

مستارات

فن الفيزياء

التعلم الآلي

ذكاء صناعي ومعطيات كبيرة



مقابلة مع الأستاذ هيربرت دراينر
أستاذ الفيزياء النظرية في جامعة بون، والمُشرف
المؤسس على برنامج "عروض الفيزياء"

العدد الرابع

ديسمبر/كانون الأول 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

محسن زهران

اللجنة الاستشارية

السيد إبراهيم لاشين

عمار سكجي

مصطفى الأعصر

الهيئة التنفيذية

راوية رمضان

إيمان طه

رند الفار

دانا عبد الغني

ريم بري

فريق التصميم

مسار المطيري

أفنان محمد علي

"Trajectories 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 تغطي 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

مقدمة رئيس التحرير	3
الكَوْنُ الْمُغَيَّمُ	5
الذكاء الاصطناعي: مفاهيم مؤسّسة ووعود كبيرة	15
مقابلة مع الأستاذ هربرت دراينر	30
من علم الخرائط إلى نظام التموضع العالمي	41
تطور أجيال الخلايا الشمسية: مواد وتقنيات وتطبيقات	57
الذكاء الاصطناعي والتعلم الآلي في الفيزياء	74
موضوعات إثرائية	85
مراجعة لكتاب	85
علماء، معلّمون ومرّبون: الدكتور الراحل محمد علي محمد	89
نوبل في الفيزياء	91
معارف	94
مسألة للطلاب	105
إعلان عن مجلة	108
الغلاف الخلفي	85

مقدمة رئيس التحرير

نضال شمعون



يسرّني أن أرحّب بقراء العدد الرابع -خريف- 2024 من مجلّة "مسارات في الفيزياء" الصادرة عن الجمعية العربية للفيزياء، وأتقدّم بجزيل شكري لمن ساهم وساعد في إتمامه، وأعتذر عن التأخّر في إعلانها بسبب ظروف طارئة تتعلّق بالأحداث التاريخية التي وقعت في وطني الحبيب سوريا وصعوبة اتّصالي مع زملائي في فريق التحرير بسبب انقطاع الكهرباء يوميًا لساعات طوال.

جرى اختيار الموضوع الرئيس لهذا العدد متوافقًا مع منح جوائز نوبل في الفيزياء والكيمياء لعام 2024 لعلماء ساهموا في تطوير التعلّم الآلي، الذي يهدف إلى محاكاة تعلّم الإنسان، ويعدّ جزءًا من الذكاء الصناعي حيث يتعلّم الحاسوب من المعطيات ويحلّس من أدائه تدريجيًا. بالرغم من تساؤل البعض عن سبب منح مثل هذه الجوائز المرموقة في العلوم لما قد يبدو تقنيّةً حسابيّة، فإن قسماً من الإجابة يكمن ربّما في إدراك أن خوارزميّات التعلّم الآلي إنما تستوحي تصميمها انطلاقاً من مفاهيم فيزيائيّة أساسيّة في مجال الفيزياء الإحصائيّة، ما يسوّغ منح الجائزة وبجدارة لمبتكري هذه المفاهيم.

هناك مقالان عن الذكاء الصناعي في هذا العدد، أحدهما عن أساسيّاته ومفاهيم الشبكات العصبونيّة والتعلّم العميق، بالإضافة إلى تحدّيات اليوم

وتوجّهات المستقبل فيما يخصّ علاقة التعلّم الآلي بالعلوم عاقّة، بينما يقصر ثانيهما المناقشة على التطبيقات في مجال فيزياء الجسيمات الأوّليّة وعلوم الكون، ويبين كيف أضحت تقنيّات تعلّم الآلة أدلةً قويّةً تساعد فيزيائيّ الطاقة العالية على التعرّف واختبار نماذج لفيزياء ما وراء النموذج القياسي سواء أكان المتعلّق بالجسيمات الأوّليّة أم بعلوم الكون. وهنا يأتي المقال الثالث عن الكون المعتم فيتحدّث عن الانفجار الكبير والمادة المعتمّة والطاقة المعتمّة ما يُشكّل حجرٍ رحىّ لنموذج الكونيّات القياسي مع بعض تنويعاته. يعالج المقال الرابع النسبيّة العاقّة من خلال مناقشة نمذجة السطوح المنحنية وفق خرائط لتحديد الموقع وصولاً إلى نظام التموضع الشمولي وزيادة دقّته بأخذ تصحيحات النسبيّة

الخاصة والعاقبة في الاعتبار. المقال الخامس هو تتمة لمقال نُشر في عدد ربيع 2024 عن الخلايا الشمسية، حيث يتطرق بشيء من التفصيل للمبادئ الفيزيائية في عملها.

أجربنا هذا العدد مقابلة مع الأستاذ هربرت دراينر، أستاذ الفيزياء النظرية في جامعة بون، والشهير بأعماله في مجال الجسيمات الأولية والكونيات، ولكن المعروف أيضًا بنشاطاته التعريفية بالفيزياء من خلال "عروض الفيزياء" التي يقدمها مع طلاب جامعتهم للعاقبة، آملين يومًا ما أن يقام مثل هذا النشاط في مدينة عربية.

وكالعادة، يضم العدد باب أخبار علمية، وباب معلومات إثرائية ضم من بين ما حواه لمحة عن العالمين هوبفيلد وهينتون الحائزين على جائزة نوبل عام 2024 بفضل اكتشافاتهما التي مهدت الطريق لتعلم الآلة مع شبكات الذكاء الصناعي، مع شرح في قسم المعارف عن الشبكات العصبونية التلافية. هناك إعلان عن مجلة "المواد الناشئة" Emergent Materials التي تشارك في تحريرها باحثة من الجمعية العربية للفيزياء، بالإضافة إلى عرض لكتابين: واحد بالعربية لزмили رئيس الجمعية، ويُعدّ الأول من نوعه باللغة العربية حول بنية المادة والنظريات الحديثة في الفيزياء، أمّا الثاني فأكاديمي عن النسبية العاقبة. نورد أيضًا حلّ مسألة العدد السابق مع مسألة جديدة، بينما نقدّم في هذا العدد نبذة عن مربّي وعالم مصري هو المرحوم الدكتور محمد علي محمد.

في الختام، أعود وأقدّم كامل شكري لكل من ساهم بإخراج هذا العدد إلى الضوء، وبانتظار مساهماتكم في عدد شتاء 2025- اللاحق.

الْكُونُ الْمُعْتِمُ

إِسْرَاءُ الْخَطِيبِ
أَسْتَاذَةُ الْفِيزِيَاءِ النَّظَرِيَّةِ بِقِسْمِ الْفِيزِيَاءِ، كَلِيَّةِ الْعُلُومِ،
جَامِعَةِ عَيْنِ شَمْسٍ، مِصْرَ

مِنَ الثَّابِتِ بِالمُشَاهَدَاتِ الفَلَكِيَّةِ أَنَّ مُحْتَوَيَاتِ
الْكُونِ المَرِيئَةَ تُقْتَلُ حَوَالِي 4% فَقَطْ مِنْ
مُحْتَوَيَاتِهِ الكُلِّيَّةِ، أَمَّا البَاقِي فَلَا يَزَالُ مَجْهُولًا
وَعَيرَ مَرِيئٍ (مُعْتَمًا). نَتَعَرَّفُ فِي هَذَا المَقَالِ
عَلَى مَا تَوْصِلُ إِلَيْهِ عُلَمَاءُ الفِيزِيَاءِ وَالْفَلَكِ
بِخُصُوصِ هَذَا الجُزْءِ المُعْتَمِ مِنَ الكُونِ

أولاً: مَقْدِمَةٌ

لَمْ يَكُنْ عِلْمُ الفَلَكِ مَعْرُوفًا بِشَكْلِهِ الحَالِي حَتَّى
بِدَايَاتِ القَرْنِ العِشْرِينَ، بَلْ لَمْ يَكُنْ مَعْرُوفًا مَا إِذَا
كَانَتِ النُّجُومُ الَّتِي تُكُونُ مَجَرَّتَنَا دَرْبِ النُّبَاتَةِ تُشَكِّلُ
الْكُونِ كُلَّهُ أَمْ إِنَّهَا إِحْدَى الجُزْرِ الكَوْنِيَّةِ المَعْرُوفَةِ
حَالِيًا بِالمَجَرَّاتِ. وَيَزِيدُ عِلْمُ الفَلَكِ الحَدِيثُ عَلَى
بَيِّنَاتِ المُشَاهَدَاتِ الفَلَكِيَّةِ -أَوْ مَا يُعْرَفُ بِالأَرصادِ،
وَقَدْ بَدَأَتْ تِلْكَ المُشَاهَدَاتُ عَامَ 1912 حِينَ بَدَأَ عَمَلُ
مُجمُوعَةٍ مِنَ العُلَمَاءِ كَانُوا لَهُمُ العَالِمَةُ الأَمْرِيكِيَّةُ
هَنْرِييْتَا لِيْفِيث، ثُمَّ تَبَعَهَا آخَرُونَ مِثْلُ إدوين هَابِل
وَمِيلْتُون هَامْسُون، وَقَدْ أَظْهَرَتْ مُشَاهَدَاتُهُمْ وَجُودَ
مَجَرَّاتٍ أُخْرَى إِلَى جَانِبِ مَجَرَّتَنَا دَرْبِ النُّبَاتَةِ، لَيْسَ هَذَا
فَحْشَبٌ، بَلْ أَوْضَحَتْ أَيْضًا أَنَّ تِلْكَ المَجَرَّاتِ تَبْتَعِدُ عَنَّا
بِسُرْعَاتٍ تَكَادُ تَتَنَاسَبُ مَعَ بُعْدِهَا عَنِ مَجَرَّتِنَا، فَكُلَّمَا
زَادَ بُعْدُ الأَجْزَامِ عَنَّا كُلَّمَا زَادَتْ سُرْعَةُ ابتِعَادِهَا. وَلِأَنَّ
كُلَّ شَيْءٍ يَتَحَرَّكُ بَعِيدًا عَنِ كُلِّ شَيْءٍ، فَهَذَا يَعْنِي أَنَّ
الأَجْزَامَ دَاخِلَ الكُونِ كَانَتْ أَقْرَبَ لِبَعْضِهَا فِي المَاضِي
السَّحِيقِ مِمَّا هِيَ عَلَيْهِ الآنَ. هَذَا يَدُلُّ عَلَى اتِّسَاعِ
الْكُونِ بِمَرُورِ الزَّمَنِ، وَتِلْكَ النَتِيجَةُ تَعْنِي أَنَّ الكُونِ
يَتَطَوَّرُ وَيَتَغَيَّرُ عِزَّ الزَّمَنِ.

وَقَدْ اسْتَطَاعَ عَالِمُ الفِيزِيَاءِ وَالرِّبَاضِيَّاتِ أَلْكُسَنْدَرُ
فُرِيدْمَان عامَ 1922 اسْتِثْقَاقَ الحُلُولِ الرِّبَاضِيَّةِ لِمُعَادَلَاتِ
أَيْنِسْتَاينَ لِمَجَالِ الجاذِبِيَّةِ وَالَّتِي تَصِفُ الكُونِ المُتَّسِعَ،
وَقَدْ عُرِفَتْ هَذِهِ المُعَادَلَاتُ بِمُعَادَلَاتِ فُرِيدْمَان. وَفِي



هَذِهِ الْأَشْغَةُ عَلَى أَنَّهَا بَقَايَا الْإِنْفِجَارِ الْعَظِيمِ. وَمِمَّا يُؤَكِّدُ صِحَّةَ تَصَوُّرِ نَمُودَجِ الْإِنْفِجَارِ الْعَظِيمِ أَنَّ الْفَلَكِيِّينَ جِئُوا تَمَكَّنُوا مِنْ رَصْدِ أَشْغَةِ الْخَلْفِيَّةِ الْمِيْكَرُووِيْفِيَّةِ وَجَدُوا أَنَّ دَرَجَةَ الْخَرَارَةِ الْمَقَاسَةِ لِتِلْكَ الْأَشْغَةِ جِئُوا تَصِلُ إِلَيْنَا مِنْ أَجْزَاءٍ مُخْتَلِفَةٍ مِنَ السَّمَاءِ تَكَادُ تَكُونُ ذَاتَ قِيَمٍ مُتَمَاثِلَةٍ، وَلَا تَزِيدُ الْإِخْتِلَافَاتُ فِيهَا عَنْ جُزْءٍ مِنْ مِائَةِ أَلْفِ جُزْءٍ، مِمَّا يَدُلُّ عَلَى صِحَّةِ الْإِزْتِكَارِ عَلَى مَبْدَأِ التَّجَانُسِ وَالتَّمَاثُلِ الْكُونِيَّ

وَتُشِيرُ الدَّلَائِلُ إِلَى أَنَّ الْمَادَّةَ الْبَارِيُونِيَّةَ (Baryonic Matter)¹ فِي الْكُونِ تُقْبَلُ حَوَالِي 4% فَقَطْ مِنْ مَكُونَاتِ الْكُونِ، وَهُوَ يُقْبَلُ النُّجُومُ وَالْأَجْزَاءُ الْمَرْيِيَّةُ مِنَ الْمَجَرَّاتِ وَغَيْرِهَا مِنَ التَّرَكِيبَاتِ الْكُونِيَّةِ، أَمَّا مَا تَبَقِيَ مِنْ مَكُونَاتِ الْكُونِ -أَيَّ حَوَالِي 96% - فَيُظَلُّ مُجْهُولًا مُغْتَمًا وَلَا نَعْرِفُ كُنْهَهُ. وَلَقَدْ أُثْبِتَتِ الْمُشَاهَدَاتُ الْفَلَكِيَّةُ وَالْأَدَلِيلُ الْعِلْمِيَّةُ أَنَّ مَا نَسْبُهُ حَوَالِي 23% مِنْ مُخْتَوِيَاتِ الْكُونِ هُوَ عِبَارَةٌ عَنْ جُسَيْمَاتٍ لِمَادَّةٍ غَيْرِ مَرْيِيَّةٍ تَخْضَعُ لِقُوَى الْجَذْبِ الْكُتْلِيَّ وَقَدْ عُرِفَتْ "بِالْمَادَّةِ الْمُغْتَمَةِ (Dark Matter DM)"، أَمَّا الْجُزْءُ الْبَاقِي وَهُوَ 73% مِنَ الْمَخْتَوِيَّاتِ فَكُنْهَهَا غَيْرُ مَعْرُوفٍ وَلَيْسَ لَهَا الْخَصَائِصُ الْمَعْرُوفَةُ لِمَادَّةٍ، وَقَدْ أَطْلَقَ الْعُلَمَاءُ عَلَيْهَا مُسَمًى "الطَّاقَةُ الْمُغْتَمَةُ (Dark Energy DE)".

وَبِنَاءً عَلَى نَمُودَجِ الْإِنْفِجَارِ الْعَظِيمِ، فَإِنَّ الْإِلِكْتُرُونَاتِ وَأَنْوِيَّةَ الذَّرَّاتِ وَالْيُوتْرُونِيَّو، وَكَذَلِكَ جَسِيمَاتِ الْمَادَّةِ الْمُغْتَمَةِ قَدْ خُلِقَتْ فِي الْمُنَازَاتِ الْأُولَى مِنْ عُمْرِ الْكُونِ. وَمَعَ نِهَآيَةِ عَصْرِ التَّنْصَحْمِ الْكُونِيَّ (Cosmic

عَامَ 1931 وَضَعَ عَالِمُ الْفِيْزِيَاءِ لُومِيْئِرُ نَظَرِيَّةَ الْإِنْفِجَارِ الْعَظِيمِ وَالَّتِي تُقَوْمُ عَلَى أَسَاسِ أَنَّ الْكُونَ قَدْ بَدَأَ مِنْ حَالَةٍ أَوَّلِيَّةٍ ذَاتِ كَثَافَةٍ مُزْتَفَعَةٍ وَدَرَجَةِ خَرَارَةٍ عَالِيَةٍ ثُمَّ بَدَأَ فِي التَّوَسُّعِ بَعْدَ ذَلِكَ، وَقَدْ اقْتَرَحَ لُومِيْئِرُ أَنَّ الْكُونَ قَدْ نَشَأَ مِنْ "ذَرَّةٍ بَدَائِيَّةٍ"، وَافْتَرَضَ أَنَّ هَذَا الْجِسْمَ الْإِلْتِدَائِيَّ عَالِيِ النَّشَاطِ الْإِشْغَاعِيَّ وَشَدِيدَ الْكَثَافَةِ حَتَّى أَنَّهُ يَخُوي بِدَاخِلِهِ كُلَّ الْمَادَّةِ وَالْفَضَاءِ وَالطَّاقَةِ لِنَكُونَ بِأَكْمَلِهِ. وَقَدْ تَبَنَّى عَالِمُ الْفِيْزِيَاءِ جُورْجُ جَامُو هَذِهِ النَّظَرِيَّةَ وَطَوَّرَهَا عَامَ 1946 بِاسْتِخْدَامِ مُعَادَلَاتِ فَرِيدْمَانِ، وَبَنَى هَذَا التَّطْوِيرَ عَلَى فِكْرَةٍ أَنَّ الْكُونَ الْمُبَكَّرَ كَانَ يَهِيْمُنُ عَلَيْهِ الْإِشْغَاعُ وَلَيْسَ الْمَادَّةُ. وَمَعَ حُلُولِ خَمْسِينَاتِ الْقَرْنِ الْعَشْرِينَ أَصْبَحَتْ الْأَرْصَادُ تَدْعُمُ حَقِيقَةً مَفَادُهَا أَنَّ الْكُونَ كَانَ أَكْثَرَ كَثَافَةً وَأَكْثَرَ سُخُونَةً فِي الْمَاضِي عَمَّا هُوَ عَلَيْهِ الْآنَ، كَمَا أَثْبِتَتْ مَبْدَأَ مَفَادُهُ أَنَّآ لَسْنَا فِي مَوْقِعٍ مُتَمَيِّزٍ مِنَ الْكُونِ، فَإِذَا مَا اعْتَبَرْنَا مِنْطَقَةً كَبِيرَةً مِنَ الْكُونِ -تَضُمُّ مِلْيُونًا مِنَ الْمَجَرَّاتِ مِثْلًا- فَسَوْفَ نَكْتَشِفُ أَنَّ الْكُونَ مُتَجَانِسًا وَمُتَمَاثِلًا فِي جَمِيعِ الْإِتْجَاهَاتِ وَأَنَّآ لَسْنَا فِي مَرْكَزِ الْكُونِ. هَذَا الْمَبْدَأُ هُوَ لُبُّ نَمُودَجِ الْإِنْفِجَارِ الْعَظِيمِ وَالَّذِي أَصْبَحَ يُعْرَفُ رَسْمِيًّا بِنَمُودَجِ الْإِنْفِجَارِ الْعَظِيمِ السَّاخِنِ (Hot Big Bang Model)، وَيَضَعُ تَصَوُّرًا كَامِلًا لِنَظَرِ الْكُونِ بِمَرُورِ الزَّمَنِ. إِلَّا أَنَّ هَذَا النَّصُورَ يَتَنَاقَضُ مَعَ النَّصُورِ الَّذِي وَضَعَهُ بَعْضُ الْفَلَكِيِّينَ مِثْلُ هِيْزْمَانِ بُونْدِي وَتُومَاسِ جُولِدِ عَامَ 1948 وَالَّذِي يَعْتَبِرُ الْكُونَ فِي حَالَةٍ اسْتِفْزَارٍ وَأَنَّهُ سَوْفَ يَسْتَمِرُّ فِي الْبَقَاءِ دُونَ تَغْيِيرٍ مُلْحُوظٍ، وَأَنَّهُ حَتَّى إِذَا تَمَدَّدَ فَإِنَّ الْمَادَّةَ تُخْلَقُ بِدَاخِلِهِ لِمَفْلَأِ الْمَرَاغَاتِ النَّاتِجَةِ عَنِ التَّمَدُّدِ.

وَحِينَ اكْتَشِفَتْ أَشْغَةُ الْخَلْفِيَّةِ الْمِيْكَرُووِيْفِيَّةِ الْكُونِيَّةِ (Cosmic Microwave Background "CMB") عَامَ 1964 انْتَصَرَ نَمُودَجُ الْإِنْفِجَارِ الْعَظِيمِ، حَيْثُ مُسِّرَتْ

¹ الباريونات هي وحدات تكوين المادة التي نعرفها ونتعامل معها بشكل يومي، وهي جسيمات غير أولية - أي أن لها تركيبًا داخليًا، وهي تقع تحت طائفة الفيرميونات لأنها تتكون من عدد فردي من الكواركات - عادة ثلاثة كواركات، وكمثال على البارونات نجد البروتونات والنيوترونات

الْكُونِ الْحَدِيثِ، فَفِي الْعُقُودِ الْمَاضِيَةِ تَمَكَّنَ الْعُلَمَاءُ مِنْ تَجْمِيعِ الْكَثِيرِ مِنَ الْأَدِلَّةِ الَّتِي تُثَبِّتُ أَنَّ حَوَالِي 85% أَوْ أَكْثَرَ مِنَ الْمَادَّةِ فِي الْكُونِ مَجْهُولٌ وَغَيْرُ مَرْنِيٍّ وَلَا نَعْرِفُ بِشَكْلِ قَاطِعٍ كَيْفَ تَكُونُ.

هَذِهِ الْمَادَّةُ الْغَامِضَةُ لَا تَعْكُشُ وَلَا تُشِعُّ الْأَشْعَاءَ الْكَهْرُومَغْنَاطِيَّيَّةَ فِي أَيِّ نِطَاقٍ مَوْجِيٍّ مَعْرُوفٍ، لَكِنَّهَا هِيَ الَّتِي تَعْمَلُ بِوَاسِطَةِ قُوَى الْجَذِبِيَّةِ عَلَى تَلَاصُقِ الْمَجَرَّاتِ وَعَنَاقِيدِ الْمَجَرَّاتِ، كَمَا أَنَّهَا تَلْعَبُ دَوْرًا هَاسًا فِي تَارِيخِ وَقَصِيرِ الْكُونِ.

نُبذة تاريخية

لَقَدْ أَثْبَتَتْ بَيِّنَاتُ الْأَرَضَادِ لِحَرَكَةِ الْمَجَرَّاتِ وَعَنَاقِيدِ الْمَجَرَّاتِ أَنَّ الْكُونِ يَحْوِي كَمِيَّةً كَبِيرَةً مِنَ الْمَادَّةِ الْمُغْتَمَّةِ. فَمُنْذُ أَكْثَرَ مِنْ تِسْعِينَ عَامًا وَتَحْدِيدًا عَامَ 1933 ذَكَرَ الْعَالِمُ الْفَلَائِي فِرِيْتزُ زَوِيْكي أَنَّ سُرْعَاتِ الْمَجَرَّاتِ فِي عُنُقُودِ كُومَا الْمَجَرِّيِّ (Coma Cluster) تَذُلُّ عَلَى أَنَّ الْكِتْلَةَ الْكُلِّيَّةَ لِهَذَا الْإِثْمَامِ تَفُوقُ كَثِيرًا كِتْلَةَ الْمَادَّةِ الْمَرْنِيَّةِ فِيهِ مِثْلَ النُّجُومِ وَالْغُبَارِ الْكُونِيِّ وَالْغَزَارَاتِ. بَلْ إِنَّ هَذِهِ السَّرْعَاتِ تَفُوقُ قُدْرَةَ الْمَادَّةِ الْمَرْنِيَّةِ عَلَى جَعْلِ الْمَجَرَّاتِ مُتَرَابِطَةً، وَقَدْ أَعْرَى زَوِيْكي تَرَابُطَ تِلْكَ الْمَجَرَّاتِ لَوْجُودِ مَادَّةٍ غَيْرِ مَرْنِيَّةٍ أَوْ مُغْتَمَّةٍ (dunkle Materie) أَوْ (dark matter). وَلِعُقُودٍ مُتَتَالِيَةٍ لَاحَظَ الْفَلَائِيُونَ هَذِهِ الظَّاهِرَةَ فِي الْعَدِيدِ مِنْ عَنَاقِيدِ الْمَجَرَّاتِ الْأُخْرَى، إِلَّا أَنَّ الْأَمْرَ ظَلَّ مُحْذِرًا وَمَشْكُوكًا فِيهِ حَتَّى عَامَ 1970 حِينَ تَمَكَّنَ فَلَايُونُ آخَرُونَ وَمِنْهُمْ فِيرُ رُوبِينُ وَكُنْتَ فُورْدُ مِنْ قِيَاسِ السَّرْعَةِ الَّتِي تَدُورُ بِهَا النُّجُومُ وَالْغَزَارَاتُ فِي أَدْرَجِ الْمَجَرَّاتِ الْخَلَزُويَّةِ حَوْلَ مَرَاكِزِ تِلْكَ الْمَجَرَّاتِ. وَقَدْ وَجَدَ هَؤُلَاءِ الْفَلَائِيُونَ تَنَاقُضًا وَاضِحًا بَيْنَ قِيَمِ السَّرْعَاتِ الَّتِي تَدُورُ بِهَا هَذِهِ الْأَدْرَجُ وَبَيْنَ الْقِيَمِ الْمُتَوَقَّعةِ لِسُرْعَةِ الدَّوَرَانِ بِنَاءً عَلَى الْمَادَّةِ الْمَرْنِيَّةِ فِيهَا.

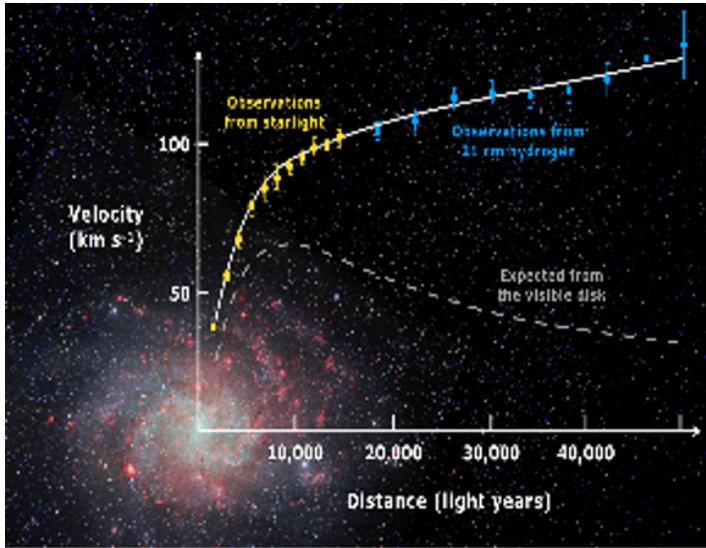


الشكل 1: عنقود ستيفان الخماسي (Stephan's Quintet) وهو مكون من خمس مجرات. أخذت الصورة بواسطة تلسكوب هابل الفضائي.

1، تَكُونَتْ جُذُورٌ لِلْاضْطِرَابَاتِ فِي الْكثَافَةِ، مِمَّا تَسَبَّبَ تَدْرِيجِيًّا فِي تَكُونِ الْهَيَاكِلِ الْكُونِيَّةِ كَبِيرَةِ الْحَجْمِ ("Large Scale Structures" LSS) مِثْلِ الْمَجَرَّاتِ وَعَنَاقِيدِ الْمَجَرَّاتِ (شكل 1). إِلَّا أَنَّ هُنَاكَ تَكَثُّلَاتٍ أُخْرَى قَدْ تَكُونَتْ قَبْلَ تَكُونِ تِلْكَ الْهَيَاكِلِ. هَذِهِ التَّكَثُّلَاتُ هِيَ مِنْ نَوْعٍ خَاصٍّ مِنْ مَادَّةٍ غَامِضَةٍ وَلَهَا سُرْعَاتٌ مُنْخَفِضَةٌ قِيَاسًا بِالسَّرْعَاتِ النَّسْبِيَّةِ - أَيِّ قِيَاسًا بِسُرْعَةِ الضَّوءِ - كَمَا أَنَّهَا لَا تَتَفَاعَلُ مَعَ الضَّوءِ، لِذَا عُرِفَتْ بِالْمَادَّةِ الْمُغْتَمَّةِ الْبَارِدَةِ ("Cold Dark Matter" CDM)، وَمِمَّا سَاعَدَ عَلَى تَكْثُّلِ تِلْكَ الْمَادَّةِ عَدَمُ قُدْرَتِهَا عَلَى الْإِثْبَاطِ أَوْ التَّفَاعُلِ مَعَ الْفُوتُونَاتِ الضَّوِّيَّةِ. وَقَدْ أَدَّى تَكْثُّلُ جَسِيَمَاتِ تِلْكَ الْمَادَّةِ إِلَى وُجُودِ مَنَاطِقٍ مِنْ جَهْدِ الْجَذِبِيَّةِ سَاعَدَ فِي انْهِيَارِ الْمَادَّةِ الْبَارِيُونِيَّةِ عَلَى بَعْضِهَا الْبَعْضُ، وَمِنْ ثَمَّ تَكُونِ هَيَاكِلِ الْكُونِ الْكَبِيرَةِ (LSS) وَفِيهَا يَلِي نَسْتَعْرِضُ الْحَدِيثَ عَنِ الْمَكُونَاتِ الْمُغْتَمَّةِ لِكُونِنَا.

ثانيًا: المادَّةُ الْمُغْتَمَّةُ (Dark Matter)

تُعْتَبَرُ الْمَادَّةُ الْمُغْتَمَّةُ مِنْ أَعْتَى الْأَلْغَازِ فِي عِلْمِ 2. التَّضَخُّمِ الْكُونِيِّ هُوَ زِيَادَةُ حَجْمِ الْكُونِ بِمَا يَقْدَرُ بِحَوَالِي $10^{50} \sim 10^{60}$ أضعاف حجمه الأصلي في فترة زمنية تعادل جزءاً من عشرة آلاف جزء من الثانية، ويُتَوَقَّعُ حَدُوثُ هَذَا التَّضَخُّمِ خِلَالِ اللَّحْظَاتِ الْأُولَى مِنْ عَمْرِ الْكُونِ، وَقَدْ وُضِعَتْ نَظَرِيَّةُ التَّضَخُّمِ الْكُونِيِّ فِي شَكْلِهَا الْأَصْلِيِّ بِوَاسِطَةِ الْعَالِمِ آلَانَ جُوْثَ عَامَ 1979.



الشكل 2: منحنى دوران المجرة الحلزونية ميسييه 33، تعبر النقاط الصفراء والزرقاء عن قيم المشاهدات، أما الخط الرمادي المتقطع فهو المنحنى المتوقع بناء على توزيع المادة المرئية.

الفئات المرشحة لتكوين المادة المغممة

نَظَرًا لِعُمُوضِ هَذِهِ الْمَادَّةِ فَإِنَّ هُنَاكَ فِئَاتٍ كَثِيرَةً مُرَشَّحَةً لِأَنْ تُمَثِّلَهَا، وَهُنَاكَ تَجَارِبٌ عَدِيدَةٌ كُلُّ مِنْهَا يَبْحَثُ فِي فِئَةٍ مِنْ تِلْكَ الْفِئَاتِ، وَلِكَيْ تُعْتَمَدَ أَيُّ مِنَ الْجُسَيْمَاتِ كَأَسَاسٍ لِتَشْكِيلِ الْمَادَّةِ الْمُغْمَمَةِ فَلَا بُدَّ لَهَا مِنْ تَحْقِيقِ مَجْمُوعَةٍ مِنَ الشُّرُوطِ

1. أَنْ تَكُونَ مُسْتَقَرَّةً أَوْ عَلَى الْأَقْلَى ذَاتَ عُمْرٍ طَوِيلٍ مُقَارَنَةً بِعُمْرِ الْكَوْنِ،
2. أَنْ تَكُونَ نَادِرَةً التَّفَاعُلِ مَعَ جُسَيْمَاتِ النَّمُودَجِ الْمُعْيَارِيِّ لِلْجُسَيْمَاتِ،
3. أَنْ تَكُونَ ذَاتَ سُرْعَاتٍ مُنْخَفِضَةٍ نِسْبَةً إِلَى سُرْعَةِ الصُّوءِ -وَهَذَا مَا يَعْبَّرُ عَنْهُ أحيانًا بِأَنَّهَا بَارِدَةٌ - وَذَلِكَ حَتَّى تَتَّفَقَ مَعَ بَيِّنَاتِ الْأَرْضَادِ لِأَبْنِيَةِ الْهَيَاكِلِ الْكُؤَبِيَّةِ الصُّخْفَةِ (LSS) فِي عَالَمِنَا.

وَتُعْتَبَرُ الْإِلِكْتُرُونَاتُ وَالْبُرُوتُونَاتُ وَالْفُوتُونَاتُ وَالنِّيُوتْرِينَوَاتُ جُسَيْمَاتٍ مُسْتَقَرَّةً إِذَا مَا قُورِنَتْ بِعُمْرِ الْكَوْنِ، إِلَّا أَنَّهَا جَمِيعًا -بِاسْتِثْنَاءِ النِّيُوتْرِينَوَاتِ- نَشِطَةٌ التَّفَاعُلِ جِدًّا مِمَّا يَمْنَعُهَا أَنْ تُعْتَمَدَ كَمَكُونَاتٍ لِلْمَادَّةِ الْمُغْمَمَةِ. وَمِنْ أَهَمِّ الْفِئَاتِ الْمُرَشَّحَةِ لِتَمَثِيلِ الْمَادَّةِ الْمُغْمَمَةِ هِيَ النِّيُوتْرِينَوَاتُ (neutrinos) وَالْمَاكُونَاتُ

فَفِي هَذِهِ الْمَجَرَّاتِ تَتَرَكَّزُ كَثَافَةُ الْكُتْلَةِ الْمُضِيئَةِ عِنْدَ الْمَرْكَزِ بَيْنَمَا تَتَنَاقُصُ كُلَّمَا ابْتَعَدْنَا عَنْهُ، هَذَا يَعْنِي أَنَّ سُرْعَةَ الدَّوَرَانِ سَوْفَ تَتَزَايَدُ كُلَّمَا ابْتَعَدْنَا عَنِ الْمَرْكَزِ، إِلَّا أَنَّ الْقِيَاسَاتِ أَوْصَحَتْ أَنَّ سُرْعَةَ الدَّوَرَانِ تَكَادُ تَكُونُ ثَابِتَةً مَهْمَا ابْتَعَدْنَا لِمَسَافَاتٍ شَاسِعَةٍ عَنِ مَرْكَزِ الْمَجَرَّةِ (شكل 2) مِمَّا يُحْتَمُّ أَنْ تَوْزِيعَ الْكُتْلِ فِي تِلْكَ الْمَجَرَّاتِ لَيْسَ كَمَا نَرَاهُ، وَأَنَّهَا ذَاتُ كُتْلٍ أَكْبَرَ بِكَثِيرٍ مِمَّا تَبْدُو عَلَيْهِ. وَفِي عَامِ 1973 وَضَعَ الْعَالِمَانِ جِيرِيمِيَا أَوْسْتِرْكَرْ وَجِيم بِيِلْ حَلًّا لِهَذَا التَّنَاقُصِ عِنْدَمَا اسْتَنْتَبَا أَنَّ الْقُرْصَ النُّجُومِيَّ يَنْعَمُشُ فِي هَالَةٍ مِنْ مَادَّةٍ ذَاتِ كُتْلَةٍ كَبِيرَةٍ وَلَكِنَّهَا غَيْرُ مَرْئِيَّةٍ.

وَفِي ثَمَانِيَيْنَاتٍ وَتِسْعِيَيْنَاتِ الْقَرْنِ الْعُشْرِينَ عَزَزَتْ سِلْسِلَةُ مِنْ بَيِّنَاتِ الْأَرْضَادِ وَجُودَ الْمَادَّةِ الْمُغْمَمَةِ، وَقَدْ تَصَفَّكَتِ الدَّلَائِلُ عَلَى وَجُودِ تِلْكَ الْمَادَّةِ بَيِّنَاتٍ تَأْثِيرِ الْعَدَسَةِ النَّاتِجَةِ عَنِ الْجَاذِبِيَّةِ (Gravitational lensing)¹ (شكل 3) وَالَّتِي تَنْشَأُ عَنْ عَنَاقِيدِ الْمَجَرَّاتِ وَكَذَلِكَ بَيِّنَاتِ تَوْزِيعِ دَرَجَاتِ الْحَرَارَةِ لِلْغَازِ السَّاخِنِ فِي الْمَجَرَّاتِ وَعَنَاقِيدِ الْمَجَرَّاتِ، وَبَيِّنَاتِ غَرَارَةِ الْعُنَاصِرِ الْخَفِيفَةِ فِي الْكَوْنِ، وَكَذَلِكَ بَيِّنَاتِ نَمَطِ التَّبَايُنِ فِي أَشْعَةِ الْخَلْفِيَّةِ الْكُؤَبِيَّةِ الْمِيْكُرُووَوِيَّةِ (CMB). كُلُّ تِلْكَ الْبَيِّنَاتِ أَظْهَرَتْ أَنَّ الْمَادَّةَ الْمُغْمَمَةَ وَتَحْدِيدًا الْمَادَّةَ الْمُغْمَمَةَ الْبَارِدَةَ تُشَكِّلُ مَا يَفْرُبُ مِنْ 85% مِنْ كَثَافَةِ الْمَادَّةِ فِي الْكَوْنِ.

1. عدسة الجاذبية هي ظاهرة تحدث عند وجود تركز كتلي كثيف في الفضاء -مثل لب كثيف لمجرة أو كتلة عملاقة مثل عناقيد المجرات- مما يؤدي لتشوه الفضاء المحيط به نتيجة كثافة مجال الجاذبية الناتج عنه، هذا التشوه يتسبب في انحناء الضوء المرسل من المجرات الخلفية البعيدة المتواجدة على نفس خط الرؤية وتوجيهه حول منطقة التركز الكتلي، ونتيجة لذلك تظهر صوراً متعددة للمجرات الخلفية، وفي الحالات المثالية تنتج دوائر كاملة أو شبه كاملة من الضوء، وفي أغلب الأحيان تظهر أقواس ضوئية رقيقة، كما يؤدي أيضاً لتضخيم صورة المجرات الخلفية. وعندما تحدث هذه الظاهرة نتيجة مرور نجم أمام نجم أبعد، يبدو ضوء النجم الخلفي أكثر إشراقاً وسطوعاً لعدة أيام وربما أسابيع، وتعرف هذه الظاهرة بعدسة الجاذبية المجهرية



الشكل 3: تأثير عدسة الجاذبية.

أ. في الصورة على اليمين تطبع المجرة الموجودة في الأمام صورة الكوازر RXJ1131-1231 والموجود في الخلف في قوس ساطع مكونة له أربع صور يمكن رؤية ثلاثة منها داخل القوس (الصورة من وكالة الفضاء الأوروبية/هابل ووكالة ناسا وسويو وآخرون)

ب. تُظهر الصورة على اليسار كيف أن الجاذبية العالية للمجرة المضيفة الحمراء (luminous red galaxy "LRG") قد شوهت ضوء المجرة الزرقاء الأبعد والموجودة في الخلف، وقد أدى انحناء الضوء لتكوين صورتين واضحتين للمجرة الخلفية، إلا أن محاذاة العدسة دقيقة جداً مما أدى لظهور تلك المجرة على شكل حدوة حصان وتكاد تكون الحلقة مكتملة. أخذت الصورة بواسطة تلسكوب هابل الفضائي

يُمْكِنُ أَنْ تَكُونَ مُرَشَّحًا جَيِّدًا لِتَكْوِينِ الْمَادَّةِ الْمُغْتَمَّةِ، أَوْ عَلَى الْأَقْلَى لَا تُكَوِّنُ الْكَثِيرَ مِنْهَا.

الْوَيْفَبَات (WIMPs)

الْوَيْفَبَات هي جُسيمات عالية الكتلة وتتأثر فقط بالقوى الضعيفة، لذا فهذه التسمية هي الخُرُوف الأولى من الكلمات المُعَرِّفَةِ لِتِلْكَ الْجُسيمات (Weakly Interacting Massive Particles). وَلِأَنَّ هَذِهِ الْجُسيمات لَا تَخْضَعُ لِلتَّفاعُلاتِ الكَهْرُومَغْناطِيسيَّةِ (Electromagnetic interactions) أَوْ التَّفاعُلاتِ القَوِيَّةِ (Strong Interactions) فَلَا يُمْكِنُ اعْتِبَارُهَا جُسيماتٍ بَارِيُونِيَّةٍ. وَيُمْكِنُ أَنْ يَكُونَ بَعْضُ هَذِهِ الْجُسيماتِ قَدْ خُلِقَ أَثْنَاءَ الانْفِجَارِ الْعَظِيمِ وَظَلَّ مُوجُودًا إِلَى يَوْمِنَا هَذَا بِوَفَرَةٍ عَالِيَةٍ تُمْكِّنُهَا مِنْ تَكْوِينِ الْمَادَّةِ الْمُغْتَمَّةِ. وَيُشْتَرَطُ لِتِلْكَ الْجُسيماتِ أَنْ تَكُونَ كِتْلَتُهَا فِي الْمَدَى مِنْ 1 جِيْغَا إِكْتَرُونُ فُولْتٍ إِلَى 1 تِيرَا إِكْتَرُونُ فُولْتٍ حَتَّى تُكَوِّنَ

(MACHOs) وَالْوَيْفَبَات (WIMPs) وَالْأَكْسِيُونَات (Axions)، وَفِيمَا يَلِي تَفْصِيلًا عَنْ كُلِّ مِنْهَا.

النُّيُوتْرِينُو (neutrino)

يُغْتَمَدُ أَنَّهُ تَمَّ إِنْتِاجُ جُسيماتِ النُّيُوتْرِينُو بِوَفَرَةٍ عَالِيَةٍ وَقَدْ الانْفِجَارِ الْعَظِيمِ، وَهِيَ الْآنَ تَمْلَأُ مَجْرَتَنَا بَلْ وَتَتَحَرَّكُ حَوْلَنَا عَلَى الْأَرْضِ، وَلِأَنَّهَا تَتَفَاعَلُ مِنْ خِلَالِ الْقُوَى الضَّعِيفَةِ، فَإِنَّ اخْتِفَالَ رَصْدِهَا ضَيْلٌ جَدًّا لِأَنَّهَا تَحْسُ فَقْظًا بِالتَّفاعُلاتِ الكَهْرُوضَّعِيفَةِ (Electroweak interactions) الصَّغِيرَةِ جَدًّا. وَنَظَرًا لِبُوفَرَةِ هَذِهِ الْجُسيماتِ فَإِنَّ كِتْلَتَهَا مُجْتَمَعَةً تُعْتَبَرُ كَافِيَةً لِشَكْلِ الْمَادَّةِ الْمُغْتَمَّةِ فِي الْكُونِ.

إِلَّا أَنَّ النُّيُوتْرِينُوَاتِ الثَّلَاثَةَ الْمَعْرُوفَةَ فِي النَّمُودَجِ الْمُعْيَارِيِّ لِلْجُسيماتِ تُعْتَبَرُ خَفِيفَةً جَدًّا، كَمَا أَنَّ سُرْعَتَهَا تَزْجَى لِلْسَّرْعَةِ النَّسِيبِيَّةِ وَبِالتَّالِي لَا يُمْكِنُ اعْتِبَارُهَا بَارِدَةً - بَلْ هِيَ حَارَّةٌ جَدًّا، هَذَا بِالإِضَافَةِ لِكُونِهَا مُتَكَرِّرَةً التَّفاعُلِ مَعَ الْجُسيماتِ الْأُخْرَى، لِذَا لَا

الأكسيونات هي جسيمات أولية تم افتراضها لحل مشكلة تزيبظ خرق تماثل الشحنة والقطبية (أو انتهاك تناظر النذية-قرن الشحنة CP Violation). هذه المشكلة تنبع من كون النموذج المعياري للجسيمات طبيعة مجال القوى الضعيفة (Weak forces) والقوية (Strong forces) تسمح لهما بأن يخرقا تماثل الشحنة-القطبية، على عكس تفاعلات مجال القوى الكهرومغناطيسية (Electromagnetic forces) المقيدة بالالتزام بتحقيق هذا التماثل. وواقع الأمر أن خرق تماثل الشحنة-القطبية قد لوحظ عملياً في تفاعلات المجال الضعيف (Weak field interactions)، إلا أن هذا الخرق لم يلاحظ أبداً في أي من تفاعلات المجال القوي (Strong field interactions) أو ما يُعرف بالديناميكا اللونية الكمومية (Quantum Chromodynamics "QCD"). هذا التضارب الذي لم يستطع النموذج المعياري للجسيمات تفسيره أوجد مشكلة عُرفت باسم "المشكلة القوية للشحنة-القطبية" (Strong CP Problem)

وفي عام 1977 وضع عالم الفيزياء النظري روبرتو بنساي وهيلين كوين خلا ل هذا التعارض من خلال تقديم مجال جديد، هذا المجال بدوره يغني جسيماً جديداً سمي بالأكسيون (Axion)، وهو جسيم ليس له شحنة، كما أنه جسيم خفيف حيث إن كتلته في حدود الإلكترُون فولت. ونظراً لأن العمر الزمني لجسيم الأكسيون أكبر من عمر الكون كما أنه ضئيل الترابط مع مجال القوى الكهرومغناطيسية فقد كان مرشحاً جيداً لأن يكون جسيماً للمادة المغممة.

ويمكن رصد الأكسيونات عن طريق ارتباطها بالقوى الكهروضعيفة، إذ يمكن للأكسيونات أن تتحلل

المادة المغممة، وهناك العديد من الجسيمات الأولية التي تندرج تحت هذه الفئة منها الجسيمات التي يتنبأ بها نموذج التماثل الفائق (Supersymmetry) مثل الليوتزالينو (neutralino) والفوتينو (photino) والهيجزينو (higzino) والإسنيوترينو (sneutrino). هذه الجسيمات أكثر استقراراً وأطول عمراً قياساً بعمر الكون وبالطبع هي أكبر في الكتلة، ويمكنها الاختلاط مع جسيمات النموذج المعياري (Standard Model) مما يمكن من وضع تصور لتخليقها في بداية الكون.

وتعتبر الوميات أكثر الجسيمات التي يتم دراستها كمرشح للمادة المغممة، وهناك جهود تجري للكشف عن تلك الجسيمات إما بشكل مباشر عن طريق دراسة وتتبع نتائج تصادماتها داخل أجهزة الكشف المعملية، حيث من المتوقع في العديد من النماذج أنها تصطدم مع الأنوية وتتناثر بمعدلات يمكن ملاحظتها، أو بشكل غير مباشر عن طريق رصد الأشعة الناتجة عن فائدها نتيجة اصطدامها ببعضها البعض وذلك باستشعارها بأجهزة كشف أرضية وفصائية قادرة على كشف أشعة جاما وغيرها من النواتج الأخرى المتوقع إنتاجها من تلك العمليات. كذلك فإن حقيقة أن هذه الجسيمات تتفاعل في حدود طاقات القوى الكهروضعيفة (Electroweak Forces) تغني أنها في متناول تجارب معجلات الجسيمات مثل المصادم الكبير للإلكترونات مع البوزيترونات (Large Electron-Positron Collider) و LEP (Large Hadron Collider) والمصادم الهادروني الكبير (LHC "Collider") في سيرن (CERN) وتجارب تصادم البروتونات في مختبر فيرمي (Fermi Lab)

الأكسيونات (Axions)

كُلَّ لَيْلَةٍ لِمَتَابَعَةِ حُدُوثِ هَذِهِ الظَّاهِرَةِ، فَقَدْ انْطَلَقَ مَشْرُوعُ مَاكُو وَام 1989 مِنْ مُخْتَبَرِ لُورِنَسِ الْوَطْنِيّ، حَيْثُ طَوَّرَتْ مَجْمُوعَةٌ مِنْ عُلَمَاءِ الْفِيزِيَاءِ بِقِيَادَةِ نَسَارِلَزْ أَلْكُوكِ تَقْنِيَّةَ تَصْوِيرِ النُّجُومِ عَنْ طَرِيقِ دَمَجِ أَجْهَرَةِ اسْتِشْعَارٍ بِأَجْهَرَةِ كَمْفِيُوتَرٍ ذَاتِ مُعَالَجَاتٍ مُتَوَازِيَةٍ (Parallel Processing Computers)، مِمَّا يُمَكِّنُهَا مِنْ سُرْعَةِ التَّصْوِيرِ وَمُعَالَجَةِ وَتَخْلِيلِ آلَافِ الصُّوَرِ فِي نَفْسِ الْوَقْتِ.

وَلِأَنَّ الْأَقْرَامَ الْبَيْضَاءَ وَالْحُمْرَاءَ لَيْسَتْ مُعْتَمَةً تَمَامًا وَإِنَّمَا تُشْغَى صَوًّا خَافِتًا، يُمَكِّنُ لِلْعَالَمِيِّينَ الْبَحْثِ عَنْهَا بِاسْتِخْدَامِ تِلِسْكُوبِ هَابِلِ الْفَضَائِيّ. وَقَدْ أُوْضِحَتْ مُشَاهَدَاتُ تِلِسْكُوبِ هَابِلِ أَنَّ أَقَلَّ مِنْ 1% فَقَطْ مِنْ كِتْلَةِ الْمَالَةِ فِي مَجَرَّتِنَا هِيَ الَّتِي تَتَكَوَّنُ مِنَ الْأَقْرَامِ الْحُمْرَاءِ، وَهَذِهِ نِسْبَةٌ ضَائِلَةٌ نِسْبَةً لِكِتْلَةِ الْمَادَّةِ الْمُعْتَمَةِ فِي الْمَالَةِ، وَنَتِيجَتُهُ لِهَذَا الْبَحْثِ فَقَدْ بَاتَ وَاضِحًا أَنَّ مَجَرَّتِنَا وَكَذَلِكَ الْمَجَرَّاتِ الْمَحِيطَةُ بِنَا لَا تَحْوِي كَمِّيَّةً مِنَ الْمَاكُوَوَاتِ تَكْفِي لِتُصَبِّحَ الْمَكُونِ الرَّئِيسِيَّ لِلْمَادَّةِ الْمُعْتَمَةِ بِدَاخِلِهَا.

كَذَلِكَ فَإِنَّ بَيَانَاتِ الْإِلَهْتِرَازَاتِ الصَّوْتِيَّةِ لِلْبَارِيُونَاتِ (Baryon Acoustic Oscillations "BAO") فِي كُلِّ مِنْ أَشْعَةِ الْخَلْفِيَّةِ الْكُوْنِيَّةِ الْمِيْكَرُوِيْفِيَّةِ (CMB) وَالْأَبْنِيَّةِ ذَاتِ الْهَيْكَلِ الْكُوْنِيَّةِ الصَّخْمَةِ (LSS) قَدْ أَظْهَرَتْ أَنَّ كَثَافَةَ الْمَادَّةِ فِي الْكُونِ أَعْلَى مِنْ سِتَّةِ أَصْعَافِ كَثَافَةِ الْبَارِيُونَاتِ، وَقَدْ كَانَ هَذَا سَبَبًا فِي اسْتِبْعَادِ الْمَاكُوَوَاتِ كَمُفْرَسِحٍ أَسَاسِيٍّ لِلْمَادَّةِ الْمُعْتَمَةِ، وَهَذَا بِاسْتِثْنَاءِ الثُّقُوبِ السَّوْدَاءِ الْأَوَّلِيَّةِ الَّتِي رُبَّمَا قَدْ تَكَوَّنَتْ قَبْلَ التَّخْلِيْقِ النَّوَوِيِّ بَعْدَ الْإِنْفِجَارِ الْعَظِيمِ (Big Bang Nucleosynthesis "BBN") وَبِالنَّاتِي قَدْ لَا تَكُونُ جُزْءًا مِنْ كَثَافَةِ الْبَارِيُونَاتِ.

الطَّاقَةُ الْمُعْتَمَةُ (Dark Energy)

إِلَى فُوتُونَيْنِ فِي وُجُودِ مَجَالٍ مُعْنَاطِيْسِيٍّ قَوِيٍّ، وَقَدْ أُنْشِئَتْ مَرَايِدُ الْأَكْسِيُونَاتِ بِدَايَةٍ فِي فُلُورِيدَا وَفِي مُخْتَبَرِ بَرُوكْهَافِنِ الْوَطْنِيّ، إِلَّا أَنَّ مَدَى الطَّاقَةِ الَّذِي تَوَجَّبَ إِجْرَاءَ الْبَحْثِ خِلَالَهُ كَانَ وَاسِعًا جِدًّا، مِمَّا لَمْ يُمَكِّنِ الْبَاحِثِينَ مِنَ التَّوَصُّلِ لِشَيْءٍ آنَذَاكَ، وَلَا يَزَالُ الْبَحْثُ جَارِيًا عَنْ هَذَا الْجِسْمِ.

الْمَاكُوَوَاتُ (MACHOs)

كَانَتْ الْمَاكُوَوَاتُ (MACHOs) فِي مَقَدِّمَةِ الْأَجْسَامِ الْمُفْتَرَحَةِ كَمَكُونٍ لِلْمَادَّةِ الْمُعْتَمَةِ، وَالْمَاكُوَوَاتُ هِيَ تِلْكَ الْأَجْرَامُ الْمَلَكِيَّةُ الْمَدْمَجَةُ خَافِتُهُ الْإِسْتِضَاءَةِ (Massive Astrophysical Compact Halo Objects "MACHOs") الَّتِي تَفْرُقُ فِي الْفَضَاءِ بَيْنَ النُّجُومِ دُونَ انْتِمَاءٍ لِأَيِّ نِظَامٍ كَوْكَبِيٍّ (شَكْل-4). هَذِهِ الْأَجْسَامُ تَتَكَوَّنُ فِي الْأَصْلِ مِنَ الْبَارِيُونَاتِ لَكِنَّهَا قَلِيلَةٌ أَوْ مُنْعَدِمَةٌ لِانْبِعَاطِ الصَّوْتِيّ، لِذَلِكَ مِنَ الصَّعْبِ رُؤْيُهَا أَوْ الْكَشْفُ عَنْهَا، وَتَتَصَفَّنُ النُّجُومُ الْيُونُوتَرُونِيَّةُ وَالْأَقْرَامُ الْبَيْضَاءُ وَكَذَلِكَ الْأَقْرَامُ الْبَيْضَاءَ وَالْحُمْرَاءَ الْخَافِتَةُ جِدًّا وَالْكُوكَبُ الْمَارِقَةُ وَالثُّقُوبُ السَّوْدَاءُ (شَكْل-5).

وَيَبْحَثُ الْعَالَمِيُّونَ عَنِ الْمَاكُوَوَاتِ عَنْ طَرِيقِ تَأْثِيرِ مَجَالِ الْجَاذِبِيَّةِ لَهَا عَلَى الصَّوِّ الْمُنْبَعِثِ مِنَ الْأَجْسَامِ الْفَضَائِيَّةِ الْمُضِيَّةِ كَالنُّجُومِ الْعَادِيَّةِ مَثَلًا، فَعِنْدَمَا يَمُرُّ أَحَدُ الْمَاكُوَوَاتِ عِبرَ حَظِ الرُّوِيَّةِ بَيْنَ الرَّاصِدِ وَالنَّجْمِ الْمُضِيءِ، فَإِنَّ قُوَّةَ جَاذِبِيَّةِ الْمَاكُو تُوَدِّي إِلَى انْحِنَاءِ الصَّوِّ الْمُنْبَعِثِ مِنَ النَّجْمِ، مِمَّا يَجْعَلُهُ كَالْعَدْسَةِ الَّتِي تَتَسَبَّبُ فِي تَرْكِيزِ الصَّوِّ الصَّادِرِ مِنَ النَّجْمِ فَيُصْبِحُ أَكْثَرَ سَطُوْعًا، وَبِالنَّاتِي فَهِيَ تَتَسَبَّبُ فِي تَغْيِيرٍ وَاضِحٍ فِي شِدَّةِ الْإِسْتِضَاءَةِ الظَّاهِرِيَّةِ لِلنَّجْمِ، وَهَذَا مَا يُعْرَفُ بِتَأْثِيرِ عَدْسَةِ الْجَاذِبِيَّةِ الْمَجْهَرِيَّةِ (Gravitational Microlensing).

وَحَيْثُ إِنَّهُ مِنَ الصَّعْبِ مِلَاحَظَةُ مَلَايِينِ النُّجُومِ

المُكَعَّبِ فَقَط. وَعَلَى الرَّغْمِ مِنْ كَوْنِ هَذِهِ الْقِيَمَةِ كَافِيَةً لِمَلَأِ فَرَاغِ الْكَوْنِ وَالتَّسَبُّبِ فِي تَسَارُعِ اتِّسَاعِهِ، إِلَّا أَنَّهُ أَقَلُّ بِمَقْدَارِ 10^{122} مَرَّةٍ مِنَ الْقِيَمَةِ الْمُقَدَّرَةِ بِالنَّظَرِيَّةِ الْكَوْنِيَّةِ، وَقَدْ اسْتَهْرَتْ هَذِهِ الْمُغْضَلَةُ فِي أَوْسَاطِ عُلَمَاءِ الْفِيزِيَاءِ وَالْفَلَكِ بِاسْمِ "مُشْكَلَةِ الثَّابِتِ الْكَوْنِيَّ" (Cosmological constant Problem).

وَهُنَاكَ نَظَرِيَّاتٌ أُخْرَى تَعْتَبِرُ الطَّاقَةَ الْمُغْتَمَّةَ فِي الْكَوْنِ تَتَغَيَّرُ مَعَ الزَّمَنِ بَدَلًا مِنْ اعْتِبَارِهَا ثَابِتًا كَوْنِيًّا، وَهُنَاكَ الْعَدِيدُ مِنَ النَّظَرِيَّاتِ الَّتِي تَعْبُرُ عَنِ التَّغْيِيرِ الزَّمَنِيِّ لِتِلْكَ الطَّاقَةِ، فَمِنْهَا مَا يَصِفُهَا بِمَجَالٍ قِيَاسِيٍّ أَوْ سَلَمِي (Scalar field) يُشَبِّهُ الْمَجَالَ الَّذِي تَسَبَّبَ فِي تَضَخُّمِ حَجْمِ الْكَوْنِ فِي بَدَايَةِ خَلْقِهِ بَعْدَ خُذُوثِ الْانْفِجَارِ الْعَظِيمِ، هَذَا إِلَى جَانِبِ الْعَدِيدِ مِنَ النَّظَرِيَّاتِ الْمُخْتَلِفَةِ الَّتِي تُحَاوِلُ تَفْسِيرَ كُنْهِ الطَّاقَةِ الْمُغْتَمَّةِ.

وَهُنَاكَ الْعَدِيدُ مِنْ جُحُودِ الرَّصْدِ لِكَشْفِ اللِّجَامِ عَمَّا إِذَا كَانَتْ الطَّاقَةُ الْمُغْتَمَّةُ هِيَ مُجَرَّدَ ثَابِتِ كَوْنِيٍّ أَمْ أَنَّهُ دَاتٌ كَثَافَةٌ تَتَغَيَّرُ عَلَى مَدَارِ الزَّمَنِ الْكَوْنِيَّ، فَعَلَى سَبِيلِ الْمَثَالِ نَجِدُ أَنَّ الطَّاقَةَ الْمُغْتَمَّةَ تُنْبِطُ نُفُوءَ الْهَيَاكِلِ الْكَوْنِيَّةِ الضَّخْمَةِ (LSS)، لِذَا فَإِنَّ قِيَاسَ تَوَزِيعِ الْمَادَّةِ فِي الْكَوْنِ وَقِيَاسَاتِ تَوَزِيعِ الْمَجَرَّاتِ وَعَنَاقِيدِ الْمَجَرَّاتِ يُعْطِينَا مَعْلُومَاتٍ عَنْ خَصَائِصِ الطَّاقَةِ الْمُغْتَمَّةِ.

المراجع:

1. Particle Cosmology and Astrophysics, Dan Hooper, Princeton Univ. Press, 2024.
2. An Introduction to Modern Cosmology, Andrew Liddle, 2nd ed., Wiley, 2003.
3. ENCYCLOPEDIA OF ASTRONOMY AND ASTROPHYSICS, P Murdin, CRC Press, 2001.
4. van Dokkum, P., Brammer, G., Wang, B. et al. A massive compact quiescent galaxy at $z=2$ with a complete Einstein ring in JWST imaging. Nat Astron 8, 119–125 (2024). <https://doi.org/10.1038/s41550-024-0188-8>.

أَحَدُ الْاِكْتِشَافَاتِ الَّتِي حَيَّرَتْ الْفَلَكِيِّينَ فِي الْعَصْرِ الْحَدِيثِ هِيَ الطَّاقَةُ الْمُغْتَمَّةُ، فَحَقِيقَةُ أَنَّ الْكَوْنَ يَتَسَارِعُ بِمَقْدَرٍ تَسَارُعِيٍّ (Accelerated expansion) يُحْتَمِلُ أَنَّهُ دَخَلَ فِي عَصْرِ لَا تَتَنَاقُضُ فِيهِ كَثَافَةُ الطَّاقَةِ الْمُهِيمَةِ عَلَى الْكَوْنِ بِسَبَبِ اتِّسَاعِهِ. وَلَئِنَّهُ إِذَا كَانَتْ الْمَادَّةُ هِيَ الَّتِي تُهَيِّمُ عَلَى مُكَوِّنَاتِ الْكَوْنِ فَإِنَّ مُعْدَلَ اتِّسَاعِهِ سَوْفَ يَتَبَاطَأُ، فَإِنَّ اِكْتِشَافَ الْاِتِّسَاعِ بِمَقْدَرٍ تَسَارُعِيٍّ يُحْتَمِلُ أَنَّ كَثَافَةَ مُدْتَوَى الْكَوْنِ يُهَيِّمُ عَلَيْهَا شَيْءٌ غَرِيبٌ، وَهَذَا مَا يُسَمَّى بِالطَّاقَةِ الْمُغْتَمَّةِ. وَقَدْ وَضَعَ هَذَا الْمُصْطَلَحَ "الْمَادَّةُ الْمُغْتَمَّةُ" تِيَزَنُرُ عَامَ 1998 عَلَى غَرَارِ مُصْطَلَحِ "الْمَادَّةُ الْمُغْتَمَّةُ" الَّذِي اِبْتَكَرَهُ فَرِيْتَزُ زُوِيكِي.

وَتُشَكِّلُ الطَّاقَةُ الْمُغْتَمَّةُ مَا نِسْبَتُهُ حَوَالِي 73% مِنْ مُكَوِّنَاتِ الْكَوْنِ وَتَتَوَزَّعُ تَوَزِيعًا مُنْتَظَمًا خِلَالَ فُضَاءِ الْكَوْنِ، وَهِيَ لَا تَتَفَاعَلُ مَعَ أَيِّ نَوْعٍ مِنْ أَنْوَاعِ الْمَجَالَّاتِ الرَّئِيسِيَّةِ سِوَى مَجَالِ الْجَاذِبِيَّةِ، وَأَيًّا مَا كَانَتْ تِلْكَ الطَّاقَةُ فَهِيَ مَا زَالَتْ سُؤَالَ مُحَدِّثًا لِلْعُلَمَاءِ.

أَحَدُ اخْتِمَالَاتِ الْإِجَابَةِ عَلَى هَذَا السُّؤَالِ أَنْ تَكُونَ تِلْكَ الطَّاقَةُ هِيَ طَاقَةُ الْفَرَاغِ الْكَوْنِيَّ، وَيُعْتَبَرُ عَنْهَا بِالثَّابِتِ الْكَوْنِيَّ الَّذِي يُرْمَزُ لَهُ بِالرَّمْزِ Λ ، وَيُعْتَبَرُ Λ فِي النَّظَرِيَّةِ النَّسْبِيَّةِ مُعَامِلًا حُرًّا، إِلَّا أَنَّ النَّظَرِيَّةَ النَّسْبِيَّةَ لَيْسَ بِهَا مَعْلُومَةٌ تُمَكِّنُنَا مِنْ وَضْعِ قِيَمَةٍ لِهَذَا الثَّابِتِ نَظَرًا لِكُونِهَا نَظَرِيَّةً كِلَاسِيكِيَّةً، أَمَّا إِذَا أَخَذْنَا النَّظَرِيَّةَ الْكَوْنِيَّةَ فِي الْاِعْتِبَارِ فَسَنَجِدُ أَنَّ قِيَمَةَ طَاقَةِ الْفَرَاغِ حَوَالِي 10^{122} جِيجَا إِيْلِكْتْرُونِ فُولْتٍ لِلْمِئَةِ الْمُكَعَّبِ.

وَقَدْ ثَبَتَ بِالْقِيَاسَاتِ الْعَمَلِيَّةِ لِلْسُّوبَرْنُوفَا وَقِيَاسِ قِيَمَةِ ثَابِتِ هَابِلَ لِلْكَوْنِ فِي الزَّمَنِ الْحَالِيَّ (H_0) وَخُلْفِيَّةِ الْأَشْعَةِ الْكَوْنِيَّةِ الْمِيْكْرُوِيْفِيَّةِ (CMB) بِالإِضَافَةِ لِنَتَاجِ الْهَيَاكِلِ الْكَوْنِيَّةِ الضَّخْمَةِ (LSS) أَنَّ كَثَافَةَ طَاقَةِ الْفَرَاغِ تُقَالُ حَوَالِي 5 جِيجَا إِيْلِكْتْرُونِ فُولْتٍ لِلْمِئَةِ

النموذج القياسي الكوني، المعروف باسم Λ CDM، تحت المجهر، إذ إنه يعتمد على فرضية أن الطاقة المظلمة ثابتة عبر الزمن.

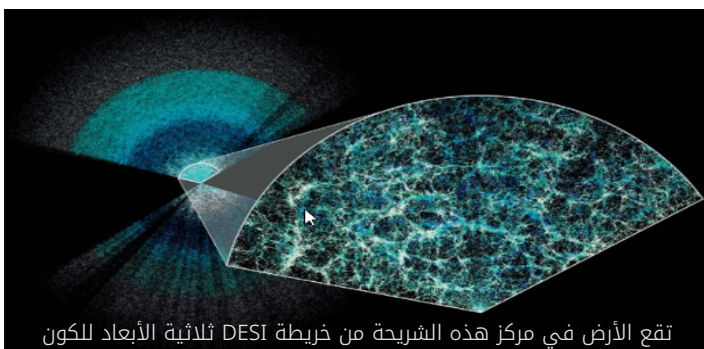
السيناريوهات المحتملة

1. **ضعف الطاقة المظلمة تدريجيًا:** إذا استمرت الطاقة المظلمة في التلاشي، فقد يتباطأ تمدد الكون، وربما يتوقف في المستقبل البعيد.

2. **قيم سالبة للطاقة المظلمة:** إذا أصبحت الطاقة المظلمة سالبة، فقد يؤدي ذلك إلى انعكاس تمدد الكون ليبدأ في الانكماش، مما يعيدنا إلى مفاهيم مثل "الكون الدوري".

3. **ثورة علمية:** هذه النتائج قد تؤدي إلى تطوير نماذج فيزيائية جديدة تتحدى فهمنا الحالي للكون رغم أن النتائج مشوقة، إلا أن فريق DESI يحذر من أن البيانات لا تزال في مراحلها الأولية. ويخطط العلماء لإجراء مزيد من التحليلات باستخدام تلسكوبات حديثة مثل مرصد فيرا روبن ومرصد نانسي غريس الروماني. ومن المتوقع إصدار خرائط كونية أكثر دقة خلال السنوات المقبلة، ما قد يساعد في تأكيد أو دحض هذه الفرضية.

إذا تأكد هذا الاكتشاف، فسيعتبر واحدًا من أعظم الاكتشافات العلمية في القرن الحالي، حيث سيعيد تعريف قوانين الفيزياء الكونية، ويوفر رؤية جديدة حول مصير الكون، وربما يفتح الباب أمام فهم جديد للطاقة والمكان والزمان. [المصدر](#)



تقع الأرض في مركز هذه الشريحة من خريطة DESI ثلاثية الأبعاد للكون

org/10.1038/s41550-023-02103-9.

5. How did the Big Bang get its name? Here's the real story, [Nature](#)..

أخبار علمية

هل الطاقة المظلمة في الكون تضعف؟ اكتشاف قد يغير مفاهيمنا عن الكون

في تطور علمي قد يقلب الموازين في علم الفلك والفيزياء الكونية، أشارت نتائج أولية لدراسة حديثة إلى أن الطاقة المظلمة، القوة الغامضة التي تتسبب في تسارع تمدد الكون، قد تكون في حالة ضعف تدريجي. إذا ثبتت صحة هذه الفرضية، فقد يؤدي ذلك إلى إعادة صياغة النظريات الكونية التي بُنيت على مدى العقود الماضية.

الطاقة المظلمة: حجر الأساس الغامض

تمثل الطاقة المظلمة حوالي 68% من محتوى الكون، وهي العنصر الأساسي الذي يفسر تمدده المتسارع. لطالما افترض العلماء أن هذه الطاقة ثابتة وغير متغيرة، وتُعرف بما يسمى "الثابت الكوني". ومع ذلك، فإن الدراسة الجديدة، التي قادها فريق مشروع (DESI) (الأداة الطيفية لاستكشاف الطاقة المظلمة Dark Energy Spectroscopic Instrument) في أريزونا، تُشير إلى احتمال أن الطاقة المظلمة ليست ثابتة كما كنا نعتقد.

قام فريق DESI بجمع بيانات دقيقة من خرائط لمليارات المجرات، محاولين قياس معدلات توسع الكون عبر فترات زمنية مختلفة. النتائج الأولية أظهرت أن معدلات التمدد الكوني ربما تكون أبطأ من المتوقع، ما يدعم فكرة أن الطاقة المظلمة قد تكون "تضعف" تدريجيًا. هذا الاكتشاف يضع

الذكاء الاصطناعي: مفاهيم مؤسّسة ووعود كبيرة

ميرفت أبو الخير
أستاذة تقانة المعلومات في كليّة هندسة وتقانة الإعلام في
الجامعة الألمانيّة، القاهرة، مصر





قادرة - بفعل الحسابات التكرارية أو التسلسلية والتي تبدأ عشوائية ثم تتحسن مع المزيد من المدخلات - على استنتاج أنماط معرفية كاملة ومُعقّدة من معلومات جزئية أو مُشوَّشة، مُحاكية بذلك ما تفعله الخلايا العصبية الموجودة في دماغ الإنسان خلال عملية التعلُّم.

إن استنتاج أنماط معرفية كاملة والقدرة على التعلُّم من أمثلة وبيانات جزئية هما السِّمات الأساسية التي يعتمد عليها التعلم الآلي بوصفه الفرع الإحصائي من الذكاء الاصطناعي. ولكن ما هو الذكاء الاصطناعي؟ وما هو التعلم الآلي أو لغة الآلة؟ وَلِمَ حدثت هذه الطفرة المفاجئة في الاهتمام العلمي والتطبيقي بهَذَيْنِ المفهومين؟

الذكاء الاصطناعي ومنظورات التعلم: قواعد حاكمة وملاحظات عن العالم

يعتمد مصطلح الذكاء الاصطناعي على تطوير برامج كمبيوترية "ذكية" يُمكنها محاكاة القدرات البشرية على التعلم والاستنتاج واتخاذ القرارات الأنسب في المواقف التي يُفترض بالإنسان فيها أن يستجيب لأحداثٍ معينة أو يُحقِّق أهدافًا معينة. يمكن للإنسان الاستفادة من مُخرجات هذه البرامج في إبداء الأحكام واتخاذ القرارات، ويُمكن أيضًا أن تُدجج تلك البرامج في آلات ذكية كالروبوتات أو الماكينات بحيث تتصرَّف بِشَكل مُستقل بناء على مخرجات تلك البرامج.

بدأ الذكاء الاصطناعي في جوهرة من القدرة البرمجية على صياغة عملية التعلم من خلال قواعد تختص بموقفٍ أو تطبيقٍ مُحدد تمَّ استنتاجها مُسبقًا ويُمكن تطبيقها على مواقف مُحدَّدة، وهو ما يعرف بالذكاء الاصطناعي الضيق، كونه يتعامل مع تطبيق مُحدَّد ولا يمكن تعميمه على كل التطبيقات. امتدَّ

فَنَحَتْ لجنة جوائز نوبل هذا العام جائزتها في الفيزياء لاثنين من رُواد لغة الآلة والذكاء الاصطناعي - جون هوبفيلد وجيفري هينتون- عن إسهاماتهما البحثية المتميزة التي اعتمدت أدوات الفيزياء الإحصائية كغُنصر أساسي لتمكين التعلم الآلي من خلال الشبكات العصبية الاصطناعية. عندما انتشر الخبر، تساءل الكثيرون عن علاقة لغة الآلة والذكاء الاصطناعي بالفيزياء، وعن ماهية أدوات الفيزياء تلك التي أسهمت في النقلة الجبارة التي تحقّقت في مجال لغة الآلة والذكاء الاصطناعي.

لكي نربط الإسهامات الثورية للعالمين بالفيزياء، يمكن البدء من أهمّ العناصر التي تقوم عليها أنظمة الذكاء الاصطناعيّ اليوم، وهي خوارزميات التعلُّم الآلي. تستوحي الخوارزميات الحديثة المستخدمة للتعلم الآلي تصميماتها من مفهوميْن مُهمَّين في مجال الفيزياء الإحصائية: شبكات هوبفيلد وآلة بولتزمان. يُمكن وصف شبكات هوبفيلد، والتي طوَّرها - كما يدلّ الاسم - جون هوبفيلد الحائز على جائزة نوبل للعام الحالي، بِكُونِها شبكات "تكرارية" ذات طبقة واحدة من الوحدات الحسابية تقبل مُدخلات من العالم الخارجي، ثم يُمكنها بناء على تلك المُدخلات أن تحسب مُخرجات بسيطة تُمثِّل في ذاتها مُدخلات لِمَرحلة تالية من الحسابات تقوم بها نفس الوحدات. هذا التصميم الشبكي هو أيضًا الغُنصر المُؤسِّس لآلة بولتزمان، والتي سُمِّيت بِاسم لودفيج بولتزمان، العالم النمساوي الذي طوَّر توزيع وثابت بولتزمان. تُطوِّع آلة بولتزمان هيكلية شبكية لنمذجة التوزيعات الاحتمالية المُعقدة بين البيانات فيما يُحاكي تسلسلية مونت كارلو. تكمن أهم مميزات شبكات هوبفيلد وآلة بولتزمان في كونها

الأكبر تكمن في أنه من غير المُمكن لتلك القواعد مهما كانت مُستفيضة أن تتعامل مع كل المواقف أو السيناريوهات المُحتملة لتطبيق مُعَيَّن، وهي إشكالية تزداد تعقيدًا مع النظم شديدة الديناميكية التي تتغير فيها باستمرار المُعطيات الحاكمة لاتخاذ القرارات.

ماذا لو لم يَكُن من الممكن تعريف قواعد حاكمة للتعامل مع مهمة عالية التعقيد أو الديناميكية؟ لا يُمكننا على سبيل المثال أن نزرع القواعد الحاكمة للمشي الصحيح في دماغ طفل لم يتطوّر بعد ليُفهم قواعد تمت صياغتها بشكل تجريدي. يتعلّم الطفل المشي بملاحظة الكيفية التي يمشي بها الكبار، ثم يتقلدها. هذا التقليد يبدأ بمحاولات خاطئة، ثم المحاولة المُرة تلو المُرة مصحوبة بإدراك جزئي يتّسع باستمرار لِماهية حركة المشي، حتى تنجح المحاولة في مُرة مُتقدّمة، فَيَتِمَكَّن الطفل من المشي بشكل صحيح، ثم يحتفظ بشكل دائم بنمط الحركة الذي يساعده على المشي، ويَطوِّره عند الحاجة إذا ما استجّدت تَغْيِرات في البيئة المُحيطة. يُمكن تطبيق نفس المفهوم على القواعد النظرية التي سبقت الإشارة لاستخراجها وبرمجتها، إذ أنّ تلك القواعد التي يمتلكها الخبراء أو تمتلكها النصوص لم تتبلور إلا بعد احتكاك مباشر بالتجارب واتخاذ قرارات خاطئة في البداية، ثم المُمارَسة والتعلم من الخطأ وتدوين القواعد التي أثبتت نجاحها.

يعتمد استخدام المحاولة والخطأ كطريقة لِبرمجة التعلّم الآلي على وجود بيانات يُمكن ملاحظتها عن العالم المحيط (السياق الحاكم للمهمة التي يُراد إنجازها)، بحيث يمكن للبرنامج أن يقوم بتحليلها واستنتاج أنماط للتعامل الناجح مع المُهمّة. هذا

طموح الباحثين بالطبع للقدرة على تصميم نظم ذكاء اصطناعي عام يمكنها التعامل مع تطبيقات متعددة و مواقف لم يتم تعريفها مُسبقًا. تُعدّ النظم الخبيرة من أوائل محاولات الباحثين لِتصميم برامج يُمكنها مُحاكاة الكيفية التي يُفكّر بها الإنسان في التصرف وحل المشكلات من خلال تعريف قواعد نظرية مُنظّمة لكيفية اتخاذ الإنسان لقراراته في سياق مُعَيَّن. تتطور هذه الفكرة لتستوعب إمكانية تصميم "العميل الذكي" الذي - فور أن يُكلّف بمهمة معينة - يمكنه أن يتخذ قرارات بناء على فهمه لبيئة المحيطة حتى يتمكّن من النجاح في تنفيذ تلك المهمة. قواعد التفاعل مع البيئة المحيطة والاستجابة لمعطياتها واستنتاج المسار الأفضل لتنفيذ مهمةٍ ما بنجاح هي من أهم القدرات التي يكتسبها الإنسان، وهي في العادة قدرات يكتسبها بمزيج من تلقين القواعد من سلطة عليا وتعلّمها من خلال الملاحظة الواقعية المستمرة.

كيف "يتلقّن" أو يتلقّى العميل الذكي قواعد التفاعل مع العالم حتى يمكنه اتباع أفضل مسار ممكن لتحقيق مهمته؟ في المنهج الكلاسيكي للذكاء الاصطناعي، يكتب المُبرمج تلك القواعد بشكل جُمَل اشتراطية يُمكن للعميل الذكي اتباعها إن تحققت شروطها حتى يصل لنقطة اتخاذ القرار أو وُجوب التصرف. بطبيعة الحال، تتطلب برمجة هذه القواعد أن يتم استخراجها أولًا، مما يستدعي إما التعامل مع خبراء في نوع المهمة التي سيتم برمجة قواعدها، أو استخراج تلك القواعد من مصادر مكتوبة. قد يكون هذا الجزء صعبًا وقد يتطلب الأمر الكثير من الوقت حتى يتم صياغة قواعد مُحكّمة يمكن استخدامها لبرمجة العميل الذكي، ولكن المشكلة

ظروف مختلفة، والتدرب عليها حتى يمكن لبرنامج العميل الذكي استنتاج كيفية التعامل مع مواقف متنوعة قبل أن يتم إدماجه في السيارة والثقة في قدرته على التعامل مع هذه المنظومة شديدة الديناميكية.

لا يمكن أن تحدث أخطاء إذا تبنينا منظور التعلم من الخبرة والقواعد في تصميم العميل الذكي، فهو قادر من البداية على اتخاذ القرارات الصحيحة والتصرف كما يستدعي السياق في مهمة ما، ولكن المشكلة الرئيسية في هذا المنظور أنه لن يكون قادراً على التصرف إذا قابلته مواقف ليست لها قواعد مبرمجة مسبقاً. على الجانب الآخر، يمكن للبرامج التي تتبنى المنظور التجريبي من خلال البيانات أن ترتكب بعض الأخطاء، ولكن بوجود بيانات مفيدة وشاملة وبالتعلم المستمر يمكن لهذه البرامج الوصول لمستوى أداءٍ ممتازٍ للمهمة. بنظرة أشمل إلى كيفية عمل كل من منظوري التعلم، سنجد أن التعلم من الخبرة أكثر مناسبة للنظم المستقرة التي تحكمها مواقف محددة، وبالتالي يمكن تعريف قواعد محددة ومحدودة لها، في حين أن التعلم من البيانات أكثر ملائمة للمواقف المتغيرة والمعقدة. بالتأكيد يجعل هذا الأمر المزج بين الطريقتين خياراً مثالياً، ولكن ما حدث بالفعل هو ركود في تبني الطريقة الأولى التي يتم فيها تحديد القواعد التجريدية الحاكمة للتعلم، بينما شهدت طريقة التعلم التجريبي من البيانات والملاحظة طفرةً كبيرةً في العقدين الماضيين. التعلم من البيانات والملاحظات هو ما نطلق عليه اصطلاحاً: التعلم الآلي أو لغة الآلة.

التعلم الآلي: المفاهيم والتأطير

التعلم الآلي مصطلح يُطلق على مجموعة الخوارزميات

التحليل لا يتم بشكل كُلي، وإنما بالملاحظة التدريجية وتعلّم شيء جديد في كل مرة يتخذ فيها البرنامج قرارات تبدو خاطئة في البداية، بحيث تتحسن طريقة التصرف أو اتخاذ القرار مع كل مثال جديد، حتى يستقرّ البرنامج عند نقطة يتخذ فيها أقل عدد من الأخطاء. يعني هذا بالضرورة أنه كلما زادت الأمثلة وتنوعت، أمكن للتعلم بهذه الطريقة أن يستنتج أنماطاً أكثر تنوعاً وأن يتعلم بشكل أفضل كيفية إتمام المهمة التي تعكسها هذه البيانات والأمثلة بنجاح.

لبيان الفرق بين المنظورين المُختلِفَيْن للتعلم، يُمكن أن نتأمل منظومة السيارات ذاتية القيادة. حتى تتمكن أيّ سيارة ذاتية القيادة من التّجول في شوارع مدينة ما، يجب في البداية أن يُلقَّنها المُبرمج قواعد مؤسسة للمرور ينبغي على كل السيارات الالتزام بها في أيّ سياق تتواجد فيه سيارة، بدءاً من فهم ما تعنيه إشارات المرور والتصرف الصحيح المرتبط بكل رمز في إشارة المرور، مروراً بالقواعد الحاكمة للسير مع سيارات أخرى في نفس الاتجاه، وانتهاءً بالقواعد التي يجب اتباعها عند تواجد مشاة. تبدو هذه القواعد كافية من حيث المبدأ لِتتمكّن السيارة ذاتية القيادة من التّجول في الشوارع، ولكنّ تلك القواعد لا يمكنها أن تساعد السيارة في التصرف في كل موقف يحدث على الطريق، كوجود الضباب الذي يعوق الرؤية مثلاً أو كأن يقرر أحد المشاة السير باتجاه السيارة مباشرة أو كأن تقرر سيارة مجاورة تجاوز السرعة المقررة أو كأن تمر سيارة إسعاف وهي تطلق سارينة (صفّارة أو زقور) السرعة. يجب إذًا توفير بيانات وأمثلة لبرنامج السيارة عن مواقف حقيقية لكيفية السير على الطُّرُق في

فيما يخص ذلك الحدث. الاختيار الجيد لتلك الأبعاد يُعَدُّ من العوامل المؤثرة بشكل كبير على جودة النتائج المتوقعة من خوارزميات التعلم. تشمل معالجة البيانات أيضا إعادة تشكيل قيمها في كل من الأبعاد التي يتم اختيارها بحيث تمنح تلك القيم الخوارزميات قدرة أكبر على استنتاج أنماط عامة. تأخذ عملية معالجة البيانات مناحي مختلفة ومتباينة التعقيد قد تختلف حسب الهدف المراد تحقيقه، ولكن في أبسط صورها، تتمثل إعادة البيانات في تحويل كل القيم إلى أرقام يمكن للخوارزميات التعامل معها رياضياً وإحصائياً.

بعد أن تتم معالجة البيانات بالشكل المناسب، يأتي دور الخوارزميات التي ستنفِّذ عملية التعلم. تعتمد عملية التعلم على التاريخ؛ تاريخ من الأمثلة المرتبطة بالهدف المراد تحقيقه. يتكون كل مثال من مجموعة قِيَم للبيانات متبوعة بقرار أو تصرُّف تم اتخاذه بالفعل في ضوء تلك القِيَم، أو ما يمكن أن نطلق عليه الحقيقة المطلقة (ground truth). مصطلح الحقيقة المطلقة لا يعني بالضرورة أن القرار أو التصرف المرتبط بتلك البيانات أو المعطيات صحيح "مطلقاً"، وإنما هو للدلالة فقط على أن القرار لا يمكن تغييره لأنه اتُّخذ في الماضي في ضوء البيانات التي كانت متاحة. كلما كُثرت الأمثلة التاريخية كلما شكّل هذا وعاءً أشمل وأكثر تنوعاً لأنماط أكثر يُمكن استنتاجها، وبالتالي للخبرة التي يمكن اكتسابها لتحقيق الهدف بشكل أكثر نجاحاً في المستقبل. يعتمد نجاح الخوارزميات إذًا على توافر كمٍّ كبير من الأمثلة التي يمكن التعلم منها. لِكَيْ تتمّ عملية التعلم بشكلٍ صحيح ويمكن تقييم نجاحها، يتم تقسيم الأمثلة المتاحة لهدف معين

التي يُمكنها تعزيز التعلم من خلال البيانات المتاحة عن أحداثٍ ترتبط بتحقيق هدف معين، فماذا نعني تحديداً بكلمة "بيانات"؟ البيانات هي الحقائق الخام التي يمكن أن نُسجِّلها عن العالم من حولنا. يمكن تعريف أيّ حدث في أيّ سياق بدلالة الحقائق التي نعرفها عن أمثلة (observations) ارتبطت سابقاً بهذا الحدث. يمكن على سبيل المثال تعريف وجود مريض مُعَيَّن بدلالة الأعراض المختلفة التي يُعاني منها مريض ما في ضوء أمثلةٍ سابقةٍ عن مريضٍ آخرين عانوا من أعراض مُشابهة. كَمِثَالٍ آخر، يمكن التنبؤ باحتمال ارتفاع قيمة سهمٍ مُعَيَّن بمعرفة قيمة السهم في أوقات سابقة بالإضافة لخصائص الشركة المالكة وبيانات المنافسين ومتغيرات السوق. كُلّما كانت البيانات غنيةً ومتنوعةً وكثيرة، كانت استنتاجاتنا عن الحدث من خلال البيانات التي تصفه أكثر دقةً وموثوقةً. تعتبر البيانات لذلك ثروةً ذات قيمةٍ عالية، ولكي يُمكن لخوارزميات التعلم الآلي استخدامها، ينبغي جمع تلك البيانات وصياغتها بطريقة تجعلها مناسبة لاستخدام الخوارزميات، والتي هي في نهاية الأمر برامج كمبيوترية تفهم الأرقام والأرقام فقط. يَغُصُّ النظر عن التفاصيل وراء تصميم الأنواع المختلفة لخوارزميات التعلم الآلي، فإن عملية التعلم ذاتها تتبع خطواتٍ واضحةً مشتركة بين جميع الخوارزميات: معالجة البيانات، بناء نماذج للتعلم، ثم اختبار تلك النماذج عن طريق معايير للتقييم من أجل تحسين الأداء بمرور الوقت.

تعتمد معالجة البيانات على اختيار أبعاد (dimensions or features) تصف الحقائق الخاصة بحدث معين بحيث يمكن تقييم مدى ارتباط تلك الأبعاد بالقدرة على التنبؤ أو اتخاذ القرار الصحيح

القيم المتعلقة بالقرارات أو التصرفات، بحيث يرى النموذج البيانات فقط بمعزل عفاً تمّ اتباعه من قرارات أو تصرفات بناء عليها. يتّخذ النموذج قرارات في ضوء البيانات فقط، ثم يتم قياس دالة الدقة أو دالة الفقد دون أن يصحح النموذج من نفسه. تُمثّل القيمة النهائية لتلك الدالة (أو دوال مختلفة حسب نوع النموذج والمستهدف منه) المقياس النهائي لأداء النموذج، والذي يمكن في ضوئه تقييم الفائدة التي يمكن تحقيقها إذا ما تمّ اعتماد النموذج في التصرف واتخاذ القرارات مستقبلاً.

لضمان ألا يتعلم النموذج بالضدفة، يجب تكرار عملية التدريب بناءً على أمثلة التعلم عدداً كافياً من مرات التعلّم (epochs) بحيث يُتاح للخوارزم أن يستمر في تقليل الخطأ. إن استمرّ النموذج الناتج عن الخوارزم في التآرجح بين معدلات خطأ عالية ومنخفضة برغم زيادة مرات التدريب، يوصف النموذج بأنه غير قادر على التعلم من البيانات المتاحة. يمكن أن يَنْتُج هذا عن استخدام أبعاد بيانات غير كافية لا تمنح النموذج القدرة على التوصيف الكافي للأنماط التي تساعد في إنتاج مخرجات سليمة (high bias). يمكن توصيف أداء النموذج أيضاً باستخدام الفرق بين أداء النموذج وقت التدريب وأدائه وقت التقييم. إذا كان الفرق صغيراً، أمكن اعتبار أن النموذج قادر على "التعميم"، بمعنى قدرته الجيدة على تمييز القرارات والتصرفات المقبولة لأمثلة التقييم التي لم يرها مسبقاً في فترة التعلم. على الجانب الآخر، إن كان ذلك الفرق كبيراً (high variance)، يُعتبَر النموذج غير قادرٍ على اتباع قرارات أو تصرفات سليمة ومقبولة بناءً على مُعطيات لم يتعلمها، وبالتالي يُعتبَر النموذج غير قادرٍ على التعميم إلى تجارب لم يرها

إلى جزأين غير متساويين: أمثلة للتدريب (training set)، وأمثلة التقييم والاختبار (test set). تُقسّم الأمثلة بين الجزأين في العادة بنسبة تتراوح بين سبعين إلى ثلاثين بالمائة أو ثمانين إلى عشرين بالمائة.

عند التعامل مع أمثلة التدريب، تُستخدم الخوارزميات كلّ مثال مع القرار أو التصرف المرتبط به لتبني نموذجاً (model) للتعلم يقوم في البداية على التخمين العشوائي لمدى تأثير البيانات على صحة القرار، يتم تصحيحه بالتدريب مع كل مثال جديد يراه. بِغَضِّ النظر عن الشكل الذي يأخذه هذا التصحيح، وإن كان في أغلب الخوارزميات يكون على هيئة أوزان أو معاملات (parameters) لأبعاد البيانات التي تبدأ عشوائية ثم يتم تعديلها، فإنه يتمّ ويجري بناءً على تقييم معايير معينة مثل الدقة في تخمين القرار أو التصرف لكل مثال (accuracy) أو الفرق بين القرار الذي يتخذه الخوارزم وبين القرار الصحيح (loss)، ولأن هذا التقييم يجب أن يكون عن مُجَمَّل القرارات المُتاحة في أمثلة التدريب، تتمّ صياغته في العادة على شكل دالة (objective function)، بحيث يحاول الخوارزم أن يُعْظِّمَهَا إن كانت دالة للدقة أو أن يُقَلِّل مُجَمَّل قيمتها إن كانت دالة للفرق أو "الفقد". عندما ينتهي الخوارزم من التعلم من كل أمثلة القسم الأول، يكون قد أنتج نموذجاً للتعامل مع الهدف من خلال أمثله المتاحة، ولكن هذا النموذج لا يمكن استخدامه بثقةٍ إلا بعد تقييمه من خلال أمثلة لم يتعرض لها مُسبّقاً. يأتي هنا دور القسم الثاني من أمثلة التقييم، والتي تحتوي أيضاً على بيانات ترتبط بقرارات أو تصرفات تم اتخاذها في الماضي. قبل أن يتعرض النموذج لهذه الأمثلة، يتم إخفاء

وصفها بأبعاد كثيرة؛ السِّمَتان اللتان تميزان عصر البيانات اليوم. لا يمكن لهذه الخوارزميات أيضا التعامل بشكلٍ مَرِنٍ مع الأنواع غير التقليدية للبيانات والتي أصبحت أيضا مُتاحة بكثرة، كالصور والنصوص والصوت والفيديو والبيانات ذات الطبيعة البيولوجية وبيانات المنظومات الفيزيائية المُعَقَّدة، مِمَّا دفع المُتَخَصِّصين في علوم الحاسب إلى التفكير في طُرُقٍ أخرى لِتَصْمِيمِ خوارزمياتٍ جديدة يمكنها التعامل مع المعطيات الجديدة للبيانات المتاحة اليوم، والتي تُعَدُّ قَصْدًا ثَرِيًّا يمكن استغلاله في استنتاج أنماط أكثر تعقيدا. بَحَثَ المتخصصون في الكيفية التي يتعامل بها الإنسان مع كل أشكال المعلومات، وكان من الطبيعي أن تكون منظومة الخلايا العصبية التي تُشَكِّلُ دماغ الإنسان محلَّ تركيزهم، فهي منظومة غنية مُعَقَّدة شديدة التشابك وقادرة على التعلم بسرعة والتعامل المرن مع معطيات مكثفة ومتعددة الأشكال. كان السؤال: هل يمكن محاكاة تلك المنظومة حتى يتمَّ تصميمُ تجربةٍ تُعَلِّمُ غنية كتلك التي يدعمها الدماغ البشري؟

تتكون منظومة الخلايا العصبية لدماغ الإنسان من عُنْصَرٍ أساسي يبدو بسيطا: الخلايا العصبية. في صورتها الأبسط، تقوم الخلية العصبية باستقبال مدخلات ثم تحديد قيمة لمخرج تُنتِجُه تلك الخلية بناء على عملية حسابية تجميعية مُبَسَّطة. يكمن إبداع المنظومة في كيفية اتصال الخلايا العصبية المختلفة ببعضها، وكيفية قيامها بتلك العملية المبسطة، ثم حساب قيمة مخرجات تُصْبِحُ في حد ذاتها أحد المُدْخَلَاتِ لخلايا أخرى. تُشَكِّلُ الخلايا العصبية بذلك شبكات معقدة يمكنها تحليل البيانات واستنتاج الأنماط من خلال التعلم المستمر.

من قبل. غياب القدرة على التعميم يُعَدُّ من أهم مشاكل خوارزميات التعلم الآلي، وهو في العادة نتيجة لاستخدام بياناتٍ وأبعادٍ تفصيلية أكثر من اللازم وقت التعلم يمكنها إنتاج أنماط خاصة بها، ولكن لا يمكن أن تُنْسَجِبَ لِتَشْمَلَ بيانات أخرى ذات أنماطٍ قد تختلف قليلاً أو كثيراً. يُطْلَقُ المتخصصون على عدم القدرة على التعميم نتيجة التفصيل الأكثر من اللازم مصطلح "النموذج الذي يحفظ ولا يتعلم".

إن لم تكن النتائج مُرْضِيَّةً أو مناسبةً لِلْمُسْتَهْدَفِ تحقيقه، يمكن هنا التفكير على مَحَاوِرٍ عِدَّة، إما فُرَادِي أو مُجْتَمَعَة. يمكن على سبيل المثال التحقق من مدى مناسبة البيانات للمهمة، أو التحقق من تصميم الخوارزم والقيم التي اختيرت للمعاملات الخاصة بالتصميم (hyperparameters) وتعديلها ثم إعادة المحاولة (كأن تزيد مرات التعلم مثلا)، أو حتى تحليل مدى مناسبة نوع الخوارزم واختيار نوع أكثر مناسبة لطبيعة الهدف المراد تحقيقه. كي تُؤَتِّي عملية التعلُّم بثمارها، يجب أيضاً أن تكون الأمثلة المتاحة للتدريب كثيرة، بحيث يمكن تعلم أنماط ذات معنى حقيقي وجودة عالية من خلال نسبة أمثلة التدريب، ويمكن اعتماد نتائج التقييم بثقة من النسبة الصغيرة المتبقية.

التعلم من العالم الطبيعي

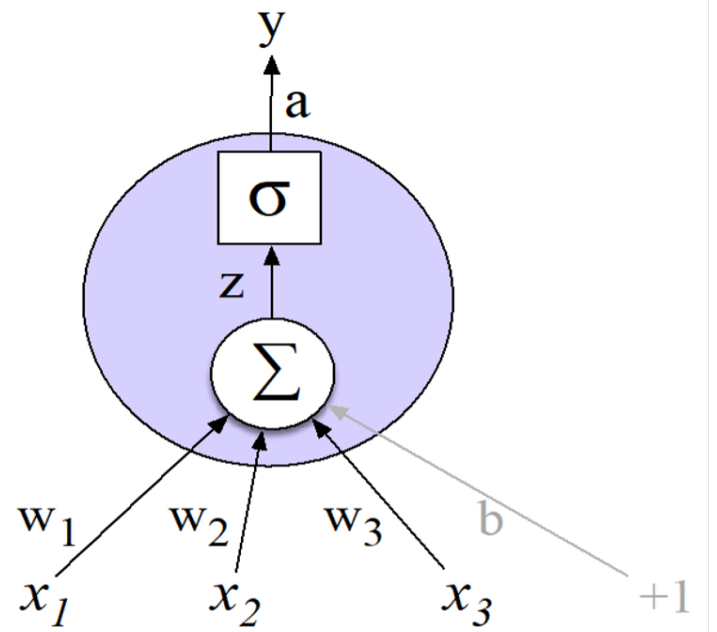
تعتمد الخوارزميات الكلاسيكية للتعلم الآلي بشكل مكثف على الهندسة المُسَبَّقة لأبعاد البيانات والتعامل معها بشكل شفاف كما هي. يمنح هذا تلك الخوارزميات القدرة على كشف طريقة عملها وتفسير الأسباب وراء قراراتها للخبراء، ولكن الخوارزميات الكلاسيكية تتعامل بصعوبة بالغة مع حجم البيانات الكبير جداً وكذا الأمثلة التي يجب

مُقارنة النتيجة التي تم حسابها بواسطة الوحدة العصبية بالنتيجة الصحيحة المُفترض حدوثها، ثم تعديل المعاملات أو الأوزان بما يضمن تقليل هامش الخطأ في الفَرْق الناتج عن تلك المقارنة، ويتم هذا التعديل بشكل تدريجي لتقليل الفارق التراكمي في دالة الفقد من خلال تقنية رياضية تُسمَّى الانحدار العكسي أو الهبوط المتدرّج (Gradient Descent).
التوصيف السابق يُمثِّل شبكة عصبية سطحية (shallow) تتكوّن من طبقة تقبل المدخلات، وطبقة تقوم بالحساب الرياضي، وطبقة تنتج المخرجات. يعتمد الدماغ البشري على ملايين الخلايا العصبية المتصلة في شبكة مُعقّدة من الوحدات التي تقوم بالحسابات الرياضية، وقد حاول المتخصصون محاكاة هذه الشبكة المعقدة، ولكن القيود على السعة التخزينية والحسابية التي لم تتجاوزها أجهزة الكمبيوتر لمدة طويلة ظلت عائقًا مؤكّدًا أمام تحويل هذه المحاكاة إلى حقيقة، حتى أفلُكّن تجاوزها أخيرًا في بداية العقد الثاني من القرن الواحد والعشرين مع تطوير الوحدات الحسابية لمعالجة الرسومات (GPUs).

العميق والأعمق

يشير مصطلح "التعلم العميق" إلى استخدام شبكات عصبية اصطناعية مُتعدّدة الطبقات، حيث تظلّ طبقة المدخلات واحدة ويمكنها أن تتكون من أي عدد من الوحدات العصبية حسب عدد الأبعاد الذي تحتاجه أمثلة التعلم لتوصيفها، وتظلّ طبقة المخرجات واحدة، مع تراوح عدد الوحدات العصبية بها ما بين وحدة عصبية واحدة تمثل قرارًا ثنائيًا بنعم أو بلا، إلى وحدات بعدد القرارات المتاح للاختيار بينها. تكمن عبقرية تصميم الشبكات العصبية العميقة في عدد الطبقات التي يمكن استخدامها للدوال الحسابية، وعدد

هذا التصميم هو ما اعتمد عليه بولتزمان لآلته ثم هوبفيلد في شبكته، حيث يتم تصميم وحدة عصبية صناعية تستقبل مدخلات هي عبارة عن قيم رقمية، وحساب المخرجات التي يتم تعريفها كدالة رياضية في تلك المدخلات ثم تفعيل الوحدة كي تتبع قرارًا أو تصرفًا (activation). في الشكل التالي، يمكن تمثيل هذا التفاعل بين المدخلات والمخرجات لخلاية واحدة، حيث تمثل قيم (x) المدخلات الخاصة بمثال واحد، وتمثل المعاملات (w) الأوزان النسبية التي ترتبط بمدى تأثير كل من الأبعاد الخاصة بالمثال في المخرجات المتوقعة للمثال. تُضاف لهذه المدخلات قيمة عشوائية (b) لضمان مرونة الشبكة العصبية وتعزيز قدرتها على استنتاج نماذج أكثر تعقيدًا مما تُضوئه المدخلات والتأقلم مع الغياب المُحتَمَل لمدخلات متوازنة.



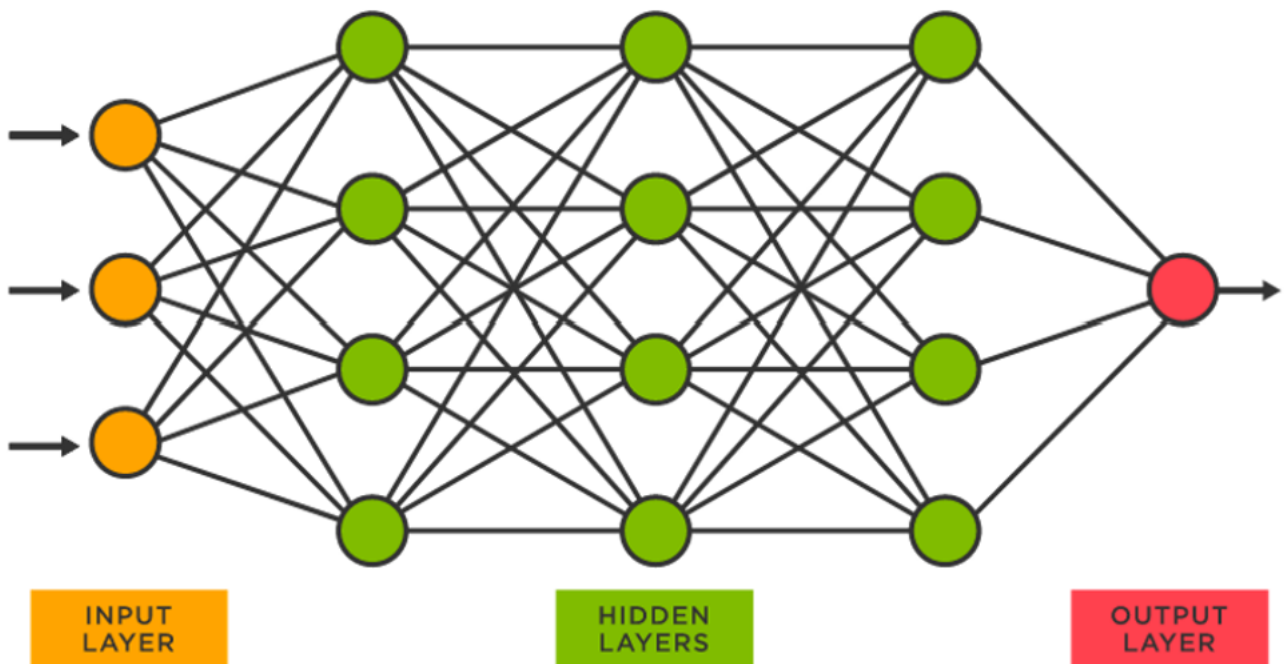
ما يحدث في الوحدة العصبية الواحدة هو جمع للمدخلات مع معاملات تأثيرها، ثم اختيار قرار أو تصرف (y) بناء على النتيجة التي تم حسابها (z) عن طريق تفعيل الوحدة (a). تتركز عملية التعلم إذًا في

من المُمكن استنتاجها بالهندسة اليدوية للبيانات، وهي المهمة التي كانت تعتمد على الخبرة والتدخل البشري المباشر في الخوارزميات الكلاسيكية. هذه الأبعاد الجديدة التي يتم استنتاجها بشكل تلقائي من خلال تصميم الشبكات العميقة تُمثّل توصيفاً أعمق وأكثر غنى وتعقيداً للأنماط التي تعكسها تلك البيانات، وتشتمل على تمثيل رقمي مُختصر لنتائج تحليل وتوصيف تلك البيانات يمكن استخدامه في حدّ ذاته كبديل مُستقبلي للبيانات الخام. بفضل هذا التمثيل الأكثر تعقيداً، أمكن استخدام الشبكات العصبية العميقة لتحليل المشكلات الكبيرة والمعقدة وتحقيق الأهداف التي كان من الصعب الوصول إلى نتائج مرضية لها في السابق.

تنقسم الشبكات العصبية العميقة حسب طريقة التوصيل بين الوحدات العصبية بين الطبقات إلى ثلاث أنواع رئيسية: الشبكات التمريرية (أو التلافيفية)، والشبكات التكرارية، والشبكات التحويلية. تعمل الشبكات العصبية التمريرية (Convolutional Neural Networks- CNNs) والشبكات العصبية التكرارية

الوحدات العصبية التي يمكن تعريفها لكل من تلك الطبقات، ثم الكيفية التي يتم من خلالها توصيل كل الوحدات في طبقة معينة بالوحدات في الطبقة التي تليها. مهما كانت درجة تعقيد الشبكات العصبية الاصطناعية، يظلّ مبدأ عملها واحداً يتمثل في تلك المراحل الثلاث: المدخلات، الحسابات، والمخرجات. تختلف تصميمات الشبكات العصبية العميقة حسب عناصر تصميم الطبقات الحسابية: الدوال المُستخدمة (دالة سيجمويد، دالة تانية، دالة ريليو)؛ كيفية التوصيل (كاملة من كل الوحدات إلى كل الوحدات بين كل طبقتين، أو جزئية بين مجموعة وحدات في طبقة إلى مجموعة وحدات في الطبقة التي تليها، أو تكرارية بين وحدات طبقة وذاتها)؛ عدد الطبقات (كلما زادت كانت الشبكة أعمق)؛ وعدد الوحدات في كل طبقة (اختيار يختلف حسب الهدف المراد تحقيقه).

كلما زادت درجة العمق في تصميم الشبكات العصبية الاصطناعية، أفكّن للشبكات استخراج ميزات أكثر تفصيلاً في كل طبقة، وأمكن أيضاً استنتاج أبعاد جديدة بناءً على المدخلات الأولية لم يكن



تكون مزدوجة الاتجاه (bidirectional) ظهرت مشكلة الاحتفاظ بمعلومات قد تكون غير ذات قيمة لمدة مطولة. أدت هذه الإشكاليات لظهور تصميم جديد يعتمد على آلية الانتباه إلى المعلومات المهمة فقط (attention)، وهو ما أُطلق عليه اسم الشبكات العصبية التحويلية (Transformers).

خلال مرحلة التعلم، تُقسّم الشبكات التحويلية بيانات المُدخلات - كالنصوص مثلاً - إلى أجزاء صغيرة (tokens) يتم تحويلها بعد ذلك إلى مدخلات رقمية في شكل متجهات عددية (vectors)، وتُستخدَم تقنيات الانحدار العكسي وضبط الأوزان لتحسين دقة التنبؤات المبنية على تلك المدخلات، والتي قد تكون في أبسط أشكالها "ما هي الكلمة التالية؟" أو أي مهمة أخرى مثل "ما إعراب أو معنى هذه الكلمة؟" أو "ما هي إجابة السؤال التالي؟". تعتمد الشبكات التحويلية على آلية الانتباه الذاتي لفهم العلاقات بين الأجزاء داخل السياق الكامل للجملة، حيث يتم لكل جزء - كلمة على سبيل المثال - تحديد الأجزاء الأخرى (الكلمات الأخرى مثلاً) الأكثر أهمية في السياق السابق واللاحق (وَلْيَكُنْ السياق جملة أو فقرة) بناءً على ارتباط تلك الأجزاء ببعضها البعض، مما يُمكن الوحدات الحسابية التي تستنتج الأنماط من تضمين السياق وفهم المعاني المختلفة للكلمات والجمل حسب السياقات المختلفة. تتيح آلية الانتباه الذاتي لكل وحدة في الشبكات التحويلية معالجة البيانات بشكل مُتوازٍ مع الوحدات الأخرى، مما يزيد من كفاءتها مقارنةً بالشبكات التكرارية التي تعالج البيانات تسلسلياً. تتكون الشبكات التحويلية في شكلها العام من شَبَكَتَيْنِ داخِلِيَّتَيْنِ، تقوم الأولى بالتشفير (Encoder) أو فهم البيانات

(Recurrent Neural Networks - RNNs) على معالجة أنواع مختلفة من البيانات باستخدام تقنيات مُخصصة لكل نوع. تُستخدَم الشبكات التمريرية بشكل رئيسي في معالجة البيانات ذات البعد المكاني مثل الصور والفيديو، حيث تعتمد على طبقات تمريرية تعمل على استخراج الميزات المهمة من البيانات عبر مُرَشِّحات أو فلاتر (filters) يتم تمريرها فوق الصورة للتعرف على أنماط مكانية مثل الحدود والأشكال والأطراف. يتم تقليل الأبعاد فيما بعد باستخدام طبقات تجميع (Pooling) لتقليل حجم البيانات مع الحفاظ على المعلومات الأساسية التي تم التَّعَرُّفُ عليها. أما الشبكات التكرارية فتُستخدَم لمعالجة البيانات التسلسلية مثل النصوص والصوت، حيث تقبل طبقة الوحدات الحسابية مدخلاتها من طبقة البيانات، ثم تقوم بحساباتها، ومن ثَمَّ تُستخدَم الوحدات العصبية في الطبقات الحسابية تلك المخرجات التي قامت بحسابها كمُدخلات مَرَّةً أخرى بالإضافة للمدخلات التي تستقبلها من طبقة البيانات. يمكن للشبكات التكرارية بهذا الشكل الاحتفاظ بالمعلومات التي تعلمتها من خطوات سابقة أثناء معالجة البيانات الجديدة، مما يسمح لها بفهم السياق والتسلسل الزمني.

مُتَّلت الشبكات التكرارية نقلة مهمة في تصميم الشبكات العصبية، حيث أمكن تصميمها بحيث تعمل بشكل ازدواجي فتدعم مهاماً مثل الترجمة بين اللغات، أو اتخاذ قرارات تنبؤية بناءً على بيانات متسلسلة، ولكن تصميم تلك الشبكات التكرارية دَعَم فقط المعالجة التسلسلية للبيانات في الماضي، دون أن يتاح للوحدات العصبية أن تأخذ البيانات المستقبلية في الاعتبار. مع إعادة تصميم تلك الشبكات بحيث

مما يُثري التفاهم الإنساني ويُسهّم في بناء عالم مترابط. تصبح اللغة بذلك أكثر من مجرد وسيلة للتعبير، فهي وسيلة للتعلم، ووسيلة لتمثيل المعرفة؛ المفهوماني الرئيسيان الذي بدأ بهما هذا المقال. نظرًا لهذه الأهمية الكبيرة للغة، تم تصميم الشبكات التحويلية بحيث تُحاكي الطريقة التي يُفكّر بها البشر عند تعاملهم مع اللغة عندما يتعلمونها كتركيبات بسيطة ومعقدة، وعندما يفهمون العناصر التي تصف وحداتها، وعندما يستوعبونها كمعان وأفكار حرفية ومجازية.

تعمل النماذج اللغوية الضخمة، مثل GPT، بنفس البنية الهيكلية للشبكات العصبية التحويلية، مع إضافة بُعْد التصميم العميق. تُكُنّ قوة النماذج اللغوية الضخمة في كَوْنِها مُصمّمة للتعلم من كمّ ضخم من البيانات النَّصِّيَّة المُتاحة من مصادر متنوعة على الويب، ممّا يُفكّنها من التعرّض لأنماط عديدة ومتباينة تُكسبها قدرة قوية على التعميم. على الجانب الآخر، تتطلّب مرحلة التعلم قدرات تخزينية وحسابية مهولة لا تتوافر إلا لعدد محدود من شركات البرمجة الكبرى. نتج عن هذا أن اختارت تلك الشركات أن تقوم بمرحلة التعلم داخليًا حتى تُنتج نماذج كبيرة وقوية، ثم تُتيح تلك النماذج للتحميل كي يُستخدمها المتخصصون دون الاضطرار للقيام بمرحلة التعلم من جديد. تُسمّى تلك النماذج بالنماذج مُسبّقة التدريب (pretrained models). أدّت هذه الإتاحة الفورية لنماذج قوية مُسبقة التدريب إلى التّوسّع في تصميم تطبيقات مُتنوّعة تعتمد على هذه النماذج كـ "صندوق أسود"، ما أنتج طُفرة في الأبحاث والتطبيقات التي تعتمد على هذه النماذج، والتي أصبحت تُنتج مُخرجات نصيّة وفُنيّة جديدة بالغة

وتحليلها لتمثيل هذا الفهم في صورة رَقْمِيَّة تحتوي ضمناً على المعاني السياقية الغنية الناتجة عن ذلك التحليل، بحيث يمكن استخدام تلك الصور التمثيلية (embeddings) في الشّبكة الثانية التي تقوم بِفكّ التشفير (Decoder) لِتَخْلِقِ نصوص جديدة أو تنفيذ أي مهام أخرى كالترتيب.

بِفَضْل هذا التصميم، وبفضل قدرتها على "تخليق" أو إنتاج مخرجات جديدة، أصبحت الشبكات التحويلية الأساس لمُعظّم نماذج الذكاء الاصطناعي الحديثة القادرة على تقديم أداء متفوق في معالجة اللغات الطبيعية وترجمة النصوص والتلخيص، وركزت الأبحاث على تصميم نماذج أكثر تعقيدًا للشبكات التحويلية، وتوسعت استخداماتها أكثر لِئُمكِنها أيضًا تحليل أنواع البيانات الأخرى وأداء مهمات متنوعة لا تتوقف عند اللغة. تظل اللغة مع ذلك هي العنصر الأساسي لتصميم الشبكات التحويلية نظرًا للوفرة الكبيرة في البيانات الخاصة بالنصوص، ونشأت نتيجة لذلك النماذج اللغوية الضخمة (Large Language Models - LLMs).

لغة الآلة وآلية اللغة

تُعَدُّ اللغة الطريقة الأكثر انتشارًا للتواصل البشري والوعاء المعرفي الأكثر رُقِيًّا، إذ تُمَثِّل الأداة التي يستخدمها الإنسان لنقل الأفكار والتجارب والمفاهيم عبر الأجيال. تُفكِّن اللغة البشر من تمثيل المعرفة في كلماتٍ وجُمَلٍ تعكس التعقيدات الفكرية والثقافية للمجتمعات المختلفة، وتتيح لهم توثيق التاريخ وتفسير الظواهر الطبيعية وتطوير العلوم والفنون، مما يجعلها مفتاح التقدم الحضاري. بفضل تنوّع اللغات، يمكن للمعرفة أن تتخذ أشكالًا متعددة تناسب السياقات الثقافية والاجتماعية المختلفة،

محاكاة بعض التصرفات البشرية. تطرح هذه القدرات التطورية النماذج الضخمة كأدوات قوية ومرنة قادرة على التكيف مع مجموعة واسعة من التحديات في مجالات متعددة تشمل التفكير المنطقي وتمتد إلى التطبيقات الصناعية والإبداعية. تمثل هذه القدرات أيضاً هاجساً للمتخصصين، الذين يتوقعون أن تقود تلك القدرات النماذج الضخمة والعملاء الأذكى الذين يُمكنهم إدماج تلك النماذج إلى تطوير "وعي" خاص بهم يُمكنهم من الاستقلال عن سيطرة البشر.

تقترب النماذج الحالية للذكاء الاصطناعي بالفعل من محاكاة الكثير من القدرات الإنسانية، لكن الوعي يظل ضمن القدرات التي لا يزال الباحثون في جدال مُتقدم حول إمكانية أن يكتسبها الذكاء الاصطناعي. برغم قوة النماذج الجديدة للذكاء الاصطناعي، وبرغم المخاوف التي يُعبر عنها الكثير من المُتخصصين وفي مقدمتهم أحد رواد هذه الطفرة، فإن هذه النماذج لا "تفهم" حتى الآن النصوص والمُدخلات كما يفهمها البشر، بل تعمل بنفس الطريقة التي تعمل بها الشبكات العصبية العميقة: استخدام بيانات كثيرة يمكن منها استنتاج إحصاءات واحتمالات لتحسين المخرجات، مع القدرة على تعريف أبعاد عميقة وجديدة لتمثيل تلك البيانات. يمكن لهذا أن يتغير في المستقبل، ولكن في الوقت الحالي، ومن خلال التجارب العلمية المختلفة، فإن مبدأ الاحتمالات الذي تم تعظيمه من خلال الحجم الهائل للبيانات التي أتاحت لتدريب تلك النماذج يظل التفسير الأكثر انتشاراً لكيفية عملها.

تظل قدرات النماذج الضخمة إذاً محل بحث ونقد، فلا زالت هناك حدود تتوقف عندها النماذج الضخمة سواء فيما يخص المنطق أو الإبداع. لا زالت

التعقيد ولم تُعد تتوقف فقط عند مهام التنبؤ المعتادة.

تحديات اليوم وتوجهات المستقبل

استقال جيفري هينتون من عمله بشركة جوجل حتى يتمكن من التحدث بحرية أكثر عما يعتبره مخاطر محتملة للذكاء الاصطناعي. أشار هينتون في المؤتمر الصحفي الذي عقده هيئة جوائز نوبل إلى أنه "ليست لدينا أي خبرة عن كيفية التعامل مع ما قد يكون أذكى منا كبشر. هناك فوائد جمة بلا شك، وبالذات في مجال الطب، ولكن لا بُدّ لنا أن نفكر أيضاً في احتمال أن تخرج هذه التكنولوجيا عن السيطرة." ولكن السؤال هو: هل يتفق العلماء على أن الذكاء الاصطناعي في صورته الجديدة المتمثلة في النماذج الضخمة قد يفوقنا ذكاءً كبشرياً؟ وهل يرى العلماء في هذا التفوق المحتمل خطراً وجودياً أو حتى تمهيداً لممارسات عملية خاطئة في المجالات التي قد يُستخدم فيها الذكاء الاصطناعي؟ تُعد الخصائص الناشئة (emergent properties) للنماذج الضخمة واحدة من أكثر الجوانب المهمة واللافتة لنظر الباحثين في تطوّر الذكاء الاصطناعي، حيث تتمثل في ظهور قدرات غير متوقعة مع زيادة حجم وتعقيد النماذج وكمية البيانات المستخدمة في تدريبها. يُبين الباحثون من خلال تجارب متنوعة أنه عند تدريب النماذج الضخمة بشكل مستمر على بيانات أكثر، يتحسن أدائها باستمرار وفي إطار المتوقع حتى يصل التعلم إلى نقطة حرجية تبدأ بعدها تلك النماذج في إظهار فهم أعمق للأنماط والعلاقات في البيانات يُمكنها من أداء مهام لم يتم تدريبها عليها صراحة، مثل حل المسائل الرياضية المعقدة، وكتابة الأكواد البرمجية، وتقديم تحليلات منطقية، وحتى

القُتْطُورَة التعبير المُبدع عن ذاتها؟ يُجادل بعض الباحثين بأن تَشَكُّلَ الوَعْي لدى هذه النماذج لا يُمكن أن يَحْدُث، نتيجة للطريقة التي صُمِّمَت بها الشبكات العصبية العميقة، حيث أن "دالة الفقد" أو "دالة الدقة" لا تزالان الهدف الأساسي الذي تسعى تلك الشبكات إِمَّا لِتَقْلِيلِهِ أو تَعْظِيمِهِ. ليس لهذه الشبكات بَعْدُ هَدَفٌ تَنَافُسيٌّ تَدْفَعُهُ "دالة البقاء"، الدالة الأهم التي تَدْفَعُ الإنسان لِلتَطَوُّرِ والتَّفكير والإبداع.

المراجع:

1. Pedro Domingos, "The Master Algorithm: How the Quest for the Ultimate Learning Machine Will Remake Our World," 1st Edition, ISBN 978-0465065707, Basic Books, 2015.

2. Christopher M. Bishop, "Pattern Recognition and Machine Learning," ISBN 978-0387310732, Springer, 2006.

أخبار علمية

عشرة علماء ومبتكرين يغيرون وجه العلوم في عام 2024م

في قائمة أصدرتها مجلة "Nature" لعام 2024، تم تسليط الضوء على عشرة شخصيات بارزة ساهمت في تشكيل مسار العلم عالمياً هذا العام. ضمت القائمة علماء ومبتكرين من مجالات متعددة مثل الفيزياء، البيولوجيا، وتقنيات المناخ. من بين الأسماء البارزة

1. **محمد يونس:** الاقتصادي والحائز على جائزة نوبل للسلام الذي أصبح قائداً مؤقتاً لبنغلاديش.
2. **بلاسيد مبالا:** الباحث الكونغولي الذي أطلق التحذيرات حول انتشار فيروس جدري القرد.
3. **كورديليا باهر:** المحامية السويسرية التي تقود

تلك النماذج عُرضة لإنتاج ردود تقع تحت توصيف "الهلوسة" أو اختلاق إجابات لا تُمَثِّل الحقيقة إن عجزت عن إيجاد ردود مناسبة، ويظهر هذا واضحا عند سؤالها عن معلومات تختص بالاستنتاج المنطقي والرياضي في المسائل المعقدة. ظهرت لهذا مؤخراً ظفرة في الأبحاث التي تدعو لإعادة التعلم من الخبرة والقواعد إلى الواجهة بعد أن توارى لِمُدَّة طويلة عن الأضواء. تدعو الاتجاهات البحثية الجديدة لتصميم نُظُم يُمكنها تحقيق التناغم بين التعلُّم من البيانات والتعلُّم من القواعد النظرية، بحيث يُمكن للنماذج اللغوية الضخمة أن تكون في الواجهة إذا ما توافرت لها البيانات التي تُفَكِّهها من أداء المهام التي لا تتطلب الالتزام الصارم بمخرجات تتوافق مع المنطق والحقائق، في حين يتدخل العميل الذكي الذي صُمِّم بناء على قواعد تمَّ التَّحَقُّق منها عند الحاجة إلى أداء مهام لا بدَّ من ضمان التفكير والردود الصحيحة المنطقية فيها. يتحقَّق التناغم في كيفية تصميم الآليَّة التي يُمكن بها للَمُودَجِّين تبادل البيانات والمعلومات بينهما.

خاتمة

يظل الإبداع نقطة التميز التي لا زال يحتكرها الإنسان، حيث لا تزال القدرات الإبداعية لتلك النماذج قاصرة عن "فهم" الإبداع وخصائصه الإنسانية، فحتى بوجود النماذج المُطَوَّرة التي تَرَسِّمُ صُوراً أو تُؤَلِّفُ موسيقى أو شِعْراً أو تُكْتُبُ روايات، لازالت تلك النماذج تفتقر للقدرة الحقيقية على الإبداع النابع من التجربة الإنسانية المتفردة.

رُبَّمَا يحدث أن تتطوَّر تلك النماذج لِتُفَكِّر، ولكن هل يُمكن أن يَتَشَكَّلَ لديها "وعي" بذاتها؟ وهل يمكن أن يؤدِّي هذا الوعي لأن تستطيع تلك النماذج

تلسكوب DESI يرسم خريطة تاريخية للكون ويؤكد صحة نظريات آينشتاين



كشف العلماء في مختبر لورانس بيركلي الوطني عن نتائج مذهلة باستخدام تلسكوب DESI (Dark Energy Spectroscopic Instrument)، الذي تمكن من رسم خريطة شاملة لحوالي 6 ملايين مجرة تمتد على مدار 11 مليار سنة من تاريخ الكون. أظهرت هذه الدراسة تطابقاً مذهلاً بين توزيع المادة في الكون وتوقعات نظرية النسبية العامة لآينشتاين. تُعتبر هذه النتائج بمثابة واحدة من أكثر الاختبارات صرامة لنظريات الجاذبية على نطاق كوني، حيث ألقت الضوء على كيفية تجمع المجرات والمادة عبر الزمن، مما يساهم في فهم أعمق لنمو الكون وتطوره.

بالإضافة إلى ذلك، أكدت الدراسة توافق توزيع المجرات مع النموذج القياسي للجاذبية والتنبؤات التي تقدمها النظرية النسبية العامة. وشمل التحليل بيانات متعددة تتطلب جهوداً دقيقة من الباحثين، حيث أُجري تحليل تفصيلي للأجرام السماوية باستخدام أحدث التقنيات لتقليل احتمالات الأخطاء. يُمثل هذا الإنجاز العلمي خطوة حاسمة نحو تفسير الظواهر الكونية مثل الطاقة المظلمة وتوزيع المادة في الكون، مع استمرار العلماء في تحليل بيانات DESI لاستكشاف مزيد من الأسرار الكونية.

4. **ريمي لام:** الباحث الذي يستخدم تقنيات الذكاء الاصطناعي لتحسين توقعات الطقس.
 5. **لي تشونلاي:** عالم جيولوجيا يقود الدراسات المتعلقة بعينات الصخور المأخوذة من القمر.
 6. **آنا أبالكينا:** المحققة الروسية المتخصصة في كشف الاحتيال في المجلات العلمية.
 7. **إيكلهارد بيك:** الفيزيائي الذي طور ساعات نووية تقدم دقة غير مسبوقة.
 8. **ويندي فريدمان:** عالمة الفلك التي قدمت مساهمات كبيرة في فهم توسع الكون.
 9. **هوجي شيو:** الباحث الصيني الذي اعتمد مقارنة ثورية لعلاج الأمراض المناعية.
 10. **كايتلين خارس:** الناشطة التي قادت حملة لدعم رواتب طلاب الدراسات العليا في كندا.
- تهدف القائمة إلى إبراز تأثير هذه الشخصيات في العلوم والسياسات البيئية والصحية والاجتماعية، مما يساهم في توجيه دفة الابتكار والتقدم العلمي.





المصدر

مقابلة مع الأستاذ هربرت دراينر مدير البحوث في معهد بيتي للفيزياء النظرية في جامعة بون، ومؤسس مشروع "عروض الفيزياء" لتبسيط العلوم

"عروض الفيزياء" لتبسيط العلوم الذي حاز جائزة
"التوعية بفيزياء الطاقات العالية HEP Outreach
Prize" من الجمعية الأوروبية للفيزياء عام 2009.
أجرى اللقاء يوم 11 ديسمبر-كانون الأول 2024
كلُّ من نضال شمعون وريم بزي من فريق التحرير.
يمكن مشاهدة المقابلة كاملةً على [الرابط](#)

من الأبواب الثابتة في مجلّة مسارات إجراء
مقابلة مع إحدى الشخصيات العلميّة المميّزة في
العالم العربي أو في العالم. يُشرّفنا في العدد
الرابع من مجلّتنا أن نستضيف الأستاذ هربرت دراينر
Herbert DREINER مدير البحوث في معهد بيتي
للفيزياء النظرية في جامعة بون، ومؤسس مشروع

الجسيمات النظرية تحت إشراف ديمتري نانوبولس، أستاذ الفيزياء في جامعة تكساس A&M حاليًا، وهو من أصل يوناني وعضو في الأكاديمية اليونانية للعلوم. عملت خلال الدكتوراة في مجال نظرية الأوتار وبناء نماذج مُستفدّة منها، وبالتالي كنتُ أعمل على جوانب صوريّة بحثية في الفيزياء النظرية، ولكن أثناء الدراسة ذهبت مرتين في الصيف إلى مذب السيرن، وهنا تمكّنتُ من العمل مع جون إليس على مسائل وثيقة الصلة بالتجارب في السيرن وكذلك في مسرّع ديزي DESY في هامبورج-ألمانيا، حيث حصلتُ بعدها على أول عملٍ كباحثٍ لمرحلة ما بعد الدكتوراة. بعد ذلك بعامٍ واحدٍ واجهتُ مشاكل مع التجنيد في ألمانيا، حيث كنتُ معارضةً ضميريًا، وكان عليّ أن أقوم بخدماتٍ اجتماعيّة بدلاً من التجنيد، فذهبتُ حينها إلى أكسفورد، حيث قضيت ثلاث سنوات أكاديميّة ممتعة للغاية. خلال هذه الفترة في ديزي وفي أكسفورد، تحوّلتُ حقًا في أبحاثي من المسائل الصوريّة إلى مسائل أكثر ظواهريّة ومرتبطة ارتباطًا وثيقًا بالتجربة. بعد السنوات الثلاث في أكسفورد، أمضيتُ عامين في المعهد الفيدرالي السويسري للتكنولوجيا ETH في زيوريخ، سويسرا، حيث كنتُ أذهب إلى السيرن مرة واحدة على الأقل شهريًا، وبالتالي عملت بشكل وثيق مع التجريبيين هناك. ثم حصلت على أول عملٍ دائم في مختبر رذرفورد الحكومي خارج أكسفورد، حيث عملتُ لخمس سنوات، قبل أن أعود لبون حيث أعمل منذ 24 عامًا.

ريم: حسناً، دكتور دراينر، هل يمكنك الاستطراد فتشرح لنا مجالَ بحثك في فيزياء الطاقات العالية؟ هل يتعلق الأمر بفيزياء الجسيمات أم بعلم الكون، أم بعلم الكونيات الجسيمية عندما يلتقي الكبير

نضال: يسعدنا ويشرفنا أن نرحب بكم -الأستاذ الدكتور هربرت دراينر- في هذه المقابلة الخاصة لنقوم بتسليط الضوء على مساهماتك البارزة في مجال الفيزياء، وخاصة في البحث عن الفيزياء خارج النموذج القياسي في المُصادِمات. كما نود منك أن تشاركنا رؤيتك حول جهود تبسيط وتحبيب العلوم التي قمت بها في جامعة بون، من خلال مشروع "عروض الفيزياء" الذي حاز على جائزة "التوعية بفيزياء الطاقات العالية HEP Outreach" من الجمعية الأوروبية للفيزياء في عام 2009.

اسمحوا لي أن أغتنم هذه اللحظات لتقديم مجلتنا: إنها تضم مقالاتٍ مكتوبةً بالعربية تشرح بعبارات بسيطة الأبحاث المتقدمة في الفيزياء. أنا نضال شمعون ومعني ريم برّي من فريق تحرير المجلة. هربرت: شكرًا لك. إنه لمن دواعي سروري التحدث معك.

نضال: هل يمكنك أن تعطينا لمحةً موجزة عن رحلتك الشخصية في الفيزياء النظرية؟ أين أكملت دراستك الجامعية؟ وما هو مجال اهتمامك؟

هربرت: حسناً، وُلدت في الولايات المتحدة، وعندما كنت في العاشرة من عمري، انتقلنا إلى ألمانيا، وذهبتُ إلى المدرسة الثانوية في آخن، في غرب ألمانيا على الحدود مع بلجيكا وهولندا. وبعد أن أكملت دراستي الثانوية، ذهبت إلى جامعة بون حيث حصلت على درجة البكالوريوس. تمتاز جامعة بون بسمعة جيّدة في إكساب طُلّاب العلوم بمهارات رياضيّة قويّة، وكان ذلك مفيدًا لي. وبعد ثلاث سنوات في بون، ذهبت إلى جامعة ويسكونسن في الولايات المتّحدة، حيث قمتُ بتحضير الدكتوراة: سنتان محاضرات ودروس وثلاث سنوات في البحث العلمي في مجال فيزياء



مرصد نترينو مكعب الثلج في القطب الجنوبي. [وكيبيديا](#)

قرص المجزّات وهالاتها extragalactic، كما تمّ رصد نترينوات تاو بشكل مباشر. علاوةً على ذلك، لدينا تجربة الطور FASER في السيرن، والتي رصدت لأول مرّة نترينوات أنتجت مباشرة في المصادم الهادروني الكبير LHC، أي نترينوات مصنوعة من قبل الإنسان. تُعدّ الأعلى طاقةً ممّا استطعنا رصده على الإطلاق. وبالتالي، يمكننا أن نتعامل هنا مع جوانب الطاقة العالية في فيزياء النترينو. هذه هي الأشياء التي أهتم بها بشكل مباشر.



تجربة FASER: ForwArd Search ExpeRiment في الـ LHC للبحث عن جسيمات خفيفة وضعيفة التأثير، مثل النترينوات. [CERN](#)

ريم: دكتور دراينر، طوال مسيرتك المهنية المرموقة في التدريس والبحث، هل سنحت لك الفرصة لتدريس

بالصغير؟

هزيرت: أعمل بشكل أساسي في ظواهر فيزياء الجسيمات، وهذا مجالٌ وثيق الصلة بالعمل الذي يتم في المصادم الهادروني الكبير LHC في السيرن. أعمل كذلك -وإن بنسبةٍ أقلّ تقارب الربع- في فيزياء الجسيمات الفلكية، حيث أتطرق لمسائل الأكسيونات axions ومسائل الهيغزينو Higgsino أو النيوترالينو neutralino كجسيماتٍ للمادة المظلمة وأشياءٍ من هذا القبيل، ولكن هذه مسائل تنشأ مباشرة من أسئلة فيزياء الجسيمات.

نضال: حسناً إذن، هيربي، ما الذي تعتبره أكثر التطورات الواعدة في الفيزياء على وجه الخصوص؟ اليوم، تمّ تكريم اكتشافات التعلم الآلي من خلال جائزتي نوبل في الفيزياء والكيمياء هذا العام، وقد أدى هذا إلى تشكيك بعض الطلاب في جدوى العمل في العلوم الأساسية، بسبب رؤية الذكاء الاصطناعي يحلّ مسائل الفيزياء. هل لديك أيّ أفكار في هذا الصدد؟

هزيرت: ليس تمامًا. أنا لا أعمل بنفسني في مجال التعلم الآلي، ولكن فُهمي لسبب الحصول على جائزة نوبل في الفيزياء هذا العام ينصّ على أن حائزها استخدموا نظريات في الفيزياء، حيث ساعد الفُهم الإحصائي للفيزياء النظرية في تطوير نماذج ذكاءٍ اصطناعي ذات علاقة، لذا، بمعنى ما، كان الأمر وثيق الصلة بالعمل في الفيزياء. وبالتالي، أجد شخصيًا أن الاستمرار في العمل على الـ LHC واعدٌ للغاية، ولا يزال واعدًا، كما أن هناك تجارب فيزيائية لا تتضمّن مُسرّعات تُعد بدورها بالكثير. على سبيل المثال، تجربة مكعب الثلج في القطب الجنوبي، حيث جرى لأول مرّة رصد نترينوات صادرة من خارج

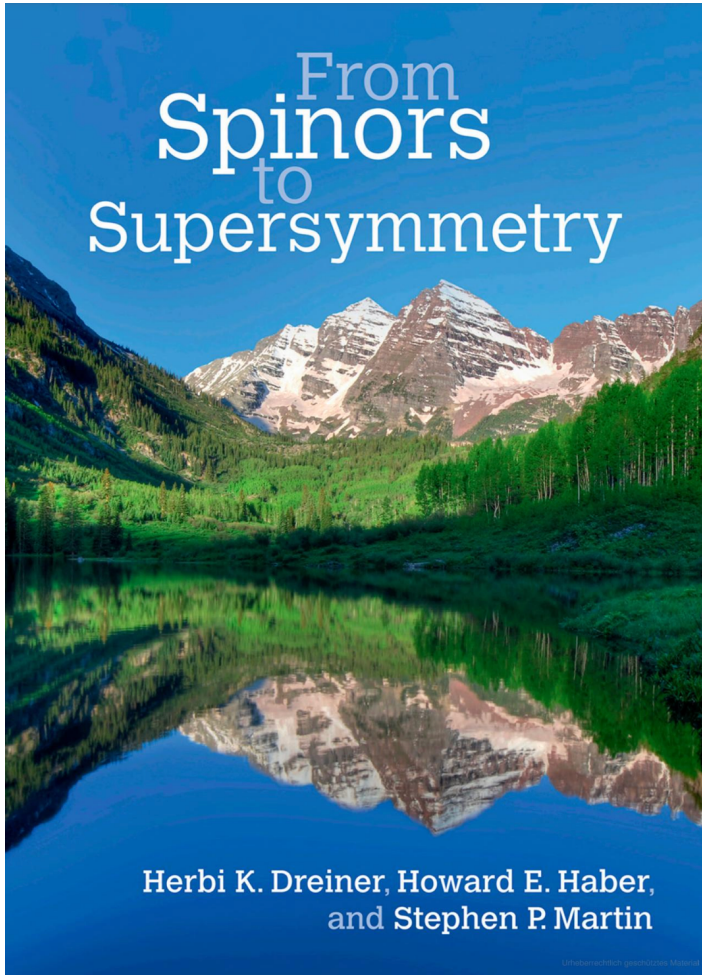
تقلّ مستوى عن قربانها البريطانيّة، فلماذا إذن لا تحظى الجامعات الألمانية بشهرة كبيرة في العالم العربي مقارنة بالجامعات في الولايات المتحدة والمملكة المتحدة؟

هربرت: هذا سؤال جيد جدًّا، ونحن نكافح من أجل تحسين هذه الصورة. لا يقتصر الأمر على العالم العربي فقط، بل الظاهرة موجودة في كلّ مكان في العالم. لسبب ما، تهيمن المملكة المتحدة والولايات المتحدة، وأعتقد أيضًا أن منظومة التصنيف الأكاديمي متحيّزة لصالح هذين البلدين. أول شيء يمكنني قوله هو أن الجامعات الألمانية مجانية، فنحن لا نتقاضى أيّ رسوم دراسية، ولكن إذا كنت ترغب في الالتحاق ببرنامج البكالوريوس في ألمانيا، عليك تحقيق شرط اللغة الألمانية. لدينا الآن طلاب يأتون من الصين -مثلًا- فيقضون عامًا واحدًا في ألمانيا لتعلم اللغة الألمانية، ثم يلتحقون بالجامعة، ولا يدفعون أي رسوم دراسية، وهذا أرخص من أربع سنوات في أمريكا، لأن هذا يعني سنة واحدة لتعلم اللغة وثلاث سنوات في الدراسة الجامعية الأولى. أمّا فيما يتعلق بجودة البحث العلمي، فلدينا بانتظام الآن حائزون على جائزة نوبل في الفيزياء من ألمانيا. لدينا الآن تمويل كبير للبحوث في ألمانيا أفضل بكثير ممّا هو عليه في الولايات المتحدة. أمّا عن كيفية جعل جامعاتنا أكثر جاذبية: في الهند -على سبيل المثال- بدأ الأمر بطريقة ما، ثم بمجرد وصول الناس هنا، فإنهم يُخبرون طلابهم، والجامعة التي أتوا منها. كما نكتسب نحن الخبرة مع مرور الزمن، فمن الصعب علينا الحكم على جودة الجامعة التي لا نعرفها. لذلك، عادة ما نأخذ شخصًا ما ونجربه، فإذا كان جيدًا، أخذنا مزيدًا من الطلاب من جامعته،

بعض الطلاب العرب؟ وفي رأيك، ما هي الصعوبات الأكبر التي تواجه الشباب العربي الراغبين في التخصص في الفيزياء النظرية؟ أهى الافتقار إلى الاهتمام أو التمويل في العلوم الأساسية باعتبارها مجالات "مُترَفّة"، بعيدة عن تطلّعات المنطقة أو -عمومًا- احتياجات البلدان النامية؟ أم إنها رغبة العديد من الطلاب في الهجرة والدراسة في الخارج، ما يؤدي إلى وجود عدد قليل من المدارس العربية القوية ذات التقاليد الراسخة في العلوم؟

هربرت: هذا أكثر ممّا أستطيع إجابته، إذ يبدو سؤالك يتضمّن خمسة أسئلة ممّا! لدينا طيف واسع من الطلاب في الجامعة، ويُعطى برنامج البكالوريوس باللغة الألمانية، بينما الماجستير والدكتوراه باللغة الإنجليزية، ونحن نجتذب عددًا كبيرًا من الطلاب من الخارج، بما فيهم الطلاب العرب، وكذلك الطلاب من إيران ومن شمال أفريقيا، ولكن في الوقت الحالي -لسبب ما- المجموعة الأكبر من الطلاب الأجانب تأتي من الهند، سواء أكانوا هندوسًا أم مسلمين. بالنسبة للطلاب العرب، لا أعرف، ولكن انطباعي هو أن خطوتهم الأولى -وربما يمكن لنضال أن يقول شيئًا هنا- عادة ما تكون عبر المركز الدولي للفيزياء النظرية في تريستا.

نضال: نعم. يُعدّ مركز تريستا مكانًا جذابًا للغاية يمكن للطلاب العرب التقدم إليه والحصول على فرصة لدراسة الفيزياء النظرية هناك. ولكن ربّما نسأل هنا كيف يمكننا الترويج بشكل أكبر للجامعات الألمانية في العالم العربي؟ يبحث العديد من الطلاب العرب عن الجامعات في المملكة المتحدة أو الولايات المتحدة، بينما أستطيع -اعتمادًا على تجربتي الشخصية- القول بأن الجامعات في ألمانيا لا



يُعدّ كتاب "من السبينورات إلى التناظر الفائق"، الذي شارك في تأليفه الدكتور دراينر، مرجعاً مهماً في برامج الدكتوراة. [Google](https://www.google.com)

تكون هذه التجارب أحياناً معقدة للغاية، وتستغرق وقتاً للتحضير، وهكذا ابتدأنا. كنت أدرس مقرّر الميكانيكا الكلاسيكية للسنة الثانية، وقبل عطلة عيد الميلاد قدمت المشروع للطلاب، وطلبت منهم التفكير فيه. وبعد عطلة عيد الميلاد، سجل نحو 25 طالباً، وكان ذلك في يناير-كانون الثاني 2002، ثم في نوفمبر-تشرين الثاني 2002 قدمنا العرض الأول لمدة ساعتين. لدينا قاعة محاضرات فيزياء كبيرة تتسع لـ 550 شخصاً، بينما حضر العرض الأول 700 شخص! كان الأمر لا يصدق.

وبعد ذلك، قمنا بشكل أساسي، مع كل مجموعة جديدة من الطلاب، بتطوير عرض جديد. وبالتالي -بمعنى ما- فإن أول مجموعة مستهدفة بالنسبة

وهكذا. لذا، أعتقد أنه يتعين علينا أن نبدأ بطريقة ما. حسناً، لقد استقبلنا كذلك وبانتظام عدداً لا بأس به من الطلاب من إيران.

نضال: حسناً، دعني أغير سياق الأسئلة الآن. نحن في الجمعية العربية للفيزياء نُقيم برنامجاً للتدريس والأنشطة التوعوية، وننظم -مثلاً- بعض المدارس الشتوية والصيفية، بالإضافة إلى عقد ندوات أسبوعية للمتخصصين وغير المتخصصين ومحاضرات عامة. لذا، هل يمكنك الآن أن تخبر القراء العرب عن مشروعك "عروض الفيزياء PhysicsShow"، فتوضح كيف بدأ وإلى أين وصل وما هي أهدافه؟ هل يمكننا أن نأمل يوماً ما أن نراه يُعقد في مدينة عربية ما؟ أو على الأقل إمكانية مشاهدته عبر الإنترنت؟

هربرت: يمكنك بالتأكيد مشاهدته عبر الإنترنت، ولدينا قناة خاصة على اليوتيوب ([Physikshow Uni](https://www.youtube.com/PhysikshowUni))

([Bonn](https://www.bonn.de)). عندما كنت طالباً في ويسكونسن، كان هناك أستاذ، يقدّم عروضاً للفيزياء، فكان يعرض التجارب ويشرحها. كان الأمر مسلياً بعض الشيء وممتعاً، لكنه كان بمفرده على المسرح، يساعده -ربّما- اثنان أو ثلاثة طلاب في إجراء التجارب. بعد مرور عامٍ على عملي كأستاذ هنا في بون، حيث -مقارنته مثلاً مع بريطانيا- لدينا مجموعة كبيرة جداً من التجارب التوضيحية أثناء تعليم الفيزياء يتولّاها شخص محترف يعمل بدوام كامل ليقدّمها، ويُحسّن منها، وينشئ تجارب جديدة، اتصلت به وسألته فيما إذا كان سيكون مهتماً بعمل "عرض للفيزياء" مشترك؟ ولكن كانت فكرتي تنصّ على إشراك الطلاب، طلاب الجامعة، بشكل كبير، حتى يتمكنوا هم من تطوير العرض وأدائه، بينما نقوم نحن الاثنان فقط بالإشراف، فأتولّى أنا الإدارة ويساعد هو في الجوانب الفنية.



فريق "عروض بون للفيزياء" في أكسفورد. [arxiv](https://arxiv.org)

لي هي طلاب الفيزياء في الجامعة، ويمنحهم العرض فرصة لاستخدام معارفهم، وللتحدث إلى الجمهور، لكن الطلاب هم من يقدّم ويطور العروض، فيتعين عليهم التفكير في كيفية شرح تجربة للجمهور العام، وهكذا نقوم كلّ عام بتدريب 20 طالبًا جديدًا في الفيزياء على التحدث إلى الجمهور بعبارات عاقّة. بالطبع،

العروض نفسها موجهة إلى عامة الناس، وعادة ما نقول للأطفال الذين تبلغ أعمارهم 10 سنوات أو أكثر.

بعد ذلك، بمجرد أن بدأنا في جعل الطلاب يقومون بالتجارب، أصبحت لدينا مجموعة يمكننا معها القيام بمشاريع أكثر تقدّمًا. لذا، في عام 2013، طوّرنّا عرضًا عن فيزياء الجسيمات التي تُعدّ موضوعًا متقدّمًا في الفيزياء، ويمكنني أن أرسل لك النص الموافق (رقم الأرشيف 1607.07478). تتعامل العروض العادية في الفيزياء بشكل أساسي مع الفيزياء الكلاسيكية، أي الميكانيك، الكهرمغناطيسيّة، والصوتيات وما إلى ذلك. أمّا في عروض فيزياء الجسيمات، فتعيّن علينا بالطبع العمل جزئيًا مع الأمثلة التشابهيّة خلال عرض لمدة ساعتين.

أوه، هناك شيء مهم في عروضنا وهو أنها دائمًا تُقدّم على شكل مسرحية. لذا، نحن لا نعرض التجارب فحسب، بل لدينا قصة، والتجارب تغدو جزءًا من القصة، ما يساعد على جذب انتباه الجمهور، بالإضافة إلى استمتاع الطلاب بتأليف مسرحية، وإظهار جانبهم الفني. على أيّ حال، مع عرض فيزياء الجسيمات، سافرنا إلى جميع أنحاء أوروبا، فذهبنا

أولاً إلى إنجلترا، ثم كنا في إيطاليا والدنمرك، وذهبنا مرّتين إلى إسبانيا ومرّة إلى البرتغال وذهبنا إلى أمستردام أيضًا. ثمّ أتت جائحة كوفيد، ولم نسافر لفترة ولكننا بدأنا هذا العام في السفر مرة أخرى، فذهبنا إلى ليوبليانا في سلوفينيا وإلى ترييستا في إيطاليا. وأخطط الآن لرحلة العام المقبل إلى وارسو وكراكوف في بولندا.

نضال: نأمل أن تتمكن يومًا ما من القدوم إلى العالم العربي.

هربرت: الأمر معقد للغاية، إذ لدينا الكثير من المعدات. لذا -على سبيل المثال- عندما أردنا بعد خروج بريطانيا من الاتحاد الأوروبي الذهاب مرة أخرى إلى إنجلترا، وجدنا الأمر صعبًا جدًّا بسبب متطلبات مراقبة الحدود، فمع كل معدّاتنا كيف يمكننا الوصول إلى سوريا مثلًا؟ يمكننا قيادة السيّارة إلى تركيا ..

ريم: نأمل أن تقدّموا العرض مرّة في مصر.

هربرت: آه، نعم، أعتقد أنه يمكننا ركوب السفينة مع المعدّات بطريقة ما. على أي حال، لم أفكر في ذلك أبدًا، فأبعد ما وصلنا إليه كان في البرتغال، حيث احتاجت رحلة الشاحنة الكبيرة المليئة بالمعدّات مدة

ما- أن نُخفّض الحاجز، لأننا نريد أن نُظهِر أن الفيزياء ممتعة، وأنها مثيرة للاهتمام. لا نتوقع من الجميع أن يخرجوا ويفهموا كل ما نتحدث عنه من الأمور، ولكن ربما يكون لديهم على الأقل اهتمام كافٍ للنظر فيها مرة أخرى.

نضال: كيف تختار طلاب عروض الفيزياء؟ هل تقتصر على طلاب دراسات عليا، أم يمكن لطلاب المرحلة الأولى الانضمام كذلك؟ وماذا عن حاجز اللغة عندما تذهب إلى دول أجنبية؟ أيتّم هنا تقديم الشروحات باللغة الإنجليزية أم باللغات المحلية، في حال كان لديك طلاب يتحدثون تلك اللغة كلغة أم؟

هربرت: نختر الطلاب في البداية كما يلي. نقوم الآن بعرضٍ جديد كل عامين، وهكذا نريد الآن تقديم عرضٍ في نهاية السنة الأولى من الدراسة الجامعية في سبتمبر-أيلول القادم، وبالتالي نسأل في نهاية الفصل الأوّل من هو المهتمّ؟ وأي شخص مهتم يمكنه الانضمام. أمّا بالنسبة للموضوعات المتقدمة، فإن الأمر يكون أكثر انتقائية. عادةً، الأشخاص الذين يستمتعون حقًا بأداء العروض ويرغبون في الاستمرار هم الأفضل فيها، لذا، يستمرّ حوالي النصف في الموضوعات الأكثر تقدّمًا، مثل السفر وما إلى ذلك. أمّا بالنسبة للغة، على سبيل المثال -كما تعلم- ذهبنا إلى هولندا، حيث يتحدّث الجميع الإنجليزية بشكل جيد للغاية؛ ثم ذهبنا إلى البرتغال، وهنا أيضًا يتحدّث الناس الإنجليزية بشكل ممتاز بسبب علاقات البرتغال القويّة تاريخيًا مع إنجلترا، حتى إن الأفلام في التلفزيون لا تجري دبلجتها، حالها في ذلك كالحال في هولندا وإسكندنافيا، والأمير نفسه عندما ذهبنا إلى الدنمارك، حيث قدّمنا عروضنا بالإنجليزية دون أيّ مشكلة. ثم ذهبنا إلى إسبانيا،

يومين ونصف، بينما سافر الطلاب بالطائرة. يمكنني أن أرسلَ لكما رابطًا لعرض فيزياء الجسيمات يتضمّن وصفَ جميع التجارب بالصور، والحوار المسرحيّ كذلك **ريم:** حسناً، دعني أستطرد في هذه النقطة. ما هي المفاهيم التي تفترض أنها ضرورية لفهم التجارب التي تعرضها للجمهور العام الذي يحضر العرض؟ إن الطلاب الذين التحقوا للتو بالمدارس الثانوية بالكاد يعرفون عن قانون نيوتن في الحركة أو عن البنية الذرية، إذن كيف يمكنك شرح بعض المفاهيم العميقة مثل الكواركات أو الجاذبية لهذا الجمهور في شكل غير تقليدي، بعيدًا عن المحاضرات أو العروض التوضيحية؟

هربرت: نعم، هذا سؤال جيد. سنقوم في الأسبوع المقبل بتقديم عرض عيد الميلاد، وهو مُوجّه للأطفال الذين تبلغ أعمارهم 10 سنوات أو أكثر؛ عادةً لا يكون الطلاب في ألمانيا في سنّ العاشرة قد درسوا الفيزياء بعد، لذلك نستخدم فقط الفيزياء العامة الكلاسيكيّة والمباشرة. مع عرض فيزياء الجسيمات، ذكرنا صراحةً أن العرض لحضور يتجاوز 15 عامًا، وفي تلك المرحلة، يكون الناس قد درسوا المزيد من الفيزياء، حيث نفترض -بمعنى ما- أنهم يعرفون بالفعل أن الذرات موجودة، فيمكننا التحدّث عن البروتون والإلكترون والنيوترون وتقديم هذه المفاهيم بإيجاز شديد. يمكنكِ قراءة العرض والحصول على شعور بمستواه العلمي. علاوةً على ذلك، هناك أيضًا قدرٌ كافٍ من الترفيه بحيث لا يشعر الناس دائمًا أنهم مضطرون لفهم كلّ ما يمكنهم رؤيته، كأن يقولوا: "أوه، أجد هذا مثيرًا للاهتمام: دعني أُلقي نظرة عليه مرة أخرى". لذا، من الصعب جدًّا الوصول إلى المستوى الصحيح، وجزء من وظيفتنا هو -نوعًا

ساعة تقريبًا، ثم في مرحلة ما تحولوا إلى اللغة الصينية، حيث انضم إليهم أيضًا أستاذ صيني للتأكد من صحة التفسيرات الفيزيائية بالصينية، لأنني لم أستطع الحكم هنا من حيث أن لغتي الصينية صفر -مثل لغتي العربية التي لا أعرف إلا عبارة "السلام عليكم" منها- وقد نجح الأمر في الواقع بشكل جيد للغاية في بكين، واتفقنا على العودة، وكنا سنعود فعلًا إذ حجزنا التذاكر لعام 2020 ولكن جاءت الجائحة. قد نعود للصين العام المقبل، بالأحرى سنعود عام 2026. حسنًا، بالنسبة للعالم العربي فإن السؤال يتبادر لذهني هو ما مدى جودة التجهيزات في جامعاتكم، هل لديكم تجارب توضيحية أم لا؟ ما مدى جودة معدّاتكم؟

نضال: هذا يعتمد على الجامعة، فهنا في دمشق -كما تعلم- أنت تعرف الوضع. لكنني كنت أفكر، أنا والدكتور شعبان خليل رئيس مركز الفيزياء الأساسية في مدينة زويل في القاهرة، فيما إذا استطعتم مستقبلًا القيام بتقديم "عروض الفيزياء" في ذاك المركز، إذ نعتقد أنه يمكن القيام بذلك، ولكن بالتأكيد ستكون هناك مشكلة السفر واللغة، حيث يمكن اعتماد ما فعلتموه في الصين -فيما يخص اللغة- بسهولة في العالم العربي. لذا، سيتعين علينا إيجاد طريقة للحصول على التمويل، ومن ثم العثور على التوقيت الصحيح.

هربرت: نعم، ربما يتعين علي السفر إلى هناك مرة واحدة لإلقاء نظرة على ما لديهم، ثم يغدو من السهل مناقشة الأمور، والتفكير في العودة -ربما- مع فني واحد من بون. هل هناك سفن مباشرة من اليونان إلى مصر؟

نضال: ريم، هل يمكنك إخبارنا؟ عادةً ما توجد رحلات

وهنا كانت المشكلة، وبالمناسبة ظهرت القضية للتوّ اليوم حيث كنت أتحدث مع أشخاص في بولندا، وأثيرت القضية نفسها، وحتى الآن لا أعرف مدى جودة اللغة الإنجليزية في بولندا، ولكن في مدريد كان الأمر جليًا في أن الحضور لن يفهم الإنجليزية. ما فعلناه هنا هو أننا وضعنا جهازًا عرض خلف المسرح، على أحدهما عرضنا التجربة أو أي شيء آخر، وعلى الجهاز الآخر كان لدينا شرح موجز للتجربة باللغة الإسبانية. إذن، على الأقل، تم شرح المفاهيم الفيزيائية الأساسية باللغة المحلية. كان لدينا في المجموعة من لغته الأم هي الإسبانية، لذا كان قادرًا على كتابة النص الإسباني. كتبت اليوم إلى مستضيفينا في بولندا وقلت إنه ليس لدينا أي شخص هنا يتحدث لغتكم، لذا سيكون من المفيد أن تقدّموا النص باللغة الإنجليزية. حسنًا، في الواقع، مع Google Translate، ربما يكون الأمر سهلًا، واللغة لن تشكّل مشكلة.

نضال: سمعنا أنك ذهبت إلى الصين.

هربرت: نعم، بالضبط. لقد ذهبنا إلى الصين، لكننا لم نجلب معنا أيّ تجارب، لأن إحضارها كان معقدًا للغاية. ذهبنا لمدة أسبوعين، ثم درّبنا مجموعة من طلاب الجامعة الصينيين باستخدام معدّات محلية لتقديم عرض باللغة الصينية لطلاب المدارس الثانوية الصينية، وكانت لغتهم الإنجليزية جيّدة جدًّا عندما تحدّثنا معهم إذ كانوا طلاب دراسات عليا في الفيزياء في بكين. هناك بعض الأشياء الأساسية التي يجب أن تتعلّمها عند تقديم تجربة على خشبة المسرح حتى يتمكن الجمهور من متابعتك، لذلك علمناهم هذه الأشياء الأساسية باللغة الإنجليزية، ثم طوروا هم قصة صغيرة، واستغرق عرضهم مدة



ما هي المادّة ؟ عرض فيزياء الجسيمات. [arxiv](https://arxiv.org/)

بحريّة من الإسكندرية إلى لبنان، أو إلى قبرص، وأعتقد أنه من الممكن أيضًا الذهاب إلى اليونان، أو إلى تركيا. نعم، سيكون ذلك مثيّرًا للاهتمام إذا أحضرت كل المعدّات.

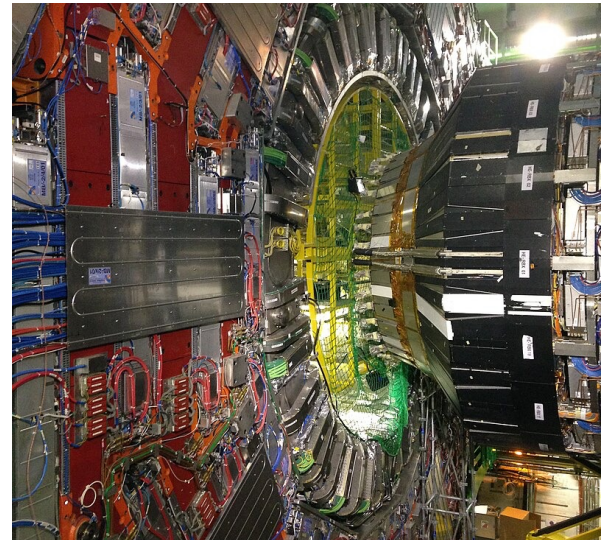
هربرت: نعم. لذا علينا حينها تأمين نقل شاحنة واحدة فقط **ريم:** حسناً. دكتور دراينر، هل تعتقد أن القيام بمثل هذه الأنشطة الممتعة بانتظام في المتاحف والمراكز الثقافية في

كلّف المصادم الهادروني الكبير مبالغ ماليّة هائلة، والجيل القادم من المصادمات يحتاج بالتأكيد إلى تعاون أو تمويل دولي. هل يمكن للدول العربية الغنية المساعدة في هذا الصدد؟

هربرت: بالتأكيد، أعني أن مخبر السيرن يرحب بالتأكيد -بقدر ما أستطيع قوله- بانضمام مجموعة واسعة من البلدان لتجاربه، وربما تكون هذه هي الطريقة الأرخص. ولكن ما هو المستقبل بالضبط؟ بالنسبة لي سأقاعد بعد خمس سنوات، وفي السنوات الخمس التالية، سيبقى المصادم الهادروني الكبير يعمل، وآمل أن يكون لدينا مشروع متابعة له، حيث تجري مناقشة ذلك على نطاق واسع الآن في أوروبا، وهناك خيارات متنوّعة. لا يمكن أن ينجح هذا الأمر -كما تقولين- إلا في إطار تعاون دولي. تساهم ألمانيا بأكبر جزء من الأموال في السيرن، ولكن -كما تعلمين- هناك العديد من البلدان الأوروبية يساهم في التمويل، ولقد تمّ مؤخراً جلب دول لم تكن تاريخياً جزءاً من السيرن، على سبيل المثال، سلوفينيا

العالم العربي يمكن أن يساعد في جعل الأطفال مهتمين بالعلوم، وبشكل عام في رفع الوعي العام بأهمية العلوم الأساسية في العالم العربي؟

هربرت: نعم، بالتأكيد، إذ يمكنك اعتماد أيّ طريقة تتفاعل من خلالها مع أشياء مثيرة للاهتمام. لذا، إذا كان لديك متحف جيد، أو إذا كان لديك شيء جيّد تعرفه -حتى لو كان مجرد محادثات جيدة- أو إذا كان لديك أشخاص يمكنهم إلقاء محادثات ممتعة وملهمة، فلا تتردّد في انتهاز هذه الفرصة. يعتمد عرضنا على حقيقة أنه من الممتع رؤية الشيء الحقيقي يحدث على خشبة المسرح مباشرة. لذا، يمكنك أن تستفيد من تجربة مفاجئة -ولدينا العديد من التجارب المدهشة- عندما نقوم بشرحها بعد ذلك، لأنه بمجرد أن تتفاجأ يفتح ذهنك وتكون على استعداد لقبول حقيقة جديدة، فتكون مهتمًا بالتفسير. أعتقد أن هذا الأمر صالح في أي مكان **ريم:** حسناً، سأتابع بسؤالتي التالي حيث أعود إلى العلم. أين ترى وجهة فيزياء الجسيمات اليوم؟ لقد



المصادم الهادروني الكبير في السيرن (يسار) وكرايف السي إم إس CMS فيه (يمين). [CERN](https://www.cern.ch) ووكبيديا

وكان يعتقد أنه ذاهب إلى آسيا، ولكنه في الواقع لقي شيئاً آخر للأسف، ولولا ذلك لكان قد مات. لذا، عندما تستكشف عليك أن تبحث في مناطق غير معروفة، ولا تعرف ما الذي قد يوجد هناك. إذن، يتعيّن علينا كبشر أن نقرر ما إذا كنا نريد الاستثمار في الاستكشاف ضمن هذه الجملة عالية الطاقة من الجسيمات من أجل فهم المفاهيم الأساسية في الطبيعة. ولكن علينا أن نحقق التوازن، فهل الأمر يستحق العناء؟ لأنه مكلف للغاية من الناحية المالية، ولا يمكننا القيام بذلك إلا إذا فعلناه سوياً. ليس لدي تفضيل فوري لوجهة فيزياء الجسيمات، أو أين أعتقد أن الفيزياء الجديدة التالية سوف تتجلى، بل أعتقد أنه يتعين علينا استكشاف أكبر عدد ممكن من الاحتمالات.

نضال: حسناً، الآن سؤال مُوجّه إليك من بعض الزملاء والقراء، كيف ترى الفيزياء بعد 10 سنوات؟ إذن، إنه سؤال ذو صلة بما سبق: ما هو المجال الأكثر نشاطاً في مجال العلوم بعد عقدٍ من الزمان، وفقاً لك؟

هربرت: بعد 10 سنوات من الآن، سأكون متقاعدًا!

نضال: نعم، ولكنك ستظلّ تتابع أمور الفيزياء.

هربرت: نعم. أوه، إنه سؤال جيد جداً، ولكن ليس

المصادم الهادروني الكبير في السيرن (يسار) وكرايف السي إم إس CMS فيه (يمين). [CERN](https://www.cern.ch) ووكبيديا
ورومانيا، ومعظم هذه الدول التي كانت وراء الستار الحديدي -بقدر ما أعلم- انضمّ إلى السيرن من خلال بعض المشاريع. إذن، مستقبل سيرن ومستقبل فيزياء الجسيمات صعب لأنه مكلف للغاية، والتجارب صعبة للغاية ومعقدة، ولكن أتمنى أن ننفق الأموال على ذلك بدلاً من إنفاقها على القنابل والطائرات العسكرية.

نضال: نعم. هناك البلاد العربية الغنيّة، وخاصة دول الخليج، يمكنها المساعدة في هذا الصدد.

هربرت (مبتسماً): يمكنها المساعدة في جلب "عروض الفيزياء" إلى العالم العربي.

نضال: في هذا الصدد، أثبت مصادم الهدرونات الكبير ما تم التنبؤ به من وجود جسيم هيغز. ومع ذلك، لا توجد إشارات قاطعة بالنسبة للفيزياء خارج النموذج القياسي، فلا إشارات عن التناظر الفائق، ولا عن المادة المظلمة حتى الآن. هل ستكون هذه نهاية القصة، وألاً وجوداً لفيزياء خارج النموذج القياسي؟ ما هي رؤيتك هنا؟

هربرت: ليس لديّ أيّ رؤى. من المحزن أو المخبئ للآمال أنه لم يتم العثور على شيء. ولكن، لنتذكّر أنه في الماضي، بدأ كولومبوس رحلته نحو الغرب،

كيفية عمل محرك السيارة، ولكن -كما تعلم- تتغير محركات السيارات الآن، فهي تتحوّل من الديزل إلى الكهرباء، أو أي شيء آخر. حاول أن تكون بعقلية منفتحة، وحاول الحصول على تعليم واسع وشامل قدر الإمكان. في رأيي، هذا هو ما تفعله الفيزياء، فهي تمنحك مجموعة واسعة من الاحتمالات، بما في ذلك المسرح وإلقاء المحاضرات العامة، وأيضاً تطوير علاج السرطان أو التعرّف على الدماغ، فمن ذكرتهم جميعاً فيزيائيون يقومون بهذه الأعمال، ونضال يعرف صديقاً مشتركاً اسمه جيمي تاترسال، وهو أيضاً فيزيائي جسيمات، يعمل الآن باستخدام الذكاء الاصطناعي للمساعدة في جعل السيارات ذاتية القيادة، وهذا مثال آخر. ولكن بالطبع، هناك فيزياء الجسيمات في حدّ ذاتها. شخصياً، ربّما أذهب الآن إلى فيزياء الجسيمات الفلكية، إذ أعتقد أن هذا سيكون تفضيلي الشخصي، لأنني أجد المجال مثيراً، وهناك تجارب جديدة قادمة، ولكن هذا سيكون خلال السنوات الخمس المقبلة. من يدري ماذا سيكون بعد 10 سنوات؟ لذا، ليس لديّ أيّ كلمات حكيمة هنا حول المستقبل البعيد.

نضال: حسناً، انتهت الأسئلة. يجب علينا أن نشكر جزيل الشكر، هيربي، على منحنا هذه الفرصة لإجراء مقابلة معك.

هربرت: شكراً جزيلاً على الاستضافة.

ريم: حسناً، شكراً لك دكتور دراينر.

هربرت: وداعاً.



الأستاذ دراينر خلال الزوم مع نضال وريم من فريق التحرير



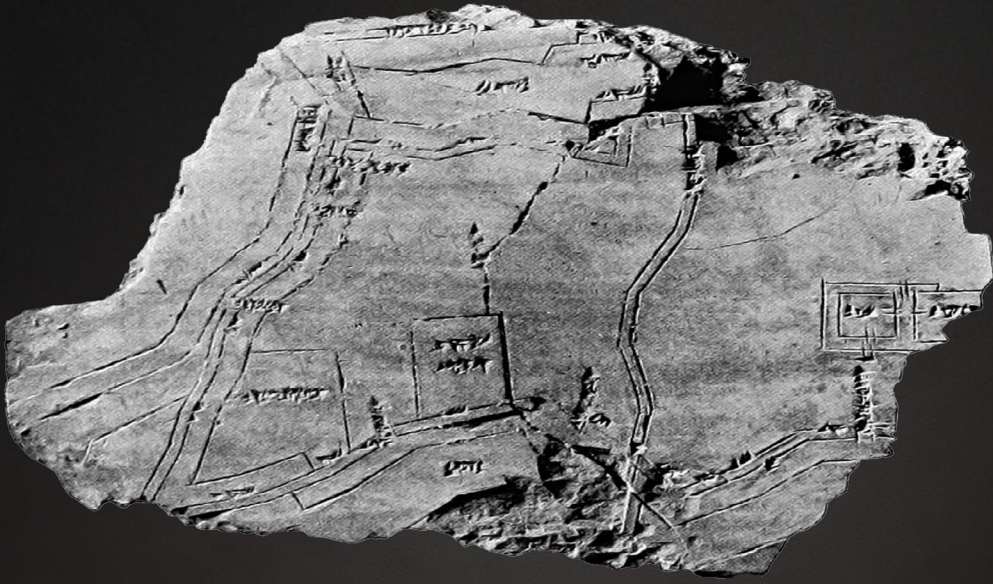
لدي إجابة جيدة جدّاً له، لذا لا أعرف. أعني، من الجيد دائماً الرهان على الدماغ، فالدماغ يصعب فهمه. أعتقد أنه -بمعنى ما- يمكن للمرء أن يسأل نفسه -إذا كان طالباً- عن المجال الذي سوف يدرسه مع إنهاء المدرسة الثانوية للتوّ؟ أجد أن دخول الفيزياء أمرٌ يستحق العناء دائماً، لأن تدريبك عندما تدرسها واسعٌ جدّاً وجوهري لدرجة أنه يمكنك القيام بالعديد من الأشياء. على سبيل المثال، حصل أفضل صديق لي من المدرسة الثانوية على درجة الدكتوراه في نظرية الأوتار، وانتهى به الأمر إلى إجراء أبحاث في الدماغ، وكما تعلمون فإن نمذجة الدماغ متعلّقة بالفيزياء. لدي صديق آخر حصل على درجة الدكتوراه في فيزياء الجسيمات، وهو يعمل الآن في التصوير الطبي باستخدام الفيزياء، متّصلاً بمشفى بصفة فيزيائي في العلاج الإشعاعي للسرطان، وأشياء معقدة أخرى. كلا هذين الصديقين بدأ تدريبه في الفيزياء، لذلك أعتقد أنه إذا تدربت ودرست الفيزياء، فهذا يفتح لك العديد من الأبواب، لكن ما هي تلك الأبواب بعد 10 سنوات، لا أعرف.

ريم: حسناً. أخيراً، ما هي نصيحتك للعلماء والإداريين المستقبليين الذين يتطلعون إلى السير على خطاك، وخاصة أولئك من العالم العربي؟

هربرت: أول شيء أوّد النصّح به: كن منفتحاً. على سبيل المثال، قمت بالكثير من العمل في المسرح في نادي الدراما في المدرسة الثانوية، وفكّرت حينها بأن هذا هو نهاية الأمر. ولكن فجأة عاد هذا الشيء مع "عروض الفيزياء"، وأنا الآن مثل شخصٍ مسرحي بدوام كامل أيضاً. لذا، نصيحتي هنا هي: حاول أن تكون منفتحاً، ولا تفكّر في نفسك على أنك ثابت. يمكن أن تدرس شيئاً واحداً فقط من مثل

من علم الخرائط إلى نظام التموضع العالمي

ضو جمال
أستاذ الفيزياء النظرية في جامعة الشهيد حمه لخضر بالوادي، الجزائر



مقدمة

وتحديد المواقع على سطح الأرض (وحتى فوق سطح الأرض) تقوم على نظام التموضع العالمي، أو ما يعرف بـ Global Positioning System، أو اختصارا GPS. هذا النظام بدوره لا يمكن أن يعمل بدقة ما لم يتم الأخذ بعين الاعتبار تأثير النسبيتين العامة والخاصة على الساعات أو الميقاتيات الذرية، أو ما يعرف بظاهرة تمدد الزمن وإشكالية موافقة الساعات.

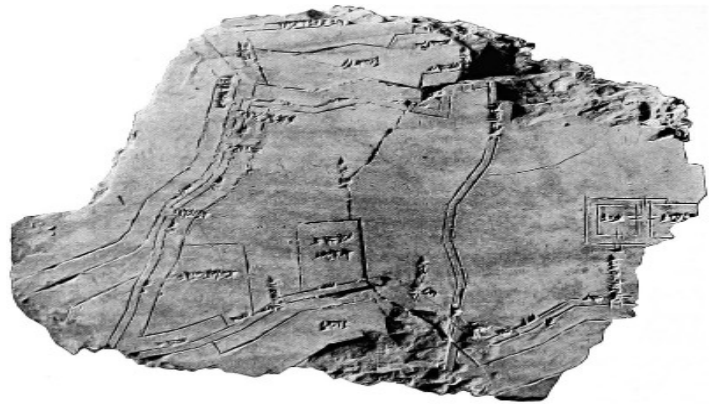
الهدف من هذا المقال هو نقل القارئ في رحلة موجزة نلقي فيها نظرة على العلاقة بين الملاحة وإشكالية رسم الخرائط ونشأة الهندسة التفاضلية الريمانية إلى النسبية العامة ثم عودة مرة أخرى إلى الملاحة من خلال نظام GPS.

إشكالية رسم الخريطة المثالية وكروية الأرض

منذ أن أدرك الإنسان كروية الأرض وحاجته لرسم خطوط الملاحة الأفضل والأقصر حتى بدأت تطفو على السطح إشكالية رسم خرائط لمواقع من اليابسة والبحر على ورقة مسطحة، أو باختصار "خريطة"، بحيث تكون هذه الخريطة الورقية تحاكي حقيقة المشهد على سطح الكرة. عندما نتحدث عن "حقيقة المشهد" فإننا نقصد أن المسافات أو المساحات أو الزوايا على الخريطة المرسومة على ورقة مسطحة أو مستوية تعكس المسافات والزوايا والمساحات الحقيقية على سطح الكرة. طبعا بعد الأخذ بعين الاعتبار الفرق في المقياس.

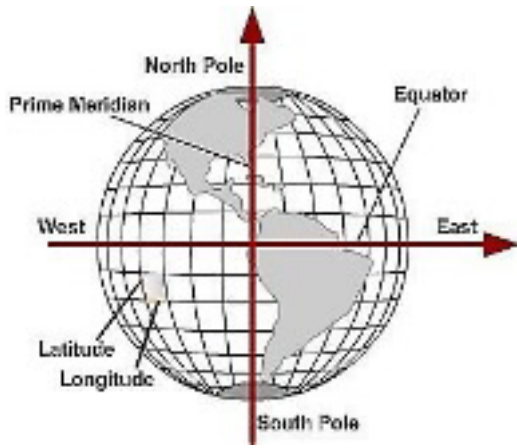
عملية إسقاط مساحات جغرافية من الكرة على ورقة مسطحة قد تبدو للوهلة الأولى مسألة بسيطة، ولكنها في الواقع مسألة هندسية غاية في العمق والتعقيد، وتاريخيا فتحت آفاقا لا حدود

اهتمام الإنسان بوضع خرائط للمواقع الأرضية يعود إلى عشرات القرون، وأقدم خريطة عُثر عليها يرجع تاريخها بحسب التقديرات إلى 25 قرنا قبل الميلاد وهي للبابليين، أنظر الصورة 1. ومع توسع الرقع الجغرافية المراد الوصول إليها برا وبحرا، إما لأسباب تجارية أو عسكرية توسعية، وتطور وسائل النقل، زادت حاجة الإنسان لتحديد المواقع وطرق الملاحة بدقة أكبر، وخاصة البحرية منها، وهو ما حول مسألة الخرائط ورسمها إلى ما يشبه العلم القائم بذاته



الشكل 1: خريطة بابلية، تعتبر أقدم خريطة عُثر عليها.

تطور علم الخرائط ومساهمات حضارات مختلفة في هذا المجال موضوع جد واسع ومتشعب، وليس هذا هدف هذا المقال، ولكن الهدف من مقالنا هذا هو إبراز العلاقة العجيبة التي ربطت تطور علم الخرائط بتطور الهندسة، وكيف أن كلاهما مدين للآخر في تطوره، بل إن المصطلحات التي تقوم عليها الهندسة التفاضلية الحديثة هي مصطلحات علم الخرائط. كما أن الإشكاليات التي واجهت البحارين وواضعي الخرائط تقود بشكل تلقائي إلى تأسيس علم الهندسة التفاضلية أو الريمانية، وهذه الأخيرة هي اللغة والأداة الرياضياتية التي تقوم عليها النسبية العامة. في المقابل فإن الملاحة اليوم



الشكل 2

السؤال الذي يتبادر للذهن هو كيف نرسم خريطة للعالم كله على ورقة مسطحة؟

ربما أبسط خريطة وأشهرها هي تلك التي تعرف بالخريطة المسطحة المربعة، الصورة في الشكل (3)، وهي خريطة بسيطة، وفي الواقع بعيدة كثيرا عن الحقيقة وتعطي صورة مغالطة كثيرا للمشاهد الحقيقي على سطح الأرض، من ناحية المساحات والمسافات، مثلما سنوضح.

في الخريطة المربعة (الشكل 2)، يتم استعمال خطوط العرض والطول التي على أساسها تم تقسيم سطح الكرة الأرضية كإحداثيات لكن السؤال طبيعي هو: ما مدى محاكاة هذه

لها في الرياضيات، وأدت في نهاية المطاف إلى وضع الأسس الرياضية للهندسة الريمانية وبشكل عام الهندسة التفاضلية، والتي بدورها ردت الجميل فيما بعد لتصبح الأداة التي سُنحل بها إشكالية الملاحة وتحديد المواقع على سطح الكرة الأرضية من دون الحاجة لرسم الخرائط على الورق .

جدير بالإشارة أن مصطلح هندسة - geometry - هو تركيب كلمتين من أصل إغريقي : "Geo" وتعني أرض، و "metron" وتعني "قياس"، أي أن لفظ هندسة يعني "قياس الأرض"

دعنا أولا نوضح بأمثلة إشكالية رسم المساحات الجغرافية على خرائط ورقية مسطحة. لا شك أن القارئ شاهد الخرائط المتداولة في كتب الجغرافيا وما يعرف بالأطلس للعالم، وهي الصور التي ترسخت في أذهان معظم الناس عن شكل العالم.

الصورة المبينة في الشكل (2) تمثل مشهد جزء من الأرض من منظور شخص يعيش في ثلاثة أبعاد، مزودة بخطوط الطول والعرض والاتجاهات الاصطلاحية (شرق-غرب، شمال-جنوب)

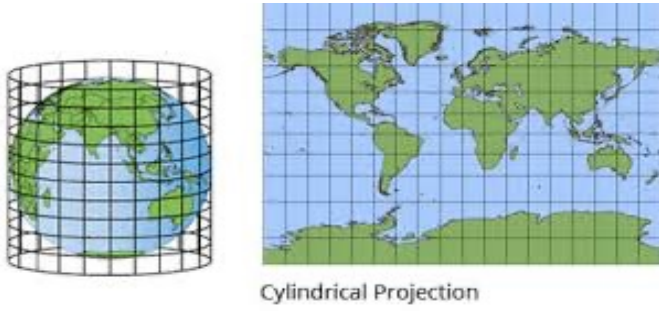


الشكل 3: الخريطة المربعة المسطحة

الخريطة للواقع؟

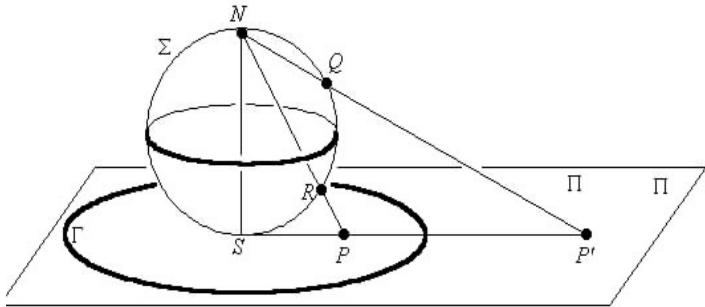
في هذه الخريطة من السهل ملاحظة أن هذه الخريطة بعيدة عن الواقع. فعلى سبيل المثال، في الخريطة المربعة كل نقطتين تقعان على نفس خط العرض ولكن على خطي طول مختلفين تكون المسافة بينهما دائما نفسها، وهو ما يخالف الحقيقة بشكل كبير، وخاصة كلما اتجهنا نحو أحد القطبين. خذ مثلا النقطتين A و B والنقطتين C و D. في الواقع المسافة بين النقطتين A و B تختلف تماما عن المسافة بين C و D. فالنقطتان C و D أقرب إلى بعضهما في الواقع مما تظهره الخريطة، وهذا بسبب أن خطوط الطول تضيق كلما اتجهنا نحو القطبين. وهذا يؤدي بدوره إلى تشويه مساحات الدول والقارات. فالخريطة المسطحة تعطي صورة مغالطة تماما عن مساحة أفريقيا مثلا مقارنة بمساحة أوروبا، فأوروبا تبدو أكبر من مساحتها الحقيقية بسبب سوء تمثيل خطوط الطول وكون أوروبا تقع شمال خط الاستواء وأقرب إلى القطب الشمالي.

هناك خرائط كثيرة تقوم على طرق مختلفة لإسقاط النقاط من سطح الأرض (سطح كرة) على ورقة مسطحة، وسنكتفي بالإشارة هنا إلى أكثرها شهرة وأهمية، وهذا لتوضيح بعض الأفكار الأساسية نشير أولا أن الأرض ليست كروية تماما بل بيضوية نسبيا، إلا أننا سنكتفي هنا باعتبارها كروية وهذا بحد ذاته كافٍ للوصول إلى الهدف الذي نبتغيه أحد أشهر الخرائط هي الخريطة التي تقوم على ما يعرف بالإسقاط الأسطواناني، بحيث يتم لف الكرة بورقة على شكل اسطوانة. الشكل 3 يوضح كيف يتم الحصول على هذه الخريطة.



الشكل 4: يتم لف الكرة بورقة على شكل اسطوانة ثم الإسقاط على هذه الورقة ثم يتم فتح الورقة لتعطي الخريطة. عملية الإسقاط يمكن أن تكون مركزية عبر شعاع من مركز الكرة أو بطريقة أرخميدس، وكل خريطة ناتجة لها ميزات مختلفة

الخريطة الشهيرة الأخرى هي التي تقوم على ما يعرف بالإسقاط المجسمي أو Sterographic Projection الشكل 5. هذا الإسقاط على أهمية رياضية كبيرة وله تطبيقات واستعمالات عديدة. من أهم ميزاته أن كل دائرة على الكرة تكون صورتها في الخريطة إما دائرة أو مستقيما.



الشكل 5: صورة توضيحية للإسقاط المجسمي لنقاط سطح كرة على ورقة مسطحة انطلاقا من القطب الشمالي. النقطة Q صورتها على الورقة النقطة P'، والنقطة R صورتها P. ودائرة الاستواء صورتها الدائرة Γ.

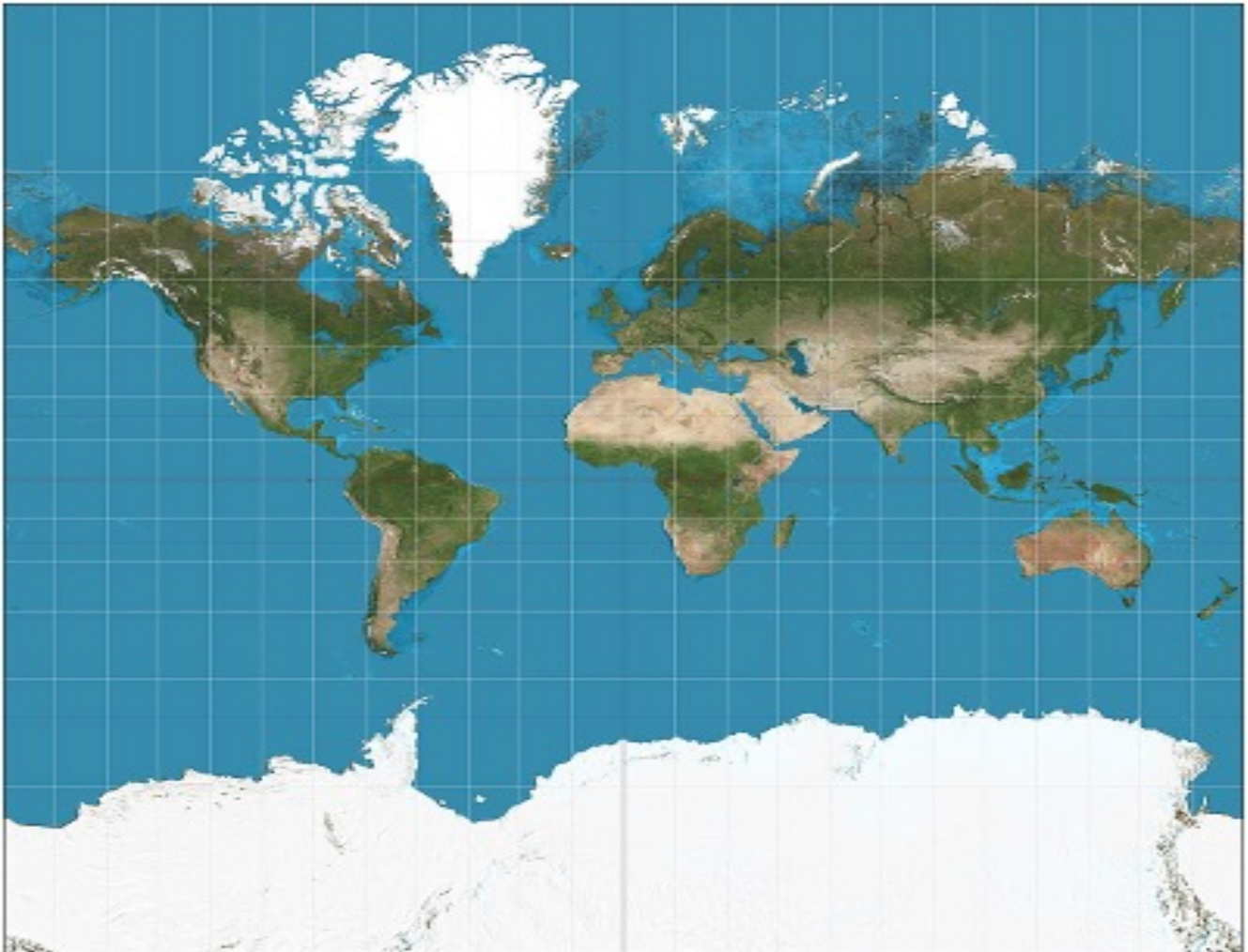


الشكل 6: خريطة لجزء من العالم بالإسقاط المجسمي من القطب الجنوبي. وهنا نلاحظ حجم الاختلاف بينها وبين الخريطة المربعة والأسطوانية

من خلال الخرائط التي أشرنا إليها سابقا نرى أن السؤال المنطقي الذي يتبادر لذهن القارئ هو : هل توجد خريطة مثالية أو إسقاط على ورقة يحاكي تماما حقيقة الأشكال على سطح الأرض؟ الإجابة عن هذا السؤال تقتضي أولا أن نحدد بدقة ما المقصود بخريطة مثالية.

نقول عن خريطة إنها مثالية إذا كانت "تقايسية"، أي تحافظ على المسافات، أو بعبارة أخرى المسافات التي على الورقة أو الخريطة المسطحة هي نفسها المسافات على سطح الكرة الأرضية. (طبعا هنا بعد أخذ سلم القياس بعين الاعتبار، مثلا كل واحد سنتيمتر على الورقة يمثل 100 كلم على سطح الأرض) قبل الاستمرار دعنا نحاول أن نعطي تعريفا رياضياتيا

الخريطة الأخيرة التي سنشير إليها هي خريطة ماركاتور Mercator، والتي ظهرت في القرن السادس عشر. هذه الخريطة نالت شهرة كبيرة وتم تبنيها بشكل كبير منذ القرن الثامن عشر لتصبح خريطة ملاحة معيارية، وهي في الواقع خريطة شبيهة بالخريطة المسطحة المربعة ولكن بتصحيحات مهمة. من ميزات هذه الخريطة أن المسارات التي تقطع خطوط الطول المختلفة بنفس الزاوية دائما تظهر على هذه الخريطة خطوطا مستقيمة، الشكل 7. أيضا مشكلة هذه الخريطة أنها وإن كانت جيدة من ناحية تحديد خطوط الملاحة بما يتلاءم مع اتجاهات البوصلة إلا أنها تؤدي إلى تشوهات كبيرة وتضخيم للمساحات كلما اتجهنا إلى القطبين.



الشكل 7: خريطة للعام بإسقاط ماركاتور، أو خريطة ماركاتور.

على الورقة مثنى-مثنى (المسافة بين $C1$ و $C2$ والمسافة $C3$ و $C4$... إلخ).

الآن، يمكن البرهان دائماً أن هذا مستحيل، وأن هناك دائماً على الأقل مسافة تختلف عن المسافة الحقيقية على سطح الكرة. وهذا كافٍ للبرهان على عدم وجود خريطة مثالية أو تقايسية.

تجدر الإشارة هنا إلى أن كل ما يمكن فعله هو البحث عن أفضل خريطة ممكنة لتغطية قطعة أو جزء من سطح الأرض، وليس سطح الأرض كله. مسألة البحث عن الخريطة الأمثل أيضاً ليست مسألة سهلة ولم تجد لها إجابات دقيقة إلا في ستينات القرن الماضي عن طريق أبحاث الرياضياتي الأمريكي الشهير Milnor، حيث قدم عدداً من الإجابات على هذه السؤال في شكل نظريات حدد فيها رياضياتياً القصد من الخريطة الأفضل ومدى محاكاتها للواقع، المرجع (1).

لنعود الآن إلى مسألة سطح الكرة واختلافها عن المستوي ونسأل عن السبب الرئيس الذي يقف عائقاً أمام إيجاد تقايس بين سطح الكرة والمستوي، أو بلغة الرياضيات تقايس بين الكرة S^2 والمستوي R^2 . من الآن فصاعداً سنتحدث عن سطح كرة ومستوي من دون الاهتمام بحجم الكرة، لأن جوهر المشكلة نفسه مهما كان نصف قطر الكرة.

دعنا نشير أولاً أن إشكالية إسقاط سطح الأرض أو كرة على ورقة مسطحة أو المستوي يخفي في طياته مشكلتين في الحقيقة وليس مشكلة واحدة المشكلة الأولى رأيناها وهي في عدم إمكانية أن نسقط النقاط من سطح الأرض على المستوي بشكل متقايس، أي يحافظ على المسافات بين النقاط، وهذه إشكالية ذات طبيعة هندسية محلية مثلما

دقيقاً نسبياً لمفهوم التقايس بين الكرة والورقة المسطحة أو بين S^2 و R^2 .

نقول عن تطبيق أو دالة ϕ من S^2 إلى R^2 إنها تقايس إذا حافظت على المسافات، أي

$$\phi: S^2 \rightarrow R^2$$

$$\forall p_1, p_2 \in S^2, d_{S^2}(p_1, p_2) = d_{R^2}(\phi(p_1), \phi(p_2))$$

حيث d_{S^2} هي المسافة بين النقطتين على سطح الكرة و d_{R^2} هي المسافة الإقليدية بين صورتيهما على الورقة.

دعنا نذكر أن المسافة الإقليدية على الورقة تعطى بدلالة الإحداثيات الكارتيزية (الديكارتية) للنقطتين بالقانون الشهير التالي

$$d_{R^2} = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2} \quad (1)$$

هذه العبارة للمسافة الإقليدية هي نتيجة لنظرية فيثاغورث والتي بدورها مكافئة للمسلمة الخامسة لإقليدس، أو المسلمة الخامسة التي تقوم عليها الهندسة الإقليدية.

بالعودة إلى سؤالنا عن إمكانية وجود تقايس بين سطح الكرة والورقة المسطحة أو المستوي، الإجابة على هذا السؤال معلومة وهي بالنفي، لا توجد خريطة مثالية. في حالة الكرة يمكن البرهان على ذلك باستعمال أربع نقط من الأرض أو من سطح الكرة. لتكن A_1, A_2, A_3, A_4 أربع نقاط من سطح الكرة (الأرض) ولتكن $C1, C2, C3, C4$ هي صور هذه النقاط على خريطة مسطحة. حتى تكون الخريطة مثالية فيجب أن تكون المسافات بين هذه النقاط الأربعة مثنى-مثنى (المسافة بين A_1 و A_2 والمسافة A_3 و A_4 ... إلخ) تكون مساوية للمسافات بين صورهم

يطلق عليها.

أما المشكلة الثانية فلم نشر إليها لحد الآن ولكنها مهمة للغاية. فلو لاحظنا الخرائط السابقة وغيرها فإننا سنجد أنها لا تغطي الأرض كلها، فدائماً هناك قطعة جغرافية لا يتم تغطيتها بالخريطة. ففي الخرائط السابقة دائماً يتم استثناء القطب الشمالي أو الجنوبي أو كلاهما معاً، هذا من ناحية. أما من ناحية أخرى فإننا نلاحظ أن هناك مناطق هي في الواقع قريبة من بعضها البعض جداً على سطح الأرض ولكنها في الخريطة لا تبدو فقط بمسافات مختلفة ولكن متباعدة جداً. مثلاً في معظم الخرائط المتداولة نجد منطقة في أقصى الجهة اليمنى ومنطقة في أقصى الجهة اليسرى للخريطة، ولكنهما في واقع الأمر متلاصقتان تقريباً على سطح الأرض. خذ مثلاً آلاسكا وأقصى شمال شرق روسيا، فهاتان المنطقتان لا تبعدان في الواقع عن بعضهما إلا كيلومترات معدودة، بينما في الخريطة تبدوان متباعدتين تماماً! تفصلهما عشرات الآلاف من الكيلومترات! (انظر الخريطة المسطحة أو الإسطوانية). هذه الإشكالية في الواقع لا تعكس اختلافاً هندسياً محلياً أو عدم إمكانية وجود تقايس بين سطح الأرض والمستوي، بل تعكس اختلافاً إجمالياً "Global" بين سطح الأرض والمستوي، أو بلغة الرياضيات الدقيقة اختلافاً طوبولوجياً "Topological".

وهنا نجد أنفسنا أمام سؤال آخر بخلاف سؤال إمكانية وجود تقايس، وهو هل يمكن تغطية الأرض بخريطة واحدة؟ المقصود بخريطة واحدة هنا هو الآتي: إيجاد خريطة واحدة تغطي سطح الأرض كله وتحقق الشرطين التاليين في آن واحد

-أولاً، لكل نقطة من على سطح الأرض نقطة واحدة

ممثلة لها على الورقة (المستوي R^2).

-ثانياً، كل نقطتين قريبتين من بعضهما على سطح الأرض تكونان كذلك على الورقة أو المستوي لاحظ هنا أننا لا نتحدث عن الحفاظ على المسافات، بل كل ما هو مطلوب المحافظة على القرب والبعد أو التجاور من عدمه، وهذه مسألة كيفية وليست كمية، أي طوبولوجية.

الإجابة عن هذا السؤال هي أيضاً بالنفي، فلا يمكن أن نغطي سطح الأرض بخريطة واحدة تحقق الشرطين السابقين. فمثلاً لو أخذنا خريطة الإسقاط المجسمي من القطب الشمالي، فإن جميع النقاط لها صورة وحيدة على سطح الورقة ما عدا نقطة القطب الشمالي فإنها لا تملك صورة معرفة، بل تقع في المالانهاية من جميع الاتجاهات. أيضاً بالإضافة إلى أن النقاط القريبة من القطب الشمالي تكون صورها على الخريطة متباعدة جداً. مثلاً الدوائر القريبة من القطب الشمالية والتي لها نصف قطر صغير جداً تكون صورها على الخريطة دوائر بنصف قطر كبير جداً. يمكن الإشارة هنا أن هذه الإشكالية نفسها التي نواجهها إذا أردنا إسقاط دائرة على خط مستقيم.

أيضاً لو أخذنا الخريطة الأسطوانية سنجد مثلاً أن القطبين الشمالي والجنوبي لا يمكن أن نسقطهما بشكل وحيد، لأن عملية الإسقاط تسقط كل دائرة من الكرة على دائرة في الأسطوانة، ولكن القطبين الشمالي والجنوبي عبارة عن نقطتين، وإذا ما مثلناهما بدائرة تكون صورتا القطب الشمالي والجنوبي ليستا نقطتين بل دائرتين! كما أنه من السهل ملاحظة أن نقاطاً قريبة من بعضها على سطح الكرة تصبح بعد إسقاطها على الأسطوانة بعيدة عن بعضها البعض

للخروج من هذه الإشكالية هو: هل يمكن أنه وبالإضافة للخريطة على ورقة، ولتكن أي خريطة، نعطي مستعمل هذه الخريطة (رجل الملاحة) دالة أخرى تمكنه من تحويل المسافات على الخريطة إلى المسافات الحقيقية على سطح الكرة؟ نسمي هذه الدالة الآن "متريّة-Metric" مرفقة بالخريطة.

الإجابة على هذا السؤال ليست بالبساطة التي يمكن تصورها، لأن محاولة الإجابة الدقيقة رياضيا على هذه السؤال هي التي فتحت الباب أمام نشأة أحد أهم فروع الرياضيات التي أنتجها العقل البشري، ألا وهي الهندسة الريمانية أو الهندسة التفاضلية بشكل عام.

طبعا ليس الهدف هنا هو شرح أسس الهندسة التفاضلية بشكل رياضياتي ولكن سنحاول أن نعطي القارئ لمحا حدسيا مبسطا حول نشأة فكرة المتريّة الريمانية وعلاقتها بتقوس أو انحناء الفضاء، انطلاقا من تصورات بسيطة.

قبل الحديث عن المتريّة المرفقة بخريطة ما يجب أولا أن نحدد ما المقصود بالمسافة بين نقطتين تقعان على سطح الكرة.

في حالة ورقة مسطحة أو المستوي R^2 المسألة سهلة. المسافة هي طول الخط المستقيم الواصل بين النقطتين، فالخط المستقيم هو أقصر مسافة بين نقطتين كيفيتين. وإذا ما اخترنا الإحداثيات الكارتيذية لتعليم النقاط على المستوي إن نظرية فيثاغورث تعطي المسافة بين كل نقطتين احداثيتهما (x_1, y_1) و (x_2, y_2) بالصيغة الشهيرة

$$d(1,2) = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2}$$

في الحقيقة نحتاج لخريطين على الأقل لتغطية سطح الأرض إذا أردنا الاستجابة للشرطين السابقين. طبعا هنا سنواجه إشكالية أخرى، وهي أننا سنجد مناطق تداخل بين الخريطين، وهذا ما يحتم ضرورة تعريف كيفية الانتقال من خريطة إلى أخرى، وهذا ما يعرف باللغة الحديثة بتغيير الإحداثيات، وهذه نقطة لن نقف عندها الآن كثيرا وسنعود إليها لاحقا. مجموعة الخرائط الكافية لتغطية سطح الأرض أو سطح الكرة تسمى أطلسا. في حالة الكرة، أي أطلس يغطيها كلها ويستجيب للشرطين السابقين لا بد أن يتكون على الأقل على خريطين، كل خريطة تغطي جزءا من الأرض مع وجود جزء تغطيه الخريطان ولكن بشكلين مختلفين . فمثلا يمكن أن نختار خريطين أحدهما تقوم على الإسقاط المجسمي انطلاقا من القطب الشمالي وتغطي سطح الكرة الأرضية ابتداء من القطب الجنوبي إلى غاية ما فوق خط الاستواء (لا يهم بكم ولكن يكفي بعض الكيلومترات من دون بلوغ القطب الشمالي)، وخريطة ثانية تعتمد على الإسقاط المجسمي انطلاقا من القطب الجنوبي وتغطي من القطب الشمالي إلى غاية ما تحت خط الاستواء من دون بلوغ القطب الجنوبي. هاتان الخريطان معا تشكلان أطلسا يغطي الكرة الأرضية ويستجيب للشرطين السابقين.

المتريّة غير الإقليدية وهندسة ريمان

الآن، بعد أن تبين أنه من المستحيل إيجاد خريطة تغطي مساحة من الأرض وتسقطها على ورقة مسطحة بحيث تكون عملية الإسقاط هذه تقايسا يحافظ على المسافات الحقيقية بين النقاط على سطح الأرض. السؤال الذي يبدو منطقيا كمحاولة

والتي تعرف بالمسافة الإقليدية.

دعنا نشير هنا أن المسافة الإقليدية السابقة إذا تم اعتمادها كمسافة بين النقاط فإن مسلمة إقليدس الخامسة يمكن برهانها كنتيجة رياضية بين الأعداد الحقيقية. لهذا فإن الهندسة الإقليدية أو الهندسة المسطحة على علاقة وثيقة بصيغة المترية الإقليدية.

والآن ماذا عن المسافة بين نقطتين على سطح الكرة؟

التعريف الطبيعي للمسافة بين نقطتين على سطح الكرة هو طول أقصر مسار بينهما. ولكن كيف نحدد المسافة الأقصر بين نقطتين على سطح الكرة؟

دعنا نذكر أنه في حالة سطح الأرض، أو سطح الكرة بشكل عام، وإذا كنا نتعامل مع مساحات صغيرة مقارنة بمساحة الأرض، أو بلغة أدق مسافات صغيرة مقارنة بنصف قطرها، فإننا عادة لا نشعر بأي انحناء لسطح الأرض ونتعامل وكأن المسافة الإقليدية المسطحة هي الأداة التي نقيس بها المسافات (وهذا ما نقوم به عادة في حياتنا اليومية). ولكن إذا كانت المسافات طويلة نبدأ بالشعور بتقوس أو تكور سطح الأرض. بعبارة أخرى أنه إذا اخترنا نقطة معينة p من سطح الأرض أو الكرة واكتفينا بجوارها الصغير $U_p(\epsilon)$ (مسافات صغيرة جدا حول النقطة p مقارنة بنصف قطرها، $\epsilon \ll R$) يمكننا استعمال الهندسة الإقليدية، أي أنه يمكننا أن نجد تقاييسا من المساحة الصغيرة المحيطة بتلك النقطة والمستوي. عمليا يمكن القيام بذلك بأخذ النقطة والمستوي المماسي للكرة في تلك النقطة ثم نسقط المساحة الصغيرة المحيطة بتلك النقطة على المستوي المماسي. الصورة تكون عبارة عن خريطة

تحاكي المساحة والأطوال الحقيقة للمساحة على سطح الأرض (أو الكرة) ما لم نبتعد عن الجوار الصغير للنقطة. العملية تشبه تماما التقريب التآلفي لدالة بخط مستقيم.

بشكل عام نعبر عن هذا رياضيا بالشكل التالي: من أجل كل نقطة من سطح الكرة يمكن دائما أن نجد جوارا لهذه النقطة $U_p(\epsilon)$ وتقاييسا ϕ من هذا الجوار نحو مجموعة جزئية مفتوحة من الورقة أو المستوي $U_{\phi(p)}$. وإذا كان q و q' نقطتين من $U_p(\epsilon)$ و (ξ_1, ξ_2) والإحداثيات الكارتيزية لصورتها (ξ'_1, ξ'_2) على الورقة، فإن المسافة بين هاتين النقطتين تعطى بالمسافة الإقليدية، أي

$$d(q, q') = d(\phi(q), \phi(q')) = \sqrt{(\xi_1 - \xi'_1)^2 + (\xi_2 - \xi'_2)^2} \quad (2)$$

السؤال الأهم الآن: ماذا لو ابتعدنا عن جوار النقطة p ؟

حتمًا لو ابتعدنا عن الجوار الصغير جدا للنقطة p فإن المسافة لا يمكن أن تعطى بالعلاقة (2)، هذا من ناحية. أما من ناحية أخرى فإذا اخترنا عملية إسقاط أخرى أو نظام إحداثيات آخر يختلف عن الإحداثيات الكارتيزية فإن المسافة بين نقطتين قريبتين جدا من بعضهما لا تُعطى بالعلاقة الإقليدية، ولكن بشكل عام يمكن كتابته على الشكل التالي:

$$\Delta d = \sqrt{\sum_{i,j=1}^2 g_{ij}(p) \Delta x^i \Delta x^j} \quad (3)$$

مجموعة الأرقام $g_{ij}(p)$ أو المصفوفة تحسب باستعمال التحويلة بين الإحداثيات الكارتيزية حول النقطة p والاحداثيات الجديدة (x_1, x_2) . هذه المصفوفة تسمى

هي $g_{ij}(x)$ ، حيث (x) ترمز لإحداثيات نقطة معينة، أي $(x_1, x_2, \dots, x_n)$. ومربع المسافة التفاضلية بين نقطتين يعطى بـ

$$dl^2 = \sum_{i,j=1}^n g_{ij}(x) dx^i dx^j \quad (5)$$

يمكن النظر إلى العلاقة (5) على أنها تعميم لنظرية فيثاغورث في حالة الفضاءات غير الإقليدية. المترية و تسمى مترية ريمان. قيم المصفوفة $g_{ij}(x)$ في نقطة معينة تتغير قيمتها من نظام إحداثيات إلى آخر أو من خريطة إلى أخرى، إلا أن المسافة dl تبقى صامدة ولا تتغير، فهي تعبر عن مسافة حقيقية في الفضاء.

إذا أمكن إيجاد خريطة أو نظام إحداثيات بحيث تأخذ المترية أو المسافة الشكل الإقليدي فإن الفضاء يعتبر مسطحاً محلياً، أو محلياً مقاييساً لـ R^n . نقول محلياً لأن الفضاء يمكن أن يكون مسطحاً ولكن بطوبولوجيا مختلفة، مثل الفرق بين الاسطوانة و R^2 ، فالاسطوانة مسطحة ويوجد بينها وبين R^2 تقايس إلا أن لها طوبولوجيا مختلفة.

طبعا الصورة السابقة مبسطة جدا للهندسة التفاضلية الريمانية وفيها بعض الإخلال بالدقة الرياضية، ولقد تطلب الأمر عقوداً من جهود خيرة علماء الرياضيات حتى تأخذ شكلها الدقيق الذي يدرس اليوم.

الزمن والميقاتيات في النسبية

في سنة 1905 وضع آينشتاين المسلمات الأساسية للنسبية الخاصة والتي تقوم بالأساس على كون سرعة الضوء ثابتة بالنسبة لجميع المراجع أو المعالم العطالية. من النتائج المهمة للنسبية الخاصة هي

المترية عند النقطة p في الإحداثيات (x_1, x_2) وهي تتغير في الواقع من نقطة إلى أخرى. ولهذا بشكل عام يمكن كتابة المسافة التفاضلية بين نقطتين إحداثياتهما (x_1, x_2) و $(dx_1 + x_1, dx_2 + x_2)$ بالشكل التالي

$$dl = \sqrt{\sum_{i,j=1}^2 g_{ij}(x) dx^i dx^j} \quad (4)$$

الآن المسافة بين نقطتين تعطى بطول المسار الأقصر الذي نحصل عليه بتجميع المسافات التفاضلية المعطاة بالعلاقة السابقة، معادلة (4). أو بلغة أدق هي تكامل المعادلة (4) عبر أقصر مسار

$$l(1,2) = \int_1^2 dl$$

المسار الأقصر يمكن الحصول عليه بطريقة تفاضلية تفاضلية ومعادلته تعطى بدلالة المترية، ويسمى هذا المسار بـ Geodesic (متقاصر) وهو نظير المستقيم في المستوي، وفي حالة سطح الكرة عبارة عن قوس.

الدراسة السابقة في الحقيقة يمكن تعميمها على جميع الفضاءات وليس سطح الدائرة فقط، وهذه هي القفزة التاريخية التي قام بها العالم ريمان سنة 1867. ففي مقالة قصيرة وخالية من أي معادلات تقريباً، عدا معادلتين، وضع الأسس التي قامت عليها الهندسة التفاضلية، أو ما بات يعرف بهندسة ريمان، المرجع (2). فمن خلال هذا التصور الفضاءات المنحنية متعددة الأبعاد (بعدها n) تعطى فيها المسافات بدلالة مترية و عبارة عن مصفوفة $n \times n$ مركباتها في نظام إحداثيات معين أو بالنسبة لخريطة معينة

$$\Delta s = \sum_{i,j=0}^3 \eta_{ij} \Delta x_i \Delta x_j, \quad (8)$$

$$\Delta x_i = x_i - x'_i$$

المقادير η_{ij} تشكل مصفوفة تعرف بمتريّة مينكوفسكي، جميع عناصرها معدومة ما عدا العناصر القطرية، $\eta_{11}=\eta_{22}=\eta_{33}=1, \eta_{00}=-1$ الفضاء والزمن أو الزمكان يكون فضاء مسطحاً R^4 ولكن بمتريّة η_{ij} إذا أهملنا الجاذبية أو أهملنا وجود المادة والطاقة. هذه المتريّة تختلف عن المتريّة الأقليدية، فهي لا تعبر عن مسافات موجبة دوماً، فهي تقيس مسافات زمكانية، لهذا تسمى متريّة شبه-ريمانية أو لورنتزية، وهذا بسبب الإشارة السالبة للعنصر η_{00} .

في حالة وجود كمية من الكتلة أو الطاقة (ككوب أو نجم أو أي كتلة) في الفضاء فإن هذا يؤدي إلى انحناءات في الفضاء والزمن وتصبح متريّة الزمكان مختلفة عن متريّة مينكوفسكي المسطحة، لتأخذ شكلاً آخر تتحكم فيه معادلة تعرف بمعادلة آينشتاين وتحدده كمية المادة والطاقة المنتشرة في الفضاء وطريقة توزيعها وكثافتها. هذا هو لب النسبية العامة: الزمكان، أو الفضاء والزمن، هو فضاء منح بمتريّة شبه-ريمانية أو لورنتزية ز-و تحدد شكلها معادلة آينشتاين، والتي بدورها تتعلق بطبيعة المادة والطاقة الموجودة في الفضاء. وهنا نلاحظ أن متريّة الزمكان لم تعد مسألة اختيارية بل تمليها معادلة آينشتاين بحيث يجب أن تكون هذه المتريّة حلاً لها.

في هذه الحالة تصبح المسافة التفاضلية الزمكانية بين حدثين في نظام إحداثيات معين تعطى بـ

ظاهرة ما يعرف بتمدد الزمن.

فإذا كان بحوزتك ميقاتية أو ساعة لقياس الزمن وكنت ساكناً في مرجع عطالي S ، بينما هناك ميقاتية أخرى تسير بحركة مستقيمة ومنتظمة بسرعة v بالنسبة لـ S ، فإن الميقاتية المتحركة تبدو وتيرة الزمن فيها أبطأ، فإذا قاست ميقاتيتك الساكنة في هذا المرجع زمناً Δt فإن الميقاتية المتحركة تقيس فترة زمنية $\Delta t'$ تعطى بـ

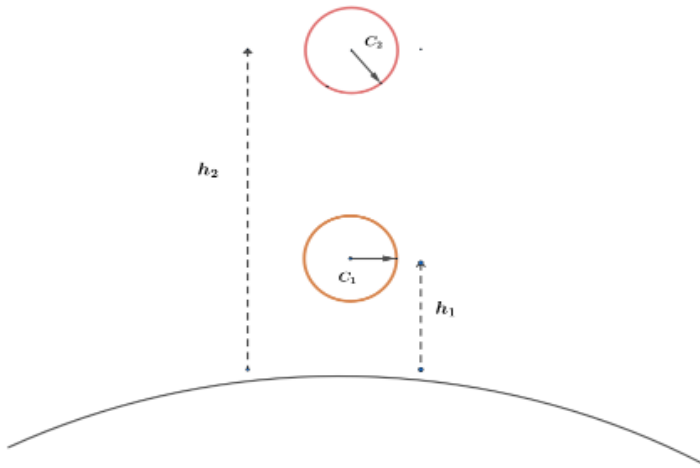
$$\Delta t' = \frac{\Delta t}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \quad (6)$$

من أهم النتائج الأخرى للنسبية الخاصة أن مفهوم المكان والزمان لم يعودا مفهومين منفصلين عن بعضهما، بل المكان والزمان يشكلان بنية فضائية واحدة من أربعة أبعاد يعرف بفضاء مينكوفسكي أو الزمكان. وهو عبارة عن فضاء مسطح من أربعة أبعاد، R^4 ، ثلاث أبعاد للمكان وبعد للزمن، والمتريّة التي تحكم هذا الفضاء هي متريّة مينكوفسكي. فإذا كان لدينا حدثان أحدهما في مكان وفي زمن معين محدد بالرباعية (x_1, y_1, z_1, t_1) ، وحدث في موضع آخر وزمان آخر محدد برباعية أخرى (x_2, y_2, z_2, t_2) ، حيث المواضع والأزمنة مقاسة بالنسبة لمرجع عطالي معين، تكون فيه الميقاتية التي قاست الزمن ساكنة، فإن المسافة الزمكانية التي تتفق حول مقدارها كل المراجع العطالية، أي تبقى صامدة عند الانتقال من مرجع عطالي إلى آخر، هي المسافة المعرفة بمتريّة مينكوفسكي:

$$\Delta s = (x - x')^2 + (y - y')^2 + (z - z')^2 - c^2(t - t')^2 \quad (7)$$

ومن الطبيعي هنا أن نستعمل الترميز التالي للإحداثيات الزمكانية، حيث نضع

الأرض



الشكل 7: مقيقتان على ارتفاعين مختلفين من سطح الأرض

تغير وتيرة دق أو تردد الميقاتيات بحسب شدة الجاذبية يؤدي حتما إلى استحالة مزامنة الساعات التي توجد في مستويات كمون جاذبية مختلفة، وعليه يجب أخذ هذا بعين الاعتبار عند مقارنة الأزمنة المقاسة بميقاتيات موجودة على مستويات أو ارتفاعات مختلفة.

نشير هنا أننا اكتفينا بالتقريب الأول في المعادلة (10)، وهذا كافٍ جدا في حالة كوكب مثل الأرض

نموذج مبسط لنظام التموضع العالمي GPS

دعنا بداية نقدم نموذجا مبسطا لنظام يمكن من خلاله أن يحدد شخص ما موضعه على الأرض باستعمال إشارات من أقمار صناعية وهذا في حالة إهمال تأثير النسبيتين العامة والخاصة، وكذلك إهمال دوران الأرض حول نفسها.

نتصور أن الأرض عبارة عن كرة نصف قطرها R ، ولنهمل أي حركة دورانية للأرض حول نفسها، ولنفترض أن هناك ثلاث أقمار صناعية تدور حول الأرض، s_1, s_2, s_3 ، الشكل 7، وهذه الأقمار يمكنها أن ترسل إشارات كهرومغناطيسية نحو الأرض، هذه الإشارات تحمل رسائل ملاحية مشفرة يستقبلها

$$ds^2 = \sum_{i,j=0}^3 g_{ij} dx^i dx^j \quad (9)$$

ما يهمنا في هذا السياق هو تأثير الجاذبية على وتيرة الزمن، وهنا سنكتفي بأهم ظاهرة وأبسطها وهي معدل التغير في وتيرة الزمن (أو تردد الميقاتيات) بين مستويات مختلفة للجاذبية، أو بعبارة أخرى الاختلاف بين الزمن الذي تقيسه ميقاتية معينة على ارتفاع معين والزمن الذي تقيسه ميقاتية معادلة على ارتفاع آخر من سطح الأرض، أو أي كوكب أو نجم آخر كتلته M ، أو بين مستويين مختلفين لكمون الجاذبية بلغة نيوتن.

فإذا كان لدينا مقيقتان أو ساعتان متماثلتان تماما (أي مصنوعتان من المادة نفسها ويعملان بالآلية نفسها) وساكنتان، الأولى على ارتفاع h_1 من سطح الأرض والثانية على ارتفاع h_2 ، $(h_2 > h_1)$ ، الشكل 7، فإن الميقاتية الثانية تكون وتيرتها أسرع من الميقاتية الأولى. العلاقة الدقيقة تعطيها صيغة المترية المستخرجة من حل معادلة آينشتاين، فإذا كان Δt_1 و Δt_2 الزمن المقاس من الميقاتيتين الأولى والثانية على التوالي فإن العلاقة بين الفترتين تحكمها المعادلة التالية:

$$\Delta t_1 = \frac{g_{00}(2)}{g_{00}(1)} \Delta t_2 \approx \left(1 + \frac{2\Delta\phi}{c^2}\right) \Delta t_2 \quad (10)$$

حيث $\Delta\phi$ هو الفرق بين كمون الجاذبية بين المستويين، والمعطى بـ

$$\Delta\phi = \frac{GM}{R + h_2} - \frac{GM}{R + h_1}$$

حيث G هو ثابت الجذب العام لنيوتن، و R نصف قطر

إلى الشخص يقرؤها جهازه. ولتكن t لحظة وصول الإشارات الثلاث بشكل متواقت أو متزامن إلى هذا الشخص بحسب الميقاتية المرفقة بجهاز استقباله. بما أن الضوء يسير في خطوط مستقيمة وبسرعة c يمكن كتابة المعادلات الثلاث التالية

$$|\vec{r}_p - \vec{r}_i| = c(t - t_i), \quad i = 1, 2, 3. \quad (11)$$

بحل هذه المعادلات الثلاث يمكن استخراج إحداثيات الشخص، أي (x_p, y_p, z_p) ، والتي يمكن تحويلها مثلما أشرنا إلى إحداثيات زاوية تحدد موقع الشخص بحسب خطوط الطول والعرض.

مثلما أشرنا، من الناحية النظرية يبدو الأمر قابلاً للتطبيق، فيمكن وضع أقمار صناعية تدور حول الأرض، كما يمكن لتكنولوجيا العصر إرسال الإشارة وتشفيرها، كما أن إجراء العمليات الحسابية ممكن بشكل عبر جهاز حاسوب مبرمج. ولكن هناك في الحقيقة عدد من الإشكاليات العملية التي تمنع النموذج السابق من أن يكون قابلاً للتطبيق بشكل مباشر.

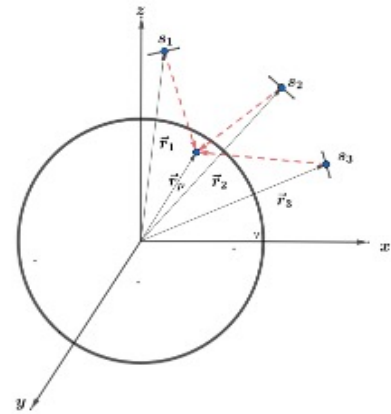
أولاً، لنأمل إشكالية تحديد المواقع بدقة بناءً على النموذج السابق بصرف النظر عن الإشكاليات التي تطرحها النسبيتان الخاصة والعامة.

فإذا أخذنا نقطتين من سطح الأرض بينهما مسافة d فإن التمييز بين هاتين النقطتين يكون بالأساس بناءً على الفرق الزمني في وصول الإشارات من الأقمار الصناعية، وبما أن الإشارات هي أشعة كهرومغناطيسية تسير بسرعة الضوء فإن الفرق الزمني في العادة يكون أقل من d/c . وعليه إذا أردنا ألا يكون الخطأ في تحديد المواضع أكبر مثلاً من عشرة أمتار، فإن الميقاتيات المستعملة يجب أن

شخص ما على سطح الأرض، ومن خلال هذه الرسائل الملاحة يمكنه عبر جهاز استقبال خاص فك هذه الشيفرة ومن خلالها يعرف اللحظة التي أرسلت فيها كل إشارة من القمر الصناعي وكذلك موضع القمر الصناعي بالنسبة للأرض في تلك اللحظة. وليكن لدينا مرجع عطالي كارتيزي مركزه الأرض، من خلاله تحدد إحداثيات الأقمار الصناعية ثم لاحقاً موقع الشخص المستخدم.

السؤال المطروح هو: هل يمكن لهذا الشخص المستقبل أو المستعمل أن يستغل هذه المعلومات المرسلة من الأقمار الصناعية الثلاث لمعرفة موقعه على الأرض؟ أي تحديد إحداثياته بالنسبة للمعلم الكارتيزي مركزه الأرض مثلاً؟

دعنا نشير هنا إلى أنه يمكن فيما بعد تحويل هذه الإحداثيات الكارتيزية إلى مواقع بالنسبة لخطوط العرض والطول. من الناحية النظرية المبدئية الإجابة نعم.



الشكل 8: ثلاث أقمار صناعية تدور حول الأرض وترسل باستمرار إشارات معلوماتية إلى مستقبل على سطح الأرض (المستخدم).

لتكن (x_i, y_i, z_i) إحداثيات الأقمار الصناعية الثلاث، $i=1, 2, 3$. وليكن t_i الزمن الذي أرسل فيه القمر الصناعي S_i الإشارة إلى الشخص p على سطح الأرض. هذه المعلومات كلها ترسل ضمن إشارة

نانو ثانية.

الساعات الذرية إذن تحل إشكالية قياس الفترات الزمنية القصيرة جداً، ولكن مثلما أشرنا سابقاً أن النسبيتين الخاصة والعامة يؤثران على طريقة عمل الساعات، من خلال ظاهرة تمدد الزمن وأيضاً تأثير الفرق في الجاذبية على أداء الميقاتيات، فتردد الميقاتية يتأثر بالجاذبية وبالسعة النسبية. لهذا قبل تطبيق المعادلات (11) يجب أولاً معرفة مدى تأثير النسبية الخاصة والعامة على الميقاتيات الموجودة في الأقمار الصناعية. فمن ناحية هذه الأقمار الصناعية توجد على مدارات ارتفاعها يقارب 20 ألف كيلومتر من سطح الأرض، وأيضاً تدور بسرعة حول الأرض تقارب 3868 متر في الثانية، فهذه الأقمار تتم دورتين كاملتين في اليوم الواحد حول الأرض.

دعنا أولاً نقيم التأثير الناتج عن دوران أو حركة الأقمار الصناعية، أي سرعة الساعات بالنسبة لملاحظ عطالي ثابت على سطح الأرض.

من خلال ما رأينا فإن الزمن الذي تقيسه الساعة المتحركة مقارنة بساعة ساكنة في معلم عطالي يعطى بالعلاقة (6)، وبما أن سرعة الأقمار الصناعية

$$\Delta t_s = \frac{\Delta t}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \approx \Delta t \left(1 + \frac{v^2}{2c^2} \right) \approx \Delta t (1 + 10^{-10})$$

صغيرة أمام سرعة الضوء فإنه يمكن كتابة وإذا افترضنا مثلاً أنه أمكن موازنة ميقاتية القمر الصناعي مع ميقاتية ساكنة على سطح الأرض فإنه بعد يوم واحد ستصبح متأخرة عن ميقاتية الأرض بما لا يقل عن 8 ميكروثانية، وهذا وحده كافٍ ليجعل الخطأ في قياس المسافات الناتج عن دورتين للقمر

تقيس الأزمنة بدقة أكبر من 10^{-8} ثانية، أي لا يزيد الخطأ عن 10^{-8} ثانية. أما إذا أردنا ألا يتجاوز الخطأ في المواضع متراً واحداً فإن دقة الميقاتية يجب ألا تقل عن 10^{-9} ثانية، أي نانو ثانية. بل إن الوصول إلى دقة كيلومتر واحد يقتضي دقة للميقاتية تتجاوز المايكروثانية، وهذه الدقة في الحقيقة لا تتوفر في الساعات العادية. لهذا فإن الميقاتيات أو الساعات العادية عديمة الجدوى ولا يمكنها أن تعتمد كوسيلة لقياس الفروق في الأزمنة بين نقاط مختلفة بشكل يسمح بتمييز النقاط المختلفة بدقة، فلا يمكن مثلاً تمييز موضع وموضع آخر على بعد كيلومترات منه.

لهذا فإن تحديد المواضع يقتضي استعمال ميقاتيات تستطيع قياس أزمنة قصيرة جداً، وهذا لا يمكن أن تقوم به إلا الساعات الذرية، حيث أن دقتها في حدود النانو ثانية، أي 10^{-9} ثانية، أو أكثر دقة. فالساعات أو الميقاتيات الذرية التي تعتمد مثلاً على ذرة السيزيوم 133- يمكنها قياس فترات زمنية في حدود واحد نانو ثانية ومستقرة بشكل كبير، ومعدل الخطأ فيها لا يتجاوز ثانية واحدة خلال ألف سنة. وهناك ساعات ذرية أخرى أكثر دقة وساعات ضوئية أكثر وأكثر دقة واستقراراً.

الساعة الذرية القائمة على ذرة السيزيوم 133- تعتمد معدل انتقال الذرة بين مستويي طاقة، ففي الثانية الواحدة تقوم ذرة السيزيوم ب 9 192 631 770 دورة إشعاعية توافق الانتقال بين مستويين دقيقين للحالة الأساسية للذرة، أو بلغة الترددات، الساعة تعمل بتردد

$$f_c = 9\,192\,631\,770 \text{ Hz}$$

وهذا يسمح بقياس فترات زمنية تصل إلى حوالي

الصناعي يصل إلى كيلومترات، فما بالك الخطأ الناتج عن أيام أو سنة أو سنوات. ولهذا إذا أهملنا تأثير النسبية فإن فكرة استعمال الإشارات القادمة من الأقمار الصناعية تنهار تماما.

لنلق الآن نظرة على تأثير النسبية العامة أو الجاذبية. بالعودة إلى المعادلة (10) فإن الساعات أو الميقاتيات المرفقة بالأقمار الصناعية تكون وتيرتها أسرع والعلاقة بين الفترة الزمنية المقاسة بميقاتية ساكنة على سطح الأرض وميقاتية مرفقة بالقمر

$$\Delta t_s = \frac{\Delta t}{\left(1 + \frac{2\Delta\phi}{c^2}\right)} \approx \Delta t \left(1 - \frac{2\Delta\phi}{c^2}\right) \approx \Delta t(1 - 10^{-6})$$

الصناعي يعطى بـ

وهنا نلاحظ أولا أن تأثير النسبية العامة أو الجاذبية على وتيرة عمل الميقاتيات أكبر من تأثير النسبية الخاصة، فهو حوالي 10000 مرة من تأثير النسبية الخاصة. وعليه فإن الميقاتية المرفقة بالقمر الصناعي ستكون بعد يوم واحد متأخرة عن الميقاتية الساكنة على سطح الأرض بما يقدر بـ 0.08 ثانية، وهو رقم كبير جدا إذا ما تذكرنا أن الضوء يقطع خلال هذه الفترة مئات الكيلومترات، وهذا يؤدي إلى انهيار فكرة الأقمار الصناعية والإشارات كوسيلة لتحديد المواقع.

لهذا على أي نظام تحديد مواقع يقوم على الأقمار الصناعية والميقاتيات الذرية أن يأخذ بعين الاعتبار تأثير كل من النسبية العامة والخاصة إذا أردنا أن نحدد المواقع بدقة على سطح الأرض، وأي إهمال لهذا التأثير يجعل من نظام تحديد المواقع عديم الجدوى، فالأخطاء في المواضع قد تصل إلى مئات الكيلومترات أو أكثر بحكم تراكم تأخر وتقدم

الميقاتيات المرفقة بالأقمار الصناعية.

في الحقيقة نظام تحديد المواضع العالمي أو GPS على أرض الواقع أعقد من الصورة المبسطة التي طرحناها في الأعلى، وإن كانت الفكرة العامة والأساسية نفسها. وشرح طريقة عمل هذا النظام يتطلب مقالا مطولا منفصلا بذاته، ولكن سنعطى أهم الأفكار، والقارئ المهتم يمكنه الإطلاع على مقالات الفيزيائي N.Ashby المرجع (3).

أولا، نشير أن المعادلات (11)، والتي تعتبر مفتاحية لتحديد المواضع عبر حلها، هي معادلات يجب أن تُصاغ في معلم عطالي تكون فيه الميقاتيات متواقتة، ولهذا يجب اختيار معلم عطالي تتحرك بالنسبة إليه الأقمار الصناعية. هذا المعلم العطالي هو المعلم العطالي المركزي المرتبط بالأرض، ECI (Earth Centred Inertial). أي المعلم الذي يكون مبدؤه مركز الأرض ولا يدور مع الأرض، فهو مرجع في حالة سقوط حر مما يجعل منه مرجعا عطاليا لحظيا.

ثانيا، بما أن الأرض تدور بالنسبة لـ ECI، فإن الميقاتيات الساكنة على سطح الأرض والتي يتم استعمالها تصبح متحركة بالنسبة إليه، ولهذا يجب أخذ بعين الاعتبار تأثير هذا على وتيرة عمل الميقاتيات وكيفية مواقتة الأزمنة.

ثالثا، بدل استعمال ثلاثة أقمار صناعية لتحديد الموضع عبر حل المعادلات، عمليا يتم استعمال أربعة أقمار صناعية مزودة كلها بساعات أو ميقاتيات ذرية، فليس من العملي تزويد كل جهاز استقبال للاستعمال الشخصي على سطح الأرض بميقاتية ذرية، وعليه فإن المعادلات الأساسية التي يتم حلها

$$|\vec{r}_p - \vec{r}_i| = c(t - t_i), \quad i = 1, 2, 3, 4.$$

تأخذ الشكل التالي في ECI،

بهذا الشكل فإن المستعمل على سطح الأرض يحدد موقعه وكذلك يعرف الزمن بشكل دقيق جدا. تجدر الإشارة أيضا أنه لتغطية سطح الأرض كاملا لا بد من استعمال شبكة من الأقمار الصناعية لا تقل عن 24 قمرا صناعيا.

للتعامل مع إشكالية مواقتة الساعات الذرية المرتبطة بتأثير النسبية العامة والنسبة الخاصة يجب الأخذ بعين الاعتبار التأثيرات التالية:

1. التأثير الناتج عن كون الميقاتيات على ارتفاعات تقارب 20 ألف كلم من سطح الأرض.
2. التأثير الناتج عن النسبية الخاصة، حركة الميقاتية بالنسبة للمرجع العطالي ECI
3. تأثير دوران الأرض حول محورها.
4. تأثير شكل الأرض، فالأرض ليست كروية تماما بل مفلطحة أو إهليجية.

كل التأثيرات السابقة يتم جمعها ويتم تعديل وتيرة عمل الميقاتيات أو ترددها بحيث يتم جعلها تسير بوتيرة أبطأ (بحكم أن محصلة التأثيرات السابقة يجعل الميقاتيات تسير بوتيرة أسرع في مدارات الأقمار الصناعية)، ولا يتم تشغيل هذه الساعات إلا بعد أن تستقر في مدارها في الأعلى، وهذا لتفادي تأثير تسارعها وحركتها من لحظة إطلاق الصاروخ الحامل للقمر الصناعي من سطح الأرض إلى لحظة وضع القمر الصناعي في مداره

من المفيد هنا الإشارة أنه في بداية السبعينات وفي المراحل الأولى عندما بدأت فكرة استعمال الأقمار الصناعية تتبلور شكك بعض المهندسين المشرفين على المشروع في جدوى أخذ تأثير النسبية العامة والخاصة بعين الاعتبار، وظن بعضهم

أن الأمر لا يتعدى كونه شيئا نظريا وأن الميقاتيات ستعمل بشكل طبيعي، إلا أن الواقع أثبت أن تأثيرات النسبيتين العامة والخاصة على وتيرة عمل الساعات حقيقة تجريبية ملموسة ومؤثرة وليست مجرد تأثير وهمي أو نظري. لهذا فإنه يمكن القول إن التطبيق التجريبي والعملي الوحيد للنسبية هو في نظام تحديد المواضع. وبهذا الشكل، ومثلما أشرنا في مقدمة المقال، تكون دائرة العلاقة بين إشكالية الخرائط وكروية الأرض والهندسة والنسبية قد أغلقت. فما كان مجرد بداية لوضع أفضل خريطة لمساحات على سطح الأرض أصبح لاحقا من أسس الهندسة الريمانية والتي بدورها وفرت اللغة الرياضية التي توصف بها النسبية الخاصة والنسبية العامة أو الجاذبية، وفي الأخير تبين أنه من دون فهم النسبية الخاصة والعامة ما كان من الممكن بناء نظام تكنولوجي قادر على تحديد المواقع بدقة على سطح الأرض والسماح بالملاحة على سطح الأرض وفي الجو بدقة كبيرة من دون الحاجة للخرائط الكلاسيكية. فنظام تحديد المواضع العالمي أو GPS هو محصلة تطبيق النسبية (العامة والخاصة) والهندسة وفيزياء الكم وعلوم الحاسوب والتكنولوجيات الحديثة.

المراجع:

1. J.Milnor: A problem in cartography. Amer. Math,Monthly 76, 1969.
2. B.Rieman, On the Hypotheses which lie at the Bases of Geometry, Nature, volume 8, pages14-17 (1873)
3. N.Ashby, Relativity in the Global Positioning System, Living Rev. Relativity, 6, (2003), 1

تطور أجيال الخلايا الشمسية: مواد وتقنيات وتطبيقات

مصطفى الأعصر , الأستاذ بقسم الفيزياء, كلية العلوم, جامعة عين
شمس وجامعة الجلالة



ضوء الشمس إلى أقصى حد مع استخدام الخلايا عالية الكفاءة مثل زرنيخيد الجاليوم (GaAs). كما شهد أواخر القرن العشرين وأوائل القرن الحادي والعشرين أيضاً ظهور خلايا شمسية من الجيل الثالث، بما في ذلك البيروفسكايت، والنقطة الكمومية (Quantum dot)، والسلك النانوي (Nanowire)، والخلايا الترادفية (Tandem)، والتي تهدف إلى التغلب على قيود التقنيات التقليدية القائمة على السيليكون. ولذلك مكّنت هذه الابتكارات، إلى جانب التركيز على خفض التكاليف وتحسين الكفاءة، من اعتماد واسع النطاق على الخلايا الشمسية للتطبيقات السكنية والتجارية وعلى نطاق المرافق.

مازالت الخلايا الشمسية مستمرة في التطور كل يوم، مع تركيز الأبحاث على استحداث مواد وتقنيات جديدة ودمجها في تطبيقات جديدة مثل المباني المزودة بمنظومات لتوليد الطاقة الشمسية (Building-integrated photovoltaics (BIPV)) والمركبات التي تعمل بالطاقة الشمسية (EV)، مما يؤكد دورها الحاسم في الانتقال العالمي من الطاقات الأحفورية إلى الطاقات المتجددة. [1, 2]

تمهيد

قبل أن ننطلق في رحلة عبر الأجيال المختلفة لخلايا الشمسية سنقدم أولاً تعريفاً بالخلية الشمسية وتكوينها وأهم العمليات الفيزيائية التي تحدث فيها كي نستطيع تحويل الطاقة الشمسية إلى طاقة كهربائية:

الخلية الشمسية هي بنية إلكترونية-ضوئية (Optoelectronic Device) تصنع من مواد أشباه الموصلات مثل السيليكون كما بالشكل (1). تقوم الخلية بامتصاص الطاقة الضوئية من أشعة الشمس

يمثل تطور الخلايا الشمسية وأجيالها رحلة من الابتكار العلمي والتقدم التقني، مدفوعة بالحاجة إلى حلول الطاقة المستدامة. بدأت هذه الرحلة في عام 1954 عندما طور الباحثون في مختبرات بيل - داريل تشابين وكالفن فولر وجيرالد بيرسون - أول خلية شمسية عملية قائمة على السيليكون. مع كفاءة تقارب 6%، شكّل هذا الاختراع الرائد تحسناً كبيراً مقارنة بالمحاولات السابقة، مما وضع الأساس لصناعة الطاقة الكهروضوئية الحديثة. وعلى ذلك فقد اكتسب اعتماد الخلايا الشمسية زخماً خلال سباق الفضاء في أواخر الخمسينيات من القرن الماضي، ونظراً لخفة وزنها فقد أصبحت مصدراً موثوقاً لإنتاج الطاقة لا غنى عنه للأقمار الصناعية مثل القمر الصناعي فانجارد 1 (Vanguard 1)، الذي استخدم مصفوفة صغيرة من الخلايا الشمسية (Small solar cell Array) لإنتاج الطاقة. ولهذا فقد أصبحت الخلايا الشمسية الدعامة الأساسية لاستكشاف الفضاء خلال الستينيات والسبعينيات من القرن الماضي، ممّا يدل على إمكاناتها لحلول الطاقة عالية الأداء في البيئات الصعبة. مصفوفة خلايا شمسية صغيرة

من الثمانينيات إلى أوائل العقد الأول من القرن الحادي والعشرين، حوّلت التطورات - في علم المواد والتصنيع وتحسين الكفاءة - الخلايا الشمسية من مجرد تطبيقات متخصصة إلى حلول رئيسية لإنتاج الطاقة. وقد أضاف تطوير الخلايا الشمسية ذات الأغشية الرقيقة (Thin-Film) في السبعينيات من القرن الماضي ميزات هامة للخلايا الشمسية مثل المرونة، كما خفض ووفر في استخدام المواد، بينما قدّمت أنظمة الطاقة الكهروضوئية المركزة (Concentrated PV) مقاربات جديدة لزيادة امتصاص

- يُنشئ الفوتون الممتص زوجًا مرتبطًا مكونًا من إلكترون وثقب، يُعرف باسم الإكسيتون.
- في معظم الخلايا الشمسية، تتفكك هذه الإكسيتونات بسرعة إلى حاملات شحنة حرة (إلكترونات وثقوب) بسبب المجال الكهربائي الداخلي.

3. فصل الشحنة (Charge Separation):

- يلعب المجال الكهربائي عند الحد الفاصل للوصلة p-n في الخلية الشمسية دورًا حاسمًا حيث يقوم بفصل الإلكترونات والثقوب.

4. نقل حاملات الشحنة (Charge Carrier Transport)

- تتحرك حاملات الشحنة المنفصلة (الإلكترونات والثقوب) عبر طبقات النقل نحو الأقطاب الكهربائية المعنية حيث

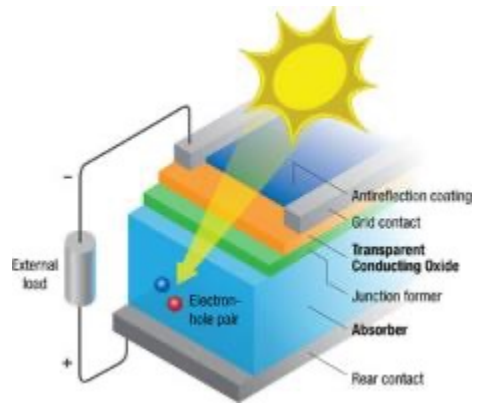
- يتم دفع الإلكترونات نحو الطبقة السالبة من شبه الموصل (n)، أو ما يعرف أيضًا بطبقة نقل الإلكترونات (Electron Transport Layer, ETL)

- كما يتم دفع الثقوب نحو الطبقة الموجبة من شبه الموصل (p)، أو طبقة نقل الثقوب (Hole Transport Layer, HTL)

- تحدث هذه العملية من خلال انجراف (Drift) حاملات الشحنة المتأثر بالمجال الكهربائي ثم الانتشار (Diffusion) الناتج عن تدرجات التركيز

5. تجميع حاملات الشحنة (Collection of Charge Carriers)

- عند الأقطاب الكهربائية يتم تجميع الإلكترونات عند القطب السالب (عادةً على الجزء الخلفي أو الجانبي من الطبقة السالبة من شبه الموصل n). كما يتم تجميع الفجوات عند القطب الموجب (عادةً على الجزء الأمامي أو الجانبي من الطبقة الموجبة من



الشكل 1: البنية الأساسية لخلايا الطاقة الشمسية التقليدية التي تعتمد على تقنية الجيل الأول (الخلايا الشمسية المصنوعة من السيليكون البلوري).

(الفوتونات) ثم تحولها إلى أزواج من الإلكترونات-ثقوب تفصل وتجمع عند الأقطاب ممّا يخلق تيارًا وجهدًا وبالتالي طاقة كهربائية.

العمليات الفيزيائية داخل الخلية الشمسية [3]

تعمل الخلايا الشمسية بناءً على التأثير الكهروضوئي، حيث تقوم بتحويل ضوء الشمس إلى كهرباء. يمكن تقسيم العمليات الفيزيائية التي تحدث داخل الخلية الشمسية إلى عدة خطوات رئيسية:

1. امتصاص الفوتونات (Photon Absorption):

- عندما يسقط ضوء الشمس (المؤلف من الفوتونات) على الخلية الشمسية، يتم امتصاص الفوتونات التي تمتلك طاقة كافية بواسطة مادة أشباه الموصلات (مثل السيليكون).

- تنقل الفوتونات الممتصة الطاقة إلى الإلكترونات في المادة، مما يثيرها من نطاق التكافؤ إلى نطاق التوصيل. هذا يخلق أزواجًا من الإلكترونات والثقوب
- يجب أن تتجاوز طاقة الفوتون ($E_{\text{photon}} = h\nu$) طاقة فجوة النطاق (E_g) لأشباه الموصلات، حيث h هو ثابت بلانك و ν هو تردد الضوء.

2. توليد وتفكك الإكسيتون (Exciton Generation and Dissociation)

شبه الموصل (p). يكمل هذا التجميع الدائرة، مما يسمح بتدفق التيار عندما تكون الخلية متصلة بحمل خارجي.

6. توليد الطاقة (Power Generation):

تُولد حركة حاملات الشحنة تيارًا كهربائيًا (I) في الدائرة الخارجية. تُنتج الخلية جهدًا (V) بسبب فرق الجهد عبر الوصلة p-n. تُعطى القدرة الكهربائية الناتجة بالعلاقة $P=I \times V$.

العمليات الداعمة الرئيسية (Key Supporting Processes)

إعادة التركيب (Recombination):

هي عملية غير مرغوب فيها داخل الخلية (Undesirable Process):

تحدث هذه العملية إذا تَجَمَّعت الإلكترونات والثقوب المولدة قبل أن تتمكن من الوصول إلى الأقطاب الكهربائية، وبذلك تُفقد الطاقة على شكل حرارة أو ضوء.

أنواع إعادة التركيب (Types of recombination):

- إعادة التركيب الإشعاعي (Radiative recombination): تُطلق الطاقة على شكل ضوء
- إعادة التركيب غير الإشعاعي (Non-radiative recombination): تُطلق الطاقة على شكل حرارة

الفقد الحراري (Thermalization):

تؤدي الفوتونات التي تمتلك طاقة أكبر من فجوة النطاق ($E_{\text{photon}} > E_g$) إلى إطلاق طاقة زائدة على شكل حرارة، مما يُقلل من الكفاءة.

الفقد الناتج عن الانعكاس والنفاذية (Reflection and Transmission Losses):

- تنعكس بعض الفوتونات عن سطح الخلية أو تمر عبرها دون أن تُمتص، مما يساهم في الخسائر

البصرية (optical losses).

يمكن أن تستخدم تلك العمليات الفيزيائية لنمذجة الخلايا الشمسية كالتالي:

نموذج تحليلي: المعادلات والمعاملات الرئيسية

لنمذجة الخلية الشمسية، نحتاج إلى مراعاة العديد من المعاملات والمعادلات الرئيسية [4]:
معادلة بواسون: تصف هذه المعادلة الجهد الكهروستاتيكي (Electrostatic) في مادة أشباه الموصلات

$$\frac{d^2\psi}{dx^2} = -\frac{q}{\epsilon_s}(p - n + N_D - N_A)$$

حيث ψ هو الجهد الكهروستاتيكي، و q هو شحنة الإلكترون، و ϵ_s هو ثابت العزل الكهربائي للسيليكون، و p هو تركيز الثقوب، و n هو تركيز الإلكترونات، و N_D هو تركيز الذرات المانحة، و N_A هو تركيز الذرات المستقبلة.

معادلات الاستمرارية (Continuity Equations): تصف هذه المعادلات حفظ تيارات الإلكترونات والفجوات في أشباه الموصلات.

$$\frac{dn}{dt} = \frac{1}{q} \frac{dJ_n}{dx} + G - R$$

$$\frac{dp}{dt} = -\frac{1}{q} \frac{dJ_p}{dx} + G - R$$

حيث J_n و J_p هما كثافة تيار الإلكترونات والثقوب، على التوالي، و G هو معدل توليد أزواج الإلكترونات والثقوب، و R هو معدل إعادة التركيب

معادلات كثافة التيار (Current Density Equations):

تُعطى كثافة التيار للإلكترونات والثقوب بالعلاقيتين

$$J_n = qn\mu_n E + qD_n \frac{dn}{dx}$$

$$J_p = qp\mu_p E - qD_p \frac{dp}{dx}$$

كثافة التيار (Current Density):

تُحسب كثافة التيار J_n و J_p باستخدام توزيعات حاملات الشحنة والمجال الكهربائي الذي تم الحصول عليه

خصائص التيار والجهد (IV Characteristics):

تدمج كثافات التيار لإيجاد التيار الكلي كدالة للجهد المطبق (خصائص التيار والجهد)

لحساب تأثير الإضاءة على الخلية الشمسية، يجب أخذ معدل توليد أزواج الإلكترونات والثقوب G الناتج

عن امتصاص الضوء في الاعتبار

$$G(x) = \alpha I_0 e^{-\alpha x}$$

حيث α يمثل مُعامل الامتصاص، و I_0 هو شدة الضوء الساقط على سطح الخلية الشمسية، و x هي المسافة من سطح الخلية إلى النقطة التي يُقاس عندها الامتصاص. تؤخذ في الاعتبار آليات إعادة الاتحاد مثل إعادة التركيب من نوع شوكل-ريد هول (SRH)، وإعادة التركيب الإشعاعي، وإعادة التركيب لعملية أوجيه (Auger). يمكن نمذجة معدل إعادة الاتحاد R على النحو التالي

$$R = \frac{np - n_i^2}{\tau_n(n + n_1) + \tau_p(p + p_1)}$$

حيث τ_n و τ_p هما عُمر حاملات الشحنة (للإلكترونات والثقوب، على التوالي)، و n_i هو تركيز حاملات

الشحنة الذاتية (Intrinsic Carrier)

وفي النهاية يتم الحصول على معاملات الخلية الشمسية مثل: جهد الدائرة المفتوحة (V_{oc})، وتيار الدائرة القصيرة (V_{sc})، وعامل الملء (FF)، والكفاءة

(η)

يوفر هذا النهج التحليلي فهمًا أساسيًا لفيزياء النبائط (Devices) ويساعد في تصميم وتحسين الخلايا الشمسية للحصول على معاملات خلية مُثلى

حيث μ_n و μ_p هما حركية (Mobility) الإلكترونات والثقوب، على التوالي. D_n و D_p هما معاملات الانتشار (Diffusion Coefficient) للإلكترونات والثقوب، على التوالي، و E هو المجال الكهربائي. المقدار الأول في كل معادلة يعبر عن الانجراف (Drift)، وهو ناشئ عن المجال الكهربائي، أما المقدار الثاني فيعبر عن الانتشار (Diffusion) والذي يعتمد على تدرج تركيز حاملات الشحنة

الشروط الحدية (Boundary Conditions):

يتم تحديد الشروط الحدية المناسبة لوصلة p-n عادةً عند حواف منطقة النضوب (Depletion)، حيث تُستخدم الشروط التالية: الجهد الداخلي V_{bi} عبر الوصلة. ومستويات فيرمي (Quasi-Fermi) للإلكترونات والثقوب. والشروط الحدية عند الوصلات الأومية (Ohmic Contacts) (يفترض تركيزات ثابتة لحاملات الشحنة)

لحل المعادلات تحليليًا نقوم باتباع الخطوات التالية:

تقريب النضوب (Depletion Approximation):

يفترض أن منطقة النضوب خالية من حاملات الشحنة الحرة. تُعطى كثافة الشحنة في منطقة النضوب بدلالة الشوائب المُؤَيَّنة (Ionized Dopants)

$$\rho(x) = q(N_D - N_A)$$

تُحل معادلة بواسون في منطقة النضوب لإيجاد المجال الكهربائي والجهد ($\psi(x)$ and $E(x)$)

$$E(x) = -\frac{d\psi}{dx}$$

توزيع حاملات الشحنة (Carrier Distribution):

تُحلُّ معادلات الاستمرارية خارج منطقة النضوب، بافتراض ظروف الحالة المستقرة

($dn/dt=0$ and $dp/dt=0$).

والان تبدأ رحلتنا عبر تطور الخلايا الشمسية واجيالها الثلاثة

أجيال الخلايا الشمسية [5]

الجيل الأول: خلايا السيليكون البلورية الشمسية

الوصف:

• تستخدم خلايا الجيل الأول السيليكون البلوري كمادة أساسية. وتعتمد على بنية الصمام الثنائي التقليدية p-n (شكل (1))

الأنواع:

• السيليكون أحادي البلورة (c-Si): مصنوع من بلورة سيليكون واحدة، مما يوفر أعلى كفاءة بين خلايا الجيل الأول

• السيليكون متعدد البلورات (poly-Si): يتكون من بلورات سيليكون متعددة، مع كفاءة أقل قليلاً، ولكن بتكاليف إنتاج أقل

الميزات الرئيسية:

• كفاءة عالية (15-27%)

• استقرار ومتانة (stability and durability) عالية.

• تكلفة تصنيع باهظة الثمن بسبب العمليات كثيفة الطاقة

التطبيقات:

تستخدم على نطاق واسع في توليد الطاقة للمحلات السكنية والتجارية وعلى نطاق المرافق

الجيل الثاني: الخلايا الشمسية الرقيقة (Thin-Film)

الوصف:

• تركز خلايا الجيل الثاني على تقليل استخدام المواد وتكاليف الإنتاج باستخدام تقنية الأغشية الرقيقة

• تُترسب المواد النشطة في طبقات رقيقة على ركائز مثل الزجاج أو المعدن أو البلاستيك

الأنواع:

• السيليكون غير المتبلور (a-Si): سيليكون غير بلوري؛ مرن وخفيف الوزن ولكنه ذو كفاءة أقل

• تيلوريد الكاديوم (CdTe): يُوفّر كفاءة أفضل وتكلفة منخفضة ولكنه يثير مخاوف بيئية بسبب الكاديوم السام

• سيلينيد نحاس إنديوم غاليوم: (Copper Indium Gallium Selenide, CIGS) كفاءة عالية في الأغشية الرقيقة، مع مرونة أفضل من السيليكون البلوري

الميزات الرئيسية:

• كفاءة أقل (6-20%) مقارنة بخلايا الجيل الأول.

• خفيف الوزن ومرن، مما يُتيح التكامل في المباني والأجهزة المحمولة

• عمليات تصنيع أسهل وأرخص.

التطبيقات:

مثالي للمنشآت واسعة النطاق والتطبيقات المحمولة، مثل الأسطح خفيفة الوزن أو المنحنية

الجيل الثالث: الخلايا الشمسية الناشئة والمتقدمة

الوصف:

• يستكشف الجيل الثالث من الخلايا الشمسية موادًا ومفاهيم متقدمة للتغلب على قيود الكفاءة والتكلفة في الأجيال السابقة

• تهدف هذه التقنيات إلى تحقيق كفاءة ومرونة واستدامة أعلى باستخدام أساليب جديدة

الأنواع الرئيسية:

• خلايا البيروفسكايت الشمسية:

مواد البيروفسكايت هي فئة من المركبات ذات بنية بلورية مُحددة، تكتب عمومًا بالصيغة ABX₃، حيث A (كاتيون أحادي التكافؤ (مثل ميثيل الأمونيوم (MA) أو فورماميدينيوم (FA) أو السيزيوم (Cs)

مما يُتيح التكامل في الإلكترونيات القابلة للارتداء والخلايا الكهروضوئية المُدمجة في المباني (BIPV) • التسامح مع العيوب (Defect Tolerance): على عكس العديد من أشباه الموصلات بما في ذلك السيليكون، تعمل البيروفسكايت بشكل جيد على الرغم من كثافة العيوب العالية فيها، مما يُقلل الحاجة إلى تنقية المواد المُكلفة

أما عن التحديات التي تواجه البيروفسكايت فهي تشمل الاستقرار وقابلية التوسع (Stability and Scalability)

• الخلايا الشمسية العضوية (OSCs):
 • تستخدم جزيئات صغيرة أو بوليمرات عضوية مثل (P3HT-PCBM)

• خفيفة الوزن ومرنة وسهلة التصنيع و ذات كفاءات تصل إلى 18% مثل (PM6:Y6, PM6:Y7)

• خلايا النقاط الكمومية الشمسية:
 • تستغل التأثيرات الكمومية لتعزيز امتصاص الضوء.
 • إمكانية تحقيق كفاءة عالية وتكلفة منخفضة، لكنها لا تزال في مراحل البحث

• الخلايا الشمسية متعددة الوصلات:
 • تستخدم طبقات متعددة من المواد لامتصاص أطوال موجية مختلفة من الضوء
 • كفاءة عالية للغاية أكبر من (40)% ، (لكنها باهظة الثمن)

• الخلايا الشمسية المحسّنة بالصبغة (DSSCs):
 • تستخدم الأصباغ لامتصاص ضوء الشمس وتوليد الإلكترونات
 • سهلة التصنيع ولكنها ذات كفاءات أقل من 10%.

الميزات الرئيسية للجيل الثالث:

• إمكانية تحقيق كفاءة عالية جدا (أكبر من 40%

B (كاتيون فلزي ثنائي التكافؤ) مثل الرصاص (Pb) أو القصدير (Sn)
 X (أنيون هاليد) مثل الكلوريد (Cl) أو البروميد (Br) أو اليوديد (I)

لقد اكتسبت هذه المواد حديثا اهتمامًا كبيرًا في مجال الخلايا الكهروضوئية نظرًا لخصائصها البصرية والإلكترونية الممتازة وإنتاجها منخفض التكلفة وتعدد استخداماتها

الخصائص الرئيسية لمواد البيروفسكايت

• معامل امتصاص عالي: تمتص البيروفسكايت طيفًا واسعًا من ضوء الشمس بكفاءة، ولا تتطلب سوى طبقات رقيقة (~ 300 نانومتر) لالتقاط معظم الفوتونات

• فجوة نطاق قابلة للضبط (Tunable Bandgap):
 عن طريق تغيير التركيب (على سبيل المثال، استبدال الهاليدات أو الكاتيونات المعدنية)، يُمكن ضبط فجوة النطاق للبيروفسكايت بين 1.2 و 2.3 إلكترون فولت، مما يسمح بالتحسين لتطبيقات مُحددة مثل الخلايا الشمسية الترادفية

• تراكيب مختلفة: منها مواد ثنائية وثلاثية الأبعاد وهجين من الإثنين

• كفاءة عالية: حققت خلايا البيروفسكايت الشمسية كفاءات تحويل طاقة تتجاوز 25% في بيئات المختبرات، تنافس خلايا السيليكون الشمسية التقليدية

• تصنيع منخفض التكلفة: تُمكن العمليات القائمة على المحاليل (Solution Processing) مثل طلاء الدوران وطباعة نفث الحبر وطلاء الشفرة من إنتاج غير مُكلف وقابل للتطوير

• تعدد الاستخدامات: يُمكن تطبيق البيروفسكايت على ركائز مُختلفة، بما في ذلك المواد المرنة،

- يتم تقطيع سبيكة السيليكون الناتجة إلى رقائق (Wafers) باستخدام مناشير أسلاك ماسية
- يتم تنميط (Texturing) أسطح الرقاقة لتقليل الانعكاس وتعزيز امتصاص الضوء

في الخلايا الترادفية

- التكامل مع الأسطح والأجهزة غير التقليدية.
- استخدام مواد وفيرة وصديقة للبيئة.

التطبيقات:

- خلايا السيليكون الشمسية متعددة البلورات
- التقنية: الصب والتصلب (Casting and Solidification)
- يُسكب السيليكون المُنصهر في قالب ويُترك ليبرد، مما يُشكّل بلورات صغيرة متعددة

- الخلايا الكهروضوئية المتكاملة مع المباني (BIPV).
- الإلكترونيات القابلة للارتداء.
- استكشاف الفضاء والاستخدامات المتخصصة.
- جدول يبين مقارنة مختصرة بين الأجيال الثلاثة للخلايا الشمسية

- يتم تقطيع الكتلة الناتجة إلى رقائق، على غرار تصنيع البلورات الأحادية
- يتم تطبيق عمليات تنميط السطح والتطعيم لتشكيل

الوصف	الجيل الأول	الجيل الثاني	الجيل الثالث
المواد	السيليكون البلوري	الأغشية الرقيقة (a-Si, CIGS, CdTe)	البيروفسكايت، المواد العضوية، النقاط الكمومية، الخ.
الكفاءة	عالية (15-27%)	معتدل (6-20%)	عالية إلى عالية جدًا (10-40% أو أكثر)
التكلفة	عالية	معتدلة إلى منخفضة	تختلف (بعضها منخفض التكلفة، وبعضها الآخر باهظ الثمن)
التصنيع	كثيفة الطاقة	استخدام أوفر للمواد، وأكثر مرونة	التقنيات المستخدمة متقدمة لكن هناك مشكلة قابلية التوسع (scalability)
التطبيقات	أنظمة المرافق العامة وأنظمة الأسطح	أنظمة محمولة ومرنة	التطبيقات المتخصصة والمستقبلية
الأثر البيئي	عالية (إنتاج كثيف الطاقة)	معتدل (بعض المواد سامة)	تختلف (بعضها يستخدم مواد صديقة للبيئة)

وصلة (p-n)

تقنيات تصنيع أجيال الخلايا الشمسية

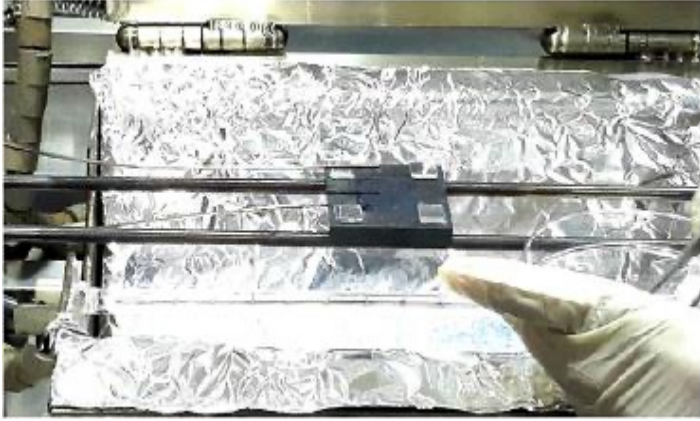
- الخطوات الرئيسية في تصنيع الجيل الأول
- التطعيم (Doping): إدخال شوائب من المجموعة p أو شوائب من المجموعة الخامسة مثل الفوسفور لتكوين النوع n.
- الطلاء المضاد للانعكاس (Anti-Reflective Coating): تستخدم مواد مثل نيتريد السيليكون لتقليل انعكاس الضوء
- الوصلات المعدنية (Metallic Contacts): إضافة خطوط شبكية موصلة (مسرى أمامي) وطبقة معدنية خلفية (مسرى خلفي)
- التغليف (Encapsulation): يستخدم لتغليف الرقائق مواد مثل الزجاج والبلاستيك أو البوليمرات للحماية من التلف البيئي

تختلف تقنيات تصنيع الخلايا الشمسية من الجيل الأول والثاني والثالث بناءً على تركيبها المادي وهيكلها وتطبيقاتها المُستهدفة. فيما يلي بعض التفاصيل لأساليب التصنيع المُستخدمة لكل جيل خلايا الجيل الأول الشمسية: السيليكون البلوري تستخدم خلايا الجيل الأول الشمسية السيليكون البلوري كمادة أساسية، ويتم تصنيعها باستخدام عمليات متعارف عليها منذ زمن وتعتبر عمليات مستهلكة للطاقة بشكل كثيف وتعتبر هذه واحدة من عيوب الجيل الأول

خلايا السيليكون الشمسية أحادية البلورة

- التقنية: عملية تشوخرالسكي (Czochralski (CZ))
- تُزرع بلورة سيليكون واحدة من بلورة بذرة (Seed Crystal) في حمام سيليكون مُنصهر

- تُستخدم أكاسيد موصلة شفافة (TCOs) كأقطاب تلامس أمامية (Front Contact)



جهاز يستخدم تقنية الـ CSS. [المصدر](#)

خلايا سيلينيد نحاس إنديوم غالسيوم (CIGS) الشمسية

التقنيات: التبخر المشترك أو الرش المهبطي (Co-) (evaporation or Sputtering)

- يتم تبخير أو رش المواد الأولية المعدنية (Metal precursors) (وهي النحاس والإنديوم والجالسيوم) بشكل مشترك على ركيزة، متبوعًا بعملية سيلينة (selenization) لتشكيل طبقة CIGS

- تستخدم طبقة TCO كقطب تلامس أمامي، وتُكمل طبقة التلامس المعدنية الخلفية البناء الهيكلي للخلاية



صنع خلايا شمسية باستخدام التبخر أو الرش المهبطي.

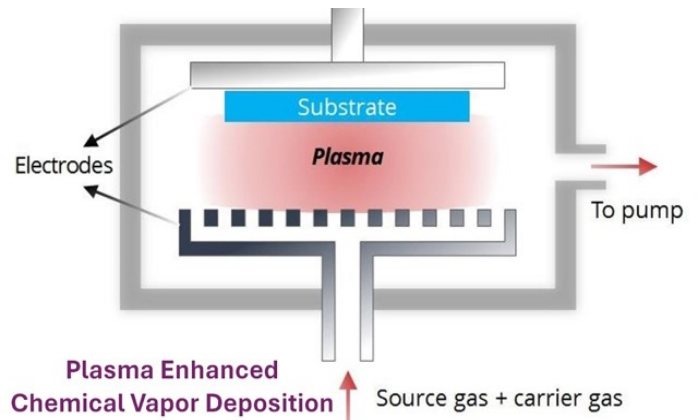
[المصدر](#)

خلايا الجيل الثاني الشمسية: تقنيات الأغشية الرقيقة

تستخدم خلايا الجيل الثاني الشمسية طبقات رقيقة من المواد الفعالة (Active layers) المترسبة على ركائز (Substrates)، مما يوفر في كمية المواد المستخدمة (وتعتبر هذه من أهم ميزات هذا الجيل) كما يتيح عمل تصميمات خلايا مرنة

خلايا السيليكون غير المتبلور (a-Si) الشمسية التقنية: ترسيب البخار الكيميائي المعزز بالبلازما (Plasma-Enhanced Chemical Vapor Deposition) (PECVD)

- يترسب السيليكون كطبقة رقيقة على ركيزة (مثل الزجاج أو المعدن أو البلاستيك) باستخدام عملية معززة بالبلازما
- تُرسب الطبقات بالتتابع لتشكيل بنية وصلة p-i-n. وتستكمل باقي طبقات الخلية

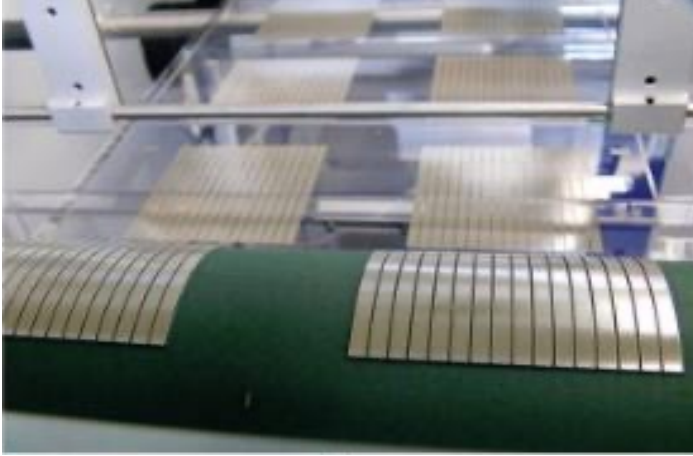
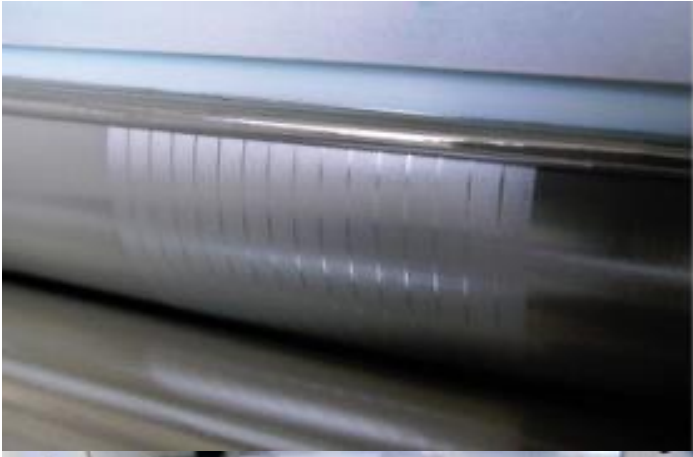


جهاز يستخدم تقنية الـ PECVD. [المصدر](#)

خلايا تيلوريد الكاديوم (CdTe) الشمسية

التقنية: التسامي قريب المسافة (Close-Spaced Sublimation) (CSS)

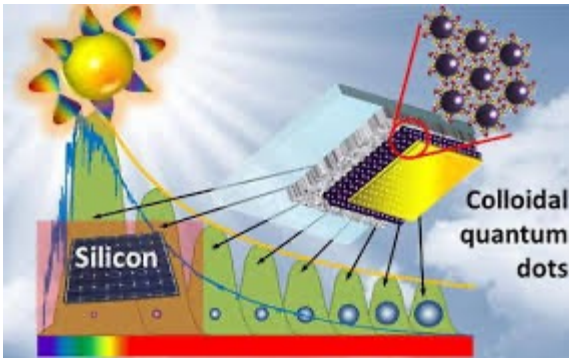
- يتم تبخير مادة تيلوريد الكاديوم وتكثيفها على ركيزة، مما يشكل طبقة رقيقة منتظمة (Uniform Thin-Film)



تقنية الطباعة من لفّة إلى لفّة في صنع خلايا شمسيّة عضويّة.

[المصدر](#)

خلايا النقاط الكمومية الشمسية (Quantum Dot)



خلايا شمسيّة قائمة على النقاط الكموميّة. [المصدر](#)

- **التقنية:** التخليق الغرواني (Colloidal Synthesis)
- تُخلَق النقاط الكمومية كجسيمات نانوية وتُدمج في طبقات فعالة (Active Layers) باستخدام طلاء الدوران أو معالجة المحاليل (Solution Processing)
- تُضاف طبقات لتسهيل نقل الشحنة (Charge)

الخطوات الرئيسية في تصنيع الجيل الثاني

- تحضير الركيزة: تنظيف وتنميط الركائز لتحسين الالتصاق والكفاءة
- ترسيب المواد: ترسيب طبقات رقيقة باستخدام عمليات كيميائية أو يتم الترسيب في الفراغ
- التلدين (Annealing): التسخين لتحسين تبلور المواد وتحسين الخصائص الإلكترونية
- التغليف: تغلف الطبقات للحماية من التدهور البيئي

خلايا الجيل الثالث الشمسية: التقنيات الناشئة والمتقدمة

- تُدمج خلايا الجيل الثالث الشمسية موادًا وتقنيات وتصميمات ومفاهيم جديدة لتحقيق كفاءة عالية جدًا وتستخدم في بعض التطبيقات المتخصصة
- خلايا البيروفسكايت الشمسية

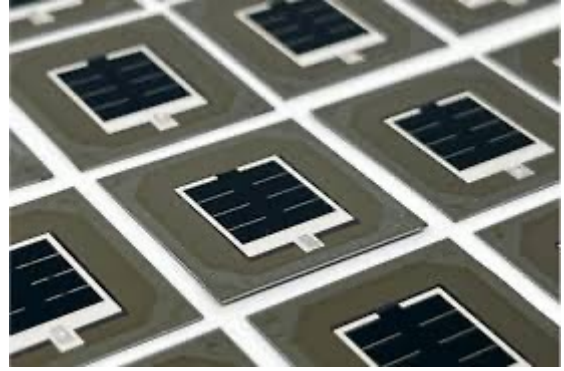
التقنية: معالجة المحاليل

- تُرسب مواد البيروفسكايت على ركائز عن طريق طلاء الدوران (Spin Coating) أو طباعة نفث الحبر (Inkjet Printing) أو طلاء الشفرة (Blade Coating)
- يستخدم التلدين بعد الترسيب لتحسين جودة التبلور والاستقرار (Crystallinity and Stability)
- الخلايا الشمسية العضوية (Organic Solar Cells OSCs)

التقنيات: الطباعة من لفّة إلى لفّة وطلاء الدوران (Roll-to-Roll Printing and Spin Coating)

- تُرسب البوليمرات العضوية أو الجزيئات الصغيرة (Small Molecules) على ركائز مرنة
- تُبنى الخلايا كهياكل متعددة الطبقات باستخدام تقنيات الطباعة (Printing Techniques) للإنتاج القابل للتطوير (Scalable Production)

Transport Layers) لتعزيز الأداء الخلايا الشمسية الترادفية (Tandem)



خلايا شمسية ترادفية. [المصدر](#)

التقنية: تكديس الطبقات (Layer Stacking)

- تُرسب مواد مختلفة (مثل البيروفسكايت والسيليكون ومواد أخرى) كطبقات مُكدسة وتكوين عدة وصلات لامتصاص أجزاء مختلفة من الطيف الشمسي
- تُعد المحاذاة الدقيقة للطبقات أمراً بالغ الأهمية لتقليل الخسائر (Losses)

الخطوات الرئيسية في تصنيع الجيل الثالث

- تخليق المواد: إنشاء مواد متقدمة مثل البيروفسكايت والنقاط الكمومية والبوليمرات العضوية
- تحسين الطبقات: ضمان السمك المناسب وهندسة الواجهة لتحقيق أقصى أداء
- تحسينات الاستقرار (Stability): معالجة التحديات مثل تدهور الكفاءة في خلايا البيروفسكايت الشمسية من خلال التغليف والمواد المضافة (Additives)

لقد تطورت تقنيات تصنيع الخلايا الشمسية بشكل كبير عبر الأجيال، مما يعكس التقدم في المواد

مقارنة بين تقنيات التصنيع

الجيل	المواد	التقنية
الجيل الأول	السيليكون البلوري (أحادي ومتعدد)	عملية CZ، الصب، التنميط
الجيل الثاني	السيليكون غير المتبلور، <u>CdTe</u> ، CIGS	PECVD، CSS، التبخر المشترك
الجيل الثالث	بيروفسكايت، مواد عضوية، نقطة كمية	Solution Processing, Roll-to-Roll

والكفاءة وقابلية التوسع. بينما تعتمد خلايا السيليكون البلورية من الجيل الأول على عمليات كثيفة الطاقة، تُركز تقنيات الأغشية الرقيقة من الجيل الثاني على كفاءة المواد والمرونة. تدفع خلايا الجيل الثالث حدود الابتكار في الخلايا الكهروضوئية، حيث تستخدم أساليب الترسيب والتخليق المتقدمة لاستكشاف مواد وهياكل جديدة. كما يستحدث تصميم تقنيات كل جيل خصباً لنقاط قوته الفريدة، مما يدفع اعتماد واستخدام الطاقة الشمسية عالمياً عبر تطبيقات متنوعة

يُظهر تطور تقنية الخلايا الشمسية من الجيل الأول إلى الجيل الثالث تحولاً من حلول عالية الكفاءة وكثيفة المواد إلى تصميمات فعالة من حيث التكلفة في استخدام المواد وطاقة التصنيع كما تتميز بأنها تصميمات مبتكرة. ولاسيما خلايا الجيل الثالث التي تحمل وعداً بالطاقة الشمسية المستدامة وعالية الأداء (ولا سيما مواد البيروفسكايت) ولكنها تواجه تحديات في الاستقرار وقابلية التوسع والتسويق. ومن المحتمل أن تؤدي الأبحاث المستمرة إلى تحقيق تطور في أداء جميع الأجيال الثلاثة، مما يضمن بقاء الطاقة الشمسية تقنية محورية لتلبية احتياجات الطاقة العالمية

وبعد أن قدمنا لتطور الأجيال المختلفة والتقنيات المستخدمة في التصنيع، لنبدأ رحلتنا مع الخلايا الشمسية من خلال أهم مادة من مواد الطاقة غير العضوية (Inorganic) والتي تمثل الجيل الأول،

السيلايكون.

في بعض الأحيان، قد يتساءل المرء لماذا يتمتع السيليكون بكل هذه السمعة والكفاءة والموثوقية في أسواق الخلايا الشمسية؟

هيمن السيليكون على صناعة الطاقة الكهروضوئية (PV) لعدة أسباب رئيسية، نابعة من مزاياه الفيزيائية، والكيميائية، والاقتصادية والتكنولوجية. جعلت هذه العوامل السيليكون المادة المفضلة لمعظم الخلايا الشمسية التجارية، على الرغم من ظهور مواد بديلة كثيرة جداً. واليك بعض الأسباب

الأسباب الرئيسية لهيمنة السيليكون

1. الوفرة والتوفر (Abundance and Availability)

ه وفرة قشرة الأرض: السيليكون هو ثاني أكثر العناصر وفرة في قشرة الأرض بعد الأكسجين، مما يجعله متاحاً على نطاق واسع للاستخراج والإنتاج. تضمن هذه الوفرة سلسلة توريد مستقرة وفعالة من حيث التكلفة

ه الاستدامة: تُساهم وفرة الطبيعة في استدامته كمادة خام، مما يُقلل من المخاوف بشأن النضوب أو مخاطر الإمداد الجيوسياسية

2. خصائص المواد المفهومة جيداً

ه خصائص أشباه الموصلات: يتمتع السيليكون بطاقة فجوة نطاق مثالية (~ 1.1 إلكترون فولت) لتطبيقات الخلايا الكهروضوئية، مما يُتيح تحويلًا فعالاً لأشعة الشمس إلى كهرباء

ه استقرار عالي: السيليكون مستقر كيميائياً ومقاوم للتدهور البيئي، مما يضمن خلايا شمسية طويلة الأمد (20-25 عام)

ه عدم السمية: على عكس الكاديوم (في خلايا CdTe) أو الرصاص والسيزيوم (في بعض خلايا

البيروفسكايت)، فإن السيليكون غير سام وآمن بيئياً
3. النضج التكنولوجي

ه صناعة راسخة: يُستخدم السيليكون في صناعة أشباه الموصلات منذ عقود، وعمليات تصنيعه (مثل نمو البلورات والتطعيم ومعالجة الرقائق) متطورة جداً

ه التكيف مع صناعة الخلايا الكهروضوئية: تم تكييف البنية التحتية والمعرفة الحالية في صناعة أشباه الموصلات لإنتاج الخلايا الكهروضوئية، مما يُقلل الحاجة إلى تقنيات واستثمارات جديدة

ه تصنيع قابل للتطوير: التقنيات مثل طريقة تشوخرالسكي (Czochralski method) لتصنيع السيليكون أحادي البلورة والصب للسيليكون متعدد البلورات قابلة للتطوير وفعالة
4. الكفاءة والأداء

ه كفاءة عالية: تُوفّر خلايا السيليكون الشمسية، وخاصة أحادية البلورة، كفاءات عالية (تصل إلى 27% في ظروف المختبر و 20-22% تجارياً)، مما يجعلها قادرة على المنافسة القوية

ه استقرار طويل المدى: تحافظ الخلايا الشمسية القائمة على السيليكون على أدائها على مدى عقود مع حد أدنى من التدهور، مما يوفر إنتاجاً موثوقاً للطاقة بعكس خلايا أخرى مثل (العضوية والبيروفسكايت)

5. التنافسية من حيث التكلفة

ه انخفاض التكاليف: على مر السنين، انخفضت تكلفة إنتاج السيليكون وتصنيع الخلايا الشمسية بشكل كبير بسبب التقدم التكنولوجي واقتصاديات الحجم (economies of scale)

ه إعادة التدوير: خلايا السيليكون الشمسية قابلة

والسيليكون الأسود، تعالج هذه القيود، مما يضمن استمرار ريادتها في السوق لفترات زمنية طويلة في المستقبل

الهيكل الأساسي لخلايا السيليكون الشمسية

يتكون الهيكل الأساسي لخلية السيليكون الشمسية من طبقات ومكونات مصممة لتحويل ضوء الشمس إلى كهرباء بكفاءة. قد يختلف الهيكل قليلاً اعتماداً على نوع السيليكون المستخدم - البلوري أو متعدد البلورات أو غير المتبلور - لكن الهيكل الأساسي يتضمن العناصر الرئيسية التالية

- طبقة التوصيل الأمامية (طبقة موصلة شفافة): كانت تستخدم بعض الأصابع المعدنية الدقيقة للتوصيل أو خطوط شبكة معدنية على السطح الأمامي ولكنها تسبب بعض التظليل فتقلل من وصول الشمس للخلية

- يمكن استبدال تلك الشبكة المعدنية الأمامية بطبقة رقيقة من مادة شفافة موصلة (CTO)، مثل أكسيد قصدير الإنديوم (ITO)، تسمح بمرور ضوء الشمس مع جمع التيار الكهربائي المُتولد.

- الطلاء المُضاد للانعكاس: تُقلل هذه الطبقة من الانعكاس، مما يضمن دخول أقصى قدر من ضوء الشمس إلى الخلية. تُستخدم مواد مثل نيتريد السيليكون بشكل شائع

- الوصلة الثنائية (pn): جوهر الخلية الشمسية هو وصلة p-n، حيث تلتقي طبقتان من السيليكون المطعم بشكل مختلف

- السيليكون من النوع n: غني بالإلكترونات الحرة بسبب التطعيم بعناصر مثل الفوسفور

- السيليكون من النوع p: غني بـ "الثقوب" (نقص الإلكترونات) بسبب التطعيم بعناصر مثل البورون

لإعادة التدوير، مما يزيد من فعاليتها من حيث التكلفة على المدى الطويل

6. التنوع والتوافق

- قابلية تطبيق واسعة: يُمكن استخدام السيليكون في تقنيات الطاقة الشمسية المختلفة، بما في ذلك التصميمات أحادية البلورة ومتعددة البلورات والأغشية الرقيقة، مما يجعله متعدد الاستخدامات لتطبيقات مختلفة، كما يشارك في بناء خلايا ترادفية مع مواد أخرى كثيرة

- التكامل مع الأنظمة الحالية: يُمكن دمج الخلايا القائمة على السيليكون بسهولة في البنية التحتية للطاقة الحالية، مما يعزز هيمنتها بشكل أكبر

7. الموثوقية وقابلية التمويل

- ثقة السوق: بنى السجل الطويل لأداء السيليكون وموثوقيته ثقة بين المستثمرين والمُصنعين والمستهلكين

- الجدوى المالية: تُعتبر تقنية الخلايا الكهروضوئية للسيليكون الراسخة استثماراً منخفض المخاطر، مما يُشجع على اعتمادها على نطاق واسع

التحديات والمنافسة

بينما يهيمن السيليكون على صناعة الخلايا الكهروضوئية، فإنه يواجه تحديات مثل

- عمليات الإنتاج كثيفة الطاقة (مثل تنقية السيليكون وتقطيع الرقائق)

- امتصاص محدود للضوء مقارنة بالمواد المتقدمة مثل البيروفسكايت أو الخلايا متعددة الوصلات

ومع ذلك، تُعالج التحسينات المستمرة في تقنيات تصنيع خلايا السيليكون، مثل خلايا الباعث المُشبع وطبقة التوصيل الخلفي (passivated emitter and rear contact (PERC)) والخلايا الترادفية

- كفاءة أقل (عادةً 15-20%) مقارنة بالسيليكون البلوري
- أقل تكلفة قليلًا في الإنتاج.
- التطبيقات : شائع في التركيبات الشمسية السكنية والتجارية نظرًا لانخفاض التكلفة
- 3. السيليكون غير المتبلور (a-Si) :
 - الهيكل : يتم ترتيب ذرات السيليكون في بنية غير بلورية (مُختلة). الطبقة الفعالة رقيقة جدًا (بضعة ميكرونات)
 - الخصائص:
 - كفاءة أقل (6-10%).
 - مرن وخفيف الوزن، ومناسب لتطبيقات الأغشية الرقيقة
 - أداء أفضل في ظروف الإضاءة المنخفضة.
 - التطبيقات: يُستخدم في الأجهزة صغيرة الحجم (مثل الآلات الحاسبة) والألواح الشمسية خفيفة الوزن أو المحمولة
 - لكل نوع من أنواع السيليكون مزايا وعيوب خاصة، ويعتمد الاختيار على التطبيق المُحدد وقيود التكلفة ومتطلبات الكفاءة

تطبيقات خلايا السيليكون الشمسية [2]

- أولاً: خلايا السيليكون الشمسية أحادية البلورة تُصنع الخلايا الشمسية أحادية البلورة من بنية سيليكون أحادية البلورة، مما يضمن كفاءة عالية ومظهرًا موحدًا. في حين أن تكلفة إنتاجها مرتفعة نسبيًا، إلا أن إنتاج الطاقة الفائض لكل وحدة مساحة يجعلها مثالية للتطبيقات التي تُعد فيها الكفاءة أمرًا بالغ الأهمية
- تركيبات الأسطح السكنية: تُستخدم الألواح أحادية البلورة على نطاق واسع في البيئات السكنية نظرًا

- يخلق المجال الكهربائي عند التقاطع أزواجًا من الإلكترونات والثقوب الناتجة عن امتصاص ضوء الشمس
- الطبقة الأساسية (السيليكون): الطبقة الأكثر سمكًا هي من السيليكون حيث يحدث معظم امتصاص الضوء وتوليد أزواج من الإلكترونات والثقوب. يعتمد السُمك على نوع السيليكون
- مجال السطح الخلفي (BSF) ((Back Surface Field: طبقة في الجزء الخلفي من الخلية الشمسية مصممة لعكس الضوء غير الممتص مرة أخرى إلى الطبقة الفعالة، مما يزيد من حبس الضوء وإعادة التدوير والكفاءة
- طبقة التوصيل الخلفية: طبقة موصلة في الجزء الخلفي من الخلية تجمع التيار الكهربائي وتعمل كطرف سالب
- الاختلافات الهيكلية حسب نوع السيليكون
- 1. السيليكون البلوري (c-Si):
 - الهيكل: تُصنع خلايا السيليكون البلورية من بلورة واحدة أو بلورات متعددة ذات بنية شبكية جيدة الترتيب
 - الخصائص:
 - كفاءة عالية (تصل إلى 27% في ظروف المختبر).
 - صلب وسميك (180-200 ميكرون).
 - التطبيقات : تُستخدم في تطبيقات عالية الأداء والألواح الشمسية التجارية
- 2. السيليكون متعدد البلورات (poly-Si) :
 - الهيكل: مصنوع من بلورات سيليكون صغيرة متعددة مدمجة معًا. تحتوي هذه على حدود حبيبية تشتت الضوء وتُقلل من حركة الإلكترونات
 - الخصائص:

ملخص للاختلافات المعمارية الرئيسية

الوصف	بلوري (c-Si)	متعدد البلورات (poly-Si)	غير متبلور (a-Si)
البنية البلورية	احادي البلورة	متعدد البلورة	غير بلوري
السُمك	سميكة (180-200 ميكرومتر)	سميكة (180-200 ميكرومتر)	رقيقة (>1 ميكرومتر)
الكفاءة	عالية (20-27%)	معتدل (15-20%)	منخفض (6-10%)
التكلفة	عالية	معتدل	منخفض
المرونة	صلب	صلب	مرن
التطبيقات	تجاري، مرافق	سكني، تجاري	الأجهزة الصغيرة والألواح الشمسية المحمولة

السيليكون الشمسية أحادية البلورة لا غنى عنها لمهام الفضاء، حيث تُغذي الأقمار الصناعية ومسابر الفضاء والمركبات الفضائية الأخرى في البيئات القاسية

ثانياً: خلايا السيليكون الشمسية متعددة البلورات تُصنع الخلايا الشمسية متعددة البلورات من بلورات سيليكون متعددة، وهي أقل كفاءة قليلاً ولكنها أكثر فعالية من حيث التكلفة مقارنة بالخلايا أحادية البلورة. ولذلك يجعل تنوعها وتوافرها مناسباً لتطبيقات مختلفة

- تركيبات الأسطح السكنية والتجارية: تُعد الألواح متعددة البلورات خياراً شائعاً للمشاريع السكنية والتجارية التي تُراعي التكلفة، خاصةً عندما لا تكون مساحة السطح عاملاً مُحددًا
- المزارع الشمسية والتركيبات واسعة النطاق: غالباً ما تستخدم مزارع الطاقة الشمسية على نطاق المرافق ألواحاً متعددة البلورات لتحقيق التوازن بين توفير التكاليف وإنتاج الطاقة، لا سيما في المناطق التي تتوفر فيها مساحات كبيرة من الأراضي
- تطبيقات خارج الشبكة والبعيدة: بالنسبة للأنظمة خارج الشبكة، توفر الألواح متعددة البلورات حلاً

لكفاءتها العالية وجمالياتها الأنيقة، مما يجعلها مناسبة بشكل خاص للمنازل ذات مساحة السطح المحدودة



خلايا شمسية ملائمة لأسطح المنازل. [المصدر](#)

- تركيبات الأسطح التجارية والصناعية: تُفضل هذه الألواح أيضاً للأسطح التجارية والصناعية، حيث تُساهم كفاءتها العالية في توفير كبير في تكاليف الطاقة مع زيادة توليد الطاقة إلى أقصى حد
- المزارع الشمسية والتركيبات واسعة النطاق: تُعد الألواح أحادية البلورة عنصراً أساسياً في مزارع الطاقة الشمسية ومحطات الطاقة على نطاق المرافق. تُعد كفاءتها العالية أمراً بالغ الأهمية لتحسين إنتاج الطاقة في التركيبات الكبيرة حيث تُعد كفاءة استخدام الأراضي أولوية
- مهام الفضاء: تجعل موثوقية وكفاءة خلايا

مناسبة لتطبيقات فريدة مثل الأجهزة الشمسية القابلة للارتداء أو التركيبات المثبتة على المركبات يُقدم كل نوع من خلايا السيليكون الشمسية، أحادية البلورة ومتعددة البلورات وغير المتبلورة، مزايا وعيوب خاصة. يعتمد اختيار نوع الخلية على المتطلبات المحددة للتطبيق، بما في ذلك الكفاءة والتكلفة والمساحة المتاحة والاعتبارات الجمالية. مع استمرار تطور تقنية الطاقة الشمسية، تظل أنواع الخلايا هذه جزءًا لا يتجزأ من تلبية احتياجات الطاقة المتنوعة عبر المجالات السكنية والتجارية والصناعية والمتخصصة

خاتمة

يُظهر تطور الخلايا الشمسية تقدمًا ملحوظًا في المواد والتقنيات والتطبيقات، مما يعكس سعي البشرية الدؤوب للحصول على حلول طاقة فعالة ومستدامة. من خلايا السيليكون البلوري من الجيل الأول إلى خلايا الأغشية الرقيقة المرنة من الجيل الثاني والأساليب المبتكرة من الجيل الثالث، واجهت كل مرحلة تحديات فريدة في الكفاءة والتكلفة وقابلية التوسع

لا يزال السيليكون خيارًا سائدًا نظرًا لوفrته وكفاءته وموثوقيته، بينما قدمت تقنيات الأغشية الرقيقة حلولًا خفيفة الوزن ومتعددة الاستخدامات. أما الجيل الثالث، الذي يتميز بتقنيات ناشئة مثل خلايا البيروفسكايت والنقاط الكمومية... الخ، فيقدم لمحة عن مستقبل الطاقة الشمسية عالية الكفاءة والفعالة من حيث التكلفة، وإن كان لا يزال يتعين التغلب على تحديات مثل الاستقرار وقابلية التوسع تسلط التطورات المستمرة في تقنيات الخلايا الشمسية الضوء على الدور المحوري للطاقة

فعالاً من حيث التكلفة لتزويد المواقع البعيدة بالطاقة حيث لا تكون التكلفة الإضافية للألواح أحادية البلورة مُبررة

ثالثًا: خلايا السيليكون الشمسية غير المتبلورة

خلايا السيليكون الشمسية غير المتبلورة هي تقنيات أغشية رقيقة معروفة بمرونتها وقدرتها على التكيف. على الرغم من أن كفاءتها أقل من الخلايا البلورية، إلا أن خصائصها الفريدة تسمح بتطبيقات مُبتكرة

• الخلايا الكهروضوئية المُدمجة في المباني: تُدمج ألواح السيليكون غير المتبلورة في مواد البناء مثل النوافذ والواجهات وأسقف المنازل، مما يوفر نهجًا سلسًا وعمليًا من الناحية الجمالية لتوليد الطاقة الشمسية

• الإلكترونيات المحمولة: تجعل طبيعتها خفيفة الوزن والمرنة هذه الخلايا مثالية للشواحن المحمولة المُستخدمة مع الهواتف الذكية والأجهزة اللوحية وأجهزة الكمبيوتر المحمولة، حيث تُعد مُلاءمتها للأسطح أمرًا ضروريًا

• اللافتات والإضاءة الخارجية: تُستخدم ألواح السيليكون غير المتبلورة في اللافتات وحلول الإضاءة التي تعمل بالطاقة الشمسية، مما يوفر استقلالاً في الطاقة ويقلل من تكاليف الصيانة • الطاقة عن بُعد وخارج الشبكة: تُعد هذه الألواح فعالة في المواقع البعيدة حيث تُعد قيود الوزن والمساحة ذات أهمية قصوى، وتكون الكفاءة أقل أهمية

• تركيبات مرنة وخفيفة الوزن: نظرًا لتصميمها الرقيق، يُمكن تطبيق ألواح السيليكون غير المتبلورة على الأسطح المُنحنية أو غير المُنتظمة، مما يجعلها

وفقاً لهذه الدراسة، قد تكون المادة المظلمة قد نشأت بشكل منفصل عن التوسع الكوني الأول، مما يشير إلى وجود توسع كوني ثانٍ مستقل أطلق عليه الباحثون هذا المصطلح.

تشير الدراسة إلى أن المادة المظلمة، التي تشكل حوالي 85% من الكتلة الكلية للكون، قد تكون انبثقت عن مرحلة انتقالية حرجية حدثت في القطاع المظلم. هذا المفهوم يقترح أن المادة المظلمة، بدلاً من التفاعل مع الضوء أو غيره من الإشعاعات الكهرومغناطيسية، تتفاعل فقط من خلال الجاذبية. أشار الباحثون إلى إمكانية التحقق من هذه النظرية من خلال رصد موجات الجاذبية التي قد تكون نتجت عن هذا الانفجار الكوني الثاني. مع تطور أدوات الرصد مثل مصفوفة توقيت النجوم النابضة ومشروع التلسكوب الكيلومري المربع، يمكن أن تؤدي هذه الدراسات إلى فتح آفاق جديدة لفهم المادة المظلمة وأصولها.

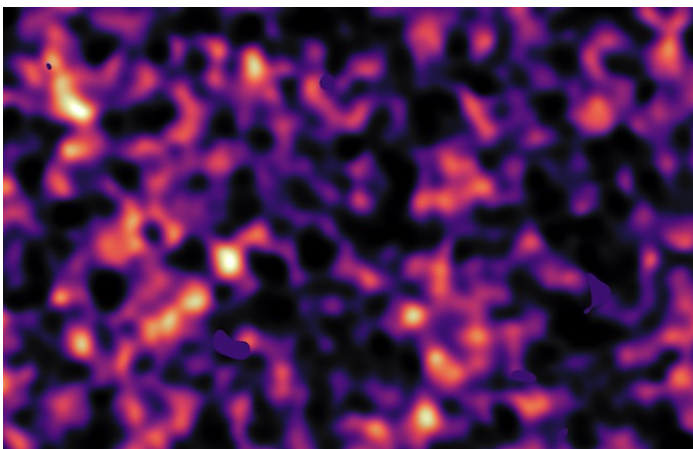
تم نشر هذه الدراسة في مجلة Physical Review D، حيث تقدم تفسيراً محتملاً لإحدى أعظم ألغاز الكون

[المصدر](#)

المتجددة في تلبية الطلب العالمي على الطاقة. من خلال التحسين المستمر للمواد والتصميمات وعمليات التصنيع، تظل الطاقة الشمسية حبر الزاوية في التنمية المستدامة ومساهمة حيوية في مستقبل أنظف وأكثر صداقة للبيئة.

المراجع

- [1] <https://www.pveducation.org>
- [2] Book: Solar cells: Types and Applications, Sandeep Arya and Prerna Mahajan, Springer (2023).
- [3] Book: The Physics of Solar Cells: Perovskites, Organics, and Photovoltaic Fundamentals, Juan Bisquert, CRC Press (2018).
- [4] Book: Solar Cells Operating Principles Technology and System Applications, by Martin A. Green, Prentice Hall (1982).
- [5] Book: Next-Generation Solar Cells: Principles and Materials, Yoon-Bong Hahn, Tahmineh Mahmoudi, Yousheng Wang, Jenny Stanford Publishing (2024).



أخبار علمية

الانفجار الكبير المظلم: نظرية جديدة لتفسير أصول المادة المظلمة

كشفت دراسة نظرية أجراها باحثان من جامعة كولغيت في الولايات المتحدة عن مفهوم جديد أطلقا عليه اسم "الانفجار الكبير المظلم"، والذي يمكن أن يقدم تفسيراً لأصول المادة المظلمة.

الذكاء الاصطناعي والتعلم الآلي في فيزياء الجسيمات الأولية والكونيات

رند الفار، ماجستير في الفيزياء، معهد إزمير للتقانة، تركيا



أولاً: مقدمة

شهدت السنوات الأخيرة إسهاماتٍ عظيمةً للذكاء الاصطناعي Artificial Intelligence والتعلم الآلي machine learning في العديد من أركان علم الكونيات وفيزياء الجسيمات الأولية أو فيزياء الطاقة العالية، حيث برزت أدوات حسابية جديدة، ووجهات نظر مبتكرة حول جمع البيانات، وتطوير النماذج وتحليلها، واكتشاف ظواهر جديدة ضمن المعطيات، بالإضافة إلى ظهور مجتمعات ومسارات تعليمية جديدة. رغم التقدم السريع، لا تزال هناك إمكانيات كبيرة غير مستغلة عند تقاطع الفيزياء -خصوصاً علم الكونيات وفيزياء الجسيمات الأولية- مع الذكاء الاصطناعي والتعلم الآلي. نستعرض في هذه المقالة بعض التطورات الحالية والمستمرة المتعلقة بتطبيق التعلم الآلي في هذين المجالين، حيث نوضح كيف يمكن استخدام أساليب التعلم الآلي المختلفة، بما في ذلك الشبكات العصبونية العميقة Deep neural networks، من أجل تعزيز قدرة العلماء على تحليل البيانات المعقدة والهائلة التي تولدها التجارب العلمية الحديثة، وتحسين النماذج الرياضية للكون والجسيمات الأولية، والمساعدة في حل المسائل الفيزيائية الصعبة

تعريف الذكاء الاصطناعي

يُعرّف الذكاء الاصطناعي بأنه فرع من فروع علوم الحاسوب يهتم بإنشاء نظمٍ قادرة على تنفيذ مهامٍ تتطلب ذكاءً بشرياً، ويتضمن بذلك تعلم الآلة، ومعالجة اللغة الطبيعية، والتعرف على الأنماط وغيرها من المجالات. يهدف الذكاء الاصطناعي في هذا السياق إلى تطوير نماذج وأنظمة تساهم في فهم وتحليل وتوقع سلوكيات فيزياء الكونيات والجسيمات الأولية

بشكل فعال ودقيق.

ثانياً: الذكاء الاصطناعي في فيزياء الجسيمات الأولية

فيزياء الجسيمات هي دراسة الجسيمات الأولية التي تشكّل الكون والقوى التي تتفاعل من خلالها. يمكن وضع حدّ أعلى لعدد هذه الجسيمات من خلال الدراسات النظرية لهذا الفرع من الفيزياء، كما ويمكن اختبارها عملياً في عدة مختبرات أو مسرّعات للجسيمات، من مثل مصادم الهدرونات الكبير¹. على مر العقود، تطورت الأساليب التجريبية والنظرية في هذا المجال بشكل كبير، مدعومة بتطور تقنيات الحوسبة وتحليل البيانات. في الآونة الأخيرة، برز التعلم الآلي كأداة قوية يمكنها التعامل مع تعقيد البيانات والمعطيات التي يتم جمعها من تجارب فيزياء الجسيمات.

تُعَدّ فيزياء الجسيمات الأولية غريبة وفريدة من نوعها مقارنةً بالمجالات الأخرى عند تطبيق التعلم الآلي و الذكاء الاصطناعي عليها، و ذلك لسببين رئيسيين. **الأول**، تخضع فيزياء الجسيمات لميكانيكا الكم، حيث يؤثر عدم اليقين المتأصل في العالم الميكانيكي الكمي على طبيعة الحقيقة التي قد نأمل في تعلّمها. فمثلاً، في عملية إنتاج بوزون هيغز² من تصادم البروتونات في أحد المسرّعات ينتج تداخل ميكانيكي كمومي بين بيانات الإشارة التي تمثّل

1. الهدرون هو كينونة تنجم عن ارتباط كواركين أو ثلاثة. البروتون مثلاً هو هَدرون مُكوّن من ثلاثة كواركات

2. بوزون هيغز هو الجسيم الذي يعطي الجسيمات الأخرى كتلتها عند تفاعلها معه. تبرز أهميته في المسرّعات، حيث لا يمكن تعيين علامة حقيقيةٍ لحدث فردي عن إنتاجه، بينما يعتمد احتمال العثور على مجموعة معينة من الجسيمات التي تظهر في الكاشف على ما إذا كان بوزون هيغز موجوداً أم لا

دقيق.

مع ذلك، يواجه تطبيق التعلم الآلي في فيزياء الجسيمات تحديات عديدة، مثل الحاجة إلى كميات كبيرة من البيانات للتدريب، وضمان تفسير النماذج، والتأكد من أن النتائج التي يتم الحصول عليها موثوقة وقابلة للتكرار. نتحدث في هذا القسم عن عدة تطبيقات للتعلم الآلي في مجال الجسيمات الأولية وتحديداً في مصادم الهدرونات الكبير.

1.1. التعلم الموجه في فيزياء الجسيمات الأولية

يُعتبر التعلم المُوجَّه supervised learning أحد التطبيقات الأساسية للتعلم الآلي في فيزياء الجسيمات. يتضمن هذا النوع من التعلم تدريب النماذج على مجموعة بيانات تحتوي على أمثلة مُصنَّفة مسبقاً، ممَّا يسمح للنموذج بتعلُّم كيفية التمييز بين الأنماط المختلفة.

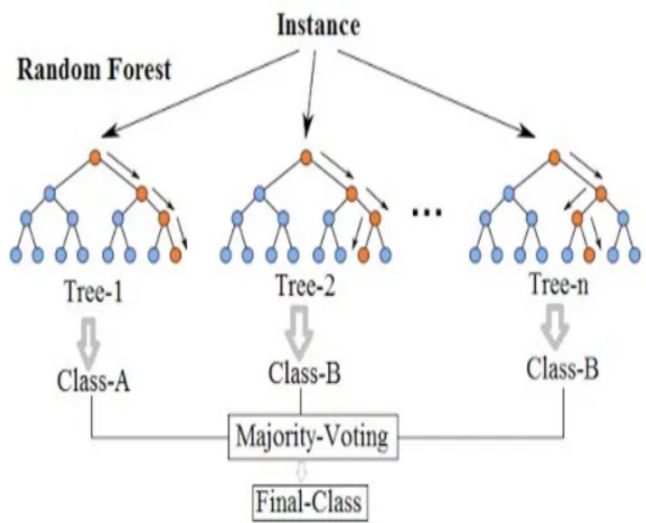
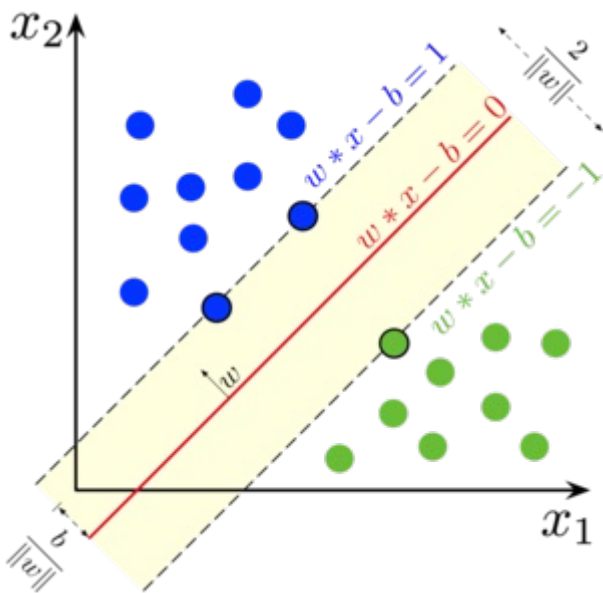
في فيزياء الجسيمات، تُستخدم أساليب التعلم الموجه بشكل واسع في تصنيف الأحداث التي تُسجل في الكواشف. على سبيل المثال، يمكن استخدام الشبكات العصبونية العميقة لتمييز

إنتاج الجسيم (جسيم هيغز في هذا المثال) وبيانات الخلفية الضوئية (تصادم البروتونات دون إنتاج بوزون هيغز)، بمعنى أنه من أجل كلِّ جسيم سوف تتداخل إشارات موافقة، فيظهر الجسيم على أنه إشارة (جسيم) وخلفية ضوئية (بدون جسيم) في الوقت نفسه. **الثاني**، تميِّز فيزياء الجسيمات بأدوات محاكاة دقيقة للغاية من أجل إنتاج بيانات تركيبية للتدريب، وقد تمَّ تطوير هذه الأدوات بواسطة خبراء على مدى أكثر من 40 عامًا.

1. تطبيق الذكاء الاصطناعي والتعلم الآلي في

فيزياء الجسيمات الأولية

يوفِّر التعلم الآلي إمكانيات جديدة لتحليل البيانات بشكل أكثر كفاءة وفعالية. بدلاً من الاعتماد فقط على النماذج التقليدية، يمكن للتعلم الآلي اكتشاف أنماط وعلاقات في البيانات لا يمكن رؤيتها بسهولة باستخدام الأساليب التقليدية. على سبيل المثال، يمكن استخدام الشبكات العصبونية العميقة بغرض تصنيف الجسيمات بناءً على بيانات المستشعرات والكواشف، أو من أجل توقع نتائج التجارب بشكل



الشكل 1: (يمين) شكل تبسيطي لغاية قرارات عشوائية مؤلفة من العديد من شجرات القرار حيث يُجاوب على سلسلة من الأسئلة ما يسمح بتقدير موثوقٍ للخرج النهائي [المصدر](#). (يسار) مستوٍ فوقَي hyperplane بهامشٍ أعظمي لآلة دعم متَّجهي SVU تمَّ تدريبها عبر عِثْنَيْنِ من صفِّين [المصدر](#).

الصدمة الثانوية إلى رذاذ من البيونات منخفضة الطاقة نسبيًا تتخلل ضمن أجهزة الكشف. يُطلق على هذه البقايا غير المثيرة للاهتمام اسم "التراكم" pileup، وبسببها يكون من الصعب تحديد الطاقة الدقيقة المشاركة في الصدمة الأولي، ما يُلوث contaminate كلَّ قياسٍ تقريبيًا في الـ LHC، ولذلك من الأهمية بمكان التخلص من التراكم عند رصد أي إشارة. هناك طرق عديدة لإزالة التراكم مثل طريقة "طرح المساحة" التي تعتمد على أن التراكم يتألف في الغالب من جسيمات منخفضة الطاقة موزعة بشكل متساوٍ، فيعيد معايير الحدث بناءً على كمية الطاقة المُودعة في بعض مناطق الكاشف التي يُعتقد أن منتجات الصدمة الأساسي غائبة فيها. هناك أيضًا طريقة "طرح الهدرون المشحون" التي تستخدم حقيقة أن الجسيمات المشحونة تترك آثارًا، بحيث يمكن مطابقة هذه الآثار إجمالًا بصدمة أولي أو بآخر ثانوي، ثم تتم إزالة الآثار الناجمة عن هذا الأخير من الحدث. لا يمكن لكلا الطريقتين إزالة جميع أنواع التراكم، لذلك من الأفضل استخدام طرق الذكاء الاصطناعي الحديثة، مثل خوارزمية "تخفيف التراكم"، باستخدام التعلم الآلي لإزالتها، حيث تعتمد على صورة الحدث فتجري ترجمة الطاقة المودعة في منطقة معينة من الكاشف إلى شدة إضاءة في بكسل موافقٍ من الصورة. تركز هذه الخوارزمية في عملها على ثلاث صورٍ متراكبة، واحدة (ثانية) للجسيمات المشحونة الناتجة عن الصدمة الأولي (الثانوي) والأخيرة مرتبطة بالجسيمات المعتدلة الشحنة. يتم إدخال هذه الصور الثلاث في شبكة عصبونية تلافيفية (CNN) تحاول إنتاج صورة رابعة تُظهر الجسيمات المعتدلة الناجمة من التفاعل الأولي فقط. يمكن تدريب الخوارزمية على

الإشارات الفيزيائية المهمة عن الخلفية الضوائية. علاوة على ذلك، تُستخدم أساليب مثل غابات القرارات العشوائية random decision forests وآلات الدعم المتجهية support vector machines من أجل تحديد خصائص الجسيمات الفردية بناءً على بيانات المستشعرات والكواشف.

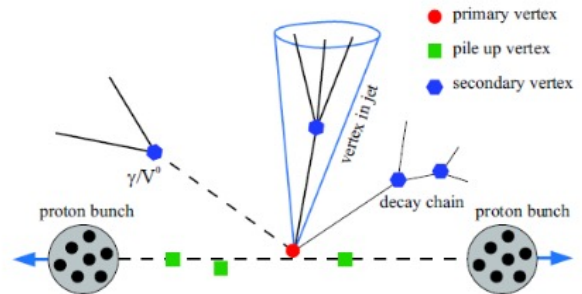
من أفضل الأمثلة التي أظهرت نجاح التعلم الآلي ما يسمى بـ "وسم الكوارك-القاعي"، والمتمثل بتحديد ما إذا كانت مجموعة معينة من الجسيمات مرتبطة بكوارك قاعي ابتدائي، أم لا. في التعلم المُوجّه، يتم وضع جميع المسارات المقاسة في شبكة عصبونية متكررة، ثم يتم تدريب الشبكة باستخدام بيانات محاكاة موسومة للتمييز بين أحداث الإشارة (كواركات قاعية) وأحداث الخلفية (كواركات أخرى).

قبل التحدث عن المثال الجيد الثاني، من المهم أن نفهم الطريقة التي تعمل بها مصادمات الجسيمات الحديثة. في الـ LHC على سبيل المثال، من أجل تحقيق تصادم مليار بروتون في الثانية، يتم تجميع الجسيمات في حزم يبلغ عددها كل منها حوالي 10^{11} بروتون، مع حوالي 3000 حزمة تدور في نفق LHC في أي لحظة معطاة. عند هذه الظروف التشغيلية، قد يصطدم 100 بروتون أو أكثر في كل مرة تمر فيها الحزم عبر بعضها البعض، ومن بين هذه الاصطدامات المائة، نادرًا ما تكون هناك حدث صدم مباشر حيث تصطدم الكواركات الموجودة داخل كل بروتون بعضها بعضًا بطاقة كافية لإنتاج شيءٍ مثير للاهتمام. عندما يكون هناك صدم مباشر -نطلق عليه غالبًا اسم الصدمة الأولي primary collision- تصطدم أيضًا بروتونات أخرى بما يُسمى صدمة ثانويًا secondary. تتفكك البروتونات المشاركة في حوادث

الفيزيائية.

هناك طريقتان للتعامل مع البيانات في هذه الحالة. في الطريقة الأولى، يمكننا محاولة تدريب الشبكة مباشرة على البيانات الحقيقية على الرغم من عدم نقائنها، بينما في الطريقة الثانية يمكننا استخدام التعلم الآلي لتحديد مدى توافق المحاكاة مع البيانات، ثم محاولة تحسين المحاكاة. على الرغم من أن البيانات الحقيقية في الطريقة الأولى لا تأتي مع تسميات (بسبب خضوع كلِّ قياسٍ لميكانيكا الكم، حيث يعطي كلُّ جسيم إشارة جسيم و إشارة خلفية ضوضائية)، يمكن العثور على أحداث نظيفة بشكل خاص توافق إمكانية إجراء التسمية بشكل لا لبس فيه -مثل رصد إشارة الكواركات العلوية الواضحة- ولكن هذه الطريقة كانت مستخدمة فيزيائياً قبل التعلم الآلي. من أجل تفعيل دور التعلم الآلي أكثر، يمكن استخدام التعلم ضعيف التوجيه حيث نستخدم التدريب مباشرة على عينات مختلطة، مثل أخذ عيّنين من حدثين تحوي إحداهما إشارة صدم واحدة و بوزون z ، بينما تحوي الأخرى إشارتي صدم؛ ومن ثمّ يمكن تدريب الشبكة العصبية للتمييز بين هاتين العينتين. يمكن أيضاً استخدام التعلم غير المُوجّه unsupervised learning، كما في JUNIPR الذي يحاول تعلّم التوزيع التفاضلي الكامل للبيانات باستخدام التعلم الآلي حيث يحتوي على بنية شبكة مبنية حول شجرة تجميع ثنائية. تُقدّم الشبكات

بيانات ومعطيات اصطناعية، حيث تكون المعلومات الحقيقية حول أصل الجسيمات المعتدلة معروفة، ثم تطبيقها على بيانات فعلية حيث لا تكون المعلومات الحقيقية عنها معروفة.



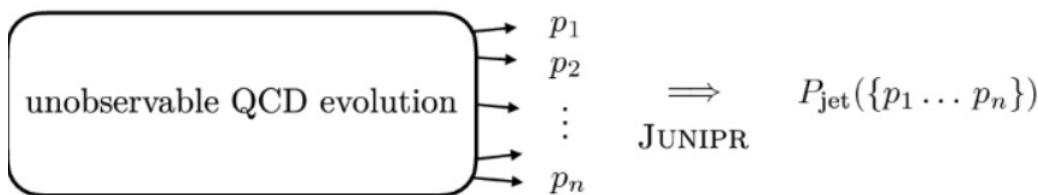
الشكل 2: أحداث صدم أولية وثانوية مع أحداث تراكم المصدر.

يتطلب النجاح في تطبيق التعلم المُوجّه توازناً دقيقاً بين تعقيد النموذج وجودة بيانات التدريب. إذا كان النموذج معقداً جداً، فقد يتسبب ذلك في تكيف مفرطٍ overfitting مع بيانات التدريب وفشل في التعميم generalization على بيانات جديدة. من ناحية أخرى، إذا كانت بيانات التدريب غير كافية أو مليئة بالانحيازات bias، فإن استنتاجات النموذج قد تكون غير دقيقة.

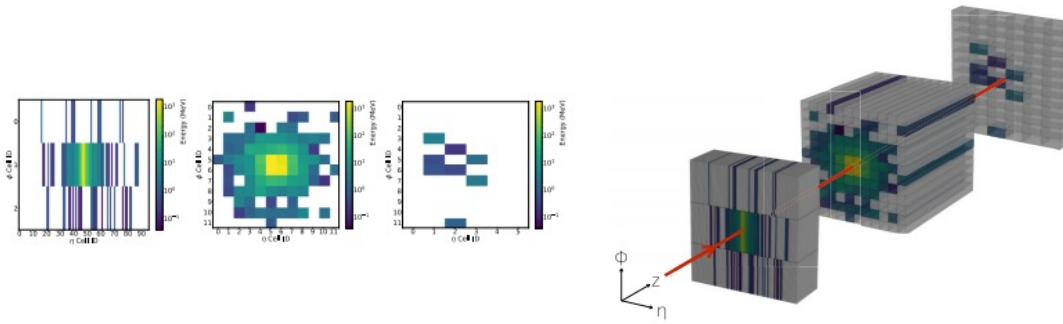
2.1. التعلم القائم على البيانات في فيزياء الجسيمات الأولية

تمثّل الأساليب القائمة على البيانات اتجاهاً ناشئاً في فيزياء الجسيمات، حيث يتم الاعتماد على البيانات التجريبية من أجل تدريب النماذج بدلاً من الاعتماد فقط على البيانات الحقيقية أو الاصطناعية (المُنشأة

باستخدام المحاكاة) كما في التعلم المُوجّه. يقلّل هذا النهج من الانحيازات الناتجة عن الافتراضات النظرية، ما يوفر صورة أكثر دقة للأحداث



الشكل 3: يحسب JUNIPR احتمالية الحصول على اندفاعاتٍ معطاة في نفثٍ دقيقٍ تمّ اختياره وفق شروطٍ محدّدة تُستخدم لتدريب البيانات المصدر.



الشكل 4: تمثيل ثلاثي البعد لحزمة بوزيترونات واردة عمودياً على مركز الكاشف. (يسار) تمثيل ثنائي البعد طبقي للحزمة السابقة. [المصدر](#).

يواجه تطبيق التعلم الآلي في فيزياء الجسيمات العديد من التحديات التي تتطلب اهتمامًا كبيرًا في المستقبل. من أبرز هذه التحديات:

1. الشفافية والتفسير: تعمل معظم النماذج المستخدمة في التعلم الآلي - وخاصة الشبكات العصبونية العميقة - كصناديق سوداء. يعني هذا أنه من الصعب فهم كيفية اتخاذ القرارات أو استنتاج الأنماط. لتعزيز الثقة في نتائج التعلم الآلي، يجب تطوير تقنيات تُتيح تفسير النماذج بشكل أفضل، مثل الخرائط التوضيحية التي تُظهر العوامل الأكثر تأثيرًا على النتائج.

2. الانحياز في البيانات: يمكن أن تحتوي مجموعات البيانات المستخدمة في التدريب على تحيزات تؤثر على دقة النماذج. على سبيل المثال، إذا كانت البيانات تفتقر إلى تمثيل كافٍ لبعض الحالات النادرة، فقد تفشل النماذج في التعرف عليها بشكل صحيح. يجب العمل على إيجاد تقنيات لتحديد وإزالة الانحيازات من البيانات.

3. تكامل النماذج مع المنهجيات التقليدية: لضمان أقصى استفادة من التعلم الآلي، يجب دمجه بسلاسة مع الأدوات والنماذج التقليدية المستخدمة في فيزياء الجسيمات. يتطلب هذا الأمر تطوير أدوات تدعم التعاون بين المناهج الحديثة والتقليدية

التوليدية التنافسية CaloGAN مثالاً آخر على التعلم غير الموجه، كذاك المُستخدم شبكة تنافسية توليدية لمحاكاة محاكي الكاشف؛ فتقوم شبكة أولى بإنتاج أحداثٍ وتحاول شبكة خُصمٍ ثانية معرفة ما إذا كانت تلك الأحداث ناجمةً عن الكاشف الحقيقي أم عن الشبكة العصبونية.

يتطلب تطبيق هذه الأساليب تقنيات متقدمة لتحسين جودة البيانات المستخدمة في التدريب. علاوة على ذلك، يتم استخدام تقنيات التعلم غير الموجه والتعلم بالتمثيل من أجل تمكين النماذج من استكشاف الأنماط الخفية في البيانات بدون إشراف مباشر. تُظهر هذه الطرق إمكانيات كبيرة في تحسين فهمنا لفيزياء الجسيمات، مع تقليل الاعتماد على البيانات الحقيقية والاصطناعية. ولكن حتى الآن، كانت التطبيقات التي تحدثنا عنها تعنى بفيزياء المصادمات فقط، ولكن في الواقع يمكن تطبيق الذكاء الاصطناعي والتعلم الآلي في جميع جوانب فيزياء الجسيمات الأولية. أحد مجالات التطبيق الواعدة للغاية هو تحسين الحسابات اللااضطرابية لخصائص المادة في إطار الديناميكا اللونية الكمومية الشبكية Neural quantum chromodynamics

2. التحديات أمام الذكاء الاصطناعي والتعلم الآلي في فيزياء الجسيمات الأولية

ثالثاً: الذكاء الاصطناعي في فيزياء الكونيات

علم الكونيات هو دراسة محتوى وتطور الكون. وفقاً لنموذج Λ CDM القياسي لعلم الكونيات، يتكون الكون من ثلاثة مكوّنات رئيسية: الطاقة المظلمة (مصدر التوسّع المتسارع للكون)، المادة المظلمة (تشكل غالبية الكتلة في الكون ويتم استنتاج وجودها عبر التفاعلات الثقالية الجاذبة)، والمادة العادية المرئية. بينما ظلت البيانات الرصدية حتى الآن متوافقة إلى حد كبير مع النموذج القياسي لعلم الكونيات، تظل هناك أسئلة فيزيائية أساسية دون إجابة. تشمل المجهولات طبيعة الجسيمات للمادة المظلمة، ومصدر التوسّع المتسارع للكون، والفيزياء التي أدت إلى نشوء البنى الأولى في الكون.

هناك احتمال مثير لحل العديد من المسائل المفتوحة في علم الكونيات أو لإحراز تقدّم كبير نحو حلّها يكمن في استخدام القوة الإحصائية التي تقدّمها التجارب الكونية الحالية والمستقبلية. سوف يتطلّب تحقيق العائد العلمي الأمثل من البيانات القادمة أساليب قادرة على استخراج أكبر قدر ممكن من المعلومات من بين الملاحظات ونتائج الرصد، مع التحكم في النظم المرتبطة بالقياسات، وفي النماذج النظرية كذلك.

في علم الكونيات، ومع زيادة تعقيد النماذج والملاحظات بمرور الوقت، ظهرت الحاجة إلى تحديث الأدوات المستخدمة لإجراء مقارنات صارمة. مع التطلع إلى العقد القادم في علم الكونيات، تُحفّز الكمّيّات الهائلة من البيانات التي سوف تُنتجها الدراسات الاستقصائية الحالية والقادمة، بالإضافة إلى التوسّع المستمر في نطاق البحث النظري،

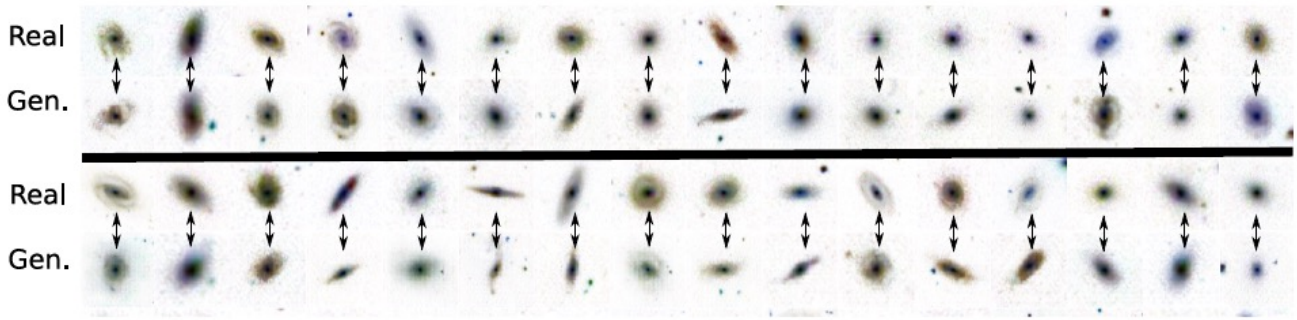
إعادة التفكير في الآليات الإحصائية المستخدمة. ظهرت مؤخراً منهجيات الذكاء الاصطناعي والتعلم الآلي كأدوات واعدة لتطبيقات علم الكونيات، حيث أثبتت قدرتها على التغلب على بعض القيود الحسابية المرتبطة بالتقنيات الإحصائية التقليدية. يمكن استخدام تقنيات الذكاء الاصطناعي في تحليل البيانات الكونية الهائلة التي تتطلب تحليلات معقدة ودقيقة. بالإضافة إلى ذلك، يمكن للذكاء الاصطناعي مساعدة العلماء في توقع الظواهر الفيزيائية المعقدة في الكون، ما يساهم في توسيع معارفنا وتقدمنا في مجال فيزياء الكونيات. ومع أن التعلم الآلي بدأ يشهد تبنياً متزايداً عبر مجالات متعددة في علم الكونيات، ولتطبيقات متنوعة، إلا أن الطبيعة الناشئة لهذه الأدوات تستلزم تطويراً دقيقاً ومتابعة حذرة عند تطبيقها في العلوم، مع إدراك تأثيرها المحتمل على المجتمع بشكل أوسع.

وحيث كان دور الذكاء الاصطناعي في فيزياء الكونيات من أهم الجوانب التي تساهم في تطوير فهمنا للكون وظواهره، نستعرض في هذا القسم بعض الطرق التي أصبحت فيها منهجيات التعلم الآلي جزءاً أساسياً من كيفية جمع البيانات الكونية وتحليلها وتفسيرها.

1. تطبيقات الذكاء الاصطناعي في دراسة

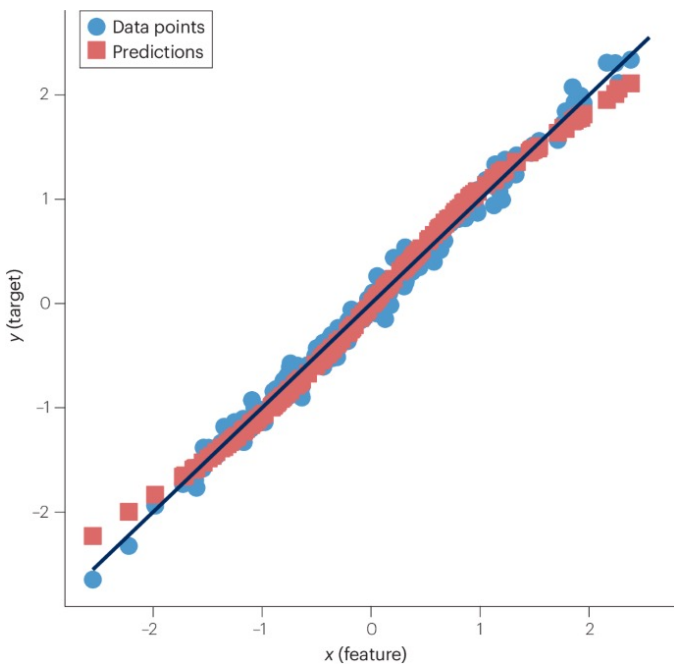
الكونيات

في علم الكونيات، يُعدّ تصنيف الأنماط pattern classification والانحدار regression من الأدوات الأساسية لتحليل البيانات المعقدة الناتجة عن عمليات الرصد الكونية. يستخدم التصنيف لفصل الأنواع المختلفة من الهياكل الكونية مثل المجرات، والعناقيد المجرية galaxy clusters، وعدسات الجاذبية



الشكل 5: عينة من قاعدة بيانات لمجرات إزاء عينة ناجمة عن محاكاة لها باستخدام شبكات عصبونية. [المصدر.](#)

وأشهر طريقة تاريخيًا لتأطير هذه المهمة في اعتبارها مسألة انحدار، مثل تدريب شبكة عصبونية على تقليل متوسط الخطأ التربيعي (MSE) بين مخرجاتها ومجموعة من المُعاملات المُستهدفة. مع التحكم في قدرة التعبير الخاصة بالشبكة العصبونية وعدد عمليات المحاكاة، يمكن إثبات أن تقليل خسارة الـ MSE يُحسِّن تقدير الأرجحية الأعظمية (MLE)



الشكل 6: يمكن استخدام تقنيات التعلم الآلي في مسائل الانحدار والتنبؤ بقيم معاملات نموذج معطى [المصدر.](#)

علاوة على ذلك، يمثل قياس الانزياح الضوئي في علم الكونيات (Photometric Redshift) تحديًا كبيرًا لتحليل بيانات الرصد. تُستخدم هذه التقنية لتقدير مسافات المجرات بناءً على قياسات ضوئية فقط، دون الحاجة إلى الطيف الكامل. يقدِّم التعلم الآلي

gravitational lens. تُستخدم الشبكات العصبونية التلافيفية (CNNs) بشكل واسع لتحديد وتصنيف هذه الهياكل بناءً على بيانات الصور. أما الانحدار، فهو يُستخدم لتقدير المعلومات الكونية مثل الكتلة، والمسافة، ومعدّل التوسع الكوني. على سبيل المثال، تُستخدم تقنيات التعلم العميق من أجل تقدير الكتلة الديناميكية للعناقيد المجرية بناءً على الحركات الداخلية للمجرات. تمكّن هذه الأدوات من تحسين دقة القياسات وتقليل الأخطاء.

تشمل تحديات هذا المجال تقليل الانحياز في النماذج الناتج عن استخدام بيانات محدودة أو غير متوازنة. لتحقيق ذلك، يتم تطوير نماذج تعلّم مُوجّه وغير مُوجّه قادرة على التعلّم من بيانات ضخمة وغير مُعَالَجة. علاوة على ذلك، يُعد تفسير النماذج قضية محورية، حيث يسعى العلماء لفهم كيف تتعلّم النماذج من البيانات وما هي الأنماط التي تُستخدم لاتخاذ القرارات.

1.1 نماذج الانحدار في فيزياء الكونيات

ربما تكون المهمة الأكثر شيوعًا في تحليل البيانات الكونية هي استنتاج المُعاملات، أي وصف ما نُخبرنا به مجموعة معينة من الملاحظات حول مجموعة من المُعاملات ذات الدلالة الفيزيائية في نموذج معين (على سبيل المثال، المُعاملات الستة لنموذج Λ CDM). في سياق التعلّم المُوجّه، تكمن أبسط

الصور، ويتم تدريب النماذج باستخدام بيانات محاكاة وأخرى تجريبية، ما يمكن من تحقيق توازن بين الدقة والسرعة. وبمجرد تحديد العدسات، تبدأ مهمة توصيف الجسم العدسي من خلال تقدير الأرجحية الأعظمية، ما يمثل مسألة حسابية مكثفة تتطلب تحسينًا غير خطي. مؤخرًا، تم استخدام الشبكات التلافيفية لإتمام تقدير سريع لمعاملات نموذج الكثافة الإهليلجية متساوية الحرارة المفردة (Singular Isothermal Ellipsoid density profile)، والذي يُستخدم بشكل شائع لنمذجة نظم العدسات الجاذبية القوية.

2.1. نماذج التعرف والتصنيف في فيزياء الكونيات

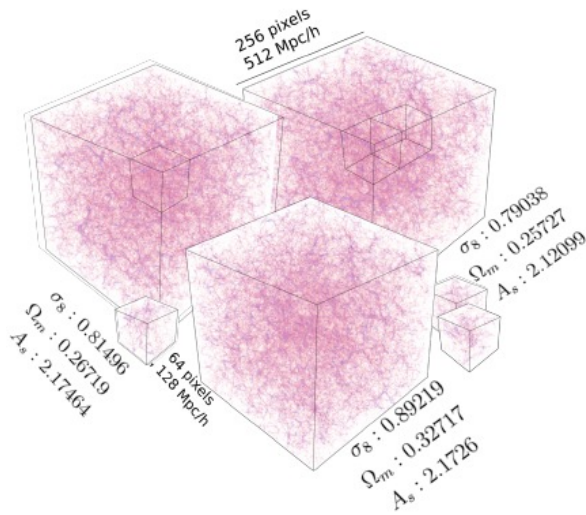
غدا التنقيب في كم البيانات الضخمة والمعطيات الهائلة والتعرف على الأنماط واستخراجها باستخدام تقنيات الذكاء الاصطناعي أدوات لا تقدر بثمن في علم الفلك، إذ أضحت تمكّنهم من غرلة كميات هائلة من البيانات الرصدية وتحديد الأنماط واكتشاف العلاقات المخفية داخل مجموعات البيانات المعقدة. تلعب هذه التقنيات دورًا حاسمًا في اكتشاف الأجرام السماوية الجديدة وتصنيف الظواهر الفلكية وفهم العمليات الأساسية التي تشكل الكون.

تستطيع خوارزميات الذكاء الاصطناعي، وخاصة نماذج التعلم الآلي والتعلم العميق، اكتشاف وتصنيف العديد من الأجرام السماوية تلقائيًا، بما في ذلك النجوم والمجرات والكويكبات والكوازار، في الصور الفلكية. وقد استُخدمت الشبكات العصبية التلافيفية على نطاق واسع في مسائل اكتشاف الأجرام السماوية وتصنيفها، ما مكّن علماء الفلك من تحليل المسوحات واسعة النطاق وفهرسة أعداد هائلة من الأجرام السماوية بدقة وكفاءة عالية.

حلولا مبتكرة لهذه المهمة، حيث يتم استخدام نماذج الانحدار لتعيين العلاقة بين سطوع المجرة وألوانها وبين مسافتها.

تشمل التقنيات الشائعة الشبكات العصبونية العميقة والنماذج القائمة على الغابات العشوائية، والتي أظهرت كفاءة عالية في تحسين دقة تقديرات الانزياح الضوئي. مع ذلك، لا يزال هناك قلق من أن توزيع بيانات التدريب قد لا يكون ممثلًا لتوزيع البيانات التي سيتم تطبيق النماذج عليها، من حيث أنه لا يتم إنشاء بيانات التدريب من خلال محاكاة مؤخرًا، تم العمل على استخدام نماذج هرمية لبناء هيكل سببي إضافي في النماذج من أجل أن تكون أكثر قوة أمام هذه الاختلافات. تهدف النماذج الهرمية إلى الجمع بين قابلية التفسير التي توفرها منهجيات التوفيق التقليدية باستخدام القوالب والمرونة التي تقدمها نماذج التعلم الآلي.

تُعَدّ عدسات الجاذبية أيضًا واحدة من أكثر الظواهر إثارة في علم الكونيات، حيث تنحني مسارات الضوء القادمة من الأجسام البعيدة بفعل الكتل الضخمة. هذه الظاهرة نادرة ولكنها أداة قوية لدراسة توزيع المادة المظلمة في المجرات الضخمة، كما إنها توفر قيودًا قيّمة على النماذج الكونية. يتطلب اكتشاف عدسات الجاذبية تحليل بيانات الصور الفلكية للبحث عن أنماط مميزة. يُستخدم التعلم الآلي -وبالأخص الشبكات العصبونية التلافيفية (CNNs)- للكشف تلقائيًا عن هذه العدسات من مجموعات بيانات ضخمة. بالإضافة إلى ذلك، يتطلب تقدير معاملات العدسة مثل الكتلة وتوزيعها استخدام نماذج الانحدار. تُساعد تقنيات التعلم العميق في تحسين دقة هذه التقديرات عبر تحليل الأنماط المعقدة في

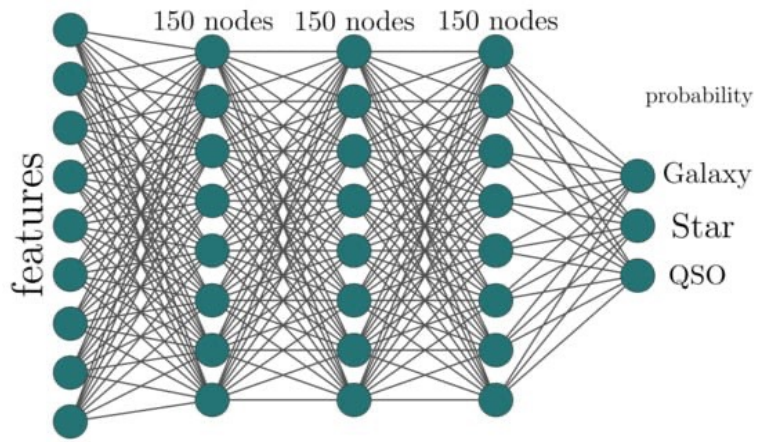


الشكل 8: توزيع ثلاثي الأبعاد للمادة المظلمة في ثلاثة مكعبات تستخدم مجموعات متباينة من البارامترات بينما تؤدي إلى توزيعات متشابهة تقريبًا. يقسم كل مكعب إلى مكعبات جزئية من أجل التدريب والتنبؤ. [المصدر](#).

على الرغم من أن الإشارة الأساسية للخلفية الكونية الميكروية (CMB) في السيناريو الكوني القياسي يمكن وصفها إحصائيًا كحقل عشوائي غاوسي وتحليلها بكفاءة باستخدام مقدرات طيف القدرة الزاوي angular power spectrum، إلا أن أساليب التعلم الآلي أثبتت أداءً متفوقًا في مهام تحليل الخلفية الكونية الميكروية، بما في ذلك إعادة بناء تأثير العدسات الجاذبية في CMB، وفصل الإشارات الأمامية، والاستدلال باستخدام خرائط الاستقطاب. بالنظر إلى التعقيد المتوقع للبيانات، يمكن لهذه التقنيات أن تُعزّز بشكل كبير المخرجات العلمية من المسوحات المستقبلية، مثل مرصد سيمونز، ومشروع CMB-S4، والتجارب المقترحة عالية الدقة مثل CMB-HD. تم أيضًا استكشاف تحليل خرائط CMB باستخدام تقنيات التعلم الآلي لتوصيف عناقيد المجرات عبر إشارات Sunyaev-Zel'dovich وتأثيرات عدسات الجاذبية على CMB.

2.2. استخدام التعلم الآلي في دراسة تطور المادة المظلمة والتنبؤ بالمعاملات

تحوّل تقنيات استخراج البيانات علماء الفلك من تصنيف أنواع مختلفة من الظواهر الفلكية بناءً على توقعاتها signature وإشاراتها المُميّزة الرصدية، مثل منحنيات الضوء، والأطياف، أو التوزيعات المكانية. يمكن لخوارزميات التعلم المُوجّه، مثل آلات الدعم المتّجهي وأشجار القرار، تصنيف الأحداث العابرة، مثل المستعرات العظمى supernova وانفجارات أشعة جاما gamma-ray bursts والنجوم المتغيرة variable stars، في البيانات الزمنية بدقة عالية، مما يسهل اكتشاف ودراسة الظواهر النادرة.



الشكل 7: نموذج شبكة عصبونية اصطناعية تُفيد في مسائل التصنيف في علوم الكون. [المصدر](#).

2. أمثلة أخرى للتعلم الآلي في فيزياء الكونيات

يفتح التعلم الآلي آفاقًا واسعة في علم الكونيات مع تطبيقات إضافية تتضمن إعادة بناء خرائط ثلاثية الأبعاد للمادة المظلمة بناءً على بيانات العدسات الجاذبية، ما يتيح استكشافاتٍ أعمق وأكثر دقة للكون. علاوة على ذلك، تُستخدم نماذج الانحدار من أجل تحليل معطيات الخلفية الكونية الميكروية (CMB) لتحديد مُعاملات النموذج الكوني القياسي بدقة أكبر.

2.1. تحليل الخلفية الكونية الميكروية باستخدام التعلم الآلي

الديناميكية للعناقيد باستخدام آلات توزيع الدعم $\text{support distribution machines}$ في محاكاة تعتمد فقط على المادة المظلمة. كما وتم تطبيق العديد من الخوارزميات غير المعتمدة على الشبكات العصبونية، مثل الانحدار باستخدام العمليات الغاوصية، وآلات الدعم المتجهية، وأجهزة تعزيز الشجرة المتدرجة لحلّ هذا النوع من المسائل.

رابعاً: خلاصة

تشير التطورات الأخيرة في التعلم الآلي إلى إمكانيات هائلة في تحسين فهمنا لفيزياء الجسيمات وعلوم الكون. من خلال دمج هذه الأدوات مع النهج التقليدية، يمكن تحقيق تقدم كبير في تحليل البيانات والتنبؤ بنتائج التجارب.

ومع ذلك، فإن النجاح المستمر يتطلب مواجهة التحديات الحالية مثل تفسير النماذج ومعالجة التحيز في البيانات. يمكن للتعلم الآلي من خلال الاستثمار في البحث والتطوير أن يصبح عنصراً أساسياً في مجموعة أدوات فيزيائيي الجسيمات والكونيات؛ الأمر الذي سيساعد كثيراً على حل الألغاز الأساسية للطبيعة.

المراجع

1. C. Dvorkin et al., arXiv: 2203.08056
2. G. Karagiorgi et al., arXiv: 2112.03769
3. M. D. Schwartz, arXiv: 2103.12226
4. D. Bourilkov, arXiv:1912.08245
5. G. Carleo et al., arXiv:1903.10563
6. P. Adragna et al., CERN-PH-EP/2009-019
7. M. Paganini, L. de Oliveira, B. Nachman, PHYSICAL REVIEW D 97, 014021 (2018)
8. A. Andreassen, I. Feige, C. Frye and M. D. Schwartz, Eur. Phys. J. C (2019) 79:102

تمّ تدريب الشبكات التلافيفية ثلاثية الأبعاد على التنبؤ بالمعاملات الكونية الأساسية بناءً على التوزيع المكاني للمادة المظلمة، حيث يتم تدريب الشبكات باستخدام محاكاة مكثفة حاسوبياً من أجل دراسة تطور المادة المظلمة في الكون مع افتراض قيم محددة للمعاملات العشرة في نموذج ΛCDM الكوني القياسي.

من الضروري عند تطبيق هذه التقنية على المادة المرئية نموذج الانحياز والتباين لمؤشرات المادة المرئية بالنسبة إلى التوزيع الأساسي للمادة المظلمة. من أجل تقليل هذه الفجوة، تمّ تدريب الشبكات التلافيفية لكي تتعلّم عبر خريطة سريعة بين المادة المظلمة والمجرات المرئية، ما يسمح بتحقيق موازنة بين دقة المحاكاة وتكلفتها الحسابية. مع ذلك، فإن التحديات تشمل الانحيازات الناتجة عن قلة الحالات المستقلة إحصائياً في المحاكاة الكبيرة لأنها مكلفة. من أجل حلّ هذه المشكلة، يتم تطوير تقنيات تعلّم غير موجهة وتقنيات زيادة البيانات (Data Augmentation) لتوسيع نطاق التنوع في مجموعات التدريب.

3.2. استخدام التعلّم العميق لتقدير كتلة

عناقيد المجرات

عناقيد المجرات هي أكبر الهياكل المرتبطة جاذبياً في الكون وتعتبر أداة قوية لدراسة الكون. تأتي معظم كتلة هذه العناقيد من المادة المظلمة، التي لا يمكن ملاحظتها مباشرة. يمكن تقدير كتل عناقيد المجرات من خلال ظاهرة عدسات الجاذبية، أو ملاحظات الأشعة السينية للوسط الداخلي للعنقود، أو عبر التحليل الديناميكي لمجرات العنقود.

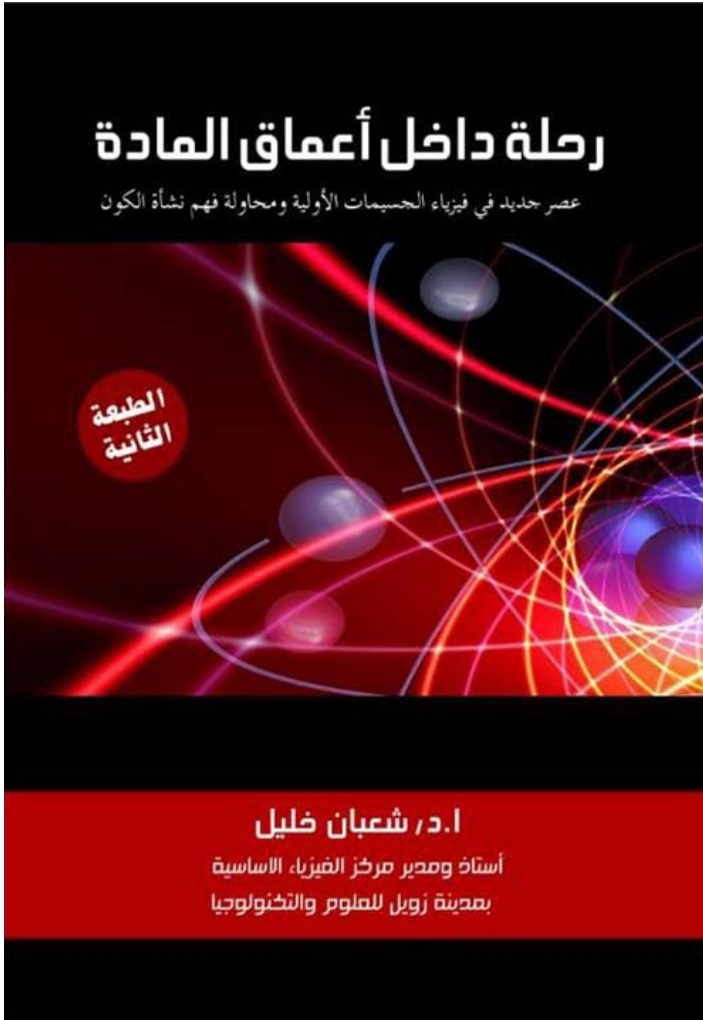
تمّ أول استخدام للتعلم الآلي من أجل تقدير الكتلة

موضوعات إثرائية: مراجعة لكتاب

رحلة داخل أعماق المادة

ل. أ. د. شعبان خليل

من منشورات دار "أندروميديا" (Andromeda) 2022



هذا كتابٌ يُعَدُّ -ربّما- الأوّل من نوعه باللغة العربية، حول النظريّات الحديثة في فيزياء الجسيمات الأولية والكونيات، ألّفه مختصّ ضليع بهذا المجال من العلوم، وبلغة رصينة علميّة مستهدِفًا القارئ العربي غير المختصّ، ولكن يمكن للطلّاب المهتمّين بدراسة الفيزياء النظريّة الاستفادة منه. يقع الكتاب في حوالي مائة وأربعين صفحة، ويحوي سنّة فصول ومقدّمة وخاتمة.

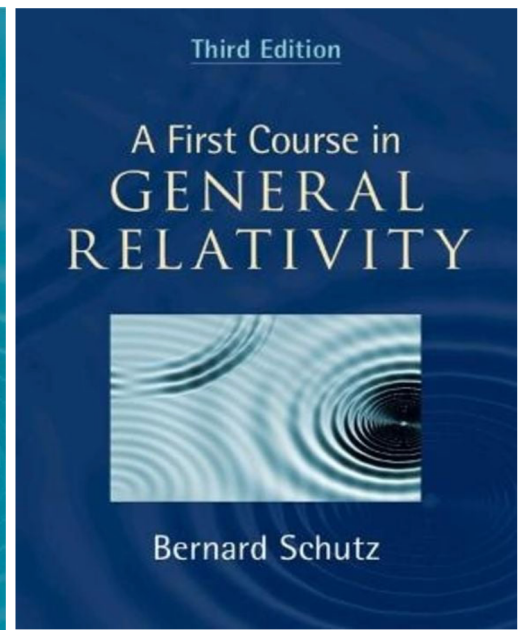
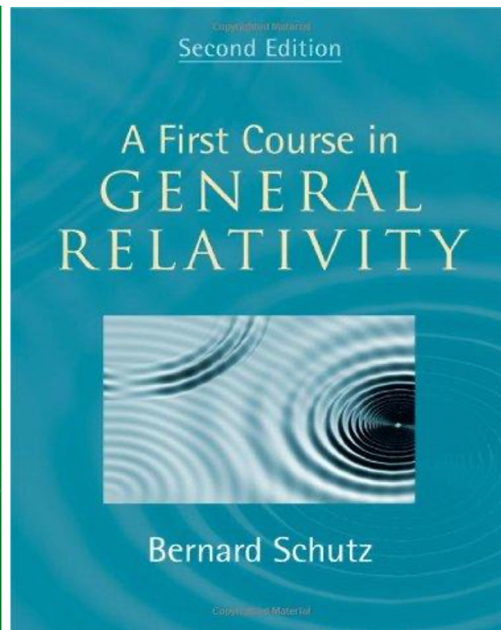
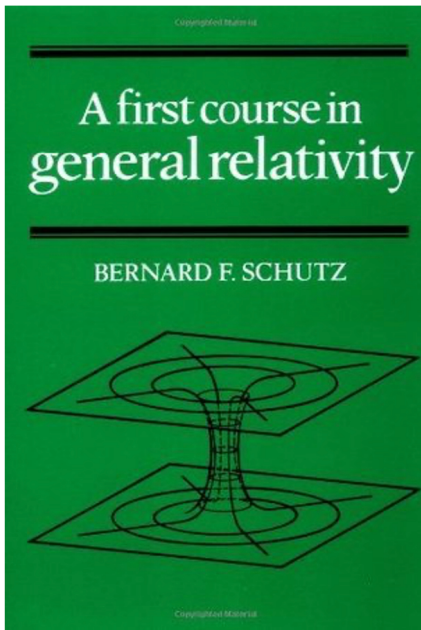
يناقش الفصل الأول المكونات الأساسيّة للمادة، وكيف أن بضعة جسيماتٍ أوليّة لا بنية داخلية لها تشكّل لبنات بناء الكون، بينما يجري استعراض القوى الأساسيّة الأربع في الطبيعة خلال الفصل الثاني، وهذان الفصلان هما الأكثر طولاً على بساطتهما. توصف القوى الأساسيّة ما خلا قوّة الجاذبيّة في الفصل الثالث باستخدام لغة المجالات الكمومية، حيث تتأثر الأجسام عبر قوئٍ معيّنة من خلال تبادلها رُسلًا موافقةً لهذه القوى فيما بينها، ويقدّم الفصل الرابع عرضاً سريعاً للنموذج القياسي للجسيمات الأولية، مودّداً القوى الكهرومغناطيسية والقوى النووية الضعيفة، ويتنبأ بوجود جسيم

"هيغز" الذي تمّ الكشف عنه عام 2012. يذكر الفصل الخامس الأسئلة التي لا يقدر النموذج القياسي على إجابتها، ما يتطلب فيزياء جديدة في ما وراء النموذج القياسي. تجري مناقشة العلاقة بين فيزياء الجسيمات وعلم الكون في الفصل السادس، فيتعرّض لنشأة الكون، ولسيناريوهات مصيره المستقبلي. تتمثّل رسالة الكتاب في تحفيز القراء العرب على معرفة المزيد عن مواضيع فيزياء الجسيمات الأولية وإدراك أنه لا يزال هناك العديد من المسائل المطروحة بلا إجابة، ومن ثمّ فهي فرصة عظيمة

الفيزياء النظرية في الجامعة البريطانية ثم مركز الفيزياء الأساسية في مدينة زويل. أستاذ زائر في جامعة ساوثامبتون ويرأس فريق مصر في برنامج كاشف الـ CMS في السيرن. وهو يقود مجموعة من أنشط فرق البحث العلمي في العالم العربي، إذ تربو ورقائته العلمية على مئات عدّة منشورة في أرقى المجلات العالمية، كما أن له بضعة كتب علمية تقنية في مجال اختصاصاته.

لجيل الشباب من أجل المساهمة في هذا الفرع الأساسي للفيزياء.

المؤلف في سطور: شعبان خليل رئيس الجمعية العربية للفيزياء. درس في جامعة عين شمس والمركز الدولي للفيزياء النظرية حائزاً على درجة الدكتوراة عام 1997 في مجال التناظر الفائق. عمل في جامعات ومخابر الولايات المتحدة والمملكة المتحدة وإسبانيا قبل عودته لوطنه مصر حيث أسس مركز



مقرّر أولي في النسبية العامة

A First Course in General Relativity

لـ برنار شوتز Bernard Schutz

ما تمّ تحديثه في الطبعة الثانية جذرياً عن الطبعة الأولى هو الفصل الأخير عن الكونيّات، ليأخذ بالاعتبار التطوّرات الهائلة في علوم الكون منذ نهاية القرن المنصرم، مثل اكتشاف التسارع في تمدّد الكون واتّساعه. أمّا الطبعة الثالثة الصادرة عام 2022، فبدورها احتوت على مراجعات لبعض اكتشافات علم الفلك التي تتطلب النسبية العامة لتفسيرها؛

عُدّت الطبعة الأولى من هذا المؤلّف الكتاب التمهيديّ الأكثر رواجاً بين الطلّاب التائقين لدراسة النسبية العامة في ثمانينيات القرن المنصرم، قبل توجّههم لكتب أكثر عمقاً مثل ذلك للمؤلّف Wald الصادر في العقد نفسه. ومع صدور الطبعة الثانية التي طال انتظارها عام 2009 عاد الكتاب إلى التداول ككتاب قصير وسهل الفهم وناجح للغاية للنسبية العامة.

من مثل الموجات الثقالية وتأثير ملاحظاتها على القياسات الكونية؛ ومعلومات جديدة عن الثقوب السوداء والنجوم النيوترونية.

يبدأ الكتاب في الفصل الأول بمراجعة جميلة للنسبية الخاصة تؤكد على هندسة الزمكان وتبتعد عن المقاربة الجبرية القائمة على تحويل لورنتز Lorentz، الذي لا يظهر إلا لاحقاً. يتبع ذلك في الفصلين الثاني والثالث مقدمة لتحليل المتجهات والموترات في الزمكان المستوي، التي يعرفها بأنها أشكال خطية بعرض سهل الفهم دون الصرامة الرياضية الزائدة. في الفصل الرابع، يقدم الكتاب وصف الزمكان للموائع؛ وهنا يظهر موتر الطاقة-الزخم لأول مرة.

يجري الانتقال إلى الزمكان المنحني في الفصول اللاحقة، فيتم في الفصل الخامس استخدام مبدأ التكافؤ لتحفيز فكرة أن الجاذبية ما هي إلا مظهر من مظاهر انحناء الزمكان، ويعرف الموتر في الزمكان المنحني بلطف، من خلال التعميم على الإحداثيات المنحنية. يتم تقديم مقدمة منهجية للهندسة التفاضلية في الفصل السادس؛ فيتعرّف القارئ على المتغيرات الريمانية، والتفاضل المتغاير covariant، والنقل الموازي، والمتقاصرات geodesics، وموترات الانحناء curvature tensor، ومطابقات بيانكي Bianchi identities. قد يبدو الفصل هائل المعلومات وثقيلًا نوعًا ما، ولكن العرض جميل وسهل الفهم يجلب الفصلان التاليان الهندسة التفاضلية إلى الفيزياء، ففي الفصل السابع يتعلّم القارئ كيفية صياغة قوانين الفيزياء في الزمكان المنحني، بينما تتم في الفصل الثامن صياغة معادلات الحقل لأنشتاين أخيرًا، وينتهي بمعالجة شاملة لتقريب

الحقل الضعيف في غوج (معيار) لورينز Lorenz. تقدّم الفصول التالية تطبيقات النظرية، حيث الفصل التاسع مخصص للموجات الثقالية (الانتشار، والكشف، والتوليد، وتوازن الطاقة، والمناخ الفيزيائية الفلكية) عبر مناقشة سهلة الإدراك ورشيقة، بينما يتم في الفصل العاشر تطبيق النظرية الصحيحة exact دونما تقريب على البنية النجمية، يجري تعريف الطالب بالثقوب السوداء في الفصل الحادي عشر، حيث يُخصّص هنا جزء كبير من الفصل لدراسة الحركة المتقاصرة في زمكان شوارتزشيلد، ما يسمح باستدعاء الاختبارات الكلاسيكية للنسبية العامة: تقدّم الحضيض perihelion وانحراف الضوء، كما يوصف السلوك المتفرد singular لإحداثيات شوارتزشيلد عند أفق الحدث vent horizon بالتفصيل، لينتهي الفصل بمناقشة عامة للثقوب السوداء، بما في ذلك مكانتها في الفيزياء الفلكية ووصف لأثر هوكينغ، وعرض مُفضّل لحلّ كير Kerr

الفصل الأخير الثاني عشر مُخصّص لعلم الكون، حيث يبدأ بإعلان المبدأ الكوني Cosmological Principle واستنتاج نماذج فريدمان-ليميتر، ويستمر بمناقشة الديناميكيات الكونية في وجود الإشعاع والثابت الكوني والمادة عديمة الضغط، ويختتم بمراجعة حديثة للقياسات الكونية وتاريخ (موجز للغاية) للكون، من الانفجار الكبير Big bang إلى التضخم inflation، وإعادة الاتحاد recombination، إلى تكوّن البنى structure formation.

إن عرض النسبية العامة وتطبيقاتها الواردة في هذا الكتاب مناسب لطلاب الجامعة الذين يفضلون مقارنة "الرياضيات-أولاً" على مقارنة "الفيزياء-أولاً". سوف يتعلم الطالب أساسيات الهندسة التفاضلية

مكون رئيسي في مرصد نيوترينو جيانغمن تحت الأرض (JUNO) في جنوب الصين. يقع المرصد على عمق 700 متر تحت الأرض، ويهدف إلى دراسة النيوترينو، أحد الجسيمات الأولية الأكثر غموضاً وأهمية في الكون.

يتكون المرصد من كرة ضخمة تشبه البطيخ مغمورة في الماء، تعتبر أكبر كاشف سائل مضيء في العالم. يحتوي الجهاز الأساسي على أكثر من 45 ألف أنبوب مضخم للضوء، تُستخدم لالتقاط الإشارات الضوئية الناتجة عن تفاعل النيوترينوهات مع الوسط السائل يُركز المشروع على قياس الكتلة المطلقة للنيوترينو واكتشاف الاختلافات النسبية بين كتل هذه الجسيمات من خلال دراسة تذبذباتها. يأمل العلماء في أن تسهم هذه الدراسة في تحسين الفهم النظري للمادة والطاقة في الكون، وتسليط الضوء على أصول الكون وتطوره.

يأتي هذا المشروع استكمالاً للجهود التي بدأت منذ القرن العشرين، حيث شكلت أبحاث النيوترينو محطة هامة في تاريخ الفيزياء، وحصلت اكتشافاتها على جوائز نوبل. يعد مرصد JUNO تطوراً مهماً يهدف إلى حل الأسئلة العالقة حول طبيعة

[المصدر](#)

بطريقة لطيفة، ثم سيطبق هذه الأدوات على الفيزياء في الزمكان المنحني؛ وكل هذا يمكن إنجازه في دورة سريعة لمدة فصل دراسي واحد. يغطي شوتز الأساسيات ببراعة في حزمة معلوماتٍ فعّالة وناجعة، بينما يُحيل جميع التعقيدات والتفاصيل إلى مزيد من القراءة في مؤلفات أكاديمية أخرى؛ وهذه استراتيجية تعلّم سليمة.

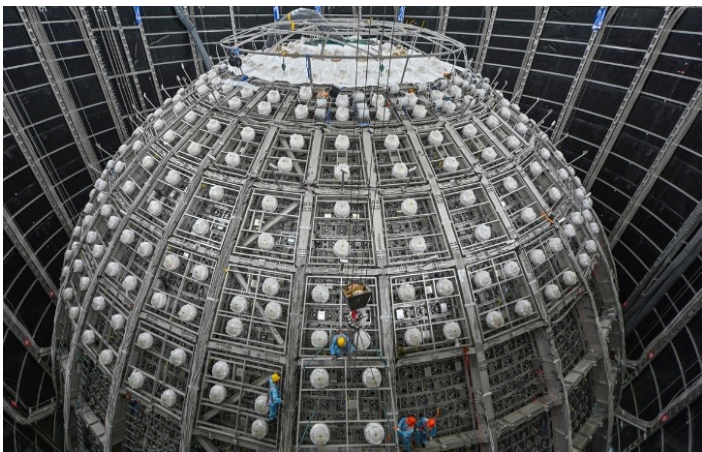
المؤلف في سطور: برنارد شوتز فيزيائي بريطاني أمريكي معروف بأبحاثه في النسبية العامة، وخاصة مساهماته في الكشف عن الموجات الثقالية، وكتبه الأكاديمية. وهو زميل في الجمعية الملكية وعضو في الأكاديمية الوطنية الأمريكية للعلوم، وأستاذ الفيزياء والفلك في جامعة كارديف حالياً، بينما كان مديراً مؤسساً لمعهد ماكس بلانك للفيزياء الجاذبية (معهد ألبرت أينشتاين) في بوتسدام بألمانيا من 1995 ولغاية 2014. كان شوتز باحثاً رئيسياً في فريق تعاون الموجات الثقالية GEO، والذي أصبح جزءاً من تعاون LIGO العلمي حيث عمل مع أستاذه خلال الدكتوراة كيب ثورن الحائز على جائزة نوبل عام 2017 عن اكتشاف الموجات الثقالية.

Publisher: Cambridge University Press (1985); Second edition (2010); Third edition (2022)

أخبار علمية

المرصد الصيني العميق لرصد النيوترينو: نافذة جديدة لفهم الكون

أعلنت الأكاديمية الصينية للعلوم عن اكتمال بناء



موضوعات إثرائية: علماء، معلّمون ومرّبون

تتقدم أسرة مجلة "مسارات في الفيزياء" بخالص التعازي لأسرة الدكتور محمد علي أحمد محمد، وتستذكر إسهاماته العظيمة في مجال الفيزياء والتعليم، سائلين العولى أن يتغمده بواسع رحمته وأن يجعل علمه صدقة جارية تنير درب الأجيال القادمة

إيمان طه



الدكتور الراحل

محمد علي أحمد محمد

نشأته ومسيرته العلمية

وُلد الدكتور محمد علي أحمد محمد في 20 إبريل 1947 م بقرية أم الزين في محافظة الشرقية، مصر. منذ صغره أظهر شغفًا كبيرًا بالعلم والمعرفة، ما دفعه للالتحاق بكلية العلوم بجامعة القاهرة حيث حصل على درجة بكالوريوس العلوم في الفيزياء التطبيقية عام 1970م. استمر في رحلته العلمية ليحصل على درجة الماجستير في فيزياء الجوامد (الجسم الصلب) عام 1976م، ودرجة الدكتوراه في فيزياء الجوامد عام 1980م.

وفي عام 2003م، حصل على درجة دكتوراه العلوم (D.Sc.) في الفيزياء التجريبية من الهيئة الملكية البريطانية، ليصبح من القلة المتميزة الذين يحملون هذه الدرجة العلمية الرفيعة، ما يعكس مدى تأثيره الأكاديمي على المستوى الدولي.

كما شغل الدكتور محمد العديد من المناصب القيادية

والاستشارية، منها:

- مستشار رئيس جامعة القاهرة للجمعيات العلمية (2004-2008).
- رائد عام نادي العلوم بجامعة القاهرة (2004-2008).
- أمين اللجنة الدائمة لترقيات الأساتذة والأساتذة المساعدين في الفيزياء (2008-2013).
- رئيس لجنة البحث العلمي والتكنولوجيا في المجلس الاقتصادي الأفريقي (2008).

إسهاماته العلمية

على مدار مسيرته المهنية، نشر الدكتور محمد أكثر

ما يحتاجونه من مواد ومعلومات خاصة بأبحاثهم بل وتمكّنهم من نشر أبحاثهم العلمية في المجلات والمؤتمرات العالمية.

الجوائز والتكريمات

حصل الدكتور محمد علي على العديد من الجوائز والتكريمات التي تعكس إنجازاته الاستثنائية، منها • جائزة الجامعة التقديرية في العلوم الأساسية (2004) من جامعة القاهرة.

• جائزة أكاديمية الشروق للإبداع العلمي (2007)
• درجة دكتوراه العلوم (D.Sc) من الهيئة الملكية البريطانية (2003).

التأثير العلمي والبحثي

إلى جانب أبحاثه ومؤلفاته، ساهم الدكتور محمد علي في بناء وتطوير مختبرات علمية وبحثية متقدمة، منها معمل علوم المواد بجامعة القاهرة. ويُعتبر هذا المعمل من بين الأحدث في الجامعات المصرية، حيث يقدم خدمات علمية عالية الدقة للعديد من كليات العلوم. كما تعاون مع أكثر من 60 باحثًا وأكاديميًا في الجامعات المصرية والدولية، مما ساعد على تطوير مشاريع بحثية ذات تأثير عالمي. الدكتور محمد علي أحمد محمد ليس مجرد أستاذ جامعي، بل هو نموذج للعالم الشامل الذي جمع بين البحث العلمي والتدريس وخدمة المجتمع. تمثّل مسيرته المهنية الحافلة ولغاية وفاته 2015 مصدرًا إلهامًا للأجيال القادمة، وكونه أتمّ دراسه وأمضى معظم حياته المهنية في وطنه، فهذه دعوة لجيل الشباب في العالم العربي لاستمرار العمل الجاد والإبداع من أجل تحقيق مستقبل أفضل للعلم والمجتمع.

من 250 بحثًا دوليًا في مجلات مرموقة، ما ساهم في تعزيز مكانة الفيزياء التجريبية عالميًا. إلى جانب أبحاثه، أشرف الدكتور محمد على 90 رسالة ماجستير و50 رسالة دكتوراه، مقدّمًا الدعم والتوجيه لجيل جديد من الباحثين في مصر والعالم.

مؤلفاته العلمية

ساهم الدكتور محمد علي في تأليف العديد من الكتب والمقررات الجامعية التي تخدم الطلبة والباحثين، منها:

• "خواص المادة والحرارة".

• "المغناطيسية والكهرباء".

• "أساسيات التصوير الضوئي".

كما ألّف سلسلة كتب تهدف إلى توعية المجتمع بالطاقة البديلة والمتجددة، مثل:

• "الطاقة الشمسية".

• "طاقة الرياح".

• "الألياف الضوئية: الحاضر والمستقبل".

الأنشطة الأكاديمية والمجتمعية

لم تقتصر إنجازات الدكتور محمد علي على البحث العلمي فقط، بل امتدت إلى الأنشطة الطلابية والمجتمعية، فقد أسهم في تنظيم ندوات تثقيفية وعلمية عديدة، كما أشرف على العديد من القوافل التنموية والبيئية في القرى المصرية، ما يعكس حرصه على خدمة المجتمع وتعزيز الوعي العلمي لدى جميع الفئات.

في هذا السياق، شارك ضمن كلية العلوم بجامعة القاهرة في إنشاء جمعية "تكنولوجيا المخترعين" التي تضم عددًا كبيرًا من الشباب الموهوب والمفكر، وتضم ما يسمى بـ "الحضانات العلمية" التي تساعد طلاب البكالوريوس على البحث العلمي فتوفر لهم

موضوعات إثرائية: نوبل في الفيزياء



إيمان طه وشعبان خليل

“تُعد جائزة نوبل رمزاً عالمياً للتميّز الإنساني، شاهدةً على إبداع الإنسان ومثابرتة في السعي وراء المعرفة. أسست الجائزة وفقاً لوصية ألفريد نوبل عام 1895 لتكريم الإنجازات البارزة في مجالات الفيزياء، الكيمياء، الطب، الأدب، السلام، والعلوم الاقتصادية. وفي مجال الفيزياء تحديداً، تبرز الجائزة الاكتشافات التي وسّعت مداركنا عن الكون، بدءاً من أدق الجسيمات إلى الفضاء الشاسع. يتم اختيار الفائزين بعناية فائقة كل عام لضمان أن عملهم يمثل تقدماً كبيراً، مما يلهم الأجيال القادمة لمزيد من الابتكار والاستكشاف. تهدف هذه السلسلة من المقالات الى تسليط الضوء على الإنجازات الاستثنائية للفائزين بالجائزة في الفيزياء، ومساهماتهم التي أثرت في العلم الحديث وفهمنا للعالم.”

عصبية يصل عددها إلى ترليونات. تُمكننا هذه التشابكات من التعلم والتعرف على الأشياء وفهم المعلومات الجديدة. عند تعلّم شيء جديد، تُشكّل الخلايا العصبية أنماطاً معقدة من الروابط تُساهم في تمييز الأشياء وربطها بالمعرفة السابقة.

جون هوبفيلد: John HOPFIELD

وُلد هوبفيلد في المملكة المتحدة عام 1933م. درس الفيزياء النظرية في جامعة كامبريدج ثم انتقل إلى الولايات المتحدة لإكمال دراسته العليا في جامعة كاليفورنيا. انضم لاحقاً إلى جامعة برينستون، حيث بدأ تطوير أفكاره حول استخدام الفيزياء الإحصائية لفهم الأنظمة البيولوجية والحوسبية. امتدت مساهماته إلى مجالات متنوعة مثل النظم الديناميكية والفيزياء الحيوية.

في عام 1982، اكتشف جون هوبفيلد الذاكرة الترابطية، وهي الفكرة التي تنصّ على أن الكمبيوتر يمكنه محاكاة طريقة الدماغ في تخزين واسترجاع الروابط بين المعلومات. طوّر هوبفيلد نموذجاً يسمى “شبكة هوبفيلد العصبونية”، وهو منظومة تتمكّن من استدعاء المعلومات الكاملة بمجرد إدخال جزء منها،

الفائزان بجائزة نوبل في الفيزياء لعام 2024م

جون هوبفيلد (John Hopfield) وجيفري هينتون (Geoffrey Hinton)



جيفري هينتون

جون هوبفيلد

في حدث علمي مميز، حصل العالمان جون هوبفيلد وجيفري هينتون على جائزة نوبل في الفيزياء لعام 2024م، تقديرًا لإسهاماتهما الرائدة في تطوير الشبكات العصبونية الصناعية، والتي أسهمت بشكل جوهري في تطوير تعلّم الآلة والذكاء الاصطناعي.

يهدف تعلم الآلة إلى محاكاة كيفية تعلم الإنسان في الدماغ البشري، فهناك أكثر من 86 مليار خلية عصبية ترتبط بتشابكات

هذه الفكرة في الشبكات العصبونية، حيث يمكن للنماذج الإحصائية التعرّف على الوجوه بناءً على تعرّض الشبكة لمزيد من الأمثلة، ما يسمح لها بالتمييز بين الوجه وأي شيء آخر بدقة عالية.

أهمية الاكتشاف وفريدته:

تكمّن أهمية اكتشافات هوبفيلد وهينتون في أنهما قاما بتقديم حلول جذرية لتحديات استمرت لعقود في مجالات معالجة البيانات وفهم الذكاء الصناعي. من خلال تقديم هوبفيلد نموذجاً للشبكات العصبية ضمن إطار رياضي بسيط ولكن فعال، حيث يُمكن لهذه الشبكات استرجاع المعلومات المخزنة بطريقة مشابهة لذاكرة الدماغ البشري، ومن خلال نجاح هينتون في تطوير خوارزميات التعلم العميق التي تعتمد على تدريب الشبكات العصبونية متعددة الطبقات، ممّا يجعلها قادرة على التعامل مع كميات ضخمة من البيانات وتحليلها بدقة، تبرز أهمية أعمالهما في الدمج بين الفيزياء وعلوم الحاسوب. لقد أظهرت أعمال هوبفيلد كيف يمكن استخدام مفاهيم الفيزياء الإحصائية لفهم الأنظمة المعقدة، بينما ساهم هينتون في تحويل هذه المفاهيم إلى أدوات عملية تُستخدم في الذكاء الصناعي.

تميزت جائزة نوبل لهذا العام بأنها كرمت إسهامات تجمع بين الفيزياء النظرية والتطبيقات العملية. في السنوات الماضية، ركزت الجائزة غالباً على الاكتشافات الفيزيائية ذات الطبيعة التجريبية أو النظرية البحتة، مثل اكتشاف الجسيمات الأساسية أو خصائص المادة. أما هذا العام، فقد احتفت الجائزة بمجال متعدد التخصصات يمتد تأثيره إلى علوم الحاسوب والتكنولوجيا كما أن الجائزة سلطت الضوء على تأثير الذكاء الصناعي في تحسين جودة الحياة اليومية، من خلال تطبيقاته في الطب والصناعة، والتكنولوجيا الرقمية. هذا كلّهُ يبرز تطوراً ملحوظاً في توجه الجائزة نحو المجالات التي تلامس احتياجات المجتمع إن جائزة نوبل في الفيزياء لعام 2024 م ليست مجرد تكريم

تماماً مثل طريقة استدعاء البشر للذكريات، ولقد استلهم هذا النموذج الرياضي من الفيزياء الإحصائية ليقدم طريقة جديدة لتخزين واسترجاع المعلومات عبر شبكات عصبونية قادرة على التعرف على الأنماط داخل مجموعات بيانات كبيرة. كان هذا العمل بمثابة نقلة نوعية في الجمع بين الفيزياء وعلوم الحوسبة.

مثّل هذا الاكتشاف خطوة هامة في تطوير الذكاء الاصطناعي، حيث أصبح بإمكان الحواسيب التعرّف على أنماط معينة واسترجاع المعلومات المخزنة بطرق مشابهة لعقل الإنسان.

جيفري هينتون: Geoffrey Hinton

وُلد هينتون في لندن عام 1947م. درس علم النفس والفيزياء في جامعة إدنبرة قبل أن ينتقل إلى جامعة كامبريدج لإكمال الدكتوراه في علوم الحاسوب. بدأ اهتمامه بالشبكات العصبونية أثناء عمله في معهد كارنيجي ميلون، حيث قدم إسهامات جوهرية في تطوير الخوارزميات المستخدمة في التعلم العميق. حالياً، يشغل منصب أستاذ في جامعة تورنتو.

يُعتبر هينتون أحد أبرز الرواد في مجال الذكاء الصناعي. عُرف بلقب "عزّاب التعلم العميق" وهو مجال يعتمد على الشبكات العصبونية الصناعية التي تحاكي الدماغ، إذ ساهم بشكل كبير في تطوير الشبكات العصبونية العميقة، والتي مكنت الحواسيب من محاكاة عملية التفكير البشري بشكل أكثر دقة وفعالية. يتمثّل أحد إنجازاته الرئيسية في تطوير خوارزمية الانتشار العكسي (backpropagation)، التي تسمح للحواسيب بالتعلم من الأخطاء وتحسين أدائها مع مرور الوقت. غدّت هذه الخوارزمية حجر الأساس في إحداث ثورة في تطبيقات الذكاء الاصطناعي، بدءاً من التعرف على الصوت والصور إلى الترجمة الآلية.

اعتمد هينتون أيضاً على الفيزياء الإحصائية، التي تُستخدم لدراسة النظم المعقدة مثل الغازات حيث يمكن -بدلاً من تحليل كلّ ذرة على حدة- دراسة خصائص المنظومة ككلّ. طبّق هينتون

Pham Tiep، أستاذ الرياضيات بجامعة روتجرز، من حل مشكلتين رياضيتين معقدتين أثارتا الجدل بين علماء الرياضيات لعقود. هذا الاختراق ليس فقط خطوة مهمة في مجال الرياضيات النظرية، ولكنه يُلقي الضوء على إمكانية توظيف تلك الحلول لفهم الأنظمة الفيزيائية والطبيعية وتعزيز التطبيقات العلمية المختلفة.

كانت أولى المشكلتين تتعلق بمخفنة "ارتفاع الصفر Hight Zero" التي طرحها عالم الرياضيات الشهير ريتشارد براور Brauer عام 1955، والمرتبطة بنظرية التمثيل القياسي Modular Representation للزمr المنتهية، التي تُعدّ من أعقد المجالات في الجبر، حيث كانت المسألة موضع تحدٍ للعلماء منذ أن تمّ طرحها. نُشر الحل الذي توصل إليه الدكتور تيب في العدد الأخير (أيلول/سبتمبر 2024) من مجلة Annals of Mathematics، وهو يُعتبر إنجازًا تاريخيًا في هذا المجال.

تمكن الدكتور تيب أيضًا من تحقيق تقدم كبير في مسألة مرتبطة بنظرية التمثيل، تُعرف باسم "نظرية ديلجن-لوستزيج Deligne-Lusztig theory". يتناول هذا الإنجاز مفهوم "آثار المصفوفات" في الرياضيات، والأثر هو مجموع العناصر القطرية للمصفوفة. تمّ تقديم بحثين في هذا المجال نُشرا في مجلتي Annalsg Inventiones Mathematicae of Mathematics لعام 2024، ويُعتبر هذا العمل جبر الزاوية في تحقيق تقدّم كبير في فهم مجال خاص من الرياضيات البحتة تُعد هذه الإنجازات تقدّمًا كبيرًا في الرياضيات النظرية، حيث توفر حلولًا جديدة لمسائل طويلة الأمد وتفتح آفاقًا للتطبيقات العملية. [المصدر](#)

لإنجاز علمي، بل هي اعتراف بأهمية التكامل بين الفيزياء وعلوم الحاسوب في مواجهة التحديات المعاصرة. تُبرز قصّة نجاح جون هوبفيلد وجيفري هينتون كيف يمكن للابتكار أن يولّد من تقاطع الأفكار المتنوعة، مما يلهم الأجيال القادمة لمتابعة البحث والاكتشاف.

المخاوف حول الذكاء الصناعي:

على الرغم من الفوائد الكبيرة لتعلّم الآلة في الطب والهندسة وغيرها، أعرب هينتون وآخرون عن مخاوفهم من التطور السريع لهذه التقنية. هناك قلق من أن الآلات قد تصل إلى مرحلة من الاستقلالية، حيث تستطيع اتّخاذ قرارات بمفردها، ممّا قد يؤدي إلى خروجها عن سيطرة الإنسان.

أضحت اليوم أجهزة الكمبيوتر، على الرغم من عدم قدرتها على التفكير مثل البشر، قادرة على محاكاة بعض وظائف العقل مثل الذاكرة والتعلم. بفضل جهود هوبفيلد وهينتون، أصبح بإمكان الآلات معالجة المعلومات بطرق مستوحاة من الدماغ البشري، ما جعلها أكثر قدرة على التعامل مع البيانات الضخمة والتعلّم منها.

أخبار علمية

عالم رياضيات من جامعة روتجرز يحقق اختراقًا مزدوجًا في حل مشكلتين رياضيتين معقدتين



في إنجاز رياضي لافت، تمكن الدكتور فام تيب

موضوعات إثرائية: معارف

المنظومة. قد تكون هذه العمليات أو الإجراءات شبه ساكنة quasi-static، بحيث يتم الحفاظ على حالة التوازن أثناء العملية وتكون العملية عكوسة reversible، ولكن يمكن للمنظومة أن تنتقل من حالة توازن إلى أخرى عبر إجرائية لا تحقق التوازن (على سبيل المثال، التمدد الحر للغاز).

يتألف "الملخص التنفيذي" للقوانين من التصريحات التالية:

1 - ينص القانون الأول على أن الحرارة هي شكل من أشكال الطاقة وأن الطاقة مصونة.

2 - يُخبرنا القانون الثاني أن المنظومة لا يمكنها تحويل كل الحرارة المُمتصة إلى عمل، فلا توجد آلات ذات كفاءة مثالية تساوي مائة بالمائة. في القانون الثاني، يتم تقديم متحول حالة مهم جديد، وهو الأنثروبية S .

3 هناك درجة حرارة دنيا، تكون فيها المنظومة منتظمة إلى أقصى حد، حيث تسعى الأنثروبية عندها إلى الصفر. هذه نتيجة للطبيعة الميكانيكية الكمومية لأي منظومة فيزيائية، حيث تغدو هذه الطبيعة مهمة وأساسية عند درجات الحرارة المنخفضة للغاية.

من المدهش أن حالات النظم العيانية المكونة من عدد كبير جدًا من الجسيمات التي تكون في حالة توازن يمكن وصفها بفعالية من خلال عدد صغير جدًا من المتحولات والبارامترات. هذه ظاهرة عامة جدًا، تنطبق على فئات كبيرة من السوائل والغازات

الديناميكا الحرارية (الترموديناميك) وقوانينها الثلاثة

ملاحظة تاريخية

نشأت الديناميكا الحرارية قبل فهم الطبيعة الذرية للمادة. كان الطبيب الألماني يوليوس روبرت ماير (1814-1878) أول من أفاد صراحةً في عام 1842 بأن الحرارة هي شكل من أشكال الطاقة، ولم يتم الاعتراف باكتشافه العظيم وبالتطبيقات التي أوجدها ماير إلا بعد ذلك بكثير، وهذا ما جعله يشعر بالمرارة واليأس.

يعود العمل على المحركات الحرارية إلى عمل نيكولا ليونارد سادي كارنو (1796-1832)، الذي صاغ قانون الأنثروبية المعروف بالقانون الثاني للديناميكا الحرارية. تمّت صياغة الديناميكا الحرارية كنظرية متماسكة بواسطة كلوزيوس واللورد كلفن، وتم تطويرها بشكل أكبر بواسطة جوزايا ويلارد جيبس حوالي عام 1875. يرجع القانون الثالث، الذي يشير إلى أن الأنثروبية تتلاشى عند درجة حرارة الصفر المطلق، إلى هيرمان والتر نيرنست (1864-1941).

قوانين الترموديناميك الثلاثة:

تصف القوانين الثلاثة للديناميكا الحرارية النظم التي تتبادل الطاقة مع بعضها البعض أو مع بعض البيئات المحيطة. يمكن لهذا التبادل أن يتمثل بعمل يقوم به المنظومة، أو أن يكون حرارة يتم امتصاصها. من حيث المبدأ، يمكن أيضًا تغيير عدد الجسيمات في

والمواد الصلبة، ومزائجها.

في الديناميكا الحرارية، نحن مهتمون بوصف عمليات النظم العيانية (أو أجزائها) التي يحدث فيها نوعٌ من تبادل الطاقة (قد يكون ذلك لأننا نجلب هذه النظم إلى تماس حراري، أو نسلط عليها قوى). الآن سنكون مهتمين بالتغيرات في المتحولات التي تميز حالة المنظومة حيث يساوي عدد المتحولات المستقلة عدد الطرق التي يمكن بها توفير الطاقة أو استخراجها من المنظومة، وحيث يُرفَق بكلٍّ من هذه المتحولات متحوّل آخر يشكّل معه زوجًا مقرونًا. نصف متحولات الحالة هذه شموليّة extensive (أي متناسبة مع كمية المادة أو حجم المنظومة)، مثل الحجم V ، والنصف الآخر ذاتيّة intensive، مثل الضغط P ودرجة الحرارة T ، لذا نحتاج لوصف الخصائص الديناميكية الحرارية بالكامل إلى عدد زوجي من المتحولات، بينما في معادلات الحالة (مثل $PV = RT$ بالنسبة للغازات المثالية) يكون لدينا عادةً عدد فردي فقط، ما يُشير إلى توقُّع وجود متحوّل ترموديناميكي آخر ذي صلة.

وبما أننا مهتمّون الآن بتغيّرات حالة المنظومة، فليس من المستغرب استخدام التفاضلات والمشتقات لوصف التغيرات اللامتناهية الصغر التي قد تخضع لها المنظومة.

ينص القانون الأول للديناميكا الحرارية بشكل أساسي على أن الحرارة هي شكل من أشكال الطاقة. وبصورة أكثر دقة، ينص على أن التغير في الطاقة dU يساوي الحرارة التي تمتصّها المنظومة dQ منقوَصًا منها مقدار العمل الذي تقوم به المنظومة dW . بدلاً من ذلك، يمكننا القول إن القانون الأول ينص على مصونيّة الطاقة. تقترح المعادلة حاليتين

خاصّتين: واحدة حيث لا يتم القيام بأي عمل ($dW = 0$)، والأخرى حيث لا يتم تبادل الحرارة ($dQ = 0$)، وفي هذه الحالة نتحدث عن إجرائيّة كظومة adiabatic. علينا الآن أن نكون حذرين هنا، حيث لا تحدث جميع الإجرائيّات المسموح بها من حيث الطاقة، فمن المؤكد أنه من الممكن تحويل العمل بالكامل إلى حرارة، ولكن ما إذا كان التحويل يعمل أيضًا في الاتجاه الآخر فليس واضحًا على الإطلاق.

القوانين الثلاثة للترموديناميك

$$dU = \delta Q - \delta W$$

$$ds = \frac{\delta Q}{T}, \quad \frac{ds}{dt} \geq 0$$

$$T \rightarrow 0 \Rightarrow s \rightarrow 0$$

مهمة مستحيلة

لقد أنفق المخترعون ومن جميع الأمم قدرًا هائلًا من العمل لإنشاء ما يُسمى بالآلة الدائمة الحركة، وهي آلة بمجرد وضعها في الحركة تستمر في الحركة إلى الأبد دون مصدر خارجي للطاقة، أي إنها جهاز يولد بنفسه الطاقة اللازمة لإبقائه قيد التشغيل. وقد تمّ اقتراح أجهزة دائمة الحركة تبدو بديعةً وفعّالة للغاية، ومع ذلك، يمكن إثبات استحالة وجود آلة دائمة الحركة بدقة من خلال أول قانونين للديناميكا الحرارية. قرّرت الأكاديمية الفرنسية للعلوم في عام 1775 عدم النظر بعدها في أيّ مقترحات أو منشورات تدّعي وجود آلة دائمة الحركة، وعلى الرغم من ذلك لا تزال بعض المقترحات المماثلة والجديدة تظهر من وقت لآخر.

نعلم جميعًا أنه إذا تمّ تسخين عجلة، فلن تبدأ

أنه لا توجد عملية ديناميكية حرارية يقتصر تأثيرها الوحيد على استخراج الحرارة من خزان أكثر برودة وتوصيلها إلى خزان أكثر سخونة. بعبارة أخرى، لا توجد ثلاجة مثالية. في الواقع، يجب بذل عمل في الثلاجة الحقيقية لنقل الحرارة من الخزان الأكثر برودة إلى الخزان الأكثر سخونة؛ وكما يعلم الجميع، فإن التبريد يتطلب طاقة.

يتضمن القانون الثاني مفهوم الأنتروبية، التي يشار إليها بـ S . إنها متحول حالة مثل درجة الحرارة، ولكنها مفهوم أكثر دقة وحذاقة، لأنه لا يمكن قياسها بشكل مباشر. يرتبط التغير في الأنتروبية بدرجة الحرارة T وكمية الحرارة Q ، بحيث تؤدي كمية ضئيلة للغاية من الحرارة تمتصها المنظومة إلى تغير في أنتروبيتها وفق العلاقة: $dQ = TdS$. ينص القانون الثاني للديناميكا الحرارية على أنه بالنسبة لأي إجرائية تجري في منظومة مغلقة، لا يمكن للأنتروبية أن تنقص. مثال: بالنسبة للثلاجة المثالية، سوف يتم استخراج كمية (موجبة) من الحرارة q من المنظومة عند درجة حرارة منخفضة T_1 وبعد ذلك سيتم توصيل نفس الكمية q إلى البيئة عند درجة حرارة أعلى T_2 . يكون التغير الكلي في الأنتروبية ΔS مساوياً لـ

$$\Delta S = -q/T_1 + q/T_2,$$

أي

$$\Delta S = q(1/T_2 - 1/T_1),$$

وهذا مقدار أصغر من 0، مما ينتهك القانون الثاني. وبالتالي فإننا نستنتج أن الثلاجة المثالية لا يمكن أن توجد.

تميل الحرارة إلى التسبب في حركات عشوائية

في الدوران من تلقاء نفسها -على الرغم من أن هذا مسموح به بموجب مصونية الطاقة- فالأمر ليس مستحيلاً ولكن احتمال حدوثه ضئيل للغاية. من ناحية أخرى، يُحوّل المحرك البخاري الحرارة إلى عمل، وبالتالي يأتي السؤال المهم "إلى أي مدى يمكن تحويل الحرارة إلى عمل؟"

تأتي الإجابة من خلال القانون الثاني للديناميكا الحرارية، وهو بلا شك الأكثر شهرة من بين القوانين الثلاثة. وقد ذُكر هذا القانون في المقال الشهير "الثافتان" بقلم سي بي سنو C.P. Snow، الذي نُشر في مجلة نيو ستيتسمان عام 1956، حيث انتقد سنو علناً الأهمية العلمية للأشخاص المتعلمين جيداً من خلال ملاحظة حقيقة مفادها أن الجميع تقريباً يعرفون حبةً لمسرحية ما لشكسبير ولكن لا أحد تقريباً يعرف ما هو القانون الثاني للديناميكا الحرارية - والذي لا يقل أهمية -!

هناك صيغتان مختلفتان ولكن متكافئتان للقانون الثاني. تنص صيغة كلفن على أنه لا توجد إجرائية ترموديناميكية يكون تأثيرها الوحيد هو استخراج الحرارة من خزان وتحويلها بالكامل إلى عمل. ويمكن إعادة صياغة ذلك بالقول إن المحرك المثالي لا يمكن وجوده من ناحية المبدأ. يجب أن نقارن هذا بمحرك حقيقي، وهو عبارة عن آلة تمر بدورة من الحالات الترموديناميكية فنُحوّل الحرارة إلى عمل، ولكن في نفس الوقت يجب أن تنقل جزءاً من الحرارة المُستخلصة إلى البيئة (التي تشكل خزائناً بدرجة حرارة أقل). لا يمكن للآلة تحويل مجمل الحرارة المستخرجة إلى عمل، ما يعني أن مثل هذا المحرك الحقيقي لا يكون فعالاً بنسبة مائة بالمائة أبداً.

تنص صيغة كلاوزيوس للقانون الثاني على

إليه، فإن الأنثروبية والفوضى تزدادان. يتفق هذا التعريف للأنثروبية مع تعريف المعلومات في نظرية المعلومات الحديثة وفقًا لأعمال كلود إلود شانون. لذا فإن محتوى المعلومات في الكتاب هو لوغاريتم جميع الطرق الممكنة التي يمكن أن يمتلئ بها الكتاب بالكلمات (أو بالحروف).

كيف يمكن أن تكون المعلومات هي نفسها الفوضى؟ تخيل فصلين دراسيين مليئين بالأطفال، حيث يوجد الكثير من الانضباط وجميع الأطفال يغنون "عيد ميلاد سعيد" في أحد الفصلين، بينما في الفصل الآخر، ذهب المعلم وترك الأطفال بمفردهم، يتحدثون جميعًا في الوقت نفسه. من الواضح أن الفصل الفوضوي يُنتج حوالي 25 ضعفًا من المعلومات التي ينتجها "صوت عيد الميلاد الواحد"، لذا، فمن المنطقي مطابقة الفوضى بالمعلومات إن الاعتبار التي ذكرناها للتو أدت إلى بيان مُثير للدهشة في أنه بما أن الأنثروبية —وبالتالي مقدار الفوضى — لابد أن تزداد، فإن المصير النهائي لأي منظومة مغلقة هو الفوضى المطلقة، أو ما يُسمى "الموت الحراري". ومن المفترض أن ينطبق هذا أيضاً على الكون ككل — وهو منظور قائم إلى حد ما بالفعل. ومع ذلك، ينبغي لنا أن نضع في اعتبارنا أن القانون الثاني لا يحظر أن تقوم منظومة جزئية معينة داخل منظومة مغلقة بخفض أنثروبيتها عن طريق إطلاق الحرارة، والتي لابد أن تمتصها بعد ذلك أجزاء أخرى من المنظومة الكلية. وهذه هي الطريقة التي يتم بها تحقيق التنظيم والتعقيد المتزايدين -على سبيل المثال- في النظم البيولوجية يشرح القانون الثالث للديناميكا الحرارية ما يحدث إذا اقتربت المنظومة من أدنى درجة حرارة ممكنة

في المنظومة، فتبدأ الجزيئات في التصادم مع المزيد من الطاقة. لذلك قد يقول المرء إن مفهوم الأنثروبية هو مقياس للفوضى في المنظومة. يمكن جعل هذا التعريف دقيقًا إذا درسنا الارتباط الإحصائي بحالات المنظومة التي يمكن الوصول إليها على المستوى المجهرى. في مجال الميكانيكا الإحصائية، يمكن للمرء أن يثبت أنه في منظومة مغلقة ليست في حالة توازن، تزداد الأنثروبية حتى تصل إلى أقصى حد لها عند حالة التوازن. هذا في الأساس نتيجة للنزعة القائلة بـ "الانتقال من حالة أقل احتمالية إلى حالة أكثر احتمالية". إذا تم إطلاق قطرة من الحبر في وعاء مملوء بالماء، فإن جزيئات الحبر ستنتشر وتنتشر في الماء حتى تصل إلى حالة التوازن حيث يتم توزيع الجزيئات بشكل منتظم في جميع أنحاء الوعاء. من الواضح أن العملية المعاكسة لن تحدث، وبالتأكيد ليس تلقائيًا. فُكر في التشبيه التالي: إذا بدأ شخص ما في إعادة ترتيب الأشياء في غرفة مراهق بشكل عشوائي، فلن يخلق ذلك بالتأكيد منظومة بل فوضى، وكما يعرف الكثير منا جيدًا، فهذه هي حالة التوازن التي تنتهي إليها غرف معظم المراهقين. أمّا لخلق الانتظام، فيتعين على المرء أن يفعل العكس وأن يبذل جهدًا مُحددًا لوضع الأشياء بالضبط في المكان الذي تنتمي إليه. وهذا في الواقع يتطلب قدرًا كبيرًا من الطاقة.

الأنثروبية والمعلومات

على المستوى المجهرى، يمكن تعريف الأنثروبية على أنها لوغاريتم عدد الحالات المجهرية التي يمكن الوصول إليها والمنسجمة مع قيم المتحولات العيانية المميزة للمنظومة، ولأن رفع درجة الحرارة يجعل عددًا متزايدًا من الحالات يمكن الوصول

أنيق بعض الخصائص الحذقة للجسيمات والتي يصعب فهمها مثل مفهوم السبين (الدومة)، ووفر أساساً متيناً لما يسمى بمبدأ الاستبعاد لباولي والضروري لتفسير البنية الذرية والجدول الدوري. وأخيراً وليس آخراً، تنبأت المعادلة بوجود المادة المضادة، من حيث أنه بالنسبة لأي "نوع" من الجسيمات يوجد نوع مرتبط به له خصائص معاكسة تمامًا (مثل الشحنة)، ولكن له نفس الكتلة.

على الرغم من نجاحات معادلة شرودنجر الهائلة، إلا أن عيباً خطيراً كان بها في أنها لم تكن متوافقة مع النسبية الخاصة. يمكن استنتاج ذلك من حقيقة أن متحوّلي المكان والزمان في المعادلة لا يظهران على قدم المساواة: فهي تحتوي على مشتقة أولى بالنسبة للزمن، بينما تكون المشتقة من الرتبة الثانية بالنسبة للإحداثيات المكانية. حلّ ديراك هذه المشكلة من خلال تقديمه المعادلة التي تحمل اسمه

$$\left\{ \gamma^\mu \left(i \frac{\partial}{\partial x^\mu} - e A_\mu \right) - m_e \right\} \Psi(x^\nu) = 0$$

معادلة ديراك للإلكترون ضمن حقل كهربي

تحتوي معادلة ديراك على بنية رياضية معقدة إلى حد ما، تُخفيها نوعاً ما طريقة التدوين المُدقّجة، لذا دعنا نأخذ بعض الوقت للتعليق على طريقة التدوين المستخدمة. يوجد مؤشر دليل μ يمكن أن يأخذ القيم 0 أو 1 أو 2 أو 3، ما يشير إلى الزمن والمركبات المكانية الثلاثة، والتي تظهر بالفعل على قدم المساواة. تصف الحقول الأربعة A_μ ، والتي تسمى "الكمونات الكهرومغناطيسية"، المجال الكهرومغناطيسي الذي يتحرك فيه الإلكترون (على سبيل المثال)، بالكتلة m_e . يتم وصف مجال الإلكترون هنا بواسطة دالة

وهي صفر كلفن، أي حوالي 273- درجة مئوية. عند هذه الدرجة من الحرارة تتوقف الحركة الحرارية، وتصبح المنظومة منظمّة إلى أقصى حد، وينخفض عدد الحالات التي يمكن الوصول إليها إذ تغدو المنظومة في أدنى حالة طاقية لها، فإذا كانت هذه الحالة فريدة من نوعها، توجّب على الأنثروبية أن تنعدم. إن وجود مثل هذه الحالة ينبع من الخصائص الكمومية للطبيعة.

الإلكترون النسبوي ومعادلة ديراك

بول أدريان موريس ديراك

ولد بول أدريان موريس ديراك في الثامن من أغسطس-آب عام 1902 في إنجلترا، وكان والده سويسرياً ووالدته إنجليزية. درس الهندسة الكهربائية والرياضيات في بريستول وانضمّ إلى كلية سانت جونز في كامبريدج، كطالب دراسات عليا في الرياضيات. حصل على درجة الدكتوراه عام 1926 وأصبح زميلاً في كلية سانت جونز. انتُخب زميلاً في الجمعية الملكية عام 1930، واحتلّ مقعد الأستاذ اللوقي للرياضيات في كامبريدج عام 1932. تقاسم ديراك جائزة نوبل في الفيزياء مع شرودنجر عام 1933. تولى ديراك في عام 1971 منصب الأستاذية في جامعة ولاية فلوريدا في الولايات المتحدة. توفي عام 1984.

معادلة ديراك

تتمل إحدى نقائص معادلة شرودنجر في أنها غير متوافقة مع النسبية. حلّت معادلة ديراك هذه المشكلة؛ فهي توحد بين مفاهيم ميكانيكا الكم والنسبية الخاصة، وتصف الخصائص الكمومية للجسيمات مثل الإلكترونات والبروتونات والنيوتريونات والكوراكات. وقد أوضح تحليل هذه المعادلة بشكل

بمعادلةٍ من نوع ديراك، والناصة على أنه لا يمكن لجسيمين أو أكثر من هذه الجسيمات أن يجلسا في الحالة نفسها تمامًا. مثل هذا الأمر مُكوّنًا حاسمًا ولكن حتى ذلك الحين موضوعًا لأغراض نظرية الكم بالذات، من حيث أنه ضروري لتفسير الجدول الدوري للذرات. في الواقع، بما أن الإلكترونات في الذرة لا يمكن أن تجلس جميعها في نفس مستوى الطاقة الأدنى، فيجب عليها أن تملأ مستويات الطاقة الأعلى بشكل منهجي، ممّا يتسبب في إظهار أنواع مختلفة من الذرات لأنماط سلوكٍ كيميائيٍّ مختلفة ومتنوعة.

تقول الأساطير أن ديراك كان يكره الدعاية وكان رجلاً قليل الكلام. ومع ذلك، فإن كتابه عن ميكانيكا الكم لا يزال واحدًا من أكثر الكتب أناقة وكتابةً جيّدةً حول هذا الموضوع. ربما يتوافق كلا الأمرين مع تصريحه: "لقد تعلمت في المدرسة ألاّ أبدأ جملة أبدًا دون معرفة نهايتها".

المجالات الكمومية

بينما تعاملنا في الفيزياء الكلاسيكية مع الجسيمات والقوى والموجات، اكتشفنا في نظرية الكم أن المفاهيم الكلاسيكية المختلفة جدًّا للجسيمات والموجات أصبحت مُوحّدة بطريقة ما، بمعنى أنها بدت متكاملة. أمّا في نظرية المجال الكمومي فإننا نضيف النسبية الخاصة إلى الصورة الكمومية، ما يعني أنه يجب تنفيذ تكافؤ الكتلة والطاقة في النظرية. وهذا ما يحدث بالفعل: فحالات نظرية المجال الكمومي هي حالات متعددة الجسيمات تصف أعدادًا مختلفة من أنواع متباينة للجسيمات، وكل منها يُلبّي علاقة أينشتاين بين

مكونة من أربعة مركّبات ψ . إن ما يسمى "مصفوفات جاما" γ هي أربع مصفوفات رقمية (مصفوفات بأربعة سطور وأعمدة) تُطبّق على (أي تُضرب بطريقة رياضية قياسية بمركّبات) ψ في الواقع، هناك مؤثّر دليل إضافي على ψ قمنا بإزالته لمنع التدوين من أن يغدو أكثر تعقيدًا).

كشف تحليل المعادلة عن معنى المركّبات الأربع لحقل ديراك. وهو يتضمن وصفًا للخاصية الغامضة التي تُسمّى السبين، والتي يمكن وصفها على أفضل وجه بأنها درجة حرّية تُعبّر عن دوران ذاتيّ متأصل. يمكننا القول إن الإلكترون هو المعادل الكمومي لقمة خذروف (بلبل) صغير دوّار - يمكنه أن يُدوّم إلى اليسار أو إلى اليمين

ومن المثير للدهشة أن المعادلة لم تصف فقط مُركّباتي السبين للإلكترون، بل وأيضًا حالتي السبين لجسيم آخر بنفس الكتلة تمامًا ولكن بشحنة معاكسة (موجبة)، أُطلق عليه اسم البوزيترون. اكتشف أندرسون هذا الجسيم الذي قدّم المثال الأول لـ "جسيم مضاد" تجريبيًا في عام 1932، وأصبح من الواضح أن جميع الجسيمات في الطبيعة لها في الواقع جسيمات مضادة، ذات خصائص معاكسة تمامًا بحيث عندما يلتقي جسيم وجسيم مضاد، يمكن لعنصري الزوج أن يفنّي أحدهما الآخر فيتحوّلًا إلى طاقة صرفة في شكل إشعاع كهرومغناطيسي، وهذا مثال درامي للمعادلة $E = mc^2$. وبسبب خصائص السبين الغريبة، يُطلق على الجسم المُركّب من أربعة مركّبات ψ اسم سبينور (مُدوّم) بدلاً من متّجه

كما أدى تحليل إضافي لمعادلة ديراك إلى تفسير مبدأ استبعاد باولي، هذه القاعدة التي تلتزم بها الإلكترونات وجميع الجسيمات الأخرى الموصوفة

شاملة لجميع التفاعلات الأساسية في الطبيعة من منظور مُوحدٍ إلا بعد تطوير نظرية المجال الكمومي

الشبكات العصبونية التلافية (Convolutional Neural Networks - CNNs)

مقدمة

الشبكات العصبونية التلافية (CNNs) هي إحدى ركائز الذكاء الاصطناعي الحديث، حيث تُستخدم على نطاق واسع في معالجة الصور والفيديوهات، بالإضافة إلى تطبيقات أخرى. تعتمد الـ CNNs على تقنيات التعلّم العميق من أجل استخراج السمات (Features) والتعامل مع الأنماط البصرية باستخدام بنية مُصمّمة لمحاكاة عمل الدماغ البشري في معالجة البيانات البصرية مثل الصور.

عندما يتعلق الأمر بالتعلّم الآلي Machine Learning، هناك الشبكات العصبونية الاصطناعية ANN التي تُعرف أيضًا باسم الـ الشبكات العصبونية ذات التغذية الأمامية FNN لأن معطيات الدخل فيها تُعالج في الاتجاه الأمامي فقط فلا تمرّ المعلومات إلّا في الاتجاه المبتدئ من عقد الدّخل المختلفة إلى عقدة الخرج مرورًا ربّما بعقد مخفية وسطية. وهناك الشبكات العصبونية الراجعة RNN التي تحفظ خزّج عقد المعالجة، التي يعمل كلّ منها كخلاية ذاكرة، وتُغذّي النتيجة مرّة أخرى في النموذج، وبالتالي لا تمرّ المعلومات في اتجاه واحد فقط، فإذا كان تنبؤ الشبكة غير صحيح، فإن المنظومة تتعلّم ذاتيًا وتستمر نحو التنبؤ الصحيح أثناء الانتشار الخلفي back propagation.

أمّا الـ CNN فهي نوع خاص من الـ FNN يستخدم

الطاقة-الكتلة والزخم. ويمكن استخدام المجالات الكمومية لإنشاء أو إفناء الجسيمات بحيث يمكن أخذ التفاعلات في الاعتبار. إنها لغة يتم فيها وصف جميع الجسيمات والقوى على قدم المساواة باعتبارها كمياتٍ من المجالات الكمومية المقابلة

الديناميكا الكهربائية الكمومية

(الإلكتروديناميك الكمومي)

تشكل معادلة ديراك مع معادلات ماكسويل الديناميكا الكهربائية الكمومية (QED)، وهي النظرية الكمومية للإلكترونات والبوزيترونات والفوتونات. وقد استكمل هذه النظرية بعد الحرب العالمية الثانية الفيزيائيان الأمريكيان ريتشارد فاينمان وجوليان شفينجر والياباني شين-إيتشيرو توموناغا. لقد تم اختبار النظرية بدقة شديدة، على سبيل المثال من خلال مجموعة متنوعة من القياسات الدقيقة للغاية للعزم المغناطيسي للإلكترون وجسيم يسمى الميون.

الديناميكا الكهربائية الكمومية هي النموذج الأولي لما يسمى الآن بنظرية المجال الكمومي -الإطار الذي يتم فيه صياغة الديناميكيات النسبوية للجسيمات الأولية والقوى الأساسية في الوقت الحاضر- التي تقدم وصفًا ناجحًا للغاية لكيفية تصرف الطبيعة على المستوى الأكثر أساسية.

ومن الجدير بالملاحظة أنه في هذا الإطار يتم إزالة التمييز بين القوى والجسيمات التي تُطبّق عليها هذه القوى؛ حيث تصف المجالات الكمومية كليهما، إذ تُوصف القوة هنا بأنها تبادلٌ بعض الجسيمات الوسيطة التي "تحمل" تلك القوة؛ ففي الكهرومغناطيسية، يُعدّ الفوتون هو ذلك الجسيم الرسول الحامل. لم يعد بوسعنا أن نأمل في معالجة

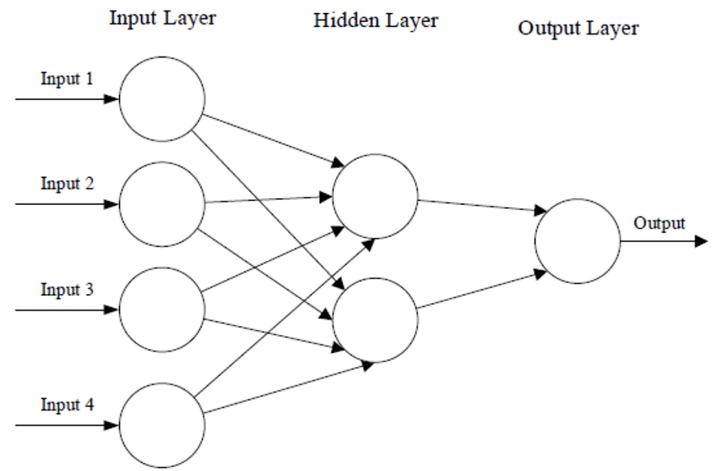
حيث تقوم بتطبيق عملية التلاف (Convolution) بين بيانات الدخل (Input) ومُرشِّح صغير (Filter) يُدعى رياضياً بالنواة Kernel، حيث يمكن تمثيل العملية بالصيغة التالية

$$y[i,j] = \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} x[i+m-1, j+n-1] \cdot w[m,n]$$

حيث $x[i,j]$ هي قيمة الدخل عند الموضع $[i,j]$ ، بينما $w[i,j]$ هي قيمة الوزن داخل المرشِّح عند الموضع $[i,j]$

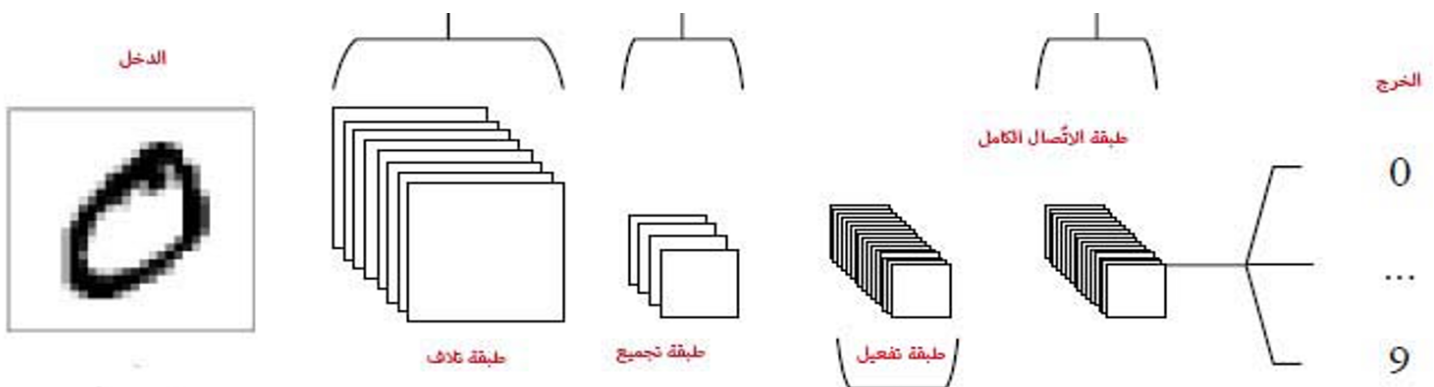
فتكون $y[i,j]$ ناتج التلاف عند الموضع $[i,j]$ ، $[m,n]$ ينجم عن هذه الطبقة إذن دالة سمة feature map تبين الخصائص الأساسية للدخل. مثلاً بتلاف المصفوفة

$$\begin{pmatrix} 3 & 0 & 1 & 2 & 7 & 4 \\ 1 & 5 & 8 & 9 & 3 & 1 \\ 2 & 7 & 2 & 5 & 1 & 3 \\ 0 & 1 & 3 & 1 & 7 & 8 \\ 4 & 2 & 1 & 6 & 2 & 8 \\ 2 & 4 & 5 & 2 & 3 & 9 \end{pmatrix}$$



الشكل 1: بنية نموذجية لـ FNN

تنوعاً من المُدركات perceptrons متعددة الطبقات، تحتوي على طبقة تلاف أو أكثر يمكن وصلها بعضها مع بعض أو تجميعها pooling، لتخلق خرائط سمات feature maps تقوم بتسجيل قسم من الصورة تخضع بعدها لمعالجة غير خطية. كما في الـ ANN، يُحسب خرج كل عصبون عبر تطبيق دالة ما على قيم الدّخل المتأنيّة من عصبونات في طبقة سابقة تتحدّد من خلال إعطاء متجه أوزان weights لمعطيات الدّخل مع انحياز bias، وتتلخّص عملية التدريب بإجراء ضبط تكراري لقيم هذه الأوزان والانحيازات حتى نبلغ قيمة صغرى لدالة الخسارة loss function.



الشكل 2: بنية نموذجية لـ CNN

مع المرشِّح

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & -1 \\ 1 & 0 & -1 \\ 1 & 0 & -1 \end{pmatrix}$$

مكونات الشبكات العصبونية التلافية

1. طبقة التلاف (Convolutional Layer)

تُعتبر طبقة التلاف العنصر الأساسي في الـ CNNs،

نحصل على

$$\begin{pmatrix} -5 & -4 & 0 & 8 \\ -10 & -2 & 2 & 3 \\ 0 & -2 & -4 & -7 \\ -3 & -2 & -3 & -16 \end{pmatrix}$$

حيث تنجم القيمة -5 في الموضع (1,1) من الجداء الداخلي للأعداد الحمراء (المرشّح) بالسوداء (المصفوفة الجزئية ببعد 3 في الزاوية العليا اليسرى)

في الشكل

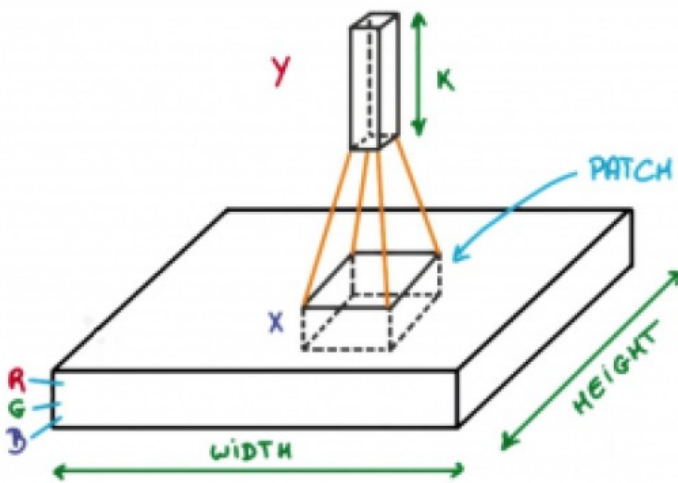
$$\begin{pmatrix} 3^1 & 0^0 & 1^{-1} \\ 1^1 & 5^0 & 8^{-1} \\ 2^1 & 7^0 & 2^{-1} \end{pmatrix}$$

والأمر نفسه بالنسبة للمواضع الأخرى. إن إجراء التلافّ على جميع العناصر يُحسّن من الأداء لأن كل عنصر في الخرج يعتمد على عدّة عناصر في الدخل، ما يؤدي إلى وجود عدد كبير من الوصلات ولكن بأوزان مشتركة فيما بينها shared weights ما يزيد من فاعليّة التعلّم، ويحسّن من قدرة الشبكة على التعميم أثناء إجرائيّة التدريب في التعلّم الآلي.

نجد أنه إذا كان الدخل مصفوفةً مربعةً بعدها n وكان المرشّح مصفوفةً مربعةً بعدها f ، نتجت لدينا بعد التلافّ مصفوفةً مربعةً بعدها $(n-f+1)$. يمكن إجراء عمليّة تشطير striding من خلال عدم إجراء التلافّ من أجل كلّ عنصر، بل يمكن القفز بـ s خطوة وفق الأسطر والأعمدة، وفي هذه الحالة يكون بعد المصفوفة الناتجة $((n-f)/s + 1)$.

من أجل البيانات البصريّة يمكن إضافة بعد ثالث للمصفوفة يمثّل عمقها ما يجعلنا نتخيلها كأنها ثلاث مصفوفات مرصوفة وراء بعضها البعض كلّ منها يمثّل لوناً من بين الألوان الأساسيّة (أحمر،

أخضر، أزرق)، بينما يمكن اعتبار عمليّة التلافّ كأنها تشذيب لعناصر المصفوفة عبر المرشّح الذي نختاره بحيث يصطفي سمةً معيّنة، وفي هذه الحالة يجب اختيار عمقه مساوياً لذاك الذي للمصفوفة. يمكن إجراء العديد من عمليّات التلافّ عبر مرشّحات متباينة، وتخيّل المصفوفات الناجمة وكأنها تمثّل بعداً (عمقاً) إضافياً للمصفوفة الناجمة عن عمليّة التلافّ الإجمالية ذات المرشّحات العديدة.



الشكل 3: تمثيل عمليّة التلافّ بمرشّح. يمكن تمثيل التلافّ بعدّة مرشّحات كعمقٍ إضافي للمصفوفة الناتجة.

2. طبقة التفعيل (Activation Layer)

بعد تطبيق عمليّة التلافّ، يتم تمرير الخرج خلال دالة تنشيط Activation function من أجل تزويد النموذج الشبكي بخصائص غير خطيّة، وأشهر هذه الدوالّ دالة

“ReLU” (Rectified Linear Unit)،

التي تُعرّف كالتالي:

$$f(x) = \max(0, x)$$

تساعد دالة الـ ReLU في تسريع عمليّة التدريب عبر استبدال الصفر بجميع القيم السالبة في دالة السمة، ما يخفّف من مشكلة انعدام التدرّج لاحقاً

تسطيح المخرجات Flatten ، أي تحويل المصفوفة إلى متجه، وتميرها إلى طبقات موصولة بالكامل تربط كل عصبون في طبقة منها بأي عصبون في الطبقة التي تسبقها. عادةً يتلقى كل عصبون دخلًا من مجموعة محدودة من الطبقة السابقة تُسمى بمجال أو حقل الاستقبال receptive field للعصبون، بينما يكون هذا الحقل مساويًا لمجمل الطبقة في حالة طبقة اتصال كامل. بسبب التلاف وتطبيقه مرات عديدة، فإن كل عصبون يتلقى من منطقة أكبر من سابقتها، وهكذا فبالرغم من أن عدد بكسلات مجال الاستقبال يبقى ثابتًا ولكنه يعبر تدريبًا عن معطيات دخل متوزعة بشكل أكبر في أرجاء الدخل، وبالتالي يمكن لتلاف أن يأسر سمات معطيات الدخل بشكل أفضل من البنى الشبكية الأخرى.

تقوم هذه الطبقات بالأعمال نفسها التي تقوم بها الـ ANN القياسية، فيمكنها إعطاء نتائج تفيد في مسائل التصنيف classification، حيث أثبتت الـ CNN نجاعةً في التعرف على الصور وتحديد فئاتها من خلال تحليل مكوناتها، أو في الكشف عن الأجسام والكينونات داخل الصور أو حتى في تقسيمها segmentation إلى مناطق ذات دلالات مختلفة.

أثناء إجرائية الأمثلة optimization، والتي توافق إجراء خوارزمية من مثل الهبوط المتدرج gradient descent على تابع خسارة مناسب.

3. طبقة التجميع (Pooling Layer)

تستخدم طبقة التجميع لاختزال الأبعاد المكانية في دالة السمة ما يقلل حجم البيانات المُدخلة إلى الطبقات التالية، وبما يقلل من عدد البارامترات ويمنع الإفراط في المواءمة والتدريب overfitting. النوعان الرئيسيان للتجميع هما:

- التجميع عبر أخذ القيمة الأعظمية Max Pooling: يحتفظ بأكبر قيمة داخل نافذة محددة.

- التجميع عبر أخذ الوسطي Average Pooling:

1	3	2	1
2	9	1	1
1	3	2	3
5	6	1	2

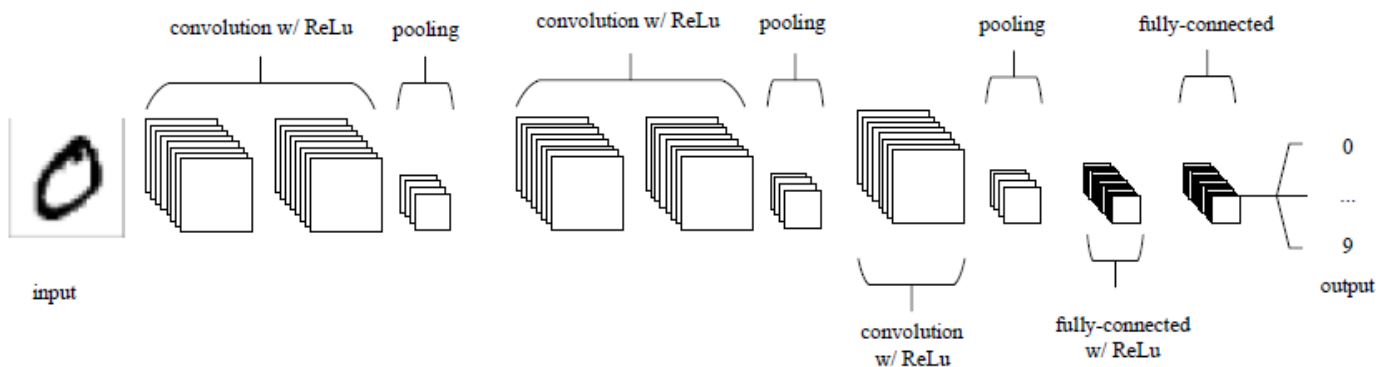
→

9	2
6	3

يحتفظ بمتوسط القيم داخل النافذة. يمكن أن تتبادل طبقة التجميع والتفعيل في ترتيبيهما، كما يمكن تكرار هذه الطبقات وإجراء مناوبات فيما بينها.

4. طبقات الاتصال الكامل (Fully Connected Layer)

بعد المرور عبر طبقات الالتفاف والتجميع، يتم

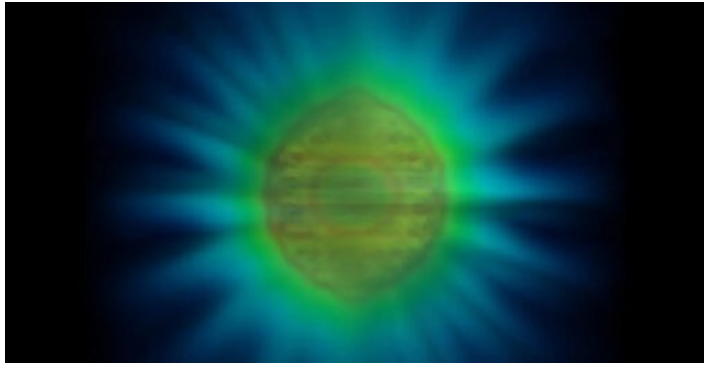


الشكل 4: بنية واقعية لـ CNN.

خاتمة

وحدة درع حراري، مع التزام الصين بتسليم 172 وحدة بحلول عام 2027م. المشروع يُعرف باسم "الشمس الاصطناعية"، ويجمع بين قوى عالمية، منها الاتحاد الأوروبي، الولايات المتحدة، اليابان، وروسيا، في سبيل تحقيق طاقة نظيفة ومستدامة على نطاق واسع. [المصدر](#)

كشف الشكل الدقيق للفوتون



طور علماء الفيزياء في المملكة المتحدة نموذجًا كموميًا مبتكرًا يكشف عن الشكل الدقيق للفوتون، الجسم الذي يمثل الوحدة الأساسية للضوء. يوضح البحث كيف يتفاعل الضوء مع المادة في تفاصيل غير مسبوقة، مما يفتح آفاقًا جديدة لفهم الخصائص الكمومية للضوء.

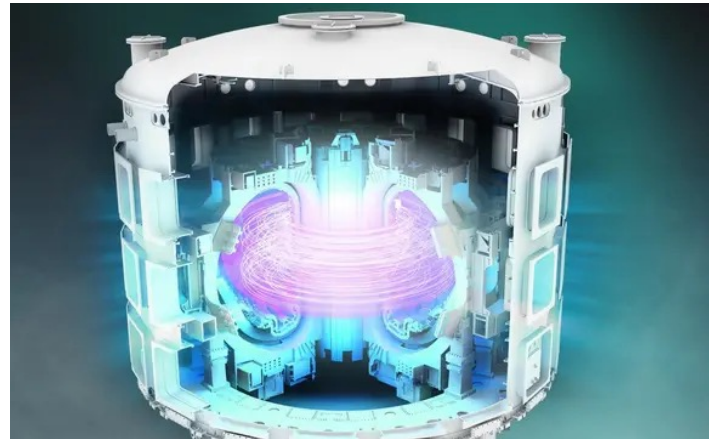
هذا الاكتشاف يعتمد على وصف كمومي شامل للتفاعلات بين الضوء والمادة، وهو ما ساهم في تحديد الشكل الدقيق للفوتون للمرة الأولى. النموذج، الذي يعتمد على معادلات موجية معقدة، يسلط الضوء على الجوانب الثنائية للفوتون بين الموجة والجسيم.

يساهم هذا البحث في تطوير تقنيات أكثر دقة في مجالات عديدة، مثل الحوسبة الكمومية، وأنظمة استشعار الضوء، والطاقة الشمسية. نُشر هذا الاكتشاف في مجلة *Physical Review Letters*، ويعكس قفزة نوعية في دراسة الديناميكيات الكمومية. [المصدر](#)

برهنت الشبكات العصبونية التلافيفية على فعاليتها في التعلّم العميق وخاصة في التطبيقات التي تتطلب فهمًا بصريًا دقيقًا، من مثل الرؤية الحاسوبية computer vision أو في المجال الطبيّ عند الكشف المبكر عن الأورام باستخدام صور الأشعة السينية والتصوير بالرنين المغناطيسي أو في مجال العربات ذاتية القيادة من خلال تحليل الصور القادمة لضمان الملاحقة. من خلال الجمع بين المرونة والكفاءة، تبقى الـ CNNs تقنيةً أساسية في تحليل البيانات الشبكية ودفع حدود الذكاء الاصطناعي نحو آفاق جديدة.

أخبار علمية

الصين وكوريا الجنوبية تتقدمان في إنتاج مكونات مفاعل الاندماج النووي ITER



أرسلت الصين مؤخرًا 48 وحدة درع حراري لمفاعل الاندماج النووي ITER إلى فرنسا، والذي يُعتبر أكبر مشروع تجريبي للاندماج النووي في العالم. تهدف هذه المكونات إلى توفير حماية فعّالة ضد النيوترونات عالية الطاقة وإدارة الحرارة النووية بكفاءة. تتعاون الصين وكوريا الجنوبية في إنتاج ما مجموعه 220

موضوعات إثرائية: مسألة للطلاب

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

عالية الغارّ ضمن المنطقة

$$0 < z < L,$$

ونرمز بـ p_0 لضغط الإلكترونات الأولي على هذه الجدران.

تُرد موجة صدمٍ بشكلٍ حاجزٍ كموني ارتفاعه $U_0=100$ $k_B T$ وتنتشر بسرعة u ضمن هذه المنطقة، ما يعني أنه بينما تكون الطاقة الكامنة للإلكترونات معدومةً من أجل $z > ut$ ، فإن هذه الطاقة تغدو U_0 من أجل $z < ut$

أوجد الضغط المُطبّق على الجدران عندما تقطع الموجة المسافة L بين الجدران. افترض أن

$$u \ll \sqrt{\frac{k_B T}{m}}$$

وأهمل الكمون الكهروستاتيكي للتأثير بين الإلكترونات، كما افترض الغاز غير منحلّ وبالتالي يمكن استخدام توزيع ماكسويل.

الحل

تواتر السيكلوترون

$$E_n \approx \hbar \omega_c (n + \frac{1}{2}) \Leftrightarrow k_B T \ll \hbar \omega_c \Leftrightarrow \omega_c = \frac{eB}{m}$$

تبقى الإلكترونات فيما يتعلّق بحركتها العرضية الموازية للجدران ضمن منطقة صغيرة "كمومية"

$$\text{مقاسها } \ell \approx \sqrt{\frac{\hbar}{eB}} \text{ واحتمال وجودها في سوية}$$

أعلى من $n=1$ صغير $\leftarrow$ بمجرد تطبيق الحقل،

مسألة غير محلولة

(فيزياء، سنة ثانية بعد أخذ مقرّر في ميكانيك الموائع)

تُغمر اسطوانة صماء بنصف قطر R وارتفاع H ، وكثافة ρ_c في ماء كثافته ρ_w . في البدء نبقى على الأسطوانة ساكنةً بحيث محورها شاقولي والمسافة بين وجهها السفلي وقعر الماء h . لحاوية الماء قعرٌ صلبٌ مستوي، وعمق الماء داخلها أكبر من $H+h$. في لحظةٍ ما نترك الاسطوانة، فتبدأ بالسقوط. ما هو الزمن المُستغرق حتى تصدم الأسطوانة قعر الحاوية؟ أهمل اللزوجة، وافترض

$$\rho_c > \rho_w, \quad H < R, \quad 10\rho_c h \ll \rho_w R.$$

مسألة العدد الماضي

(فيزياء، سنة ثانية)

يوجد غاز إلكتروني ذو كثافة منخفضة ضمن منطقة يخيّم فيها حقل مغناطيسي في الاتجاه z شدّته تحقّق

$$B \gg \frac{mk_B T}{\hbar e}$$

حيث T درجة الحرارة؛ m و e كتلة وشحنة الإلكترون على الترتيب. تحصر الجدران التي تُعدّ حواجز كمومية

وباعتبار الكثافة المنخفضة للغاز، ينعقد الاقتران decouple بين الإلكترونات التي نفترضها

غير منحلة non-degenerate وينطبق عليها توزيع ماكسويل. لا اصطدامات بين الإلكترونات، وبالتالي بسبب الحقل المطبق الشديد لا تتساوى السرعات بقيمة حرارية (thermalize)، بينما لا يؤثر الحقل على الحركة بموازاته، ولا يؤثر عليها إلا موجة الصدم.

نعتبر إذن إلكترونًا منفردًا بسرعة v_0 بموازية z . بما أن U_0 أكبر بكثير من $k_B T$ فمن الأرجح ألا تكون v_0 كافية لتسلق

الحاجز الكموني، بل سيرتد الإلكترون عنه مكتسبًا سرعة إضافية $2u$ ، وبسبب $\sqrt{\frac{2k_B T}{m}} \ll u$ فمن الأرجح كذلك ألا تصبح سرعته كافية، ليرتد ويكتسب $2u$ ، وهكذا دواليك. تغدو سرعته إذن عند الارتداد من الرتبة n : $v_n = v_0 + 2un$ ،

ويتكرر ذلك لغاية أن تتجاوز السرعة القيمة $10v_T \equiv 10\sqrt{\frac{2k_B T}{m}} = 10\sqrt{\frac{2U_0}{m}}$ ، فينفذ الإلكترون لخلف موجة الصدم

عند الرتبة: $n = \left\lfloor \frac{10v_T - v_0}{2u} \right\rfloor + 1$ (عدد كبير من أجل غالبية الإلكترونات التي كانت موجودة في البدء، وتعني الأقواس

هنا القسم الصحيح). بعد النفوذ، يفقد الإلكترون U_0 من طاقته وتغدو سرعته $v_f = \sqrt{v_n^2 - 100v_T^2} \approx \sqrt{20v_T(v_n - 10v_T)}$ ، حيث لدينا (Frac تعني القسم الكسري):

$$v_n - 10v_T = v_0 + 2u \left(\left\lfloor \frac{10v_T - v_0}{2u} \right\rfloor + 1 \right) - 10v_T = 2u \left(1 - \text{Frac} \left(\frac{10v_T - v_0}{2u} \right) \right)$$

كأسنان المنشار بدور $2u$ تأخذ قيمها في $[0, 10v_T]$ (من أجل قيم v_0 الأعلى من $10v_T$ ينفذ الإلكترون من أول مرة).

حيث أن $v_T \ll u$ فإنه يمكن أخذ وسطي دالة أسنان المنشار مساويًا لمنتصف قيمته العظمى: $v_f \approx v_T^2 \ll u$

$20v_T \frac{1}{2} 2u = 20v_T u$ ، ما يعني أنه حتى بعد القفزة والنفوذ وفقدان قسم من الطاقة فإن الإلكترون يستمر في حركته

بشكلٍ أسرع بكثير من موجة الصدم. يسمح لنا ذلك بتطبيق النظرية الكظومة adiabatic theorem القائلة بأنه من

أجل منظومة خاضعة لشروط متغيرة بشكلٍ بطيء وتقوم بحركة دورية فإن مساحة السطح الذي تحصره المنظومة

خلال حركتها الدورية في فضاء الطور يبقى ثابتًا. في حالتنا كان المسار الابتدائي في البدء مستطيلًا بطول L وعرض

$2mv_0$. عند تقدّم موجة الصدم والارتداد عنها ينكمش طول المستطيل المتعلق بإحداثية الموضع، بينما يتمدد عرض

المستطيل المتعلق بإحداثية الزخم، ولكن مساحة المستطيل تبقى صامدة. عندما يبلغ العرض ضعفَي القيمة $10v_T$ يحدث

النفوذ ويُخلق مستطيلٌ فيما وراء موجة الصدم. في نهاية الأمر، سيغدو المستطيل الثاني بطول L مع اختفاء المستطيل

الأول، وبفرض صمود مساحة المستطيل، نجد أن السرعة النهائية يجب أن تكون مساوية للسرعة الابتدائية. بما أن

ضغط الغاز يعتمد على متوسط مربع السرعة للإلكترونات وعلى كثافتها العددية، ولم يتغير كلا هذين المقدارين نجد أن

الضغط في النهاية سيبقى نفسه $p = p_0$.

(*) نناقش الآن الحالة عندما لا يكون التقريب الكظوم صالحًا. يفترض هذا التقريب $\frac{\lambda}{D} \ll \left| \frac{d\lambda}{dt} \right|$ حيث λ بارامتر يعرّف الشروط الخارجية (في حالتنا، نأخذ موضع موجة الصدم أو المسافة x بين جبهة الموجة والجدار الثاني) و D الدور الزمني للمنظومة. باستخدام النظرية الكظومة تكون x عند لحظة القفز مساوية لـ $k = \frac{L}{x}$:

$$D = \frac{x}{kv_0} + \frac{L-x}{v_f} \approx \frac{L}{k^2 v_T} + \frac{L}{\sqrt{2kv_T u}} \approx \frac{L}{k^2 v_T} \quad \text{وبالتالي يكون الدور عند القفزة مستويًا لـ } \frac{v_n}{v_0} \approx \sqrt{\frac{2k_B T}{m}} \sqrt{\frac{U_0}{k_B T}} = 10$$

$$u \ll \frac{2v_T}{k} = \frac{L}{\sqrt{2kv_T u}} \quad \text{ويغدو شرط التقريب الكظوم:} \quad u = \left| \frac{dx}{dt} \right| \ll \frac{x}{D} = \frac{x\sqrt{2kv_T u}}{L} = \sqrt{\frac{2v_T u}{k}}$$

$$2\sqrt{\frac{k_B T}{U_0}} \sqrt{\frac{2k_B T}{m}} \quad \text{بينما في حال عدم تحقق الشرط فإن الإلكترون يحافظ على سرعته } v_f \text{ لغاية النهاية. من أجل حساب}$$

الضغط نحسب القوة المُسلّطة من الإلكترونات بسرعة ابتدائية v_0 ، وتساوي تغيّر الزخم عند كل صدم مقسومًا على الزمن الفاصل بين صدمتين متتاليتين مضروبًا بعدد الإلكترونات ذات السرعة نفسها، ويُحسب الأخير من توزيع بولتزمان (N العدد الكلي للإلكترونات، وأضفنا العامل 2 لنحصل على التوزيع بجانب واحد):

$$dF = \frac{2mv_f(v_0)}{\frac{2L}{v_f(v_0)}} n(v_0) dv_0 = \frac{mv_f^2(v_0)}{L} \cdot 2N \sqrt{\frac{m}{2\pi k_B T}} \exp\left(\frac{-mv_0^2}{2k_B T}\right) dv_0 = \frac{2Nm v_f^2(v_0)}{L v_T \sqrt{\pi}} \exp\left(\frac{-v_0^2}{v_T^2}\right) dv_0$$

$$F = \frac{20Nm v_T u}{L v_T \sqrt{\pi}} \int_0^\infty \exp\left(\frac{-v_0^2}{v_T^2}\right) dv_0 = \text{فحصل على } (0, +\infty) \text{ نجرى التكامل على } v_T \ll 10v_T \text{ بما أن}$$

$$p = \frac{F}{S} = 20m v_T u \frac{N}{LS} = 20m v_T u n \quad \text{وبالتالي } \frac{40Nmu}{L\sqrt{\pi}} \cdot v_T \frac{\sqrt{\pi}}{2} = \frac{20mN v_T u}{L} \quad \text{نجد } p_0 = nk_B T$$

$$\boxed{20m v_T u \frac{p_0}{k_B T} = 20p_0 u \sqrt{\frac{2m}{k_B T}}}$$

موضوعات إثرائية: إعلان عن مجلة

"المواد الناشئة Emergent Materials"

تصدر عن دور نشر شبرينغر-نايتشر، سويسرا، بالتعاون مع جامعة قطر، ويرأس تحريرها الدكتور محمّد مهدي شهيمي، يعاونه فريق من المحرّرين يضمّ الدكتورة مريم العلي المعاضيد عضوة مجلس إدارة الجمعية العربية للفيزياء

"المواد الناشئة" مجلة مُحرّمة مفتوحة المصدر

متعددة التخصصات تنشر مقالات بحثية عالية التأثير

في مجال علوم المواد، وتهدف إلى تقديم أفضل

الأبحاث الرائدة في مجالات الفيزياء والكيمياء

والأحياء وهندسة المواد المتقدمة إلى مجتمع

البحث العالمي، من أجل تعزيز فهم وتطبيق المواد

الجديدة بدءًا من تركيب وتوصيف المواد الناشئة

إلى تطبيقاتها التحويلية في التكنولوجيا والصناعة.

تنشر المجلة مجموعةً من أنواع المقالات بما

في ذلك المراجعات والمراجعات القصيرة والمقالات

والتقارير، مركّزة على مجموعة متنوعة من المواضيع،

مثل:

- تحويل وتخزين الطاقة

- مواد معالجة المياه وتحلية المياه

- المواد الحيوية (على سبيل المثال، للطب التجديدي)

- مواد البناء والرصف والبناء

- المواد البصرية

- السبائك عالية الأنتروبية

- أجهزة الاستشعار الحيوية والأجهزة الذكية الأخرى

- المركبات البوليمرية

- تحويل النفايات الحيوية وتثمينها

- أشكال الكربون المتأصلة

- التقنيات منخفضة الكربون

- التصنيع الإضافي

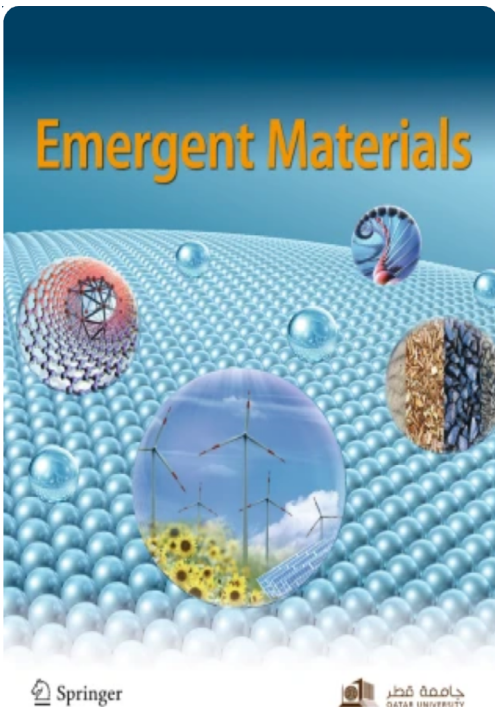
ببلغ عامل التأثير لها قيمة 4.3 خلال السنوات

الخمس السابقة لعام 2023 حيث بلغ 4.8، كما تمّ

تحميل محتوياتها خلال ذلك العام حوالي مئتي ألف

مرّة.

[موقع المجلة](#)



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 الرابع:

- مقابلةً مع الدكتور هربرت دراينر Herbert Dreiner أستاذ الفيزياء النظرية في
جامعة بون-ألمانيا، والشهير في مجال الجسيمات الأولية والكونيات، بالإضافة
لنشاطه التعريفي والمُحبِّب بالعلوم من خلال "عروض الفيزياء PhysikShow".
- مقالاً أساسياً يغطّي أساسيات الذكاء الصناعي وما يَعد به في المستقبل.
- أربعة مقالات عن تطبيقات التعلّم الآليّ في فيزياء الجسيمات الأولية والكونيات،
وعن الكون المعتم بركّيه المادة والطاقة العاتمتين، وعن علم الخرائط وتطبيقات
النظرية النسبية فيه بما في ذلك منظومة التموضع الشمولي GPS، وعن الخلايا
الشمسية والمبادئ الفيزياء الحاكمة لعملها.
- تغطيةً لأخبار علمية متنوعة تمتدّ من حلّ مسألتين حيرت الرياضيين لعقود، إلى
دحض فرضية "سرير الطابقين"، مروراً بالسباق نحو المفاعل الاندماجي، والشمس
الصناعية الكورية، والمرصد الصيني العميق لرصد النّترينو، وتأكيد مقراب DESI
لتنبؤات أنشتاين، وكشف الشكل الدقيق لكَمّة الضوء: الفوتون، وغيرها.
- مواضيع إثرائية عديدة، منها شرحٌ عن الحائزين على جائزة نوبل للفيزياء للعام
2024 وأهميّة أعمالهما في تمهيد الطريق أمام تقنيّات التعلّم الآلي ضمن الذكاء
الصنعي، ومعارفٌ عن الترموديناميك وقوانينه، وعن معادلة ديراك النسبوية، وعن
الشبكات العصبونية التلافّية، مع استعراضٍ كتب مرجعية وعرض مسأله ذات فوائد
تعليمية، بالإضافة إلى إعلانٍ عن مجلّة علميّة تشارك في إدارة تحريرها باحثة من
الجمعية العربية للفيزياء، ونبذة عن أستاذ مُربّ هو الدكتور المرحوم محمد علي
محمد كشخصة علمية عربية.