التكنولوجيا الكمية والسلام والأمن: دليل تمهيدي

زانا لـ. مالكوس سميث وجياكومو بيرسي باولي

الشكر والتقدير

يشكل الدعم الذي تقدمه الجهات المانحة الرئيسية لمعهد الأمم المتحدة لبحوث نزع السلاح الأساس لجميع أنشطة المعهد. لقد تم تمويل هذا المنشور من قبل الاتحاد الأوروبي في إطار برنامج الأمن والتكنولوجيا التابع لمعهد الأمم المتحدة لبحوث نزع السلاح، والذي تدعمه أيضًا حكومات جمهورية التشيك وفرنسا وألمانيا وإيطاليا وهولندا والنرويج وسويسرا، بالإضافة إلى شركة مايكروسوفت.

نتوجه بالشكر الخاص إلى الدكتور إيرفينج لاشو والأستاذ أندرو ريدي من جامعة كاليفورنيا في بيركلي، وكذلك إلى الفريق الدؤوب من مساعدي الأبحاث في ويست بوينت، الأكاديمية العسكرية للولايات المتحدة التكون من: الملازم الأول كريستينا هوينه والطلاب جيسون إنجرسول، وكريستوفر ت. كونين، وكونر ر. ليجيت، ورايلي هويس.

حول معهد الأمم المتحدة لبحوث نزع السلاح

معهد الأمم المتحدة لبحوث نزع السلاح هو معهد مستقل ممول طوعيًا تابع للأمم المتحدة. يعد معهد الأمم المتحدة لبحوث نزع السلاح أحد المعاهد السياسية القليلة في العالم التي تركز على نزع السلاح، ويعمل على إنتاج المعرفة وتعزيز الحوار والعمل بشأن نزع السلاح والأمن. يقع مقر معهد الأمم المتحدة لبحوث نزع السلاح في جنيف، ويساعد المجتمع الدولي على تطوير الأفكار العملية والمبتكرة اللازمة لإيجاد حلول للمشكلات الأمنية الحرجة.

ملحوظة

إن التسميات المستخدمة في هذا المنشور وطريقة تقديم المادة فيه لا تعبر عن أي رأي مهما كان من جانب الأمانة العامة للأمم المتحدة فيما يتعلق بالوضع القانوني لأي بلد أو إقليم أو مدينة أو منطقة، أو لسلطات أي منها، أو فيما يتعلق بتعيين حدودها أو تخومها. الآراء الواردة في المنشور تقع ضمن مسؤولية المؤلف فقط. إنها لا تعكس بالضرورة آراء أو وجهات نظر الأمم المتحدة أو معهد الأمم المتحدة لبحوث نزع السلاح أو موظفيها أو الجهات الراعية لها.

الاقتباس

مالكوس سميث، زانا ا.، وبيرسي باولي، وجياكومو. "التكنولوجيا الكمية والسلام والأمن: دليل تمهيدي" جنيف، سويسرا: معهد الأمم المتحدة لبحوث نزع السلاح، 2024.

حول المؤلفين

زانا لـ. ماليكوس سميث، دكتورة في القانون، هي زميلة غير مقيمة في معهد الأمم المتحدة لبحوث نزع السلاح وأستاذة للقانون الدولي في معهد الأمم المتحدة للتدريب والبحث (اليونيتار). بالإضافة إلى ذلك، فهي زميلة بارزة في مشروع أمن الفضاء الجوي وبرنامج التكنولوجيا الإستراتيجية في المركز الدولي للدراسات المستقبلية والاستراتيجية في واشنطن العاصمة، وزميلة زائرة في مجلس كارنيجي للأخلاقيات في الشؤون الدولية، وزميلة في المعهد السيبراني للجيش في الأكاديمية العسكرية الأمريكية في ويست بوينت. في السابق، كانت ماليكوس سميث أستاذة مساعدة في قسم هندسة النظم في ويست بوينت وأستاذة في دراسات الحرب السيبرانية في كلية الحرب الجوية الأمريكية. وكانت نقيبة ومحامية سابقة في هيئة المشاورين العدليين العامين في القوات الجوية الأمريكية، وحصلت على تكليفها من برنامج تدريب ضباط الاحتياط (ROTC) في معهد ماساتشوستس للتكنولوجيا. الآراء الواردة في هذا المنشور آراء المؤلفة فقط وليست آراء الأمم المتحدة أو حكومة الولايات المتحدة أو وزارة الدفاع الأمريكية.

الدكتور جياكومو بيرسي باولي رئيس برنامج الأمن والتكنولوجيا في معهد الأمم المتحدة لبحوث نزع السلاح. تشمل خبرته مجال العلوم والتكنولوجيا مع التركيز على آثار التكنولوجيا الناشئة على الأمن والدفاع. قبل انضمامه إلى المعهد، كان جياكومو مديرًا مشاركًا في مؤسسة راند أوروبا RAND Europe، حيث قاد محفظة العلوم الدفاعية والأمنية والتكنولوجيا والابتكار بالإضافة إلى مركز راند RAND للدراسات المستقبلية والاستشرافية. حصل على درجة الدكتوراه في الاقتصاد من جامعة روما بإيطاليا، ودرجة الماستر في العلوم السياسية من جامعة بيزا بإيطاليا.

الاختصارات

AI	**الذكاء الاصطناعي**
AWS	نظام الأسلحة المستقلة
DSS	نظام دعم القرار
GNSS	النظام العالمي للملاحة بالأقمار الصناعية
ICT	تكنولوجيا المعلومات والاتصالات
ISR	الاستخبارات والمراقبة والاستطلاع
OEWG	الفريق العامل المفتوح العضوية

PQC	التشفير ما بعد الكمي
QKD	توزيع المفاتيح الكمية
SQUID	جهاز التداخل الكمي فائق التوصيل (سكويد)

جدول المحتويات

الشكر والتقدير 1
حول معهد الأمم المتحدة لبحوث نزع السلاح 1
ملحوظة 1
الاقتباس 1
حول المؤلفين 2
الاختصارات 2
الموجز التنفيذي 5
1. مقدمة: صعود التكنولوجيا الكمية 7
2. المفاهيم الأساسية لميكانيكا الكم 8
3. استكشاف التطبيقات العسكرية للتكنولوجيا الكمية 10
3.1 الاستشعار الكمي 10
3.2 التصوير الكمي 12
3.3 أنظمة الرادار الكمية 13
3.4 الاتصالات الكمية 13
3.5 توزيع المفاتيح الكمية 14
3.6 الحوسبة الكمية 14
4. التداعيات على الأمن الدولي للتكنولوجيا الكمية 15
4.1 أمن تكنولوجيا المعلومات والاتصالات العالمي 15
4.2 الاستخبارات والمراقبة والاستطلاع المعتمدة على التكنولوجيا الكمية 16
4.3 أنظمة دعم القرار وأنظمة الأسلحة المستقلة 16
4.4 الرصد والتحقق 17
5. أمثلة على المبادرات الوطنية والإقليمية في مجال التكنولوجيا الكمية 18
6. الخلاصة 21

الموجز التنفيذي

يقدم هذا الدليل التمهيدي لصناع السياسات والدبلوماسيين نظرة عامة على التكنولوجيا الكمية وتأثيرها المتوقع على الأمن الدولي، مع التركيز على فوائدها المحتملة ومخاطرها، عبر المجالات العسكرية والمدنية. تبشر التطورات الكمية بتغييرات تحويلية في الاستشعار والحوسبة والاتصالات والتشفير، كما أنها توفر قدرات محسنة للاستخبارات والمراقبة والاستطلاع بالإضافة إلى التطورات الحاسمة في أمن المعلومات والقدرة على الصمود في مجال التشفير. ولكن هذه التكنولوجيا نفسها تنطوي أيضًا على تحديات قد تؤدي إلى زعزعة استقرار الأطر الأمنية التي تدعم السلام العالمي.

يمثل الاستشعار الكمي، على سبيل المثال، قفزة كبيرة في القياس الدقيق، حيث إنه يشمل تطبيقات تمتد من العمليات العسكرية إلى التحقق من نزع السلاح. وهذه القدرة من شأنها أن تحسن بشكل كبير تقنيات الرصد الأساسية لمراقبة الأسلحة، مما يسمح بالكشف بحساسية عالية عن المواد النووية وغيرها من العلامات البيئية الحرجة. وتتمتع المستشعرات الكمية أيضًا بقدرات واعدة في المجال البحري، حيث يمكنها الكشف عن عتاد تحت الماء لم يكن من الممكن اكتشافه سابقًا مثل الغواصات، مما يشكل تحديًا استراتيجيًا لتقنيات التخفي البحرية التقليدية.

رغم أنها لا تزال في مرحلة التطوير، فإن الحوسبة الكمية من المتوقع أن تعمل على إحداث ثورة في المجالات التي تتطلب معالجة متقدمة للبيانات، مثل التشفير والمحاكاة المعقدة والأتمتة المعتمدة على الذكاء الاصطناعي. ومع نضوج هذه التكنولوجيا، فإنها قد تؤدي إلى تعريض للخطر أنظمة التشفير الحالية التي تعمل على تأمين البنية التحتية الحيوية والاتصالات الحساسة. وهذا يؤكد على الحاجة الملحة إلى التحول إلى معايير التشفير ما بعد الكمي من أجل تأمين البيانات الحكومية والعسكرية والمدنية ضد التهديدات الإلكترونية المستقبلية.

وإضافة إلى مجال أمن المعلومات والاتصالات، فإن المُستشعرات الكمية والحوسبة الكمية لديها القدرة على التأثير على السلام والأمن الدوليين على نطاق أوسع، بطريقة إيجابية وسلبية على حد سواء. على سبيل المثال، قد تدعم التكنولوجيا الكمية تقنيات التحقق الأكثر دقة، وتعزز جهود منع الانتشار، وتوفر قدرات الرصد عن بعد الحساسة بما يكفي للكشف عن النشاط النووي من الفضاء، مما يؤدي إلى توسيع نطاق المراقبة المتاح للمجتمع الدولي.

هناك اهتمام واسع النطاق بين الدول بتطوير القدرات الكمية، محفزًا بإمكانية تحقيق الميزة التنافسية وتعزيز الأمن. أدمجت بعض الدول التطوير الكمي في استراتيجياتها للأمن الوطني، وغالبا ما تقوم بتشكيل شراكات بين القطاعين العام والخاص التي تعمل على تسريع البحث وسد الفجوة بين الابتكار العلمي والتطبيق العملي. وتؤكد هذه المبادرات على الحاجة إلى التعاون متعدد الأطراف لمعالجة التفاوت المتزايد في القدرات الكمية، وهو ما قد يؤدي إلى اتساع الفجوات الرقمية القائمة بين الدول التي تتولى زمام المبادرة في مجال التكنولوجيا الكمية والبلدان النامية.

وللمضي قدمًا، هناك حاجة إلى أطر حوكمة قوية وشراكات بين القطاعات والتركيز على بناء القدرات لدعم القوى العاملة المستعدة لاستخدام التكنولوجيا الكمية. وسيكون التعاون متعدد الأطراف ضروريًا

لإرساء المعايير حول الاستخدام المسؤول للتكنولوجيا الكمية، وتعزيز الاستقرار بدلا من المنافسة، وضمان استفادة الجميع من التقدم في مجال التكنولوجيا الكمية. ومن شأن النهج الشامل للتكنولوجيا الكمية - الذي يتناول دورة حياتها الكاملة - أن يساعد الدول على توقع فرصها والحد من تحدياتها في مجال السلام والأمن الدوليين.

1. مقدمة: بروز التكنولوجيا الكمية

لقد أصبح ارتفاع مستوى البحث والابتكار والاستثمار في تكنولوجيا الكم ظاهرة عالمية.[1] وباعتبارها تكنولوجيا، فإنها تنطوي على قدر كبير من الوعود بتحقيق اختراقات كبيرة في دعم العديد من أهداف التنمية المستدامة.[2]

وعلى الرغم من الفوائد المغرية التي تعد بتوفير تكنولوجيا الكم، إلا أن هناك أيضا مخاوف بشأن المخاطر التي قد تشكلها على السلام والأمن الدوليين. فقد حذر الأمين العام للأمم المتحدة الجمعية العامة في عام 2022 من أن الحواسيب الكمية يمكن أن "تدمر الأمن السيبراني وتزيد من خطر حدوث أعطال في الأنظمة المعقدة، وليس لدينا أي بودر لبنية عالمية للتعامل مع أي من هذه المخاطر."[3]

من المؤكد أن المدى الذي قد تشكل فيه التكنولوجيا القائمة على الكم الطبيعة المستقبلية للحرب، أو الأمن بشكل عام، لا يزال غير مؤكد إلى حد كبير، وخاصة في ضوء الحالة الهشة والناشئة للأنظمة الكمية.[4] وعلى الرغم من هذا الغموض، ومن منظور الأمن العالمي، فمن المهم الاستثمار في التعليم المبكر وبناء المعرفة في هذا المجال لأن العلوم والتكنولوجيا الكمية يمكن أن تُحدث ثورة عميقة في مجال الحوسبة.

تهتم الدول اهتمامًا متزايدًا بهذه التكنولوجيا، كما يتضح من زيادة الاستثمارات في أبحاث تكنولوجيا الكم[5] ومن خلال العدد الكبير من الإشارات إلى التكنولوجيا الكمية من قبل الدول الأعضاء خلال الدورات الرسمية لفريق العمل المفتوح العضوية التابع للأمم المتحدة المعني بأمن تكنولوجيا المعلومات والاتصالات واستخدامها.[6]

مع اقتراب عام 2025، الذي أعلنته الأمم المتحدة السنة الدولية للعلوم والتكنولوجيا الكمية، يهدف هذا الدليل التمهيدي إلى رفع مستوى الوعي حول التأثيرات المحتملة للتكنولوجيا الكمية على الأمن الدولي.

---

[1] Alina Clasen, "Germany Strives to Catch Up with US, China in Quantum Tech Race", Euractiv,12 May 2023, https://www.euractiv.com/section/digital/news/germany-strives-catch-up-with-us-china-in-quantum-tech-race/.

[2] Open Quantum Institute, *Progress Report 2024: Quantum for All Initiative* (Geneva: Gesda, October 2024), https://gesda.global/wp-content/uploads/2024/10/GESDA-Quantum-For-All-Progress-Report-2024_Final.pdf.

[3] الأمم المتحدة، ""عالمنا في ورطة كبيرة"، الأمين العام يحذر الجمعية العامة، ويحث الدول الأعضاء على العمل كأمم متحدة واحدة"، بيان صحفي SG/SM/21466، 20 سبتمبر 2022، https://press.un.org/en/2022/sgsm21466.doc.htm.

[4] Lauren Biron, "Five Ways QSA Is Advancing Quantum Computing", Berkeley Lab News Center, 10 April 2023, https://newscenter.lbl.gov/2023/04/10/five-ways-qsa-is-advancing-quantum-computing/.

[5] Indra, "ADEQUADE: Advanced, Disruptive and Emerging QUAntum Technologies for Defence", 2022, https://www.indracompany.com/en/indra/adequade-advanced-disruptive-emerging-quantum-technologies-defence.

[6] United Nations, Office for Disarmament Affairs, "Open-ended Working Group on Security of and in the Use of Information and Communications Technologies", https://meetings.unoda.org/open-ended-working-group-on-information-and-communication-technologies-2021.

وتم تصميمه لتزويد صناع السياسات والدبلوماسيين بإطار مرجعي للنظر في بيئة المخاطر المحيطة بالعلوم والتكنولوجيا الكمية.

ولمساعدة القارئ على فهم تعقيد الموضوع، يقدم القسم الثاني، بعد هذا المقدمة، لمحة عامة عن المبادرات الوطنية والإقليمية المختارة بشأن مفهوم الكم. وبعد ذلك، يتناول القسم الثالث العديد من المفاهيم الأساسية في ميكانيكا الكم. ويقدم القسم الرابع التطبيقات العسكرية للتكنولوجيا الكمية. ويقدم القسم الخامس نظرة عامة أولى على التأثيرات المحتملة للتكنولوجيا الكمية على المشهد الأمني الدولي قبل الاستنتاجات المقدمة في القسم السادس.

2. المفاهيم الأساسية لميكانيكا الكم

تدرس ميكانيكا الكم سلوك الذرات والجسيمات. تتكون الذرات من نواة مكونة من بروتونات ونيوترونات، تدور حولها الإلكترونات. وتتحرك الإلكترونات في كمّات منفصلة discrete quanta (وهي أصغر وحدة للطاقة) ويمكنها أيضًا التحرك في موجة مستمرة، مثل تدفق الماء من حوض المطبخ. يمكن للإلكترونات أن تشغل حالات متعددة في الوقت نفسه، فيما يسمى بالتراكب.[7] وتعني هذه الظاهرة أن ميكانيكا الكم قد تم تصنيفها على أنها ""غريبة" من قبل بعض الفيزيائيين.[8]

على المستوى الكمي، الأحداث لا يتم تحديدها ببساطة. على سبيل المثال، بدلاً من وجود حالتين منفصلتين للشحنة، غير مشحونة (يرمز لها بالرمز 0) ومشحونة (يرمز لها بالرمز 1)، يمكن تطبيق كلتا الحالتين في وقت واحد، وبشكل عشوائي أيضًا. وتوضح تجربة الشق المزدوج الشهيرة هذه الخصائص الفريدة للظواهر الكمية. باختصار، لاحظ العلماء أنه عندما تمر موجات الإلكترونات عبر شقين، فإنها تنتج موجات أصغر، والتي تتضخم وتنفي بعضها البعض حتى تصطدم بالجدار الخلفي لمنطقة الاختبار. يحدث هذا النمط من التداخل لأن "الإلكترونات تبدو وكأنها تتصرف مثل الموجات حتى النقطة التي يتم ملاحظتها أو قياسها عندها، حيث تعود إلى كونها جسيمات مرة أخرى".[9]

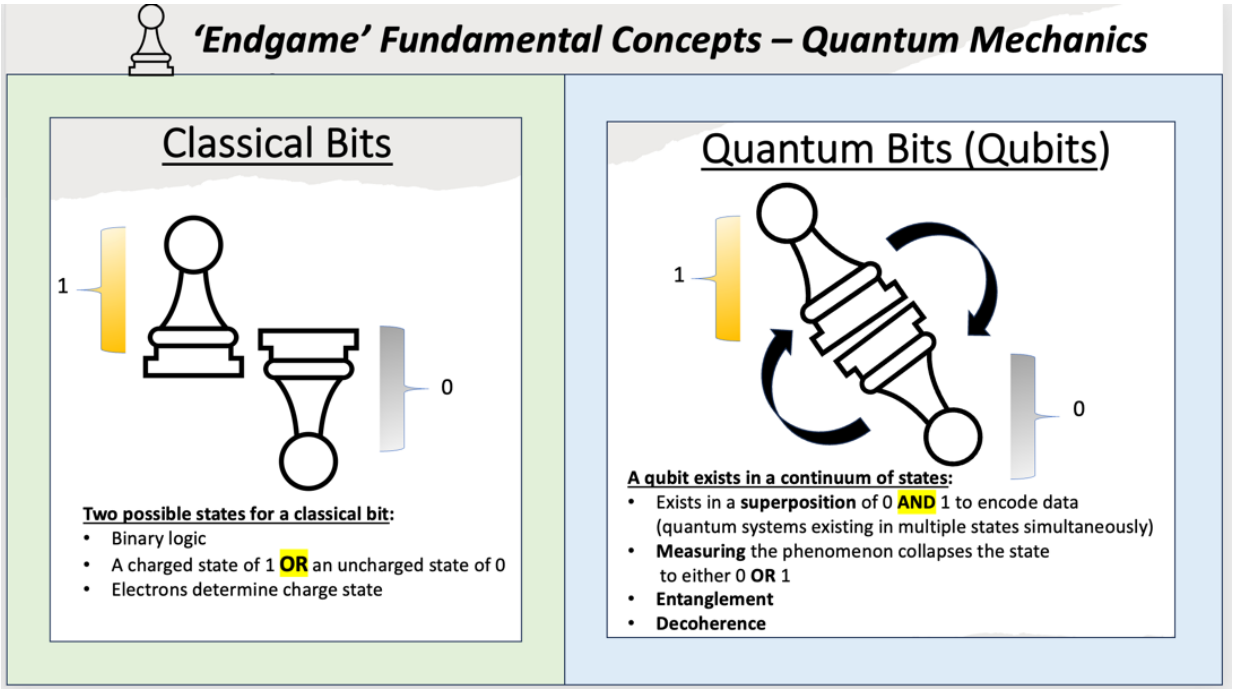
---

[7] المرجع نفسه.

[8] Michio Kaku, *Physics of the Future: How Science Will Shape Human Destiny and Our Daily Lives by the Year 2100* (New York: Anchor, 2012).

[9] Amit Katwala, *Quantum Computing: How It Works and How It Could Change the World* (London: Random House Business Books, 2021), p. 16.

الشكل 1. تمثيل مرئي للبتات العادية والبتات الكمية



يمكن تفسير التراكب بشكل أكبر باستخدام صورة بيدق الشطرنج في الشكل 1. تخيل أن البيدق يمكن وضعه إما واقفًا (يشير إلى حالة مشحونة تبلغ 1) أو مدورًا رأسًا على عقب (يشير إلى حالة غير مشحونة تبلغ 0). هذا المنطق الثنائي هو الطريقة التي تعمل بها الحواسيب الرقمية الحديثة. يمكن للبت العادي (الوحدة الأساسية للمعلومات) - أو البيدق العادي في هذا المثال - أن يمثل إما 0 أو 1. وعلى النقيض من ذلك، فإن الحواسيب الكمية عبارة عن أنظمة أكثر تعقيدًا تعمل باستخدام وحدات مختلفة من المعلومات، تسمى **بِتات كمية** أو **كيوبِتات**، توجد في تراكب بين 0 و1 لتشفير البيانات.[10] يمكن أن يوجد البيدق الكمي في الشكل 1 في سلسلة متصلة من الحالات أثناء دورانه - وبالتالي يمكن للذرة أن "تحتوي على معلومات أكثر بكثير من 0 أو 1"، كما يوضح الفيزيائي النظري ميتشيو كاكو.[11] وعند النظر إليها تحت مجهر متخصص، تبدو البتات الكمية (الكيوبتات) وكأنها تشبه "علامات الجمع (+) الفضية".[12] فهي تمكن الحواسيب الكمية من أداء مهام النمذجة المعقدة وحل المشكلات متعددة المتغيرات بكفاءة أكبر من الحواسيب الرقمية.[13]

---

[10] IBM, "IBM Quantum Learning", n.d., https://learning.quantum.ibm.com/.

[11] Kaku, *Physics of the Future*.

[12] Katwala, *Quantum Computing*, p. 45.

[13] Lily Chen et al., *Report on Post-Quantum Cryptography* (Washington, DC: National Institute of Standards and Technology, April 2016), https://doi.org/10.6028/nist.ir.8105.

علاوة على ذلك، يمكن أن تتفاعل الكيوبِتات أيضًا مع كيوبِتات أخرى في ظاهرة تسمى التشابك. فالتشابك هو حالة يمكن فيها "ربط جسمين أو أكثر في نظام كمي بشكل جوهري مع بعضهما البعض، بحيث يحدد قياس جسم واحد نتائج القياس المحتملة لجسم آخر، بغض النظر عن مدى البعد بين الجسمين".[14] تتيح هذه الخاصية للأنظمة الكمية إجراء حسابات متعددة في وقت واحد.[15] ومع ذلك، فإن الحالات الكمية حساسة للغاية للاضطرابات البيئية، مثل الصوت والحركة والتغيرات في درجات الحرارة.

يستكشف العلماء حاليا كيفية الاستفادة من التراكب لتعزيز القوة الحسابية وسرعة الحواسيب الكمية. ومن بين التحديات العديدة التي تواجه تطوير ونشر التكنولوجيا الكمية كيفية ضمان عدم تأثر الكميات شديدة الحساسية بعدم التماسك أو عدم اليقين في قياس التردد.[16] والسبب في ذلك هو أن مجرد إجراء قياس الأنظمة الكمية قد يؤدي إلى تغيير سلامة النتيجة، وتحويلها إلى شكل ثنائي من 0 أو 1.[17] وتؤدي هذه الاضطرابات البيئية إلى الضمور (أي فقدان التماسك)، مما يُصعّب على الأنظمة الكمية الحفاظ على التراكب والتشابك لفترات أطول من زمن إجراء التجربة.

3. استكشاف التطبيقات العسكرية للتكنولوجيا الكمية

تمكن الخصائص الأساسية لميكانيكا الكم الموصوفة في القسم 2 من استكشاف التطبيقات العسكرية أو الأمنية المتعددة. في الواقع، تتيح التكنولوجيا الكمية قدرات في مجال الحوسبة والاتصالات والوعي بالأوضاع لا مثيل لها مقارنة بالتكنولوجيا المتاحة حاليًا.[18]

يقدم هذا القسم نظرة عامة تمهيدية على التطبيقات الأكثر شيوعًا في الأدبيات الأكاديمية والأوسع نطاقًا، مثل: الاستشعار الكمي، والتصوير الكمي، وأنظمة الرادار الكمي، والاتصالات الكمية، وتوزيع المفاتيح الكمية QKD، والحوسبة الكمية.

3.1 الاستشعار الكمي

في الأساس، المُستشعرات الكمية هي أدوات قياس. وفي حين أن مبادئ الفيزياء والمواد المستخدمة في بناء المُستشعرات الكمية هي نفسها الموجودة في المُستشعرات التقليدية، إلا أن الأولى شديدة الحساسية. على سبيل المثال، فهي قادرة على استشعار أدنى الاضطرابات البيئية في المجالات

---

[14] National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine, *Quantum Computing: Progress and Prospects* (Washington, DC: National Academies Press, 2019), https://doi.org/10.17226/25196, p. 26.

[15] Alexandre Menard et al., "A Game Plan for Quantum Computing", McKinsey & Company, 6 February 2020, https://www.mckinsey.com/capabilities/mckinsey-digital/our-insights/a-game-plan-for-quantum-computing.

[16] Adrian Cho, "A Quantum Sense for Dark Matter", *Science*, 28 April 2022, https://www.science.org/content/article/crack-mystery-dark-matter-physicists-turn-super-sensitive-quantum-sensors.

[17] المرجع نفسه.

[18] North Atlantic Treaty Organization (NATO), "Summary of NATO's Quantum Technologies Strategy", 17 January 2024, https://www.nato.int/cps/en/natohq/official_texts_221777.htm .

الكهربائية والمغناطيسية ووجود الإشعاع. ومع ذلك، فإن الفارق الرئيسي بين المُستشعرات الكمية والمُستشعرات التقليدية هو أن المُستشعرات الكمية تمتلك قدرات دقة مذهلة تسمح لها باكتشاف أصغر وحدة طاقة أو قياس، تسمى الكوانتا.[19]

ونظرًا لقدرات الدقة التي تتمتع بها المُستشعرات الكمية في اكتشاف مثل هذه التغيرات اللامتناهية في الزمن والجاذبية، يستكشف العلماء طرقًا يمكن من خلالها تطبيق هذه التكنولوجيا لتوفير التفوق لقدرات الاستشعار العسكرية الحالية، للأغراض الدفاعية والهجومية. على سبيل المثال، يمكن للمُستشعرات الكمية أن توفر للجيوش القدرة على الحفاظ على دقة التوقيت وتحديد المواقع في البيئات التي يتعرض فيها النظام العالمي للملاحة بالأقمار الصناعية (GNSS) لمشكلات بسبب التداخل الإلكتروني في شكل تشويش الإشارات وتزييفها.[20]

أعلنت الأكاديمية الصينية للعلوم في عام 2017 أنها طورت مُستشعر يسمى جهاز التداخل الكمي فائق التوصيل (سكويد)، والذي يعتمد على مُستشعرات كمية للكشف عن التغيرات البيئية فائقة الحساسية (على سبيل المثال، المجالات المغناطيسية الخافتة في نشاط الدماغ). ويعتبر جهاز سكويد حساسًا للغاية لدرجة أنه يمكنه تسجيل الأنشطة عن بعد في الفضاء الخارجي (على سبيل المثال، الانفجارات الشمسية). بالإضافة إلى ذلك، يمكن لجهاز سكويد اكتشاف الطائرات في إطار الدفاع الوطني ويمكنه أيضًا دعم الطائرات المضادة للغواصات من خلال الكشف المعزز عن الشذوذ المغناطيسي. ويعمل الباحثون الصينيون أيضًا على تطوير أنواع مختلفة من أجهزة الكشف المغناطيسية، وبعضها يمكن تركيبه على الأقمار الصناعية،[21] والتي يمكن تشغيلها على متن الطائرات لتحديد مواقع المعادن بدقة تحت سطح الأرض.[22]

علاوة على ذلك، تبرز المُستشعرات الكمية كتكنولوجيا واعدة لتعزيز قدرات اكتشاف الغواصات تحت الماء. وسواء تعلق الأمر بالأنظمة التي تعتمد على الأقمار الصناعية، أو الأنظمة الثابتة تحت الماء، أو الأنظمة المحمولة على الطائرات أو السفن، فإن المُستشعرات الكمية المستقبلية قد يكون لها تأثير تخريبي على خفية عمليات الغواصات، بما في ذلك الغواصات التي تعمل بالطاقة النووية والتي تحمل صواريخ باليستية، والتي تعد مكسبًا حاسمًا للردع النووي. على سبيل المثال:

---

[19] David Chandler, "Quantum Sensor Can Detect Electromagnetic Signals of Any Frequency", MIT News, Massachusetts Institute of Technology, 21 June 2022, https://news.mit.edu/2022/quantum-sensor-frequency-0621.

[20] US Department of Defense, Defense Science Board (DSB), "DSB Reports", n.d., https://dsb.cto.mil/reports.htm.

[21] Henk H.F. Smid, "An Analysis of Chinese Remote Sensing Satellites", *Space Review*, 26 September 2022, https://www.thespacereview.com/article/4453/1.

[22] Stephen Chen, "Has China Developed the World's Most Powerful Submarine Detector?", *South China Morning Post*, 24 June 2017, https://www.scmp.com/news/china/society/article/2099640/has-china-developed-worlds-most-powerful-submarine-detector.

- يمكن استخدام **المقاييس المغناطيسية الكمية** للكشف عن التغيرات الدقيقة في المجالات المغناطيسية الناجمة عن هيكل الغواصة المعدني أو نظام دفعها. وسيؤدي ذلك إلى توسيع نطاق اكتشاف الغواصات المغمورة بشكل كبير.
- يمكن استخدام **مقاييس الجاذبية الكمية** في قياس أصغر الاختلافات في الجاذبية، مما قد يكشف عن وجود كتلة الغواصة. ومن المحتمل أن تتمكن أجهزة قياس الجاذبية الكمية من اكتشاف الغواصات دون وجود أي طريقة للغواصات لحماية نفسها.[23]

3.2 التصوير الكمي

التصوير الكمي هو طريقة تصوير متخصصة تمكن العلماء من التقاط صور ضوئية عالية الجودة لجسم ما.[24] تعتمد هذه الطريقة على استخدام جزيئات الضوء المتشابكة لإنشاء صور مفصلة لأطوال موجية شديدة الحساسية وغير قابلة للملاحظة.[25] ومن خلال إدارة أزواج الفوتونات، يستطيع العلماء التقاط صور ذات جودة ودقة أعلى، تتجاوز الطرق التقليدية.[26]

بالنسبة للعمليات العسكرية، من الممكن تطوير قدرات التصوير بالأشعة تحت الحمراء المتقدمة لتعزيز قدرات الاستخبارات والمراقبة والاستطلاع. على سبيل المثال، يمكن تطبيق أنظمة التصوير الكمي لاستشعار وجود غازات ضارة في بيئات ساحة المعركة والمساعدة في التحليل الجنائي للأسلحة الكيميائية وتركيبة أنواع البلاستيك.[27] وبالإضافة إلى ذلك، قد تمكن التكنولوجيا الكمية ما يسمى بالتصوير الشبح، وهي تقنية تستخدم الارتباطات الكمية بين الفوتونات لإنشاء صور للأشياء دون "رؤيتها" بشكل مباشر، مما يسمح بتصوير الأهداف من خلال مواد معتمة مثل السحب أو الضباب أو الدخان. وسيكون ذلك مفيدًا للاستطلاع والاستهداف العسكري.[28] ومن شأن مفهوم مماثل أن يتيح تحسنًا كبيرًا في ظروف الإضاءة المنخفضة للغاية، وهو سيناريو آخر له أهمية أساسية لنجاح عمليات الاستخبارات والمراقبة والاستطلاع.[29]

---

[23] Rudy Ruitenberg, "Armed with Quantum Sensors, France Eyes Leaps in Electronic Warfare", *Defense News*, 25 June 2024, https://www.defensenews.com/global/europe/2024/06/25/armed-with-quantum-sensors-france-eyes-leaps-in-electronic-warfare/.

[24] "Quantum Imaging", *Nature*, n.d., https://www.nature.com/collections/gehjgebjcc.

[25] Fraunhofer-Gesellschaft, "Quantum Imaging: Pushing the Boundaries of Optics", Phys.org, 3 January 2022, https://phys.org/news/2022-01-quantum-imaging-boundaries-optics.html.

[26] المرجع نفسه.

[27] المرجع نفسه.

[28] Rajesh Uppal, "Quantum Imaging Technique Can Have Military Applications, US and China Racing to Deploy Quantum Ghost Imaging in Satellites for Stealth Plane Tracking", IDST, 26 June 2022, https://idstch.com/technology/photonics/revolutionary-new-quantum-imaging-technique-can-have-military-applications/.

[29] National Security Technology Accelerator (NSTXL), "Quantum Technology in the Military", 1 February 2023, https://nstxl.org/quantum-technology-in-the-military/.

3.3 أنظمة الرادار الكمي

تتعرض أنظمة الرادار التقليدية إلى التشويش من قبل أجهزة مصممة لهذا الغرض كما تتعرض للتشويش بسبب الضوضاء الناجمة عن الظواهر الطبيعية. وفي المقابل، يمكن لنظام الرادار القادر على الصمود والمجهز بالتكنولوجيا الكمية اكتشاف الطائرات الشبحية بدقة أكبر من خلال استخدام نظام تتابع الفوتونات الأكثر تطورًا.[30]

ويرى بعض العلماء أن الأثر المحتمل للرادار الكمي في العمليات العسكرية لا ينبغي أن يكون موضع شك، لأنه بمجرد وصول التكنولوجيا إلى مرحلة التنفيذ، فإنها ستدل على "نهاية عصر التخفي".[31] وخلاف ذلك، ووفقًا لخبراء آخرين، لا تزال هناك "تحديات هندسية كبيرة" تحيط بالرادار الكمي، بدءًا من بناء أجهزة كشف حساسة إلى إيجاد وسيلة لتثبيت تدفقات الفوتونات المتشابكة.[32] وبشكل عام، هناك نقاش حاد بين المنظرين حول القيمة التي تضيفها تكنولوجيا الرادار الكمي في العمليات العسكرية.

وفيما يتعلق بالعمليات الفضائية، يفترض بعض العلماء أن الرادار الكمي يمكن استخدامه في الفضاء الخارجي لاكتشاف المركبات الفضائية الخفية، وتتبع حركة الحطام المداري الضئيل والضار في نفس الوقت، وكذلك لمراقبة الصواريخ الباليستية.[33] ويظل البعض الآخر متشككًا بشأن مدى التطوير في القدرة على اكتشاف الأشياء.[34]

توفر التكنولوجيا الكمية في مجال الاستشعار والتصوير والرادار مجتمعة إمكانية تحسين الوعي بالأوضاع لفائدة الجيوش، في حين أنها قد تهدد أيضًا بتقليص قدرات التخفي العسكرية في سياقات معينة.[35]

3.4 الاتصالات الكمية

من بين جميع فئات التكنولوجيا الكمية المقدمة في هذا الدليل التمهيدي، تعد الاتصالات الكمية الأقل تطورًا للتطبيق العسكري في هذا الوقت. تستخدم الاتصالات الكمية التشابك - وهي العملية التي يمكن من خلالها للكيوبتات (البتات الكمية) التواصل مع بعضها البعض في وقت واحد - لنقل البيانات عبر قنوات الإرسال والمواقع.[36]

---

[30] Martin Giles, "The US and China Are in a Quantum Arms Race That Will Transform Warfare", *MIT Technology Review*, 3 January 2019, https://www.technologyreview.com/2019/01/03/137969/us-china-quantum-arms-race/.

[31] انظر، على سبيل المثال، البروفيسور سيث لويد من معهد ماساتشوستس للتكنولوجيا، المذكور في المرجع نفسه.

[32] انظر، على سبيل المثال، البروفيسور جوناثان باوغ من جامعة واترلو، المذكور في المرجع نفسه.

[33] Chris Jay Hoofnagle and Simson Garfinkel, "Quantum Sensors—Unlike Quantum Computers—Are Already Here", Defense One, 27 June 2022, https://www.defenseone.com/ideas/2022/06/quantum-sensorsunlike-quantum-computersare-already-here/368634/.

[34] وزارة الدفاع الأمريكية، مجلس علوم الدفاع ((DSB، "تقارير DSB".

[35] Hoofnagle and Garfinkel, "Quantum Sensors—Unlike Quantum Computers—Are Already Here".

[36] US National Science Foundation (NSF), "NSF and White House Office of Science and Technology Policy Initiate Collaborative Effort to Develop Critical Resources for Quantum Education", 18 May 2020, https://www.nsf.gov/news/special_reports/announcements/051820.jsp.

في حين أن الاتصالات الكمية لا تزال في بداياتها، فإن المجال الفرعي لتوزيع المفاتيح الكمية أكثر تطورًا قليلاً للتطبيقات العسكرية.

3.5 توزيع المفاتيح الكمية

في السياق العسكري، لأمن الاتصالات أهمية قصوى في ضمان القدرة على ممارسة القيادة والسيطرة الفعالة وتحقيق نجاح المهام. وفي هذا الصدد، يلعب تشفير البيانات والمعلومات دائمًا دورًا مهمًا في المجال العسكري. يعتمد توزيع المفتاح الكمية QKD على مبادئ ميكانيكا الكم لتشفير البيانات. وفي العالم المادي، يتم استخدام المفتاح لقفل وفتح الأنظمة. وفي الحوسبة، يمكن أن يتكون المفتاح من سلسلة من الأرقام 1 و0 يمكن استخدامها لتشفير وفك تشفير المعلومات.

نجحت الصين في عام 2017 تفعيل أول شبكة اتصالات تستخدم لتوزيع المفاتيح الكمية عابرة للقارات من الأرض إلى القمر الصناعي ومن القمر الصناعي إلى الأرض بين القمر الصناعي الكمي ميسيوس Micius ومحطة أرضية للاتصالات الكمية في مقاطعة هبي.[37] وحسب قائد نظام ميسيوس، فإن شبكة الاتصالات الكمية هذه هي "الطريقة الأكثر أمانًا للاتصالات لأن أي متنصت سوف يعطل التشابك ويتم اكتشافه".[38] كان هذا الاختبار مهمًا لأنه أثبت أن الاتصالات الآمنة المعتمدة على التكنولوجيا الكمية في الفضاء ممكنة. علاوة على ذلك، افترض مقال في *مجلة الناتو NATO Review* أنه يمكن الاستفادة من توزيع المفاتيح الكمية لتمكين "نقل البيانات شديدة الأمان، والتي قد تكون غير قابلة للاختراق تمامًا" في اتصالات الدفاع العسكري.[39]

3.6 الحوسبة الكمية

الحوسبة الكمية هي شكل متقدم من أشكال الحوسبة التي تستخدم مبادئ الفيزياء الكمية لمعالجة المعلومات، وبذلك فلها القدرة على حل مشكلات قد تستغرق الحواسيب العادية آلاف السنين لحلها. وتعد الحوسبة الكمية تقنية تمكينية تحمل الكثير من الوعود في جميع قطاعات المجتمع، بما في ذلك المجال العسكري. وتشمل التطبيقات العسكرية الرئيسية ما يلي:[40]

- **التشفير والأمن السيبراني**، بما في ذلك فك الشفرات والتشفير المقاوم للكم (انظر للقسم 4)
- **الذكاء الاصطناعي والتعلم الآلي**، لدعم كل من أنظمة دعم القرار المتفوقة DSSs والجيل الجديد من الأنظمة المستقلة
- **اللوجستية والمشكلات التحسين المعقدة**، مثل إدارة سلسلة التوريد وتخطيط المهام

---

[37] "China Achieves a Quantum Jump", *China Daily*, 18 June 2017, http://en.people.cn/n3/2017/0618/c90000-9229972.html.

[38] المرجع نفسه.

[39] Michiel van Amerongen, "Quantum Technologies in Defence & Security", *NATO Review*, 3 June 2021, https://www.nato.int/docu/review/articles/2021/06/03/quantum-technologies-in-defence-security/index.html.

[40] National Security Technology Accelerator (NSTXL), "Quantum Technology in the Military".

- **المحاكاة والنمذجة**، لتوفير محاكاة أكثر دقة وتعقيدًا لظروف ساحة المعركة للتدريب العسكري
- **علوم المواد**، لتسريع اكتشاف وتطوير مواد جديدة للتطبيقات العسكرية، مثل الدروع الأقوى والأخف وزنًا

4. تداعيات التكنولوجيا الكمية على الأمن الدولي

بعد تقديم لمحة عامة موجزة عن التكنولوجيا الكمية واستخداماتها العسكرية المحتملة في الأقسام السابقة، يقدم هذا القسم نظرة عامة أولية رفيعة المستوى على التداعيات الأمنية الدولية المحتملة في أربعة مجالات رئيسية، وهي: أمن تكنولوجيا المعلومات والاتصالات العالمي، والاستخبارات والمراقبة والاستطلاع، وأنظمة دعم القرار، ونظام الأسلحة المستقلة، والرصد والتحقق.

4.1 أمن تكنولوجيا المعلومات والاتصالات العالمي

كما ذكر في المقدمة، فإن عددًا متزايدًا من الدول الأعضاء المشاركة في الفريق العامل المفتوح العضوية المعني بأمن تكنولوجيا المعلومات والاتصالات قد سلطت الضوء على التهديدات المحتملة التي تشكلها التكنولوجيا الكمية. فكيف يمكن لهذه التهديدات أن تتجسد على أرض الواقع؟

على سبيل المثال، قد تتمكن الحواسيب الكمية من فك العديد من أنظمة التشفير المستخدمة حالياً، بما في ذلك أنظمة التشفير بالمفتاح العام المستخدم على نطاق واسع (مثل خوارزمية آر إس إيه RSA وتشفير المنحنى الإهليلجي ECC. ومن شأن ذلك أن يهدد أمن الاتصالات الحكومية والعسكرية والاستخباراتية الحساسة على المستوى المحلي وبين الدول. وستتيح هذه القدرة أيضًا للجهات الخبيثة فك تشفير الاتصالات المشفرة التي سبق اعتراضها وتخزينها. وفي هذا النوع من أعمال تكنولوجيا المعلومات والاتصالات الخبيثة - والمعروفة باسم "احصد الآن وفك التشفير لاحقًا" HNDL - يتم استخراج البيانات المشفرة وتخزينها اليوم، ثم فك تشفيرها في المستقبل باستخدام خوارزميات التشفير ما بعد الكمي PQC.[41] وهذا أمر مثير للقلق لأن هذه البروتوكولات الأمنية تعمل على تأمين الاتصالات والعمليات اليومية التي تتم عبر الإنترنت، بما في ذلك تلك الخاصة بالخدمات الحيوية مثل التمويل والرعاية الصحية.[42] وعلى الرغم من عدم وجود حاسوب كمي مجهز حاليًا بعدد كافٍ من الكيوبتات لحساب العوامل الأولية اللازمة لفك تشفير الاتصالات الحساسة بسرعة،[43] فلا ينبغي أن يتهاون صناع القرار عند النظر في مخاطر الأمن السيبراني المتزايدة.[44]

ينبغي للدول أن تبدأ في التخطيط لكيفية تحديث الأنظمة الحساسة للتشفير ما بعد الكمي من أجل حمايتها بشكل أفضل ضد بيئة مخاطر التشفير ما بعد الكمي. ومع ذلك، فإن تحويل البنية التحتية الحيوية إلى

---

41 US National Institute of Standards and Technology, Information Technology Laboratory, Computer Security Division, "Post-Quantum Cryptography", n.d., https://csrc.nist.gov/projects/post-quantum-cryptography.

42 المرجع نفسه.

43 QuTech Academy, "Shor's Algorithm", n.d., https://www.qutube.nl/quantum-algorithms/shors-algorithm.

44 Menard et al., "A Game Plan for Quantum Computing".

معايير التشفير ما بعد الكمي يمثل تحديًا معقدًا يتطلب الوقت والاستثمار والتعاون المنظم بين القطاعين العام والخاص. وفي إطار تخطيطي أولي، ينبغي لصناع السياسات أن يركزوا على معالجة هذه الجوانب والتعاون مع أصحاب المصلحة لبناء الثقة حول تحديث الأنظمة والبنية الأساسية المعرضة للخطر.

4.2 الاستخبارات والمراقبة والاستطلاع المعتمدة على التكنولوجيا الكمية

تتطور المُستشعرات الكمية بوتيرة سريعة. ويعتقد بعض خبراء التكنولوجيا أنهم سوف ينتقلون من المختبر إلى السياق التشغيلي بشكل أسرع من الحوسبة الكمية.[45]

ستكون هناك حاجة إلى توسيع نطاق المُستشعرات الكمية أولاً قبل نشرها في البيئات التشغيلية العسكرية.[46] ويمكن أن تعمل المُستشعرات الكمية على تعزيز قدرات الاستخبارات والمراقبة والاستطلاع (كما هو موضح في القسم 3.1)، وخاصة لإعادة تعريف مفهوم العمليات الخفية في جميع البيئات. وعلى المستوى النظري على الأقل، قد يكون لذلك تأثيرات متتالية على الأمن والاستقرار الدوليين نظرًا لقدرة المُستشعرات الكمية المحتملة على إحداث ثورة في التخطيط وإدارة العمليات العسكرية فضلاً عن الردع النووي (على سبيل المثال من خلال تأثيرها على اكتشاف الغواصات كما هو موضح في القسم 3.1).

4.3 أنظمة دعم القرار وأنظمة الأسلحة المستقلة

تتمتع الأنظمة الكمية أيضًا بالقدرة على تسريع البحث في قدرات الذكاء الاصطناعي والتعلم الآلي المتقدمة التي يمكن أن تفتح الباب أمام جيل جديد من أنظمة الذكاء الاصطناعي المعقدة لدعم أنظمة دعم القرار الأكثر تقدمًا والجيل الجديد من الأنظمة المستقلة، بما في ذلك أنظمة الأسلحة المستقلة. على سبيل المثال، فإن القوة الحسابية المعززة والقدرة على تشغيل نماذج الذكاء الاصطناعي باستخدام الخوارزميات الكمية من شأنها أن تمكن من اتخاذ قرارات أفضل وأسرع في الوقت الحقيقي (التي يتخذها البشر أو الأنظمة المستقلة) وتسمح بمعالجة مشكلات التحسين المعقدة التي غالبا ما تكون مستعصية على الحواسيب العادية.

ولتوضيح الرؤية بعض الشيء حول حجم هذا الابتكار، فقد تمكن الحاسوب الكمي لجوجل في عام 2019 من إكمال مهمة في 200 ثانية فقط، بينما يستغرق الحاسوب العادي 10 آلاف عام لإنجازها.[47]

---

[45] Marco Lanzagorta and Jeffrey Uhlmann, "Opportunities and Challenges of Quantum Radar", *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, vol. 35, no. 11 (1 November 2020): 38–56, https://doi.org/10.1109/maes.2020.3004053.

[46] Marcus Doherty, "Quantum Technology: The Defence Imperative", Australian Army Research Centre, 5 May 2020, https://researchcentre.army.gov.au/library/land-power-forum/quantum-technology-defence-imperative.

[47] Cameron Wood and Alex Krijger, "The Convergence of Artificial Intelligence and Quantum Computing: Unravelling the Complex Geopolitical Nexus", Transformation Forums, 18 June 2023,

وتعتبر هذه القدرة ضرورية للعمليات العسكرية التي تنطوي على العديد من المتغيرات والنتائج المحتملة. وبالإضافة إلى توفير القدرة المتزايدة على معالجة البيانات في الوقت الفعلي، فإن دمج الحوسبة الكمية مع الذكاء الاصطناعي سيسمح للمخططين العسكريين بمحاكاة السيناريوهات والنتائج المختلفة بكفاءة أكبر بكثير، مما يؤدي إلى اتخاذ قرارات أفضل.

وفي القطاعات مثل الرعاية الصحية وإدارة المياه والأمن الغذائي، تظهر التكنولوجيا الكمية بالفعل نتائج واعدة من حيث الكفاءة والإنتاجية والدقة والسرعة. ومن المهم بالتالي أن تراعي أيضًا المناقشات حول التطوير المسؤول والنشر والاستخدام للذكاء الاصطناعي في المجال العسكري التأثير المحتمل للتكنولوجيا الكمية.[48]

4.4 الرصد والتحقق

أما المجال الأخير، ولكن المهم، لتطبيق التكنولوجيا الكمية في مجال الأمن الدولي، فيتمثل في الرصد والتحقق لدعم منع الانتشار والضمانات. وتعتبر هذه العناصر أساسية لضمان الاستخدام السلمي للتكنولوجيا النووية ومنع انتشار الأسلحة النووية. وتبرز المُستشعرات الكمية كأدوات واعدة لتعزيز هذه الجهود بطرق مختلفة، كما يلي:

- **قدرات الكشف المحسنة:** توفر المُستشعرات الكمية تحسينات كبيرة في الكشف عن المواد والأنشطة النووية. وهي تعمل على وجه الخصوص على تحسين حساسية ونطاق اكتشاف الإشعاع.[49] ومن ثم فإنها تتيح مراقبة أكثر فعالية للمرافق النووية والحدود لمنع الاتجار بالمواد النووية.
- **تعزيز أخذ العينات البيئية:** يمكن لتقنيات الاستشعار الكمي أن تعزز تحليل العينات البيئية التي يتم جمعها لأغراض الحماية. ويوفر ذلك إمكانية الكشف عن كميات ضئيلة من المواد النووية بدقة أكبر.[50]
- **تحسين تقنيات التحقق:** قد تسمح تقنيات الاستشعار الكمي المتقدمة بإجراء قياسات أكثر دقة وغير مدمرة لكميات وتراكيب المواد النووية. ويعد ذلك القياس أمرًا بالغ الأهمية للتحقق من البيانات واكتشاف التسريب.[51]

---

https://www.transformationforums.com/the-convergence-of-artificial-intelligence-and-quantum-computing-unravelling-the-complex-geopolitical-nexus/.

[48] Open Quantum Institute, *Intelligence Report on Quantum Diplomacy for the Sustainable Development Goals (SDGs)* (Geneva: Gesda, October 2024), https://open-quantum-institute.cern/wp-content/uploads/2024/10/GESDA_OQI_Intelligence-Report-2024_Final.pdf.

[49] Samanvya Hooda, "Quantum Sensors and Submarine Invulnerability", 16 October 2023, https://www.9dashline.com/article/quantum-sensors-and-submarine-invulnerability.

[50] Henning Soller and Niko Mohr, "Quantum Sensing's Untapped Potential: Insights for Leaders", 17 September 2024, https://www.mckinsey.com/capabilities/mckinsey-digital/our-insights/quantum-sensings-untapped-potential-insights-for-leaders.

[51] المرجع نفسه.

- **تحسين قدرات الرصد عن بعد:** قد تتمكن المُستشعرات الكمية المستقبلية التي يتم نشرها على الأقمار الصناعية من اكتشاف الأنشطة النووية من الفضاء بحساسية غير مسبوقة، وهو ما يعزز قدرات الرصد العالمية.

5. أمثلة على المبادرات الوطنية والإقليمية في مجال التكنولوجيا الكمية

لقد استثمرت بعض الدول، أو أعلنت عن استثمارات، في التكنولوجيا الكمية. وقد استفاد العديد منها أيضًا من الشراكات المنظمة بين القطاعين العام والخاص مع الجهات الفاعلة في القطاع الخاص، بدءًا من الشركات الناشئة إلى شركات التكنولوجيا الكبرى.[52]

تطمح ألمانيا، على سبيل المثال، إلى قيادة سباق الابتكار الكمي العالمي وفقًا لبرنامج الإطار المفاهيمي للتكنولوجيا الكمية 2023.[53] تحدد هذه الوثيقة الإطار الاستراتيجي لألمانيا وخطتها لاستثمار 3 مليارات يورو لتطوير حاسوب كمي عالمي بحلول عام 2026. وتتطلع كندا أيضًا إلى أن تكون محور الاهتمام بناءً على استراتيجيتها الوطنية الكمية لعام 2023، حيث خصصت 360 مليون دولار كندي لتعزيز البحث الكمي والابتكار والتسويق.[54]

في عام 2023، نشرت الحكومة الأسترالية الاستراتيجية الوطنية في مجال التكنولوجيا الكمية وتعهدت بتخصيص مليار دولار أسترالي لتسريع الابتكار الكمي.[55] وتستثمر الصين، حسب بعض التقديرات، 15 مليار دولار في التكنولوجيا الكمية، ومن الممكن أن تنفق أكثر من استثمارات بقية العالم مجتمعة.[56] وفي المقابل، يخطط الاتحاد الأوروبي لاستثمار 7.2 مليار دولار (6.8 مليار يورو) في مشاريع الحوسبة الكمية بحلول عام 2025.[57] وتعهدت الولايات المتحدة بإنفاق 1.9 مليار دولار حتى عام

---

[52] انظر، على سبيل المثال، آي بي آم "IBM and Government of Quebec Launch Groundbreaking Partnership to Accelerate Discovery with First IBM System in Canada", 3 February 2022, https://newsroom.ibm.com/2022-02-03-IBM-and-Government-of-Quebec-Launch-Groundbreaking-Partnership-to-Accelerate-Discovery-with-First-IBM-Quantum-System-in-Canada.

[53] وزارة التعليم والبحث الفيدرالية، "الإطار المفاهيمي للتكنولوجيا الكمية" برنامج الحكومة الفيدرالية"، أبريل 2023، https://www.quantentechnologien.de/fileadmin/public/Redaktion/Dokumente/PDF/Publikationen/Quantum-Technologies-Conceptual-Framework-2023_english_bf_C1.pdf

[54] حكومة كندا، "نظرة عامة على استراتيجية كندا الوطنية الكمية"، 31 يوليو 2023، https://ised-isde.canada.ca/site/national-quantum-strategy/en.

[55] حكومة أستراليا، "الاستراتيجية الكمية الوطنية"، 3 مايو 2023، https://www.industry.gov.au/publications/national-quantum-strategy.

[56] Mateusz Masiowski et al., "Quantum Computing Funding Remains Strong, But Talent Gap Raises Concern", McKinsey, 15 June 2022, https://www.mckinsey.com/capabilities/mckinsey-digital/our-insights/quantum-computing-funding-remains-strong-but-talent-gap-raises-concern.

[57] المرجع نفسه.

2025.[58] وبالإضافة إلى ذلك، تعهدت روسيا باستثمار 800 مليون دولار في تطوير التكنولوجيا الكمية حتى عام 2025، كما اعتمدت خارطة طريق روسية للتكنولوجيا الكمية مدتها خمس سنوات.[59]

وفي أوروبا، أعلنت المؤسسة الأوروبية المشتركة للحوسبة عالية الأداء EuroHPC JU عن خططها لاستثمار 100 مليون يورو في بناء ستة مواقع للحواسيب الكمية الأوروبية، في جمهورية التشيك وألمانيا وإسبانيا وفرنسا وإيطاليا وبولندا.[60] وكمثال آخر، يسعى مشروع تقنيات الدفاع الكمية المتقدمة والمبتكرة والناشئة ADEQUADE التابع للمفوضية الأوروبية، والذي يضم أكثر من 30 شريكًا في 8 دول أوروبية، إلى الاستفادة من تكنولوجيا الاستشعار الكمي لتعزيز القدرات الحربية.[61] وتتراوح هذه القدرات من تحسين تحديد المواقع والملاحة والتوقيت إلى تطوير استشعار الترددات الراديوية والاستشعار الضوئي.[62] وتتعاون حكومتا فرنسا والدنمارك في اختبار مُستشعر كمي لتحديد مجال الجاذبية الأرضية وتقييم كيفية الملاحة باستخدام أنظمة تعتمد على التكنولوجيا الكمية في حالة تعطل خدمات الملاحة بالأقمار الصناعية العالمية أثناء الأزمة.[63] وأخيرا، وباعتماد استراتيجيتها الوطنية الكمية في عام 2023، تعهدت المملكة المتحدة بمضاعفة الاستثمار في التكنولوجيا الكمية من خلال استثمار 2.5 مليار جنيه إسترليني على مدى السنوات العشر المقبلة.[64] وتعمل المملكة المتحدة أيضًا على تطوير نماذج أولية لمُستشعرات كمية للأقمار الصناعية المدمجة، والتي تسمى كيوبساتس "CubeSats"، في إطار مبادرة لاستكشاف تطبيقات التكنولوجيا الكمية من الأرض إلى الفضاء الخارجي.[65]

وفيما يتعلق بمنطقة المحيطين الهندي والهادئ، أنشأت أمانة مجلس الأمن القومي في الهند مختبرًا كميًا في الكلية العسكرية للهندسة الاتصالاتية لمواكبة التهديدات المعلوماتية الكمية للأنظمة العسكرية، مثل

---

[58] المرجع نفسه.

[59] "Russia's Quantum Patent Applications Decline Amid Sanctions", *Moscow Times*, 14 June 2023, https://www.themoscowtimes.com/2023/06/14/russias-quantum-patent-applications-decline-amid-sanctions-a81499.

[60] Laura Kabelka, "Commission Announces Six Sites for European Quantum Computers", Euractiv, 5 October 2022, https://www.euractiv.com/section/digital/news/commission-announces-six-sites-for-european-quantum-computers/.

[61] Indra, "ADEQUADE: Advanced, Disruptive and Emerging QUAntum Technologies for DEfence".

[62] المرجع نفسه.

[63] Technical University of Denmark, "Navigation Quantum Sensor Being Tested in Greenland", The Mirage, 12 June 2023, https://miragenews.com/navigation-quantum-sensor-being-tested-in-1024820.

[64] United Kingdom Department of Innovations, Science and Technology, "National Quantum Strategy", 15 March 2023, https://www.gov.uk/government/publications/national-quantum-strategy#full-publication-update-history .

[65] Alanna Madden, "Researchers to Test Limits of Quantum Technologies with Nanoparticles in Space", Courthouse News Service, 21 June 2023, https://www.courthousenews.com/researchers-to-test-limits-of-quantum-technologies-with-nanoparticles-in-space/.

التشفير ما بعد الكمي PQC.[66] وأعلنت الحكومة اليابانية أيضًا أنها ستنتج حاسوبًا كميًا محليًا وتؤسس أربعة مراكز للأبحاث الكمية.

لقد أثبتت السنوات القليلة الماضية أن التكنولوجيا الكمية تعد بتشكيل الشراكات الكمية الثنائية ومتعددة الأطراف، مثل الاتفاقيات التي وقعتها الولايات المتحدة مع سويسرا واليابان وأستراليا.[67] وتُعد الشراكات أيضًا سمة أساسية لاستراتيجية تقنيات الكم الخاصة بحلف شمال الأطلسي التي تسلط الضوء على أن "التحالف الجاهز للتكنولوجيا الكمية يتطلب، أولاً وقبل كل شيء، تعاونًا أوثق بين الحلفاء، وبيئة كمية قادرة على الصمود تمتد إلى ما هو أبعد من توفر التمويل المناسب".[68]

وتشير بعض التوقعات إلى أنه بحلول نهاية عام 2027، من المرجح أن تستثمر الدول والقطاع الخاص أكثر من 16 مليار دولار في الحوسبة الكمية.[69]

---

[66] Indian Ministry of Defence, "Indian Army Establishes Quantum Laboratory at MHow (MP)", 29 December 2021, https://pib.gov.in/PressReleasePage.aspx?PRID=1786012.

[67] Thomas Wong, "The United States and Switzerland Sign Joint Statement to Strengthen Collaboration on Quantum", National Quantum Initiative, 21 October 2022, https://www.quantum.gov/the-united-states-and-switzerland-sign-joint-statement-to-strengthen-collaboration-on-quantum/; United States Department of State, "Tokyo Statement on Quantum Cooperation", 19 December 2019, https://www.state.gov/tokyo-statement-on-quantum-cooperation/; The White House, "The United States and Australia Partner to Build Quantum Future", 18 November 2021, https://www.whitehouse.gov/ostp/news-updates/2021/11/18/the-united-states-and-australia-partner-to-build-quantum-future/.

[68] North Atlantic Treaty Organization (NATO), "Summary of NATO's Quantum Technologies Strategy", 17 January 2024, https://www.nato.int/cps/en/natohq/official_texts_221777.htm .

[69] IDC, "IDC Forecasts Worldwide Quantum Computing Market to Grow to $7.6 Billion in 2027", 17 August 2023, https://www.idc.com/getdoc.jsp?containerId=prUS51160823.

6. الخلاصة

مع تقدم التكنولوجيا الكمية، فإنها تكشف عن إمكانات تحويلية ومخاطر معقدة للأمن الدولي. فإن اتباع نهج شامل للابتكار الكمي ـ وهو نهج يأخذ في الاعتبار دورة الحياة الكاملة من التطوير إلى النشر ـ أمرٌ ضروري لفهم آثاره على الاستقرار العالمي والحد من التسلح. وعلى وجه الخصوص، فإن إمكانية تعرض بروتوكولات التشفير الحالية للخطر من خلال الحواسيب الكمية تُبرز أهمية التحول إلى معايير التشفير ما بعد الكمي. وسيكون هذا التحول حاسمًا لتأمين البنية التحتية الحيوية وأنظمة الاتصالات والدفاع ضد تهديدات الأمن السيبراني الناشئة.

ويتطلب التصدي لهذه التحديات تعاونًا قويًا بين الحكومات والأوساط الصناعية والجامعية. وتعتبر مثل هذه الشراكات بين القطاعات ضرورية لتنمية القوى العاملة الجاهزة للتكنولوجيا الكمية وتخفيف الفجوات الرقمية التي قد تنشأ مع تقدم التكنولوجيا الكمية. وعلاوة على ذلك، فإن تطوير أطر الحوكمة متعددة الأطراف، وتدابير بناء الثقة، ومبادرات بناء القدرات من شأنه أن يدعم الابتكار الكمي المسؤول.

ينص قانون أمارا على أننا "نميل إلى المبالغة في تقدير تأثير التكنولوجيا على المدى القصير والتقليل من تقدير تأثيرها على المدى الطويل". وإذ نضع ذلك نصب أعيننا، فإن مستقبل التكنولوجيا الكمية يتطلب اتخاذ إجراءات دقيقة ومنسقة.

فمن خلال تعزيز التعاون والاستعداد على المستوى العالمي، يمكن للمجتمع الدولي أن يدمج التقدم الكمي بشكل مسؤول. وهذا من شأنه أن يضمن استخدامها كأدوات للاستقرار والأمن، وليس كمصدر للصراعات والاضطرابات.