

Principles of Quantum Information Theory and Its Capabilities in Information Retrieval

Pourya Rahat^{1✉} and Mohsen Haji Zeinolabedini²

1. *Corresponding Author*, Department of Information Science, Faculty of Psychology and Educational Sciences, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran. E-mail:

p.rahat@mail.sbu.ac.ir

2. Department of Information Science, Faculty of Psychology and Educational Sciences, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran. E-mail: m_zabedini@sbu.ac.ir

ABSTRACT

The primary objective of this research was to analyze the capabilities of Quantum Information Theory (QIT) in improving information retrieval processes. The study sought to address how the fundamental principles of quantum mechanics can be leveraged to overcome the challenges inherent in traditional information retrieval systems. This study was conducted using a library method with an analytical-review approach. Through a comprehensive review of theoretical literature, the foundational concepts of QIT were identified, and their conceptual and practical relevance to the field of information retrieval were systematically analyzed. The findings indicated that Quantum Information Theory, through concepts such as superposition and entanglement, provided a new framework for information representation, processing, and retrieval. The application of phenomena like quantum algorithms and quantum error correction could significantly increase the accuracy and speed of information retrieval. By unifying the representation, ranking, and cognitive aspects of the user, this approach offered solutions for developing more dynamic and context-aware systems. Despite existing technical and theoretical obstacles, Quantum Information Theory held the potential to fundamentally transform the field of information retrieval. It was anticipated that with continued research in this area, innovative technologies based on quantum principles would be developed, leading to enhanced efficiency, security, and precision in future information retrieval systems.

Keywords: Information Retrieval, Quantum Computing, Quantum Information Theory, Quantum Systems, Quantum Mechanics

Cite this Article: Rahat, P., & Haji Zeinolabedini, M. (2026). Principles of Quantum Information Theory and Its Capabilities in Information Retrieval. *Knowledge Retrieval and Semantic Systems*, 13(48), 1-32. <https://doi.org/10.22054/jks.2025.86403.1723>



© 2026 by The author(s) retain the copyright

Publisher: Allameh Tabataba'i University Press

DOI: <https://doi.org/10.22054/jks.2025.86403.1723>

EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Quantum information is a general form of information that can be considered the fundamental material of the universe (Penchev, 2020). Its basic unit is the qubit, which, unlike a classical bit's binary 0 or 1 state, can exist in multiple states simultaneously. This phenomenon, known as superposition, allows a qubit to be a linear combination of states (Nielsen & Chuang, 2010), enabling quantum parallelism and an exponential increase in computational power. Quantum Information Theory (QIT) explores these principles, along with other key concepts such as entanglement, where qubits become interdependent regardless of distance; the no-cloning theorem, which makes it impossible to create an identical copy of an unknown quantum state; and practical applications like quantum error correction and quantum cryptography. While traditional Information Retrieval (IR) is built on core concepts like Boolean, vector space, and probabilistic models (Melucci, 2015; Tunkelang & Thelwall, 2009; Büttcher et al., 2010; Gudivada et al., 2018), QIT provides a new framework to enhance it. This theory offers a way to unify the representation, ranking, and cognitive aspects of the user by applying the formalism and mathematics of quantum mechanics. This connection is often inspired by the theory and applied to classical computers, drawing on the broad use of quantum principles in cognitive science, psychology, and decision-making (Ashoori & Rudolph, 2018; Lebedev & Khrennikov, 2020). This paper aimed to review the fundamental principles of QIT, analyze their relevance to IR, and present the opportunities and challenges at the intersection of these two fields.

Literature Review

The intersection of QIT and IR has evolved from foundational theoretical work to practical and evaluative models. Early research by Piwowarski et al. (2010) proposed a quantum framework to address key IR challenges like interaction, novelty, and diversity, a view expanded by van Rijsbergen (2011), who argued that quantum formalism is the appropriate language for modeling the uncertainty inherent in information. Subsequent studies demonstrated the application of quantum mathematics, such as the "Quantum Probability Ranking Principle" for ranking interdependent documents (Zuccon & Azzopardi, 2010) and the use of quantum theory for "quantum-like" modeling (Khrennikov, 2019) and meaning-focused retrieval (Aerts et al., 2013). More recently, the field has moved toward integrating quantum principles with deep learning, as seen in quantum-inspired neural matching models (Jiang et al., 2020), and addressing security through protocols like quantum private information retrieval (Yang et al., 2023). This progression indicates a shift from purely theoretical explorations (Ashoori & Rudolph, 2018) to the development of practical evaluation frameworks (Ferrari Dacrema et al., 2024) and new contextual search methods (Alodjants et al., 2024).

Methodology

This study was conducted as fundamental research, employing an analytical-review method appropriate for the theoretical and emerging nature of the topic. Data collection started with documentary research, using defined keywords to systematically gather sources from databases such as Web of Science and Google Scholar. Following the screening and selection of relevant literature, the research utilized an approach of conceptual analysis and literature synthesis. Foundational concepts from Quantum Information Theory were first extracted and broken down. Then, in the synthesis phase, these concepts were systematically linked to the challenges, needs, and processes of Information Retrieval to build a logical and applied bridge between the two fields.

Results

The results of this analysis are presented in two main parts. First, the foundational concepts of Quantum Information Theory (QIT) are detailed, organized into three categories: fundamental concepts, including qubits, quantum states, superposition, entanglement, and quantum entropy; principles and theories, such as quantum algorithms and the no-cloning theorem; and applications, like quantum error correction, cryptography, and quantum gates. The second part of the results systematically connects these principles to the domain of Information Retrieval (IR). The results demonstrated how concepts like superposition can offer a probabilistic framework for relevance, how quantum algorithms, such as Grover's algorithm, can exponentially speed up search, and how quantum entanglement and error correction can be used to model complex term dependencies and ensure the security and integrity of the retrieval process, respectively.

Discussion

The theoretical alignment between Quantum Information Theory (QIT) and Information Retrieval (IR) suggests that quantum principles are exceptionally well-suited to address the core limitations of classical IR systems, particularly the complex issues of context, ambiguity, and human cognition. The inherent probabilistic nature of quantum states, governed by superposition, offers a formal mathematical framework for modeling the fuzzy and subjective concept of relevance more dynamically than traditional vector-space models. Furthermore, the concept of entanglement provides a powerful mechanism to model the nonlocal dependencies between index terms, documents, and user intent, moving beyond simple co-occurrence counts to capture holistic conceptual relationships. The analysis highlighted that while the full power of quantum computing is not always necessary for these benefits, as evidenced by successful quantum-like (QL) models running on classical hardware, the ultimate, exponential performance gains promised by algorithms like Grover's algorithm for database searching remain the strongest long-term motivation for future IR systems to leverage true quantum hardware.

Conclusion

By analytically comparing the core principles of Quantum Information Theory (QIT) and identifying their points of convergence with classical information retrieval systems, this research confirmed that Quantum Information Theory offered a potent, mathematically grounded framework with the potential to fundamentally transform the field of Information Retrieval. By leveraging quantum principles (such as superposition to model the inherent uncertainty of relevance and entanglement to capture complex, nonlocal dependencies between terms) future IR systems could overcome the cognitive and structural limitations of classical models. While the full deployment of quantum algorithms like Grover's algorithm on dedicated quantum hardware promised exponential speed and efficiency gains in the long term, even the adoption of QL models on existing classical infrastructure could yield significant, immediate improvements in accuracy, security, and contextual awareness. Despite existing technical and theoretical obstacles, it was anticipated that continued research in this area would lead to innovative technologies based on quantum principles, resulting in enhanced precision and efficiency in future information retrieval systems.

Ethical Considerations

Adherence to Research Ethics Principles

This research relied solely on publicly accessible documents and published literature; therefore, institutional ethical board review was not applicable. The authors complied with all ethical publication standards and ensured accuracy and transparency in reporting and referencing. The authors avoided data fabrication, falsification, plagiarism, and misconduct.

Author Contributions

Conceptualization, P.R. and M.H.Z.; methodology, P.R.; software, P.R.; validation, P.R. and M.H.Z.; formal analysis, P.R.; investigation, P.R.; resources, P.R.; data curation, P.R.; writing—original draft preparation, P.R.; writing—review and editing, P.R. and M.H.Z.; visualization, P.R.; supervision, M.H.Z.; project administration, P.R.

All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Data Availability Statement

Not applicable

Conflict of Interest

The authors declare no conflict of interest.

Funding

This research did not receive any specific grant from funding agencies in the public, commercial, or not-for-profit sectors.

Acknowledgements

The authors would like to express their deepest gratitude and appreciation to all the material and spiritual supporters who contributed to this research.

اصول نظریه کوانتومی اطلاعات و قابلیت‌های آن در بازیابی اطلاعات

پوریا راحت^۱ و محسن حاجی زین‌العابدینی^۲

۱. نویسنده مسئول، گروه علم اطلاعات و دانش‌شناسی، دانشکده علوم تربیتی و روان‌شناسی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران.

رایانامه: p.rahat@mail.sbu.ac.ir

۲. گروه علم اطلاعات و دانش‌شناسی، دانشکده علوم تربیتی و روان‌شناسی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران. رایانامه:

m_zabedini@sbu.ac.ir

چکیده

این پژوهش با هدف اصلی تحلیل قابلیت‌های نظریه کوانتومی اطلاعات در بهبود فرایندهای بازیابی اطلاعات انجام شده است. پژوهش به دنبال پاسخ به این مسئله است که چگونه می‌توان از اصول بنیادی مکانیک کوانتومی برای رفع چالش‌های موجود در سیستم‌های بازیابی اطلاعات سنتی بهره برد. پژوهش حاضر با استفاده از روش کتابخانه‌ای و رویکرد تحلیلی-مروری انجام شده است. در این راستا، با مرور جامع ادبیات نظری، مفاهیم بنیادین نظریه کوانتومی اطلاعات شناسایی و سپس ارتباط مفهومی و کاربردی آن‌ها با حوزه بازیابی اطلاعات به صورت نظام‌مند تحلیل گردیده است. یافته‌ها نشان می‌دهد که نظریه کوانتومی اطلاعات از طریق مفاهیمی چون درهم‌نهی و درهم‌تنیدگی، چارچوب جدیدی برای نمایش، پردازش و بازیابی اطلاعات فراهم می‌کند. به کارگیری پدیده‌هایی مانند الگوریتم‌های کوانتومی و تصحیح خطای کوانتومی می‌تواند به طور چشمگیری دقت و سرعت بازیابی اطلاعات را افزایش دهد. این رویکرد با یکپارچه‌سازی جنبه‌های بازنمایی، رتبه‌بندی و شناختی کاربر، راهکارهایی برای توسعه سیستم‌های پویاتر و آگاه به زمینه ارائه می‌دهد. علی‌رغم وجود موانع فنی و نظری، نظریه کوانتومی اطلاعات پتانسیل ایجاد یک تحول بنیادین در حوزه بازیابی اطلاعات را داراست. انتظار می‌رود با پیشرفت تحقیقات در این زمینه، فناوری‌های نوینی مبتنی بر اصول کوانتومی توسعه یابند که منجر به افزایش کارایی، امنیت و دقت در سیستم‌های بازیابی اطلاعات آینده خواهد شد.

کلیدواژه‌ها: بازیابی اطلاعات، رایانش کوانتومی، سیستم‌های کوانتومی، مکانیک کوانتومی، نظریه کوانتومی اطلاعات

مقدمه

بررسی مسئله اصلی این پژوهشکه بررسی ربط نظریه کوانتومی اطلاعات^۱ با بازیابی اطلاعات - با شیوه‌ای که در حال وارد شدن به مجموعه پردازش‌های کلاسیک است - با مفهوم اطلاعات کوانتومی آغاز می‌شود که آن دلالتی است بر صورت کلی اطلاعات که برای سری‌های محدود تا بی‌نهایت و یا مجموعه‌های مختلف قابل استفاده است؛ می‌توان آن را به‌عنوان ماده بنیادی جهان در نظر گرفت (Penchev, 2020). واحد بنیادی اطلاعات کوانتومی، کیوبیت^۲ است که نشان‌دهنده انتخابی میان مجموعه نامتناهی از جایگزین‌ها^۳ است. دنیای فیزیکی، شامل ذرات کوانتومی مانند الکترون‌ها، از کیفیت «انتخاب» برخوردار است، اما دارای «اراده آزاد» نیست. اراده آزاد شامل کنش هدفمند می‌شود، درحالی که مکانیک کوانتومی^۴ ماهیت نامعینی دارد (Conway & Kochen, 2006; 2009). جهان را می‌توان به‌عنوان یک رایانه کوانتومی در نظر گرفت که اطلاعات کوانتومی را در عمیق‌ترین لایه‌های هستی پردازش می‌کند. در این دیدگاه، تمام فرایندهای فیزیکی ماهیتی اطلاعاتی-کوانتومی دارند. اطلاعات کوانتومی گذشته، حال و آینده را به‌عنوان یک کمیت فیزیکی قابل اندازه‌گیری، متحد می‌کند.

نظریه اطلاعات کوانتومی به بررسی اصول بنیادی و مفاهیمی می‌پردازد که زیربنای مکانیک کوانتومی هستند و پیامدهای آن‌ها را برای پردازش اطلاعات بررسی می‌کند. بیت از حالات باینری^۵ (صفر و یک) برای نمایش اطلاعات استفاده می‌کند، درحالی که کیوبیت می‌تواند هم‌زمان در چندین حالت مختلف وجود داشته باشد. به نقل از نایلسن و چانگ^۶ (۲۰۱۰) «حالت‌ها با نمادهای $|0\rangle$ و $|1\rangle$ نمایش داده می‌شوند و یک کیوبیت ترکیبی خطی از این حالت‌هاست، به صورت $|\psi\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle$ که α و β اعداد مختلط هستند به شرطی که $|\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1$ »، درواقع اصل برهم‌نهی^۷ به کیوبیت‌ها اجازه می‌دهد تا هم‌زمان در چندین حالت باشند و این امر موجب برقراری «هم‌زمانی کوانتومی»^۸ شده و قدرت محاسباتی را به‌طور نمایی و چشمگیری افزایش می‌دهد. درهم‌تنیدگی^۹ پدیده کلیدی دیگری است که در آن کیوبیت‌ها وابستگی متقابل پیدا می‌کنند و وضعیت یک کیوبیت می‌تواند به‌صورت لحظه‌ای بر وضعیت دیگری تأثیر بگذارد، فارغ از اینکه این دو کیوبیت چقدر از هم فاصله دارند.

نظریه اطلاعات کوانتومی همچنین شامل قضیه عدم همانندسازی^{۱۰} است که بیان می‌کند ایجاد یک کپی یکسان از یک حالت کوانتومی ناشناخته دلخواه غیرممکن است. مفاهیم کلیدی دیگر شامل تصحیح خطای کوانتومی^{۱۱} است که از اطلاعات کوانتومی در برابر خطاهای ناشی از ناهمدوسی^{۱۲} و سایر نویزهای کوانتومی محافظت می‌کند و همچنین

1. Quantum Information Theory (QIT)
2. Qubit
3. alternatives
4. Quantum mechanics (QM)
5. binary
6. Nielsen & Chuang
7. Superposition
8. Quantum parallelism
9. Entanglement
10. No-cloning theorem
11. Quantum error correction
12. Decoherence

رمزنگاری کوانتومی^۱ که از مکانیک کوانتومی برای ایجاد روش‌های ارتباطی امن بهره می‌برد. این اصول اساسی در توسعه فناوری‌هایی مانند محاسبات کوانتومی و ارتباطات کوانتومی نقش محوری ایفا می‌کنند.

هسته اصلی مفاهیم بازیابی اطلاعات، شامل رویکردها و سیستم‌های مدل‌سازی مختلفی است. این مفاهیم عبارت‌اند از: مدل بولی^۲ و منطقی، مدل فضای برداری^۳، مدل‌های احتمالی^۴، یادگیری ماشین^۵ برای رتبه‌بندی اسناد، طرح وزن‌دهی تی. اف-آی. دی. اف^۶، چارچوب ارتباط احتمالی^۷، مدل بازیابی استقلال دودویی^۸، نمونه بی. ام ۲۵^۹، مدل‌سازی زبان، واگرایی از تصادفی بودن^{۱۰}، فهرست‌نویسی، بازیابی، ارزیابی، پیش‌پردازش متن، طرح‌های وزن‌دهی واژه، نمایه موقعیتی^{۱۱}، پرسش‌های ترکیبی و مجاورت، فنون بازخورد ارتباطی، و کتابخانه‌ها و چارچوب‌های بازیابی اطلاعات. این مفاهیم در طراحی و اجرای سیستم‌های بازیابی اطلاعات کارآمد ضروری هستند و اساس فناوری‌های جستجوی مدرن و موتورهای جستجو را تشکیل می‌دهند (Melucci, 2015; Tunkelang & Thelwall, 2009; Büttcher et al., 2010; Gudivada et al., 2018).

نظریه اطلاعات کوانتومی می‌تواند بازیابی اطلاعات را با یکپارچه‌سازی نمایش، رتبه‌بندی، و جنبه‌های شناختی کاربر، استفاده از فرمالیسم احتمالی، و به کارگیری چارچوب‌ها و ریاضیات مکانیک کوانتومی ارتقا دهد. این نظریه از طریق ارتباطات ریاضی به بازیابی اطلاعات مرتبط است. با الهام از این نظریه، چنین ارتباطی بر روی اطلاعاتی که در رایانه‌های کلاسیک رمزگذاری، پردازش و به آن‌ها دسترسی پیدا می‌شود، تمرکز دارد (Ashoori & Rudolph, 2018). نظریه اطلاعات کوانتومی به‌طور گسترده در درک شناختی، روان‌شناسی، تصمیم‌گیری و بازیابی اطلاعات کاربرد دارد که زمینه‌ای امیدوارکننده در علم اطلاعات است (Lebedev & Khrennikov, 2020). این مقاله سعی دارد تا با مروری بر اصول بنیادی نظریه کوانتومی اطلاعات و با گردآوری توضیحات معتبر، ربط حوزه مذکور با مفهوم بازیابی اطلاعات را تحلیل کند و برجسته سازد؛ هدف دیگر آنکه فرصت‌ها و چالش‌های این تلاقی را بازنمایی کند. این مطالعه همچنین در نظر دارد تا پیشرفت‌های اخیر مواجهه این دو مقوله را انتقال دهد، در شکل‌دهی گفتمان آن مشارکت داشته باشد، به ترسیم چشم‌انداز آینده کمک کند و ضرورت ادامه این راه را بررسی کند.

پیشینه پژوهش

پیووارسکی و همکاران^{۱۲} (۲۰۱۰) پژوهشی تحت عنوان «آنچه نظریه کوانتومی به بازیابی اطلاعات ارائه می‌دهد» دارند؛ این چارچوب مبتنی بر نظریه کوانتومی، عملکرد قابل‌قبولی را در یک کار بازیابی اطلاعات خاص^{۱۳} ارائه می‌دهد. پتانسیل

1. Quantum cryptography
2. Boolean
3. vector space model
4. probabilistic models
5. Machine learning
6. TF-IDF
7. Probabilistic relevance framework
8. Binary independence retrieval
9. BM25
10. Divergence from randomness
11. Positional index
12. Piwowarski et al.
13. ad-hoc retrieval task

این چارچوب برای پرداختن به سه چالش مهم در بازیابی اطلاعات یعنی تعامل^۱، تازگی^۲ و تنوع^۳ مورد بحث قرار گرفته است. فرمول‌بندی احتمالاتی فیزیک کوانتومی، پایه‌ای محکم برای ساختن یک چارچوب اصولی برای بازیابی اطلاعات در نظر گرفته شده است. پیوارسکی و همکاران (۲۰۱۰) اظهار کرده‌اند که چنین چارچوبی می‌تواند بر مفهوم فضای برداری (مبتنی بر بردار) نیاز اطلاعاتی کاربر بنا شود، در این مدل رویدادهایی مانند ارتباط یک سند با پرسش یا برهم‌کنش‌های کاربر، با فضاهای فرعی (زیرفضاها) در آن فضای برداری مطابقت داده می‌شوند.

زوکون و آزوپاردی^۴ (۲۰۱۰) نشان دادند که چگونه می‌توان از «اصل رتبه‌بندی احتمال کوانتومی» برای رتبه‌بندی اسناد وابسته به یکدیگر بهره برد؛ چالشی که مدل‌های رتبه‌بندی کلاسیک اغلب با آن درگیر هستند. این یک نمونه‌ای از کاربرد ریاضیات کوانتومی در یک مسئله مشخص بازیابی اطلاعات است.

دیدگاه پیوارسکی و همکاران (۲۰۱۰) که به آن اشاره شد، دیدگاه بنیادینی است که توسط ون رایزبرگن^۵ (۲۰۱۱)، یکی از پیشگامان حوزه، گسترش یافت. او در مقاله‌ای کلاسیک با عنوان «بازیابی اطلاعات کوانتومی چیست؟» به تبیین مبانی نظری و فلسفی این حوزه پرداخت و استدلال کرد که فرمالیسم مکانیک کوانتومی، زبان مناسبی برای مدل‌سازی عدم قطعیت و ساختار پیچیده اطلاعات است. او در این مقاله چارچوب نظری و فلسفی بازیابی اطلاعات کوانتومی^۶ را پایه‌گذاری می‌کند.

آرچوادزه و همکاران^۷ (۲۰۱۲) در مقاله‌ای با عنوان «مفاهیم کوانتومی در بازیابی اطلاعات» به بررسی رتبه‌بندی مفاهیم فازی، ارزیابی ارتباط و روش‌های یادگیری ماشین برای بهبود بازیابی اطلاعات با استفاده از مفاهیم کوانتومی می‌پردازند. این مقاله به بررسی شکل‌گیری مفاهیم کوانتومی، نحوه نمایش و ذخیره‌سازی آن‌ها، و همچنین روش‌های مقایسه برای الگوریتم‌های بازیابی اطلاعات می‌پردازد. در این راستا، آن‌ها به بازنمایی مفاهیم کوانتومی با کیویت‌ها و روش‌های مقایسه آن‌ها از طریق گیت‌های منطقی کوانتومی می‌پردازند.

آثرترس و همکاران^۸ (۲۰۱۳) مقاله‌ای با عنوان «بازیابی اطلاعات الهام گرفته شده از کوانتوم با تمرکز بر معنا» دارند که به یک چارچوب بازیابی اطلاعات بر اساس «معنای کوانتومی» برای بازیابی پرسش‌های ساختارمند در مجموعه متون و مجموعه داده‌های آزمون استاندارد اشاره می‌کند. این چارچوب بر بازسازی حالت‌های کامل «موجودیت‌ها و مفاهیم معنا» از حالت‌های فروپاشیده آن‌ها که به عنوان ردپایی در اسناد مرتبط شناسایی شده‌اند، استوار است.

ملوچی^۹ (۲۰۱۳) مطالعه‌ای با عنوان «استخراج یک مبانی بازیابی اطلاعات کوانتومی»^{۱۰} دارد. در این مطالعه نشان می‌دهند که اصل رتبه‌بندی احتمالی^{۱۱} و قضیه نایمان-پیرسون^{۱۲} معادل هستند. همچنین، امکان تعریف مبانی بازیابی

1. interaction
2. novelty
3. diversity
4. Zuccon & Azzopardi
5. van Rijsbergen
6. Quantum Information Retrieval (QIR)
7. Archuadze et al.
8. Aerts et al.
9. Melucci
10. Quantum information retrieval basis (QIRB)
11. probability ranking principle
12. Neyman-Pearson lemma

اطلاعات کوانتومی وجود دارد که حداقل از لحاظ تئوری، رتبه‌بندی مؤثرتر اسناد را نسبت به روش‌های رتبه‌بندی فعلی ارائه می‌دهد.

عاشوری و رودالف^۱ (۲۰۱۸) در پژوهشی با عنوان «گزارشی بر بازیابی اطلاعات الهام گرفته شده از نظریه کوانتوم» نشان داده‌اند که مکانیک کوانتومی به صورت ریاضی، نه فیزیکی، در بازیابی اطلاعات استفاده می‌شود و پیشنهادهایی در مورد استفاده از پردازش اطلاعات کوانتومی در بازیابی اطلاعات و تبیینی از این مفاهیم نوظهور در عمل بازیابی را ارائه داده‌اند. این مقاله همچنین سردرگمی بین نظریه کوانتوم و تکنیک‌های بازیابی اطلاعات را روشن می‌کند.

کرنیکف^۲ (۲۰۱۹) با پژوهشی تحت عنوان «اصول نظریه کوانتوم برای مدل‌سازی کوانتوم گونه بازیابی اطلاعات» به سراغ فرمول‌بندی ریاضی و اصول موضوعه مکانیک کوانتومی رفته است. آن‌ها در پژوهش خود نشان داده‌اند که نظریه اندازه‌گیری کوانتومی در بازیابی اطلاعات و تصمیم‌گیری مؤثر است و تداخل احتمالات آماری در مشاهدات ناسازگار را رفع می‌کند.

لبدف و کرنیکف^۳ (۲۰۲۰) در مطالعه‌ای با عنوان «مروری مقدماتی بر بازیابی اطلاعات کوانتومی» به مرور مختصری وضعیت فعلی بازیابی اطلاعات کوانتومی برای تحریک تحقیقات در این زمینه هیجان‌انگیز از علم اطلاعات می‌پردازند. فرمول‌بندی ریاضی نظریه کوانتوم به طور گسترده در شناخت، روان‌شناسی، تصمیم‌گیری و پردازش اطلاعات استفاده می‌شود. اگرچه این مقاله یک بررسی جامع ارائه نمی‌دهد، اما هدف آن برانگیختن علاقه بیشتر به تحقیق در مورد استفاده از اصول کوانتومی برای پیشرفت در علم اطلاعات است.

امریائو و همکاران^۴ (۲۰۲۰) مطالعه‌ای تحت عنوان «مزیت کوانتومی در بازیابی اطلاعات» دارند. این مقاله ویژگی‌ای از سیستم‌های کوانتومی را شناسایی می‌کند که به آن‌ها «مزیت کوانتومی»، در هر کار بازیابی اطلاعات با حافظه محدود، تحت عنوان «مکان‌مندی ترتیبی»^۵ می‌دهد. این ویژگی نه تنها برای دستیابی به مزیت کوانتومی ضروری و کافی است، بلکه همچنین میزان این مزیت را نیز تعیین و کمی‌سازی می‌کند.

جیانگ و همکاران^۶ (۲۰۲۰) یک مدل انطباق عصبی الهام گرفته از تداخل کوانتومی برای بازیابی اطلاعات موردی توسعه داده‌اند که نشان از ظرفیت این رویکرد در بهبود معماری‌های پیشرفته بازیابی اطلاعات دارد. این مقاله یک مدل انطباق عصبی^۷ الهام گرفته از مفهوم تداخل کوانتومی برای بازیابی اطلاعات موردی^۸ معرفی می‌کند. این منبع به خوبی نشان می‌دهد که چگونه می‌توان از اصول کوانتومی برای بهبود مدل‌های یادگیری عمیق در بازیابی اطلاعات استفاده کرد.

آپرتی و همکاران^۹ (۲۰۲۱) در مطالعه خودشان با عنوان «پیمایشی بر رویکردهای بازیابی اطلاعات الهام گرفته شده از نظریه کوانتوم» به این موضوع توجه کرده‌اند که از سال ۲۰۰۴ از نظریه کوانتومی در یکپارچگی و یکپارچه‌سازی جنبه‌های

1. Rudolp
2. Khrennikov
3. Lebedev& Khrenniko
4. Emeriau et al.
5. sequential contextuality
6. Jiang et al.
7. Neural Matching
8. Ad-hoc
9. Uprety et al.

مختلف بازیابی اطلاعات^۱، از جمله بازنمایی اطلاعات، رده‌بندی و جنبه‌های کاربری و شناخت کاربر استفاده شده است که یک چارچوب کلی برای احتمالات و منطق ارائه می‌دهد و حوزه‌ای امیدوارکننده برای توسعه سیستم‌های پویا، منطبق و آگاه به زمینه به شمار می‌رود. مقاله مذکور مروری در این زمینه است. هدف این مقاله ترسیم چشم‌انداز این زمینه و ارائه نقشه راهی برای پژوهش‌ها و جهت‌گیری‌های آتی است.

دوالی^۲ (۲۰۲۱) با عنوان «محدودیت‌های ذخیره و بازیابی اطلاعات کوانتومی» محدودیت‌های جهانی در ظرفیت ذخیره اطلاعات کوانتومی و زمان بازیابی را مطرح می‌کند. ظرفیت محدود به مساحت سطح است، زمان بازیابی نیز محدود به حجم؛ و حدود جهانی خاص در ظرفیت ذخیره اطلاعات کوانتومی و در مقیاس زمانی بازیابی آن برای یک سیستم نظری میدان‌های کوانتومی عمومی را ارائه کرده است و بیان کرده که حدود مشابه برای سیستم‌های چندجسمی غیرنسبیتی نیز اعمال می‌شود.

علاوه بر این با تمرکز بر بازیابی اطلاعات محرمانه کوانتومی^۳ پژوهش‌هایی انجام شده است. فنگ و همکاران^۴ (۲۰۲۳) با پژوهشی با عنوان «بازیابی اطلاعات محرمانه کوانتومی از طریق کانال جمعی پرنویز» بیان دارند که پروتکل پیشنهادی دی.اف.اس-کیو.پی.آی.آر از زیرفضای عاری از ناهمدوسی^۵ برای کاهش اثرات نویز در کانال‌های کوانتومی استفاده می‌کند و بدین ترتیب بازیابی ایمن و مطمئن اطلاعات را تضمین خواهد کرد. با رفع نویز واحد جمعی^۶ در کانال‌های کوانتومی، این پروتکل پتانسیل کاربردهای گسترده‌تری در سیستم‌های بازیابی اطلاعات ایمن را نشان می‌دهد. در این مقاله، از زیرفضای عاری از ناهمدوسی^۷ برای پروتکل کیو.پی.آی.آر استفاده شده است تا اثر نویز کانال را روی خطاهای موجود در آیتیم بازیابی شده از بین ببرد.

پژوهش‌های اخیر نشان‌دهنده حرکت این حوزه از مباحث صرفاً نظری به سمت کاربردهای عملی و ارزیابی‌های تجربی است. برای مثال، فراری داکرما و همکاران^۸ (۲۰۲۴) در کنفرانس گروه تخصصی بازیابی اطلاعات^۹، چارچوبی برای ارزیابی رایانش کوانتومی (مشخصاً کوانتوم آنیلینگ^{۱۰}) در وظایف بازیابی اطلاعات و سیستم‌های توصیه‌گر ارائه کرده و یک چارچوب ارزیابی به نام کوانتوم سی.آل.ای.اف^{۱۱} را برای این منظور معرفی نموده‌اند. این منبع نشان‌دهنده حرکت جامعه علمی از تئوری به سمت پیاده‌سازی و ارزیابی عملی است.

در همین راستا، آلودجانتس و همکاران^{۱۲} (۲۰۲۴) یک رویکرد کاملاً جدید برای جستجو، بازیابی و رتبه‌بندی اسناد متنی مبتنی بر تست بل^{۱۳} در فیزیک کوانتومی پیشنهاد داده‌اند که نشان‌دهنده پتانسیل بالای اصول کوانتومی برای مدل‌سازی

-
1. Information retrieval (IR)
 2. Dvali
 3. Quantum private information retrieval (QPIR)
 4. Fang et al.
 5. Decoherence-free subspace-quantum private information retrieval (DFS-QPIR)
 6. collective unitary noise
 7. Decoherence-free subspace (DFS)
 8. Ferrari Dacrema et al.
 9. Special Interest Group on Information Retrieval (SIGIR)
 10. Quantum Annealing
 11. QuantumCLEF
 12. Alodjants et al.
 13. Bell-like test

زمینه در بازیابی اطلاعات است. علاوه بر این، پژوهشگران در حال ترکیب اصول کوانتومی با مدل‌های یادگیری عمیق هستند.

باتوجه به پیشینه پژوهش، می‌توان نتیجه گرفت که تلاقی میان نظریه کوانتومی اطلاعات و بازیابی اطلاعات، یک حوزه تحقیقاتی پویا و امیدوارکننده را شکل داده است. مرور ادبیات نشان می‌دهد که پژوهشگران به‌صورت هماهنگ بر این باورند که مدل‌های سنتی بازیابی اطلاعات با چالش‌هایی نظیر مدل‌سازی تعاملات پیچیده کاربر، تنوع و تازگی نتایج مواجه هستند. در مقابل، توانمندی اصلی سازوکار کوانتومی در فرمالیسم ریاضیاتی آن نهفته است که با یکپارچه‌سازی بازنمایی، رتبه‌بندی و جنبه‌های شناختی کاربر، چارچوبی کلی برای احتمالات و منطق فراهم می‌آورد.

پیامدهای به‌کارگیری این رویکرد، توسعه سیستم‌های بازیابی پویاتر، تطبیق‌پذیرتر و آگاه به زمینه است که می‌توانند برتری کوانتومی محسوسی، به‌ویژه در وظایف با حافظه محدود، از خود نشان دهند. چشم‌انداز آتی این حوزه، حرکت به سمت پیاده‌سازی پروتکل‌های بازیابی اطلاعات محرمانه کوانتومی و بهره‌گیری از مزیت کوانتومی برای افزایش کارایی و امنیت است که باید با ملاحظات اخلاقی، حین توسعه یکپارچه شود. با این حال، موانع موجود نیز قابل توجه هستند؛ از جمله محدودیت‌های فیزیکی در ظرفیت ذخیره‌سازی و زمان بازیابی اطلاعات کوانتومی و تأثیر مخرب نویز در کانال‌های کوانتومی که نیازمند راهکارهایی قطعی، قابل تکرار و قابل اطمینان چون فضای فرعی عاری از نااهمدوسی است.

مقایسه نتایج مطالعات نشان می‌دهد که پژوهش‌ها از بررسی‌های نظری اولیه برای به‌کارگیری ریاضیات کوانتومی در بازیابی اطلاعات به سمت مدل‌سازی‌های عملی‌تر و امنیتی حرکت کرده‌اند. علی‌رغم این پیشرفت‌ها، خلأهای تحقیقاتی مهمی همچنان باقی است. شکاف میان مدل‌های نظری الهام گرفته از کوانتوم و پیاده‌سازی عملی آن‌ها بر روی سخت‌افزارهای کوانتومی واقعی، یک مورد مسکوت‌مانده و حیاتی است. علاوه بر این، پژوهشی که به‌صورت نظام‌مند و جامع، اصول نظریه کوانتومی اطلاعات را در بستر بازیابی اطلاعات در ایران تحلیل کند، یافت نشد که این خود یک خلأ تحقیقاتی منطقه‌ای را برجسته می‌سازد.

روش

پژوهش حاضر از نظر هدف، یک پژوهش بنیادی است و برای اجرای آن از روش تحلیلی-مروری بهره گرفته شده است. باتوجه به ماهیت نظری و نوظهور موضوع تلاقی نظریه کوانتومی اطلاعات و بازیابی اطلاعات، این رویکرد به‌عنوان مناسب‌ترین روش انتخاب شد؛ زیرا پیش از هرگونه پژوهش تجربی، نیازمند ایجاد یک چارچوب مفهومی منسجم از طریق شناسایی، تحلیل و ترکیب نظام‌مند ادبیات موجود هستیم.

فرایند انجام این پژوهش در چند مرحله مشخص صورت گرفت:

۱. گردآوری داده‌ها: در مرحله اول، از روش کتابخانه‌ای برای گردآوری منابع علمی استفاده شد. تمرکز اصلی بر روی پایگاه‌های استنادی معتبر بین‌المللی نظیر وب‌آوساینس^۱ و گوگل اسکالر^۲ قرار گرفت تا از اعتبار و کیفیت علمی منابع اطمینان حاصل شود. می‌توان در پژوهش‌های آتی از ابزارهای هوش مصنوعی متنوع نیز بهره برد.

۲. راهبرد جستجو و انتخاب منابع: جستجوی منابع با استفاده از یک راهبرد نظام‌مند انجام شد که جزئیات آن در جدول ۱ ارائه شده است. کلیدواژه‌های اصلی شامل «کوانتوم»، «نظریه کوانتومی اطلاعات» و «بازیابی اطلاعات» با استفاده از عملگرهای بولی ترکیب شدند. پس از اجرای جستجوها، منابع بازیابی شده مورد غربالگری قرار گرفتند؛ ابتدا رکوردهای تکراری حذف و سپس با بررسی عنوان و چکیده، مقالات غیرمرتبط کنار گذاشته شدند تا در نهایت مجموعه‌ای متمرکز و مرتبط برای تحلیل نهایی انتخاب شود.

۳. روش تحلیل: در این پژوهش از رویکرد تحلیل مفهومی^۱ و سنتز ادبیات^۲ استفاده شده است. بدین صورت که ابتدا مفاهیم بنیادین، اصول و کاربردهای نظریه کوانتومی اطلاعات از دل منابع معتبر استخراج و به اجزای تشکیل‌دهنده‌شان شکسته شدند. سپس در مرحله سنتز، هر یک از این مفاهیم به صورت نظام‌مند به چالش‌ها، نیازها و فرایندهای حوزه بازیابی اطلاعات پیوند داده شد. هدف از این کار، صرفاً مرور مفاهیم نبود، بلکه ایجاد ارتباطی منطقی و کاربردی میان این دو حوزه و برجسته‌سازی قابلیت‌های بالقوه حاصل از این تلاقی بود. مقاله حاضر حاصل این تحلیل و سنتز نظام‌مند است. پس از برآورد رکوردهای تکراری بازیابی شده از وب‌آوساینس و گوگل اسکالر و حذف رکوردهای غیرمرتبط، ۱۶ پژوهش برای پیشینه مقاله حاضر انتخاب شد.

جدول ۱. راهبرد جستجو برای مرور پیشینه

(Quantum OR "Quantum Information Theory" OR "Quantum Information") AND "Information Retrieval"			
Quantum	تعداد نتایج جستجو در وب‌آوساینس		
OR*			
Quantum Information Theory	AND*	Information Retrieval	۳۳
OR*			
Quantum Information			

این مقاله از حیث تحلیلی به دو بخش اصلی تقسیم شده است، در بخش اول قصد داریم تا مفاهیم اساسی موجود در بطن نظریه کوانتومی اطلاعات را با ارجاع به منابع و متون توضیح دهیم. این مفاهیم به سه مقوله: (۱) مفاهیم بنیادی؛ (۲) اصول و نظریات؛ (۳) کاربردها و فناوری‌ها، تفکیک شده‌اند. در بخش دوم مطالعه، مفاهیم اساسی حوزه نظریه اطلاعات کوانتومی به مفهوم بازیابی اطلاعات ربط داده شده‌اند -البته صرفاً آن دسته از مفاهیمی که در نتیجه و بر طبق مرور صورت گرفته شده، تا زمان انجام این مطالعه، ارتباط مستقیم یا نزدیکی با مفهوم بازیابی اطلاعات داشته‌اند- تا از دل این ارتباطات، به برجسته کردن کاربردها پرداخته شود که می‌تواند برای کشف ایده‌های نو مفید واقع شود.

یافته‌ها

اصول و مفاهیم اساسی نظریه کوانتومی اطلاعات

در این بخش قصد داریم تا مفاهیم اساسی موجود در بطن نظریه کوانتومی اطلاعات را با ارجاع به منابع و متون توضیح دهیم. این مفاهیم به سه مقوله: (۱) مفاهیم بنیادی؛ (۲) اصول و نظریات؛ (۳) کاربردها و فناوری‌ها، تفکیک شده‌اند.

1. Conceptual Analysis
2. Literature Synthesis

۱. مفاهیم بنیادی:

حالت‌های کوانتومی و کیوبیت: حالات کوانتومی وضعیت یک سیستم کوانتومی را توصیف می‌کنند. یک کیوبیت یک سیستم کوانتومی دو حالته است که می‌تواند به صورت خارجی کنترل شود و به آن اجازه می‌دهد بین حالت‌ها تغییر کند (Averin, 1999; Brańczyk et al., 2006; Cole et al., 2001). فراتر از کیوبیت‌ها، حالات کوانتومی با ابعاد بالا (کیودیت‌ها) منابع غنی تری را برای شبکه‌های کوانتومی و ارتباطات ارائه می‌دهند، اگرچه انتقال قابل اعتماد آن‌ها همچنان چالش برانگیز است (Cozzolino et al., 2018). کیوبیت‌ها توسط اشیای فیزیکی کوانتومی مانند فوتون‌ها، الکترون‌ها یا اتم‌ها نشان داده می‌شوند و برای محاسبات کوانتومی و پردازش اطلاعات کوانتومی ضروری هستند؛ این واحدها توانایی وجود در دو حالت و دست‌کاری برای محاسبات کوانتومی را دارند. حالات کوانتومیکه این کیوبیت‌ها را توصیف می‌کنند، می‌توانند با استفاده از تکنیک‌های پیشرفته مختلف کنترل و تفکیک شوند. حالات کوانتومی با ابعاد بالا و پردازش اطلاعات کوانتومی با متغیرهای پیوسته مسیرهای اضافی را برای بهبود شبکه‌ها و کاربردهای کوانتومی ارائه می‌دهند. تحقیق و توسعه در حال انجام در این زمینه‌ها راه را برای سیستم‌های محاسباتی و ارتباطی کوانتومی کاربردی هموار می‌کند. حالت‌های کوانتومی به پیکربندی‌های منحصربه‌فردی اشاره دارند که کیوبیت‌ها می‌توانند در آن‌ها وجود داشته باشند، و از برهم‌نهی و درهم‌تنیدگی برای انجام عملیات فراتر از توانایی‌های محاسبات کلاسیک استفاده می‌کنند. این حالت‌ها ظریف و در برابر مداخلات محیطی آسیب‌پذیر هستند و منجر به ازدست‌رفتن اطلاعات و فروپاشی حالت‌های کوانتومی می‌شوند.

برهم‌نهی کوانتومی: اصل برهم‌نهی برای درک رفتار اجسام کوانتومی ضروری است و به آن‌ها اجازه می‌دهد تا خواص موجی از خود نشان دهند و به طور هم‌زمان در چندین مکان وجود داشته باشند. این یک اصل بنیادی در مکانیک کوانتومی است که بیان می‌کند هر دو (یا بیشتر) حالت کوانتومی را می‌توان با هم جمع کرد (برهم‌نهی) و نتیجه یک حالت کوانتومی معتبر دیگر خواهد بود (Dmytrovych & Volodymyrovich, 2017; Gudder, 1970). این اصل یک خاصیت اساسی از تابع موج است که دامنه احتمال موقعیت و سایر متغیرهای یک ذره را توصیف می‌کند (Dmytrovych & Volodymyrovich, 2017). این مفهوم درک کلاسیک ما از واقعیت را به چالش می‌کشد و پیامدهای عمیقی برای محاسبات کوانتومی، اپتیک کوانتومی و درک گذار کلاسیک-کوانتوم دارد. این اصل که مکانیک کوانتومی را از مکانیک کلاسیک متمایز می‌کند، زیرا نیازمند پذیرش عدم قطعیت در نتایج مشاهدات است (Duff, 1964). این اصل زیربنای بسیاری از پیش‌بینی‌های منحصربه‌فرد و غیرشهودی نظریه کوانتومی است، مانند وجود حالت‌هایی که ماهیتاً احتمالی هستند تا قطعی و جبری. باین‌حال، این اصل تابع محدودیت‌های نظری است و پیامدهای عمیقی برای تفسیر مکانیک کوانتومی، به‌ویژه در مقیاس‌های ماکروسکوپی دارد. البته باید گفت رویکردهایی منطقی به این اصل وجود دارند که به چالش‌ها و تناقضات مفهومی مانند آنچه در تمثیل گره‌به‌شرویدینگر نشان داده شده است، می‌پردازد. از سویی، چنین مقوله‌ای امکان یادگیری ماشین چند خصوصیتی را فراهم می‌کند و به مدل‌های کوانتومی اجازه می‌دهد تا به طور هم‌زمان داده‌ها را از منابع مختلف پردازش و یاد بگیرند که منجر به بهبود عملکرد نسبت به یادگیری تک و ویژگی کلاسیک می‌شود (Nguyen et al., 2022). این اصل در شبکه‌های عصبی کوانتومی و حتی در زمینه نظریه‌های جامعه‌شناسی، جایی که به‌عنوان «برهم‌نهی اجتماعی» برای توضیح تغییر اجتماعی از طریق ترکیب حالات اجتماعی مختلف، به کار گرفته شده است (Kurizki & Gordon, 2020).

درهم‌تنیدگی کوانتومی

مفهومی بنیادی در فیزیک کوانتومی است که در آن، حالت‌های کوانتومی ذرات، فارغ از فاصله آن‌ها، به هم وابسته می‌شوند و منجر به همبستگی‌های غیر موضعی می‌گردد (Wong, 2020; Niknamian et al., 2019; Maiolo et al., 2006). آروین شرویدینگر، این پدیده را «جوهر مکانیک کوانتومی» توصیف کرده است. درهم‌تنیدگی با پارادوکس‌ها و پدیده‌های خلاف شهود متعددی مرتبط است و مفاهیم سنتی مکان و جداسازی را به چالش می‌کشد (Zeilinger, 1998; Melnikov et al., 2019). این مفهوم نقشی حیاتی در ارتباطات، رمزنگاری و محاسبات کوانتومی ایفا می‌کند. پیشرفت‌های اخیر بر درهم‌تنیدگی چند ذره‌ای و کاربردهای آن در فناوری‌های پیشرفته متمرکز است. جنبه‌ای عمیق و مرموز از دنیای کوانتومی که پیامدهای آن از فیزیک بنیادی تا کاربردهای عملی در زمینه‌های مختلف را در بر می‌گیرد. حالت و اندازه‌گیری یک ذره به‌طور آنی بر حالت ذره دیگر مؤثر است. مفهوم غیر موضعی بودن، بر ماهیت منحصر به فرد درهم‌تنیدگی کوانتومی تأکید می‌کند (Kurizki & Gordon, 2020). این مفهومی محوری، نظری و عملی در علوم اطلاعات است که امکان برقراری ارتباطات پیشرفته، محاسبات و پروتکل‌های رمزنگاری را فراهم می‌کند. در تعریفی دیگر، این پدیده باعث می‌شود جفت یا گروهی از ذرات به گونه‌ای به هم مرتبط می‌شوند که حالت کوانتومی هر ذره را نمی‌توان مستقل از حالت دیگری توصیف کرد (Niknamian et al., 2019). نسبت خاص محدودیت‌هایی را بر انتقال اطلاعات بین سیستم‌های دوردست اعمال می‌کند؛ آلبرت اینشتین به طرز مشهوری از این پدیده به‌عنوان «عمل شبح‌وار از راه دور» یاد کرد (Polzik, 2002). این اصل منجر به بحث‌ها و تناقض‌هایی در بین فیزیک‌دانان در مورد پیامدهای آن، به‌ویژه در رابطه با برقراری ارتباط سریع‌تر از نور شده است. برخی از محققان نتیجه‌گیری کرده‌اند که چنین ارتباطی غیرممکن است (Xue, 2021). به‌علاوه این جنبه‌ای مرکزی و گیج‌کننده از نظریه کوانتوم است و ذرات را به روشی به هم پیوند می‌دهد که با شهود کلاسیک در مورد فضا و زمان در تضاد تلقی می‌شود. این پدیده پیامدهای قابل توجهی برای درک ما از جهان و توسعه فناوری‌های آینده دارد (Kohnle & Deffebach, 2015; Wang Xinye, 2021; Xue, 2021).

آنتروپی و اطلاعات کوانتومی

این حیطه به اندازه‌گیری تصادفی بودن و تمایز در حالات کوانتومی می‌پردازد. برای تعریف و اندازه‌گیری آنتروپی کوانتومی روش‌های مختلفی پیشنهاد شده است، مانند استفاده از جفت‌های مزدوج مشاهده‌پذیرها که فضای فاز کوانتومی را تشکیل می‌دهند (De Julio, 2022). نظریه اطلاعات منطقی این مفهوم را به سیستم‌های کوانتومی گسترش می‌دهد (Anza & Crutchfield, 2022). این چارچوب‌ها به دنبال آن هستند که جنبه‌های احتمالی و غیر کلاسیک سیستم‌های کوانتومی را ثبت کنند و ماهیت پیچیده آنتروپی و اطلاعات کوانتومی را روشن سازند.

آنتروپی کوانتومی معیاری برای سنجش عدم قطعیت، تصادفی بودن یا بی‌نظمی در یک سیستم کوانتومی است. این مفهوم مشابه آنتروپی کلاسیک عمل می‌کند، اما در مورد حالات کوانتومی به کار می‌رود. آنتروپی کوانتومی میزان اطلاعات گم‌شده را زمانی که تنها از حالت کوانتومی سیستم اطلاع داریم، کمیت‌سازی می‌کند. در اینجا، اطلاعات در یک چارچوب کوانتومی کدگذاری شده و از طریق کانال‌های کوانتومی قابل‌پردازش و انتقال است (Ohya & Watanabe, 2010; Uttam, 2012). آنتروپی کوانتومی درعین حال که شباهت‌هایی با همتای کلاسیک خود دارد،

ویژگی‌های منحصربه‌فرد مکانیک کوانتومی را نیز نشان می‌دهد، مانند تأثیر پدیده‌هایی مانند اثر آهارونوف-بوم (Lima et al., 2023). علاوه بر این، آنتروپی کوانتومی را می‌توان از طریق اصل لاندائِر^۱ به ترمودینامیک مرتبط کرده که پاک کردن اطلاعات را به اتلاف گرما مرتبط می‌کند (Lent, 2019).

این مفاهیم برای درک ارتباطات کوانتومی ضروری هستند. آن‌ها همچنین در توسعه فناوری‌های کوانتومی مانند رمزنگاری کوانتومی و محاسبات کوانتومی نقش اساسی دارند.

این اصل را به عنوان یک کلاس هم‌ساخت‌شناسی کلی در نظر می‌گیرند که احتمالات کلاسیک و کوانتومی و عملگرهای مشاهده‌پذیر را تعمیم می‌دهد (Baudot & Bennequin, 2015). آنتروپی منطقی، مشتق شده از منطق پارتیشن‌بندی، مفهوم طبیعی اطلاعات را برای نظریه اطلاعات کوانتومی فراهم می‌کند که بر تمایز حالات کوانتومی تمرکز دارد (Ellerman, 2018). به نظریه اطلاعات که توسط شانون^۲ در سال ۱۹۴۸ و جی‌نز^۳ در سال ۱۹۵۷ پایه‌گذاری شد، متصل است (Tsallis, 2022).

در زمینه مکانیک کوانتومی به‌طور خاص، آنتروپی کوانتومی مفهومی مشابه آنتروپی اطلاعات را نشان می‌دهد، اما برای توصیف عدم قطعیت در حالات کوانتومی. این عدم قطعیت ناشی از اصول مکانیک کوانتومی مانند اصل عدم قطعیت هایزنبرگ^۴ است که محدودیت‌هایی را برای اندازه‌گیری هم‌زمان خواص فیزیکی ذرات کوانتومی ایجاد می‌کند. تأثیر اندازه‌گیری‌های کوانتومی بر آنتروپی اساسی است؛ این اصل با نظریه اطلاعات منطقی در تعامل است.

کانال‌های کوانتومی و نویز

کانال‌های کوانتومی در ارتباطات کوانتومی ضروری هستند و مسیر انتقال اطلاعات کوانتومی را فراهم می‌کنند. این کانال‌ها تحت تأثیر نویز قرار دارند که مانعی مهم در برقراری ارتباطات کوانتومی در مسافت‌های طولانی و شبکه‌های کوانتومی توزیع شده است.

پژوهشگران، شبکه‌های عصبی کوانتومی را برای مطالعه و تشخیص نویز در کانال‌های کوانتومی به کار گرفته‌اند و به‌دقت بالایی در مدل‌سازی رفتار کانال‌های نویزی دست یافته‌اند. امکان پیاده‌سازی رمزگشاهای کوانتومی وجود دارد که کارایی قابل‌مقایسه‌ای با الگوریتم‌های کلاسیک را نشان می‌دهد، علی‌رغم محدودیت‌های رایانه‌های کوانتومی در مقیاس میانی پرنویز^۵ (Hamidi-rad & Kaewell, 2022). نویز در کانال‌های کوانتومی به هرگونه برهم‌کنش ناخواسته بین سیستم کوانتومی و محیط آن اشاره دارد که می‌تواند منجر به خطا در انتقال اطلاعات کوانتومی شود. این نویز می‌تواند ناشی از ناهم‌دوسی^۶ و سایر منابع نویز کوانتومی باشد و بر وفاداری^۷ حالت کوانتومی در حال انتقال تأثیر بگذارد (Li, 2020; Melvin, 2023). درحالی‌که کانال‌های کوانتومی و نویز اغلب به‌عنوان عوامل مخرب در نظر گرفته می‌شوند، آن‌ها همچنین در رمزنگاری کوانتومی و تصحیح خطا^۸ نقش ایفا می‌کنند (Kretschmann et al., 2008). علاوه بر این،

1. Landauer principle
2. Shannon
3. Jaynes
4. Heisenberg
5. NISQ
6. decoherence
7. fidelity
8. error correction

اطلاعات همدوس^۱ یک کانال کوانتومی پرنویز، کمیتی است که با پردازش کوانتومی قابل افزایش نیست و با ظرفیت این کانال برای تصحیح خطای کوانتومی مرتبط است (Schumacher & Nielsen, 1996). مطالعه این مفاهیم بر توسعه کدهای تصحیح خطا و پروتکل‌های ارتباطی امن تأثیر می‌گذارد. درک ماهیت کانال‌های کوانتومی و کاهش نویز برای پردازش قابل اعتماد اطلاعات کوانتومی و تحقق سیستم‌های محاسباتی کوانتومی عملی ضروری است (Hirche et al., 2016; Hirche, 2015; Holbrook et al., 2005; Holevo, 1997; Khalifa et al., 2021; Kretschmann et al., 2008; Li, 2020; Melvin, 2023; Nielsen, 2000; Schumacher & Nielsen, 1996).

مثلاً استفاده از یک سوئیچ کوانتومی که به ذرات کوانتومی اجازه می‌دهد، تا در یک برهم‌نهی از نظم‌های مختلف حرکت کنند، می‌تواند ارتباط بدون نویز را از طریق کانال‌های پرنویز امکان‌پذیر سازد (Caleffi & Cacciapuoti, 2019). شبکه‌های عصبی کوانتومی به‌عنوان روشی کارآمد برای مدل‌سازی و تشخیص نویز در کانال‌های کوانتومی پیشنهاد شده‌اند و اثربخشی بالایی را در آموزش و مشخصه‌یابی نویز نشان می‌دهند (Song et al., 2023).

۲. اصول و نظریات

الگوریتم‌های کوانتومی (عملیات و مدل‌های رایانش)

عملیات کوانتومی شامل دست‌کاری کیوبیت‌ها از طریق گیت‌های کوانتومی برای انجام محاسبات است (Mizukami & Koga, 2023). الگوریتم‌ها، عملیات و مدل‌های محاسباتی کوانتومی با مهار پدیده‌های کوانتومی برای افزایش قدرت و کارایی محاسبات، پارادایم‌های محاسبات سنتی را متحول می‌کنند. الگوریتم‌های کوانتومی توالی‌هایی از گیت‌های منطقی کوانتومی هستند که روی کیوبیت‌ها اعمال می‌شوند تا وظایف محاسباتی را انجام دهند. این الگوریتم‌ها از پدیده‌هایی مانند برهم‌نهی بهره می‌برند (Ralescu & Mayfield, 2005; Rahmi et al., 2012). عملیات کوانتومی به دست‌کاری کیوبیت‌ها در یک رایانه کوانتومی با استفاده از گیت‌های کوانتومی مانند گیت هادامارد^۲ و گیت‌های پاولی^۳ اشاره دارد که می‌توان آن‌ها را در یک چارچوب واحد از گیت‌ها خلاصه کرد (Ralescu & Mayfield, 2005; Slepoy, 2006). مدل‌های محاسبات کوانتومی اساس نظری برای محاسبات کوانتومی را فراهم می‌کنند. مدل مدار کوانتومی یکی از این چارچوب‌ها است که در آن پژوهشگران محاسبه را به‌صورت یک توالی از عملیات گیت روی کیوبیت‌ها نمایش می‌دهند (Wootton, 2024). الگوریتم‌های کوانتومی مجموعه رویه‌های محاسبات کوانتومی، عملیات کوانتومی انجام شده روی داده‌های کوانتومی و مدل‌های محاسباتی و درواقع چارچوب‌هایی انتزاعی هستند که اصول و ساختار زیربنایی محاسبات کوانتومی را توصیف می‌کنند. این عناصر برای زمینه محاسبات کوانتومی که قرار است قابلیت‌های محاسباتی را برای مسائل پیچیده خاصی متحول کند، ضروری هستند.

قضیه عدم همانندسازی^۴ کوانتومی

قضیه تکثیرناپذیری در نظریه اطلاعات کوانتومی بیان می‌کند که ایجاد نسخه‌های کپی دقیق و یکسان از حالات کوانتومی ناشناخته دلخواه غیرممکن است. این اصل بنیادی در رمزنگاری کوانتومی اهمیت دارد. این قضیه ارتباط نزدیکی با مفهوم

1. coherent information

2. Pauli

3. Hadamard

4. No-Cloning theorem

عدم تلپورت دارد، جایی که ارسال حالت‌های کوانتومی از طریق کانال‌های کلاسیک بدون درهم‌تنیدگی از پیش به اشتراک گذاشته شده ممنوع است (Girling et al., 2023). این قضیه منحصر به فرد بودن اطلاعات کوانتومی را تضمین می‌کند و زیربنای امنیت رمزنگاری کوانتومی را تشکیل می‌دهد (Bergou & Hillery, 2013; Kok & Lovett, 2010). قضیه تکثیرناپذیری نه تنها یک مفهوم مستقل است، بلکه با سایر اصول کوانتومی نیز ارتباط عمیقی دارد. برای مثال، این قضیه معادل این اصل است که درهم‌تنیدگی نمی‌تواند تحت عملیات محلی و ارتباطات کلاسیک افزایش یابد (Horodecki & Horodecki, 1997). ارتباطات این قضیه با سایر پدیده‌های کوانتومی، ماهیت منسجم نظریه کوانتومی و نقش بنیادی آن در این زمینه را برجسته می‌کند.

۳. کاربردها و فناوری‌ها

تصحیح و تاب‌آوری خطا

شامل طراحی الگوریتم‌ها و تکنیک‌هایی مانند تصحیح خطای کوانتومی^۱ برای محافظت از اطلاعات کوانتومی در برابر خطا و ناهم‌دوسی است (Khan, 2023). این حوزه برای افزایش پایداری و یکپارچگی مدارهای کوانتومی بر روی گیت‌های جامع و پارامترهایی مانند احتمال خطا و فاصله کدهای تصحیح خطا تمرکز می‌کند.

این شامل کدگذاری اطلاعات کوانتومی در یک فضای هیلبرت^۲ بزرگ‌تر است به طوری که علی‌رغم وقوع خطاهای خاص، اطلاعات اصلی قابل بازیابی باشد (Devitt et al., 2009). بحث تحمل خطا از سویی، این مفهوم را بسط می‌دهد؛ آن هم با اطمینان از اینکه کل فرایند محاسبات کوانتومی، از جمله مراحل تصحیح خطا، حتی زمانی که اجزای سیستم خود در معرض خطا قرار می‌گیرند، به درستی پیش می‌رود (Terhal, 2015).

تصحیح خطای کوانتومی و تحمل خطا برای تحقق عملی سیستم‌های محاسباتی و ارتباطی کوانتومی اساسی هستند. چنین مقوله‌هایی با ممکن ساختن بازیابی اطلاعات کوانتومی و اطمینان از استحکام محاسبات کوانتومی در برابر نویز و نقص در اجزای سیستم، به حساسیت سیستم‌ها به خطا می‌پردازند. تحقیق و توسعه مداوم در این زمینه‌ها برای پیشبرد این حوزه به سمت فناوری‌های کوانتومی مقیاس‌پذیر و قابل اعتماد ضروری است.

رمزنگاری کوانتومی^۳

از اصول فیزیک کوانتومی برای برقراری ارتباط امن با جلوگیری از دسترسی غیرمجاز به داده‌های ارسالی استفاده می‌کند. این فناوری از پروتکل‌های توزیع کلید کوانتومی^۴ برای ایجاد کلیدهای رمزگذاری امن استفاده می‌کند (مانند پروتکل بی. بی. ۸۴^۵) و بدین ترتیب، رهگیری یا رمزگشایی اطلاعات در حال انتقال را برای شنودگران بالقوه بسیار دشوار می‌سازد. رمزنگاری کوانتومی امنیت بالاتری را نسبت به روش‌های رمزنگاری سنتی ارائه می‌دهد، به‌ویژه با توجه به ظهور قابلیت‌های رایانه‌های کوانتومی که می‌توانند تکنیک‌های رمزنگاری متعارف را به خطر بیندازند (Bernstein, 2023; Kavuri et al., 2023; Giroti & Malhotra, 2022; Frigiyik, 2022). این رویکرد به امنیت داده با ارائه سطح جدیدی از

1. Quantum Error Correction (QEC)
2. Hilbert space
3. quantum cryptography
4. quantum key distribution (QKD)
5. BB84

محافظت در برابر تهدیدات سایبری، مقولات مختلفی مانند رأی‌گیری آنلاین، بانکداری و تولید را متحول خواهد کرد. سطح جدیدی از امنیت که الگوریتم‌های کلاسیک ممکن است در مواجهه با تهدید بالقوه رایانه‌های کوانتومی از آن برخوردار نباشند.

توزیع کلید کوانتومی

یک روش امن است که دو طرف، بر فرض آلیس و باب، را قادر می‌سازد تا یک کلید مخفی مشترک را بر کانال کوانتومی ایجاد کنند و بدین ترتیب امنیت بی‌قید و شرط در برابر استراق سمع را تضمین می‌کند (Bassi et al., 2023; Malavolta & Wahler, 2023). البته با فرض وجود کانال‌های کلاسیک تأیید شده برای پیاده‌سازی عملی.

پیشرفت‌های اخیر، الگوریتم‌های رمزنگاری پساکوانتوم^۱ را با کیو.کی.دی ادغام کرده‌اند که باعث ساده‌سازی ساختارهای شبکه و تسهیل افزودن کاربران جدید می‌شود؛ بدون خدشه‌دار کردن امنیت. علاوه بر این، کیو.کی.دی عمدتاً در ارتباطات نقطه‌به‌نقطه مورد استفاده قرار گرفته است، اما تلاش‌هایی برای گسترش کاربرد آن به شبکه‌های چندکاربره در حال انجام است (Techateerawat, 2012). این موارد نشان‌دهنده پیشرفت قابل توجه در تکنیک‌های رمزنگاری و روشی برای توزیع کلید امن است که از لحاظ تئوری در برابر حملات، از جمله حملات رایانه‌های کوانتومی، مصون باشد. ادغام آن با رمزنگاری پساکوانتوم قابلیت اعمال آن را در شبکه‌های بزرگ‌تر افزایش می‌دهد که نشان‌دهنده آینده امیدوارکننده‌ای برای ارتباطات امن کوانتومی است.

گیت‌ها و مدارهای کوانتومی

گیت‌های کوانتومی روی کیوبیت‌ها عمل می‌کنند و حالت بردارهای آن‌ها را از طریق عملیاتی مانند گیت نات^۲، گیت‌های پاولی و گیت هادامارد^۳ تغییر می‌دهند (Baaquie & Kwek, 2023). این مدارها از کیوبیت‌های ابررسانا تشکیل شده‌اند که تحت تأثیر تشدید گر‌ها، میدان‌های مغناطیسی و سایر برهم‌کنش‌ها قرار می‌گیرند و اطلاعات را از طریق حالات مکانیکی کوانتومی - به‌جای ولتاژهای بالا و پایین کلاسیک - منتقل می‌کنند.

گیت‌های کوانتومی همانند گیت‌های منطقی کلاسیک در رایانه‌های معمولی، بلوک‌های سازنده بنیادی در محاسبات کوانتومی هستند. آن‌ها روی تعداد کمی از کیوبیت‌ها عمل می‌کنند؛ این گیت‌ها از پدیده‌های مکانیک کوانتومی مانند برهم‌نهی و درهم‌تنیدگی استفاده می‌کنند. مدارهای کوانتومی از اتصال آبشاری یا سلسله‌مراتبی این گیت‌های کوانتومی تشکیل شده‌اند که با دست‌کاری کیوبیت‌ها که حاملان اطلاعات کوانتومی هستند، برای انجام محاسبات پیچیده و اجرای الگوریتم‌ها مرتب می‌شوند. توسعه و بهینه‌سازی این گیت‌ها و مدارهای کوانتومی برای پیشرفت محاسبات کوانتومی و برای پیشرفت مدارهای فوتونیک کوانتومی مجتمع ضروری است، زیرا آن‌ها زیربنای پتانسیل پردازش اطلاعات کوانتومی در مقیاس بزرگ را تشکیل می‌دهند.

1. Post-quantum cryptography (PQC)
2. NOT
3. Hadamard gate

تله پورت (انتقال از راه دور) کوانتومی و کدگذاری فوق چگال

تله پورت کوانتومی فرایندی است که در آن حالت یک سیستم کوانتومی از یک مکان به مکان دیگر منتقل می شود، بدون اینکه خود سیستم کوانتومی به صورت فیزیکی منتقل شود. این امر از طریق درهم تنیدگی ممکن می شود که در بخش های قبلی مقاله توضیح داده شد؛ از سوی دیگر، کدگذاری فوق چگال یک پروتکل ارتباطی کوانتومی است که با بهره گیری از خواص درهم تنیدگی کوانتومی، امکان انتقال دو بیت اطلاعات کلاسیک را تنها با ارسال یک کیوبیت فراهم می کند. مطالعات انجام شده رویکردها و پیشرفت های مختلفی را برای این پروتکل ها ارائه می دهند. برای مثال، نمودارهای اتصال زنجیره ای معکوس کننده^۱ دیدگاهی هندسی در مورد درهم تنیدگی کوانتومی ارائه می کنند که برای تله پورت کوانتومی و کدگذاری فوق چگال اساسی است. علاوه بر این، استفاده از یک حالت پنج کیوبیتی در جهت تسهیل تله پورت کامل و هم زمان برای کدگذاری فوق چگال، کارآمد نشان داده شده است که نسبت به روش های سنتی تراکم اطلاعاتی بالاتری دارد. همچنین، سیستم های درهم تنیده کوانتومی با تعداد کیوبیت فرد که از جفت های گرینبرگر-هورن-زایلینگر^۲ و بل^۳ تشکیل شده اند، برای این پروتکل ها مفید شناخته شده اند؛ در واقع قابلیت ارسال « $2N + 1$ » بیت کلاسیک با انتقال « $N + 1$ » کیوبیت را دارند (Buot et al., 2023; Muralidharan & Panigrahi, 2008; Saha & Panigrahi, 2012).

این پروتکل ها در زمینه های مختلفی از جمله «کیودیت های توپولوژیکی»^۴ که توسط «آنیون ها»^۵ تحقق می یابد، مورد بررسی قرار گرفته اند که نشان دهنده تطبیق پذیری و کاربردهای بالقوه آنها در پردازش اطلاعات کوانتومی است (Mastriani, 2023). این دو مقوله در اصل دو پروتکل هستند که از ویژگی های منحصر به فرد درهم تنیدگی کوانتومی برای دستیابی به انتقال اطلاعات و وظایف ارتباطی استفاده می کنند؛ کاری که با سیستم های کلاسیک امکان پذیر نیست. همچنان تحقیقات در این زمینه به بررسی حالات و سیستم های کوانتومی جدید، برای بهبود کارایی و قابلیت های این پروتکل های پیشرفته ادامه دارد و این امر با در نظر داشتن کاربردهای بالقوه در ارتباطات و محاسبات کوانتومی در جریان است.

ارتباط اصول و مفاهیم اساسی کیو.آی.تی با مفهوم بازیابی اطلاعات

در این بخش قصد داریم تا با تعمیم اصول نظریه کوانتومی اطلاعات به مفهوم مطلق بازیابی اطلاعات، نگاهی به ترکیبات موجود در این حوزه داشته باشیم و رویکردهای نو را متصور شویم.

کیوبیت و حالت های کوانتومی در بازیابی اطلاعات

کیوبیت ها و حالت های کوانتومی، ارکان اصلی در زمینه علم اطلاعات کوانتومی^۶، زیرشاخه بازیابی اطلاعات را نیز در بر می گیرد. حالت های کوانتومی، پیکربندی هایی هستند که کیوبیت ها می توانند به خود بگیرند و نقش مهمی در ذخیره سازی و بازیابی اطلاعات در سیستم های کوانتومی ایفا می کنند (Flarend & Hilborn, 2022; Gerry & Bruno, 2013; Archuadze et al., 2012; Liu et al., 2022). در حالی که حالت های کوانتومی و کیوبیت ها بخش جدایی ناپذیر بازیابی

1. Inverter-chain link (ICL)
2. Greenberger-Horne-Zeilinger (GHZ)
3. Bell
4. topological qudits
5. anyons
6. Quantum information science (QIS)

اطلاعات کوانتومی هستند، اما لی (۲۰۲۳) فرضیه فیزیکی بودن کیویت‌ها را به چالش می‌کشد و پیشنهاد می‌کند که آن‌ها سازه‌های ریاضی هستند که مشابه فیزیکی مستقیمی ندارند. برعکس، کورسباکن و همکاران^۱ (۲۰۰۹) و بنهلم و همکاران^۲ (۲۰۰۹) نمونه‌هایی از سیستم‌های فیزیکی مانند کیویت‌های شار یا ناپایا و یون‌های به‌دام‌افتاده را ارائه می‌کنند که در آن‌ها کیویت‌ها برای همدوسی کوانتومی و پردازش اطلاعات ساخته و دست‌کاری می‌شوند. این دو مقوله روش‌های جدیدی را برای نمایش، ذخیره و دسترسی به اطلاعات ارائه می‌دهند. با وجود بحث نظری در مورد فیزیکی بودن کیویت‌ها، پیاده‌سازی‌های عملی، کاربرد آن‌ها را در فناوری‌های اطلاعات کوانتومی نشان می‌دهد؛ بنابراین، رابطه بین این سه هم‌بنیادی و هم در حال تکامل است و تحقیقات در حال انجام به درک و کاربرد ما از این مفاهیم در حوزه کوانتوم کمک می‌کند.

حالت‌های کوانتومی نقش اساسی در پروتکل‌های بازیابی اطلاعات کوانتومی ایفا می‌کنند. بازیابی اطلاعات کوانتومی خصوصی به کاربران این امکان را می‌دهد تا حالت‌های کوانتومی خاصی را با ایمنی و کارآمدی از سرورها و سیستم‌های اطلاعاتی بازیابی کنند بدون اینکه فاش شود به کدام حالت دسترسی پیدا کرده‌اند، و بدین ترتیب حریم خصوصی و امنیت را افزایش می‌دهد. استفاده از زیرفضای عاری از ناهمدوسی در بازیابی اطلاعات کوانتومی خصوصی حتی در حضور کانال‌های کوانتومی نویزدار، اطمینان، امنیت پایگاه داده و حریم خصوصی کاربر را تضمین می‌کند و از تقلب و بازیابی‌های نادرست جلوگیری می‌نماید. علاوه بر این، سیستم‌های کوانتومی به دلیل ویژگی‌هایی مانند بافت متوالی^۳، در کارهای بازیابی اطلاعات (Yang et al., 2023) نسبت به روش‌های کلاسیک برتری نشان می‌دهند که قدرت استراتژی‌های کوانتومی را در سناریوهای بازیابی با حافظه محدود نشان می‌دهد.

بازیابی اطلاعات و برهم‌نهی

برهم‌نهی پیامدهای قابل توجهی برای فرایندهای بازیابی اطلاعات دارد. از خواص این اصل می‌توان برای بهبود کارایی و امنیت روش‌های بازیابی اطلاعات استفاده کرد (Kovachy et al., 2015; Liu et al., 2022). برای مثال، رمزنگاری کوانتومی از ویژگی‌های برهم‌نهی کوانتومی برای ایمن‌سازی پایگاه‌های داده ابری استفاده می‌کند و امکان رمزگذاری اطلاعات کوانتومی و تضمین حریم خصوصی را در هنگام بازیابی اطلاعات مبتنی بر سرور فراهم می‌کند (Liu et al., 2022). گرچه ایجاد برهم‌نهی‌ها، به‌ویژه برای حالت‌های کوانتومی ناشناخته، تحت محدودیت‌های خاص و قضایای عدم توانایی^۴ قرار دارد که چالش‌هایی را برای کاربرد عملی آن‌ها در سیستم‌های بازیابی اطلاعات ایجاد می‌کند (Bandyopadhyay, 2020; Oszmaniec et al., 2016).

برهم‌نهی با ارائه یک چارچوب احتمالاتی در کنار منطق کلی بازیابی اطلاعات، جنبه‌های نمایش، رتبه‌بندی و شناختی کاربر را در سیستم‌های بازیابی اطلاعات یکپارچه می‌کند و آن‌ها را ارتقا می‌دهد، تطبیق‌پذیرتر و از متن آگاه‌تر می‌سازد. علاوه بر این، برهم‌نهی کنترل‌شده کوانتومی در آشکارسازها می‌تواند اطلاعاتی را در مورد همبستگی‌های میدان استخراج کند که در غیر این صورت غیرقابل دسترسی است و بر کمیت‌های نظریه اطلاعات مانند درهم‌تنیدگی و اطلاعات متقابل نیز تأثیر می‌گذارد (Henderson et al., 2020).

1. Korsbakken et al.

2. Benhelm et al.

3. sequential contextuality

4. no-go theorems

اطلاعات و آنتروپی کوانتومی در امر بازیابی

سیستم‌های نظریه میدان کوانتومی دارای محدودیت در ظرفیت ذخیره‌سازی اطلاعات هستند، آنتروپی ریز حالت توسط مساحت سطح جسم در واحدهای ثابت فروپاشی گلدستون محدود می‌شود و زمان بازیابی به حجم در همان واحدها مرتبط است (Dvali, 2021). معیارهای بازیابی اطلاعات و ازدست‌دادن اطلاعات^۱ رابطه سود-زیان را در حین اندازه‌گیری‌ها نشان می‌دهند و چگونگی تکامل حالات کوانتومی و ازدست‌دادن اطلاعات را به تصویر می‌کشند (Wang, 2019). آنتروپی کوانتومی، به‌ویژه آنتروپی فون نویمان، معیاری از عدم قطعیت یا محتوای اطلاعاتی یک حالت کوانتومی است (Wilde, 2013). در زمینه بازیابی اطلاعات، آنتروپی کوانتومی را می‌توان از نظر مفهومی به عدم قطعیت یا میزان اطلاعاتی که می‌توان از یک سیستم کوانتومی استخراج کرد، مرتبط کرد.

کاربرد مکانیک کوانتوم در بازیابی اطلاعات عمدتاً ماهیت ریاضیاتی دارد و از فرمالیسم‌های نظریه کوانتومی برای مدل‌سازی جنبه‌هایی از بازیابی اطلاعات مانند ارتباط و برهم‌نهی حالات سند استفاده می‌کند (Ashoori & Rudolph, 2018; Lebedev & Khrennikov, 2020). درحالی‌که آنتروپی کوانتومی مفهومی اساسی در نظریه اطلاعات کوانتومی است، کاربرد مستقیم آن در سیستم‌های بازیابی اطلاعات کلاسیک ساده نیست. بازیابی اطلاعات کوانتومی پتانسیل نظریه کوانتومی را برای بهبود سیستم‌های بازیابی اطلاعات کلاسیک بررسی می‌کند، اما لزوماً به اجرای فیزیکی رایانه‌های کوانتومی نیاز ندارد (Ashoori & Rudolph, 2018).

این دو مفهوم از طریق چارچوب نظری که نظریه اطلاعات کوانتومی ارائه می‌دهد، به بازیابی اطلاعات مرتبط هستند. از این چارچوب می‌توان برای مدل‌سازی و بهبود بالقوه سیستم‌های بازیابی اطلاعات کلاسیک استفاده کرد، اگرچه کاربرد عملی فرایندهای فیزیک کوانتومی در بازیابی اطلاعات همچنان زمینه‌ای برای تحقیق و توسعه در حال انجام است.

الگوریتم‌های کوانتومی و بازیابی اطلاعات

محاسبات کوانتومی روی چندین عنصر به‌طور هم‌زمان عملیات انجام می‌دهند و در نتیجه نیاز به استفاده گسترده از حافظه رم^۲ را کاهش می‌دهد (Naskar, 2023). چارچوب کلی منطق و احتمال نظریه کوانتومی از سال ۲۰۰۴ در بازیابی اطلاعات مورد استفاده قرار گرفته است (Yang et al., 2023). استراتژی‌های کوانتومی در وظایف بازیابی اطلاعات، مانند استراتژی بازی اژدر^۳، مزایای قابل توجهی را نشان داده‌اند که برتری کوانتومی در وظایف با حافظه محدود و اهمیت ویژگی‌هایی مانند «زمینه‌مندی متوالی» برای دستیابی به برتری کوانتومی در بازیابی اطلاعات را برجسته می‌کند (Upreti et al., 2021).

الگوریتم گروور^۴ می‌تواند یک پایگاه داده مرتب نشده را دو برابر سریع‌تر از هر الگوریتم کلاسیکی جستجو کند که این امر به‌ویژه برای بازیابی اطلاعات که سرعت در آن حیاتی است، مفید است (Giri & Korepin, 2017; Kwon et al., 2022; Shrivastava et al., 2019). الگوریتم‌های کوانتومی سرعت جستجوهای پیچیده را افزایش می‌دهند، این لزوماً به معنای کاهش هزینه منابع پویا مانند کاهش مصرف انرژی در مقایسه با الگوریتم‌های کلاسیک نیست. این موضوع

1. Information loss (IL)
2. Random-access memory
3. Torpedo game
4. Grover's algorithm

جنبه ظرفی از محاسبات کوانتومی را برجسته می‌کند که در آن مزایا ممکن است وابسته به زمینه باشد (Perlner & Liu, 2017). الگوریتم‌های کوانتومی را می‌توان در سرویس‌های ابری اعمال کرد و با اطمینان از محرمانگی و امنیت از طریق روش‌های رمزگذاری کوانتومی، قابلیت‌های سیستم‌های بازیابی اطلاعات را ارتقا داد (Kwon et al., 2022, Liu et al., 2022). از یک سو، کاربردهای مبنی بر برداشت اطلاعات از وب (تقی‌زاده کورایم و همکاران، ۱۴۰۵) و بازیابی زمان‌مند داده‌ها می‌تواند توسط الگوریتم گروور بهینه شود.

کانال‌های کوانتومی، نویز و بازیابی اطلاعات

رابطه بین کانال‌های کوانتومی، نویز و بازیابی اطلاعات پیچیده و چندوجهی است. نویز به طور معمول چالشی است که باید کاهش یابد، اما در شرایط خاص می‌تواند برای بهبود ارتباط به کار گرفته شود. ظرفیت کانال‌های کوانتومی برای انتقال اطلاعات تحت تأثیر ماهیت نویز و استراتژی‌های به کاررفته برای مدیریت آن است و تحقیقات، هم محدودیت‌ها و هم فرصت‌هایی را برای بهینه‌سازی بازیابی اطلاعات در شبکه‌های ارتباطات کوانتومی نشان می‌دهند.

مطالعات حالات کوانتومی پرنویز، بر اهمیت تبیین نمودن اطلاعات کلاسیک قابل بازیابی، و به حداقل رساندن هزینه‌های بازیابی اطلاعات تأکید می‌کند (Zhao, 2023). تحقیقات روی دستگاه‌های ذخیره و بازیابی احتمالی که برای گیت‌های فاز بهینه شده‌اند، مقاومت متفاوتی نسبت به انواع مختلف نویز را نشان می‌دهند، به طوری که نویز فاززدایی نسبت به نویز قطبی‌زدایی قابل مدیریت‌تر است و بر عملکرد دستگاه در حضور نویز تأثیر می‌گذارد (Pavličko & Ziman, 2022). وجود نویز گاوسی^۱ بر حداکثر ویژگی‌های اطلاعاتی کانال‌های ارتباطات کوانتومی تأثیر می‌گذارد و روش‌های مختلف آشکارسازی (هترودین، همودین و آشکارسازی فوتونی^۲) در سطوح مختلف نویز عملکرد بهینه دارند (Hall, 1994). ظرفیت انتقال اطلاعات کانال‌های کوانتومی ثابت نبوده و وابسته به شرایطی است. پدیده‌هایی مانند «فزون جمع‌پذیری» نشان می‌دهد که ظرفیت ترکیبی دو کانال، می‌تواند از مجموع ظرفیت‌های فردی آن‌ها بیشتر باشد و نویز نیز می‌تواند وابسته به شرایط باشد (Nema et al., 2023). نویز به طور کلی محدودیت‌هایی را برای نرخ انتقال اطلاعات اعمال می‌کند، اما برای مثال، استفاده از حالات حرارتی همبسته و چندحالتی، می‌تواند نرخ انتقال اطلاعات کوانتومی را در کانال‌های گاوسی افزایش دهد (Noh et al., 2020).

درهم‌تنیدگی کوانتومی در نگاه بازیابی اطلاعات

تحقیقات سانگ و همکاران^۳ (۲۰۲۳)، شکافی نمایی در پیچیدگی ارتباطی، بین سناریوهای درهم‌تنیده و غیر درهم‌تنیده در کیو.پی.آی. آر برای پیام‌های کوانتومی را برجسته می‌کند. علاوه بر این، مطالعات سانگ و هایشی (۲۰۲۱) کارآمدی پروتکل‌های کیو.پی.آی. آر تک سرور را زمانی که کاربران و سرورها درهم‌تنیدگی را به اشتراک می‌گذارند، نشان می‌دهد که منجر به فرایندهای بازیابی اطلاعات مؤثرتر می‌شود. درهم‌تنیدگی کوانتومی فرایندهای بازیابی اطلاعات امن و کارآمد را امکان‌پذیر می‌کند و راه را برای پیشرفت در وظایف ارتباطات کوانتومی هموار می‌کند. در پروتکل‌های ارتباط مستقیم ایمن، حالات درهم‌تنیده به عنوان کانال‌های کوانتومی عمل می‌کنند، جایی که ذرات ارسالی، خودشان پیام‌های مخفی را حمل نمی‌کنند و بدین ترتیب امنیت را افزایش می‌دهند (Zhan et al., 2009). سیستم‌های درهم‌تنیده همبستگی‌هایی را

1. Gaussian noise

2. heterodyne, homodyne, and photodetection

3. Song et al.

از خود نشان می‌دهند که می‌توان از آن‌ها برای بازیابی اطلاعات در فرایندهای اطلاعات کوانتومی بهره برد (Das et al., 2022).

البته باید گفت درحالی که درهم‌تنیدگی کوانتومی برای بازیابی اطلاعات محوری است، اما چالش‌هایی را نیز به همراه دارد. به‌عنوان مثال، حالات درهم‌تنیدگی وابسته‌که شکلی از درهم‌تنیدگی هستند، برای پردازش اطلاعات به‌سختی تقطیر می‌شوند و به دست می‌آیند، اما می‌توانند از طریق درهم‌شدگی اطلاعات کوانتومی فعال شوند که بر توزیع درهم‌تنیدگی درون یک سیستم تأثیر می‌گذارد (Sinha, 2023).

علاوه بر این، تفاسیر دیگری از مکانیک کوانتومی وجود دارد که امکان استفاده از درهم‌تنیدگی برای بازیابی اطلاعات را زیر سؤال می‌برند و پیشنهاد می‌کنند که درهم‌تنیدگی به معنای تأثیرات غیر موضعی نیست که این موضوع برخی از طرح‌های محاسبات و ارتباطات کوانتومی را رد می‌کند (Guowen, 2005).

تصحیح خطای کوانتومی در بازیابی اطلاعات

تصحیح خطای کوانتومی یا کیو.ای.سی، با اطمینان از صحت و بازیابی اطلاعات کوانتومی، با بازیابی اطلاعات مرتبط است. امکان تشخیص و تصحیح خطا در کیویته‌ها را فراهم می‌کند که برای بازیابی اطلاعات کوانتومی دقیق، پس از محاسبه یا انتقال، ضروری است (Aoki et al., 2009). از طرفی قضیه عدم همانندسازی، کپی کردن حالات کوانتومی ناشناخته را ممنوع می‌کند. علاوه بر این، وجود نویز هم‌دوس در سیستم‌های کوانتومی و تأثیرش بر بازیابی اطلاعات را باید در نظر داشت (Zhao & Liu, 2023).

این مفهوم با شکندگی ذاتی حالات کوانتومی و ناهم‌دوسی که می‌تواند اطلاعات را فرو شکند، مبارزه می‌کند. توسعه کدهای تصحیح خطای کوانتومی و درک عملکرد آن‌ها تحت مدل‌های نویز مختلف برای پیشبرد رایانش کوانتومی و بازیابی دقیق اطلاعات کوانتومی حیاتی است. طراحی کدهای تصحیح خطا، مانند کدهای تثبیت‌کننده^۱ نظیر کد سطح^۲، با هدف افزایش پایداری مدارهای کوانتومی صورت می‌گیرد. آن‌هم با تعیین تعداد خطاهای قابل تصحیح و کمیت‌سازی احتمال وقوع خطاهایی که از طریق پارامتری مانند فاصله کد یا احتمال خطا، انجام می‌شود (Gushanskiy et al., 2022). تصحیح خطای کوانتومی نه تنها از اطلاعات کوانتومی در طول ارتباطات و محاسبات کوانتومی محافظت می‌کند، بلکه به طراحی تاب‌آور در برابر خطا نیز کمک می‌کند و امکان تصحیح خطاها را بدون برهم‌زدن حالت محافظت‌شده، فراهم می‌سازد.

بحث و نتیجه‌گیری

این پژوهش با هدف تحلیل و برجسته‌سازی قابلیت‌های بنیادین نظریه کوانتومی اطلاعات در حوزه بازیابی اطلاعات انجام شد. نتایج این مطالعه تحلیلی-مروری نشان می‌دهد که این حوزه نوظهور، صرفاً یک بهبود تدریجی بر روش‌های سنتی نیست، بلکه پتانسیل ایجاد یک تحول پارادایمی در نحوه بازنمایی، پردازش و بازیابی اطلاعات را داراست. در ادامه، ضمن مقایسه رویکرد کوانتومی با چالش‌های ذاتی مدل‌های کلاسیک، یافته‌های پژوهش در راستای اهداف آن تشریح شده و

چشم‌انداز آینده و خلأهای تحقیقاتی موجود ترسیم می‌گردد. مقاله حاضر در دو بخش تنظیم شد و توسعه یافت. در بخش اول مفاهیم اساسی نظریه کوانتومی اطلاعات تشریح شد، در ادامه و در بخش دوم با تعمیم این اصول به مفهوم بازیابی اطلاعات، سعی شد تا علاوه بر کشف ارتباط منطقی میان این دو حوزه، نگاهی به پیشرفت‌های موجود در این زمینه نیز بشود. تحلیل‌های مبتنی بر متون در این مطالعه، فرصت‌ها و موانع پیوست دو حوزه را برجسته کرد.

مقایسه رویکردهای کوانتومی و سنتی؛ فراتر از محدودیت‌های کلاسیک

ذکر شد که الگوریتم‌های بازیابی اطلاعات سنتی، با وجود کارایی بالا در بسیاری از کاربردها، با چالش‌های بنیادینی مواجه هستند. مدل‌های کلاسیک مانند فضای برداری یا مدل‌های احتمالی، اغلب در درک و مدل‌سازی روابط معنایی پیچیده و وابستگی‌های متنی^۱ دچار محدودیت هستند (Melucci, 2015; Tunkelang & Thelwall, 2009; Büttcher et al., 2010; Gudivada et al., 2018). این مدل‌ها اطلاعات را در فضایی کلاسیک و قطعی بازنمایی می‌کنند که در آن یک سند یا به یک پرسش مرتبط است یا خیر. این رویکرد دو گانه، از پس ظرافت‌های نیاز اطلاعاتی کاربر و ابهام ذاتی زبان طبیعی به خوبی برنمی‌آید.

در مقابل، همان‌طور که در این مقاله نشان داده شد، نظریه کوانتومی اطلاعات چارچوبی ذاتاً احتمالی و چندوجهی ارائه می‌دهد. اصل برهم‌نهی به یک سند اجازه می‌دهد تا به‌طور هم‌زمان در چندین حالت ارتباط با یک پرسش قرار گیرد (Dmytrovych & Volodymyrovich, 2017; Gudder, 1970; Henderson et al., 2020) و این امر بازنمایی بسیار غنی‌تری از عدم قطعیت را ممکن می‌سازد. علاوه بر این، پدیده درهم‌تنیدگی می‌تواند برای مدل‌سازی وابستگی‌های غیر موضعی بین مفاهیم و واژگان در اسناد به کار رود (Das et al., 2022)؛ قابلیت که پیاده‌سازی آن در مدل‌های کلاسیک بسیار دشوار و پرهزینه است. همچنین ذکر شد که الگوریتم‌هایی مانند الگوریتم گرور نیز مزیت محاسباتی چشمگیری در سرعت جستجو در پایگاه‌های داده نامرتب ارائه می‌دهند که به‌طور مستقیم بر کارایی بازیابی اطلاعات تأثیرگذار است (Kwon et al., 2022).

ارتباط یافته‌ها با اهداف پژوهش

هدف اصلی این پژوهش، پاسخ به این پرسش بود که قابلیت‌های نظریه کوانتومی اطلاعات در بازیابی اطلاعات چیست. یافته‌های این مقاله به‌طور مستقیم به این هدف پاسخ می‌دهند:

- در سطح بازنمایی اطلاعات: تحلیل شد که چگونه کیویت‌ها به جای بیت‌های کلاسیک، می‌توانند اطلاعات را در فضایی بسیار بزرگ‌تر و پیچیده‌تر ذخیره و پردازش کنند.
- در سطح پردازش و رتبه‌بندی: نشان داده شد که الگوریتم‌های کوانتومی می‌توانند فرایندهای محاسباتی سنگین در بازیابی اطلاعات را تسریع بخشند و چارچوب‌های جدیدی برای رتبه‌بندی اسناد بر اساس احتمالات کوانتومی ارائه دهند.
- در سطح امنیت و دقت: بررسی مفهیمی چون تصحیح خطای کوانتومی و رمزنگاری کوانتومی نشان داد که این رویکرد می‌تواند به‌طور هم‌زمان دقت و امنیت بازیابی اطلاعات را، به‌ویژه در سیستم‌های حساس و توزیع‌شده، تضمین کند.

بنابراین، این پژوهش با مرتبط ساختن اصول نظری اطلاعات کوانتومی، به نیازهای عملی حوزه بازیابی اطلاعات، به هدف خود دست یافته و نشان داد که این تلاقی، راه را برای نسل جدیدی از سیستم‌های بازیابی اطلاعات هوشمندتر، سریع‌تر و امن‌تر هموار می‌کند.

چشم‌انداز آینده و تحولات پیش رو

با پیشرفت رایانش کوانتومی، می‌توان انتظار داشت که شاهد توسعه فناوری‌های نوینی باشیم که مستقیماً بر حوزه بازیابی اطلاعات تأثیر می‌گذارند. سیستم‌های بازیابی اطلاعات آگاه به زمینه و کاربر که قادرند حالت شناختی و نیاز اطلاعاتی پویای کاربر را مدل‌سازی کنند، یکی از این چشم‌اندازهاست. اینکه کاربر بدون فاش کردن هویت یا محتوای پرسش خود، از یک پایگاه داده اطلاعات دریافت کند؛ امری است که امنیت و حریم خصوصی را در عصر دیجیتال متحول خواهد کرد. حرکت جامعه علمی به سمت چارچوب‌های ارزیابی عملی مانند کوانتوم سی.آل.ای.اف (Ferrari Dacrema et al., 2024) و ترکیب مدل‌های عصبی با الهامات کوانتومی (Uprety et al., 2021)، نشان می‌دهد که این چشم‌اندازها به تدریج در حال نزدیک شدن به واقعیت هستند. همچنین، موتورهای جستجوی کوانتومی قادر خواهند بود مجموعه داده‌های عظیم و بدون ساختار را با سرعتی غیرقابل تصور برای الگوریتم‌های کلاسیک تحلیل کنند. درنهایت، پروتکل‌های بازیابی اطلاعات محرمانه کوانتومی این امکان را فراهم می‌آورند که کاربر بدون فاش کردن هویت یا محتوای پرسش خود، از یک پایگاه داده اطلاعات دریافت کند؛ امری که امنیت و حریم خصوصی را در عصر دیجیتال متحول خواهد کرد. زمینه مهم دیگری که باید با در نظر داشتن تأثیرات رایانش کوانتومی بررسی شود، تحریف‌های شناختی در مراحل مختلف بازیابی اطلاعات است، ضرورت توجه به این مسئله برای طراحان نظام‌های کلاسیک بازیابی اطلاعات بررسی شده است (هلاکویان و همکاران، ۱۴۰۵).

خلاهای پژوهشی و مسیرهای آینده

علی‌رغم پتانسیل‌های ذکر شده، مسیر کاربردی‌سازی این نظریه همچنان با چالش‌ها و پرسش‌های بی‌پاسخ همراه است که خود زمینه‌ساز پژوهش‌های آتی هستند:

- توسعه مدل‌های ترکیبی: یک خلا تحقیقاتی مهم، طراحی مدل‌های ترکیبی است که از قدرت پردازش موازی کامپیوترهای کوانتومی برای وظایف سنگین (مانند رتبه‌بندی اولیه) و از زیرساخت‌های کلاسیک برای سایر وظایف (مانند پردازش زبان طبیعی) به‌طور هم‌زمان استفاده کنند.
 - طراحی معیارهای ارزیابی کوانتومی: معیارهای ارزیابی سنتی مانند دقت و بازخوانی ممکن است برای سنجش کارایی سیستم‌های بازیابی اطلاعات کوانتومی که خروجی‌های احتمالی تولید می‌کنند، کافی نباشند. تحقیق برای توسعه معیارهای ارزیابی جدید یک نیاز ضروری است.
 - شبیه‌سازی و پیاده‌سازی عملی: بیشتر پژوهش‌های کنونی ماهیت نظری دارند. انجام تحقیقات بیشتر در زمینه شبیه‌سازی الگوریتم‌های بازیابی اطلاعات کوانتومی بر روی سخت‌افزارهای کوانتومی موجود و بررسی تأثیر نویز بر عملکرد آن‌ها، یک گام حیاتی به‌سوی کاربردی‌سازی این حوزه است.
- در پایان، این پژوهش تأکید می‌کند که نظریه کوانتومی اطلاعات، با ارائه زبانی جدید برای توصیف اطلاعات و عدم قطعیت، منبع الهام‌بخش و قدرتمندی برای آینده حوزه بازیابی اطلاعات خواهد بود.

ملاحظات اخلاقی

پیروی از اصول اخلاق پژوهش

نویسندگان اصول اخلاقی را در انجام و انتشار این پژوهش علمی رعایت نموده‌اند و این موضوع مورد تأیید همه آن‌هاست.

مشارکت نویسندگان

مفهوم‌سازی، پوریا راحت و محسن حاجی زین‌العابدینی؛ روش‌شناسی، پوریا راحت؛ نرم‌افزار، پوریا راحت؛ اعتبارسنجی، پوریا راحت و محسن حاجی زین‌العابدینی؛ تحلیل داده‌ها، پوریا راحت؛ تحقیق و بررسی، پوریا راحت؛ منابع، پوریا راحت؛ سازمان‌دهی داده‌ها، پوریا راحت؛ نگارش - تهیه پیش‌نویس اصلی، پوریا راحت؛ نگارش - بازبینی و ویرایش، پوریا راحت و محسن حاجی زین‌العابدینی؛ بصری‌سازی، پوریا راحت؛ نظارت و راهنمایی، محسن حاجی زین‌العابدینی؛ مدیریت پروژه، پوریا راحت. کلیه نویسندگان نسخه منتشر شده مقاله را مطالعه و با آن موافقت کرده‌اند.

دسترسی به داده‌ها

پژوهش داده‌ای ندارد.

تعارض منافع

بنا بر اظهار نویسندگان این مقاله تعارض منافع ندارد.

حامی مالی

مقاله حاضر بدون حمایت مالی انجام شد.

سپاسگزاری

از کلیه حامیان مادی و معنوی که در انجام پژوهش حاضر همراهی داشتند، نهایت قدردانی و تشکر را ابراز می‌نمایم.

ORCID

Pourya Rahat



<https://orcid.org/0000-0002-8493-3881>

Mohsen Haji Zeinolabedini



<https://orcid.org/0000-0003-4226-9377>

- تقی‌زاده کورایم، فرنز، کاباران‌زاد قدیم، محمدرضا، و موسوی، سیدعبداله امین. (۱۴۰۵). استفاده از انتخابگرهای پویا و هوش مصنوعی برای مقاوم‌سازی کدهای بازیابی اطلاعات وب. *فصلنامه بازیابی دانش و نظام‌های معنایی*، ۱۳(۴۶)، ۱-۲۴. <https://doi.org/10.22054/jks.2026.89870.1753>
- هلاکویان، سیده نجمه، بهزادی، حسن، و ارسطوپور، شعله. (۱۴۰۵). تأثیر تحریف‌های شناختی بر بازیابی اطلاعات: یک تحلیل رفتاری در مراحل مختلف جستجو. *فصلنامه بازیابی دانش و نظام‌های معنایی*، ۱۲(۴۵)، ۱-۳۴. <https://doi.org/10.22054/jks.2025.86648.1727>

References

- Aerts, D., Broekaert, J., Sozzo, S., & Veloz, T. (2013). Meaning-focused and quantum-inspired information retrieval. In *Quantum interaction* (pp. 69–80). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-54943-4_7
- Alodjants, A. P., Avdyushina, A. E., Tsarev, D. V., Bessmertny, I. A., & Khrennikov, A. Y. (2024). Quantum approach for contextual search, retrieval, and ranking of classical information. *Entropy*, 26(10), Article 862. <https://doi.org/10.3390/e26100862>
- Anza, F., & Crutchfield, J. P. (2022). Quantum information dimension and geometric entropy. *PRX Quantum*, 3(2), Article 020355. <https://doi.org/10.1103/PRXQuantum.3.020355>
- Aoki, T., Takahashi, G., Kajiya, T., Yoshikawa, J.-I., Braunstein, S. L., van Loock, P., & Furusawa, A. (2009). Quantum error correction beyond qubits. *Nature Physics*, 5(8), 541–546. <https://doi.org/10.1038/nphys1309>
- Archuadze, M., Besiashvili, G., Khachidze, M., & Kervalishvili, P. (2012). Quantum concepts in information retrieval. In *2012 6th International Conference on Application of Information and Communication Technologies (AICT)* (pp. 1–4). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICAICT.2012.6398524>
- Ashoori, E., & Rudolph, T. (2018). *Commentary on quantum-inspired information retrieval*. arXiv. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1809.05685>
- Averin, D. (1999). Quantum computation: Solid-state qubits under control. *Nature*, 398(6730), 748–749. <https://doi.org/10.1038/19622>
- Baaquie, B. E., & Kwek, L.-C. (2023). Quantum gates and circuits. In *Quantum computers* (pp. 139–153). Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-19-7517-2_7
- Bandyopadhyay, S. (2020). Impossibility of creating a superposition of unknown quantum states. *Physical Review A*, 102(5), Article 050202. <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.102.050202>
- Bassi, R., Zhang, Q., Gatto, A., Tornatore, M., & Verticale, G. (2023). Quantum key distribution with trusted relay using an ETSI-compliant software-defined controller. In *2023 19th International Conference on the Design of Reliable Communication Networks (DRCN)* (pp. 1–7). IEEE. <https://doi.org/10.1109/DRCN57075.2023.10108347>
- Baudot, P., & Bennequin, D. (2015). The homological nature of entropy. *Entropy*, 17(5), 3253–3318. <https://doi.org/10.3390/e17053253>
- Benhelm, J., Kirchmair, G., Gerritsma, R., Zähringer, F., Monz, T., Schindler, P., ... & Blatt, R. (2009). 40Ca⁺ quantum bits for quantum information processing. *Physica Scripta*, 2009(T137), Article 014008. <https://doi.org/10.1088/0031-8949/2009/T137/014008>
- Bergou, J. A., & Hillery, M. S. (2013). *Introduction to the theory of quantum information processing*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-1-4614-7092-2>
- Bernstein, B. (2023). Quantum cryptography. In *Quantum computing: Physics, blockchains, and cryptography* (pp. 241–264). Wiley. <https://doi.org/10.1002/9781119905172.ch14>
- Brańczyk, A., Mendonca, P., Gilchrist, A., Doherty, A., & Bartlett, S. (2006). Quantum control of a single qubit. *Physical Review A*, 75(1), Article 012329. <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.75.012329>

- Buot, F. A., Otadoy, R. E. S., & Bacalla, X. L. (2023). *An inverter-chain link implementation of quantum teleportation and superdense coding*. arXiv. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2312.03276>
- Büttcher, S., Clarke, C. L., & Cormack, G. V. (2010). *Information retrieval: Implementing and evaluating search engines*. MIT Press.
- Caleffi, M., & Cacciapuoti, A. S. (2019). Quantum switch for the quantum internet: Noiseless communications through noisy channels. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 38(3), 575–588. <https://doi.org/10.1109/JSAC.2020.2969035>
- Cole, B., Williams, J., King, B., Sherwin, M., & Stanley, C. (2001). Coherent manipulation of semiconductor quantum bits with terahertz radiation. *Nature*, 410(6824), 60–63. <https://doi.org/10.1038/35065032>
- Conway, J., & Kochen, S. (2006). The free will theorem. *Foundations of Physics*, 36(10), 1441–1473. <https://doi.org/10.1007/s10701-006-9068-6>
- Conway, J., & Kochen, S. (2009). The strong free will theorem. *Notices of the AMS*, 56(2), 226–232.
- Cozzolino, D., Bacco, D., Lio, B., Ingerslev, K., Ding, Y., Dalgaard, K., ... & Oxenløwe, L. (2018). Orbital angular momentum states enabling fiber-based high-dimensional quantum communication. *Physical Review Applied*, 11(6), Article 064058. <https://doi.org/10.1103/PhysRevApplied.11.064058>
- Das, D., Malapaka, S. K., Bapat, J., & Das, D. (2022). A proactive connection setup mechanism for large quantum networks. In *2022 IEEE International Conference on Electronics, Computing and Communication Technologies (CONECCT)* (pp. 1–6). IEEE. <https://doi.org/10.1109/CONECCT55679.2022.9865700>
- De Julio, M. (2022). On quantum entropy. *Entropy*, 24(10), Article 1341. <https://doi.org/10.3390/e24101341>
- Devitt, S. J., Nemoto, K., & Munro, W. J. (2009). *Quantum error correction for beginners*. arXiv. <https://doi.org/10.48550/arXiv.0905.2794>
- Dmytrovych, B. V., & Volodymyrovich, B. V. (2017). Quantum-mechanical aspects of the L. Pauling's resonance theory. *SSRN Electronic Journal*. <https://doi.org/10.2139/ssrn.3065282>
- Duff, G. F. D. (1964). On the principle of superposition in quantum mechanics. *Canadian Mathematical Bulletin*, 7(1), 77–83. <https://doi.org/10.4153/CMB-1964-010-5>
- Dvali, G. (2021). *Bounds on quantum information storage and retrieval*. arXiv. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2105.00995>
- Ellerman, D. (2018). Logical entropy: Introduction to classical and quantum logical information theory. *Entropy*, 20(9), Article 679. <https://doi.org/10.3390/e20090679>
- Emeriau, P.-E., Howard, M., & Mansfield, S. (2020). *Quantum advantage in information retrieval*. arXiv. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2009.05581>
- Ferrari Dacrema, M., Pasin, A., Cremonesi, P., & Ferro, N. (2024). Using and evaluating quantum computing for information retrieval and recommender systems. In *Proceedings of the 47th International ACM SIGIR Conference on Research and Development in Information Retrieval* (pp. 3017–3020). ACM. <https://doi.org/10.1145/3626772.3661378>
- Flarend, A., & Hilborn, B. (2022). Qubits and quantum states. In *Quantum computing: From Alice to Bob* (pp. 25–43). Oxford University Press. <https://doi.org/10.1093/oso/9780192857972.003.0004>
- Frigyik, A. (2022). *Quantum cryptography: Quantum key distribution, a non-technical approach*. arXiv. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2211.17089>
- Gerry, C. C., & Bruno, K. M. (2013). Quantum information, quantum cryptography, and quantum teleportation. In *The quantum divide* (pp. 132–148). Oxford University Press. <https://doi.org/10.1093/acprof:oso/9780199666560.003.0006>
- Giri, P. R., & Korepin, V. E. (2017). A review on quantum search algorithms. *Quantum Information Processing*, 16(12), Article 315. <https://doi.org/10.1007/s11128-017-1768-7>
- Girling, M., Cîrstoiu, C., & Jennings, D. (2023). *A simple formulation of no-cloning and no-hiding that admits efficient and robust verification*. arXiv. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2307.03197>
- Giroti, I., & Malhotra, M. (2022). Quantum cryptography: A pathway to secure communication. In *2022 IEEE International Conference on Current Trends in Advanced Computing (ICCTAC)* (pp. 1–6). IEEE. <https://doi.org/10.1109/CSITSS57437.2022.10026388>

- Gudder, S. P. (1970). A superposition principle in physics. *Journal of Mathematical Physics*, 11(3), 1037–1040. <https://doi.org/10.1063/1.1665193>
- Gudivada, V. N., Rao, D., & Gudivada, A. R. (2018). Information retrieval: Concepts, models, and systems. In *Handbook of statistics* (Vol. 38, pp. 331–401). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/bs.host.2018.07.009>
- Guowen, W. (2005). *Locality of quantum entanglement*. arXiv. <https://doi.org/10.48550/arXiv.quant-ph/0512195>
- Gushanskiy, S., Potapov, V., & Bozhich, V. I. (2022). Research and development of a quantum code for error correction. *Izvestiya SFedU. Engineering Sciences*, (3), 129–139. <https://doi.org/10.18522/2311-3103-2022-3-129-139>
- Halakoyan, S. N., Behzadi, H., & Arastoopoor, S. (2026). The influence of cognitive distortions on information retrieval: A behavioral analysis across search stages. *Knowledge Retrieval and Semantic Systems*, 12(45), 1–34. <https://doi.org/10.22054/jks.2025.86648.1727> [In Persian]
- Hall, M. J. (1994). Gaussian noise and quantum-optical communication. *Physical Review A*, 50(4), 3295–3303. <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.50.3295>
- Hamidi-rad, S., & Kaewell, J. D. (2022). Quantum channel decoding. In *2022 IEEE International Conference on Quantum Computing and Engineering (QCE)* (pp. 675–676). IEEE. <https://doi.org/10.1109/QCE53715.2022.00141>
- Henderson, L. J., Belenchia, A., Castro-Ruiz, E., Budroni, C., Zych, M., Brukner, Č., & Mann, R. B. (2020). Quantum temporal superposition: The case of quantum field theory. *Physical Review Letters*, 125(13), Article 131602. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.125.131602>
- Hirche, C. (2015). *Polar codes in quantum information theory*. arXiv. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1501.03737>
- Hirche, C., Morgan, C., & Wilde, M. M. (2016). Polar codes in network quantum information theory. *IEEE Transactions on Information Theory*, 62(2), 915–924. <https://doi.org/10.1109/TIT.2016.2514319>
- Holbrook, J. A., Kribs, D. W., Laflamme, R., & Poulin, D. (2005). Noiseless subsystems for collective rotation channels in quantum information theory. *Integral Equations and Operator Theory*, 51(2), 215–234. <https://doi.org/10.1007/s00020-004-1345-1>
- Holevo, A. S. (1997). *Coding theorems for quantum communication channels*. arXiv. <https://doi.org/10.48550/arXiv.quant-ph/9708046>
- Horodecki, M., & Horodecki, R. (1997). *Are there basic laws of quantum information processing?* arXiv. <https://doi.org/10.48550/arXiv.quant-ph/9705003>
- Jiang, Y., Zhang, P., Gao, H., & Song, D. (2020). A quantum interference inspired neural matching model for ad-hoc retrieval. In *Proceedings of the 43rd International ACM SIGIR Conference on Research and Development in Information Retrieval* (pp. 19–28). ACM. <https://doi.org/10.1145/3397271.3401089>
- Kavuri, R., Voruganti, S., Mohammed, S., Inapanuri, S., & Harish Goud, B. (2023). Quantum cryptography with an emphasis on the security analysis of QKD protocols. In *Evolution and applications of quantum computing* (pp. 265–288). Wiley. <https://doi.org/10.1002/9781119905172.ch16>
- Khalifa, O. O., Amirah bt Sharif, N., Saeed, R. A., Abdel-Khalek, S., Alharbi, A. N., & Alkathiri, A. A. (2021). Digital system design for quantum error correction codes. *Contrast Media & Molecular Imaging*, 2021, Article 1101911. <https://doi.org/10.1155/2021/1101911>
- Khan, K. (2023). Error correction using quantum computation. *Journal of Digital Science*, 5(1), 16–28. https://doi.org/10.33847/2686-8296.5.1_2
- Khrennikov, A. (2019). Basics of quantum theory for quantum-like modeling information retrieval. In *Quantum-like models for information retrieval and decision-making* (pp. 67–85). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-25913-6_4
- Kohnle, A., & Deffebach, E. (2015). *Investigating student understanding of quantum entanglement*. arXiv. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1512.02346>
- Kok, P., & Lovett, B. W. (2010). Quantum information processing. In *Introduction to optical quantum information processing* (pp. 48–89). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9781139193658.003>

- Korsbakken, J. I., Wilhelm, F. K., & Whaley, K. B. (2009). Electronic structure of superposition states in flux qubits. *Physica Scripta*, 2009(T137), Article 014022. <https://doi.org/10.1088/0031-8949/2009/T137/014022>
- Kovachy, T., Asenbaum, P., Overstreet, C., Donnelly, C. A., Dickerson, S. M., Sugarbaker, A., ... & Kasevich, M. A. (2015). Quantum superposition at the half-metre scale. *Nature*, 528(7583), 530–533. <https://doi.org/10.1038/nature16155>
- Kretschmann, D., Kribs, D. W., & Spekkens, R. W. (2008). Complementarity of private and correctable subsystems in quantum cryptography and error correction. *Physical Review A*, 78(3), Article 032330. <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.78.032330>
- Kurizki, G., & Gordon, G. (2020). What is a quantum superposition? In *The quantum matrix* (pp. 21–38). Oxford University Press. <https://doi.org/10.1093/oso/9780198787464.003.0002>
- Kwon, H., & Bae, J. (2022). Quantum amplitude amplification operators: Exact quantum search. In K. S. Deacon & R. E. Meyers (Eds.), *Quantum communications and quantum imaging XX* (Vol. 12224, pp. 10–17). SPIE. <https://doi.org/10.1117/12.2626449>
- Lebedev, A., & Khrennikov, A. (2020). *Introductory review to quantum information retrieval*. arXiv. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2008.13541>
- Lent, C. S. (2019). Information and entropy in physical systems. In *Energy limits in computation* (pp. 1–63). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-93458-7_1
- Li, J. (2020). Some progress on quantum error correction for discrete and continuous error models. *IEEE Access*, 8, 46998–47012. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2977344>
- Lima, F. C. E., Moreira, A. R. P., Almeida, C. A. S., Edet, C. O., & Ali, N. (2023). Quantum information entropy of a particle trapped by the Aharonov–Bohm-type effect. *Physica Scripta*, 98(6), Article 065111. <https://doi.org/10.1088/1402-4896/acd309>
- Liu, Z., Xie, Q., Zha, Y., & Dong, Y. (2022). Quantum delegated computing ciphertext retrieval scheme. *Journal of Applied Physics*, 131(4), Article 044401. <https://doi.org/10.1063/5.0080097>
- Maiolo, T. A. C., Della Sala, F., Martina, L., & Soliani, G. (2006). Entanglement of electrons in interacting molecules. *Theoretical and Mathematical Physics*, 152(2), 1184–1191. <https://doi.org/10.1007/s11232-007-0098-9>
- Malavolta, G., & Wahler, M. (2023). Non-interactive quantum key distribution. *IACR Cryptology ePrint Archive*, 2023, Article 618. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2304.02999>
- Mastriani, M. (2023). Multi-qubit teleportation and multi-bit superdense coding via cascade splitting. *Optical and Quantum Electronics*, 55(11), Article 1026. <https://doi.org/10.1007/s11082-023-05295-8>
- Melnikov, D., Mironov, A., Mironov, S., Morozov, A., & Morozov, A. (2019). From topological to quantum entanglement. *Journal of High Energy Physics*, 2019(5), Article 116. [https://doi.org/10.1007/JHEP05\(2019\)116](https://doi.org/10.1007/JHEP05(2019)116)
- Melucci, M. (2013). Deriving a quantum information retrieval basis. *The Computer Journal*, 56(11), 1279–1291. <https://doi.org/10.1093/comjnl/bxs095>
- Melucci, M. (2015). Elements of information retrieval. In *Introduction to information retrieval and quantum modeling* (pp. 11–32). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-662-48313-8_1
- Melvin, T. (2023). Mechanizing quantum error correction through entangled quantum machine learning techniques. In *Quantum computers: From fundamentals to technology*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.1002876>
- Mizukami, K., & Koga, A. (2023). Quantum algorithm for the microcanonical thermal pure quantum state method. *Physical Review A*, 108(1), Article 012404. <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.108.012404>
- Muralidharan, S., & Panigrahi, P. K. (2008). Perfect teleportation, quantum-state sharing, and superdense coding through a genuinely entangled five-qubit state. *Physical Review A*, 77(3), Article 032321. <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.77.032321>
- Naskar, S. (2023). *Quantum algorithm for researching the nearest (QARN)*. arXiv. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2304.10976>
- Nema, A., Maity, A. G., Strelchuk, S., & Elkouss, D. (2023). *Noise is resource-contextual in quantum communication*. arXiv. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2305.00680>

- Nguyen, T., Paik, I., & Thang, T. (2022). Multi-feature machine learning with quantum superposition. In *2022 IEEE International Conference on Consumer Electronics-Asia (ICCE-Asia)* (pp. 1–4). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICCE-Asia57006.2022.9954778>
- Nielsen, M. A. (2000). *Quantum information theory*. arXiv. <https://doi.org/10.48550/arXiv.quant-ph/0011036>
- Nielsen, M. A., & Chuang, I. L. (2010). *Quantum computation and quantum information* (10th anniversary ed.). Cambridge University Press.
- Niknamian, S., Zaminpira, S., & Seneff, S. (2019). *Quantum entanglement in theoretical physics as a new insight into cancer biology*. viXra.
- Noh, K., Pirandola, S., & Jiang, L. (2020). Enhanced energy-constrained quantum communication over bosonic Gaussian channels. *Nature Communications*, 11(1), Article 457. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-14329-6>
- Ohya, M., & Watanabe, N. (2010). Quantum entropy and its applications to quantum communication and statistical physics. *Entropy*, 12(5), 1194–1245. <https://doi.org/10.3390/e12051194>
- Oszmaniec, M., Grudka, A., Horodecki, M., & Wójcik, A. (2016). Creating a superposition of unknown quantum states. *Physical Review Letters*, 116(11), Article 110403. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.116.110403>
- Pavličko, J., & Ziman, M. (2022). *Robustness of optimal probabilistic storage and retrieval of unitary channels to noise*. arXiv. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2211.07079>
- Penchev, V. (2020). Main concepts in philosophy of quantum information. *SSRN Electronic Journal*. <https://doi.org/10.2139/ssrn.3630828>
- Perlner, R., & Liu, Y.-K. (2017). *Thermodynamic analysis of classical and quantum search algorithms*. arXiv. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1709.10510>
- Piowowski, B., Frommholz, I., Lalmas, M., & van Rijsbergen, K. (2010). What can quantum theory bring to information retrieval. In *Proceedings of the 19th ACM International Conference on Information and Knowledge Management (CIKM)* (pp. 59–68). ACM. <https://doi.org/10.1145/1871437.1871450>
- Polzik, E. (2002). Atomic entanglement on a grand scale. *Physics World*, 15(9), Article 30. <https://doi.org/10.1088/2058-7058/15/9/30>
- Rahmi, M., Shamanta, D., & Tasnim, A. (2012). Basic quantum algorithms and applications. *International Journal of Computer Applications*, 56(4), 26–31. <https://doi.org/10.5120/8880-2868>
- Ralescu, A., & Mayfield, L. (2005). Generalization of common gates for quantum computation. In *NAFIPS 2005 - 2005 Annual Meeting of the North American Fuzzy Information Processing Society* (pp. 509–514). IEEE. <https://doi.org/10.1109/NAFIPS.2005.1548607>
- Saha, D., & Panigrahi, P. K. (2012). N-qubit quantum teleportation, information splitting and superdense coding through the composite GHZ–Bell channel. *Quantum Information Processing*, 11(2), 615–628. <https://doi.org/10.1007/s11128-011-0270-x>
- Schumacher, B., & Nielsen, M. A. (1996). Quantum data processing and error correction. *Physical Review A*, 54(4), 2629–2635. <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.54.2629>
- Shrivastava, P., Soni, K. K., & Rasool, A. (2019). Evolution of quantum computing based on Grover's search algorithm. In *2019 10th International Conference on Computing, Communication and Networking Technologies (ICCCNT)* (pp. 1–6). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICCCNT45670.2019.8944676>
- Sinha, S. (2023). *Effect of quantum information scrambling on bound entangled states*. arXiv. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2311.16209>
- Slepoy, A. (2006). *Quantum gate decomposition algorithms* (Report No. SAND2006-6962). Sandia National Laboratories. <https://doi.org/10.2172/889415>
- Song, J., Lu, B., Liu, L., & Wang, C. (2023). Noisy quantum channel characterization using quantum neural networks. *Electronics*, 12(11), Article 2430. <https://doi.org/10.3390/electronics12112430>
- Song, S. H., Le Gall, F., & Hayashi, M. (2023). *Prior entanglement exponentially improves one-server quantum private information retrieval for quantum messages*. arXiv. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2305.15875>

- Song, S., & Hayashi, M. (2021). Quantum private information retrieval for quantum messages. In *2021 IEEE International Symposium on Information Theory (ISIT)* (pp. 1260–1265). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ISIT45174.2021.9517794>
- Taghizadeh Kourayem, F., Kabaranzad Ghadim, M., & Mousavi, S. A. A. (2026). Using dynamic selectors and artificial intelligence to harden web data retrieval codes. *Knowledge Retrieval and Semantic Systems*, 13(46), 1–24. <https://doi.org/10.22054/jks.2026.89870.1753> [In Persian]
- Techateerawat, P. (2012). Network management system for quantum key distribution. In *2012 Ninth International Conference on Information Technology - New Generations* (pp. 415–420). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ITNG.2012.58>
- Terhal, B. M. (2015). Quantum error correction for quantum memories. *Reviews of Modern Physics*, 87(2), 307–346. <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.87.307>
- Tsallis, C. (2022). Entropy. In *Thermodynamic weirdness* (pp. 11–24). MIT Press. <https://doi.org/10.7551/mitpress/11924.003.0011>
- Tunkelang, D., & Thelwall, M. (2009). *Faceted search* (Synthesis Lectures on Information Concepts, Retrieval, and Services). Morgan & Claypool Publishers.
- Upreti, S., Gkoumas, D., & Song, D. (2021). A survey of quantum theory inspired approaches to information retrieval. *ACM Computing Surveys*, 53(5), 1–38. <https://doi.org/10.1145/3402179>
- Uttam, S. (2012). Quantum information theory. In *Quantum information processing and quantum error correction* (pp. 457–492). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-385491-9.00012-5>
- Van Rijsbergen, C. J. K. (2011). What is quantum information retrieval? In G. Amati & F. Crestani (Eds.), *Advances in information retrieval theory* (Vol. 6931, p. 2). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-23318-0_2
- Wang, X. (2021). Quantum entanglement results from quantum state transition at fast-than-light speed with matter wave's phase velocity. *Physical Science & Biophysics Journal*, 5(2), 1–4. <https://doi.org/10.23880/psbj-16000179>
- Wang, X. M. (2019). *Entropy gain and information loss by measurements*. arXiv. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1908.10364>
- Wilde, M. M. (2013). Quantum information and entropy. In *Quantum information theory* (pp. 252–291). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9781139525343.012>
- Wong, B. (2020). *On quantum entanglement*. viXra.
- Wootton, J. (2024). Circuit model of quantum computation. In *Oxford research encyclopedia of physics*. Oxford University Press. <https://doi.org/10.1093/acrefore/9780190871994.013.30>
- Xue, Y. (2021). Basic theory of quantum entanglement and the possibility of passing on information faster than the speed of light. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 658(1), Article 012001. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/658/1/012001>
- Yang, Y. G., Yang, P. Z., Xu, G. B., Zhou, Y. H., & Shi, W. M. (2023). Quantum private information retrieval over a collective noisy channel. *Modern Physics Letters A*, 38(01), 2350001. <https://doi.org/10.1142/S0217732323500013>
- Zeilinger, A. (1998). Quantum entanglement: A fundamental concept finding its applications. *Physica Scripta*, 1998(T76), 203–209. <https://doi.org/10.1238/Physica.Topical.076a00203>
- Zhan, Y.-B., Zhang, L.-L., & Zhang, Q.-Y. (2009). Quantum secure direct communication by entangled qutrits and entanglement swapping. *Optics Communications*, 282(23), 4633–4636. <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2009.08.024>
- Zhao, Y. (2023). *Benchmarking machine learning models for quantum error correction*. arXiv. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2311.11167>
- Zhao, Y., & Liu, D. (2023). *Lattice gauge theory and topological quantum error correction with quantum deviations in the state preparation and error detection*. Research Square. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-2615571/v1>
- Zuccon, G., & Azzopardi, L. (2010). Using the quantum probability ranking principle to rank interdependent documents. In C. Gurrin et al. (Eds.), *Advances in information retrieval* (Vol. 5993, pp. 357–369). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-12275-0_32