

Dualisme Gelombang-Partikel: Landasan Teori, Transformasi Konsep Ilmiah, dan Implikasi pada Fisika Modern

Margareth Jacoba Da Gomes^{1*}, Elisabeth Endang Permata Simbolon², Loni Ignasia Lingga³, Miftahul Jannah⁴, Rizki Salsabila Batubara⁵, Deo Demonta Panggabean⁶, Ladestam Sitinjak⁷

^{1,2,3,4,5,6,7} Jurusan Fisika, Program Studi Pendidikan Fisika, FMIPA, Universitas Negeri Medan, Medan, Indonesia.

Received:

Revised:

Accepted:

Corresponding Author:

Margareth Jacoba Da Gomes

margarethjdgomes@gmail.com

© 2025 Kappa Journal is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International License](#)



DOI:

<https://doi.org/10.29408/kpj.v9i3.32457>

Abstract: Wave-particle dualism is a fundamental concept that has shaped physics since the early twentieth century and remains central to modern physics research. This study aims to examine the development of wave-particle dualism through three key phenomena: black-body radiation, the photoelectric effect, and Compton scattering. The method employed is a systematic literature review of 10 peer-reviewed journal articles published between 2018 and 2024, focusing on theoretical perspectives, experimental evidence, and conceptual implications. The results indicate that research on black-body radiation has progressed from the development of high-precision radiation sources toward the control of atomic energy shifts and light polarization. Studies on the photoelectric effect reveal its dual role as both an effective educational tool through simple, low-cost experiments and a platform for advanced investigations of electron momentum distribution. Meanwhile, research on Compton scattering spans practical applications such as radiation detector calibration and theoretical modeling of photon-electron interactions in extreme quantum fields. Overall, this study demonstrates that wave-particle dualism is not merely a historical concept but an evolving framework that continues to inform theoretical development, experimental validation, and technological innovation. The findings have implications for physics education, experimental design, and future research on quantum phenomena by highlighting the interconnected nature of foundational quantum effects.

Keywords: wave-particle duality; blackbody radiation; photoelectric effect; Compton scattering; quantum physics

Pendahuluan

Kajian mengenai cahaya dan materi pada skala mikroskopis merupakan salah satu landasan utama dalam perkembangan Fisika Modern. Sejumlah eksperimen pada awal abad ke-20 menunjukkan bahwa teori klasik tidak mampu memberikan penjelasan yang memadai terhadap fenomena tertentu (Nugraha, 2022).

Radiasi benda hitam memperkenalkan gagasan kuantisasi energi melalui konstanta Planck, yang menunjukkan bahwa energi radiasi tidak dipancarkan secara kontinu, melainkan dalam paket-paket diskrit.

Efek fotolistrik selanjutnya menegaskan peran foton sebagai pembawa energi diskrit, di mana pelepasan elektron dari permukaan logam hanya bergantung pada frekuensi cahaya dan tidak dapat dijelaskan oleh teori gelombang klasik. Sementara itu, hamburan Compton memperluas pemahaman tersebut dengan menunjukkan bahwa foton tidak hanya membawa energi, tetapi juga momentum, yang terkonfirmasi melalui perubahan panjang gelombang akibat tumbukan dengan elektron. Dengan demikian, ketiga fenomena ini secara berurutan memperlihatkan

How to Cite:

Gomes, M. J. D., Simbolon, E. E. P., Lingga, L. I., Jannah, M., Batubara, R. S., Panggabean, D. D., & Sitinjak, L. (2025). Dualisme Gelombang-Partikel: Landasan Teori, Transformasi Konsep Ilmiah, dan Implikasi pada Fisika Modern. *Kappa Journal*, 9(3), 393-403. <https://doi.org/10.29408/kpj.v9i3.32457>

pergeseran konseptual dari pandangan klasik menuju deskripsi kuantum, serta saling melengkapi dalam menjelaskan sifat ganda cahaya sebagai gelombang dan partikel. Integrasi ketiga fenomena ini menjadi landasan penting bagi pengembangan teori kuantum modern dan pemahaman konseptual tentang dualisme gelombang-partikel (Irfan, 2023).

Namun, kajian-kajian sebelumnya cenderung membahas radiasi benda hitam, efek fotolistrik, dan hamburan Compton secara terpisah, baik dalam konteks historis maupun matematis. Penelitian oleh (Nugraha, 2022) dan (Irfan, 2023) menekankan peran masing-masing fenomena sebagai tonggak perkembangan fisika kuantum, tetapi belum mengkaji keterkaitan konseptual ketiganya secara terpadu dalam menjelaskan dualisme gelombang-partikel. Demikian pula, (Hidayati, 2024) lebih memfokuskan kajiannya pada pemahaman fenomena individual melalui pendekatan konseptual dan simulasi, tanpa mengintegrasikan ketiga fenomena tersebut sebagai satu kesatuan dasar konseptual.

Selain itu, sejumlah penelitian lebih menitikberatkan pada aspek formal dan persamaan matematis dari fenomena kuantum, sehingga penekanan terhadap makna fisik dan hubungan konseptual antar fenomena masih terbatas (Nurlina & Bancong, 2020; Ridha et al., 2024). Kondisi ini menunjukkan bahwa integrasi radiasi benda hitam, efek fotolistrik, dan hamburan Compton sebagai fondasi konseptual dualisme gelombang-partikel belum banyak dibahas secara komprehensif.

1. Konsep Dualisme Gelombang Partikel

Konsep dualisme gelombang-partikel menyatakan bahwa cahaya dan materi memiliki sifat sebagai gelombang dan partikel. Pada tahun 1901, Planck menyatakan bahwa cahaya sebagai gelombang elektromagnetik juga dianggap sebagai paket-paket energi yang disebut foton, di mana besar paket energi tiap foton adalah: $E = hv$ (Nugraha, 2022). Keyakinan bahwa cahaya juga memiliki sifat sebagai partikel diperkuat oleh eksperimen A. H. Compton yang mampu menunjukkan bahwa foton memiliki momentum dengan mempelajari tumbukan antara foton dengan elektron, di mana besarnya adalah:

$$p = \frac{hv}{c} \quad \dots (1)$$

Dualisme gelombang partikel merupakan salah satu tonggak penting dalam perkembangan fisika modern yang menandai pergeseran paradigma dari fisika klasik menuju fisika kuantum. Dalam pandangan klasik, cahaya dianggap murni sebagai gelombang elektromagnetik berdasarkan teori Maxwell, sementara materi diasosiasikan dengan partikel diskrit yang memiliki massa dan momentum. Namun, perkembangan penelitian sejak awal abad ke-20

menunjukkan bahwa pemisahan tersebut tidak sepenuhnya benar. Cahaya, yang sebelumnya dipahami hanya sebagai gelombang, ternyata menunjukkan sifat partikel melalui fenomena efek fotolistrik sebagaimana dijelaskan oleh Einstein. Sebaliknya, partikel bermassa seperti elektron dan neutron juga memperlihatkan perilaku gelombang ketika melewati kisi difraksi atau celah ganda, sebagaimana dibuktikan oleh eksperimen Davisson-Germer (1927). Fenomena inilah yang melahirkan gagasan dualisme gelombang partikel, yaitu bahwa entitas kuantum dapat memperlihatkan sifat gelombang maupun sifat partikel, tergantung pada bagaimana ia diobservasi dan jenis eksperimen yang dilakukan.

Dalam konteks modern, dualisme gelombang-partikel tidak lagi dipandang sebagai paradoks filosofis, melainkan dikaji melalui pendekatan teoretis dan eksperimental yang menegaskan sifat gelombang intrinsik pada partikel bermassa. Studi interferensi pada molekul berskala besar menunjukkan bahwa sifat gelombang bukan hanya terbatas pada foton atau elektron, tetapi dapat muncul pada sistem kompleks, sehingga memperluas penerapan dualisme hingga skala meso dan makro (Mairhofer & Passon, 2022).

Selain itu, eksperimen berbasis pengukuran lemah (weak measurement) memperlihatkan bahwa aspek gelombang dan partikel dapat dimanifestasikan secara kontekstual dalam satu sistem kuantum yang sama, sebagaimana ditunjukkan melalui konsep *quantum Cheshire cat*, di mana interferensi dan informasi jalur dapat diamati secara bersamaan tanpa saling meniadakan (J. K. Li et al., 2023).

2. Hipotesis de Broglie

Pada tahun 1924, Louis de Broglie, seorang filosof Perancis, mengajukan hipotesis bahwa sifat ganda yang dimiliki cahaya (gelombang elektromagnetik pada umumnya) juga dimiliki oleh partikel material. Artinya partikel material juga dapat menunjukkan sifat gelombang sebagaimana ditunjukkan oleh foton. Menurut de Broglie, terhadap setiap partikel yang berenergi E dan bergerak dengan momentum linear p terdapat gelombang yang diasosiasikan dengannya. Gelombang yang diasosiasikan dengan partikel yang bergerak itu disebut gelombang materi, atau gelombang de Broglie. Dalam konteks yang demikian dapat dikatakan bahwa gelombang elektromagnetik adalah gelombang de Broglie yang diasosiasikan dengan foton (Nurlina & Bancong, 2020).

Pemikiran de Broglie terkait dengan fenomena dualisme cahaya yang dianalogikan dengan dualisme partikel-gelombang, yaitu bahwa partikel seperti elektron juga memiliki sifat seperti gelombang. Pemikiran ini dituangkan dalam disertasi doktoralnya pada tahun 1924, yang mengkaji teori dualisme dengan

menganalisis persamaan yang telah Einstein untuk foton, yakni $E = hf$. Menurut de Broglie sebuah partikel yang memiliki momentum p jika dipandang sebagai gelombang, akan memiliki panjang gelombang yang dinyatakan dengan persamaan:

$$\lambda = \frac{h}{p} \dots (2)$$

dengan λ adalah panjang gelombang de Broglie, h konstanta Planck ($6,626 \times 10^{-34}$ Js), dan $p = mv$ momentum linear partikel bermassa m dengan kecepatan v . Rumus ini menunjukkan bahwa panjang gelombang suatu partikel berbanding terbalik dengan momentumnya: semakin besar momentum, semakin kecil panjang gelombangnya (Barasa, Putra, Manihuruk, Nadila, & Nurhafiza, 2025).

Hipotesis ini awalnya bersifat teoretis, namun dibuktikan secara eksperimen melalui percobaan Davisson-Germer (1927). Dalam eksperimen tersebut, ditunjukkan pola difraksi elektron pada kristal nikel sesuai dengan prediksi panjang gelombang de Broglie. Temuan tersebut menegaskan bahwa partikel bermassa juga memiliki sifat gelombang dan menjadi dasar bagi pengembangan mekanika kuantum gelombang, yang kemudian diformalkan melalui Persamaan Schrödinger dengan fungsi gelombang ψ sebagai representasi probabilitas keberadaan partikel (Nurlina, 2017).

3. Bukti Eksperimen Gelombang Materi

Hipotesis de Broglie tentang sifat gelombang pada partikel bermassa tidak hanya dibuktikan melalui eksperimen awal, tetapi juga diperluas ke sistem yang lebih kompleks, seperti biomolekul. Demonstrasi interferensi pada peptida gramicidin menunjukkan bahwa meskipun memiliki struktur internal yang kompleks, sifat gelombang materi tetap dapat diamati ketika kondisi eksperimen dikendalikan dengan baik. Pola interferensi yang dihasilkan konsisten dengan prediksi panjang gelombang de Broglie, sehingga menegaskan bahwa dualitas gelombang-partikel bersifat universal dan tidak terbatas pada partikel elementer atau molekul sederhana (Shayeghi et al., 2020).

Temuan tersebut memiliki implikasi luas, baik dalam mekanika kuantum fundamental maupun pengembangan teknologi dan pendidikan. Dari sisi fundamental, eksperimen ini memperluas batas ukuran dan kompleksitas sistem yang masih dapat menunjukkan interferensi kuantum. Dari sisi aplikasi, keberhasilan mempertahankan koherensi gelombang materi pada biomolekul membuka peluang bagi pengembangan interferometri molekuler dan sensor kuantum. Dalam konteks pendidikan, keterbatasan fasilitas eksperimen nyata mendorong penggunaan simulasi sebagai alternatif, yang terbukti dapat meningkatkan pemahaman mahasiswa terhadap

konsep interferensi dan difraksi gelombang-materi dibandingkan pembelajaran teori semata (Hidayati, Izzulhaq, Oktamaypasha, & Rini, 2024).

4. Mekanika Kuantum dan Fungsi Gelombang

Dalam cabang fisika, mekanika kuantum mempelajari perilaku dan interaksi partikel atomik dan subatomik. Teori mekanika kuantum terdiri dari dua komponen utama; prinsip ketidakpastian dan sifat gelombang partikel subatomik (Ridha et al., 2024). Suatu fungsi gelombang berfungsi sebagai probability amplitude, di mana kuadrat modulus nya, menunjukkan bahwa distribusi probabilitas partikel dalam ruang fase. Ini sejalan dengan gagasan Born bahwa realitas kuantum bersifat probabilistik bukan deterministik. Hukum dasar Schrodinger

$$i\hbar \frac{\partial \psi}{\partial t} = H \psi \dots (3)$$

menghubungkan energi sistem dengan fungsi gelombangnya. Probabilitas kuantum menunjukkan "kerapatan peluang" untuk menemukan partikel pada posisi tertentu (Jong, Kim, Jon, & Jo, 2023). Konsep probabilitas dalam mekanika kuantum sangat penting, bukan karena keterbatasan pengukuran, melainkan karena sifat hakiki sistem kuantum.

Heisenberg berpendapat bahwa ketelitian tak terbatas tidak dapat bersamaan dengan posisi dan momentum. Menurut BO (2023) ketidakpastian terkait dengan hukum konservasi energi tidak hanya dari batasan pengukuran. Ia menunjukkan bahwa, tidak seperti dalam formulasi klasik Heisenberg, $\Delta x \Delta p$ memiliki batas bawah dan atas. Ini menawarkan perspektif baru bahwa prinsip ketidakpastian adalah hasil dari sifat dasar dinamika gelombang bukan dari kesalahan pengukuran. Wang (2022) mengatakan bahwa hubungan antara ketidakpastian posisi-momentum dan waktu-energi sering disalahartikan. Ia menekankan bahwa persamaan Robertson ($\Delta x \Delta p \geq \hbar/2$) tidak terkait dengan eksperimen secara langsung, tetapi merupakan hasil matematis formal. waktu-energi tidak memiliki dasar fisik yang jelas karena tidak ada bukti eksperimen yang mendukungnya.

5. Efek Fotolistrik

Efek fotolistrik terjadi ketika elektron terlepas dari permukaan logam ketika cahaya dengan frekuensi di atas ambangnya disinari. Menurut Einstein, cahaya terdiri dari atas foton dengan energi $E = hf$, yang digunakan untuk mengatasi fungsi kerja logam ϕ dan sisanya akan menjadi energi kinetik maksimum elektron ($K_{max} = hf - \phi$). Karakteristik penting dari efek ini adalah adanya frekuensi ambang, energi kinetik elektron yang bergantung pada frekuensi, dan intensitas cahaya yang hanya mempengaruhi jumlah elektron dan bukan energinya (Khumaeni, 2022). Eksperimen yang dilakukan dengan simulasi PhET

menunjukkan hubungan linier antara frekuensi cahaya dan energi kinetik. Ini juga dapat digunakan untuk menemukan konstanta Planck secara praktis (Anwar, Isnaini, & Utami, 2018). Menurut penelitian lain, fungsi kerja logam menentukan frekuensi ambang dan membentuk inti sel surya (Hartanti & Amilian, 2025). Selain itu, penelitian yang menggunakan mikrokontroler dan LED RGB menunjukkan metode alternatif untuk mengamati efek fotolistrik di laboratorium dengan sumber cahaya variabel (Umma & Sucahyo, 2017).

6. Efek Compton

Arthur H. Compton pertama kali mengamati efek Compton pada tahun 1923 saat meneliti hamburan sinar-X pada elektron. Fenomena ini menunjukkan bahwa panjang gelombang sinar-X yang terhambur berubah sesuai dengan sudut hamburan, sesuai dengan persamaan berikut:

$$\Delta\lambda = \frac{h}{m_e c} (1 - \cos(\theta)) \quad \dots (4)$$

Persamaan ini dapat dijelaskan apabila foton dianggap sebagai partikel yang membawa momentum. Efek Compton adalah bukti langsung bahwa cahaya memiliki sifat dualitas gelombang-partikel, yang membawa momentum dan energi sekaligus. Kajian teoritis kontemporer menunjukkan bahwa model tambahan diperlukan untuk menjelaskan bagaimana foton berinteraksi dengan elektron terikat. Untuk menjelaskan distribusi momentum elektron, dapat menggunakan berbagai pendekatan, termasuk aproksimasi impuls dan pendekatan *ab-initio*. Ini berdampak pada spektrum Compton (Y. Li, Chen, Yu, Walukiewicz, & Gong, 2021).

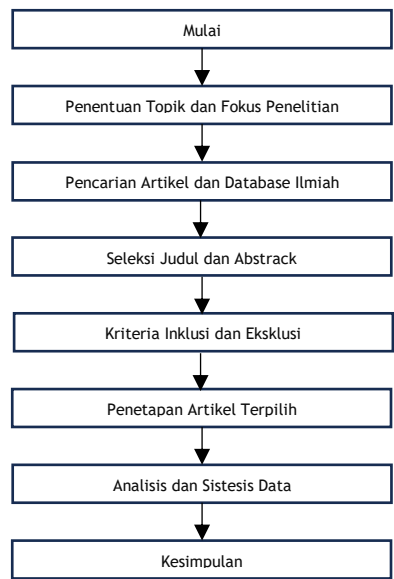
Pengaruh bentuk cahaya Hermite-Gaussian pada spektrum hamburan Compton, menemukan variasi distribusi yang menunjukkan bahwa hasil hamburan dipengaruhi langsung oleh momentum foton (Agui, Sakurai, Tsuji, Ito, & Nitta, 2021). Compton ionization adalah bagian penting dari hamburan sinar-X femtosekon pada skala waktu ultrafast. Mereka menunjukkan konservasi momentum yang konsisten meskipun dalam proses kuantum yang sangat cepat. Pengembangan kamera gamma untuk mengukur radioaktivitas adalah contoh aplikasi praktis dari efek Compton. Studi terbaru menunjukkan bahwa kalibrasi instrumen ini harus memperhitungkan pergeseran energi yang disebabkan oleh hamburan Compton (Chen-Mayer, Sahin, Remley, Brown, & Goodman, 2024). Ketebalan sampel dan kondisi medium memengaruhi intensitas dan polarisasi hamburan sinar-X, ini sesuai dengan teori Compton mengenai momentum foton (Saito, Tanaka, & Kawai, 2022). Dengan demikian, foton tidak hanya membawa

energi tetapi juga momentum, dan efek Compton adalah dasar dari teknologi modern berbasis radiasi.

Metode

Metode penelitian ini menggunakan pendekatan kajian pustaka secara sistematis untuk menelaah perkembangan konsep dualisme gelombang-partikel tanpa melakukan percobaan langsung di laboratorium. Pendekatan ini dipilih karena tujuan utamanya adalah mengumpulkan, menilai, dan merangkum hasil penelitian yang sudah diterbitkan, sehingga dapat memberikan gambaran yang menyeluruh mengenai teori, bukti percobaan, serta perubahan pemahaman ilmiah yang terjadi. Proses kajian dilakukan secara terencana dan berurutan agar setiap tahap dapat diperiksa kembali oleh peneliti lain. Kerangka kajian difokuskan pada tiga pokok bahasan, yaitu radiasi benda hitam, efek fotolistrik, dan efek Compton sebagai pilar utama dalam pembahasan dualisme gelombang-partikel.

Penelitian ini dilaksanakan melalui beberapa tahapan yang disusun secara sistematis sebagaimana ditunjukkan pada diagram alir penelitian. Proses dimulai dengan penentuan topik dan fokus penelitian yang diarahkan pada kajian dualisme gelombang-partikel. Tahap selanjutnya adalah pencarian artikel pada database ilmiah, yang kemudian dilanjutkan dengan seleksi judul dan abstrak untuk menilai kesesuaian awal dengan fokus kajian. Artikel yang lolos tahap awal selanjutnya melalui seleksi teks lengkap berdasarkan kriteria inklusi dan eksklusi yang telah ditetapkan. Melalui tahapan tersebut diperoleh artikel yang memenuhi kriteria dan ditetapkan sebagai artikel terpilih. Artikel terpilih selanjutnya dianalisis dan disintesis secara sistematis sehingga menghasilkan gambaran yang utuh mengenai perkembangan dan pemaknaan konsep dualisme gelombang-partikel, yang pada akhirnya menjadi dasar dalam penarikan kesimpulan penelitian.



Gambar 1. Diagram Alur Penelitian

1. Sumber Data dan Pencarian Artikel

Sumber data dalam penelitian ini berupa artikel jurnal ilmiah yang diperoleh melalui beberapa basis data daring, yaitu Google Scholar, ScienceDirect, SpringerLink, dan DOAJ. Pemilihan basis data tersebut didasarkan pada reputasi, kredibilitas, serta cakupan publikasi yang luas terhadap jurnal nasional dan internasional di bidang fisika, fisika kuantum, dan pendidikan fisika. Basis data tersebut menyediakan berbagai artikel yang relevan dengan perkembangan teori dan eksperimen fisika modern, sehingga mampu mendukung tujuan penelitian dalam menelaah konsep dualisme gelombang-partikel secara komprehensif dan terpercaya.

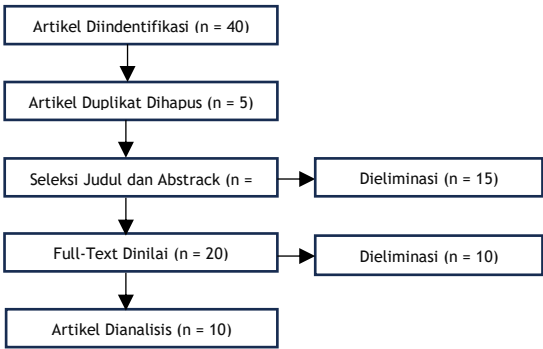
Pencarian artikel dilakukan dengan menggunakan kata kunci yang berhubungan erat dengan konsep dualisme gelombang-partikel. Kata kunci digunakan secara tunggal maupun dikombinasikan untuk memperluas jangkauan pencarian dan meningkatkan relevansi hasil. Proses pencarian disesuaikan dengan fitur masing-masing basis data, seperti penyaringan berdasarkan tahun terbit, jenis dokumen, dan ketersediaan teks lengkap. Artikel yang diperoleh kemudian diseleksi secara bertahap melalui penelaahan judul, abstrak, dan naskah lengkap untuk memastikan kesesuaiannya dengan fokus kajian penelitian.

2. Proses Seleksi Artikel

Proses seleksi artikel dalam penelitian ini dilakukan secara sistematis dengan mengacu pada pedoman PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses). Pada tahap identifikasi diperoleh 40 artikel dari seluruh basis data yang digunakan, kemudian dilakukan penghapusan artikel duplikat sehingga tersisa 35 artikel. Selanjutnya, tahap penyaringan berdasarkan judul dan abstrak

mengeliminasi 15 artikel yang tidak relevan dengan topik dualisme gelombang-partikel, sehingga diperoleh 20 artikel untuk tahap berikutnya.

Tahap selanjutnya adalah penilaian kelayakan artikel melalui pembacaan teks lengkap untuk memastikan kesesuaian isi dengan tujuan dan fokus penelitian. Pada tahap ini, sebanyak 10 artikel dieliminasi karena tidak memenuhi kriteria inklusi yang telah ditetapkan, seperti tidak membahas secara spesifik fenomena utama dualisme gelombang-partikel atau tidak menyediakan naskah lengkap yang dapat dianalisis. Melalui proses seleksi tersebut, diperoleh 10 artikel jurnal yang dinyatakan layak, yang selanjutnya diolah dan dianalisis secara mendalam guna memperoleh sintesis konseptual yang komprehensif mengenai perkembangan dan pemahaman konsep dualisme gelombang-partikel, sebagaimana ditunjukkan pada diagram alir seleksi artikel berikut.



Gambar 2. Diagram PRISMA Penelitian

3. Artikel Yang Terpilih

Berdasarkan seluruh tahapan seleksi tersebut, diperoleh sepuluh artikel jurnal yang paling relevan dengan fokus kajian. Artikel-artikel terpilih disajikan pada Tabel 1. berikut.

Tabel 1. Artikel Terpilih			
Judul Artikel	Nama Jurnal	Tahun Terbit	
Effect on Compton Scattering Spectra by Hermite-Gaussian Light	Crystals	2021	
Eksperimen Efek Foto Listrik Berbasis Simulasi PhET	Paedagogia	2018	
Studi Pemahaman Konsep Dualisme Gelombang-Partikel Pada Mahasiswa Jurusan Fisika	Jurnal Review Pendidikan dan Pengajaran	2025	
Reinvestigation of Heisenberg's Uncertainty Principle and a New Deduction	International Journal of Physics	2023	

of Schrodinger Equation			
Calibration of a Gamma Ray Compton Camera for Radioactivity Measurements	Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry	2024	
Efek Fotolistrik dan Aplikasinya dalam Teknologi Surya	Journal of Science and Technology: Alpha	2025	
DIY Innovations in Quantum Physics: Proving Light Dualism with Photoelectric Effect and Double Slit Experiments	Jurnal Pendidikan dan Ilmu Fisika	2024	
Experimental Demonstration of Separating the Wave-Particle Duality of a Single Photon	Light: Science and Applications	2023	
Reconsidering the Relation Between Matter Wave Interference and Wave-Particle Duality	Foundations of Physics	2022	
Percobaan Efek Fotolistrik Berbasis Mikrokontroller	Inovasi Fisika Indonesia	2017	

Hasil dan Pembahasan

Untuk memetakan perkembangan pemikiran dan bukti eksperimental mengenai dualisme gelombang-partikel, dilakukan telaah literatur secara mendalam. Hasil kajian disajikan dalam tabel komparatif yang menyoroti tiga fenomena kunci: radiasi

Dengan Led Rgb Sebagai Sumber Cahaya

4. Teknik Analisis Data

Teknik analisis data yang digunakan dalam kajian ini adalah analisis tematik kualitatif, yang dilakukan dengan menelaah setiap artikel terpilih secara sistematis. Analisis difokuskan pada beberapa indikator utama, yaitu tujuan penelitian, fenomena kuantum yang dikaji meliputi radiasi benda hitam, efek fotolistrik, dan efek Compton pendekatan yang digunakan (teoretis atau eksperimental), serta kontribusi temuan terhadap pemahaman konsep dualisme gelombang-partikel.

Pendekatan ini memungkinkan peneliti mengidentifikasi pola, kesamaan, dan perbedaan antar hasil penelitian dari berbagai sudut pandang teoretis maupun eksperimental, sehingga hubungan antar fenomena kuantum dapat dipahami secara lebih menyeluruh. Melalui analisis tematik, setiap temuan tidak hanya diperlakukan sebagai hasil terpisah, tetapi disatukan dalam kerangka konseptual yang utuh. Dengan demikian, diperoleh gambaran yang komprehensif mengenai perkembangan pemikiran ilmiah, kekuatan bukti empiris, serta arah kajian dualisme gelombang-partikel dalam fisika modern.

benda hitam sebagai pijakan historis, efek fotolistrik sebagai pembuktian kuantum cahaya, dan efek Compton sebagai verifikasi momentum foton. Ringkasan pada tabel ini menjadi dasar analisis lebih lanjut mengenai kesamaan, perbedaan, dan arah perkembangan penelitian.

Tabel 2. Perbandingan Antara Teori-Teori yang Relevan

Penulis	Radiasi Benda Hitam	Efek Fotolistrik	Efek Compton
Olschewski et al., 2018	Menyajikan rancangan <i>large-area blackbody</i> beremissivitas >0,997 dan keseragaman suhu <0,1 K untuk kalibrasi spektrometer inframerah satelit. Keunggulan rancangan ini memastikan distribusi spektral Planck yang sangat stabil, memberikan acuan absolut bagi penelitian radiasi termal dan validasi konstanta Planck. Meskipun penelitian tidak menelaah interaksi elektron-foton secara langsung, desain sumber radiasi presisi tinggi ini menyediakan basis eksperimen bagi studi dualisme dengan tingkat ketidakpastian yang sangat rendah.	Tidak melakukan eksperimen fotoemisi; namun stabilitas spektral yang dicapai menjadi prasyarat penting dalam percobaan fotolistrik berpresisi tinggi. Sumber radiasi dengan ketelitian ini memungkinkan pengukuran ambang energi elektron yang lebih akurat dan membantu mengurangi error dalam penentuan konstanta Planck, sehingga tetap memiliki kontribusi konseptual terhadap pemahaman dualisme.	Tidak mengkaji hamburan Compton, tetapi pendekatan kalibrasi spektral dan pemodelan distribusi energi yang dipaparkan dapat diterapkan untuk menguji dan memvalidasi pergeseran energi akibat hamburan foton berenergi tinggi, yang merupakan inti analisis Compton
Amemiya et al., 2019	Mengembangkan lembaran elastomer bertekstur nano-mikro	Tidak meneliti pelepasan elektron akibat cahaya; kontribusinya	Tidak melaksanakan hamburan

	dengan absorptansi $\sim 0,9995$ di rentang mid-IR. Temuan ini menandai lompatan material karena menghasilkan sumber radiasi termal fleksibel yang mendekati blackbody ideal, memudahkan kalibrasi perangkat ilmiah dan penelitian nanofotonik. Keunggulan sifat mekanik dan spektral material ini memberikan acuan baru dalam eksperimen radiasi benda hitam pada suhu ruang hingga suhu tinggi.	bersifat konseptual dengan menyediakan sumber radiasi terkontrol yang dapat dimanfaatkan dalam pengujian fotolistrik, terutama ketika diperlukan intensitas dan distribusi spektral yang seragam. Keberadaan material dengan absorptansi sangat tinggi ini memungkinkan perancangan eksperimen fotoelektrik yang lebih konsisten secara energi.	Compton secara langsung, namun karakteristik absorptansi material memungkinkan pemanfaatan sebagai target uji untuk pengukuran hamburan foton pada spektrum luas, sehingga tetap memiliki relevansi metodologis terhadap eksperimen Compton yang menuntut target dengan reflektansi minimal.
Lu et al., 2024	Memperlihatkan bahwa nanostruktur tertentu dapat menghasilkan radiasi benda hitam yang terpolarisasi melingkar dan terarah, menantang asumsi Planck klasik yang menganggap radiasi blackbody isotropik dan tak terpolarisasi. Temuan ini membuka peluang untuk mengendalikan sifat polarisasi termal sehingga memperluas konsep dualisme, karena polarisasi yang terkontrol dapat memengaruhi perilaku gelombang dan partikel cahaya dalam eksperimen interferensi.	Tidak melakukan eksperimen fotolistrik, tetapi keterkaitan ilmiahnya jelas: polarisasi foton yang dapat diatur memberi jalur baru dalam memodifikasi probabilitas emisi elektron dan memungkinkan kajian lebih mendalam tentang hubungan antara polarisasi medan dan distribusi momentum elektron.	Tidak meneliti efek Compton, namun prinsip pengendalian polarisasi yang ditemukan berpotensi diaplikasikan pada studi hamburan foton-elektron, di mana polarisasi awal sinar memengaruhi distribusi sudut dan energi hasil hamburan.
Anwar et al., 2018	Tidak meneliti radiasi benda hitam; pemanfaatannya sebatas acuan teoretis dalam modul pembelajaran. Walau demikian, konsep distribusi energi Planck tetap dijadikan kerangka awal untuk menjelaskan asal-usul energi foton yang diperlukan dalam efek fotolistrik, sehingga tetap memperkuat pemahaman peserta didik mengenai keterkaitan gelombang dan partikel cahaya.	Mengembangkan modul pembelajaran berbasis simulasi PhET untuk mengukur konstanta Planck melalui efek fotolistrik. Hasilnya menunjukkan peningkatan signifikan pemahaman mahasiswa tentang hubungan frekuensi energi dan mekanisme pelepasan elektron, menegaskan pentingnya pendekatan praktikum virtual dalam memperkenalkan dualisme gelombang-partikel di pendidikan tinggi.	Tidak meneliti Compton; kontribusinya terletak pada penguatan pemahaman dasar interaksi foton elektron yang menjadi landasan bagi interpretasi hamburan Compton di tingkat lanjut.
Hidayati et al., 2024	Tidak meneliti radiasi benda hitam secara langsung; konsep Planck hanya digunakan sebagai latar teoretis dalam perancangan sumber cahaya percobaan. Walaupun demikian, pemahaman terhadap distribusi energi foton tetap krusial agar perangkat DIY yang dirancang dapat menghasilkan spektrum cahaya yang sesuai untuk demonstrasi dualisme.	Menciptakan perangkat DIY berbiaya rendah untuk percobaan efek fotolistrik dan celah ganda. Perangkat ini memungkinkan pengukuran hubungan frekuensi dan energi kinetik elektron yang akurat dengan biaya minim, sekaligus menegaskan bahwa fenomena kuantum dapat ditunjukkan dengan peralatan sederhana tanpa mengurangi ketelitian ilmiah.	Tidak meneliti Compton; namun pendekatan pengajaran yang diadopsi memperkuat pemahaman dasar tentang interaksi foton elektron yang juga mendasari hamburan Compton.
Lin et al., 2022	Tidak meneliti radiasi benda hitam secara eksperimental, tetapi analisis arah polarisasi cahaya yang dilaporkan memberi kontribusi konseptual penting bagi	Menemukan bahwa energi fotoelektron bergantung pada arah emisi relatif terhadap arah cahaya, memperluas model konvensional fotoemisi. Temuan ini	Tidak meneliti efek Compton; meskipun demikian, analisis transfer momentum foton yang mendasari penelitian ini

	pemahaman emisi termal terstruktur yang berkaitan dengan radiasi benda hitam non-isotropik.	memberikan bukti eksperimental bahwa distribusi momentum elektron sangat dipengaruhi oleh geometri eksitasi, sehingga memperdalam wawasan tentang sifat partikel dan gelombang cahaya.	memiliki kesamaan teoretis dengan proses hamburan Compton
Khalaf et al., 2023	Tidak meneliti radiasi benda hitam secara eksperimental; teori medan kuat yang mereka kembangkan dapat diterapkan pada kondisi radiasi termal ekstrem, memberikan landasan konseptual bagi penelitian blackbody pada suhu sangat tinggi.	Tidak meneliti efek fotolistrik, tetapi kerangka teori interaksi foton elektron di medan intens yang mereka kembangkan dapat diadaptasi untuk menganalisis proses fotoionisasi nonlinier.	Mengembangkan kerangka nonperturbatif untuk hamburan Compton dalam medan kuantum intens dan memprediksi modifikasi spektrum ketika foton berinteraksi dengan cahaya sangat kuat, memberikan wawasan baru tentang dinamika partikel pada kondisi ekstim.

Temuan yang berkaitan dengan radiasi benda hitam dan efek fotolistrik menunjukkan konsistensi kuat dengan teori kuantisasi energi yang dikemukakan oleh Planck dan Einstein sebagai fondasi awal dualisme gelombang-partikel. Penelitian oleh (Anwar et al, 2018) menegaskan bahwa pelepasan elektron hanya bergantung pada frekuensi cahaya, bukan intensitasnya, sehingga memperkuat konsep foton sebagai paket energi diskret. Hasil ini sejalan dengan pemahaman teoretis mekanika kuantum bahwa cahaya tidak dapat dijelaskan sepenuhnya melalui model gelombang klasik. Lebih lanjut, pendekatan edukatif dan eksperimental yang ditampilkan oleh (Hidayati et al, 2024) memperlihatkan bahwa fenomena efek fotolistrik dan celah ganda mampu merepresentasikan dualisme cahaya secara simultan, sehingga memperdalam pemahaman konseptual mahasiswa terhadap sifat gelombang dan partikel cahaya dalam konteks pembelajaran fisika kuantum.

Pada fenomena efek Compton, hasil kajian memperlihatkan kesesuaian yang kuat dengan teori hamburan foton-elektron yang bersifat relativistik. Penelitian (Agui et al, 2021) dan (Saito et al, 2022) menunjukkan bahwa perubahan panjang gelombang cahaya setelah tumbukan hanya dapat dijelaskan jika cahaya diperlakukan sebagai partikel bermomentum, sebagaimana diprediksi oleh teori Compton. Temuan (Chen-Mayer et al, 2024) memperluas konteks ini dengan menunjukkan penerapan efek Compton dalam instrumentasi modern, seperti kamera gamma, yang menegaskan relevansi konsep dualisme dalam pengembangan teknologi mutakhir. Dengan demikian, penelitian-penelitian tersebut tidak hanya mengonfirmasi teori klasik Compton, tetapi juga menunjukkan bahwa sifat partikel cahaya tetap dominan dalam interaksi energi tinggi dan aplikasi praktis di bidang nuklir dan instrumentasi presisi.

Sementara itu, kajian yang bersifat konseptual dan eksperimental lanjutan memperlihatkan pendalaman makna dualisme gelombang-partikel dalam kerangka mekanika kuantum modern. Studi oleh (Jong et al, 2023) dan (Wang, 2022) mengaitkan fungsi gelombang dengan densitas probabilitas, menegaskan bahwa sifat gelombang muncul dalam representasi matematis, sedangkan hasil pengukuran menampilkan karakter partikel. Temuan ini diperkaya oleh eksperimen (Li et al, 2023) dan (Shayeghi et al, 2020) yang menunjukkan bahwa sifat gelombang dan partikel dapat dimanipulasi atau diamati secara kontekstual, bahkan pada sistem foton tunggal dan molekul kompleks. Selain itu, (Barasa et al, 2025) menegaskan bahwa pemahaman dualisme masih menjadi tantangan konseptual, baik secara kualitatif maupun kuantitatif, sehingga menempatkan penelitian ini sebagai penghubung antara teori fundamental, eksperimen mutakhir, dan kajian pendidikan fisika kuantum.

Hasil kajian ini menunjukkan bahwa dualisme gelombang-partikel tidak muncul sebagai sifat tetap dari cahaya atau materi, melainkan sebagai manifestasi yang bergantung pada konteks interaksi dan metode pengukuran. Berbeda dengan penelitian terdahulu yang umumnya menyoroti satu fenomena kuantum secara terpisah, penelitian ini menampilkan keterkaitan konseptual antara radiasi benda hitam, efek fotolistrik, dan efek Compton sebagai rangkaian bukti empiris yang saling melengkapi. Sintesis ini menegaskan bahwa perubahan karakter gelombang dan partikel tidak dapat dipahami secara fragmentaris, tetapi harus dilihat sebagai respons sistem kuantum terhadap kondisi eksperimental tertentu.

Perbedaan utama kajian ini dengan kajian sebelumnya terletak pada pendekatan analisis tematik komparatif yang digunakan. Banyaknya mengulang pembuktian eksperimental atau penjelasan matematis

masing-masing fenomena, kajian ini mengungkap pola konseptual yang konsisten di antara berbagai teori dan eksperimen, mulai dari kuantisasi energi hingga hamburan relativistik. Pendekatan ini memungkinkan pemetaan perkembangan pemikiran ilmiah secara berkelanjutan, sehingga dualisme gelombang-partikel dipahami sebagai konsep dinamis yang berkembang seiring kemajuan teori dan teknologi, bukan sekadar konsep historis dalam fisika kuantum.

Selain itu, kajian ini memberikan kontribusi pembeda dengan menempatkan hasil-hasil eksperimen modern dan kajian fisika dalam satu kerangka analisis yang terpadu. Integrasi antara penelitian fundamental, aplikasi teknologi, dan konteks pembelajaran memperlihatkan bahwa dualisme gelombang-partikel memiliki relevansi lintas bidang. Dengan demikian, hasil kajian ini tidak hanya membedakan diri dari penelitian terdahulu secara metodologis, tetapi juga memperluas makna dan fungsi dualisme sebagai konsep kunci dalam fisika modern dan pendidikan fisika.

1. Keterbatasan Penelitian

Penelitian ini memiliki beberapa keterbatasan yang perlu diperhatikan. Kajian dibatasi pada artikel jurnal yang tersedia dalam rentang waktu tertentu dan dapat diakses dalam bentuk teks lengkap, sehingga masih dimungkinkan adanya penelitian relevan lain yang belum tercakup. Selain itu, analisis yang digunakan bersifat kualitatif tematik, sehingga perbandingan antar teori dan temuan empiris lebih menekankan aspek konseptual daripada kekuatan kuantitatif data eksperimen. Fokus kajian yang terbatas pada radiasi benda hitam, efek fotolistrik, dan efek Compton juga menyebabkan fenomena kuantum lain yang berkontribusi penting terhadap pemahaman dualisme gelombang-partikel belum dibahas secara mendalam, meskipun fenomena tersebut memiliki implikasi teoretis yang signifikan.

Berdasarkan keterbatasan tersebut, penelitian selanjutnya dapat diarahkan pada perluasan cakupan fenomena kuantum serta penggunaan pendekatan analisis kuantitatif untuk memperkuat perbandingan antar teori. Kajian lanjutan juga berpotensi mengaitkan dualisme gelombang-partikel dengan interpretasi mekanika kuantum modern dan perkembangan teknologi kuantum, sehingga pemahaman terhadap konsep dualisme tidak hanya bersifat historis dan konseptual, tetapi juga relevan secara empiris dan aplikatif dalam fisika modern.

2. Implikasi dan Prospek Pengembangan Kajian

Kajian lanjutan mengenai dualisme gelombang-partikel perlu diarahkan pada perluasan fenomena kuantum yang dianalisis agar pemetaan konseptual yang dihasilkan menjadi lebih menyeluruh dan

representatif terhadap perkembangan fisika modern. Selain radiasi benda hitam, efek fotolistrik, dan efek Compton yang menjadi fondasi awal pembuktian dualisme, fenomena lain seperti interferensi gelombang materi, eksperimen *delayed-choice*, serta sistem kuantum berbasis keterikatan (*quantum entanglement*) berpotensi memperkaya pemahaman mengenai kemunculan sifat gelombang dan partikel secara kontekstual. Pendekatan ini memungkinkan penguatan analisis komparatif antar teori sekaligus memperjelas bahwa dualisme bukan karakter intrinsik yang statis, melainkan hasil interaksi antara sistem kuantum, kondisi eksperimen, dan perangkat pengukuran.

Selain perluasan fenomena, pengembangan kajian juga dapat diarahkan pada pendalaman kerangka teoretis yang digunakan untuk menafsirkan dualisme gelombang-partikel. Pengaitan fenomena kuantum dengan berbagai interpretasi mekanika kuantum modern membuka ruang analisis yang lebih reflektif terhadap makna fungsi gelombang, probabilitas, dan peran pengamat. Pendekatan ini penting untuk menjembatani perbedaan pandangan teoretis yang selama ini muncul dalam literatur, serta memberikan pemahaman yang lebih koheren mengenai posisi dualisme dalam struktur teori kuantum secara keseluruhan.

Di sisi metodologis, kajian lanjutan berpotensi diperkuat melalui integrasi analisis tematik kualitatif dengan pendekatan kuantitatif, seperti meta-analisis data eksperimen, guna meningkatkan validitas dan kedalaman sintesis yang dihasilkan. Selain memperkaya pemahaman konseptual, pengembangan metodologi ini juga memungkinkan pengaitan dualisme gelombang-partikel dengan perkembangan teknologi kuantum dan pembelajaran fisika. Dengan demikian, kajian lanjutan tidak hanya berkontribusi pada penguatan landasan teoretis, tetapi juga memperluas relevansi dualisme gelombang-partikel dalam konteks aplikatif dan pendidikan fisika modern.

Kesimpulan

Kajian literatur ini menunjukkan bahwa perkembangan gagasan dualisme gelombang-partikel berlangsung secara berkelanjutan melalui tiga fenomena utama, yaitu radiasi benda hitam, efek fotolistrik, dan efek Compton. Berbeda dari penelitian terdahulu yang umumnya mengkaji masing-masing fenomena secara terpisah, penelitian ini menyajikan sintesis konseptual yang menempatkan ketiganya dalam satu kerangka pemahaman yang saling terkait. Hasil kajian memperlihatkan adanya pergeseran fokus riset dari pembuktian sifat ganda cahaya dan materi menuju pemanfaatan serta pengendalian sifat tersebut dalam eksperimen presisi dan pengujian teori kuantum pada

kondisi yang semakin kompleks. Pegangan utama penelitian ini terletak pada pemetaan perkembangan dualisme gelombang-partikel yang mengintegrasikan aspek teoretis, eksperimental, dan kontekstual. Sintesis temuan menunjukkan bahwa prinsip kuantisasi energi Planck, konsep foton Einstein, dan formulasi hamburan Compton tetap relevan dalam riset kontemporer, sekaligus mengalami pengembangan melalui pendekatan eksperimental modern. Dengan demikian, penelitian ini memberikan pembeda yang jelas dibandingkan kajian sebelumnya, yaitu pada upaya menyatukan berbagai hasil penelitian lintas fenomena ke dalam satu kerangka analisis tematik yang komprehensif dan berkelanjutan. Implikasi hasil penelitian ini bersifat lintas bidang. Bagi pendidik fisika, temuan ini dapat dimanfaatkan sebagai dasar pengembangan pembelajaran fisika kuantum yang menekankan keterkaitan antarfenomena agar konsep dualisme tidak dipahami secara terfragmentasi. Bagi peneliti, kajian ini membuka peluang pengembangan metode analisis yang lebih beragam, termasuk integrasi pendekatan kualitatif dan kuantitatif serta perluasan cakupan fenomena kuantum seperti interferensi materi. Sementara itu, bagi pemangku kebijakan, hasil penelitian ini dapat menjadi rujukan dalam penguatan kurikulum dan arah pengembangan riset fisika kuantum yang relevan dengan kebutuhan ilmu pengetahuan dan teknologi masa depan.

Ucapan Terima Kasih

Penulis ucapkan terima kasih kepada seluruh rekan penulis yang telah berkontribusi secara aktif dalam setiap tahap penyusunan artikel ini. Dukungan dalam bentuk diskusi ilmiah, pengumpulan referensi, dan penyempurnaan naskah sangat membantu dalam menjaga ketelitian dan kedalaman kajian literatur. Kerja sama yang terjalin memberikan wawasan baru dan memperkaya analisis mengenai dualisme gelombang partikel. Semoga kolaborasi ini menjadi langkah awal untuk penelitian bersama di masa mendatang.

Referensi

- Agui, A., Sakurai, H., Tsuji, N., Ito, H., & Nitta, K. (2021). Effect on Compton scattering spectra by Hermite-gaussian light. *Crystals*, 11(6), 1–6. <https://doi.org/10.3390/cryst11060650>
- Anwar, K., Isnaini, M., & Utami, L. S. (2018). Eksperimen Efek Foto Listrik Berbasis Simulasi PhET. *Paedagogia: Jurnal Kajian, Penelitian Dan Pengembangan Kependidikan*, 4(2), 9–15.
- Barasa, A. L., Putra, A. J. A. D., Manihuruk, L. K., Nadila, N., & Nurhafiza, S. (2025). Studi Pemahaman Konsep Dualisme Gelombang-Partikel Pada Mahasiswa Jurusan Fisika: Perspektif Kualitatif Dan Kuantitatif. *Jurnal Review Pendidikan Dan Pengajaran*, 8(1), 1022–1027. <https://doi.org/10.31004/jrpp.v8i1.38237>
- BO, Z. (2023). Reinvestigation of Heisenberg's Uncertainty Principle and a New Deduction of Schrodinger Equation - Spinvector Motion II. *International Journal of Physics*, 11(2), 81–87. <https://doi.org/10.12691/ijp-11-2-4>
- Chen-Mayer, H. H., Sahin, D., Remley, B., Brown, S., & Goodman, D. (2024). Calibration of a gamma ray Compton camera for radioactivity measurements. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 333(12), 6645–6651. <https://doi.org/10.1007/s10967-024-09729-7>
- Hartanti, M., & Amilian, D. (2025). Efek Fotolistrik dan Aplikasinya Dalam Teknologi Surya. *Journal of Science and Technology: Alpha*, 1(2), 48–54. <https://doi.org/10.70716/alpha.v1i2.174>
- Hidayati, A. K., Izzulhaq, A., Oktamaypasha, R., & Rini, S. B. I. (2024). DIY Innovations in Quantum Physics: Proving Light Dualism with Photoelectric Effect and Double Slit Experiments. *Jurnal Pendidikan Dan Ilmu Fisika*, 4(1), 17–30. <https://doi.org/10.52434/jpif.v4i1.3428>
- Jong, C., Kim, J.-S., Jon, S.-H., & Jo, S.-I. (2023). Explanation of Relation between Wave Function and Probability Density Based on Quantum Mechanics in Phase Space. *World Journal of Mechanics*, 13(01), 20–72. <https://doi.org/10.4236/wjm.2023.131002>
- Khumaeni, E. A. (2022). *Buku Ajar Fisika Modern*. Yogyakarta: DIVA Press.
- Li, J. K., Sun, K., Wang, Y., Hao, Z. Y., Liu, Z. H., Zhou, J., ... Guo, G. C. (2023). Experimental demonstration of separating the wave-particle duality of a single photon with the quantum Cheshire cat. *Light: Science and Applications*, 12(1). <https://doi.org/10.1038/s41377-022-01063-5>
- Li, Y., Chen, G., Yu, K., Walukiewicz, W., & Gong, W. (2021). Annealing induced saturation in electron concentration for v-doped cdo. *Crystals*, 11(9), 1–7. <https://doi.org/10.3390/cryst11091079>
- Mairhofer, L., & Passon, O. (2022). Reconsidering the Relation Between “Matter Wave Interference” and “Wave-Particle Duality.” *Foundations of Physics*, 52(2), 1–15. <https://doi.org/10.1007/s10701-022-00544-2>
- Nugraha, D. A. (2022). Kaleidoskop Dualisme Cahaya Sebagai Bentuk Penghayatan Diri Terhadap Ayat-

- ayat Semester. *Jurnal Pendidikan Fisika*, 7(1), 87-95.
- Nurlina. (2017). *Fisika Kuantum*. Makassar: LPP Umismuh Makassar.
- Nurlina, N., & Bancong, H. (2020). *Fisika kuantum untuk pemula: Panduan mudah untuk memahami teori fisika kuantum*. Makassar: LPP UNISMUH MAKASSAR.
- Ridha, N. A., Supiyanto, S., Ahyad, M., Taryana, E., Yudharma, G., Pawawoi, P., ... Annur, S. (2024). *Fisika Kuantum*. Padang: CV. Gita Lentera.
- Saito, N., Tanaka, R., & Kawai, J. (2022). Polarization and intensity of Compton scattering. *X-Ray Spectrometry*, 51(1), 86-90. <https://doi.org/10.1002/xrs.3261>
- Shayeghi, A., Rieser, P., Richter, G., Sezer, U., Rodewald, J. H., Geyer, P., ... Arndt, M. (2020). Matter-wave interference of a native polypeptide. *Nature Communications*, 11(1). <https://doi.org/10.1038/s41467-020-15280-2>
- Umma, B. M., & Sucahyo, I. (2017). Percobaan Efek Fotolistrik Berbasis Mikrokontroller Dengan Led Rgb Sebagai Sumber Cahaya. *Inovasi Fisika Indonesia*, 6(3), 90-96.
- Wang, H. Y. (2022). Exploring the implications of the uncertainty relationships in quantum mechanics. *Frontiers in Physics*, 10, 1-17. <https://doi.org/10.3389/fphy.2022.1059968>