

## Antara Teori dan Realitas: Refleksi Filosofis dan Interpretasi Kosmologi Kuantum

M. Abu Kamal<sup>1</sup>, Fitriya S<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Teknologi Informasi, Fakultas Teknik, Universitas Annuqayah, Sumenep, Indonesia

<sup>2</sup>Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Annuqayah, Sumenep, Indonesia

Email: <sup>1</sup>akmal09kasya@gmail.com, <sup>2</sup>fitriya.s.1991@gmail.com

### Abstract

*Einstein's General Theory of Relativity has revolutionized our understanding of gravity by replacing Newtonian gravitational law, which regarded gravity as an attractive force between two masses. In GR, gravity is seen as a manifestation of the geometry of spacetime, influenced by the distribution of mass and energy. This theory successfully explains phenomena such as the bending of light by massive objects and the prediction of the existence of black holes. Meanwhile, Quantum Mechanics, rooted in the works of Max Planck, Albert Einstein, Niels Bohr, and Werner Heisenberg, reveals a microscopic world filled with probabilities and uncertainties, as well as phenomena such as wave-particle duality and Heisenberg's uncertainty principle. While both theories have successfully explained phenomena at macroscopic and microscopic scales, the inability to unify General Relativity and Quantum Mechanics remains a major issue in theoretical physics. The fundamental differences between them, particularly regarding the nature of spacetime and determinism, create challenges in formulating a theory of quantum gravity. Various approaches, such as Loop Quantum Gravity (LQG) and string theory, aim to unify these two theories, although they still face limitations in experimental verification. Quantum cosmology also opens up space for deeper philosophical reflections on the nature of reality, spacetime, determinism, and the role of the observer in determining physical existence, leading to questions regarding the meaning and purpose of the universe itself within its underlying probabilistic and uncertain framework.*

**Keywords:** General Theory of Relativity, Quantum Mechanics, Quantum Cosmology, Interpretation of Quantum Cosmology.

### Abstrak

*Teori Relativitas Umum Einstein, telah merevolusi pemahaman kita mengenai gravitasi dengan menggantikan hukum gravitasi Newtonian yang menganggap gravitasi sebagai gaya tarik antara dua massa. Dalam GR, gravitasi dipandang sebagai manifestasi dari geometri ruang-waktu yang dipengaruhi oleh distribusi massa dan energi. Teori ini mampu menjelaskan fenomena-fenomena seperti pembengkokan cahaya oleh objek masif dan prediksi keberadaan lubang hitam. Sementara itu, Mekanika Kuantum, yang berakar pada karya Max Planck, Albert Einstein, Niels Bohr, dan Werner Heisenberg, mengungkap dunia mikroskopik yang dipenuhi dengan probabilitas dan ketidakpastian, serta fenomena-fenomena seperti dualisme gelombang-partikel dan prinsip ketidakpastian Heisenberg. Meskipun kedua teori ini sukses dalam menjelaskan fenomena yang berbeda dalam skala makroskopik dan mikroskopik, ketidakmampuan untuk menyatukan Relativitas Umum dan Mekanika Kuantum menjadi persoalan besar dalam fisika teoretis. Perbedaan mendasar antara keduanya, terutama terkait dengan sifat ruang-waktu dan determinisme, menciptakan tantangan dalam merumuskan teori gravitasi kuantum. Berbagai pendekatan, seperti Loop Quantum Gravity (LQG) dan teori string, berusaha untuk menyatukan kedua teori ini, meskipun masih menghadapi keterbatasan dalam verifikasi eksperimental. Kosmologi kuantum juga membuka ruang bagi refleksi filosofis yang lebih mendalam mengenai sifat realitas, ruang-waktu, determinisme, serta peran pengamat dalam menentukan eksistensi fisik, yang mengarah pada pertanyaan mengenai makna dan tujuan alam semesta itu sendiri dalam kerangka probabilistik dan ketidakpastian yang mendasarinya.*

**Kata Kunci:** Teori Relativitas Umum, Mekanika Kuantum, Kosmologi Kuantum, Interpretasi Kosmologi Kuantum.

## 1. PENDAHULUAN

Salah satu tantangan utama dalam fisika modern adalah mengintegrasikan dua teori yang sangat sukses dalam menjelaskan alam semesta pada skala yang sangat berbeda. Di satu sisi, mekanika kuantum berhasil menjelaskan dunia subatomik dengan ketepatan luar biasa, sedangkan teori relativitas umum Einstein berhasil menggambarkan fenomena gravitasi pada skala kosmik, mulai dari pergerakan planet hingga prilaku lubang hitam (Rovelli, 2016). Namun, meskipun keduanya sangat tepat dalam domain masing-masing, pertemuan antara keduanya pada kondisi ekstrem, seperti dalam singularitas lubang hitam atau pada saat-saat awal alam semesta, masih belum dapat dipahami dengan memadai. Masalah ini muncul karena adanya ketidakcocokan mendalam antara cara teori-teori ini menggambarkan ruang, waktu, dan hukum fisika yang mengaturnya (Rovelli & Vidotto, 2022). Ketidaksesuaian antara konsep ruang-waktu kontinu dalam relativitas umum dan ketidakpastian serta diskritisasi yang ditemukan dalam mekanika kuantum menjadi pusat masalah. Oleh karena itu, penyatuan keduanya menjadi penting untuk memperoleh teori yang dapat menjelaskan fenomena alam pada seluruh skala, dari subatomik hingga kosmik, yang selama ini terpisah oleh ketidakcocokan mendalam (Carroll, 2019). Menemukan teori yang mampu menggabungkan keduanya bukan hanya masalah teknis, tetapi juga fundamental dalam memahami struktur dasar alam semesta.

Dalam upaya mengintegrasikan keduanya, fisikawan teoretik telah mengembangkan berbagai pendekatan. Salah satu pendekatan yang paling terkenal adalah teori string, yang pertama kali dikembangkan oleh Green dan Schwarz (1984), yang berusaha menggantikan model partikel titik dengan objek satu dimensi yang disebut string. Teori ini memungkinkan deskripsi semua gaya fundamental, termasuk gravitasi, dalam kerangka mekanika kuantum. Pendekatan kedua adalah *Loop Quantum Gravity* (LQG), yang dikembangkan oleh Rovelli dan Smolin (1995), pendekatan ini memperlakukan ruang-waktu sebagai jaringan terkuantifikasi, dengan struktur diskrit yang dapat menjelaskan fenomena gravitasi pada skala Planck. Pendekatan lainnya adalah teori gravitasi kuantum, yang dibahas oleh Howl, Penrose, dan Fuentes (2019), yang mengusulkan model untuk memahami interaksi gravitasi dengan mekanika kuantum di tingkat fundamental, serta untuk mengatasi tantangan gravitasi kuantum dalam konteks singularitas dan lubang hitam. Selain itu, teori holografi, yang dipopulerkan oleh Maldacena (1997) melalui konjektur *AdS/CFT*, menawarkan cara yang menarik untuk memahami hubungan antara teori gravitasi di ruang-waktu dimensi tinggi dengan teori medan kuantum di dimensi lebih rendah, memberikan pandangan baru mengenai bagaimana informasi dan gravitasi dapat dipahami dalam konteks kuantum. Semua pendekatan ini mencerminkan upaya yang mendalam untuk merumuskan teori yang dapat menggabungkan kedua pilar fisika modern ini, yang diharapkan dapat membawa pemahaman yang lebih holistik tentang alam semesta di tingkat dasar. Teori-teori ini, meskipun belum terverifikasi secara eksperimen, terus menjadi fokus utama dalam perumusan *Theory of Everything* yang dapat menjelaskan semua gaya fundamental dalam satu kerangka konsisten sehingga dapat menjelaskan alam semesta secara menyeluruh.

Pendekatan-pendekatan ini tidak hanya menghadirkan tantangan teknis dalam fisika, tetapi juga memunculkan pertanyaan filosofis yang mendalam terkait dengan realitas, waktu, dan determinisme (Zinkernagel, 2006). Salah satu contoh penting adalah bagaimana konsep ruang dan waktu dipahami dalam kerangka teori-teori ini. Dalam

teori LQG, ruang dan waktu tidak lagi dipandang sebagai entitas kontinu dan dapat dibagi tanpa batas. Sebaliknya, teori ini mengusulkan bahwa ruang dan waktu tersusun dari "simpal-simpal" kuantum (terkuantisasi secara kanonik), yang disebut sebagai "spin networks," yang saling terhubung dalam jaring-jaring yang sangat kecil dan terstruktur (Rovelli & Vidotto, 2022). Pendekatan ini memaksa kita untuk mempertanyakan realitas yang kita alami sehari-hari—apakah pengalaman kita terhadap ruang dan waktu hanyalah ilusi yang dihasilkan oleh struktur yang lebih mendalam dan lebih fundamental? Ataukah ada realitas lain yang lebih luas dan lebih komprehensif yang tersembunyi di balik pemahaman kita yang terbatas?

Selain itu, konsep ketidakpastian yang diungkapkan oleh Heisenberg (1958) juga memiliki dampak yang signifikan dalam kosmologi kuantum. Seperti yang dijelaskan oleh Heisenberg, prinsip ketidakpastian menunjukkan bahwa kita tidak dapat mengetahui secara tepat posisi dan momentum suatu partikel secara bersamaan, yang bertentangan dengan pandangan deterministik yang berlaku dalam fisika klasik. Penerapan prinsip ini pada skala kosmik mengarah pada pandangan bahwa alam semesta bersifat probabilistik, dengan kemungkinan berbagai konfigurasi ruang-waktu yang muncul akibat interaksi kuantum. Dalam konteks ini, pertanyaan filosofis muncul tentang sejauh mana alam semesta ini dipengaruhi oleh prinsip ketidakpastian, dan apakah kita bisa memahami realitas alam semesta hanya melalui teori kuantum (Carroll, 2019). Hal ini membawa kita pada pemikiran bahwa realitas itu sendiri bisa bersifat probabilistik, dan bukan deterministik seperti yang dipahami dalam fisika klasik.

Implikasi filosofis lainnya muncul dari konsep waktu itu sendiri dalam kosmologi kuantum. Dalam teori-teori seperti LQG, waktu bukanlah suatu objek yang dapat diamati secara langsung, melainkan sebuah hasil dari interaksi kuantum yang lebih fundamental (Le Bihan, 2020). Ini mengarah pada pertanyaan tentang sifat eksistensi waktu, apakah ia benar-benar ada, ataukah ia hanya ilusi yang dihasilkan oleh struktur dasar yang lebih mendalam? Filosofisnya, ini mengajak kita untuk merenungkan apakah kita dapat memahami waktu di luar batas-batas teori fisika yang ada, ataukah kita harus menerima bahwa pemahaman kita terbatas pada teori-teori yang kita miliki saat ini. Sebagai contoh, teori-teori seperti LQG menawarkan pandangan radikal bahwa waktu itu sendiri mungkin tidak eksis dalam arti yang kita pahami selama ini. Sebaliknya, waktu mungkin muncul sebagai hasil dari struktur kuantum yang lebih fundamental (Esposito, 2024).

Artikel ini bertujuan untuk mengeksplorasi lebih dalam hubungan antara teori kosmologi kuantum dengan pemahaman kita tentang realitas dan eksistensi. Dengan mengkaji berbagai teori dan pandangan filosofis yang terkait, seperti yang ditemukan dalam karya-karya Rovelli (2016), Zinkernagel (2006), dan Esposito (2024), artikel ini akan membahas bagaimana ketegangan antara teori dan realitas ini membentuk cara kita memandang alam semesta. Pemahaman tentang alam semesta melalui teori kuantum membuka ruang bagi refleksi filosofis yang lebih luas mengenai eksistensi dan hubungan kita dengan kosmos (Hawking & Penrose, 1996). Secara spesifik, artikel ini ingin menjawab beberapa pertanyaan penelitian kunci: bagaimana teori-teori kosmologi kuantum menggambarkan ruang-waktu pengaruhnya terhadap pemahaman kita tentang konsep ruang, waktu, dan realitas itu sendiri? Bagaimana konsep ketidakpastian dalam mekanika kuantum dapat diterapkan pada skala kosmik untuk memahami alam semesta secara lebih mendalam? Dengan mengkaji berbagai teori terkini, artikel ini akan menggali bagaimana pandangan filosofis baru muncul dari upaya penyatuan kedua teori ini, serta bagaimana perdebatan tentang determinisme dan probabilisme memengaruhi pandangan kita tentang alam semesta (Howl, Penrose, & Fuentes, 2019).

Artikel ini mengkaji berbagai pendekatan yang digagas para fisikawan untuk menyatukan teori relativitas umum dan mekanika kuantum dalam upaya merumuskan *theory of everything*. Selain aspek teknis, penelitian ini juga mengeksplorasi pertanyaan filosofis terkait dengan ruang, waktu, dan ketidakpastian, serta dampaknya terhadap pemahaman kita tentang realitas dan eksistensi. Dengan membahas bagaimana teori-teori kuantum dapat mengubah pandangan kita tentang alam semesta, penelitian ini memberikan kontribusi dalam memperdalam pemahaman kita mengenai struktur dasar alam semesta dan implikasi filosofisnya.

## 2. METODOLOGI PENELITIAN

Penelitian ini mengadopsi pendekatan **critical literature review**, sebuah metode yang digunakan untuk meninjau dan menganalisis secara mendalam literatur yang relevan dengan topik kajian kosmologi kuantum dan refleksi filosofis yang terkait dengan teori relativitas umum dan mekanika kuantum. Melalui tinjauan kritis ini, artikel ini bertujuan untuk mengidentifikasi temuan-temuan kunci dari penelitian terdahulu, serta menilai kontribusi masing-masing teori dalam konteks pemahaman filosofis tentang realitas dan struktur alam semesta. Critical literature review bukan sekadar rangkuman dari literatur yang ada, melainkan juga proses evaluasi yang mendalam terhadap kualitas dan relevansi studi sebelumnya.

Berikut adalah diagram alur penelitian ini



Diagram 1. Alur penelitian

Langkah pertama dalam prosedur ini adalah penentuan tema atau topik penelitian, yang berfungsi sebagai dasar untuk menyusun kerangka tinjauan literatur. Fokus utama dari penelitian ini adalah mengeksplorasi ketidakpaduan antara teori relativitas umum dan mekanika kuantum, pendekatan-pendekatan yang digagas para fisikawan untuk menginterasikan keduanya, dan pandangan filosofis yang muncul dari pendekatan-pendekatan tersebut dalam konteks kosmologi. Tema ini dipilih berdasarkan urgensi untuk memahami lebih dalam bagaimana teori-teori fisika dapat menjelaskan realitas, dan sebaliknya, bagaimana konsep-konsep filosofis dapat memberikan perspektif baru dalam menghadapi pertanyaan-pertanyaan yang muncul dari fisika kuantum.

Setelah tema ditentukan, langkah berikutnya adalah penyusunan kriteria inklusi dan eksklusi, yang berfungsi untuk memfilter literatur yang relevan dan valid. Kriteria inklusi mencakup artikel-artikel dan publikasi yang mengkaji aspek teoritis dan filosofis dalam kosmologi kuantum. Sebaliknya, literatur yang terlalu teknis atau tidak membahas dimensi filosofis, seperti studi empiris yang hanya berfokus pada model matematis tanpa melibatkan refleksi ontologis atau epistemologis, dikeluarkan melalui kriteria eksklusi.

### Kriteria Inklusi

1. Relevansi literatur dengan topik penelitian
2. Literatur tidak hanya membahas aspek teknis, seperti model matematis, tetapi juga mencakup refleksi ontologis dan epistemologis.
3. Literatur berasal dari sumber terpercaya

4. Literatur yang diterbitkan dalam beberapa dekade terakhir, untuk memastikan bahwa penelitian yang digunakan up-to-date dan mencakup perkembangan terbaru dalam kosmologi kuantum dan teori fisika kuantum.

### Kriteria Eksklusi

1. Literatur yang hanya membahas model matematis atau hasil eksperimen tanpa memasukkan refleksi filosofis atau teori ontologis dan epistemologis tidak akan disertakan.
2. Literatur yang hanya mengupas aspek teknis atau matematis tanpa mempertimbangkan dampak atau relevansi filosofisnya terhadap pemahaman tentang alam semesta dan realitas.
3. Sumber-sumber yang terlalu jauh dari tema utama penelitian atau yang membahas topik yang hanya sedikit atau tidak relevan dengan teori-teori kuantum dan kosmologi.

Proses pencarian literatur dilakukan dengan mengakses berbagai sumber ilmiah terkemuka melalui basis data akademik seperti Google Scholar, arXiv, dan berbagai jurnal internasional lainnya. Literatur yang dicari meliputi artikel, buku, dan publikasi konferensi yang diterbitkan dalam beberapa dekade terakhir untuk memastikan relevansi dan kemutakhiran informasi yang digunakan dalam tinjauan ini. Pencarian ini dilakukan dengan menggunakan kata kunci yang spesifik dan terarah untuk memperoleh sumber yang paling relevan dengan fokus penelitian, yaitu hubungan antara kosmologi kuantum dan refleksi filosofisnya.

Setelah literatur terkumpul, langkah berikutnya adalah melakukan analisis dan sintesis mendalam terhadap literatur yang ada. Literatur dipilih dan dikelompokkan berdasarkan relevansinya dengan topik penelitian, dengan memperhatikan keterkaitan antara teori fisika dan pemahaman filosofis tentang realitas. Dalam analisis ini, peneliti menggunakan teknik *triangulasi teoritis*, sebuah metode yang memungkinkan perbandingan, integrasi, dan sintesis berbagai teori serta perspektif untuk menghasilkan pemahaman yang lebih komprehensif. Dengan pendekatan ini, diharapkan tidak hanya memperkuat validitas hasil analisis ilmiah, tetapi juga memperdalam wawasan mengenai tantangan konseptual dalam kosmologi kuantum, serta membuka ruang bagi refleksi filosofis yang lebih mendalam tentang hubungan antara teori fisika dan realitas ontologis.

Langkah terakhir dalam penelitian ini adalah penulisan laporan penelitian yang mengintegrasikan hasil dari analisis literatur yang telah dilakukan. Laporan ini menyajikan temuan-temuan kunci dari berbagai teori yang relevan, sekaligus mengkritisi perbedaan dan kesenjangan dalam pemahaman yang ada. Penulisan dilakukan dengan tujuan untuk memberikan wawasan yang lebih komprehensif tentang ketegangan antara teori dan realitas dalam kosmologi kuantum, serta implikasi filosofis yang muncul dari penerapan teori-teori tersebut.

## 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

### 3.1 Sejarah dan Perkembangan Teori Relativitas Umum dan Mekanika Kuantum

Teori Relativitas Umum (GR), yang diperkenalkan oleh Albert Einstein pada tahun 1915, mengubah cara kita memahami gravitasi. Sebelum itu, gravitasi dipahami melalui hukum gravitasi Newton yang menganggap bahwa gravitasi adalah gaya tarik antara dua benda yang sebanding dengan massa kedua benda dan berbanding terbalik dengan kuadrat jarak di antara mereka (Yasmini,2021). Namun, pemahaman ini tidak

dapat menjelaskan fenomena tertentu, seperti pergerakan orbit Merkurius yang sedikit berbeda dari perhitungan Newton. Di sinilah relativitas umum muncul sebagai teori yang lebih fundamental.

Relativitas umum menggantikan pandangan Newtonian dengan pandangan yang lebih radikal: gravitasi bukan lagi gaya, melainkan akibat dari kelengkungan ruang-waktu yang disebabkan oleh massa dan energi. Semakin besar massa suatu objek, semakin besar pula kelengkungan ruang-waktu yang dihasilkannya. Dalam teori ini, ruang dan waktu bukanlah entitas terpisah, melainkan membentuk suatu kontinuitas empat dimensi yang disebut ruang-waktu. Massa dan energi, pada gilirannya, mempengaruhi geometri ruang-waktu itu sendiri, yang pada akhirnya mempengaruhi pergerakan objek. Secara matematis, ini dijelaskan oleh persamaan medan Einstein, yang menghubungkan distribusi massa-energi dengan geometri ruang-waktu (Einstein, 1915).

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} R g_{\mu\nu} - \Lambda g_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

Teori relativitas umum berhasil menjelaskan sejumlah fenomena yang tidak bisa dijelaskan oleh teori Newton, termasuk pembengkokan cahaya oleh objek masif seperti Matahari (efek lenticular gravitasi), serta prediksi adanya lubang hitam dan singularitas di pusatnya. Sebagai contoh, lubang hitam adalah prediksi dari relativitas umum di mana kelengkungan ruang-waktu menjadi begitu ekstrem sehingga tidak ada yang bisa lolos, bahkan cahaya sekalipun (Penrose, 1965).

Mekanika Kuantum berkembang pada awal abad ke-20, dimulai dengan karya Max Planck yang pada tahun 1900 menemukan bahwa energi dalam sistem atom tidak dapat dihasilkan secara kontinu, melainkan hanya dalam jumlah tertentu yang disebut kuantum. Konsep kuantum ini kemudian diperluas oleh Albert Einstein pada tahun 1905 melalui penjelasan fenomena efek fotolistrik, yang menunjukkan bahwa cahaya dapat dipandang sebagai partikel (kuanta) yang disebut foton. Hal ini menandai lahirnya teori kuantum (Einstein, 1905).

Seiring waktu, mekanika kuantum berkembang lebih lanjut dengan karya-karya Niels Bohr, Werner Heisenberg, dan Erwin Schrödinger. Bohr mengembangkan model atom yang menyarankan bahwa elektron bergerak dalam orbit tertentu dan hanya dapat berada dalam level energi yang diskrit. Heisenberg, pada tahun 1927, mengusulkan prinsip ketidakpastian yang menyatakan bahwa tidak mungkin mengukur posisi dan momentum partikel secara bersamaan dengan presisi tak terbatas (Heisenberg, 1927).

$$\Delta x \Delta p \geq \frac{\hbar}{2}$$

Schrödinger, melalui persamaan gelombang yang dinamakan menurut namanya, mengembangkan cara untuk menggambarkan keadaan partikel sebagai fungsi gelombang, yang memberikan probabilitas posisi dan momentum (Schrödinger, 1926).

$$\hat{H} |\psi(t)\rangle = i\hbar \frac{\partial}{\partial t} |\psi(t)\rangle$$

Teori ini berhasil menjelaskan fenomena yang tidak bisa dijelaskan oleh fisika klasik, seperti stabilitas atom dan spektrum cahaya yang dipancarkan oleh atom-atom tertentu. Selain itu, mekanika kuantum juga membuka jalan bagi penemuan fenomena baru seperti superposisi kuantum, entanglement, dan dualitas gelombang-partikel.

Semua ini menunjukkan bahwa dunia pada skala mikroskopik sangat berbeda dari dunia yang kita alami sehari-hari, dan ia mengharuskan kita untuk menerima kenyataan bahwa determinisme klasik tidak berlaku di dunia subatomik.

Namun, meskipun teori relativitas umum dan mekanika kuantum berhasil menjelaskan fenomena yang sangat berbeda di dunia makroskopik dan mikroskopik, keduanya tidak dapat digabungkan dengan mudah. Konflik yang muncul antara keduanya menandai tantangan besar dalam fisika teoretis.

### **3.2. Konflik Teori Relativitas Umum dan Mekanika Kuantum**

Tantangan terbesar yang dihadapi oleh fisikawan teoritik saat ini adalah ketidakmampuan untuk menyatukan teori relativitas umum dengan mekanika kuantum secara konsisten dan koheren (Natesan, 2022) (Prabhakaran, 2022) (Howl, Penrose & Fuentes, 2019). Ketegangan antara keduanya terutama terletak pada pandangan mereka yang berbeda tentang ruang dan waktu serta konsep determinisme.

Dalam relativitas umum, ruang dan waktu adalah entitas kontinu yang membentuk kerangka acuan bagi seluruh peristiwa fisik (Mamone-Capri, 2018). Massa dan energi mempengaruhi kelengkungan ruang-waktu, dan objek bergerak melalui ruang-waktu sesuai dengan prinsip geometri yang ditetapkan oleh teori ini. Di sisi lain, dalam mekanika kuantum, ruang dan waktu pada skala yang sangat kecil (misalnya pada skala Planck) dipandang tidak kontinu, melainkan diskrit, dan fenomena kuantum dapat mengubah gambaran ini. Ini menghasilkan perbedaan fundamental tentang sifat ruang-waktu (Macías & Camacho, 2008).

Konsep ketidakpastian dalam mekanika kuantum bertentangan dengan determinisme dalam relativitas umum. Mekanika kuantum menggambarkan dunia subatomik dalam bentuk probabilitas, bukan dalam bentuk kejadian yang pasti dan dapat diprediksi. Prinsip ketidakpastian Heisenberg menunjukkan bahwa ada batasan fundamental pada seberapa banyak kita dapat mengetahui tentang posisi dan momentum suatu partikel pada saat yang bersamaan, yang bertentangan dengan gambaran deterministik dari gravitasi dalam relativitas umum. Relativitas umum, di sisi lain, memperlakukan peristiwa fisik dalam ruang-waktu dengan cara yang lebih jelas dan terdefinisi, yang menunjukkan bahwa teori ini bersifat deterministik.

Di samping itu, masalah singularitas juga menambah kerumitan. Relativitas umum memprediksi adanya singularitas, yaitu titik di mana ruang dan waktu berakhir, seperti yang ditemukan di pusat lubang hitam atau dalam kondisi awal Big Bang (Penrose, 1965). Di titik ini, kerapatan massa menjadi tak terhingga, dan teori ini tidak dapat memberikan penjelasan lebih lanjut mengenai kondisi tersebut. Namun, dalam mekanika kuantum, kita tahu bahwa fluktuasi kuantum akan mendominasi pada skala yang sangat kecil, sehingga singularitas yang diprediksi oleh relativitas umum mungkin tidak benar-benar terjadi, dan kita membutuhkan teori yang menggabungkan keduanya untuk memahami fenomena ini (Rovelli, 2016).

### **3.3. Upaya Penyatuan Teori Relativitas Umum dan Mekanika Kuantum**

Berbagai upaya telah dilakukan untuk menyatukan teori relativitas umum dan mekanika kuantum dalam satu kerangka teoritis yang koheren. Salah satu pendekatan yang dikembangkan adalah teori gravitasi medan kuantum, yang memandang ruang-waktu sebagai medan kuantum yang dapat berfluktuasi, di mana gravitasi dianggap sebagai salah satu interaksi yang muncul dari fluktuasi ini. Pendekatan ini memungkinkan integrasi gravitasi dengan teori medan kuantum lainnya, seperti teori medan kuantum elektrodinamika (QED), yang telah terbukti sangat efektif dalam menjelaskan gaya elektromagnetik (Jakobsen, 2020). Teori ini bertujuan untuk

memberikan penjelasan yang lebih konsisten mengenai interaksi gravitasi, seraya membuka jalan untuk pemahaman lebih dalam tentang struktur dasar ruang-waktu.

Pendekatan selanjutnya adalah teori string, yang pertama kali diperkenalkan pada awal 1970-an, menawarkan perspektif yang lebih radikal. Dalam teori ini, partikel dipandang bukan sebagai titik, tetapi sebagai objek satu dimensi yang bergetar pada berbagai frekuensi, yang membentuk berbagai jenis partikel yang kita amati di alam semesta. Salah satu keunggulan utama teori string adalah kemampuannya untuk menggabungkan gaya gravitasi dengan tiga gaya fundamental lainnya—elektromagnetik, gaya nuklir kuat, dan gaya nuklir lemah—dalam satu teori yang dikenal sebagai *Teori Segalanya* (TOE). Teori ini mengusulkan bahwa semua gaya fundamental adalah manifestasi dari getaran string pada dimensi ruang yang lebih tinggi (Green & Schwarz, 1984). Meskipun menawarkan kerangka yang sangat ambisius, teori string memerlukan verifikasi eksperimen yang lebih lanjut dan tantangan besar terkait dengan pengukuran dimensi tambahan yang sangat kecil, yang saat ini masih sulit dijangkau dengan teknologi yang ada.

Pendekatan lain yang lebih baru adalah teori holografi, yang dipopulerkan oleh Juan Maldacena pada 1997 dengan konjektur AdS/CFT. Teori ini mengusulkan bahwa gravitasi dalam ruang-waktu berdimensi tinggi dapat dipahami melalui teori medan kuantum di dimensi yang lebih rendah. Konsep ini memberikan wawasan baru mengenai hubungan antara informasi dan gravitasi dalam konteks kuantum, serta menawarkan perspektif yang lebih luas tentang bagaimana informasi fundamental dapat terorganisasi pada skala yang lebih mendalam. Teori holografi mengundang refleksi filosofis yang mendalam mengenai batasan ruang-waktu dan bagaimana informasi fundamental dapat bekerja dalam konteks teori fisika yang lebih fundamental, serta membuka ruang untuk memikirkan kembali realitas fisik dan implikasi ontologisnya (Maldacena, 1997).

Sementara itu, Loop Quantum Gravity (LQG), yang dikembangkan pada pertengahan 1990-an oleh Carlo Rovelli dan Lee Smolin, menawarkan pendekatan yang berbeda dengan mencoba menggabungkan relativitas umum dengan prinsip-prinsip kuantum tanpa mengabaikan keduanya. Salah satu gagasan utama dalam LQG adalah bahwa ruang-waktu pada skala Planck tidaklah halus dan kontinu, melainkan tersusun dari elemen-elemen dasar yang disebut "loop." Elemen-elemen ini membentuk jaringan yang sangat kecil, dan perubahan dalam struktur ini dapat memengaruhi sifat fisik lainnya. LQG tidak memerlukan dimensi ekstra seperti pada teori string dan berupaya mengintegrasikan gravitasi ke dalam kerangka teori kuantum tanpa merombak teori relativitas umum secara keseluruhan, sehingga menjadi kandidat yang menjanjikan dalam pencarian untuk teori gravitasi kuantum. Namun, tantangan terbesar LQG adalah kesulitan dalam menguji prediksi model ini secara eksperimental, karena prediksi tersebut belum dapat diuji dengan eksperimen yang ada (Rovelli & Vidotto, 2022).

Meskipun masing-masing pendekatan ini memiliki kelebihan dan tantangan tersendiri, mereka bersama-sama menawarkan potensi besar dalam upaya menyatukan relativitas umum dan mekanika kuantum dalam satu kerangka teoritis yang lebih koheren. Selain itu, pendekatan-pendekatan ini juga membuka ruang bagi refleksi filosofis yang lebih mendalam mengenai hubungan antara teori fisika dan realitas ontologis yang lebih fundamental.

### 3.4. Refleksi Filosofis dalam Kosmologi Kuantum

Kosmologi kuantum bukan hanya menjelaskan alam semesta pada skala mikro atau makro. Ia juga membawa kita pada ranah pemikiran filosofis yang lebih mendalam mengenai sifat realitas, ruang, waktu, dan bahkan eksistensi kita sendiri. Ketika kita

berbicara tentang kosmologi kuantum, kita tidak hanya berbicara tentang teori fisika canggih, tetapi juga tentang paradigma baru dalam memahami dunia yang secara radikal berbeda dari pandangan klasik yang telah lama mendominasi. Dalam konteks ini, ada banyak pertanyaan filosofis yang muncul, baik yang terkait dengan interpretasi konsep ruang-waktu, ketidakpastian, maupun peran pengamat dalam fenomena fisik.

### **3.4.1. Ontologi Ruang dan Waktu: Apakah ruang-waktu itu benar-benar ada?**

Pertanyaan pertama yang muncul dalam kosmologi kuantum adalah tentang ontologi ruang dan waktu. Pendekatan gravitasi kuantum memperlakukan ruang dan waktu sebagai medan yang dapat berfluktuasi pada skala kuantum. Ini berlawanan dengan pandangan relativitas umum yang melihat ruang-waktu sebagai struktur yang kontinu dan tak berubah. Dalam pandangan ini, ruang-waktu bukanlah latar belakang yang tetap, melainkan medan dinamis yang dapat berfluktuasi sesuai dengan prinsip-prinsip mekanika kuantum (Jakobsen, 2020). Ini mengarah pada pandangan bahwa ruang dan waktu tidak hanya dipengaruhi oleh materi dan energi, tetapi juga oleh fluktuasi kuantum yang terjadi di dalamnya. Dengan demikian, gravitasi kuantum mengubah pandangan kita tentang ruang dan waktu dari entitas tetap menjadi fenomena yang lebih fleksibel dan tidak pasti, memungkinkan adanya interaksi yang lebih kompleks antara materi, energi, dan struktur ruang-waktu.

Teori string menawarkan pandangan yang lebih radikal tentang ruang dan waktu dengan memperkenalkan dimensi-dimensi tambahan yang sangat kecil dan tersembunyi, yang hanya dapat diamati pada skala energi sangat tinggi (Le Bihan, 2020). Dalam teori ini, ruang-waktu tidak hanya terdiri dari empat dimensi yang kita kenal, tetapi melibatkan lebih banyak dimensi yang terlipat rapat di tingkat Planck. Hal ini mengimplikasikan bahwa pemahaman kita tentang ruang dan waktu dalam kehidupan sehari-hari hanya merupakan bagian dari gambaran yang jauh lebih besar, yang tersembunyi dalam struktur dimensi tambahan. Pendekatan ini memunculkan pertanyaan filosofis tentang apakah ruang dan waktu yang kita alami hanyalah ilusi dari dimensi yang lebih tinggi, atau apakah keduanya memang entitas fundamental yang terpisah.

LQG mengusulkan bahwa ruang-waktu pada skala Planck bukanlah kontinu, tetapi terdiri dari elemen-elemen dasar yang membentuk struktur diskrit yang disebut "loop" (Rovelli & Vidotto, 2022). Dalam teori ini, ruang-waktu dipandang sebagai jaring-jaring kecil yang membentuk ruang-waktu secara keseluruhan. Implikasi dari pandangan ini adalah bahwa struktur ruang-waktu yang kita amati sehari-hari bukanlah hal yang mulus dan tak terpecah, melainkan hasil dari struktur kuantum yang sangat kecil dan terdistribusi secara diskrit. Oleh karena itu, LQG menantang pandangan tradisional tentang ruang dan waktu sebagai entitas kontinu yang terpisah dari peristiwa fisik. Sebaliknya, ruang dan waktu menjadi bagian dari realitas yang lebih kompleks dan terhubung langsung dengan fenomena kuantum.

Teori holografi, yang dipopulerkan oleh Maldacena (1997), mengusulkan bahwa ruang-waktu yang kita alami di dimensi tinggi dapat dipahami melalui teori medan kuantum yang ada di dimensi lebih rendah, yang dikenal dengan konjektur AdS/CFT. Ini menyarankan bahwa informasi yang ada di ruang-waktu dimensi tinggi, seperti gravitasi dan fenomena lainnya, sebenarnya dapat dijelaskan dalam teori medan kuantum di dimensi yang lebih rendah, yang menggugah pemikiran baru tentang sifat ruang dan waktu. Holografi menunjukkan bahwa ruang-waktu dapat dipahami sebagai manifestasi dari informasi yang lebih fundamental, yang memicu diskusi filosofis tentang bagaimana informasi mendasari struktur dasar alam semesta. Ini membuka perspektif baru yang lebih radikal tentang ruang dan waktu, mengusulkan bahwa

keduanya mungkin bukan entitas fundamental, tetapi lebih merupakan hasil dari hubungan informasi yang ada dalam dimensi yang lebih rendah.

Setiap pendekatan memberikan pandangan yang berbeda mengenai ruang dan waktu, yang secara kolektif menantang konsep-konsep tradisional tentang keduanya. Relativitas umum memandang ruang dan waktu sebagai entitas kontinu dan terpisah dari fenomena fisik yang terjadi di dalamnya, sedangkan gravitasi medan kuantum dan LQG mengubah pandangan ini dengan melihat ruang-waktu sebagai fenomena dinamis dan berfluktuasi yang tidak terpisahkan dari peristiwa fisik. Di sisi lain, teori string memperkenalkan gagasan dimensi tersembunyi yang lebih kompleks, sementara teori holografi menggambarkan ruang-waktu sebagai hasil dari informasi yang ada di dimensi yang lebih rendah, membuka ruang bagi pemahaman baru mengenai hubungan antara ruang, waktu, dan informasi dalam kosmologi kuantum.

Pendekatan-pendekatan ini juga membawa dampak signifikan pada pemahaman filosofis tentang ruang dan waktu. Dengan melihat ruang dan waktu sebagai struktur diskrit (LQG) atau sebagai hasil dari fluktuasi kuantum (gravitasi medan kuantum), kita dihadapkan pada kemungkinan bahwa keduanya tidak bersifat fundamental, melainkan konstruksi dari interaksi fisik yang lebih dalam. Pendekatan teori string dan holografi, yang memperkenalkan dimensi tambahan dan informasi sebagai dasar realitas, juga menggugah kita untuk berpikir kembali tentang apakah ruang dan waktu itu sendiri ada dengan sendirinya ataukah mereka hanya merupakan hasil dari pemahaman manusia yang berkembang seiring dengan penemuan-penemuan baru dalam fisika kuantum.

### **3.4.2. Determinisme vs Probabilitas: Nasib Alam Semesta**

Selain ruang dan waktu, pertanyaan filosofis lainnya yang muncul dalam kosmologi kuantum adalah mengenai determinisme vs probabilitas. Dalam teori relativitas umum, fenomena fisik cenderung mengikuti hukum deterministik, di mana peristiwa dapat diprediksi dengan akurat berdasarkan kondisi awalnya. Pergerakan planet-planet, misalnya, dapat diprediksi dengan sangat tepat melalui persamaan medan Einstein (Einstein, 1915). Di sisi lain, mekanika kuantum menggambarkan dunia subatomik dalam istilah probabilitas. Prinsip ketidakpastian Heisenberg, yang menyatakan bahwa kita tidak dapat mengukur posisi dan momentum suatu partikel dengan ketepatan tak terbatas, mengarah pada pemahaman bahwa dunia kuantum pada dasarnya bersifat acak dan probabilistik (Heisenberg, 1927).

Sebagai contoh, dalam eksperimen dualisme partikel-gelombang, kita tahu bahwa elektron dapat berperilaku sebagai gelombang dan partikel, dan hasil percobaan bergantung pada probabilitas keberadaan elektron pada posisi tertentu (Feynman, 1965). Namun, fenomena ini berlawanan dengan pandangan kita tentang dunia makroskopik, yang bersifat lebih deterministik. Dalam kerangka kosmologi kuantum, pertanyaan yang muncul adalah apakah alam semesta ini pada dasarnya acak atau apakah terdapat determinisme yang lebih mendalam yang belum kita temukan? Albert Einstein, yang terkenal dengan ungkapannya "Allah tidak melempar dadu", tidak pernah menerima kenyataan bahwa hukum alam dapat bersifat probabilistik (Einstein, 1935). Namun, Niels Bohr dan para pendukung mekanika kuantum berargumen bahwa ketidakpastian adalah bagian tak terpisahkan dari alam semesta (Bohr, 1928).

Dalam kosmologi kuantum, pertanyaan ini menjadi semakin kompleks. Misalnya, dalam teori inflasi kuantum yang menjelaskan asal-usul alam semesta, fluktuasi kuantum pada tahap awal alam semesta dapat mengarah pada pembentukan struktur besar seperti galaksi. Dalam hal ini, probabilitas memainkan peran kunci dalam pembentukan kosmos seperti yang kita kenal sekarang (Linde, 1982). Ini membuka pertanyaan filosofi lebih lanjut: Apakah kita hidup di dalam alam semesta yang

dirancang oleh determinisme yang lebih tinggi, atau apakah alam semesta kita hanya hasil dari kebetulan dan probabilitas yang tak terhitung jumlahnya?

### 3.4.3. Peran Pengamat: Apakah Kita Menentukan Realitas?

Peran pengamat dalam menentukan realitas adalah salah satu isu paling mendalam dalam kosmologi kuantum. Dalam interpretasi Copenhagen yang diajukan oleh Niels Bohr (1928), realitas subatomik seperti posisi dan momentum partikel hanya terwujud ketika diukur, yang mengarah pada pertanyaan mendasar: apakah realitas eksis secara independen dari kita, ataukah kita sebagai pengamat turut berperan dalam "menciptakan" realitas tersebut? Konsep ini memberi dampak besar terhadap pemahaman kita tentang asal mula alam semesta. Dalam model Big Bang kuantum, fluktuasi kuantum pada tahap awal menciptakan ketidakpastian yang memungkinkan terbentuknya berbagai kemungkinan konfigurasi alam semesta. Kemudian, melalui proses pengukuran yang dilakukan oleh pengamat atau interaksi makroskopik, bentuk alam semesta yang konkret terpilih (Hawking, 1983). Dalam pandangan ini, ruang-waktu dan objek fisik tidak terwujud secara pasti hingga pengamatan dilakukan, menunjukkan bahwa alam semesta pada level fundamental bersifat probabilistik.

Sebaliknya, interpretasi Many-Worlds yang diperkenalkan oleh Hugh Everett (1957) menawarkan pemahaman yang berbeda, di mana setiap pengamatan tidak mengarah pada kolaps fungsi gelombang, melainkan pada penciptaan alam semesta paralel yang terpisah. Dalam kerangka ini, setiap keputusan pengamatan menghasilkan cabang dunia yang mengarah pada kemungkinan realitas yang terpisah dan berdiri sendiri (Everett, 1957). Pendekatan ini memberikan gambaran bahwa alam semesta kita bukanlah satu-satunya yang ada, tetapi bagian dari multiverse, di mana setiap cabang memiliki hukum fisika yang konsisten namun berbeda (Carroll, 2019). Ini mengarahkan pada pandangan deterministik terhadap evolusi alam semesta, di mana semua kemungkinan sudah terjadi dalam dunia paralel yang berbeda, dan tidak ada kebutuhan untuk fungsi gelombang yang kolaps.

Selain itu, pendekatan seperti gravitasi medan kuantum, teori string, Loop Quantum Gravity (LQG), dan teori holografi juga menawarkan wawasan penting terhadap pemahaman kita tentang realitas. Misalnya, dalam gravitasi medan kuantum, ruang-waktu dianggap sebagai entitas yang berfluktuasi pada skala Planck, dan pengamat berperan dalam menyusun realitas yang terwujud dalam proses pengukuran (Rovelli & Vidotto, 2022). Di sisi lain, dalam teori string, yang menyarankan adanya lebih banyak dimensi tersembunyi di luar dimensi ruang-waktu yang kita alami, pemahaman kita tentang realitas dapat melampaui pandangan terbatas kita tentang alam semesta yang hanya terdiri dari empat dimensi (Le Bihan, 2020).

Loop Quantum Gravity (LQG) membawa konsep diskretisasi ruang-waktu ke dalam gambaran kosmologi kuantum, dengan menyarankan bahwa ruang-waktu pada skala Planck tidak lagi kontinu, melainkan terdiri dari elemen-elemen kuantum kecil yang membentuk jaringan (Rovelli & Vidotto, 2022). Pendekatan ini sejalan dengan gagasan bahwa fluktuasi kuantum pada skala ini bisa menciptakan berbagai cabang realitas, mendukung teori Many-Worlds dalam konteks kosmologi. Di sisi lain, teori holografi menawarkan pemahaman bahwa seluruh informasi mengenai alam semesta dapat direpresentasikan sebagai data dua dimensi yang terkandung pada permukaan batas alam semesta, yang mempengaruhi pandangan kita tentang ruang dan waktu sebagai fenomena yang lebih mendalam dan terkait erat dengan informasi kuantum.

Dalam konteks ini, interpretasi Copenhagen dan Many-Worlds berperan dalam memperluas wawasan kita tentang realitas. Copenhagen mengajukan bahwa realitas fisik hanya terwujud pada saat pengukuran, memperkenalkan konsep probabilistik yang

mendorong kita untuk melihat realitas sebagai sesuatu yang dibentuk melalui interaksi pengamat dan sistem fisik. Sementara itu, Many-Worlds mengusulkan bahwa setiap kemungkinan peristiwa fisik terwujud dalam cabang-cabang dunia paralel, yang memberikan pemahaman yang lebih luas tentang multiverse dan determinisme dalam kosmologi kuantum. Kedua interpretasi ini, dengan bantuan teori-teori seperti inflasi kuantum dan LQG, menantang pandangan tradisional kita tentang realitas yang bersifat tetap dan objektif, dan mendorong kita untuk merenungkan peran kita sebagai pengamat aktif dalam konstruksi realitas tersebut.

#### **3.4.4. Ketidakpastian dan Keberadaan: Apakah Alam Semesta Memiliki Tujuan?**

Kosmologi kuantum tidak hanya menyelidiki mekanisme alam semesta, tetapi juga menggugah kita untuk mempertanyakan makna dan tujuan eksistensinya. Jika ketidakpastian dan probabilitas merupakan elemen fundamental alam semesta, apakah ada tujuan yang lebih dalam, ataukah ia sekadar hasil fluktuasi acak (Linde, 1982)? Ini menantang kita untuk mempertimbangkan posisi kita: apakah kita benar-benar memahami alam semesta, atau hanya produk dari fluktuasi kuantum?

Interpretasi Copenhagen menyatakan bahwa realitas fisik hanya terwujud saat pengukuran dilakukan, dengan alam semesta berada dalam keadaan probabilistik hingga diamati. Ini terkait dengan ketidakpastian di skala Planck, di mana fluktuasi ruang-waktu muncul dan membentuk kenyataan (Bohr, 1928). Sebaliknya, Many-Worlds mengusulkan bahwa setiap pengukuran menghasilkan cabang-cabang dunia paralel, yang masing-masing terwujud secara simultan dan mengikuti hukum fisika yang konsisten, menciptakan multiverse yang lebih luas (Everett, 1957; Carroll, 2019).

Pendekatan-pendekatan ini juga relevan dengan teori-teori modern seperti gravitasi medan kuantum, teori string, Loop Quantum Gravity (LQG), dan teori holografi. LQG menyarankan ruang-waktu terkuantisasi, di mana fluktuasi kuantum pada skala Planck dapat menghasilkan pemisahan alam semesta (Rovelli & Vidotto, 2022). Teori string membuka kemungkinan dimensi tambahan yang dapat mempengaruhi realitas kita, sementara teori holografi menggambarkan ruang-waktu sebagai informasi dua dimensi yang terkait dengan permukaan batas, memperluas pemahaman tentang realitas.

Konflik antara Copenhagen dan Many-Worlds terletak pada bagaimana kita memandang "realitas". Copenhagen melihatnya sebagai probabilistik hingga diamati, sedangkan Many-Worlds melihat realitas terwujud dalam banyak cabang dunia yang terpisah, memberi gambaran deterministik dan ketergantungan pada keputusan-keputusan fisik yang terjadi.

Kedua interpretasi ini, bersama dengan teori-teori kuantum, mengubah cara kita memandang alam semesta, mendorong kita untuk bertanya apakah alam semesta memiliki tujuan atau hanya hasil dari fluktuasi acak. Juga, peran pengamat dalam menciptakan realitas membuka pertanyaan lebih dalam tentang hubungan kita dengan kosmos.

### **4. KESIMPULAN**

Artikel ini menggali pertemuan antara dua pilar besar dalam fisika modern: teori relativitas umum dan mekanika kuantum, yang meskipun mengungkapkan keindahan alam semesta secara terpisah, ternyata bertentangan dalam menjelaskan inti realitas itu sendiri. Konflik ini membuka jendela baru menuju pencarian revolusioner untuk teori gravitasi kuantum, dengan upaya penyatuan melalui pendekatan canggih seperti teori string dan loop quantum gravity. Meskipun pendekatan ini menjanjikan, tantangan

eksperimental dan teoretis yang ada menunjukkan bahwa kita baru saja menggores permukaan pemahaman tentang ruang, waktu, dan gravitasi. Kosmologi kuantum, dengan segala paradoks dan keajaibannya, mengundang kita untuk mempertanyakan kembali dasar-dasar realitas, yang selama ini kita anggap pasti dan jelas.

Pencapaian besar dalam fisika membutuhkan lompatan imajinatif yang lebih berani. Oleh karena itu, penelitian lebih lanjut harus berani menantang batasan teori yang ada dan membuka jalan untuk eksperimentasi yang lebih radikal. Kolaborasi antara filosofi, matematika, dan eksperimen mutakhir harus menjadi landasan untuk merumuskan teori yang tidak hanya menyatakan alam semesta fisik, tetapi juga mendalamkan pemahaman kita tentang keberadaan kita di dalamnya. Langkah berani untuk meretas batas antara dunia makroskopik dan mikroskopik akan membawa kita lebih dekat ke pengungkapan kebenaran kosmik yang selama ini tersembunyi.

## REFERENCES

- Abdeen, M. S., & de Silva, L. N. K. (2013). Incompatibility of General Relativity with Quantum Mechanics. *Proceedings of Technical Sessions*, 29, 57-63.
- Berkeley, G. (1710). *A Treatise Concerning the Principles of Human Knowledge*.
- Boe, Maria Roswita (2023). *Ruang Dan Waktu Sebagai Bentuk Presentasi Dari Intuisi A Priori Perspektif Immanuel Kant*. PEDAGOGI: Jurnal Ilmiah Pendidikan. Volume 9, No. 2, 2023, pp.54-61.
- Bohm, D. (1980). *Wholeness and the Implicate Order*. Routledge.
- Bohr, N. (1928). The Quantum Postulate and the Recent Development of Atomic Theory. *Nature*, 121, 580-590.
- Carroll, S. (2019). *Something Deeply Hidden: Quantum Worlds and the Emergence of Spacetime*. Dutton.
- Carroll, S. (2019). *The Big Picture: On the Origins of Life, Meaning, and the Universe Itself*. Dutton.
- Einstein, A. (1915). Die Grundlage der allgemeinen Relativitätstheorie. *Annalen der Physik*, 354(7), 769-822.
- Esposito, G. (2024). An Introduction to Quantum Gravity. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1108.3269>.
- Everett, H. (1957). Many-Worlds Interpretation of Quantum Mechanics. *Journal of the Franklin Institute*, 262(3), 118-133.
- Feynman, R. P. (1965). *The Feynman Lectures on Physics*. Addison-Wesley.
- Green, M.B., & Schwarz, J.H. (1984). Anomaly cancellation in supersymmetric  $D=10$  gauge theory and superstring theory. *Physics Letters B*, 149(1), 117-122. doi:10.1016/0370-2693(84)91940-2.
- Heisenberg, W. (1927). Über den anschaulichen Inhalt der quantentheoretischen Kinematik und Mechanik. *Zeitschrift für Physik*, 43(3-4), 172-198.
- Heisenberg, W. (1958). *Physics and Philosophy: The Revolution in Modern Science*. Harper & Row.
- Hawking, S. W., & Penrose, R. (1996). *The Nature of Space and Time*. Princeton University Press.
- Howl, R., Penrose, R., & Fuentes, I. (2019). Exploring the unification of quantum theory and general relativity with a Bose-Einstein condensate. *New J. Phys.*, 21, 043047. <https://doi.org/10.1088/1367-2630/ab104a>.

- Jakobsen, Gustav Uhre (2020). General Relativity From Quantum Field Theory. Master's Thesis: Niels Bohr International Academy, The Niels Bohr Institute, University of Copenhagen. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2010.08839> or arXiv:2010.08839
- Le Bihan, B. (2020). String Theory, Loop Quantum Gravity and Eternalism. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2005.09335>.
- Linde, A. (1982). A New Inflationary Universe Scenario: A Possible Solution of the Horizon, Flatness, Homogeneity, and Primordial Monopole Problems. *Physics Letters B*, 108(6), 389-393.
- Macías, A., & Camacho, A. (2008). On the incompatibility between quantum theory and general relativity. *Physics Letters B*, 663, 99–102.
- Maldacena, J. (1997). *The large N limit of superconformal field theories and supergravity*. *International Journal of Theoretical Physics*, 38(1), 111-146. doi:10.1023/A:1026654312961.
- Mamone-Capri, M. (2018). On the Incompatibility of Special Relativity and Quantum Mechanics. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1704.02587>.
- Natesan, P. (2022). General Relativity Vs Quantum Mechanics, Incompatibility Solved with Real Dimensions of Space-Time. *International Journal of Advanced Research in Physical Science (IJARPS)*, 9(9), 1-11. ISSN No. (Online) 2349-7882. www.arcjournals.org.
- Penrose, R. (1965). Gravitational Collapse and Space-Time Singularities. *Physical Review Letters*, 14(3), 57-59.
- Prabhakaran, N. (2022). General Relativity Vs Quantum Mechanics, Incompatibility Solved with Real Dimensions of Space-Time. *International Journal of Advanced Research in Physical Science (IJARPS)*, 9(9), 1-11. ISSN No. (Online) 2349-7882.
- Rovelli, C. (2016). *Reality Is Not What It Seems: The Journey to Quantum Gravity*. Riverhead Books.
- Rovelli, C., & Vidotto, F. (2022). Philosophical Foundations of Loop Quantum Gravity. *arXiv:2211.06718v2*.
- Rovelli, C., & Vidotto, F. (2022). *Covariant Loop Quantum Gravity: An Elementary Introduction to Quantum Gravity and Spacetime Structure*. Cambridge University Press.
- Rovelli, C., & Smolin, L. (1995). *Loop quantum gravity and the quantum black hole*. *Nuclear Physics B*, 442(3), 593-628. doi:10.1016/0550-3213(95)00265-I..
- Yasmini, Luh Putu Budi. 2021. Gravitasi: Gaya vs. Geometri. Indonesian Physical Review Volume 4 Issue 1, January 2021 P-ISSN: 2615-1278, E-ISSN: 2614-7904. DOI:10.29303/ijpr.v4i1.69
- Zinkernagel, H. (2006). The Philosophy Behind Quantum Gravity. *An International Journal for Theory, History and Foundations of Science*, 21(3), 295-312.