

# FISIKA KUANTUM

**Nurul Azmi Ridha, S.Si., M.Si. | Supiyanto, S.Pd., M.M., M.Pd.**  
**Muhammad Ahyad, S.Si., M.Si. | Dr. Een Taryana, S.T., M.T.**  
**Dr. Ir. Gede Yudharma, M.Si. | Dr. Pawawoi, S.T., M.T.**  
**Dr. Ir. Adi Ganda Putra, S.T., M.T. | Sri Hartanto, S.T., M.T.**  
**Dr. Ir. Bambang Mulyo Raharjo, M.Si. | Dita Rama Insiyanda, M.Si.**  
**Zuffa Anisa, S.Pd., M.Si. | Subhan Annur, M.Pd.**



**Penerbit  
Gita Lentera**

# FISIKA

# KUANTUM

**Penulis:**

Nurul Azmi Ridha, S.Si., M.Si.

Supiyanto, S.Pd., M.M., M.Pd.

Muhammad Ahyad, S.Si., M.Si.

Dr. Een Taryana, S.T., M.T.

Dr. Ir. Gede Yudharma, M.Si.

Dr. Pawawoi, S.T., M.T.

Dr. Ir. Adi Ganda Putra, S.T., M.T.

Sri Hartanto, S.T, M.T.

Dr. Ir. Bambang Mulyo Raharjo, M.Si.

Dita Rama Insiyanda, M.Si.

Zuffa Anisa, S.Pd., M.Si.

Subhan Annur, M.Pd.

Penerbit CV. Gita Lentera



# Fisika Kuantum

Oleh:

Nurul Azmi Ridha, S.Si., M.Si.  
Supiyanto, S.Pd., M.M., M.Pd.  
Muhammad Ahyad, S.Si., M.Si.  
Dr. Een Taryana, S.T., M.T.  
Dr. Ir. Gede Yudharma, M.Si.  
Dr. Pawawoi, S.T., M.T.  
Dr. Ir. Adi Ganda Putra, S.T., M.T.  
Sri Hartanto, S.T, M.T.  
Dr. Ir. Bambang Mulyo Raharjo, M.Si.  
Dita Rama Insiyanda, M.Si.  
Zuffa Anisa, S.Pd., M.Si.  
Subhan Annur, M.Pd.

Editor:

Yustina, M.Pd.

Hak Cipta dilindungi oleh Undang-undang

©All right reserved

**ISBN: 978-623-8708-75-8**

Layouter : Tim Gita Lentera  
Desain Sampul : Tim Gita Lentera  
Penerbit : CV. Gita Lentera  
Perm. Permata Hijau Regency blok F/1 Kel.  
Pisang, Kec. Pauh, Padang, Sumatera Barat  
Website: <https://gitalentera.com>  
Email: [git4lenter4@gmail.com](mailto:git4lenter4@gmail.com)  
Anggota IKAPI No. 042/SBA/2023

Cetakan Pertama, Oktober 2024

Dilarang keras menerjemahkan, memfotokopi, atau memperbanyak sebagian atau seluruh buku ini tanpa izin tertulis dari penerbit.



# FISIKA KUANTUM

## KATA PENGANTAR

Puji syukur ke hadirat Allah SWT atas rahmat dan karunia-Nya, sehingga buku yang berjudul **Fisika Kuantum** ini dapat disusun dan diterbitkan. Buku ini hadir sebagai upaya untuk menjawab kebutuhan akan pemahaman yang lebih mendalam tentang konsep-konsep fisika kuantum, sebuah bidang yang telah merevolusi cara kita memahami fenomena alam di tingkat fundamental.

Fisika kuantum merupakan salah satu cabang ilmu fisika yang telah mengubah pandangan kita terhadap alam semesta pada tingkat fundamental. Berbeda dari fisika klasik yang memadai dalam menjelaskan perilaku objek makroskopis, fisika kuantum membawa kita ke dalam dunia subatomik, di mana hukum-hukum yang kita kenal sering kali tidak lagi berlaku. Buku ini disusun untuk memberikan pemahaman mendalam tentang berbagai konsep dasar hingga penerapan fisika kuantum dalam teknologi modern. Dengan latar belakang pembaca yang bervariasi, buku ini berupaya menyajikan materi secara komprehensif namun tetap mudah dipahami.

Bab pertama, “Konsep Dasar Fisika Kuantum,” mengajak pembaca memahami awal mula fisika kuantum, termasuk fenomena radiasi benda hitam yang menjadi salah satu dasar kelahiran teori ini. Selanjutnya, pada bab kedua, “Matematika pada Fisika Kuantum,” kita akan mempelajari alat-alat matematis seperti ruang Hilbert dan operator Hermitian yang menjadi fondasi bagi analisis dalam fisika kuantum.

Setelah memahami dasar-dasarnya, bab ketiga hingga bab kelima akan membawa pembaca lebih dalam ke mekanika kuantum,

struktur atom, serta spin dan statistik kuantum. Di sini, pembaca akan menemukan bagaimana prinsip-prinsip dasar ini diaplikasikan dalam menjelaskan perilaku partikel elementer.

Bab-bab selanjutnya membahas topik yang lebih kompleks, seperti teori perturbasi, teori medan kuantum, dan elektrodinamika kuantum. Buku ini juga memperkenalkan topik komputasi dan informasi kuantum yang sedang menjadi tren, serta aplikasi fisika kuantum dalam material dan teknologi modern.

Sebagai penutup, buku ini mengeksplorasi berbagai interpretasi dan filosofi fisika kuantum, serta implementasi praktisnya di bidang sains dan teknologi. Dengan demikian, diharapkan pembaca mendapatkan pandangan holistik mengenai fisika kuantum dan relevansinya terhadap kemajuan ilmu pengetahuan dan teknologi masa kini.

Semoga buku ini dapat memberikan wawasan baru dan memotivasi pembaca untuk terus mengeksplorasi dunia fisika kuantum.

**Tim Penyusun**



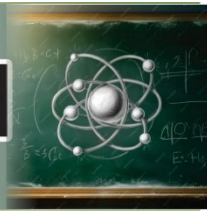
# FISIKA KUANTUM

## SINOPSIS

Buku **Fisika Kuantum** ini dirancang untuk menjawab berbagai pertanyaan mendasar tentang dunia subatomik dan membawa pembaca menuju pemahaman yang lebih dalam mengenai teori kuantum. Dimulai dengan konsep dasar, buku ini memaparkan asal-usul fisika kuantum dan peran pentingnya dalam menjelaskan fenomena yang tak dapat diterangkan oleh fisika klasik, seperti radiasi benda hitam dan dualitas partikel-gelombang. Di bagian selanjutnya, pembaca akan diajak untuk mendalami aspek matematis dari fisika kuantum, yang mencakup ruang Hilbert, operator Hermitian, serta peran transformasi Fourier dalam mekanika kuantum. Buku ini kemudian membahas teori mekanika kuantum, struktur atom, dan fenomena spin serta statistik kuantum yang menjadi dasar pemahaman terhadap perilaku partikel-partikel elementer. Pembaca juga akan mendapatkan wawasan mengenai aplikasi praktis teori kuantum, seperti komputasi dan informasi kuantum, yang menjadi pilar dalam teknologi mutakhir. Buku ini tidak hanya menyajikan konsep fisika kuantum dari sisi ilmiah, tetapi juga menyoroti interpretasi filosofisnya dan potensi pengembangan teknologi berbasis kuantum di masa depan. Dengan bahasa yang jelas dan disertai dengan contoh kasus yang mudah dipahami, buku ini diharapkan mampu menjadi referensi yang bermanfaat bagi para pelajar, akademisi, dan siapa saja yang tertarik mendalami fisika kuantum.



# FISIKA KUANTUM



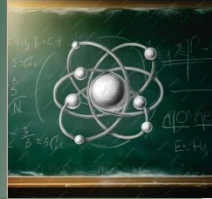
## DAFTAR ISI

	Halaman
<b>KATA PENGANTAR</b> .....	ii
<b>SINOPSIS</b> .....	iv
<b>DAFTAR ISI</b> .....	v
<b>KONSEP DASAR FISIKA KUANTUM</b> .....	1
1.1. Awal Munculnya Fisika Kuantum .....	1
1.2. Radiasi Benda Hitam .....	2
<b>MATEMATIKA PADA FISIKA KUANTUM</b> .....	13
2.1. Ruang Hilbert dan Fungsi Gelombang .....	13
2.2. Operator Hermitian dan Eigenvalue .....	15
2.3. Teorema Spektral dan Operator Linear .....	18
2.4. Transformasi Fourier dalam Mekanika Kuantum .....	20
2.5. Persamaan Schrödinger dan Solusi Matematis .....	22
<b>MEKANIKA KUANTUM</b> .....	26
3.1. Postulat dasar mekanika kuantum .....	28
3.2. Persamaan Schrödinger .....	32
3.3. Persamaan Schrödinger bebas waktu .....	32
3.4. Kasus-kasus sederhana dalam mekanika kuantum .....	33
<b>ATOM DAN STRUKTUR ATOM</b> .....	43
4.1. Konsep Atom dalam Fisika Klasik.....	44
4.2. Munculnya Mekanika Kuantum .....	46
4.3. Prinsip Mekanika Kuantum: Prinsip Ketidakpastian Heisenberg (1927).....	48

<b>SPIN DAN STATISTIK KUANTUM.....</b>	<b>59</b>
5.1. Spin Elektron .....	59
5.2. Statistik Kuantum .....	64
5.3. Fungsi Distribusi .....	67
5.4. Statistik Maxwell–Boltzmann .....	69
5.5. Bose–Einstein dan Statistik Foton.....	71
5.6. Statistik Fermi–Dirac.....	76
<b>TEORI PERTURBASI.....</b>	<b>81</b>
6.1. Definisi.....	82
6.2. Hamiltonian .....	82
6.3. Jenis-Jenis Teori Perturbasi .....	83
6.4. Aplikasi Teori Perturbasi.....	86
6.5. Keuntungan dan Keterbatasan Teori Perturbasi.....	89
<b>TEORI MEDAN KUANTUM .....</b>	<b>94</b>
7.1. Latar Belakang Sejarah Teori Medan Kuantum.....	94
7.2. Konsep Dasar Teori Medan Kuantum .....	96
7.3. Formulasi Teori Medan Kuantum .....	98
7.4. Interaksi dan Teori Gangguan dalam Teori Medan Kuantum	100
7.5. Renormalisasi dalam Teori Medan Kuantum.....	103
7.6. Aplikasi Teori Medan Kuantum.....	106
<b>ELEKTRODINAMIKA KUANTUM.....</b>	<b>112</b>
8.1. Konsep Dasar.....	112
8.2. Perkembangan Elektrodinamika Kuantum .....	113
8.3. Diagram Feynman.....	115
8.4. Amplitudo Probabilitas .....	116
8.5. Formulasi Matematis.....	122

8.6. Elektrodinamika Kuantum Pada Bidang Telekomunikasi .....	123
<b>KOMPUTASI DAN INFORMASI KUANTUM .....</b>	<b>129</b>
9.1. Komputasi Kuantum dan Informasi kuantum .....	129
9.2. Komponen Komputasi dan Informasi Kuantum .....	131
9.3. Quantum Bits (Qubits) .....	133
9.4. Superposisi .....	135
9.5. Keterikatan Kuantum (Quantum Entanglement) .....	137
9.6. Gerbang Kuantum (Quantum Gates) .....	139
9.7. Sirkuit Kuantum (Quantum Circuits) .....	143
9.8. Pengukuran Kuantum (Quantum Measurement) .....	145
9.9. Dekohesi Kuantum dan Koreksi Kesalahan (Quantum Decoherence and Erros Correction) .....	147
9.10. Teori Informasi Kuantum .....	149
9.11. Supremasi Kuantum (Quantum Supremacy) .....	152
<b>FISIKA KUANTUM DALAM MATERIAL DAN TEKNOLOGI .....</b>	<b>157</b>
10.1. Pengantar Fisika Kuantum untuk Material .....	157
10.2. Zat Padat: Struktur Kristal dan Elektron dalam Potensial Periodik .....	157
10.3. Zat Cair: Fluida Kuantum dan Superfluida .....	159
10.4. Zat Gas: Statistika Kuantum pada Gas Fermi dan Bose .....	161
10.5. Aplikasi Fisika Kuantum pada Material Modern .....	163
<b>INTERPRETASI DAN FILOSOFI FISIKA KUANTUM .....</b>	<b>177</b>
11.1. Filsafat/ Filosofi Fisika Kuantum .....	177
11.2. Interpretasi mekanika kuantum .....	177
11.3. Interpretasi Mekanika Kuantum Pada Beberapa Tokoh .....	182

<b>IMPLEMENTASI FISIKA KUANTUM DALAM SAINS DAN TEKNOLOGI .....</b>	<b>187</b>
12.1. Implementasi Fisika Kuantum di Bidang Sains .....	188
12.2. Implementasi Fisika Kuantum di Bidang Teknologi.....	190
12.3. Potensi Masa Depan Implementasi Fisika Kuantum .....	193
12.4. Tantangan dan Batasan Teknologi Berbasis Fisika Kuantum .....	195



# ELEKTRODINAMIKA KUANTUM

Oleh Sri Hartanto, S.T., M.T.

## 8.1. Konsep Dasar

Elektrodinamika kuantum adalah teori medan kuantum yang menjelaskan bagaimana partikel bermuatan listrik berinteraksi satu sama lain melalui pertukaran foton (“kuanta” ringan, atau paket kecil cahaya) dan merambat dengan kecepatan cahaya. Elektrodinamika kuantum (*Quantum Electrodynamics, QED*) adalah elektrodinamika ditinjau dari sudut pandang relativitas. Jika elektrodinamika klasik mempelajari tentang interaksi antara muatan listrik dan arus listrik dengan jarak antar muatan dan gaya medan yang cukup besar, maka elektrodinamika kuantum mempelajari tentang interaksi antara muatan listrik dan arus listrik dengan jarak antar muatan yang kecil dan gaya medan yang rendah.

Elektrodinamika kuantum dapat memprediksi dengan tepat anomali momen magnetik elektron, dan pergeseran tingkat energi hidrogen. Elektrodinamika kuantum adalah teori medan kuantum elektron dan positron (medan elektron-positron) dan foton (medan elektromagnetik atau radiasi). Teori ini juga berlaku untuk lepton berat yang diketahui ( $\mu$  dan  $\tau$ ) dan secara umum dapat digunakan untuk menggambarkan interaksi elektromagnetik partikel elementer bermuatan lainnya. Meskipun demikian, partikel-partikel ini juga tunduk pada gaya nonelektromagnetik, yaitu interaksi kuat dan lemah.

Elektrodinamika kuantum dapat menghitung probabilitas posisi dan gerak partikel, bahkan yang tidak memiliki massa seperti *foton*, dan nilainya tergantung pada jangkauan medan partikel. Elektrodinamika kuantum dapat menjelaskan cahaya dan materi sebagai dualitas gelombang-partikel yang diajukan oleh Albert Einstein pada tahun 1905. Richard Feynman menyebut Elektrodinamika kuantum sebagai "Permata Fisika" karena dapat digunakan untuk memprediksi kuantitas seperti momen magnetik anomali elektron dan pergeseran Lamb pada tingkat energi hidrogen dengan akurat.

Terdapat dua pendekatan untuk elektrodinamika kuantum. Pendekatan yang lebih formal bergantung pada peralatan umum untuk kuantisasi medan gelombang. Pendekatan lainnya, yang lebih ilustratif, berasal dari Stückelberg dan Feynman, dan menggunakan formalisme propagator.

## **8.2. Perkembangan Elektrodinamika Kuantum**

Pada tahun 1920-an, Paul Dirac menjelaskan formulasi pertama elektrodinamika kuantum tentang interaksi radiasi dengan materi untuk memperoleh koefisien pemancaran spontan suatu atom. Formulasi tersebut menjelaskan kuantisasi medan elektromagnetik sebagai suatu kesatuan osilator harmonis menggunakan konsep penciptaan dan pemusnahan partikel. Pada tahun-tahun berikutnya, Wolfgang Pauli, Eugene Wigner, Pascual Jordan, Werner Heisenberg dan Enrico Fermi mengungkapkan proses fisika yang melibatkan foton dan partikel bermuatan.

Studi lebih lanjut oleh Felix Bloch, Arnold Nordsieck dan Victor Weisskopf pada tahun 1937-1939 mengungkapkan bahwa elektrodinamika kuantum hanya bisa dipakai untuk teori penyimpangan orde satu, masalah yang telah dikemukakan oleh Robert Oppenheimer. Pada orde yang lebih tinggi, perhitungan yang

dibuat malah menyebabkan ketidakkonsistenan teori tersebut, sehingga timbul ketidakcocokan dasar antara relativitas khusus dan mekanika kuantum.

Perbaikan dalam teknologi gelombang mikro memungkinkan perhitungan pergeseran tingkat atom hidrogen yang lebih presisi yang sekarang dikenal dengan pergeseran Lamb dan momen magnetik elektron. Hans Bethe pada tahun 1947 melakukan perhitungan non-relativitas pertama untuk pergeseran garis-garis atom hidrogen yang diukur oleh Lamb dan Rutherford dengan cara koreksi massa dan muatan secara tak berhingga melalui beberapa eksperimen. Dengan cara ini, ketidakterbatasan akan diserap dalam konstanta dan menghasilkan nilai tertentu yang hasilnya sesuai dengan eksperimen. Prosedur ini dinamakan renormalisasi.

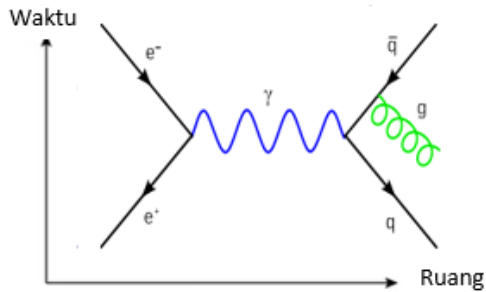
Shin'ichirō Tomonaga, Julian Schwinger, Richard Feynman dan Freeman Dyson mendapatkan formulasi kovarian penuh terbatas pada orde apapun dalam deret perturbasi. Formulasi kovarian dan *gauge-invariant* memungkinkan perhitungan observasi pada orde perturbasi apapun. Teknik matematika Feynman yang didasarkan pada diagram-diagram, awalnya tampak berbeda dengan pendekatan berbasis operator dan teori medan milik Schwinger dan Tomonaga, tetapi Freeman Dyson kemudian menunjukkan bahwa kedua pendekatan tersebut setara. Renormalisasi memberi makna fisik pada divergensi tertentu dan muncul dengan cara integral, yang kemudian menjadi salah satu aspek fundamental elektrodinamika kuantum.

Elektrodinamika kuantum telah berkembang menjadi kromodinamika kuantum di awal tahun 1960-an dan mencapai bentuknya saat ini oleh H. David Politzer, Sidney Coleman, David Gross, dan Frank Wilczek. Schwinger, Gerald Guralnik, Dick Hagen, Tom Kibble, Peter Higgs, Jeffrey Goldstone, Sheldon Glashow, Steven Weinberg, dan Abdus Salam secara independen menunjukkan

bagaimana gaya nuklir lemah dan elektrodinamika kuantum dapat digabungkan menjadi satu gaya elektro lemah.

### 8.3. Diagram Feynman

Penggambaran paling umum tentang elektrodinamika kuantum terdapat pada Diagram Feynman seperti terlihat dalam



Gambar 8.1 berikut yang dikemukakan oleh Richard Feynman. Diagram Feynman menggunakan garis lurus dan berlekuk untuk menganalisis berbagai cara partikel bertukar foton sehingga dapat berinteraksi secara fisik.

Gambar 8.1. Komponen Dalam Diagram Feynman

Diagram Feynman pada Gambar 8.1 mengilustrasikan suatu elektron ( $e^-$ ) dan suatu positron ( $e^+$ ) dimusnahkan untuk menghasilkan foton ( $\gamma$ , yang dilambangkan dengan gelombang sinus biru) dan kemudian menjadi pasangan quark–antiquark (quark  $q$ , antiquark  $\bar{q}$ ). Setelahnya, antiquark meradiasikan suatu gluon ( $g$ , dilambangkan dengan heliks hijau). Aksi-aksi elektron dan foton ini direpresentasikan dalam bentuk tiga elemen dasar diagram: garis bergelombang untuk foton, garis lurus untuk elektron dan persimpangan dua garis lurus dan satu garis bergelombang untuk titik puncak yang merepresentasikan pemancaran atau penyerapan foton

oleh elektron.

Dengan demikian, komponen utama Diagram Feynman dapat berupa tiga aksi dasar, yaitu:

1. Suatu foton berpindah dari satu tempat dan waktu ke tempat dan waktu lain,
2. Suatu elektron berpindah dari satu tempat dan waktu ke tempat dan waktu lain,
3. Suatu elektron memancarkan atau menyerap foton di tempat dan waktu tertentu.

#### **8.4. Amplitudo Probabilitas**

Richard Feynman berpendapat bahwa partikel bergerak tidak hanya dari satu titik ke titik lain di sepanjang satu jalur tetapi menjelajahi setiap jalur yang mungkin secara bersamaan. Dalam mekanika klasik, suatu partikel memiliki jalur yang pasti, ditentukan dengan jalur mana yang ditempuh untuk meminimalkan aksi. Setiap jalur dapat dibayangkan berkontribusi terhadap probabilitas dimana suatu partikel akan ditemukan. Untuk menghitung probabilitas ini, Feynman menetapkan angka, yang disebut amplitudo probabilitas untuk setiap jalur. Amplitudo probabilitas untuk setiap jalur sebanding dengan eksponensial aksi jalur tersebut dikalikan dengan fase kompleks. Dengan demikian, aksi di dalam jalur memengaruhi seberapa banyak jalur tersebut berkontribusi terhadap tujuan akhir partikel.

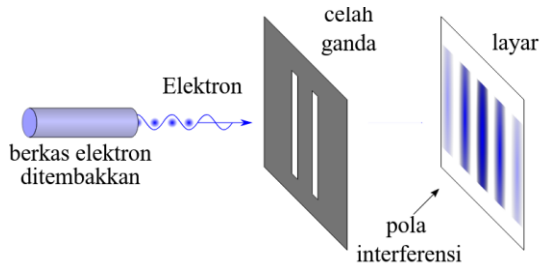
Menurut Richard Feynman, foton tidak hanya mengikuti satu rute. Sebaliknya, dibutuhkan banyak rute yang mungkin secara bersamaan, beberapa jalur langsung, dan beberapa jalur lain yang tidak langsung. Probabilitas menemukan foton dalam jalur tertentu ditentukan dengan menambahkan amplitudo kompleks semua jalur ini. Jalur dengan aksi serupa akan bertambah secara konstruktif dan meningkatkan probabilitas foton tiba di sepanjang jalur tersebut,

sedangkan aksi lainnya akan dibatalkan karena fase yang berbeda, yang menunjukkan interferensi kuantum. Jumlah semua riwayat yang mungkin ini bukanlah tambahan langsung, karena melibatkan penggabungan jalur yang mungkin dalam jumlah tak terbatas, suatu proses yang dibuat dapat dikelola melalui teknik matematika tingkat lanjut. Pendekatan integral jalur unggul dalam sistem dimana aksi didominasi oleh suku kuadrat membuatnya dapat dipecahkan dan berguna untuk solusi dan perkiraan yang tepat.

Dalam fisika klasik, cahaya bergerak dalam garis lurus dari bintang ke bumi, mengikuti jalur dengan aksi paling sedikit, rute secara langsung yang meminimalkan energi yang digunakan dari waktu ke waktu dan merupakan jalur yang sederhana dan efisien. Meskipun demikian, menurut formulasi integral jalur Feynman, foton yang dipancarkan oleh bintang tidak hanya mengambil satu jalur. Sebaliknya, dibutuhkan setiap jalur yang mungkin untuk mencapai bumi. Beberapa jalur ini bisa secara langsung, atau bisa secara zigzag liar melalui ruang angkasa, dan kemungkinan lainnya melingkar di sekitar benda langit lain sebelum menuju ke bumi. Masing-masing jalur ini berkontribusi terhadap amplitudo probabilitas keseluruhan kedatangan foton di lokasi tertentu di bumi. Jalur yang lebih dekat ke garis lurus klasik, lebih sederhana dan membutuhkan lebih sedikit aksi (dalam hal interaksi dan penyimpangan), berkontribusi lebih signifikan terhadap amplitudo probabilitas. Jalur langsung tersebut analog dengan jalur utama pada peta yang biasanya lebih cepat dan lebih langsung. Sebaliknya, jalur yang lebih berbelit-belit, yang meliputi kemungkinan memantulkan foton dari objek antarbintang atau mengambil jalur memutar yang panjang, berkontribusi jauh lebih sedikit terhadap amplitudo probabilitas keseluruhan, seperti jalur memutar yang berbelit-belit pada peta kota yang cenderung tidak dipilih untuk perjalanan cepat. Untuk memvisualisasikan beberapa jalur ini, seseorang dapat menggunakan Diagram Feynman,

yang tidak hanya menggambarkan interaksi langsung tetapi juga probabilitas interaksi dengan partikel lain di sepanjang jalur. Diagram ini menyederhanakan probabilitas kompleks menjadi visualisasi yang dapat dikelola, dimana setiap simpul atau titik interaksi pada diagram merepresentasikan potensi perubahan jalur atau keadaan foton. Pada akhirnya, perilaku foton adalah superposisi semua jalur ini, dan jalur yang diamati (foton yang tiba di bumi dari bintang) hanyalah salah satu dari banyak probabilitas, dipengaruhi oleh jumlah amplitudo semua jalur yang mungkin. Hal ini menekankan sifat kuantum realitas, dimana setiap riwayat yang mungkin memiliki kontribusinya, dan intuisi klasik tentang jalur yang paling sederhana hanyalah bagian gambaran probabilistik yang jauh lebih kaya.

Eksperimen celah ganda seperti pada Gambar 8.2 berikut adalah contoh klasik formulasi integral jalur Feynman dalam aksi dan menunjukkan prinsip-prinsip inti mekanika kuantum, terutama superposisi dan interferensi kuantum. Dalam eksperimen celah ganda, partikel (seperti elektron, foton, atau bahkan molekul yang lebih besar) ditembakkan ke arah penghalang yang memiliki dua celah. Setelah melewati celah, partikel mengenai layar deteksi di belakang penghalang. Jika partikel berperilaku seperti partikel klasik, diharapkan dapat melihat dua celah berbeda yang berlawanan langsung dengan dua celah pada layar deteksi, sesuai dengan jalur laluan setiap celah. Namun, yang sebenarnya diamati adalah pola banyak celah atau pinggiran dengan kecerahan yang bervariasi. Pola ini dihasilkan dari interferensi, yang menunjukkan partikel bersifat seperti gelombang.



Gambar 8.2. Eksperimen Celah Ganda

Menurut mekanika kuantum, setiap partikel melewati kedua celah secara bersamaan, bukan sebagai entitas lokal tunggal tetapi sebagai gelombang yang menyebar dan melewati kedua celah. Pendekatan integral jalur Feynman memberikan penjelasan mendalam untuk fenomena ini. Hal ini menunjukkan bahwa setiap partikel mengeksplorasi semua jalur yang mungkin dari sumber ke layar deteksi. Jalurnya termasuk melewati celah pertama, melewati celah kedua, mungkin memantul dari tepi celah, dan setiap jalur lain yang bisa dibayangkan. Pola interferensi muncul karena amplitudo probabilitas yang terkait dengan jalur ini bergabung. Beberapa jalur akan berada dalam fase dan secara konstruktif mengganggu (meningkatkan probabilitas partikel datang di titik-titik tertentu di layar), sedangkan yang lain akan keluar dari fase dan mengganggu secara destruktif (mengurangi probabilitas partikel datang di titik yang lain). Pinggiran terang pada layar sesuai dengan titik-titik interferensi konstruktif (dimana jalur bertambah dalam fase), dan area gelap sesuai dengan interferensi destruktif (dimana jalur dibatalkan). Eksperimen ini menyoroti kedatangan radikal intuisi klasik dimana partikel dalam mekanika kuantum tidak memiliki posisi atau jalur yang terdefinisi dengan baik sebelum pengukuran. Sebaliknya, perilakunya digambarkan dengan jumlah semua jalur

yang mungkin, dengan hasil akhir yang diamati adalah hasil gangguan amplitudo probabilitas pada semua jalur ini. Eksperimen ini secara langsung mendukung gagasan bahwa entitas kuantum seperti foton dan elektron berperilaku sebagai partikel dan gelombang, tergantung pada bagaimana partikel dan gelombang diamati.

Pendekatan integral jalur Feynman dapat digunakan untuk memahami dan menghitung efek kuantum, misalnya pada masalah perpindahan partikel sebagai berikut.

- Kondisi Awal: Suatu perpindahan partikel dimulai di titik A (posisi  $x_A$ ) di waktu  $t_A$
- Kondisi Akhir: Suatu perpindahan partikel berakhir di titik B (posisi  $x_B$ ) di waktu  $t_B$

Amplitudo probabilitas partikel untuk berpindah dari titik A ke titik B dengan Aksi S untuk partikel bebas (tidak ada energi potensial) dinyatakan dengan:

$$S = \int_{t_A}^{t_B} \frac{1}{2} m \dot{x}^2 dt$$

dimana  $\dot{x}$  adalah kecepatan partikel, dan m adalah massa partikel.

Amplitudo probabilitas K untuk partikel berpindah dari titik A ke titik B dinyatakan dengan integral jalur,

$$K(x_B, t_B; x_A, t_A) = \int D_x e^{iS/\hbar}$$

dimana  $D_x$  menunjukkan integrasi semua probabilitas jalur  $x(t)$  yang dimulai dari titik A ke titik B, dan  $\hbar$  adalah konstanta Planck yang direduksi.

Untuk partikel bebas, integral jalur dapat diselesaikan dengan tepat. Jalur yang berkontribusi secara signifikan adalah jalur yang dekat dengan jalur klasik yang meminimalkan aksi S. Dalam kasus sederhana ini, jalur klasik adalah gerakan garis lurus dari titik A ke titik B dengan kecepatan konstan.

$$\dot{x} = \frac{x_B - x_A}{t_B - t_A}$$

Aksi di sepanjang jalur ini adalah:

$$S = \frac{1}{2} m \left( \frac{x_B - x_A}{t_B - t_A} \right)^2 (t_B - t_A)$$

Amplitudo probabilitas  $K$  merepresentasikan amplitudo mekanika kuantum untuk partikel melakukan perjalanan dari titik A ke titik B dalam interval waktu, mempertimbangkan semua jalur yang mungkin tetapi dengan kontribusi dominan dari jalur klasik. Contoh ini menampilkan aplikasi dasar integral jalur Feynman dalam menghitung amplitudo kuantum untuk sistem kuantum sederhana.

Dalam formulasi integral jalur mekanika kuantum, terutama untuk sistem sederhana seperti partikel bebas (dimana tidak ada gaya yang bekerja pada partikel), jalur yang paling mungkin adalah jalur yang berkontribusi paling signifikan terhadap integral jalur, yaitu jalur garis lurus. Jalur ini sesuai dengan jalur klasik yang akan diikuti partikel menurut mekanika klasik. Dalam mekanika klasik, jalur yang diambil suatu sistem antara dua titik adalah jalur yang meminimalkan aksi (Prinsip Aksi Terkecil), kuantitas yang didefinisikan sebagai integral dari waktu ke waktu dengan sistem Lagrangian untuk partikel bebas, yaitu

$$L = \frac{1}{2} m \dot{x}^2$$

Aksi untuk setiap jalur dari titik A ke titik B selama waktu  $t$  dinyatakan dengan:

$$S = \int \frac{1}{2} m \dot{x}^2 dt$$

Jalur yang meminimalkan aksi ini dalam kondisi titik akhir tetap adalah garis lurus dengan kecepatan konstan.

Aturan dasar amplitudo probabilitas yang akan digunakan adalah

1. Jika suatu peristiwa dapat terjadi melalui sejumlah proses

alternatif yang tidak dapat dibedakan (alias proses "virtual"), maka amplitudo probabilitasnya adalah jumlah amplitudo probabilitas alternatif-alternatif tersebut.

2. Jika suatu proses virtual melibatkan sejumlah sub-proses yang independen atau bersamaan, maka amplitudo probabilitas keseluruhan proses (gabungan) adalah hasil kali amplitudo probabilitas sub-proses tersebut.

### 8.5. Formulasi Matematis

Secara matematis, elektrodinamika kuantum adalah teori pengukur Abelian dengan kelompok simetri yang didefinisikan pada ruang Minkowski (ruang waktu datar). Medan pengukur yang memediasi interaksi antara medan spin-1/2 bermuatan adalah medan elektromagnetik. Elektrodinamika kuantum Lagrangian untuk medan spin-1/2 yang berinteraksi dengan medan elektromagnetik dalam satuan alami memberikan formulasi berikut:

$$S_{\text{QED}} = \int d^4x \left[ -\frac{1}{4} F^{\mu\nu} F_{\mu\nu} + \bar{\psi} (i\gamma^\mu D_\mu - m) \psi \right]$$

Perluasan turunan kovarian mengungkapkan bentuk Lagrangian kedua yang berguna sebagai berikut:

$$\mathcal{L} = -\frac{1}{4} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu} + \bar{\psi} (i\gamma^\mu \partial_\mu - m) \psi - e j^\mu A_\mu$$

Perluasan turunan kovarian dalam Lagrangian menghasilkan

$$\begin{aligned} \mathcal{L} &= -\frac{1}{4} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu} + i\bar{\psi} \gamma^\mu \partial_\mu \psi - e\bar{\psi} \gamma^\mu A_\mu \psi - m\bar{\psi} \psi \\ &= -\frac{1}{4} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu} + i\bar{\psi} \gamma^\mu \partial_\mu \psi - m\bar{\psi} \psi - e j^\mu A_\mu. \end{aligned}$$

Saat melakukan perhitungan, jauh lebih mudah untuk bekerja dengan transformasi Fourier dari propator. Uji eksperimental

elektrodinamika kuantum biasanya merupakan eksperimen hamburan. Dalam teori hamburan, momenta partikel daripada posisinya dipertimbangkan, dan lebih mudah untuk menganggap partikel diciptakan atau dimusnahkan ketika berinteraksi. Diagram Feynman kemudian terlihat sama, tetapi garis-garisnya memiliki interpretasi yang berbeda. Garis elektron merepresentasikan elektron dengan energi dan momentum tertentu, dengan interpretasi yang serupa dari garis foton. Diagram simpul merepresentasikan pemusnahan satu elektron dan penciptaan elektron lain bersamaan dengan penyerapan atau penciptaan foton yang masing-masing memiliki energi dan momenta tertentu.

Keberhasilan prediksi elektrodinamika kuantum sebagian besar bertumpu pada penggunaan teori gangguan, yang dinyatakan dalam Diagram Feynman. Namun, elektrodinamika kuantum juga mengarah pada prediksi di luar teori gangguan. Dengan adanya medan listrik yang sangat kuat, elektrodinamika kuantum dapat memprediksi bahwa elektron dan positron akan diproduksi secara spontan, sehingga menyebabkan peluruhan medan. Proses yang disebut dengan efek Schwingertidak ini tidak dapat dipahami dalam kerangka Diagram Feynman dalam jumlah terbatas dan karenanya digambarkan sebagai nonperturbative. Secara matematis, ini dapat diturunkan dengan perkiraan semiklasik ke integral jalur elektrodinamika kuantum.

## **8.6. Elektrodinamika Kuantum Pada Bidang Telekomunikasi**

Dengan ditemukannya *Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation* (MASER), minat terhadap penanganan efek kuantum dalam sistem komunikasi semakin besar. Hal ini didasari pada pengembangan frekuensi optik yang memiliki sifat ganda (seperti partikel dan seperti gelombang) dan penanganan mekanika kuantum terhadap medan elektromagnetik.

Elektrodinamika kuantum dapat diterapkan pada saluran pita sempit yang memiliki lebar pita  $W$  dan frekuensi pembawa  $\frac{\omega_0}{2\pi}$ . Saluran komunikasi tersebut secara terus-menerus terganggu oleh derau termal lingkungannya pada suhu tersebut, dengan asumsi  $W \ll \gamma \ll \omega_0$ . Dalam banyak kasus, hal ini dapat dianggap setara dengan sumber gangguan yang melekat pada sistem yang sedang dipertimbangkan. Saluran transmisi yang digunakan untuk merepresentasikan gelombang bidang koheren pada frekuensi cahaya memiliki dua polarisasi independen untuk setiap vektor gelombang, dengan kerapatan mode per unit jumlah gelombang adalah  $\frac{l}{2\pi}$ .

Elektrodinamika kuantum dapat dijelaskan dengan menggunakan evolusi waktu operator medan untuk menyelesaikan persamaan gerak Heisenberg yang relevan dimana persamaan gabungan operator penciptaan dan pemusnahan untuk mode normal jalur transmisi utama dan jalur deteksi dapat dinyatakan dengan:

$$\frac{da_k}{dt} + i\omega_k a_k = i \frac{c}{\sqrt{2}} \sqrt{\frac{L}{l}} \frac{1}{\sqrt{\hbar\omega_k}} i_0(t) + \frac{c^2}{2} \frac{1}{\sqrt{l\Delta}} \frac{k_0}{\sqrt{\omega_k\omega_0}} (a_\Delta^\dagger - a_\Delta) e^{-i\kappa t}$$

Persamaan tersebut dan *adjoint* Hermitiannya menghasilkan persamaan diferensial linier yang dapat diselesaikan secara tepat dengan cara yang mudah.

Suatu model sederhana telah dibangun untuk transmisi sinyal pita sempit dari sudut pandang medan kuantum. Baik saluran transmisi utama (saluran) maupun perangkat pengukuran (penerima) dikuantisasi untuk memperhitungkan efek kuantum yang disebabkan oleh fluktuasi titik nol dan didapatkan bahwa status awal pengukuran

bergantung pada hasil pengukuran sebelumnya. Memori perangkat pengukuran meluruh secara eksponensial dengan waktu karakteristik  $\Delta/c$  yang sama dengan waktu gelombang elektromagnetik untuk melewati detektor. Telah ditunjukkan bahwa untuk pengukuran yang efektif, memori  $\Delta/c$  harus cukup panjang untuk dirata-ratakan selama banyak siklus frekuensi pembawa dan cukup pendek untuk menyelesaikan komponen modulasi kuadrat sinyal secara cukup rinci. Dalam kondisi ini, laju pengukuran berulang cukup lambat relatif terhadap memori deteksi sehingga efek kuantum yang disebabkan oleh pengukuran sebelumnya dapat diabaikan atau terlupakan.

Detektor gabungan koheren yang melakukan pengukuran simultan ideal pada laju Nyquist mendeteksi proses acak Gaussian sederhana. Derau efektif saluran, yang disebabkan oleh fluktuasi termal dan kuantum dari total kuantum ( $n_{th} + 1$ ), bersifat aditif. Jika sinyal masukan diberikan atau dipilih dengan daya sinyal dibatasi pada nilai tertentu, konsep dan persamaan klasik untuk informasi mutual rata-rata dan kapasitas saluran masih berlaku, asalkan derau kuantum dari satu kuantum disertakan dengan benar. Ketika suhu  $T$  mendekati nol, efek kuantum memunculkan satu kuantum derau yang memberikan batasan mendasar terhadap keakuratan teorema pengambilan sampel dan mencegah saluran ideal memiliki kapasitas tak terbatas.

Dalam komunikasi optik, umumnya diterapkan formulasi yang memperlakukan ruang dan waktu secara nonrelativistik, karena tidak ada muatan menonjol yang bergerak dengan kecepatan mendekati kecepatan cahaya. Hal ini didasarkan pada persamaan Maxwell untuk medan elektromagnetik. Dalam komunikasi optik dengan pendekatan elektrodinamika kuantum, medan elektromagnetik didukung dengan variabel reguler untuk memperoleh status operator kuantum yang bekerja pada vektor status medan radiasi. Akibatnya, prinsip

kuantum secara konsisten diterapkan pada keseluruhan setiap sistem, baik ada muatan atau foton maupun tidak.

Dalam teori klasik, medan listrik radiasi  $e$  adalah nol ketika tidak ada cahaya, sedangkan dalam elektrodinamika kuantum, operator gandeng multipolar seperti  $-\mu \cdot e$  yang merepresentasikan dipole listrik ( $E1$ )  $\mu$  yang terlibat dengan suatu vektor medan listrik  $e$  yang tidak pernah nol, karena  $\mu$  dan  $e$  keduanya adalah operator, yang satu bekerja pada keadaan materi dan yang lainnya pada medan radiasi. Hal yang sama berlaku ketika penggandengan dipole ini dinyatakan dalam medan perpindahan listrik.

Hamburan medan gelombang mikro koheren diukur dengan cara mengekstrak parameter qubit dan mengkalibrasi daya absolut foton pada qubit. Selanjutnya, qubit dilepaskan satu sama lain dan kemudian menerapkan pulsa gelombang mikro resonansi ke saluran transmisi. Qubit dapat disiapkan secara individual pada bidang  $\alpha|g\rangle + \beta|e\rangle$ , dimana  $\alpha$  dan  $\beta$  adalah koefisien kompleks yang ditentukan oleh amplitudo dan fase pulsa. Foton yang dipancarkan oleh qubit diverifikasi menggunakan deteksi amplitudo kuadratur dari keluaran kiri dan kanan saluran transmisi. Foton-foton ini diperkuat dan diturunkan ke frekuensi tengah  $f_d$  menggunakan pencampuran sefase dan kuadratur (IQ). Satu qubit yang tidak ditetapkan dalam keadaan  $(|g\rangle + |e\rangle)/\sqrt{2}$  digunakan untuk kalibrasi dan menangkap dinamika waktu emisi dengan merata-ratakan amplitudo tegangan pada keluaran pencampur. Qubit juga dapat sepenuhnya tereksitasi dimana foton yang dipancarkan tidak memiliki koherensi relatif terhadap keadaan vakum dan dengan demikian, tegangan rata-rata menjadi nol. Sinyal foton yang dipancarkan oleh qubit diperkuat dan diturunkan ke frekuensi tengah  $f_d$  sebelum digitalisasi. Sinyal digital kemudian didemodulasi lebih lanjut dan diintegrasikan menggunakan kode larik gerbang medan dapat diprogram (Field Programmable

Gate Array, FPGA) untuk memperoleh sepasang bilangan kompleks  $S_L = X_L + jP_L$  dan  $S_R = X_R + jP_R$ .

## • Referensi

- Andrews, David L, etc. 2020. Quantum Electrodynamics in Modern Optics and Photonics: Tutorial. *Journal Optical Society of America* 37 (4): 1153-1172.
- Banerjee, Swapnonil dan Banerjee, S. 2023. Feynman's Path Integral Explained with Basic Calculus. SwaNi.
- Chiao She. 1968. Quantum Electrodynamics of a Communication Channel. *IEEE Transactions on Information Theory*. 14 (1): 32-37.
- Feynman, Richard. 1949. Space-Time Approach to Quantum Electrodynamics. *Physical Review*. 76 (6): 769-89.
- Feynman, Richard. 1950. Mathematical Formulation of the Quantum Theory of Electromagnetic Interaction. *Physical Review*. 80 (3): 440-457.
- Feynman, Richard. 1985. QED: The Strange Theory of Light and Matter. Princeton University Press. ISBN 978-0-691-12575-6.
- Feynman, Richard. 1998. Quantum Electrodynamics. Westview Press.
- Jauch, J.M.; Rohrlich, F. 1980. The Theory of Photons and Electrons. Springer-Verlag.
- J. Schwinger. 1948. On Quantum-Electrodynamics and the Magnetic Moment of the Electron. *Physical Review*. 73 (4): 416-17.
- J. Schwinger. 1948. Quantum Electrodynamics. I. A Covariant Formulation". *Physical Review*. 74 (10): 1439-61.
- Miller, Arthur I. 1995. Early Quantum Electrodynamics: A Sourcebook. Cambridge University Press. ISBN 978-0-521-56891-3.
- Schweber, Silvan. 1994. "Chapter 5". QED and the Men Who Did it: Dyson, Feynman, Schwinger, and Tomonaga. Princeton University Press. p. 230. ISBN 978-0-691-03327-3.

## **PROFIL PENULIS**



**Sri Hartanto**  
**Universitas Krisnadwipayana**

Penulis buku *Arsitektur Komputer* terbitan BSI Press dan buku *Keamanan dan Keandalan Jaringan* terbitan CV Mitra Ilmu dan penulis berbagai jurnal ilmiah baik nasional maupun internasional. Selain itu, masih aktif sebagai Editor di *Jurnal Ilmiah Techno* terbitan Universitas Nusa Mandiri dan Reviewer pada *International Journal of Engineering Continuity*.

# FISIKA KUANTUM

Buku Fisika Kuantum ini dirancang untuk menjawab berbagai pertanyaan mendasar tentang dunia subatomik dan membawa pembaca menuju pemahaman yang lebih dalam mengenai teori kuantum. Dimulai dengan konsep dasar, buku ini memaparkan asal-usul fisika kuantum dan peran pentingnya dalam menjelaskan fenomena yang tak dapat diterangkan oleh fisika klasik, seperti radiasi benda hitam dan dualitas partikel-gelombang. Di bagian selanjutnya, pembaca akan diajak untuk mendalami aspek matematis dari fisika kuantum, yang mencakup ruang Hilbert, operator Hermitian, serta peran transformasi Fourier dalam mekanika kuantum. Buku ini kemudian membahas teori mekanika kuantum, struktur atom, dan fenomena spin serta statistik kuantum yang menjadi dasar pemahaman terhadap perilaku partikel-partikel elementer. Pembaca juga akan mendapatkan wawasan mengenai aplikasi praktis teori kuantum, seperti komputasi dan informasi kuantum, yang menjadi pilar dalam teknologi mutakhir. Buku ini tidak hanya menyajikan konsep fisika kuantum dari sisi ilmiah, tetapi juga menyoroti interpretasi filosofisnya dan potensi pengembangan teknologi berbasis kuantum di masa depan. Dengan bahasa yang jelas dan disertai dengan contoh kasus yang mudah dipahami, buku ini diharapkan mampu menjadi referensi yang bermanfaat bagi para pelajar, akademisi, dan siapa saja yang tertarik mendalami fisika kuantum.



**Penerbit**  
**Gita Lentera**

Office 1: Perm. Permata hijau regency blok F/1 kelurahan Pisang  
kecamatan Pauh kota Padang, Sumatera Barat  
Office 2: Jl Weling no 120 Gejayan, Yogyakarta  
Cp. Admin: +62823-8699-7194  
git4lenter4@gmail.com www.gitalentera.com

ISBN 978-623-8708-75-8



9 786238 708758



**IKAPI**  
IKATAN PENERBIT INDONESIA

Anggota IKAPI  
No. 042/SBA/2023