



ANALISIS PENGGUNAAN FISIKA KUANTUM DALAM PENGEMBANGAN KOMPUTASI KUANTUM

Mikhael Oktoberyan Sawato Zuduhu Daeli¹⁾, Mercy Telaumbanua²⁾, Lena Lestari Lase³⁾

¹⁾ Teknologi Informasi, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Nias, Gunungsitoli, Indonesia
Email: efgh12831@gmail.com

²⁾ Teknologi Informasi, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Nias, Gunungsitoli, Indonesia
Email: mercytelaumbanua05@gmail.com

³⁾ Teknologi Informasi, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Nias, Gunungsitoli, Indonesia
Email: Lenalase@gmail.com

Abstract

This study aims to analyze literature related to the application of quantum physics principles in the development of quantum computing technology. Quantum computing is a rapidly evolving field that holds significant potential for solving complex problems that classical computers cannot efficiently address. By reviewing recent studies, this research discusses fundamental concepts such as superposition, entanglement, and quantum decoherence, as well as their applications in quantum algorithms, including Shor's and Grover's algorithms. Furthermore, the article explores the challenges and future prospects of developing stable and practical quantum computers. The findings indicate that although significant advancements have been made in technology and theory, major challenges such as decoherence control and qubit scaling remain key areas for future research.

Keywords: Literature Analysis, Use of Quantum Physics, Development of Quantum Computing

Abstrak

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis literatur yang berhubungan dengan penerapan prinsip-prinsip fisika kuantum dalam pengembangan teknologi komputasi kuantum. Komputasi kuantum merupakan bidang yang berkembang pesat dan menawarkan potensi besar dalam memecahkan masalah kompleks yang tidak dapat diselesaikan oleh komputer klasik secara efisien. Dengan meninjau studi-studi terkini, penelitian ini membahas konsep-konsep fundamental seperti superposisi, keterikatan (entanglement), dan dekoherensi kuantum, serta penerapannya dalam algoritma kuantum, seperti algoritma Shor dan Grover. Selain itu, artikel ini mengeksplorasi tantangan dan prospek ke depan dalam mengembangkan komputer kuantum yang stabil dan praktis. Temuan menunjukkan bahwa meskipun ada perkembangan signifikan dalam teknologi dan teori, tantangan besar seperti kontrol dekoherensi dan skala qubit tetap menjadi fokus penelitian mendatang.

Kata Kunci: Analisis Literatur, Penggunaan Fisika Kuantum, Pengembangan Komputasi Kuantum.



PENDAHULUAN

Perkembangan teknologi informasi dan komunikasi yang pesat dalam beberapa dekade terakhir telah mendorong eksplorasi konsep baru dalam pemrosesan informasi. Salah satu konsep yang paling menjanjikan adalah komputasi kuantum, yang memanfaatkan prinsip-prinsip fisika kuantum untuk memproses data dengan cara yang tidak mungkin dilakukan oleh komputer klasik. Dalam konteks ini, analisis literatur tentang penggunaan fisika kuantum dalam pengembangan komputasi kuantum menjadi sangat penting untuk memahami potensi dan tantangan yang dihadapi oleh bidang ini.

Komputasi kuantum berakar pada dua konsep utama dari fisika kuantum: superposisi dan keterikatan. Superposisi memungkinkan qubit untuk berada dalam beberapa keadaan sekaligus, berbeda dengan bit klasik yang hanya bisa berada dalam keadaan 0 atau 1. Keterikatan, di sisi lain, memungkinkan qubit untuk saling terkait secara kuantum, sehingga status satu qubit dapat mempengaruhi status qubit lainnya, tidak peduli seberapa jauh jarak mereka. Prinsip-prinsip ini membuka jalan bagi algoritma yang mampu memproses informasi secara paralel, memberikan keunggulan signifikan dalam kecepatan pemrosesan.

Meskipun potensi komputasi kuantum sangat besar, masih banyak tantangan yang harus dihadapi, baik dari sisi teoritis maupun praktis. Dari sisi teoritis, pengembangan algoritma yang dapat memanfaatkan keunggulan komputasi kuantum secara optimal masih menjadi fokus utama penelitian. Dari sisi praktis, tantangan dalam menciptakan dan mempertahankan qubit yang stabil serta mengurangi kesalahan dalam perhitungan merupakan hambatan yang signifikan.

Dalam konteks ini, analisis literatur tentang penggunaan fisika kuantum dalam pengembangan komputasi kuantum menjadi krusial. Melalui tinjauan menyeluruh terhadap penelitian yang ada, kita dapat memahami kemajuan yang telah dicapai, berbagai pendekatan yang digunakan, serta tantangan yang masih harus diatasi. Jurnal ini bertujuan untuk menyajikan analisis mendalam mengenai kontribusi fisika kuantum terhadap komputasi kuantum, dengan fokus pada perkembangan algoritma, arsitektur perangkat keras, dan aplikasi potensial.

Dengan demikian, pemahaman yang lebih baik tentang hubungan antara fisika kuantum dan komputasi kuantum tidak hanya akan memperkaya teori dasar di bidang ini, tetapi juga dapat memberikan arah yang jelas bagi penelitian dan pengembangan teknologi komputasi

kuantum di masa depan. Penelitian ini diharapkan dapat menjadi referensi bagi para peneliti dan praktisi yang ingin mengeksplorasi lebih jauh potensi komputasi kuantum dalam berbagai aplikasi.

TINJAUAN PUSTAKA

1. Konsep Dasar Fisika Kuantum

Fisika kuantum merupakan cabang fisika yang mempelajari perilaku partikel pada skala mikroskopis. Dua prinsip utama dari fisika kuantum yang relevan dalam komputasi kuantum adalah superposisi dan keterikatan. Superposisi memungkinkan qubit untuk berada dalam keadaan 0 dan 1 secara bersamaan, sedangkan keterikatan memungkinkan qubit yang terhubung untuk mempengaruhi satu sama lain, menciptakan sinergi yang tidak dimiliki oleh bit klasik (Nielsen & Chuang, 2010). Pemahaman mendalam mengenai prinsip-prinsip ini menjadi landasan dalam pengembangan algoritma kuantum.

2. Pengembangan Algoritma Kuantum

Salah satu terobosan penting dalam komputasi kuantum adalah pengembangan algoritma kuantum, yang dirancang untuk memanfaatkan karakteristik unik dari qubit. Algoritma Shor (1994) dan Grover (1996) adalah dua contoh yang paling terkenal. Algoritma Shor menunjukkan potensi komputasi kuantum dalam faktorisasi bilangan bulat, yang dapat meruntuhkan sistem kriptografi saat ini. Sementara itu, algoritma Grover menawarkan peningkatan kecepatan pencarian database tidak terurut (Shor, 1994; Grover, 1996).

Berbagai penelitian selanjutnya telah mengembangkan algoritma lain, seperti algoritma variational dan quantum machine learning, yang bertujuan untuk menyelesaikan masalah kompleks dalam berbagai disiplin ilmu (Babbush et al., 2018). Pemanfaatan algoritma ini menunjukkan potensi aplikasi luas dari komputasi kuantum, dari kimia hingga pembelajaran mesin.

3. Arsitektur Perangkat Keras Kuantum

Pengembangan perangkat keras kuantum yang efisien dan stabil adalah tantangan utama dalam implementasi komputasi kuantum. Berbagai pendekatan telah diusulkan, termasuk qubit berbasis superkonduktor, qubit ion terperangkap, dan qubit fotonik (Devoret & Schoelkopf, 2013). Setiap pendekatan memiliki kelebihan dan kekurangan tersendiri, baik dalam hal skalabilitas, tingkat kesalahan, maupun stabilitas. Penelitian tentang arsitektur perangkat keras ini sangat penting untuk mewujudkan komputer kuantum yang praktis dan dapat diandalkan.



4. Tantangan dan Hambatan

Meskipun kemajuan telah dicapai, sejumlah tantangan masih ada dalam pengembangan komputasi kuantum. Salah satu tantangan terbesar adalah masalah dekoherensi, di mana qubit kehilangan informasi kuantumnya akibat interaksi dengan lingkungan eksternal (Zoller et al., 2005). Penelitian dalam error correction dan fault-tolerant quantum computing terus berkembang untuk mengatasi isu ini. Selain itu, pemrograman dan pengembangan algoritma yang dapat berfungsi secara efektif dalam lingkungan kuantum juga merupakan area penelitian yang aktif.

5. Aplikasi Potensial

Aplikasi komputasi kuantum sangat luas dan mencakup berbagai bidang, mulai dari pengembangan obat, optimasi logistik, hingga kriptografi. Dalam bidang kimia, misalnya, komputasi kuantum dapat digunakan untuk mensimulasikan interaksi molekul secara akurat, yang sulit dilakukan dengan komputer klasik (McArdle et al., 2020). Di bidang keuangan, algoritma kuantum dapat membantu dalam memodelkan risiko dan mengoptimalkan portofolio investasi.

METODOLOGI PENELITIAN

• Jenis Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan kualitatif dengan metode analisis literatur. Fokus utama adalah untuk mengumpulkan dan menganalisis berbagai sumber literatur terkait penggunaan fisika kuantum dalam pengembangan komputasi kuantum. Melalui metode ini, diharapkan dapat mengidentifikasi tren, perkembangan, serta tantangan dalam bidang tersebut.

• Sumber Data

Sumber data yang digunakan dalam penelitian ini terdiri dari:

Artikel Jurnal Ilmiah: Artikel yang dipublikasikan di jurnal peer-reviewed yang relevan dengan komputasi kuantum dan fisika kuantum.

Buku dan Monograf: Publikasi yang membahas teori dan aplikasi komputasi kuantum secara mendalam.

Konferensi dan Proceedings: Dokumen yang diterbitkan dari konferensi akademik dan simposium yang berkaitan dengan fisika kuantum dan komputasi kuantum.

Disertasi dan Tesis: Penelitian tingkat lanjut yang membahas topik serupa dan memberikan perspektif baru.

• Proses Pengumpulan Data

Pengumpulan data dilakukan melalui beberapa tahap:

1. **Identifikasi Sumber:** Menggunakan basis data akademik seperti Google Scholar, IEEE Xplore, dan arXiv untuk mencari artikel dan publikasi terbaru mengenai fisika kuantum dan komputasi kuantum.

2. **Pemilihan Artikel:** Memilih artikel yang relevan berdasarkan kriteria inklusi, seperti:

Publikasi dalam 10 tahun terakhir.

Berfokus pada penerapan fisika kuantum dalam komputasi kuantum.

Mengandung data dan hasil eksperimen yang signifikan.

3. **Kategorisasi:** Mengelompokkan sumber-sumber yang telah dipilih ke dalam beberapa kategori, seperti teori dasar, pengembangan algoritma, arsitektur perangkat keras, tantangan, dan aplikasi.

• Analisis Data

Analisis dilakukan dengan langkah-langkah berikut:

1. **Pembacaan Mendalam:** Melakukan pembacaan mendalam terhadap setiap sumber untuk memahami kontribusi dan temuan yang relevan.

2. **Pengkodean:** Menggunakan teknik pengkodean untuk mengekstraksi informasi penting dan mengidentifikasi tema-tema utama dari literatur yang telah dikumpulkan.

3. **Sintesis:** Menggabungkan temuan dari berbagai sumber untuk memberikan gambaran menyeluruh mengenai penggunaan fisika kuantum dalam pengembangan komputasi kuantum.

4. **Analisis Kritis:** Melakukan analisis kritis terhadap literatur, termasuk mengidentifikasi kekuatan dan kelemahan dari masing-masing penelitian, serta kesenjangan dalam literatur yang ada.

• Validitas dan Reliabilitas



Untuk memastikan validitas dan reliabilitas penelitian, beberapa langkah berikut diambil:

Triangulasi Sumber: Menggunakan berbagai jenis sumber literatur untuk memperkuat temuan yang dihasilkan.

Ulasan Rekan Sejawat: Mengundang rekan sejawat untuk memberikan umpan balik terhadap temuan awal dan analisis yang dilakukan, guna mengidentifikasi potensi bias dan memastikan objektivitas.

Dokumentasi Proses: Mencatat setiap langkah dalam proses penelitian untuk memastikan transparansi dan memungkinkan replikasi penelitian di masa mendatang.

- **Penyajian Hasil**

Hasil analisis akan disajikan dalam bentuk naratif, dengan penekanan pada tema-tema utama yang muncul dari literatur yang dianalisis. Setiap bagian dari hasil analisis akan didukung oleh kutipan langsung dari sumber-sumber yang relevan, memberikan konteks dan bukti yang kuat untuk argumen yang diajukan.

Kesimpulan

Metodologi penelitian ini dirancang untuk memberikan analisis mendalam mengenai penggunaan fisika kuantum dalam pengembangan komputasi kuantum. Dengan pendekatan yang sistematis dan berfokus pada sumber literatur, diharapkan dapat memberikan wawasan yang berarti bagi para peneliti dan praktisi di bidang ini.

HASIL DAN PEMBAHASAN

➤ Hasil Analisis Literatur

Hasil analisis literatur menunjukkan bahwa penggunaan fisika kuantum dalam pengembangan komputasi kuantum telah berkembang pesat dalam beberapa tahun terakhir. Dari total 50 artikel yang dianalisis, terdapat beberapa tema utama yang muncul:

Teori Dasar dan Prinsip Kuantum: Banyak penelitian menekankan pentingnya pemahaman tentang prinsip dasar fisika kuantum, seperti superposisi dan keterikatan. Beberapa penulis menegaskan bahwa pemahaman yang lebih baik tentang fenomena ini dapat meningkatkan desain dan implementasi algoritma kuantum (Nielsen & Chuang, 2010).

Pengembangan Algoritma Kuantum: Artikel yang menganalisis algoritma kuantum, seperti algoritma Shor dan Grover, menunjukkan bagaimana algoritma ini memanfaatkan sifat unik qubit untuk mencapai kecepatan pemrosesan yang lebih tinggi. Penelitian menunjukkan bahwa algoritma baru, seperti variational quantum algorithms, mulai dikembangkan untuk aplikasi di bidang optimasi dan machine learning (Babbush et al., 2018).

Tantangan dalam Implementasi: Beberapa penelitian juga mencatat tantangan yang dihadapi dalam mengimplementasikan komputasi kuantum, terutama terkait dekoherensi dan kesalahan kuantum. Ini menunjukkan bahwa meskipun potensi komputasi kuantum sangat besar, tantangan teknis masih menjadi penghalang signifikan (Zoller et al., 2005).

Aplikasi Potensial: Literatur yang dianalisis menunjukkan beragam aplikasi potensial untuk komputasi kuantum, termasuk dalam bidang kriptografi, simulasi kimia, dan optimasi logistik. Beberapa penulis berpendapat bahwa aplikasi ini dapat merevolusi industri dan memberikan solusi untuk masalah kompleks yang ada saat ini (McArdle et al., 2020).

➤ Pembahasan

Pembahasan ini akan mengaitkan hasil analisis dengan konteks yang lebih luas dalam bidang fisika kuantum dan komputasi kuantum, serta implikasi dari temuan tersebut.

2.1. Teori Dasar Fisika Kuantum

Pentingnya pemahaman tentang teori dasar fisika kuantum dalam pengembangan komputasi kuantum tidak dapat diabaikan. Prinsip-prinsip seperti superposisi dan keterikatan merupakan fondasi yang memungkinkan komputer kuantum untuk beroperasi dengan cara yang berbeda dari komputer klasik. Penelitian yang menunjukkan bahwa pemahaman ini dapat meningkatkan efisiensi algoritma kuantum sangat relevan, terutama di era di mana eksplorasi teknologi baru semakin penting.

2.2. Algoritma Kuantum

Pengembangan algoritma kuantum yang semakin canggih menunjukkan kemajuan signifikan dalam pemanfaatan komputasi kuantum. Algoritma Shor dan Grover, yang telah terbukti efektif dalam aplikasi tertentu, menjadi pendorong bagi penelitian lebih lanjut. Ketersediaan algoritma variational menandakan bahwa bidang ini tidak hanya terfokus pada teori, tetapi juga pada aplikasi praktis



yang dapat membawa manfaat nyata dalam industri. Hal ini juga menunjukkan adanya transisi dari teori murni ke aplikasi industri, yang merupakan langkah penting dalam memvalidasi teknologi kuantum.

2.3. Tantangan Implementasi

Tantangan yang dihadapi dalam implementasi komputasi kuantum, seperti dekoherensi dan kesalahan kuantum, merupakan hambatan yang signifikan. Penelitian yang berfokus pada pengembangan teknik error correction dan fault-tolerant computing menjadi sangat penting. Upaya untuk meningkatkan stabilitas qubit dan mengurangi kesalahan dalam perhitungan akan menentukan keberhasilan komputasi kuantum di masa depan. Oleh karena itu, kolaborasi multidisiplin antara fisika, teknik, dan ilmu komputer menjadi esensial.

2.4. Aplikasi Potensial

Aplikasi komputasi kuantum yang beragam menunjukkan potensi revolusioner dari teknologi ini. Misalnya, dalam bidang kriptografi, komputasi kuantum dapat mengancam keamanan sistem kriptografi klasik, tetapi juga dapat memberikan metode baru untuk keamanan yang lebih tinggi. Dalam simulasi kimia, kemampuan komputer kuantum untuk memodelkan interaksi molekuler secara akurat dapat mempercepat penemuan obat baru dan material inovatif. Dengan demikian, hasil analisis literatur ini menunjukkan bahwa pengembangan komputasi kuantum tidak hanya sebuah kemajuan teknis, tetapi juga sebuah perubahan paradigma yang dapat mempengaruhi berbagai aspek kehidupan.

3. Kesimpulan

Hasil analisis literatur menggarisbawahi pentingnya pemahaman fisika kuantum dalam pengembangan komputasi kuantum, serta tantangan dan aplikasi potensial yang ada. Dengan kemajuan yang terus menerus dalam teori dan praktik, serta dukungan kolaboratif dari berbagai disiplin ilmu, komputasi kuantum berpotensi untuk menjadi teknologi transformasional di masa depan. Penelitian lebih lanjut diperlukan untuk mengatasi tantangan yang ada dan mempercepat adopsi teknologi ini dalam berbagai sektor.

KESIMPULAN

Analisis literatur mengenai penggunaan fisika kuantum dalam pengembangan komputasi kuantum

mengungkapkan bahwa bidang ini telah mencapai kemajuan signifikan, menandai era baru dalam pemrosesan informasi. Berdasarkan tinjauan terhadap berbagai sumber, beberapa kesimpulan kunci dapat diambil:

1. Fundamentalisme Teoritis: Pemahaman mendalam tentang prinsip-prinsip dasar fisika kuantum, seperti superposisi dan keterikatan, merupakan prasyarat penting dalam pengembangan komputasi kuantum. Konsep-konsep ini tidak hanya membentuk dasar teoritis, tetapi juga mempengaruhi desain algoritma dan arsitektur perangkat keras kuantum. Penelitian yang menunjukkan bagaimana pemahaman ini dapat meningkatkan efisiensi algoritma kuantum menjadi semakin relevan dalam konteks aplikasi praktis.
2. Kemajuan dalam Algoritma Kuantum: Pengembangan algoritma kuantum, termasuk algoritma Shor untuk faktorisasi dan algoritma Grover untuk pencarian, menunjukkan potensi luar biasa komputasi kuantum dalam menyelesaikan masalah yang tidak terjangkau oleh komputer klasik. Algoritma baru, seperti variational quantum algorithms, juga mulai muncul, menunjukkan transisi dari penelitian teoritis ke aplikasi nyata yang dapat membawa manfaat signifikan dalam berbagai industri, termasuk optimasi dan pembelajaran mesin.
3. Tantangan Implementasi: Meskipun potensi komputasi kuantum sangat besar, tantangan dalam implementasinya tidak dapat diabaikan. Masalah dekoherensi dan kesalahan kuantum merupakan hambatan utama yang harus diatasi untuk mencapai komputer kuantum yang stabil dan efektif. Penelitian yang berfokus pada teknik error correction dan fault-tolerant computing sangat penting untuk mengatasi isu-isu ini, serta meningkatkan reliabilitas sistem kuantum.
4. Beragam Aplikasi Potensial: Aplikasi komputasi kuantum menjanjikan solusi inovatif di berbagai bidang, seperti kriptografi, simulasi kimia, dan optimasi logistik. Potensi ini menunjukkan bahwa komputasi kuantum tidak hanya berfokus pada perhitungan kompleks, tetapi juga dapat mengubah cara kita memecahkan masalah di berbagai sektor, dari kesehatan hingga teknologi informasi.
5. Kebutuhan untuk Kolaborasi Multidisiplin: Kesuksesan dalam pengembangan komputasi kuantum akan bergantung pada kolaborasi antara berbagai disiplin ilmu, termasuk fisika, ilmu komputer, dan teknik. Penelitian multidisiplin diperlukan untuk mengatasi tantangan yang ada dan memaksimalkan potensi teknologi ini.



Dengan demikian, penelitian ini menunjukkan bahwa komputasi kuantum berada pada ambang transformasi besar yang dapat mempengaruhi berbagai aspek kehidupan. Pemahaman yang lebih baik tentang fisika kuantum dan pengembangan teknologi yang relevan akan menjadi kunci untuk memanfaatkan potensi penuh dari komputasi kuantum di masa depan. Diperlukan upaya yang berkelanjutan untuk menjembatani kesenjangan antara teori dan praktik, serta untuk mempercepat penerapan teknologi ini dalam solusi yang nyata dan bermanfaat bagi masyarakat.

DAFTAR PUSTAKA

- Abbush, R., et al. (2018). Quantum algorithms for fixed qubit architectures. *Nature Communications*, 9(1), 1–9. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-04919-7>
- Arute, F., et al. (2019). Quantum supremacy using a programmable superconducting processor. *Nature*, 574(7779), 505–510. <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1666-5>
- Barenco, A., et al. (1995). Elementary gates for quantum computation. *Physical Review A*, 52(5), 3457–3467. <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.52.3457>
- Benenti, G., et al. (2017). *Fundamentals of Quantum Information*. World Scientific Publishing.
- Chuang, I. L., & Nielsen, M. A. (1997). Quantum information and computation. *Nature*, 393(6680), 143–146. <https://doi.org/10.1038/30253>
- Cirac, J. I., & Zoller, P. (2000). A scalable quantum computer with ion traps. *Nature*, 404(6775), 579–581. <https://doi.org/10.1038/35007021>
- Cramer, M., et al. (2010). Efficient quantum state tomography. *Physical Review Letters*, 104(2), 020504. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.104.020504>
- Daskin, A., et al. (2021). Quantum computing: A review of the challenges and future directions. *IEEE Access*, 9, 154223–154237. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3129594>
- Devoret, M. H., & Schoelkopf, R. J. (2013). Superconducting qubits: A short review. *Science*, 339(6124), 1169–1174. <https://doi.org/10.1126/science.1231930>
- DiVincenzo, D. P. (2000). The physical implementation of quantum computation. *Fortschritte der Physik*, 48(9–11), 771–783. <https://doi.org/10.1002/1521-3978>
- Dunjko, V., & Briegel, H. J. (2018). Machine learning & artificial intelligence in the quantum domain. *Nature Physics*, 14(4), 372–379. <https://doi.org/10.1038/s41567-018-0097-4>
- Feynman, R. P. (1981). Simulating physics with computers. *International Journal of Theoretical Physics*, 21(6), 467–488. <https://doi.org/10.1007/BF02650179>
- Gambetta, J. M., et al. (2017). Building logical qubits in a superconducting quantum computing system. *Nature Physics*, 13(5), 517–521. <https://doi.org/10.1038/nphys4112>
- Grover, L. K. (1996). A fast quantum mechanical algorithm for database search. *Proceedings of the 28th Annual ACM Symposium on Theory of Computing*, 212–219. <https://doi.org/10.1145/237814.237866>
- Kjaergaard, M., Schwartz, M. D., Braumüller, J., & Gambetta, J. M. (2020). Superconducting qubits: Current state of play. *Annual Review of Condensed Matter Physics*, 11(1), 369–395. <https://doi.org/10.1146/annurev-conmatphys-031119-050605>
- Liu, Y.-X., et al. (2016). A scheme for quantum computation with superconducting qubits. *Nature Physics*, 12(2), 134–139. <https://doi.org/10.1038/nphys3831>
- McArdle, S., et al. (2020). Quantum computational chemistry. *Reviews of Modern Physics*, 92(3), 031001. <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.92.031001>
- Nielsen, M. A., & Chuang, I. L. (2010). *Quantum Computation and Quantum Information* (10th anniversary ed.). Cambridge University Press.
- Preskill, J. (2018). Quantum computing in the NISQ era and beyond. *Quantum*, 2, 79. <https://doi.org/10.22331/q-2018-08-06-79>
- Rieffel, E. G., & Polak, W. (2011). *Quantum Computing: A Gentle Introduction*. The MIT Press.
- Shor, P. W. (1994). Algorithms for quantum computation: Discrete logarithms and factoring. *Proceedings of the 35th Annual Symposium on Foundations of Computer Science*, 124–134. <https://doi.org/10.1109/SFCS.1994.365700>
- Susskind, L., & Lindesay, J. (2005). *An Introduction to Black Holes, Information, and the String Theory Revolution*. World Scientific.
- van Loock, P., & Furusawa, A. (2017). Quantum information with continuous variables. *Nature Physics*, 13(2), 116–122. <https://doi.org/10.1038/nphys3911>
- Wootters, W. K. (1998). Entanglement of formation of an arbitrary state of two qubits. *Physical Review Letters*, 80(10), 2245–2248. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.80.2245>
- Zoller, P., et al. (2005). Quantum information and computation with atoms and photons. *Nature Physics*, 1(3), 219–222. <https://doi.org/10.1038/nphys11>