

Bab 3: Dari Partikel dan Gelombang ke Dualitas Kuantum

Pada Bab 2 kita melihat cara berpikir klasik: sebuah partikel dianggap mempunyai posisi dan momentum tertentu, bergerak melalui lintasan tertentu, dan berubah menurut hukum gerak yang deterministik. Cara berpikir ini sangat berhasil untuk bola, planet, peluru, bandul, dan banyak sistem fisis makroskopik.

Tetapi Bab 1 sudah memberi tanda bahwa gambaran itu tidak cukup. Radiasi benda hitam memerlukan gagasan energi yang terkuantisasi. Efek fotolistrik menunjukkan bahwa cahaya, yang dalam elektromagnetisme klasik dipahami sebagai gelombang, dalam keadaan tertentu bertindak seolah-olah datang dalam paket-paket energi. Spektrum atom menunjukkan bahwa elektron dalam atom tidak dapat memiliki sembarang energi. Stabilitas materi juga sulit dipahami jika elektron hanya dibayangkan sebagai partikel bermuatan yang mengorbit inti menurut elektromagnetisme klasik.

Bab ini mengambil langkah berikutnya. Kita akan membangun gagasan bahwa entitas kuantum—misalnya foton, elektron, neutron, atom, bahkan molekul kecil—tidak dapat dipahami hanya sebagai partikel klasik atau gelombang klasik. Mereka menampilkan ciri yang dalam bahasa sejarah disebut dualitas gelombang-partikel, tetapi istilah itu harus dipahami dengan hati-hati.

Dualitas kuantum bukan berarti “elektron kadang-kadang benar-benar partikel klasik, kadang-kadang benar-benar gelombang klasik.” Lebih tepatnya: konsep partikel klasik dan gelombang klasik masing-masing menangkap sebagian aspek dari perilaku kuantum, tetapi tidak satu pun cukup sebagai gambaran lengkap.

Kita mulai dari dua konsep yang sudah akrab: partikel dan gelombang.

3.1 Partikel klasik dan gelombang klasik

Dalam mekanika klasik, partikel adalah model ideal untuk benda yang ukurannya dapat diabaikan dibandingkan skala geraknya. Sebuah partikel klasik memiliki posisi tertentu $x(t)$ pada waktu t , momentum tertentu $p(t)$, dan lintasan tertentu di ruang.

Contoh sederhana adalah bola kecil yang dilempar. Pada setiap saat, bola berada di suatu tempat. Jika kita mengetahui posisi awal, kecepatan awal, dan gaya-gaya yang bekerja, mekanika Newton memungkinkan kita menghitung lintasannya. Dalam gambaran klasik, bola tidak “menyebar” melewati dua jalan sekaligus. Ia mengikuti satu lintasan.

Sebaliknya, gelombang klasik adalah gangguan yang menyebar melalui ruang dan waktu. Gelombang air, gelombang bunyi, dan gelombang elektromagnetik adalah contoh penting. Gelombang memiliki ciri-ciri seperti panjang gelombang, frekuensi, amplitudo, fase, interferensi, dan difraksi.

Panjang gelombang adalah jarak antara dua puncak gelombang berturutan. Biasanya dilambangkan dengan λ . Frekuensi adalah banyaknya osilasi per satuan waktu, dilambangkan dengan f atau ν . Untuk gelombang yang merambat dengan kecepatan v , hubungan dasarnya adalah

$$v = \lambda f.$$

Untuk cahaya di vakum, kecepatannya adalah c , sehingga

$$c = \lambda f.$$

Gelombang klasik juga dapat saling menumpuk. Jika dua gelombang bertemu, simpangan totalnya adalah jumlah simpangan masing-masing. Prinsip ini disebut superposisi.

Contohnya, dua gelombang air dapat bertemu. Jika puncak bertemu puncak, gelombang menjadi lebih tinggi. Ini disebut interferensi konstruktif. Jika puncak bertemu lembah, keduanya dapat saling melemahkan. Ini disebut interferensi destruktif.

Partikel klasik dan gelombang klasik tampak sangat berbeda:

- partikel klasik terlokalisasi, sedangkan gelombang klasik menyebar;
- partikel klasik mengikuti lintasan, sedangkan gelombang merambat melalui banyak daerah sekaligus;
- partikel klasik dapat dihitung satu per satu, sedangkan gelombang klasik biasanya digambarkan oleh amplitudo yang kontinu;
- gelombang menunjukkan interferensi dan difraksi, sedangkan partikel klasik biasa tidak.

Mekanika kuantum muncul ketika alam menunjukkan bahwa pemisahan tajam ini tidak dapat dipertahankan.

3.2 Kuantisasi: ketika besaran fisis tidak berubah sembarang kecil

Kata kuantisasi berarti bahwa suatu besaran fisis hanya dapat mengambil nilai-nilai tertentu, bukan sembarang nilai kontinu. Dalam bahasa sederhana, kuantisasi berarti “bertingkat” atau “berpaket”.

Contoh sehari-hari dapat membantu, walaupun tidak sempurna. Uang logam di dompet bersifat terkuantisasi dalam satuan tertentu: jika hanya ada koin Rp500 dan Rp1.000, maka jumlah uang logam tidak dapat berubah sebesar Rp137. Energi pada tangga klasik seperti menaiki bidang miring bersifat kontinu, tetapi energi pada sistem kuantum tertentu lebih mirip menaiki anak tangga: hanya tingkat-tingkat tertentu yang diizinkan.

Namun, contoh uang logam hanyalah analogi. Dalam mekanika kuantum, kuantisasi bukan karena keterbatasan alat hitung atau kesepakatan manusia. Kuantisasi muncul dari struktur hukum alam.

Secara historis, gagasan kuantisasi menjadi penting dalam masalah radiasi benda hitam. Max Planck menemukan bahwa spektrum radiasi benda hitam dapat dijelaskan jika pertukaran energi antara materi dan radiasi terjadi dalam paket-paket yang sebanding dengan frekuensi, yaitu

$$E = hf,$$

dengan E energi, f frekuensi, dan h konstanta Planck (Planck, 1901). Nilai konstanta Planck adalah

$$h \approx 6,626 \times 10^{-34} \text{ J s.}$$

Konstanta ini sangat kecil dalam satuan sehari-hari. Karena itu, efek kuantisasi sering tidak terlihat pada benda makroskopik. Untuk bola tenis, energi dan momentum tampak dapat berubah secara kontinu. Tetapi pada skala atomik, h tidak dapat diabaikan.

Kuantisasi adalah salah satu perbedaan terdalam antara mekanika klasik dan mekanika kuantum. Dalam mekanika klasik, energi sebuah osilator harmonik—misalnya massa pada pegas ideal—dapat bernilai berapa saja, bergantung pada amplitudonya. Dalam mekanika kuantum, osilator harmonik memiliki tingkat energi diskret. Kita akan menghitungnya secara rinci pada Bab 10.

Untuk saat ini, pelajaran utamanya adalah:

> Pada beberapa sistem fisis mikroskopik, besaran seperti energi tidak tersedia sebagai pilihan kontinu, melainkan dalam tingkat-tingkat yang diizinkan.

Ini tidak dapat dijelaskan oleh mekanika klasik biasa.

3.3 Cahaya sebagai gelombang: keberhasilan klasik yang nyata

Sebelum berbicara tentang foton, kita harus mengakui bahwa cahaya memang memiliki sifat gelombang yang sangat kuat.

Dalam elektromagnetisme Maxwell, cahaya adalah gelombang elektromagnetik: medan listrik dan medan magnet yang saling terkait dan merambat dengan kecepatan c . Teori ini menjelaskan pemantulan, pembiasan, polarisasi, interferensi, difraksi, dan banyak gejala optik klasik.

Salah satu bukti penting sifat gelombang cahaya adalah eksperimen celah ganda. Bayangkan sebuah sumber cahaya diarahkan ke layar dengan dua celah sempit. Di belakang celah ada layar penangkap. Jika cahaya hanya terdiri dari partikel klasik kecil yang melewati salah satu celah, kita mungkin mengharapkan dua daerah terang, masing-masing tepat di belakang celah.

Tetapi yang muncul adalah pola garis terang dan gelap. Garis terang muncul di tempat gelombang dari dua celah saling memperkuat. Garis gelap muncul di tempat gelombang dari dua celah saling melemahkan. Pola seperti ini adalah tanda interferensi.

Secara klasik, penjelasannya jelas: gelombang cahaya melewati kedua celah, lalu dua gelombang hasil celah saling bertumpuk di layar. Di titik tertentu, beda lintasan dari celah pertama dan celah kedua menentukan apakah interferensi konstruktif atau destruktif.

Jika beda lintasan adalah kelipatan bulat panjang gelombang,

$$\Delta L = m\lambda, \quad m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots,$$

maka terjadi interferensi konstruktif. Jika beda lintasan adalah setengah kelipatan ganjil panjang gelombang,

$$\Delta L = \left(m + \frac{1}{2}\right) \lambda,$$

maka terjadi interferensi destruktif.

Sampai di sini, cahaya tampak sangat cocok sebagai gelombang klasik. Tetapi efek fotolistrik dan hamburan Compton menunjukkan bahwa gambaran gelombang klasik saja tidak cukup.

3.4 Foton: paket energi cahaya

Dalam efek fotolistrik, cahaya yang mengenai permukaan logam dapat melepaskan elektron. Hasil eksperimennya tidak sesuai dengan prediksi gelombang klasik sederhana. Yang penting bukan hanya intensitas cahaya, tetapi frekuensinya. Di bawah frekuensi ambang tertentu, elektron tidak keluar meskipun intensitas cahaya diperbesar. Di atas frekuensi ambang, elektron dapat keluar, dan energi kinetik maksimumnya bertambah ketika frekuensi cahaya dinaikkan.

Albert Einstein menjelaskan gejala ini dengan mengusulkan bahwa cahaya, dalam interaksinya dengan materi, bertindak seolah-olah terdiri dari paket-paket energi. Paket cahaya itu kemudian disebut foton. Energi satu foton diberikan oleh

$$E = hf.$$

Gagasan ini digunakan Einstein untuk menjelaskan efek fotolistrik pada tahun 1905 (Einstein, 1905).

Jika sebuah elektron dalam logam memerlukan energi minimum ϕ untuk keluar—disebut fungsi kerja logam—maka energi kinetik maksimum elektron yang terlepas adalah

$$K_{\text{maks}} = hf - \phi.$$

Persamaan ini mengandung beberapa pelajaran penting.

Pertama, jika $hf < \phi$, elektron tidak dapat keluar. Menambah intensitas cahaya berarti menambah jumlah foton, tetapi energi tiap foton tetap hf . Jika energi tiap foton terlalu kecil, satu foton tidak cukup untuk melepaskan elektron.

Kedua, jika $hf > \phi$, kelebihan energi menjadi energi kinetik elektron. Semakin tinggi frekuensi, semakin besar energi kinetik maksimum elektron.

Ketiga, dalam penjelasan ini cahaya tidak diperlakukan hanya sebagai gelombang kontinu. Ia juga membawa energi dalam paket-paket individual.

Contoh numerik sederhana: misalkan cahaya memiliki frekuensi f , sehingga energi fotonnya $hf = 4 \text{ eV}$. Jika fungsi kerja logam adalah $\phi = 2,5 \text{ eV}$, maka energi kinetik maksimum elektron yang keluar adalah

$$K_{\text{maks}} = 4 \text{ eV} - 2,5 \text{ eV} = 1,5 \text{ eV}.$$

Jika frekuensi cahaya diturunkan sehingga $hf = 2 \text{ eV}$, elektron tidak keluar karena energi tiap foton lebih kecil daripada fungsi kerja.

Di sini terlihat perbedaan tajam dengan mekanika klasik. Dalam gambaran gelombang klasik murni, kita mungkin berharap bahwa gelombang cahaya yang cukup intens akhirnya dapat memberi energi yang cukup kepada elektron, apa pun frekuensinya. Tetapi eksperimen menunjukkan adanya frekuensi ambang. Itu adalah tanda bahwa energi cahaya dalam interaksi ini bersifat kuantum.

3.5 Momentum foton dan hamburan Compton

Energi bukan satu-satunya besaran yang perlu dipikirkan. Cahaya juga membawa momentum. Untuk foton di vakum, hubungan antara energi dan momentum adalah

$$E = pc,$$

sehingga, karena $E = hf$ dan $c = \lambda f$, momentum foton adalah

$$p = \frac{E}{c} = \frac{hf}{c} = \frac{h}{\lambda}.$$

Rumus

$$p = \frac{h}{\lambda}$$

akan menjadi sangat penting. Ia menghubungkan besaran yang biasanya kita asosiasikan dengan partikel, yaitu momentum, dengan besaran yang biasanya kita asosiasikan dengan gelombang, yaitu panjang gelombang.

Bukti kuat bahwa cahaya membawa momentum dalam paket-paket datang dari hamburan Compton. Dalam eksperimen ini, sinar-X ditembakkan ke elektron. Setelah bertumbukan, panjang gelombang sinar-X berubah bergantung pada sudut hamburan. Arthur H. Compton menjelaskan perubahan ini dengan memperlakukan sinar-X sebagai foton yang bertumbukan dengan elektron seperti tumbukan relativistik antara partikel, dengan energi dan momentum kekal (Compton, 1923).

Perubahan panjang gelombang Compton diberikan oleh

$$\Delta\lambda = \lambda' - \lambda = \frac{h}{m_e c} (1 - \cos \theta),$$

dengan:

- λ panjang gelombang foton sebelum hamburan,
- λ' panjang gelombang foton setelah hamburan,
- m_e massa elektron,
- c kecepatan cahaya,
- θ sudut hamburan foton.

Besaran

$$\lambda_C = \frac{h}{m_e c}$$

disebut panjang gelombang Compton elektron.

Hamburan Compton memperkuat pelajaran dari efek fotolistrik: cahaya tidak dapat dipahami hanya sebagai gelombang elektromagnetik klasik. Dalam interaksi tertentu, cahaya bertindak seperti paket energi dan momentum.

Namun kita juga tidak boleh menyimpulkan bahwa cahaya hanyalah partikel klasik. Cahaya tetap menunjukkan interferensi dan difraksi. Jadi kita memerlukan bahasa baru: cahaya adalah entitas kuantum.

3.6 Apakah elektron juga memiliki sifat gelombang?

Sampai titik ini, mungkin kita berpikir: “Baiklah, cahaya ternyata memiliki aspek partikel. Tetapi elektron tetap partikel, bukan?”

Secara klasik, elektron mudah dibayangkan sebagai partikel kecil bermuatan negatif. Dalam tabung sinar katode, elektron dapat dibelokkan oleh medan listrik dan medan magnet. Ia memiliki massa, muatan, energi, dan momentum. Banyak gejala membuat elektron tampak seperti partikel.

Namun Louis de Broglie mengusulkan gagasan yang lebih radikal: jika cahaya, yang dikenal sebagai gelombang, memiliki aspek partikel, maka partikel bermateri seperti elektron juga mungkin memiliki aspek gelombang. Ia mengusulkan bahwa partikel bermomentum p memiliki panjang gelombang

$$\lambda = \frac{h}{p}$$

Gagasan ini dikenal sebagai panjang gelombang de Broglie. De Broglie mengembangkan hubungan ini dalam karya awalnya tentang teori kuantum (de Broglie, 1925).

Untuk partikel nonrelativistik bermassa m dan kecepatan v , momentumnya adalah

$$p = mv,$$

sehingga panjang gelombang de Broglie menjadi

$$\lambda = \frac{h}{mv}.$$

Rumus ini sangat sederhana, tetapi maknanya besar: momentum partikel dikaitkan dengan panjang gelombang.

Mari lihat contoh.

Misalkan sebuah elektron bergerak dengan kecepatan $v = 1,0 \times 10^6$ m/s. Massa elektron adalah

$$m_e \approx 9,11 \times 10^{-31} \text{ kg}.$$

Momentumnya kira-kira

$$p = m_e v = (9,11 \times 10^{-31})(1,0 \times 10^6) = 9,11 \times 10^{-25} \text{ kg m/s}.$$

Maka panjang gelombang de Broglie-nya adalah

$$\lambda = \frac{6,626 \times 10^{-34}}{9,11 \times 10^{-25}} \approx 7,27 \times 10^{-10} \text{ m}.$$

Ini sekitar 0,7 nm, seukuran skala atomik. Jadi sifat gelombang elektron dapat terlihat ketika elektron berinteraksi dengan struktur yang ukurannya juga atomik, misalnya kisi kristal.

Sekarang bandingkan dengan bola tenis bermassa 0,057 kg yang bergerak dengan kecepatan 30 m/s. Momentumnya

$$p = (0,057)(30) = 1,71 \text{ kg m/s.}$$

Panjang gelombang de Broglie-nya

$$\lambda = \frac{6,626 \times 10^{-34}}{1,71} \approx 3,9 \times 10^{-34} \text{ m.}$$

Nilai ini luar biasa kecil, jauh lebih kecil daripada ukuran inti atom. Karena itu, efek gelombang bola tenis tidak tampak dalam pengalaman sehari-hari. Bukan karena hukum kuantum berhenti berlaku, melainkan karena panjang gelombang de Broglie benda makroskopik biasanya terlalu kecil untuk diamati dalam kondisi biasa.

Inilah salah satu cara mekanika klasik muncul sebagai pendekatan yang baik: untuk benda makroskopik, aspek gelombang kuantum sering tidak relevan secara praktis.

3.7 Difraksi elektron: bukti gelombang materi

Jika elektron memiliki panjang gelombang, maka elektron seharusnya dapat menunjukkan difraksi dan interferensi. Difraksi adalah penyebaran gelombang ketika melewati celah sempit atau berinteraksi dengan penghalang yang ukurannya sebanding dengan panjang gelombang.

Untuk cahaya, difraksi mudah diamati dengan celah kecil atau kisi optik. Untuk elektron, panjang gelombangnya pada energi laboratorium tertentu berada pada skala atomik. Maka kisi kristal, dengan jarak antaratom yang juga sekitar 10^{-10} m, dapat bertindak sebagai kisi difraksi bagi elektron.

Eksperimen Davisson-Germer menunjukkan bahwa elektron yang dipantulkan oleh kristal nikel menghasilkan pola difraksi, sesuai dengan gagasan gelombang de Broglie (Davisson & Germer, 1927). Pada periode yang sama, G. P. Thomson dan A. Reid mengamati difraksi elektron melalui film tipis, juga mendukung sifat gelombang elektron (Thomson & Reid, 1927).

Hasil ini sangat penting. Elektron bukan hanya “partikel kecil” dalam pengertian klasik. Elektron dapat menghasilkan pola difraksi, yaitu gejala yang dalam teori klasik biasanya dikaitkan dengan gelombang.

Tetapi sekali lagi, kita harus hati-hati. Ketika elektron dideteksi pada layar, deteksinya terjadi sebagai peristiwa terlokalisasi: satu titik, satu kejadian. Ini tampak seperti partikel. Namun distribusi banyak kejadian deteksi membentuk pola interferensi atau difraksi. Ini tampak seperti gelombang.

Maka elektron tidak cocok disebut partikel klasik, dan juga tidak cocok disebut gelombang klasik. Ia adalah entitas kuantum.

3.8 Eksperimen celah ganda: inti keanehan kuantum

Eksperimen celah ganda adalah salah satu eksperimen paling jernih untuk melihat perbedaan antara mekanika klasik dan mekanika kuantum. Richard Feynman bahkan menyebutnya sebagai fenomena yang mengandung “satu-satunya misteri” mekanika kuantum dalam arti bahwa banyak ciri khas kuantum dapat dilihat darinya (Feynman, Leighton, & Sands, 1965).

Mari kita bangun perlahan.

Bayangkan ada sumber yang menembakkan elektron satu per satu menuju layar dengan dua celah sempit. Di belakang celah ada layar detektor. Kita atur intensitas sumber sangat rendah sehingga pada satu waktu hanya satu elektron yang lewat alat.

Secara klasik, ada dua kemungkinan sederhana.

Pertama, jika elektron adalah partikel klasik, setiap elektron melewati celah kiri atau celah kanan. Setelah banyak elektron ditembakkan, pola di layar seharusnya merupakan jumlah dari dua pola partikel: satu dari celah kiri dan satu dari celah kanan. Tidak ada alasan muncul garis-garis gelap akibat interferensi, karena partikel klasik tidak saling meniadakan probabilitas.

Kedua, jika elektron adalah gelombang klasik, gelombang elektron dapat melewati kedua celah dan berinterferensi. Tetapi gelombang klasik biasanya menyebarkan energi secara kontinu. Kita mungkin mengharapkan detektor menerima sedikit energi di banyak tempat sekaligus, bukan kejadian deteksi satu per satu.

Yang terjadi dalam eksperimen kuantum menggabungkan dua aspek:

1. elektron terdeteksi satu per satu sebagai kejadian terlokalisasi;
2. setelah banyak elektron terkumpul, pola deteksinya membentuk pola interferensi.

Eksperimen interferensi elektron dengan celah buatan dilakukan oleh Claus Jönsson pada awal 1960-an (Jönsson, 1961). Demonstrasi pembentukan pola interferensi dari elektron tunggal yang datang satu per satu kemudian ditampilkan secara jelas dalam eksperimen Tonomura dan rekan-rekannya (Tonomura et al., 1989).

Pola ini tidak dapat dijelaskan oleh partikel klasik biasa. Jika setiap elektron hanya melewati satu celah dengan probabilitas biasa, maka membuka dua celah seharusnya memberi pola

$$P_{12}(x) = P_1(x) + P_2(x),$$

dengan $P_1(x)$ pola probabilitas ketika hanya celah 1 terbuka, dan $P_2(x)$ pola ketika hanya celah 2 terbuka.

Tetapi dalam eksperimen interferensi, pola dua celah bukan sekadar jumlah dua pola satu celah. Ada suku interferensi. Dalam bahasa yang akan kita kembangkan pada Bab 4, yang dijumlahkan bukan probabilitasnya langsung, melainkan amplitudo probabilitasnya.

Jika amplitudo dari celah 1 adalah $\psi_1(x)$, dan amplitudo dari celah 2 adalah $\psi_2(x)$, maka amplitudo totalnya adalah

$$\psi(x) = \psi_1(x) + \psi_2(x).$$

Probabilitas deteksi diberikan oleh kuadrat besar amplitudo:

$$P(x) = |\psi(x)|^2.$$

Maka

$$P(x) = |\psi_1(x) + \psi_2(x)|^2.$$

Jika amplitudo-amplitudo ini kompleks, hasilnya mengandung suku silang:

$$P(x) = |\psi_1(x)|^2 + |\psi_2(x)|^2 + 2 \operatorname{Re} [\psi_1^*(x)\psi_2(x)].$$

Suku terakhir adalah suku interferensi. Ia dapat positif, menghasilkan garis terang, atau negatif, menghasilkan garis gelap.

Inilah inti perbedaannya. Dalam probabilitas klasik biasa, jika dua alternatif saling eksklusif—misalnya partikel lewat celah 1 atau lewat celah 2—probabilitas dijumlahkan. Dalam mekanika kuantum, jika alternatif-alternatif itu tidak dibedakan oleh pengukuran, amplitudonya yang dijumlahkan. Dari penjumlahan amplitudo inilah interferensi muncul.

3.9 Apa yang terjadi jika kita mengamati celah yang dilewati?

Pertanyaan alami muncul: elektron sebenarnya lewat celah mana?

Dalam mekanika klasik, pertanyaan ini tampak selalu sah. Sebuah partikel klasik harus melewati celah kiri atau celah kanan. Jika kita belum tahu, itu hanya karena informasi fisis kita belum lengkap.

Dalam mekanika kuantum, situasinya lebih halus. Jika kita memasang alat untuk mengetahui celah mana yang dilewati elektron, maka pola interferensi hilang. Kita memperoleh pola yang sesuai dengan penjumlahan probabilitas dari dua alternatif:

$$P_{12}(x) = P_1(x) + P_2(x),$$

tanpa suku interferensi.

Ini bukan sekadar karena alat ukur “menggangu” elektron dengan cara kasar, walaupun gangguan eksperimental bisa terjadi. Lebih mendasar: informasi tentang lintasan mana yang tersedia membuat dua alternatif menjadi dapat dibedakan secara fisis. Ketika alternatif menjadi dapat dibedakan, amplitudo tidak lagi berinterferensi dengan cara yang sama.

Contoh sederhana: bayangkan dua gelombang air dari dua sumber. Jika keduanya koheren—artinya hubungan fase antara keduanya stabil—pola interferensi jelas terlihat. Jika hubungan fase menjadi acak atau jika informasi yang membedakan sumber tersimpan di lingkungan, pola interferensi dapat hilang. Dalam mekanika kuantum, gagasan ini akan berkembang menjadi konsep dekoherensi, yang akan kita bahas pada Bab 18.

Untuk sekarang, cukup pegang prinsip berikut:

> Interferensi kuantum muncul ketika alternatif-alternatif fisis tidak dibedakan. Ketika informasi pembeda tersedia, pola interferensi dapat hilang.

Ini menunjukkan bahwa mekanika kuantum bukan sekadar teori tentang benda kecil. Ia juga teori tentang struktur informasi fisis: informasi apa yang tersedia, informasi apa yang dapat diperoleh, dan bagaimana informasi itu memengaruhi prediksi probabilitas.

3.10 Mengapa bukan sekadar ketidaktahuan klasik?

Seseorang mungkin berkata: “Mungkin elektron sebenarnya selalu melewati salah satu celah, hanya saja kita tidak tahu. Interferensi muncul karena kita belum mengetahui lintasan sebenarnya.”

Ini adalah dugaan yang masuk akal dari sudut pandang klasik, tetapi tidak cocok dengan struktur eksperimen. Dalam ketidaktahuan klasik biasa, probabilitas total dari dua alternatif eksklusif adalah jumlah probabilitas masing-masing. Jika elektron benar-benar memiliki lintasan pasti melalui celah 1 atau celah 2, dan kita hanya tidak tahu, maka pola total seharusnya

$$P_{12}(x) = P_1(x) + P_2(x).$$

Tetapi pola interferensi menunjukkan bahwa ada suku tambahan yang dapat menambah atau mengurangi probabilitas. Bahkan ada titik di layar yang dapat menjadi gelap ketika dua celah terbuka, padahal titik itu mungkin terang ketika hanya satu celah terbuka.

Ini mustahil dalam probabilitas klasik sederhana. Menambahkan celah kedua tidak seharusnya mengurangi jumlah partikel yang sampai di titik tertentu jika partikel hanya memilih salah satu lintasan secara klasik. Tetapi dalam mekanika kuantum, membuka jalur kedua dapat menghasilkan interferensi destruktif di tempat tertentu.

Contoh konseptualnya begini. Misalkan dengan celah 1 saja, elektron dapat tiba di titik A. Dengan celah 2 saja, elektron juga dapat tiba di titik A. Secara klasik, jika kedua celah dibuka, peluang tiba di A seharusnya bertambah. Tetapi secara kuantum, amplitudo dari dua celah dapat memiliki fase berlawanan sehingga saling meniadakan. Akibatnya, peluang tiba di A dapat menjadi nol.

Ini bukan perilaku partikel klasik. Ini juga bukan perilaku gelombang klasik biasa, karena deteksi tetap terjadi sebagai kejadian individual. Inilah perilaku kuantum.

3.11 Dualitas kuantum: apa artinya dan apa yang bukan artinya

Istilah dualitas gelombang-partikel sering digunakan, tetapi mudah menyesatkan jika dibaca terlalu harfiah.

Makna yang benar:

- entitas kuantum dapat menunjukkan gejala yang dalam fisika klasik diasosiasikan dengan partikel, seperti deteksi terlokalisasi dan pertukaran energi-momentum dalam paket;
- entitas kuantum juga dapat menunjukkan gejala yang dalam fisika klasik diasosiasikan dengan gelombang, seperti interferensi dan difraksi;
- tidak ada model klasik tunggal—partikel kecil dengan lintasan pasti atau gelombang kontinu biasa—yang cukup untuk menjelaskan semua gejala tersebut.

Makna yang keliru:

- elektron bukan bola kecil yang kadang berubah menjadi gelombang air;
- foton bukan butiran klasik kecil yang diam-diam bergerak pada lintasan Newtonian biasa;
- fungsi gelombang bukan gelombang material klasik yang selalu membawa energi tersebar seperti gelombang air;
- dualitas bukan izin untuk memilih gambaran sesuka hati tanpa aturan matematis.

Mekanika kuantum akan mengganti pertanyaan klasik “lintasan apa yang dilalui partikel?” dengan pertanyaan yang lebih tepat: “keadaan kuantum apa yang menggambarkan sistem fisis, dan berapa probabilitas hasil pengukuran tertentu?”

Kita belum membangun bahasa keadaan kuantum secara lengkap. Itu tugas Bab 4 dan Bab 5. Tetapi Bab ini sudah menunjukkan mengapa bahasa itu diperlukan.

3.12 Hubungan energi, frekuensi, momentum, dan panjang gelombang

Mari kumpulkan hubungan-hubungan utama yang muncul dalam bab ini.

Untuk foton:

$$E = hf,$$

$$p = \frac{h}{\lambda},$$

dan karena $c = \lambda f$,

$$E = pc.$$

Untuk partikel bermateri, seperti elektron, de Broglie mengusulkan

$$\lambda = \frac{h}{p}.$$

Jika partikelnya nonrelativistik, maka

$$p = mv,$$

sehingga

$$\lambda = \frac{h}{mv}.$$

Perhatikan struktur yang indah: baik cahaya maupun materi memiliki hubungan antara momentum dan panjang gelombang. Tetapi hubungan energi dan momentum berbeda untuk foton dan partikel bermassa.

Untuk foton:

$$E = pc.$$

Untuk partikel bermassa dalam batas nonrelativistik, energi kinetiknya adalah

$$K = \frac{p^2}{2m}.$$

Maka jangan mencampur rumus tanpa memeriksa konteks fisis. Kesalahan umum adalah memakai $E=pc$ untuk elektron lambat. Itu tidak benar. Rumus $E=pc$ berlaku untuk partikel tak bermassa seperti foton. Untuk elektron, hubungan relativistik penuhnya adalah

$$E^2 = p^2c^2 + m^2c^4,$$

dan dalam batas nonrelativistik energi kinetiknya mendekati $p^2/2m$.

Kebiasaan memeriksa konteks seperti ini penting dalam mekanika kuantum. Simbol yang sama dapat muncul dalam situasi berbeda, tetapi makna fisisnya harus dijaga.

3.13 Apa yang tidak dapat dilakukan mekanika klasik di sini?

Sekarang kita dapat merumuskan dengan jelas keterbatasan mekanika klasik dalam topik bab ini.

Pertama, mekanika klasik tidak dapat menjelaskan kuantisasi energi sebagai struktur dasar. Dalam mekanika klasik, energi osilator dapat berubah kontinu. Tetapi radiasi benda hitam dan sistem atomik menuntut gagasan tingkat atau paket energi.

Kedua, teori gelombang klasik cahaya tidak dapat menjelaskan efek fotolistrik secara lengkap. Frekuensi ambang dan hubungan linear antara energi kinetik maksimum elektron dan frekuensi cahaya memerlukan gagasan foton.

Ketiga, teori gelombang klasik cahaya tanpa foton tidak cukup untuk menjelaskan hamburan Compton. Perubahan panjang gelombang sinar-X akibat hamburan oleh elektron dipahami secara alami melalui konservasi energi-momentum foton.

Keempat, mekanika klasik partikel tidak dapat menjelaskan difraksi elektron. Elektron bermassa dan bermuatan, tetapi dapat menghasilkan pola difraksi seperti gelombang.

Kelima, probabilitas klasik tidak dapat menjelaskan pola celah ganda ketika partikel dikirim satu per satu. Pola interferensi menuntut penjumlahan amplitudo, bukan sekadar penjumlahan probabilitas.

Jadi mekanika kuantum bukan tambahan kecil pada mekanika klasik. Ia mengubah cara kita menghubungkan keadaan, pengukuran, dan prediksi.

3.14 Ringkasan bab

Kita telah bergerak dari bahasa klasik menuju bahasa kuantum.

Dalam mekanika klasik, partikel dan gelombang adalah dua jenis objek yang berbeda. Partikel memiliki lintasan dan posisi tertentu. Gelombang menyebar, berinterferensi, dan berdifraksi. Tetapi alam mikroskopik menunjukkan gabungan perilaku yang tidak dapat dimasukkan ke salah satu kategori klasik tersebut.

Cahaya, yang jelas memiliki sifat gelombang, juga bertindak sebagai paket energi dan momentum: foton. Elektron, yang tampak seperti partikel bermassa, juga memiliki panjang gelombang de Broglie dan dapat berdifraksi. Eksperimen celah ganda menunjukkan inti struktur kuantum: deteksi terjadi secara terlokalisasi, tetapi distribusi banyak deteksi dibentuk oleh interferensi amplitudo.

Pelajaran terpenting bab ini adalah:

> Entitas kuantum bukan partikel klasik dan bukan gelombang klasik. Mereka memerlukan konsep keadaan kuantum, amplitudo probabilitas, dan aturan pengukuran yang berbeda dari mekanika klasik.

Pada Bab 4, kita akan mulai membangun bahasa itu secara sistematis melalui konsep fungsi gelombang. Di sana kita akan melihat bagaimana informasi fisis tentang sistem kuantum dikodekan bukan sebagai posisi dan momentum pasti, melainkan sebagai amplitudo probabilitas yang dapat digunakan untuk menghitung hasil pengukuran.

References

Compton, A. H. (1923). A quantum theory of the scattering of X-rays by light elements. *Physical Review*, 21(5), 483-502.

<https://doi.org/10.1103/PhysRev.21.483>

Davisson, C. J., & Germer, L. H. (1927). Diffraction of electrons by a crystal of nickel. *Physical Review*, 30(6), 705-740.

<https://doi.org/10.1103/PhysRev.30.705>

de Broglie, L. (1925). Recherches sur la théorie des quanta. *Annales de Physique*, 10e série, 3, 22-128.

<https://doi.org/10.1051/anphys/192510030022>

Einstein, A. (1905). Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt. *Annalen der Physik*, 322(6), 132-148. <https://doi.org/10.1002/andp.19053220607>

Feynman, R. P., Leighton, R. B., & Sands, M. (1965). *The Feynman Lectures on Physics, Volume III: Quantum Mechanics*. Addison-Wesley.

Jönsson, C. (1961). Elektroneninterferenzen an mehreren künstlich hergestellten Feinspalten. *Zeitschrift für Physik*, 161, 454–474. <https://doi.org/10.1007/BF01342460>

Planck, M. (1901). Ueber das Gesetz der Energieverteilung im Normalspectrum. *Annalen der Physik*, 309(3), 553–563. <https://doi.org/10.1002/andp.19013090310>

Thomson, G. P., & Reid, A. (1927). Diffraction of cathode rays by a thin film. *Nature*, 119, 890. <https://doi.org/10.1038/119890a0>

Tonomura, A., Endo, J., Matsuda, T., Kawasaki, T., & Ezawa, H. (1989). Demonstration of single-electron buildup of an interference pattern. *American Journal of Physics*, 57(2), 117–120. <https://doi.org/10.1119/1.16104>

Document information

Bab 3: Dari Partikel dan Gelombang ke Dualitas Kuantum

Project	Mekanika Kuantum dari Prinsip Pertama
Document	Document 1.7
Author	mujirin
Verifier	Not verified
Downloaded	July 04, 2026 22:06 KST
Status	Working
Document link	https://www.theorytrace.com/projects/mekanika-kuantum-dari-prinsip-pertama/documents/bab-3-dari-partikel-dan-gelombang-ke-dualitas-kuantum/