

Bab 2: Gelombang, Partikel, dan Hipotesis de Broglie

Pada Bab 1 kita melihat bahwa fisika klasik mulai retak ketika berhadapan dengan radiasi benda hitam, efek fotolistrik, spektrum atom, dan kalor jenis padatan. Retakan itu tidak muncul karena fisikawan kurang teliti menghitung. Retakan itu muncul karena alam mikroskopik memakai aturan yang berbeda dari intuisi sehari-hari.

Bab ini membahas salah satu perubahan cara berpikir paling penting dalam sejarah fisika: cahaya yang selama ini dianggap gelombang ternyata juga memperlihatkan sifat partikel, dan materi yang selama ini dianggap partikel ternyata juga memperlihatkan sifat gelombang.

Gagasan kedua terdengar lebih aneh. Kita terbiasa membayangkan elektron sebagai butiran kecil bermuatan negatif. Tetapi Louis de Broglie mengusulkan bahwa elektron, dan bahkan semua benda bermomentum, memiliki panjang gelombang tertentu. Gagasan ini awalnya tampak berani, tetapi kemudian dikonfirmasi oleh eksperimen difraksi elektron oleh Davisson dan Germer serta oleh G. P. Thomson dan A. Reid pada tahun 1927 (Davisson & Germer, 1927; Thomson & Reid, 1927).

Bab ini tidak bertujuan membuat kita langsung “terbiasa” dengan dunia kuantum. Tujuannya lebih sederhana dan lebih penting: membangun jembatan dari konsep klasik menuju persamaan Schrödinger pada Bab 3.

2.1 Apa yang dimaksud dengan gelombang?

Sebelum membahas dualitas gelombang-partikel, kita harus jelas dahulu tentang kata gelombang.

Secara sederhana, gelombang adalah pola gangguan yang merambat. Pada gelombang air, yang merambat adalah pola naik-turun permukaan air. Pada gelombang bunyi, yang merambat adalah pola rapatan dan renggangan udara. Pada gelombang cahaya klasik, yang merambat adalah medan listrik dan medan magnet yang berubah terhadap waktu.

Ada beberapa besaran dasar untuk menggambarkan gelombang.

Pertama, panjang gelombang, ditulis λ , adalah jarak antara dua titik sefase yang berdekatan. Misalnya, jarak dari puncak gelombang ke puncak gelombang berikutnya.

Kedua, frekuensi, ditulis f , adalah banyaknya siklus gelombang per satuan waktu. Jika dalam satu detik lewat 500 puncak gelombang, frekuensinya 500 Hz.

Ketiga, kecepatan gelombang, ditulis v , menghubungkan panjang gelombang dan frekuensi:

$$v = \lambda f.$$

Untuk cahaya di ruang hampa, kecepatannya adalah

$$c = \lambda f,$$

dengan c kecepatan cahaya di ruang hampa.

Contoh sederhana: jika suatu gelombang air memiliki panjang gelombang 2 m dan frekuensi 3 Hz, maka kecepatannya

$$v = \lambda f = (2 \text{ m})(3 \text{ s}^{-1}) = 6 \text{ m/s}.$$

Gelombang juga memiliki sifat khas yang tidak dimiliki partikel klasik sederhana. Dua yang paling penting adalah interferensi dan difraksi.

Interferensi terjadi ketika dua gelombang bertemu dan amplitudonya saling menjumlah. Jika puncak bertemu puncak, hasilnya lebih besar. Ini disebut interferensi konstruktif. Jika puncak bertemu lembah, keduanya dapat saling melemahkan. Ini disebut interferensi destruktif.

Difraksi adalah penyebaran atau pembelokan pola gelombang ketika gelombang melewati celah, tepi penghalang, atau struktur periodik seperti kisi. Difraksi paling jelas terlihat jika ukuran celah atau jarak antarstruktur sebanding dengan panjang gelombang.

Contoh: gelombang air dengan panjang gelombang besar akan menyebar kuat setelah melewati celah sempit. Tetapi jika panjang gelombangnya sangat kecil dibandingkan celah, gelombang tampak hampir bergerak lurus.

Ide terakhir ini akan menjadi sangat penting: sifat gelombang mudah terlihat jika panjang gelombang tidak terlalu kecil dibandingkan ukuran alat eksperimen.

2.2 Apa yang dimaksud dengan partikel?

Dalam fisika klasik, partikel adalah objek yang dapat dianggap memiliki posisi, kecepatan, massa, dan momentum tertentu pada setiap saat. Sebuah bola tenis, peluru, planet, dan butiran debu sering dapat diperlakukan sebagai partikel jika ukuran internalnya tidak penting bagi masalah yang sedang dipelajari.

Besaran penting untuk partikel adalah momentum. Untuk gerak yang jauh lebih lambat dari cahaya, momentum diberikan oleh

$$p = mv,$$

dengan m massa dan v kecepatan.

Momentum dapat dipahami sebagai “ukuran gerak” suatu benda. Truk pelan dapat memiliki momentum besar karena massanya besar. Peluru kecil juga dapat memiliki momentum besar karena kecepatannya tinggi.

Dalam mekanika klasik, partikel dan gelombang adalah dua kategori yang berbeda. Bola tenis adalah partikel. Gelombang air adalah gelombang. Keduanya memiliki sifat matematis dan perilaku yang berbeda.

Tetapi cahaya mulai mengacaukan pembagian rapi ini.

2.3 Cahaya: gelombang yang membawa paket energi

Pada abad ke-19, teori elektromagnetik Maxwell menjelaskan cahaya sebagai gelombang elektromagnetik. Penjelasan ini sangat berhasil. Interferensi, difraksi, polarisasi, dan perambatan cahaya dapat dijelaskan dengan gambaran gelombang.

Namun efek fotolistrik menunjukkan sisi lain. Dalam efek fotolistrik, cahaya yang mengenai permukaan logam dapat melepaskan elektron. Hasil eksperimen menunjukkan bahwa energi elektron yang keluar bergantung pada frekuensi cahaya, bukan pada intensitas cahaya secara langsung. Einstein menjelaskan hal ini dengan mengusulkan bahwa cahaya bertukar energi dengan materi dalam paket-paket diskret yang sekarang disebut foton (Einstein, 1905).

Energi satu foton adalah

$$E = hf,$$

atau, karena $\omega = 2\pi f$ dan $\hbar = h/2\pi$,

$$E = \hbar\omega.$$

Di sini:

- E adalah energi foton,
- h adalah konstanta Planck,
- f adalah frekuensi cahaya,
- ω adalah frekuensi sudut,
- \hbar dibaca "h-bar".

Konstanta Planck bernilai tepat $h = 6.62607015 \times 10^{-34}$ J s dalam definisi SI modern (BIPM, 2019). Nilainya sangat kecil dalam satuan sehari-hari. Inilah salah satu alasan mengapa efek kuantum tidak tampak jelas pada benda makroskopik.

Contoh: cahaya biru memiliki frekuensi lebih tinggi daripada cahaya merah. Karena energi foton $E = hf$, satu foton biru membawa energi lebih besar daripada satu foton merah. Maka dalam efek fotolistrik, menaikkan frekuensi cahaya dapat membuat elektron keluar dengan energi kinetik lebih besar, sedangkan menaikkan intensitas cahaya terutama menambah jumlah foton yang datang per satuan waktu.

Ini berbeda dari gambaran gelombang klasik murni. Dalam gambaran klasik murni, intensitas cahaya berkaitan dengan energi gelombang. Orang mungkin menduga bahwa cahaya dengan intensitas cukup besar selalu dapat melepaskan elektron, berapa pun frekuensinya. Tetapi eksperimen menunjukkan adanya frekuensi ambang. Di bawah frekuensi tertentu, elektron tidak keluar walaupun intensitas diperbesar. Penjelasan Einstein adalah: jika energi tiap foton terlalu kecil, satu foton tidak cukup untuk melepaskan satu elektron dari logam (Einstein, 1905).

Dengan demikian, cahaya tidak dapat dipahami hanya sebagai gelombang klasik. Ia juga memperlihatkan perilaku seperti partikel: energi datang dalam paket-paket lokal yang dapat diserap oleh elektron.

2.4 Momentum foton

Jika foton membawa energi, apakah foton juga membawa momentum?

Jawabannya: ya.

Untuk partikel relativistik tak bermassa seperti foton, hubungan antara energi dan momentum adalah

$$E = pc.$$

Karena energi foton juga memenuhi

$$E = hf,$$

dan karena untuk cahaya

$$c = \lambda f,$$

maka

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

Jadi momentum foton adalah

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

Dalam bentuk lain, karena $k = 2\pi/\lambda$, kita dapat menulis

$$p = \hbar k.$$

Di sini k disebut bilangan gelombang. Besaran ini mengukur seberapa cepat fase gelombang berubah terhadap posisi. Panjang gelombang besar berarti k kecil. Panjang gelombang kecil berarti k besar.

Momentum foton bukan sekadar gagasan formal. Hamburan Compton menunjukkan bahwa sinar-X yang bertumbukan dengan elektron mengalami perubahan panjang gelombang yang dapat dijelaskan dengan memperlakukan cahaya sebagai kuantum bermomentum $p = h/\lambda$ (Compton, 1923).

Perhatikan struktur matematis yang muncul:

$$E = \hbar\omega,$$

$$p = \hbar k.$$

Energi berkaitan dengan frekuensi. Momentum berkaitan dengan bilangan gelombang. Dua persamaan ini akan menjadi pintu masuk menuju mekanika gelombang.

2.5 Dari foton ke materi: keberanian de Broglie

Sampai titik ini, kita punya cahaya yang bersifat gelombang tetapi juga membawa energi dan momentum seperti partikel. Louis de Broglie kemudian mengajukan pertanyaan sederhana tetapi radikal:

> Jika cahaya yang selama ini dianggap gelombang ternyata juga memiliki sifat partikel, mungkinkah partikel materi yang selama ini dianggap partikel juga memiliki sifat gelombang?

De Broglie mengusulkan bahwa setiap partikel bermomentum p memiliki panjang gelombang

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

Persamaan ini disebut hubungan de Broglie (de Broglie, 1925).

Untuk partikel bermassa yang bergerak jauh lebih lambat daripada cahaya, $p = mv$, sehingga

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

Artinya, semakin besar momentum suatu benda, semakin kecil panjang gelombangnya. Benda besar dan cepat memiliki panjang gelombang yang luar biasa kecil. Elektron yang massanya kecil dapat memiliki panjang gelombang yang cukup besar untuk diamati dalam eksperimen difraksi.

Mari kita hitung dua contoh.

Contoh 1: bola tenis

Ambil bola tenis bermassa kira-kira

$$m = 0.058 \text{ kg}$$

yang bergerak dengan kecepatan

$$v = 30 \text{ m/s.}$$

Momentumnya

$$p = mv = (0.058)(30) = 1.74 \text{ kg m/s.}$$

Panjang gelombang de Broglie-nya

$$\lambda = \frac{h}{p} \approx \frac{6.63 \times 10^{-34}}{1.74} \approx 3.8 \times 10^{-34} \text{ m.}$$

Ini jauh lebih kecil daripada ukuran inti atom, bahkan jauh lebih kecil daripada skala yang dapat diamati dalam percobaan biasa. Karena itu kita tidak melihat bola tenis mengalami difraksi seperti gelombang.

Contoh 2: elektron dipercepat oleh tegangan 100 volt

Elektron bermuatan $-e$ yang dipercepat melalui beda potensial V memperoleh energi kinetik kira-kira

$$K = eV,$$

selama kecepatannya masih cukup rendah sehingga rumus nonrelativistik dapat dipakai. Untuk gerak nonrelativistik,

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

Maka

$$p = \sqrt{2m_e eV},$$

dan panjang gelombang de Broglie elektron adalah

$$\lambda = \frac{h}{\sqrt{2m_e eV}}.$$

Untuk $V = 100$ V, hasilnya kira-kira

$$\lambda \approx 1.23 \times 10^{-10} \text{ m} = 0.123 \text{ nm}.$$

Skala ini sebanding dengan jarak antaratom dalam kristal. Karena itu kristal dapat bertindak seperti kisi difraksi bagi elektron. Inilah alasan mengapa difraksi elektron dapat diamati di laboratorium.

Perbandingan dua contoh ini mengajarkan hal penting: semua benda memiliki panjang gelombang de Broglie, tetapi untuk benda makroskopik panjang gelombangnya biasanya terlalu kecil untuk tampak.

2.6 Apa arti “gelombang materi”?

Kita harus berhati-hati. Ketika dikatakan elektron memiliki panjang gelombang, maksudnya bukan bahwa elektron adalah gelombang air kecil atau gelombang bunyi kecil. Elektron bukan getaran medium klasik.

Dalam mekanika kuantum modern, keadaan elektron dijelaskan oleh fungsi gelombang, yang nanti akan kita tulis sebagai ψ . Fungsi gelombang bukan gelombang materi biasa yang terbuat dari zat. Ia adalah objek matematis yang, melalui aturan Born, digunakan untuk menghitung probabilitas hasil pengukuran. Interpretasi probabilistik ini akan dibahas dengan lebih hati-hati pada Bab 4. Gagasan bahwa $|\psi|^2$ berkaitan dengan probabilitas diperkenalkan oleh Max Born pada tahun 1926, setelah persamaan Schrödinger ditemukan; untuk sekarang kita cukup menyimpan ide bahwa “gelombang” pada partikel kuantum bukan gelombang klasik biasa (Griffiths & Schroeter, 2018).

Namun sebelum masuk ke interpretasi probabilitas, kita dapat memahami beberapa hal dari bentuk gelombangnya.

Gelombang bidang satu dimensi dapat ditulis secara kompleks sebagai

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

Di sini:

- A adalah amplitudo,
- i adalah bilangan imajiner dengan $i^2 = -1$,
- k adalah bilangan gelombang,
- ω adalah frekuensi sudut.

Mengapa memakai bilangan kompleks? Karena bentuk eksponensial kompleks sangat memudahkan perhitungan fase, turunan, dan superposisi gelombang. Besaran yang dapat diukur tetap berupa bilangan real. Pada bab-bab berikutnya kita akan melihat bahwa struktur kompleks ini bukan sekadar trik matematika, melainkan bagian alami dari mekanika kuantum.

Hubungan de Broglie dan Planck-Einstein dapat ditulis sebagai

$$p = \hbar k,$$

$$E = \hbar \omega.$$

Jadi gelombang dengan k besar berkaitan dengan momentum besar. Gelombang dengan ω besar berkaitan dengan energi besar.

Ini memberi petunjuk kuat: jika kita ingin membuat teori gelombang untuk partikel, maka turunan terhadap posisi harus berkaitan dengan momentum, dan turunan terhadap waktu harus berkaitan dengan energi. Petunjuk inilah yang akan mengarah ke persamaan Schrödinger pada Bab 3.

2.7 Gelombang bidang dan paket gelombang

Gelombang bidang

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

memiliki panjang gelombang dan momentum yang pasti. Tetapi gelombang ini tersebar di seluruh ruang. Amplitudonya tidak terlokalisasi di satu tempat. Jika elektron digambarkan hanya oleh satu gelombang bidang sempurna, elektron itu tidak memiliki posisi tertentu.

Sebaliknya, dalam eksperimen kita sering mendeteksi elektron pada titik tertentu di layar. Bagaimana mungkin sesuatu yang berperilaku seperti gelombang juga terdeteksi secara lokal?

Jawabannya adalah konsep paket gelombang.

Paket gelombang adalah gabungan banyak gelombang dengan bilangan gelombang yang sedikit berbeda. Ketika gelombang-gelombang ini dijumlahkan, mereka dapat saling memperkuat di daerah tertentu dan saling melemahkan di daerah lain. Hasilnya adalah pola yang lebih terlokalisasi.

Contoh visual: bayangkan banyak gelombang air dengan panjang gelombang hampir sama bertemu. Di beberapa tempat puncaknya hampir sejajar sehingga gelombang besar muncul. Di tempat lain puncak dan lembah saling menghapus. Pola yang tampak dapat berupa "gumpalan" gelombang yang bergerak.

Dalam bahasa matematika, lokalisasi membutuhkan superposisi. Superposisi berarti menjumlahkan beberapa keadaan gelombang untuk membentuk keadaan baru. Ini adalah salah satu prinsip paling dasar dalam mekanika kuantum.

Ada konsekuensi penting: semakin tajam paket gelombang dilokalisasi dalam ruang, semakin lebar rentang bilangan gelombang k yang diperlukan. Karena momentum terkait dengan k melalui $p = \hbar k$, maka lokalisasi posisi berkaitan dengan penyebaran momentum. Ini adalah bayangan awal dari prinsip ketidakpastian Heisenberg, yang akan dibahas secara formal pada Bab 9.

Untuk partikel bebas nonrelativistik, energi kinetik adalah

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

Dengan hubungan kuantum

$$E = \hbar\omega,$$

$$p = \hbar k,$$

kita memperoleh

$$\hbar\omega = \frac{(\hbar k)^2}{2m},$$

atau

$$\omega = \frac{\hbar k^2}{2m}.$$

Kecepatan rambat paket gelombang disebut kecepatan grup dan diberikan oleh

$$v_g = \frac{d\omega}{dk}.$$

Untuk hubungan $\omega = \hbar k^2/2m$,

$$v_g = \frac{d}{dk} \left(\frac{\hbar k^2}{2m} \right) = \frac{\hbar k}{m} = \frac{p}{m}.$$

Tetapi untuk gerak nonrelativistik,

$$v = \frac{p}{m}.$$

Jadi kecepatan grup paket gelombang sama dengan kecepatan partikel klasik. Ini memberi hubungan indah antara gambaran gelombang dan gambaran partikel: paket gelombang dapat bergerak seperti partikel klasik, tetapi tetap membawa sifat gelombang seperti interferensi dan difraksi.

2.8 Difraksi elektron: ketika materi memperlihatkan gelombang

Jika elektron memiliki panjang gelombang, maka elektron seharusnya dapat mengalami difraksi. Tetapi difraksi hanya tampak jelas jika struktur yang dilewati memiliki skala sebanding dengan panjang gelombang elektron.

Untuk elektron berenergi puluhan sampai ratusan elektronvolt, panjang gelombang de Broglie berada pada skala sekitar 10^{-10} m, yaitu skala jarak antaratom dalam kristal. Karena itu kristal dapat digunakan sebagai kisi difraksi alami.

Pada tahun 1927, Clinton Davisson dan Lester Germer mengamati hamburan elektron oleh kristal nikel dan menemukan pola yang sesuai dengan perilaku gelombang elektron (Davisson & Germer, 1927). Pada tahun yang sama, G. P. Thomson dan A. Reid mengamati difraksi elektron melalui film tipis, juga mendukung hipotesis gelombang materi (Thomson & Reid, 1927).

Secara konseptual, eksperimennya dapat dipahami seperti ini. Kristal memiliki atom-atom yang tersusun periodik. Jika gelombang elektron datang ke kristal, gelombang yang tersebar dari berbagai bidang atom dapat saling memperkuat pada sudut tertentu dan saling melemahkan pada sudut lain. Pola sudut ini adalah tanda difraksi.

Jika elektron hanyalah partikel klasik kecil yang memantul dari atom-atom seperti bola biliar, kita tidak mengharapkan pola interferensi yang tajam seperti gelombang. Tetapi pola difraksi muncul. Maka elektron tidak dapat dijelaskan sebagai partikel klasik biasa.

Yang menarik, G. P. Thomson adalah putra J. J. Thomson. J. J. Thomson terkenal karena menunjukkan bahwa elektron adalah partikel bermuatan negatif pada akhir abad ke-19. Beberapa dekade kemudian, G. P. Thomson menunjukkan sifat gelombang elektron. Secara historis ini menjadi simbol indah: elektron bukan sekadar “partikel” dalam arti klasik, dan bukan pula “gelombang” dalam arti klasik.

2.9 Dualitas gelombang-partikel: apa yang benar dan apa yang menyesatkan?

Istilah dualitas gelombang-partikel sering dipakai untuk menyatakan bahwa objek kuantum kadang berperilaku seperti gelombang dan kadang seperti partikel. Istilah ini berguna, tetapi bisa menyesatkan jika dipahami terlalu harfiah.

Pernyataan yang lebih hati-hati adalah:

> Objek kuantum tidak identik dengan gelombang klasik maupun partikel klasik. Dalam beberapa eksperimen, distribusi hasilnya memperlihatkan sifat gelombang seperti interferensi dan difraksi. Dalam eksperimen lain, pertukaran energi dan momentum terjadi dalam kejadian lokal seperti partikel.

Contoh cahaya:

- Dalam eksperimen interferensi dua celah, cahaya menunjukkan pola terang-gelap seperti gelombang.
- Dalam efek fotolistrik, cahaya melepaskan elektron seolah energinya datang dalam paket foton.

Contoh elektron:

- Dalam detektor, elektron sering terdaftar sebagai kejadian lokal: satu titik pada layar.
- Dalam eksperimen difraksi, banyak elektron membentuk pola interferensi yang menunjukkan panjang gelombang de Broglie.

Jadi, dualitas bukan berarti elektron berubah-ubah dari bola kecil menjadi gelombang air kecil. Dualitas berarti konsep klasik kita tidak cukup. Kita membutuhkan konsep baru: keadaan kuantum, fungsi gelombang, operator, dan aturan probabilitas.

Dalam buku ini, kita akan memakai kata “gelombang” untuk membangun intuisi, tetapi secara bertahap kita akan menggantinya dengan bahasa yang lebih tepat: vektor keadaan dalam ruang Hilbert, operator, dan amplitudo probabilitas.

2.10 Prinsip korespondensi

Jika mekanika kuantum benar, mengapa mekanika klasik begitu berhasil untuk bola, planet, mesin, dan banyak fenomena sehari-hari?

Jawabannya diberikan oleh gagasan yang disebut prinsip korespondensi. Secara umum, prinsip ini menyatakan bahwa teori kuantum harus memberikan hasil yang mendekati teori klasik pada batas yang sesuai. Bohr menggunakan prinsip korespondensi sebagai panduan dalam teori atom awal: untuk bilangan kuantum besar, perilaku sistem kuantum harus mendekati perilaku klasik tertentu (Bohr, 1913).

Dalam konteks de Broglie, batas klasik dapat dipahami melalui panjang gelombang.

Jika panjang gelombang de Broglie suatu benda jauh lebih kecil daripada skala eksperimen, sifat gelombangnya sulit diamati. Lintasan klasik menjadi pendekatan yang sangat baik.

Contoh: bola tenis tadi memiliki panjang gelombang sekitar

$$10^{-34} \text{ m.}$$

Ukuran bola tenis sekitar

$$10^{-1} \text{ m.}$$

Perbandingannya luar biasa kecil. Tidak ada celah, kisi, atau alat makroskopik biasa yang dapat membuat difraksi bola tenis tampak.

Sebaliknya, elektron berenergi rendah dapat memiliki panjang gelombang sekitar

$$10^{-10} \text{ m,}$$

yang sebanding dengan jarak antaratom. Maka efek gelombangnya dapat diamati dengan kristal.

Ada cara lain menyatakan batas klasik. Dalam banyak sistem, mekanika klasik menjadi baik ketika besaran aksi karakteristik sistem jauh lebih besar daripada \hbar . Aksi adalah besaran berdimensi energi dikali waktu, atau momentum dikali panjang. Dalam mekanika klasik lanjut, aksi memainkan peran penting dalam menentukan lintasan. Jika aksi sistem sangat besar dibandingkan \hbar , koreksi kuantum sering menjadi sangat kecil. Jika aksi sebanding dengan \hbar , efek kuantum menjadi penting.

Contoh sederhana: untuk benda bermomentum p yang bergerak dalam daerah berukuran L , besaran pL memiliki dimensi aksi. Jika

$$pL \gg \hbar,$$

maka panjang gelombang de Broglie

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

jauh lebih kecil daripada L , sehingga pendekatan klasik sering memadai.

Tetapi kata “sering” penting. Ada sistem makroskopik yang tetap menunjukkan efek kuantum kolektif, misalnya superkonduktivitas dan superfluida. Hal-hal ini akan lebih dekat dengan pembahasan materi padat dan sistem banyak partikel. Untuk sekarang, cukup diingat: ukuran besar biasanya membuat efek kuantum sulit terlihat, tetapi bukan karena hukum kuantum berhenti berlaku. Hukum kuantum tetap berlaku; hanya saja pendekatan klasik menjadi sangat baik dalam banyak keadaan.

2.11 Kapan gambaran klasik masih dapat dipakai?

Kita dapat memakai gambaran klasik ketika beberapa syarat pendekatan terpenuhi. Ini bukan aturan mutlak, tetapi panduan fisik.

Pertama, panjang gelombang de Broglie harus jauh lebih kecil daripada skala perubahan sistem. Jika partikel bergerak melalui celah yang jauh lebih besar daripada λ , difraksi kecil. Jika partikel bergerak dalam potensial yang berubah sangat lambat dibandingkan λ , lintasan klasik sering menjadi pendekatan baik.

Contoh: peluru yang melewati jendela tidak menunjukkan pola difraksi yang dapat diamati karena panjang gelombangnya sangat kecil dibandingkan ukuran jendela.

Kedua, energi dan momentum yang dipertukarkan biasanya begitu besar dalam satuan kuantum sehingga diskretnya tingkat energi tidak tampak. Misalnya, getaran senar gitar memang pada akhirnya tunduk pada mekanika kuantum, tetapi jumlah kuantum getaran yang terlibat sangat besar sehingga deskripsi klasik sebagai gelombang pada senar sangat baik.

Ketiga, interaksi dengan lingkungan dapat membuat superposisi kuantum sulit diamati pada benda besar. Benda makroskopik terus-menerus berinteraksi dengan udara, cahaya, getaran, dan lingkungan lain. Interaksi semacam ini berkaitan dengan proses yang kelak disebut dekoherensi. Kita tidak perlu membahasnya secara formal di sini, tetapi gagasannya membantu: efek interferensi kuantum sangat sensitif terhadap informasi yang bocor ke lingkungan.

Namun kita harus menjaga disiplin konsep. Bukan berarti “benda besar tidak kuantum”. Benda besar tetap tersusun dari atom dan elektron yang kuantum. Tetapi untuk banyak tujuan, variabel makroskopiknya dapat dijelaskan sangat baik oleh teori klasik.

2.12 Mengapa hipotesis de Broglie penting?

Hipotesis de Broglie penting bukan hanya karena berhasil menjelaskan difraksi elektron. Ia juga memberi struktur matematika bagi teori baru.

Dari foton dan de Broglie kita memiliki dua hubungan:

$$E = \hbar\omega,$$

$$p = \hbar k.$$

Dalam gelombang kompleks,

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

Jika kita menurunkan fungsi ini terhadap x , kita memperoleh faktor ik:

$$\frac{\partial \psi}{\partial x} = ik\psi.$$

Karena $p = \hbar k$, maka momentum dapat dikaitkan dengan operasi turunan terhadap posisi. Nanti kita akan melihat bahwa operator momentum dalam representasi posisi adalah

$$\hat{p} = -i\hbar \frac{\partial}{\partial x}.$$

Jika kita menurunkan fungsi gelombang terhadap t , kita memperoleh faktor $-i\omega$:

$$\frac{\partial \psi}{\partial t} = -i\omega\psi.$$

Karena $E = \hbar \omega$, energi dapat dikaitkan dengan operasi turunan terhadap waktu. Inilah salah satu alasan mengapa persamaan Schrödinger berbentuk persamaan diferensial terhadap ruang dan waktu.

Kita belum akan menurunkan persamaan Schrödinger secara penuh di sini. Tetapi kita sudah melihat jejaknya. Jika partikel memiliki sifat gelombang, maka teori geraknya harus berupa teori gelombang. Jika energi dan momentum terkait dengan frekuensi dan bilangan gelombang, maka persamaan geraknya harus menghubungkan turunan waktu dan turunan ruang. Bab berikutnya akan membangun gagasan ini secara lebih sistematis.

2.13 Ringkasan gagasan utama

Bab ini membawa kita dari cahaya ke materi.

Cahaya yang dahulu dipahami sebagai gelombang elektromagnetik ternyata juga bertukar energi dalam paket-paket foton. Energi foton memenuhi

$$E = hf = \hbar\omega.$$

Foton juga membawa momentum

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

De Broglie kemudian mengusulkan bahwa hubungan momentum-panjang gelombang tidak hanya berlaku untuk cahaya, tetapi juga untuk materi:

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

Untuk benda makroskopik, panjang gelombang ini amat sangat kecil, sehingga perilaku klasik muncul sebagai pendekatan yang baik. Untuk elektron dan partikel mikroskopik lain, panjang gelombang de Broglie dapat sebanding dengan jarak antaratom, sehingga difraksi dan interferensi dapat diamati.

Eksperimen difraksi elektron mengonfirmasi bahwa elektron memiliki sifat gelombang. Tetapi elektron bukan gelombang klasik biasa, dan bukan juga partikel klasik biasa. Ia adalah objek kuantum. Bahasa yang tepat untuk menggambarkannya akan kita bangun bertahap: fungsi gelombang, probabilitas, operator, ruang Hilbert, dan pengukuran.

Hal terpenting yang perlu dibawa ke Bab 3 adalah pasangan hubungan berikut:

$$E = \hbar\omega,$$

$$p = \hbar k.$$

Dari dua hubungan ini, kita akan melihat bagaimana persamaan gelombang untuk partikel dapat dirumuskan. Di sanalah persamaan Schrödinger mulai muncul.

References

BIPM. (2019). The International System of Units (SI) (9th ed.). Bureau International des Poids et Mesures.

Bohr, N. (1913). On the Constitution of Atoms and Molecules. *Philosophical Magazine*, 26, 1-25.

Compton, A. H. (1923). A Quantum Theory of the Scattering of X-rays by Light Elements. *Physical Review*, 21, 483-502.

Davisson, C., & Germer, L. H. (1927). The Scattering of Electrons by a Single Crystal of Nickel. *Physical Review*, 30, 705-740.

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

Einstein, A. (1905). Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreff

Document information

Bab 2: Gelombang, Partikel, dan Hipotesis de Broglie

Project	Mekanika Kuantum
Document	Document 1.6
Author	terry.mart
Verifier	Not verified
Downloaded	July 04, 2026 23:51 KST
Status	Working
Document link	https://www.theorytrace.com/projects/mekanika-kuantum/documents/bab-2-gelombang-partikel-dan-hipotesis-de-broglie/