

Bab 1: Krisis Fisika Klasik dan Lahirnya Kuantum

Pada akhir abad ke-19, fisika klasik tampak sangat kuat. Mekanika Newton menjelaskan gerak benda dari proyektil sampai planet. Elektromagnetisme Maxwell menyatukan listrik, magnet, dan cahaya sebagai gelombang elektromagnetik. Termodinamika dan mekanika statistik menjelaskan kalor sebagai akibat gerak banyak partikel. Jika seseorang hanya melihat keberhasilan-keberhasilan ini, wajar jika ia merasa bahwa tugas fisika tinggal “mengisi rincian”.

Namun alam tidak mengikuti rasa puas manusia.

Ketika eksperimen makin teliti, terutama pada cahaya, atom, elektron, dan padatan dingin, muncul gejala yang tidak cocok dengan gambaran klasik. Bukan sekadar angka teori yang sedikit meleset, melainkan pola dasar yang salah. Empat contoh paling penting adalah:

1. radiasi benda hitam,
2. efek fotolistrik,
3. spektrum garis atom,
4. kalor jenis padatan pada suhu rendah.

Keempatnya menunjukkan hal yang sama dari sisi berbeda: energi dan keadaan mikroskopik tidak selalu dapat diperlakukan sebagai besaran kontinu klasik. Dari krisis inilah gagasan kuantum lahir.

Kata kuantum berarti “sejumlah tertentu” atau “paket tertentu”. Dalam mekanika kuantum, banyak besaran yang dalam fisika klasik dapat berubah mulus ternyata, dalam kondisi tertentu, hanya muncul dalam nilai-nilai diskret. Diskret berarti terpisah-pisah, seperti anak tangga. Kontinu berarti dapat berubah mulus, seperti posisi titik pada garis.

Contoh sederhana: tinggi air dalam gelas tampak kontinu karena kita dapat menuangkan sedikit demi sedikit. Tetapi jumlah kelereng dalam kotak diskret: 0, 1, 2, 3, dan seterusnya, tidak pernah 2,4 kelereng utuh. Mekanika kuantum menyatakan bahwa beberapa besaran mikroskopik lebih mirip “jumlah kelereng” daripada “tinggi air”, meskipun analogi ini harus dipakai hati-hati.

Bab ini belum akan membangun mekanika kuantum lengkap. Tujuannya lebih mendasar: kita ingin melihat mengapa fisika klasik dipaksa berubah.

1.1 Apa yang dimaksud dengan “krisis” fisika klasik?

Dalam sains, krisis bukan berarti semua teori lama langsung dibuang. Krisis berarti ada wilayah eksperimen yang tidak dapat dijelaskan secara konsisten oleh teori yang tersedia.

Fisika klasik tetap benar sebagai pendekatan dalam banyak keadaan. Lintasan bola, arus listrik dalam kabel biasa, gerak planet, dan gelombang bunyi tidak memerlukan mekanika kuantum secara eksplisit untuk dihitung dengan baik. Tetapi pada skala atom, energi rendah, suhu rendah, dan interaksi cahaya-materi, asumsi klasik sering gagal.

Dua asumsi klasik yang akan sering muncul dalam bab ini adalah:

Pertama, energi dianggap dapat berubah kontinu. Jika sebuah sistem dapat memiliki energi 1 joule dan 2 joule, maka secara klasik ia juga dapat memiliki 1,3 joule, 1,31 joule, 1,314 joule, dan seterusnya.

Kedua, energi termal cenderung terbagi rata ke semua derajat kebebasan yang tersedia. Ini disebut teorema ekipartisi. Dalam mekanika statistik klasik, setiap suku energi berbentuk kuadrat, misalnya $(1/2)mv^2$ atau $(1/2)kx^2$, menyumbang energi rata-rata $(1/2)k_B T$, dengan k_B adalah konstanta Boltzmann dan T suhu mutlak. Teorema ini sangat berhasil untuk gas ideal klasik, tetapi gagal untuk banyak sistem mikroskopik.

Contoh: untuk atom gas monoatomik seperti helium pada suhu biasa, energi kinetik translasi rata-rata per atom adalah

$$\langle E_{\text{kin}} \rangle = \frac{3}{2} k_B T,$$

karena ada tiga arah gerak: x , y , dan z . Ini cocok dengan teori gas klasik. Tetapi ketika prinsip yang sama diterapkan pada radiasi elektromagnetik dalam rongga atau getaran atom dalam padatan pada suhu rendah, hasilnya bertentangan dengan eksperimen.

Dari sinilah cerita kuantum dimulai.

1.2 Radiasi benda hitam: ketika teori klasik menghasilkan tak hingga

Sebuah benda hitam adalah benda ideal yang menyerap semua radiasi elektromagnetik yang datang kepadanya. Karena penyerapannya sempurna, radiasi yang dipancarkannya hanya bergantung pada suhu, bukan pada bahan atau warna permukaannya. Secara eksperimen, benda hitam dapat didekati oleh sebuah rongga dengan lubang kecil: cahaya yang masuk ke lubang akan berkali-kali dipantulkan di dalam rongga dan hampir tidak keluar lagi.

Contoh sehari-hari: logam yang dipanaskan mula-mula tampak merah, lalu kuning, lalu mendekati putih. Warna ini menunjukkan bahwa distribusi energi radiasi berubah dengan suhu. Pada suhu lebih tinggi, pancaran kuat bergeser ke frekuensi lebih tinggi.

Untuk membahasnya secara matematis, kita memakai besaran

$$u(\nu, T),$$

yaitu rapat energi spektral: energi radiasi per satuan volume per satuan interval frekuensi pada frekuensi ν dan suhu T . Frekuensi ν adalah banyaknya getaran per detik. Cahaya merah memiliki frekuensi lebih rendah daripada cahaya biru.

Prediksi klasik: hukum Rayleigh-Jeans

Dalam teori klasik, radiasi elektromagnetik dalam rongga dapat dipandang sebagai kumpulan gelombang berdiri. Gelombang berdiri adalah gelombang yang pola simpul dan perutnya tetap di tempat, seperti getaran senar gitar yang ujung-ujungnya terikat. Untuk medan elektromagnetik di rongga, setiap mode gelombang dapat diperlakukan seperti osilator harmonik klasik.

Jumlah mode elektromagnetik per satuan volume antara frekuensi ν dan $\nu+d\nu$ adalah

$$\frac{8\pi\nu^2}{c^3} d\nu,$$

dengan c kelajuan cahaya. Menurut ekipartisi klasik, setiap mode memiliki energi rata-rata

$$\langle E \rangle = k_B T.$$

Maka teori klasik memberi

$$u_{\text{RJ}}(\nu, T) = \frac{8\pi\nu^2}{c^3} k_B T.$$

Ini dikenal sebagai hukum Rayleigh-Jeans, dikembangkan dalam konteks teori radiasi klasik oleh Rayleigh dan Jeans pada awal abad ke-20 [Rayleigh, 1900; Jeans, 1905].

Masalahnya tampak jelas: ketika ν makin besar, u_{RJ} bertambah seperti ν^2 . Jika kita jumlahkan energi pada semua frekuensi,

$$\int_0^{\infty} u_{\text{RJ}}(\nu, T) d\nu,$$

integral ini divergen, yaitu menghasilkan energi total tak hingga. Ini mustahil secara fisik. Benda panas tidak memancarkan energi tak hingga pada frekuensi ultraviolet.

Kegagalan ini disebut bencana ultraviolet. “Ultraviolet” merujuk pada frekuensi tinggi, lebih tinggi daripada cahaya tampak ungu. “Bencana” merujuk pada fakta bahwa teori klasik memprediksi energi yang tidak masuk akal.

Perhatikan sifat krisisnya. Bukan hanya teori klasik kurang akurat. Teori klasik memberi hasil yang secara matematis meledak tak hingga.

Ide Planck: energi osilator terkuantisasi

Max Planck menyelesaikan masalah ini dengan langkah yang pada awalnya sangat radikal. Ia mengusulkan bahwa osilator materi yang menyerap dan memancarkan radiasi tidak dapat memiliki energi sembarang, melainkan hanya energi

$$E_n = nh\nu,$$

dengan

$$n = 0, 1, 2, 3, \dots$$

dan h adalah konstanta Planck. Gagasan ini diperkenalkan Planck dalam perumusan hukum distribusi energi radiasi benda hitam [Planck, 1901].

Makna persamaan itu sederhana tetapi dalam: energi datang dalam paket-paket berukuran hnu. Untuk frekuensi tinggi, paket energinya besar. Pada suhu tertentu, paket besar lebih sulit “diaktifkan” secara termal, sehingga mode frekuensi tinggi tidak mendapat energi sebanyak prediksi klasik.

Dengan asumsi kuantisasi energi, energi rata-rata mode menjadi

$$\langle E \rangle = \frac{h\nu}{e^{h\nu/k_B T} - 1}.$$

Maka rapat energi spektralnya adalah

$$u(\nu, T) = \frac{8\pi h\nu^3}{c^3} \frac{1}{e^{h\nu/k_B T} - 1}.$$

Inilah hukum radiasi Planck. Untuk frekuensi rendah, ketika $h\nu \ll k_B T$, hukum Planck mendekati hukum Rayleigh-Jeans. Tetapi untuk frekuensi tinggi, faktor eksponensial $e^{h\nu/k_B T}$ membuat rapat energi turun cepat, sehingga energi total tetap berhingga.

Contoh numerik konseptual: jika $h\nu$ jauh lebih kecil daripada $k_B T$, energi termal cukup untuk mengisi mode tersebut, sehingga perilakunya hampir klasik. Tetapi jika $h\nu$ jauh lebih besar daripada $k_B T$, mode itu hampir tidak tereksitasi. Dengan demikian, frekuensi tinggi tidak lagi menyerap energi tanpa batas.

Ini adalah pelajaran pertama kuantum: diskretisasi energi dapat menyelamatkan teori dari prediksi klasik yang tak hingga.

Namun pada tahap Planck, kuantisasi terutama dipakai sebagai cara menghitung pertukaran energi antara materi dan radiasi. Gagasan bahwa cahaya itu sendiri terdiri dari paket-paket energi baru memperoleh bentuk lebih tajam melalui efek fotolistrik.

1.3 Efek fotolistrik: cahaya sebagai paket energi

Efek fotolistrik adalah keluarnya elektron dari permukaan logam ketika logam disinari cahaya dengan frekuensi cukup tinggi. Elektron yang keluar disebut fotoelektron.

Bayangkan pelat logam disinari cahaya. Secara klasik, cahaya adalah gelombang elektromagnetik. Energi gelombang seharusnya bergantung pada intensitasnya. Intensitas berarti energi per satuan waktu per satuan luas. Lampu terang memiliki intensitas lebih besar daripada lampu redup.

Maka, menurut intuisi klasik sederhana, cahaya yang lebih terang seharusnya lebih mudah mengeluarkan elektron, apa pun warnanya, asalkan cukup lama disinarkan. Tetapi eksperimen menunjukkan pola berbeda.

Fakta penting efek fotolistrik adalah:

- ada frekuensi ambang; di bawah frekuensi ini, elektron tidak keluar meskipun cahaya sangat terang,
- energi kinetik maksimum fotoelektron bertambah linear terhadap frekuensi cahaya,
- jika frekuensi sudah di atas ambang, intensitas cahaya terutama memengaruhi jumlah elektron yang keluar per detik, bukan energi maksimum tiap elektron.

Einstein menafsirkan gejala ini dengan mengusulkan bahwa cahaya berperilaku seolah-olah terdiri dari kuanta energi, masing-masing sebesar

$$E = h\nu.$$

Makalah Einstein tahun 1905 menyajikan gagasan kuantum cahaya ini untuk menjelaskan efek fotolistrik dan beberapa fenomena radiasi lain [Einstein, 1905].

Jika satu kuantum cahaya diserap oleh satu elektron, sebagian energinya dipakai untuk melepaskan elektron dari logam. Energi minimum untuk melepaskan elektron disebut fungsi kerja, dilambangkan ϕ . Sisa energi menjadi energi kinetik elektron:

$$K_{\max} = h\nu - \phi.$$

Jika $h\nu < \phi$, elektron tidak dapat keluar. Itulah asal frekuensi ambang

$$\nu_0 = \frac{\phi}{h}.$$

Jika $\nu > \nu_0$, fotoelektron dapat keluar, dan energi kinetik maksimumnya naik linear terhadap ν .

Contoh: cahaya merah memiliki frekuensi lebih rendah daripada cahaya ultraviolet. Untuk logam tertentu, cahaya merah yang sangat terang bisa saja gagal mengeluarkan elektron karena energi per fotonnya terlalu kecil. Sebaliknya, cahaya ultraviolet yang lebih redup dapat mengeluarkan elektron karena setiap fotonnya membawa energi hnu yang lebih besar.

Dalam bahasa modern, kuantum cahaya disebut foton. Kata “foton” sendiri baru digunakan luas kemudian, tetapi gagasan energi cahaya berbentuk paket sudah muncul dalam analisis Einstein. Hubungan linear antara energi fotoelektron dan frekuensi kemudian diuji secara teliti, antara lain oleh Millikan, meskipun Millikan pada awalnya tidak menerima interpretasi kuantum cahaya secara penuh [Millikan, 1916].

Efek fotolistrik memberi pelajaran kedua: cahaya yang dalam banyak eksperimen tampak sebagai gelombang juga dapat berinteraksi dengan materi sebagai paket energi diskret.

Ini bukan berarti cahaya “sebenarnya hanya partikel biasa”. Bab berikutnya akan membahas dualitas gelombang-partikel dengan lebih hati-hati. Untuk sekarang, cukup kita simpan ketegangan ini: gelombang elektromagnetik klasik tidak cukup untuk menjelaskan semua perilaku cahaya.

1.4 Spektrum atom: mengapa atom hanya memancarkan warna tertentu?

Jika gas hidrogen dipanaskan atau diberi lucutan listrik, ia memancarkan cahaya. Ketika cahaya itu dilewatkan melalui prisma atau kisi difraksi, kita tidak melihat pita warna kontinu seperti pelangi lengkap. Kita melihat garis-garis terang pada panjang gelombang tertentu.

Pola seperti ini disebut spektrum garis. Kata “spektrum” berarti sebaran cahaya menurut panjang gelombang atau frekuensi. “Garis” berarti hanya nilai-nilai tertentu yang muncul.

Contoh: lampu neon tampak berwarna khas karena atom-atom gas di dalamnya memancarkan garis spektrum tertentu. Hidrogen juga memiliki garis-garis khas, salah satunya garis merah dalam deret Balmer.

Pada tahun 1885, Johann Balmer menemukan rumus empiris untuk beberapa garis spektrum hidrogen tampak [Balmer, 1885]:

$$\frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right), \quad n = 3, 4, 5, \dots$$

Di sini λ adalah panjang gelombang cahaya, dan R adalah konstanta Rydberg untuk hidrogen. Rumus ini sangat akurat, tetapi pada awalnya tidak menjelaskan mengapa atom hidrogen memilih nilai-nilai tersebut.

Masalah atom klasik

Setelah eksperimen hamburan partikel alfa, Rutherford mengusulkan model atom dengan inti kecil bermuatan positif dan elektron di sekitarnya [Rutherford, 1911]. Model ini penting karena menunjukkan bahwa muatan positif atom terkonsentrasi dalam volume sangat kecil.

Tetapi jika elektron mengitari inti seperti planet mengitari Matahari, muncul masalah besar. Dalam elektrodinamika klasik, muatan yang dipercepat memancarkan radiasi elektromagnetik. Elektron yang bergerak melingkar mengalami percepatan sentripetal. Maka secara klasik elektron seharusnya memancarkan energi, kehilangan energi, lalu jatuh ke inti. Atom tidak akan stabil.

Namun atom nyata stabil. Hidrogen tidak runtuh dalam waktu singkat. Selain itu, jika elektron klasik dapat memiliki orbit dengan energi sembarang, spektrum atom seharusnya kontinu atau setidaknya tidak memiliki pola diskret sederhana yang diamati.

Dengan demikian, atom menampilkan dua kegagalan klasik sekaligus:

1. kestabilan atom tidak dijelaskan,
2. spektrum garis tidak dijelaskan.

Model Bohr: keadaan stasioner dan lompatan energi

Niels Bohr mengusulkan model atom hidrogen yang menggabungkan struktur inti Rutherford dengan gagasan kuantisasi [Bohr, 1913]. Model Bohr bukan mekanika kuantum lengkap, tetapi ia adalah jembatan penting.

Bohr memperkenalkan dua gagasan utama.

Pertama, elektron hanya boleh berada pada orbit tertentu yang disebut keadaan stasioner. Stasioner berarti keadaan itu tidak memancarkan energi meskipun, dari sudut pandang orbit klasik, elektron tampak bergerak mengelilingi inti.

Kedua, atom memancarkan atau menyerap cahaya hanya ketika elektron berpindah antara dua keadaan stasioner. Frekuensi cahaya ditentukan oleh beda energi:

$$h\nu = E_i - E_f$$

untuk emisi dari keadaan awal i ke keadaan akhir f dengan energi lebih rendah.

Dalam model Bohr untuk hidrogen, energi keadaan dengan bilangan kuantum utama n adalah

$$E_n = -\frac{13,6 \text{ eV}}{n^2}, \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

Tanda negatif berarti elektron terikat pada inti. Nilai $n=1$ adalah keadaan dasar, yaitu keadaan energi terendah. Nilai $n=2,3,\dots$ adalah keadaan tereksitasi.

Jika elektron turun dari $n=3$ ke $n=2$, atom memancarkan foton dengan energi

$$h\nu = E_3 - E_2.$$

Karena hanya nilai n tertentu yang diizinkan, beda energi juga hanya tertentu. Maka cahaya yang dipancarkan memiliki frekuensi tertentu. Inilah asal spektrum garis dalam model Bohr.

Contoh: deret Balmer pada hidrogen berhubungan dengan transisi menuju $n=2$. Transisi dari $n=3$ ke $n=2$ menghasilkan garis merah terkenal hidrogen. Transisi dari tingkat lebih tinggi menuju $n=2$ menghasilkan garis lain dalam daerah tampak dan dekat ultraviolet.

Model Bohr menjelaskan banyak hal penting tentang hidrogen, tetapi tidak sempurna. Ia tidak memberi teori umum untuk semua atom, tidak menjelaskan intensitas garis spektrum secara mendasar, dan tidak muncul dari prinsip matematika yang konsisten seperti mekanika kuantum modern. Namun ia menunjukkan sesuatu yang sangat penting: energi atom bersifat diskret.

Pelajaran ketiga kuantum adalah: atom stabil karena keadaan mikroskopiknya tidak sembarang; hanya keadaan tertentu yang diizinkan.

1.5 Kalor jenis padatan: kegagalan ekipartisi pada suhu rendah

Sekarang kita pindah dari cahaya dan atom ke padatan.

Kalor jenis mengukur seberapa banyak kalor yang diperlukan untuk menaikkan suhu suatu zat. Untuk padatan, yang sering dibahas adalah kapasitas kalor pada volume tetap, C_V . Jika energi dalam padatan berubah sebesar dU ketika suhu berubah sebesar dT , maka

$$C_V = \left(\frac{\partial U}{\partial T} \right)_V.$$

Dalam model klasik sederhana, atom-atom dalam padatan dianggap bergetar di sekitar posisi keseimbangannya. Getaran kecil ini dapat dimodelkan sebagai osilator harmonik. Osilator harmonik adalah sistem yang mengalami gaya pemulih sebanding dengan simpangan, seperti massa pada pegas:

$$F = -kx.$$

Dalam tiga dimensi, setiap atom memiliki tiga arah getaran. Untuk satu arah, energi osilator harmonik terdiri dari energi kinetik dan energi potensial, masing-masing memberi $(1/2)k_B T$ menurut ekipartisi. Jadi satu arah memberi $k_B T$, dan tiga arah memberi $3k_B T$ per atom.

Untuk N atom,

$$U = 3Nk_B T,$$

sehingga

$$C_V = 3Nk_B.$$

Untuk satu mol padatan, $N=N_A$, sehingga

$$C_V = 3R,$$

dengan $R=N_A k_B$ konstanta gas. Hasil ini dikenal sebagai hukum Dulong-Petit dan bekerja cukup baik untuk banyak padatan pada suhu tinggi.

Tetapi pada suhu rendah, eksperimen menunjukkan bahwa kapasitas kalor padatan menurun menuju nol, bukan tetap $3R$. Ini bertentangan dengan prediksi klasik.

Masalahnya mirip dengan radiasi benda hitam. Fisika klasik membagi energi termal secara merata ke semua mode getaran. Tetapi alam tampaknya “mematikan” mode-mode tertentu ketika suhu terlalu rendah.

Model Einstein untuk padatan

Einstein menerapkan gagasan Planck pada getaran atom dalam padatan. Ia memodelkan setiap atom sebagai osilator kuantum dengan energi diskret, bukan kontinu [Einstein, 1907]. Untuk osilator dengan frekuensi ν , energi tereksitasi harus datang dalam paket hnu.

Jika suhu rendah sehingga

$$k_B T \ll h\nu,$$

energi termal tidak cukup untuk mengeksitasi osilator secara efektif. Akibatnya, kapasitas kalor menurun.

Model Einstein menjelaskan mengapa kapasitas kalor padatan berkurang pada suhu rendah, tetapi tidak sepenuhnya cocok dengan data untuk suhu sangat rendah. Alasannya: dalam padatan nyata, atom-atom tidak bergetar sendiri-sendiri dengan frekuensi sama. Getaran kolektif padatan memiliki banyak frekuensi.

Model Debye dan getaran kolektif

Peter Debye memperbaiki model ini dengan memperlakukan getaran padatan sebagai gelombang elastik kolektif, mirip bunyi dalam benda padat, dengan batas frekuensi maksimum tertentu [Debye, 1912]. Getaran kolektif ini kelak dalam bahasa kuantum disebut fonon, yaitu kuantum getaran kisi. Kita belum perlu memakai fonon secara penuh di sini; yang penting adalah bahwa padatan memiliki spektrum mode getaran, bukan satu frekuensi saja.

Dalam model Debye, kapasitas kalor adalah

$$C_V = 9Nk_B \left(\frac{T}{\Theta_D} \right)^3 \int_0^{\Theta_D/T} \frac{x^4 e^x}{(e^x - 1)^2} dx,$$

dengan Θ_D adalah suhu Debye, parameter yang menyatakan skala energi maksimum getaran dalam padatan.

Pada suhu tinggi, model Debye kembali ke hasil klasik:

$$C_V \rightarrow 3Nk_B.$$

Pada suhu rendah, model Debye memberi hukum

$$C_V \propto T^3.$$

Lebih tepatnya,

$$C_V \approx \frac{12\pi^4}{5} Nk_B \left(\frac{T}{\Theta_D} \right)^3 \quad (T \ll \Theta_D).$$

Hukum T^3 ini merupakan keberhasilan besar karena cocok dengan perilaku banyak padatan kristalin pada suhu rendah.

Contoh: berlian memiliki suhu Debye tinggi. Pada suhu kamar, beberapa mode getarannya masih belum tereksitasi penuh secara klasik, sehingga kapasitas kalornya lebih kecil daripada nilai klasik $3R$. Inilah alasan historis mengapa beberapa padatan ringan dan kaku tampak “menyimpang” dari hukum Dulong-Petit.

Pelajaran keempat kuantum adalah: pada suhu rendah, energi termal tidak dapat selalu dibagi rata secara klasik karena mode mikroskopik membutuhkan paket energi minimum untuk tereksitasi.

Nama Debye akan muncul kembali dalam perjalanan menuju persamaan Schrödinger. Untuk saat ini, cukup kita lihat bahwa Debye membantu menunjukkan bahwa kuantisasi bukan hanya tentang cahaya dan atom, tetapi juga tentang sifat termal materi padat.

1.6 Benang merah: apa yang sebenarnya gagal?

Mari kita satukan empat krisis tadi.

Pada radiasi benda hitam, teori klasik memberi terlalu banyak energi pada mode frekuensi tinggi. Kuantisasi Planck membatasi energi mode melalui paket hnu.

Pada efek fotolistrik, teori gelombang klasik tidak menjelaskan frekuensi ambang. Kuantum cahaya Einstein menjelaskan bahwa energi tiap foton adalah $h\nu$, sehingga intensitas besar tidak membantu jika frekuensi terlalu rendah.

Pada spektrum atom, teori klasik tidak menjelaskan kestabilan atom dan garis spektrum diskret. Model Bohr memperkenalkan keadaan stasioner dan transisi energi diskret.

Pada kalor jenis padatan, ekipartisi klasik memprediksi kapasitas kalor tetap pada suhu rendah. Model Einstein dan Debye menunjukkan bahwa getaran padatan harus dikuantisasi.

Keempat kasus itu berbeda secara eksperimen, tetapi secara konseptual memiliki pola yang sama:

kontinu klasik \rightarrow diskret kuantum.

Namun kita harus berhati-hati. Mekanika kuantum bukan sekadar pernyataan “semua hal diskret”. Posisi partikel, misalnya, dapat memiliki spektrum kontinu dalam banyak sistem. Energi partikel bebas juga kontinu. Yang benar adalah: struktur keadaan kuantum ditentukan oleh persamaan dan syarat batas sistem; beberapa observable memiliki nilai diskret, beberapa kontinu.

Istilah observable berarti besaran fisika yang dapat diukur, seperti posisi, momentum, energi, atau momentum sudut. Kita akan mempelajarinya secara formal pada bab tentang operator. Untuk sekarang, cukup pahami bahwa mekanika kuantum tidak hanya mengubah nilai energi, tetapi juga mengubah bahasa dasar untuk membicarakan keadaan dan pengukuran.

1.7 Konstanta Planck sebagai skala dunia kuantum

Konstanta Planck h muncul di semua contoh utama bab ini:

$$E = h\nu,$$

$$E_n = nh\nu,$$

$$h\nu = E_i - E_f.$$

Sering juga digunakan konstanta

$$\hbar = \frac{h}{2\pi},$$

dibaca “h-bar”. Konstanta \hbar akan muncul sangat sering dalam mekanika kuantum, terutama ketika kita membahas momentum, operator, dan persamaan Schrödinger.

Secara konseptual, h atau \hbar mengukur ukuran efek kuantum. Jika besaran aksi suatu sistem jauh lebih besar daripada h , perilakunya sering mendekati klasik. Jika aksi sebanding dengan h , efek kuantum menjadi penting.

Aksi adalah besaran dengan satuan energi dikali waktu, atau momentum dikali panjang. Kita belum membutuhkan definisi formalnya. Contoh kasar: benda sehari-hari seperti bola tenis memiliki aksi karakteristik yang sangat besar dibandingkan h , sehingga lintasannya tampak klasik. Elektron dalam atom memiliki aksi yang sebanding dengan \hbar , sehingga mekanika klasik gagal.

Inilah sebabnya mekanika kuantum tidak terasa langsung dalam pengalaman sehari-hari. Bukan karena dunia makroskopik “bukan kuantum”, melainkan karena dalam banyak keadaan efek kuantum rata-rata menjadi sangat kecil sehingga pendekatan klasik cukup baik.

1.8 Dari kuantum lama menuju mekanika kuantum

Gagasan Planck, Einstein, Bohr, dan Debye sering disebut bagian dari teori kuantum lama. Teori kuantum lama adalah kumpulan aturan kuantisasi sebelum mekanika kuantum modern terbentuk. Ia sangat kreatif dan berhasil dalam beberapa kasus, tetapi belum memiliki fondasi umum.

Kelemahannya terlihat jelas:

- Planck menguantisasi energi osilator, tetapi belum memberi teori umum keadaan mikroskopik.
- Einstein menjelaskan efek fotolistrik dengan kuantum cahaya, tetapi hubungan penuh antara gelombang dan partikel masih membingungkan.
- Bohr menjelaskan hidrogen, tetapi model orbitnya tidak menjadi teori umum untuk atom kompleks.
- Debye menjelaskan kalor jenis padatan, tetapi teori kuantum getaran kisi masih membutuhkan dasar yang lebih luas.

Mekanika kuantum modern akan muncul ketika pertanyaan-pertanyaan ini dijawab dengan bahasa baru: fungsi gelombang, operator, ruang Hilbert, komutator, dan probabilitas pengukuran.

Bab berikutnya akan memulai langkah itu melalui gagasan de Broglie: jika cahaya yang berupa gelombang dapat berperilaku seperti partikel, mungkinkah partikel seperti elektron juga memiliki sifat gelombang?

Pertanyaan inilah yang membuka jalan menuju persamaan Schrödinger.

Ringkasan bab

Fisika klasik gagal menjelaskan beberapa eksperimen penting pada awal abad ke-20. Pada radiasi benda hitam, hukum Rayleigh-Jeans memprediksi energi tak hingga pada frekuensi tinggi, sedangkan hukum Planck berhasil karena memperkenalkan energi diskret $E_n = nh\nu$. Pada efek fotolistrik, Einstein menjelaskan frekuensi ambang dan hubungan linear energi fotoelektron dengan frekuensi melalui kuantum cahaya $E = h\nu$. Pada spektrum atom, model Bohr memperkenalkan keadaan stasioner dan transisi energi diskret untuk menjelaskan garis-garis hidrogen. Pada kalor jenis padatan, Einstein dan Debye menunjukkan bahwa getaran atom tidak dapat diperlakukan sepenuhnya klasik, terutama pada suhu rendah.

Krisis-krisis ini tidak menghancurkan fisika klasik, tetapi membatasi wilayah berlakunya. Fisika klasik tetap muncul sebagai pendekatan ketika skala aksi jauh lebih besar daripada konstanta Planck. Namun untuk atom, cahaya, dan getaran mikroskopik, alam menuntut teori baru.

Teori baru itu adalah mekanika kuantum.

References

- Balmer, J. J. (1885). "Notiz über die Spectrallinien des Wasserstoffs." *Annalen der Physik und Chemie*,

Document information

Bab 1: Krisis Fisika Klasik dan Lahirnya Kuantum

Project	Mekanika Kuantum
Document	Document 1.5
Author	terry.mart
Verifier	Not verified
Downloaded	July 04, 2026 22:50 KST
Status	Working
Document link	https://www.theorytrace.com/projects/mekanika-kuantum/documents/bab-1-krisis-fisika-klasik-dan-lahirnya-kuantum/