

See discussions, stats, and author profiles for this publication at: <https://www.researchgate.net/publication/390248526>

E-Book Fisika Kuantum

Book · March 2025

CITATIONS

0

READS

690

2 authors:



[Adi Ganda Putra](#)

Jenderal Achmad Yani University

25 PUBLICATIONS 20 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)



[Pawawoi Pawawoi](#)

Jenderal Achmad Yani University

26 PUBLICATIONS 29 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)

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
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

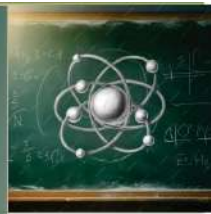
DAFTAR ISI

	Halaman
KATA PENGANTAR	ii
SINOPSIS.....	iv
DAFTAR ISI	v
KONSEP DASAR FISIKA KUANTUM	1
1.1. Awal Munculnya Fisika Kuantum	1
1.2. Radiasi Benda Hitam	2
MATEMATIKA PADA FISIKA KUANTUM	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
MEKANIKA KUANTUM.....	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
ATOM DAN STRUKTUR ATOM.....	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

SPIN DAN STATISTIK KUANTUM.....	59
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
TEORI PERTURBASI.....	81
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
TEORI MEDAN KUANTUM	94
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
ELEKTRODINAMIKA KUANTUM.....	112
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
KOMPUTASI DAN INFORMASI KUANTUM	129
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
FISIKA KUANTUM DALAM MATERIAL DAN TEKNOLOGI	157
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
INTERPRETASI DAN FILOSOFI FISIKA KUANTUM	177
11.1. Filsafat/ Filosofi Fisika Kuantum	177
11.2. Interpretasi mekanika kuantum	177
11.3. Interpretasi Mekanika Kuantum Pada Beberapa Tokoh	182

IMPLEMENTASI FISIKA KUANTUM DALAM SAINS DAN TEKNOLOGI	187
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



KONSEP DASAR FISIKA KUANTUM

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

1.1. Awal Munculnya Fisika Kuantum

Pada akhir abad ke-19 dan awal abad ke-20, merupakan masa dimana konsep-konsep fisika memerlukan teori baru yang mampu menjelaskan beberapa konsep dalam fisika yang karena beberapa hasil eksperimen dan fenomena fisika tidak dapat dijelaskan oleh fisika klasik. Teori-teori yang berlaku saat itu, seperti mekanika Newton dan elektromagnetisme Maxwell, bekerja sangat baik untuk menjelaskan dunia makroskopik, tetapi gagal ketika diterapkan pada skala atomik dan subatomik. Beberapa peristiwa penting yang memicu lahirnya fisika kuantum adalah ketidakmampuan teori klasik dalam menjelaskan *energy distribution* pada spektrum radiasi benda hitam (Nurlina & Hartono, 2020)

Benda hitam adalah objek teoritis yang menyerap semua radiasi elektromagnetik yang mengenainya dan memancarkan radiasi dengan distribusi tertentu yang hanya bergantung pada suhu objek tersebut. Lord Rayleigh dan James Jeans (*Teori Rayleigh-Jeans*), mencoba memodelkan secara sederhana untuk menjelaskan spektrum ini. Dengan pemodelan ini, *Rayleigh-Jeans* merumuskan distribusi intensitas I_λ . Model ini berhasil menjelaskan Panjang gelombang spektrum radiasi benda hitam pada panjang gelombang tinggi (frekuensi rendah) namun gagal untuk frekuensi tinggi (panjang gelombang rendah), yang menyebabkan prediksi energi tak terbatas bertentangan dengan hasil eksperimen.

Max Planck mengusulkan solusi untuk masalah ini dengan memperkenalkan gagasan baru yang menyimpang dari hukum equipartisi energi klasik, yang diperkenalkan pada tahun 1900 di Berlin dalam sebuah artikel berjudul "*Zur Theorie des Gesetzes der Energieverteilung im Normalspectrum*". Penemuan ini dianggap radikal karena menentang konsep energi kontinu yang dipegang oleh fisika klasik. Meskipun pada awalnya karya Planck tidak menarik banyak perhatian, lambat laun para ilmuwan menyadari bahwa idenya memicu perubahan besar dalam dunia fisika. Pendekatan kuantisasi energi Planck membuka jalan bagi lahirnya mekanika kuantum, yang kemudian digunakan untuk menjelaskan berbagai fenomena fisika di skala mikroskopis yang sebelumnya tidak dapat dijelaskan oleh fisika klasik.

1.2. Radiasi Benda Hitam

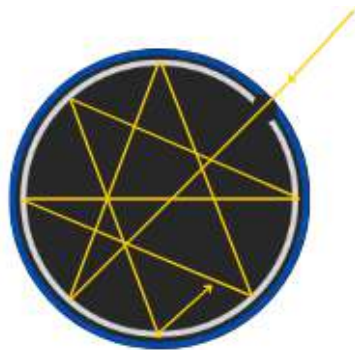
Salah satu masalah terbesar dalam fisika abad ke-19 adalah memahami bagaimana energi radiasi benda hitam didistribusikan di seluruh spektrum elektromagnetik. Radiasi benda hitam adalah konsep penting dalam fisika yang menggambarkan bagaimana objek memancarkan energi dalam bentuk radiasi elektromagnetik berdasarkan suhunya. Benda hitam adalah objek ideal yang menyerap semua radiasi elektromagnetik yang jatuh padanya. Dalam fisika, konsep benda hitam digunakan untuk menjelaskan distribusi energi dalam radiasi termal dan memainkan peran penting dalam pengembangan fisika kuantum.

1.2.1 Radiasi Termal

Dalam studi fisika, radiasi termal sangat penting karena berhubungan dengan bagaimana energi dipancarkan, diserap, dan didistribusikan di antara benda-benda yang memancarkan radiasi. Radiasi termal adalah radiasi elektromagnetik yang dipancarkan oleh objek sebagai hasil dari suhu internalnya. Semua benda dengan suhu di atas nol absolut ($T > 0 \text{ K}$) memancarkan radiasi termal. Warna spektrum radiasi yang dipancarkan oleh sebuah benda tergantung pada temperatur benda tersebut. Pada suhu yang relatif rendah, seperti beberapa ratus derajat Celsius, benda memancarkan radiasi di

spektrum inframerah. Radiasi inframerah tidak terlihat oleh mata manusia, tetapi dapat dirasakan sebagai panas. Demikian juga dengan benda hitam (*blackbody*), pada suhu yang sama, semua benda hitam memancarkan radiasi dengan spektrum yang sama, terlepas dari sifat material yang menyusunnya.

Istilah radiasi benda hitam diperkenalkan pertama kali oleh Gustav Robert Kirchhoff pada tahun 1862 dalam konteks teori radiasi termal. Kirchhoff mengembangkan konsep ini saat mempelajari hubungan antara penyerapan dan emisi radiasi oleh benda. Ia menyadari bahwa benda yang baik dalam menyerap radiasi juga merupakan pemancar radiasi yang baik pada suhu yang sama. Berdasarkan ini, Kirchhoff menyatakan bahwa benda hitam adalah benda yang ideal dalam menyerap radiasi elektromagnetik pada semua panjang gelombang.

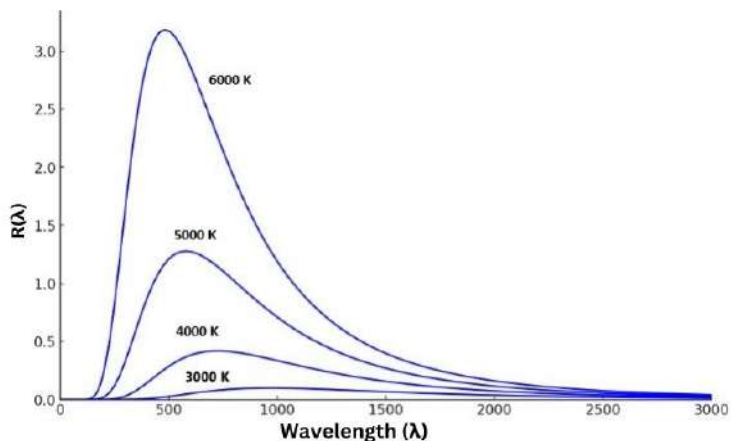


Gambar 1.1 Lubang kecil pada permukaan berongga berperilaku sebagai benda hitam (*blackbody*)

Pada hakikatnya, benda hitam (*blackbody*) tidak ditemukan wujudnya di alam semesta. Walaupun demikian, sebuah lubang kecil pada permukaan benda berongga dapat dianggap sebagai benda hitam. Ketika radiasi masuk melalui lubang tersebut, maka memiliki kemungkinan radiasi untuk keluar hampir tidak ada,

dikarenakan terjadi pemantulan radiasi oleh dinding benda berongga tersebut. Ketika tidak ada radiasi yang keluar pada lubang kecil tersebut kemungkinan seluruh energinya terserap seluruhnya maka benda tersebut berperilaku sebagai benda hitam sempurna. Jika kemudian terdapat radiasi yang dipancarkan dari benda hitam itu sendiri, maka disebut dengan radiasi benda hitam (Sutopo, 2017).

Radiasi pada benda hitam menghasilkan spektrum yang digambarkan sebagai fungsi distribusi, terlihat oleh grafik yang selalu berbentuk garis lengkung . Pengamatan spektrum ini dapat dilakukan menggunakan spektrometer dan detektor gelombang elektromagnetik. Radiasi spektral merupakan fungsi dari frekuensi dan dilambangkan dengan $R_T(f)\Delta f$, yang didefinisikan sebagai jumlah energi radiasi termal yang dipancarkan per satuan waktu, per satuan luas permukaan benda yang bersuhu T, dalam rentang frekuensi antara f dan (f + Δf). Radiasi total, merupakan akumulasi energi pancaran termal meliputi semua frekuensi, per satuan luas, per satuan waktu. Jika digambarkan pada grafik nilai tersebut sama halnya dengan luas permukaan di bawah garis lengkung (Abdullah, R dan Kadri, M. 2017).



Gambar . Radiasi spektral pada temperatur yang berbeda

Luasan dibawah grafik $R_T(f)\Delta f$, menyatakan intensitas radiasi yang

dipancarkan benda-hitam pada rentang suhu tertentu. Dengan kata lain, merepresentasikan total energi termal yang dipancarkan pada suhu T , di mana setiap bagian dari spektrum (frekuensi tertentu) memberikan kontribusi pada total energi ini. Jadi, semua komponen spektrum berkontribusi terhadap pancaran radiasi benda hitam secara keseluruhan. Hal tersebut yang dijelaskan di atas, bersesuaian dengan kaidah yang diperkenalkan oleh Stefan-Boltzman tentang energi radiasi. Hukum ini menunjukkan bahwa semakin tinggi suhu benda hitam, semakin besar total energi yang dipancarkan, yang juga berarti luasan di bawah grafik $R_T(f)$ akan semakin besar pada suhu yang lebih tinggi. Secara matematis oleh **Stefan** dan dirumuskan sebagai berikut:

$$\int_0^{\infty} R_T(f) df = \sigma T^4 \quad (1)$$

di mana terdapat variable konstanta σ yang merupakan *tetapan Stefan-Boltzman*, yang dari beberapa percobaan yang dilakukan maka diperoleh nilai σ sebesar $5,6703 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$

1.2.2. Hukum Pergeseran Wien

Gambar 1.2 di atas juga memperlihatkan bahwa jika temperatur dinaikkan, maka intensitas radiasi akan meningkat. Dalam setiap temperatur, terlihat adanya Panjang gelombang yang memiliki intensitas maksimum, yakni sebesar λ_{max} . Semakin besar nilai temperatur, maka semakin besar frekuensi spektrum yang diradiasikan. Hal ini menandakan bahwa Intensitas λ_{max} semakin bergeser ke arah Panjang gelombang lebih pendek. Gejala pergeseran intensitas radiasi pada peristiwa benda hitam ini disebut **Pergeseran Wien**. Wien menemukan bahwa hasil kali antara intensitas pada λ_{max} dan suhu mutlak merupakan bilangan tetapan sebesar $2,898 \times 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{K}$. Secara matematis, Hukum pergeseran Wien dinyatakan

$$\lambda_{max} T = 2,898 \times 10^{-3} \text{ m} \quad (2)$$

Hubungan antara intensitas dan Panjang gelombang yang ditemukan Wien secara matematis dapat dituliskan

$$R(\lambda) = \frac{A}{\lambda^5} e^{-C/\lambda T} \quad (3)$$

dimana A dan C merupakan sebuah konstanta. Dari perumusan di atas, mampu menjelaskan radiasi benda hitam pada gelombang (λ) pendek, tetapi gagal untuk panjang gelombang (λ) yang panjang (Surya, 2009).

1.2.3. Perumusan Rayleigh-Jeans

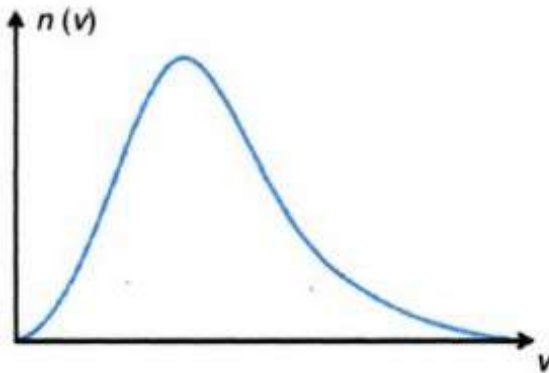
Beberapa tahun tidak lama setelah Wien merumuskan teori radiasi benda hitam yang hanya mampu dijelaskan pada panjang gelombang pendek, beberapa ilmuwan mencoba menjelaskan teori spektrum radiasi benda hitam, diantaranya Lord Rayleigh dan Sir James Hopwood Jeans. Rayleigh-Jeans mencoba menjelaskan radiasi benda hitam dengan menggunakan teori kinetik gas dalam fisika klasik.

Menurut fisika klasik tentang ekuipartisi energi menjelaskan bahwa pada suhu T , energi kinetik rata-rata setiap derajat kebebasan adalah $\frac{1}{2} kT$. Perlu diketahui bahwa setiap gelombang berdiri dalam rongga mempertimbangkan dua komponen energi, yakni yang berasal dari energi kinetik dan energi potensial, sehingga energi total setiap getaran gelombang menjadi $2 \times \frac{1}{2} kT = kT$, dengan k adalah konstanta Stefan – Boltzmann (Adebayu, 2022).

Teori Distribusi Maxwell-Boltzmann memberikan dasar statistik yang digunakan untuk menggambarkan distribusi energi dalam sistem termal, termasuk dalam gas. Teori ini kemudian diterapkan dalam berbagai konteks fisika, termasuk radiasi benda hitam. Rayleigh-Jeans menggunakan prinsip ini untuk merumuskan radiasi benda hitam dalam bentuk gelombang elektromagnetik, dengan memperlakukan radiasi sebagai gelombang yang ada dalam sebuah rongga.

Pada Gambar 1.3, yang merupakan sebaran sejumlah partikel molekul gas yang memiliki kecepatan v . Sebaran energi

kinetik diwakili oleh sebaran kecepatan karena energi kinetik dapat dinyatakan dengan kecepatan. Rayleigh-Jeans melihat bahwa kurva sebaran tersebut sama dengan hasil yang diperoleh pada intensitas spektrum radiasi kalor. Oleh karena itu, Rayleigh-Jeans berasumsi bahwa ada kesamaan antara sifat panas benda dan radiasi kalor.



Gambar 1.3. Kurva distribusi Maxwell

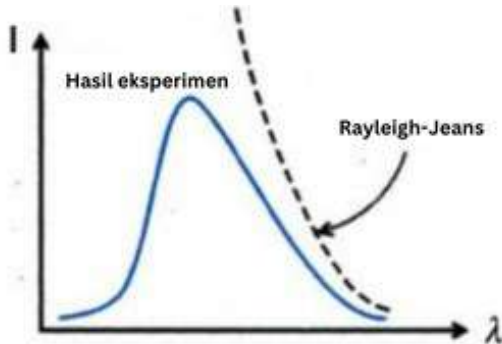
Berdasarkan prinsip ekuipartisi energi, Rayleigh-Jeans mengasumsikan bahwa jumlah mode gelombang dalam rentang panjang gelombang tertentu λ hingga $\lambda + d\lambda$ sebanding dengan $1/\lambda^4$, Rayleigh dan Jeans menyusun **hukum Rayleigh-Jeans** untuk intensitas radiasi pada panjang gelombang λ :

$$R(\lambda) = \frac{2\pi ckT}{\lambda^4} \quad (4)$$

Dari perumusan radiasi di atas memperlihatkan bahwa intensitas radiasi meningkat tajam untuk panjang gelombang yang lebih pendek (frekuensi tinggi). Bahkan Intensitas radiasi mampu menuju nilai tak terhingga jika λ mendekati 0. Hal ini sangat menyimpang dari hasil empiris (eksperimen) yang menunjukkan bahwa intensitas radiasi mendekati nol Ketika λ semakin mengecil. Penyimpangan persamaan Rayleigh-Jeans yang sangat jauh ini diberi istilah *katastropi ultraviolet* (*bencana ultraviolet*) karena panjang gelombang pendek berada

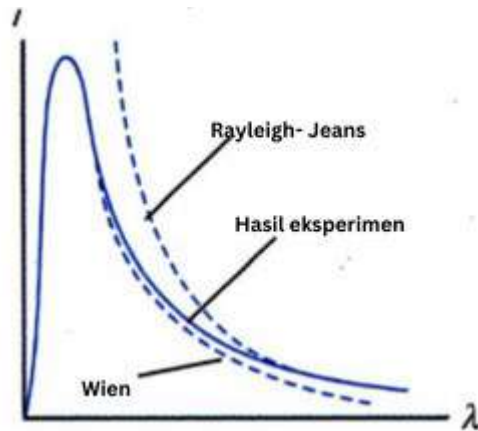
dalam rentang Panjang gelombang ultraviolet.

Pada kurva 1.4 memperlihatkan bahwa perumusan Reyleigh-Jeans dan hasil empiris (eksperimen) memiliki kesesuaian hanya untuk Panjang gelombang yang Panjang.



Gambar 1.4 Perbandingan hasil empiris dan Perumusan Reyleigh-Jeans

Rayleigh-Jeans menggunakan prinsip Maxwell-Boltzmann untuk menyusun hukum radiasi benda hitam, mengasumsikan bahwa energi dipancarkan secara kontinu oleh mode-mode gelombang elektromagnetik. Namun, hukum ini mengalami kegagalan pada panjang gelombang pendek (frekuensi tinggi). Jika digambarkan kedalam kurva hasil penemuan Wien, Reyleigh-Jeans dan hasil empiris (eksperimen) maka terlihat hubungan seperti pada gambar di bawah



Gambar 1.5. Kurva perbandingan hasil penemuan Wien, Rayleigh-Jeans dan hasil empiris

1.2.4. Teori kuantum planck

Munculnya teori kuantum yang dikemukakan oleh Max Planck, dikarenakan kegagalan fisika klasik dalam memprediksi energi radiasi yang dipancarkan oleh benda hitam. Wilhelm Wien memiliki kelemahan dalam menjelaskan radiasi benda hitam pada frekuensi rendah. Sedangkan Rayleigh-Jeans kebalikannya memiliki kelemahan dalam menjelaskan radiasi benda hitam pada frekuensi tinggi.

Planck beranggapan bahwa pendapat dari keduanya sah tetapi pada rentang frekuensi tertentu. Alasan tersebut yang meenergi mbuat Planck mampu membuat Keputusan untuk merumuskan teori distribusi energi radiasi benda hitam yang mampu melengkapi kedua teori sebelumnya (Sugiyono, 2016).

Dalam teori Planck, setiap benda hitam mampu mencarkan atau menyerap energi hanya dalam jumlah tertentu yang terdiri dari kelipatan bulat energi dasarnya (ϵ). Dalam hal ini energi tersebut tidaklah bersifat kontinu, tetapi berupa diskrit.

$$E = n \epsilon, (n = 1, 2, 3, \dots) \quad (5)$$

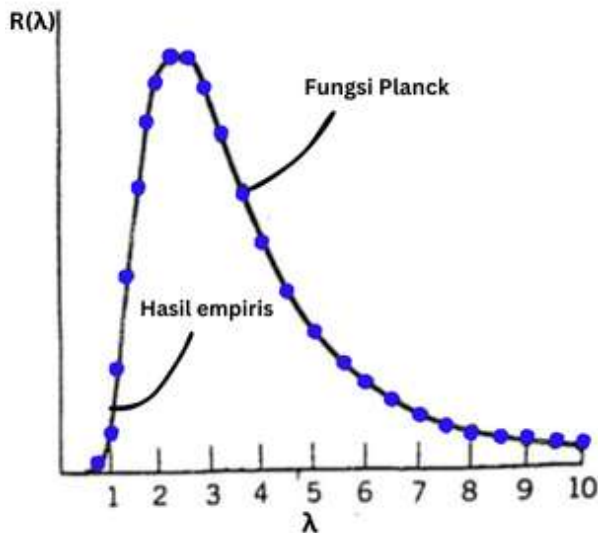
Dimana n merupakan jumlah kuantum. Setiap kuantum ini memiliki energi yang ditentukan besar frekuensi yang secara dirumuskan secara matematis, yaitu

$$\epsilon = hf \quad (6)$$

dengan h adalah konstanta banding atau disebut sebagai konstanta Planck. Berdasarkan asumsi kuantisasi ini, Planck merumuskan hukum radiasi yang menjelaskan distribusi energi radiasi benda hitam sebagai berikut,

$$R(\lambda) = \left(\frac{c}{4}\right) \left(\frac{8\pi}{\lambda^4}\right) \left[\left(\frac{hc}{\lambda}\right) \frac{1}{e^{hc/kT} - 1}\right] \quad (7)$$

Hukum Planck mampu menjelaskan distribusi energi radiasi benda hitam di seluruh spektrum panjang gelombang, termasuk Panjang gelombang pendek (yang gagal dijelaskan oleh Rayleigh-Jeans). Gambar di 1.6, memperlihatkan kesesuaian antara teori Planck dan hasil empiris



Gambar 1.6 Teori Planck berimpit dengan hasil empiris

Perumusan yang dikemukakan oleh Planck juga mampu menurunkan hukum Stefan-Boltzman dan hukum pergeseran Wien. Dan didapatkan hubungan dari konstanta Planck dan konstanta Stefan-Boltzman sebagai berikut :

$$\sigma = \frac{2\pi^5 k^4}{15c^2 h^3}$$

Dari perumusan di atas maka didapatkan nilai konstanta Planck sebesar $h = 6,626 \times 10^{-34}$ J.S (Krane, 2012).

• Referensi

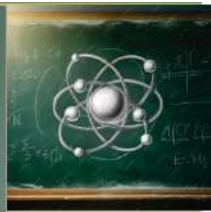
- Abdullah, R dan Kadri, M. 2017. Fisika Kuantum. Jakarta: PT Bumi Aksara.
- Adebayu, R. 2022. Dualisme Gelombang Partikel. Jakarta : Guepedia.
- Krane, K. 2012. Modern Physics, 3rd edition. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons.
- Nurlina & Bancong, H. 2020. Fisika Kuantum untuk pemula: Panduan Mudah untuk Memahami Teori Fisika Kuantum. Makassar: LPP Unismuh Makassar
- Surya, Y. 2009. Fisika modern (Seri Bahan Persiapan Olimpiade Fisika). Tangerang: PT. Kandel Golden.
- Sugiyono, V. 2016. Mekanika Kuantum. Yogyakarta: CAPS (Center for Academic Publishing Service).
- Sutopo, 2023. Pengantar Mekanika Kuantum. Malang: MNC Publishing.

PROFIL PENULIS



Nurul Azmi Ridha, S.Si., M.Si.
Dosen Program Studi Teknik Sipil
Universitas Pepabri Makassar

Penulis lahir di Ambon 11 Oktober 1993, menyelesaikan pendidikan di Universitas Islam Negeri (UIN) Alauddin Makassar Program studi Fisika, Fakultas Sains dan Teknologi pada Tahun 2015. Melanjutkan pendidikan ke pascasarjana program studi magister (S-2) Fisika di perguruan tinggi Universitas Hasanuddin (Unhas) selesai di Tahun 2018. Saat ini, penulis mengabdikan sebagai Dosen Tetap Yayasan di Universitas Pepabri Makassar pada program studi S1 Teknik Sipil, Fakultas Teknik. Sejak menjadi mahasiswa, penulis sudah aktif mengajar, yakni sebagai tutor pada bimbingan belajar dan menjadi asisten praktikum fisika dasar. Pengalaman menjadi dosen juga pernah penulis dapatkan pada tahun 2018, yakni menjadi dosen LB yang mengajar mata kuliah fisika dasar prodi Teknik Sipil, Universitas Fajar.



MATEMATIKA PADA FISIKA KUANTUM

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

2.1. Ruang Hilbert dan Fungsi Gelombang

Dalam fisika kuantum, *ruang Hilbert* adalah kerangka matematika yang digunakan untuk menggambarkan keadaan sistem kuantum. Ruang ini adalah ruang vektor berdimensi tak hingga yang dilengkapi dengan produk dalam (*inner product*) yang memungkinkan pengukuran panjang dan sudut antara vektor-vektor di dalamnya. Vektor-vektor dalam ruang Hilbert mewakili fungsi gelombang, yaitu fungsi yang menggambarkan probabilitas suatu partikel ditemukan pada posisi atau keadaan tertentu. Ruang Hilbert dinamai sesuai dengan matematikawan David Hilbert, yang mengembangkan teori ini untuk analisis fungsional.

Fungsi gelombang $\psi(x,t)$ adalah deskripsi matematis dari sistem kuantum, biasanya dalam bentuk fungsi kompleks. Fungsi ini digunakan untuk menghitung probabilitas bahwa sebuah partikel berada di suatu lokasi atau dalam keadaan tertentu. Secara matematis, probabilitas tersebut diperoleh dari kuadrat modulus dari fungsi gelombang, yaitu $|\psi(x,t)|^2$. Sebagai contoh, untuk menemukan probabilitas partikel berada di antara posisi x_1 dan x_2 , kita menggunakan integral:

$$P(x_1 \leq x \leq x_2) = \int_{x_1}^{x_2} |\psi(x, t)|^2 dx.$$

Ruang Hilbert juga memungkinkan penerapan operator matematis yang mewakili observabel dalam fisika kuantum, seperti momentum dan energi. Operator ini adalah fungsi linear yang bekerja pada vektor dalam ruang Hilbert. Sebagai contoh, operator momentum dalam representasi posisi adalah $\hat{p} = -i\hbar \frac{\partial}{\partial x}$, di mana \hbar adalah konstanta Planck yang tereduksi dan i adalah unit imajiner. Penerapan operator ini pada fungsi gelombang memberikan informasi tentang momentum partikel dalam keadaan tersebut.

Selain itu, fungsi gelombang dalam ruang Hilbert harus dinormalisasi, artinya integral dari kuadrat modulus fungsi gelombang di seluruh ruang harus sama dengan satu:

$$\int_{-\infty}^{\infty} |\psi(x, t)|^2 dx = 1.$$

Ini memastikan bahwa partikel pasti berada di suatu tempat dalam ruang, memberikan kepastian bahwa total probabilitas adalah 100%.

Menurut Dirac (1930), "Ruang Hilbert menyediakan alat matematis yang sangat diperlukan untuk memahami mekanika kuantum karena memungkinkan deskripsi keadaan kuantum dalam hal vektor unit normalisasi." Selain itu, John von Neumann (1955) menyatakan bahwa "Ruang Hilbert menjadi dasar analisis operator dalam fisika kuantum, memungkinkan kita untuk mendefinisikan dan memanipulasi observabel dan keadaan sistem secara matematis."

Sebagai contoh sederhana, dalam kasus partikel bebas yang bergerak dalam satu dimensi, fungsi gelombang dapat diberikan dalam bentuk gelombang bidang:

$$\psi(x, t) = Ae^{i(kx - \omega t)},$$

di mana k adalah bilangan gelombang, ω adalah frekuensi sudut, dan A adalah amplitudo. Fungsi gelombang ini menggambarkan partikel dengan momentum terdefinisi dalam arah tertentu.

2.2. Operator Hermitian dan Eigenvalue

Dalam fisika kuantum, operator Hermitian memainkan peran penting karena mereka berhubungan dengan observabel, yaitu besaran fisik yang dapat diukur seperti energi, momentum, dan posisi. Secara matematis, operator Hermitian adalah operator linear \hat{A} yang memenuhi syarat:

$$\hat{A} = \hat{A}^\dagger,$$

di mana \hat{A}^\dagger adalah adjoint atau transpose kompleks dari operator \hat{A} . Operator Hermitian ini penting karena mereka memiliki eigenvalue yang real, yang sesuai dengan hasil pengukuran yang dapat diamati dalam eksperimen.

Sebagai contoh, pertimbangkan operator Hamiltonian \hat{H} yang mewakili energi total dari suatu sistem kuantum. Karena \hat{H} adalah operator Hermitian, kita dapat menjamin bahwa hasil pengukuran energi, yang merupakan eigenvalue dari \hat{H}

\hat{H}), selalu bernilai real. Hal ini penting karena pengukuran energi pada sistem fisik harus berupa nilai real, bukan imajiner.

Untuk memahami hubungan antara operator Hermitian dan eigenvalue, kita perlu mendalami konsep eigenvalue dan eigenvector. Jika \hat{A} adalah operator Hermitian, maka sebuah vektor $|\psi\rangle$ dikatakan sebagai eigenvector dari \hat{A} jika memenuhi persamaan:

$$\hat{A}|\psi\rangle = \lambda|\psi\rangle,$$

di mana λ adalah eigenvalue yang terkait dengan eigenvector $|\psi\rangle$. Dalam konteks fisika kuantum, eigenvalue ini adalah hasil pengukuran observabel yang diwakili oleh operator \hat{A} , sedangkan eigenvector menggambarkan keadaan sistem setelah pengukuran dilakukan.

Sebagai contoh, dalam kasus partikel dalam kotak potensial, operator Hamiltonian \hat{H} memiliki fungsi gelombang $\psi_n(x)$ sebagai eigenvector dengan energi E_n sebagai eigenvalue:

$$\hat{H}\psi_n(x) = E_n\psi_n(x),$$

di mana E_n adalah nilai energi yang mungkin untuk keadaan kuantum n , yang bersifat diskrit dan real, sesuai dengan sifat Hermitian dari \hat{H} .

$$\langle\psi_1|\psi_2\rangle = 0 \quad \text{jika} \quad \lambda_1 \neq \lambda_2.$$

Kutipan dari ahli lain juga mendukung pentingnya operator Hermitian dalam fisika kuantum. Menurut Feynman (1964), "Operator Hermitian memungkinkan mekanika kuantum untuk memiliki landasan matematis yang konsisten dengan realitas fisik, memastikan bahwa pengukuran selalu memberikan hasil yang nyata." Di samping itu, Ballentine (1998) menyatakan, "Sifat Hermitian dari operator observabel memastikan bahwa hasil pengukuran sesuai dengan nilai yang dapat diobservasi secara fisik dan menjaga konsistensi teori kuantum."

Selain itu, operator Hermitian juga memiliki sifat lain yang penting, yaitu vektor eigen dari operator Hermitian yang berbeda-beda eigenvalue bersifat ortogonal. Ini berarti bahwa jika

$$\hat{A}|\psi_1\rangle = \lambda_1|\psi_1\rangle \quad \text{dan} \quad \hat{A}|\psi_2\rangle = \lambda_2|\psi_2\rangle, \text{ maka:}$$

$$\langle \psi_1 | \psi_2 \rangle = 0 \quad \text{jika} \quad \lambda_1 \neq \lambda_2.$$

Kondisi ini memastikan bahwa keadaan kuantum yang berbeda dapat dibedakan dengan jelas secara matematis.

Dalam kasus praktis, operator Hermitian sering muncul dalam bentuk operator diferensial. Sebagai contoh, operator momentum dalam mekanika kuantum dalam ruang posisi diberikan oleh $\hat{p} = -i\hbar \frac{d}{dx}$. Operator ini Hermitian karena ketika diterapkan pada fungsi gelombang, hasil dari operasi ini memenuhi syarat Hermitian jika batas-batas fungsi hilang di infinity.

Dengan demikian, operator Hermitian sangat esensial dalam teori kuantum karena memastikan bahwa pengukuran fisik memberikan hasil yang sesuai dengan dunia nyata. Eigenvalue dari operator ini memberikan informasi tentang hasil pengukuran, dan

sifat-sifat operator Hermitian memastikan bahwa teori kuantum secara konsisten memodelkan realitas fisik.

2.3. Teorema Spektral dan Operator Linear

Teorema spektral adalah salah satu konsep fundamental dalam matematika yang mendasari fisika kuantum. Teorema ini berkaitan dengan dekomposisi operator linear Hermitian atau normal ke dalam bentuk yang melibatkan spektrum dari operator tersebut, yaitu himpunan eigenvalue yang terkait dengan operator. Dalam konteks fisika kuantum, teorema spektral memungkinkan representasi observabel, seperti energi atau momentum, melalui operator Hermitian, sehingga kita dapat menghitung dan memprediksi hasil pengukuran.

Secara formal, teorema spektral menyatakan bahwa setiap operator Hermitian \hat{A} pada ruang Hilbert dapat didekomposisi sebagai kombinasi dari proyektor pada ruang eigen yang terkait dengan eigenvalue real λ_i . Secara matematis, hal ini dinyatakan sebagai:

$$\hat{A} = \sum_i \lambda_i P_i,$$

di mana P_i adalah operator proyeksi yang berhubungan dengan eigenvalue λ_i . Dekomposisi ini menunjukkan bahwa operator Hermitian dapat "dipecah" ke dalam komponen-komponen yang terhubung dengan nilai-nilai yang terukur (eigenvalue).

Contoh paling sederhana dari teorema spektral adalah operator Hamiltonian pada ruang Hilbert. Jika kita menganggap sebuah partikel dalam potensial kotak satu dimensi, Hamiltonian

\hat{H} dapat dinyatakan dalam basis eigenvektor fungsi gelombang $\psi_n(x)$ dengan energi E_n sebagai eigenvalue-nya. Oleh karena itu, kita memiliki:

$$\hat{H}\psi_n(x) = E_n\psi_n(x),$$

dengan E_n adalah energi diskrit yang terkait dengan keadaan kuantum n , yang bisa dihitung menggunakan formula yang berasal dari syarat batas pada fungsi gelombang.

Teorema spektral tidak hanya berlaku untuk operator Hermitian tetapi juga untuk operator normal, yang memiliki sifat $\hat{A}^\dagger\hat{A} = \hat{A}\hat{A}^\dagger$. Namun, dalam fisika kuantum, fokus utama adalah pada operator Hermitian, karena mereka menjamin bahwa eigenvalue-nya real, yang penting untuk pengukuran fisik.

Menurut von Neumann (1955), "Teorema spektral menyediakan struktur yang diperlukan untuk analisis spektrum dalam mekanika kuantum, memungkinkan kita untuk memahami observabel dalam bentuk operator yang terukur." Selain itu, Dirac (1930) juga menambahkan bahwa "teorema spektral memberi kita cara yang sistematis untuk menangani pengukuran dalam mekanika kuantum melalui penggunaan operator Hermitian yang memiliki spektrum real."

Sifat dasar lain dari operator Hermitian yang relevan dengan teorema spektral adalah bahwa mereka dapat di-diagonalkan dalam basis eigenvektor mereka. Ini berarti, jika kita memilih basis yang terdiri dari eigenvektor $|\psi_i\rangle$, operator Hermitian \hat{A} dapat dinyatakan dalam bentuk matriks diagonal dengan nilai diagonalnya sebagai eigenvalue λ_i :

$$\hat{A} = \text{diag}(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n).$$

Ini mempermudah perhitungan ketika kita beralih ke representasi numerik dari operator, terutama dalam sistem dengan banyak keadaan kuantum.

Sebagai contoh dalam ruang Hilbert yang lebih kompleks, seperti untuk osilator harmonik kuantum, operator Hamiltonian juga dapat didekomposisi menjadi deret eigenvalue yang terkait dengan fungsi Hermite. Setiap nilai energi diskrit yang diperoleh merupakan eigenvalue yang sesuai dengan keadaan kuantum tertentu, dan solusi ini dapat digambarkan melalui aplikasi teorema spektral.

Dengan demikian, teorema spektral dan operator linear memberikan alat penting dalam fisika kuantum untuk menjelaskan hasil pengukuran observabel melalui spektrum eigenvalue, serta memfasilitasi perhitungan matematis dalam mekanika kuantum.

2.4. Transformasi Fourier dalam Mekanika Kuantum

Transformasi Fourier merupakan alat matematis yang sangat penting dalam mekanika kuantum karena memungkinkan kita untuk beralih antara representasi ruang posisi dan ruang momentum. Dalam fisika kuantum, sebuah sistem kuantum bisa dijelaskan baik dalam ruang posisi (di mana fungsi gelombang bergantung pada posisi partikel) maupun dalam ruang momentum (di mana fungsi gelombang bergantung pada momentum partikel). Transformasi Fourier memungkinkan kita untuk menghubungkan kedua representasi ini secara langsung, sehingga informasi dalam satu ruang dapat diterjemahkan ke dalam bentuk lain.

Dalam representasi ruang posisi, fungsi gelombang menggambarkan probabilitas menemukan partikel pada posisi tertentu. Namun, dalam banyak kasus, lebih berguna untuk bekerja

dalam representasi ruang momentum, terutama ketika kita tertarik pada informasi tentang kecepatan atau momentum partikel. Di sinilah transformasi Fourier menjadi sangat berguna, karena ia menerjemahkan fungsi gelombang dari satu representasi ke representasi lainnya, memberikan perspektif yang berbeda tentang sifat fisik partikel.

Dalam mekanika kuantum, momentum dan posisi adalah pasangan variabel kanonik yang tidak dapat diukur secara bersamaan dengan ketepatan penuh, sebagaimana dinyatakan dalam prinsip ketidakpastian Heisenberg. Transformasi Fourier menggabungkan kedua variabel ini secara matematis dan memungkinkan penghitungan yang lebih mudah dari besaran observabel yang terkait dengan momentum. Dengan menggunakan transformasi Fourier, kita dapat mengubah fungsi gelombang dalam ruang posisi menjadi fungsi gelombang dalam ruang momentum, yang menggambarkan distribusi momentum partikel.

Selain itu, transformasi Fourier juga memiliki peran kunci dalam menyelesaikan persamaan Schrödinger. Banyak masalah dalam mekanika kuantum, seperti partikel dalam kotak potensial atau osilator harmonik, menjadi lebih mudah diselesaikan dalam ruang momentum daripada ruang posisi. Oleh karena itu, transformasi Fourier menyediakan cara untuk menyederhanakan persamaan diferensial yang rumit dengan mengubahnya menjadi bentuk yang lebih sederhana dan lebih mudah ditangani.

Peran transformasi Fourier dalam mekanika kuantum juga meluas ke pemahaman tentang penyebaran paket gelombang. Dalam sistem kuantum, paket gelombang menyebar seiring waktu, dan transformasi Fourier memungkinkan kita untuk menganalisis bagaimana distribusi posisi atau momentum berubah. Dengan kata lain, transformasi ini membantu dalam memvisualisasikan dan memprediksi evolusi waktu dari sistem kuantum.

Secara keseluruhan, transformasi Fourier adalah alat penting dalam mekanika kuantum yang memungkinkan transisi yang mulus antara representasi ruang posisi dan ruang momentum. Dengan membantu dalam analisis sistem kuantum, transformasi ini memberikan wawasan yang lebih dalam tentang sifat partikel dan bagaimana mereka berperilaku dalam berbagai keadaan.

2.5. Persamaan Schrödinger dan Solusi Matematis

Persamaan Schrödinger adalah salah satu landasan utama dalam fisika kuantum yang menggambarkan evolusi waktu dari fungsi gelombang suatu sistem kuantum. Persamaan ini pertama kali diperkenalkan oleh Erwin Schrödinger pada tahun 1926 dan merevolusi cara kita memahami perilaku partikel pada skala mikroskopis. Persamaan Schrödinger menggantikan konsep klasik tentang partikel dengan deskripsi gelombang, di mana keadaan sistem kuantum diwakili oleh fungsi gelombang yang memberikan probabilitas menemukan partikel pada lokasi atau keadaan tertentu.

Secara umum, persamaan Schrödinger dibagi menjadi dua bentuk: persamaan waktu-independen dan persamaan waktu-tergantung. Persamaan waktu-independen digunakan untuk sistem yang tidak mengalami perubahan energi seiring waktu, seperti partikel dalam kotak potensial atau elektron dalam atom hidrogen. Di sisi lain, persamaan waktu-tergantung digunakan untuk menggambarkan sistem yang berkembang seiring waktu, seperti paket gelombang yang bergerak atau partikel yang terlibat dalam interaksi dinamis.

Salah satu aplikasi utama persamaan Schrödinger adalah dalam menentukan fungsi gelombang dan energi partikel dalam keadaan kuantum tertentu. Dengan menyelesaikan persamaan ini, kita dapat menemukan distribusi probabilitas dari posisi partikel serta nilai-nilai energi yang mungkin, yang disebut eigenvalue energi. Hal ini sangat

berbeda dari fisika klasik, di mana energi partikel dapat memiliki nilai kontinu; dalam fisika kuantum, energi partikel dibatasi oleh nilai-nilai diskrit yang terkait dengan solusi dari persamaan Schrödinger.

Solusi matematis dari persamaan Schrödinger sangat tergantung pada bentuk potensial yang mempengaruhi partikel. Sebagai contoh, untuk partikel bebas (tanpa gaya eksternal), solusi fungsi gelombang menggambarkan gelombang bidang yang bergerak dengan kecepatan konstan. Namun, untuk partikel dalam kotak potensial, fungsi gelombang memiliki bentuk stasioner yang menggambarkan keadaan kuantum diskrit, dan hanya nilai-nilai energi tertentu yang diizinkan. Setiap sistem kuantum memiliki bentuk solusi tersendiri yang mencerminkan pengaruh potensial eksternal terhadap partikel.

Penyelesaian persamaan Schrödinger biasanya dilakukan menggunakan metode analitis atau numerik tergantung pada kompleksitas sistem. Untuk sistem sederhana, seperti partikel dalam kotak atau osilator harmonik kuantum, solusi analitis dapat ditemukan dengan menghitung eigenvalue dan fungsi gelombang secara langsung. Namun, untuk sistem yang lebih kompleks, seperti molekul dengan banyak elektron atau partikel yang bergerak dalam medan potensial yang rumit, metode numerik sering digunakan untuk menghitung solusi secara perkiraan.

Dengan demikian, persamaan Schrödinger adalah jantung dari mekanika kuantum yang memungkinkan kita untuk memahami dan memprediksi perilaku sistem mikroskopis. Solusi matematis dari persamaan ini memberikan wawasan tentang sifat-sifat dasar partikel, termasuk distribusi posisi, momentum, dan energi mereka, serta bagaimana partikel-partikel ini berinteraksi dengan lingkungannya.

Rumus/Formula	Contoh
Persamaan Schrödinger Waktu-Tergantung:	Partikel Bebas:
$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \psi(x, t) = \hat{H} \psi(x, t)$	Solusi: $\psi(x, t) = A e^{i(kx - \omega t)}$
Persamaan Schrödinger Waktu-Independen:	Partikel dalam Kotak Potensial:
$\hat{H} \psi(x) = E \psi(x)$	Solusi: $\psi_n(x) = \sqrt{\frac{2}{L}} \sin\left(\frac{n\pi x}{L}\right)$, $E_n = \frac{n^2 \pi^2 \hbar^2}{2m L^2}$
Operator Hamiltonian:	Osilator Harmonik Kuantum:
$\hat{H} = -\frac{\hbar^2}{2m} \frac{d^2}{dx^2} + V(x)$	Solusi: Fungsi Hermite $\psi_n(x) = N_n H_n(\xi) e^{-\xi^2/2}$, Energi: $E_n = \hbar\omega(n + \frac{1}{2})$
Operator Momentum dalam Ruang Posisi:	Transformasi Fourier dalam Ruang Momentum:
$\hat{p} = -i\hbar \frac{d}{dx}$	Solusi: $\psi(p) = \int_{-\infty}^{\infty} \psi(x) e^{-ipx/\hbar} dx$
Persamaan Schrödinger untuk Osilator Harmonik:	Keadaan Dasar Osilator Harmonik:
$\hat{H} \psi(x) = E \psi(x)$	Solusi keadaan dasar: $\psi_0(x) = \left(\frac{m\omega}{\pi\hbar}\right)^{1/4} e^{-m\omega x^2/2\hbar}$, $E_0 = \frac{1}{2}\hbar\omega$

Tabel ini memberikan beberapa contoh dan rumus utama yang terkait dengan Persamaan Schrödinger dan Solusi Matematis.

• Referensi

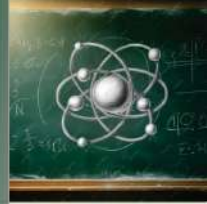
- Ballentine, L. E. (1998). Quantum Mechanics: A Modern Development. World Scientific.
- Dirac, P. A. M. (1930). The Principles of Quantum Mechanics (4th ed.). Oxford University Press.
- Feynman, R. P., Leighton, R. B., & Sands, M. (1964). The Feynman Lectures on Physics. Addison-Wesley.
- von Neumann, J. (1955). Mathematical Foundations of Quantum Mechanics. Princeton University Press.

PROFIL PENULIS



Supiyanto, S. Pd., MM., M.Pd.
Dosen Ilmu Biomedik Dasar, Statistika
STIKes Budi Luhur Cimahi

Supiyanto Lahir di Tulung Agung 07 Mei 1967 Anak Ketiga dari empat bersaudara, menyelesaikan pendidikan Fisika di IKIP Bandung tahun 1990 dan melanjutkan Pendidikan Matematika di IKIP Siliwangi Cimahi, menyelesaikan magister Manajemen Konsentrasi Kesehatan di IMNI Jakarta tahun 2011 dan Magister Pendidikan Matematika di IKIP Siliwangi Cimahi tahun 2018, Pengalaman mengajar matematika-Fisika di SMP-SMA dari Tahun 1990 sd 2005, mengajar mata kuliah Matematika di STIKes Borromeus Tahun 2009 sd 2017, Mengajar mata kuliah Ilmu Biomedik Dasar (Fisika), Biostatistik, Metodologi Penelitian, dan Statistik dari Tahun 2009 sd Sekarang di STIKes Budi Luhur Cimahi.



MEKANIKA KUANTUM

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

Mekanika kuantum adalah cabang fisika yang mempelajari perilaku dan interaksi dari partikel-partikel atomik dan subatomik. Teori ini muncul pada awal abad ke-20 untuk menjelaskan fenomena yang tidak dapat dijelaskan oleh mekanika klasik, seperti radiasi benda hitam, efek fotolistrik, dan spektrum atom hidrogen (Zettili, 2009)

Teori mekanika kuantum memiliki dua aspek yang mendasar, yaitu sifat gelombang-partikel dari partikel sub-atom dan prinsip ketidakpastian. Prinsip ketidakpastian dari Heisenberg menyatakan bahwa terdapat batas ketidakpastian minimum pada besaran-besaran fisis partikel sub-atom, seperti posisi dan momentum, yang tidak dapat diukur secara simultan dengan presisi yang sempurna (Sakurai & Napolitano, 2017)

Mekanika kuantum dapat diformulasikan dengan berbagai pendekatan, dan dua di antaranya yang paling terkenal adalah pandangan Schrödinger dan pandangan Heisenberg. Keduanya memberikan deskripsi mekanika kuantum yang setara secara fisik, tetapi menggunakan cara yang berbeda dalam menggambarkan evolusi sistem kuantum. Berikut adalah perbedaan utama antara pandangan Schrödinger dan pandangan Heisenberg (Feynman *et.al*, 1965):

Pandangan Schrödinger (*Schrödinger Picture*)

- Fokus pada fungsi gelombang (*wavefunction*): Dalam pandangan Schrödinger, keadaan sistem kuantum dijelaskan oleh fungsi gelombang $\psi(t)$ yang berisi semua informasi tentang sistem.
- Evolusi waktu berada pada fungsi gelombang: Evolusi waktu

dalam pandangan Schrödinger dikendalikan oleh persamaan Schrödinger. Operator observabel, seperti posisi atau momentum, dianggap tetap dan tidak berubah seiring waktu. Fungsi gelombang berevolusi menurut persamaan Schrödinger:

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

di mana \hat{H} adalah operator Hamiltonian (energi total sistem).

- Operator Statis, fungsi gelombang dinamis: Operator kuantum (seperti posisi \hat{x} dan momentum \hat{p} tidak berubah terhadap waktu). Sebaliknya, fungsi gelombang yang menggambarkan keadaan sistem berubah seiring waktu.
- Kenyamanan interpretasi: Pandangan Schrödinger sangat intuitif karena memungkinkan kita menggambarkan keadaan sistem sebagai fungsi gelombang yang berevolusi secara terus-menerus, mirip dengan gelombang fisik dalam mekanika klasik (Davies, 1998).

Pandangan Heisenberg (Heisenberg Picture)

- Fokus pada operator observabel: Dalam pandangan Heisenberg, keadaan sistem dijelaskan oleh operator observabel (seperti posisi \hat{x} , momentum \hat{p} , operator lainnya) yang berevolusi seiring waktu.
- Evolusi waktu berada pada operator: Fungsi gelombang tidak berubah, tetapi operator observabel yang menggambarkan besaran fisik sistem, seperti posisi dan momentum, berubah dengan waktu. Evolusi operator mengikuti persamaan gerak Heisenberg yang mirip dengan hukum Newton (Griffiths, 2005)(Sakurai & Napolitano, 2017)(Zettili, 2009):

$$\frac{d\hat{A}}{dt} = \frac{i}{\hbar} [\hat{H}, \hat{A}] + \frac{\partial \hat{A}}{\partial t}$$

Di mana $[\hat{H}, \hat{A}]$ adalah komutator antara operator Hamiltonian \hat{H} dan operator \hat{A} .

- Operator dinamis, fungsi gelombang statis: Dalam pandangan Heisenberg, fungsi gelombang tetap konstan dan tidak berevolusi seiring waktu. Sebaliknya, operator yang mewakili besaran fisik,

seperti posisi dan momentum, berubah dengan waktu.

- Hubungan dengan mekanika klasik: Pendekatan Heisenberg memberikan analogi yang lebih dekat dengan mekanika klasik karena evolusi operator mirip dengan gerak dinamis dalam mekanika Newton, di mana posisi dan momentum berubah dengan waktu.

Meskipun kedua pandangan ini menggunakan pendekatan yang berbeda, mereka sepenuhnya setara secara fisik. Hasil yang diperoleh dari keduanya selalu sama ketika menghitung observasi fisik. Adapun pada pembahasan Bab ini, pendekatan yang dilakukan yaitu berdasarkan Gambaran Schrödinger.

3.1. Postulat dasar mekanika kuantum

Postulate Quantum Mechanics atau postulat dasar mekanika kuantum adalah sekumpulan prinsip dasar yang menggambarkan dan menjelaskan fenomena alam pada skala *subatomic*. Prinsip-prinsip ini menjadikan pondasi bagi teori mekanika kuantum, yang telah terbukti sangat efektif dalam memprediksi dan menjelaskan berbagai fenomena alam di tingkat atom dan partikel (Laurent & Pris, 2022). Salah satu prinsip konseptual fundamental dalam mekanika kuantum yang diajukan adalah gagasan bahwa setiap sistem elementer pada level *subatomic* merupakan pembawa satu unit informasi atau satuan kuantum yang tidak dapat dibagi lagi. Prinsip ini memuat implikasi filosofis yang penting terkait dengan sifat dasar realitas.

Namun, argumen idealisme yang melekat pada prinsip tersebut telah mendapat tantangan dari pandangan realisme. Pandangan realisme menyatakan bahwa sifat-sifat spesifik sistem kuantum justru merupakan konsekuensi dari ketidakmungkinan membicarakan sistem tersebut tanpa mengacu pada konteks pengukuran dan identifikasi yang digunakan. Dengan kata lain, sifat-sifat sistem kuantum timbul dari relasi antara sistem yang diamati dengan alat ukur atau metode identifikasi yang digunakan, bukan semata-mata dari esensi intrinsik sistem itu sendiri (Kent, 2014).

Pemahaman mengenai sifat fundamental realitas melalui mekanika kuantum masih terus diperdebatkan. Perdebatan ini juga

terkait dengan upaya mengasosiasikan mekanika kuantum dengan dunia makroskopik yang tampak kuasiklasik. Terlepas dari perdebatan filosofis, pengembangan teori mekanika kuantum telah memberikan sumbangan yang sangat besar bagi kemajuan ilmu pengetahuan dan teknologi, terutama di bidang fisika, kimia, dan informatika (Arndt & Hornberger, 2014) (Beauregard et al., 2014) (Kent, 2014) (Laurent & Pris, 2022). Postulat ini menggantikan pandangan deterministik dari fisika klasik dengan pendekatan probabilistik yang lebih sesuai dengan perilaku partikel-partikel mikroskopis. Berikut adalah penjelasan dan bagian-bagian dari postulat mekanika kuantum :

3.1.1. Postulat Fungsi Gelombang

Setiap sistem fisik dalam mekanika kuantum digambarkan oleh fungsi gelombang (ψ). Fungsi gelombang ini berisi semua informasi yang dapat diketahui tentang sistem tersebut.

Makna fungsi gelombang $\psi(x, t)$ adalah fungsi kompleks yang bergantung pada ruang spasial (x) dan waktu (t). kuadrat dari nilai mutlak fungsi gelombang $|\psi(x, t)|^2$, memberikan probabilitas menemukan partikel di suatu titik pada suatu posisi (x) dan waktu (t) tertentu. Fungsi gelombang ini harus bersifat ortonormal, yang berarti orthogonal dan ternormalisasi. Fungsi gelombang harus ternormalisasi, yang berarti total peluang menemukan partikel di seluruh ruang sama dengan 1 (Griffiths, 2005)(Zettili, 2009)

$$\int_{-\infty}^{\infty} |\psi(x, t)|^2 dx = 1$$

3.1.2. Postulat operator observable

Setiap besaran fisis yang dapat diukur (*observable*) dalam mekanika kuantum diwakili oleh operator Hermitian. Operator Hermitian memiliki sifat bahwa nilai eigen dari operator tersebut adalah bilangan riil, yang diperlukan karena observabel yang diukur seperti posisi, momentum, energi dan lain-lain harus bernilai riil dalam dunia nyata. Contoh operator observable :

Posisi x diwakili oleh operator posisi \hat{x} ,

Momentum p diwakili oleh operator momentum $\hat{p} = -i\hbar \frac{d}{dx}$,

Energi E diwakili oleh operator Hamiltonian \hat{H} , sering kali merupakan total energi kinetik dan potensial.

3.1.3. Postulat Persamaan Schrödinger

Persamaan Schrödinger, sebuah konsep fundamental dalam mekanika kuantum, telah memainkan peran penting dalam pemahaman kita tentang perilaku partikel subatomik dan sifat materi. Dikembangkan oleh fisikawan Austria, Erwin Schrödinger, pada tahun 1920-an, persamaan ini menyediakan kerangka matematika untuk menggambarkan sifat gelombang partikel dan interaksinya dengan lingkungan sekitarnya.

Persamaan Schrödinger adalah persamaan diferensial parsial linear yang mengatur evolusi fungsi gelombang, yaitu representasi matematika dari keadaan kuantum suatu partikel. Persamaan ini memperhitungkan energi potensial dan energi kinetik dari suatu partikel, dan solusinya menghasilkan distribusi probabilitas untuk menemukan partikel tersebut dalam keadaan atau lokasi tertentu. Secara lengkap persamaan Schrödinger dapat dituliskan dalam ruang 1 dimensi sebagai berikut (Sakurai & Napolitano, 2017):

$$\hat{H}\Psi(x, t) = E\Psi(x, t)$$

di sini, \hat{H} adalah operator Hamiltonian yang mewakili energi total sistem (Energi kinetik + energi potensial), dan E adalah nilai eigen yang terukur, dan $\Psi(x, t)$ adalah fungsi gelombang. bentuk lain dari persamaan di atas yaitu :

$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \Psi(x, t) = \hat{H}\Psi(x, t)$$

Ini menggambarkan bagaimana fungsi gelombang berubah dari waktu ke waktu di bawah pengaruh operator Hamiltonian.

3.1.4. Postulat Nilai Harapan

Hasil rata-rata pengukuran suatu observabel dalam sistem

kuantum diberikan oleh nilai harapan operator observabel tersebut. Jika \hat{A} adalah operator observable yang mewakili suatu besaran fisis A , maka nilai harapan dari observable A dalam keadaan Ψ adalah (Griffiths, 2005):

$$\langle A \rangle = \int_{-\infty}^{\infty} \Psi^*(x, t) \hat{A} \Psi(x, t) dx$$

Di sini, $\Psi^*(x, t)$ adalah konjugat kompleks dari $\Psi(x, t)$. Nilai harapan ini memberikan kita hasil rata-rata pengukuran dari besaran A dalam keadaan kuantum tertentu.

3.1.5. Postulat Kuantisasi dan Nilai Eigen

Hasil pengukuran dari suatu observabel adalah salah satu nilai eigen dari operator observabel tersebut. Ketika suatu sistem berada dalam keadaan fungsi gelombang Ψ , jika dilakukan pengukuran suatu observable yang diwakili oleh operator \hat{A} , maka hasil pengukurannya adalah salah satu dari nilai eigen a dari \hat{A} , dan fungsi gelombang Ψ akan “kolaps” menjadi fungsi eigen yang bersesuaian dengan nilai eigen tersebut.

3.1.6. Prinsip Superposisi

Setiap keadaan kuantum dapat digambarkan sebagai superposisi linear dari fungsi-fungsi eigen dari operator observable. Jika sebuah sistem dapat berada dalam keadaan Ψ_1 dan Ψ_2 , maka setiap kombinasi linier dari keadaan tersebut juga merupakan keadaan yang mungkin (Zettili, 2009). Misalnya,

$$\Psi = c_1 \Psi_1 + c_2 \Psi_2$$

Di mana c_1 dan c_2 adalah konstanta kompleks. Prinsip superposisi ini sangat penting dalam menjelaskan fenomena interferensi dan *quantum entanglement*.

3.1.7. Postulat Pengukuran (Kolaps Fungsi Gelombang)

Sebelum pengukuran, sistem kuantum berada dalam superposisi beberapa keadaan eigen dari suatu kemungkinan. Namun, saat pengukuran dilakukan, fungsi gelombang kolaps ke

salah satu keadaan eigen yang sesuai dengan hasil pengukuran.

$$P_n = |c_n|^2$$

di mana c_n adalah koefisien dari fungsi eigen Ψ_n dalam superposisi linier.

3.2. Persamaan Schrödinger

Keadaan suatu sistem dalam mekanika kuantum dapat dinyatakan dalam persamaan Schrödinger. Karena persamaan tersebut mewakili observabel keadaan energi total, yaitu berupa energi kinetik dan energi potensial. Adapun bentuk umum dari persamaan Schrödinger dapat dituliskan sebagai berikut (Sakurai & Napolitano, 2017):

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 \Psi(\vec{r}, t) + \hat{V}(\vec{r}, t) \Psi(\vec{r}, t) = i\hbar \frac{\partial \Psi(\vec{r}, t)}{\partial t}$$

dengan $\hbar = \frac{h}{2\pi}$ dan ∇^2 adalah operator nabla yang bergantung pada koordinat apa sistem direpresentasikan keadaanya. Sedangkan $\Psi(\vec{r}, t)$ adalah fungsi gelombang yang bergantung ruang dan waktu yang dapat dinyatakan dalam bentuk lain yaitu:

$$\Psi(\vec{r}, t) = \psi(\vec{r}) e^{-\frac{iEt}{\hbar}}$$

Dalam beberapa kasus sederhana, persamaan tersebut dapat menjadi lebih sederhana, misalnya dalam keadaan stasioner yang tidak bergantung waktu dan sistem hanya bergerak dalam ruang 1 dimensi.

3.3. Persamaan Schrödinger bebas waktu

Persamaan Schrödinger bebas waktu adalah bentuk khusus dari persamaan Schrödinger yang digunakan untuk menggambarkan keadaan stasioner dari suatu sistem kuantum.

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 \psi(\vec{r}) + V(\vec{r}) \psi(\vec{r}) = E \psi(\vec{r})$$

Pada persamaan di atas, solusinya memberikan *eigen state* (fungsi gelombang posisi) dan *eigen energi* (energi diskret yang mungkin) dari sistem. Sistem kuantum dalam keadaan ini memiliki energi yang tetap, dan fungsi gelombang tidak berubah bentuk seiring waktu

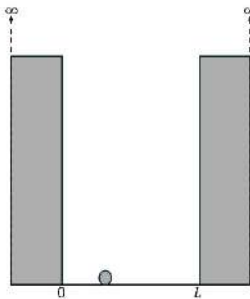
(walaupun fase kompleksnya mungkin beresilasi).

3.4. Kasus-kasus sederhana dalam mekanika kuantum

Beberapa fenomena yang dapat dijelaskan menggunakan mekanika kuantum seperti partikel dalam sumur potensial takhingga, osilator harmonik dan yang berkaitan dengan teknologi semikonduktor yaitu efek terobosan (*Tunneling effect*).

A. Partikel dalam sumur potensial tak hingga

Bayangkan suatu partikel terjebak di antara dinding besar dan sangat tinggi sehingga kemungkinan kecil untuk partikel keluar dari dinding-dinding tersebut. Sistem ini analogi dengan *quantum dot*, di mana elektron atau *hole* terperangkap dalam wilayah yang sangat kecil (nanometer). Elektron terperangkap dalam batasan yang disebabkan oleh perbedaan potensial antara material *dot* dan lingkungannya. Potensial di luar *quantum dot* sangat besar, sehingga partikel tidak bisa meninggalkan *dot*, mirip dengan dinding tak hingga dalam model sumur potensial takhingga (Harrison,2005)(Davies,1998)(Kittel,2004). Kita dapat melihat ilustrasinya sebagai berikut



Gambar 1. Partikel terperangkap pada sumur potensial takhingga

Pada ilustrasi tersebut terlihat partikel terjebak di antara dinding besar yang bisa dianggap sebagai sumur potensial takhingga, di mana keadaan tersebut menyebabkan kemungkinan partikel hanya berada di sepanjang interval $0 \leq x \leq L$ saja, sedangkan di daerah lainnya

($x < 0$) dan ($x > L$) partikel tidak mungkin ditemukan, sehingga persamaan gelombang selain di daerah $0 \leq x \leq L$ bernilai nol. Adapun keadaan partikel di daerah $0 \leq x \leq L$ dapat dideskripsikan dengan persamaan Schrödinger yaitu

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{d^2\psi(x)}{dx^2} + V(x)\psi(x) = E\psi(x)$$

di sini potensial di sepanjang $0 \leq x \leq L$ bernilai nol sehingga $V(x) = 0$. Solusi dari persamaan tersebut yaitu

$$\begin{aligned} -\frac{\hbar^2}{2m} \frac{d^2\psi(x)}{dx^2} + 0 &= E\psi(x) \\ \frac{d^2}{dx^2}\psi(x) + \frac{2mE}{\hbar^2}\psi(x) &= 0 \end{aligned}$$

kita dapat menggunakan *tools* persamaan differensial orde-2, dengan menganggap $\frac{d}{dx} = D$ dan $k^2 = \frac{2mE}{\hbar^2}$, sehingga

$$\begin{aligned} (D^2 + k^2)\psi(x) &\rightarrow (D + ik)(D - ik)\psi(x) = 0 \\ D_1 &= -ik \text{ dan } D_2 = ik \end{aligned}$$

Solusi umum dari persamaan di atas adalah

$$\psi(x) = Ae^{-ikx} + Be^{ikx}$$

Untuk menyederhanakan persamaan tersebut, kita gunakan definisi fungsi Euler yaitu $Ae^{i\theta} = C_1 \cos \theta + iC_2 \sin \theta$, dalam bentuk yang lebih sederhana, Solusi persamaan Schrödinger tersebut dapat kita tuliskan

$$\psi(x) = C_1 \cos kx + C_2 \sin kx$$

Pada posisi $x = 0$ dan $x = L$, fungsi gelombang bernilai nol karena potensial yang sangat tinggi membuat partikel tidak mungkin berada di keadaan $x < 0$ dan $x > L$.

$$\begin{aligned} \psi(0) = 0 &\rightarrow 0 = C_1 \cos 0 + C_2 \sin(0) \\ C_1 &= 0 \end{aligned}$$

Saat $x = L$

$$\psi(L) = C_2 \sin kL = 0$$

C_2 belum tentu bernilai nol, sehingga yang mungkin bernilai nol di sini adalah

$$\sin kL = 0$$

$$kL = 0, \pi, 2\pi \dots n\pi$$

Karena $k^2 = \frac{2mE}{\hbar^2}$ maka

$$\begin{aligned}\sqrt{\frac{2mE}{\hbar^2}} L &= n\pi \\ 2mEL^2 &= n^2\pi^2\hbar^2 \\ E_n &= \frac{n^2\pi^2\hbar^2}{2mL^2}\end{aligned}$$

Terlihat bahwa eigen energi dari sistem partikel yang terkungkung dalam sumur potensial tak hingga bernilai diskret. Adapun fungsi gelombang (fungsi eigen) dapat kita perbaharui menjadi

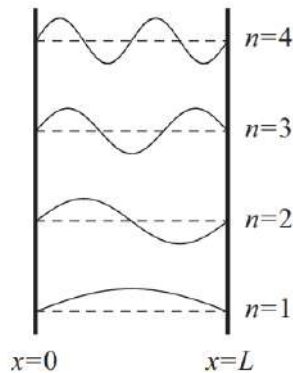
$$\psi_n(x) = C_2 \sin\left(\frac{n\pi x}{L}\right)$$

Dalam postulat mekanika kuantum, fungsi gelombang harus bersifat ortonormal, yaitu saling ortogonal dan ternormalisasi. Kita dapat menormalisasi fungsi gelombang dengan formulasi

$$\begin{aligned}\int_{-\infty}^{\infty} \psi(x)^* \psi(x) dx &= 1 \\ \int_{-\infty}^{\infty} C_2 \sin\left(\frac{n\pi x}{L}\right) C_2 \sin\left(\frac{n\pi x}{L}\right) dx &= 1 \\ C_2^2 \int_0^L \sin^2\left(\frac{n\pi x}{L}\right) dx &= 1 \\ C_2^2 \int_0^L \left(\frac{1 - \cos\frac{2n\pi x}{L}}{2}\right) dx &= 1 \\ \frac{C_2^2}{2} \left(x - \frac{L}{2n\pi} \sin\left(\frac{2n\pi x}{L}\right)\right) \Big|_0^L &= 1 \\ \frac{C_2^2}{2} ((L - 0) - \frac{L}{2n\pi} (\sin(2n\pi) - \sin(0))) &= 1 \\ C_2^2 L = 2 \rightarrow C_2 &= \sqrt{\frac{2}{L}}\end{aligned}$$

Dengan demikian fungsi eigen (fungsi gelombang) dari sistem partikel dalam sumur potensial tak hingga dapat direpresentasikan dalam bentuk (Zettili, 2009) (Griffiths, 2005):

$$\psi_n(x) = \sqrt{\frac{2}{L}} \sin\left(\frac{n\pi x}{L}\right)$$



Gambar 2. Keadaan kuantum partikel yang terperangkap pada sumur potensial takhingga

Gambar 2 menunjukkan keadaan kuantum partikel yang bergerak bebas di ruang $0 < x < L$ yang bersesuaian dengan fungsi gelombang dan keadaan energi partikel.

B. Osilator Harmonik

Sistem lainnya yang penting dan dipelajari yaitu Osilator Harmonik. Osilator harmonik berperan penting dalam memahami vibrasi molekul. Gerakan harmonik Ketika molekul bergetar, atom bergerak bolak-balik di sekitar posisi kesetimbangan. Model osilator harmonik dapat menjelaskan perilaku sistem dengan baik, terutama pada vibrasi yang kecil. Selain itu, osilator harmonik berperan pula terhadap spektroskopi Infra merah (IR) (Banwell *et.al*, 1994). Vibrasi molekul menyebabkan perubahan momen dipol, memungkinkan interaksi dengan radiasi IR. Dengan menggunakan model osilator harmonik, kita dapat memahami spektrum vibrasi dan menentukan frekuensi vibrasi, yang berkaitan dengan ikatan kimia dalam molekul (Levine, 2009). Salah satunya yaitu potensial Morse, di mana di

daerah titik setimbang mendekati bentuk potensial osilator harmonik . Suatu sistem yang dipengaruhi oleh potensial osilator harmonik, persamaan Schrödinger sistem dapat dituliskan sebagai :

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{d^2}{dx^2} \psi(x) + \frac{1}{2} m \omega^2 x^2 \psi(x) = E \psi(x)$$

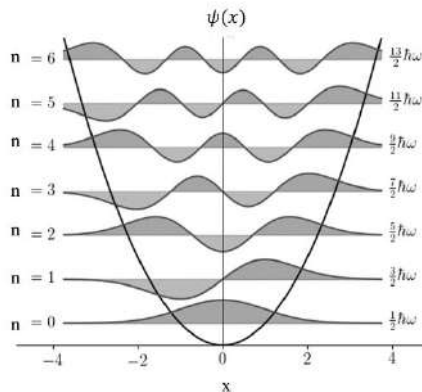
di mana $\frac{1}{2} m \omega^2 x^2$ potensial osilator harmonik. Untuk menyelesaikan persamaan tersebut kita dapat menggunakan metode analitik dan metode operator *ladder*. Untuk Solusi persamaan Schrödinger di atas, persamaan gelombang (fungsi eigen) dapat dituliskan sebagai :

$$\psi(z) = \left(\frac{1}{2^n n!} \right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{m\omega}{\pi \hbar} \right)^{\frac{1}{4}} H_n(z) e^{-\frac{z^2}{2}}$$

dengan $z = \sqrt{\frac{m\omega}{\hbar}} x$ dan $H_n(z)$ adalah polinom Hermit yang mempunyai bentuk umum yaitu

$$H_n(z) = (-1)^n e^{z^2} \frac{d^n}{dz^n} (e^{-z^2})$$

Keadaan kuantum partikel yang berada pada potensial osilator harmonik dapat diilustrasikan pada Gambar 3.

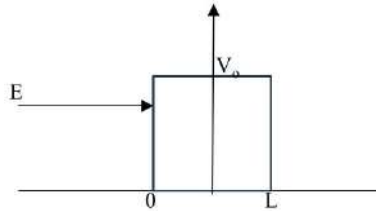


Gambar 3. Keadaan kuantum partikel yang berada pada pengaruh potensial osilator harmonik

C. Efek Terobosan (*Tunneling effect*)

Dalam kajian Fisika klasik, Ketika partikel memiliki energi

kurang dari potensial penghalang maka partikel tersebut tidak memiliki kemungkinan untuk dapat melewati penghalang tersebut seperti pada gambar



Gambar 4. Partikel menemui penghalang dengan energi yang dimiliki partikel $E < V_0$

Jika kita analisis, potensial di tiga daerah tersebut dapat kita tuliskan

$$V(x) = \begin{cases} 0, & x < 0 \\ V_0 & 0 < x < L \\ 0, & x > L \end{cases}$$

Kita dapat mendeskripsikan persamaan gelombang di tiga daerah tersebut yaitu

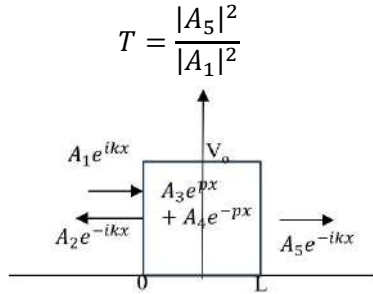
$$\psi(x) = \begin{cases} \psi_1(x) = A_1 e^{ikx} + A_2 e^{-ikx}, & x < 0 \\ \psi_2(x) = A_3 e^{px} + A_4 e^{-px}, & 0 < x < L \\ \psi_3(x) = A_5 e^{ikx}, & x > L \end{cases}$$

di mana $k = \sqrt{\frac{2mE}{\hbar^2}}$ dan $p = \sqrt{\frac{2m(E-V_0)}{\hbar^2}}$. semua konstanta A_2 ,

A_3 , A_4 dan A_5 diperoleh dari A_1 dengan kondisi di perbatasan (*Boundary conditions*) yaitu $\psi(x)$ dan $\frac{d\psi(x)}{dx}$ harus kontinu di $x = 0$ dan $x = L$. Keadaan kuantum dari partikel yang menemui potensial penghalang dapat diilustrasikan seperti pada Gambar 5. Banyaknya bagian sistem yang memantul kembali dapat dilihat dari koefisien reflektansinya, sedangkan yang menembus penghalang tersebut dapat dilihat dari koefisien transmisi yang masing-masing dapat dirumuskan sebagai

$$R = \frac{|A_2|^2}{|A_1|^2}$$

dan



Gambar 5. Keadaan kuantum partikel yang menemui penghalang, $A_1 e^{ikx}$ adalah bagian gelombang insiden, $A_2 e^{-ikx}$ bagian gelombang yang dipantulkan, $A_3 e^{px} + A_4 e^{-px}$ bagian gelombang evanescence di dalam penghalang, $A_5 e^{ikx}$ bagian gelombang yang ditransmisikan.

Jika kita terapkan syarat kontinyu di $x = 0$ dan $x = L$ maka koefisien reflektansi dan transmitansi dapat diperoleh dengan formula yaitu

$$R = \left(\frac{k^2 + p^2}{kp} \right)^2 \sinh^2(pL) \left[4 \cosh^2(pL) + \left(\frac{p^2 - k^2}{pk} \right)^2 \sinh^2(pL) \right]^{-1}$$

$$T = 4 \left[4 \cosh^2(pL) + \left(\frac{p^2 - k^2}{pk} \right)^2 \sinh^2(pL) \right]^{-1}$$

nilai transmitansi T berhingga yang berarti bahwa peluang terjadinya transmisi pada partikel ke daerah $x \geq L$ tidaklah nol. Untuk mempermudah notasi penulisan, kita dapat menyederhanakan perumusan di atas dengan

$$R = \frac{T}{4\varepsilon(1-\varepsilon)} \sinh^2(\lambda\sqrt{1-\varepsilon})$$

$$T = \left[1 + \frac{1}{4\varepsilon(1-\varepsilon)} \sinh^2(\lambda\sqrt{1-\varepsilon}) \right]^{-1}$$

dengan $\lambda = L \sqrt{\frac{2mV_0}{\hbar^2}}$ dan $\varepsilon = \frac{E}{V_0}$

Kasus Khusus

Jika $E \ll V_0$, maka $\varepsilon \ll 1$ atau $\lambda\sqrt{1-\varepsilon} \gg 1$ kita dapat mengaproksimasi $\sinh(\lambda\sqrt{1-\varepsilon}) \approx \frac{1}{2} \exp(\lambda\sqrt{1-\varepsilon})$. Selanjutnya kita dapat menunjukkan bahwa koefisien transmisi memiliki bentuk

$$T \approx 16\varepsilon(1-\varepsilon)e^{-2\lambda\sqrt{1-\varepsilon}}$$

$$T \approx \frac{16E}{V_o} \left(1 - \frac{E}{V_o}\right) e^{-\frac{2L}{\hbar}(\sqrt{2m(V_o-E)})}$$

bentuk tersebut menunjukkan bahwa koefisien transmisi dari partikel tersebut tidak bernilai nol, tidak seperti pandangan klasik. Dalam pandangan fisika klasik, tidak mungkin partikel melewati penghalang karena energinya lebih kecil dibandingkan potensial penghalang. Hal ini sesuai dengan aplikasinya yang sekarang dapat kita rasakan pada teknologi semikonduktor seperti pada diode dan transistor. Dalam diode, efek *tunneling* digunakan untuk menghasilkan aliran arus yang signifikan pada tegangan rendah. Pada tegangan kecil elektron bisa langsung menembus *junction* yang sangat tipis melalui proses *tunneling*, yang menyebabkan kurva karakteristik arus-tegangan non-linear (dengan daerah resistansi negatif). Pada transistor, efek tunneling digunakan untuk memungkinkan perpindahan elektron antara terminal sumber dan drain melalui penghalang potensial tipis di gerbang. TFET dirancang untuk bekerja pada tegangan rendah dengan efisiensi tinggi, yang menjadikannya kandidat yang baik untuk aplikasi di perangkat berdaya rendah (Taur *et.al*, 2009) (Kittel, 2004) (Lundstrom, 1999), Sze *et.al*, 2007).

• Referensi

- Arndt, M., & Hornberger, K. 2014. *Testing the Limits of Quantum Mechanics with Matter Waves*. In A. K. D. E. Z. (Ed.), *Quantum Theory: A Very Short Introduction* (pp. 75-100). Oxford University Press.
- Banwell, C. N., & McCash, E. M. 1994. *Fundamentals of Molecular Spectroscopy* (4th ed.). McGraw-Hill.
- Beauregard, T., Tilley, D. R., & Tilley, J. 2014. *Quantum Mechanics and the Path to Quantum Computers*. In A. A. Z. A. (Ed.), *Introduction to Quantum Mechanics* (pp. 89-113). Springer.
- Davies, J. H. 1998. *The Physics of Low-Dimensional Semiconductors: An Introduction*. Cambridge University Press.
- Dirac, P. A. M. 1981. *The Principles of Quantum Mechanics* (4th ed.).

Oxford University Press.

Griffiths, D. J. 2005. *Introduction to Quantum Mechanics* (2nd ed.). Pearson Prentice Hall.

Harrison, P. 2005. *Quantum Wells, Wires and Dots: Theoretical and Computational Physics of Semiconductor Nanostructures* (2nd ed.). Wiley.

Kent, A. 2014. *Quantum Theory and the Role of Observation*. In D. Z. Albert & A. Ney (Eds.), *The Wave Function: Essays on the Metaphysics of Quantum Mechanics* (pp. 77-96). Oxford University Press.

Kittel, C. 2004. *Introduction to Solid State Physics* (8th ed.). Wiley.

Laurent, B., & Pris, M. 2022. *Foundations of Quantum Mechanics: Philosophical and Physical Perspectives*. Cambridge University Press.

Levine, I. N. 2009. *Quantum Chemistry* (6th ed.). Pearson.

Lundstrom, M. 1999. *Fundamentals of Carrier Transport* (2nd ed.). Cambridge University Press.

Sakurai, J. J., & Napolitano, J. 2017. *Modern Quantum Mechanics* (2nd ed.). Cambridge University Press.

Sze, S. M., & Ng, K. K. 2007. *Physics of Semiconductor Devices* (3rd ed.). Wiley.

Taur, Y., & Ning, T. H. 2009. *Fundamentals of Modern VLSI Devices* (2nd ed.). Cambridge University Press.

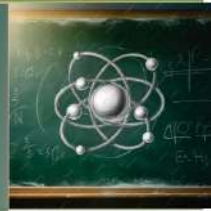
Zettili, N. 2009. *Quantum Mechanics: Concepts and Applications* (2nd ed.). Wiley.

PROFIL PENULIS



Muhammad Ahyad, S.Si., M.Si.
Trainer Olimpiade Fisika

Muhammad Ahyad, S.Si., M.Si. menyelesaikan Pendidikan Sarjana dan Magister di bidang Fisika Teori dan Komputasi dari IPB University. Selama Pendidikan Sarjana dan Magister, konsentrasi Fisika yang didalami yaitu optika nonlinear dan *quantum optics* dengan beberapa artikel yang terbit di jurnal internasional. Selain itu, selama menempuh Pendidikan Sarjana, Muhammad Ahyad aktif menjadi asisten Dosen di departemen Fisika IPB University. Pengalamannya mengikuti ajang Olimpiade Sains di bidang Fisika semenjak SMA hingga Mahasiswa, menjadikannya sebagai seorang Trainer Olimpiade Bidang Fisika di Tingkat Kabupaten/Kota, Propinsi ataupun Nasional untuk semua jenjang yaitu SD, SMP, SMA dan Mahasiswa dari tahun 2016 hingga sekarang. Selain Olimpiade Sains bidang Fisika, penulis juga aktif melatih siswa-siswi untuk mempersiapkan ujian *Cambridge Assessment* baik IGCSE, maupun A&AS Level serta siswa-siswi yang mempersiapkan untuk masuk PTN.



ATOM DAN STRUKTUR ATOM

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

Atom adalah partikel dasar dari semua materi yang ada di alam semesta. Setiap benda, dari udara yang kita hirup hingga tubuh kita sendiri, terdiri dari atom. Konsep atom pertama kali diperkenalkan oleh para filsuf Yunani kuno, seperti Demokritus, yang membayangkan bahwa segala sesuatu terbentuk dari partikel-partikel kecil yang tak dapat dibagi lagi. Namun, pemahaman ilmiah modern tentang atom baru berkembang pada abad ke-19 dan 20 melalui serangkaian penemuan oleh para ilmuwan seperti John Dalton, J.J. Thomson, Ernest Rutherford, dan Niels Bohr.

Struktur atom adalah konsep fundamental dalam fisika kuantum yang menjelaskan konfigurasi internal atom, yang merupakan penyusun dasar materi. Pemahaman tentang struktur atom membutuhkan teori mekanika kuantum karena perilaku partikel subatomik seperti elektron, proton, dan neutron tidak dapat dijelaskan dengan fisika klasik. Dalam bab ini, kita akan mengeksplorasi bagaimana mekanika kuantum menjelaskan struktur atom, termasuk peran fungsi gelombang, bilangan kuantum, dan konfigurasi elektron (Wilson, 2009).

1. Latar Belakang

Perjalanan pemahaman manusia tentang struktur atom dan perilakunya mengalami perubahan dramatis sepanjang sejarah.

Berawal dari konsep-konsep atom yang sederhana dalam fisika klasik, berkembang menjadi teori yang lebih kompleks dan mendalam dengan munculnya mekanika kuantum. Dalam bab ini, kita akan mengeksplorasi bagaimana model-model klasik akhirnya digantikan oleh model-model kuantum, yang lebih mampu menjelaskan fenomena-fenomena subatomik yang tidak dapat dijelaskan oleh fisika klasik.

4.1. Konsep Atom dalam Fisika Klasik

Pada abad ke-19, pemahaman tentang struktur atom masih sangat terbatas dan didasarkan pada model-model yang bersifat makroskopik dan deterministik. Model-model awal yang dikembangkan oleh ilmuwan seperti John Dalton, J.J. Thomson, dan Ernest Rutherford menjadi dasar pemahaman mengenai atom dalam fisika klasik.

a. Teori Atom Dalton (1803)

John Dalton adalah ilmuwan pertama yang secara sistematis mengembangkan teori atom berdasarkan gagasan bahwa materi tersusun atas partikel-partikel kecil yang tak terbagi, yang disebut atom. Dalam teori Dalton, atom adalah bola padat yang tidak dapat dihancurkan, dan atom dari unsur yang sama identik dalam segala hal, termasuk massa. Dalton juga mengusulkan bahwa reaksi kimia melibatkan penyusunan ulang atom tanpa mengubah sifat dasar atom itu sendiri (Mubarak et al., 2023; Shamey & Westland, 2020).

Meskipun teori Dalton merupakan langkah awal yang signifikan dalam memahami atom, model ini tidak mampu menjelaskan fenomena-fenomena yang lebih kompleks, seperti emisi cahaya dari atom atau perilaku partikel subatomik lainnya (Aidas et al., 2014).

b. Model "Plum Pudding" J.J. Thomson (1897)

Penemuan elektron oleh J.J. Thomson pada tahun 1897 membawa perubahan besar dalam pemahaman tentang atom.

Thomson mengusulkan model "plum pudding", di mana atom digambarkan sebagai bola bermuatan positif yang tersebar merata, dengan elektron-elektron bermuatan negatif tertanam di dalamnya seperti kismis dalam pudding (Hon & Goldstein, 2013).

Model ini menunjukkan bahwa muatan positif adalah distribusi seragam, mengimbangi muatan negatif elektron, tetapi juga gagal menjelaskan hasil eksperimen tertentu, terutama yang terkait dengan hamburan partikel alfa (Ali, 2016).

Model ini merupakan salah satu upaya awal untuk memasukkan partikel subatomik ke dalam teori atom. Namun, meskipun berhasil menjelaskan adanya elektron, model Thomson tidak dapat menjelaskan distribusi muatan dan massa secara detail (Donald & Williams, 2008).

c. Model Atom Rutherford (1911)

Ernest Rutherford melakukan eksperimen yang terkenal, yaitu percobaan hamburan partikel alfa, yang membuktikan bahwa sebagian besar massa atom terkonsentrasi di inti kecil yang bermuatan positif, sementara elektron beredar di sekitarnya. Model Rutherford mengusulkan bahwa atom sebagian besar terdiri dari ruang kosong, dengan inti padat di pusat dan elektron mengorbit di sekitarnya seperti planet yang mengelilingi matahari (Durlo, 2021).

Meskipun model Rutherford lebih akurat dalam menggambarkan distribusi muatan dalam atom, model ini masih menggunakan konsep klasik yang melibatkan orbit elektron seperti planet dalam sistem tata surya. Model ini gagal menjelaskan mengapa elektron tidak jatuh ke inti akibat gaya tarik-menarik antara elektron bermuatan negatif dan inti yang bermuatan positif (Hoffmann, 2017).

4.2. Munculnya Mekanika Kuantum

Seiring dengan berkembangnya pemahaman tentang sifat gelombang dan partikel cahaya, mulai terlihat bahwa fisika klasik tidak cukup untuk menjelaskan fenomena subatomik. Konsep mekanika kuantum mulai muncul sebagai cara baru untuk memahami atom dan perilaku partikel subatomik (Solov'ev, 2011).

a. Teori Kuantum Max Planck (1900)

Max Planck adalah pelopor teori kuantum. Pada tahun 1900, Planck mengusulkan bahwa energi radiasi dipancarkan atau diserap oleh materi dalam bentuk paket-paket diskret yang disebut kuantum. Gagasan ini muncul dari usahanya untuk menjelaskan spektrum radiasi benda hitam, yang tidak dapat dijelaskan oleh hukum-hukum fisika klasik (Tibbetts, 2013a).

Konsep kuantisasi energi ini membuka jalan bagi munculnya mekanika kuantum. Planck menunjukkan bahwa energi hanya dapat dipancarkan atau diserap dalam jumlah tertentu, bukan secara kontinu, sebagaimana yang dijelaskan dalam fisika klasik.

b. Model Atom Bohr (1913)

Niels Bohr mengembangkan model atom baru berdasarkan prinsip kuantisasi energi dari Planck. Dalam model Bohr, elektron hanya dapat mengorbit inti pada jarak tertentu, yang sesuai dengan tingkat energi yang terkuantisasi. Elektron tidak memancarkan energi ketika berada dalam orbit stasioner ini, tetapi ketika berpindah dari satu orbit ke orbit lain, mereka memancarkan atau menyerap energi dalam bentuk foton (Tibbetts, 2013b).

Model Bohr berhasil menjelaskan spektrum atom hidrogen, yang tidak dapat dijelaskan oleh model klasik Rutherford. Meskipun model ini merupakan langkah besar ke depan, model Bohr masih menggunakan konsep orbit klasik dan tidak dapat menjelaskan spektrum atom yang lebih kompleks.

c. Dualitas Gelombang-Partikel Louis de Broglie (1924)

Pada tahun 1924, Louis de Broglie mengusulkan bahwa elektron dan partikel subatomik lainnya tidak hanya memiliki sifat partikel tetapi juga sifat gelombang. Hipotesis de Broglie menghubungkan momentum partikel dengan panjang gelombang, yang dikenal sebagai panjang gelombang de Broglie. Konsep ini membantu menjelaskan mengapa elektron dalam atom hanya bisa berada pada orbit tertentu, karena hanya panjang gelombang tertentu yang sesuai dengan kondisi batas dari atom (Man'kin, 2022).

Gagasan dualitas gelombang-partikel ini memainkan peran penting dalam pengembangan mekanika kuantum. Penemuan bahwa partikel subatomik dapat berperilaku seperti gelombang membuka pintu bagi model atom yang lebih canggih.

d. Mekanika Gelombang Schrödinger (1926)

Pada tahun 1926, Erwin Schrödinger mengembangkan persamaan gelombang Schrödinger, yang menggambarkan perilaku elektron dalam atom sebagai fungsi gelombang. Model ini menggantikan konsep orbit elektron dengan orbital, yang merupakan fungsi probabilitas tempat di mana elektron mungkin ditemukan. Solusi dari persamaan ini memberikan bilangan kuantum yang mendeskripsikan energi dan distribusi elektron dalam atom (Davey, 2020).

Mekanika gelombang Schrödinger menjadi salah satu landasan mekanika kuantum modern, menjelaskan tidak hanya perilaku atom hidrogen, tetapi juga atom-atom yang lebih kompleks. Model ini juga dapat menjelaskan spektrum atom yang lebih rumit dan mengatasi keterbatasan model Bohr (Davey, 2020; Golub & Lamoreaux, 2023).

4.3. Prinsip Mekanika Kuantum: Prinsip Ketidakpastian Heisenberg (1927)

Pada tahun 1927, Werner Heisenberg mengusulkan Prinsip Ketidakpastian, yang menyatakan bahwa tidak mungkin untuk mengetahui secara pasti posisi dan momentum suatu partikel secara bersamaan. Semakin akurat posisi suatu partikel diketahui, semakin tidak pasti momentum partikel tersebut, dan sebaliknya. Prinsip ini menekankan sifat probabilistik mekanika kuantum, berbeda dengan determinisme fisika klasik (Ozawa, 2015).

Prinsip ketidakpastian Heisenberg menjelaskan mengapa elektron tidak jatuh ke dalam inti sebagaimana yang diprediksi oleh model klasik: elektron tidak memiliki posisi dan momentum yang pasti, melainkan hanya probabilitas keberadaan di sekitar inti atom (Matteucci et al., 2010).

2. Model Mekanika Kuantum Atom

Dalam mekanika kuantum, posisi dan kecepatan elektron tidak dapat ditentukan secara bersamaan dengan pasti, sesuai dengan Prinsip Ketidakpastian Heisenberg. Alih-alih orbit deterministik, elektron dijelaskan oleh fungsi gelombang (Ψ), yang memberikan probabilitas menemukan elektron di wilayah tertentu di sekitar inti atom.

a. Persamaan Gelombang Schrödinger

Persamaan Schrödinger adalah dasar dari mekanika kuantum. Untuk sebuah elektron dalam atom, persamaan ini dapat dituliskan sebagai (Teixeira-Dias, 2017) :

$$\hat{H}\Psi = E\Psi$$

Di sini, \hat{H} adalah operator Hamiltonian (yang mewakili total energi sistem), Ψ adalah fungsi gelombang elektron, dan E adalah energi yang terkait dengan fungsi gelombang tersebut. Menyelesaikan persamaan ini untuk atom hidrogen menghasilkan tingkat energi

terkuantisasi, yang sesuai dengan garis spektral diskret yang diamati secara eksperimental.

b. Konsep Orbital

Dalam mekanika kuantum, elektron tidak lagi dianggap sebagai partikel yang mengelilingi inti seperti planet mengelilingi matahari. Sebaliknya, elektron berada di wilayah ruang yang disebut orbital, di mana terdapat probabilitas tinggi untuk menemukan elektron. Orbital dijelaskan oleh solusi dari persamaan Schrödinger (Hofer, 2012).

Setiap orbital dicirikan oleh satu set bilangan kuantum:

- *Bilangan kuantum utama (n):* Menentukan tingkat energi dan ukuran orbital.
- *Bilangan kuantum azimuthal (l):* Menentukan bentuk orbital (orbital s, p, d, f).
- *Bilangan kuantum magnetik (m_l):* Menjelaskan orientasi orbital di ruang.
- *Bilangan kuantum spin (m_s):* Mewakili spin intrinsik elektron.

3. Bilangan Kuantum dan Konfigurasi Elektron

Bilangan kuantum dan konfigurasi elektron adalah konsep kunci dalam fisika atom dan kimia kuantum. Mereka memberikan gambaran rinci tentang posisi, energi, dan sifat elektron dalam atom. Memahami bilangan kuantum dan bagaimana elektron diatur dalam orbital atom sangat penting untuk menjelaskan sifat kimia elemen dan reaksi kimia.

Bilangan kuantum adalah seperangkat angka yang menjelaskan keadaan energi elektron dalam atom. Setiap elektron dalam atom diwakili oleh empat bilangan kuantum, yang membantu menggambarkan orbital tempat elektron berada, orientasi orbital tersebut, dan spin elektron. Empat bilangan kuantum di atas

mendefinisikan keadaan sebuah elektron dalam atom. Pemahaman tentang bilangan kuantum ini sangat penting untuk menggambarkan konfigurasi elektron suatu atom (Zarkadis et al., 2021).

a. Bilangan Kuantum Utama (n)

Bilangan kuantum utama, n , menentukan ukuran dan energi keseluruhan dari orbital. Semakin besar nilai n , semakin jauh kemungkinan elektron ditemukan dari inti, dan semakin tinggi energi orbital tersebut.

b. Bilangan Kuantum Azimuthal (l)

Bilangan kuantum azimuthal atau bilangan kuantum orbital, dilambangkan dengan l , menentukan bentuk orbital tempat elektron berada. Nilai l tergantung pada bilangan kuantum utama n , dengan aturan $l=0$ hingga $n-1$.

Setiap nilai l menunjukkan bentuk orbital yang berbeda:

- $l = 0$ menyatakan orbital **s** (bentuk bola),
- $l = 1$ menyatakan orbital **p** (bentuk dumbel),
- $l = 2$ menyatakan orbital **d** (bentuk lebih kompleks),
- $l = 3$ menyatakan orbital **f** (bentuk sangat kompleks).

c. Bilangan Kuantum Magnetik (m_l)

Bilangan kuantum magnetik, dilambangkan dengan m_l , menggambarkan **orientasi orbital** dalam ruang tiga dimensi. Nilai m_l dapat berkisar dari $-l$ hingga $+l$, termasuk nol. Sebagai contoh, jika $l=1$, nilai m_l bisa $-1, 0$, atau $+1$, yang menunjukkan tiga orientasi berbeda untuk orbital **p**.

Untuk setiap tipe orbital:

- Orbital **s** ($l=0$) hanya memiliki satu orientasi ($m_l = 0$),
- Orbital **p** ($l=1$) memiliki tiga orientasi ($m_l = -1, 0, +1$),
- Orbital **d** ($l=2$) memiliki lima orientasi ($m_l = -2, -1, 0, +1, +2$)

d. Bilangan Kuantum Spin (m_s)

Bilangan kuantum spin, dilambangkan dengan s atau m_s , menggambarkan **spin elektron**. Elektron memiliki dua kemungkinan arah spin:

- $m_s = +1/2$ (spin searah jarum jam),
- $m_s = -1/2$ (spin berlawanan arah jarum jam).

Spin adalah sifat intrinsik elektron dan sangat penting dalam pengaturan elektron dalam orbital. **Prinsip Larangan Pauli** menyatakan bahwa tidak ada dua elektron dalam atom yang dapat memiliki keempat bilangan kuantum yang sama. Oleh karena itu, dua elektron dalam satu orbital harus memiliki spin yang berlawanan (Weiner, 2013).

4. Konfigurasi Elektron Atom

Konfigurasi elektron adalah distribusi elektron dalam orbital-orbital atom berdasarkan tingkat energi mereka. Setiap elektron menempati tingkat energi tertentu, dan tingkat energi ini terbagi lagi menjadi subtingkat energi yang dikenal sebagai orbital. Elektron akan mengisi orbital-orbital ini berdasarkan beberapa prinsip dasar, seperti prinsip Aufbau, prinsip larangan Pauli, dan aturan Hund (Brom, 2018).

Konfigurasi elektron memberikan informasi tentang bagaimana elektron dalam atom terdistribusi dalam kulit-kulit energi dan subkulit (s, p, d, f). Setiap kulit atau tingkat energi utama diwakili oleh bilangan kuantum utama n , sedangkan subkulit diwakili oleh bilangan kuantum azimuthal l .

Ada beberapa aturan yang mengatur bagaimana elektron mengisi orbital-orbital dalam atom:

a. Prinsip Aufbau

Prinsip Aufbau menyatakan bahwa elektron akan mengisi tingkat energi terendah terlebih dahulu sebelum mengisi tingkat yang lebih

tinggi. Ini berarti elektron akan mengisi orbital $1s$ sebelum $2s$, orbital $2s$ sebelum $2p$, dan seterusnya (Hüfner, 2003).

b. Prinsip Larangan Pauli

Prinsip Larangan Pauli menyatakan bahwa tidak ada dua elektron dalam atom yang dapat memiliki keempat bilangan kuantum yang sama. Karena setiap orbital dapat menampung maksimal dua elektron, elektron yang menempati orbital yang sama harus memiliki spin yang berlawanan (Kaplan, 2013).

c. Aturan Hund

Aturan Hund menyatakan bahwa elektron akan mengisi orbital dengan energi yang setara satu per satu terlebih dahulu, sebelum berpasangan. Ini berarti, dalam satu subkulit dengan beberapa orbital yang memiliki energi yang sama (misalnya subkulit p atau d), setiap orbital akan ditempati oleh satu elektron sebelum ada yang berpasangan (Katriel & Montgomery, 2012).

5. Tingkat Energi dan Garis Spektral

Tingkat energi dan garis spektral adalah konsep mendasar dalam fisika atom dan mekanika kuantum. Kedua konsep ini membantu menjelaskan bagaimana atom dan molekul menyerap serta memancarkan cahaya, yang pada akhirnya menghasilkan spektrum karakteristik yang dapat digunakan untuk mengidentifikasi elemen dan mempelajari struktur atom.

Tingkat energi yang terkuantisasi dalam atom bertanggung jawab atas emisi dan absorpsi cahaya. Ketika elektron bertransisi antara tingkat energi, elektron akan menyerap atau memancarkan foton dengan energi yang sama dengan selisih antara kedua tingkat energi tersebut. Fenomena ini menghasilkan garis spektral, yang unik untuk setiap unsur dan dapat diamati dalam spektrum atom (Lee, 2012).

Dalam atom, elektron bergerak mengelilingi inti pada tingkat energi tertentu. Setiap tingkat energi ini memiliki nilai energi tertentu, yang merupakan hasil dari interaksi antara elektron dan inti atom. Tingkat energi ini terkuantisasi, yang berarti elektron hanya bisa berada pada tingkat energi tertentu, bukan di antara tingkat-tingkat tersebut (Kok, 2023).

Untuk atom hidrogen, energi tingkat ke- n adalah:

$$E_n = -\frac{13,6 \text{ eV}}{n^2}$$

Model mekanika kuantum dengan demikian mampu menjelaskan spektrum hidrogen, yang terdiri dari garis-garis spektral diskret seperti seri Lyman, Balmer, dan Paschen (Gnatenko et al., 2022).

6. Atom Multi-Elektron dan Efek Pelindung

Dalam fisika atom, atom multi-elektron (atom yang memiliki lebih dari satu elektron) memperkenalkan fenomena yang lebih kompleks dibandingkan dengan atom hidrogen sederhana. Interaksi antara elektron-elektron dalam atom multi-elektron menciptakan efek-efek tambahan, seperti efek pelindung dan screening, yang memengaruhi distribusi elektron dan energi tingkat energi (Zhan & Wu, 2013).

7. Aplikasi dan Relevansi dalam Fisika Modern

Model mekanika kuantum atom tidak hanya penting dalam pemahaman teoretis tentang struktur atom, tetapi juga dalam berbagai aplikasi teknologi modern. Prinsip-prinsip kuantum ini digunakan dalam pengembangan **transistor**, **laser**, **semikonduktor**, dan bahkan dalam bidang **komputasi kuantum**.

Selain itu, mekanika kuantum memainkan peran penting dalam pemahaman sifat material, termasuk konduktivitas listrik, magnetisme, dan reaksi kimia. Konsep-konsep kuantum memungkinkan kita merancang material baru dengan sifat yang

diinginkan melalui manipulasi struktur atomiknya.

• Referensi

- Aidas, K., Angeli, C., Bak, K. L., Bakken, V., Bast, R., Boman, L., Christiansen, O., Cimiraglia, R., Coriani, S., Dahle, P., Dalskov, E. K., Ekström, U., Enevoldsen, T., Eriksen, J. J., Ettenhuber, P., Fernández, B., Ferrighi, L., Fliegl, H., Frediani, L., ... Ågren, H. (2014). The <sc>D</sc> alton quantum chemistry program system. *WIREs Computational Molecular Science*, 4(3), 269–284. <https://doi.org/10.1002/wcms.1172>
- Ali, S. (2016). Potential distribution around a test charge in a positive dust-electron plasma. *Frontiers of Physics*, 11(3), 115201. <https://doi.org/10.1007/s11467-015-0545-2>
- Brom, J. M. (2018). Orbital Configuration: Terms, States, and Configuration State Functions. *Journal of Chemical Education*, 95(9), 1592–1600. <https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.8b00187>
- Davey, A. C. H. (2020). Schrodinger Wave Equation. *MacEwan University Student EJournal*, 4(1). <https://doi.org/10.31542/muse.v4i1.1317>
- Donald, W. A., & Williams, E. R. (2008). Evaluation of Different Implementations of the Thomson Liquid Drop Model: Comparison to Monovalent and Divalent Cluster Ion Experimental Data. *The Journal of Physical Chemistry A*, 112(16), 3515–3522. <https://doi.org/10.1021/jp711012b>
- Durlo, A. (2021). The Role of Models in the Discovery of the Nucleus: Ernest Rutherford and his School. *Education, Society and Human Studies*, 2(2), p21. <https://doi.org/10.22158/eshs.v2n2p21>
- Gnatenko, Kh. P., Laba, H. P., & Tkachuk, V. M. (2022). Energy levels estimation on a quantum computer by evolution of a physical quantity. *Physics Letters A*, 424, 127843.

<https://doi.org/10.1016/j.physleta.2021.127843>

- Golub, R., & Lamoreaux, S. K. (2023). Schrödinger and the development of wave mechanics. In *The Historical and Physical Foundations of Quantum Mechanics* (pp. 103–137). Oxford University Press/Oxford. <https://doi.org/10.1093/oso/9780198822189.003.0007>
- Hofer, W. A. (2012). *Quantum mechanics: A new chapter?* 216–229. <https://doi.org/10.1063/1.4773133>
- Hoffmann, S. E. (2017). Prediction of deviations from the Rutherford formula for low-energy Coulomb scattering of wavepackets. *Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics*, 50(21), 215302. <https://doi.org/10.1088/1361-6455/aa8d9f>
- Hon, G., & Goldstein, B. R. (2013). J. J. Thomson's plum-pudding atomic model: The making of a scientific myth. *Annalen Der Physik*, 525(8–9). <https://doi.org/10.1002/andp.201300732>
- Hüfner, S. (2003). *Introduction and Basic Principles* (pp. 1–60). https://doi.org/10.1007/978-3-662-09280-4_1
- Kaplan, I. G. (2013). The Pauli Exclusion Principle. Can It Be Proved? *Foundations of Physics*, 43(10), 1233–1251. <https://doi.org/10.1007/s10701-013-9742-4>
- Katriel, J., & Montgomery, H. E. (2012). Hund's rule in the two-electron quantum dot. *The European Physical Journal B*, 85(12), 394. <https://doi.org/10.1140/epjb/e2012-30589-8>
- Kok, P. (2023). *Atoms and Energy* (pp. 75–95). https://doi.org/10.1007/978-3-031-16165-0_4
- Lee, C. J. (2012). Photon absorption and emission statistics of a two-level atom in a cavity. *Journal of the Korean Physical Society*, 60(5), 766–772. <https://doi.org/10.3938/jkps.60.766>
- Man'kin, I. (2022). About the Nature of De Broglie Wave. *OALib*, 09(04), 1–4. <https://doi.org/10.4236/oalib.1108655>

- Matteucci, G., Ferrari, L., & Migliori, A. (2010). The Heisenberg uncertainty principle demonstrated with an electron diffraction experiment. *European Journal of Physics*, 31(5), 1287–1293. <https://doi.org/10.1088/0143-0807/31/5/027>
- Mubarak, N. M., Anwar, M., Debnath, S., & Sudin, I. (2023). Atomic Structure. In *Fundamentals of Biomaterials* (pp. 11–24). Springer Nature Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-19-9300-8_2
- Ozawa, M. (2015). Heisenberg's Original Derivation of the Uncertainty Principle and its Universally Valid Reformulations. *Current Science*, 109(11), 2006. <https://doi.org/10.18520/cs/v109/i11/2006-2016>
- Shamey, R., & Westland, S. (2020). Dalton, John 1766–1844. In *Pioneers of Color Science* (pp. 139–142). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-30811-1_30
- Solov'ev, E. A. (2011). Classical approach in atomic physics. *The European Physical Journal D*, 65(3), 331–351. <https://doi.org/10.1140/epjd/e2011-20261-6>
- Teixeira-Dias, J. J. C. (2017). The Schrödinger Equation. In *Molecular Physical Chemistry* (pp. 113–205). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-41093-7_3
- Tibbetts, G. G. (2013a). Max Planck, the First Superhero of Quantum Theory, Saves the Universe from the Ultraviolet Catastrophe. In *How the Great Scientists Reasoned* (pp. 89–99). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-398498-2.00007-2>
- Tibbetts, G. G. (2013b). Niels Bohr Models the Hydrogen Atom as a Quantized System with Compelling Exactness, but His Later Career Proves that Collaboration and Developing New Talent Can Become More Significant than the Groundbreaking Research of Any Individual. In *How the Great Scientists Reasoned* (pp. 125–141). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-398498-2.00009-6>

- Weiner, R. M. (2013). Spin-statistics-quantum number connection and supersymmetry. *Physical Review D*, 87(5), 055003. <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.87.055003>
- Wilson, E. B. (2009). On the definition of molecular structure in quantum mechanics. *International Journal of Quantum Chemistry*, 16(S13), 5–14. <https://doi.org/10.1002/qua.560160803>
- Zarkadis, N., Papageorgiou, G., & Markos, A. (2021). Understanding quantum numbers: students' verbal descriptions and pictorial representations of the atomic structure. *International Journal of Science Education*, 43(13), 2250–2269. <https://doi.org/10.1080/09500693.2021.1959080>
- Zhan, F., & Wu, B. (2013). Hydrogen atom as a quantum-classical hybrid system. *Journal of Physics: Conference Series*, 442, 012006. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/442/1/012006>

PROFIL PENULIS

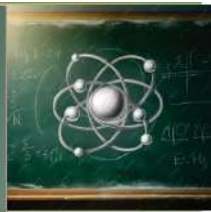


Dr. Een Taryana, S.T., M.T.

Dosen Teknik Elektro

Universitas Jenderal Achmad Yani

Een Taryana lahir di Sumedang pada tanggal 9 Juni 1971. Sejak tahun 2000 sampai sekarang bekerja sebagai dosen di Program Studi Teknik Elektro Universitas Jenderal Achmad Yani Cimahi. Adapun yang bersangkutan adalah lulusan dari SMA Negeri 1 Sumedang lulus pada tahun 1991, Pendidikan jenjang S1 Prodi Teknik Elektro dari Universitas Jenderal Achmad Yani lulus dengan gelar Sarjana Teknik pada tahun 1991, dan Jenjang S2 gelar Magister Teknik dari Pascasarjana Institut Teknologi Bandung prodi Teknik Elektro lulus tahun 2003 serta Jenjang S3 gelar Doktor dari Pascasarjana Universitas Indonesia lulus tahun 2023.

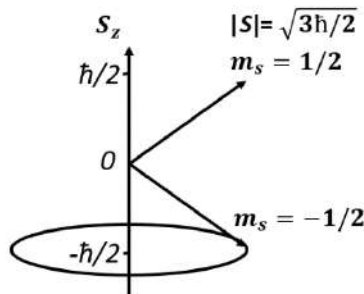


SPIN DAN STATISTIK KUANTUM

Oleh Dr. Ir. Gede Yudharma, M.Si.

5.1. Spin Elektron

Elektron Ketika bergerak memiliki momentum angular dan momen dipol magnetik yang intrinsik, pada arah komponen Z yang dinyatakan oleh bilangan kuantum m_s : bilangan kuantum ini hanya mempunyai dua harga, yaitu: $+\frac{1}{2}$ dan $-\frac{1}{2}$. Momentum angular intrinsik ini disebut spin.



Gambar 1. Spin Elektron

a. Eksperimen Stern-Gerlach

Spin ditemukan dalam eksperimen Stern-Gerlach pada tahun 1922. Dalam eksperimen ini, atom-atom perak dipanaskan dalam

oven, yang kemudian keluar melalui lubang kecil. Atom-atom tersebut bergerak ke arah x dan memasuki peralatan tempat atom-atom tersebut melewati medan magnet yang tidak homogen $\mathbf{B} = bz\mathbf{k}$. Medan ini mengarah ke arah z dan memiliki gradien terbatas $\partial B_z / \partial z = b$. Jika atom-atom membawa momen magnet \mathbf{m} , hal ini menimbulkan gaya sebesar.

$$F_z = \frac{\partial}{\partial z} (\boldsymbol{\mu} \cdot \mathbf{B}) = m_z \frac{\partial B_z}{\partial z} \quad (1)$$

Gaya ini yang membelokkan atom-atom tersebut ke arah z. Adapun $E = \boldsymbol{\mu} \cdot \mathbf{B}$ merupakan energi potensial interaksi.

Dalam percobaan tersebut diamati bahwa atom-atom tiba dilayar hanya pada dua titik. Kuantisasi momentum angular orbital \mathbf{L} selalu menghasilkan bilangan ganjil $2l + 1$ dari kemungkinan nilai F_z karena l adalah bilangan bulat. Percobaan tersebut dapat dijelaskan sepenuhnya dengan memperkenalkan momen magnetik intrinsik,

$$\hat{\mathbf{m}} = -\frac{e}{m_e} \hat{\mathbf{S}} \quad (2)$$

dimana $\hat{\mathbf{S}}$ memiliki sifat-sifat momentum angular, dengan $l = l_s = 1/2$ bukan bilangan bulat. Karena bilangan kuantum magnetik spin dibatasi pada $m_s = -l_s, -l + 1, \dots, l_s$ ini hanya membolehkan dua nilai $m_s = \pm \frac{1}{2}$, maka

$$S_z = \frac{\hbar}{2} \text{ atau } S_z = -\frac{\hbar}{2} \quad (3)$$

Dengan gaya F_z , dapat disimpulkan bahwa lokasi atom-atom yang tiba yang diamati memang sesuai dengan kedua nilai ini.

Keadaan spin elektron dijelaskan oleh vektor dua komponen disebut spinor sebagai berikut.

$$\psi = \begin{pmatrix} \psi_{\uparrow} \\ \psi_{\downarrow} \end{pmatrix} \quad (4)$$

di mana

$|\psi_{\uparrow}|^2$ =kemungkinan bahwa $S_z = \hbar/2$ ('spin up')

$|\psi_{\downarrow}|^2$ = kemungkinan bahwa $S_z = -\hbar/2$ ('spin down')

Sehingga dapat dinyatakan bahwa, $\psi = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}$ menggambarkan elektron dengan spin ke atas dan $\psi = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}$ menggambarkan elektron dengan spin ke bawah.

b. Operator spin

Operator spin $\hat{S} = \hat{S}_x \mathbf{i} + \hat{S}_y \mathbf{j} + \hat{S}_z \mathbf{k}$ terdiri dari tiga matriks spin

$$\hat{S}_x = \frac{\hbar}{2} \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}$$

$$\hat{S}_y = \frac{\hbar}{2} \begin{pmatrix} 0 & -i \\ i & 0 \end{pmatrix}$$

$$\hat{S}_z = \frac{\hbar}{2} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix} \quad (5)$$

Ketiga matriks tersebut yaitu,

$$\sigma_x = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}, \quad \sigma_y = \begin{pmatrix} 0 & -i \\ i & 0 \end{pmatrix}, \quad \sigma_z = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix} \quad (6)$$

disebut matriks Pauli. Sedangkan perkalian matriks menghasilkan

$$\hat{S}^2 = \hat{S}_x^2 + \hat{S}_y^2 + \hat{S}_z^2 = \frac{3}{4} \hbar^2 \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (7)$$

Hubungan komutasi juga mengikuti perkalian matriks,

$$[\hat{S}_x, \hat{S}_y] = i\hbar\hat{S}_z, \quad [\hat{S}_y, \hat{S}_z] = i\hbar\hat{S}_x, \quad [\hat{S}_z, \hat{S}_x] = i\hbar\hat{S}_y \quad (8)$$

$$[\hat{S}_x, \hat{S}^2] = 0, \quad [\hat{S}_y, \hat{S}^2] = 0, \quad [\hat{S}_z, \hat{S}^2] = 0 \quad (9)$$

Ini identik dengan hubungan komutasi momentum angular.

c. Nilai eigen dan vektor eigen dari \hat{S}^2 dan \hat{S}_z

Dari persamaan nilai eigen berikut semua vektor adalah vektor eigen \hat{S}^2 . Nilai eigen $\frac{3}{4}\hbar^2$ sesuai dengan momentum angular dengan $l = l_s = 1/2$, Karena

$$\hat{S}^2 \begin{pmatrix} \psi_{\uparrow} \\ \psi_{\downarrow} \end{pmatrix} = \frac{3}{4}\hbar^2 \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \psi_{\uparrow} \\ \psi_{\downarrow} \end{pmatrix} = \frac{3}{4}\hbar^2 \begin{pmatrix} \psi_{\uparrow} \\ \psi_{\downarrow} \end{pmatrix} \quad (10)$$

$$\hat{S}_x \begin{pmatrix} \psi_{\uparrow} \\ \psi_{\downarrow} \end{pmatrix} = \frac{\hbar}{2} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \psi_{\uparrow} \\ \psi_{\downarrow} \end{pmatrix} = \frac{\hbar}{2} \begin{pmatrix} \psi_{\uparrow} \\ \psi_{\downarrow} \end{pmatrix} \quad (11)$$

Vektor eigen ternormalisasi dari \hat{S}_z adalah $\psi = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}$ dengan nilai eigen $\hbar/2$ dan $\psi = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}$ dengan nilai eigen $-\hbar/2$. Ini sesuai dengan hasil perhitungan momentum angular dengan $l = l_s = 1/2$. Sedangkan Nilai eigen dan vektor eigen dari \hat{S}_x Dan \hat{S}_y diperoleh dari persamaan berikut

$$\hat{S}_x \begin{pmatrix} \psi_{\uparrow} \\ \psi_{\downarrow} \end{pmatrix} = \frac{\hbar}{2} \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \psi_{\uparrow} \\ \psi_{\downarrow} \end{pmatrix} = \frac{\hbar}{2} \begin{pmatrix} \psi_{\downarrow} \\ \psi_{\uparrow} \end{pmatrix} \quad (12)$$

Oleh karena itu, normalisasi vektor eigen dari \hat{S}_x adalah $\psi = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix}$ dengan nilai eigen $\hbar/2$ dan $\psi = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ -1 \end{pmatrix}$ dengan nilai eigen $-\hbar/2$.

$$\hat{S}_y \begin{pmatrix} \psi_{\uparrow} \\ \psi_{\downarrow} \end{pmatrix} = \frac{\hbar}{2} \begin{pmatrix} 0 & -i \\ i & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \psi_{\uparrow} \\ \psi_{\downarrow} \end{pmatrix} = \frac{\hbar}{2} \begin{pmatrix} -i\psi_{\uparrow} \\ i\psi_{\downarrow} \end{pmatrix} \quad (13)$$

Oleh karena itu, vektor eigen ternormalisasi dari \hat{S}_x adalah $\psi = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ i \end{pmatrix}$ dengan nilai eigen $\hbar/2$ dan $\psi = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ -i \end{pmatrix}$ dengan nilai eigen $-\hbar/2$.

d. Spin dalam notasi Dirac

Untuk menjelaskan spin dalam notasi Dirac, perhatikan keadaan yang dinormalisasi dan saling ortogonal $|\uparrow\rangle$ untuk “spin up” dan $|\downarrow\rangle$ untuk “spin down”, dengan

$$\hat{S}_z |\uparrow\rangle = \frac{\hbar}{2} |\uparrow\rangle, \quad \hat{S}_z |\downarrow\rangle = -\frac{\hbar}{2} |\downarrow\rangle \quad (14)$$

Total putaran diberikan sebagai

$$\hat{S}^2 = \hat{S}_x^2 + \hat{S}_y^2 + \hat{S}_z^2 = \frac{3}{4} \hbar^2 (|\uparrow\rangle\langle\uparrow| + |\downarrow\rangle\langle\downarrow|), \quad (15)$$

Keadaan eigen dari \hat{S}_x adalah $|\pm x\rangle = \sqrt{1/2}(|\uparrow\rangle \pm |\downarrow\rangle)$, sedangkan nilai eigen \hat{S}_y adalah $|\pm y\rangle = \sqrt{1/2}(|\uparrow\rangle \pm i|\downarrow\rangle)$,

Semua nilai untuk ekspektasi dan probabilitas yang diberikan diatas kini dapat dilihat sebagai perwujudan khusus dari aturan umum untuk mekanika kuantum, yang dievaluasi dalam basis $|\uparrow\rangle, |\downarrow\rangle$.

Dalam analogi momentum angular orbital, juga dapat memakai operator tangga sebagai berikut.

$$\begin{aligned} \hat{S}_+ &= \hat{S}_x + i\hat{S}_y = |\uparrow\rangle, |\downarrow\rangle \\ \hat{S}_- &= \hat{S}_x - i\hat{S}_y = |\downarrow\rangle, |\uparrow\rangle \end{aligned} \quad (16)$$

5.2. Statistik Kuantum

Misalkan kita memiliki gas dengan N partikel dalam volume V . Ketika kita mengatakan "gas", yang kita maksud adalah partikel-partikel tersebut tidak berinteraksi satu sama lain. Misalkan kita mengetahui keadaan partikel tunggal dalam gas ini. Kita ingin mengetahui apa saja keadaan yang mungkin dari sistem secara keseluruhan. Q_i merupakan koordinat gabungan (posisi dan spin) partikel ke- i sedangkan s_i keadaan kuantum partikel ke- i . Keadaan seluruh gas dinyatakan sebagai (s_1, s_2, s_3, \dots) . Fungsi gelombang pada keadaan ini adalah $\psi = \psi_{[s_1, s_2, s_3, \dots]}(Q_1, Q_2, Q_3, \dots, Q_N)$.

a. Statistik Maxwell Boltzmann (Klasik)

Dalam statistik Maxwell-Boltzmann (klasik), partikel dapat dibedakan (*distinguishable*). Berapapun jumlah partikel dapat menempati keadaan Tunggal s yang sama. Tidak ada simetri yang dibutuhkan ketika dua partikel ditukar.

b. Deskripsi Mekanika Kuantum

Dalam mekanika kuantum dibutuhkan simetri ketika terjadi pertukaran partikel. Partikel secara intrinsik tidak dapat dibedakan (*indistinguishable*), artinya setiap pertukaran partikel tidak menghasilkan keadaan baru serta dapat terjadi pembatasan untuk menempati keadaan tertentu. Karena keadaan simetri ini, keadaan kuantum erat hubungannya dengan spin partikel. Partikel dengan spin bulat (*integral spin*) untuk statistic Bose-Einstein, di mana setiap partikel memiliki momentum angular spin total (diukur dalam unit \hbar) bilangan bulat : 0,1,2,3,4,...

Dalam statistik Fermi-Dirac setiap partikel memiliki momentum angular spin total (diukur dalam unit \hbar) kelipatan $1/2$ yakni $1/2, 3/2, \dots$ Partikel juga bersifat antisimetri dan *indistinguishable*, maka dua atau

lebih partikel tidak mungkin pada keadaan yang sama. Ini sesuai dengan prinsip eksklusi Pauli. Bila kita bandingkan situasi tersebut dengan sebuah contoh. Misalkan ada 2 partikel dan 3 kemungkinan keadaan partikel tunggal dengan energi $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$. Energi-energi ini tidak harus berbeda, tetapi keadaan partikel tunggal harus dibedakan oleh beberapa bilangan kuantum, seperti spin atau posisi yang berbeda atau eksitasi vibrasi sepanjang sumbu yang berbeda.

Untuk statistik Maxwell-Boltzmann, partikel-partikel tersebut diperlakukan sebagai dapat dibedakan untuk menghitung keadaan. Dengan menunjukkan dua partikel A dan B, keadaan yang mungkin seperti tabel 1 dan fungsi partisi Z dalam kasus ini adalah,

$$Z_{MB} = \frac{1}{2!} [e^{-2\varepsilon_1} + e^{-2\varepsilon_2} + e^{-2\varepsilon_3} + e^{-2\varepsilon_4} + e^{-2\varepsilon_5} + e^{-2\varepsilon_6}] \tag{17}$$

Perhatikan bahwa kita memperlakukan kedua partikel sebagai berbeda saat menyusun fungsi partisi, lalu membaginya dengan $N!$.

Tabel 1. kemungkinan keadaan partikel Tunggal

Maxwell-Boltzmann (BM)			Bose-Einstein (BE)			Fermi-Dirac (FD)		
ε_1	ε_2	ε_3	ε_1	ε_2	ε_3	ε_1	ε_2	ε_3
AB			AA			A	A	
A	B		A	A		A		A
A		B	A		A		A	A
B	A			AA				
	AB			A	A			
	A	B			AA			
B		A						

	B	A		
		AB		

Untuk statistik Bose-Einstein, kemungkinan keadaan dan fungsi partisinya adalah

$$Z_{BE} = e^{-2\varepsilon_1} + e^{-2\varepsilon_2} + e^{-2\varepsilon_3} + e^{-\varepsilon_1-\varepsilon_2} + e^{-\varepsilon_1-\varepsilon_3} + e^{-\varepsilon_2-\varepsilon_3} \quad (18)$$

Perhatikan bahwa kita memperlakukan partikel-partikel tersebut sebagai identik, jadi AA = BA = AB adalah satu keadaan. Tidak diperlukan $N!$.

Untuk statistik Fermi-Dirac, keadaan yang mungkin dan fungsi partisi adalah

$$Z_{FD} = e^{-\varepsilon_1-\varepsilon_2} + e^{-\varepsilon_1-\varepsilon_3} + e^{-\varepsilon_2-\varepsilon_3} \quad (19)$$

Perhatikan bahwa ada 9 keadaan dari dua partikel untuk kasus Maxwell-Boltzmann, 6 untuk kasus boson dan hanya 3 untuk kasus fermion. 3 keadaan dalam kasus fermion adalah keadaan di mana setiap partikel memiliki energi yang berbeda. Jika ada m tingkat energi yang mungkin, maka akan ada

$$n_{fermi} = \binom{m}{2} = \frac{1}{2}m^2 - \frac{1}{2}m \quad (20)$$

kemungkinan keadaan fermion. Jumlah keadaan dua partikel boson akan mencakup semua kemungkinan keadaan fermion ditambah m keadaan di mana kedua partikel memiliki energi yang sama, jadi

$$n_{bose} = n_{fermi} + m = \frac{1}{2}m^2 + \frac{1}{2}m \quad (21)$$

Jumlah keadaan dua partikel klasik adalah $n_{class} = m^2$. Untuk membandingkan dengan kasus fermion atau boson, perhatikan bahwa dalam batas $k_B T \gg \varepsilon_i$, $k_B T$ adalah konstanta Boltzmann untuk semua energi, semua faktor Boltzmann menuju ke 1 sehingga fungsi partisi Z hanya menghitung jumlah keadaan. Jadi jumlah keadaan efektif dalam statistik Maxwell-Boltzmann adalah

$$n_{MB} = Z_{MB}(k_B T \gg \varepsilon_j) = \frac{1}{2!} n_{class} = \frac{1}{2} m^2 \quad (22)$$

Dengan demikian, kita melihat bahwa untuk 2 partikel ketika jumlah energi yang dapat diterima secara termal cukup besar, maka jumlah keadaan dua partikel adalah sama dalam ketiga kasus.

Bila didefinisikan:

$$\xi = \frac{\text{probabilitas menemukan partikel dalam keadaan sama}}{\text{probabilitas menemukan partikel dalam keadaan berbeda}}$$

Maka:

$$\xi_{MB} = \frac{3}{6} = \frac{1}{2}; \quad \xi_{BE} = \frac{3}{3} = 1; \quad \xi_{FD} = \frac{0}{3} = 0$$

Dari sini dapat diartikan bahwa partikel BE memiliki kemungkinan lebih besar berada pada keadaan yang sama bila dibandingkan dengan partikel klasik. Sedangkan partikel FD memiliki kecenderungan yang berbeda satu sama lain.

5.3. Fungsi Distribusi

Dengan mempertimbangkan gas dengan N partikel identik dalam volume V dalam kesetimbangan pada suhu T , formulasi problem statistik menggunakan notasi berikut:

1. Beri label kemungkinan keadaan kuantum dari satu partikel dengan r atau s .
2. Nyatakan energi partikel dalam keadaan r dengan ε_r .
3. Nyatakan jumlah partikel dalam keadaan r dengan n_r .
4. Beri label semua kemungkinan keadaan kuantum dengan R .

Karena partikel-partikel dalam gas tidak berinteraksi atau berinteraksi secara lemah, kita dapat menggambarkan keadaan R dari sistem memiliki n_1 partikel dalam keadaan $r = 1$, n_2 partikel dalam keadaan $r = 2$, dst. Energi total dari keadaan tersebut adalah

$$E_R = n_1\varepsilon_1 + n_2\varepsilon_2 + n_3\varepsilon_3 \dots = \sum_r n_r\varepsilon_r \quad (23)$$

Karena jumlah total partikel diketahui adalah N , maka

$$\sum_r n_r = N \quad (24)$$

Untuk mengetahui sifat-sifat makroskopis (seperti entropi), fungsi partisi dapat ditentukan dari persamaan berikut:

$$Z = \sum_R e^{-\beta E_R} = \sum_R e^{-\beta(n_1\varepsilon_1 + n_2\varepsilon_2 + \dots)} \quad (25)$$

Ini merupakan jumlah dari semua kemungkinan keadaan R dari seluruh gas, untuk semua kemungkinan nilai angka n_1, n_2, n_3, \dots

Sekarang kita dapat mencari jumlah rata-rata \bar{n}_s partikel dalam keadaan s . Dari persamaan berikut ini

$$P_R = \frac{e^{-\beta(n_1\varepsilon_1 + n_2\varepsilon_2 + \dots)}}{Z} \quad (26)$$

adalah kemungkinan menemukan gas dalam keadaan tertentu di mana terdapat n_1 partikel dalam keadaan 1, n_2 partikel dalam

keadaan 2, dan seterusnya. Jumlah rata-rata partikel dalam keadaan s dapat ditulis:

$$\bar{n}_s = \sum_R n_s P_R = \frac{\sum_R n_s e^{-\beta(n_1 \varepsilon_1 + n_2 \varepsilon_2 + \dots)}}{Z} \quad (27)$$

Kemudian jumlah rata-rata partikel ini dapat ditulis kembali sebagai

$$\bar{n}_s = \frac{1}{Z} \sum_R \left(-\frac{1}{\beta} \frac{\partial}{\partial \varepsilon_s} \right) e^{-\beta(n_1 \varepsilon_1 + n_2 \varepsilon_2 + \dots)} = \frac{1}{\beta Z} \frac{\partial Z}{\partial \varepsilon_s} \quad (28)$$

Atau

$$\bar{n}_s = \frac{1}{\beta Z} \frac{\partial \ln Z}{\partial \varepsilon_s} \quad (29)$$

Jadi untuk menghitung jumlah rata-rata partikel dalam keadaan partikel tunggal s tertentu, kita hanya perlu menghitung fungsi partisi Z dan mengambil turunan yang sesuai.

5.4. Statistik Maxwell–Boltzmann

Dengan mempertimbangkan kasus klasik statistik Maxwell–Boltzmann, partikel-partikelnya dapat dibedakan sehingga setiap partikel memiliki kumpulan tingkat energi partikel tunggal yang sama. Sebagai hasilnya, kita dapat menulis fungsi partisi sebagai

$$Z = \zeta^N \quad (30)$$

di mana fungsi partisi partikel tunggal adalah

$$\zeta = \sum_R e^{-\beta \varepsilon_r} \quad (31)$$

Kemudian didapat nilai

$$\ln Z = N \ln \zeta = N \ln \left(\sum_r e^{-\beta \varepsilon_r} \right) \quad (32)$$

Sekarang kita dapat menghitung jumlah partikel rata-rata

$$\bar{n}_s = \frac{1}{\beta Z} \frac{\partial Z}{\partial \varepsilon_s} = -\frac{1}{\beta} N \frac{-\beta e^{-\beta \varepsilon_s}}{\sum_r e^{-\beta \varepsilon_r}} \quad (33)$$

atau

$$\bar{n}_s = N \frac{e^{-\beta \varepsilon_s}}{\sum_r e^{-\beta \varepsilon_r}} \quad (34)$$

Ini disebut sebagai distribusi Maxwell–Boltzmann. Kemudian turunan alternatif fungsi partisi Maxwell–Boltzmann dapat ditulis sebagai fungsi partisi gas sebagai berikut.

$$Z = \sum_R e^{-\beta(n_1 \varepsilon_1 + n_2 \varepsilon_2 + \dots)} \quad (35)$$

Di sini kita menjumlahkan semua kemungkinan keadaan R gas, yaitu, atas semua nilai $n_r = 0, 1, 2, 3, \dots$ untuk semua r , sehingga

$$\sum_r n_r = N \quad (36)$$

Karena ini adalah sistem klasik, partikel harus dianggap dapat dibedakan. Jadi, setiap permutasi dua partikel dalam keadaan yang berbeda harus dihitung sebagai keadaan yang berbeda dari seluruh gas meskipun angka n_1, n_2, n_3, \dots tidak diubah.

Tidak cukup untuk menentukan berapa banyak partikel dalam setiap keadaan partikel tunggal, tetapi perlu juga untuk menentukan partikel tertentu mana yang berada dalam keadaan mana. Untuk himpunan nilai n_1, n_2, n_3, \dots , ada $\frac{N!}{n_1! n_2! \dots}$ kemungkinan cara agar partikel dapat dimasukkan ke dalam keadaan partikel tunggal, di mana n_1 partikel dalam keadaan 1, n_2 partikel dalam keadaan 2, dst. Ini adalah jumlah keadaan di mana partikel dapat dibedakan. Oleh karena itu

$$\begin{aligned}
Z &= \sum_{n_1, n_2, \dots} \frac{N!}{n_1! n_2! \dots} e^{-\beta(n_1 \varepsilon_1 + n_2 \varepsilon_2 + \dots)} \\
&= \sum_{n_1, n_2, \dots} \frac{N!}{n_1! n_2! \dots} (e^{-\beta \varepsilon_1})^{n_1} (e^{-\beta \varepsilon_2})^{n_2} \dots \quad (37)
\end{aligned}$$

Karena persamaan ini merupakan perluasan multinomial, jadi kita dapat menulis

$$Z = (e^{-\beta \varepsilon_1} + e^{-\beta \varepsilon_2} + \dots)^N \quad (38)$$

Atau

$$\ln Z = N \ln \left(\sum_r e^{-\beta \varepsilon_r} \right) \quad (39)$$

di mana $\sum_r e^{-\beta \varepsilon_r}$ merupakan fungsi partisi untuk satu partikel.

5.5. Bose–Einstein dan Statistik Foton

Pada statistik Bose-Einstein partikel-partikel tersebut dianggap tidak dapat dibedakan, sehingga keadaan gas dapat ditentukan hanya dengan mencantumkan jumlah partikel dalam setiap keadaan partikel tunggal (n_1, n_2, n_3, \dots) . Karena tidak ada batasan jumlah partikel yang dapat menempati suatu keadaan, n_s dapat sama dengan $(0, 1, 2, 3, \dots)$ untuk setiap keadaan s . Untuk foton, jumlah total partikel tidak tetap karena foton dapat dengan mudah dipancarkan atau diserap oleh dinding ruangan.

Untuk kasus statistik foton, dengan mengetahui nilai n_s . Fungsi partisi diberikan oleh

$$Z = \sum_R e^{-\beta(n_1 \varepsilon_1 + n_2 \varepsilon_2 + \dots)} \quad (40)$$

di mana penjumlahan dilakukan untuk semua nilai $n_r = 0, 1, 2, 3, \dots$ pada setiap r , tanpa batasan lebih lanjut. Kemudian nilai Z didapat sebagai berikut.

$$Z = \sum_{n_1, n_2, \dots} e^{-\beta n_1 \varepsilon_1} e^{-\beta n_2 \varepsilon_2} e^{-\beta n_3 \varepsilon_3} \quad (41)$$

atau

$$Z = \left(\sum_{n_1=0}^{\infty} e^{-\beta n_1 \varepsilon_1} \right) \left(\sum_{n_2=0}^{\infty} e^{-\beta n_2 \varepsilon_2} \right) \left(\sum_{n_3=0}^{\infty} e^{-\beta n_3 \varepsilon_3} \right) \dots \quad (42)$$

Tetapi setiap penjumlahan merupakan deret geometri yang suku pertamanya adalah 1 dan rasio antara suku-suku yang berurutan adalah $\exp(-\beta \varepsilon_r)$. Dengan demikian, persamaan ini dapat disederhanakan menjadi:

$$\sum_{n_s=0}^{\infty} e^{-\beta n_s \varepsilon_s} = 1 + e^{-\beta \varepsilon_s} + e^{-2\beta \varepsilon_s} + \dots = \frac{1}{1 - e^{-\beta \varepsilon_s}} \quad (43)$$

Oleh karena itu, persamaan fungsi partisi menjadi

$$Z = \left(\frac{1}{1 - e^{-\beta \varepsilon_1}} \right) \left(\frac{1}{1 - e^{-\beta \varepsilon_2}} \right) \left(\frac{1}{1 - e^{-\beta \varepsilon_3}} \right) \dots \quad (44)$$

atau

$$\ln Z = - \sum_s \ln (1 - e^{-\beta \varepsilon_s}) \quad (45)$$

Jadi, jika kita masukkan persamaan ini ke persamaan (29), kita peroleh

$$\bar{n}_s = \frac{1}{\beta Z} \frac{\partial \ln Z}{\partial \varepsilon_s} = \frac{1}{\beta} \frac{\partial}{\partial \varepsilon_s} \ln (1 - e^{-\beta \varepsilon_s}) = \frac{e^{-\beta \varepsilon_s}}{1 - e^{-\beta \varepsilon_s}} \quad (46)$$

atau

$$\bar{n}_s = \frac{1}{e^{\beta \varepsilon_s} - 1} \quad (47)$$

Ini disebut distribusi Planck. Ini biasanya dibahas saat membahas radiasi benda hitam.

Foton adalah boson, tetapi jumlah total nya tidak kekal karena dapat diserap dan dipancarkan. Namun, jenis boson lainnya memiliki jumlah total yang kekal. Salah satu contohnya adalah atom ${}^4\text{He}$. Atom ${}^4\text{He}$ adalah boson karena jika ditambahkan spin proton, neutron, dan 2 elektron, akan selalu memperoleh bilangan bulat. Jika jumlah boson kekal, maka n_s harus memenuhi syarat

$$\sum_s \bar{n}_s = N \quad (48)$$

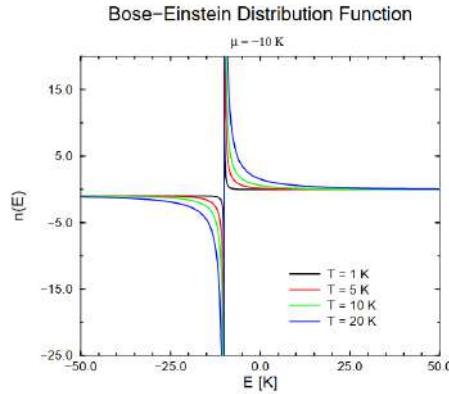
di mana N adalah jumlah total boson dalam sistem. Untuk memenuhi syarat ini, distribusi Planck sedikit dimodifikasi. Hasilnya dikenal sebagai distribusi Bose–Einstein

$$\bar{n}_s = \frac{1}{e^{\beta(\varepsilon_s - \mu)} - 1} \quad (49)$$

di mana μ adalah potensial kimia. μ disesuaikan sehingga persamaan (48) terpenuhi. Secara fisik μ adalah perubahan energi sistem ketika satu partikel ditambahkan. Persamaan (49) disebut fungsi distribusi Bose–Einstein atau disingkat fungsi distribusi Bose. Sering sekali dituliskan sebagai fungsi energi:

$$n(\varepsilon) = \frac{1}{e^{\beta(\varepsilon - \mu)} - 1} \quad (50)$$

$n(\varepsilon)$ juga disebut distribusi Bose-Einstein.



Gambar 2. Fungsi distribusi Bose-Einstein.

Perhatikan bahwa jika $\varepsilon < \mu$, maka $n(\varepsilon) < 0$ sehingga tidak logis. Distribusi Bose harus untuk $\varepsilon > \mu$. Kita dapat secara eksplisit menurunkan (49). Untuk memenuhi syarat (48), kita mengalikan fungsi partisi dengan faktor *fudge* $\exp(-\alpha N)$. α kemudian disesuaikan untuk memenuhi persamaan (48). α adalah contoh dari apa yang disebut pengali Lagrange.

$$\begin{aligned}
 \mathcal{Z} &= \sum_R e^{-\beta(n_1\varepsilon_1+n_2\varepsilon_2+\dots)} e^{-\alpha N} \\
 &= \sum_R e^{-\beta(n_1\varepsilon_1+n_2\varepsilon_2+\dots)} e^{-\alpha(n_1+n_2+\dots)} \\
 &= \sum_{n_1, n_2, \dots} e^{-(\alpha+\beta\varepsilon_1)n_1-(\alpha+\beta\varepsilon_2)n_2-\dots} \\
 &= \left(\sum_{n_1=0}^{\infty} e^{-(\alpha+\beta\varepsilon_1)n_1} \right) \left(\sum_{n_2=0}^{\infty} e^{-(\alpha+\beta\varepsilon_2)n_2} \right) \dots \quad (51)
 \end{aligned}$$

Penggunaan simbol \mathcal{Z} sebagai ganti Z karena kita memiliki faktor tambahan $\exp(-\alpha N)$. \mathcal{Z} adalah fungsi grand partisi yang biasa ditemui ketika membahas ensemble grand kanonik. Ini merupakan produk dari deret geometri sederhana. Oleh karena itu

$$\mathcal{Z} = \left(\frac{1}{1-e^{-(\alpha+\beta\varepsilon_1)}} \right) \left(\frac{1}{1-e^{-(\alpha+\beta\varepsilon_2)}} \right) \dots \quad (52)$$

Atau

$$\ln \mathcal{Z} = - \sum_r \ln (1 - e^{-(\alpha+\beta\varepsilon_r)}) \quad (53)$$

Ketika membahas ensembel grand kanonik dan fungsi grand partisi perlu menetapkan $\alpha = \beta\mu$, di mana μ adalah potensial kimia. Pada dasarnya dibuat asumsi bahwa sistem boson yang berinteraksi lemah ketika kontak dengan energi dan jumlah partikel reservoir, dengan suhu T dan potensial kimia μ ditetapkan oleh reservoir. Jadi dari persamaan (50) dapat dipakai untuk memperoleh fungsi grand partisi.

Dengan menghitung nilai rata-rata N ,

$$\begin{aligned} \bar{N} &= \frac{1}{\mathcal{Z}} \sum_R N e^{-\beta(n_1\varepsilon_1+n_1\varepsilon_1+\dots)} e^{\beta\mu N} \\ &= \frac{1}{\beta} \frac{1}{\mathcal{Z}} \frac{\partial}{\partial \mu} \sum_R N e^{-\beta(n_1\varepsilon_1+n_1\varepsilon_1+\dots)} e^{\beta\mu N} \\ &= \frac{1}{\beta} \frac{1}{\mathcal{Z}} \frac{\partial \mathcal{Z}}{\partial \mu} \\ &= \frac{1}{\beta} \frac{\partial \ln \mathcal{Z}}{\partial \mu} \\ &= \frac{1}{\beta} \frac{\partial}{\partial \mu} \left[- \sum_r \ln (1 - e^{-\beta(\varepsilon_r-\mu)}) \right] \\ &= \frac{1}{\beta} \sum_r \frac{\beta e^{-\beta(\varepsilon_r-\mu)}}{1 - e^{-\beta(\varepsilon_r-\mu)}} \end{aligned}$$

$$= \sum_r \frac{1}{e^{\beta(\varepsilon_r - \mu)} - 1} \quad (54)$$

μ ditetapkan dengan menetapkan $\bar{N} = N$ di mana N adalah jumlah total boson dalam sistem. Akhirnya kita dapat menghitung jumlah rata-rata boson dalam keadaan s :

$$\begin{aligned} \bar{n}_s &= \frac{1}{\mathcal{Z}} \sum_{states} n_s e^{-\beta(n_1 \varepsilon_1 + n_2 \varepsilon_2 + \dots)} e^{\beta \mu (n_1 + n_2 + \dots)} \\ &= \frac{1}{\mathcal{Z}} \left(-\frac{1}{\beta} \frac{\partial}{\partial \varepsilon_s} \right) \sum_{states} e^{-\beta(n_1 \varepsilon_1 + n_2 \varepsilon_2 + \dots)} e^{\beta \mu (n_1 + n_2 + \dots)} \\ &= -\frac{1}{\beta} \frac{\partial \ln \mathcal{Z}}{\partial \varepsilon_s} \\ &= -\frac{1}{\beta} \frac{\partial}{\partial \mu} \left[-\sum_r \ln (1 - e^{-\beta(\varepsilon_r - \mu)}) \right] \\ &= -\frac{1}{\beta} \frac{(-\beta) e^{-\beta(\varepsilon_s - \mu)}}{1 - e^{-\beta(\varepsilon_s - \mu)}} \end{aligned} \quad (55)$$

atau

$$\bar{n}_s = \frac{1}{e^{\beta(\varepsilon_s - \mu)} - 1} \quad (56)$$

Perhatikan bahwa dengan menetapkan $\mu = 0$, dapat memperoleh kembali hasil untuk foton. Perhatikan juga bahwa

$$\bar{N} = \sum_s \bar{n}_s \quad (57)$$

5.6. Statistik Fermi–Dirac

Fermion memiliki statistik spin setengah bilangan bulat dan paling banyak satu fermion dapat menempati setiap keadaan partikel tunggal. Ini berarti bahwa $n_s = 0$ atau 1 . Kita dapat dengan mudah memperoleh gambaran tentang apa itu \bar{n}_s dengan mempertimbangkan kasus yang sangat sederhana dari suatu sistem

dengan hanya satu keadaan partikel tunggal. Dalam kasus ini nilai \bar{n}_S hanya memiliki 2 suku.

$$\bar{n}_S = \frac{\sum n_s n_s e^{-\beta n_s \varepsilon_s}}{\sum n_s e^{-\beta n_s \varepsilon_s}} \quad (58)$$

Penyebutnya adalah

$$\sum_{n_s=0,1} e^{-\beta n_s \varepsilon_s} = 1 + e^{-\beta \varepsilon_s} \quad (59)$$

Pembilangnya adalah

$$\sum_{n_s=0,1} n_s e^{-\beta n_s \varepsilon_s} = 0 + e^{-\beta \varepsilon_s} \quad (60)$$

Jadi persamaan \bar{n}_S menjadi

$$\bar{n}_S = \frac{e^{-\beta \varepsilon_s}}{1 + e^{-\beta \varepsilon_s}} \quad (61)$$

Atau

$$\bar{n}_S = \frac{1}{e^{\beta \varepsilon_s} + 1} \quad (62)$$

Untuk sistem nyata, akan memiliki banyak keadaan partikel tunggal dan banyak partikel. Ekspresi untuk n_s dalam kasus ini harus memenuhi syarat bahwa jumlah partikel adalah konstan:

$$\sum_s \bar{n}_S = N \quad (63)$$

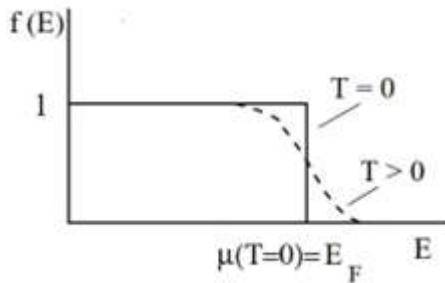
Rumus yang benar yang memenuhi syarat ini (49) adalah

$$\bar{n}_S = \frac{1}{e^{\beta(\varepsilon_s - \mu)} + 1} \quad (64)$$

Penulisan ini dapat juga sebagai sebagai fungsi energi:

$$f(\varepsilon) = \frac{1}{e^{\beta(\varepsilon - \mu)} + 1} \quad (65)$$

$f(\epsilon)$ disebut fungsi distribusi Fermi. μ disesuaikan untuk memenuhi kendala (63). Seperti dalam kasus Bose–Einstein, μ disebut potensial kimia. Ini pada dasarnya sama dengan energi Fermi. Perhatikan bahwa $f(\epsilon = \mu) = 1/2$. Hal ini selalu berlaku untuk distribusi Fermi.



Gambar 3. Fungsi Distribusi Fermi

Secara formal untuk memperoleh distribusi Fermi dapat diperoleh dengan cara yang sama seperti memperoleh distribusi Bose. Dengan mempertimbangkan sistem fermion yang berinteraksi lemah ketika kontak dengan energi dan jumlah partikel reservoir. Fungsi grand partisi diberikan oleh

$$\begin{aligned}
 \mathcal{Z} &= \sum_{states} e^{-\beta(E-\mu N)} \\
 &= \sum_{n_1, n_2, n_3, \dots} e^{-\beta(n_1 \epsilon_1 + n_2 \epsilon_2 + \dots)} e^{\beta \mu (n_1 + n_2 + \dots)} \\
 &= \sum_{n_1, n_2, n_3, \dots} e^{-\beta(\epsilon_1 - \mu) n_1} e^{-\beta(\epsilon_2 - \mu) n_2} \\
 &= \left(\sum_{n_1=0}^1 e^{-\beta(\epsilon_1 - \mu) n_1} \right) \left(\sum_{n_2=0}^1 e^{-\beta(\epsilon_2 - \mu) n_2} \right) \dots \\
 &= (1 + e^{-\beta(\epsilon_1 - \mu)}) (1 + e^{-\beta(\epsilon_2 - \mu)}) \dots \\
 &= \prod_r (1 + e^{-\beta(\epsilon_r - \mu)})
 \end{aligned} \tag{66}$$

dan

$$\ln \mathcal{Z} = \sum_r \ln (1 + e^{-\beta(\varepsilon_r - \mu)}) \quad (65)$$

Jadi jumlah rata-rata partikel dalam sistem adalah

$$\bar{N} = \frac{1}{\beta} \frac{\partial \ln \mathcal{Z}}{\partial \mu} = \frac{1}{\beta} \sum_r \frac{\beta e^{-\beta(\varepsilon_r - \mu)}}{1 + e^{-\beta(\varepsilon_r - \mu)}} \quad (66)$$

atau

$$\bar{N} = \sum_r \frac{1}{e^{\beta(\varepsilon_r - \mu)} + 1} \quad (67)$$

Jumlah rata-rata fermion dalam keadaan s adalah

$$\bar{n}_s = -\frac{1}{\beta} \frac{\partial \ln \mathcal{Z}}{\partial \varepsilon_s} = -\frac{1}{\beta} \frac{(-\beta) e^{-\beta(\varepsilon_s - \mu)}}{1 + e^{-\beta(\varepsilon_s - \mu)}} \quad (68)$$

atau

$$\bar{n}_s = \frac{1}{e^{\beta(\varepsilon_s - \mu)} + 1} \quad (69)$$

• Referensi

- Lewit, Malcolm H. 2008. Spin Dynamics Basic of Nuclear Magnetic resonance, John Wiley & Sons, Ltd.
- Kittel, C., Introduction to Solid State Physics 7th ed., New York: John Wilry & Sons (1996)
- Schomerus, H., 2020. Lecture notes for PHYS223 : Quantum Mechanics. Lancaster University
- Schwartz, Matthew D. Spring 2019. Statistical Mechanics, , Lecture 10: Quantum Statistical Mechanics. Harvard University
- Liboff, Richard L. 1980. Introductory Quantum Mechanics. Addison-Weslwy Publisng Company. Cornell University.

PROFIL PENULIS



Dr. Ir. Gede Yudharma, M.Si.

Dosen Teknik Elektro

Sekolah Tinggi Teknologi Duta Bangsa

Pendidikan: S1 Teknik Fisika Institut Teknologi Bandung (lulus 1988), S2 Ilmu Material Universitas Indonesia (lulus 2004), S3 Ilmu Material Universitas Indonesia (lulus 2023). Pengalaman kerja: Pusat Ilmu Komputer dan Sistem Informasi (PIKSI ITB, 1988 - 1989), Industri Pesawat Terbang Nusantara (IPTN, 1990 – 1991), PT. Perusahaan Listrik Negara (PLN, 1992 – 2018). Pengalaman mengajar: Dosen tetap Sekolah Tinggi Teknologi Duta Bangsa (2023 – Sekarang).



TEORI PERTURBASI

Oleh Dr. Pawawoi ST., MT.

Dalam mekanika kuantum khususnya Fisika Atom, pembahasan tentang hubungan antara atom dan elektron akan memerlukan gagasan-gagasan tentang ikatan dan interaksi antara atom dan elektron ini. Pada saat interaksi antar atom ini akan ada beberapa hal yang dapat mempengaruhi interaksi tersebut. Gangguan-gangguan ini akan bersifat kompleks dan rumit sehingga diperlukan postulat untuk menyederhanakan gangguan ini. Teori perturbasi adalah seperangkat skema perkiraan yang terkait langsung dengan gangguan matematis untuk mendeskripsikan sistem kuantum yang rumit ke dalam sistem yang lebih sederhana. Idennya adalah memulai dengan sistem sederhana yang solusi matematisnya diketahui, dan menambahkan Hamiltonian tambahan yang "mengganggu" yang mewakili gangguan lemah pada sistem (Grace, 2022).

Jika gangguannya tidak terlalu besar, berbagai besaran fisis yang terkait dengan sistem yang terganggu (misalnya tingkat energi dan keadaan eigennya) dapat dinyatakan sebagai "koreksi" terhadap sistem sederhana. Koreksi ini, karena kecil dibandingkan dengan besarnya sendiri, dapat dihitung menggunakan metode perkiraan seperti deret asimtotik. Oleh karena itu, sistem yang rumit dapat dipelajari berdasarkan pengetahuan yang lebih sederhana. Dalam hal ini teori perturbasi memungkinkan kita untuk mendekati energi dan fungsi gelombang dari sistem kuantum yang tidak dapat diselesaikan secara eksak, berdasarkan solusi yang diketahui dari sistem yang

lebih sederhana.

6.1. Definisi

Teori perturbasi adalah alat dasar yang digunakan di berbagai bidang ilmu dan teknik, terutama dalam fisika dan mekanika kuantum. Teori ini menyediakan cara sistematis untuk menemukan solusi perkiraan dari masalah kompleks yang tidak dapat diselesaikan secara eksak. Ide utama teori perturbasi adalah memulai dari sistem sederhana yang dapat diselesaikan, lalu memperkenalkan modifikasi kecil (disebut perturbasi) untuk mengeksplorasi bagaimana perubahan ini memengaruhi sistem (Vlah, 2016).

Dalam mekanika kuantum, Hamiltonian adalah salah satu operator paling penting dan mendasar. Hamiltonian merepresentasikan energi total dari suatu sistem kuantum, yang mencakup energi kinetik dan energi potensial. Operator ini memainkan peran kunci dalam menentukan bagaimana suatu sistem berevolusi seiring waktu. Pemahaman tentang Hamiltonian sangat penting untuk mempelajari berbagai sistem, dari partikel kuantum sederhana hingga medan kuantum yang lebih kompleks (Chuang, 2019)

6.2. Hamiltonian

Hamiltonian, biasanya dilambangkan dengan \hat{H} , adalah analog kuantum dari Hamiltonian dalam mekanika klasik, yang merepresentasikan total energi dari suatu sistem. Dalam mekanika kuantum, Hamiltonian bekerja pada fungsi gelombang $\psi(x,t)$ untuk mendeskripsikan energi dan evolusi waktu dari suatu sistem. Fungsi gelombang menyimpan semua informasi tentang keadaan kuantum dari sistem tersebut (Chuang, 2019).

Secara matematis, untuk suatu sistem dengan energi E , Hamiltonian memenuhi persamaan Schrödinger, yang merupakan persamaan fundamental dalam mekanika kuantum (Toth, 2020):

$$\hat{H}\psi(x,t) = i\hbar \frac{\partial \psi(x,t)}{\partial t}$$

Di mana:

\hat{H} adalah operator Hamiltonian.

$\psi(x,t)$ adalah fungsi gelombang.

i adalah bilangan imajiner.

\hbar adalah konstanta Planck tereduksi.

Dalam persamaan ini, Hamiltonian mengendalikan bagaimana fungsi gelombang berubah seiring waktu. Dengan menyelesaikan persamaan Schrödinger, kita bisa memprediksi perilaku masa depan sistem kuantum berdasarkan keadaan kuantum saat ini.

6.3. Jenis-Jenis Teori Perturbasi

Teori perturbasi mewakili kerangka matematika yang tangguh yang banyak digunakan dalam bidang mekanika kuantum, serta dalam berbagai disiplin ilmu lainnya, untuk tujuan menganalisis dengan cermat sistem yang mengalami gangguan atau gangguan kecil. Premis mendasar yang mendasari konstruksi teoretis ini melibatkan memulai dengan sistem yang memiliki struktur yang terdefinisi dengan baik dan dapat dipecahkan, kemudian memperkenalkan modifikasi yang sangat kecil, yang pada gilirannya memungkinkan kita untuk secara sistematis memperkirakan dan mengevaluasi konsekuensi dari perubahan tersebut pada sifat dan perilaku yang melekat dari sistem yang bersangkutan (Paldus, 2023).

Dalam konteks ini, penting untuk menyoroti beberapa kategori utama teori perturbasi yang telah ditetapkan, yang meliputi tetapi tidak terbatas pada: teori gangguan yang tidak bergantung pada waktu, teori gangguan yang bergantung pada waktu, dan teori gangguan variasional, yang masing-masing melayani tujuan dan aplikasi yang berbeda dalam lingkup analisis perturbatif yang lebih

luas (Nicolas Fillion, 2022).

6.3.1 Teori Perturbasi Tak Bergantung Waktu

Teori perturbasi tak bergantung waktu digunakan untuk mempelajari sistem di mana *Hamiltonian* (operator energi) dapat diekspresikan sebagai jumlah dari Hamiltonian yang dapat diselesaikan secara tepat \hat{H}_0 dan suatu perturbasi \hat{H}' :

$$\hat{H} = \hat{H}_0 + \lambda \hat{H}'$$

di mana λ adalah parameter kecil yang mengontrol kekuatan gangguan. Tujuan utamanya adalah menemukan koreksi terhadap tingkat energi dan keadaan eigen dari sistem.

a. Teori Perturbasi Non-Degenerasi

Dalam teori perturbasi non-degenerasi, Hamiltonian tidak terganggu \hat{H}_0 memiliki tingkat energi yang tidak terdegenerasi. Koreksi terhadap tingkat energi $E_n^{(1)}$ dan keadaan eigen $\psi_n^{(1)}$ dapat dihitung sebagai berikut:

- **Koreksi Energi Orde Pertama:**

$$E_n^{(1)} = \langle \psi_n^{(0)} | \hat{H}' | \psi_n^{(0)} \rangle$$

- **Koreksi Keadaan Orde Pertama:**

$$|\psi_n^{(1)}\rangle = \sum_{m \neq n} \frac{\langle \psi_m^{(0)} | \hat{H}' | \psi_n^{(0)} \rangle}{E_n^{(0)} - E_m^{(0)}} |\psi_m^{(0)}\rangle$$

di mana $\psi_n^{(0)}$ dan $E_n^{(0)}$ adalah keadaan eigen dan nilai eigen dari Hamiltonian yang tidak terganggu.

b. Teori Perturbasi Degenerasi

Setelah memperoleh koreksi energi, langkah selanjutnya adalah menganalisis stabilitas sistem dengan memanfaatkan fungsi Hamiltonian yang telah dimodifikasi. Dalam konteks ini, penting untuk mempertimbangkan bagaimana perubahan kecil dalam kondisi awal dapat mempengaruhi dinamika sistem secara keseluruhan, terutama ketika berhadapan dengan gangguan eksternal. Penelitian

terbaru menunjukkan bahwa pemodelan keseimbangan energi Hamiltonian dapat memberikan wawasan baru tentang daerah stabil dan tidak stabil dalam sistem daya, di mana transisi antara keadaan pasca-gangguan dan pra-gangguan dapat diekspresikan melalui persamaan keseimbangan energi (Emanuelle C. Machado, 2019).

Dengan demikian, pendekatan ini tidak hanya relevan untuk memahami fenomena degenerasi dalam Hamiltonian tetapi juga membuka jalan bagi aplikasi praktis dalam rekayasa sistem dinamis yang lebih kompleks.

6.3.2 Teori Perturbasi Bergantung Waktu

Teori perturbasi bergantung waktu diterapkan ketika Hamiltonian sistem berubah seiring waktu. Hamiltonian total dapat diekspresikan sebagai:

$$\hat{H}(t) = \hat{H}_0 + \lambda \hat{H}'(t)$$

Tujuan utama di sini adalah untuk menentukan bagaimana sistem berevolusi seiring waktu akibat perturbasi. Teori ini sangat berguna dalam mempelajari transisi antara keadaan yang diinduksi oleh medan eksternal, seperti radiasi elektromagnetik.

a. Perturbasi Orde Pertama

Probabilitas transisi dari keadaan awal dapat dihitung menggunakan teori perturbasi bergantung waktu orde pertama:

$$P_{i \rightarrow f} = \left| \frac{-i}{\hbar} \int_0^t \langle \psi_f | \hat{H}'(t') | \psi_i \rangle e^{i\omega_{fi}t'} dt' \right|^2$$

di mana $\omega_{fi} = \frac{E_f - E_i}{\hbar}$ adalah frekuensi yang sesuai dengan perbedaan energi antara keadaan.

b. Perturbasi Orde Lebih Tinggi

Untuk hasil yang lebih akurat, koreksi orde yang lebih tinggi dapat dihitung menggunakan integral yang lebih kompleks, tetapi perhitungan menjadi semakin rumit seiring bertambahnya orde.

6.3.3 Teori Perturbasi Variasional

Teori perturbasi variasional menggabungkan prinsip-prinsip teori perturbasi dengan metode variational, yang sering digunakan untuk menemukan solusi perkiraan untuk persamaan Schrödinger. Dalam pendekatan ini, seseorang mulai dengan fungsi gelombang percobaan yang bergantung pada sekumpulan parameter variational. Energi total dinyatakan sebagai fungsi dari parameter-parameter ini, dan teori perturbasi diterapkan untuk memperoleh koreksi terhadap energi dan fungsi gelombang (Heinrichs, 1968).

Langkah-langkah kunci dalam teori perturbasi variasional meliputi (Marcelli, 2022):

- Memilih fungsi gelombang percobaan ψ_{trial} yang menggabungkan efek dari perturbasi.
- Menghitung nilai harapan energi:

$$E_{var} = \frac{\langle \psi_{trial} | \hat{H} | \psi_{trial} \rangle}{\langle \psi_{trial} | \psi_{trial} \rangle}$$

- Mengoptimalkan parameter variational untuk meminimalkan energi.

Teori perturbasi variasional sangat berguna dalam masalah kuantum banyak benda, di mana solusi langsung sering kali tidak mungkin.

6.4. Aplikasi Teori Perturbasi

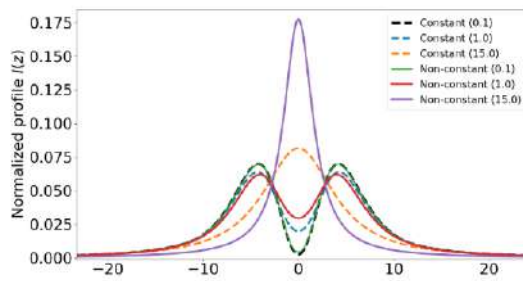
Teori perturbasi adalah alat dasar dalam mekanika kuantum dan bidang fisika lainnya, yang memungkinkan peneliti untuk menganalisis sistem yang mengalami gangguan kecil. Teori ini menyediakan solusi perkiraan untuk masalah yang kompleks, memungkinkan pemahaman yang lebih dalam tentang berbagai fenomena fisika. Berikut ini adalah beberapa aplikasi kunci dari teori perturbasi di berbagai bidang.

6.4.1 Mekanika Kuantum

Dalam mekanika kuantum, teori perturbasi terutama digunakan untuk menganalisis sistem dengan Hamiltonian yang dapat diekspresikan sebagai jumlah dari bagian yang dapat diselesaikan secara tepat dan suatu perturbasi kecil (Abdullaev, 1999). Ini memiliki beberapa aplikasi penting:

a. Sistem Atom dan Molekul

Teori perturbasi digunakan secara luas untuk mempelajari sistem atom dan molekul, terutama dalam keberadaan medan eksternal (seperti medan elektromagnetik) (Jeremy I. Musher, 1968). Misalnya, efek Stark menggambarkan pergeseran tingkat energi atom dalam medan listrik, yang dapat dianalisis dengan akurat menggunakan teori perturbasi (Miguel Ballesteros, 2019).



Gambar 1. Profil intensitas yang dinormalisasi dari dua komponen Stark yang berbeda menunjukkan konfigurasi simetris yang bergantung pada parameter pergeseran energi yang berkurang, menandakan distribusi yang harmonis di sekitar nilai pusat (Valery Astapenko, 2021).

b. Efek Zeeman

Efek Zeeman, yang menggambarkan pemisahan garis spektral dalam medan magnet, juga dapat dipelajari menggunakan teori perturbasi. Dengan menerapkan medan magnet sebagai gangguan, kita dapat menghitung pergeseran yang dihasilkan dalam tingkat energi keadaan atom.

c. Teori Pencar

Dalam masalah pencar, teori perturbasi membantu memahami bagaimana partikel berinteraksi ketika suatu potensial kecil ditambahkan ke sistem partikel bebas. Hasilnya memberikan wawasan penting tentang penampang lintang dan amplitudo pencar.

6.4.2 Teori Medan Kuantum

Teori perturbasi adalah landasan dari teori medan kuantum (QFT), terutama dalam konteks menghitung interaksi antar partikel.

a. Diagram Feynman

Dalam QFT, teori perturbasi memungkinkan representasi grafis interaksi melalui diagram Feynman. Diagram ini menyederhanakan perhitungan amplitudo pencar dan fungsi korelasi, yang mengarah pada prediksi tentang perilaku partikel dalam fisika energi tinggi (Akshay Pal, 2023).

b. Renormalisasi

Teori perturbasi memainkan peran penting dalam renormalisasi, yang mengatasi infinities yang muncul dalam perhitungan QFT. Dengan menerapkan teknik perturbatif secara sistematis, fisikawan dapat memperoleh prediksi terbatas untuk kuantitas yang dapat diamati.

6.4.3 Astrofisika dan Kosmologi

Dalam astrofisika, teori perturbasi diterapkan untuk memahami berbagai fenomena.

a. Gelombang Gravitasi

Teori perturbasi digunakan dalam studi gelombang gravitasi, khususnya saat menganalisis efek gangguan kecil dalam metrik ruang-waktu. Ini membantu dalam memperoleh persamaan yang mengatur propagasi gelombang dalam relativitas umum (Roman Berens, 2024).

b. Pembentukan Struktur Kosmik

Dalam kosmologi, teori perturbasi membantu memahami pembentukan struktur skala besar di alam semesta. Dengan

menganalisis fluktuasi kecil dalam kerapatan materi, peneliti dapat memodelkan bagaimana gangguan ini tumbuh seiring waktu untuk membentuk galaksi dan gugus (Matsubara, 2023).

6.5. Keuntungan dan Keterbatasan Teori Perturbasi

Teori perturbasi adalah pendekatan matematis yang banyak digunakan dalam fisika dan rekayasa, khususnya untuk menyelesaikan masalah yang tidak dapat dipecahkan secara eksak. Dengan memberikan solusi perkiraan berdasarkan deviasi kecil dari sistem yang diketahui, teori perturbasi memiliki berbagai aplikasi. Namun, ada juga keterbatasan yang perlu dipertimbangkan.

6.5.1 Keuntungan Teori Perturbasi

1. Kejelasan dan Kemudahan Akses

- o Mudah Diterapkan: Teori perturbasi memungkinkan peneliti untuk memperoleh solusi perkiraan dari model yang lebih sederhana dan dapat diselesaikan. Aksesibilitas ini membuatnya menjadi pilihan utama untuk banyak masalah dalam mekanika kuantum, mekanika klasik, dan bidang lainnya.
- o Pendekatan Sistematis: Teori ini menawarkan metode terstruktur untuk menangani masalah kompleks dengan membangun dari solusi yang ada, sehingga memudahkan pemahaman tentang bagaimana perubahan kecil mempengaruhi suatu sistem.

2. Penerapan yang luas

- o Alat yang Serbaguna: Teori perturbasi dapat diterapkan di berbagai disiplin ilmu, termasuk mekanika kuantum, dinamika fluida, dan mekanika statistik. Fleksibilitas ini menjadikannya alat yang berharga bagi fisikawan dan insinyur.
- o Rentang Masalah yang Luas: Ini sangat berguna untuk sistem dengan gangguan kecil, seperti medan eksternal yang ringan

atau interaksi lemah, di mana solusi eksak tidak mungkin.

3. Solusi Bertahap

- o Koreksi Orde Lebih Tinggi: Teori perturbasi memungkinkan perhitungan koreksi orde lebih tinggi, memberikan solusi yang semakin akurat. Ini sangat bermanfaat dalam mekanika kuantum, di mana tingkat energi dan fungsi keadaan dapat diperbaiki secara sistematis.
- o Wawasan tentang Perilaku: Teori ini memberikan wawasan tentang bagaimana suatu sistem merespons perubahan kecil, yang bisa sangat penting untuk memahami stabilitas dan dinamika.

4. Konsep Dasar untuk Pendekatan Lanjutan

- o Dasar untuk Metode Lain: Banyak metode lanjutan, seperti renormalisasi dalam teori medan kuantum, dibangun berdasarkan prinsip-prinsip teori perturbasi, menunjukkan perannya yang mendasar dalam fisika teoritis.

6.5.2 Keterbatasan Teori Perturbasi

1. Rentang Validitas

- o Kebutuhan Gangguan Kecil: Keterbatasan utama adalah bahwa teori perturbasi hanya berlaku untuk sistem di mana gangguannya kecil. Gangguan besar dapat menyebabkan deviasi signifikan dari perilaku yang diharapkan, menjadikan pendekatan perturbatif tidak efektif.
- o Keterbatasan Deret: Dalam beberapa kasus, deret perturbatif dapat divergen, yang berarti bahwa koreksi orde lebih tinggi tidak konvergen ke suatu solusi. Ini terjadi terutama dalam sistem dengan interaksi yang kuat.

2. Kompleksitas dalam Orde Lebih Tinggi

- o Peningkatan Kompleksitas: Seiring dengan dihitungnya koreksi orde lebih tinggi, kompleksitas matematis dapat

meningkat secara signifikan, membuat perhitungan menjadi rumit dan memakan waktu. Ini dapat membatasi aplikasi praktis dalam sistem yang lebih rumit.

- o Masalah Konvergensi: Meskipun istilah orde lebih tinggi dapat memberikan pendekatan yang lebih baik, mereka juga dapat memperkenalkan masalah konvergensi yang menyulitkan interpretasi hasil.

3. Pengabaian Efek Non-Perturbatif

- o Mengabaikan Fenomena Penting: Teori perturbasi sering kali mengabaikan efek non-perturbatif yang dapat sangat penting dalam sistem tertentu. Misalnya, fenomena seperti transisi fase atau tunneling mungkin tidak ditangkap dengan memadai melalui metode perturbatif saja.
- o Keterbatasan dalam Regime Keterhubungan Kuat: Dalam sistem dengan keterhubungan kuat, di mana interaksi signifikan, metode perturbatif mungkin gagal sepenuhnya, memerlukan pendekatan non-perturbatif.

4. Ketergantungan pada Akurasi Model

- o Sensitivitas Model: Akurasi solusi perturbatif sangat bergantung pada kebenaran model yang mendasarinya. Jika sistem dasar didefinisikan dengan buruk, hasil perturbatif mungkin menyesatkan.

• Referensi

Abdullaev, S. S. (1999). A new integration method of Hamiltonian systems by symplectic maps. *Journal of Physics A*.

Akshay Pal, J. K. (2023). Perturbation theory for stochastic nonlinear oscillators and Feynman diagram. *Annals of Physics*.

Chuang, G. H. (2019). *Hamiltonian Simulation by Qubitization*. Massachusetts.

Emanuelle C. Machado, J. E. (2019). Hamiltonian energy-balance

- method for direct analysis of power systems transient stability . *Iet Generation Transmission & Distribution*.
- Grace, M. R. (2022). *Perturbation Theory for Quantum Information*. USA: University of Arizona.
- Heinrichs, J. (1968). General perturbation and variational methods for responses to time- dependent interactions in quantum mechanics. *Physical Review*.
- Jeremy I. Musher, J. M. (1968). Perturbation-Theoretic Approach To Atoms and Molecules . *Physical Review*.
- Marcelli, G. (2022). Improved energy estimates for a class of time-dependent perturbed Hamiltonians. *Letters in Mathematical Physics*.
- Matsubara, T. (2023). The integrated perturbation theory for cosmological tensor fields I: Basic formulation.
- Miguel Ballesteros, N. C. (2019). Perturbation Theory for Weak Measurements in Quantum Mechanics, Systems with Finite-Dimensional State Space. *Annales Henri Poincaré*.
- Nicolas Fillion, R. M. (2022). Perturbation Theory. *Encyclopedia of Theory*, 12.
- Paldus, J. (2023). Josef Paldus. In *Springer Handbooks*. Springer.
- Roman Berens, T. G. (2024). Gravitational Waves on Kerr Black Holes I: Reconstruction of Linearized Metric Perturbations.
- Toth, P. (2020). HAMILTONIAN GENERATIVE NETWORKS. *ICLR*, (p. 19).
- Valery Astapenko, A. L. (2021). From the Vector to Scalar Perturbations Addition in the Stark Broadening Theory of Spectral Lines. *universe*, 13.
- Vlah, Z. (2016). Perturbation theory, effective field theory, and oscillations in the power spectrum. *IOP Publishing*. IOP Publishing.

PROFIL PENULIS



Dr. Pawawoi ST., MT.

Dosen Teknik Metalurgi

Universitas Jenderal Achmad Yani



TEORI MEDAN KUANTUM

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

7.1. Latar Belakang Sejarah Teori Medan Kuantum

Teori Medan Kuantum (QFT) merupakan salah satu pilar dasar fisika modern, yang mengintegrasikan mekanika kuantum dengan relativitas khusus untuk menjelaskan gaya dan partikel fundamental di alam. Perkembangan QFT ditandai oleh serangkaian tonggak penting dan kontribusi dari banyak fisikawan sepanjang abad ke-20.

Awal Abad ke-20: Mekanika Kuantum dan Relativitas Khusus

Dasar bagi QFT dibangun pada awal 1900-an dengan munculnya mekanika kuantum. Kuantisasi energi oleh Max Planck pada tahun 1900 dan penjelasan Albert Einstein mengenai efek fotoelektrik pada tahun 1905 menunjukkan bahwa energi terkuantisasi dan bahwa partikel menunjukkan perilaku gelombang dan partikel.

Secara bersamaan, relativitas khusus, yang diperkenalkan oleh Einstein pada tahun 1905, merombak pemahaman kita tentang ruang dan waktu, memerlukan kerangka teoritis yang dapat menjelaskan partikel berkecepatan tinggi.

Kelahiran Teori Medan Kuantum

Langkah signifikan pertama menuju QFT terjadi pada 1920-an ketika fisikawan seperti Paul Dirac mulai menggabungkan mekanika kuantum dengan prinsip-prinsip relativitas. Pada tahun 1927, Dirac merumuskan persamaan Dirac, yang menggambarkan fermion (seperti elektron) dalam kerangka relativistik dan memprediksi adanya antimateri.

Karya Dirac membuka jalan bagi kuantisasi bidang, bukan

hanya partikel. Dengan memperlakukan partikel sebagai eksitasi dari bidang yang mendasarinya, ia memberikan perspektif baru yang akhirnya mengarah pada pengembangan QFT.

1930-an: Elektrodinamika Kuantum (QED)

Pada 1930-an, teori Elektrodinamika Kuantum mulai terbentuk. Richard Feynman, Julian Schwinger, dan Sin-Itiro Tomonaga secara independen mengembangkan formalism yang menggambarkan interaksi antara cahaya dan materi. Karya mereka termasuk pengenalan diagram Feynman, yang secara visual mewakili interaksi partikel dan sangat menyederhanakan perhitungan.

Versi awal QED menghadapi banyak divergensi—hasil yang tidak fisik. Konsep renormalisasi muncul selama periode ini, memungkinkan fisikawan untuk secara sistematis menangani infinities ini dan menghasilkan prediksi yang terbatas dan bermakna.

1940-an dan 1950-an: Konsolidasi dan Ekspansi

Era pasca Perang Dunia II melihat QFT mengukuhkan statusnya sebagai kerangka dasar dalam fisika. QED yang telah direnormalisasi diuji secara eksperimental dengan presisi yang luar biasa, mengonfirmasi prediksinya. Tahun 1950-an membawa pengembangan Kromodinamika Kuantum (QCD), yang menggambarkan interaksi kuat antara kuark dan gluon.

Periode ini juga menyaksikan penyatuan gaya lemah dan elektromagnetik, yang berpuncak pada teori elektroweak yang diusulkan oleh Sheldon Glashow, Abdus Salam, dan Steven Weinberg. Karya mereka membawa mereka meraih Hadiah Nobel pada tahun 1979.

Akhir Abad ke-20: Di Luar Model Standar

Pada akhir abad ke-20, QFT telah matang menjadi kerangka komprehensif yang dikenal sebagai Model Standar fisika partikel. Model ini berhasil menjelaskan tiga dari empat gaya fundamental (elektromagnetik, lemah, dan kuat) dan mengklasifikasikan partikel-elemenar yang dikenal.

Namun, tantangan tetap ada, terutama terkait dengan penyatuan gravitasi dengan mekanika kuantum dan sifat materi gelap

serta energi gelap. Pencarian pemahaman yang lebih dalam tentang alam semesta terus berlanjut, dengan teori-teori seperti teori string dan gravitasi kuantum semakin menarik perhatian.

7.2. Konsep Dasar Teori Medan Kuantum

Teori Bidang Kuantum (QFT) adalah kerangka fundamental dalam fisika modern yang menjelaskan bagaimana partikel berinteraksi melalui bidang kuantum. Teori ini menggabungkan prinsip-prinsip mekanika kuantum dengan relativitas khusus, memberikan pemahaman komprehensif tentang perilaku partikel-elementer dan gaya fundamental. Berikut adalah konsep-konsep kunci yang membentuk dasar QFT:

1. Bidang dan Partikel

Di inti QFT adalah konsep bidang. Bidang adalah besaran fisik yang didefinisikan di setiap titik dalam ruang dan waktu. Dalam kerangka ini, partikel dipandang sebagai eksitasi atau gangguan dari bidang yang mendasarinya. Misalnya:

- **Bidang Elektron:** Elektron adalah eksitasi dari bidang elektron.
- **Bidang Foton:** Foton adalah eksitasi dari bidang elektromagnetik.

Pandangan ini memungkinkan perlakuan terpadu terhadap partikel dan gaya, karena interaksi dapat dijelaskan dalam istilah dinamika bidang.

2. Status Kuantum

Status kuantum dalam QFT direpresentasikan menggunakan konsep keadaan vakum, yang merupakan keadaan energi terendah dari bidang. Dari vakum ini, partikel dapat diciptakan dan dimusnahkan. Formalisme matematis menggunakan operator penciptaan dan operator penghancuran:

Operator Penciptaan (a^\dagger) : Menambahkan partikel ke dalam bidang.

Operator Penghancuran (a) : Menghapus partikel dari bidang.

Operator-operator ini bertindak pada keadaan vakum untuk menghasilkan keadaan dengan jumlah partikel yang bervariasi.

3. Formulasi Lagrangian dan Hamiltonian

Dinamika bidang dalam QFT dijelaskan oleh **densitas Lagrangian**, yang mengkodekan informasi tentang bidang dan interaksinya. Formulasi Lagrangian menghasilkan **persamaan Euler-Lagrange**, yang mengatur persamaan gerak untuk bidang.

Sebagai alternatif, terdapat **formulasi Hamiltonian**, yang fokus pada energi sistem. Operator Hamiltonian menggambarkan total energi dan memainkan peran penting dalam evolusi waktu dari status kuantum.

4. Pendekatan Integral Jalur

Dikembangkan oleh Richard Feynman, formulasi integral jalur menawarkan cara yang kuat untuk menghitung kuantitas fisik. Dalam pendekatan ini, semua jalur yang mungkin diambil oleh sebuah partikel antara status awal dan akhir dipertimbangkan, dengan setiap jalur berkontribusi pada amplitudo probabilitas keseluruhan. Integral jalur secara matematis direpresentasikan sebagai:

$$Z = \int D[\phi] e^{iS[\phi]}$$

di mana $S[\phi]$ adalah aksi yang diambil dari densitas Lagrangian, $D[\phi]$ menunjukkan integrasi atas semua konfigurasi bidang.

5. Interaksi dan Teori Gangguan

Interaksi antara partikel dijelaskan oleh istilah tertentu dalam Lagrangian. Kekuatan interaksi ini dicirikan oleh **konstanta kopling**. Untuk menghitung observables, fisikawan sering menggunakan teori gangguan, yang melibatkan pengembangan istilah interaksi dalam sebuah seri dan menghitung kontribusi urutan demi urutan.

Diagram Feynman berfungsi sebagai alat visual untuk merepresentasikan interaksi ini, di mana garis mewakili partikel dan titik pertemuan mewakili interaksi.

6. Renormalisasi

Salah satu tantangan utama dalam QFT adalah menangani infinities yang muncul dalam perhitungan, yang dikenal sebagai divergensi. Renormalisasi adalah proses yang secara sistematis

menghilangkan infinities ini dengan mendefinisikan ulang parameter tertentu dalam teori (seperti massa dan muatan) sedemikian rupa sehingga menghasilkan hasil yang terbatas. Ini memungkinkan prediksi fisik yang bermakna.

7. Aplikasi QFT

QFT telah berperan penting dalam pengembangan beberapa teori fundamental dalam fisika:

- **Elektrodinamika Kuantum (QED):** Teori yang menggambarkan interaksi antara cahaya dan partikel bermuatan, dikenal karena presisinya yang tinggi dan validasi eksperimental.
- **Kromodinamika Kuantum (QCD):** Teori interaksi kuat, yang menjelaskan perilaku kuark dan gluon dalam proton dan neutron.
- **Teori Elektroweak:** Menyatukan gaya elektromagnetik dan gaya nuklir lemah, menyediakan kerangka untuk memahami interaksi partikel.

7.3. Formulasi Teori Medan Kuantum

Teori Medan Kuantum (QFT) menyediakan kerangka matematis yang rigor untuk memahami interaksi partikel dan bidang. Dengan menggabungkan prinsip dari mekanika kuantum dan relativitas khusus, QFT menggambarkan perilaku partikel fundamental secara terpadu. Artikel ini akan membahas komponen utama dari formulasi QFT, termasuk formulasi Lagrangian, pendekatan integral jalur, dan transisi ke status kuantum.

1. Formulasi Lagrangian

Dasar QFT dibangun di atas formulasi Lagrangian, yang dimulai dengan konstruksi densitas Lagrangian (\mathcal{L}). Densitas Lagrangian mengkodekan informasi tentang bidang dan interaksinya. Ini merupakan fungsi dari bidang dan turunan-turunannya, dan biasanya dinyatakan dalam bentuk:

- Bidang Skalar : Misalnya, bidang skalar nyata $\phi(x)$.
- Bidang Fermionik : Direpresentasikan menggunakan bidang spinor $\psi(x)$.
- Bidang Gauge : Seperti bidang elektromagnetik $A_\mu(x)$.

Densitas Lagrangian memiliki bentuk umum:

$$L = L_{free} + L_{int}$$

di mana L_{free} menggambarkan bidang bebas (tanpa interaksi) dan L_{int} mencakup istilah interaksi.

2. Persamaan Euler-Lagrange

Dari densitas Lagrangian, persamaan gerak untuk bidang dapat diturunkan menggunakan persamaan Euler-Lagrange:

$$\frac{\partial L}{\partial \phi} - \partial_\mu \frac{\partial L}{\partial (\partial_\mu \phi)} = 0$$

Persamaan ini mengatur dinamika bidang dan menentukan bagaimana bidang tersebut berkembang seiring waktu.

3. Kuantisasi Medan/Bidang

Dalam QFT, proses kuantisasi melibatkan promosi bidang klasik menjadi operator. Ini dapat dilakukan dengan dua pendekatan utama:

- Kuantisasi Kanonik: Dalam pendekatan ini, bidang dan momenta konjugat diperlakukan sebagai operator yang memenuhi relasi komutasi tertentu. Misalnya, untuk bidang skalar:

$$[\phi(x), \pi(y)] = i\delta^3(x - y)$$

di mana $\pi(y)$ adalah momentum konjugat dari bidang $\phi(x)$.

- Kuantisasi Integral Jalur: Dikembangkan oleh Richard Feynman, pendekatan ini mereformulasi teori dalam bentuk integral fungsional atas semua konfigurasi bidang yang mungkin. Integral jalur dinyatakan sebagai:

$$Z = \int D[\phi] e^{iS[\phi]}$$

di mana $S[\phi]$ adalah aksi, yang didefinisikan sebagai integral densitas Lagrangian di atas ruang-waktu.

4. Gambar Interaksi dan Teori Gangguan

Dalam QFT, gambar interaksi sering digunakan untuk

menyederhanakan perhitungan. Dalam formulasi ini, status berkembang sesuai dengan Hamiltonian bebas, sementara operator berkembang sesuai dengan Hamiltonian interaksi. Pemisahan ini memungkinkan penerapan teori gangguan, di mana istilah interaksi diperlakukan sebagai koreksi kecil terhadap teori bebas.

5. Renormalisasi

Renormalisasi adalah proses penting dalam QFT yang menangani infinities yang muncul dalam perhitungan. Proses ini melibatkan mendefinisikan ulang parameter dalam teori (seperti massa dan konstanta kopling) untuk menyerap divergensi ini, sehingga menghasilkan prediksi yang terbatas dan bermakna secara fisik. Langkah-langkah umumnya mencakup:

1. Regulasi: Memperkenalkan cutoff atau metode lain untuk mengendalikan divergensi.
2. Renormalisasi: Mendefinisikan ulang parameter dalam teori dan menghitung kuantitas fisik.
3. Grup Renormalisasi: Menganalisis bagaimana parameter berubah dengan skala energi, memberikan wawasan tentang perilaku teori.

6. Keadaan Vakum dan Keadaan Partikel

Dalam QFT, keadaan vakum adalah keadaan energi terendah dari sistem, yang tidak mengandung partikel nyata tetapi memungkinkan adanya partikel virtual karena fluktuasi kuantum. Keadaan partikel dibangun dari keadaan vakum menggunakan operator penciptaan. Misalnya, keadaan dengan n partikel dapat direpresentasikan sebagai:

$$|n\rangle = a_1^\dagger a_2^\dagger \cdots a_n^\dagger |0\rangle$$

di mana a_i^\dagger adalah operator penciptaan untuk partikel yang berbeda

7.4. Interaksi dan Teori Gangguan dalam Teori Medan Kuantum

Teori Medan Kuantum (QFT) menggambarkan partikel-partikel fundamental dan interaksinya melalui bidang. Salah satu aspek penting dari QFT adalah bagaimana interaksi ini diformulasikan dan dihitung. Teori gangguan memainkan peran krusial dalam proses ini,

memungkinkan fisikawan untuk menghasilkan prediksi tentang perilaku dan interaksi partikel secara sistematis. Artikel ini menjelajahi sifat interaksi dalam QFT dan bagaimana teori gangguan diterapkan untuk menghitung observables fisik.

1. Sifat Interaksi dalam QFT

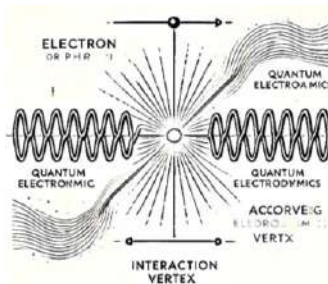
Dalam QFT, interaksi antara partikel dijelaskan oleh istilah tertentu dalam densitas Lagrangian. Lagrangian biasanya terdiri dari dua bagian:

- Bagian Bebas (L_{free}): Menggambarkan bidang yang tidak berinteraksi, di mana partikel berpindah secara independen.
- Bagian Interaksi (L_{int}): Mengkodekan interaksi antara bidang. Bagian ini memperkenalkan konstanta kopling yang menentukan kekuatan interaksi.

Sebagai contoh, dalam Elektrodinamika Kuantum (QED), Lagrangian interaksi melibatkan kopling antara bidang elektromagnetik dan partikel bermuatan (seperti elektron).

2. Diagram Feynman

Diagram Feynman adalah alat visual yang kuat digunakan untuk merepresentasikan interaksi dalam QFT. Setiap diagram sesuai dengan istilah tertentu dalam ekspansi gangguan dan menggambarkan dinamika interaksi partikel. Komponen utama dari diagram Feynman seperti diunjukkan pada Gambar dibawah. Diagram menggambarkan interaksi antara elektron dan foton dalam elektrodinamika kuantum (QED):



Gambar 1. Diagram Feynman

- Garis lurus: melambangkan elektron yang bergerak.
- Garis bergelombang: melambangkan foton
- Garis Eksternal: Mewakili partikel yang masuk atau keluar.
- Garis Internal: Mewakili partikel virtual yang menjadi mediator interaksi.
- Titik Pertemuan (*vertex interaction*): Menunjukkan titik di mana partikel berinteraksi.

Diagram Feynman memungkinkan fisikawan untuk mengorganisir perhitungan amplitudo hamburan dan lintasan dengan efektif.

3. Teori Gangguan

Teori gangguan adalah teknik matematis yang digunakan untuk menghitung kuantitas fisik dengan memperlakukan interaksi sebagai gangguan kecil terhadap sistem yang dapat diselesaikan. Dalam konteks QFT, pendekatan ini melibatkan pengembangan matriks S (matriks hamburan) dalam kekuatan Hamiltonian interaksi.

Matriks S menghubungkan status awal dan akhir dari suatu proses hamburan dan diberikan oleh:

$$S = T \left(\exp \left(-i \int_{-\infty}^{+\infty} H_{int}(t) dt \right) \right)$$

di mana T menunjukkan penyusunan waktu, dan H_{int} adalah Hamiltonian interaksi.

4. Menghitung Amplitudo

Untuk menghitung amplitudo hamburan menggunakan teori gangguan (*Perturbation theory*), biasanya diikuti langkah-langkah berikut:

- Pilih Ekspansi Gangguan: Matriks S dapat diekspansi sebagai deret daya dalam konstanta kopling g :

$$S = S^{(0)} + S^{(1)} + S^{(2)} + \dots$$

di mana $S^{(n)}$ mewakili kontribusi dari urutan ke- n dalam teori gangguan.

- Hitung Amplitudo Orde Pertama: Istilah pertama dalam ekspansi memberikan kontribusi utama untuk proses

hamburan. Ini sering kali dapat dihitung menggunakan satu diagram Feynman yang sesuai dengan interaksi.

- c. Koreksi Orde Lebih Tinggi: Kontribusi orde lebih tinggi ($S^{(2)}$, $S^{(3)}$, ...) memperhitungkan interaksi yang lebih kompleks dan dapat dihitung dengan mempertimbangkan beberapa diagram Feynman.
- d. Renormalisasi: Saat koreksi orde lebih tinggi dihitung, infinities mungkin muncul. Teknik renormalisasi digunakan untuk mendefinisikan ulang parameter (seperti massa dan muatan) untuk menyerap divergensi ini dan menghasilkan prediksi yang terbatas.

5. Aplikasi Teori Gangguan

Teori gangguan banyak digunakan dalam berbagai aplikasi QFT, termasuk:

- Proses Hamburan: Menghitung lintasan dan laju peluruhan untuk tabrakan partikel.
- Elektrodinamika Kuantum (QED): Memberikan prediksi yang tepat untuk proses seperti hamburan elektron-foton dan momen magnetik anomali elektron.
- Kromodinamika Kuantum (QCD): Menganalisis interaksi kuat antara kuark dan gluon.

Meskipun teori gangguan adalah alat yang kuat, ia memiliki batasan:

- Masalah Konvergensi: Deret mungkin tidak konvergen, terutama dalam teori yang terkopel kuat.
- Efek Non-Gangguan: Beberapa fenomena (seperti instanton dalam QCD) tidak dapat ditangkap oleh metode gangguan.

Dalam kasus seperti itu, teknik alternatif, seperti QCD kisi atau pendekatan non-gangguan, digunakan.

7.5. Renormalisasi dalam Teori Medan Kuantum

Renormalisasi adalah proses fundamental dalam Teori Medan Kuantum (QFT) yang menangani infinities yang muncul dalam perhitungan kuantitas fisik. Infinities ini dapat terjadi dalam berbagai konteks, seperti koreksi energi diri atau diagram loop, dan mereka

menjadi tantangan signifikan dalam membuat prediksi yang bermakna dalam fisika partikel. Artikel ini menjelaskan konsep renormalisasi, metodenya, dan implikasinya dalam QFT.

1. Masalah Infinities

Dalam QFT, perhitungan perturbatif sering kali menghasilkan integral yang divergen, yang berarti hasilnya cenderung menuju tak hingga. Misalnya, saat menghitung energi diri partikel, diagram loop dapat menyumbang istilah yang divergen, mengakibatkan prediksi fisik yang tidak masuk akal. Untuk mendapatkan hasil yang terbatas dan relevan secara fisik, fisikawan menggunakan teknik renormalisasi.

2. Proses Renormalisasi

Renormalisasi melibatkan mendefinisikan ulang parameter dalam teori, seperti massa dan konstanta kopling, untuk menyerap divergensi ini. Proses ini dapat dibagi menjadi beberapa langkah kunci:

- **Regulasi:** Ini adalah langkah pertama, di mana sebuah cutoff diperkenalkan untuk mengendalikan infinities. Metode regulasi dapat mencakup:
 - **Regulasi Cutoff:** Memperkenalkan batas atas pada momentum.
 - **Regulasi Dimensional:** Memperluas jumlah dimensi di mana integral dievaluasi untuk menghindari divergensi.
- **Renormalisasi:** Setelah regulasi, langkah berikutnya adalah mendefinisikan ulang parameter teori. Ini dilakukan dengan mengekspresikan parameter asli dalam istilah "kuantitas yang ter-renormalisasi" dan counterterms. Misalnya, massa m dari suatu partikel dapat dinyatakan sebagai:

$$m = m_{bare} + \delta m$$

di mana m_{bare} adalah massa bare (parameter yang tidak dapat diamati), dan δm adalah counterterm yang mengatasi infinities.

- **Prediksi Fisik:** Setelah parameter didefinisikan ulang, kuantitas fisik dapat dihitung menggunakan parameter yang ter-

renormalisasi. Ini menghasilkan prediksi yang terbatas yang dapat dibandingkan dengan hasil eksperimen.

3. Grup Renormalisasi

Grup Renormalisasi (RG) adalah alat yang kuat dalam memahami bagaimana parameter fisik berubah dengan skala energi. Persamaan RG menggambarkan bagaimana konstanta kopling dan parameter lainnya berevolusi saat bergerak dari skala energi tinggi ke rendah. Ini memungkinkan fisikawan untuk:

- Mengidentifikasi Titik Tetap: Titik tetap dalam aliran RG menunjukkan perilaku kritis dan transisi fase dalam teori.
- Mengklasifikasikan Teori: Dengan mempelajari perilaku konstanta kopling di bawah renormalisasi, fisikawan dapat mengklasifikasikan teori sebagai terkopel lemah atau kuat.

4. Aplikasi Renormalisasi

Renormalisasi memiliki aplikasi yang luas dalam berbagai bidang fisika:

- Elektrodinamika Kuantum (QED): Renormalisasi memungkinkan perhitungan yang tepat dari kuantitas yang dapat diamati, seperti momen magnetik anomali elektron.
- Kromodinamika Kuantum (QCD): Proses renormalisasi sangat penting untuk memahami interaksi kuat antara kuark dan gluon.
- Mekanika Statistik: Teknik renormalisasi juga digunakan dalam fisika statistik untuk mempelajari transisi fase dan fenomena kritis.

5. Tantangan dan Implikasi

Meskipun berhasil, renormalisasi memiliki tantangan dan implikasi filosofis:

- Ketergantungan pada Skema Regulasi: Hasil dari proses renormalisasi dapat bergantung pada skema regulasi yang dipilih, menimbulkan pertanyaan tentang keunikan teori.
- Ambiguitas yang Melekat: Pengenalan counterterms dapat menyebabkan ambiguitas dalam mendefinisikan parameter fisik.
- Efek Non-Gangguan: Beberapa fenomena, seperti penguncian

dalam QCD, tidak dapat dijelaskan secara memadai menggunakan renormalisasi perturbatif dan memerlukan teknik non-gangguan.

7.6. Aplikasi Teori Medan Kuantum

Teori Medan Kuantum (QFT) adalah kerangka kerja yang kuat yang menggabungkan mekanika kuantum dan relativitas khusus untuk menggambarkan perilaku partikel-partikel fundamental dan interaksinya. Aplikasi QFT meluas di berbagai bidang fisika, memberikan wawasan dan prediksi yang penting untuk memahami alam semesta. Artikel ini mengeksplorasi beberapa aplikasi kunci dari QFT dalam fisika partikel, fisika materi terkondensasi, dan lainnya.

1. Fisika Partikel

Salah satu aplikasi paling signifikan dari QFT adalah dalam bidang fisika partikel, di mana QFT membentuk dasar bagi Model Standar fisika partikel. Model Standar menjelaskan tiga dari empat gaya fundamental di alam: interaksi elektromagnetik, lemah, dan kuat.

- **Elektrodinamika Kuantum (QED):** QED adalah teori bidang kuantum untuk interaksi elektromagnetik. Ia menggambarkan bagaimana cahaya (foton) berinteraksi dengan partikel bermuatan (seperti elektron) dan telah diuji dengan akurasi yang luar biasa. Prediksi seperti momen magnetik anomali elektron telah dikonfirmasi dengan tingkat presisi yang sangat tinggi.
- **Kromodinamika Kuantum (QCD):** QCD adalah teori interaksi kuat, yang mengikat quark bersama untuk membentuk proton, neutron, dan hadron lainnya. QCD menjelaskan fenomena seperti muatan warna dan penguncian, menjelaskan mengapa quark tidak pernah ditemukan secara terpisah.
- **Teori Elektroweak:** Teori ini menyatukan interaksi elektromagnetik dan lemah, memprediksi keberadaan boson W dan Z, yang menjadi mediator gaya lemah. Penemuan partikel ini di CERN (*Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire*) pada tahun 1980-an mengonfirmasi aspek kunci dari Model Standar.

2. Kosmologi

QFT juga memainkan peran penting dalam kosmologi, terutama dalam studi alam semesta awal:

- **Teori Inflasi:** QFT digunakan untuk menggambarkan dinamika medan kuantum selama ekspansi cepat alam semesta yang dikenal sebagai inflasi kosmik. Periode ini dapat menjelaskan keseragaman radiasi latar belakang gelombang mikro kosmik dan struktur skala besar alam semesta.
- **Penciptaan Partikel:** Selama alam semesta awal, densitas energi sangat tinggi sehingga QFT memprediksi produksi partikel dari fluktuasi vakum. Mekanisme penciptaan partikel ini penting untuk memahami evolusi alam semesta.

3. Fisika Materi Terkondensasi

QFT telah menemukan aplikasi di luar fisika energi tinggi, terutama dalam fisika materi terkondensasi:

- **Transisi Fase Kuantum:** QFT menyediakan kerangka untuk memahami transisi fase dalam material pada suhu nol mutlak, di mana efek kuantum mendominasi. Konsep seperti titik kritis dan universalitas muncul dari penerapan QFT pada transisi ini.
- **Fenomena Emergen:** Dalam sistem materi terkondensasi, QFT dapat menggambarkan perilaku emergen, seperti efek Hall kuantum fraksional dan fase topologis. Fenomena ini muncul dari perilaku kolektif banyak partikel, di mana QFT memberikan cara sistematis untuk menganalisis properti mereka.

4. Astrofisika Energi Tinggi

QFT juga diterapkan dalam astrofisika energi tinggi untuk memahami fenomena kosmik:

- **Sinar Kosmik:** Interaksi sinar kosmik energi tinggi dengan medium antarbintang dapat dianalisis menggunakan QFT. Memahami interaksi ini membantu dalam mempelajari asal-usul dan mekanisme percepatan sinar kosmik.
- **Fisika Neutrino:** QFT penting dalam studi neutrino, yang merupakan partikel fundamental yang berinteraksi lemah dengan materi. Kerangka teoretis ini memungkinkan analisis

osilasi neutrino dan peran neutrino dalam proses astrofisika.

5. Komputasi Kuantum dan Informasi

Prinsip-prinsip QFT sedang dieksplorasi dalam konteks komputasi kuantum dan teori informasi kuantum:

- **Algoritma Kuantum:** Beberapa algoritma kuantum memanfaatkan teknik QFT untuk mencapai percepatan komputasi. Misalnya, transformasi Fourier kuantum adalah komponen penting dari algoritma seperti algoritma Shor untuk memfaktorkan angka besar.
- **Koreksi Kesalahan Kuantum:** Konsep QFT digunakan dalam pengembangan kode koreksi kesalahan kuantum, yang penting untuk mempertahankan koherensi dalam komputasi kuantum.

6. Selain Model Standar

QFT menyediakan kerangka untuk mengeksplorasi teori-teori di luar Model Standar, seperti:

- **Supersimetri:** Perluasan teoretis ini mengusulkan simetri antara fermion dan boson. Teknik QFT digunakan untuk menganalisis model supersimetri dan implikasinya untuk fisika partikel.
- **Teori String:** Meskipun bukan QFT dalam arti tradisional, teori string menggabungkan elemen QFT untuk menggambarkan partikel fundamental sebagai string satu dimensi. Teori ini bertujuan untuk menyatukan gravitasi dengan mekanika kuantum dan menawarkan wawasan tentang fisika lubang hitam dan kosmologi.

Kesimpulan

1. Perkembangan sejarah Teori Medan Kuantum mencerminkan jalinan eksplorasi intelektual dan kolaborasi yang kaya. Dari mekanika kuantum dan relativitas khusus pada awal abad ke-20 hingga kerangka canggih saat ini, QFT telah secara mendalam membentuk pemahaman kita tentang alam semesta, mengungkap hubungan rumit antara partikel, gaya, dan struktur ruang-waktu itu sendiri.
2. Formulasi Teori Medan Kuantum merupakan kerangka yang canggih dan rumit untuk menyatukan prinsip-prinsip mekanika

kuantum dan relativitas khusus. Melalui persamaan Lagrangian, kuantisasi bidang, teori gangguan, dan renormalisasi, QFT memberikan wawasan mendalam tentang perilaku partikel fundamental dan interaksinya.

3. Interaksi dan teori gangguan adalah pusat dari Teori Medan Kuantum, menyediakan cara sistematis untuk menghitung observables fisik. Melalui penggunaan diagram Feynman dan pengembangan matriks S , fisikawan dapat menghasilkan prediksi tentang proses hamburan dan perilaku partikel.
4. Renormalisasi adalah landasan dari Teori Medan Kuantum, menyediakan pendekatan sistematis untuk menangani infinities dan memungkinkan ekstraksi prediksi fisik yang bermakna.
5. Teori Medan Kuantum merupakan alat yang tak tergantikan dalam fisika modern, dengan aplikasi yang meluas dari ranah subatomik hingga skala kosmologis. Kemampuannya untuk menggambarkan interaksi fundamental, menganalisis transisi fase, dan mengeksplorasi fenomena emergen menjadikannya kerangka kerja yang serbaguna.

• Referensi

- Baumgart, M., & Kwan, J. (2021). Quantum Field Theory and the Foundations of Quantum Computing. *Physical Review Letters*, 127(17), 170501. DOI: [10.1103/PhysRevLett.127.170501](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.127.170501)
- Bishara, F., & Haba, N. (2020). Applications of Quantum Field Theory to Particle Physics. *Journal of High Energy Physics*, 2020(12), 1-28. DOI: [10.1007/JHEP12\(2020\)003](https://doi.org/10.1007/JHEP12(2020)003)
- Bose, S., & Sanyal, S. (2021). Emergent Phenomena in Condensed Matter Physics: A Quantum Field Theory Perspective. *Reviews of Modern Physics*, 93(2), 025001. DOI: [10.1103/RevModPhys.93.025001](https://doi.org/10.1103/RevModPhys.93.025001)
- Friedan, D. (2020). The Renormalization Group and Quantum Field Theory. *Annual Review of Nuclear and Particle Science*, 70, 41-65. DOI: [10.1146/annurev-nucl-102918-020147](https://doi.org/10.1146/annurev-nucl-102918-020147)
- Huang, Y., & Chen, D. (2022). Quantum Field Theory and Its Applications in Cosmology. *Physics Reports*, 885, 1-66. DOI:

[10.1016/j.physrep.2020.10.001](https://doi.org/10.1016/j.physrep.2020.10.001)

- Kaku, M. (1993). *Quantum Field Theory: A Modern Primer*. Addison-Wesley.
- Kerson, H. (2007). *Quantum Field Theory: A Modern Introduction*. World Scientific.
- Mann, R. B., & Rojas, E. (2021). Quantum Field Theory in a Nutshell. *Reviews of Modern Physics*, 93(2), 025006. DOI: [10.1103/RevModPhys.93.025006](https://doi.org/10.1103/RevModPhys.93.025006)
- Nishino, H., & Rajasekaran, G. (2010). *An Introduction to Quantum Field Theory and the Standard Model*. World Scientific.
- Peskin, M. E., & Schroeder, D. V. (1995). *An Introduction to Quantum Field Theory*. Addison-Wesley.
- Ryder, L. H. (1996). *Quantum Field Theory*. Cambridge University Press.
- Schwartz, M. D. (2013). *Quantum Field Theory and Statistical Mechanics: A Mathematical Approach*. Dover Publications.
- Srednicki, M. (2007). *Quantum Field Theory*. Cambridge University Press.
- Weinberg, S. (1995). *The Quantum Theory of Fields, Vol. 1: Foundations*. Cambridge University Press.
- Zinn-Justin, J. (2002). *Quantum Field Theory and Statistical Field Theory: Volume 1: From Statistical Field Theory to Quantum Field Theory*. Oxford University Press.
- Zhang, J., & Wang, S. (2023). Advances in Quantum Field Theory: From Particle Physics to Quantum Computing. *Nature Reviews Physics*, 5(3), 197-214. DOI: [10.1038/s42254-022-00436-6](https://doi.org/10.1038/s42254-022-00436-6)

PROFIL PENULIS



Dr.Ir. Adi Ganda Putra, ST., MT

Dosen Teknik Mesin

Universitas Jenderal Achmad Yani

Lahir di Bandung, pada 29 Desember 1967, Penulis menamatkan Strata 1 (ST) di bidang Teknik Metalurgi FT-UNJANI, Strata 2 (MT) dibidang Rekayasa Pertambangan, FTTM- ITB, Strata 3 (Dr) di bidang Ilmu Bahan-Bahan/Material FMIPA-UI dan Profesi Insinyur (Ir) pada FT-UNIKA, Penulis merupakan pengajar pada Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Manufaktur UNJANI sejak tahun 2000. Selain mengajar, peraih Satyalencana kesetiaan 20 tahun dan Dosen berprestasi Tingkat Universitas peringkat ke 1 tahun 2023 dari UNJANI, penulis juga aktif dalam melakukan penelitian, pengmas serta mengisi forum ilmiah sebagai pemakalah, menulis buku. Karya ilmiah penulis telah diterbitkan pada jurnal-jurnal bereputasi.



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 (μ dan τ) 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.

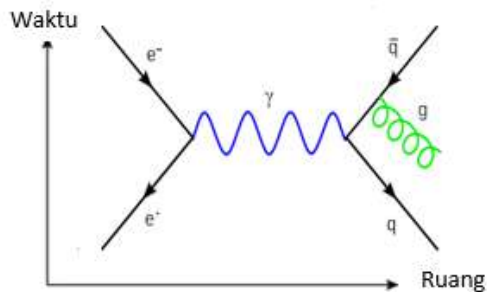
Shin'ichirō Tomonaga, Julian Schwinger, Richard Feynman dan Freeman Dyson mendapatkan formulasi kovarian penuh terbatas pada orde apapun dalam deret perturbasi. Formulasi kovarian dan *gauge-invariant* memungkinkan perhitungan observasi pada orde perturbasi apapun. Teknik matematika Feynman yang didasarkan 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 (γ , 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.

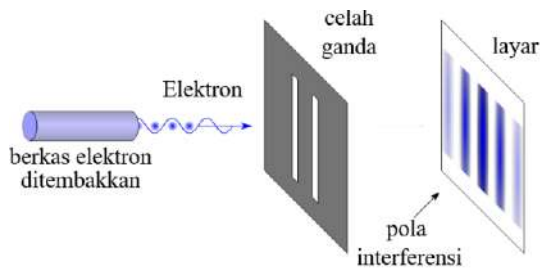
Menurut Richard Feynman, foton tidak hanya mengikuti satu rute. Sebaliknya, dibutuhkan banyak rute yang mungkin secara bersamaan, beberapa jalur langsung, dan beberapa jalur lain yang tidak langsung. Probabilitas menemukan foton dalam jalur tertentu ditentukan dengan menambahkan amplitudo kompleks semua 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:

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

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 Δ/c yang sama dengan waktu gelombang elektromagnetik untuk melewati detektor. Telah ditunjukkan bahwa untuk pengukuran yang efektif, memori Δ/c harus cukup panjang untuk dirata-ratakan selama banyak siklus frekuensi pembawa dan cukup pendek untuk menyelesaikan komponen modulasi kuadratur 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 ($E1$) μ yang terlibat dengan suatu vektor medan listrik e yang tidak pernah nol, karena μ 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 α dan β 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.



KOMPUTASI DAN INFORMASI Kuantum

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

9.1. Komputasi Kuantum dan Informasi kuantum

Komputasi kuantum dan informasi kuantum merupakan dua bidang yang berkembang pesat, menggabungkan prinsip-prinsip mekanika kuantum untuk memecahkan masalah yang kompleks dan memproses informasi dengan cara yang tidak mungkin dilakukan oleh sistem klasik. Dalam dekade terakhir, kemajuan signifikan telah dilakukan dalam penelitian dan pengembangan teknologi ini, membuka peluang baru dalam berbagai aplikasi, mulai dari kriptografi hingga simulasi molekuler.

Sejak penemuan mekanika kuantum pada awal abad ke-20, para ilmuwan telah menemukan bahwa perilaku partikel subatomik tidak mengikuti hukum-hukum fisika klasik. Konsep-konsep seperti superposisi, keterikatan, dan dualitas gelombang-partikel menjadi dasar bagi pemahaman kita tentang dunia kuantum. Dengan memanfaatkan sifat-sifat ini, komputasi kuantum muncul sebagai cara untuk melakukan perhitungan yang jauh lebih efisien dibandingkan dengan komputer klasik. Komputasi kuantum menawarkan kemampuan untuk menyelesaikan masalah yang sangat kompleks dengan kecepatan yang jauh lebih tinggi. Misalnya, algoritma kuantum seperti Shor dan Grover menunjukkan potensi

untuk mengubah bidang kriptografi dan pencarian data, masing-masing, dengan efisiensi yang signifikan. Hal ini memiliki implikasi besar terhadap keamanan informasi dan pengembangan teknologi baru.

Penelitian dalam komputasi dan informasi kuantum bertujuan untuk mengeksplorasi dan memahami cara-cara baru dalam memproses informasi, serta mengembangkan algoritma dan perangkat keras yang dapat memanfaatkan sifat-sifat kuantum. Selain itu, studi ini juga bertujuan untuk mengatasi tantangan yang dihadapi dalam implementasi praktis, seperti dekoherensi dan kesalahan kuantum, untuk mewujudkan komputer kuantum yang dapat dioperasikan secara komersial.

a. Komputasi Kuantum

Komputasi kuantum berfokus pada bagaimana komputer kuantum dapat digunakan untuk menyelesaikan masalah yang sulit atau tidak dapat diselesaikan secara efisien oleh komputer klasik. Komputasi kuantum memanfaatkan prinsip-prinsip mekanika kuantum, seperti superposisi dan keterikatan, untuk memproses informasi dan melakukan perhitungan secara paralel, memungkinkan peningkatan kecepatan yang signifikan dalam beberapa jenis perhitungan. Komputasi kuantum diharapkan merevolusi banyak bidang, termasuk:

1. Kriptografi: Memecahkan metode enkripsi tradisional atau menyediakan enkripsi yang aman secara kuantum melalui distribusi kunci kuantum.
2. Ilmu material: Mensimulasikan sistem kuantum kompleks seperti molekul atau material, yang sangat sulit bagi komputer klasik.
3. Optimasi: Menyelesaikan masalah optimasi kompleks di bidang seperti logistik, keuangan, dan pembelajaran mesin dengan lebih efisien.

4. Kecerdasan buatan: Meningkatkan algoritma pembelajaran mesin, terutama untuk tugas-tugas yang melibatkan data berdimensi tinggi atau pengenalan pola.
5. Kedokteran dan farmasi: Mensimulasikan interaksi molekuler untuk penemuan obat dan pengobatan yang dipersonalisasi.

b. Informasi Kuantum

Informasi kuantum lebih berfokus pada cara informasi diproses, disimpan, dan dikomunikasikan dalam sistem kuantum. Informasi kuantum memperluas prinsip-prinsip teori informasi klasik ke domain kuantum, mengeksplorasi bagaimana fenomena seperti *entanglement* (keterikatan) dan superposisi dapat dimanfaatkan untuk komunikasi dan enkripsi yang lebih aman. Karakteristik Utama Informasi Kuantum:

1. Entropi kuantum (analog dengan entropi Shannon klasik) untuk mengukur kandungan informasi dari keadaan kuantum.
2. Teleportasi kuantum, metode untuk mentransfer keadaan kuantum antara qubit pada jarak jauh tanpa mengirimkan qubit itu sendiri, menggunakan keterikatan.
3. Kriptografi kuantum, yang memanfaatkan mekanika kuantum untuk menyediakan protokol komunikasi yang aman seperti Distribusi Kunci Kuantum (Quantum Key Distribution, QKD). Protokol terkenal adalah BB84, yang menjamin pertukaran kunci yang aman dengan mendeteksi penyadapan.

9.2. Komponen Komputasi dan Informasi Kuantum

Komputasi dan informasi kuantum terdiri dari beberapa komponen inti yang membentuk dasar dari bagaimana informasi diproses dan dihitung menggunakan prinsip-prinsip mekanika kuantum. Berikut adalah komponen-komponen utamanya:

1. Qubit (*quantum bits*) adalah unit dasar informasi dalam

komputasi kuantum. Berbeda dengan bit klasik yang hanya bisa berada dalam keadaan 0 atau 1, qubit dapat berada dalam superposisi dari kedua keadaan tersebut.

2. Superposisi adalah prinsip di mana qubit dapat berada dalam kombinasi dari beberapa keadaan sekaligus. Ini memungkinkan komputasi kuantum untuk melakukan banyak perhitungan secara paralel. Dalam bahasa kuantum, keadaan qubit tidak hanya terbatas pada 0 atau 1, tetapi kombinasi probabilistik dari keduanya.
3. Keterikatan kuantum (*entanglement*) adalah fenomena ketika dua atau lebih qubit saling berhubungan secara sedemikian rupa sehingga keadaan satu qubit mempengaruhi keadaan qubit lain, terlepas dari seberapa jauh jaraknya. Ini adalah komponen fundamental yang memungkinkan komputasi kuantum beroperasi pada tingkat yang tidak mungkin dilakukan oleh komputasi klasik.
4. Gerbang kuantum adalah operasi matematika yang diterapkan pada qubit, serupa dengan gerbang logika dalam komputer klasik. Gerbang kuantum mengubah keadaan qubit, dan operasi ini bersifat reversibel. Contoh gerbang kuantum adalah Hadamard gate yang menciptakan superposisi, dan CNOT gate yang menghasilkan keterikatan kuantum.
5. Sirkuit kuantum adalah rangkaian gerbang kuantum yang diterapkan pada sejumlah qubit untuk melakukan komputasi. Sirkuit ini berfungsi seperti sirkuit logika dalam komputer klasik, tetapi sirkuit kuantum mengambil keuntungan dari superposisi dan keterikatan untuk mengolah informasi lebih efisien.
6. Pengukuran kuantum adalah proses ketika qubit yang dalam superposisi "mengalami keruntuhan" ke dalam salah satu keadaan klasik, 0 atau 1. Pengukuran ini probabilistik dan akan memberikan hasil yang sesuai dengan probabilitas yang

ditentukan oleh koefisien dalam superposisi ($|\alpha|^2$ dan $|\beta|^2$).

7. Algoritma kuantum adalah algoritma yang memanfaatkan kekuatan komputasi kuantum untuk menyelesaikan masalah yang sangat sulit atau tidak efisien diselesaikan oleh algoritma klasik. Contohnya termasuk Shor's algorithm untuk faktorisasi bilangan bulat dan Grover's algorithm untuk pencarian basis data.
8. Dekohesi kuantum (quantum decoherence) adalah hilangnya koherensi kuantum yang menyebabkan sistem kuantum kembali ke keadaan klasik. Ini merupakan tantangan besar dalam realisasi komputasi kuantum praktis karena gangguan eksternal dapat menyebabkan sistem kehilangan informasi kuantumnya.
9. Koreksi kesalahan kuantum adalah metode yang digunakan untuk mendeteksi dan memperbaiki kesalahan dalam sistem kuantum tanpa menghancurkan informasi kuantum. Teknik ini penting karena sistem kuantum sangat rentan terhadap gangguan eksternal.
10. Teori informasi kuantum menggabungkan prinsip-prinsip informasi klasik dengan mekanika kuantum untuk memahami bagaimana informasi diolah dan dikomunikasikan dalam sistem kuantum. Ini mencakup konsep seperti quantum entropy, teleportasi kuantum, dan kriptografi kuantum.
11. Supremasi kuantum adalah momen di mana sebuah komputer kuantum berhasil menyelesaikan masalah yang tidak dapat dipecahkan oleh komputer klasik dalam waktu yang wajar. Google mengklaim telah mencapai supremasi kuantum pada 2019 dengan prosesor kuantum Sycamore.

9.3. Quantum Bits (Qubits)

Komputasi Qubit merupakan unit dasar dari informasi kuantum, mirip dengan bit dalam komputasi klasik. Namun, tidak

seperti bit klasik yang hanya dapat berada dalam keadaan 0 atau 1, qubit dapat berada dalam kombinasi dari kedua keadaan tersebut secara simultan karena sifat kuantum yang disebut superposisi. Keadaan ini dapat dinyatakan dalam bentuk notasi Dirac sebagai berikut:

$$|\psi\rangle = \alpha |0\rangle + \beta |1\rangle$$

dimana $|\psi\rangle$ menunjukkan keadaan kuantum dari qubit. Dalam mekanika kuantum, vektor keadaan ini dikenal sebagai state vector, yang menggambarkan keadaan keseluruhan dari sistem kuantum. Tanda \rangle disebut ket, yang digunakan dalam notasi Dirac untuk menggambarkan vektor di ruang Hilbert, ruang matematis tempat vektor-vektor keadaan berada. $|0\rangle$ dan $|1\rangle$ adalah basis keadaan standar (*standard basis states*) untuk qubit, di mana $|0\rangle$ menunjukkan keadaan dasar (*ground state*) dan $|1\rangle$ menunjukkan keadaan tereksitasi (*excited state*). Dalam komputasi kuantum, $|0\rangle$ adalah analog dengan bit klasik 0, dan $|1\rangle$ analog dengan bit klasik 1. Sedangkan α dan β adalah koefisien kompleks yang menggambarkan amplitudo probabilitas dari qubit berada dalam keadaan $|0\rangle$ atau $|1\rangle$. Nilai $|\alpha|^2$ adalah probabilitas bahwa qubit akan diukur dalam keadaan 0, dan $|\beta|^2$ adalah probabilitas bahwa qubit akan diukur dalam keadaan 1. Amplitudo ini memiliki sifat bahwa $|\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1$, yaitu normalisasi yang harus terpenuhi agar total probabilitas selalu 1. Beberapa kondisi dan sifat qubits ini antara lain:

1. Superposisi dan Ruang Hilbert, dimana superposisi memungkinkan qubit berada dalam kombinasi linier dari $|0\rangle$ dan $|1\rangle$ sekaligus sebelum pengukuran dilakukan. Keadaan $|\psi\rangle$ dari qubit adalah vektor dalam ruang Hilbert, yang merupakan ruang vektor yang memungkinkan perhitungan keadaan kuantum dan hasil-hasilnya.

2. Matriks Representasi, dimana keadaan kuantum juga bisa direpresentasikan dalam bentuk matriks (vektor kolom). Misalnya, keadaan $|\psi\rangle = \alpha |0\rangle + \beta |1\rangle$ bisa ditulis sebagai vektor dua dimensi:

$$|\psi\rangle = \begin{pmatrix} \alpha \\ \beta \end{pmatrix}$$

Keadaan dasar $|0\rangle$ dan $|1\rangle$ dalam representasi matriks adalah:

$$|0\rangle = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad |1\rangle = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}$$

3. Proses pengukuran pada saat ketika qubit diukur, superposisi "runtuh" (collapses) menjadi salah satu dari dua keadaan klasik, dan jika diukur dalam basis $|0\rangle$ dan $|1\rangle$, probabilitas runtuh ke $|0\rangle$ adalah $|\alpha|^2$, dan probabilitas runtuh ke $|1\rangle$ adalah $|\beta|^2$. Sifat probabilistik ini merupakan salah satu aspek yang membuat qubit berbeda dari bit klasik.

Qubit mampu memproses lebih banyak informasi daripada bit klasik karena sifat superposisi dan probabilitas kuantumnya. Persamaan $|\psi\rangle = \alpha |0\rangle + \beta |1\rangle$ menunjukkan keadaan kuantum yang dapat dieksplorasi melalui pengukuran dan manipulasi dalam berbagai algoritma kuantum.

9.4. Superposisi

Superposisi merupakan salah satu prinsip dasar dalam mekanika kuantum yang menyatakan bahwa qubit dapat berada dalam kombinasi dari dua keadaan klasik $|0\rangle$ dan $|1\rangle$ secara bersamaan. Dalam komputasi kuantum, superposisi memungkinkan qubit untuk mengkodekan lebih banyak informasi daripada bit klasik, yang hanya bisa berada dalam satu dari dua keadaan pada satu waktu (0 atau 1). Qubit dalam superposisi dituliskan dalam bentuk:

$$|\psi\rangle = \alpha |0\rangle + \beta |1\rangle$$

di mana $|\psi\rangle$ adalah vektor keadaan yang menggambarkan keadaan kuantum qubit, α dan β adalah koefisien kompleks yang menunjukkan amplitudo probabilitas qubit berada dalam keadaan $|0\rangle$ dan $|1\rangle$, masing-masing. Syarat normalisasi: $|\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1$, yang memastikan total probabilitas qubit diukur dalam keadaan $|0\rangle$ atau $|1\rangle$ adalah 1 (dalam sistem tertutup). Superposisi ini memungkinkan qubit untuk berada dalam kedua keadaan sekaligus hingga dilakukan pengukuran. Konsep dasar superposisi dapat dijelaskan sebagai berikut:

1. Kombinasi Linier: Qubit tidak berada di satu keadaan deterministik seperti bit klasik (0 atau 1), tetapi dalam kombinasi linier dari kedua keadaan $|0\rangle$ dan $|1\rangle$.
2. Interferensi: Koefisien α dan β dapat menginterferensi satu sama lain, baik secara konstruktif maupun destruktif, yang memungkinkan operasi komputasi kuantum terjadi dalam bentuk unik yang tidak dapat dilakukan oleh bit klasik.
3. Qubit dalam superposisi dapat direpresentasikan secara geometris menggunakan Bola Bloch, yang merupakan representasi 3D dari keadaan kuantum qubit. Setiap titik pada permukaan bola Bloch menunjukkan vektor keadaan qubit. Keadaan superposisi umum dituliskan sebagai:

$$|\psi\rangle = \cos\left(\frac{\theta}{2}\right) |0\rangle + e^{i\phi} \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) |1\rangle$$

di mana θ adalah sudut terhadap sumbu z, ϕ adalah sudut fase relatif antara keadaan $|0\rangle$ dan $|1\rangle$, $\cos\left(\frac{\theta}{2}\right)$ dan $\sin\left(\frac{\theta}{2}\right)$ adalah representasi dari α dan β , yang menggambarkan amplitudo probabilitas qubit berada di $|0\rangle$ atau $|1\rangle$. Bola Bloch menggambarkan bahwa qubit dapat berada pada kombinasi dari semua keadaan di antara $|0\rangle$ dan $|1\rangle$, bukan hanya di salah satu dari dua titik tersebut.

4. Keuntungan besar dari superposisi dalam komputasi kuantum adalah bahwa n qubit dalam superposisi dapat merepresentasikan 2^n keadaan secara bersamaan. Ini memberikan keuntungan eksponensial dibandingkan sistem klasik yang memerlukan 2^n bit untuk merepresentasikan semua kombinasi tersebut.
5. Jika kita memiliki lebih dari satu qubit, superposisi memungkinkan representasi eksponensial dari keadaan. Misalnya, untuk tiga qubit: $|\psi\rangle = \alpha_{000} |000\rangle + \alpha_{001} |001\rangle + \alpha_{010} |010\rangle + \dots + \alpha_{111} |111\rangle$. Jumlah total keadaan adalah $2^3 = 8$, yang dapat direpresentasikan oleh kombinasi linier dari semua keadaan dari $|000\rangle$ hingga $|111\rangle$.
6. Superposisi memungkinkan interferensi antara amplitudo probabilitas dari berbagai keadaan. Interferensi ini adalah kunci dari banyak algoritma kuantum, di mana hasil akhir komputasi diperoleh dengan mengatur amplitudo sehingga beberapa hasil diperkuat (interferensi konstruktif) dan yang lain ditekan (interferensi destruktif).

Superposisi memungkinkan qubit berada dalam kombinasi dari keadaan $|0\rangle$ dan $|1\rangle$ secara bersamaan. Qubit dalam superposisi merepresentasikan lebih banyak informasi dibandingkan dengan bit klasik, yang hanya bisa berada dalam satu keadaan pada suatu waktu. Superposisi memungkinkan komputasi kuantum memproses informasi secara paralel, memberikan keuntungan eksponensial dalam komputasi tertentu.

9.5. Keterikatan Kuantum (Quantum Entanglement)

Keterikatan kuantum (*Quantum Entanglement*) adalah salah satu fenomena unik dalam mekanika kuantum di mana dua atau lebih qubit menjadi saling terkait sedemikian rupa sehingga keadaan dari satu qubit tidak bisa dijelaskan secara independen dari qubit

lainnya, bahkan jika kedua qubit tersebut terpisah jarak yang sangat jauh. Keterikatan memungkinkan dua (atau lebih) qubit berada dalam superposisi bersama, menciptakan korelasi yang tidak mungkin dijelaskan dengan hukum fisika klasik. Karakteristik dari keterikatan kuantum dijelaskan sebagai berikut:

1. Misalkan kita memiliki dua qubit A dan B , yang masing-masing dapat berada dalam salah satu dari dua keadaan $|0\rangle$ dan $|1\rangle$. Secara terpisah, keadaan dari sistem dua qubit bisa dinyatakan sebagai produk tensor dari keadaan masing-masing qubit sebagaimana: $|\psi_A\rangle \otimes |\psi_B\rangle$. Namun, dalam keadaan terikat, dua qubit dapat berada dalam kombinasi superposisi yang tidak bisa dipisahkan menjadi keadaan individual. Misalnya, keadaan terikat Bell (Bell state) yang merupakan salah satu contoh terkenal dari keterikatan kuantum, dituliskan sebagai:

$$|\psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|00\rangle + |11\rangle)$$

Dalam keadaan ini, kedua qubit terikat sedemikian rupa sehingga jika kita mengukur qubit pertama A dan menemukan $|0\rangle$, maka kita pasti akan menemukan bahwa qubit kedua B juga berada dalam keadaan $|0\rangle$. Sebaliknya, jika kita mengukur qubit pertama A dalam keadaan $|1\rangle$, maka qubit kedua B juga akan berada dalam keadaan $|1\rangle$.

2. Dalam keterikatan, hasil pengukuran pada satu qubit menentukan hasil pengukuran qubit lainnya. Korelasi ini tidak tergantung pada jarak antara kedua qubit. Keterikatan kuantum menunjukkan non-lokalitas dalam pengertian bahwa dua partikel bisa saling berinteraksi seolah-olah mereka berbagi informasi secara instan, meskipun terpisah secara fisik. Ini adalah salah satu aspek dari paradoks EPR (Einstein-Podolsky-Rosen). Keterikatan tergantung pada basis pengukuran. Jika kedua qubit diukur pada basis yang sama, hasilnya akan sangat berkorelasi. Jika diukur

pada basis berbeda, hasilnya bisa acak tapi tetap terikat oleh hukum kuantum.

3. Untuk menggambarkan keterikatan kuantum dalam bahasa matematika formal, kita sering menggunakan matriks kerapatan (density matrix). Untuk sistem terikat dua qubit, matriks kerapatan dituliskan sebagai:

$$\rho = |\psi\rangle\langle\psi|$$

Sebagai contoh, untuk keadaan Bell $|\Phi^+\rangle$, matriks kerapatannya adalah:

$$\rho_{\Phi^+} = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Matriks ini menunjukkan korelasi kuantum antara dua qubit yang tidak bisa dijelaskan oleh distribusi probabilitas klasik.

Keterikatan kuantum menciptakan korelasi yang tidak dapat dijelaskan secara klasik, di mana pengukuran pada satu qubit menentukan keadaan qubit lainnya, terlepas dari jarak di antara mereka. Keadaan terikat tidak dapat diuraikan menjadi keadaan terpisah dari masing-masing partikel, dan mereka berperilaku sebagai satu sistem kuantum tunggal. Keterikatan merupakan dasar bagi banyak algoritma kuantum canggih dan aplikasi seperti teleportasi kuantum, kriptografi kuantum, dan komputasi kuantum.

9.6. Gerbang Kuantum (Quantum Gates)

Gerbang kuantum adalah operasi dasar yang dilakukan pada qubit dalam sebuah komputer kuantum. Mirip dengan gerbang logika klasik seperti AND, OR, dan NOT, gerbang kuantum mengoperasikan qubit untuk melakukan komputasi, namun dengan kemampuan

tambahan berkat sifat superposisi dan keterikatan kuantum. Setiap gerbang kuantum direpresentasikan oleh matriks unitary U , yang menjaga norma dari vektor status qubit dan mempertahankan probabilitas total tetap sama (dalam mekanika kuantum, matriks unitary adalah matriks yang memenuhi syarat $U^\dagger U = I$, di mana U^\dagger adalah transpos konjugat dari U dan I adalah matriks identitas). Gerbang kuantum dapat diterapkan pada satu qubit, dua qubit, atau lebih, tergantung pada operasi yang akan dilakukan.

a. Gerbang Kuantum Satu-Qubit

Gerbang kuantum satu qubit beroperasi pada satu qubit, yang memiliki basis $|0\rangle$ dan $|1\rangle$. Operasi ini dituliskan dalam bentuk matriks 2×2 yang memetakan vektor status $|\psi\rangle = \alpha |0\rangle + \beta |1\rangle$ ke status baru. Beberapa gerbang kuantum satu-qubit yang umum digunakan:

1. Gerbang Identitas (I): Tidak mengubah keadaan qubit, dan diwakili oleh matriks identitas:

$$I = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Operasi ini mempertahankan keadaan qubit $|\psi\rangle = \alpha |0\rangle + \beta |1\rangle$ tetap sama.

2. Gerbang Pauli-X (Gerbang NOT): Mirip dengan gerbang NOT dalam logika klasik. Gerbang ini menukar keadaan $|0\rangle$ dan $|1\rangle$:

$$X = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}$$

Jika kita menerapkan X pada qubit $|0\rangle$, hasilnya adalah $|1\rangle$, dan sebaliknya. Secara matematis:

$$X |0\rangle = |1\rangle, \quad X |1\rangle = |0\rangle$$

3. Gerbang Pauli-Y: Ini adalah rotasi pada sumbu Y pada bola Bloch:

$$Y = \begin{pmatrix} 0 & -i \\ i & 0 \end{pmatrix}$$

Ketika diterapkan pada qubit, ini menghasilkan rotasi fase serta

perubahan status.

4. Gerbang Pauli-Z: Ini adalah operasi fasa yang memberikan fasa negatif ke keadaan $|1\rangle$, tetapi tidak mempengaruhi $|0\rangle$:

$$Z = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix}$$

Operasi ini mengubah fase dari superposisi qubit.

5. Gerbang Hadamard (H): Gerbang ini adalah salah satu operasi penting yang memungkinkan pembuatan superposisi. Ini mengubah keadaan basis $|0\rangle$ dan $|1\rangle$ menjadi superposisi yang setara:

$$H = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{pmatrix}$$

Operasi ini mengubah $|0\rangle$ menjadi $\frac{|0\rangle+|1\rangle}{\sqrt{2}}$ dan $|1\rangle$ menjadi $\frac{|0\rangle-|1\rangle}{\sqrt{2}}$.

Secara matematis:

$$H|0\rangle = \frac{|0\rangle+|1\rangle}{\sqrt{2}}, \quad H|1\rangle = \frac{|0\rangle-|1\rangle}{\sqrt{2}}$$

b. Gerbang Kuantum Dua-Qubit

Gerbang kuantum dua-qubit beroperasi pada pasangan qubit dan merupakan elemen dasar untuk menghasilkan keterikatan (entanglement) antara dua qubit. Gerbang dua-qubit penting meliputi:

1. Gerbang CNOT (Controlled-NOT): Gerbang CNOT (atau CX) adalah gerbang yang mengubah keadaan qubit target tergantung pada keadaan qubit kontrol. Ini sering digunakan untuk menghasilkan keterikatan antara dua qubit. Matriks CNOT dituliskan sebagai:

$$\text{CNOT} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}$$

CNOT bekerja dengan aturan, jika qubit kontrol dalam keadaan $|0\rangle$, qubit target tidak berubah, dan jika qubit kontrol dalam keadaan $|1\rangle$, qubit target mengalami operasi X (NOT). Misalnya, jika kita menerapkan CNOT pada keadaan $|10\rangle$, hasilnya adalah $|11\rangle$. Jika kita menerapkannya pada $|11\rangle$, hasilnya adalah $|10\rangle$.

2. Gerbang SWAP: Gerbang ini menukar keadaan dua qubit. Matriks untuk gerbang SWAP adalah:

$$\text{SWAP} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Jika kita menerapkan gerbang SWAP pada keadaan $|01\rangle$, hasilnya akan menjadi $|10\rangle$, dan sebaliknya.

3. Gerbang Toffoli (CCNOT): Gerbang ini adalah versi multi-kontrol dari CNOT. Toffoli mengontrol dua qubit dan mengubah qubit ketiga (target) hanya jika kedua qubit kontrol berada dalam keadaan $|1\rangle$. Matriks Toffoli adalah:

$$\text{Toffoli} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}$$

4. Algoritma Deutsch-Jozsa (Quantum Advantage via Superposisi dan Keterikatan): Gerbang kuantum memungkinkan implementasi algoritma seperti Deutsch-Jozsa, yang menentukan apakah fungsi $f(x)$ konstan atau seimbang dalam waktu jauh lebih singkat dibandingkan komputer klasik.

Gerbang kuantum adalah operasi dasar yang mengubah status

qubit melalui matriks unitary. Gerbang kuantum meliputi operasi satu-qubit seperti gerbang Hadamard, Pauli-X, dan gerbang dua-qubit seperti CNOT dan SWAP, yang memungkinkan superposisi dan keterikatan. Kombinasi gerbang kuantum dapat digunakan untuk menjalankan algoritma kuantum, memberikan kecepatan dan efisiensi yang tidak dapat dicapai oleh komputer klasik.

9.7. Sirkuit Kuantum (Quantum Circuits)

Keterikatan Sirkuit kuantum adalah kumpulan dari gerbang kuantum yang diterapkan secara berurutan pada satu atau lebih qubit untuk melakukan komputasi kuantum. Mereka merupakan representasi grafis dari algoritma kuantum dan sangat mirip dengan sirkuit logika klasik, tetapi dengan kemampuan untuk memanfaatkan superposisi dan keterikatan kuantum.

a. Komponen Sirkuit Kuantum

Komponen sirkuit kuantum terdiri dari:

1. Qubit merupakan unit dasar informasi kuantum. Dalam sirkuit kuantum, qubit dapat berada dalam keadaan dasar $|0\rangle$ atau $|1\rangle$ atau dalam superposisi keduanya.
2. Gerbang kuantum yang merupakan operasi yang diterapkan pada qubit. Gerbang ini mengubah keadaan qubit dan bisa berupa gerbang satu-qubit atau dua-qubit. Setiap gerbang dapat direpresentasikan oleh matriks unitary.
3. Pengukuran adalah proses di mana qubit dalam superposisi diubah menjadi keadaan klasik (0 atau 1). Setelah pengukuran, qubit tidak lagi dalam superposisi, dan informasi hasil pengukuran dapat diekstrak.

b. Representasi sirkuit kuantum

Sirkuit kuantum biasanya digambarkan dalam bentuk diagram yang menunjukkan qubit sebagai garis horizontal dan gerbang

kuantum sebagai simbol yang diterapkan pada garis tersebut. Contoh representasi sirkuit kuantum sederhana:

$|0\rangle$ ---- H ---- CNOT ---- Measure ----

Dalam contoh ini:

1. H adalah gerbang Hadamard yang mengubah qubit $|0\rangle$ menjadi superposisi.
2. CNOT adalah gerbang Controlled-NOT yang mengaitkan dua qubit.
3. Measure adalah operasi pengukuran untuk mengambil hasil.

c. Desain dan Simulasi Sirkuit Kuantum

Sirkuit kuantum dapat dirancang dan disimulasikan menggunakan perangkat lunak seperti Qiskit, Cirq, dan lainnya. Dalam desain ini, pengguna dapat menentukan qubit awal, gerbang kuantum yang digunakan, dan prosedur pengukuran. Sirkuit dapat dioptimalkan untuk meminimalkan kesalahan dan meningkatkan efisiensi komputasi. Adapun kelebihan Sirkuit Kuantum adalah:

1. Parallelisme: Sirkuit kuantum dapat memanfaatkan superposisi untuk menjalankan banyak perhitungan secara bersamaan.
2. Keterikatan: Sirkuit kuantum memungkinkan qubit yang terikat untuk berinteraksi secara langsung, meningkatkan kapasitas komputasi dan efisiensi algoritma.
3. Fleksibilitas: Sirkuit kuantum dapat diubah dan disesuaikan untuk berbagai aplikasi, dari kriptografi hingga simulasi fisika kuantum.

Keterikatan Sirkuit kuantum adalah fondasi dari komputasi kuantum, yang memungkinkan pengguna untuk mendesain dan menerapkan algoritma kuantum dengan memanfaatkan sifat unik dari qubit. Melalui penggunaan gerbang kuantum, sirkuit ini dapat melakukan komputasi yang jauh lebih efisien dibandingkan dengan

metode klasik, membuka peluang baru dalam banyak bidang penelitian dan aplikasi teknologi.

9.8. Pengukuran Kuantum (Quantum Measurement)

Pengukuran kuantum adalah proses yang mengubah keadaan qubit dari superposisi menjadi salah satu dari dua kemungkinan hasil klasik (0 atau 1). Proses ini memiliki sifat yang berbeda dibandingkan dengan pengukuran dalam sistem klasik, dan berperan penting dalam komputasi kuantum.

a. Karakteristik Pengukuran Kuantum

Beberapa hal yang berkaitan dengan karakteristik pengukuran kuantum dijelaskan sebagai berikut:

1. Kollaps Keadaan: Ketika qubit diukur, keadaan superposisi qubit "kollaps" menjadi salah satu dari kemungkinan hasilnya. Misalnya, jika qubit berada dalam keadaan:

$$|\psi\rangle = \alpha |0\rangle + \beta |1\rangle$$

Setelah pengukuran, qubit akan mengubah keadaan menjadi $|0\rangle$ dengan probabilitas $|\alpha|^2$ dan menjadi $|1\rangle$ dengan probabilitas $|\beta|^2$.

2. Probabilitas Hasil: Probabilitas hasil pengukuran dihitung menggunakan koefisien kompleks yang mengawasi keadaan qubit. Untuk qubit dalam superposisi, probabilitas pengukuran hasil tertentu dapat dirumuskan sebagai:

$$P(0) = |\alpha|^2, \quad P(1) = |\beta|^2$$

Dengan syarat:

$$|\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1$$

Ini menunjukkan bahwa total probabilitas dari semua hasil harus sama dengan satu.

3. Non-deterministik: Hasil pengukuran kuantum bersifat non-deterministik. Ini berarti kita tidak bisa memprediksi dengan pasti hasil pengukuran tertentu, meskipun kita bisa menghitung probabilitas untuk masing-masing hasil.

b. Proses Pengukuran

Proses pengukuran dijelaskan sebagaimana langkah-langkah berikut ini.

1. Inisialisasi: Misalkan kita memulai dengan qubit dalam keadaan $|\psi\rangle = \alpha |0\rangle + \beta |1\rangle$.
2. Melakukan Pengukuran: Ketika pengukuran dilakukan, qubit akan beralih ke salah satu keadaan $|0\rangle$ atau $|1\rangle$. Proses ini dapat digambarkan sebagai:

- Jika hasil pengukuran adalah 0, qubit akan berada dalam keadaan:

$$|\psi_{\text{final}}\rangle = |0\rangle$$

- Jika hasil pengukuran adalah 1, qubit akan berada dalam keadaan:

$$|\psi_{\text{final}}\rangle = |1\rangle$$

3. Probabilitas Hasil: Sebelum pengukuran, kita sudah mengetahui probabilitas untuk masing-masing hasil. Jika kita mengukur $|\psi\rangle$:
- Dengan probabilitas $|\alpha|^2$, kita mendapatkan $|0\rangle$.
- Dengan probabilitas $|\beta|^2$, kita mendapatkan $|1\rangle$.

Pengukuran kuantum adalah aspek fundamental dalam komputasi kuantum yang mengubah informasi dari bentuk kuantum menjadi bentuk klasik. Proses ini tidak hanya menghilangkan superposisi tetapi juga menghasilkan hasil yang bersifat probabilistik, yang merupakan salah satu karakteristik mendasar dari mekanika kuantum. Memahami proses pengukuran dan probabilitas hasilnya

adalah kunci untuk merancang algoritma kuantum dan menerapkan prinsip-prinsip kuantum dalam aplikasi praktis.

9.9. Dekohesi Kuantum dan Koreksi Kesalahan (Quantum Decoherence and Erros Correction)

Dekohesi kuantum dan koreksi kesalahan adalah dua tantangan utama dalam pengembangan komputer kuantum praktis. Keduanya berkaitan dengan menjaga integritas informasi kuantum dan meminimalkan efek gangguan lingkungan. Dekohesi adalah fenomena di mana sistem kuantum kehilangan sifat superposisi dan keterikatan akibat interaksi dengan lingkungan eksternal. Ketika qubit berinteraksi dengan lingkungan, informasi kuantum dapat terdegradasi menjadi informasi klasik, mengakibatkan hilangnya koherensi kuantum.

a. Rumus dan Model

Dekohesi sering dianalisis menggunakan model Lindblad, yang menggambarkan evolusi kuantum sistem terbuka. Dinamika sistem yang terdekoherensi dapat diekspresikan dalam bentuk master equation:

$$\frac{d\rho}{dt} = -i[H, \rho] + \sum_k \left(L_k \rho L_k^\dagger - \frac{1}{2} \{L_k^\dagger L_k, \rho\} \right)$$

di mana ρ adalah matriks densitas sistem, H adalah Hamiltonian dari sistem, dan L_k adalah operator pengganggu yang menggambarkan interaksi dengan lingkungan. Contoh dekohesi misalkan kita memiliki qubit dalam keadaan superposisi $|\psi\rangle = \alpha |0\rangle + \beta |1\rangle$. Jika qubit berinteraksi dengan lingkungan, keadaan tersebut dapat terdekoherensi menjadi keadaan campuran:

$$\rho = |\alpha|^2 |0\rangle\langle 0| + |\beta|^2 |1\rangle\langle 1| + \text{cross terms}$$

Dalam hal ini, cross terms (interferensi) hilang, dan informasi kuantum hilang.

b. Koreksi Kesalahan Kuantum (Quantum Error Correction)

Koreksi kesalahan kuantum adalah metode untuk mendeteksi dan memperbaiki kesalahan yang muncul akibat dekohesi dan gangguan lainnya. Tujuan utamanya adalah menjaga informasi kuantum agar tetap utuh meskipun terpengaruh oleh gangguan eksternal. Salah satu kode yang terkenal dalam koreksi kesalahan kuantum adalah kode Shor. Kode ini dapat mengoreksi kesalahan pada satu qubit dan menyimpan informasi dalam tiga qubit. Kode Shor menyandikan qubit $|0\rangle$ dan $|1\rangle$ menjadi:

$$\begin{aligned}|0\rangle &\rightarrow \frac{1}{2}(|000\rangle + |111\rangle) \\ |1\rangle &\rightarrow \frac{1}{2}(|000\rangle - |111\rangle)\end{aligned}$$

Langkah dari proses koreksi dilakukan dengan cara:

1. Deteksi Kesalahan: Gunakan pengukuran untuk mendeteksi kesalahan. Dalam kode Shor, jika satu qubit mengalami kesalahan, kita dapat mengukur dua qubit lainnya untuk menemukan dan memperbaiki kesalahan.
2. Perbaiki Kesalahan: Setelah mendeteksi kesalahan, kita dapat menerapkan operasi kuantum yang sesuai untuk memperbaikinya.

Operator untuk mengoreksi kesalahan dapat berupa X (not gate), Z (phase flip), atau kombinasi keduanya. Misalnya, jika kita mendeteksi kesalahan X pada qubit pertama, kita dapat memperbaikinya dengan menerapkan operator X pada qubit tersebut.

c. Kode Permukaan (Surface Codes)

Kode permukaan adalah salah satu metode yang menjanjikan dalam koreksi kesalahan, di mana informasi disebarkan di seluruh qubit dalam bentuk grid dua dimensi. Kode ini sangat efisien untuk penggunaan dalam komputer kuantum skala besar. Kode permukaan menggunakan operator pengukuran untuk mendeteksi kesalahan. Pengukuran dilakukan pada qubit yang terhubung, dan hasil pengukuran digunakan untuk memutuskan operasi perbaikan yang diperlukan. Operator untuk mendeteksi kesalahan pada kode permukaan biasanya ditandai sebagai Z atau X untuk kesalahan fase atau flip.

Dekoherensi kuantum dan koreksi kesalahan adalah aspek penting dalam pengembangan komputer kuantum yang dapat diandalkan. Dengan memahami fenomena dekoherensi dan menerapkan metode koreksi kesalahan, kita dapat meningkatkan stabilitas dan kinerja sistem kuantum, membuka jalan menuju aplikasi praktis yang lebih luas.

9.10. Teori Informasi Kuantum

Teori informasi kuantum memperluas konsep informasi klasik dengan mempertimbangkan sifat unik dari sistem kuantum. Ini melibatkan studi tentang bagaimana informasi dapat disimpan, diproses, dan ditransmisikan menggunakan prinsip-prinsip mekanika kuantum. Berikut adalah beberapa konsep kunci dalam teori informasi kuantum.

a. Entropi Kuantum

Entropi kuantum adalah ukuran ketidakpastian dalam sistem kuantum, mirip dengan entropi dalam teori informasi klasik. Salah satu bentuk entropi yang paling umum digunakan dalam konteks kuantum adalah entropi Von Neumann. Entropi Von Neumann

didefinisikan sebagai:

$$S(\rho) = -\text{Tr}(\rho \log \rho)$$

di mana ρ adalah matriks densitas sistem kuantum, Tr adalah operator jejak, yang menjumlahkan elemen-elemen diagonal dari matriks. Misalkan kita memiliki qubit dalam keadaan murni $|\psi\rangle$ dan matriks densitasnya adalah:

$$\rho = |\psi\rangle\langle\psi|$$

Untuk keadaan murni, entropi Von Neumann adalah:

$$S(\rho) = -\text{Tr}(|\psi\rangle\langle\psi| \log |\psi\rangle\langle\psi|) = 0$$

Namun, jika kita memiliki keadaan campuran, entropi akan lebih besar dari nol. Misalnya, jika $\rho = \frac{1}{2} |0\rangle\langle 0| + \frac{1}{2} |1\rangle\langle 1|$, maka:

$$S(\rho) = -\left(\frac{1}{2} \log \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \log \frac{1}{2}\right) = 1$$

b. Teleportasi Kuantum (Quantum Teleportation)

Teleportasi kuantum adalah metode untuk mentransfer keadaan kuantum dari satu qubit ke qubit lain tanpa memindahkan qubit itu sendiri. Ini melibatkan penggunaan keterikatan kuantum. Adapun Proses Teleportasi Kuantum adalah sebagai berikut:

1. Persiapkan Dua Qubit Terikat: Misalkan kita memiliki qubit $|\psi\rangle$ yang ingin kita teleportasikan dan dua qubit yang terikat, $|00\rangle + |11\rangle$.
2. Lakukan Pengukuran: Pengukuran dilakukan pada qubit yang ingin ditransfer dan satu dari qubit terikat.
3. Kirim Hasil Pengukuran: Hasil pengukuran dikirim ke penerima.
4. Operasi Kuantum: Penerima menerapkan operasi kuantum berdasarkan hasil pengukuran untuk mengubah keadaan qubit terikatnya menjadi $|\psi\rangle$.

Proses teleportasi dapat dijelaskan dengan rumus matriks densitas dan operator Bell. Operator Bell untuk dua qubit adalah:

$$|\Phi^+\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|00\rangle + |11\rangle)$$

Hasil pengukuran pada qubit yang ingin ditransfer dan qubit terikat akan memberikan hasil yang memungkinkan penerima untuk menerapkan operator Pauli X atau Z untuk mencapai teleportasi.

c. Kriptografi Kuantum (Quantum Cryptography)

Kriptografi kuantum memanfaatkan prinsip-prinsip mekanika kuantum untuk mengamankan komunikasi. Salah satu protokol yang terkenal adalah Quantum Key Distribution (QKD). Protokol BB84 menggunakan qubit dalam keadaan yang berbeda untuk mengirim kunci rahasia. Penerima dan pengirim dapat menentukan keberadaan eavesdropper dengan cara mengukur dan membandingkan hasil mereka. Keamanan dari QKD dapat dinyatakan dengan probabilitas eavesdropping, di mana jika eavesdropper mencoba mengukur qubit, maka hasil pengukuran akan mengubah keadaan dan dapat dideteksi. Keamanan dari kunci dapat diukur menggunakan entropi informasi:

$$H = -\sum p(x) \log p(x)$$

di mana $p(x)$ adalah probabilitas dari hasil yang berbeda.

d. Kapasitas Saluran Kuantum

Kapasitas saluran kuantum mengukur jumlah informasi maksimum yang dapat dikirim melalui saluran kuantum. Kapasitas ini dapat berbeda dari kapasitas saluran klasik karena adanya efek dekohesi dan keterikatan kuantum. Kapasitas saluran kuantum dapat dihitung menggunakan rumus Holevo:

$$C \leq S(\rho) - \sum_i p_i S(\rho_i)$$

di mana p_i adalah probabilitas hasil dan ρ_i adalah matriks densitas untuk hasil tersebut.

Teori informasi kuantum memberikan kerangka kerja untuk memahami dan memanfaatkan informasi dalam konteks kuantum. Dengan konsep-konsep seperti entropi kuantum, teleportasi kuantum, dan kriptografi kuantum, kita dapat menjelajahi cara-cara baru untuk menyimpan, memproses, dan mentransmisikan informasi, yang memiliki implikasi signifikan dalam bidang teknologi dan komunikasi.

9.11. Supremasi Kuantum (Quantum Supremacy)

Supremasi kuantum adalah istilah yang digunakan untuk menggambarkan situasi di mana komputer kuantum dapat menyelesaikan tugas tertentu yang tidak dapat diselesaikan oleh komputer klasik dalam waktu yang wajar. Ini adalah tonggak penting dalam pengembangan teknologi kuantum, menunjukkan potensi luar biasa yang dapat dihasilkan dari pemanfaatan prinsip-prinsip mekanika kuantum.

a. Definisi Supremasi Kuantum

Supremasi kuantum dicapai ketika sebuah komputer kuantum menyelesaikan suatu masalah dalam waktu yang jauh lebih cepat dibandingkan dengan komputer klasik terbaik yang tersedia. Dalam banyak kasus, masalah ini tidak selalu berguna dalam aplikasi dunia nyata, tetapi fokusnya adalah pada kemampuan komputasi itu sendiri.

b. Eksperimen Supremasi Kuantum

Salah satu contoh paling terkenal dari supremasi kuantum diumumkan oleh tim di Google pada tahun 2019. Mereka menggunakan komputer kuantum yang dikenal sebagai Sycamore untuk melakukan perhitungan kompleks yang melibatkan pengambilan sampel dari distribusi probabilitas yang dihasilkan oleh rangkaian kuantum. Dalam eksperimen ini, mereka menggunakan rangkaian kuantum untuk menghasilkan hasil dari N qubit yang dapat dinyatakan dalam bentuk matriks densitas. Misalkan $|\psi\rangle$ adalah keadaan kuantum dari sistem, maka probabilitas hasil dari pengukuran qubit dapat dinyatakan sebagai:

$$P(x) = |\langle x | \psi \rangle|^2$$

di mana $|x\rangle$ adalah basis pengukuran. Dari hasil pengukuran, distribusi probabilitas yang dihasilkan dapat dibandingkan dengan hasil dari algoritma klasik yang menyelesaikan tugas yang sama.

c. Menghitung Waktu Komputasi

Google mengklaim bahwa Sycamore dapat menyelesaikan perhitungan dalam waktu sekitar 200 detik, yang diperkirakan memerlukan waktu lebih dari 10.000 tahun untuk komputer klasik yang paling kuat pada saat itu. Kita dapat membandingkan waktu komputasi T_{quantum} dari komputer kuantum dengan waktu komputasi $T_{\text{classical}}$ dari komputer klasik. Jika:

$$\text{Speedup} = \frac{T_{\text{classical}}}{T_{\text{quantum}}}$$

Sebagai contoh, jika $T_{\text{classical}} = 10,000 \text{ years}$ dan $T_{\text{quantum}} = 200 \text{ seconds}$, maka:

$$\text{Speedup} = \frac{10,000 \text{ years}}{200 \text{ seconds}} \approx 1.58 \times 10^9$$

Ini menunjukkan bahwa komputer kuantum Sycamore dapat menyelesaikan tugas tersebut dengan kecepatan yang sangat lebih tinggi dibandingkan dengan komputer klasik.

d. Dampak Supremasi Kuantum

Supremasi kuantum memiliki implikasi yang luas, termasuk:

1. Kriptografi: Komputer kuantum dapat memecahkan beberapa algoritma kriptografi yang saat ini digunakan, seperti RSA.
2. Simulasi Kuantum: Memungkinkan simulasi sistem kuantum yang kompleks, yang sulit dilakukan dengan komputer klasik.
3. Optimasi: Mempercepat proses penyelesaian masalah optimasi yang rumit dalam berbagai bidang.

e. Tantangan dan Batasan

Walaupun supremasi kuantum menunjukkan potensi besar, masih ada tantangan besar yang harus dihadapi, termasuk:

1. Dekohesi: Komputer kuantum sangat rentan terhadap gangguan dari lingkungan, yang dapat mengganggu keadaan kuantum.
2. Koreksi Kesalahan: Membangun kode koreksi kesalahan yang efektif untuk mempertahankan integritas informasi kuantum.
3. Pengembangan Algoritma: Meskipun sudah ada algoritma kuantum yang terkenal, pengembangan algoritma yang dapat memanfaatkan sepenuhnya kemampuan komputer kuantum masih dalam tahap awal.

Supremasi kuantum menandakan kemajuan besar dalam penelitian dan pengembangan komputer kuantum. Meskipun saat ini lebih banyak berfokus pada demonstrasi kemampuan kuantum, tantangan teknis dan teoritis masih harus diatasi untuk menerapkan komputer kuantum secara praktis dalam berbagai aplikasi yang bermanfaat. Supremasi kuantum memberikan harapan untuk masa depan di mana komputasi kuantum akan menjadi bagian integral dari

teknologi informasi dan komunikasi.

- **Referensi**

- Arute, Frank, et al. 2019. Quantum Supremacy Using a Programmable Superconducting Processor. *Nature*.
- Benenti, Giuliano, Giulio Casati, dan Giuliano Strini. 2007. *Principles of Quantum Computation and Information: Volume I: Basic Concepts*. World Scientific Publishing.
- Bouwmeester, Dirk, Artur Ekert, dan Anton Zeilinger (eds.). 2000. *The Physics of Quantum Information: Quantum Cryptography, Quantum Teleportation, Quantum Computation*. Springer.
- Grover, Lov K. 1996. "A Fast Quantum Mechanical Algorithm for Database Search." *Proceedings of the Twenty-Eighth Annual ACM Symposium on Theory of Computing (STOC)*. ACM.
- Nielsen, Michael A., dan Isaac L. Chuang. 2010. *Quantum Computation and Quantum Information*. Cambridge University Press.
- Preskill, John. 1998. *Lecture Notes for Physics 229: Quantum Information and Computation*. California Institute of Technology.
- Rieffel, Eleanor G., dan Wolfgang H. Polak. 2011. *Quantum Computing: A Gentle Introduction*. MIT Press.
- Shor, Peter W. 1994. "Algorithms for Quantum Computation: Discrete Logarithms and Factoring." *Proceedings 35th Annual Symposium on Foundations of Computer Science (FOCS)**. IEEE.

PROFIL PENULIS



Dr. Ir. Bambang Mulyo Raharjo, M.Si.
Dosen Teknik Elektro
Sekolah Tinggi Teknologi Duta Bangsa

Pendidikan: S1 Teknik Tenaga Listrik Institut Teknologi Nasional Bandung (lulus 1991), S2 Ilmu Material Universitas Indonesia (lulus 2003), S3 Ilmu Material Universitas Indonesia (lulus 2022). Pengalaman kerja: PT. Industri Pesawat Terbang Nusantara (IPTN, 1993 – 1994), PT. Unindo (Alstom, 1994 – 1996), PT. Cikarang Listrindo (1996 – 2016). Pengalaman mengajar: Dosen tetap Sekolah Tinggi Teknologi Duta Bangsa (2010 – Sekarang), Dosen luar biasa Universitas Islam 45 Bekasi (Unisma, 2017 – Sekarang).



FISIKA KUANTUM DALAM MATERIAL DAN TEKNOLOGI

Oleh Dita Rama Insiyanda, M.Si.

10.1. Pengantar Fisika Kuantum untuk Material

Perkembangan fisika kuantum dan bagaimana konsep tersebut diterapkan dalam memahami sifat-sifat material, baik itu zat padat, cair, maupun gas. Akan dijelaskan bahwa mekanika kuantum tidak hanya penting dalam fisika fundamental, tetapi juga dalam aplikasinya pada teknologi material (Griffiths, 1995).

Postulat dasar fisika kuantum, di mana fungsi gelombang digunakan untuk mendeskripsikan keadaan kuantum suatu sistem. Persamaan Schrödinger dengan aplikasi dasar pada elektron di dalam potensial sumur kotak satu dimensi menjelaskan bagaimana kuantisasi energi terjadi (Shankar, 1994; Sakurai, 2010). Sedangkan pada aplikasi modern dari fisika kuantum dalam teknologi material diantaranya aplikasi semikonduktor pada transistor hingga nanoteknologi dan pengembangan material superkonduktor dengan sifat kuantum unik (Datta, 2005)

10.2. Zat Padat: Struktur Kristal dan Elektron dalam Potensial Periodik

1. Struktur Kristal dan Kisi Bravais

Dalam material zat padat, atom-atom membentuk struktur periodik yang dikenal sebagai kisi kristal. Setiap atom menempati

posisi tertentu dalam struktur tersebut, yang dapat dideskripsikan sebagai kisi Bravais, yaitu susunan periodik atom dalam ruang. Setiap jenis material memiliki struktur kristal yang berbeda, seperti struktur kubik sederhana, heksagonal, atau kubik berpusat muka (FCC).

Perilaku elektron dalam material padat tidak dapat dijelaskan hanya dengan pendekatan klasik. Mekanika kuantum digunakan untuk memahami bagaimana elektron bergerak melalui kisi kristal dengan potensial periodik yang dihasilkan oleh ion-ion positif dari atom-atom dalam kisi.

2. Teori Pita Energi

Elektron yang bergerak dalam material padat dipengaruhi oleh potensial periodik, yang menyebabkan elektron memiliki rentang energi terlarang (*band gap*) antara pita valensi dan pita konduksi. Ini dijelaskan melalui teori pita energi (*band theory*), yang dikembangkan dari solusi persamaan Schrödinger untuk elektron dalam potensial periodik.

Elektron dalam material padat dapat dianggap sebagai quasi-partikel dengan energi yang bergantung pada vektor gelombang (k). Hubungan ini ditulis sebagai:

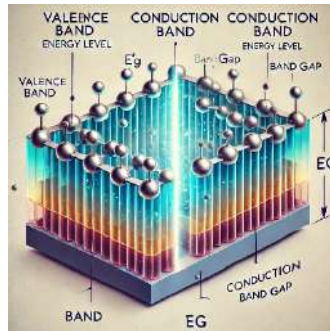
$$E(k) = \frac{\hbar^2 k^2}{2m^*}$$

dimana m^* adalah massa efektif elektron dalam material. Massa efektif ini bergantung pada interaksi elektron dengan kisi, yang berbeda dari massa elektron bebas.

Pada semikonduktor, terdapat gap energi (E_g) antara pita valensi dan pita konduksi. Elektron hanya dapat berpindah dari pita valensi ke pita konduksi jika energi yang diserap melebihi energi gap ini:

$$E_g = E_C - E_V$$

dimana E_C adalah energi terendah dari pita konduksi, dan E_V adalah energi tertinggi dari pita valensi (Gambar 1).



Gambar 1. Diagram bagaimana elektron berpindah dari pita valensi ke pita konduksi saat menyerap energi yang cukup untuk melewati gap energi.

3. Efek Spin dalam Material Padat

Spin elektron juga berperan penting dalam memahami sifat material padat, terutama dalam teknologi *spintronik*. *Spin* elektron dapat berinteraksi dengan medan magnetik melalui interaksi *spin-orbit*, yang memodifikasi struktur pita energi (Kittel,2005).

10.3. Zat Cair: Fluida Kuantum dan Superfluida

1. Kondensasi Bose-Einstein

Pada suhu yang sangat rendah, partikel bosonik seperti atom helium-4 dapat mengalami transisi kuantum yang disebut kondensasi Bose-Einstein (BEC). Pada kondisi ini, mayoritas partikel berada dalam keadaan kuantum dasar yang sama, menghasilkan fenomena *superfluiditas*, di mana fluida mengalir tanpa gesekan. Hal ini pertama kali direalisasikan secara eksperimen pada gas rubidium-87 di tahun 1995, yang mengukuhkan prediksi teoretis dari Satyendra Nath Bose dan Albert Einstein pada tahun 1920-an.

Dalam Kondensasi Bose-Einstein terjadi ketika distribusi energi partikel mengikuti statistika Bose-Einstein:

$$n(\epsilon) = \frac{1}{e^{(\epsilon-\mu)/k_B T} - 1}$$

dimana ϵ adalah energi partikel, μ adalah potensial kimia, k_B adalah

konstanta Boltzmann, dan T adalah suhu.

Pada suhu yang sangat rendah, banyak partikel menempati keadaan energi yang sama, menciptakan keadaan kuantum makroskopik, di mana fluktuasi termal sangat kecil sehingga perilaku partikel tidak lagi mengikuti mekanika klasik.

2. Superfluida: Sifat Kuantum pada Helium-4

Superfluida adalah bentuk zat cair yang menunjukkan sifat kuantum makroskopik, seperti aliran tanpa viskositas dan kemampuan merambat melalui celah sempit tanpa kehilangan energi. Fenomena ini pertama kali diamati pada helium-4 cair pada suhu mendekati nol absolut. Pada helium-4, ketika didinginkan di bawah suhu titik lambda ($\sim 2,17$ K), cairan helium memasuki fase *superfluida*, di mana ia mengalir tanpa viskositas. Ini artinya, tidak ada gesekan internal dalam aliran fluida, yang membuat fluida dapat mengalir secara terus-menerus tanpa kehilangan energi.

Keunikan dari *superfluida* dapat dijelaskan melalui mekanika kuantum, di mana fungsi gelombang kolektif dari partikel-partikel bosonik menyebabkan terbentuknya **aliran kuantum koheren**. Aliran ini tidak bisa dijelaskan dengan konsep fluida klasik karena melibatkan **kuantisasi momentum sudut**. Secara matematis, kecepatan aliran superfluida berhubungan dengan bilangan kuantum n sebagai berikut:

$$v = \frac{n\hbar}{mr}$$

Dimana v adalah kecepatan aliran, \hbar adalah konstanta Planck tereduksi, m adalah massa partikel, r adalah jarak radial dari pusat putaran.

Dalam superfluida, ada partikel kuantum yang bergerak dengan kecepatan kuantum:

$$v = \frac{\hbar k}{m}$$

Dimana v adalah kecepatan aliran, k adalah bilangan gelombang dari partikel.

Aplikasi dalam Teknologi, Superfluida dan Perangkat Kuantum, Superfluida digunakan dalam berbagai eksperimen fisika fundamental dan perangkat teknologi. Salah satu aplikasinya adalah dalam interferometer superfluida yang memanfaatkan interferensi fungsi gelombang fluida untuk mendeteksi variasi medan gravitasi dan rotasi dengan presisi sangat tinggi. Selain itu, superfluida juga berperan penting dalam studi kosmologi kuantum untuk mensimulasikan fenomena seperti fluktuasi kuantum dan latar belakang kosmik.

10.4. Zat Gas: Statistika Kuantum pada Gas Fermi dan Bose

1. Statistika *Fermi-Dirac*

Gas Fermi adalah gas yang tersusun dari partikel fermion, yaitu partikel yang memiliki spin setengah integer (misalnya elektron, proton, neutron). Fermion mematuhi prinsip eksklusi Pauli, yang menyatakan bahwa dua fermion tidak bisa menempati keadaan kuantum yang sama. Akibatnya, pada suhu rendah, partikel-partikel fermion mengisi keadaan energi mulai dari yang terendah hingga tingkat energi tertentu yang disebut energi Fermi.

Gas yang terdiri dari fermion seperti elektron mengikuti statistika Fermi-Dirac, yang memperhitungkan prinsip eksklusi Pauli. Distribusi Fermi-Dirac dinyatakan sebagai:

$$f(E) = \frac{1}{e^{(E-\mu)/k_B T} + 1}$$

Dimana $f(E)$ adalah fungsi distribusi Fermi-Dirac, E adalah energi partikel, μ adalah potensial kimia atau energi Fermi pada suhu nol absolut, k_B adalah konstanta Boltzmann, T adalah suhu.

Gas elektron dalam logam adalah contoh dari gas Fermi, di mana

pada suhu rendah, elektron menempati keadaan energi hingga tingkat Fermi. Hal ini karena Pada suhu nol, semua keadaan dengan energi kurang dari energi Fermi E_F terisi penuh, sementara keadaan di atasnya kosong. Di atas suhu nol, fermion mulai "melompat" ke keadaan energi yang lebih tinggi sesuai dengan probabilitas distribusi Fermi-Dirac.

Dalam logam, elektron dianggap sebagai gas Fermi yang bergerak bebas di dalam kisi kristal ion positif. Sifat kelistrikan dan termal dari logam dapat dijelaskan dengan model elektron Fermi ini, yang memberikan penjelasan kuantitatif tentang kapasitas panas elektronik dan konduktivitas listrik.

2. Statistika Bose-Einstein

Gas Bose, sebaliknya, terdiri dari boson, yaitu partikel dengan spin integer yang tidak mematuhi prinsip eksklusi Pauli. Boson dapat menempati keadaan kuantum yang sama secara simultan. Ini menciptakan fenomena unik seperti kondensasi Bose-Einstein, di mana pada suhu yang sangat rendah, sejumlah besar boson mengkondensasi ke dalam keadaan kuantum terendah yang sama. Pada suhu rendah, boson dapat menempati keadaan kuantum yang sama, menghasilkan efek kuantum makroskopis seperti kondensasi Bose-Einstein (Pitaevskii, 2003). Distribusi energi partikel dalam gas Bose mengikuti statistika Bose-Einstein:

$$f(E) = \frac{1}{e^{(E-\mu)/k_B T} - 1}$$

perbedaan utama dengan distribusi Fermi-Dirac adalah adanya tanda negatif di penyebut, yang mencerminkan bahwa boson tidak dibatasi oleh prinsip eksklusi Pauli.

Gas Bose ideal digunakan untuk menggambarkan perilaku partikel boson pada suhu sangat rendah, seperti foton dalam radiasi benda hitam atau atom dalam kondensasi Bose-Einstein. Fenomena ini memiliki implikasi besar dalam pengembangan teknologi kuantum, termasuk komputasi kuantum dan simulator kuantum.

3. Transisi Fase Kuantum dan Aplikasi dalam Material Gas

Pada suhu rendah, baik gas Fermi maupun gas Bose mengalami transisi fase kuantum, yang berbeda dari transisi fase klasik seperti cair menjadi gas. Dalam gas Fermi, transisi kuantum dapat mengarah pada fenomena superkonduktivitas, di mana elektron membentuk pasangan Cooper dan bergerak tanpa hambatan melalui material. Ini dijelaskan melalui teori BCS (*Bardeen-Cooper-Schrieffer*), yang menunjukkan bagaimana pasangan elektron dengan spin yang berlawanan dapat membentuk keadaan kuantum terikat, menciptakan arus listrik tanpa resistansi.

Superkonduktor digunakan dalam berbagai aplikasi teknologi, termasuk:

- MRI (*Magnetic Resonance Imaging*),
- Maglev (*Magnetic Levitation*) untuk kereta api,
- Kabel transmisi listrik superkonduktif yang mengurangi kehilangan energi.

Dalam gas Bose, aplikasi transisi fase kuantum terlihat pada laser atom yang memanfaatkan sifat koheren dari kondensat Bose-Einstein untuk menghasilkan aliran atom yang sangat terkontrol.



Sumber : https://www.hss.edu/condition-list_mri-magnetic-resonance-imaging.asp

Gambar 2. MRI adalah Aplikasi Fisika kuantum Superkonduktor

10.5. Aplikasi Fisika Kuantum pada Material Modern

Fisika kuantum memainkan peran penting dalam memahami sifat-sifat material padat, terutama pada skala atomik dan subatomik, di mana hukum-hukum mekanika klasik tidak lagi memadai untuk

menjelaskan fenomena yang diamati. Dalam material padat, konsep utama dari fisika kuantum diterapkan untuk memahami perilaku elektron, struktur pita energi, dan interaksi spin dalam kisi kristal. Ini memiliki implikasi langsung pada sifat listrik, termal, dan optik dari material, termasuk semikonduktor, logam, dan isolator.

1. Elektron dalam Potensial Periodik: Teori Bloch

Dalam material padat, atom-atom tersusun dalam kisi kristal yang periodik, menciptakan potensial periodik bagi elektron yang bergerak melaluinya. Teori kuantum menunjukkan bahwa elektron dalam kisi ini tidak berperilaku seperti partikel bebas. Sebaliknya, mereka berinteraksi dengan medan listrik dari ion-ion dalam kisi, menghasilkan kuantisasi energi yang dikenal sebagai pita energi.

Salah satu teori kunci dalam memahami perilaku elektron dalam material padat adalah teori Bloch. Menurut teori ini, solusi dari persamaan Schrödinger untuk elektron dalam potensial periodik dapat diwakili dalam bentuk fungsi Bloch:

$$\psi_k(r) = e^{ik \cdot r} u_k(r)$$

Dimana $\psi_k(r)$ adalah fungsi gelombang Bloch, k adalah vector gelombang yang menggambarkan momentum kristal elektron, $u_k(r)$ adalah fungsi periodik yang memiliki simetri yang sama dengan kisi kristal.

Fungsi gelombang ini menunjukkan bahwa meskipun elektron bergerak dalam potensial periodik, ia masih dapat memiliki sifat seperti partikel bebas pada skala makroskopik, tetapi dengan modifikasi pada massanya, yang disebut sebagai massa efektif.

2. Struktur Pita Energi (*Band Structure*)

Salah satu aplikasi utama dari fisika kuantum pada material padat adalah pemahaman tentang struktur pita energi. Dalam kristal, tingkat energi elektron tidak diskret seperti pada atom terisolasi, melainkan membentuk pita energi akibat interaksi antar atom dalam kisi kristal. Ada dua pita energi utama yang penting:

- Pita Valensi (*Valence Band*): Pita energi yang ditempati oleh elektron pada keadaan dasar.
- Pita Konduksi (*Conduction Band*): Pita energi yang lebih tinggi, tempat elektron dapat bergerak secara bebas dan berkontribusi pada konduksi listrik.

Di antara pita valensi dan pita konduksi terdapat gap energi (E_g). Dalam semikonduktor dan isolator, gap energi ini cukup besar sehingga elektron memerlukan energi tambahan, misalnya dari panas atau cahaya, untuk berpindah dari pita valensi ke pita konduksi. Sebaliknya, pada logam, pita valensi dan konduksi saling tumpang tindih sehingga elektron dapat bergerak bebas, menjadikannya konduktor yang baik. Hubungan antara energi dan vektor gelombang k dalam pita energi digambarkan oleh persamaan dispersi energi:

$$E(k) = \frac{\hbar^2 k^2}{2m^*}$$

Dimana $E(k)$ adalah energi elektron sebagai fungsi dari vektor gelombang k , \hbar adalah konstanta Planck tereduksi, m^* adalah massa efektif elektron dalam bahan padat.

Massa efektif m^* tidak sama dengan massa elektron bebas m , karena pengaruh dari medan periodik dalam kisi. Massa efektif dapat bervariasi tergantung pada sifat interaksi elektron dengan ion-ion dalam material.

3. Semikonduktor dan Elektron dalam Material

Aplikasi fisika kuantum pada semikonduktor merupakan landasan dari seluruh teknologi modern, dari transistor hingga perangkat elektronik lainnya. Semikonduktor adalah salah satu aplikasi paling penting dari fisika kuantum pada material padat. Sifat konduksi listrik semikonduktor sangat tergantung pada gap energi (E_g) yang memisahkan pita valensi dan pita konduksi. Pada suhu kamar, hanya sedikit elektron yang memiliki energi cukup untuk

berpindah dari pita valensi ke pita konduksi.

Semikonduktor seperti silikon memiliki gap energi yang memisahkan pita valensi dan pita konduksi. Elektron dapat ditingkatkan dari pita valensi ke pita konduksi dengan menyerap energi, biasanya dalam bentuk panas atau foton.

Dalam semikonduktor, kuantisasi energi dan konsep elektron bebas menjadi sangat penting. Prinsip kuantum diterapkan untuk menjelaskan *doping* semikonduktor, yang meningkatkan konduktivitas material dengan menambahkan atom-atom tertentu untuk menciptakan lebih banyak elektron bebas atau lubang (*hole*).

Ada dua jenis doping:

- Doping tipe-n: Menambahkan atom dengan lebih banyak elektron daripada material dasar, seperti menambahkan fosfor ke dalam silikon. Ini menghasilkan lebih banyak elektron bebas di pita konduksi.
- Doping tipe-p: Menambahkan atom dengan lebih sedikit elektron daripada material dasar, seperti menambahkan boron ke dalam silikon. Ini menciptakan "lubang" di pita valensi, yang bertindak sebagai pembawa muatan positif.

Rumus yang menggambarkan jumlah elektron di pita konduksi pada suhu tertentu adalah:

$$n_c = N_c e^{-(E_c - E_F)/k_B T}$$

Dimana n_c adalah konsentrasi elektron di pita konduksi, N_c adalah kepadatan keadaan di pita konduksi, E_c adalah energi dasar dari pita konduksi, E_F adalah energi Fermi, k_B adalah konstanta Boltzmann, T adalah suhu absolut.

Dengan mengontrol doping, kita dapat merekayasa sifat-sifat listrik dari semikonduktor, yang merupakan dasar dari teknologi transistor dan perangkat elektronik modern. Hukum Ohm kuantum juga berlaku pada tingkat kuantum untuk mendeskripsikan aliran elektron dalam material ini:

$$I = \frac{e^2}{h} V$$

Dimana e adalah muatan elektron, h adalah konstanta Planck, V adalah potensial listrik, dan I adalah arus yang dihasilkan (Shankar,1994).

4. Magnetisme Kuantum: Interaksi Spin dan Efek Hall Kuantum

Fisika kuantum juga berperan dalam menjelaskan fenomena magnetisme kuantum dalam material padat, khususnya yang melibatkan spin elektron. Elektron memiliki sifat intrinsik yang disebut spin, dan interaksi antara spin-spin ini dapat menyebabkan berbagai fenomena magnetik dalam material, seperti feromagnetisme dan antiferomagnetisme.

Efek Hall kuantum (*Quantum Hall Effect*) adalah salah satu contoh fenomena magnetik kuantum yang terjadi pada suhu rendah dan medan magnet yang sangat kuat. Dalam kondisi ini, elektron dalam dua dimensi menunjukkan kuantisasi konduktivitas Hall:

$$\sigma_{xy} = \frac{e^2}{h} \nu$$

Dimana σ_{xy} adalah konduktivitas Hall, e adalah muatan elektron, h adalah konstanta Planck, ν adalah bilangan bulat yang menunjukkan tingkat kuantisasi.

Efek ini menunjukkan bahwa konduktivitas listrik dapat dikontrol secara kuantum, yang sangat penting dalam aplikasi teknologi seperti spintronik, yang memanfaatkan spin elektron untuk menyimpan dan memproses informasi.

Penerapan fisika kuantum pada material padat melibatkan konsep-konsep dasar seperti teori pita energi, interaksi spin, dan kuantisasi energi elektron dalam potensial periodik. Fenomena seperti konduktivitas listrik, semikonduktor, superkonduktivitas, dan efek Hall kuantum semuanya bisa dijelaskan melalui pendekatan kuantum, yang menggantikan pandangan klasik dalam memahami sifat material. Dengan memahami fisika kuantum, kita dapat

merekayasa material dengan sifat yang diinginkan, membuka jalan bagi inovasi dalam teknologi elektronik dan magnetik.

Tabel 1. Perbedaan Pendekatan Fisika Klasik dengan Pendekatan Fisika Kuantum Pada Fenomena Fisika

FENOMENA	PENDEKATAN FISIKA KLASIK	PENDEKATAN FISIKA KUANTUM
Konduktivitas Listrik	<ul style="list-style-type: none"> • Dijelaskan dengan Model Drude, di mana elektron dianggap sebagai partikel bebas yang menabrak ion dalam kisi. • Semakin sering tumbukan elektron dengan ion, semakin tinggi resistansi. • Konduktivitas berkurang seiring meningkatnya suhu karena tumbukan yang lebih sering. 	<ul style="list-style-type: none"> • Dijelaskan melalui teori pita energi: elektron berada di pita konduksi untuk berkontribusi pada konduktivitas. • Konduktivitas bergantung pada struktur pita dan massa efektif elektron, serta prinsip eksklusi Pauli untuk fermion. • Elektron dapat berpindah antara pita valensi dan konduksi, terutama dalam material semikonduktor.
	$\sigma = \frac{ne^2\tau}{m}$ <p>Dimana σ adalah konduktivitas listrik, n adalah konsentrasi elektron, e adalah muatan elektron, τ adalah waktu antara tumbukan(relaksasi), m adalah massa elektron.</p>	$\sigma = \frac{ne^2\tau}{m^*}$ <p>Dimana m^* adalah massa efektif elektron, yang berbeda dari massa elektron bebas karena interaksi dengan kisi kristal.</p>

FENOMENA	PENDEKATAN FISIKA KLASIK	PENDEKATAN FISIKA KUANTUM
Semikonduktor	<ul style="list-style-type: none"> Semikonduktor dianggap sebagai material dengan sedikit elektron bebas. Tidak ada konsep pita energi dan doping yang dapat direkayasa secara klasik. Konduktivitas meningkat dengan suhu karena lebih banyak elektron bebas. 	<ul style="list-style-type: none"> Dijelaskan oleh gap energi antara pita valensi dan pita konduksi. Elektron berpindah ke pita konduksi dengan menyerap energi. Doping memungkinkan pengendalian jumlah elektron atau lubang, yang meningkatkan konduktivitas secara terkontrol. Konduktivitas tergantung pada tingkat energi donor (doping tipe-n) atau tingkat energi akseptor (doping tipe-p).
Superkonduktivitas	<ul style="list-style-type: none"> Tidak bisa dijelaskan oleh fisika klasik. Selalu ada resistansi akibat tumbukan elektron dengan ion-ion dalam kisi. Dalam pendekatan klasik, resistansi akan berkurang, tetapi tidak pernah mencapai nol. Tidak bisa menjelaskan transisi fase yang terjadi pada superkonduktor di bawah suhu kritis. 	<ul style="list-style-type: none"> Dijelaskan oleh Teori BCS, di mana pasangan Cooper terbentuk dan bergerak tanpa resistansi pada suhu rendah. Elektron dalam pasangan Cooper membentuk keadaan kuantum koheren yang memungkinkan aliran listrik tanpa resistansi di bawah T_c. Celah energi muncul di bawah T_c, yang mencegah eksitasi energi rendah, dan membuat arus listrik tanpa gesekan.

FENOMENA	PENDEKATAN FISIKA KLASIK	PENDEKATAN FISIKA KUANTUM
	-	$\Delta(T) = \Delta(0) \left[1 - \left(\frac{T}{T_c} \right)^2 \right]$ <p>Dimana $\Delta(T)$ adalah celah energi pada suhu T, $\Delta(0)$ adalah celah energi pada suhu nol absolut, T_c adalah suhu transisi super-konduktivitas.</p>
Efek Hall Kuantum	<ul style="list-style-type: none"> • Efek Hall klasik dijelaskan oleh gaya Lorentz yang bekerja pada elektron yang bergerak dalam medan magnet. • Tegangan Hall V_H berbanding lurus dengan medan magnet dan arus listrik. • Tidak ada kuantisasi tegangan atau konduktivitas Hall dalam efek Hall klasik. 	<ul style="list-style-type: none"> • Efek Hall kuantum menunjukkan kuantisasi konduktivitas Hall pada medan magnet tinggi dan suhu rendah. • Konduktivitas Hall mengikuti hukum diskrit: $\sigma_{xy} = \frac{e^2}{h} \nu$ di mana ν adalah bilangan bulat atau fraksi. • Efek ini memberikan bukti langsung bahwa konduktivitas pada skala kuantum terjadi secara diskrit, yang tidak bisa dijelaskan klasik.
	$V_H = \frac{IB}{ne}$ <p>Dimana V_H adalah tegangan Hall, I adalah arus listrik, B adalah medan magnet, n adalah konsentrasi elektron, e adalah muatan elektron.</p>	$\sigma_{xy} = \frac{e^2}{h} \nu$ <p>Dimana σ_{xy} adalah konduktivitas Hall kuantum, e adalah muatan elektron, h adalah konstanta Planck, ν adalah bilangan bulat atau fraksional yang disebut angka Landau.</p>

5. Contoh Soal

1) Elektron dalam Pita Energi Semikonduktor

Sebuah semikonduktor memiliki gap energi (E_g) sebesar 1,1 eV. Pada suhu kamar (300 K), hanya sebagian kecil elektron yang dapat berpindah dari pita valensi ke pita konduksi.

- Hitung peluang relatif (probabilitas) bahwa sebuah elektron akan memiliki cukup energi untuk berpindah dari pita valensi ke pita konduksi pada suhu 300 K.
- Jika massa efektif elektron dalam pita konduksi adalah $m^* = 0.2m_e$, di mana m_e adalah massa elektron bebas ($m_e = 9.11 \times 10^{-31} \text{ kg}$), hitung energi kinetik minimum elektron di dalam pita konduksi pada suhu 300 K.

Data yang diberikan:

Konstanta Boltzmann $k_B = 8.617 \times 10^{-5} \text{ eV/K}$

Suhu $T = 300 \text{ K}$

$1 \text{ eV} = 1.602 \times 10^{-19} \text{ J}$

Pembahasan

a. Peluang Relatif Elektron Berpindah ke Pita Konduksi

Pada suhu tertentu, probabilitas bahwa sebuah elektron memiliki energi yang cukup untuk berpindah dari pita valensi ke pita konduksi diberikan oleh distribusi Fermi-Dirac. Peluang relatif elektron berpindah dapat diperkirakan dengan menggunakan persamaan eksponensial sederhana untuk transisi energi yang melibatkan gap energi E_g :

$$P \propto e^{-\frac{E_g}{k_B T}}$$

Dimana:

E_g adalah gap energi, yaitu 1,1 eV,

k_B adalah konstanta Boltzmann dalam satuan eV/K,

T adalah suhu dalam Kelvin, yaitu 300 K.

Substitusikan:

$$P \propto e^{-\frac{1.1 \text{ eV}}{(8.617 \times 10^{-5} \text{ eV/K}) \times 300 \text{ K}}}$$

$$P \propto e^{-\frac{1.1}{0.025851}}$$

$$P \propto e^{-42.56}$$

Jadi, peluang relatifnya sangat kecil, sekitar:

$$P \approx 3.3 \times 10^{-19}$$

Artinya, pada suhu kamar, hanya sebagian kecil elektron yang dapat berpindah dari pita valensi ke pita konduksi.

Peluang relatif bahwa sebuah elektron memiliki energi yang cukup untuk berpindah dari pita valensi ke pita konduksi pada suhu kamar sangat kecil, sekitar 3.3×10^{-19} , yang menunjukkan bahwa hanya sedikit elektron yang dapat berpindah ke pita konduksi tanpa adanya doping atau sumber energi eksternal.

b. Energi Kinetik Minimum Elektron dalam Pita Konduksi

Setelah sebuah elektron berpindah ke pita konduksi, energinya akan dihitung berdasarkan massa efektif elektron m^* . Energi kinetik elektron di dalam pita konduksi mengikuti bentuk parabolik dari hubungan dispersi dalam material padat:

$$E_k = \frac{\hbar^2 k^2}{2m^*}$$

Namun, kita bisa menghitung energi kinetik minimum sebagai energi dari elektron dengan momentum kuantum minimum. Dalam hal ini, kita cukup menggunakan massa efektif untuk memperkirakan energi kinetik pada suhu T .

Energi kinetik rata-rata elektron dapat diperkirakan dengan

menggunakan teorema ekuipartisi energi, yang menyatakan bahwa pada suhu T , energi rata-rata per derajat kebebasan adalah $\frac{1}{2}k_B T$. Untuk elektron dalam tiga dimensi, energi kinetiknya adalah:

$$E_k = \frac{3}{2} k_B T$$

Substitusi nilai K_B dan T :

$$E_k = \frac{3}{2} \times (8.617 \times 10^{-5} \text{ eV/K}) \times 300 \text{ K}$$

$$E_k = \frac{3}{2} \times 0.025851 \text{ eV}$$

$$E_k = 0.03878 \text{ eV}$$

Jadi, energi kinetik minimum elektron dalam pita konduksi pada suhu kamar adalah sekitar 0.039 eV.

Energi kinetik minimum elektron dalam pita konduksi pada suhu kamar adalah sekitar 0.039 eV, yang merupakan energi rata-rata yang terkait dengan suhu termal.

2) Massa Efektif dan Kecepatan Elektron di Material Zat Padat

Dalam sebuah material padat, elektron bergerak dalam pita energi dengan massa efektif $m^* = 0.1m_e$, di mana m_e adalah massa elektron bebas. Hitung kecepatan elektron yang memiliki energi sebesar 0,1 eV.

Data yang diberikan:

Massa elektron bebas $m_e = 9.11 \times 10^{-31} \text{ kg}$

Energi $E = 0.1 \text{ eV}$

$1 \text{ eV} = 1.602 \times 10^{-19} \text{ J}$

Pembahasan

Kecepatan elektron dalam material padat dapat dihitung menggunakan hubungan antara energi kinetik dan kecepatan:

$$E_k = \frac{1}{2} m^* v^2$$

Dimana:

E_k adalah energi kinetik,

m^* adalah massa efektif elektron,

v adalah kecepatan elektron.

Langkah 1: Ubah energi dari eV ke joule:

$$E_k = 0.1 \text{ eV} = 0.1 \times 1.602 \times 10^{-19} \text{ J}$$

$$E_k = 1.602 \times 10^{-20} \text{ J}$$

Langkah 2: Hitung kecepatan v menggunakan massa efektif $m^* = 0.1m_e$:

$$E_k = \frac{1}{2} m^* v^2 \implies v = \sqrt{\frac{2E_k}{m^*}}$$

Substitusi nilai:

$$v = \sqrt{\frac{2 \times 1.602 \times 10^{-20} \text{ J}}{0.1 \times 9.11 \times 10^{-31} \text{ kg}}}$$

$$v = \sqrt{\frac{3.204 \times 10^{-20}}{9.11 \times 10^{-32}}}$$

$$v = \sqrt{3.517 \times 10^{11}}$$

$$v \approx 5.93 \times 10^5 \text{ m/s}$$

Jadi, kecepatan elektron dengan energi 0,1 eV dalam material padat adalah sekitar $5.93 \times 10^5 \text{ m/s}$

• Referensi

- Datta, S. 2005. Quantum Transport: Atom to Transistor. Cambridge University Press.
- Griffiths, David J. 1995. Introduction to Quantum Mechanics. Prentice Hall.
- Kittel, Charles. 2005. Introduction to Solid State Physics (8th ed.). Wiley.
- Pitaevskii, L. P., & Stringari, S. 2003. Bose-Einstein Condensation. Oxford University Press.
- Sakurai, J. J., & Napolitano, J. 2010. Modern Quantum Mechanics. Addison-Wesley.
- Shankar, R. 1994. Principles of Quantum Mechanics. Plenum Press
- Balibar, S. 2008. Superfluidity and Quantum Hydrodynamics in Helium-4 *Nature*, 464(7292), 176–179.

PROFIL PENULIS

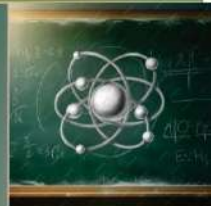


Dita Rama Insiyanda

Dosen Fisika

di Politeknik Transportasi Darat Indonesia-STTD

Lahir 1988 di Klaten, Jawa tengah memperoleh gelar Sarjana Pendidikan Fisika, MIPA Universitas negeri Jakarta, UNJ. Magister Fisika terapan, MIPA Institut Teknologi Bandung, ITB. Adapun riwayat pekerjaan yaitu pernah bekerja di KEMDIKBUD RI sebagai Tutor, KEMENSOS RI sebagai Staff non-PNS, PTN UNTIRTA sebagai Dosen, BRIN-LIPI sebagai Peneliti Muda bidang Teknik Energi Material, Politeknik Transportasi Darat Indonesi-STTD sebagai Staff dan Dosen (2020 – sekarang)



INTERPRETASI DAN FILOSOFI FISIKA KUANTUM

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

11.1. Filsafat/ Filosofi Fisika Kuantum

Apakah fisika kuantum itu sains atau filsafat?

- ✓ Secara garis besar ada empat cabang filsafat fisika : Fisika Kuantum (mekanika kuantum, teori medan kuantum), Ruangwaktu dan Kosmologi (mekanika klasik, dua teori relativitas), dan Fisika Modern (mekanika kuantum, teori medan kuantum).
- ✓ Sebelumnya kita perlu mengenal apa itu filsafat/ filosofi
filsafat atau filosofi adalah pengetahuan dan penyelidikan dengan akal budi mengenai hakikat segala yang ada, sebab, asal, dan hukumnya. Filosofi juga diartikan sebagai n teori yang mendasari alam pikiran atau suatu kegiatan, dan n ilmu yang berintikan logika, estetika, metafisika, dan epistemologi

Apa filosofi mekanika kuantum?

- ✓ Dalam mekanika kuantum, semuanya berbeda. Tidak ada keadaan kuantum yang menetapkan nilai pasti untuk semua kuantitas fisik, dan probabilitas dibangun ke dalam formulasi standar teori

11.2. Interpretasi mekanika kuantum

Interpretasi mekanika kuantum adalah upaya untuk menjelaskan bagaimana teori matematika mekanika kuantum dapat sesuai dengan

realitas yang dialami.

Pandangan terhadap interpretasi berbeda pada pertanyaan-pertanyaan fundamental soal apakah mekanika kuantum itu deterministik atau random, yang unsur-unsur mekanika kuantumnya dapat dianggap "ril", dan apa tolok ukurnya, dan persoalan lainnya.

Meskipun diperdebatkan dan diuji coba sepanjang lebih dari seabad, tak ada konsensus yang dicapai di kalangan fisikawan dan filsuf fisika terkait interpretasi realitas terbaik yang "mewakili". Meskipun struktur matematika memiliki dasar yang kuat, masih banyak perdebatan tentang interpretasi fisik dan filosofis dari teori tersebut. Interpretasi ini bertujuan untuk menangani berbagai konsep seperti:

- ✓ Evolusi keadaan sistem kuantum (diberikan oleh fungsi gelombang), biasanya melalui penggunaan persamaan Schrödinger. Konsep ini hampir diterima secara universal, dan jarang diperdebatkan.
- ✓ Masalah pengukuran, yang berhubungan dengan apa yang disebut keruntuhan fungsi gelombang. Keruntuhan keadaan kuantum menjadi pengukuran yang pasti (yaitu keadaan eigen tertentu dari fungsi gelombang). Perdebatan tentang apakah keruntuhan ini benar-benar terjadi merupakan masalah utama dalam menafsirkan mekanika kuantum. Dimana keruntuhan fungsi gelombang adalah konsep fundamental dalam mekanika kuantum yang menjelaskan pergeseran dari potensi ke aktualitas dalam sistem kuantum. Keruntuhan ini terjadi ketika fungsi gelombang yang awalnya berada dalam superposisi beberapa keadaan eigen tereduksi menjadi satu keadaan eigen tunggal.
- ✓ Solusi standar untuk masalah pengukuran adalah interpretasi "Ortodoks" atau "Kopenhagen", yang mengklaim bahwa fungsi gelombang runtuh sebagai hasil pengukuran oleh pengamat atau peralatan di luar sistem kuantum.

Mekanika kuantum telah bertahan terhadap pengujian yang ketat dan sangat tepat dalam berbagai eksperimen yang sangat luas. Namun, ada sejumlah aliran pemikiran yang saling bertentangan mengenai interpretasinya. Pandangan-pandangan tentang

interpretasi ini berbeda pada pertanyaan-pertanyaan mendasar seperti apakah mekanika kuantum bersifat deterministik atau stokastik, lokal atau non-lokal, elemen-elemen mekanika kuantum mana yang dapat dianggap nyata, dan apa sifat pengukurannya, di antara hal-hal lainnya.

Meskipun beberapa variasi interpretasi Kopenhagen umumnya disajikan dalam buku teks, banyak interpretasi yang menggugah pikiran telah dikembangkan. Meskipun sudah lebih dari satu abad perdebatan dan eksperimen, tidak ada konsensus yang dicapai di antara fisikawan dan filsuf fisika mengenai interpretasi mana yang paling "mewakili" realitas.

Tabel 1. Beberapa Tokoh Berpengaruh Dalam Penafsiran Mekanika Kuantum

		
Erwin Rudolf Josef Alexander Schrödinger (12 Agustus 1887 – 4 Januari 1961) ialah fisikawan Austria.	Max Born dilahirkan pada tanggal 11 Desember 1882, di Breslau, Jerman. Born belajar fisika di Universitas Breslau, Heidelberg, dan Zürich	Niels Bohr bernama lengkap Niels Hendrik David Bohr. Bohr 7 Oktober 1885 – 18 November 1962 . Niels Bohr adalah seorang ahli fisika yang pernah meraih hadiah Nobel Fisika pada tahun 1922



Werner Karl Heisenberg adalah seorang ahli teori sub-atom dari Jerman, pemenang Penghargaan Nobel dalam Fisika 1932



Max Karl Ernst Ludwig Planck adalah seorang fisikawan Jerman yang banyak dilihat sebagai penemu teori kuantum



Louis-Victor-Pierre-Raymond, duc de Broglie ialah fisikawan Prancis dan pemenang Hadiah Nobel.

Definisi istilah-istilah teori kuantum, seperti fungsi gelombang dan mekanika matriks, berkembang melalui banyak tahap. Misalnya, Erwin Schrödinger awalnya memandang fungsi gelombang elektron sebagai kerapatan muatannya yang tersebar di seluruh ruang, tetapi Max Born menafsirkan ulang nilai kuadrat absolut fungsi gelombang sebagai kerapatan probabilitas elektron yang tersebar di seluruh ruang; aturan Born, seperti yang sekarang disebut, sesuai dengan eksperimen, sedangkan pandangan kerapatan muatan Schrödinger tidak.

Pandangan beberapa pelopor awal mekanika kuantum, seperti Niels Bohr dan Werner Heisenberg, sering dikelompokkan bersama sebagai "**penafsiran Kopenhagen**", meskipun fisikawan dan sejarawan fisika berpendapat bahwa terminologi ini mengaburkan perbedaan antara pandangan yang disebut demikian. Gagasan-gagasan seperti Kopenhagen tidak pernah diterima secara universal, dan tantangan terhadap ortodoksi Kopenhagen yang dianggap benar semakin mendapat perhatian pada tahun 1950-an dengan **interpretasi gelombang-pilot David Bohm dan interpretasi banyak-dunia Hugh Everett III**.

Fisikawan N. David Mermin pernah berkata, "Interpretasi

baru muncul setiap tahun. Tidak ada yang pernah hilang."Sebagai panduan kasar untuk pengembangan pandangan umum selama tahun 1990-an dan 2000-an, "gambaran singkat" pendapat dikumpulkan dalam jajak pendapat oleh Schlosshauer dkk. pada konferensi "Fisika Kuantum dan Hakikat Realitas" pada bulan Juli 2011. Para penulis merujuk pada jajak pendapat informal serupa yang dilakukan oleh Max Tegmark pada konferensi "Fundamental Problems in Quantum Theory" pada bulan Agustus 1997. Kesimpulan utama para penulis adalah bahwa "interpretasi Kopenhagen masih berkuasa", menerima suara terbanyak dalam jajak pendapat mereka (42%), "Interpretasi Kopenhagen masih berkuasa di sini, terutama jika kita menggabungkannya dengan keturunan intelektual seperti interpretasi berbasis informasi dan interpretasi Bayesian kuantum. Dalam jajak pendapat Tegmark, interpretasi Everett menerima 17% suara, yang serupa dengan jumlah suara (18%) dalam jajak pendapat kami."

Beberapa konsep yang berasal dari studi interpretasi telah menemukan aplikasi yang lebih praktis dalam ilmu informasi kuantum.

Ilmu Informasi Kuantum adalah bidang yang menggabungkan prinsip-prinsip mekanika kuantum dengan teori informasi untuk mempelajari pemrosesan, analisis, dan transmisi informasi. Ilmu ini mencakup aspek-aspek teoritis dan eksperimental fisika kuantum, termasuk batasan-batasan yang dapat dicapai dengan informasi kuantum [1,2]

Kurang lebih, semua **interpretasi mekanika kuantum memiliki dua kualitas** yang sama:

- a. Mereka menafsirkan **formalisme—seperangkat persamaan dan prinsip** untuk menghasilkan prediksi melalui masukan kondisi awal
- b. Mereka menafsirkan **fenomenologi—seperangkat pengamatan, termasuk yang diperoleh melalui penelitian empiris dan yang diperoleh secara informal**, seperti pengalaman manusia terhadap dunia yang tidak ambigu

Dua kualitas berbeda di antara interpretasi:

- a. **Epistemologi**—klaim tentang kemungkinan, cakupan, dan cara menuju pengetahuan yang relevan tentang dunia
- b. **Ontologi**—klaim tentang hal-hal apa, seperti kategori dan entitas, yang ada di dunia

Dalam filsafat sains, perbedaan antara pengetahuan dan realitas disebut epistemik versus ontik. Hukum umum dapat dilihat sebagai generalisasi dari keteraturan hasil (**epistemik / pengetahuan**), sedangkan mekanisme kausal dapat dianggap sebagai penentu atau pengatur hasil (ontik/realita). Suatu fenomena dapat diinterpretasikan baik sebagai ontik maupun epistemik. Misalnya, ketidakpastian dapat dikaitkan dengan keterbatasan pengamatan dan persepsi manusia (pengetahuan/ epistemik), atau dapat dijelaskan sebagai keacakan **fisik intrinsik (realita/ ontik)**.

Terminologi yang diterapkan dalam dasar-dasar **mekanika kuantum dan metafisika kuantum** secara kolektif disebut filsafat kuantum (subbidang filsafat fisika).

11.3. Interpretasi Mekanika Kuantum Pada Beberapa Tokoh

Beberapa interpretasi mekanika kuantum antara lain 1. Bohmian Mechanics (de Broglie–Bohm theory), 2. consistent histories, 3 Copenhagen interpretation, 4. Ensemble Interpretation, 5. many-worlds interpretation (MWI) dsb.

1. Bohmian Mechanics (de Broglie–Bohm theory)

Teori de Broglie–Bohm adalah interpretasi mekanika kuantum yang menyatakan bahwa, selain fungsi gelombang, konfigurasi partikel yang sebenarnya ada, bahkan ketika tidak teramati. Evolusi konfigurasi semua partikel dari waktu ke waktu didefinisikan oleh persamaan pemandu. Evolusi fungsi gelombang dari waktu ke waktu diberikan oleh persamaan Schrödinger. Teori ini dinamai menurut Louis de Broglie (1892–1987) dan David Bohm (1917–1992).

Pengukuran, formalisme kuantum, dan independensi pengamat. Teori De Broglie–Bohm memberikan hasil yang hampir sama dengan mekanika kuantum (non-relativistik). Teori ini

memperlakukan fungsi gelombang sebagai objek fundamental dalam teori tersebut, karena fungsi gelombang menggambarkan bagaimana partikel bergerak. Ini berarti bahwa tidak ada eksperimen yang dapat membedakan antara kedua teori tersebut. Bagian ini menguraikan gagasan tentang bagaimana formalisme kuantum standar muncul dari mekanika kuantum.

Dalam teori de Broglie–Bohm, selalu ada fakta tentang posisi dan momentum sebuah partikel. Setiap partikel memiliki lintasan yang terdefinisi dengan baik, serta fungsi gelombang. Pengamat memiliki pengetahuan terbatas tentang lintasan ini (dan dengan demikian tentang posisi dan momentum). Kurangnya pengetahuan tentang lintasan partikel inilah yang menyebabkan hubungan ketidakpastian.

2. Consistent Histories

Dalam mekanika kuantum, interpretasi **sejarah konsisten** atau "teori kuantum konsisten" menggeneralisasi aspek komplementaritas dari interpretasi Kopenhagen konvensional. Pendekatan ini terkadang disebut sejarah dekoheren dan dalam karya lain sejarah dekoheren lebih terspesialisasi.

3. Copenhagen Interpretation

Interpretasi Kopenhagen adalah kumpulan pandangan tentang makna mekanika kuantum, yang berasal dari karya Niels Bohr, Werner Heisenberg, Max Born, dan lain-lain. Sementara "Kopenhagen" merujuk ke kota Denmark, penggunaan sebagai "interpretasi" tampaknya dicetuskan oleh Heisenberg selama tahun 1950-an untuk merujuk pada ide-ide yang dikembangkan dalam periode 1925-1927, menutupi perbedaan pendapatnya dengan Bohr.[3][4] Akibatnya, tidak ada pernyataan historis yang definitif tentang apa yang dimaksud dengan interpretasi tersebut.

4. Ensemble Interpretation

Penafsiran ansambel mekanika kuantum menganggap deskripsi keadaan kuantum hanya berlaku untuk ansambel sistem yang dipersiapkan secara serupa, alih-alih menganggap bahwa ansambel tersebut secara menyeluruh mewakili sistem fisik individual.

Pendukung interpretasi ansambel mekanika kuantum mengklaim bahwa interpretasi tersebut minimalis, dengan asumsi fisik yang paling sedikit tentang makna formalisme matematika standar. Interpretasi ini mengusulkan untuk mengambil interpretasi statistik Max Born secara maksimal, yang membuatnya memenangkan Penghargaan Nobel Fisika pada tahun 1954.

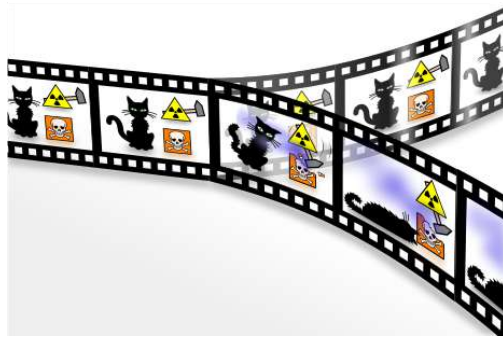
5. Many-Worlds Interpretation

Interpretasi banyak dunia (MWI) adalah interpretasi mekanika kuantum yang menyatakan bahwa fungsi gelombang universal itu nyata secara objektif, dan tidak ada keruntuhan fungsi gelombang. Ini menyiratkan bahwa semua kemungkinan hasil pengukuran kuantum terwujud secara fisik di beberapa "dunia" atau alam semesta. Evolusi realitas secara keseluruhan dalam MWI bersifat deterministik secara kaku dan lokal.

Penafsiran alternatif, Interpretasi Banyak-dunia, pertama kali dijelaskan oleh **Hugh Everett** pada tahun 1957 (di mana ia disebut interpretasi keadaan relatif, nama Banyak-dunia dicetuskan oleh Bryce Seligman DeWitt mulai tahun 1960-an dan diselesaikan pada tahun 1970-an). Bryce DeWitt mempopulerkan formulasi tersebut dan menamakannya banyak dunia pada tahun 1970-an.

Formalisme mekanika kuantumnya menyangkal bahwa pengukuran memerlukan keruntuhan gelombang, sebaliknya menyarankan bahwa semua yang benar-benar diperlukan dari suatu pengukuran adalah bahwa hubungan kuantum terbentuk antara partikel, alat ukur, dan pengamat.

Dalam versi modern banyak dunia, kemunculan subjektif keruntuhan fungsi gelombang dijelaskan oleh mekanisme dekoherensi kuantum. Pendekatan dekoherensi untuk menafsirkan teori kuantum telah banyak dieksplorasi dan dikembangkan sejak tahun 1970-an. MWI dianggap sebagai interpretasi arus utama mekanika kuantum, bersama dengan interpretasi dekoherensi lainnya, interpretasi Kopenhagen, dan teori variabel tersembunyi seperti mekanika Bohmian.



Gambar 1. Paradoks "kucing Schrödinger"

Paradoks "kucing Schrödinger" mekanika kuantum menurut interpretasi banyak dunia. Dalam interpretasi ini, setiap peristiwa kuantum adalah titik cabang; kucing itu hidup dan mati, bahkan sebelum kotak dibuka, tetapi kucing yang "hidup" dan "mati" berada di cabang multiseksemesta yang berbeda, yang keduanya sama-sama nyata, tetapi tidak berinteraksi satu sama lain.

• Referensi

- Barnum, Howard; Wehner, Stephanie; Wilce, Alexander (August 2018). "Introduction: Quantum Information Theory and Quantum Foundations". *Foundations of Physics*. 48 (8): 853–856. Bibcode:2018FoPh...48..853B. doi:10.1007/s10701-018-0188-6. ISSN 0015-9018. S2CID 126293060.
- DiVincenzo, David P.; Fuchs, Christopher A. (2019-02-01). "Quantum foundations". *Physics Today*. 72 (2): 50–51. Bibcode:2019PhT....72b..50D. doi:10.1063/PT.3.4141. ISSN 0031-9228. S2CID 241052502
- Faye, Jan (2019). "Copenhagen Interpretation of Quantum Mechanics". In Zalta, Edward N. (ed.). *Stanford Encyclopedia of Philosophy*. Metaphysics Research Lab, Stanford University.
- Camilleri, K.; Schlosshauer, M. (2015). "Niels Bohr as Philosopher of Experiment: Does Decoherence Theory Challenge Bohr's Doctrine of Classical Concepts?". *Studies in History and Philosophy of Modern Physics*. 49: 73–83. arXiv:1502.06547. Bibcode:2015SHMPM..49...73C. doi:10.1016/j.shpsb.2015.01.005. S2CID 27697360

PROFIL PENULIS

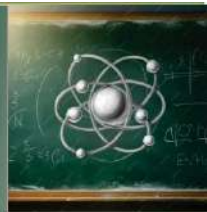


Zuffa Anisa, S. Pd., M.Si.

Dosen Fisika / Kimia

Universitas Bojonegoro

Zuffa Anisa, S.Pd., M.Si., lahir di Bojonegoro 21 Agustus 1989, merupakan anak kedua dari 4 bersaudara pasangan dari (Bapak Ahmad Marzuqi – Ibu Rahma), istri dari Bapak Danang Arief Agustiyen. Penulis telah menempuh pendidikan formal di TK Aisyiyah Bustanul Atfhal, SDN Kadipaten 1 Bojonegoro, SMPN 1 Bojonegoro, SMAN 2 Bojonegoro, S1 Pendidikan Fisika Universitas Negeri Malang angkatan 2008 dan S2 Fisika Institut Teknologi Sepuluh November (ITS) angkatan 2013 dengan mendapatkan fully funded scholarship BPPDN-Calon Dosen Kemendikbudristek. Saat ini profesi penulis adalah sebagai dosen di Universitas Bojonegoro Fakultas Sains dan Teknik. Riset pendanaan yang pernah diraih penulis adalah PDP Kemendikbudristek tahun 2020 dan tahun 2023. Akhir kata apabila ada kritik dan saran dapat dikirim ke Email zuffa.anisa@gmail.com.



IMPLEMENTASI FISIKA KUANTUM DALAM SAINS DAN TEKNOLOGI

Oleh Subhan Annur, M.Pd.

Fisika kuantum telah membawa perubahan revolusioner dalam pemahaman kita tentang alam semesta di tingkat paling mendasar. Berawal dari upaya untuk memahami sifat cahaya dan materi di awal abad ke-20, teori ini berkembang menjadi salah satu pilar terpenting dalam fisika modern. Nama-nama besar seperti Max Planck, Albert Einstein, dan Niels Bohr berperan penting dalam pengembangan teori kuantum. Namun, bukan hanya ilmu murni yang diuntungkan dari perkembangan ini, penerapan fisika kuantum telah meresap ke dalam berbagai aspek kehidupan manusia.

Perkembangan terbaru menunjukkan bahwa prinsip-prinsip dasar fisika kuantum seperti superposisi, keterikatan kuantum, dan tunneling kuantum telah diimplementasikan dalam berbagai teknologi modern. Dari komputer kuantum hingga komunikasi kuantum, penerapan ini tidak hanya menarik perhatian ilmuwan, tetapi juga industri besar yang melihat potensinya untuk mengubah cara kita hidup, berkomunikasi, dan bekerja. Meskipun tantangan teknis masih ada, seperti dekoherensi dan keterbatasan skala, era baru revolusi kuantum sedang mendekat, di mana teknologi kuantum dapat membawa perubahan besar di berbagai sektor.

Dalam bab ini, kita akan mengeksplorasi bagaimana fisika kuantum telah diimplementasikan dalam bidang sains dan teknologi, membahas berbagai aplikasi praktis dan potensi yang dapat direalisasikan dalam beberapa dekade mendatang. Kita akan memulai dengan penerapan fisika kuantum di dunia sains, sebelum masuk ke teknologi yang mendasari berbagai inovasi modern.

12.1. Implementasi Fisika Kuantum di Bidang Sains

Media Fisika kuantum tidak hanya mengubah cara kita memahami realitas fisik, tetapi juga telah menjadi fondasi untuk terobosan dalam berbagai disiplin ilmu. Penerapan prinsip-prinsip kuantum dalam bidang sains memberikan kemampuan baru untuk menganalisis, memodelkan, dan memprediksi fenomena alam yang sangat kompleks, yang sebelumnya tidak dapat dijelaskan oleh teori klasik. Mulai dari pengembangan model molekuler di kimia hingga eksplorasi sifat fundamental materi di fisika, fisika kuantum telah memungkinkan terobosan yang menggerakkan ilmu pengetahuan ke arah yang tidak terduga. Salah satu aplikasi paling signifikan dalam penerapan fisika kuantum adalah komputasi kuantum, yang telah membuka pintu bagi pemecahan masalah yang sangat sulit dan memakan waktu di dunia klasik.

1. Komputasi Kuantum

Komputasi kuantum adalah salah satu inovasi paling signifikan yang lahir dari fisika kuantum. Berbeda dengan komputasi klasik yang menggunakan bit biner (0 dan 1), komputasi kuantum menggunakan qubit. Keistimewaan qubit adalah kemampuannya untuk berada dalam keadaan superposisi, di mana ia bisa berada di posisi 0 dan 1 secara bersamaan (Nielsen & Chuang, 2010). Ini seperti sebuah koin yang bisa berputar di udara, tidak hanya menjadi kepala atau ekor, tapi keduanya sekaligus—memberikan potensi pemrosesan data

yang jauh lebih cepat dan efisien.

Contoh aplikasinya bisa dilihat pada bagaimana komputer kuantum bisa digunakan dalam simulasi molekul untuk membantu penemuan obat baru. Dalam sistem biologi kompleks seperti protein, pemodelan interaksi atom dengan presisi tinggi adalah tantangan bagi komputer klasik. Misalnya, simulasi lipatan protein, yang penting untuk memahami penyakit seperti Alzheimer, bisa diselesaikan lebih cepat menggunakan komputer kuantum (Reiher et al., 2017). Teknologi ini berpotensi merevolusi industri kesehatan dan farmasi, mempercepat proses penemuan obat-obatan.

Dalam kehidupan sehari-hari, meskipun komputer kuantum belum digunakan di rumah atau perangkat pribadi, dampaknya mulai terasa di sektor industri yang menggunakan simulasi untuk membuat inovasi lebih efisien. Beberapa algoritma, seperti Shor's Algorithm, telah mengubah cara dunia melihat kriptografi, memungkinkan pemecahan kunci enkripsi yang sebelumnya dianggap tak terpecahkan oleh komputer klasik (Shor, 1997).

2. Optika Kuantum

Optika kuantum adalah bidang lain yang telah melihat kemajuan luar biasa berkat fisika kuantum. Teknologi seperti laser kuantum telah meresap ke dalam kehidupan sehari-hari, mulai dari perangkat pemutar Blu-ray hingga peralatan medis seperti laser operasi mata. Salah satu aplikasi paling menarik dalam optika kuantum adalah pada teknologi **Quantum Key Distribution (QKD)**, yang memberikan keamanan data tingkat tinggi dalam komunikasi. Prinsipnya sederhana namun sangat kuat: jika ada pihak yang mencoba mengintersepsi informasi kuantum, keadaan foton akan terganggu dan intersepsi tersebut dapat dideteksi secara langsung (Gisin et al., 2002).

Bayangkan aplikasi ini dalam kehidupan sehari-hari: misalnya,

saat mengirim pesan terenkripsi melalui internet, dengan QKD, keamanan komunikasi Anda menjadi lebih kuat dibandingkan enkripsi klasik. Penerapan QKD di sektor perbankan dan keamanan nasional sudah dimulai, terutama di negara-negara yang memprioritaskan perlindungan data dengan standar tertinggi. Pada masa depan, kita mungkin akan memiliki Kuantum Internet, jaringan komunikasi berbasis keterikatan kuantum yang bisa menghubungkan komputer-komputer kuantum di seluruh dunia. Dengan Kuantum Internet, pertukaran data akan lebih cepat dan lebih aman, meminimalkan ancaman peretasan yang saat ini menjadi momok besar bagi individu dan organisasi (Wehner, Elkouss, & Hanson, 2018).

3. Pengaruh Fisika Kuantum dalam Kimia

Fisika kuantum telah membawa dampak besar dalam bidang kimia, terutama dalam memahami reaksi molekuler pada tingkat atom. Dengan bantuan teori kuantum, para ilmuwan kini dapat memodelkan interaksi atom dalam reaksi kimia dengan presisi yang belum pernah terjadi sebelumnya. Salah satu contoh penerapannya adalah pada pengembangan material baru yang memiliki sifat superkonduktivitas atau kekuatan yang lebih tinggi, seperti graphene (Geim & Novoselov, 2007).

Graphene, material berstruktur satu lapisan atom karbon, menjadi contoh nyata penerapan fisika kuantum dalam kehidupan sehari-hari. Material ini digunakan untuk membuat layar sentuh yang fleksibel, baterai berkapasitas tinggi, dan bahkan dalam pakaian pintar. Inovasi semacam ini hanya mungkin berkat pemahaman mendalam tentang interaksi kuantum pada skala atom.

12.2. Implementasi Fisika Kuantum di Bidang Teknologi

Seiring dengan perkembangan fisika kuantum, penerapannya tidak terbatas pada teori ilmiah saja, tetapi juga telah membentuk

berbagai inovasi teknologi yang mulai meresap ke dalam kehidupan sehari-hari. Dari perangkat elektronik hingga metode komunikasi yang lebih aman, fisika kuantum telah menjadi fondasi bagi pengembangan teknologi masa depan yang lebih canggih. Banyak perusahaan teknologi besar kini berlomba-lomba untuk mengadopsi prinsip kuantum guna menciptakan solusi yang lebih efisien dan inovatif. Teknologi berbasis kuantum tidak hanya mendorong batasan yang ada, tetapi juga membentuk era baru dalam perhitungan, komunikasi, dan sensor yang lebih presisi. Salah satu aplikasi utama yang menjadi sorotan di bidang teknologi adalah komputer kuantum, yang memiliki potensi besar untuk mengubah lanskap industri.

1. Teknologi Komputer Kuantum

Komputer kuantum menawarkan solusi untuk masalah yang terlalu rumit diselesaikan oleh komputer klasik, seperti optimisasi dan pemodelan molekuler. Dalam kehidupan sehari-hari, ini mungkin belum langsung terasa, tetapi dampaknya bisa sangat signifikan di sektor seperti farmasi, di mana komputer kuantum dapat mempercepat proses penemuan obat (Reiher et al., 2017). Selain itu, perusahaan teknologi besar seperti Google dan IBM telah melakukan terobosan besar dalam pengembangan teknologi ini.

Pada tahun 2019, Google mengklaim telah mencapai *quantum supremacy*, sebuah pencapaian yang menunjukkan bahwa komputer kuantum bisa melakukan perhitungan dalam hitungan menit yang membutuhkan ribuan tahun oleh komputer klasik (Arute et al., 2019). Walaupun komputer kuantum masih berada dalam tahap awal pengembangan dan belum tersedia di pasar konsumen, potensi aplikasi di bidang industri, seperti pemecahan masalah optimasi yang kompleks atau simulasi perilaku pasar saham, bisa memberikan dampak signifikan pada kehidupan sehari-hari kita di masa depan.

2. Komunikasi Kuantum

Sebagai kelanjutan dari optika kuantum, di mana foton tunggal dan interaksi cahaya dengan materi memainkan peran penting, komunikasi kuantum muncul sebagai salah satu aplikasi praktis yang memanfaatkan prinsip-prinsip ini. Dalam komunikasi kuantum, keterikatan kuantum dan fenomena superposisi digunakan untuk menciptakan sistem komunikasi yang jauh lebih aman dan tahan terhadap ancaman peretasan dibandingkan dengan teknologi klasik.

Salah satu teknologi terdepan di bidang ini adalah ***Quantum Key Distribution (QKD)***. Seperti yang dijelaskan dalam optika kuantum, QKD memungkinkan dua pihak untuk berbagi kunci enkripsi secara aman menggunakan foton sebagai pembawa informasi kuantum. Jika ada upaya intersepsi, keadaan kuantum foton akan terganggu, sehingga deteksi intersepsi dapat dilakukan secara instan (Gisin et al., 2002). Teknologi komunikasi kuantum, seperti QKD, menawarkan keamanan komunikasi yang belum pernah ada sebelumnya. Dalam dunia yang semakin bergantung pada transaksi digital dan perlindungan data, QKD menjanjikan keamanan yang tak dapat ditembus oleh teknologi klasik.

Contoh aplikasinya dapat dilihat pada sektor perbankan digital. Misalnya, jika QKD diintegrasikan ke dalam sistem perbankan, upaya peretasan dapat segera terdeteksi, memberikan perlindungan yang sangat kuat terhadap data sensitif seperti informasi kartu kredit atau transaksi perbankan online. Dengan QKD, sistem ini akan membuat setiap usaha penyadapan segera terungkap, memastikan bahwa informasi yang dikirim tetap aman dan rahasia.

Bayangkan masa depan di mana Anda bisa mengirim data pribadi melalui internet dengan ketenangan pikiran, mengetahui bahwa tidak ada yang bisa menyadap atau mencuri informasi tersebut. Keamanan data ini akan membawa manfaat besar, terutama di dunia yang semakin terhubung dengan perangkat pintar

dan transaksi online, di mana keamanan dan privasi menjadi prioritas utama.

Dengan kemampuan seperti ini, komunikasi kuantum tidak hanya menawarkan perlindungan lebih baik, tetapi juga membuka jalan bagi pengembangan kuantum Internet, sebuah infrastruktur komunikasi global yang akan menghubungkan jaringan kuantum dan mengubah cara kita bertukar informasi di dunia digital yang semakin kompleks (Wehner, Elkouss, & Hanson, 2018).

3. Teknologi Sensor Kuantum

Sensor kuantum menggunakan sifat mekanika kuantum seperti superposisi dan entanglement untuk mendeteksi variabel fisik dengan presisi yang belum pernah terjadi sebelumnya. Salah satu aplikasi menarik adalah atomic clocks, yang telah digunakan dalam sistem navigasi global seperti GPS. Jam atom ini memberikan waktu yang sangat akurat, sehingga memungkinkan pelacakan lokasi dengan presisi tinggi yang digunakan dalam berbagai aplikasi, mulai dari ponsel pintar hingga kendaraan otonom (Ludlow et al., 2015).

Selain itu, teknologi sensor kuantum bisa digunakan untuk pengamatan geofisika, seperti mendeteksi variasi medan gravitasi bumi. Sensor semacam ini berpotensi merevolusi eksplorasi sumber daya alam, seperti minyak bumi atau air bawah tanah, dan bahkan membantu dalam mendeteksi gempa bumi sebelum terjadi.

12.3. Potensi Masa Depan Implementasi Fisika Kuantum

Penerapan fisika kuantum pada beberapa dekade ini, telah bergerak dari ranah teoretis menuju implementasi teknologi nyata yang siap mengubah berbagai aspek kehidupan manusia. Meskipun teknologi berbasis kuantum masih berada pada tahap pengembangan awal, dampaknya sudah mulai terasa, terutama di bidang komputasi dan komunikasi. Di masa depan, perkembangan

teknologi kuantum diprediksi akan menciptakan lompatan besar dalam cara kita memproses informasi, melindungi data, serta memecahkan masalah-masalah kompleks yang tidak dapat dipecahkan oleh teknologi klasik.

Fase ini sering disebut sebagai "revolusi kuantum kedua," di mana penerapan prinsip-prinsip dasar kuantum tidak lagi terbatas pada laboratorium, tetapi mulai masuk ke ranah industri dan aplikasi praktis. Potensi besar ini ditopang oleh sejumlah terobosan penting, seperti *quantum supremacy*, pencapaian revolusioner yang menandai dominasi komputasi kuantum atas komputasi klasik; revolusi industri kuantum, yang diharapkan mampu mengubah banyak sektor industri; serta konsep Kuantum Internet, yang menjanjikan masa depan komunikasi global yang aman dan efisien.

1. Quantum Supremacy

Quantum supremacy adalah tonggak penting di mana komputer kuantum mampu menyelesaikan tugas yang tidak mungkin diselesaikan oleh komputer klasik dalam waktu yang wajar. Meskipun Google telah mengklaim mencapainya, implementasi praktisnya masih dalam perdebatan. Namun, jika *quantum supremacy* benar-benar terwujud, potensi dampaknya di dunia nyata sangat besar, dari memecahkan algoritma kriptografi hingga mempercepat simulasi ilmiah yang kompleks (Arute et al., 2019).

2. Revolusi Industri Kuantum

Fisika kuantum dapat memicu revolusi industri baru yang dikenal sebagai revolusi kuantum kedua. Bayangkan masa depan di mana komputer kuantum membantu merancang material yang lebih kuat, menyusun strategi bisnis yang lebih efisien, dan bahkan membantu memecahkan tantangan perubahan iklim melalui simulasi dan optimasi energi. Di sektor kesehatan, komputasi kuantum akan mempercepat penemuan obat baru, sementara di sektor keuangan, pengambilan keputusan yang kompleks dapat dilakukan secara real-

time dengan risiko lebih rendah (Preskill, 2018).

3. Kuantum Internet

Masa depan kuantum Internet menjanjikan perubahan radikal dalam cara kita berkomunikasi dan mentransfer data. Bayangkan jaringan global di mana setiap transmisi informasi benar-benar aman dari peretasan atau gangguan. Pengembangan Kuantum Internet masih dalam tahap awal, tetapi potensinya dalam mengubah infrastruktur digital global sangat besar, mulai dari komunikasi pribadi hingga keamanan nasional (Wehner, Elkouss, & Hanson, 2018).

12.4. Tantangan dan Batasan Teknologi Berbasis Fisika Kuantum

Seiring Meskipun potensi teknologi kuantum sangat besar, penerapannya masih menghadapi tantangan yang signifikan. Salah satu kendala utama dalam pengembangan teknologi kuantum, terutama di bidang komputasi kuantum, adalah masalah dekoherensi. Dekoherensi terjadi ketika qubit, yang menyimpan dan memproses informasi kuantum, berinteraksi dengan lingkungan eksternal. Akibatnya, informasi kuantum yang disimpan dalam qubit dapat rusak atau hilang, sehingga mengurangi stabilitas sistem kuantum. Tantangan ini membuat para ilmuwan dan insinyur berupaya keras mengembangkan metode koreksi error kuantum yang dapat menjaga informasi tetap akurat selama proses komputasi (Nielsen & Chuang, 2010).

Masalah keterbatasan skala dan biaya juga menjadi hambatan utama dalam implementasi teknologi kuantum. Untuk mencapai skala komersial dan dapat diterapkan dalam kehidupan sehari-hari, teknologi kuantum memerlukan investasi besar dalam pengembangan perangkat keras, infrastruktur, dan sistem pemrosesan yang canggih. Saat ini, hanya perusahaan besar dengan sumber daya signifikan, seperti Google, IBM, dan Microsoft, yang

mampu melakukan penelitian dan pengembangan di bidang ini. Untuk memperluas adopsi teknologi kuantum, perlu ada upaya dalam menurunkan biaya produksi dan meningkatkan efisiensi sistem kuantum (Preskill, 2018). Meskipun tantangan teknis dan finansial ini ada, para ilmuwan dan insinyur di seluruh dunia terus membuat kemajuan yang signifikan. Dengan adanya kolaborasi lintas disiplin antara fisikawan, insinyur, dan ahli komputer, tantangan ini lambat laun bisa diatasi. Koreksi error kuantum sudah menunjukkan hasil yang menjanjikan dalam menjaga stabilitas qubit, dan upaya untuk meningkatkan skala sistem kuantum terus berlangsung. Dalam jangka panjang, ketika masalah dekoherensi dan biaya berhasil diatasi, teknologi kuantum akan semakin mendekati implementasi penuh di berbagai sektor industri dan ilmiah.

• Referensi

- Arute, F., Arya, K., Babbush, R., Bacon, D., Bardin, J. C., Barends, R., ... & Martinis, J. M. (2019). Quantum supremacy using a programmable superconducting processor. *Nature*, 574(7779), 505-510.
- Geim, A. K., & Novoselov, K. S. (2007). The rise of graphene. *Nature Materials*, 6(3), 183-191.
- Gisin, N., Ribordy, G., Tittel, W., & Zbinden, H. (2002). Quantum cryptography. *Reviews of Modern Physics*, 74(1), 145-195.
- Ludlow, A. D., Boyd, M. M., Ye, J., Peik, E., & Schmidt, P. O. (2015). Optical atomic clocks. *Reviews of Modern Physics*, 87(2), 637-701.
- Nielsen, M. A., & Chuang, I. L. (2010). *Quantum Computation and Quantum Information: 10th Anniversary Edition*. Cambridge University Press.
- Preskill, J. (2018). Quantum computing in the NISQ era and beyond. *Quantum*, 2, 79.

- Reiher, M., Wiebe, N., Svore, K. M., Wecker, D., & Troyer, M. (2017). Elucidating reaction mechanisms on quantum computers. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 114(29), 7555-7560.
- Shor, P. W. (1997). Polynomial-time algorithms for prime factorization and discrete logarithms on a quantum computer. *SIAM Journal on Computing*, 26(5), 1484-1509.
- Wehner, S., Elkouss, D., & Hanson, R. (2018). Quantum internet: A vision for the road ahead. *Science*, 362(6412).

PROFIL PENULIS

Subhan Annur, M.Pd.

Universitas Lambung Mangkurat

Syubhan Annur, M.Pd sebagai Dosen Program Studi Pendidikan IPA FKIP Universitas Lambung Mangkurat, Lulusan Sarjana S1 Pendidikan Fisika tahun 2004 di Universitas Islam Negeri Sunan Kalijaga Yogyakarta, Lulus Program Magister pada tahun 2012 di Program Studi Pendidikan Sains(IPA) di Universitas Negeri Yogyakarta. Saat ini sedang menyelesaikan program doctoral S3 Pendidikan IPA di Universitas Negeri Semarang. Publikasi buku yang sudah diterbitkan: Bumi dan Antariksa dalam Teori Moderen dan Alquran (2017), Fisika Dasar 1 (2020), Bumi dan Kebencanaan Model Pembelajaran STEMK Wasaka (2023), Kontigensi Bencana Kabut Asap Kota Banjarbaru (2023), Resiko Bencana (2023), Rencana Penanggulangan Rawan Bencana (2024).

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
git4lentera@gmail.com www.git4lentera.com

ISBN 978-623-8708-75-8



9 786238 708758



IKAPI
IKATAN PENERBIT INDONESIA

Anggota IKAPI
No. 042/SBA/2023