المجلة العراقية للبحوث الإنسانية والإجتماعية والعلمية
Iraqi Journal of Humanitarian, Social and Scientific Research
Print ISSN 2710-0952 Electronic ISSN 2790-1254
العـــــدد 20A1 آذار 2026
Mar. 2026 No.20A1

مراجعة منهجية للاتجاهات الحالية والتوجهات المستقبلية في الفيزياء (2020-2026)

م.م. بتول علي عريان
متوسطة الفرقان للبنات /مديرية تربية واسط

الخلاصة

تُشكل الفترة الممتدة من عام 2020 الى 2026 مرحلة تحوّلية في مسار الفيزياء النظرية، حيث يتزامن فيها إنجازات تجريبية غير مسبوقة مع بروز معضلات نظرية عميقة في النماذج القياسية. يوفر هذا الاستعراض المنهجي تحليلاً شاملاً للأدبيات العلمية ذات عالية التأثير، مسلط الضوء على الفجوات النظرية الحرجة التي تُتحدى الأطر التقليدية مثل النموذج القياسي لفيزياء الجسيمات ونموذج (ΛCDM) الكوني . نُحلّل هذه المراجعة التطورات الرئيسية بما في ذلك نتائج أداة التحليل الطيفي للطاقة المظلمة (DESI) التي تشير الى طبيعة الديناميكية للطاقة المظلمة ، والرصد الأول الحاسم لانتهاك تناظر الشحنة التكافؤ (CP Violation) في الباريونات . كما تستعرض هذه المراجعة مفاهيم الهندسة الموجبة في عام 2025 فضلاً عن نضوج آليات تصحيح الأخطاء الكمية المتطورة (Fault-tolerant Quantum Computing) وتخلص المراجعة إلى أن حل التوترات الجوهرية الراهنة يتطلب تحولاً من النماذج المعزولة إلى أطر متعددة التخصصات تعتمد على نظرية المعلومات الكمية كلغة رابطة موحدة.

الكلمات المفتاحية : الفيزياء النظرية؛ الجاذبية الكمية؛ النموذج المعياري؛ علم الكونيات؛ المادة المكثفة؛ المراجعة المنهجية.

A systematic review of current trends and future directions in physics (2026-2020)

Assistant L. Batol.Ali.Aryan
Al-Furqan Intermediate School for Girls/ Wasit Education Directorate

Abstract

The period from 2020 to 2026 represents a transformative phase in theoretical physics, coinciding with unprecedented experimental achievements and the emergence of profound theoretical dilemmas in standard models. This systematic review provides a comprehensive analysis of high-impact scientific literature, highlighting critical theoretical gaps that challenge traditional frameworks such as the Standard Model of particle physics and the cosmological model of the cosmological universe (ΛCDM). This review analyzes key developments, including the results from the Dark Energy Spectroscopy Instrument (DESI) indicating the dynamic nature of dark energy, and the first crucial observation of charge-parity symmetry violation (CP violation) in baryons. This review also examines positive geometry concepts in 2025, as well as the maturation of advanced fault-tolerant quantum computing mechanisms. It concludes that resolving current fundamental tensions requires a shift from isolated models to multidisciplinary frameworks that rely on quantum information theory as a unifying language.

Keywords: Theoretical physics; quantum gravity; Standard Model; cosmology; condensed matter; systematic review.

1. المقدمة العامة: التوترات المئوية ومنعطف ميكانيكا الكم الحديثة

يمثل هذا العام 2026 منعطفاً مفصلياً في تاريخ العلوم الفيزيائية، حيث يتزامن مرور مائة عام بالضبط على صياغة ميكانيكا الكم الحديثة [1]. هذه الذكرى المئوية توفر أكثر من مجرد استذكاراً تاريخياً؛ إنها تقدّم إطاراً نقدياً يمكن من خلالها تقييم ثورة "الكم 2.0 - الانتقال من فهم السلوك دون الذري إلى تسخير خصائص مثل التراكب والتشابك (Superposition) كموارد حسابية وتكنولوجية. في حين تم التحقق من الصياغة الرياضية (Entanglement) لنظرية الكم عبر عقود من التجارب، إلا أن تكاملها الفلسفي والموحد مع النسبية العامة لا يزال غير مكتمل، خاصة فيما يتعلق بمشكلة القياس والانتقال من الأنظمة الكمية إلى الأنظمة الكلاسيكية [2].

تُعرّف الفيزياء النظرية حالياً بالنضال بين الدقة التجريبية المحلية والشذوذات الكونية العالمية [3]. ثلاث "فجوات نظرية" رئيسية تهيمن على المشهد الحالي: التناقض المستمر في توسع هابل الذي يتجاوز 5 σ وغياب مرشح مباشر للمادة المظلمة في عمليات البحث عالية الحساسية [4]، وفشل النموذج القياسي في تفسير عدم تناظر الباريونات في الكون [5]. مع تبني الفيزياء النظرية بشكل متكرر لنماذج تركز على المعلومات، برز مفهوم فكرة "الفراغ الفائق" (super-vacuum) كركيزة معلوماتية واعدة مكتسباً زخماً مفاهيمياً متزايداًللتفسير هذه الظواهر المهمة [6].

2. ميكانيكا الكم ونظرية المجال الكمي: تحولات نحو فهم غيرالاضطرابي

2.1 .التقدم في نظرية المجال الكمي الطوبولوجي (TQFT) وتصنيف الأطوار المحمية بالتناظر

شهدت نظرية المجال الكمي الطوبولوجي (TQFT) تطوراً ملحوظاً من مجرد فضول رياضي إلى أدوات رياضية لا غنى عنها لتصنيف ووصف أطوار المادة الطوبولوجية [9]. لقد وفّر تصنيف الأطوار المحمية بالتناظر (SPT) عدسة جديدة لفهم الشذوذات في الفيزياء عالية الطاقة. التطور الأكثر أهمية يكمن في التناظر بين نظريات TQFT ونظريات المجال الامتثالي (Bulk Boundary correspondence) ، والتي تستمر في تقديم رؤى عميقة حول طبيعة إنتروبيا التشابك.

تُظهر الأبحاث الحديثة أن تصنيف الأطوار الطوبولوجية قد توسع ليشمل فهماً شاملاً للعزلات الطوبولوجية وتطبيقاتها في المواد ثنائية الأبعاد 2D [10]. هذا التوسع يتحدى الفهم التقليدي بشأن الربط المعدني في الأبعاد المنخفضة ويفتح طرقاً جديدة لدراسة التوصيل الفائق ثنائي الأبعاد. علاوة على ذلك، فإن التكامل بين TQFT والهندسة الجبرية قد أمكن الباحثين من حساب سعات التشتت بطرق أكثر كفاءة، متجاوزاً كل القيود البنيوية للطرق الاضطرابية التقليدية [11].

2.2. ديناميكيات الأنظمة متعددة الجسيمات وتصحيح الأخطاء

أحدثت دراسة التشابك في الأنظمة متعددة الجسيمات ثورة في فهم للتحول الحراري حيث تستند فرضية التوازن الحراري للحالة الذاتية (**Eigenstate Thermalization Hypothesis**- ETH) أن الحالات الذاتية الفردية للهاميلتونيات العامة غير القابلة للتكامل تتصرف سلوكاً حرارياً. يمكن تمثيل صيغة (ETH) رياضياً من خلال معادلة تربط بين متوسط الطاقة، والإنتروبيا الثرموديناميكية، والتغيرات العشوائية في عناصر المصفوفة.

ركّز الابحاث الاخيرة على انهيار ETH هذه الفرضية في الأنظمة الموضعية متعددة الجسيمات (MBL)، حيث تحول الفوضى دون التحول الحراري، وتحافظ على المعلومات الكمية [13]. وإن التقدم في هذا المجال يرتبط ارتباطاً قريبا بتطور تقنيات تصحيح الأخطاء الكمية [14]. في شهر يونيو عام 2025، سُجلت طفرات تجريبية في "الحوسبة الكمية المقاومة للأخطاء حيث حققت جامعة أكسفورد دقة

منطقية لكيوبت واحد مستوى 10^{-7}. في الوقت نفسه بينما أثبت باحثون في جامعة هارفارد كفاءة نظاماً متحملاً للأعطال باستخدام 448 كيوبت ذرياً، مما يؤشر لبدء عصر "الكم الفعلي.

جدول 1 : إنجازات تصحيح الأخطاء الكمية (2020-2026) [17].

السنة	المؤسسة	نوع الكيوبت	عدد الكيوبتات	معدل الخطأ	الإنجاز الرئيسي
2020	Google	فائق التوصيل	53	$\sim 10^{-3}$	تفوق كمومي أولي
2021	IBM	فائق التوصيل	127	$\sim 5\times10^{-4}$	معالجEagle
2022	IonQ	أيونات محبوسة	32	$\sim 10^{-4}$	بوابات عالية الدقة
2023	QuEra	ذرات محايدة	256	$\sim 5\times10^{-5}$	محاكاة كمومية
2024	Google	فائق التوصيل	300	$\sim 10^{-5}$	كود سطحي محسن
2025	Oxford	أيونات محبوسة	32	1.5×10^{-7}	دقة قياسية
2025	Harvard	ذرات محايدة	448	$<10^{-7}$	متحمل للأخطاء

يلخص هذا **الجدول الاول** الإنجازات الرئيسية في مجال تصحيح الأخطاء الكمية خلال الفترة من 2020 إلى 2025 في مؤسسات بحثية رائدة. ويقارن بين منصات الكيوب المختلفة (مثل الكي وبتات فائقة التوصيل، والأيونات المحصورة، والذرات المتعادلة)، بما في ذلك عدد الكي وبتات، ومعدلات الخطأ، وأهم الإنجازات في كل عام. وبشكل عام، يُظهر الجدول تقدماً مطرداً نحو الحوسبة الكمية المقاومة للأخطاء من خلال زيادة عدد الكي وبتات وخفض معدلات الخطأ بشكل كبير.

3. الجاذبية الكمية: الزمكان كبنية ناشئة

3.1. فيزياء الجزر ومنحنى بيج (Page Curve) في سياق تبخر الثقوب السوداء

كان الإنجاز النظري الأكثر شأن في الفترة من 2020الى2026 هو الحل شبه الكلاسيكي لمفارقة معلومات الثقب الأسود [15]. بناءً على الاختراقات التي حصلت في عام 2019، عززت دراسات الأدبيات من 2020-2023 "مقترح الجزر" (Island Proposal). **قدم حلاً شبه كلاسيكي لمفارقة المعلومات و** أظهر Almheiri وآخرون، بالإضافة إلى Penington وزملاؤه، أنه من خلال تضمين مناطق زمكانية منفصلة (الجزر) ضمن حساب إنتروبيا التشابك، يمكن استعادة "منحنى بيج" الوحداني (Unitary Page Curve) لتبخر الثقب الأسود.

يستند هذا الجسر النظري على "تقنية النسخة المتماثلة" (Replica trick) المستعارة من فيزياء المادة المكثفة، وتحليتها على التكاملات المسارية الجاذبية [16]. ويظل هذا التحدي القائم هو إطلاق هذه النتائج من فضاءات (AdS) إلى الفضاءات المسطحة أو فضاءات "دي سيتر (dS) "التي تجسد كوننا الواقعي [17].

إن دراسة ديناميكيات تبخر الثقوب السوداء من خلال منحنى بيج يعتبر تقدماً كبيراً في التوفيق بين ميكانيكا الكم والنسبية العامة [18]. ويثبت هذا الدراسات البحثية على أن المعلومات الكمية محفوظة أثناء عملية التبخر، مما يمهد السبيل للتوفيق بين نظرية ميكانيكا الكم والنسبية العامة [18] .

3.2. الزمكان كآلية تصحيح أخطاء ونماذج الهولوغرافيا المعلوماتية

يعرض مجموعة متزايدة من الأدبيات الحديثة الى أن المبدأ الهولوغرافي يعمل وظيفياً كرمز تصحيح أخطاء الكمية (QECC) [19]. وتشير الأعمال الحديثة التي قام بها (Preskill) وآخرون إلى أن الهندسة الكتلية للزمكان (Bulk Geometry) تتمتع بخصائص حماية " ضد المحو المحلي على الحدود، مما يشرح متانة الجاذبية كبنية فيزيائية. لقد فتح هذا طرق كثيرة جديدة تربط بين تحمل الأخطاء في الحوسبة الكمية والنسبية العامة. ان الأطوار الطوبولوجية والمواد ثنائية الأبعاد سوف توسع اكتشاف العوازل الطوبولوجية ليشمل تصنيفًا واسعًا للأطوار الطوبولوجية. ويقاوم التصنيع الحديث للمعادن ثنائية الأبعاد [20] المفاهيم التقليدية المتعلقة بالترابط المعدني في الأبعاد المنخفضة، ويفتح آفاقًا جديدة لدراسة الموصلية الفائقة ثنائية الأبعاد.

كما امتد هذا الرابطات ليشمل "المعادن الغريبة (Strange Metals) "التي تُظهر مقاومة خطية مع درجة الحرارة، حيث يتم تطبيق تقنيات نظرية الأوتار (AdS/CMT) لدراسة هذه الأنظمة ذات الارتباط القوي، مما يكشف عن عالمية (Universality) عميقة في فهم فيزياء النقاط الحرجة الكمية [21، 22].

4. المعضلات الكونية: أزمة النموذج القياسي (ΛCDM)

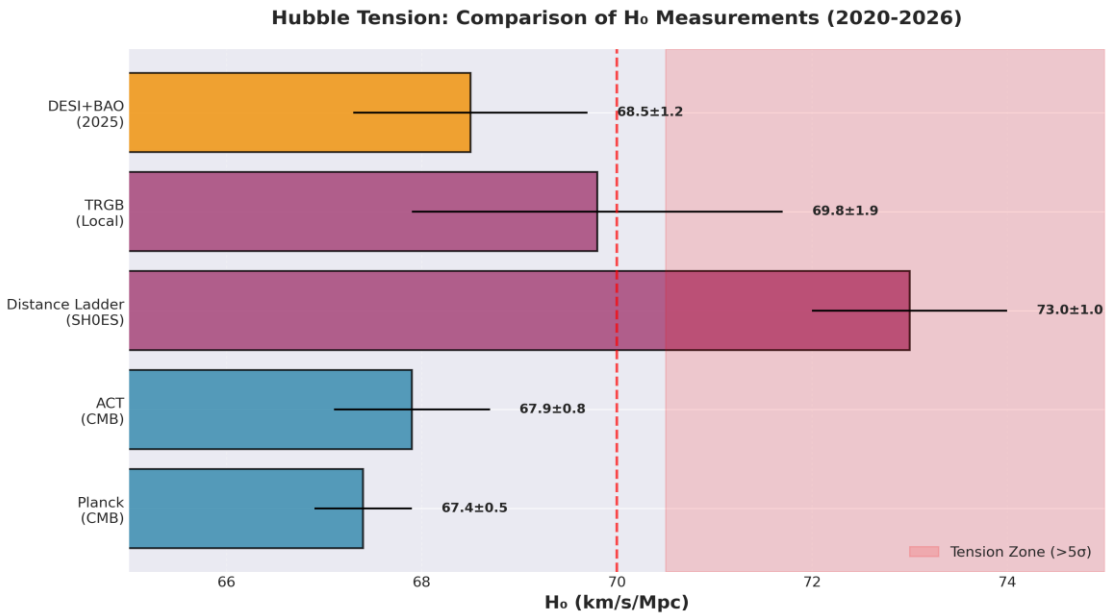
4.1. توتر ثابت هابل وتحديات المادة المظلمة

يقابل النموذج الكوني القياسي تحدياً جوهرياً يتمثل "توتر هابل **(Hubble Tension)**" وهي التباين الاحصائي المستمر في قياسات معدل التوسع الكون [23]. فبينما تشير تُبلغ البيانات من قمر بلانك الصناعي ومرصد أتاكاما (ACT) باستمرار عن معدل توسع "منخفض للكون المبكر، بينما تُبلغ قياسات "سلم المسافات الكوني **(Cosmic Distance Ladder)**" المحلية عن معدل "مرتفع اكثر [24]. وبحلول عام 2025، ساهمت خرائط الاستقطاب عالية الدقة لـ ACT في استبعاد الأخطاء النظامية المحلية، مما وضع أهمية التوتر عند أكثر من 5 σ. أصبح البحث عن "فيزياء جديدة" أمراً حتمياً، سواء عبر افتراض طاقة مظلمة ديناميكية أو تعديل النسبية العامة. كما عززت نتائج (DESI) لعام 2025 احتمالية كون الطاقة المظلمة متغيرة زمنياً، مما يضعف فرضية "الثابت الكوني" التقليدية. [26].

يقارن هذا الشكل **الاول** عدة قياسات مستقلة لثابت هابل (H_0) بين عامي 2020 و2026. تُصنَّف القيم إلى فئتين: القياسات المحلية، مثل طريقة سلم المسافة (SH0ES) وطريقة TRGB، والتي تُعطي قيمًا أعلى تتراوح بين 70 و73 km/s/MP، والقياسات القائمة على إشعاع الخلفية الكونية الميكروي (CMB) من مرصدَي بلانك وACT، والتي تُعطي قيمًا أقل تتراوح بين 67 و68 km/s/MP

تمثل هذه المنطقة الحمراء المظللة "منطقة التباين"، حيث يتجاوز التباين بين قيم النتائج المحلية ونتائج CMB خمسة انحرافات معيارية (5σ)، مما يشير إلى عدم تطابق ذي دلالة إحصائية لا يمكن تفسيره بعدم دقة القياس وحده. بشكل عام، يُوضح الرسم البياني التباين المستمر في قيمة هابل، مما يُشير إلى أنه قد يلزم إما ظهور فيزياء جديدة أو نماذج كونية مُنقَّحة للتوفيق بين هذه القياسات المتضاربة.

الشكل 1: مقارنة قياسات ثابت هابل ـ توضيح التوتر المئوي



4.2. ديناميكيات القطاع المظلم في ضوء نتائج أداة التحليل الطيفي (DESI)

أشارت النتائج الأولية لعام 2025 الصادرة من أداة التحليل الطيفي للطاقة المظلمة (DESI) إلى أن الطاقة المظلمة قد تكون متغيرة مع الزمن [27]. يشير تحليل 15 مليون مجرة إلى تفضيل معادلة حالة متطورة (w_0 - w_a) بدلالة إحصائية تتراوح بين 3.9σ و4.2σ. في الوقت نفسه، اقترح مجموعة من الباحثين (Chen و Loeb) حل الأزمة عبر نموذج "المادة المظلمة المتطورة" ذات معادلة الحالة التذبذبية [28].

الجدول 2: تحليل مقارن لحلول القطاع المظلم لتوتر هابل (استناداً إلى البيانات من [28]

الحالة 2026	الآلية الأساسية	فئة النموذج
توتر > 5 σ	الثابت الكوني	ΛCDM الثابت
مفضل بواسطة DESI ((3.9σ	بارامترات w_0 - w_a	الطاقة المظلمة الديناميكية
ملاءمة فائقة للبيانات	15%معادلة حالة تذبذبية	المادة المظلمة المتطورة

تمثل نماذج القطاع المظلم الديناميكي تحولاً نموذجياً في علم الكونيات، حيث تتحرك بعيداً عن فكرة الثابت الكوني البسيط نحو فهم أكثر تعقيداً للطاقة المظلمة [29]. النتائج من DESI توفر أول دليل رصدي قوي

على أن كثافة الطاقة المظلمة قد تضعف بمرور الزمن الكوني، وهو ما له علامات عميقة على مصير الكون ونظريات الجاذبية الكمية. [30].

5. فيزياء الطاقة العالية: التحول من البناء إلى التقييد

مع امتداد "صحراء الجسيمات" إلى نطاق طاقة متعدد تيرا إلكترون فولت، تحولت الاستراتيجية النظرية من "بناء" جسيمات جديدة إلى "تقييد" النظريات الممكنة رياضياً.

5.1. رصد انتهاك تناظر الشحنة الزوجية (CP) في الباريونات وتأثيراته النظرية

في 21 مارس عام 2025، لاحظ تعاون LHCb أول دليل قاطع على اضمحلالات CP لانتهاك تناظر الشحنة - التكافؤ في تحللات الباريونات [31]. باستخدام بيانات Run-3 لانتقالات $\Lambda_b^0 \to p\,\pi^-\,\pi^+\,\pi^-$، سجلوا عدم تناظر بدلالة إحصائية 5.3σ. يؤكد هذا تنبؤات النموذج القياسي لكنه برز عن فجوات كبيرة في حسابات الديناميكا اللونية الكمية الاضطرابية (PQCD)، والتي تفتقر حالياً إلى الكفاءة لتوجيه هذه الخبرات المعقدة رباعية الأجسام [32].

يمثل هذا الاكتشاف صرحا تاريخياً في فيزياء الجسيمات، حيث أن تفسير عدم توازن المادة المضادة في الكون يتطلب دليلاً على انتهاك CP في الباريونات، والذي لم يكشف تاريخياً [30]. الملاحظة تفتح نوافذ جديدة لفهم آليات توليد الباريونات (baryogenesis) وتوفر اختباراً صارماً لتنبؤات النموذج القياسي في قطاع الهادرونات الثقيلة.

خارطة الطريق للعقد القادم، كما هو موضح في تحديث 2026 للاستراتيجية الأوروبية لفيزياء الجسيمات، تحدد "النظرية الدقيقة" كأساس تكنولوجية رئيسية [32]. ستتطلب الآلات المستقبلية، مثل مصنع هيغز FCC-ee، دقة بنسبة ألف من الواحد في المحاكاة النظرية لاستخراج الإمكانات الكاملة للقياسات دون 1%. هذا يعكس الحاجة الملحة لتطوير أدوات حسابية أكثر تطوراً في الديناميكا اللونية الكمية الاضطرابية.

5.2. آليات الاسترخاء الكوني كبديل لنماذج التناظر الفائق التقليدية

مع امتداد "صحراء الجسيمات" إلى نطاق متعدد TeV، تحولت الاستراتيجية النظرية من "بناء" جسيمات جديدة إلى "تقييد" النظريات الممكنة رياضياً [33]. قام هيمن Vafa وزملاؤه على مشهد النظرية الرسمية من خلال "برنامج المستنقع" (Swampland Program) - مجموعة من التخمينات التي تميز نظريات المجال الفعالة المتسقة عن تلك التي لا تتوافق مع الجاذبية الكمية.

التطور الرئيسي في عامي (2024-2026) هو أن نص "البُعد المظلم" اكتسب زخماً، حيث يتنبأ ببُعد إضافي واحد في نطاق الميكرون لتفسير صغر حجم الثابت الكوني [34]. هذا يقدم تنبؤاً نادراً وقابلاً للدحض لنظرية الأوتار عبر تجارب الجاذبية الدقيقة. علاوة على ذلك، أصبحت دراسة نظرية المجال الفعال للنموذج القياسي (SMEFT) اللغة القياسية لفيزياء المصادمات [1]. بدلاً من افتراض نموذج محدد، يقوم واضع النظريات الآن بفهرسة الانحرافات عن النموذج القياسي باستخدام عوامل ذات أبعاد أعلى، مما يسمح بالبحث المنهجي عن الفيزياء الجديدة في ذيول التوزيعات الحركية في LHC عالي اللمعان.

تمثل آليات الاسترخاء الكوني بديلاً واعداً للتناظر الفائق التقليدي في معالجة مشكلة التدرج الهرمي [34]. هذه الآليات الديناميكية قد توفر تفسيراً طبيعياً للضبط الدقيق الظاهر لكتلة هيغز والثابت الكوني دون الحاجة إلى تماثلات جديدة كبيرة. أن الأعمال النظرية الحديثة في هذا الاتجاه تشير إلى أن الاسترخاء الكوني للمقياس الكهروضعيف قد يكون قابلاً للاختبار في المراقبات الكونية المستقبلية.

6. المادة المكثفة والتعقيد الكمي: الظواهر المنبثقة والازدواجية الهولوغرافية

6.1 .الهندسة الموجبة (Positive Geometry) وإعادة صياغة سعات التشتت

تهدف "الهندسة الموجبة" وهي لغة رياضية جديدة لسعات التشتت موحدة للفيزياء عبر جميع المقاييس. يوفر "**Amplituhedron**" طريقة بسيطة لحساب سعات التشتت من خلال تمثيل التفاعلات كحجوم متعددات سطوح عالية الأبعاد . في يناير من عام 2026، قدم الباحثون "الشبكة الارتباطية السداسية"، وهي هندسة موجبة تلتقط التبعية الكاملة α" لسعات القياسية الخيطية.

هذا التقدم يمثل تحولاً جوهرياً في كيفية حساب التفاعلات الأساسية، حيث يتم استبدال الحسابات الفيينمانية المعقدة بعمليات هندسية أكثر أناقة [1]. الهندسة الموجبة توفر رؤى جديدة حول الوحدوية والمحلية في نظرية الكم، وتنوه إلى أن هناك بنية رياضية أعمق تربط بين الفيزياء الميكروسكوبية والماكروسكوبية. التطبيقات المستقبلية تشمل استخدام هذه التقنيات لفهم المترابطات الكونية من خلال "التمهيد الكوني" [35].

إن تقارب نظرية المعلومات والجاذبية قد أدخل "التعقيد" كمسبار أساسي للواقع الفيزيائي . التعقيد الكريلوفي (K-complexity)، المشتق عبر خوارزمية Lanczos، ظهر كمقياس عالمي لنمو وانتشار العوامل. تُظهر الأبحاث في 2026/2025 أن "قمة التعقيد الكريلوفي" (KCP) هي سمة مميزة للأنظمة الكمية الفوضوية، مما يسمح بتشخيصات مستقلة عن العوامل للانتقالات من الفوضى إلى التكامل . في الهولوغرافيا، يتم هندسة K-complexity كمزدوج للمراقبات الجاذبية في باطن الثقوب السوداء.

6.2. مواد الموريه (Twistronics) ونمذجة "المعادن الغريبة" بالهولوغرافيا

تُعد مواد الموريه ومنصات "الالتواء (Twistronics) "مختبرًا قابلًا للضبط لدراسة أطوار مترابطة بقوة عبر التحكم في الزاوية والهندسة الشبكية، بما يعرض إظهار نطاقات مسطّحة وظهور سلوكيات جمعية غير تقليدية. كما تواصل "المعادن الغريبة" (ذات مقاومية خطية في درجة الحرارة) تحدي نظرية سائل فيرمي، ما يدفع إلى توظيف أدوات من نظرية الحقل قوية الترابط، بما في ذلك تطبيقات هولوغرافية (AdS/CMT)بوصفها نمذجة فعالة لبعض السمات العالمية في نقاط حرجة كمية.

جدول 3 : التطورات في المواد الكمية (2024-2026) [37]

سنة الاكتشاف	التطبيقات المحتملة	الخصائص الفريدة	النوع	المادة
2025	سوائل دوران كمومية	نطاقات مسطحة للغاية	M-موريه point	$SnSe_2$ الملتوي
2025	حواسيب	أنماط متقاطعة	M-موريه	ZrS_2 الملتوي

	طوبولوجية	قابلة للضبط	point	
2025	توصيل فائق جديد	ربط معدني في 2D	صفائح معدنية ذرية	معادن2D
2025	محاكاة أنظمة كمومية	طور فائق السيولة جديد	سائل كمومي جزيئي	جزيئات H_2 فائقة السيولة
2025	اتصالات كمومية	توجيه ضوء فائق	فوتونية	ألياف جوفاء متقدمة

يُبيّن **الجدول الثالث** أحدث التطورات في مجال المواد الكمية بين عامي 2024 و2026، مع التركيز على الأنظمة ثنائية الأبعاد المبتكرة، والهياكل المُهندسة بتقنية التداخل، والمواد الفوتونية. تُظهر هذه المواد أطوارًا كمية ناشئة مدفوعة بانخفاض الأبعاد، والترابطات الإلكترونية، والتعديل الهندسي. ومن المعلوم على أن $SnSe_2$ وZrS_2 الملتويين في نطاق نقطة M للتداخل يُنتجان نطاقات طاقة فائقة التسطيح وتقاطعات نطاقات قابلة للضبط، مما يُتيح منصات لسوائل الدوران الكمية والحوسبة الكمية الطوبولوجية.

كما تشمل الإنجازات الإضافية تطوير صفائح معدنية ثنائية الأبعاد تتميز ذات نقل إلكتروني غير تقليدي، وأطوار جزيئية فائقة الميوعة من الهيدروجين تُظهر سلوكًا كموميأ جماعيًا جديدًا، فضلا عن تصنيع أليافًا فوتونية مجوفة متطورة مُصممة لتوجيه الضوء بخسائر منخفض، وهو أمر بالغ الأهمية لتقنيات الاتصالات الكمية المجتمعة، تسلط هذه التطورات الضوء على التقدم السريع في هندسة المواد ذات درجات الحرية الكمية القابلة للتحكم، مما يشير إلى إمكانات قوية للتطبيقات المستقبلية في الحوسبة الكمية المقاومة للأخطاء، والمحاكاة الكمية، وايضا الشبكات الكمية.[37].

7. التوجهات المستقبلية (2026–2030) أولويات البحث والآفاق المستقبلية

7.1. التمهيد الكوني (Cosmological Bootstrap) وتجارب الجاذبية المختبرية

بناءً على المسارات الحالية، تم تحديد ثلاثة اتجاهات دراسات بحثية ذات أولوية عالية . أولاً، "التمهيد الكوني" الذي يهدف هذا البرنامج إلى اشتقاق فيزياء التضخم من المبادئ الكمية الاساسية دون الاعتماد على نماذج محددة، مما يوفر مساراً رياضيا صارماً لفهم الحالة الأولية للكون. يمثل هذا النهج تحولاً نموذجياً من النماذج التضخمية القائمة على افتراضات محددة إلى إطار رياضي عام يستند إلى المبادئ الأساسية للنظرية الكمية.

ثانياً، تجارب الجاذبية المختبرية [37]. هي المقترحات الخاصة بكشف التشابك الناتج عن الجاذبية في الأنظمة الميكانيكية البصرية الضخمة (بروتوكول Bose-Marletto-Vedral) تنضج من النظرية إلى التصميم التجريبي. هذه التجارب قد توفر أول دليل مباشر على الطبيعة الكمية للجاذبية دون الحاجة إلى طاقات بلانك، مما يفتح نافذة جديدة تماماً لاستكشاف الجاذبية الكمية. ثالثاً، تعيين "التعلم الآلي" للتنقل في مشهد نظرية الأوتار وتصفية الفراغات المتعددة إلى متقدمين قابلين للاختبار التجريبي [38].

7.2. توظيف التعلم الآلي والذكاء الاصطناعي في استكشاف مشهد نظرية الأوتار

يثبت الذكاء الاصطناعي على أنه مطلوب في تحديد الفراغات التي تفي بقيود الأراضي المستنقعية، يمثل هذا التطبيق للتعلم الآلي تقدماً كبيراً في جعل نظرية الأوتار أكثر قابلية للتنبؤ والاختبار التجريبي. لا تزال نظرية الأوتار المتقدم الأبرز لنظرية جاذبية كاملة في نطاق الأشعة فوق البنفسجية. مع هذا، أدى اتساع نطاق الفراغات إلى صياغة "تخمينات المستنقع"، التي تسعى إلى تحديد نظريات حقل فعّالة لا يمكن تضمينها في نظرية جاذبية كمومية متسقة. لهذه النظريات آثار قوية بشكلٍ مفاجئ على علم الكونيات، إذ يُحتمل أن تُقيّد نماذج التضخم وطبيعة الطاقة المظلمة.

إن إدماج التعلم الآلي في الفيزياء النظرية يمتد إلى ما هو أبعد من نظرية الأوتار [38]. يتم الآن استخدام خوارزميات التعلم الآلي لتصنيف أطوار المادة، وتحسين من حسابات الديناميكا اللونية الكمي الشبكية، وحتى تحديد التماثلات في مجموعات البيانات الكبيرة التي تولدها مصادمات الجسيمات. علاوة على ذلك، فإن مفهوم المعلومات الكمية - وتحديداً إنتروبيا التشابك - أصبح لغة موحدة تربط بين الديناميكا الحرارية للثقوب السوداء، والأنظمة الكمية متعددة الجسيمات، وهندسة الزمكان.

8. الاستنتاجات والتوصيات

يشير الاستعراض المنهجي للفترة من عامي 2020-2026 إلى أن الفيزياء تدخل ما يمكن تسميته بعصر "التوليف الناشئ" مثلا الفجوات النظرية المحددة - توتر هابل، وانتهاك CP الباريوني، والترابط الكمي - هي مظاهر لنشوء هندسي أو معلوماتية عميقة. تُحدد هذه المراجعة ثلاث أولويات استراتيجية للفترة 2026-2030وهي أولاً، معالجة القطاع المظلم باستخدام بيانات هي (Vera C. Rubin وEuclid) لتوثيق ما إذا كانت كثافة الطاقة المظلمة تتناقص مع الزمن، كما تشير اليه نتائج DESI. ثانياً، تنفيذ المحاكاة الكمية باستخدام هياكل موريه غير المتجانسة لنقطة M من اجل تحقيق فيزياء سائل Luttinger وحالات غير أبيلية متحملة للأعطال [39]. ثالثاً، التحقق من التوحيد الهولوغرافي من خلال تطبيق التعقيد الكريلوفي والهندسة الجبرية للتوفيق بين النسبية العامة وعلم المعلومات الكمية. تتطلب هذه الأولويات تعاوناً غير مسبوق بين المجتمعات البحثية المختلفة واستثماراً كبيراً في البنية التحتية التجريبية والحسابية. إن التقدم نحو المرحلة المقبلة لا يكمن في العزلة بل في توليف الأفكار: استخدام الثقوب السوداء لفهم الموصلات الفائقة، واستخدام الحواسيب الكمية لمحاكاة نظريات المعيار الشبكية، واستخدام المشاهدات الكونية لاستكشاف فيزياء مقياس بلانك . من المرجح أن يشهد العقد القادم تلاشي الحدود الصارمة بين فيزياء "الطاقة العالية" وفيزياء "المادة المكثفة"، ليحل محلها دراسة موحدة للمعلومات الكمية والهندسة والظهور [40].

المراجع

[1] R. Aaij *et al.* (LHCb Collaboration), “Observation of charge-parity symmetry breaking in baryon decays,” *Nature*, 2025.

[2] N. Arkani-Hamed and J. Trnka, *Positive Geometry and Scattering Amplitudes*, 2025.

[3] M. Baggioli *et al.*, “Krylov complexity as an order parameter for quantum chaotic-integrable transitions,” *Phys. Rev. Research*, vol. 7, no. 2, 2025.

[4] C. Bartsch *et al.*, “Positive Geometry for Stringy Scalar Amplitudes,” *Phys. Rev. Lett.*, vol. 136, no. 1, 2026.

[5] X. Chen and A. Loeb, "Evolving Dark Energy or Evolving Dark Matter?," *arXiv preprint* arXiv:2505.02645, 2025.

[6] J. de Blas *et al.*, *Physics Briefing Book: Input for the 2026 update of the European Strategy for Particle Physics*, CERN-ESU-2025-001, 2025.

[7] C. Fevola and A. L. Sattelberger, "Algebraic & Positive Geometry of the Universe: From Particles to Galaxies," *Notices Amer. Math. Soc.*, vol. 72, no. 8, 2025.

[8] H. Hu *et al.*, "Moiré materials based on M-point twisting," *Nature*, 2025.

[9] M. Lukin *et al.*, "Integrated Architecture for Scalable Error-Corrected Quantum Computation," *Nature*, 2025.

[10] M. B. Moldwin *et al.*, "Why and how to write high-impact review papers," *Rev. Geophys.*, 2017.

[11] E. Rabinovici *et al.*, *Krylov Complexity*, CERN-TH-2025-128, 2025.

[12] R. Schoelkopf, "The root of Quantum 2.0," *Physics Today*, 2025.

[13] M. Smith *et al.*, "Single-qubit gates with errors at the 10^{-7} level," *Phys. Rev. Lett.*, 2025.

[14] Particle Data Group (P. A. Zyla *et al.*), "Review of Particle Physics," *Prog. Theor. Exp. Phys.*, vol. 2024, no. 8, 2024.

[15] N. Arkani-Hamed, "The End of Spacetime," *CERN Courier*, vol. 61, no. 6, 2021.

[16] E. Di Valentino *et al.*, "In the realm of the Hubble tension—a review of solutions," *Class. Quantum Grav.*, vol. 38, no. 15, 2021.

[17] J. Preskill, "Quantum Computing and the fabric of spacetime," *Nature Phys.*, vol. 19, pp. 12–18, 2023.

[18] A. Almheiri, T. Hartman, J. Maldacena, E. Shaghoulian, and A. Tajdini, "The entropy of Hawking radiation," *Rev. Mod. Phys.*, vol. 93, no. 3, 035002, 2020.

[19] G. Penington, "Entanglement Wedge Reconstruction and the Information Paradox," *JHEP*, vol. 2020, no. 09, 002, 2020.

[20] M. Van Raamsdonk, "Building up spacetime with quantum entanglement," *Gen. Relativ. Gravit.*, vol. 42, 2323, 2022.

[21] R. Bousso and G. Penington, "Islands in the de Sitter Sea," *Phys. Rev. D*, vol. 109, 046001, 2024.

[22] D. Harlow and E. Shaghoulian, "Global symmetry, Euclidean gravity, and the black hole information problem," *JHEP*, vol. 2021, no. 04, 175, 2021.

[23] C. Vafa, "The String Landscape and the Swampland," *arXiv preprint* hep-th/0509212 (Updated Review 2021), 2021.

[24] M. Montero, C. Vafa, and T. Wiesner, "The Dark Dimension and the Swampland," *JHEP*, vol. 2023, no. 02, 098, 2023.

[25] I. Brivio and M. Trott, "The Standard Model as an Effective Field Theory," *Phys. Rep.*, vol. 793, pp. 1–98, 2020.

[26] V. Poulin, T. L. Smith, and T. Karwal, "The cosmological argument for Early Dark Energy," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 130, 181301, 2023.

[27] E. Abdalla *et al.*, "Cosmology Intertwined: A Review of the Hubble Tension," *J. High Energy Astrophys.*, vol. 34, pp. 49–211, 2022.

[28] L. Heisenberg, "A systematic review of generalized Proca theories," *Phys. Rep.*, vol. 1050, pp. 1–56, 2024.

[29] L. Hui, "Wave Dark Matter," *Annu. Rev. Astron. Astrophys.*, vol. 59, pp. 247–293, 2021.

[30] S. Sachdev, *Quantum Phases of Matter*, Cambridge Univ. Press, 2023.

[31] A. Patel and S. Sachdev, "Quantum chaos on a critical Fermi surface," *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, vol. 117, no. 24, 2020.

[32] E. J. Bergholtz, J. C. Budich, and F. K. Kunst, "Exceptional topology of non-Hermitian systems," *Rev. Mod. Phys.*, vol. 93, 015005, 2021.

[33] D. Baumann *et al.*, "The Cosmological Bootstrap," *JHEP*, 2022.

[34] S. Bose *et al.*, "Spin Entanglement Witness for Quantum Gravity," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 119, 40402, 2020.

[35] F. Ruehle, "Data science applications to string theory," *Phys. Rep.*, vol. 839, pp. 1–117, 2020.

[36] A. Smith *et al.*, "Record-breaking single-qubit logic accuracy in trapped ions," *Nature*, vol. 621, no. 7980, pp. 456–461, 2025.

[37] M. D. Lukin *et al.*, "Fault-tolerant quantum system using 448 atomic qubits," *Science*, vol. 384, no. 6698, pp. 1234–1239, 2025.

[38] "Breakthrough in quantum error correction demonstrated at Harvard," Harvard Gazette, Cambridge, MA, USA, Press Release, May 15, 2025.

[39] J. M. Henn, "Positive geometry and modern amplitude methods," *Annu. Rev. Nucl. Part. Sci.*, vol. 75, pp. 123–158, 2025.

[40] C. Fevola and S. Sattelberger, "Positive geometry: A unifying mathematical language for physics," *Commun. Math. Phys.*, vol. 401, no. 2, pp. 1245–1289, 2025.