساك بأعداد أكبر من النيوترينو، وذلك من أجل تحسين التحليل الإحصائي للنتائج التجريبية، وإعداد حزم كثيفة من النيوترينو يمكن ضبط طاقتها حسب رغبتنا، وذلك لأن دراسة تأثير طاقة النيوترينوات تُمكننا من قياس أشياء كثيرة مهمة.

هناك بالفعل الكثير من التجارب يُعدّ ليتمّ إجراؤه في المستقبل القريب حتى يتمّ فكّ شفرة ذلك الجسيم اللغز الذي ظلّ يُدهشنا على قرابة مائة عام، وما زال في جعبته الكثير من المفاجآت.

المراجع:

[1] Frank Close, (2010), Neutrino, Oxford University Press, Oxford

[2] Takaaki Kajita, (2010), Atmospheric neutrinos and discovery of neutrino oscillations, Proc. Jpn. Acad. Ser. B 86.

خبر



توفي بيتر هيغز، الحائز على جائزة نوبل والذي تنبأ بـ "جسيم هيغز" المُسمّى نسبةً إليه، عن عمر يناهز 94 عامًا. تمّ اكتشاف هذا الجسيم الأوليّ عام 2012، وهو حجر رحيّ أساسي في النموذج القياسي، الذي يُجسد معظم المعارف البشرية حتى الآن عن الجسيمات الأولية. المصدر: [The New York Times](https://www.nytimes.com)

النيوترينو لكتلة صغيرة جدًا. هذه الكتلة الصغيرة المتوقّعة للنيوترينو أصغر من كتلة الإلكترون بحوالي مليون مرّة، ونذكر أن الإلكترون بحدّ ذاته يُعدّ من أخفّ الجسيمات الأولية.

سابعًا: خاتمة وتحديات

مما سبق يتّضح لنا أن النيوترينو تفاعله ضعيف جدًا مع المادة، ولكي يتسنى لنا اكتشافه لا بدّ من بناء كواشف عملاقة تحتوي على كمّيات ضخمة من الموادّ كالماء مثلاً

تستلزم تجارب اهتزاز النيوترينو أن تكون له كتلة والبيانات التجريبية تشي بصغر هذه الكتلة إلى حدّ مليون مرّة أصغر من كتلة الإلكترون، وهذا الصّغر البالغ لكتلة النيوترينو بالنسبة للجسيمات الأولية الأخرى يستصرخنا من أجل التفسير. وماذا عن هرمية ترتيب الكتل (بمعنى الترتيب من الأصغر نحو الأكبر من ناحية الكتلة)؟ وهل هناك ثلاثة نيوترينوات أم أكثر؟

هل لعب النيوترينو دورًا فاعلاً في تشكيل الكون حولنا؟ في الحقيقة، إن الكون حولنا مليء فقط بالمادّة، ولا توجد آثار ملحوظة عن تجمّعات من المادّة المضادّة. حسب نموذج الانفجار العظيم لنشأة الكون، فإن الكون قد بدأ بمقادير متساوية من المادّة والمادّة المضادّة، ولو استمرّ على هذا الحال لانتهى به المطاف إلى كونٍ مليءٍ بالفوتونات، ولما كنّا هنا الآن نتعجّب من نشأة الكون. لا بدّ من أن هناك ثقله فروقٍ بين المادّة والمادّة المضادّة أدت إلى هيمنة (سيادة) المادّة في كوننا الحالي. هل يمكن للنيوترينو أن يلعب دورًا مهمًا هنا؟

تستلزم هذه التحديات والمعضلات إجراء تجارب جديدة بأفكار مُبتكرة، وبناء كواشف عملاقة

المُوصِّلِيَّةُ الفائقة ومستقبل التقنية

محمود عبد الحفيظ

أستاذ مساعد محاضر في جامعتي هارفارد (الولايات المتحدة) وأوبسالا (السويد)

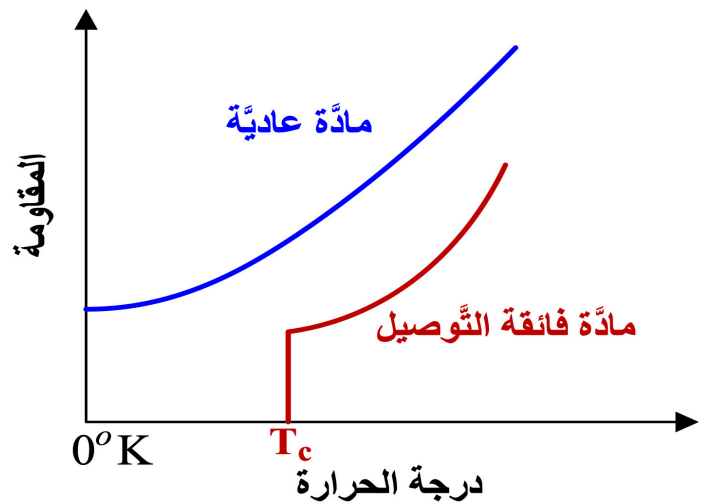


أولاً: مقدّمة

حالات مميّزة للمادّة في الطّبيعة. الحالة الأولى هي الحالة الصّلبة وتتنّصّف بها مواد مثل الحديد والرّمال والرّمال والرّمال وغيرها الكثير. تتميّز هذه الحالة ببنائها الذّري المترابط ممّا يجعلها قويّة البنية وأنّ تتخذ أشكالاً وأحجاماً ثابتة. الحالة الثانية هي الحالة السّائلة مثل المياه والزيتون وكل المواد الكيميائيّة السّائلة، ويكون التّرابط بين ذرّاتها أو جزيئاتها أقلّ من نظيراتها في الحالة الصّلبة ممّا يمكّنها من التّحرّك انسيابياً. تتميّز هذه الحالة أيضاً بحجم ثابت عند درجة حرارة وضغط معينين، وهي تأخذ شكل الإناء الذي توضع فيه. الحالة الثّالثة هي الحالة الغازيّة مثل بخار الماء والرّيح والدخان، وهي على النقيض من أسلافها يكون التّرابط بين ذرّاتها أو جزيئاتها شبه معدوم. كما أنّ ليس لها شكل أو حجم ثابت وتشغل الحيز الذي توضع فيه حيث تكون مكوّناتها في حركة دائبة تتميّز بالتصادمات الثنائيّة بين هذه المكوّنات.

مع تقدّم العلم، اكتشف الإنسان أنّ هناك حالات أخرى للمادّة. فقد تمّ التعرّف على ما يعرف بالبلازما لأوّل مرّة في المختبر بواسطة السير ويليام كروكس (Sir William Crookes) عام 1879. البلازما هي واحدة من عدّة حالات أساسية للمادّة، وتتكوّن أساساً من جسيمات مشحونة، وتشكّل مزيجاً من الشّوارد أو الإلكترونات، كما إنّها الشّكل الأكثر وفرة من المادّة العادية في الكون، وينتشر معظمها في النّجوم (بما في ذلك الشّمس)، ولكنها تهيمن أيضاً على الوسط المخلخل في الفضاء البينجمي interstellar والبيمجريّ intergalactic. يمكن توليد البلازما بشكل صناعي أيضاً، على سبيل المثال، عن طريق تسخين غاز محايد أو تعريضه لمجال

الموصليّة (النّاقليّة) الفائقة هي ظاهرة فيزيائيّة يعود اكتشافها إلى بداية القرن العشرين وتتميّز بمجموعة من الخواص التي تفتّ ملاحظتها في بعض المواد عند تبريدها إلى درجات حرارة متدنيّة. فعند حرارة تبلغ بضعة درجات كلفن تفقد هذه المواد مقاومتها الكهربائيّة وتطرد المجال المغنطيسي في ظاهرة فريدة تعرف بتأثير مايسنر (Meissner effect). تُعرف المواد التي لها هذه الخواص بالمواد فائقة التّوصيل. تختلف هذه المواد في طبيعتها عن المواد الموصّلة العاديّة التي تتناقص مقاومتها تدريجياً مع انخفاض درجة الحرارة. فالمواد فائقة التّوصيل تنخفض موصليتها الكهربائيّة إلى الصّفر فجأة عند درجة حرارة حرجة معيّنة تعتمد على طبيعة المادّة نفسها، كما هو موضّح في الشّكل 1. يمكن للتيار الكهربائي الذي يمر عبر حلقة من سلك فائق التّوصيل أن يستمر في التدفق إلى أجل غير مسقّى بدون مصدر للطاقة.



الشّكل 1. تقلّ مقاومة المادّة العادية بشكل رتيب مع انخفاض درجة الحرارة. أمّا المواد فائقة التّوصيل فتتخفّف مقاومتها فجأة إلى الصّفر المطلق عند درجة حرارة حرجة مميّزة للمادّة.

ثانياً: حالات العادة

لاحظ الإنسان منذ القدم أنّ المادّة توجد في ثلاث

تعتبر المواد فائقة التوصيل (المواد الموصلية بشكل فعال للكهرباء) من أهم الاكتشافات التي ساهمت بشكل كبير في تطور التكنولوجيا الحديثة وتحقيق التقدم العلمي. تاريخ هذه المواد وأهميتها لا يمكن إغفالهما، فهي قاعدة أساسية في عالم الإلكترونيات والطاقة والاتصالات والطب، وقد أحدثت ثورة في هذه المجالات وساهمت في تحسين حياة البشر بشكل كبير

أ- تقنيات الكهرباء والإلكترونيات: تُستخدم المواد فائقة التوصيل في تصنيع المكونات الإلكترونية مثل الأقراص الصلبة، وأجهزة الرادار، والأقمار الصناعية. تحسّن هذه المواد من أداء الأجهزة وتوفّر استهلاكًا منخفضًا للطاقة.

ب- توليد الكهرباء: يمكن استخدام المواد فائقة التوصيل في توليد الكهرباء باستخدام الترميز المغناطيسي، ممّا يقلل من الفاقد في نقل الكهرباء ويزيد من كفاءة توليدها.

ج- الاتصالات: تُستخدم هذه المواد في تصنيع أجهزة الاستشعار والهوائيات الفائقة التوصيل، ممّا يزيد من دقة أجهزة الرصد والاتصالات.

د- الطّب: يمكن استخدام المواد فائقة التوصيل في تصنيع أجهزة التصوير الطبي مثل الرنين المغناطيسي وأجهزة تخطيط القلب.

هـ- البيئة والطاقة المتجددة: تساهم هذه المواد في تطوير تقنيات تخزين الطاقة المتجددة وتقليل استهلاك الوقود الأحفوري.

باختصار، تلعب المواد فائقة التوصيل دورًا حاسمًا في تقدم العلوم والتكنولوجيا الحديثة، وتجعلها تطبيقاتها المتعددة جزءًا لا غنى عنه في حياتنا اليومية، فهي تُساهم في تطوير حلول

كهرومغناطيسي قوي. كما أنّها تستخدم في مفاعلات الاندماج النووي لتوليد الطاقة عندما درس العلماء مسألة استقرار النجوم متراصة البنية (الأقزام البيضاء والنجوم النيوترونية)، وجدوا أن حالة الاستقرار هذه تتطلب وجود نوع آخر من المادة، وهو ما يعرف بحالة التردّي الإلكتروني (electron degeneracy) والتردّي النيوتروني. فعند الضّغط الشّديد في قلب النجوم متراصة البنية تقترب الإلكترونات من بعضها مشكّلة نوعًا من الغاز الإلكتروني الذي يحكمه قانون باولي للاستبعاد، ويكون تأثيرها معاكسًا لقوّة الجاذبية ممّا يمنع الجرم من التّقلّص (collapse) على نفسه. تحدث هذه العمليّة في قلب الأقزام البيضاء. كما تحدث عمليّة مماثلة تعرف بالتّردّي النيوتروني (neutron degeneracy) في قلب النجوم النيوترونيّة.

لذلك نحن محاطون بحالات أو أطوار مختلفة للمادة. وبتخصيص الحديث عن علم الجوامد (الأجسام الصلبة)، يمكننا القول إن دراسة الخواص الفيزيائية للجوامد قد غيّرت وجه الحياة على الأرض، فمن المصباح الكهربائي إلى صاروخ الفضاء مروراً بكل الأجهزة الإلكترونية المتاحة بين أيدينا الآن، هذه الأدوات والآلات ما هي إلا تطبيق مباشر أو غير مباشر لظواهر فيزيائية منبثقة من علم الجوامد. من أهم تلك الظواهر والتي تشغل حيّزًا كبيرًا من فكر المجتمع العلمي في الوقت الحالي وعلى مدار القرن الماضي ظاهرة اكتشاف وتصنيع مواد ذات توصيل كهربائي فائق في ظروف مواتية من حيث درجة الحرارة والضغط الجوي، لما سيحدثه هذا الاكتشاف من تغيير جذري في التكنولوجيا وتوابعها

ثالثًا: مجالات تطبيقات المواد فائقة التوصيل

الظاهرة التي أصبحت تعرف باسم تأثير مايسنر. في عام 1935، أظهر فريتز (Fritz) وهالينز لندن (Heinz London) أن تأثير مايسنر كان نتيجة لتقليل الطاقة الكهرومغناطيسية الحرة التي يحملها التيار فائق التوصيل

ومع مرور الوقت، تم اكتشاف المزيد من المواد الفائقة التوصيل، مثل السيراميكات فائقة التوصيل في الثمانينيات. في عام 1986، تم اكتشاف المواد فائقة التوصيل عالية الحرارة، مما ساهم في تحسين أداء التبريد وتطوير تقنيات توليد الكهرباء. أدى هذا الاكتشاف الجديد إلى توسيع نطاق تطبيقات المواد فائقة التوصيل.

يقدم الشكل (2) ملخصًا لتطور مواد الفائقة التوصيل في التبريد منذ اكتشاف الظاهرة عام 1911 ولغاية اليوم

1911-1930

بعد اكتشاف ظاهرة فائقة التوصيل في مادته الزئبق، بدأ الباحثون في دراسة الظواهر الفيزيائية التي ترتبط بهذه الظاهرة. كانت الأبحاث تتركز بشكل رئيسي على دراسة خصائص المواد المختلفة عند درجات حرارة قريبة من الصفر المطلق

1931-1980

تم تطوير تقنيات تبريد جديدة تسمح بتحقيق درجات حرارة أقل، مما أدى إلى اكتشاف الفائقة التوصيل في المزيد من المواد. بدأ الباحثون في فهم أسباب الفائقة وتأثير العوامل المختلفة عليها

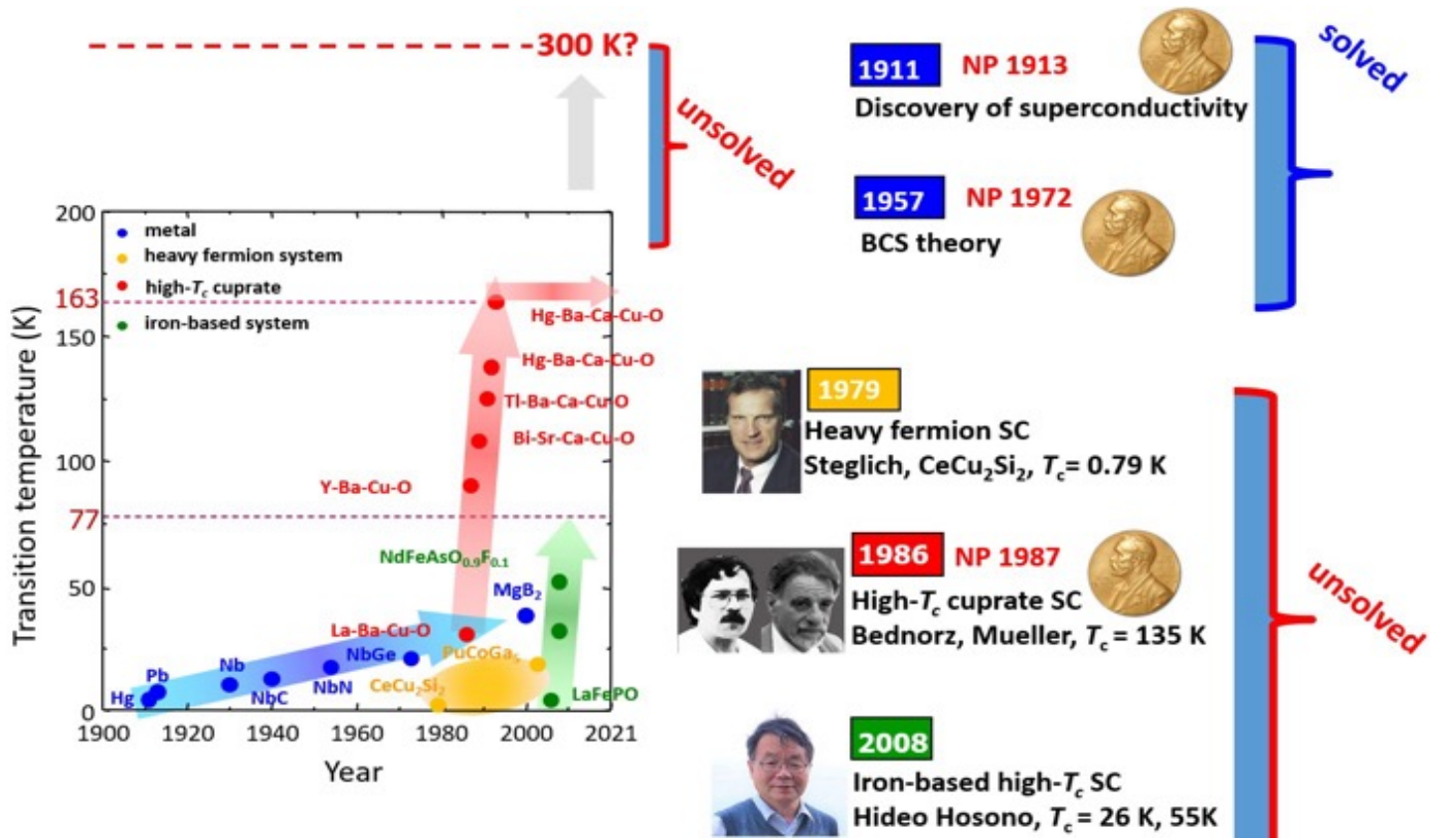
1981-2000

في الفترة من عام 1981 إلى عام 2000، شهدت ظاهرة فائقة التوصيل لبعض المواد تطورات هامة واكتشافات مثيرة. بفضل التقنيات الجديدة للتبريد

رابعًا: تواريخ هامة في اكتشاف الموصلية الفائقة وتطور استعمالاتها

ذكرنا أن الموصلية الفائقة ظاهرة فيزيائية تحدث عندما يمر التيار الكهربائي من خلال مادة دون مقاومة تقريبًا في حالة تُعرف بالحالة الفائقة، وتظهر هذه الظاهرة عندما تبرد المادة إلى درجة حرارة منخفضة يحدث عندها تحول طوري تنعدم عنده المقاومة الكهربائية

اكتشف هايك كامرلينج أونيس (Heike Kamerlingh Onnes) الموصلية الفائقة في 8 نيسان/أبريل 1911. كان أونيس يدرس مقاومة الزئبق عند درجات الحرارة المنخفضة باستخدام الهليوم السائل المنتج حديثًا كمادة تبريد. وقد لاحظ أونيس أن المقاومة اختفت فجأة عند درجة حرارة 4.2 كلفن. وفي التجربة نفسها، لاحظ أيضًا تحول الهليوم إلى سائل فائق عند درجة حرارة 2.2 كلفن، دون التعرّف على أهمية هذا الاكتشاف. لم يتعرّف العلماء على التاريخ الحقيقي للاكتشاف وظروفه إلا بعد قرن من الزمان، عندما تم العثور على دفتر ملاحظات أونيس. وفي السنين التالية، لوحظت الموصلية الفائقة في العديد من المواد الأخرى. ففي عام 1913، اكتشف أن الرصاص يصبح موصلًا فائقًا عند درجة حرارة 7 كلفن، وفي عام 1941 اكتشف أن نيتريد النيوبيوم يصبح موصلًا فائقًا عند درجة حرارة 16 كلفن. عكف العلماء بعد ذلك على بذل جهود كبيرة لمعرفة كيف تعمل الموصلية الفائقة. حدثت الخطوة المهمة في عام 1933، عندما اكتشف مايسنر (Meissner) وأوكسينفيلد (Ochsenfeld) أن الموصلات الفائقة تطرد المجالات المغناطيسية المطبقة، وهي



الشكل 2. تواريخ هامة في تاريخ الموصلية الفائقة.

المواد الفائقة واكتشاف تطبيقات جديدة تعتمد على هذه الخواص المميزة

2001-2024

شهدت الفترة الممتدة من عام 2001 إلى عام 2024 تقدماً هائلاً في مجال فائقية التوصيل لبعض المواد، حيث تسارعت الأبحاث والتطبيقات المتعلقة بهذه الظاهرة الفيزيائية الرائعة. خلال هذه الفترة، تم تطوير تقنيات حديثة واكتشاف مواد جديدة تُظهر الفائقية بشكل أكبر وأقوى، فقد عمل العلماء على تحسين فهمنا لميكانيكيتهما ولكيفية تحقيقها في مجموعة متنوعة من المواد. استمرت التطبيقات المتنوعة لفائقية التوصيل في التوسع، حيث تم استخدام هذه الخواص المذهلة في مجالات متعددة من التكنولوجيا والعلوم. على سبيل المثال، تم استخدام مواد فائقة التوصيل في تطوير أنظمة الرادار والأقمار الصناعية، ما سمح بتحسين أداء هذه

التي تمكنت من تحقيق درجات حرارة أقل، تم اكتشاف مواد جديدة تُظهر هذه الظاهرة، خاصة في مركبات النحاس، حيث تبين أن بعض سبائك النحاس، عند تبريدها، يمكن للتيار الكهربائي أن يمر فيها دون أي مقاومة تقريباً

تطور استخدام فائقية التوصيل خلال هذه الفترة بشكل كبير في التطبيقات التقنية والعلمية. على سبيل المثال، بدأت هذه المواد الفائقة التوصيل في الاستخدام في تصنيع الأسلاك الكهربائية عالية الأداء والأجهزة الإلكترونية الحساسة، كما استُخدمت في تطوير أنظمة الرادار والاتصالات الفضائية، حيث تعتبر فائقية التوصيل ميزة حاسمة لتحقيق أداء عالٍ وكفاءة ممتازة

بالإضافة إلى ذلك، فتحت تلك التطورات الجديدة أبواباً واسعة للبحث العلمي في مجال الفائقية، حيث بدأ العلماء في دراسة خصائص هذه

نظرية غينزبورغ-لانداو

تقدّم النظرية التي وضعت في عام 1950 وصفًا
ماكروسكوبيًا (عيانيًا) لفائقيّة التوصيل باستخدام
معادلات حقلية

المبادئ الأساسية:

1. معادلة جينزبورغ-لانداو: تصف حالة فائقيّة التوصيل
باستخدام معادلة تتضمن وسيطًا عقديًا (Ψ) يمثل
دالة موجية للمنظومة
2. الطاقة الحرة: تُكتب الطاقة الحرة للمنظومة
كدالة في الوسيط Ψ ومشتقاته. يحدّد التغيير في Ψ
مع الحقل الكهرومغناطيسي خواصّ المادة الفائقة
3. الطول المميز: تُقدّم النظرية مفهوميّن أساسيين،
طول التماسك (ξ) وعمق الاختراق (λ)، حيث يحدّدان
مدى تأثير الفائقيّة داخل المادة

النتائج:

تساعد النظرية في وصف الظواهر الماكروسكوبية
في فائقيّة التوصيل مثل تشكيل الدوامات في
الحقول المغناطيسية

وكوبر وشرايفر. أوضحت نظرية BCS أنّه يمكن اعتبار
تيار التوصيل سائلًا فائقًا مكوّنًا من أزواج كوبر
(Cooper pair)، وهي أزواج من الإلكترونات تتفاعل
من خلال تبادل الفونونات. تتحرّك أزواج الإلكترونات
في المادّة فائقة التوصيل بشكل مترابط وتحكمها
دالة موجيّة واحدة. لهذا العمل، حصل المؤلفون
على جائزة نوبل في عام 1972. في عام 1959، وجد
ليف جوركوف (Lev Gor'kov) أنّ نظرية BCS يمكن
اختزالها إلى نظرية غينزبورغ-لانداو بالقرب من درجة
الحرارة الحرجة

الأنظمة وزيادة قدرتها على توفير بيانات دقيقة. كما
أصبحت المواد فائقة التوصيل أيضًا جزءًا أساسيًا من
تصميم الأجهزة الإلكترونية الحديثة، ممّا ساهم في
تطوير أجهزة الكمبيوتر والهواتف الذكية والأجهزة
اللوحية بشكل كبير

خامسًا: نظريات الموصلية الفائقة

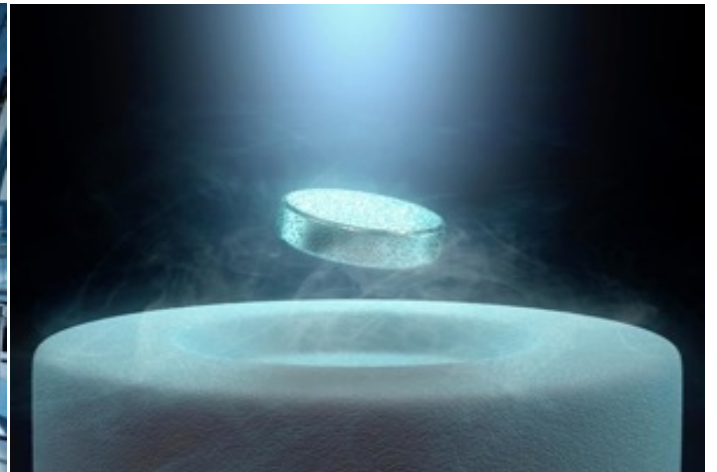
بقي فهم النظريّة التي تحكم ظاهرة الموصلية
الفائقة مستعصية على العلماء خلال عقود من
الزمن. لكن خلال الخمسينيات من القرن العشرين،
توصّل علماء فيزياء المادة المكثفة النظريّة من خلال
نظريّة ميكانيكا الكم إلى فهم الموصلية الفائقة
"التقليدية"، إذ اقترحت نظريتان على قدّ كبير من
الأهميّة والجمال لتفسير الموصلية الفائقة. النظريّة
الأولى هي نظرية غينزبورغ-لانداو (- Ginzburg
Landau) عام 1950، ثمّ نظرية باردين - كوبر -
شرايفر (Bardeen - Cooper - Schrieffer, BCS)
المجهرية عام 1957

ففي عام 1950، وضع غينزبورغ ولانداو نظريّة
للموصلية الفائقة. جمعت هذه النظريّة بين نظرية
لانداو لانتقالات الطّور من الدّرجة الثانية مع معادلة
موجية تشبه معادلة شرودنغر، وقد حققت نجاحًا كبيرًا
في شرح الخصائص العيانية للمواد فائقة التوصيل.
وجد أبريكوسوف (Abrikosov) أنّ هذه النظريّة تنبأ
على وجه الخصوص، بتقسيم الموصلات الفائقة إلى
الفئتين التي يشار إليهما حاليًا بالنوع الأوّل والنوع
الثاني. حصل أبريكوسوف وغينزبرغ على جائزة نوبل
عام 2003 لعملهما (حصل لانداو على جائزة نوبل
عام 1962 عن أعمال أخرى، وتوفي عام 1968)
اقترحت أخيرًا النظريّة المجهرية الكاملة
للموصلية الفائقة في عام 1957 من قبل باردين

على المستوى الذري. لتأثير جوزيفسون العديد من التطبيقات العملية لأنه يظهر علاقة دقيقة بين القياسات الفيزيائية المختلفة، مثل الجهد والتردد، مما يسهل إجراء قياسات دقيقة للغاية. يُنتج تأثير جوزيفسون (Josephson effect) تيارًا، يُعرف باسم التيار الفائق (supercurrent)، يتدفق بشكل مستمر دون أي جهد مطبق، عبر جهاز يعرف باسم وصلة جوزيفسون (Josephson Junction)، وتتكوّن من اثنين أو أكثر من الموصلات الفائقة مقترنة برابطة ضعيفة. يمكن أن تكون الرابطة الضعيفة عبارة عن حاجز عازل رقيق يفصل بين المادتين فائقتي التوصيل تمتلك وصلات جوزيفسون تطبيقات مهمة في

سادسًا) ظواهر مرتبطة بالموصلية الفائقة

6.1 تأثير مايسنر: ترتبط بالموصلية الفائقة عدّة ظواهر وتطبيقات لعلّ أهمها هو ما يعرف بتأثير مايسنر الذي أشرنا إليه سابقًا. فعند تبريد المادة إلى درجة حرارة حرجة تعتمد على طبيعتها تصبح فائقة التوصيل، وفي هذه الحالة لا تخترقها خطوط المجال المغنطيسي، ونتيجة لذلك تطفو المادة في الهواء أو الفراغ عند وضعها على قطعة مغنطيس، كما هو مبين في الشكل 3. من أهم تطبيقات هذه الظاهرة هو القطار فائق السرعة، ولكن ذلك يتطلب تطوير مواد فائقة التوصيل في درجات الحرارة العادية (انظر الشكل 4)



الشكل 4. قطار المستقبل: يطفو القطار على القضبان باستخدام تأثير مسنر، لكن يتطلب ذلك تطوير مواد فائقة التوصيل في درجة الحرارة العادية.

الشكل 3. ظاهرة تأثير مسنر. تطفو مادة فائقة التوصيل عند بلوغها درجة الحرارة الحرجة فوق قطعة من المغنطيس.

6.2 تأثير جوزيفسون (Josephson effect)

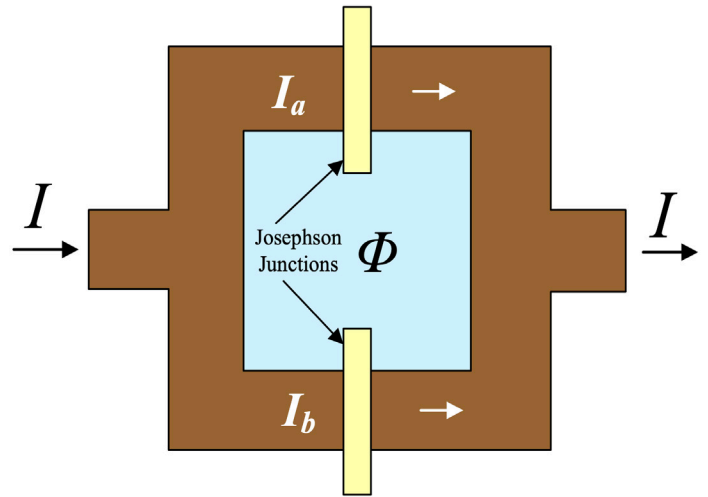
دوائر ميكانيكا الكم، مثل SQUIDS (انظر أدناه)، والكيوبتات فائقة التوصيل (superconducting qubits)، والإلكترونيات الرقمية من خلال وحيد التدفق الكمي السريع (rapid single flux quantum, RSFQ)، وهو نبيلة (جهاز device) إلكترونية رقمية تستخدم النبائط فائقة التوصيل

6.3 جهاز التداخل الكمي فائق التوصيل (SQUID)

تأثير جوزيفسون هو ظاهرة تحدث عندما وضع اثنين من الموصلات الفائقة بالقرب من بعضهما البعض، مع وجود حاجز أو قيود بينهما. تفتت تسمية التأثير على اسم الفيزيائي البريطاني بريان جوزيفسون، الذي تنبأ في عام 1962 بالعلاقات الرياضية للتيار والجهد عبر الرابطة الضعيفة. وهو مثال على ظاهرة الكم العيانية، حيث يمكن ملاحظة تأثيرات ميكانيكا الكم على المستوى العادي، وليس

بيدورز (Bednorz) ومولر (Müller) الفائقة (LBCO)، وهي مادة البيروفسكايت القائمة على اللانثانوم، والتي كانت لها درجة حرارة انتقالية 35 كلفن (درجة الحرارة التي تصبح فيها المادة ذات موصلية فائقة)، وتوّجت بجائزة نوبل في الفيزياء عام 1987. وسرعان ما وُجد أنّ استبدال اللانثانوم بالإيتريوم (أي صنع YBCO) يؤدي إلى رفع درجة الحرارة الحرجة إلى ما فوق 90 كلفن.

هذه القفزة في درجة الحرارة لها أهمية هندسية خاصة، لأنها تسمح بالنيوتروجين السائل كمادة تبريد أن يحلّ محل الهليوم السائل، ويمكن إنتاج النيوتروجين السائل بتكلفة زهيدة نسبيًا. تساعد درجات الحرارة المرتفعة بالإضافة إلى ذلك على تجنب بعض المشاكل التي تنشأ عند درجات حرارة الهليوم السائل، مثل تكوين سدادات من الهواء المتجمد التي يمكن أن تسد الخطوط المبردة وتسبب في تراكم الضغط غير المتوقع والذي ربّما يكون خطيرًا. منذ ذلك الحين اكتشف العلماء العديد من الموصلات الفائقة الأخرى من النحاسيات، وتعتبر نظرية الموصلية الفائقة في هذه المواد واحدة من التحديّات الرئيسيّة البارزة في فيزياء المادة المكثفة النظرية. توجد حاليًا فرضيتان رئيسيتان لتفسير الموصلية الفائقة عند درجات الحرارة العالية نسبيًا. تتناول النظرية الأولى رابطة الرنين والتكافؤ (resonating-valence-bond theory)، وتقلّب الدّومة (المغزل spin) التي تحظى بأكبر قدر من الدّعم في المجتمع العلمي. تقترح الفرضية الثانية أنّ الاقتران الإلكتروني في الموصلات الفائقة ذات درجة الحرارة العالية يتمّ بواسطة موجات دوميّة

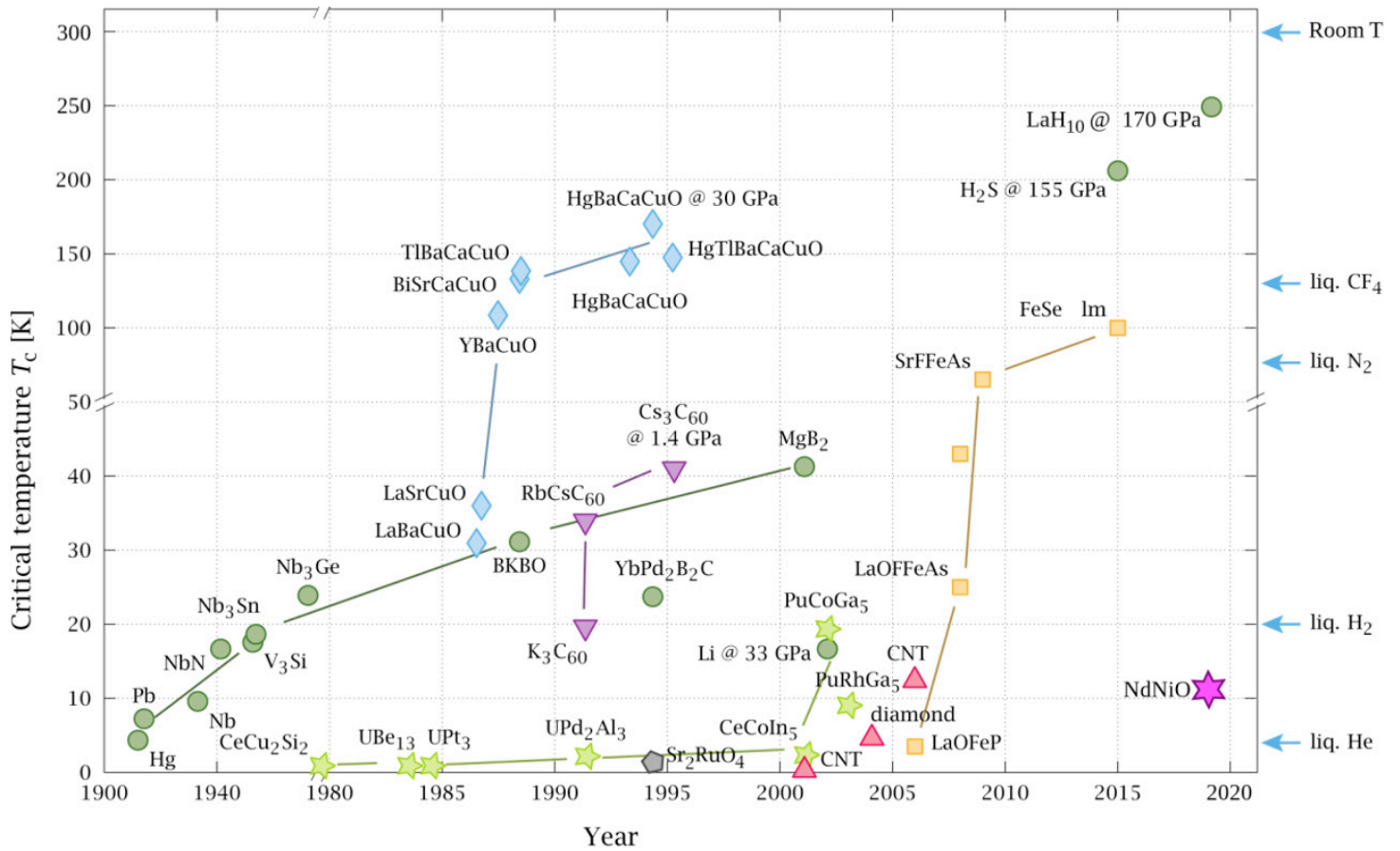


الشكل 4. رسم تخطيطي لـ SQUID. يدخل التيار وينقسم إلى مسارين، لكل منهما تيار يمرّ عبره. الحواجز الرقيقة على كل مسار هي وصلات جوزيفسون، والتي تفصل معًا المنطقتين فائقتي التوصيل. يمثل Φ التدفق المغناطيسي الذي يخترق حلقة الـ SQUID.

هو مقياس مغناطيسي حساس للغاية يستخدم لقياس المجالات المغناطيسية الضعيفة للغاية، استنادًا إلى حلقات فائقة التوصيل تحتوي على وصلات جوزيفسون. يعدّ هذا الجهاز حساسًا بما يكفي لقياس الحقول التي تصل شدّتها إلى تسلا، ويتميّز بمستويات ضوضاء منخفضة تصل إلى 3 Hz-1/2 ft. للمقارنة، ينتج مغناطيس الثلجة النموذجي 0.01 تسلا. من المحتمل أن تكون مقاييس المغناطيسية الذرية (spin exchange relaxation-free magnetometer)، التي تم اختراعها في أوائل العقد الأوّل من القرن الحادي والعشرين، أكثر حساسيّة، ولا تتطلب تبريدًا قريًا (cryogenic) ولكنها أكبر حجمًا (~ 1 سم) ويجب تشغيلها في مجال مغناطيسي عند درجة حرارة قريبة من الصفر المطلق.

سابعًا: الموصلية الفائقة في درجات الحرارة العالية (High Temperature Superconductors)

كان الاعتقاد السائد حتى عام 1986، هو أنّ نظرية BCS تحظر الموصلية الفائقة عند درجات حرارة أعلى من حوالي 30 كلفن. وفي ذلك العام، اكتشف



الشكل 6. الجدول الزمني للمواد فائقة التوصيل. تمثل الألوان فئات مختلفة من المواد: BCS (●)، فربونات ثقيلة، (◆)، كربيئات، (▼) تعتمد على كيمبستروفوليرين كعنصر أساس، (▲) متآكلة الكربون، (■) تعتمد على الحديد والنيكتوجين كعنصر أساس، (★) تعتمد على النيكل كعنصر أساس، (◊) روثينيت السترونتيشوم

العالية في بعض المواد. وأخيراً، في 31 ديسمبر 2023، تمّ نشر "الموصلية الفائقة الشاملة في درجة حرارة الغرفة في الجرافيت" في مجلة "تقنيات الكم المتقدمة" بدعوى إثبات الموصلية الفائقة في درجة حرارة الغرفة والضغط العادي في الجرافيت الحراري عالي التوجه مع صفائف كثيفة من عيوب الخطوط المتوازية تقريباً. يبيّن الشكل 6 المواد فائقة التوصيل التي تمّ اكتشافها وزمن الاكتشاف ودرجة الحرارة لكلّ منها. يتعيّن ملاحظة عدم ذكر الظروف التي تمّ خلالها الحصول على درجة الحرارة للموصلية الفائقة في هذه المواد.

ثامناً: خلاصة

فائقيّة التوصيل ظاهرة معقدة تم تفسيرها

قصيرة المدى تعرف باسم المُسيّرات المغنطيسية (paramagnons)، وتتكوّن من مغنونات (magnons) تنشأ في المواد المغنطيسية التي تكون في مرحلة درجة حرارتها العالية غير المضطربة. (المغنون هو عبارة عن إثارة جماعية لبنيّة دومات الإلكترون في شبكة بلورية)..

في عام 2008، اقترح جوبسر (Gubser)، وهارتنول (Hartnoll)، وهيرزوغ (Herzog)، وهورويتز (Horowitz) الموصلية الفائقة المجسّمة، التي تستخدم الازدواجية (المثنوية duality) المجسّمة (holographic) أو نظرية التوافق AdS/CFT (وجود تكافؤ بين نظرية ثقالة جاذبية في فضاء خاص مع نظرية مجال كمّي محافظ في فضاء بأبعاد أقل)، كتفسير محتمل للموصلية الفائقة في درجات الحرارة

بواسطة نظريات متعددة، بدءًا من النظرية البسيطة نسبيًا BCS إلى النظريات المعقدة المستخدمة لفهم المواد الفائقة عند درجات الحرارة العالية. كلٌّ من هذه النظريات يُقدِّم رؤية مختلفة عن كيفية حدوث فائقيّة التوصيل، مما يعزز فهمنا لهذه الظاهرة ويسهم في التطورات التقنية المستقبلية في مجال الموصلات الفائقة

بالإضافة إلى ذلك، بدأ العلماء في استكشاف إمكانية الوصول إلى درجات حرارةٍ فائقةٍ أقلّ، وهذا يعني أنه ربما يتم الوصول يومًا ما إلى اكتشاف مواد فائقة التوصيل تعمل عند درجة حرارة الغرفة، مما سيكون له أثر كبير على حياتنا اليومية. مع استمرار التطور التقني والعلمي، يظل البحث في مجال الفائقيّة في التوصيل حيويًا ومثيرًا للاهتمام، وربما سنرى في المستقبل المزيد من الاكتشافات والتطبيقات العملية المبتكرة في هذا المجال

المراجع:

1. Foundations of Applied Superconductivity, T.P. Orlando and K.A. Delin, Addison-Wesley, 1991
2. Superconductivity: Fundamentals and Applications W. Buckel and R. Kleiner, 2nd Edition, John-Wiley & Sons (Wiley-VCH); 2004

خبر

اكتشاف شرائط نانوية مضغوطة مصنوعة من التيتانيوم والكبريت في طور الموصليّة الفائقة

وفقًا لدراسة نُشرت في مجلة Nano Letters، يمكن لشرائط النانو المصنوعة من التيتانيوم والكبريت، عند

نظرية المجال الكمي (Quantum Field Theory)

تُستخدم لتطوير نظريات أكثر تعقيدًا عن الموصليّة الفائقة، مثل نظريات فائقيّة التوصيل غير التقليدية والمرتبطة بالمواد ذات الحرارة العالية

المبادئ الأساسية:

1. تفاعلات معقدة: تأخذ هذه النظريات في الاعتبار التفاعلات الأكثر تعقيدًا بين الإلكترونات والفونونات والجسيمات الأخرى

2. نماذج متعددة الجسيمات: تستخدم نماذج مثل نماذج التموجات المغزلية (السبينية أو الدوميّة) والفونونات المرتبطة بالمغناطيسية لتفسير الظواهر في المواد الفائقة عند درجات الحرارة العالية

النتائج:

التوسّع في فهم فائقيّة التوصيل في مواد غير تقليدية مثل أكاسيد النحاس والسيراميك

نظريات حديثة للموصليّة الفائقة عند درجات الحرارة العالية

تُركّز هذه النظريات على المواد التي تظهر فائقيّة التوصيل عند درجات حرارة أعلى بكثير من المواد التقليدية، مثل أكاسيد النحاس وفائقيّة التوصيل الحديدية

المبادئ الأساسية:

1. تفاعل غير تقليدي: تعتمد على آليات غير تقليدية لتكوين أزواج كوبر، مثل التفاعلات المغزلية (الدوميّة spin) بدلاً من الفونونات

2. حالات الكتلة الهامشية: تدرس خصائص المواد التي تكون في حالات قريبة من التحول الطوري المغناطيسي

النتائج:

• تفسر لماذا يمكن لبعض المواد الفائقة التوصيل أن تكون فعّالة في درجات حرارة أعلى بكثير من الموصلات الفائقة التقليدية

• تساعد في تصميم مواد جديدة بفائقيّة توصيل أعلى.

تبلغ حوالي 2.9 كلفن هي سمة أساسية لـ TiS_3 ، مما يلقي ضوءًا جديدًا على الخصائص الإلكترونية المثيرة للاهتمام الناجمة عن الضغط العالي على هذه المادة

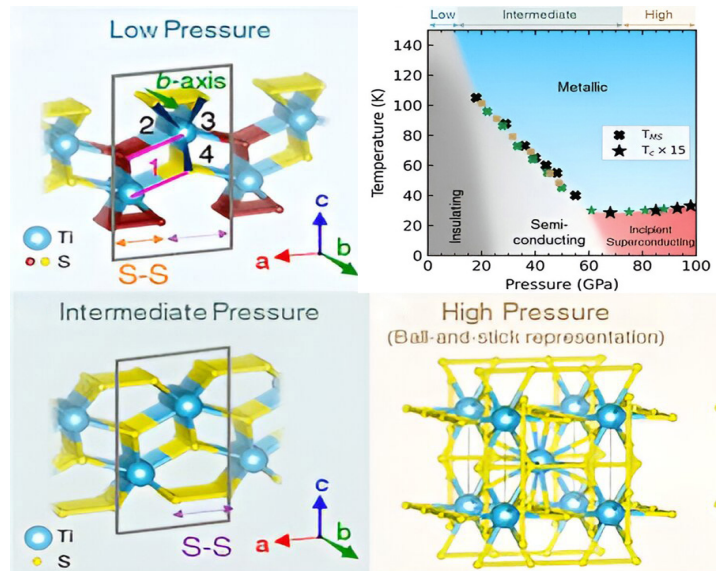
يمكن هذا الأمر الطريق لتطوير مواد لا تُسبب ضياعًا قليلًا عند نقل الكهرباء فحسب، بل -وكما يؤكد المؤلفون- إن هذه المعرفة ضرورية لتطوير مواد جديدة قد تكون موصلات فائقة في درجات حرارة أعلى وأكثر عملية. المصدر: PHYS.ORG

اختراق في فيزياء الكم يلقي الضوء على أغاز الموصلات الفائقة ذات درجات الحرارة العالية

حقق الباحثون تقدماً كبيراً في فهم الموصلات الفائقة ذات درجات الحرارة العالية، وخاصة المركبات النحاسية (cuprates). باستخدام نموذج هوبارد ثنائي الأبعاد المُحسَّن، تمكن الفريق من محاكاة الميزات الرئيسية لهذه الموصلات الفائقة عبر إضافة حركة الإلكترونات القطرية لتبيان إمكانية تحقيق الموصلية الفائقة من خلال محاكاة استخدام حواسيب فائقة. نُشرت النتائج في مجلة Science، حيث أبرزت إمكانيات النماذج الأبسط في فهم السلوكيات الكمومية المعقدة

يعد هذا الاكتشاف مهماً لأنه قد يساهم في تطوير تقنيات الحوسبة الكمومية وعلوم المواد من خلال تبسيط دراسة الظواهر الكمومية المعقدة، ويمثل العمل خطوة هامة نحو استخدام النماذج المحسنة لفهم المواد التي لها خصائص فائقة التوصيل عند درجات حرارة عالية، مما كان يُعتبر لغزاً في السابق.

المصدر: PHYS.ORG

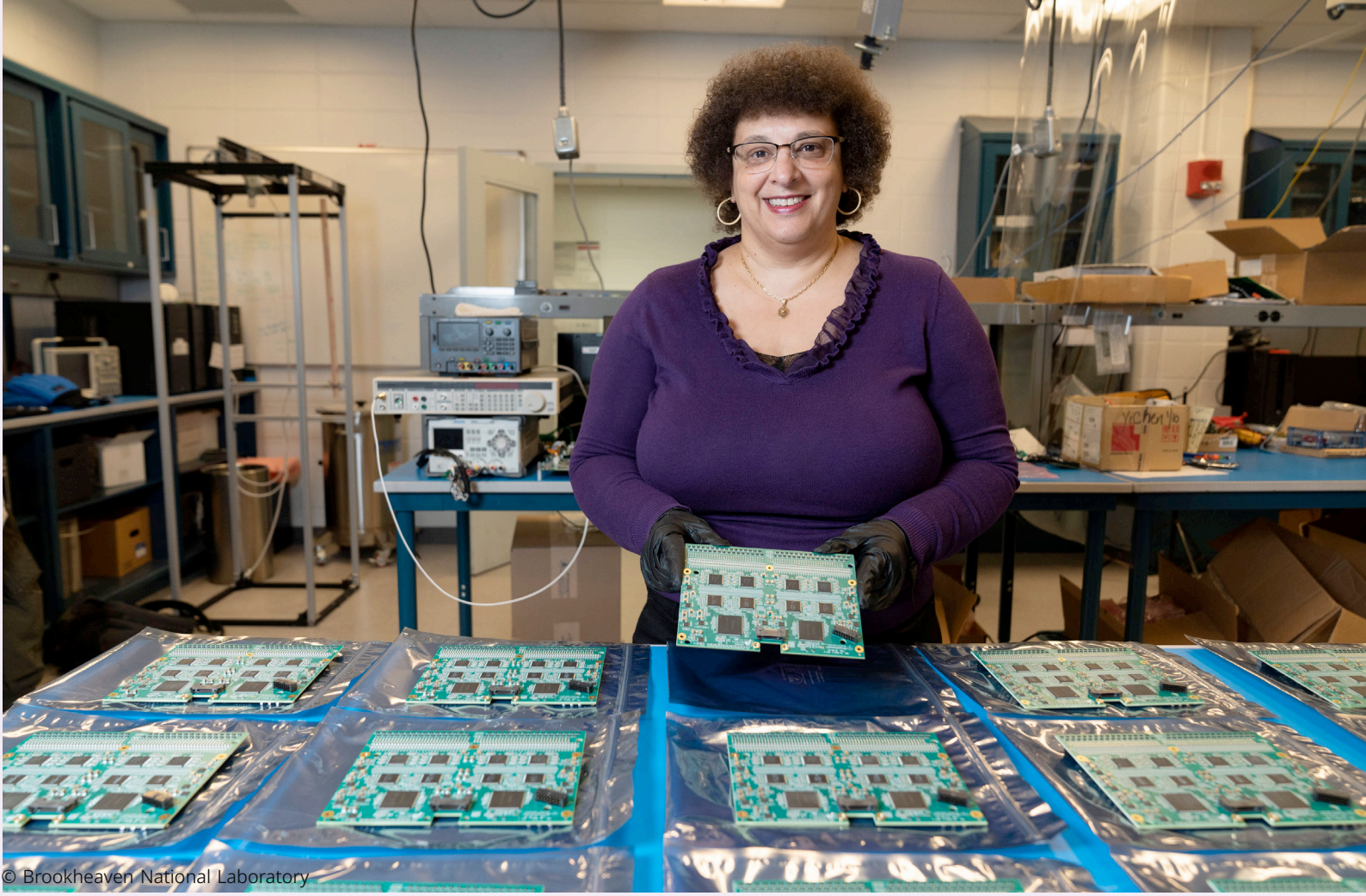


المراحل المُستَحْتة بالضغط لشبكة بلورية أحادية الميل لـ TiS_3 عند ضغط منخفض (أ) ومتوسط (ب) وعال (ج)، ومخطط الطور لـ TiS_3 وفق الضغط ودرجة الحرارة.

ضغطها، أن تُغيّر من خصائصها بشكل كبير، وتتحول إلى مواد قادرة على توصيل الكهرباء دون فقدان الطاقة

وقد توصل الباحثون إلى هذا الاكتشاف خلال بحثهم المضني عن مواد جديدة ذات موصلية فائقة، وهو موضوع مهمّ ظل يطارد المجتمع العلمي لفترة طويلة

يقول محمود عبد الحافظ، الأستاذ في جامعة أوبسالا في السويد والعضو المشارك في قسم الفيزياء التطبيقية وعلم الفلك بجامعة الشارقة: "تُرَكِّز أبحاثنا على مادة واحدة واحدة، ألا وهي شرائط TiS_3 النانوية، وهي هياكل صغيرة تشبه الشريط مصنوعة من التيتانيوم والكبريت. تكون في حالتها الطبيعية عازلة لا توصل الكهرباء بشكل جيد، ومع ذلك، اكتشفنا أنه من خلال الضغط على هذه الأشرطة النانوية، يمكننا تغيير خصائصها الكهربائية بشكل كبير، فنتنقل من عوازل إلى معادن وأنصاف نواقل وأخيراً موصلات فائقة. لقد قدّمنا دليلاً دامغاً على أن الموصلية الفائقة عند درجات حرارة منخفضة



© Brookhaven National Laboratory

مقابلة مع الأستاذة ماري بيشاي، المتحدّث الرسمي لتجربة DUNE المهمّة عن خواصّ النيوترينو

في داكوتا الجنوبيّة بهدف إجراء أبحاثٍ حول دور النيوترينو في عمل الكون، كما أنها حازت بصفحتها عضوةً في تجربة Daya Bay في الصين -التي بيّنت عدم انعدام الزاوية الصغرى لتمازج النُّتريونات- وبالمشاركة مع أعضاء فريق التعاون الدولي جائزة الكشف-الاختراق Breakthrough المرموقة في العلوم الأساسيّة. أجرى اللقاء يوم 13 مايو- أيار 2024 كلٌّ من عادل عوض ودانا عبد الغني من فريق التحرير. يمكن مشاهدة المقابلة كاملةً على [الرابط](#).

من الأبواب الثابتة في مجلّة مسارات إجراء مقابلة مع إحدى الشخصيّات العلميّة المهمّة في العالم العربي أو في العالم. يُشرفنا في العدد الثاني من مجلّتنا أن نستضيف الأستاذة ماري بيشاي Mary BISHAI المتحدث الرسمي لتجربة الـ Deep (Underground Neutrino Experiment (DUNE التي تضمّ أكثر من 1400 عالم وسوف تُرسل أكثر حزم النُّترينو شدّةً في العالم لتقطع مسافةً تنوب على 1300 كم من مخبر فيرمي بالقرب من شيكاغو إلى مركز أبحاث سانفورد تحت الأرضي

إلى جامعة كولورادو، حيث حُزْتُ البكالوريوس في الفيزياء، ووقتًا كان مُشرفي العلمي/المهنيّ يعمل في مختبر فيرمي، وشاركته اهتمامه بفيزياء الجسيمات. ثم انتقلت إلى جامعة بيرديو Purdue لدراسة الدكتوراة في مجال فيزياء الجسيمات التجريبية حيث عملتُ ضمن تجربة CLEO في مختبر جامعة كورنيل، حيث كان هناك مُصَادِم للإلكترون ومُضادّه، وكنتُ في جزءٍ من أطروحتي أدرس خواص الكوارك الفُتّان (الساحر charm).

في مرحلة بعد الدكتوراة، انتقلت إلى مختبر فيرمي للعمل على الكاشف CDF لمُصَادِم التيفاترون -أعلى مُصَادِم جسيماتٍ طاقةً في العالم حينئذ- الذي كان قيد العمل، وقد أُجريت على الكاشف تحديثٌ كبير ثانٍ CDF2، وكنتُ واحدةً مَقَّن أوصى باستخدام السيليكون فيه. عملتُ في أبحاثي على العتاديات hardware، كما قمت بقياس مُعدّل إنتاج الجسيمات في ورقةٍ غدتُ واحدة من أكثر أوراق الـ CDF2 استشهادهًا.

ثم التحقْتُ بمختبر بروكهافن، حيث انتقلت في عملي من مصَادِمات الهادرونات إلى النيوتريونات. شاركتُ في تجربة دايايبي (DayaBay) وتجربة أمينوس (AMINOS)، وهاتان تجربتا نيوترينو مختلفتان، أُجرت أولاهما في الصين. تركّزت معظم مساهماتي في إجراء تجارب النيوترينو في أعماق الأرض، ولكنني شاركتُ في فريق عمل دايايبي (DayaBay) في السنوات الأولى وجميع التجارب الصينية التي كانت تدرس خواص البوزيترونات والنيوتريونات الصادرة من المُفاعلات القريبة.

بعد ذلك، كرّست عملي طوال السنوات العشرين الماضية في مختبر بروكهافن لإنجاز

عادل: مساء الخير، بروفيسورة بيشاي. نتشرف باستضافتك في هذا العدد الثاني من مجلتنا "مسارات في الفيزياء" الصادرة عن الجمعية العربية للفيزياء لديك مسيرة علمية متميزة للغاية، فأنتِ عملتِ وتعملين في بعض أهمّ مختبرات فيزياء الجسيمات في العالم: أولاً، في مختبر فيرمي-لاب، مع تجربة التيفاترون، ثم مختبر بروكهافن الوطني، حيث أنت الآن مسؤولة عن فريق عمل تجربة "دون" (DUNE) والبالغ 1400 عضو. بالإضافة إلى ذلك، شاركتِ في العديد من تجارب النيوترينو المهمة وفي جميع أنحاء العالم، مثل تجربة دايايبي (DayaBay) التي حصلتِ بالاشتراك مع فريق عملها على جائزة Breakthrough في العلوم الأساسية في عام 2016. كما أنك أيضاً زميلة في الجمعية الأمريكية للفيزياء منذ عام 2014.

دعيني أقدم مجلتنا بإيجاز، إنها تهدف إلى شرح البحوث المتقدمة في العلوم الفيزيائية للجمهور العربي، وتصدر عن الجمعية العربية للفيزياء الملتزمة بنشر المعرفة العلمية وتعزيز الفهم العام للفيزياء في العالم العربي

أنا عادل عوض، ومعني دانا عبد الغني، من فريق التحرير في المجلة، نحن سعيدان جداً بلقاءك دعيني أبدأ بالسؤال التالي: هل يمكنك أن تعطينا نظرة عامة موجزة عن مسيرتك الشخصية في فيزياء الجسيمات التجريبية منذ دراستك الجامعية ولغاية تولّي مسؤولية منصب المتحدث الرسمي لتجربة DUNE؟

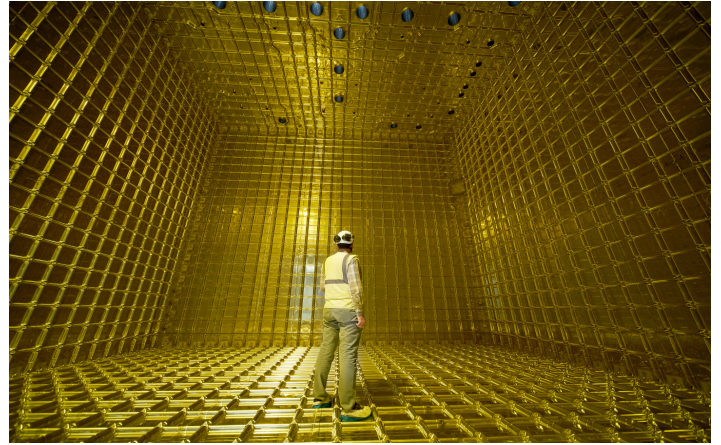
ماري: بدأت مسيرتي الجامعية في الجامعة الأمريكية في القاهرة ثم انتقلت في السنة الثالثة



التيافاترون في مختبر فيرمي. [ويكيبيديا](#)

من أعمامي -وحتى والدي- كان حائراً على شهادة الدكتوراه، فإنني أعتبر هذا الحدث بداية الرحلة التي انتهت بي إلى أن أكون باحثاً في مرحلة ما بعد الدكتوراه في التيفاترون. وأنا لا زلت أحتفظ بذلك العدد من مجلة ناشونال جيوغرافيك، وأشكر عقبي لأنني بفضلها تعرّفتُ إلى هذا المجال من البحوث **داننا:** كوني خريجة فيزياء أبحث عن مواصلة دراستي، فإنني أتساءل دوماً كيف يختار الناس مجال اهتمامهم بسرعة بعد التخرّج. لماذا اخترت فيزياء الجسيمات؟ ما الذي لفت انتباهك في هذا المجال؟ **ماري:** ساعدني والدي بتأمين بيئة مُشجّعة للعلم والقراءة في المنزل. بعد انتقالي إلى الولايات المتحدة كطالب جامعي، تحدّثت مع أساتذتي فتقدّمتُ بطلب للحصول على درجة الدكتوراه في المعهد المعني اعتماداً على قراءاتي وفهمي للاختلافات بين العلوم الأساسية والتطبيقية. أعتقد أن الشباب اليوم يحصلون على المعلومات من الإنترنت ويشاهدون مقاطع فيديو YouTube و TikTok. في أيامي، كنتُ محظوظةً بأن لدي والدين اشتريا لي مجلات وكتباً علمية لكي أتمكّن من تعليم نفسي لأنه لم تكن لدينا إمكانية الوصول إلى الإنترنت. وبالطبع، كانت هناك برامج علمية -مركّزة

تجربة النيوترينو ذات الخطّ القاعدي الطويل (Long Baseline Neutrino Experiment LBNE) في الولايات المتّحدة، حيث عاصرت نموّ مشروع التجربة منذ بدئه كفكرةٍ اقترحها زميلي ميلان ديوان وآخرون لغاية اليوم باسمه الجديد تجربة النيوترينو عميقاً تحت الأرض ((Deep Underground Neutrino)



كاشف في تجربة الـ DUNE. [CERN](#)

Experiment DUNE). تمثّل هذه التجربة مشروع تعاونٍ دوليٍّ كبير يجمع جهود العلماء التجريبيين في الولايات المتحدة وأوروبا وجنوب إفريقيا ويهدف إلى تحقيق إرسال حزمة نيوترينو من مختبر فيرمي والكشف عنها بكواشف موجودة على بعد 1300 كيلومتر في منجم عميق في ولاية داكوتا الجنوبية. أستطيع القول إن رحلتي في فيزياء الجسيمات بدأت في عمر الخامسة عشر عندما قدّم لي عقبي الدكتور حلمي بيّشاي -وهو عالمٌ أحياء مشهور في مصر متخصّص في أسماك المياه العذبة ولديه العديد من الدراسات الرائدة في هذا المجال- عددًا لمجلة ناشونال جيوغرافيك National Geographic كان لديه حينها، فقرأت فيه مقالاً عن فيزياء الجسيمات يتحدّث عن التيفاترون، وعن مخبر السيرن، وقررت أن هذا ما أريد أن أفعله. وحيث أن العديد

يكون محمياً من الأشعة الكونية- في ما كان منجماً للذهب في ولاية جنوب داكوتا. هذه كانت التجربة الشهيرة التي قام بها راي ديفيس من مختبر بروكهافن الوطني، درس فيها نيوتريونات من الشمس وقام بإحصاء عددها المنتج هناك. لقد كان هناك اختلاف بين ما تم إنتاجه وما تم كشفه، وهذا الفرق نجم لأننا كنا نبحث عن تفاعل كيميائي ينظر بشكل مُحدّد إلى تفاعل نيوتريونات الإلكترون.

استنتجت التجارب اللاحقة في اليابان أن النيوتريونات فعلاً تتغير من هوية (نكهة flavor) إلى أخرى. وقد اقترن هذا الأمر مع وجود أنواع عدّة للنيوتريونات. مثلاً، اكتشفت تجربة في مختبر بروكهافن وجود نيوترينو يرتبط بالتفاعلات المنتجة لميون فأطلق عليه اسم نيوترينو الميون، ثم كانت هناك تجارب في مختبر فيرمي اكتشفت أيضاً النيوترينو الثالث المرتبط بلبتون التاو الأثقل من بين اللبتونات الثلاثة: الإلكترونات والميونات والتاوات. نعلم الآن أن النيوتريونات تنتقل من نوع إلى آخر، ولكل نيوترينو هوية، فإما أن تكون إلكترونية أو ميونية، أو ناونية. يعني ذلك أنه عند حدوث التفاعل مع النترينو فإن الناتج دوماً هو إلكترون أو ميون أو تاو وفقاً لكون نترينو التفاعل جسيم نترينو إلكترون أو نترينو ميون أو نترينو تاو على الترتيب، وبشكل مُشابه إذا صدر لدينا مضاد إلكترون فهذا يعني أن التفاعل قد جرى مع مُضاد نترينو إلكترون، وهكذا.

نعلم الآن أن كل هوية-نكهة في الواقع هي تراكب من ثلاث حالات كمومية كلٌ منها يتميّز بقيمة محدّدة للكتلة، والتمازجات المتباينة لهذه الحالات الكتلية تتوافق مع النكهات المتنوّعة للنترينو. عندما تتحرك هذه الكتل المُكوّنة لتراكب النيترينو

أساساً على الطّب- تُعرَض على التلفزيون المصري، شاهدتها على قنّتها

عادل: هل يمكنك إعطاء قرّائنا في العالم العربي نظرة عامة على التجارب النيوتريونية التي تشاركين فيها حالياً وما هي أهدافها؟ هل يمكنك أن تشرحي للمهتقين بالعلوم كيفية استخراج إشارات الفيزياء الجديدة من تجارب النيوترينو؟ وكيف يمكننا استخدامها للتمييز بين نماذج النيوترينو المختلفة؟ **ماري:** نعلم أنه إذا وضعت يدك خارجاً، ستضربها 10 مليارات نيوترينو قادمة من الشمس. إذن، النيوتريونات متوافرة بكثرة، وهي جسيمات معتدلة كهربائياً وخفيفة جداً يتم إنتاجها في عمليات الانشطار والاندماج النوويين. هذه قصة النيوتريونات التي لعبت دوراً رئيسياً في حصول مختبر بروكهافن على جائزتي نوبل (1988 و2002)، وتُجرى حالياً تجربتان (ICARUS, SBND) بالتعاون بين مخبري فيرمي وبروكهافن.

بدأ العمل بناءً على فكرة استخدام النيوتريونات لفهم الشمس، لأنها جسيمات تتأثر وتتفاعل بضعف شديد. يمكنك دراسة النيوتريونات من الشمس وتحديد توزيع طيف طاقتها لمعرفة نوع الوقود الذي يحترق داخل الشمس. إذا نظرت فقط إلى ضوء الشمس أو المجرات أو الظواهر الفلكية الأخرى مثل نجم ينفجر كمستعرٍ فائق (سوبرنوفا)، فستشاهد ما يحدث على السطح فقط. أمّا إذا أردت رؤية العمليات التي تحدث داخل الشمس أثناء احتراقها أو انفجارها، فالنيوتريونات أداة سبرنا هنا -لضعف تفاعلاتها أثناء تسلّقها للسطح- وهذا سبب اهتمامنا بها.

من خلال هذه الدراسة، تم وضع كاشف كبير على بعد مسافة كبيرة (1.5 كم) تحت الأرض -بحيث

في أعماق الأرض هو البحث عن الاختلاف بين اهتزازات وتأرجحات نكهات النيوتريـنو وموافقاتها للنيوتريـنو المضاد، وأيضاً استخدام هذا الاختلاف للبحث عن شيء آخر.

بالطبع، سوف نخبرنا هذه التداخلات ما إذا كانت الحالة الكتلية الثالثة أثقل أم أخف من الحالة الأولى. علاوةً على ذلك، قد نستطيع تحديد ماهيةً مكوّنات الحالة الكتلية الأولى أو الثانية أو الثالثة. أعني هنا أننا نعلم أن الجسيمات تأتي ضمن عائلات أو أجيال generations، فالإلكترونات من العائلة الأولى في النموذج القياسي لفيزياء الجسيمات، أمّا الميونات والتاوات فتنتهي للعائلة الثانية والثالثة، وبالتالي، نعلم أن ما نسميه الحالة الكتلية الأولى للنيوتريـنو تحتوي في الغالب على نترينو إلكترون، لذا إذا اتبعنا النموذج كما في القطاع الكواركي، سنجد أن العائلة الدنيا وبالتالي الكتلة الأولى هي الأخف وزناً، تليها الكتلة الثانية فالثالثة. هذا ما نسميه الترتيب الطبيعي normal ordering للنيوتريـنو، وتوافق كون الحالة الكتلية الثالثة، المحتوية على أجزاء متساوية تقريباً من نيوتريـنو التاو ونيوتريـنو الميون المنتمين للعائلتين الثانية والثالثة، هي الأثقل، وبالتالي تتبع ترتيب الكتل الطبيعي مثل الكواركات.

إذا لم يكن الأمر كذلك، فسيكون الترتيب معكوساً (مقلوباً inverted). يُثير الترتيب المعكوس الاهتمام، لأن كل شيء يتعلق بالنيوتريـنو مختلف جداً عن القطاع الكواركي، وحقيقةً امتلاكه كتلةً بالفعل تُعتبر فيزياء خارج النموذج القياسي، كما أن حقيقةً كون اختلاطات حالات نكهاته تكاد تكون قصوى هي شيء شديد الاختلاف عن الكواركات، حيث الاختلاط صغير ولكنه موجود. لذا التناظرات الحاكمة

الكمومي فإنها تتحرك بسرعات مختلفة، وبالتالي تتغير التركيبة الكتلية للنيوتريـنو، أي يمكن لنكهة النيوتريـنو أن تتغير من واحدة إلى أخرى. هذا التداخل الكمومي ظاهرة فريدة ومميّزة جداً للنيوتريـنو بسبب كتلته المنخفضة كثيراً، حيث يمكن ملاحظة هذا التداخل على مسافات طويلة جداً، بالرغم من أن قيم الكتل صغيرة جداً.

نتحدث هنا عن الفرق بين أخف كتلة وأثقل كتلة. نحن لا نعرف الكتلة المطلقة للنيوتريـنو، ولكن نعلم أنها أقل من نصف إلكترون فولت. يبيّن لنا الفرق بين كتلتين الحاليتين الثالثة والثانية وجود قيمة كتلية على الأقل 0.05 إلكترون فولت وقد تصل إلى 0.5 إلكترون فولت. نحن نعرف الفروق بين قيم كتل الحالات الكتلية، ولكننا لا نعرف الكتلة المطلقة للحالة الأخف وزناً، وهذا هو أحد الأمور التي نحاول تحقيقها.

حالياً، نركّز في دراساتنا على كيفية امتزاج النيوتريـنويات ومضاداتها فيما بينها لمعرفة ما إذا كانت هناك أدلة على تفاوتات وتخالفات كبيرة بين المادة ومضادها. نعلم من قطاع الكواركات وامتزاجها الأصغر بكثير من ذلك الذي للنتريـنو، أن هناك فرقاً بين تجلّي المادة والمادة المضادة، ولكن الفرق صغير جداً لا يكفي لتفسير سبب امتلاء الكون بالمادة. لذا، نحن نبحث فيما إذا كان للنيوتريـنو تفاوتات أكبر في طريقة امتزاج النيوتريـنويات ومضاداتها، فإذا كان هناك تخالف كبير، أمكن لذلك أن يعطينا إشارة عن نوع الفيزياء التي تؤدي إلى سيادة المادة على مضادها في الكون.

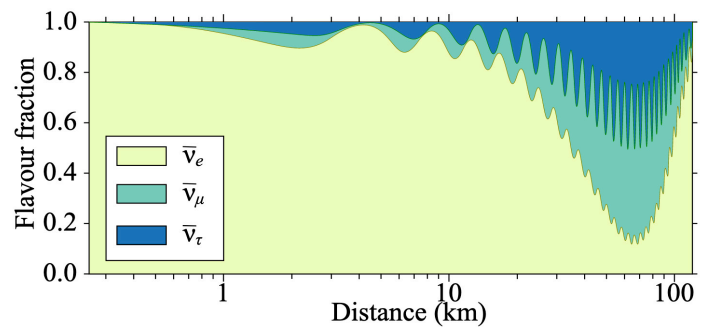
ولكن في الوقت الحالي، الحافز الأكبر وراء تجارب النيوتريـنو الضخمة بما فيها تجربة النيوتريـنو

يستجيب بها الناس للقادة من النساء والرجال، وحتى كيفة الوصول إلى تلك المناصب، إذ يبدو أن على القادة النساء إثبات أنفسهن بشكل أكبر، كما أنهن يعلن إلى تبرير آرائهن بشكل أكبر من زملائهن الرجال. يمكن اعتبار هذه الأمور عقبات، ولكن من ناحية أخرى، أعتقد أنها تجعلك عالمة وقائدة أفضل إذا كنت حذرة فيما تقولينه، وإذا كنت أكثر إقناعاً. لذا يجب علينا ألا نأخذ ببساطة ما يقوله البعض عن الإدارة لأننا على دراية بطريقة تفكيرهم أو لأنهم ذكور أو إناث، بل يجب دوماً تفحص ذلك، وكمديرة فريق عليك الإصغاء لآراء الآخرين ثم تبرير القرارات التي تتخذينها. لذلك، نعم أعتقد أن هذا النوع من التحدي يجعلنا علماء أفضل. ولكن من ناحية أخرى، من الأسهل أحياناً تبوء منصب المدير لو كنت رجلاً وذلك بسبب التحيز الضمني لدى الجميع -بما في ذلك النساء أيضاً- تجاه كيفة تصرف المدراء وكيفة إثبات قيادتهم وسلطتهم

عادل: في هذا الصدد، هل أثرت نشأتك في إفريقيا، أولاً في في نيجيريا ثم في مصر، على اهتمامك بالعلوم؟ بمعنى آخر، هل كان لديك تعرض كافٍ للعلوم كمراة في هذين البلدين؟ وما هي النصائح التي يمكنك تقديمها للأهل من أجل إبقاء أبنائهم مهتمين بالعلوم؟

ماري: دعني أقل إن جيلي -جيل إكس X كما يسمونه- كان مختلفاً إلى حد ما، من حيث أن فرص الاطلاع على العلوم كانت أقل بكثير. ولكنني ذهبت إلى المدرسة الابتدائية في نيجيريا، ما أعطاني خلفية رياضية ممتازة، فقد وفرت لي مدرستي تدريباً رياضياً جيداً، كما كان معلّمو الرياضيات رائعين عندما جئت إلى مصر، على الرغم من أن المناهج الدراسية

في قطاع النيوتريينو مختلفة جداً عنها في قطاع الكوارك لذلك نريد أن نعرف ما إذا كانت الاختلافات فعلاً قصوى عند النيوتريينو، وما إذا كان ترتيب الكتل طبيعياً كما في الكواركات، أم أنه مختلف. هذه هي الأسئلة التي نحاول الإجابة عليها من خلال دراسة تذبذبات النيوتريينو في تجارب مثل تجربة النيوتريينو عميقاً تحت الأرض، وتجارب معاملة في اليابان حيث تصدر النترينوات عن مسرعات. أمّا في تجربة داياياي Daya Bay الصينية، فيدرس الاختلاط على مسافات أقصر من كيلومتر لنترينوات صادرة عن مفاعلات نووية: في حالة واحدة تُدرس تذبذبات النيوتريينوات (ومضاداتها) الميونية، وفي حالة ثانية ندرس تذبذب



تذبذب واهتزاز النيوتريينوات. [ويكيبيديا](#)

نيوتريينوات الإلكترون المضادة الصادرة عن المفاعلات **دانا:** هل واجهت أي عقبات في مسيرتك المهنية كامرأة في مجال العلوم؟ وإذا كان الأمر كذلك، فكيف تعاملت معها؟

ماري: بشكل عام، لا تشعرين بالكثير من العقبات عندما تكونين أقل خبرة. أعتقد أنه ليست هناك عقبات كثيرة، ولكن هناك اختلافات في الطريقة التي تصبحين فيها أكثر خبرة، وتبدئين في تبوء مناصب قيادية. هناك اختلافات في الطريقة التي

المصادر التي سيجدون فيها شروحاتٍ عنها عندما كنتُ في جنوب إفريقيا، وجدتُ أنه كان لديهم متحفٌ علومٍ رائع، يُحضرون إليه الطلاب، ويوفّرون فيه برامج محاضرات عامة. يمكن إذن جعلُ المدارس -سواء أكانت خاصة أم حكوميّة تخدم بيئاتٍ فقيرة- تنخرط في مثل هذه النشاطات التي يمكن أن تؤمّن المراجعَ ومحاضراتٍ عاقبةً يُلقيها ضليعون بالعلم، ممّا يمكن أن يجذب انتباه الطلاب، ما يجعلهم يبحثون لاحقاً على هواتفهم عن المزيد. ولكن يجب أولاً تأمين هذا الطريق الابتدائي، أي المكان الذي يوفّر فرص إعطاء الأفكار العلميّة بطريقة ممتعة وهذا هو الجميل في متاحف العلوم أو إعطاء المحاضرات في المختبرات. صحيحُ أن هذه الأماكن قد لا تتسع للجميع، ولكن يمكن للطفل التلميذ قضاء بعض الوقت في مراكز كهذه تمّ إنشاؤها بطريقة تجذب اهتمامه، كما يمكن أن يُعتبر ذلك جزءاً من النشاط في المنهاج الدراسي. أعني، كما قلتُ، أحياناً ليس لدى المدارس القدرة على الحصول على المزيد من الأموال، ولكن من خلال المشاركة بمثل هذه النشاطات يمكنها جذب الطلاب إلى العلم وتشجيعهم على الانخراط في فعاليّاته بشكل أفضل.

دانا: ما هي النصيحة التي تقدميها للفيزيائيين الشباب الذين يطمحون إلى بناء حياة مهنية في العلوم، وخاصةً النساء؟ كيف يمكن للبلدان النامية، وخاصةً العربيّة، أن توفر للنساء المزيد من الدعم والفرص للمشاركة بشكل أكبر في مجالات العلوم والتكنولوجيا والهندسة والرياضيات؟

ماري: أعتقد أنه فيما يخص مجالات مثل الطب والهندسة فإننا لا تحتاج لفعل الكثير من أجل

وفقاً للطريقة التي كانت تُدرّس بها في ذلك الوقت- كانت ثابتة غير ديناميكيّة. هذه هي الحقيقة، أليس كذلك؟ عندما كنتُ في المدرسة، شكّلت طريقةُ تدريس الفيزياء والرياضيات في المناهج الحكوميّة مشكلةً كبيرة، فقد كنّا نلقن طريقة الحل دون وجود فرصة لفهم المفاهيم أو مناقشتها بشكل جيّد. ومع قولي هذا، كان معلّمو الرياضيات والفيزياء رائعين، بعضهم كان يشرح من خارج المنهاج ليثير الاهتمام فينا.

لكن الأهمّ من ذلك كان دعم والديّ لي. أعتقد أن معظم الأهالي اليوم يقفون وراء أطفالهم. نعم، لأن الجميع أكثر وعياً بما يحدث، وذلك بسبب إمكانية الوصول إلى الإنترنت، فهناك الكثير من الفرص لتعلّم المزيد

على سبيل المثال، أنا مُحاضرةٌ في المدرسة الإفريقية للفيزياء، التي بدأها أحد زملائي كتعاونٍ مشترك بين الولايات المتحدة وأوروبا وتُعدّ كل عامين منذ عام 2000. نقوم هناك بإعداد محاضرات في الفيزياء الأساسية، ونختار الطلاب من خلفيات أقلّ تميّزاً وحظوظاً. لقد جنّت من خلفية ميسورة الحال، إذ ذهبت إلى مدارس خاصة، وكان والديّ ثريين نسبياً، وقّرا لي الموارد التي لم أكن أستطيع الحصول عليها لوحدتي. لكن ما نراه اليوم هو أنه بسبب انتشار الإنترنت، يطلع الأطفال -حتى بطريقة بسيطة من خلال المدارس أو نوادي العلوم- على الكثير، فيمكنهم البحث عمّا يثير اهتمامهم واستكشاف الإنترنت من أجل التعلّم، بل وحتى -كما تعلم- يمكنهم أخذ دورات تعليميّة إذا لزم الأمر. لقد أضى أمر التعليم أسهل من قبل، ولكن أعتقد أننا يجب أن نبدأ بتقديم المفاهيم وإطلاع أطفالنا على

من أجل التدريب على التقنيات المتقدمة للتعليم بواسطة الآلة. أعني أنه عبر التطبيق فإنك لا تتعلمين علم الحاسوب بل كيفية تطبيقه على مسألة أمامك بطريقة إبداعية لم يستخدمها أحد من قبل.

لذلك، يكمن جزء من الإجابة على سؤالك في إقناع الناس بأن هذه المهارات مفيدة. وعندما تُشرك الشباب، فافعل ذلك بالمساواة. لا يهم ما إذا كنت ذكراً أم أنثى أو ما هي خلفيتك، فأياً كانت بينتُك -سواءً أأنت من مدرسة فقيرة أم غنية، أو من أي شيء آخر- الموهبة هي فرصة عالمية وكنز شمولي. في الواقع، ستجدين أن الأشخاص الأقل امتيازاً هم الأكثر موهبةً أحياناً لأنهم أكثر طموحاً ولديهم حافز أكبر لتحقيق الذات بمواجهة الظروف الصعبة. لذلك، علينا إيجاد طريقة لتحديد المواهب وفعل ذلك بطريقة حيادية لا تتعلّق بماهيتك، لا تفرق ما إذا كنت ذكراً أم أنثى

عادل: بالعودة إلى فيزياء النيوتريانو، ماذا كانت أفضل تجربة بحثية شعرت فيها بالفضول والحماس الأكبر؟ ما هي تجارب النيوتريانو المستقبلية في العقد القادم؟ وما هي أهدافها؟ هل تمكّننا من تحديد طبيعة النيوتريانو: أهى ديراك أم ماجورانا؟ وتراتبية كتله: أهى طبيعية أم معكوسة؟

ماري: حسناً، أعتقد أن رحلة مهنتي منحنتني رضى وإحباطاً بقدرين متساويين. لقد كنتُ محظوظةً للغاية بانضمامي إلى مختبر بروكهافن في الوقت الذي بدأت فيه فكرة ما غداً بعدها تجربة DUNE تتطور. لقد مثل الأمر تحدياً لأنه استغرق 20 عامًا، فهو مشروع ضخم جدّاً، تصل كلفته إلى مليارات الدولارات، ويشمل العديد من البلدان، وبالتالي فهو تحدٍ كبير جدّاً. أولاً، أحببتُ جدّاً عملي عندما

تشجيع الطلاب على دراستها، فأغلبيتهم تضع هذه المجالات في مقدمة طموحاتها، ولكن لا بد من النضال لجعلهم يقدرّون ويدرسون العلوم الأساسية، بسبب غياب الفهم لما يعنيه التدرّب والتمرّن في العلوم الأساسية. تميل أسواق العمل لدينا في الشرق الأوسط وإفريقيا إلى أن تكون مُحدّدة للغاية، فربّ العمل يقوم بتوظيف هذا الشخص الذي يجب أن يعرف ذلك الأمر تمامًا. في الولايات المتحدة، لا تهتمّ سوق العمل تمامًا بما تعرفه، بل بمدى إبداعك وقدرتك على التعلّم، لذلك، فهي أكثر اهتماماً بإجرائية تفكيرك. يعني هذا الأمر أنه من أجل تحقيق التقدّم في ثقافتنا علينا إدراك أنّ تعلّقنا للعلوم الأساسية يزوّدنا بطريقة تفكير ومقاربة معيّنين، وأن هذا الأمر أكثر مرونةً بدرجات من أن تكون مُدرّباً للقيام بعمل مُحدّد في مجال معين.

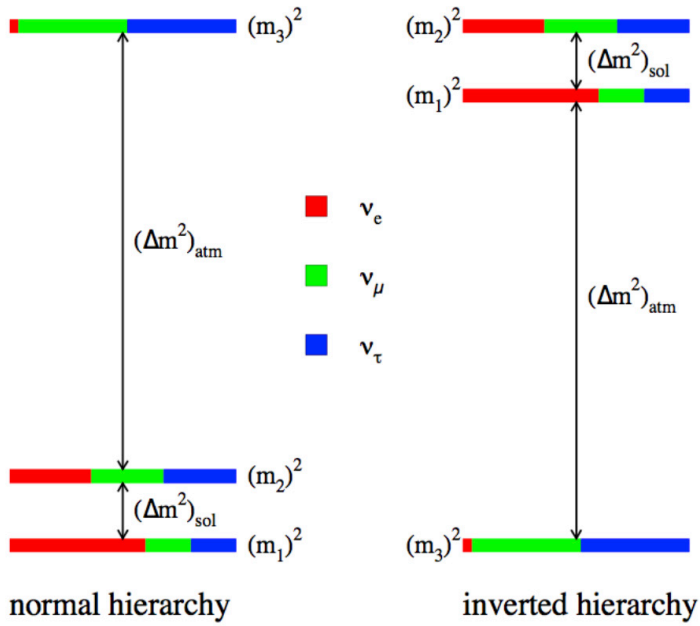
كما تعلمين، فإن الهندسة أيضاً تتطلّب أيضاً في جزء منها الإبداع لتكون قادرةً على التقدّم وتطبيق مفاهيم العلوم الأساسية هذه. لذلك، أعتقد أن تحقيق التقدّم يتطلّب إدراك قيمة تعليم العلوم الأساسية، وأن الكثير منها -وهذا ينطبق بشكل خاص على فيزياء الجسيمات- يمثّل مجالاً واسعاً رجباً قد لا يكون مُحدّداً تمامًا مثل علوم الهندسة. أنا مثلاً فيزيائية تجريبية، وأحتاج لتطوير مهارات تجريبية. عليّ أن أعرف القليل عن الإلكترونيات، وعن تصميم الكواشف، كما يجب أن أعرف الكثير عن تحليل المعطيات، وهذا مجال اهتمام كبير في مجتمعاتنا، إذ نحتاج لأشخاص قادرين على الإبداع فيما يُسقى المعطيات الضخمة، أي في كيفية فهم المعطيات وتحليلها، فهذا مجال عمل جيّد للغاية

من العائلة الثانية، والأمر نفسه بالنسبة للبتونات المشحونة فالإلكترون من العائلة الأولى أخف من الميون من العائلة الثانية الذي هو أخف بدوره من التاو من العائلة الثالثة، ولكن هذا الترتيب قد لا يكون هو المتَّبَع عند النيوتريونات، فهل حالة النيوترينو الكتليّة (بكتلة m_1) المحتوية على القسم الأكبر من نيوترينو الإلكترون هي الأَخَفّ؟

إذن، ترتيب الكتلة مسألة مهمّة، وهناك طريقتان لمعالجتها. أولاً، يمكننا النظر إلى طرق تذبذب نيوترينو الميون واستحالته نيوترينو إلكترونياً على مسافات طويلة، وهذه هي تجربة الـ DUNE التي ستتم بفضل المسافة الطويلة جدًّا وبالباغية التي 1300 كيلومتر، حيث يمكننا رؤية تغير نمط التداخل الناجم على الأرجح بسبب بعثرة نيوترينو الإلكترون عن الإلكترونات في الأرض، بشكلٍ مُشابهٍ لتبعثر الضوء بسبب تغَيّر قرينة الانكسار بين أوساط مختلفة، وبالتالي يمكن الحصول على تعزيزٍ لتذبذب نيوترينو الميون إلى نيوترينو إلكترون إذا كان ترتيب الكتلة طبيعيًّا، أي إذا كانت كتلة الحالة الثالثة هي الأثقل. تكمن الطريقة الأخرى لقياس هذه التراتبيّة الهرميّة في أن ننظر فعلاً إلى التفاصيل الدقيقة في نمط التذبذب والاهتزاز، فنمط الاهتزاز يبدو على شكل توزيع جيب مُرَّع \sin^2 ، ويكون الطور هنا دالّةً للطاقة. هذه هي مقارنة تجربة UNO في الصين، التي تستخدم النيوتريونات المولّدة في المفاعلات النووية، إذ يتمّ تفحص نيوتريونات تقطع مسافةً حوالي 60 كيلومتراً -صادرةً عن مفاعلات قوية- ثم يتمّ إحصاء نيوتريونات الإلكترون المضادة التي تبقى بعد قطع المسافة. توجد ذبذبة في هذا العدد طوّرها يتمّ تفحصه بطرق دقيقة جدًّا

كنتّ العالمة المسؤولة عن المشروع وقتها حين كان يُسمى بتجربة الـ LBNE والتي أضحت بعدها DUNE، فقد كنتّ مسؤولةً عن ربط أعضاء فريق التعاون العلمي بالمشروع الفعلي. هذا عملٌ ضخم بقيمة مليار دولار مع مهندسيه وفنيّيه ومديري مشاريعه، فكيف تترجم ما يحاول العلماء القيام به إلى ما نحاول بناءه؟ وما هي المتطلبات؟ وما هي المواصفات؟ ثم يُخبرك المهندسون أين يمكننا إجراء ذلك الأمر بهذه الطريقة، أو يخبرك المهندس المدني أين يمكننا القيام بذلك باستخدام كاشفٍ أصغر أو كيف أو جه الحفر، فعليك أن تربط بين العلماء والمشروع الفعلي. لقد أحببتُ ذلك جدًّا، وبقية العالمة المسؤولة عن المشروع حتى بداية الـ DUNE، حيث استخدمنا مفاهيم التجربة السابقة من أجل تطوير التصميم المفاهيمي للتجربة الجديدة. نعم، ما أثار حماسي حقًّا هو أنني كنتّ عامِلَ الارتباط الذي يردم الحفرة فيقرب وجهات النظر بين المهندسين ومدراء المشاريع من ناحية وبين العلماء الفعاليين والعلوم التي نريد القيام بها من ناحية أخرى، لنترجم ذلك بما كُنّا ننشئه أو بحاجة إلى بنائه.

أما عن الجزء الثاني من السؤال والمتعلّق بتجارب النيوترينو، فأقول ما يلي. في الوقت الحالي، هناك طريقتان رئيسيتان لمعالجة مسألة التراتبيّة الهرميّة (أو الترتيب) للكتلة، التي تنصّ كما ذكرت على معرفة النيوترينو الأثقل، فهل هو ذلك المحتوي على نكهة العائلة الثانية فيه ($m_3 > m_1$)؟ أم أن هذا هو الأَخَفّ ($m_3 < m_1$) وبشكلٍ غير متّسق تمامًا مع القطّاع الكواركي؟ في يخصّ الكواركات، فإن الكوارك العلوي والسفلي من العائلة الأولى هما الأَخَفّ، ثم يليهما الكوارك الغريب والفئان



مسألة تراتبية كتل النيوتريينو. [ويكيبيديا](#)

Double Beta Decay $0\nu\beta\beta$. توجد نوى خاصة يمكنها عندما تُجرى تحلل بيتا الإشعاعي مُصدرة إلكترون ونيوتريينو أن تعود وتمتص الأخير -من خلال تحلل بيتا المعاكس- إذا كان النيوتريينو مُطابقاً لمضاده، أي في حال كان النيوتريينو ومضاده الجسيم نفسه أمكن لفئة مُحددة من النوى أن ينبعث منها إلكترون عندما تتحلل مع نيوتريينو تقوم بامتصاصه بسبب كونه جسيماً مضاداً وينبعث إلكترون آخر عند هذا الامتصاص. هذه هي تحللات بيتا المُضاعفة دون إصدار نيوتريينو. سيكون للتجارب المستقبلية حساسية تسمح بتحديد وجود مثل هذه التحللات. كما تعلم، تحاول بعض التجارب تحديد كتلة النيوتريينو من خلال دراسة كيفية انبعاث الإلكترونات ذات الطاقات الأعلى في تحلل التريتيوم، فتُسقى تجارب نقطة النهاية endpoint، وهي تجارب فريدة وصعبة الإنجاز إلى حد كبير. فإذا كان ترتيب الكتل معكوساً -وهذا أمر سنعلمه من DUNE أو في نهاية المطاف من JUNO- فإن هناك إمكانية لأن تكون تجارب نقطة النهاية حساسة للغاية وقادرة على إصدار إفادة حاسمة

التجربتان مختلفتان كثيراً، ولذلك نرغب في أن ندر على قياس تسلسل الكتلة الهرمي بهاتين الطريقتين. وبالتالي، خلال السنوات الأولى لتشغيل الـ DUNE، التي ستبدأ حوالي عام 2031، ستكون لدينا قياسات باستخدام تذبذبات واهتزازات النيوتريونات الميونية إلى النيوتريونات الإلكترونية عبر مسافات طويلة جداً، من خلال النظر إلى تعزيز في هذا الاهتزاز ينجم عن تبعثر نيوتريونات الإلكترون في الأرض. أو -في الطريقة الأخرى- يمكننا النظر إلى الطور في تجربة JUNO، فإذا رأينا فرقاً عن السائد، استنتجنا أن هناك أمراً ما يحدث عندما ينتقل النيوتريينو عبر المادة، وسيكون هذا أمراً مثيراً جداً للاهتمام. لذا، ستكون قياسات الـ DUNE خلال السنتين الأوليين ذات مدلولية إحصائية كبيرة، بينما ستستغرق معطيات الـ JUNO وقتاً طويلاً لأن القياسات هنا دقيقة جداً تتطلب جهداً كبيراً قبل الوصول إلى تحديد طريقة القياس القاطعة. الشيء المثير للإعجاب هو الجمع بين هاتين الطريقتين في نهاية المطاف، ولكننا نعتقد أن إتمام القياسات الحاسمة سيتحقق خلال السنوات الأولى من العقد المقبل، وبعد ذلك ستبدأ بيانات الـ JUNO في بلوغ المستوى نفسه من الدقة، أي ما يتجاوز 3 سيغما، وعندها يمكن النظر في معطيات كلتا التجريبتين المهتمتين جداً.

أقاً بالنسبة للسؤال عن طبيعة النيوتريينو، ماجورانا مقابل ديراك، فهذا أمر مُعقد إلى حد ما. يتعلّق الأمر بتحديد فيما إذا كان النيوتريينو (وبالتحديد، حالته الكمومية ذات القيمة المُحددة للكتلة) مُطابقاً لمضاده.

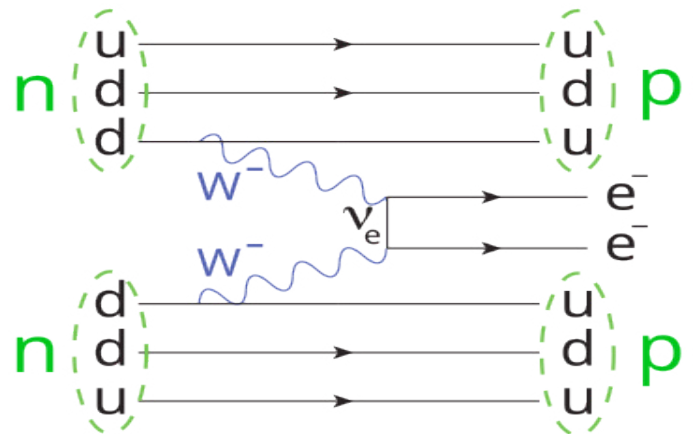
إذا كان ترتيب الكتلة مقلوباً، فهناك تحللات بيتا المضاعفة دون إصدار نترينو Neutrinoless

التجربة، ولكن من خلال مشاركتي فيها، رأيت كيف تطوّرت الصين -هذا البلد الضخم- بشكلٍ كبيرٍ وسريعٍ جدًا في العلوم الأساسية. وبالمثل نرى كيف تقدّمت بعض البلدان النامية مثل البرازيل والهند المُشاركة في تجربة DUNE في هذه العلوم.

أعتقد أن العالم العربي متأخر قليلًا في مجال العلوم الأساسية، ولكن المال وحده ليس الحل. أعتقد أن فيزياء الجسيمات تُشكّل حالةً فريدةً من حيث إمكانية الانضمام إلى أي من هذه التجارب الضخمة -سواء في CERN أو DUNE أو تجارب أخرى في الولايات المتحدة- بتكلفة متواضعة. نعم، أنت بحاجة إلى بعض المال تدفعه مقابل الانضمام، ولكن يمكنك الوصول إلى كل تلك الخبرة ومجمل تلك البيانات باستثمارٍ متواضع، صحيح؟ نفقةٌ قليلة ولكن لا يمكن أن تكون صفرًا، فغالبيتنا في معظم الدول العربية قد تقول: "نحن فقراء، أعطونا هذا" لا، لا تجري الأمور هكذا، بل على البلاد العربية أن تقبل بالقيام باستثمارٍ متواضعٍ نسبيًا، وفيزياء الجسيمات فريدة في هذا الصدد. إنها تقدم لك فرصةً الانضمام كمهندس وليس فقط كعالِم، فهناك الكثير من الهندسة وتصميم الأجهزة هناك، كما أن هناك فرصةً لمشاركة العلماء في كثير من العلوم الحاسوبية، ولكن كل ذلك يحتاج بعض الاستثمار ويتطلّب السماح بالسفر والقدرة عليه. يجب أن تكون قادرًا على دفع تمويل مشترك، من رتبة عدة آلاف دولار لكل طالب دكتوراة لضمان إمكانية الوصول إلى المعطيات كجزءٍ من فريق العمل. إذن، التمويل ليس المشكلة في مجال فيزياء الجسيمات، التي تتطلب بعض الإنفاق، ولكنها تقدّم فرصًا فريدة، لذا يجب أن نكون مستعدين لذلك

بشأن ما إذا كانت النيوتريونات ذات طبيعة ديراك أم ماجورانا، لأنها ستلاحظ عمليات تحلل $0\nu\beta\beta$ المُنتجة لأشعة بيتا -أي إلكترونات ذات العلامة الفارقة. إنه قياس دقيق جدًا، ولكن أهمية الترتيب المعكوس تنجم عن أن مثل هذه التجارب قادرة في حالته على الإقرار برصد تحلل $0\nu\beta\beta$ الموافق للعائلة الثالثة أم لا.

أولًا إذا كان الترتيب طبيعيًا، فإن عمليات تحلل $0\nu\beta\beta$ هذه يمكن أن تكون في أي مكان، وقد يتجاوز كشفها حساسية الجيل القادم من التجارب، وقد لا نعرف أبدًا -في حال كانت الكتلة صغيرة جدًا- من حيث أن هذه التجارب لن تقدر على استشعار تحلل



تحلل بيتا المُضاعف دون إصدار نيوتريينو. [ويكيبيديا](#)

$0\nu\beta\beta$.

دانا: في رأيك، ما الذي يحتاجه العالم العربي لتطوير العلوم؟ هل هو التمويل، التعليم أم رفع الوعي بأهمية العلوم؟

ماري: أعتقد أنه يحتاج إلى جميع هذه العوامل الثلاثة. بالرغم من تشرفني بحيازة جائزة الـ Breakthrough كعضوة في فريق عمل تجربة DayaBay، إلا أنني كنت مجرد شخصٍ واحدٍ من أصل 200، ولم أسهم شخصيًا بشكل كبير في تلك

السؤال بالفيزياء خارج التوسعة البسيطة للنموذج القياسي المتضمنة لكتل النيوتريونات **ماري:** إذن، تقع النيوتريونات فعلاً خارج النموذج القياسي لأننا لا نفهمها، لذلك حتى التوسعة البسيطة للنموذج القياسي لديها بعض التنبؤات التي يمكن اختبارها. هناك البعض - في تجارب من مثل DUNE وتجارب أخرى في CERN- يبحث عن أشياء من مثل ما ندعوه لبتونات حيادية ثقيلة يمكن أن تكون جزءاً من تلك النماذج المسماة "بنماذج الأرجوحة seesaw" والتي تمثل توسعةً للنموذج القياسي. لذلك، أعتقد أنه إذا عدنا إلى الأساسيات، فقط لشرح السبب وراء وقوع النيوتريونات خارج النموذج القياسي، فإننا نعلم- عد اكتشاف جسيم الهيغز بكتلة قريبة مما تنبأ به النموذج القياسي انطلاقاً من كتلة بوزونات W&Z - أن هناك آلية لتوليد كتلة الجسيمات، لكن النيوترينو أخف بمقدار مليوني مرة على الأقل من أخف جسيم -وهو الإلكترون-، ما يعني أنه لا يمكن الحصول على كتلته مباشرة من بوزون هيغز.

لذا، هناك نظريات تتوقع وجود نيوترينو من نوع جديد، لبتون حيادي ولكن ثقيل و"عقيم"، أي لا يتفاعل مع المادة العادية، بل يتصل بواسطة فيزياء جديدة لا نعرفها -تُسمى آلية الأرجوحة- بالنيوترينو الخفيف الذي نراه. لذا، هناك توقعات بإمكانية مشاهدة هذه اللبتونات الحيادة الثقيلة، وبعض باحثي الـ DUNE أو حتى تجارب الـ LHC يبحثون عن أدلة على ذلك. يمكن للنيوتريونات أيضاً أن تكون جزءاً من مشهد الجسيمات وفق التناظر الفائق Suzy، وإن كانت هذه الإمكانية شيئاً فشيئاً تُستبعد. السؤال الأكبر بالطبع هو انتهاك تناظر الـ CP

هناك عدة دول عربية وأفريقية مثل المغرب والجزائر ومصر وجنوب أفريقيا لها مشاركة كبيرة في المصادم الهادروني الكبير (LHC) في سيرن، ودول صغيرة مثل مدغشقر تشارك في مشروع DUNE. إذن هذه الدول مُشاركة، ولكنها لا تحصل دائماً على المبالغ المتواضعة -ولكن الغير معدومة- المطلوبة لإرسال المزيد من الطلاب.

لا يوجد الكثير من الفهم للطبيعة التعاونية في بحوث فيزياء الجسيمات، ومن الصعب جداً تبريرها لوكالة التمويل الخاصة بك، عندما تطلب منها -مثلاً- عدّة آلاف دولار لكي تشارك في تجربة معينة. لذا، يجب تغيير هذه المفاهيم، ويجب أن تتغير لأن هناك فرصة رائعة للانضمام إلى مثل مشاريع التجارب الضخمة هذه، وجزء مما يجب تغييره هو فهم احتياج إنجازاتها الهندسية وعلومها الحسابية ومجموعة المهارات المكتسبة من خلال الانضمام لها والمشاركة بها إلى استخدام المعرفة في العلوم الأساسية.

الانضمام وحده لا يكفي، بل يتطلب أيضاً مزيداً من المشاركة ومساهمة أكبر من جانب مجموعات بحثية، وهذا يستغرق كلاً وقتاً، ولكن البداية الأولى تكمن في إقناع الحكومة بأن هذه فرصة فريدة -يمكن تحمّل تكلفتها بشكل معقول- لأن نكون جزءاً من إنجاز هندسي وعلمي لا يُصدّق ولاكتساب مجموعة من المهارات القيمة جداً التي لن تستطيع الحصول عليها في أي مكان آخر **عادل:** لنعد مرة أخرى إلى فيزياء الجسيمات. هل ستساعدنا معرفة المزيد عن فيزياء النيوترينو في فهم المزيد عن الفيزياء خارج النموذج القياسي؟ إذا كانت الإجابة بنعم، فكيف يحدث ذلك؟ يتعلّق

يفني بعضها بعضًا -ولنقل في الشمس- ما يُنتج نيوتريونات يمكن كشفها في الكواشف الكبيرة، مثل كاشف المكعب الجليدي في القطب الجنوبي الذي يُعدّ واحدًا من أروع تجارب النيوتريونات التي يمكن أن تتخيلها، يبحث عن نيوتريونات ذات طاقة عالية جدًا وبما ينعكس على الفيزياء الفلكية. يمكنك أيضًا البحث عن بصماتٍ للمادة المظلمة التي تُنتج النيوتريونات. إذن، هذه أمثلة أخرى على مجالاتٍ نشطة جدًا حيث يمكنك استخدام تجارب النيوتريونات لاستقصاء الفيزياء خارج النموذج القياسي

دانا: حسنًا، بعيدًا عن الفيزياء. في وقت فراغك، هل لديك أيّ هوايات؟ قرأت أنك معجبة بالاستماع إلى الأوبرا والموسيقى الكلاسيكية. هل تعتقدين أن وجود وقتٍ للتسلية أمرٌ مفيد عندما يعمل الشخص بدوامٍ كامل غارقًا في العلم؟

ماري: لا يمكنك أن تكون فيزيائيًا جسيماتٍ ناجحًا دون أن تمتلك حياةً فكرية عميقة. أعتقد أنه من أجل عملنا وقيادتنا لمئات الأشخاص نحتاج إلى فهم الإنسانية، ولا يوجد شيء أفضل لذلك من الأدب والفنون.

علاوةً على ذلك، تحتاج كفيزيائيًا لامتلاك خيالٍ نشيط يسمح لك بترجمة لغة الطبيعة -ألا وهي الرياضيات- إلى مفاهيم يمكن للإنسان فهمها. لتحقيق التقدم وتجاوز ما هو موجود، نحتاج حياةً فكرية شاملة تتجاوز العلم، لأنه هكذا نستطيع تطوير مهارتنا، ولا أقصد هنا فقط مهارات التواصل وإنما مهارات التخيل، التي نحتاجها لترجمة لغة الطبيعة المعقدة، أي الرياضيات

ريتشارد فينمان الفيزيائي الشهير كان مشهورًا جدًا بأخذ هذه المفاهيم المعقدة جدًا: صيغ رياضية

(الشفعية-قرن الشحنة)، وهو ما يؤدي إلى تخالف المادة عن المادة المضادة. يمكن النظر للنيوتريونات -فيما يخص تذبذباته واهتزازاته- كمقياس تداخل. نقوم في الـ DUNE بإنتاج نيوتريونات ميونية تقطع مسافة 1300 كيلومتر معانيةً اهتزازًا ينقلها إلى نيوتريونات إلكترونية تتأثر مع الأرض. يخمن البعض بسبب انتقالها عبر 1300 كيلومتر بأن هذه النيوتريونات يمكن أن تتحسس لتفاعلاتٍ ضعيفةٍ أضعف بكثير من أضعف قوة نعرفها الآن، فيمكن لذلك أن يغيّر نمط التداخل. لذا، يمكن للنيوتريونات يحاكي دور مقياس تداخل يبحث عن تفاعلات جديدة ضعيفة جدًا قد تظهر عن طريق تغيير نمط الاهتزاز بين نيوتريوني الميون والإلكترون المُعبر عن تداخلٍ بين حالات كمومية، فيمكن للقوى الموافقة لهذه التأثيرات الجديدة الضعيفة أن تتجلى كتغيرات على ما نتوقعه من النموذج القياسي الحالي للنيوتريونات. هناك البعض ممن يستخدم تجارب النيوتريونات بسبب ضخامتها وعمقها السحيق تحت الأرض للبحث عن تحلل البروتون. في الواقع، هناك قصة طريفة حول تجارب النيوتريونات التي فازت بجائزة نوبل مثل Super-KamioKande في اليابان، إذ أنها بدأت أصلًا بهدف دراسة تحلل البروتون وكانت النيوتريونات تُشكّل الخلفية، وانتهى الأمر باكتشاف تذبذبات النيوتريونات وغدا ذلك الفيزياء الرئيسة، والجديدة خارج النموذج القياسي. ولكننا لا نزال نبحث عن تحلل البروتون ذي عمر الحياة الطويل جدًا -إن كان منتهيًا- كما يتوقع النموذج القياسي. إذا رأيت حادثة تحلل بروتون واحد في أيّ من هذه الكواشف الضخمة جدًا، فهذا يُعتبر فيزياء خارج النموذج القياسي

هناك أشخاص يبحثون عن المادة المظلمة، التي

أيّ مدينة كبيرة، لذا، كنت أستمع إلى بثّ الراديو. الآن لديهم بالفعل بثّ في السينما، حيث يمكنك الذهاب إلى دار السينما ومشاهدة الأوبرا بتكلفة أقل بكثير من تذكرة الأوبرا، ولكن في زمني كان الراديو. الآن يمكنني الذهاب ومشاهدة هذه الأوبرا شخصياً

عادل: من المفترض أن يكون هذا سؤالاً من أحد قراءنا. من ضمن إنجازاتك العديدة، مُنحتَ بالمشاركة مع أعضاء فريق عمل تجربة دايا باي DayaBay جائزة الكشف-الاختراق (البريكثرو Breakthrough) في العلوم الأساسية في عام 2016. ماذا يعني لك الفوز بهذه الجائزة "المرموقة"؟

ماري: بصراحة، شعرتُ بالمزيد من التكريم والتشرف عندما حُزّتْ الزمالة في الجمعية الفيزيائية الأمريكية، حيث كانت جائزةً بشكلٍ مباشرٍ عن عملي في فهم الكواركات والنيوترينوات.

ما عنّته جائزة البريكثرو عندها هو أنها كانت أوّل مرّة تُمنح فيها جائزة تكريميّة تُقر بأن علمنا ثمره جهود تعاونيّة. لذلك، على الرغم من أنني لم أكن مشاركة رئيسيّة في تجربة دايا باي بأي حال من الأحوال، تمّ منحي هذه الجائزة كعضوٍ من فريق هذا التعاون العلمي الذي يضم أكثر من 200 شخص من كلّ مكان. أعني، إنه مشروع قائم في الصين، ولكنه ضمّ باحثين من الصين والولايات المتحدة وأوروبا، حاولوا جميعًا فهم بعض الحقائق الأساسية عن النيوترينو

في الواقع، تمّ الإعلان عن نتائج تجربة دايا باي في العام نفسه -2012- الذي تمّ فيه اكتشاف جسيم الهيجز، ويُعتبر كلا هذين الكشفيين (جسيم الهيجز وقياس دايا باي) في مجالنا حدثًا إبداعيًا على القدر نفسه من الأهميّة.

صعبة جدًا تتعلّق بالتأثيرات الكهروضعيفة، وبرسم مخططات توضيحية، وغدا مشهورًا جدًا بذلك. علاوةً على ذلك، ذهب إلى البرازيل لمدة عام لأنه أراد أن يتعلم كيف يعزف على الطبول في الكرنفال.

نعرف جميعًا أن أينشتاين كان موسيقياً وكان يحبّ الرسم وشرودينجر أيضاً. جميع هؤلاء كانت لديهم هوايات واهتمامات، بسبب هذا الارتباط العميق بين الخيال وما يطرّره الفن والأدب من أجل تحقيق فهمٍ للإنسانية تحتاه عندما تعمل مع أعداد كبيرة من الناس مثلما تحتاج -بالقدر نفسه من الأهميّة- مهاراتٍ تواصليةٍ معهم

تميل جميع العلوم تقريبًا، وليس مجرد فيزياء الجسيمات، إلى أن تكون تشاركيّةً على نطاقٍ أوسع. تتطور جميع العلوم الحديثة تقريبًا من خلال جهودٍ تعاونية، وهذه الجهود تعني أن البشر المتعاملين مع بعضهم البعض يأتون من خلفيات متباينة جدًا. ولهذا السبب تحتاج إلى حياة ثرية من أجل أن تغدو عالمًا أفضل

نعم، أنا أحب الأوبرا وكنت أتعلّم الموسيقى الكلاسيكية، فدرستُ العزف على البيانو عندما كنت طفلة. مرة أخرى، بفضل والدَيّ. أعتقد أنه في ذلك الوقت كانوا يبثّون على التلفزيون المصري بقناتيّه -حينئذٍ- أوبرا كلّ شهر على القناة 2، وغدوتُ مدمنةً عليها لأنني بالفعل أحب الموسيقى الكلاسيكية.

وبعد ذلك، عندما جئت إلى الولايات المتحدة كطالبة دراسات عليا، كنت أستمع إلى الأوبرا على الراديو وأيام السبت، حيث كانوا يذيعون مباشرة من أوبرا ميتروبوليتان في نيويورك، وأحيانًا من أوبرا ليريك في شيكاغو. بالطبع، كنتُ فقيرةً كطالبة دراسات عليا من أجل حضور عروض أوبرا، كما لم أعش قرب

قيمة تلك الجائزة وما تعنيه بالنسبة لي.
عادل: شكرًا جزيلاً، الأستاذة ماري، على منحنا هذه
 الفرصة الرائعة من وقتك الكريم لإجراء مقابلة معك
ماري: الشكر الجزيل. أشكركما على منحي هذه
 الفرصة

أعتقد أن هذا هو ما تعنيه لي جائزة البريكترو.
 إنها المرة الأولى التي تعترف فيها جائزة علمية
 رئيسية بأن العلم هو جهدٌ تعاوني وأنه يستلزم
 مئات الأشخاص. بالطبع، لتحقيق إنجازٍ رئيسي، يوجد
 بعض القادة الذين صاغوا الفكرة، ولكن جعل هذه
 الفكرة ممكنةً لهو مشروعٌ ضخمٌ جداً. هذه هي



SOLAR
ENERGY

الخلايا الشمسية طاقة المستقبل النظيفة والمستدامة

مصطفى الأعصر، أستاذ في جامعة عين شمس، مصر



مقدمة

لتلقي الطاقة الشمسية. على سبيل المثال، بلغ الاستهلاك العالمي للطاقة في عام 2021 حوالي 580 إكسا جول (EJ)، حيث يعادل الإكسا جول الواحد 277 تيراواط/ ساعة. ومن الجدير بالذكر تخيّل حقيقة أن الطاقة الشمسية التي تضرب سطح الأرض في ساعة واحدة فقط تتجاوز الاستهلاك السنوي للطاقة لجميع الأنشطة البشرية. وهذا يبين لنا كيف أن هذه الطاقة كنز يجب استغلاله على المستوى الإقليمي والعالمي

ولعل بعض الأسباب الرئيسية التي تعطي الطاقة الشمسية أهميتها هي الاستدامة، وأنها نظيفة وصديقة للبيئة، ولها كثيرٌ من الفوائد الاقتصادية، وتطبيقاتها متنوعةٌ بمقاييس مختلفة وقدرات كهربية مختلفة، كما أنها في تطوّر مستمرٍ حتى تصبح أكثر كفاءة وموثوقية، وهي رخيصة التكلفة على المدى البعيد، ما يجعلها تحلّ محلّ المصادر الأخرى وخصوصاً في الأزمات

وقد أدركت الكثير من الدول الأهمية الاستراتيجية للطاقة الشمسية على مستوى العالم، حيث تقوم بدمجها في تخطيطاتها وسياساتها المستقبلية للطاقة لضمان حلولٍ طاقة مستدامة ونظيفة وفعالة. ويعتبر هذا الأمر بالغ الأهمية للحد من التأثير البيئي وتعزيز النمو الاقتصادي وتحسين نوعية الحياة على النطاق العالمي

تستعرض هذه المقالة التطوّر التاريخي والحالة الراهنة والتوجهات المستقبلية لتكنولوجيا الخلايا الشمسية، مع التركيز على بعض المبادئ والأسس الفيزيائية للخلايا الشمسية، وأهمية التكامل بين الدول في شبكة طاقة إقليمية أو عالمية موحدة

ماهي الخلايا الشمسية

تعتبر الطاقة الشمسية مصدرًا نظيفًا ووفيرًا ومتجددًا للطاقة الآمنة غير المحدودة، كما أن لديها القدرة على تقليل الاعتماد العالمي على الوقود الأحفوري بشكل كبير. تقوم الخلايا الشمسية (تسمى أيضًا بالخلايا الكهروضوئية PV) بتحويل الطاقة الشمسية إلى طاقة كهربائية يمكن استخدامها في أنشطة الانسان اليومية المختلفة على المستوى الفردي والزراعي والصناعي... الخ. والجدير بالذكر أن ظهور مشكلة تغير المناخ والتأثيرات البيئية لمصادر الطاقة التقليدية أدى إلى استثمارات وأبحاث كثيرة في تكنولوجيا الطاقة الكهروضوئية.

تُعدّ الطاقة المنبعثة من الشمس واحدةً من أكثر الموارد المتاحة للبشرية وفرةً واستدامة. يبلغ متوسط الطاقة الشمسية التي تسقط على سطح الأرض حوالي 1000 واط لكل متر مربع (W/m^2). يمثل هذا الرقم كمية هائلة من الطاقة، قادرة على تلبية بل وحتى تجاوز- جميع احتياجات الطاقة البشرية إلى أجل غير مسمى

تتلقى الأرض حوالي 174 بيتا واط (PW) من الإشعاع الشمسي القادم في الغلاف الجوي العلوي. ينعكس ما يقرب من 30% من هذه الطاقة إلى الفضاء، بينما يُمتصّ الباقي في الغلاف الجوي والمحيطات والكتل الأرضية. على الرغم من هذا الانعكاس والامتصاص، فإن كمية الطاقة الشمسية التي تصل إلى سطح الأرض لا تزال مذهلة. في المتوسط، يتلقى كل متر مربع من سطح الأرض حوالي 1000 واط/م² من الطاقة الشمسية خلال ساعات النهار. يكون تدفق الطاقة هذا كبيرًا عند النظر في مساحة السطح الواسعة المتاحة

المواد العضوية وأنظمة التمثيل الضوئي لتعزيز امتصاص الضوء وكفاءة التحويل. وكان أول ظهور لأبحاث خلايا المواد العضوية في الخمسينات إلا أن التطور في كفاءتها لم يشاهد إلا في التسعينات وبداية ألفينات القرن الحادي والعشرين (2000s)، ولا زالت تلك الخلايا في طور التطوير حتى تنافس مثيلاتها من السيليكون.

- خلايا البيروفسكايت الشمسية: برزت خلايا البيروفسكايت الشمسية كتقنية واعدة، وحققت اختراقات كبيرة في الكفاءة في عقد واحد (10 سنوات)، حيث تجاوزت 25% في المختبرات، وقد ظهرت خلايا البيروفسكايت في 2009 ولاتزال في طور التطوير والأبحاث للوصول إلى عمر افتراضي كبير يقارن بخلايا السيليكون، والجدير بالذكر أن انخفاض تكاليف التصنيع وخصائص الامتصاص الممتازة لهذه الخلايا تجعلها بديلاً مستقبلياً قابلاً للتطبيق

التركيب الأساسي لخلية السيليكون البلوري

تُعتبر خلية السيليكون الشمسية، والمعروفة أيضاً باسم الخلية الشمسية المصنوعة من السيليكون البلوري (c-Si)، النوع الأكثر استخداماً من الخلايا الكهروضوئية نظراً لكفاءتها العالية واستقرارها على مدى زمني طويل. يتضمن الهيكل الأساسي لخلية السيليكون الشمسية (شكل 1) عدة طبقات ومكونات رئيسية، لكلٍ منها وظيفة محددة في عملية تحويل ضوء الشمس إلى كهرباء، ألا وهي:

1. أقطاب التوصيل الأمامية (خطوط الشبكة): غالباً ما تصنع من الفضة (Ag) ودورها هو توصيل الكهرباء المُولَّدة خارج الخلية. تُصمَّم على هيئة شبكةٍ لتقليل تأثير التظليل السلبي مع توفير مقاومة منخفضة للتيار

هي أجهزة (نبائط) إلكتروضوئية (Optoelectronic) ذات تصميم خاص لتحويل ضوء الشمس مباشرة إلى كهرباء مستمرة.

التطور التاريخي والتقدم التكنولوجي للخلايا الشمسية

- الاكتشافات المبكرة (1839-1954): لوحظ التأثير الكهروضوئي لأول مرة من قبل ألكسندر إدموند بيكريل في عام 1839. ومع ذلك، لم تتحقق التطبيقات العملية لهذا الاكتشاف حتى منتصف القرن العشرين مع تطوير الخلية الكهروضوئية السيليكونية من قبل مختبرات بيل في عام 1954، مما يمثل بداية الخلايا الشمسية الحديثة.

- ثم تلى ذلك عصرُ السيليكون (1954 إلى الوقت الحاضر) حيث سيطر السيليكون باعتباره المادة الأساسية للخلايا الشمسية نظراً لوفرتة وخصائصه شبه الموصلة. وقد كان التطور من السيليكون أحادي البلورة إلى السيليكون متعدد البلورات مدفوعاً بالحاجة إلى خفض التكلفة وتعزيز الكفاءة.

- ثم توالى الأنواع الأخرى من الخلايا، حيث ظهر مفهوم خلايا الأغشية الرقيقة في السبعينات وتجارياً في الثمانينات، وتستخدم هذه الخلايا طبقاتٍ من المواد شبه الموصلة بسماكة بضعة ميكرومترات مثل خلايا تيلورايد الكادميوم و CIGS التي ظهرت في تسعينات القرن العشرين. وكان الدافع وراء ذلك تقليل استهلاك المواد وبالتالي انخفاض تكاليفها وتحقيق مرونة أكبر مقارنة بخلايا السيليكون التقليدية

- الخلايا الكهروضوئية العضوية والهجينة الحيوية: استكشفت الابتكارات في الخلايا الكهروضوئية العضوية والأنظمة الهجينة الحيوية إمكانيّة استخدام

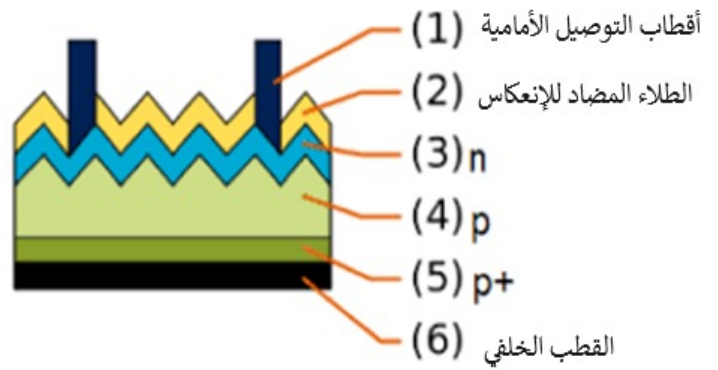
مبدأ عمل خلية السيليكون الشمسية

يتم تصميم الهيكل الأساسي لخلية السيليكون الشمسية بهدف حصد أكبر كمية من ضوء الشمس وتحويله إلى طاقة كهربائية. لكل طبقة دور أو وظيفة محددة تساهم في الأداء الكلي للخلية وتحديد كفاءتها. يُعدّ فهم هذا الهيكل أمرًا أساسيًا لتطوير تكنولوجيا الخلايا الشمسية وتحسين كفاءة أنظمة الطاقة الشمسية. وكما تتحول الطاقة من النطاق الضوئي إلى النطاق الكهربائي هناك بعض العمليات التي تتم في الخلية، ألا وهي امتصاص الفوتونات وتوليد أزواج من الإلكترون-فجوة وفصل الشحنات عن بعضها ثم الانجراف (drift) والانتشار (diffusion) ثم تجميع ناقلات الشحن - بتناسقٍ لتحويل ضوء الشمس إلى طاقة كهربائية. إن فهم هذه العمليات يساعد في تحسين تصميم وكفاءة الخلايا الشمسية، مما يمهد الطريق لتقنيات طاقة شمسية أكثر فعالية. ولذلك عندما يضرب ضوء الشمس الخلية

الشمسية المصنوعة من السيليكون، تحدث العمليات الفيزيائية التالية

امتصاص الفوتونات: تمتص طبقات السيليكون الفوتونات (ذات طاقة \leq فجوة النطاق) من ضوء الشمس، مما يؤدي إلى توليد أزواج من الإلكترونات والفجوات في حالة من الارتباط (تسمى الإكسيتونات).
فصل الشحنات: يعمل المجال الكهربائي (قوة تدفع الشحنات الموجبة في اتجاه المجال والسالبة عكس المجال) عند الوصلة p-n على فصل أزواج الإلكترون-فجوة، مما يؤدي إلى دفع الإلكترونات نحو طبقة n-type والثقوب نحو طبقة p-type

الانجراف والانتشار: تتحرك ناقلات الشحنة المنفصلة خلال مادة السيليكون عبر آليتين



الشكل 1. الهيكل الأساسي لخلية السيليكون البلوري

2. الطلاء المضاد للانعكاس (ARC): يُصنع من نيتريد السيليكون (SiNx) أو ثاني أكسيد التيتانيوم (TiO₂) والهدف منه تقليل انعكاس ضوء الشمس عن سطح الخلية، ممّا يسمح بدخول المزيد من الضوء إلى الخلية وزيادة الكفاءة

3. طبقة السيليكون من النوع N: وهي سيليكون مشبع بالفوسفور (أو عنصر خماسي التكافؤ) وتحمل فائضًا كبيرًا من الإلكترونات (حاملات الشحنة السالبة) في الطبقة العليا للخلية، ممّا يشكل الجانب السالب من الوصلة p-n.

4. طبقة السيليكون من النوع P: وهي طبقة من السيليكون المشبع بالبورون (أو عنصر ثلاثي التكافؤ) وتحمل فائضًا كبيرًا من الفجوات (حاملات الشحنة الموجبة) في الطبقة السفلية للخلية، ممّا يشكل الجانب الموجب من الوصلة p-n.

5. طبقة حقل السطح الخلفي (BSF): وهي طبقة من الألومنيوم أو السيليكون من النوع p المشبع بشكل كبير جدًا (+p) والذي بدوره يقلل من إعادة اتحاد الإلكترونات الفجوات على السطح الخلفي، مما يعزّز كفاءة الخلية عن طريق عكس الإلكترونات مرة أخرى إلى الخلية

6. أقطاب التوصيل الخلفية: تكون من الألومنيوم (Al) وتقوم بتوصيل الكهرباء المُولّدة في الخلية

STC. يتأثر V_{oc} بخصائص المادة ودرجة حرارة الخلية
3. القدرة النظرية: وهي حاصل ضرب V_{oc} و I_{sc} ،
 حيث لا يمكن الوصول إليها، والقدرة الفعلية للخلية
 دائما أقل منها

4. نقطة الطاقة القصوى (P_m): هي نقطة على
 منحنى I-V حيث يكون حاصل ضرب التيار والجهد هو
 الحد الأقصى، ويمثل أعلى طاقة يمكن أن توفرها
 الخلية. يعتبر P_m هاتفاً في تحديد كفاءة الخلية
 الشمسية ويمكن حسابها باستخدام العلاقة

$$P_m = V_m \times I_m$$

5. عامل التعبئة (FF): هو النسبة بين أقصى نقطة
 طاقة (P_m) إلى القدرة النظرية، ويشير إلى جودة
 الخلية الشمسية، حيث تُشير قيمة أعلى له إلى
 خلية شمسية أكثر كفاءة

6. الكفاءة (η): نسبة خرج القدرة الكهربائية (P_m)
 إلى طاقة الضوء الساقط، وهي تقيس الكفاءة
 ومدى فعالية الخلية الشمسية في تحويل ضوء
 الشمس إلى طاقة كهربائية. تشير الكفاءة الأعلى
 إلى خلية شمسية أفضل أداءً

7. مقاومة السلسلة (على التسلسل) (R_s): هي
 المقاومة التي يواجهها التيار المتدفق عبر الخلية
 الشمسية، بما في ذلك أقطاب التوصيل والمادة
 نفسها. تقلل المقاومة على التسلسل العالية من
 عامل التعبئة والكفاءة الإجمالية، وتؤثر على ميل
 منحنى I-V بالقرب من تيار الدائرة القصيرة

8. مقاومة التوازي (R_{sh}): وتمثل المقاومة عبر
 أطراف الخلية الشمسية بسبب تيارات التسرب. تُعتبر
 مقاومة التوازي العالية مرغوبة لأنها تقلل من تيار
 التسرب وتحسّن عامل التعبئة والكفاءة. تتسبب
 مقاومة التوازي المنخفضة في فقد الطاقة وتقليل

1. الانجراف: حركة ناقلات الشحنة بسبب المجال
 الكهربائي في منطقة الاستنزاف (الناضبة depletion)
 2. الانتثار: حركة ناقلات الشحنة بسبب تدرج تركيزها
 خارج منطقة الاستنزاف

تجميع الشحنات: يتم تجميع الشحنات المنفصلة
 بواسطة أقطاب التوصيل الأمامية والخلفية. تتدفق
 الإلكترونات عبر الدائرة الخارجية، بينما تتدفق الفجوات
 إلى جهة الاتصال الخلفية لتوليد تيار كهربائي

المعاملات الكهربائية للخلية الشمسية

تعتبر المعاملات الكهربائية الرئيسية للخلية الشمسية
 (تيار الدائرة القصيرة (I_{sc})، وجهد الدائرة المفتوحة
 (V_{oc})، ونقطة الطاقة القصوى (P_m)، والتيار والجهد
 عند أقصى نقطة طاقة (I_m و V_m)، ومعامل التعبئة
 (FF)، والكفاءة (η)، ومقاومة التوالي (R_s)، ومقاومة
 التحويل (R_{sh}) (ضرورية جداً لفهم أداء الخلية
 وتحسينه.

توفر هذه المعاملات رؤى حول كفاءة الخلية
 الشمسية وسلوكها في ظل ظروف مختلفة. وفيما
 يلي أهم تلك المعاملات

1. تيار الدائرة القصيرة (I_{sc}): هو التيار المار عبر
 الخلية الشمسية عندما تكون أطراف الخرج تميل
 دائرة قصيرة (دائرة قصر) بدون مقاومة (أي عندما
 يكون الجهد عبر الخلية صفراً). وهو يمثل الحد
 الأقصى للتيار الذي يمكن أن تنتجه الخلية في ظل
 ظروف الاختبار القياسية (STC). I_{sc} يتناسب طردياً مع

شدة الضوء الساقط ومع مساحة سطح الخلية
2. الجهد في حالة الدائرة المفتوحة (V_{oc}): هو
 جهد الخلية الشمسية عندما تكون أطراف الخرج
 مفتوحة (أي عندما يكون التيار المار عبر الخلية صفراً).
 ويشير إلى أقصى جهد يمكن أن تنتجه الخلية تحت

.V_{oc}

9. معاملات درجة الحرارة: وهي التي تصف كيف يتغير V_{oc} و I_{sc} والكفاءة مع درجة الحرارة، إذ يعتمد أداء الخلية الشمسية على درجة الحرارة. عادةً ما يتناقص V_{oc} مع زيادة درجة الحرارة، بينما يزداد I_{sc} بشكل طفيف

تساعد هذه المعاملات في تقييم فعالية الخلايا الشمسية وتصميم أنظمة الطاقة الشمسية لتحقيق أقصى إنتاج للطاقة الحدود القصوى النظرية لكفاءة الخلايا الشمسية

الحد النظري الأقصى لكفاءة الخلايا الشمسية هو مفهوم حاسم في أبحاث الطاقة الكهروضوئية لأنه يحدّ الإمكانيات والقيود للمواد والتقنيات الحالية، كما يرشد الى تطوير ابتكارات جديدة مثل الخلايا الترادفية (Tandem cells) لتسخير الطاقة الشمسية بشكل أفضل

يُشير الحدّ النظري لكفاءة الخلايا الشمسية، والذي غالبًا ما تتم الإشارة إليه في سياق حد شوكللي - كوايسر (Shockley-Queisser)، إلى الحد الأقصى للكفاءة التي يمكن أن تحققها الخلية الشمسية ذات الوصلة الواحدة في تحويل الطاقة الشمسية إلى كهرباء في ظل الظروف القياسية. يتم اشتقاق هذا الحد من مبادئ التوازن التفصيلية ويأخذ في الاعتبار العديد من العوامل الفيزيائية. تمّ حساب هذا الحد من قبل ويليام شوكللي وهانز كوايسر في عام 1961 [2]، ويوفّر تفسيرًا نظريًا مفصلاً للحد الأقصى للكفاءة التي يمكن توقعها من خلية شمسية مصنوعة من وصلة p-n واحدة تستخدم مادة شبه موصلة واحدة

إذن ما هي العوامل التي تؤثر على هذا الحد؟

• **طاقة فجوة النطاق (Bandgap):** لكل مادة شبه موصلة طاقة مميزة تسمى فجوة نطاق، وهي الفجوة بين نطاقي التكافؤ والتوصيل، لا يتم امتصاص الفوتونات التي تقل طاقتها عن فجوة النطاق وبالتالي لا تساهم في توليد الكهرباء. سوف يتم امتصاص الفوتونات ذات الطاقة الأكبر من فجوة النطاق، ولكن الطاقة الزائدة فوق فجوة النطاق تتحول بسرعة إلى حرارة بدلاً من الكهرباء

• **خسائر التسخين:** تضع الطاقة الزائدة للفوتونات عالية الطاقة (الطاقة التي تزيد عن فجوة النطاق لأشباه الموصلات) كحرارة عندما تسترخي الإلكترونات المثارة إلى حافة النطاق. هذه الخسارة كبيرة، خاصة بالنسبة لأشباه الموصلات ذات طاقات فجوة النطاق المنخفضة التي يمكن أن تمتص المزيد من الطيف الشمسي

• **الكفاءة الكمية:** من الناحية المثالية، يجب أن يولّد كلُّ فوتون ممتص زوجًا واحدًا من الإلكترونات والفجوات. ومع ذلك، لا تؤدي جميع الفوتونات الممتصة إلى توليد ناقلات شحنة بسبب طرق الخسارة المختلفة داخل هيكل الخلية

• **خسائر إعادة الاتحاد:** يمكن لحاملات الشحنة المتولدة (الإلكترونات والفجوات) أن تتحد قبل تجميعها والوصول إلى الأقطاب الكهربائية. وهذا يشمل إعادة الاتحاد الإشعاعي وغير الإشعاعي

• **فقدان الجهد:** يقتصر الحد الأقصى الممكن لإخراج الجهد للخلية الشمسية على جهد فجوة النطاق لأشباه الموصلات. ومع ذلك، تعمل الخلايا الشمسية العملية بجهد أقل من هذا بسبب خصائص

المواد غير المثالية وقيود التصميم العملي

قيمة الحد النظري:

يفترض حدّ شوكلي - كوايسر أن الحد الأقصى لكفاءة خلية ذات وصلة واحدة يبلغ حوالي 33% في ظل ظروف الاختبار القياسية (إضاءة شمس واحدة، 25 درجة مئوية) [1]. بمعنى أنه من كل الطاقة الموجودة في ضوء الشمس (حوالي 1000 واط/م²) التي تسقط على خلية شمسية مثالية، لا يمكن تحويل سوى 33% منها إلى كهرباء أي 330 واط/م² فقط. تمتلك مادة الخلايا الشمسية الأكثر شيوعًا وهي السيليكون، فجوة نطاق تبلغ 1.1 فولت، تصل الخلايا الشمسية أحادية البلورية التجارية إلى كفاءة تحويل تبلغ حوالي 24%، وبالتالي تصبح الطاقة المُحوّلة إلى كهرباء 240 واط/م² فقط.

ما وراء الحدّ: الخلايا الشمسية الترادفية (Tandem solar cells)

سعى الباحثون إلى إيجاد طريقة كي تتجاوز الخلايا حد شوكلي - كوايسر، وتوضّل الباحثون لتصميم وتصنيع خلايا شمسية متعددة الوصلات (ترادفية)، حيث تتوالى فيها وصلات متعددة من مواد ذات فجوات نطاقية مختلفة. من خلال تسخير نطاق أوسع من الإشعاع الشمسي بشكل أكثر كفاءة، تستهدف كل وصلة جزءًا مختلفًا من الطيف الشمسي، وبالتالي تقليل خسائر التسخين وتعزيز الكفاءة الكلية للخلية الكفاءات المحتملة للخلايا الترادفية: تشير النماذج النظرية إلى أنه من خلال الجمع الأمثل بين المواد وتصميم الوصلات، يمكن أن تحقق الخلايا الشمسية الترادفية كفاءة تتجاوز 45%. يسمح هذا النوع من الخلايا باستخدام الطيف الشمسي بشكل أكثر اكتمالاً وكفاءة مما هو ممكن مع تصميمات

الوصلة الواحدة

الاتجاهات والابتكارات المستقبلية

تعزيز الكفاءة: يستمر البحث في دفع حدود كفاءة الخلايا الشمسية من خلال مواد وتصميمات خلايا جديدة. تُظهر الخلايا متعددة الوصلات، التي تتكون من عدة وصلات (junctions)، إمكانيةً التقاط أجزاء طيفية مختلفة من ضوء الشمس، وبالتالي إمكانية تحقيق معدلات كفاءة تصل إلى 47.6% [2] حسب آخر تحديثات NREL.

قابلية التوسع والتأثير البيئي: يتطلب التأثير البيئي لإنتاج الخلايا الشمسية، لا سيما فيما يتعلق بالحصول على المواد والتخلص من نهاية العمر، اهتمامًا مستمرًا لضمان حلول طاقة مستدامة حقًا

التكامل والتحديات

تكامل الشبكة: يمثل دمج الطاقة الشمسية في شبكة الطاقة الحالية تحديات كبيرة مثل التباين وتخزين ونقل الكهرباء. تتضمن الحلول تطوير أنظمة تخزين البطاريات المتقدمة وتطوير تقنيات إدارة الشبكات. في حين أن الفوائد كبيرة، فإن التكامل العالمي لشبكات الطاقة يطرح أيضًا تحديات تشمل الحاجة إلى استثمارات كبيرة في البنية التحتية، ومواءمة الأطر التنظيمية، وضمان الأمن السيبراني. بالإضافة إلى ذلك، يُعدّ التعاون السياسي والاقتصادي بين الدول أمرًا بالغ الأهمية لنجاح هذا المشروع الطموح

التحديات الاقتصادية والسياسية: على الرغم من انخفاض التكاليف، إلا أن اعتماد الطاقة الشمسية تعيّنهُ العوامل الاقتصادية وأطر السياسة في مختلف المناطق. وتعتبر برامج الحوافز والإعانات والدعم التنظيمي أمرًا بالغ الأهمية لمزيد من الاعتماد

المراجع

[1] William Shockley; Hans J. Queisser
(March 1961). "Detailed Balance Limit of
Efficiency of p-n Junction Solar Cells" (PDF).
Journal of Applied Physics. 32 (3):510-519.
doi:10.1063/1.1736034.

[2] <https://www.nrel.gov/pv/assets/images/cell-pv-eff-mjcells.jpg>

خبر

المركبة الفضائية SpaceX's Starship تُحدث نجاحًا كبيرًا في اختبار الطيران الرابع



في 6 يونيو/حزيران 2024، حققت شركة سيس إكس نجاحًا ملحوظًا في رابع اختبار طيران لمركبتها الفضائية (ستارشيب) (SpaceX's Starship)، حيث تم تسجيل تقدم هام في تطوير منظومة الإطلاق التي من المقرر أن تنقل رواد الفضاء التابعين لناسا إلى القمر بحلول عام 2026.

انطلق الدقّاش فائق الثقل Superheavy booster من مجمع ستاربيز في جنوب تكساس في الساعة 7:50 صباحًا بالتوقيت المحلي، صاعدًا إلى السماء بقوة دفع تبلغ 16.7 مليون رطل دفع (أي حوالي

التكامل العالمي لشبكات الطاقة الكهربائية

يمثل تكامل شبكات الطاقة الكهربائية على نطاق عالمي طريقًا واعدًا لتعزيز فوائد الطاقة الشمسية الكهروضوئية (PV)، وهي المصدر الرئيسي للطاقة المتجددة. يتضمن هذا التكامل ربط شبكات الطاقة الإقليمية والوطنية لإنشاء نظام كهرباء عالمي أكثر مرونة وكفاءة. ويمكن للتكامل العالمي أن يعزز فعالية وفوائد الطاقة الشمسية الكهروضوئية عن طريق تعزيز استقرار الشبكة وموثوقيتها، وخفض التكلفة والكفاءة الاقتصادية، وزيادة الاستثمار في الطاقة المتجددة، وتسهيل التقدم التكنولوجي، وتعزيز أمن الطاقة. وبذلك يكون الاعتماد على الطاقة الشمسية الكهروضوئية على نطاق واسع من خلال تكامل الشبكة العالمية ذا فوائد بيئية واجتماعية كبيرة، منها تقليل الاعتماد على الوقود الأحفوري وبالتالي نُقْل من انبعاثات غازات الاحتباس الحراري وتلوث الهواء والآثار الصحية المرتبطة به. علاوة على ذلك، يمكن لنمو صناعة الطاقة الشمسية أن يخلق فرص عمل ويحفز التنمية الاقتصادية في المناطق الغنية بالموارد الشمسية، مما يساهم في تحقيق أهداف التنمية المستدامة العالمية

الخاتمة

يعكس تطور الخلايا الشمسية من أجهزة بسيطة إلى أنظمة متطورة وعالية الكفاءة تقدّمًا علميًا وتكنولوجيًا كبيرًا. كما يبدو أن مستقبل الخلايا الشمسية واعدٌ مع استمرار الابتكارات التي تهدف إلى التغلب على التحديات الحالية وتعزيز انتشار وتوليد ونقل الطاقة الشمسية عبر شبكات عالمية موحدة في مشروع طموح للتعاون بين مختلف اقطار العالم

غير مسبوقه. المسبار، الذي هبط في فوهة ضخمة قريبة من القطب الجنوبي للقمر، يحمل العينات التي جُمعت لأول مرة من هذا الموقع الغامض، ممّا يمثل طفرة كبيرة في مجال استكشاف الفضاء

وصفت الإدارة الوطنية الصينية للفضاء هذه المهمة بأنها "إنجاز غير مسبوق في تاريخ استكشاف الإنسان للقمر". وقد أقلعت وحدة جمع العينات من المركبة "تشانغ آو6-6" في الساعات الأولى من صباح الثلاثاء 4 يونيو-حزيران، مختربة الفضاء لتبدأ رحلتها الطويلة نحو الأرض

وفي تفاصيل العملية، أظهرت مقاطع الفيديو التي نشرتها وكالة الفضاء الصينية كيف نجحت المركبة في التقاط العينات باستخدام ذراع آلية، ثم لوّحت بالعلم الصيني في لحظة فخر وطني تعكس الإنجاز العلمي والتقني للبلاد

هذا وتعتبر مهمة-إرسالية "تشانغ آو6-6" جزءاً من سلسلة طويلة من البعثات القمرية التي تخطط لها الصين، حيث تهدف إلى استكشاف وجمع المزيد من البيانات عن القمر، وخصوصاً الجانب الذي لا يظهر لنا من الأرض. وتأتي هذه المهمة لتؤكد على ريادية الصين في مجال استكشاف الفضاء وقدرتها على تنفيذ مهام معقدة وذات أهمية كبيرة في مجال العلوم والتكنولوجيا

يُنْتَظَر أن يعود المسبار إلى الأرض في نهاية يونيو-حزيران، حيث ستهبط العينات في صحاري منغوليا الداخلية، ليتم بعدها تحليلها من أجل فهم أفضل لتكوين القمر وتطوره. لا يُعَدُّ هذا الإنجاز خطوة كبيرة للصين فحسب، بل للعلم العالمي أيضاً، في استكشاف أسرار القمر واستغلاله في المستقبل

المصدر [BBC](#)

3.75 مليون نيوتن) بفضل 32 من محركاته الثلاثة والثلاثين التي تعمل بالميثان. بعد دقائق من الإطلاق، انفصلت المرحلة العليا - المعروفة باسم "السفينة" - عن المرحلة الأولى، وأشعلت ستة من محركاتها الخاصة

وفي إنجاز جديد لـ (ستارشيب)، تمكنت المرحلة الأولى من الهبوط الناعم في خليج المكسيك بعد أن فشلت محاولة الهبوط في الاختبار الثالث مارس-آذار الماضي بسبب مشكلة في إعادة إشعال بعض المحركات. أما المرحلة العليا فقد وصلت إلى ارتفاعات تزيد عن 200 كيلومتر لكنها لم تكمل مداراً كاملاً حيث كان الهدف هو القيام بهبوط ناعم أيضاً في المحيط الهندي

احتفل إيلون ماسك، مؤسس سبيس إكس، بنجاح الاختبار مشيراً إلى أن السفينة تمكنت من الهبوط بنجاح على الرغم من فقدان بعض قطع قوالب طوبها المقاوم للحرارة وتضرر أحد الأجنحة. وقد قدّم بيل نيلسون، مدير ناسا، تهنئاته معرباً عن تفاؤله بأن هذا النجاح يقربنا خطوة أخرى من إعادة البشر إلى القمر من خلال برنامج أرتيميس ومن ثم التوجه إلى المريخ. تستعد سبيس إكس لاستخدام نسخة مخصصة من "السفينة" كمركبة هبوط لمهمة أرتيميس 3، والتي من المقرر أن تكون أول مهمة/إرسالية مأهولة إلى سطح القمر منذ أبولو 17 في عام 1972. المصدر [Universe Today](#)

إطلاق المسبار الصيني من الجانب البعيد للقمر

في إنجاز علمي يُعَدُّ الأول من نوعه، أعلنت الصين نجاح إطلاق مسبارها القمري من الجانب البعيد للقمر، حيث بدأ رحلة عودته إلى الأرض مُحمّلاً بعينات قمرية



الشواش والكسوريات حيث الفيزياء وجاذبها العجيب

محسن زهران، أستاذ الفيزياء في جامعة المنصورة، مصر



“ضاعت المملكة وقتل الملك بسبب خسارة معركة، وحدثت هذه الخسارة لأن الفارس قد هزم، وانهزم الفارس بسبب عدم اتزان فرسه، الذي كان يعاني من حدوته، والحدوة لم تكن مُثَبَّتَةً بسبب مسمارٍ صَدِئٍ

أولاً: مقدّمة

على المعادلات الحاكمة للظواهر الطبيعية، أمكن استنباط العديد من حلولها في صيغ رياضية محكمة ومثيرة تعطي تنبؤات حتمية (deterministic) لأي نقطة في المستقبل

وكم سيكون رائعاً أن تكون لدينا آلية يمكنها الحصول على موضع وسرعة الجسم المتحرك بدقة عالية للغاية، بدءاً من لحظة انطلاقه وفهم شروطه الأولية حتى وصوله إلى هدفه أو حالته النهائية. وتحت وطأة إنجازات نيوتن والسحر الذي بنى به أجدته العلمية، كانت مفرداته هي أن الكون إله عملاق منظم، يحدّد مستقبله سلفاً حاضراً، كما كانت أحداثه في الماضي تحكمها قوانين السببية (cause-effect rule) في أن السبب يسبق نتيجته، خاصة وأن العلاقة السببية دالة متباينة (one to one map)، غالباً ما تكون خطية linear ما يعني أن أي خطأ في قياس الشروط الأولية لمنظومة ديناميكية لن يؤدي إلى أخطاء كبيرة في قياس حالته النهائية. بلغت هذه الموجة من الفلسفة المادية ذروتها بإعلان لابلاس أن كل جسيم في الكون، من أكبر نجم إلى أصغر ذرة في الكون، مقيّد بالقوانين الفيزيائية التي يخضع لها، وصولاً إلى أصغر التفاصيل، لينتج لنا وبكل دقة حساب مستقبله وكأن القوانين المستخدمة مُنرّهة عن الخطأ

“لا يوجد خطأ أكبر في العلم من الاعتقاد بأن مجرد إجراء عملية رياضية سيجعل ظاهرة ما في الطبيعة مؤكدة”

لكن الأمور لم تسر كما كانت الفيزياء الكلاسيكية تأمل، وظهر العديد من السحب السوداء فوق إطارها الفكري، مثل النظم الفيزيائية التي

تُصنّف الفيزياء في المرتبة الثانية بعد الرياضيات كعلم وصل إلى مرحلة منطقية قائمة على الملاحظة والتجربة واستنتاج العلاقات الرياضية التي تحكم بعض الظواهر الفيزيائية، وقد تمّ ذلك على يد العالم الإيطالي جاليليو (1564-1642) عملاق العلم. فالعلم بشكل عام، والفيزياء بشكل خاص، مدين بشكل أساسي لهذا العالم لقدرته الفذة على التفكير المخالف للفطرة والطبيعة الظاهرة للأشياء، ولقدرته الفائقة على تحليل حركة السقوط الحر للأجسام المختلفة الشكل والكتلة في مجال الجاذبية عندما تكون المنظومة الفيزيائية معزولة عن محيطها. وقد اتضح ذلك عندما بيّن أنه إذا تمّ تجاهل تأثير مقاومة الهواء، فإن المطرقة تسقط بالطريقة نفسها التي تسقط بها ريشة الطائر. ثم جاء العبقرى نيوتن (1642-1727) الذي صاغ قانون الجاذبية العامة القائل بأن كل جسيم في الكون يجذب الجسيمات الأخرى بقوة تتناسب عكساً مع مربع المسافة التي تفصله عنها

$$F_g = G \frac{M_1 M_2}{R^2}$$

حيث M_1, M_2 كتلتا الجسامين المتجاذبين و R المسافة بينهما و G ثابت الجاذبية العام. أعطى هذا القانون عمومية لفهم الكون بأكمله وأسس إطاراً جديداً للفكر، حيث قدّم نيوتن في كتابه المبادئ (البرنسيبيال) فكرة كون الظواهر الفيزيائية محكومة عموماً بقوانين رياضية صارمة يمكن صياغتها والتنبؤ بها. وهكذا، بدأت المعادلات الرياضية تحل محل التصورات الهندسية المعقدة، خاصة مع ابتكار طريقة التفاضل والتكامل لصياغتها. وبمجرد العثور

وسطية مساوية لتراكم كافة الأخطاء في لحظات سابقة في تطورها، فيصبح الخطأ هو السائد وتغدو القدرة على التنبؤ بمصير الحالات مستحيلة. ولذلك فإن القيمة الأولية لخطأ القياس، حتى لو كانت جزءاً واحداً من المليار، سوف تتسع بسرعة إلى حد الهلاك لدرجة تعصف بتحديدية المنظومة

ثانياً: النظم الشواش

أهم ملامح هذه النظم هي:

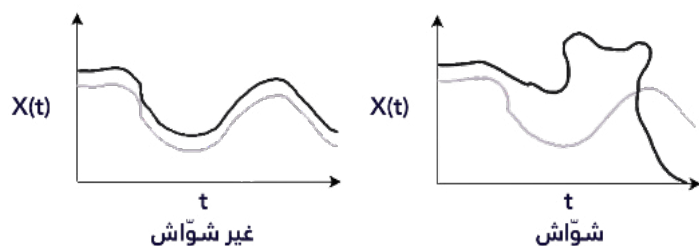
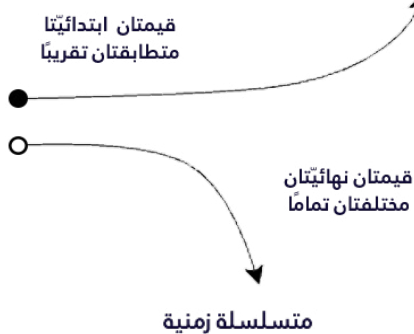
- المعادلات الرياضية الحاكمة حتمياً تكون غير خطية (Nonlinear).

- لها حساسية مفرطة تجاه قياس الشروط الابتدائية للمنظومة (ظاهرة جناح الفراشة Butterfly effect).

- لها ما يسمى بالتغذية الراجعة الموجبة أي أن مخرجات مرحلة معينة هي مدخلات المرحلة التالية (feedback effect)

- الاعتماد المفرط على تغيير قيم بعض البارامترات الفيزيقية، مثل تردد مصدر التغذية القصيرة للنظام أو قيمة معامل الإخماد أو الاحتكاك، من أجل تحقيقها فيما يخص الحساسية للشروط الأولية، فإن الشكل

(1) يوجزها



الشكل 1: تميّز النظم الشواشة باعتماد سلوكها كثيراً على قيم الشروط الابتدائية.

تتكون من أعداد كبيرة من الجزيئات، مثل غاز في صندوق مغلق، أو رمي آلاف قطع النرد. يتم التعامل مع هذه النظم الكبيرة واللامتناهية باستخدام علم الإحصاء لربط الحالات الجزيئية للغازات بخصائصها الفيزيائية المرئية والقابلة للقياس (مثل الضغط ودرجة الحرارة) عن طريق أخذ المتوسطات أو الاحتمالات. ولذلك تم إنشاء الأساليب الإحصائية كنظير للطرق التجريبية النظرية، إذ نجحت الأخيرة في وصف النظم البسيطة بعددٍ صغيرٍ من درجات الحرية، تاركة وصف النظم الكبيرة للطرق الإحصائية، وأصبح حكم الطرق الإحصائية قطعيّ الدلالة وواضحاً وجديراً بالثقة في أعمالٍ عديدة كتلك الخاصة بشركات التأمين وأصحاب الكازينوهات

ومن الواضح أنه في المواقف الحقيقية، فإن البيانات الأولية لجميع النظم الطبيعية ستكون عرضةً للشك وعدم الدقة، حتى لو تم قياسها بدقة إلى حد ما، ولكن افتراض عدم الدقة أو الجهل البسيط بالحالة الأولية للمنظومة سوف يُترجم إلى جهلٍ بسيط ومُسيطرٍ عليه عند تحديد الحالة النهائية أو مصير المنظومة. ولذلك فمن الطبيعي أن تتراكم الأخطاء أو عدم الدقة عند قياس حركة المنظومة مع مرور الوقت، ولكن الأهم من ذلك أنها تزيد تقريباً بما يتناسب مع تدفق الوقت، وبالتالي يمكن تحديدها والتنبؤ بها

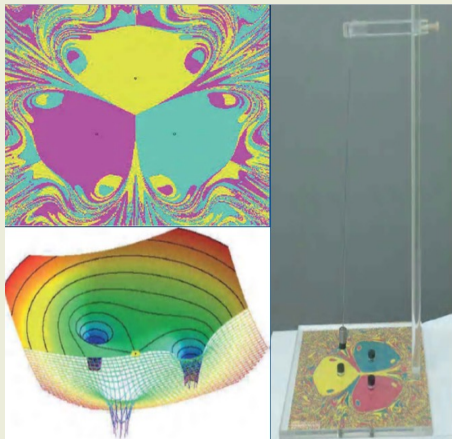
لكن العجيب أن هناك نظماً فيزيائية ذات هياكل وأوصاف بسيطة تمردت على فيزياء لابلاس-نيوتن وأظهرت سلوكاً بقدر كبير من الإبداع أو العشوائية الخلاقة مع تطورها عبر الزمن. وفي مثل هذه النظم يتضاعف تأثير عدم الدقة في قياس قيم الحالة الأولية، بحيث تكون القيمة في لحظة

تجربه مخبرية جميلة لفهم حساسية الشروط الابتدائية وفضاء الطور الجاذب

- التجربة عبارة عن بندول فيزيائي مكوّن من كرة وخيط، حيث الخيط مثبت من طرف وبه كرة معدنية قابله للاهتزاز من الطرف الآخر

- تُثبّت عند قاعدة البندول ثلاثة مغناط عند رؤوس مثلث متساوي الأضلاع كما هو موضح بالشكل (3) - تبدأ التجربة من موضع معيّن معروف في فضاء الطور ونترك الكرة تحت تأثير الحركة الاهتزازية وقوة الجذب المغناطيسي للمغناط، ونسجّل تطوّر البندول ونقطة اتزانه الأخير عند أحد المغناط. من الجميل أنه بتكرار التجربة من نقطة البداية نفسها فإننا نحصل على نتائج مختلفة ما يؤكّد حساسية البندول للشروط الابتدائية وأيضاً عدم القدرة على التنبؤ بانتظام بالرغم من بساطة المنظومة الديناميكية من حيث درجات الحرية ووجود معادلات

الحركة المُفبّسة لها

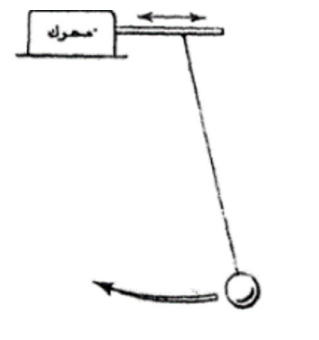


الشكل 3: بالرغم من الابتدء بالنقطة نفسها تقريباً فإننا ننتهي إلى نتائج مختلفة.

شبه إهليجي ذي دورة تساوي تردّد المتذبذب. عجيب الأمر أن المنظومة توصف بمعادلات بسيطة ذات درجات حرية قليلة لا تتعدّى 3 درجات وتصف بنجاح

تعني هذه الفكرة أن نقطتين ابتدائيتين متقاربتين لمنظومة ما قد تؤولان لحلول مختلفة كلياً. كمثالٍ تبسيطي عن هذه الفكرة قمّ بإلقاء قطعّين من الورق المقوى في المكان نفسه تقريباً في منتصف مجرى تيارٍ مائي ذي سرّيان مضطرب ولاحظْ بعد فترة زمنية مسارَ الحركة لكلّ منهما. سوف تجد أن مساريهما كانا متقاربتين في البداية وبعد فترة ذهبت كلّ ورقة في مسارٍ مختلفٍ مبتعداً عن الأخرى. هذه من أهم سمات النظم الفوضوية (الشوّاش) في أن اختلافاً طفيفاً في بداية التجربة قد يؤدي إلى حلّ وسلوكٍ مختلفٍ تماماً عن الآخر، حتى وإن كان الفرق جزءاً واحداً من المليار في قراءات الشروط الابتدائية

ومن خلال التجربة التالية، يمكننا بسهولة فهم ميزة أخرى للنظم الشوّاشة. لنفترض أن لدينا نوّاساً (بندولاً) كرويّاً كما هو مبين في الشكل (2)



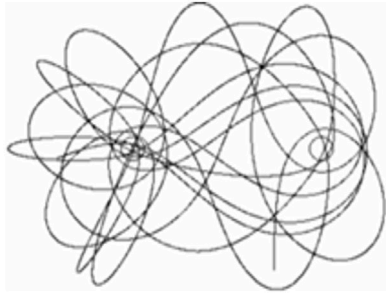
الشكل 2: نوّاس-بندول كروي

وهو نوّاس يتكون من سلك معدني رفيع مثبت من أعلى بطرف جهازٍ قوّدٍ للذبذبات والطرف الآخر مُعلّقة به كرة معدنية حرّة الحركة ترسم سطح كرة. ما إن يبدأ المُتذبذب في الحركة أفقياً بتردد معين عند نقطة التعليق في اتجاه أفقي فإن البندول سيبدأ في الاهتزاز والتأرجح ذهاباً وإياباً ممثلاً للحركة التوافقية البسيطة المستقرة على مسار

تقدّم هذه المنظومة البسيطة أول دليل على الحركة العشوائية وغير المنتظمة وغير المُتنبأ بها، وتغدو مدارات الدوران ككرة خيوط الصوف، وليست منتظمة كالتي حصلنا عليها من نموذج الجسمين كما مبين في الشكل (5)



مدار إهليجي



مدار شواش

الشكل 5: المدار الشواش إزاء الإهليجي

حاول العبقرى الفرنسي بوانكاريه (-1854) الإجابة بدراسة حركة الأجسام الثلاثة تحت عنوان فخم من نمط "هل المنظومة الشمسية مستقرة؟". بدأ هذا العبقرى في معالجة السؤال بمقاربة جديدة عن طريق اختراع ما يُسَمَّى بفضاء الطور، وهو يختلف كلياً عن الفضاء العادي حيث ندرس تغيير حركة الكمية الفيزيائية مثل الموضع q مع الزمن t . إن فضاء الطور شيء آخر حيث يوضّح العلاقة بين الموضع q والسرعة \dot{q} أو بالأحرى كمية الحركة $p=mq$ ؛ وبالتالي أصبحت منظومة الإحداثيات تُمثّل بالزوج (q,p) . تفتت مقاربة بوانكاريه في دراسة استقرار المنظومة الشمسية وذلك عبر تحيّل صفحة وهمية متعامدة على مسار في فضاء الطور (ما يُدعى مقطع بوانكاريه Poincare sections) كما هو موضح بالشكل (6)

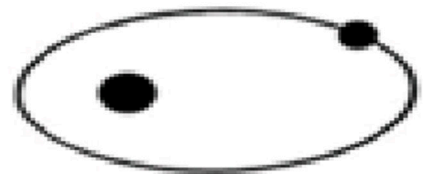
وفي كل مره يقطع مسار الكوكب المقطع تُسجّل نقطة على الأخير، ويلاحظ تقارب النقاط

الحركة الترددية المنتظمة الناتجة، أي أن المنظومة محدّدة تماماً. لكن بإجراء تغيير طفيف في تردد المتذبذب يتحوّل البندول إلى حركة عشوائية في جميع الاتجاهات ممّا يفقدنا أيّ قدرة على التنبؤ أو معرفة ما حدث من تغيير الانتظام إلى هيولى (Chaos) تدور بها الكرة في اتجاه مرة وفي الاتجاه المضادّ مرة أخرى وبلا ضابط معين. هذا القصور في التنبؤ لا يُعزى لقصور بشري أو إلى محدودية النموذج الرياضي التوصيفي ولكنه حقيقة أساسية ومتأصلة وجزء من سيناريو تطور النظم الديناميكية اللاخطية كلّها وكأن مستقبلاً لم يكتب بعد

ثالثاً: التناغم والتوافق في حركة جسمين (two-bodies) إزاء الطلاق والانفصال في حركة

ثلاثة أجسام (Three-bodies)

نعرف أن النجاح الرائع لقوانين نيوتن أتى بعد أن وصف بالتفصيل دوران كوكب نموذجي مثل الأرض حول نجم مثل الشمس ووجد أن المدار كان إهليجياً طالما أنهما مرتبطان بقوة الجاذبية. إذا أضفنا جسماً آخر لتلك المنظومة الجاذبية (الشكل 4)، فإن الدراسات تبين أن المسافات بين الأجسام الثلاثة وبالأحرى قوة الجاذبية بينها- سوف تتغير باستمرار



قدّم نيوتن حلاً تحليلياً بسيطاً لمسألة جسمين



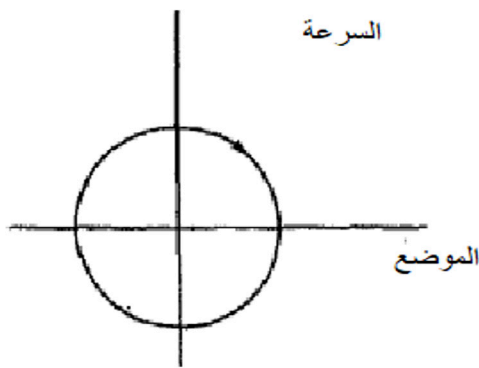
بين بوانكاريه بشكل رئيس أن مسألة الأجسام الثلاثة غير قابلة للحل

الشكل 4: مسألة التجاذب الثقالي لجسمين إزاء ثلاثة أجسام.

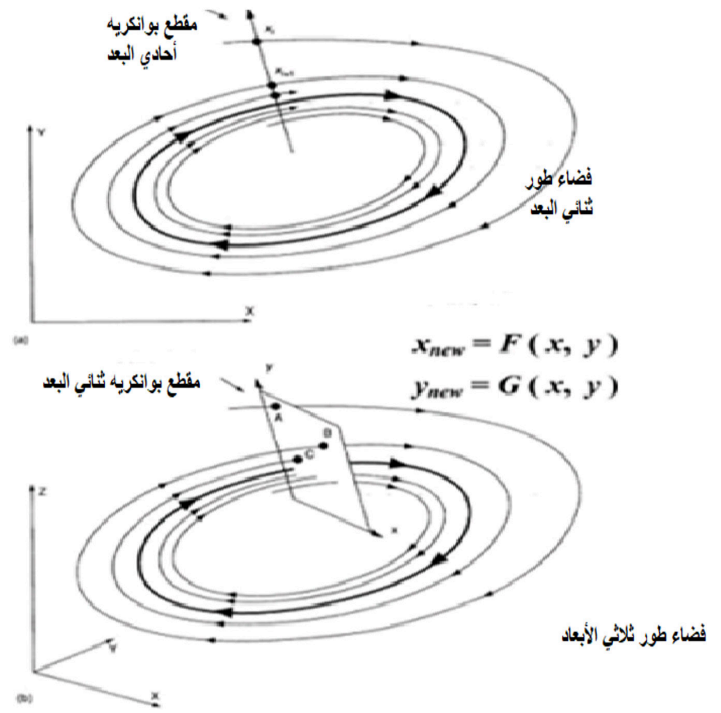
الانكماش متمثلاً في نقصان سعة حركة البندول.
2. مُحافِظة حيث الطاقة الكلية للمنظومة ثابتة
ولذلك تكون مساراتها في فضاء الطور مغلقةً
مثل الدائرة

لنأخذ الآن البندول كحالة دراسة حيث تُوصَف
حركة النقطة المُعلَّقة في طرفه بمعادلة غير
خطية لـ θ زاوية رأسه: $\frac{d^2\theta}{dt^2} = -I^2 \sin \theta$ وذلك
لوجود الحد $\sin \theta$. يكمن نمط التفكير المُتَّبَع في
الفيزياء النظرية في تبسيط المسألة بأن نحوِّلها
إلى تقريب خطي شريطة المحافظة تقريباً على
السلوك الأساسي للظاهرة المُراد دراستها. يعني
ذلك أنه بفرض أن θ صغيرة نحصل على معادلة
خطية للحركة $\frac{d^2\theta}{dt^2} = -I^2 \theta$ ، حيث يمكن الحلّ
في معظم الحالات بصورة تحليلية (analytical) أو
حسابية (computational)

يمكن فهم موضوع الجاذب من خلال الأمثلة التالية:
أ- **البندول المثالي**: نفترض هنا أن البندول لا يعاني
أيّ مقاومة ومن ثم يستمر في الحركة سرمدياً
وتكون الطاقة الكلية مصنونة. مسار المنظومة في
الفضاء العادي عبارة عن دالة دورية جيبيّة، بينما في
فضاء الطور -أي الجاذب- عبارة عن دائرة مغلقة
(الشكل 7). تؤدّي زيادة سعة الحركة في الحالة
الابتدائية إلى دائرة أكثر اتساعاً



الشكل 7: بندول مثالي



الشكل 6: مقطع بوانكاريه في فضاء الطور.

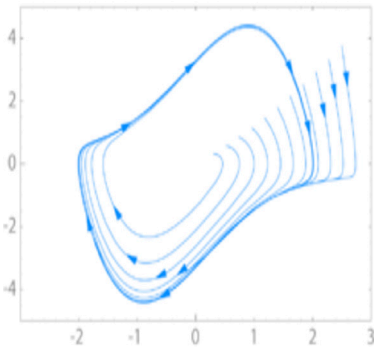
المُسجَّلة ومن ثم تقارب سلسلة الحل الناتجة. وجد
بوانكاريه أن الأشكال الناجمة في المقاطع وبخاصة
المناطق التي لم تُظهر بها دورية خالصة حيث
تكدّست النقاط أعطت إرهاصات عمّا سُوي لاحقاً
بالجاذب العجيب أو الغريب (Strange attractor). كمن
الاستنتاج الرئيسي لدراسة بوانكاريه أن مسار الكواكب
لا يمكن التنبؤ به بدقة لأنه غير دوري على المدى
الطويل، أي أن المنظومة سوف تعيش في حالة
عشوائية شواشة إن عاجلاً أم آجلاً ولفتره طويلة من
الزمن لا يمكن الهروب منها أو تجنبها في المنظومة
الشمسية

رابعاً: الجاذبات في النظم الديناميكية

هناك نوعان شائعان لهذه النظم:

1. مُشَبَّهة للطاقة أو مخدّدة (مثال حركة كرة
بندول في وسط احتكاكي كالهواء، حيث تتوزع
طاقة كرة البندول على جزيئات الهواء من خلال
الاحتكاك ومن ثم لا يمكن استرجاعها) وعند رسم
حركتها داخل فضاء الطور فإن سرعتها تعاني من

د- الجاذب مُحدّد الدورة Limit cycle: يظهر هذا الجاذب عند دراسة البندول القصري (self-oscillatory system) ، وهو النموذج الرياضي المستخدم في توصيف حركة القلب البشري وقد استنتجها العالم فان دير بول، حيث تحتوي معادلته التفاضلية من المرتبة الثانية: $\frac{d^2x}{dt^2} - \mu(1 - x^2)\frac{dx}{dt} + x$ على حدّ تخميد للطاقة (يتضمّن لثابت μ . الجاذب هنا مسارٌ مغلقٌ ممثّل للحركة الاهتزازية، ومع ذلك فإننا لو بدأنا الحركة من الشروط الابتدائية خارج أو داخل هذا السريان المغلق فإن المسار سوف يتقارب له قسرياً كما هو موضح بالشكل (10).



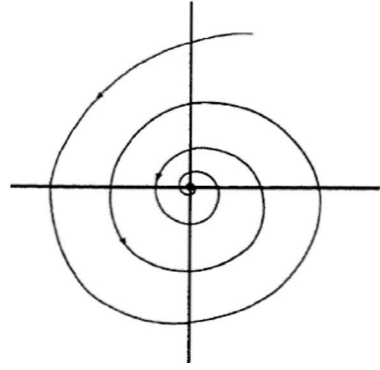
الشكل 9: بندول لا خطّي

ه- الجاذب العجيب strange attractor: هذا الجاذب هو العلامة المميزة للنظم العشوائية ولسيراتها الديناميكي داخل فضاء الطور، فلا يمكن التنبؤ به لأنه عبارة عن عددٍ لا نهائي من المسارات يتميز بالخصائص الآتية

- ينتج عن عدد قليل من المعادلات التفاضلية اللاخطية
- ينتمي إلى المجموعات الرياضية ذات الأبعاد الكسورية fractal dimension

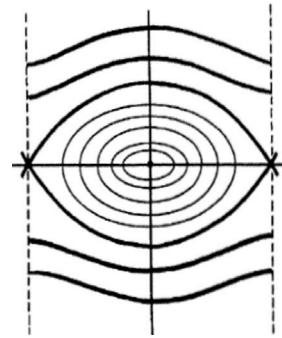
ويعود سبب تسميته بالعجيب إلى مخالفته للحدس كونه محتوئاً داخل حيزٍ محدود في فضاء الطور وفي الوقت نفسه يعتمد على أن أيّ نقطتين

ب- البندول الحقيقي: يتعرض البندول في الحقيقة لقوى احتكاك وبالتالي تقل سعة حركته من دورة إلى أخرى مما يجعله يستقرّ حتماً عند نقطة اتزان بصورة مؤكدة ما لم يتعرض لقوة تغذية من الخارج، ولذلك نقول إن الجاذب هنا نقطة (الشكل 8)



الشكل 8: بندول حقيقي

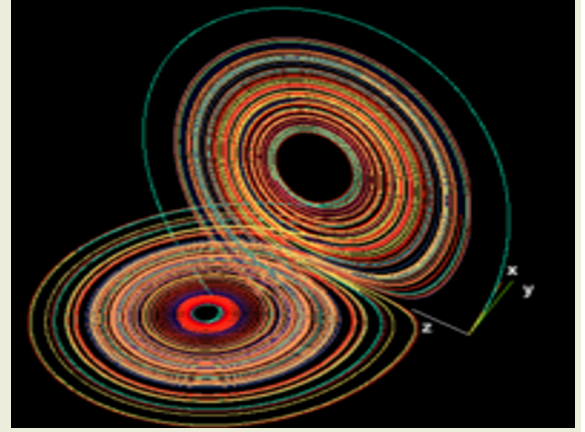
ج- البندول اللاخطي: هنا لا نستطيع تقريب $\sin \theta$ بـ θ ، بل ننظر إلى معادلة الحركة بصورتها الأصلية، لأن سعة الحركة كبيرة لدرجة أن الكرة قد تصل إلى نقطة التعليق وتدور في حركة دورانية بدلاً من الحركة الاهتزازية، ومن ثم ينقسم الجاذب إما إلى مسار مغلق إهليجي يصاب الحركة الاهتزازية أو مسار مفتوح يعبر عن الحركة الدورانية مع وجود فواصل بينهما (Separatrices). والعجيب في الأمر أن كرة البندول عندما تصل إلى نقطة التعليق لا أحد يستطيع التنبؤ هل هي ذاهبة إلى الحركة الدورانية أم إلى الاهتزازية (الشكل 9)



الشكل 9: بندول لا خطّي

المنظومة الشوّاشة الأكثر شهرة (لورنز- قديس الطقس):

جاذب لورنتزو ذو بُعد كسوريّ بين 2 و3 ويشبه عيني البومة أو جناحي الفراشة، وهو محتوى داخل حيز محدود من فضاء الطور، رغمًا أنه لا يلاقي نفسه أو يتقاطع، وهو يقدّم توصيفًا جيّدًا لنظام الطقس ذي التدفق الحتمي ولكن اللادوري Deterministic non-periodic flow.



الشكل 11: جاذب لورنتزو

يكن جمال دراسة التنبؤ بالطقس كمنظومة ديناميكية في عدد من الأسباب المنطقية - يمثل تحديًا قويًا لصلاحية القوانين الفيزيائية والعلاقات بين المتغيرات الترموديناميكية مثل درجة الحرارة ونسبة الرطوبة وسرعة الرياح وفروق الضغط - يمثل اختيارًا رائعًا لقدرتنا الحسابية في تتبع تطور منظومة ديناميكية معقدة يحكمها عددٌ من المعادلات التفاضلية

اللاخطية المقترنة coupled nonlinear differential equations.

- يقدّم فوائد اقتصادية رائعة من خلال تجنب كوارث الأعاصير المميتة وفيضانات الأمطار المُغرقة والحوادث العرضية الناتجة من التغيرات الفجائية للطقس، مثلًا أثناء عمليات الصيد في البحر

“الجبال ليست مخروطية الشكل، السحب ليست اسطوانية الشكل والبرق ليس خطًا مستقيمًا”

متقاربتين في الشروط الابتدائية تُنتجان نمطين من الطول المختلفة اختلافًا كبيرًا. وقد اقترح تسمية الجاذب العجيب الرياضيَّان رُويل وتاكنز تحت ما يسمى التنافس بين ظاهرئي المظّ والطيّ في فضاء الطور بشكلٍ مماثلٍ لكيفية صنع حوى التوفي عبر إجراء كثيرٍ من عمليات المظّ والطيّ بحيث أن أيّ نقطتين متجاذبتين قد تتقاربان أو تتباعدان لحظيًا، ومن أهمّ أمثله جاذب لورنتزو (الشكل 11)

خامسًا: مقارنة النظم الديناميكية

يوضح الجدولان التاليان الفروق الجوهرية بين الأنماط الثلاث من النظم الديناميكية: المُرتّب (Order)، الشوّاش (Chaos) والعشوائي (Random)، بالإضافة إلى الفرق بين النظم الخطية (linear) واللاخطية (Nonlinear)

سادسًا: الكسوريات؛ هندسة الكون الحقيقية
نحن نعلم أن النقطة ليس لها أبعاد فهي صفرية البعد $D=0$ ، والخطّ المستقيم له بعد مساوٍ للواحد الصحيح $D=1$ ، بينما الشكل المستوي له بعدان، والحجم يتمّ توصيفه باستخدام ثلاث إحداثيات. في الحقيقة كانت هناك إرهابات مبكرة حول أن هناك بعض الأشكال الهندسية لها أبعاد كسرية، ولكن الكسوريات غدت علمًا عندما أصدر بنوا مندلبروت (1924-2010) كتابه الأول بعنوان الشكل والصدفة والبعد form, chance and dimension وقد أعقبه

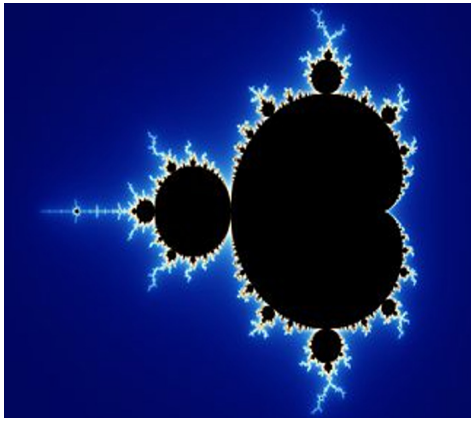
لكون هي الكسورية الملائمة لتركيباتها الغنية والمليئة بالتفاصيل الدقيقة والتجاويف الكثيرة والتماثل الذاتي. من الجميل أن نعرف أن الرئة ذات تركيب تفّرعي من أجل أن تعطي مساحةً سطحية كبيرة مقارنة بالحجم الذي يحويها، ممّا يلائم كفاءةً عظيمة أثناء عملية تبادل الغازات في عمليتي الشهيق والزفير

يشير مصطلح "كسور" إلى شكل مُكوّن من أجزاء مشابهة للكل، ما يعرض التناظر عبر المقاييس. في حين تفشل الهندسة الإقليدية في وصف العديد من الهياكل في الطبيعة والفيزياء، توفّر الهندسة الكسورية إطاراً لقياس تعقيدها الفطري. هذا يدلنا على الحكمة وراء سر تفرعات الأشجار وتجفّعات المجرات واضطرابات الموائع بسبب التماثل التآلفي الذاتي (self-affine) أو

التماثل الذاتي الصحيح (exact-self similar) في أنماطها. فقط من خلال استخدام المخططات التكرارية للمعادلات الديناميكية غير الخطية، يمكن توليد مجموعتي ماندلبروت وجوليا اللتين تحاكيان الأشكال الطبيعية الخرافية كما هو موضح في الشكل (13) الجدير بالملاحظة أن المعادلة المنتجة للشكل

المنظومة الفيزيائية (System)	عشوائي أو إحصائي (Randomness)	شواش (Chaos)	نموذج كلاسيكي ذو ترتيب (order)
مثال نموذجي	رمي النرد	السحب - الطقس	الساعات - الكواكب
الاحتمالية والتنبؤية	لا يوجد تنبؤ سوى كوسطي للأعداد الكبيرة	تنبؤ محدود لفترة قصيرة	عالية الدقة في التنبؤ
تأثير عدم الدقة في قياس الشروط الابتدائية	لا شيء سوى الأخطاء	يتزايد عدم اليقين أسياً ويصبح هو المسيطر مع تطور المنظومة	ضعيف ويبقى دائماً متناسباً مع الحل
درجات الحرية وأبعاد المنظومة	لا نهائي	قليل	محدود
التحكّم	ضعيف	صعب ومخادع	سهل ومتاح
جاذب	لا يوجد	عجيب وذو بعد كسوري	مسار مغلق (مثل دائرة)
لا خطي Nonlinear		خطي Linear	
قانون بسيط يؤدي لسلوك معقد، اختلاف بسيط في قيم البارامترات يؤدي لتأثيرات ضخمة.		قواعد بسيطة تؤدي لسلوك سهل الصياغة والفهم، المدخلات تتناسب مع المخرجات تناسباً خطياً	
يقينية محدودة وسلوك شاذ يحمل الكثير من المفاجآت مثل التنظيم الذاتي - self-organizations أو التآزري cooperative		يقينية تامة ولا توجد مفاجآت أثناء تطور المنظومة مع الزمن	
الكل لا يساوي مجموع الأجزاء		مجموع تأثيرات الأجزاء يعطي تأثير الكل	
مثال: معادلة KdV-Burger $\frac{d\theta}{dt} + \theta \frac{d\theta}{dx} + \frac{d^3\theta}{dx^3} = \frac{d^2\theta}{dx^2}$ يُضفي الحد اللاخطي $\theta \frac{d\theta}{dx}$ خواصً خلابة للمعادلة لدرجة أنها قد تنتج موجاتٍ شبيهةً بخواص		مثال: $\frac{d^2\theta}{dt^2} = -I^2\theta$ الحل دالة دورية جيبية أو تراكب Superposition دوالٍ جيبية، يتغير الحل بانتظام طوال تطور المنظومة	

يكتاب أكثر عمومية بعنوان fractal geometry of nature، وقد حوى معظم أفكاره والتي دائماً ما يذكرها مثل أن "السحب ليست اسطوانية الشكل ولا الجبال مخروطية الطبيعة حتى البرق ليس خطاً مستقيماً". إن الطبيعة تحب وترغب في الهندسة الكسورية كما يبيّن الشكل (12) إذن من السهل القول إن الهندسة الرسمية



الشكل 13: أشكال شبيهة بمجموعتي ماندلبروت وجوليا.



رئتان



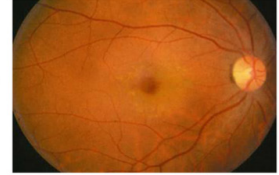
خارطة جغرافية



جبل



← أوعية دموية
أو نسجية →



الشكل 12: أمثلة عن ظواهر طبيعية تتجلى فيها الكسوريات.

طبيعية أو ذات تركيب يتضمّن عنصر العشوائية، حيث لا تكون الأخيرة تامّة الانتظام، كأن تكون تآلفية ذاتياً self-affine (أي تحقّق الصمود عبر تغيير المقاس بنسب غير منتظمة في المناحي) أو تكون متماثلة ذاتياً إحصائياً statistical self-similar (أي تحقّق الصمود عبر تغيير المقاس بالنسبة لخصائص إحصائية إجمالية)، مع ملاحظة أن الطبيعة لا بد أن تعطي كامل الحظوظ للصدفة والعشوائية البناءة والخلاقة

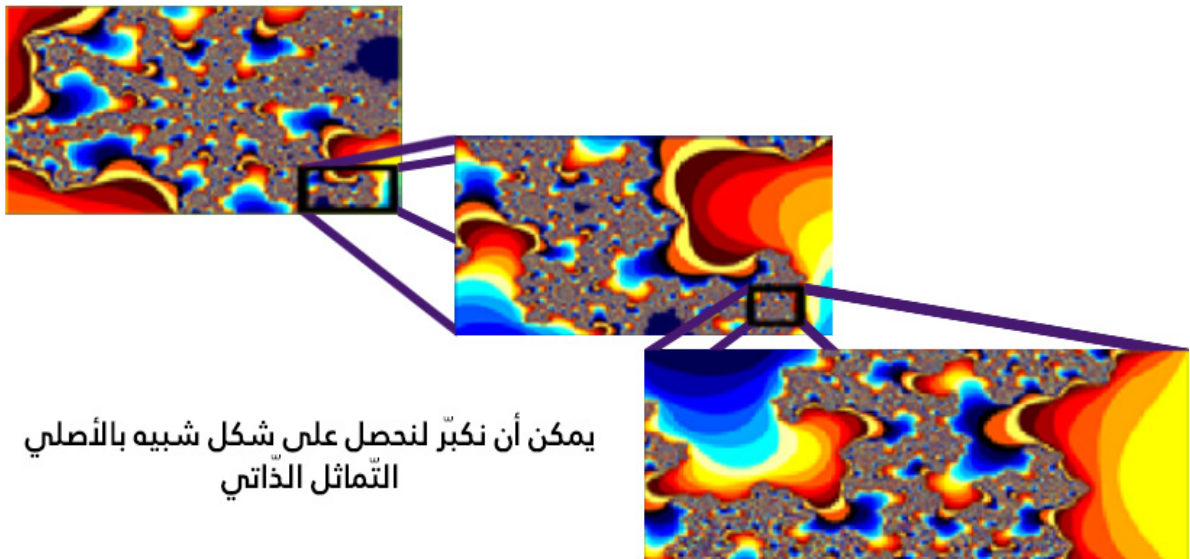
الكسوريات الرياضية الأحادية mono-fractals: يمكن إنشاؤها بواسطة علاقات رياضية صارمة

الرائع غايةً في البساطة تُعرّف بشكلٍ تكراري في المستوي العقدي على النحو $Z_{i+1} = Z_i^2 + C$ ، حيث C عددٌ عقديّ ثابت (متغيّر) في مجموعة جوليا (ماندلبروت)

من الجميل لنا أن نتعرف أيضاً على ما يسمى التماثل الذاتي -أو ما يُعرّف أيضاً بالصمود إزاء تغيير المقاس- الضروري لتوليد الكسوريات من حيث أنها تتولّد عبر تكرارٍ عمليّة تقسيمٍ متتالي، وكل تقسيم ينجم عنه شكل شبيه بالأصلي (الشكل 14)

سابعاً: أنواع الكسوريات:

تنقسم الكسوريات إلى كسوريات رياضية وكسوريات

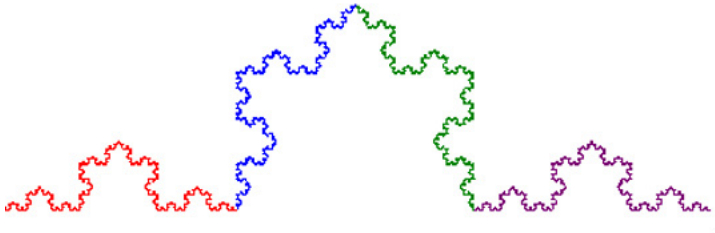
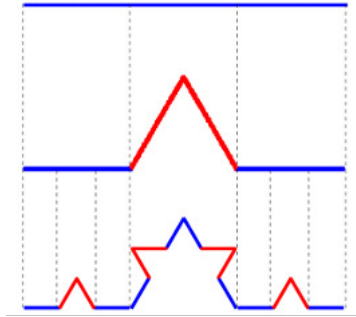


يمكن أن نكبّر لنحصل على شكل شبيه بالأصلي التماثل الذاتي

الشكل 14: التماثل الذاتي.

ب- **منحني كوخ Koch Curve**: ومرة أخرى نُعيد عملية إنشاء مجموعة كانتور، ولكن باستبدال مقطعين بالجزء الأوسط كما في الشكل (16) فنحصل على مجموعة كسورية بين الخط المستقيم والمستوي بُعدها

$$D_f = \frac{\log N}{\log r} = \frac{\ln 4}{\ln 3} = 1.2618$$



الشكل 16: منحني كوخ.

تُعطي قيمة البُعد الأكبر من الواحد الصحيح بالقيمة 0.2618 إشارة على درجة معتدلة لتعشُم

المستقيم ذي البعد

المساوي للواحد. لك أن

تعرف أن شبكية العين

لها بُعد كسوري يساوي

تقريبًا 1.723 وبالتالي

شكلها الكسوري أقرب إلى

المستوي منه إلى الخط المستقيم

ج- **مثلث سيربنسكي Sierpinski triangle**: كما يبيّن

الشكل (17)، نبتدئ هنا بمثلث متساوي الأضلاع حيث

نقسم أضلاعه إلى جزأين متساويين ونوصل النقاط

لنصل إلى المثلث المتوسط الأبيض، وب حذفه نحصل

على مثلث منقوص الربع الأوسط، ونستمر في هذه

وتكرارية يتم وصفها بمتغير واحد، ألا وهو البعد الكسوري fractal dimension، ونورد فيما يلي بعضًا من أمثلتها.

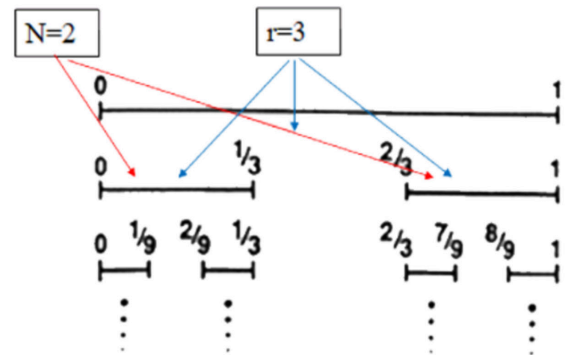
أ- **مجموعة كانتور أو غبار كانتور Cantor Set**: نبدأ بقطعة مستقيمة وليكن طولها الواحد تُقسّم إلى ثلاثة أجزاء متساوية، ثم يُنزع الجزء الأوسط لنحصل على جزأين متساويين. نكرّر العملية على الأجزاء المتبقية عددًا كبيرًا من المرات حتى نحصل على مجموعة نمطية -تمثّل التقاطع اللانهائي للأجزاء التي نحصل عليها في كل مرة- ينعلم قياسها وفق لوبيغ، وكذلك بُعدها الطوبولوجي بخلاف بُعد هاوسدورف الكسوري -والذي يقيس "خشونة" المجموعة قيد الدراسة- الخاص بها والمُعطى بـ

$$D_f = \frac{\log(N)}{\log(r)}$$

حيث N هي عدد الأجزاء بعد عملية حذف الجزء الوسط

و r نسبة التقسيم لنصل إلى قيمة بُعد كسوري

مساوية تقريبًا لـ 0.6309 (الشكل 15)



الشكل 15: بُعد مجموعة كانتور.

لقد حصلنا على مجموعة رياضية تحوي عددًا غير

عدود من النقاط، وليست خطأً مستقيماً ولا نقطة

أيضاً ولكنها مجموعة هندسية ذات أبعاد كسورية.

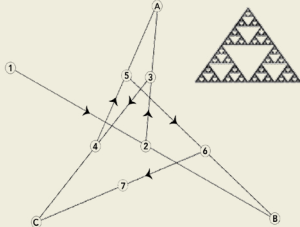
يوضّح لنا المثال مدى سهولة اختزال البُعد الخطي

إلى بُعد كسوري

تجربة ذهنية جميلة: هل التداخل الضوئي عبارة

عن لعبة شواشيّة كونية؟!

ليبان وجه النظر المراد إيصالها والتي قد يكون لها مردود فلسفي عميق، تخيّل أنه لدينا مثلث متساوي الأضلاع رؤوسه A, B, C، وأن هناك نردًا أوجهه عبارة عن الثلاثة حروف السابقة كما موضح بالشكل (18)



الشكل 18: لعبة الشواش

نبدأ التجربة من النقطة (1) حيث نرمي النرد لنحصل مثلاً على B، فنقف في منتصف المسافة بين (1) والرأس B، ولتكن النقطة (2). ثم نكرّر رمي النرد لنحصل مثلاً على A، فتكون النقطة (3) منتصف القطعة A-(2) بداية المحاولة التالية، وهكذا نكرّر العملية آلاف المرات لنحصل على شكل سيربنسكي الكسوري بكل تفاصيله من التماثل الذاتي الصارم،

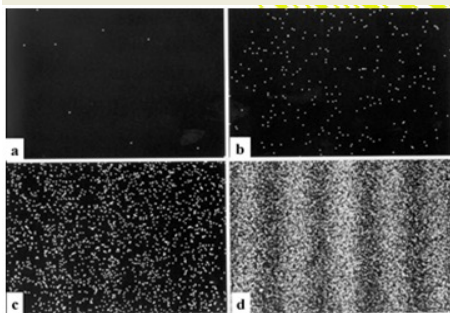
طارحاً الأسئلة الآتية عن سبب

- انتظام الشكل الناجم على الرغم من وجود عنصر الصدفة الناتج عن وجود النرد

- هناك نقاط متاحة للتكدّس والتجمع، وهناك نقاط خالية ممنوعة على لعبه النرد

- بقطع النظر عن أيّ نقطة خارج المثلث نبدأ منها، فإننا سوف ننتهي داخله

ولكن السؤال الأهم يبقى: أليس هناك تشابه كبير بين التجربة السابقة وتجربة التداخل الضوئي للفوتونات المنفردة من حيث التداخل البناء والتكديس في مناطق واستحالة التواجد في مناطق التداخل الهدّام؟ (الشكل 19)



الشكل 19: التداخل للفتونات والهدّام

الإجرائيّة الرياضيّة مرات عديدة لنحصل على منظومة كسوريّة يُبعد كسوريّ مساوٍ لـ $D_f = \frac{\log M}{\log r} = \frac{\ln 3}{\ln 2} = 1.585$

الشكل 17: مثلث سيربنسكي. $r=2$

ثامناً: مقارنة بين الكسوريّات الرياضيّة والطبيعيّة

هناك من الأشكال الكسوريّة ما يخلب الألباب بسبب غناها اللامتناهي. يوضّح الجدول التالي الفرق بين الكسوريّات الطبيعية والرياضية

الكسوريّات الرياضيّة	الكسوريّات الطبيعيّة
تولد من خلال خوارزميات صارمة، والشكل الناتج يكون متماثلاً إلى أدق تفاصيله	هي من نتاج الطبيعة ولذلك من الضروري وجود عنصر عشوائي أو احتمالي أثناء عمليات تكوينها
ذات تماثل ذاتي حيث الجزء الصغير عند تكبيره يحمل كل تفاصيل الشكل الأصلي	التماثل بصورة إحصائية حيث هناك تشابه بصورة تقريبية بين الجزء الصغير عند تكبيره والشكل الأم
يمكن التوصيف بعدد واحد وهو بعد التماثل الذاتي $D_f = \frac{\log N}{\log r}$	لا بد من توصيفها بعدد كبير من المتغيرات مثل البعد الكسوري D_f ، والإنتروبي D_i ، والترابطي D_c .
مجموعة جوليا	شبكة العين - الرئة

تاسعاً: ميزات الكسوريّات وتطبيقاتها

تُقاس الكسوريّات ببعدها الكسوريّ الذي يعبر عن كيفية ملء كائنٍ للوسط المحيط به مقارنةً بالهندسة الصحيحة العادية. معظم الكسوريّات الطبيعية تتراوح أبعادها بين 1.5-2.5، وتشمل المؤشرات ذات الصلة التجويفية التي تقيس أحجام الفجوات ودرجات الالتصاق والخشونة والتعرجات. تُولّد النظم الحقيقيّة كسوريّاتٍ عبر التغيّرات الفيزيائية ذاتية التنظيم أو قواعد النمو أو عمليات التطور بدلاً من مجرد العلاقات الرياضية التكرارية البسيطة. تتطلّب نمذجة الكسوريّات الطبيعيّة التركيز على الديناميكيات التي

لنسيج الزمكان عند أبعاد بلانك، وخصوصاً أن الهياك الكومومي يلعب دوراً مهماً في مصير كثير من العمليات الفيزيائية. يبدو نسيج الزمكان مثل محيطٍ سلسٍ ومستوٍ عند النظر من الطائفة، ولكن في الحقيقة قد يعجُّ القُحيط المستوي بالأعاصير والموجات العملاقة

3. هل هناك دور يمكن أن تلعبه الهندسة الكسورية في المصالحة بين ميكانيكا الكم والنسبية العامة لإنتاج نظرية مقبولة عن الجاذبية الكوموميّة؟
4. الأشكال المعقّدة فيها كثير من التعرجات والخشونة والانكسارات، ما يجعل صعباً استخدام المعادلات التفاضلية العادية، ولكن الكسوريات غير تفاضليّة بشكل رئيس، فهل هناك فرصة لما يُسقى بالحسابات التفاضليّة الكسورية مثل $\frac{d^{1/2}x}{dt^{1/2}}$

المراجع:

1. Chaos: Making a New Science, James Gleick, Penguin Books; First Edition (2008).
2. Chaos in the cosmos, the stunning complexity of the universe, B. Parker, Plenum Press (1996).
3. Chaos, I.A. Smith, oxford University press (2007).
4. Does God play dice? The Mathematics of Chaos, I. Stewart, Basil Blackwell Inc. (1990).

خبر

تشير النتائج الجديدة إلى أن آخر اصطدام كبير لمجرتنا حدث بعد مليارات السنين مما كان يُعتقد سابقاً. أصبح الاكتشاف ممكناً بفضل مركبة غايا التابعة لوكالة الفضاء الأوروبية، التي تقوم برسم خريطة لأكثر من مليار نجم في مجرة درب التبانة وما وراءها، متتبعاً حركات هذه النجوم وسطوعها وحرارتها وتركيبها.

المصدر: [ScienceDaily](https://www.sciencedaily.com)

تؤدي إلى التعقيد من خلال التدرج. هناك العديد من التطبيقات التي تستفيد من مفاهيم الديناميكا اللاخطية والتحليل الكسوري في مجموعة متنوعة من المجالات من مثل

- محاكاة أحوال الطقس والمناخ والهيدرولوجيا والزلازل

- نمذجة أنماط النمو في علم الأحياء وعلم التشكل.

- تحليل التقلبات والتدرج في التمويل، وتصميم أدوات التداول في الأسواق التجارية

- تفسير الفوضى في النيوترونات والشبكات العصبونية

- تطوير مخططات التشفير باستخدام خرائط فوضوية ذات تعقيد عالٍ

- تحسين شبكات اللاسلكي مع مراعاة تجانس التغطية

- بناء هوائيات كسورية لأجهزة الاتصال متعددة النطاق

- تصنيف الإشارات والصور والبيانات باستخدام الأبعاد الكسورية

- محاكاة الرسوميات الحاسوبية للواقع المتصقّن مثلاً لمناظر طبيعية

- إنشاء فنٍّ وعمارةٍ كسوريّين ذوي خصائص جمالية مُرضية

عاشراً: أسئلة مفتوحة أمام الأجنحة البحثية

Open problems للعلوم

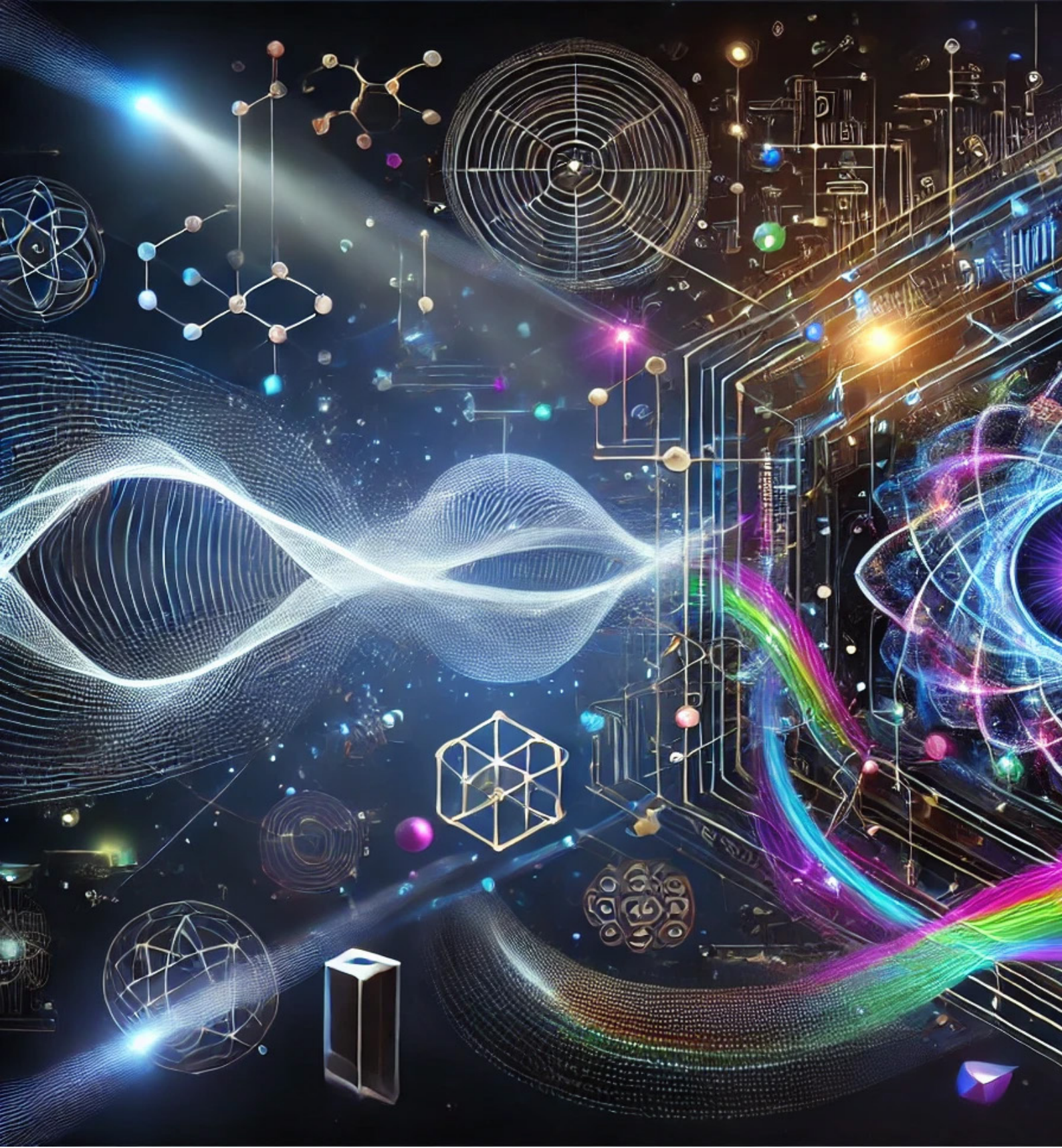
1. هل هناك دور للبنية الهندسية الكسورية من أجل فهم عمل الدماغ ومن ثم طبيعة الوعي الإنساني وخصوصاً أن البنية الدماغية لها خصائص كسورية واضحة؟

2. يثار كثيراً من الجدل حول الطبيعة الكسورية



الضوء الكمومي واختبار أسس ميكانيك الكم

عبدالله قنيزح, ماجستير في الهندسة الطبيّة, سوريا



نقدّم هنا عرضاً موجزاً للضوء الكمومي، هذا المجال الذي يشغل أهميّة كبيرة في الأبحاث الراهنة سواء أكانت في المجالات التطبيقية -من مثل الليزر- أو في المجالات النظرية حيث يمكن اختبار أساسيات ميكانيك الكمّ عبر تجارب تتضمّنه -من مثل تجربة الخيار المتأخّر (المسّقة أيضاً تجربة المحاة الكمومية).

أولاً: نظرة إجمالية

اكتسبت هكذا صفةً الجسيم من حيث امتلاكها لطاقةً واندفاعٍ مُحدّدين، بقيت طبيعة الضوء الأساسية لغزاً لغاية سنة 1928 عندما بيّن أخيراً ديراك Dirac عند توحيد ميكانيك الكمّ اللانسبوي مع النسبية الخاصة Special Relativity ضرورة تعديل صورة سلوك الضوء المستمرّ continuous الذي تُبرزه معادلات ماكسويل ودياكة مفهوم الفوتون ضمن نسيج نظرية ميكانيك الكمّ، وبالتالي ننتقل من صورة الحقل المستمرّ الكلاسيكي إلى نظرية حقل كمومي Quantum Field Theory عبر تقنية التكمية الثانية Second Quantization، حيث تُعتبر مركّبات فورييه للحقول الكلاسيكية بمثابة مؤثّرات تخضع لقواعد تبادل قانونية [1]. بدا ذلك عندها أمراً صعباً على الفهم، وكانت الرياضيات التي تضقنها صعبةً نسبياً، ولكن شيئاً فشيئاً بدت هذه الاستراتيجيّة قادرةً على تفسير جميع الأمور المتعلّقة بالضوء، وبيّنت أن الضوء في جميع مجالات تطبيقه ما هو في الحقيقة إلّا ضوءً كموميّ Quantum Optics يكمن الأمر اللافت للنظر هنا في أن الأمور المُثيرة تحدث عندما تسلك كقّات الضوء-الفوتونات العديدة سلوكاً مترابطاً Coherent، بعيداً كلّ البعد عن الفوضى Chaos التي تحدث عندما تتصرّف الكقّات بشكلٍ عشوائي Random. يألّف العاملون في مجال الأمواج الراديوية -وهي نوعٌ من الموجات الضوئية ذو أطوال موجية كبيرة وبالتالي لا تنتمي إلى الضوء المرئي- وجودَ إشاراتٍ مترابطة correlated، فالراديو والتلفاز-الرأسي وكلّ وسائل الاتّصالات Communications الأخرى تتجلّى في ظواهر تسلك فيها جميع الكقّات السلوك نفسه تقريباً بدلاً من أن تتصرّف بشكلٍ عشوائي. يصف العاملون بالأمواج

يمثّل حقل فيزياء الضوء مجال أبحاثٍ قديمة تعود ربّما لأيّام الإغريق، ولكننا لم نتعلّم كثيراً عن ماهيّته لغاية حوالي بداية القرن التاسع عشر عندما غداً واضحاً أن الضوء عبارة عن أمواج waves -استغرقتنا حوالي قرنٍ إضافيٍّ من الزمن لمعرفة طبيعتها- وتحقّقت أكثر الاكتشافات المتعلّقة بالكهرباء والمغناطيسية. وأخيراً تمّ تأطير حقلّي الفيزياء هذين ضمن صياغة واضحة وضعها ماكسويل Maxwell عام 1860 بيّن فيها أن الضوء عبارة عن موجة كهرومغناطيسية، وبدأ أن كلّ شيء واضح لغاية بداية القرن العشرين، حيث أضى جلياً وجودَ ظواهر يسلك فيها الضوء سلوك جسيمات، ليست تقليديةً بالمعنى المألوف بل تسلك سلوكاً غريباً يجمع بين المظهرين الموجي Wave والجسمي Particle. ما كان غريباً وقتها هو ارتباط هذه الاكتشافات المتعلّقة بالضوء باكتشافاتٍ تتعلّق بطبيعة المادّة matter، إذ تبين أن المادّة أيضاً تسلك أحياناً سلوك موجاتٍ ممّا شكّل صدمةً لفيزيائيي العقود الأولى من القرن العشرين. وضح ميكانيك شرودينغر الكمومي اللانسبوي Non-relativistic Schrodinger Quantum Mechanics هذه الطبيعة الكمومية للمادّة، بينما عجز عن معالجة طبيعة الضوء وذلك بسبب حاجة الأخير إلى معالجة نسبوية. على الرغم من التقدّم في فهم طبيعة الضوء -فرضية تكميم الطاقة لبلاك 1900، وتألّف الضوء من "كقّات" Quanta (دُعيت فوتونات Photons) في المفعول الكهروضوئي 1905 والذي بفضل حاز أنشتاين جائزة نوبل 1921، ثمّ مفعول كومبتون 1923 في تفسير تغيّر تواتر الأشعة السينية المتبعثرة عبر عزو اندفاع (كمية حركة) نسبوي لكقّة الضوء التي

جائزة نوبل على أعمالهم في مجال الميزر- دوراً كبيراً في اختراع الليزر (عام 1960) الموافق لتوليد موجات مترابطة في مجال الضوء المرئي ذي الأطوال الموجية القصيرة. نجح العلماء في تحقيق هذا الأمر من خلال فهم عميق للتأثير Interaction بين الضوء المرئي والمادة، ولكن ما هو لافت للنظر هو أن عملهم النظري هنا كان قائماً على وصف نصف كلاسيكي للتأثير حيث وُصفت المادة كموميّاً بينما كان يوصف الضوء كلاسيكياً كحقل مستمر، ولذلك كانت نظريتهم رغم نجاح اعتمادها في صنع الليزر غير كاملة، وما عمل عليه النظريون لاحقاً في مجال الضوء الكمومي تمثل في إيجاد صياغة رياضية كمومية للترباط الضوئي الذي يحققه الليزر، عبّرت عن النظرية الإحصائية لسلوك كمّات الضوء تتضمن مؤثرات Operators خلقها Creation وإفنائها Annihilation، أي باستخدام لغة الإلكتروديناميك الكمومي QED. سمح ذلك في تحقيق تطوّرات هائلة في مجال التقانة وصنع العناصر الضوئية الإلكترونية Optoelectronic devices بخصائص ملائمة، ولكنه ساهم أيضاً في اختبار أسس ميكانيك الكمّ وفتح الباب أمام أبحاث في مجال الحوسبة والاتصالات الكمومية Quantum Communication/Computers. سوف نعرض السمات الرئيسية لليزر والحالات المترابطة في الضوء آخذين بالاعتبار وجود أدبيات غزيرة في هذا المجال، ولكننا سنتعرّض بعدها لمجال أقلّ ألفة، وهو التجارب الضوئية التي تسمح باختبار أسس ميكانيك الكمّ ذات المقترضات المُخالفة للحدس، وسنختار كمثال في مقالنا هذا تجربة الخيار المتأخّر لويلر [3 Wheeler]

ثانياً: تعريف وأساسيات

الراديوية هذه الحالة الأخيرة العشوائية بالضجيج Noise، وعلى الرغم من انتشارها الهائل في حياتنا، فإن الجهد ينصبّ الآن على تحضير ظروف يتم خلق الترابط Coherence خلالها. يتعلّق الترابط إذن بتلك الظروف حيث تتصرّف جميع الكمّات بشكل متشابهة ومنتظم، ما يعني وجود شيء يمكننا التنبؤ به. قابلية التنبؤ Predictability هذه هي أساس الاتصالات، فبدونها وبدون انتظام الظواهر لا يمكننا الاتصال مثلاً. تعلّمنا الكثير عن الترابط خلال العقود الأخيرة : عن ماهيته وعن كيفية خلقه والمحافظة عليه، وكان للعالم غلاوبر Glauber الحائز على جائزة نوبل بفضل أعماله في مجال الضوء الكمومي دور كبير في هذا المجال، وعلى الأخص فيما يُسمّى بالنظرية الكمومية للترباط الضوئي Quantum Theory of Optical Coherence [2]، وهي تتعلّق بمسألة كيفية جعل هذه الأعداد الكبيرة من الفوتونات تسلك السلوك نفسه والقابل للتنبؤ بشكل كبير. لقد تمّ تحقيق تقدّم كبير في هذا المجال على الصعيدين النظري والتجريبي.

يمثّل الليزر Laser المثال الأهمّ عن التقدّم التجريبي هنا. الليزر جهاز تمّ اختراعه على مراحل إذ بدأ في مجال الموجات المكمروية microwaves ذات الأطوال الموجية الكبيرة (التواترات المنخفضة) من خلال ما يُعرّف بالميزر maser، حيث اكتشف العلماء بعد الحرب العالمية الثانية أن أحد استعمالات الرادار هو في جعل هذه الموجات المكمروية تتأثر وتتواصل بشكل مترابط مع مغناطيسية النوى، وتمّ اختراع مُشعّات مكمروية microwave radiators تولّد حزم موجات مكمروية تتمتع بالترباط. لعب تاوونز Townes الذي حاز مع باسوف Basov وبروخوروف Prokhorov

والفيزياء عموماً، ممّا فتح آفاقاً جديدةً لأفكار وتقانات جديدة في مجالاتٍ من مثل الضوء الذري ومعالجة المعلومات. في الحقيقة، استلزم الأمر عقوداً حتى أخذ مُصطلح الضوء الكمومي معناه الدقيق والضروري لوصف ظواهر كموميّة، فمن اللافت للنظر أنه عند اختراع الليزر كان الوصف شبه الكلاسيكي لتأثير الضوء مع المادة كافياً، ولم يكن ضرورياً استخدام نظريّة الحقل الكمومي للضوء -التي تعود في أسسها الأولى إلى عمل ديراك في عشرينيّات وثلاثينيّات القرن العشرين-، ولم تتجلّ الظواهر الكموميّة حصرًا إلا بعد مرور زمن، وخاصّةً بعدما نجح غلاوبر بتطبيق لغة الحقل الكموميّة للضوء على أجهزة ضوئية كلاسيكية من مثل مُداخل مايكلسون النجمي Michelson Stellar Interferometer وكواشف Detectors الضوء. تكلم الناس إذن عن "فيزياء ذريّة" أو عن "إلكترونيّات كموميّة" لوصف التأثير بين المادّة والإشعاع لغاية 1960 فُرِّجَين أكثر على المادّة، بينما أضحى "علم الليزر" المهتمّ بمبادئ وتصميم واستعمالات الليزر مجالَ بحثٍ مهمّاً مع تركيزٍ على خصائص الضوء الموافق عند استقصاء المبادئ الكموميّة لعمل الليزر، وشيئاً فشيئاً غدا مصطلح الضوء الكمومي مألوفاً [4]

مع تطبيق ميكانيك الكم على الضوء، تمّ فهم آليّة الكشف الضوئي Photodetection بعمقٍ أكبر، وتمّ وضع الأسس النظرية للمعالجة الإحصائية Statistics للضوء من خلال لغة مؤثرات خلق وإفناء الفوتونات. قاد ذلك إلى مفهوم الحالات المترابطة [5 Coherent state] كمفهومٍ يميّز ضوءً منابغ الليزر عن ضوء المنبع الحراري، وعندما أوجد تجريبياً كيمبل

يعنى الضوء الكمومي بدراسة التأثيرات بين المادّة وحقل الإشعاع حيث الآثار الكموميّة مهمّة. يتعلّق قسمٌ مهمٌ من الدراسة هنا باقتضاءاتها فيما يخصّ أسس ميكانيك الكم، ولكن السؤال الرئيس في الضوء الكمومي يكمن في وجوب تكميم الحقل الكهرمغناطيسي أم لا من أجل الحصول على الصورة الصحيحة للتأثير بين المادّة والحقل الكهرمغناطيسي وكيفيّة توصيف امتصاص Absorption الأخير أو تبعثره Scattering أو إصداره Emission . أقنع التنبؤ النظريّ بظاهريّ تحزيم الفوتونات المُضادّ Antibunching- حيث تصل الفوتونات إلى الكاشف في بعض التجارب بشكلٍ منفصلٍ وليس معاً كما يتنبأ النموذج الكلاسيكي- وعُضِر الفوتونات Squeezing- حيث تكون موجة الفوتون "معصورة" في أحد الاتجاهات وممتدّة في الاتجاه العمودي- والتحقّق التجريبيّ منهُما الباحثين بضرورة تكميم الحقل وبدؤوا يركّزون أنظارهم على الآثار الكمومية غير الكلاسيكية للضوء من مثل التشابك الكمومي Quantum Entanglement

الضوء الكمومي هو إذن مجال بحثٍ تقع عند تقاطع الفيزياء الذريّة والجزيئية والضوئية، وأهم سماته الفميّزة هي تعامله مع الليزر -منابع الإشعاع الكهرمغناطيسي المترابط-. من الواضح الآن أهميّة الضوء الكمومي في حياتنا اليومية وذلك بسبب الاستخدامات المتزايدة لليزر منذ اختراعها أوائل ستينات القرن المنصرم: في الطب، والاتصالات، وعلوم البيئة، وعلوم القياسات، والبيولوجيا، إلخ. علاوةً على ذلك، وخلال العقدين الأخيرين من الزمن تبين أن هناك خصائص كثيرة لضوء الليزر يمكن استخدامها في البحوث عن أساسيات ميكانيك الكم

الذرات فوتوناتها في اتجاه واحد وبالتواتر والطور نفسها. رياضياً، تُعرّف الحالة المترابطة وفق أحد الشروط الثلاث التالية المتكافئة: إنها الحالات الذاتية Eigen states لمؤثر الإفناء Annihilation Operator (أي الحالات التي لا تتغير عند إضافة أو امتصاص فوتون منها)، أو هي الحالات الناجمة عن تطبيق مؤثر الانسحاب Displacement Operator (تركيب مُعيّن من مؤثري الموضع والاندفاع) على حالة الفراغ (الحالة المُعرّفة بأنها لا تحوي أيّ فوتون)، أو -أخيراً- هي الحالات ذات الارتياح الأصغري Minimum Uncertainty State (أي التي تحقق المساواة في متراجحات هايزنبرغ للارتياح) بتشتتين نسبئين للموضع وللاندفاع متساويين. يُبرهن كذلك أن الحالة المترابطة هي التي توافق توزيعاً إحصائياً بواسونياً Poissonian لعدد الفوتونات التي يمكن كشفها فيها، وبالتالي يكون متوسط هذا العدد مساوياً لتباينه (مربع انحرافه المعياري). يمكن بتطبيق بعض المؤثرات المُعبّرة عن تأثيرات غير خطية تحويل الحالة المترابطة إلى حالة مترابطة معصورة Squeezed Coherent State، حيث يكون التوزيع الإحصائي لعدد الفوتونات المُكتشفة بواسونياً فوقياً super-Poissonian (التباين أكبر من المتوسط) أو تحتياً Sub-Poissonian (التباين أصغر من المتوسط).

رابعاً: الميزر والليزر [6]

الليزر اختصار لعبارة "تضخيم الضوء عبر الإصدار المحثوث للإشعاع" Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation، وهو جهاز يُصدر ضوءاً مترابطاً مكانياً وزمنياً. يسمح الترابط المكاني Spatial Coherence ببقاء حزمة الضوء ضيقةً وبتركيزه ضمن بقعة صغيرة جداً، ممّا سمح

Kimble عام 1977 نُظماً حيث تُصدر الفوتونات عن ذرة منفردة واحداً فواحداً ازداد الاقتناع بأن هذه المعالجة الكمومية الإحصائية للضوء تمثل فعلاً ما يحدث في نظم الضوء الكمومي

فتح تطويز الليزر النبضية فائقة القصر Ultrashort Laser Pulses -بواسطة تقنيات تعديل الجودة Q switching حيث تكون حزمة الخرج نبضيةً وبذروة تفوق بكثير ما يمكن أن ينتجه الليزر لو كان يعمل في مجال الموجة المستمرة ممّا يؤدي إلى معدلات تكرار نبضات أخفض وطاقات أعلى ومدّة أطول- الباب أمام تطبيقات كثيرة في مجال فيزياء الجسم الصلب (مطيافية رامان Raman Spectroscopy) وفي دراسة القوى الميكانيكية للضوء على المادة، ممّا يسمح بوضع عُمامات من الذرات في مصيدة ضوئية Optical trap حيث ساعدت هذه التقنية على تحقيق تكاثف بوز-أينشتاين Bose-Einstein Condensation وهو حالة فريدة من المادة تنبأ بها العلماء نظرياً منذ مدّة ولكن لم يتم تحقيقها تجريبياً إلا بعد فترة.

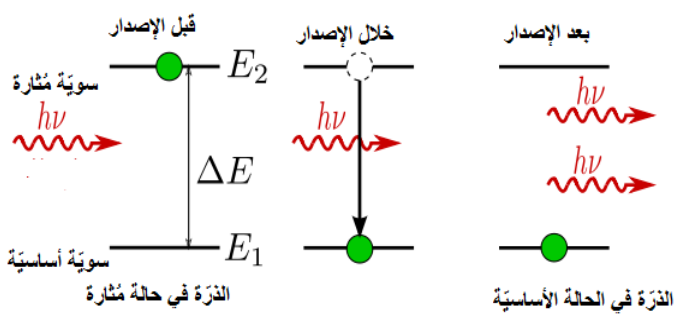
تمثلت إحدى نتائج الضوء الكمومي الأخرى المهمة في تصنيع نُظُم برهنت على صحة التشابك الكمومي Quantum Entanglement والنقل الكمومي عن بُعد Quantum Teleportation، وسمحت باختبار أسس ميكانيك الكمّ إزاء بدائل أخرى مثل نظرية المتغيّرات الخفية Hidden Variables Theory

ثالثاً: الحالات المترابطة

في مجال الضوء الكمومي، تصف الحالة المترابطة فيزيائياً حالة الحقل الكهرمغناطيسي المُكمّم الصادر عن منبع ليزريّ وحيد التواتر، حيث تُصدر

المحثوث مترابطاً، فتشارك جميع فوتوناتِه بقيم الطاقة والطور، ويكون لها الاتجاه والاستقطاب نفسها

تاريخياً، تمّت الدراسة والتصاميم الأولى على العيزر الموافق لتضخيم الموجات المكروية Microwaves وليس على الليزر الموافق لتضخيم الضوء المرئي، ولكنهما يقومان على المبدأ نفسه في وجود وسطٍ ماديٍّ مُضخَّم يوضع في حاوية رنينية Resonant Cavity، ويتمّ خلق تغذية راجعة Feedback تسمح بتوليد إشعاعٍ مترابط. تُفيد الميزرات حالياً كساعاتٍ ذرية دقيقة، كما أن هناك ظواهر عديدة في الفيزياء الفلكية يصدر فيها إشعاعٌ ميزريّ محثوث من الوسط بين النجوم Interstellar space.



$$E_2 - E_1 = \Delta E = h\nu$$

الشكل 1. آلية الإصدار المحثوث

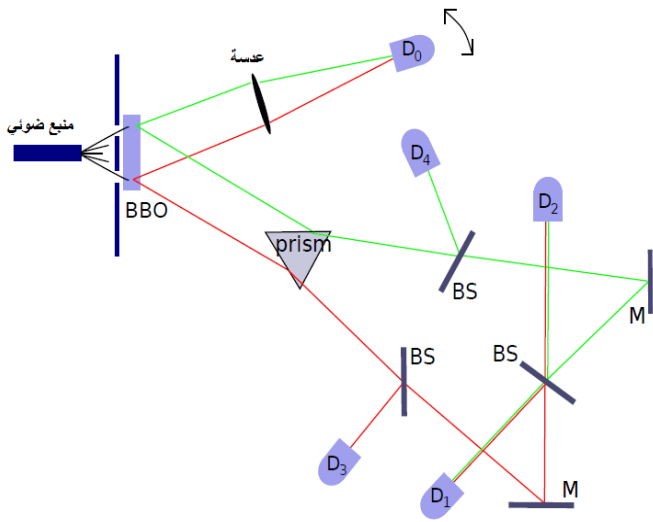
خامساً: اختبار تجربة الخيار المتأخر لأسس ميكانيك الكم

دأب العلماء ومنذ اكتشاف ميكانيك الكم إلى مناقشة مدى صحة مسلماته الأساسية، وفيما إذا كان ممكناً اختبارها وفق تجارب تتجلى فيها الظواهر الكمومية بشكلٍ يخالف حدسنا التقليدي، ومثّل الضوء إحدى أهم الأدوات التي مكنتهم من ذلك، سواء أكان ذلك عبر تجارب ذهنية Gedenken أم عبر تجارب حقيقية. من بين تجارب كثيرة سوف

بتطبيقاتٍ من مثل القطع بالليزر والمؤثرات الليزرية، أمّا الترابط الزمني Temporal Coherence فيسمح بإصدار ضوءٍ بتواترٍ واحد، فيكون ذا لونٍ وحيد. هناك تطبيقات كثيرة لليزرات تمتدّ من مساق الأقرص الضوئية Optical Disk Drives إلى تجهيزات الإظهار الضوئية Laser Lighting Displays مروراً بالطابعات الليزرية والألياف الضوئية والتطبيقات الطبية والعسكرية وغيرها.

يتألف الليزر من وسطٍ ماديٍّ بخواصّ تسمح بتضخيم الضوء فيه عبر آلية الإصدار المحثوث Stimulated Emission، حيث تتمّ إثارته عبر إسقاط ضوء خارجيٍّ عليه أو عبر حقنه بتيار كهربائي. يكون الليزر عادةً بشكل حاوية ضوئية Optical Cavity تتكوّن من مرآتين على طرفي الوسط حيث ينتقل الضوء جيئةً وذهاباً بين هاتين المرآتين مروراً بالوسط المُضخَّم، وينفذ قسمٌ منه للخارج مشكلاً خرج الليزر فيزيائياً، توضع إلكترونات ذرات الوسط المادي في سويةٍ طاقيةٍ عليا عبر امتصاصها لضوءٍ واردٍ مثلاً، فتصدر الذرات ضوءاً عندما تعود لسويتها الأساسية. يمكن أن يتمّ هذا الإصدار تلقائياً فيسمى بالإصدار التلقائي Spontaneous Emission ويكون طوره هنا عشوائياً يختلف من ذرة لأخرى، وبالتالي لا يكون مترابطاً. ولكن هناك آلية أخرى -الإصدار المحثوث- حيث يحرض ورود فوتونٍ بقيمٍ محدّدة للتواتر والطور والاستقطاب إصدار الذرات لفوتونٍ بالقيم نفسها للوارد -في حال كانت السوية الطاقية المُثارة أعلى من السوية الأخرى بمقدارٍ يعاثل تماماً طاقة الفوتون الوارد- كما في الشكل 1¹. وهكذا يكون الضوء

1 من الجدير ذكره أن ميكانيك الكم اللانسبوي يقدر على تفسير ظاهرة الإصدار المحثوث، بينما يعجز عن تفسير ظاهرة الإصدار التلقائي الأكثر ألفة -بسبب تشابهها مع ميل النظم في الفيزياء الكلاسيكية لتخفيض طاقتها- التي تحتاج لنظرية حقل كمومية نسوية للتفسير.



الشكل 2. الشكل 2: يُبثع منبع ضوئي على الشقين. تسمح بلورة BBO بشطر الفوتون إلى فوتونين متشابكين entangled. يكشف الكاشف D0 "فوتون الإشارة" المتحرك للأعلى ويبين وجود أهداب تداخل أو عدفه. يتلقى موشور "الفوتون الوسيط" ليمر بعدها في أجهزة شطر حزمة BS ومرايا M. [المرجع 8]

شاطر حزمة (BS) لينعكس عنه نحو الكاشف (D3) (D4) أو لينفذ منه نحو مرآة (M) (Mirror) بنسبة 50-50% تقوم بعكسه نحو شاطر حزمة آخر فينعكس عنه نحو الكاشف (D1) (D2) أو ينفذ منه نحو الكاشف (D2) (D1) وذلك أيضاً بنسبة 50-50%. إذا تم الكشف عن الفوتون الوسيط في الكاشفين D3 أو D4 فهذا يعني معرفة أي من الفوتونين A2 أم B2 تم رصده، وبالتالي علم الشق الذي مر منه، أي غاب التداخل فينبغي على D0 ألا يبين أي أهداب تداخل، بينما إذا تم الكشف في D2 أو D1 لما علمنا أيًا من الفوتونين A2 أم B2 تم رصده، ولبقي مجهولاً الشق الذي مر منه، فهناك إذن تداخل يجب على D0 تبيانه. وهكذا فإن قرار القياس بالكاشفين D3,4 يوافق الحصول على معلومة أي طريق سلكه الفوتون 2، وبالتالي معرفة مسار الفوتون 1 المتشابك معه، بينما يوافق قرار القياس بالكاشفين D1,2 القيام بقياس هذه المعلومة، ومن هنا أتت تسمية المحماة. حيث أن التجربة توافق دوماً الكشف بـ D0

نناقش تجربة واحدة، ولكن الاستنتاج يصلح عمومًا لجميع تجارب اختبار أسس ميكانيك الكم المُجرأة لغاية اليوم.

يتعلق الأمر بتجربة مخالفة للحدس تعود تاريخياً إلى العالم ويلر وفق نسختها المعروفة بالمحماة الكمومية للعالمين سكالي Scully ودروول Druhl [7]. يقوم مبدأ التجربة على تجربة الشقين المألوفة ليوونغ Young ما عدا عن أنه يمكننا إزالة شاشة الكاشف في اللحظة الأخيرة قبل سقوط الضوء عليها مع اجتيازه للشقين، وعندها يتوجه بعيداً نحو مقارب يمكنها تحديد المسار الذي سلكه. يسمح ذلك بتحقيق "خيار متأخر Delayed Choice" للمراقب بعد اجتياز الفوتون المُفتَرَض لحاجز الشقين. بالرغم من توصيف ميكانيك الكم لهذه التجربة بشكل صحيح، فإنها قد تبدو مخالفة لحدسنا المباشر في أن اختيارنا لجهاز الكشف "بعد" اجتياز الفوتون لحاجز الشقين يُلزمه في لحظة الاجتياز "الماضية" هذه بأن يختار إما النفوذ من الشقين معاً أو عبر واحد منهما، وكأن "الماضي لم يعد موجوداً، بل يمكن التأثير عليه، وبشكل يناقض -ظاهرياً- إذن مبدأ السببية Causality" في أن السبب يسبق النتيجة

يبين الشكل 2 رسماً تبسيطياً للتجربة [من المرجع 8]، بينما يعرض الشكل 3 [من المرجع 9] تحقيقاً تجريبياً تم إجراؤه والتأكد فيه من مقتضيات ميكانيك الكم. كما نرى في الشكل 2 فإن الضوء الوارد من الشق يمكنه إثارة ذرات بلورة بورات الباريوم (Barium Borate (BBO لتصدر زوجين من فوتونين متشابكين: زوج (A (B باللون الأخضر (الأحمر) يتوجه أحد عنصريه (B1 (A1 نحو الكاشف D0 بينما يتجه الآخر (B2 (A2 عبر موشور prism نحو

تتشكّل أهدابُ التداخلِ عنده، وحصل على الرسّمين المُقيّنين في الشكل 4 و5.

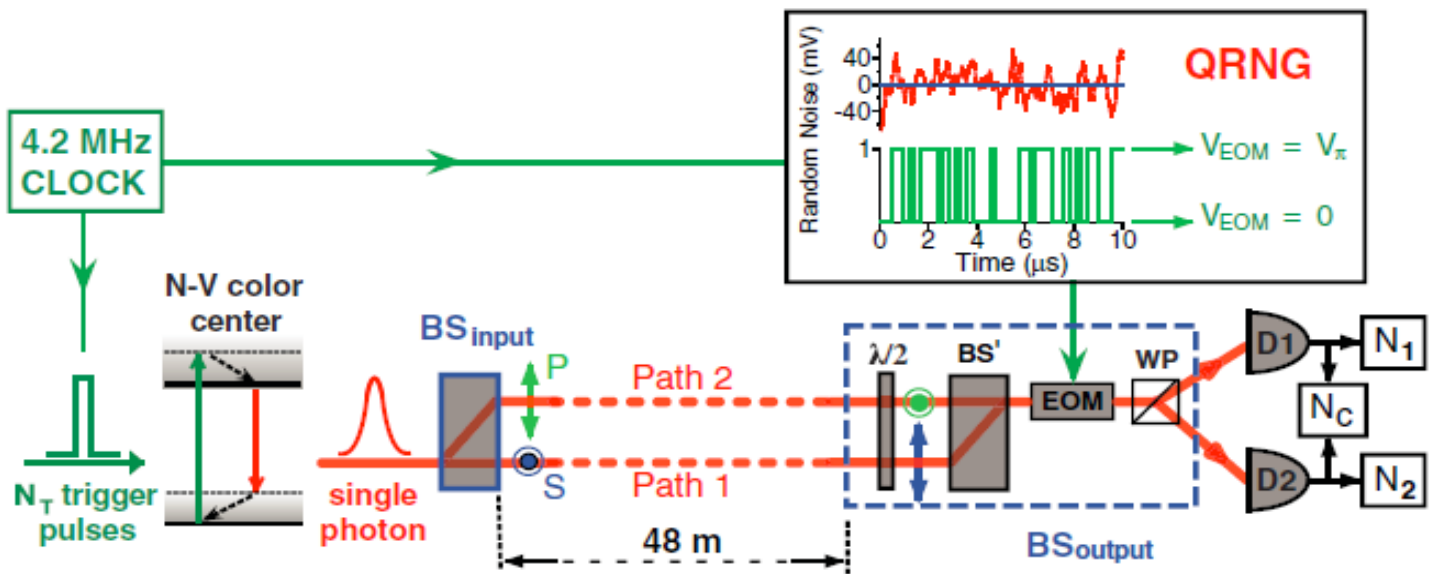
يصدر فوتون وحيد عن مركز الـ $N-V$ ، ويُرسَل عبر مقياس تداخل استقطابي طوله 48 م، ممّا يكافئ زمنَ طيرانٍ 160 نانو ثا. يولّد الـ QNRG أعداداً عشوائية 0,1، تجعل فلتية الـ EOM مساويةً لـ 0، V_0 على الترتيب خلال 40 نانو ثا بعد تأخّر إلكتروني 80 نانو ثا. تُستعمل إشارتان متواقنتان من الساعة لإطلاق الفوتون المنفرد ولتوليد أعداد الـ QNRG. في مرجع المخبر، يجري الاختيار العشوائي بين التشكيل المغلق والمفتوح (الموافقين لإدخال شاطر حزمة خارجي BSinput أم لا) آتياً مع ولوج الفوتون مقياس التداخل. بالاستفادة من كون الـ QNRG متوضّعاً عند خرج مقياس التداخل، تسمح مثل هذه المُواقنة للفوتون أن يدخل المخروط الضوئي المستقبلي للخيار العشوائي عندما يكون في منتصف مقياس التداخل، بعد اجتيازه لـ BSinput بفترة معتبرة.

هناك نوعان مختلفان تماماً من ظواهر التداخل في تجربة كيم، فالأول يتضمّن تداخلاً لفوتونٍ منفردٍ

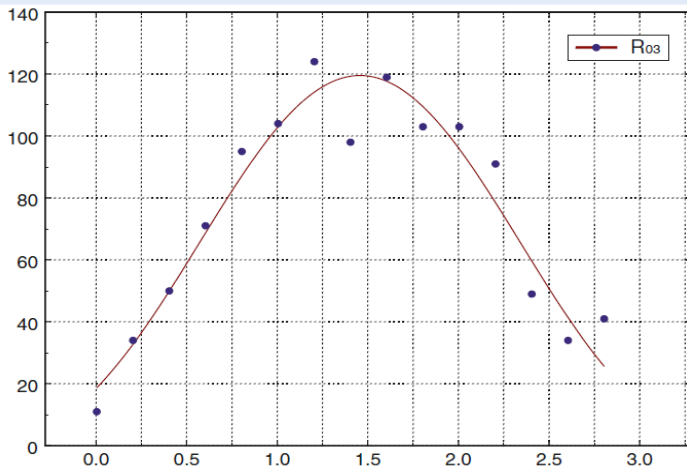
قبل الكشف بالكواشف الأخرى، فإن انهيار الدالة الموجية Collapse of wave function المُلاحَظ في D0 (تحديد مسار الفوتون أهو عبر الشقين أم عبر شقٍّ واحد) تمّ خلقه عبر حادثة -موافقةٍ للكشف عن الفوتون الوسيط في D3 أو D4 على الأقلّ- وقعت في لحظةٍ لاحقةٍ في الزمن، ومن هنا المفارقة عن كيفية تسبّب عمليّة قياس ما في انهيار الدالة الموجية في الماضي.

يمكن حلّ المفارقة باستخدام لغة المؤثرات في الضوء الكمومي، كما يمكن وباستخدام مفهوم الاحتمالية الشرطية لعمليات القياس على جسيمات متشابكة تبيان اتّساق ميكانيك الكمّ مع التجربة، وألاً تناقض مع مفهوم السببية. في الحقيقة، قام فريق كيم [10] Kim بقياس R0k معدّل تعداد الكشف المُشترك Joint Detection Counting Rate (أي تمّ تسجيل عدد حوادث الكشف المُشتركة خلال

وحدة الزمن) للفوتونات بين الكواشف D_k ($k=1,2,3$) والكاشف D_0 أثناء تغيير موضع الأخير ومع جعل الشقين بعيدين عن بعضهما بحيث لا

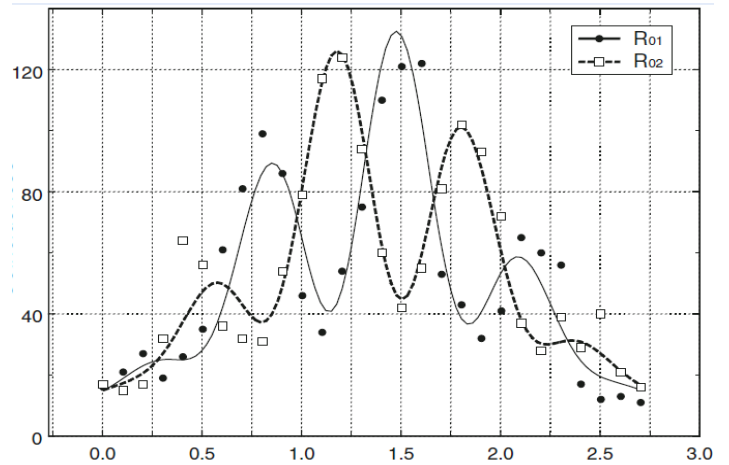


الشكل 3. تحقيق تجربة الخيار المتأخّر في المرجع [9].



الشكل 5. معدّل التعداد R03 (يوافق المنحني المتصل مواءمةً نظريّةً مع نقاط المعطيات) على المحور الشاقولي إزاء موضع D0 بالمم على المحور الأفقي. نلاحظ غياب أيّ عيّنة تداخلية. نحصل على منحنيّ مماثل من أجل R04. [المرجع 10]

الذي يتعامل مع سلوك الضوء عند "تفكيكه" إلى مكوناته وكمّاته الأساسيّة: الفوتونات، وبعض من هذا السلوك يختلف تماماً عما نتوقّعه كلاسيكياً للضوء. تمّ توضيحُ أساسيات النظرية عبر رياضيات ثلاثيّات القرن العشرين في أمثلةٍ بسيطة لا تتضمّن أعداداً كبيرةً من الفوتونات، بينما غالبية النظم الضوئية التي نراها تحوي مقاديرَ كبيرةً من الضوء. أحياناً يسلك هذا العدد الكبير من الكمّات سلوكاً مستمراً بحيث لا يمكن تمييزه عن السلوك الذي كانت تصفه معادلات ماكسويل، ولكن هناك سياقات كثيرة وأنواع عديدة من التجارب حيث نرى وبشكلٍ وثيقٍ جداً العلاقة بين الضوء وبين الذرات التي تُصدره أو تُبعثه أو تمتصّه، وكلّما رأينا هذه التأثيرات بين الضوء والمادّة بشكلٍ وثيقٍ كانت الطبيعة الكموميّة للضوء القائلة بتألّف الأخير من كمّاتٍ متقطّعةٍ ضروريّةً لفهم ما يجري. هذا هو جوهر الضوء الكمومي، فهو ليس ضرورياً لتفسير كثيرٍ من ظواهر الضوء المعروفة، ولكنه شرطٌ لا بدّ منه لفهم تأثير الضوء مع ذرات المادّة، وبعض من هذه التأثيرات مثل أحجياتٍ وألغازاً من وجهة النظر الكلاسيكيّة للضوء



الشكل 4. معدّلا التعداد R01 و R02 (توافق المنحنيات مواءمةً نظريّةً مع نقاط المعطيات) على المحور الشاقولي إزاء موضع D0 بالمم على المحور الأفقي. نلاحظ وجود عيّنة تداخلية نمطيّة (مع فرق في الطور بين المنحنيين) تماثل عيّنة تداخل تجربة الشقّين الكلاسيكيّة، لأن الكشف وفق D0,1 يقتضي ممحاةً كمومية لمعلومة مسار الفوتون. [المرجع 10]

وحيد، بينما يشتمل الآخر على تداخلٍ لفوتونين إثنيين. ينجم غيابُ التداخل عند قياس معدّل التعداد الأحاديّ في كاشفٍ واحد D0 عن كون المسافة الفاصلة بين الشقّين أكبرَ بكثير من عرض الهدب، أمّا غيابه في معدّل التعداد الثنائي R03 المشترك للكاشفَين D0, D3 فينجم عن مساهمةٍ دالّةٍ موجيّة لفوتونين (1 و 2) واحدةٍ لا غير موافقةٍ للمسار B، بينما يتأتّى التداخل في معدّل التعداد الثنائي R01 المشترك للكاشفَين D0, D1 من مساهمةٍ دالّتين موجيّتين لفوتونين (1 و 2) توافقان المسارين A و B

نستنتج إذن أن ميكانيك الكم يتفق مع النتائج التجريبية لاختباره الضوئي في تجربة الخيار المتأخّر، ولا انتهاك لمبادئه، بل إن جميع نتائج الرصد في اختبارات ضوئية مشابهة ناجمة عن تداخلٍ لفوتونات متعدّدة، حيث لا يمكن تفسير ظاهرة التداخل اللاموضعية والمشتتة لجسيمات عديدة ضمن النظرية التقليديّة ولا بدّ من تفسير كمومي لها.

سادساً: خلاصة

يعبر الضوء الكمومي إذن عن ذلك المظهر من الضوء

المراجع

مجالّي التنمية المستدامة والاتصالات العالمية
المصدر: [American Physical Society](#)
**انطلاقة جديدة في الفوتونات
الكمومية**
**عدسات معدنية متعددة الوظائف
تحدث ثورة في التكنولوجيا**
قدم الباحثون عدسات معدنية رقيقة
متعددة الوظائف أحدثت ثورة في طريقة
التحكم بالإصدار الكمومي من مُصدّرات
الفوتونات الأحادية في نيتريد البورون
السداسي (hBN). وكما هو مُفصّل في
مجلة eLight، فإن هذا الابتكار يسمح
بالتحكم المتزامن في اتجاه واستقطاب
والزخم الزاوي المداري للانبعاشات
الكمومية
صمم الفريق من جامعة موناخ وجامعة
بوهانغ وجامعة التكنولوجيا في سيدني
هذه العدسات المعدنية باستخدام
السيليكون الهيدروجيني منخفض الضياء،
ما يحقق كفاءة تجميع عالية وتحكماً
دقيقاً في الفوتونات. يمكن هذا النظام
من توجيه والتحكم في خصائص الفوتونات
الأحادية بطرق غير مسبوقة
يعد هذا التقدم بإنجازات كبيرة في الحوسبة
الكمومية والاتصالات الآمنة والاستشعار
الكمومي. يهدف الفريق البحثي إلى
دمج مصدّرات الفوتونات الأحادية في
hBN مباشرة مع العدسات المعدنية في
المستقبل، كما يعزز قدراتها ويفتح الباب
أمام إمكانيات جديدة في تصميم الأجهزة
الكمومية المتكاملة. المصدر: [Nature](#)

- [1] Dirac P (1930) The principle of quantum mechanics. Oxford University Press, Oxford
[2] Glauber RJ (1963) The quantum theory of optical coherence. Phys Rev 130:2529
[3] Wheeler JA (1982) A delayed choice experiment. Maryland lectures collection,
[4] Scully MO, Suhail Zubairy M (1997) Quantum optics. Cambridge University Press, Cambridge
[5] Glauber RJ (1963) Coherent and incoherent states of the radiation field. Phys Rev 131:2766
[6] Kastler A (1985) Birth of the maser and laser. Nature 316:307–309
[7] Scully MO, Druhl H (1982) Quantum eraser: a proposed photon correlation Experiment concerning observation and “delayed choice” in quantum mechanics. Phys Rev A 25:2208
[8] Demystifying the Delayed Choice Experiments, B. Gaasbeek, arXive 1007/3977 (2010)
[9] Experimental Realization of Wheeler’s, Delayed-Choice Gedanken Experiment, V. Jacques et al., Science, v. 315, 966 (2007)
[10] Kim YH, Yu SP, Kulik SP, Shih YH, Scully MO (2000) A delayed “choice” quantum eraser. Phys Rev Lett 84:1

خبر

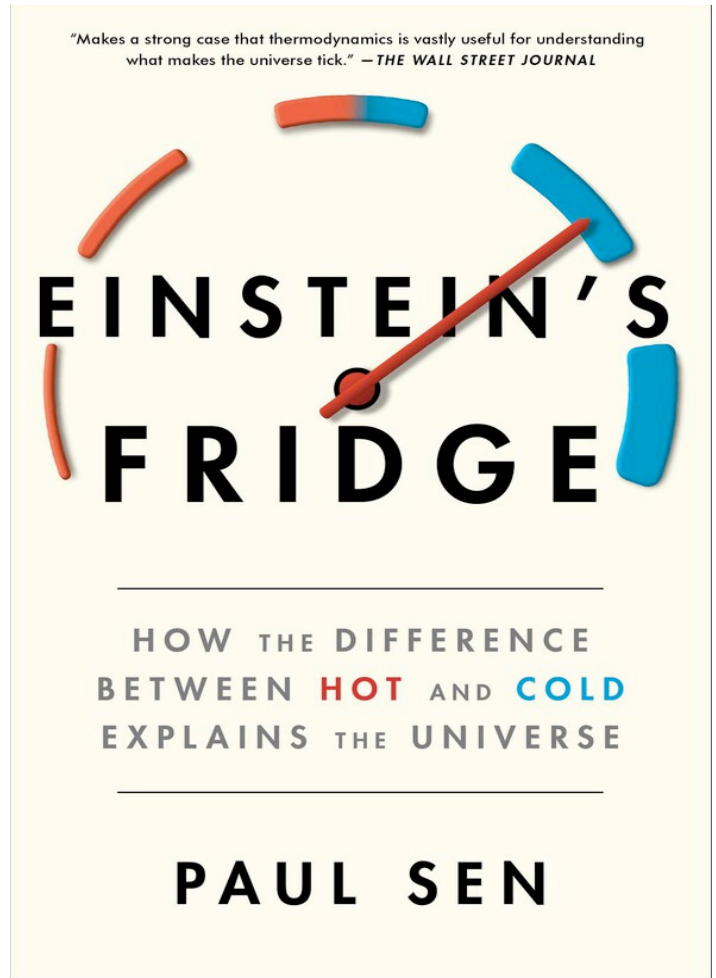
أعلنت الأمم المتحدة أن عام 2025 هو السنة الدولية للعلوم والتكنولوجيا الكمومية. يُقرّ هذا الإعلان بإمكانية العلوم الكمومية في دفع الابتكارات في

الشهير لازار كارنو اسم "سعدي" تيقناً بالشاعر الفارسي سعدي الشيرازي الذي كان لازار كارنو مُعجَباً به) وحتى عصرنا الحاضر ونظرية الثقب الأسود على يد العبقري ستيفن هوكينغ (نيكولا سعدي كارنو هو أيضاً عم الرئيس الفرنسي ماري فرانسوا سعدي كارنو ، والذي كان رئيساً لفرنسا منذ 1887 حتى اغتياله عام 1894).

كانت البداية إذن على يد الفرنسي كارنو رغم أن إنجلترا هي من كانت السبّاقة في اختراع وتصنيع المحركات البخارية (والتي كانت بالمناسبة ذات مردود منخفض جداً، ونسبة الفقد فيها تصل إلى 90 بالمئة)، ولكن الإطار الفيزيائي والرياضي لكيفية عمل هذه المحركات لم يكن مفهوماً بشكل جيد حتى أتى كارنو ليشرح أنه في أي منظومة لا يمكن إنتاج عملٍ مفيد إذا لم يحصل تبادل حراري بين منبعٍ حراري ساخن و مصرفٍ حراري بارد في دورة حرارية، عُرفت باسم دورة كارنو (Carnot cycle) ليضع المعادلات الرياضية الناظمة لعمل هذا المحرك، وليبرهن أن العمل المفيد الناتج عن هذا المحرك الحراري يتناسب طردياً مع الفرق في درجة الحرارة بين المنبع الساخن ولنسمها T_1 والمصرف البارد ولنسمها T_2 .

كان كارنو تلميذاً نبهاً وعلى درجة عالية من الذكاء، فقد دخل مدرسة البوليتكنيك الشهيرة في عمر 16 سنة وتخرج منها بعد دراسة الفيزياء والرياضيات على يد كبار العلماء مثل أمبير ولاغرانج وغي لوساك وبواسون وغيرهم.

ظهرت على يد كارنو فكرة مصونية الطاقة (energy conservation) للمرة الأولى، وإن لم يكن ذلك بالوضوح الكافي فيزيائياً أو رياضياً. وبعد وفاة



كتاب:

برّاد أينشتاين Einstein's Fridge

د. محمد علي حماده

يشرح الصحفي الشهير بول سين في كتابه الممتع والسلس بالعنوان الغريب "برّاد أينشتاين" تاريخ علم الترموديناميك (يسمّى أحياناً بالميكانيكا الحرارية) منذ بداياته أوائل القرن التاسع عشر على يد العالم الفرنسي نيكولا ليونار سعدي كارنو (ليس هناك خطأ في الاسم، فقد اختار له والدّه السياسي

الأنتروبيّة تغدو ثابتة عند درجة حرارة الصفر المطلق أو صفر كالفين، وتساوي حوالي 273- درجة مئوية) يتابع الكتابُ بعدها وصفَ تطور الترموديناميك وارتباطه بباقي فروع الفيزياء ولا سيما فيزياء الجسيمات وفيزياء الكم، ويروي عن انجازات العالم الأسكتلندي جيمس ماكسويل في مجال الترموديناميك قبل انتقاله إلى مجال الكهرومغناطيسية واكتشافه لمعادلات ماكسويل الشهيرة.

ويقف المؤلف أيضاً عند محطة هامة من تاريخ الترموديناميك وارتباطه بنظرية المعلومات على يد المهندس والرياضي الأميركي كلود شانون، وكيف أن قياس كمية المعلومات كلوغاريتم لتابع الاحتمال مرتبطٌ بشكلٍ جذري مع مفهوم الأنتروبيّة في الترموديناميك

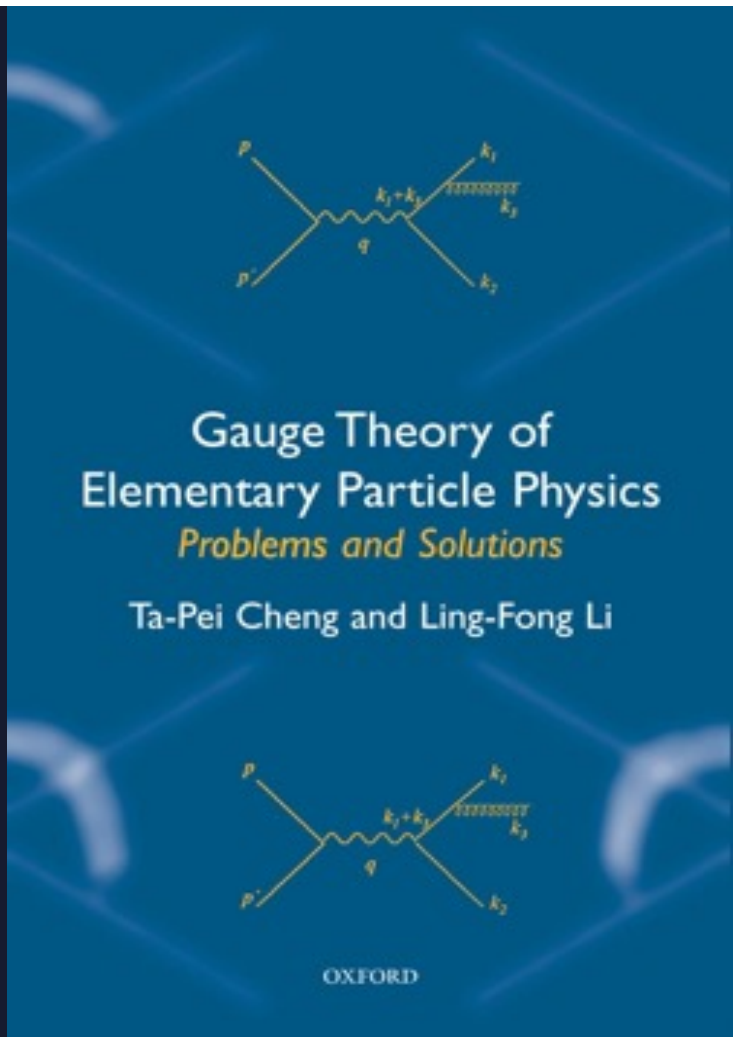
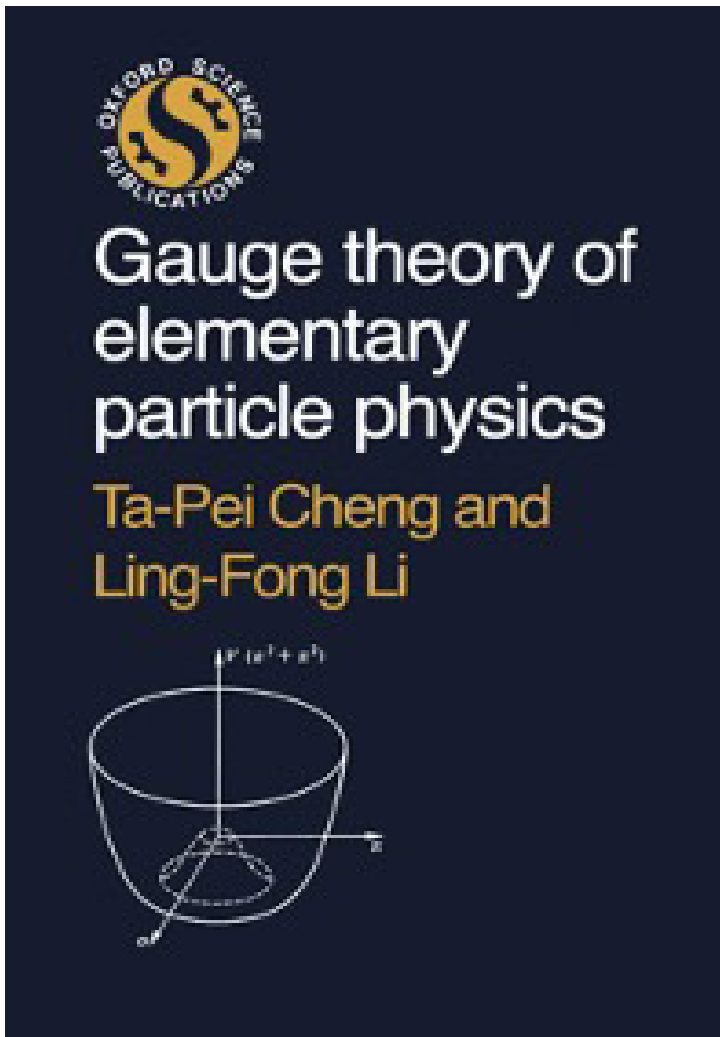
في الفصول الأخيرة يتحدث المؤلف عن إسهامات آينشتاين في مجال الترموديناميك والحركة البراونية، والتي لا يعرفها معظم الناس بسبب ارتباط شهرته بنظريّتي النسبية الخاصة والعامة اللتين غيرتا فهم العلم لمفاهيم الزمن والفضاء الثلاثي الأبعاد، قبل أن ينهي كتابه بالحديث عن ستيفن هوكينغ وموضوع أفق الحدث (event horizon) والذي يمكن تعريفه بأنه المنطقة الحدودية حوالي الثقب الأسود التي لا يستطيع الضوء تجاوزها والإفلات منها بسبب الجاذبية الهائلة في مركز الثقب الأسود.

عنوان الكتاب "براد آينشتاين" قد لا يكون مُوفّقاً بالنسبة لمحتويات الكتاب، ولكنه عنوان مثير يدفع القارئ لشراء الكتاب، فبراد آينشتاين لا يحتوي على لحم أو جبنّة أو مرتديلا ولكنه يروي بشكل ممتع وسهل تاريخ علم الترموديناميك على امتداد القرنين الماضيين.

كارنو المأساوية عن عمر 36 سنة (أصيب بأزمة نفسية دخل على إثرها المصحّة ليصاب هناك بالكوليرا ويموت بعدها) تابع أفكاره الفيزيائي الألماني كلاوس سيوس الذي وضح فكرة مصونيّة الطاقة مؤسساً للقانون الأول في الترموديناميك القائل بأن الطاقة لا تفتنى ولا تخلق من العدم، بمعنى أن كل ما نراه حولنا من نظم ميكانيكية وحرارية إنما تقوم بتحويل الطاقة من شكل إلى آخر، فالمحرك الكهربائي يحوّل الطاقة الكهربائية إلى طاقة حركية والدينامو يحول الطاقة الحركية إلى كهربائية وهكذا

بعد كلاوس سيوس استلم العبقرى بولتزمان المشعل وأدخل مفاهيم الفيزياء الإحصائية (statistical physics) لدراسة الترموديناميك، حيث يمكن استنتاج الخواص العامة الماكروسكوبية لجسم ما عن طريق تطبيق قوانين الإحصاء والاحتمالات على الجزيئات الميكروسكوبية المُكوّنة لهذا الجسم، وكذلك وضع بولتزمان الصيغة الرياضية لمفهوم الأنتروبيّة (entropy) الغامض والهام في مجال الترموديناميك، والذي يمكن ربطه بكمية الفوضى في جملة ما ونزوعها نحو التجانس، فحين نضع الكريما في فنجان القهوة نجد أنها تنتشر وتتوزع بشكل متجانس مع القهوة ولا تبقى معزولة عنها لم تنل مقارنةً بولتزمان الإحصائية موافقةً معظم الفيزيائيين المعاصرين، وأثر ذلك على نفسيته، وفي النهاية أقدم على الانتحار خلال عطلة مع عائلته.

الأنتروبيّة هي أساس القانون الثاني للترموديناميك القائل بأنها تزداد بشكل مستمر في أية جملة فيزيائية (هناك نتيجة لهذا القانون تسمى أحياناً القانون الثالث للترموديناميك والتي تقول إن



الأصلي، أما الكتاب الثاني فقد صدر بعد الأول باثني عشر عاماً ويتكون من مجموعة من المسائل والمواضيع الإضافية كان الغرض منها تدريب القارئ على حل المسائل وكذلك لتحديث الكتاب الأصلي وإضافة عدد من المواضيع الجديدة

يناسب هذا الكتاب طالب الدراسات العليا، المختص بفيزياء الجسيمات الأولية، والذي قد أتم دراسة مقدمة في منهج المجالات الكمية لمدة فصل دراسي على الأقل

يعرض الكتاب الأصلي في فصوله الثلاثة الأولى: مقدمة مُقنّصة عن المجالات الكمية، فهي ليست قصيرة أو طويلة لكنها كافية، بعدها يعرض طرق تنظيم اللانهائيات (regularization schemes) التي تظهر في الحسابات المختلفة للمجالات

كتاب:

النظرية المعيارية وفيزياء

الجسيمات الأولية (تا بي تشنج و لينج-فونج لي)

يُعدّ كتاب تشنج ولي أحد المراجع التقليدية المهمة في مجال النظريات المعيارية (Gauge Theories)، المستخدمة في فيزياء الجسيمات الأولية، لما يحتويه من تنوع وتحديق في موضوعات نظرية المجالات الكميّة (quantum field theory) الشبّقة والخاصة بهذا الفرع من الفيزياء.

يتكون هذا الكتاب من مجلدين، أولهما الكتاب

الفصل الثاني عشر.

أما في الأربعة فصول الأخيرة فيعرض المؤلفان عددًا من الموضوعات المتقدمة التي أثرت في كثير من مجالات الفيزياء النظرية للجسيمات الأولية اليوم، مثل إمكانية وجود كتل لجسيمات النيوتريو، وكذلك يعرض نظريات التوحيد العظيمة التي تتنبأ بتوحيد جميع المجالات سابقة الذكر في زمرة واحدة مثل $SU(5)$ ، وتبعات تلك النظريات على عمر البروتون، وكذلك إمكانية وجود ظواهر مثل وحيد القطب المغناطيسي الذي تبأ به ديراك وأفكار السوليتون والإنستانتون التي قدّمت لنا طرقاً نظرية جديدة من أجل فهم نظريات المجالات المعيارية بشكل أفضل وبعيداً عن تقريبات نظرية الاضطرابات (Perturbation Theory) المحدودة

أما بالنسبة للجزء الثاني من الكتاب فبالإضافة لحل عدد كبير من المسائل الجيدة في هذا المجال، أضاف المؤلفان عددًا غير قليل من المواضيع الجديدة، ممّا جعل هذا الجزء جزءاً فُكِّلاً للأول من ناحية المفاهيم والمواضيع أيضاً من هذه المواضيع:

- العلاقات بين طرق تنظيم اللانهائيات المختلفة
- تطبيقات جديدة لطرق تكامل المسار
- النظرية النسبية كنظرية معيارية
- الموضّلة الفائقة كظاهرة هيگز
- نموذج سيجما اللاخطي
- استخدام طرق تكامل المسار في الشذوذات المحورية axial anomalies
- نظرية الزمر ونظريات التوحيد العظمى وغيرها من المواضيع المتقدمة والتي صارت مهمّة مؤخراً

الكمية، فيمهد بذلك لعملية إعادة التسوية (Renormalization) شديدة الأهمية، وكذلك يعرض موضوعات "معادلات زمر إعادة التسوية" (Renormalization Group Equations) أو كيف تعتمد الكميات الفيزيائية المُقاسة على الطاقة المستخدمة في قياس تفاعل الجسيمات ببعضها البعض.

تختص الفصول الأربع التالية بدراسة تأثير التماثل (أو التناظر symmetry) على خصائص الجسيمات الأولية مع دراسة بعض الزمر المهمة مثل $SU(3)$ ، $SU(2)$ وكذلك نموذج الكوارك وطبيعة التفاعلات النووية القوية وخصائصها.

في الفصول الثلاث التالية، الثامن والتاسع والعاشر، يعرض المؤلفان صياغات نظرية الكم للمجالات المعيارية تحديداً باستخدام طرق تكامل المسار (Path-Integral)، والتي تُعدّ من أهم الطرق لفهم الطبيعة الكمومية لجميع المجالات المعيارية. تُطبق هذه الحسابات على أهم ثلاث نظريات معيارية معروفة وهي الديناميكا الكهربائية الكمومية والديناميكا اللونية الكمومية (النظرية الكمومية للتفاعلات النووية القوية) وكذلك النموذج القياسي للتفاعلات الكهرومغناطيسية والضعيفة والقوية معاً، أو ما يعرف بنموذج جلاشو-سلام-واينبرج والذي صار النموذج الرئيس في فهمنا لفيزياء الجسيمات الأولية ككل.

يتطرق الكتاب في فصليّيه الحادي والثاني عشر لنموذج جلاشو-سلام-واينبرج بالتفصيل ويعرض تفاصيله، ثم يستنتج عددًا من التنبؤات التجريبية المُهمّة للنموذج، مثل وجود التيار المتعادل وكذلك جسيم الهيگز وجسيمات W, Z ، والتي يناقشها في

أخبار علمية

أول قمر صناعي خشبي في العالم



تاكاو دوي، رائد الفضاء المهندس في جامعة كيوتو، وهو يحمل أول قمر صناعي خشبي

في خطوة مبتكرة نحو استكشاف الفضاء بطرق أكثر استدامة، طرح باحثون من جامعة كيوتو بالتعاون مع شركة سوميتومو فوريس تري إمكانية النظر في استخدام الخشب كمادة بناء رئيسية في الأقمار الصناعية، وربما حتى في المستعمرات الفضائية المستقبلية. أُطلق على القمر الصناعي اسم "ليجنوسات" وهو مصمم بأبعاد مكعب صغير بطول 10 سنتيمترات، مصنوع من ألواح خشب الماغنوليا بتقنيات النجارة اليابانية التقليدية التي لا تعتمد على الغراء أو التثبيتات المعدنية

يُقدّم الخشب، وهو مادة تتحلل بيولوجياً، فوائد عديدة في الفضاء حيث أنه لا يعيق الإشارات الراديوية ويتمتع بخصائص عازلة للحرارة، ما يجعله مثاليًا لحماية الأجهزة الإلكترونية والنظم الحساسة. علاوة على ذلك، عندما يحين وقت إنهاء مهمة القمر الصناعي وعودته إلى الأرض، يمكن أن يحترق الخشب بشكل كامل في الغلاف الجوي، مما يقلل من ترك بقايا أو مخلفات قد تضر بالبيئة الفضائية يتضمن "ليجنوسات" أجهزة استشعار متعددة

لقياس الإجهاد، درجات الحرارة، القوى المغناطيسية، والإشعاع الكوني، وهو مجهز لاستقبال وإرسال الإشارات الراديوية. من المقرر نقله إلى محطة الفضاء الدولية في سبتمبر-أيلول ومن ثم إطلاقه في نوفمبر-تشرين الثاني.

لا يتوقف المشروع عند هذا الحد، حيث تم طرح فكرة استخدام الخشب ليس فقط في الأقمار الصناعية ولكن أيضًا في بناء المساكن على سطح القمر والمريخ. تشير الدراسات إلى أن الخشب قد يقدم حماية طبيعية ضد الإشعاعات ويساعد في تنظيم درجة الحرارة داخل هذه المساكن، مما يجعل الإقامة فيها أكثر راحة للرواد المستقبليين

تشير التوجهات الحديثة في استكشاف الفضاء إلى تزايد الاهتمام بالاستدامة واستخدام مواد صديقة للبيئة من أجل تقليل الأثر البيئي للأنشطة البشرية خارج كوكب الأرض. تُسلط مثل هذه المشاريع الضوء على تطور مثير في مجال استكشاف الفضاء، إذ يأتي مشروع ليجنوسات في إطار مساعي البحث عن مواد بديلة ومستدامة تخفف من الأثر البيئي للأقمار الصناعية، خصوصًا تلك المتعلقة بتلوث الفضاء. يأمل الباحثون أن تسهم هذه المبادرات في دفع عجلة الاستكشاف الفضائي نحو آفاق جديدة مع الحفاظ على البيئة الفضائية والأرضية

المصدر: [The New York Times](https://www.nytimes.com)

اكتشف علماء الفلك أكبر ثقب أسود نجمي في مجرة درب التبانة

بكتلة تعادل 33 ضعف كتلة الشمس تشكّل بعد انفجار نجم على بعد 2000 سنة ضوئية فقط من الأرض، كشف عن نفسه هذا الثقب الأسود، المعروف

بقاعدة كيب كانافيرال الفضائية في فلوريدا. خلال الرحلة، أظهر ويلمور وويليامز مهارتهما في القيادة اليدوية للمركبة وأكملت فترة نومهما بنجاح. قبل فترة نوم الطاقم، كشفت الفرق الفنية عن ثلاث تسريبات للهليوم في المركبة، تم التعامل معها وفقاً لخطة موضوعة مسبقاً. كما تمت معالجة عطل في خمسة من المحركات التحكّمية، حيث أُجريت اختبارات تشغيل ساخن hot-fire لإعادة تفعيل أربعة منها، ممّا سمح للطاقم بمواصلة المهمة والتحام المركبة بنجاح بالمحطة

هذه الرحلة ليست فقط خطوة مهمة في مسيرة استكشاف الفضاء ولكنها تمثل أيضاً تأكيداً على نجاح شراكة ناسا مع القطاع الخاص في برنامج الطاقم التجاري، مما يعزز القدرات الأمريكية في الوصول إلى الفضاء

المصدر [NASA](#)

قد تكون الذرات عند درجات حرارة سالبة تتجاوز الصفر المطلق شكلاً جديداً من المادة

نجح الفيزيائيون في حثّ سُحابة من الذرات على الوصول إلى درجة حرارة سالبة تتجاوز الصفر المطلق، ووضعها في هيكل هندسي يمكن أن يُنتج شكلاً غير معروف من المادة، بخصائص غريبة كونه أكثر سخونة من أي منظومة بدرجة حرارة موجبة.

هذه الإمكانيّة موجودة في النظم الكموميّة، مع استحالتها في النظم الكلاسيكيّة، فدرجة الحرارة لا تُعبّر هنا عن الطاقة الحركيّة، بل تعتمد على التوزيع الطاقي للجزيئات وتكون مرتبطةً بمفهوم الإنتروبيّة. من أجل درجة حرارة موجبة تكون السويّات

بـ BH3، للباحثين من خلال قوة الجذب الهائلة التي يمارسها على نجم مرافق يدور حوله في تجمّع أكيلدا (النسر) النجمي. إن هذا الاكتشاف العفوي مهمٌ للغاية لدرجة أن العلماء قاموا بنشر تفاصيل هذا الجسم قبل الموعد المخطط له لتمكين علماء الفلك الآخرين من إجراء المزيد من الملاحظات في أقرب وقت ممكن

وقال الدكتور باسكوال بانوزو، عالم الفلك والعضو في مشروع تعاون غايا في مرصد باريس: "إنه مفاجأة تامة. إنه الثقب الأسود ذو الأصل النجمي الأكثر ضخامة في مجرتنا والثاني في قربه لنا ممّا اكتشفناه حتى الآن". المصدر: [The Guardian](#)

رواد فضاء بوينج ستارلاينر التابعون ناسا يدخلون محطة الفضاء



صورة جماعيّة لأفراد طاقم Expedition 71 السبعة مع رائدي الفضاء الوافدين

في رحلة فضائية تاريخية، نجح رائدا الفضاء بوتش ويلمور وسوني ويليامز في تحقيق التحام مركبة بوينج "ستارلاينر" بمحطة الفضاء الدولية في الساعة 1:34 بعد الظهر بتوقيت شرق الولايات المتحدة يوم 7 يونيو/حزيران 2024. انطلقت "ستارلاينر" على متن صاروخ "أتلانتيك 5" التابع لتحالف الإطلاق المتحد United Launch Alliance من منصة الإطلاق رقم 41

معلومات إثرائية

ما هو المقاس الوسطي لجميع الأشياء في الكون؟

قد يسألك طفلك الصغير أين يقع المنتصف بالنسبة لمقاسات جميع الأشياء في العالم؟ يبدو هذا السؤال فلسفيًا بعض الشيء، ولكن إذا فكرنا قليلاً به أمكننا الحصول على إجابة طريفة، لا نأخذها على محمل الجد ولكنها مُثيرة للتأمل

نبدأ بالأشياء المفاهيمية القابلة للتخيّل، فمقاس أصغر كينونةٍ يمكننا تصوّرها هو طول بلانك الذي يمثّل المقاس المكانيّ حيث يفقد المكان هويته، وتبلغ قيمته 10^{-35} متر، أي أصغر بعشرة ملايين مليار مليار مرّة من الذرة باعتبار مقاس الأخيرة من رتبة 10^{-10} متر. أمّا أكبر كينونةٍ نتصوّرها فهو مجمل الكون المرئيّ، وبالتالي المسافة التي أمكن للضوء قطعها منذ الانفجار الكبير قبل أربعة عشر مليار سنة تقريبًا، ولكن انتبه هذا لا يمثّل 14 مليار سنة ضوئية، بل أكثر بكثير بسبب التضمّم الكوني حيث عانى الكون اتساعًا أسيًا خلال فترة قصيرة بعد الانفجار الكبير، فيكون مقاس الكون المرصود حوالي 93 مليار سنة ضوئية (السنة الضوئية حوالي 10^{16} متر، أو 10^{27} متر).

هناك طرائق عديدة لأخذ الوسطي، ولكن من الواضح أنه وللإجابة على سؤال طفلنا، فإننا سنأخذ المتوسط الحسابي للأشياء في قوى العشرة، وإلا لانعدم تأثير العدد الأصغر في حال أخذنا المتوسط الحسابي للعددين، وبالتالي نجد القيمة 10^{-4} متر.

الطاقة الأعلى مشغولةً بنسبةٍ أقلّ من الأدنى، بينما العكس تمامًا من أجل القيم السالبة لدرجة الحرارة، ممّا يعني في الحالة الأخيرة امتلاء السويّات ذات الطاقات الأعلى، وبالتالي عند تأثرها مع منظومات عادية تتدفّق الطاقة منها نحو النظم الأخرى، ما يجعلها تقيّأ أكثر سخونةً من أي منظومة بدرجة حرارة موجبة.

حقّق دونيني وزملاؤه من جامعة كامبردج هذه الإمكانية من خلال وضع ذرّات بوتاسيوم في حجرة خلاء وتبريدها لدرجاتٍ قريبة من الصفر المطلق باستخدام ليزر وحقول مغناطيسية، ما سمح لهم بالتحكّم في طاقات الذرّات ووضعها في منظومة بدرجة حرارةٍ سالبة، ضمن نمطٍ من مُسدّسات ومثلاثات يُدعى بصفيحة كاغومي، حيث لا طاقةً حركيةً للذرّات، بل جُلّ طاقتها تأتي من التآثر مع الذرّات الأخرى ومن هندسة الصفيحة التي تجعل شغل الطاقات الأعلى مُفضّلًا. المصدر: [New Scientist](#)

اكتشف الباحثون نطاقات إلكترونية جديدة مسطحة، ما يُمهّد الطريق لتطوير مواد كمومية متقدمة

في دراسة نُشرت في مجلة "نيتشر كومبونيكيشنز" في 19 يونيو-حزيران، يتوقع فريق من العلماء بقيادة تشيمياو سي من جامعة رايس وجود نطاقات إلكترونية مسطحة، حيث لا تعتمد الطاقة على الاندفاع، عند مستوى فيرمي -بخلاف ما هو شائع عن ابتعادها عنه والذي يفتر عادةً محدوديةً تأثيرها على خواص المادة -، وهو اكتشاف يمكن أن يتيح أشكالًا جديدة من الحوسبة الكمومية والأجهزة الإلكترونية. المصدر: [ScienceDaily](#)

ف نجد الرتبة نفسها 10^{-4} متر !!
حيث أن الخلايا هي الوحدات الأساسية لعلم الحياة، وحيث أن نسبة أمثلية لا بد من تحقيقها بين مقياس الكائن الحي ومقياس خلاياه، من أجل امتلاك سطح أمثلي للفاعل مع العالم المحيط، فهل يمكن لهذه القيمة الوسطية أن تمثل المقياس المميز لوجود حياة غنية في الكون؟

[مرجع: Radiolab](#)

إشعاع الخلفية التريوني الكوني CvBR

يعبر عن إشعاع التريونات التي تبقّت في الكون منذ مرور حوالي ثانية واحدة على الانفجار الكبير بدرجة حرارة 1.9 كلفن تقريباً، بينما يعود إشعاع الخلفية المكروي الكوني CMBR إلى الفوتونات المتبقية منذ مرور حوالي 400000 سنة على الانفجار وبدرجة حرارة 3 كلفن تقريباً

بالرغم من عدم الكشف عنه بشكل مباشر لغاية اليوم، فإن نموذج الانفجار الكبير يتنبأ بوجوده وهناك دلائل تجريبية غير مباشرة على وجوده، ما يجعله -مع ما رصدناه عن اتساع الكون، وبنية الكون على المقياس الكبير، وإشعاع الـ CMBR، ووفرة العناصر الخفيفة- حجر رحي أساسياً في الدلائل التجريبية على صحة نموذج الانفجار الكبير وخاصة في حال الكشف عنه بشكل مباشر، ولكن هذه المهمة صعبة للغاية، بسبب تأثير التريون الضعيف جداً مع الجسيمات الأخرى

يعود الاختلاف بين زماني إشعاعي الخلفية إلى أن الكون في توسّعه وتمدّده تبرّد بعد مرور الثانية الأولى إلى درجة تجفّدت freeze out فيها

تمثل هذه القيمة عُشر المليمتر، وتسع حوالي عشر بكتريات كبيرة.

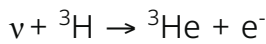
ولكن لنعد إلى طفلنا، فمن الأرجح أنه لم يقصد الأشياء المفاهيمية، بل علينا إجابته باعتبار الأشياء المادية. ما هي أصغر كينونية مادية يمكننا قياسها؟ أهى البروتون بمقايسه من رتبة الفيرمي 10^{-15} متر؟ أم الإلكترون، أم الكوارك، أم ... ؟

يمكن القول بأن الكوارك، وحيث أننا لم نستطع فصله لوحده، أصغر من مقياس (resolution) أي جهاز قياس استخدمناه، ومن الممكن أن يتبين لاحقاً أن الكواركات -والحال نفسه بالنسبة للإلكترونات- نقاط لا بعد لها وإن كنا نشك في ذلك استناداً إلى نظريات تعتبرها مبنية من لبنات أصغر. إذن يمكن القول إنها أصغر من أصغر قياس استطاع الفيزيائيون سبره في مسرعات الجسيمات، ولناخذ المسرع الهادروني الكبير بطاقة من رتبة 15 TeV أي أكبر بـ 1.5×10^4 من كتلة البروتون المقاربة لـ 1 GeV، وبالتالي قيمة أصغر قياس تبلغ حوالي 0.6×10^{-20} متر.

ماذا عن أكبر كينونية أمكننا قياسها؟ لن نأخذ تجمّعا لنجوم مثل المجرة، أو تجمّعات المجرات، بل سنأخذ شيئاً يمكن لطفلنا وحواسه اعتباره كينونية واحدة مستقلة، مثل كوكب أو نجم أو ثقب أسود، بالرغم من أن كلاً منها هو مجموعة جزيئات أو ذرات. النجم الأكبر المعروف في الوقت الراهن هو النجم UY Scuti الذي يبعد عنا حوالي 6000 سنة ضوئية في تجمّع سكوتوم، ويبلغ نصف قطره حوالي 10^3 نصف قطر الشمس (أي يسع لمليار شمس ضمنه!)، وحيث أن الأخير يبلغ تقريباً مليار متر، إذن أكبر مقياس لكينونية مستقلة في الكون من رتبة 10^{12} متر.

نحسب الآن الوسطي (المتوسط الهندسي)،

إلى الفوتونات، بينما لم تُعط شيئاً للنتريونات بسبب عدم تأثرها معها، ممّا تسبّب بزيادة درجة حرارة الفوتونات نسبةً للنتريونات، ومنذئذ بقيت هذه النسبة ثابتة لغاية اليوم وتساوي حوالي 0.7 ما يعطي تنبؤاً لدرجة حرارة الـ CvBR بقيمة 3×0.7 أي 1.9 كلفن، وهي طاقة صغيرة جداً تجعل من المُحال تقريباً الكشف عنها تجريبياً -إلاّ إذا قمنا بتسريع كاشف نترينوات إلى سرعات نسبيّة ما يسمح في مرجعها الطائر بـ "دفش boost" نترينوات الـ CvBR إلى طاقات قابلة للكشف!- بالرغم من وجود بعض التجارب في طور البناء التي تُحاول الكشف المباشر عنها من خلال التقاطها في التريوم للتحريض على القيام بتحليل بيتا:



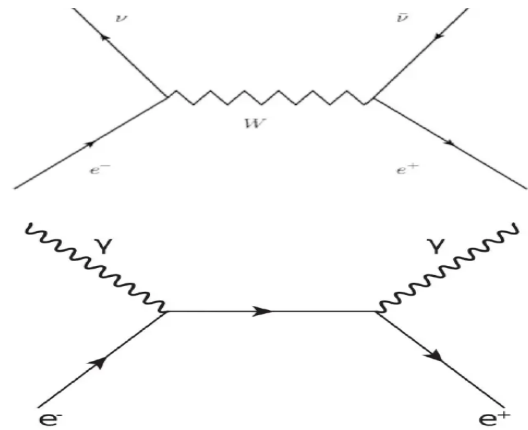
بتوقيعٍ مميزٍ للإلكترون الصادر الذي يجب تمييزه عن إلكترونات إشارة الخلفيّة الصادرة عن تحلل بيتا الطبيعي



وحيث أن طاقة الإلكترون في هذا التفاعل أقلّ منها في التفاعل السابق بمقدارٍ من رتبة كتلة النترينو الصغيرة، توجّب على الكاشف امتلاك قدرةٍ مَيّزٍ كبيرة لفصل الإشارئين عن بعضهما البعض، كما هو مخطّط في تجربة PTOLEMY بحلول 2025

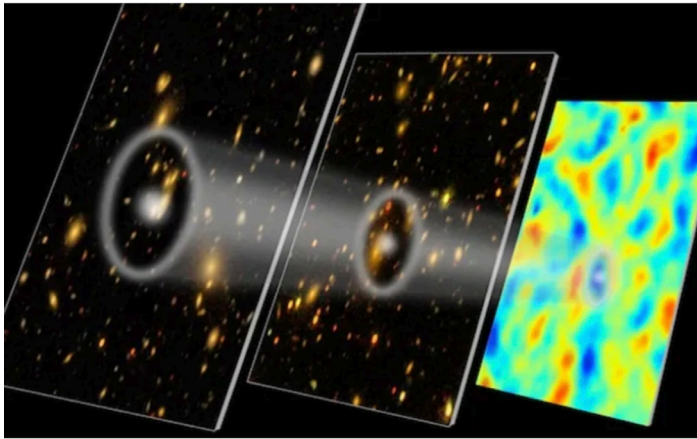
مع ذلك، هناك دلائل غير مباشرة على الإشعاع النترينوي هذا من خلال ظاهرتين (آ) تأثيره على إشعاع الخلفيّة الفوتوني CMBR، وبشكل أدقّ على التراوحات فيه من رتبة 10^{-5} والتي تُعبّر عن اللاتجانسات في بنية الكون، من حيث أن تشكيل البنى الكتلّيّة ونقوّها بسبب التقوّض الثقالي gravitational collapse تقاومه وتردّه فوتونات الـ

القوى الضعيفة، أي انخفضت درجة حرارة الكون لدرجةٍ لا تسمح بتجلّي هذه القوى، ما يعني أنه يمكن تجاهلها، بينما قبلاً كانت موجودة بالدرجة نفسها التي للقوى الكهرمغنطيسيّة. في الواقع، حوى الكون بعد الثانية الأولى بشكلٍ رئيسيّ الجسيمات التالية مع أضدادها: نكليونات وإلكترونات و نترينوات وفوتونات، ولكن بينما استمرّ التوازن الترموديناميكي بين عملية إفناء إلكترون-بوزترون إلى فوتونات وعملية خلق زوج إلكترون-بوزترون انطلاقاً من فوتونين (المخطّط السفلي من الشكل)، توقّف التوازن بين العمليتين المماثلتين في حالة النترينو (المخطّط العلوي من الشكل)، فلم يتسّن للنترينو ومضاده امتلاك طاقة تكفي لخلق الزوج بسبب انخفاض درجة حرارة الكون المتمدّد، ومنذئذ استمرّت هذه النترينوات في حركتها دونما إعاقة لغاية اليوم آخذةً في الوهن شيئاً فشيئاً.

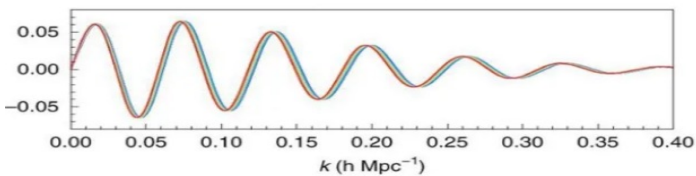
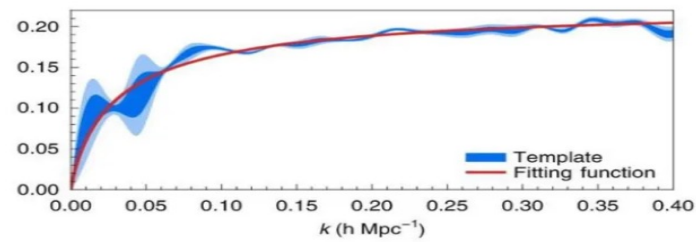


إفناء وخلق زوج إلكترون-بوزترون إمّا من فوتونين أو من نترينو ومضاده يسمح ذلك أيضاً بالتنبؤ بنسبة درجتّي حرارتي الإشعاعين، إذ ظلّتا متكافئتين لحين تجمّد الفوتونات بعد أربعمئة ألف سنة، حين لم يستطع الفوتون حيازةً طاقةٍ كافية من الكون المتبرّد لإتمام عمليّة خلق الزوج، وبالتالي منحت عندها غالبية الإلكترونات والبوزترونات أثناء إفنائها لبعضها البعض طاقتها

oscillation التي تعبر عن تراوحات في كثافة المادة الباريونية (الطبيعية) المرئية، حيث يُظهر تراكم المجرات حول بعضها البعض وعقدتها clustering عبر المسافات الكونية وجود مقاييس مسافيي خاص ندعوه بالمقاس الصوتي- يفصل بين المجرات وتزداد قيمته مع تمدد الكون واتساعه. مرة أخرى، سوف يؤثر وجود الترنينوات المتبقية ذات الكتلة- من حيث أن تدققها يُنقص قليلاً من نمو البنى عند المقاسات الصغيرة- بشكل دقيق وحساس لعدد عائلات الترنينو على هذا المقاس، ما يمكن رصده، حيث يثبت المعطيات المُلاحَظة مرة ثانية توافق هذا العدد مع ثلاثة



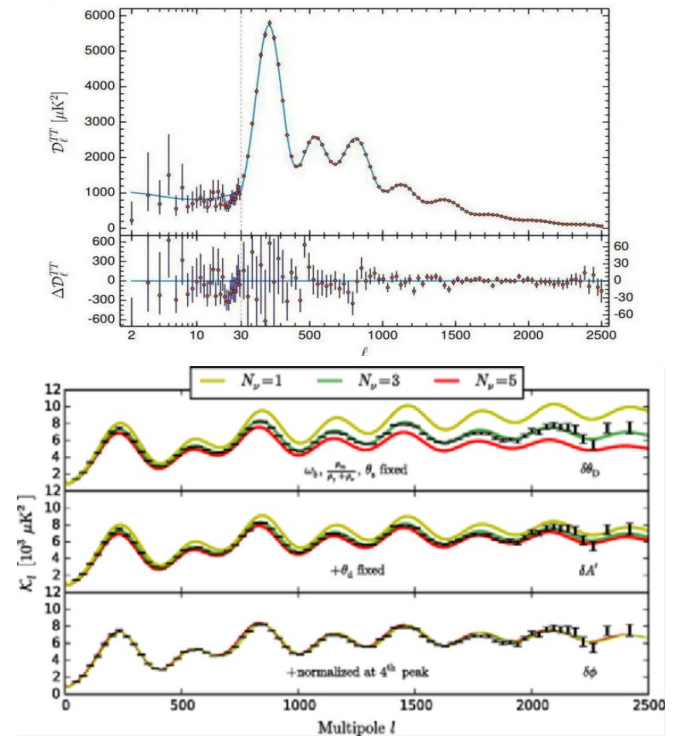
إشعاع الخلفية قبل 14 مليار سنة بنى المجرات قبل 5.5 مليار سنة بنى المجرات قبل 4 مليار سنة



تجلى وجود إشعاع الخلفية الترنينوي على مقاس الاهتزازات الباريونية الصوتية في بنية الكون على المقاس الكبير. نمط الذبذبات على المقاس يتحسس لعدد عائلات الترنينو.

المراجع: [ويكيبيديا](#) و [BIGTHING](#)

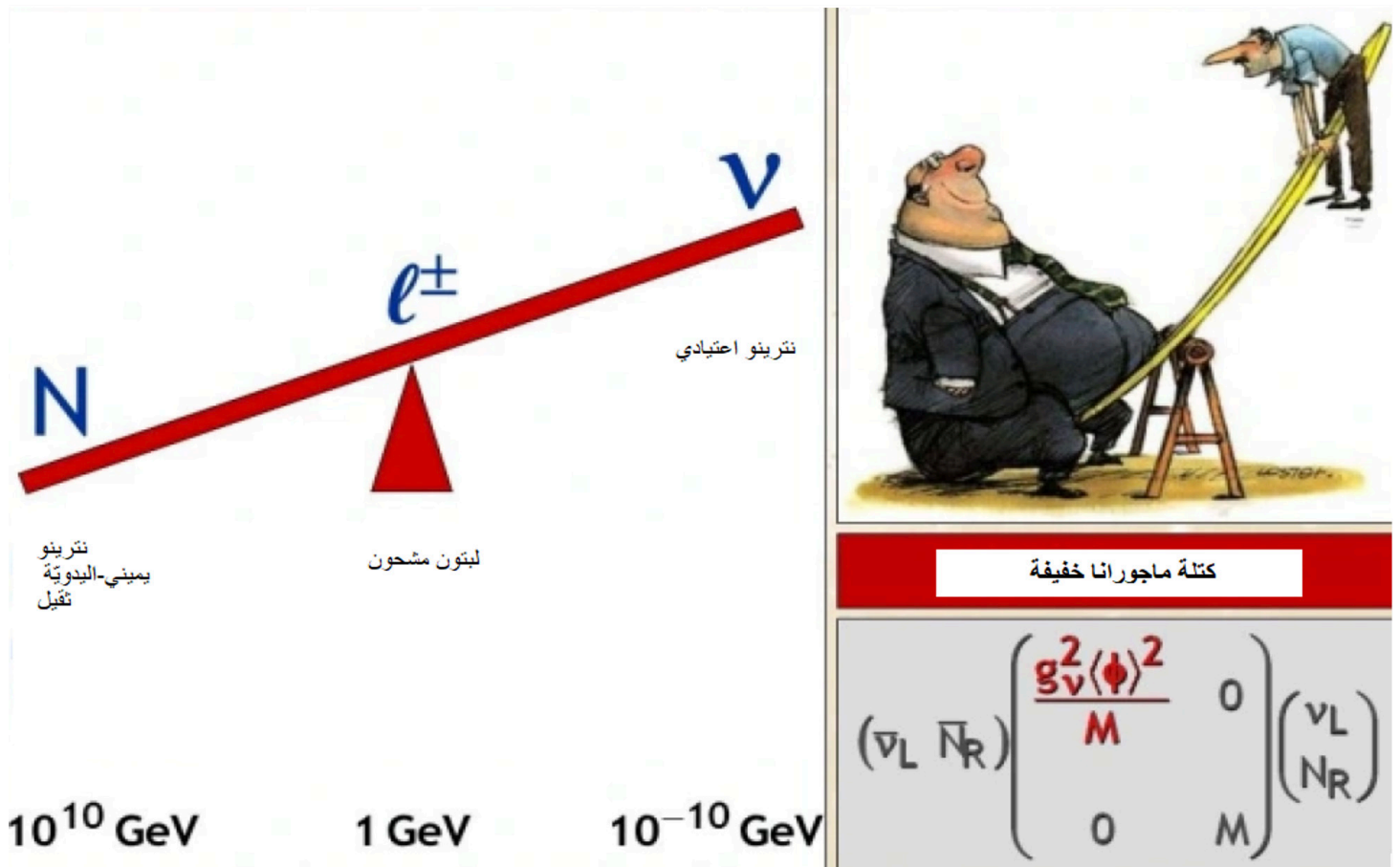
CMBR، ما يقتضي وجود ذرى ووديان في تراوحات درجة الحرارة المقيسة والتي تُعطينا معلومات عن نسبة المادة الطبيعية- التي تعاني هذا الارتداد الناجم عن تأثيرها مع الإشعاع- إلى المظلمة التي لا تتأثر مع الإشعاع. يتسبب وجود ترنينوات الخلفية في انزياح نمط الذرى والوديان هذا إلى مقاسات أكبر بشكل يتحسس للغاية مع عدد عائلات الترنينوات، حيث يثبت قياسات في العقد المنصرم رصده مثل هذه الانزياحات، وبشكل يتوافق فيه البيانات المرصودة مع عائلات ثلاث للترنينوات الخفيفة



(فوق) إشعاع الـ CMBR وفق الساتل COBE موافق لإشعاع جسم أسود، ولكن بوجود نمط من ذرى ووديان. (تحت) يتسبب وجود الـ CvBR بانزياح نمط الذرى والوديان قليلاً وبشكل حساس لعدد عائلات الترنينو.

(ب) تأثيره على تشكيل البنى على المقاس الكبير، فأى تأثير على الـ CMBR لا بد وأن يتجلى على مسافات كبيرة كونية، لأن لا تجانسات الـ CMBR تُعد بذرات أساس تشكيل المجرات وبنية الكون على المقاس الكبير، وفعلًا من خلال دراسة ما يُسمى الاهتزازات الصوتية الباريونية Baryonic acoustic

آلية الأرجوحة لتوليد كتلة النترينو



آلية الأرجوحة. مصدر: [sciencesprings](https://sciencesprings.com)

بتفسير هذه القيمة الصغيرة جدًا. تدوم بعض الجسيمات بشكلٍ يكون فيه اتّجاه سبينها موازياً (مخالفًا) لاتّجاه حركتها، فنقول بأنها ذات يدويّة يمينيّة (يساريّة)، ونجد أكثر الجسيمات بنوعيّ يدويّته، ما خلا النترينو الذي لم نجد إلاّ الأيسر منه. ولكن آلية الأرجوحة تفترض وجود نوعين من النترينوات: خفيفة عسراء وهي المألوفة، وثقيلة يسرة (يمينيّة) لم نرها قطّ ولكن الآليّة تفترض وجودها وبكتلة ضخمة بشكلٍ غير عادي، إذ قد تكون أثقل من البروتون بكوادريون (10^{10}) مرّة. علاوةً على ذلك، تفترض الآليّة أن هذه النترينوات اليمينيّة يمكن أن تقبل كتلةً من شكل ماجورانا، أي أن الحقل المُعبّر

تغطّي كتل الجسيمات الأولى مجالًا واسعًا، فالإلكترون أخفّ بألفي مرّة تقريبًا من النيكلون (البروتون أو النترون) الأخفّ بدوره بمائة مرّة من جسيم الهيجز، ولكن النترينو يقف خفيًا لدرجة غريبة، فكان يُعدّ وفق النموذج المعياري لفيزياء الجسيمات لغاية التسعينيات عديم الكتلة، إلى أن تمّ اكتشاف اهتزازاته حيث يمكن تفسير النقص في عدد بعض أنواع أو نكهات النترينو من خلال خضوعه لتذبذبات ينتقل وبقها من عائلة ذات نكهة معيّنة إلى أخرى. لا يمكن تفسير هذه التذبذبات إلاّ بافتراض كتلة غير معدومة للنترينو، أصغر بحوالي مليون مرّة وربّما أكثر- من كتلة الإلكترون. تسمح آلية الأرجوحة

لـ N إلكترون والذي يضم حدودًا توصف الطاقة الحركية والتجاذب الكولومبي بين الإلكترونات والنوى والتنافر الكولومبي بين الإلكترونات. يمكن أن تشمل في حدّ التأثير مع النوى التناورات المتبادلة بين هذه الأخيرة، أو تأثيرات حقول خارجية، وهدفنا هو إيجاد دالة موجية لـ N إلكترون تحلّ معادلة شرودينغر من جهة وتخضع لمبدأ باولي بأن تتغير إشارتها عند إجراء تبديل بين أيّ جسيمين من جهة أخرى.

بسبب مبدأ باولي، لا يمكن كتابة الدالة الموجية الإجمالية

$$\Psi(x_1, x_2, \dots, x_n)$$

كجاء دالات موجية

$$\prod_{i=1}^N \psi_i(x_i)$$

كلّ منها يمثل دالة لجسيم منفرد تكتب في الحالة اللانسبوية- كجاء قسم مكاني بآخر سبيني، بل نستخدم تركيبًا خطيًا من محدّدات سلاتر، حيث كلّ محدّد

$$\Phi_{\alpha_1 \alpha_2 \dots \alpha_N}(x_1, x_2 \dots x_N) =$$

$$\frac{1}{\sqrt{N!}} \begin{vmatrix} \psi_{\alpha_1}(x_1) & \psi_{\alpha_1}(x_2) & \dots & \psi_{\alpha_1}(x_N) \\ \psi_{\alpha_2}(x_1) & \psi_{\alpha_2}(x_2) & \dots & \psi_{\alpha_2}(x_N) \\ \vdots & \ddots & \ddots & \vdots \\ \psi_{\alpha_N}(x_1) & \psi_{\alpha_N}(x_2) & \dots & \psi_{\alpha_N}(x_N) \end{vmatrix}$$

يحقق خاصية مبدأ باولي بسبب انعكاس إشارته عند تبديل أيّ عمودين، ويمثّل تشكيلة واحدة من N مدار (أو سوّية) تشغلها الـ N إلكترون. نظرًا لعدم معرفتنا المسبقة بماهية المدارات المشغولة، فإنّ الدالة الموجية الإجمالية عمومًا تُكتب كتركيب خطي من محدّدات سلاتر، يحقق أوتوماتيكياً مبدأ باولي بسبب تحقيق كلّ من حدود التركيب للمبدأ. لا يمكن حلّ معادلة شرودينغر باستخدام تركيب لا نهائي من المحدّدات ولا بدّ من طرق تقريبية.

عنها يكون مطابقاً لمضادّه. عندها، ومن خلال تجميع هذه الترتيبات الخفيفة والثقيلة لتحديد الكتلة - ما يُعرف بتقطير مصفوفة الكتلة المُعبّرة عن الشكل التربيعي لهذه الحقول ضمن اللاغرانجي- نحصل على نوعين من تركيباتها، واحد هما ν (ثانيهما NR) يساري (يميني) اليدوية بكتلة خفيفة m/M (ثقيلة M)، بحيث جاء الكتلتين ثابت m من رتبة كتلة الهيجز، وبالتالي يتم تفسير الكتلة الصغيرة جدًّا للتيرينو من خلال الكتلة الكبيرة جدًّا لـ M ، والتي يمكن أن تتأتى من فيزياء نظريات التوحيد الكبيرة، ومنه فعل الأرجوحة.

علاوة على تفسير القيمة الصغيرة لكتلة التيرينو، تسمح هذه الآلية بتقديم تفسيرات لغلبة المادة على ضدّها في الكون، من حيث أن وجود الترتيبات من طبيعة ماجورانا (أي المطابقة لضدّها) يسمح -بخلاف أكثر النظريات المألوفة- بحدوث انتهاك -ولو كان صغيرًا- لتناظر المادة-ضدّ المادة يسمح بتفسير غلبة المادة في الكون.

بالرغم من عدم رؤيتنا لأيّ من هذه الترتيبات اليمينية، ربّما لعدم تأثيرها مع أيّ من القوى المعروفة، فإنّ العلماء يعتقدون أنهم بتفحص سلوك الترتيبات اليسارية قد نحصل على إشارات عن وجود أصنافها اليمينية، وفي حال وجدنا مثل تلك الإشارات فإنّ ذلك قد يدعم صحة آليّة الأرجوحة.

المراجع: [SCHOLARPIDIA](https://www.scholarpedia.org) و [symmetrymagazine](https://www.symmetrymagazine.org)

مقارنة بين طريقتي هارتر-فوك ونظرية دالي الكثافة في الفيزياء الكيمياء الجزيئية

تبدأ كلتا الطريقتين من نفس التابع الهاملتوني

النظرية الأولى شكل الدالي، ولكن هنا تأتي نظرية HK الثانية لتصف لنا خاصية مميزة لهذا الدالي من أنه يحقق قيمة أصغر عند الكثافة الإلكترونية الأرضية، وبالتالي بعد افتراض تقريبات على شكل دالي الطاقة، يمكن إذن استخدام الحساب المتغيراتي لتحديد الكثافة الإلكترونية الأرضية، وبالتالي جميع خصائص المنظومة.

المراجع:

- [SCHOLARPEDIA](#)
- [ويكيبيديا](#)
- A Chemist's Guide to Density Functional Theory. Second Edition, Wolfram Koch, Max C. Holthausen, ISBNs: 3-527-30372-3 (Softcover); 3-527-60004-3 (Electronic)

مسألة للطلاب

نهدف في هذه الزاوية إلى تدريب طلابنا على حل بعض المسائل التي تتطلب بعض التفكير. نختار عادةً مثل هذه المسائل من الأسئلة التي تُلقى في المسابقات (ومنها مسابقات الأولمبيادات الدولية). في كل عدد، سوف نعرض حلاً لمسألة عُرضت في العدد السابق ونقدّم مسألة جديدة.

مسألة غير محلولة (فيزياء، بعد إتمام مُقرّر أولي في علم الكون):

تُطلق رصاصة ضمن كون روبرتسون-ووكر المتمدّد،

$$ds^2 = -dt^2 + R^2(t) \left[\frac{dr^2}{1-kr^2} + r^2 (d\theta^2 + \sin^2 \theta d\phi^2) \right]$$

تنص طريقة هارتر-فوك Hartree-Fock على استخدام محدد سلاتر واحد لتقريب الدالة الموجية الإجمالية، حيث يتم استخدام تقنيات الحساب المتغيراتي من أجل اختيار الدوال الموجية للجسيمات المنفردة بشكل يجعل طاقة الحالة الأساسية

$$E_0 = \langle \Psi_0 | H | \Psi_0 \rangle$$

أصغر. بسبب الاقتصار على محدد واحد للدالة الموجية، فإننا غير قادرين على تفسير ارتباطات correlation الإلكترونات بشكل كامل، وعلى هذا النحو فإن طاقة HF تكون عادةً أعلى من الطاقة الفعلية للمنظومة.

أما بالنسبة لطريقة نظرية دالي الكثافة (Density Functional Theory (DFT)، فإنه بدلاً من التفكير في الدالة الموجية الإجمالية، فإن الكمية المدروسة هي الكثافة الإلكترونية (تُعطى في حالة محدد سلاتر بالشكل البسيط

$$\rho_0(\mathbf{r}) = \sum_{i=1}^N |\psi_{a_i}(\mathbf{r})|^2$$

$$\rho_0(\mathbf{r}) = \sum_{i=1}^N \int d\mathbf{r}_1 \int d\mathbf{r}_2 \cdots \int d\mathbf{r}_N |\Psi_0(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, \dots, \mathbf{r}_N)|^2 \delta(\mathbf{r}_i - \mathbf{r})$$

$$= N \int d\mathbf{r}_2 \cdots \int d\mathbf{r}_N |\Psi_0(\mathbf{r}, \mathbf{r}_2, \dots, \mathbf{r}_N)|^2$$

تعتمد طريقة نظرية DFT على نظرية هوهنبرج-كوهن (Hohenberg-Kohn (HK) الأولى القائلة بأنه يمكن عكس العلاقة السابقة، أي أنه إذا أعطينا الكثافة الإلكترونية في الحالة الأرضية أمكننا تحديد الدالة الموجية الإجمالية الموافقة، التي تغدو هكذا داليًا (functional، أي دالة لدالة) لدالة الكثافة، وبالتالي طاقته الأرضية كذلك

$$E_0[\rho_0(\mathbf{r})].$$

ولكن كيف لنا معرفة أن الكثافة الإلكترونية المُعطاة هي الموافقة للحالة الأرضية؟ لا تُعطينا

حلّ مسار الدائرة المأوّة بالرؤوس بنصف قطر $\frac{A}{\sqrt{3}}$ وبتسارع مركزي $\mu g = \frac{v^2}{R}$ زمنًا قدره $\frac{2\pi A}{4\sqrt{3}\sqrt{\mu g}}$ (لماذا؟)، الأقلّ من زمن الـ bangbang، ولكه ليس الزمن الأقصر.

لحلّ المسألة الموضّحة في الشكل الأيسر، نلجأ إلى راسم الخطا hodograph الموضّح في الشكل الأيمن.

بالتناظر، طويّلات متّجهات السرعات عند الرؤوس متساوية، وتُعيد صياغة مسألتنا القائلة بالبحث عن مسار بين الوضعين (0) و (1) نقطعه بزمن أصغري مع كون المسافة الفاصلة بينهما A ثابتة بجعلها مسألة البحث عن مسار نقطعه بزمن ثابت T بين الوضعين (0) و (1) بحيث يكون متوسط طويّلة مركّبة السرعة على محور الـ x أعظمًا

في راسم الخطا لدينا $v = (u, w) = (-u, w)$ ، فيكون متوسط u المساوي لـ $\langle u \rangle = \int_{(0)}^{(1)} u dv$ ما نبحت عن تعظيمه (أو تصغير عكسه U)

$$\min \left(\int_{w_0}^{w_1} U \sqrt{1+U'^2} dw \right)_{T=const}$$

لاحظ أنه لولا وجود القيد على ثبات الزمن، لأضحت المسألة مطابقة لمسألة تصغير الطاقة الكامنة الثقالية لحبل يتدلّى بين نقطتين، ومن الواضح أنّ حلّ محدودًا لها إلاّ بتقييد طول الحبل. مع خيارنا للوحدات لدينا عند الوضعين (0) و (1):

$$R = \frac{1}{\sqrt{3}}, \frac{v^2}{R} = 1 \Rightarrow v = \frac{1}{\sqrt{3}}$$

إذن في راسم الخطا:

$$(0) \equiv \left(\frac{-1}{2\sqrt{3}}, \frac{-\sqrt{3}}{2} \right), (1) \equiv \left(b = \frac{1}{2\sqrt{3}}, -h = \frac{-\sqrt{3}}{2} \right)$$

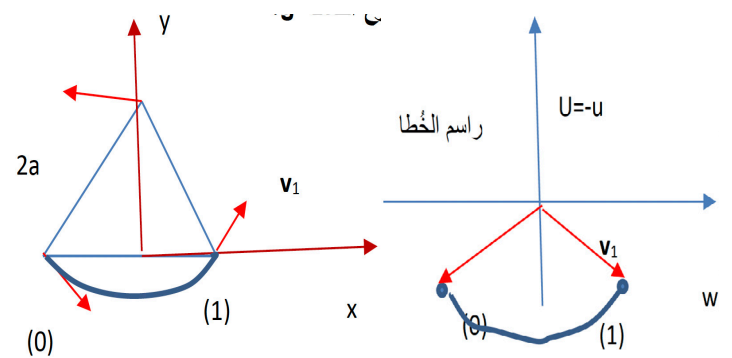
سرعتها v_1 (بالنسبة لراصد كوني ثابت في الإحداثيات المتحركة ضمن تمدد الكون comoving). بعد برهة تمّدّد خلالها الكون بمقدار عاملٍ مقاييس $(1+z)^{-1}$ (scale factor)، غدت سرعة الطلقة بالنسبة للراصد الكوني الموضعي في موضع الرصاصة الجديد مساويةً لـ v_2 . نعتبر $c=1$. برهن العلاقة

$$\frac{\gamma_2 v_2}{\gamma_1 v_1} = \frac{1}{1+z} : \gamma(V) = (1-V^2)^{-\frac{1}{2}}$$

واستنتج عبارة الانزياح نحو الأحمر الموافقة للفوتونات

مسألة العدد الماضي (فيزياء، منهاج سنة ثانية جامعة)

يدور طفل حول منزلٍ شكله مثلث متساوي الأضلاع بضع $2a$ على حقلٍ جليدي. ما هو الزمن الأقصر لدورة واحدة حول المنزل بافتراض مسار أمثلي، علماً أن معامل الاحتكاك بين الطفل والجليد ثابت μ وأن تسارع الثقالة g.



تتعلّق المسألة بطفل يتحرّك بين رؤوس المثلث بتسارع طويّله ثابتة وتساوي μg . نختار واحدتي المسافة والزمن: $A = 2a = 1 = \mu g$

يعطي حلّ الـ bangbang القاضي بانعدام السرعة عند الرؤوس، وعكس جهة التسارع عند منتصف كل ضلع زمن قطع قدره $\frac{6A}{\sqrt{\mu g}}$ (لماذا؟)، بينما يُعطي

$$u(b) = -h \Rightarrow \lambda = -h - c \cosh \frac{b}{c}$$

نحسب متوسط مركبة السرعة u بين الوضعين (0)

و(1)

$$\langle u \rangle = \frac{1}{T} = \int_{-b}^b u dv = \int_{-b}^b u \sqrt{1+u'^2} dw = \int_{-b}^b \left(h + c \cosh \frac{b}{c} - c \cosh \frac{w}{c} \right) \cosh \frac{w}{c} dw$$

فنجد:

$$\frac{1}{2c \sinh \frac{1/2\sqrt{3}}{c}} = \left[\frac{\sqrt[4]{3}}{2} + c \cosh \frac{1/2\sqrt{3}}{c} \right] 2c \quad \times$$

$$\sinh \frac{1/2\sqrt{3}}{c} - \frac{c}{2} \left[\frac{1}{\sqrt[4]{3}} + \frac{c^2}{2} \sinh \frac{1/2\sqrt{3}}{c} \right]$$

وبحلها رقمياً نحصل على c ، وبالتالي يكون الزمن الأقصر هو $3T$. بإجراء تعليمة ماثماتيكا الموافقة

```
csol[T_?NumericQ] := Abs[c] /. FindRoot[T == 2 c Sinh[1/(2 3^(1/4) c)], {c, 1}]
FindRoot[-1/T + ((3^(1/4))/2 + csol[T] Sqrt[1 + (T^2)/(4 (csol[T])^2)]) T - csol[T]/(2 3^(1/4)) - T/4 (csol[T])^2 Sqrt[1 + (T^2)/(4 (csol[T])^2)] == 0, {T, 1}, WorkingPrecision -> 10]
```

نجد $\{T \rightarrow 0.9681933462\}$ أي الزمن الأقصري المنشود حسابه يساوي تقريباً $\frac{2.9A}{\sqrt{\mu g}}$

بتطبيق طريقة مُضاعف لاغرانج Lagrange Multiplier في الحساب المتغيراتي

$$T = \int dt = \int \frac{dv}{dv/dt} = \int dv = \int_{w_0=-b}^{w_1=b} \sqrt{1+U'^2} dw \Rightarrow \min \left\{ \int_{w_0=-b}^{w_1=b} U \sqrt{1+U'^2} dw - \lambda \left[\int_{w_0=-b}^{w_1=b} \sqrt{1+U'^2} dw \right] - T \right\} = \min \left\{ \int_{w_0=-b}^{w_1=b} (U - \lambda) \sqrt{1+U'^2} dw + 2b \lambda T \right\}$$

بإسقاط الحد الأخير الثابت الذي لا يدخل في معدلات أولر-لاغرانج، وبملاحظة أن التابع المُكامل عليه L لا يعتمد صراحة على المتحول w ، فيكون الهاملتوني الموافق ثابتاً، أي

$$H = \frac{\partial L}{\partial U'} - L = \frac{(U - \lambda)U'^2}{\sqrt{1+U'^2}} - (U - \lambda)\sqrt{1+U'^2} = C$$

إذن

$$U'^2 = \frac{(U - \lambda)^2}{C^2} - 1 \Rightarrow \frac{d(U - \lambda)}{dw} = \sqrt{\frac{(U - \lambda)^2}{C^2} - 1}$$

وبالتالي

$$\int dw = \int \frac{d(U - \lambda)}{\sqrt{\frac{(U - \lambda)^2}{C^2} - 1}} = C \cosh^{-1} \frac{U - \lambda}{C}$$

أي $U - \lambda = C \cosh \frac{w+B}{C}$. باعتبار $u = -U$ عند الوضعين (0) و(1) متساوية نجد $B=0$ ، وبأخذ $c = -C$ نجد

$$u = \lambda + c \cosh \frac{w}{c}$$

الآن: نحاول إيجاد c ، λ لحساب T :

$$T = \int_{-b}^b \sqrt{1+u'^2} dw = \int_{-b}^b \sqrt{1 + \sinh^2 \frac{w}{c}} dw$$

أي $T = 2c \sinh \frac{b}{c}$:
كذلك

NuDM-2024



إعلان مؤتمر النيوتريينو والمادة المظلمة

المؤتمر الدولي حول النيوتريونات والمادة المظلمة (NuDM-2024) مخصص لذكرى الأستاذ الدكتور دورموش علي ديمير، وهو فيزيائي نظري تركي مؤقّر. لقد تسبب رحيله في فبراير-شباط 2024 في حزن عميق للمجتمع العلمي، وتكريس هذا المؤتمر لذكراه هو تكريم لإرثه العلمي.

يتبع مؤتمر NuDM-2024 الذي تنظمه دار أندروميديا للنشر والخدمات الأكاديمية من المملكة المتحدة بالتعاون مع مدينة زويل للعلوم والتكنولوجيا في مصر، خطى NDM-2020 و NuDM-2022. ويتمثل هدفه الأساسي في العمل كمنصة لتبادل الأفكار والمناقشات حول ظواهر فيزياء الجسيمات، والإشارات التمييزية في الفيزياء الفلكية، والقيود التجريبية المتعلقة بالنيوتريونات، والمادة المظلمة، والطاقة المظلمة، إلى جانب استكشاف الروابط المحتملة فيما بينها.

سيتضمن برنامج المؤتمر عروضاً عامة يقدمها متحدثون مرموقون ومحاضرات مختارة من المُلخّصات المُقدّمة. ستتناول هذه الجلسات مجموعة واسعة من الموضوعات المترابطة في فيزياء الجسيمات وعلم الكون والفيزياء الفلكية، مثل المادة المظلمة والطاقة المظلمة والموجات الثقالية والثقوب السوداء البدائية وتأثيراتها على فهمنا للكون.

موعد المؤتمر: 11-14 ديسمبر-كانون الأوّل 2024،

الموعد النهائي للتسجيل ودفع الرسوم: 31 أكتوبر-تشرين الأوّل 2024

انتهز الفرصة وسارع [للتسجيل](#)



هذه المجلة

صادرة عن الجمعية العربية للفيزياء ArPS
- تهدف إلى تبسيط العلوم الفيزيائية والرياضية وجعل المعارف العميقة في
هذه العلوم متاحةً أمام القارئ العربي المثقف

يحتوي العدد الثاني:

- مقابلةً مع العالمة ماري بيشاي، المتحدث الرسمي لتجربة النيوتريانو عميقاً تحت
الأرض (DUNE) والحائزة على جائزة الكشف-الاختراق (Breakthrough) في العلوم
الأساسية

- مقالاً أساسياً يغطي موضوع فيزياء النيوتريانو وكيفية الكشف عن هذا الجسيم
الشبح

- أربعة مقالات عن الخلايا الشمسية، وعن الضوء الكمومي، وعن الشواش
والكسوريات، وعن الموصلية الفائقة.

- تغطيةً لأخبار علمية متنوعة تمتدّ من أوّل قمر صناعي خشبي في العالم إلى
اكتشاف أكبر ثقب أسود نجمي في مجرتنا، مروراً بالكشف عن شرائط نانوية ذات
موصلية فائقة عند انضغاطها وغيرها

- مواضيع إثرائية عديدة، منها آلية الأرجوحة لتوليد كتلة النيوتريانو، وإشعاع
الخلفية النيوتريوني، ومقارنة طريقتي هارثري فوك ونظرية داليّ الكثافة في
الفيزياء والكيمياء الجزيئية، بالإضافة إلى استعراض كتب مرجعية وعرض مسأله
ذات فوائد تعليمية

- إعلان مؤتمر النيوتريانو والمادة المظلمة الذي ستنظّمه مدينة زويل للعلوم
ديسمبر-كانون الأول 2024