

Bab 1: Mengapa Mekanika Kuantum Diperlukan

Mekanika kuantum tidak lahir karena fisikawan ingin membuat teori yang lebih aneh. Ia lahir karena alam memaksa kita meninggalkan beberapa asumsi klasik yang sebelumnya tampak sangat masuk akal.

Pada akhir abad ke-19, mekanika klasik Newton, elektromagnetisme Maxwell, dan termodinamika sudah sangat berhasil. Gerak planet dapat dihitung. Gelombang cahaya dipahami sebagai gelombang elektromagnetik. Mesin uap, kalor, tekanan gas, dan arus listrik dapat dianalisis dengan ketelitian tinggi. Jika kita hanya melihat dunia sehari-hari, wajar bila kita berpikir bahwa tugas fisika hampir selesai.

Namun, ketika pengukuran menjadi semakin teliti pada skala atomik dan radiasi, muncul pola-pola yang tidak cocok dengan teori klasik. Bukan sekadar “perhitungan klasik belum cukup rapi”, melainkan ada kegagalan prinsip. Ada gejala fisis yang tidak dapat dijelaskan jika energi selalu dapat berubah secara kontinu, jika cahaya selalu hanya gelombang klasik, dan jika elektron di dalam atom boleh diperlakukan seperti partikel kecil yang bergerak pada lintasan klasik.

Bab ini membangun alasan mengapa mekanika kuantum diperlukan. Kita akan melihat empat masalah utama:

1. radiasi benda hitam,
2. efek fotolistrik,
3. spektrum atom,
4. stabilitas materi.

Keempatnya menunjukkan hal yang sama dari arah berbeda: dunia mikroskopik tidak mengikuti kerangka klasik secara penuh.

1.1 Apa yang dimaksud “klasik” dan “kuantum”?

Sebelum masuk ke bukti historis, kita perlu menyamakan bahasa.

Mekanika klasik adalah kerangka teori yang menggambarkan sistem fisis melalui besaran-besaran seperti posisi, kecepatan, momentum, gaya, dan energi. Dalam bentuk Newtonian, jika posisi dan kecepatan awal sebuah partikel diketahui, dan gaya yang bekerja padanya diketahui, maka gerak berikutnya dapat dihitung. Dalam bentuk Hamiltonian, keadaan sistem digambarkan sebagai titik di ruang fase, yaitu ruang matematis yang berisi semua kemungkinan posisi dan momentum.

Contoh sederhana: sebuah bola dilempar ke atas. Jika kita tahu posisi awal, kecepatan awal, massa bola, dan percepatan gravitasi, maka kita dapat menghitung kapan bola mencapai titik tertinggi dan kapan bola kembali ke tanah. Dalam banyak situasi sehari-hari, cara berpikir ini sangat berhasil.

Mekanika kuantum adalah teori fisis yang menggambarkan sistem fisis dengan keadaan kuantum. Keadaan kuantum tidak sama dengan daftar posisi dan momentum pasti. Ia memberi amplitudo probabilitas, yaitu bilangan yang digunakan untuk menghitung peluang hasil pengukuran. Nanti, dalam bab-bab berikutnya, kita akan membuat pernyataan ini lebih matematis. Untuk sekarang, cukup pahami bahwa mekanika kuantum mengubah cara kita menghubungkan teori dengan hasil pengukuran.

Kata kuantum berarti “paket diskret”. Diskret berarti tidak dapat mengambil sembarang nilai secara kontinu, tetapi hanya nilai-nilai tertentu. Misalnya, jumlah mahasiswa dalam kelas adalah diskret: 30, 31, atau 32 orang, tetapi tidak 31,7 orang. Sebaliknya, panjang meja dalam model klasik dapat dianggap kontinu: 1,20 m, 1,201 m, 1,2013 m, dan seterusnya.

Dalam fisika kuantum, diskretisasi muncul pada besaran-besaran seperti energi atom, momentum sudut, dan hasil pengukuran spin. Tetapi hati-hati: mekanika kuantum bukan hanya teori “semuanya diskret”. Ada juga spektrum kontinu, misalnya energi partikel bebas. Yang benar adalah: mekanika kuantum memiliki struktur keadaan dan pengukuran yang berbeda dari mekanika klasik.

1.2 Radiasi benda hitam: ketika energi klasik menjadi tak masuk akal

Masalah pertama datang dari radiasi termal.

Setiap benda pada suhu di atas nol mutlak memancarkan radiasi elektromagnetik. Besi yang dipanaskan mula-mula tampak gelap, lalu merah, kemudian oranye, dan pada suhu lebih tinggi dapat tampak putih terang. Warna dan intensitas radiasi bergantung pada suhu. Untuk mempelajari gejala ini secara ideal, fisikawan memperkenalkan konsep benda hitam.

Benda hitam adalah sistem ideal yang menyerap semua radiasi elektromagnetik yang jatuh padanya dan memancarkan radiasi dengan spektrum yang hanya bergantung pada suhu. Kata “hitam” bukan berarti benda itu selalu tampak hitam. Pada suhu tinggi, benda hitam dapat memancarkan cahaya tampak yang sangat terang. Istilah “hitam” berarti penyerap sempurna.

Model eksperimental yang baik untuk benda hitam adalah rongga dengan lubang kecil. Radiasi yang masuk ke lubang akan memantul berkali-kali di dalam rongga dan hampir tidak keluar lagi. Lubang tersebut bertindak seperti penyerap hampir sempurna. Radiasi yang keluar dari lubang mencerminkan radiasi termal di dalam rongga.

Pertanyaannya: berapa banyak energi radiasi pada setiap frekuensi?

Frekuensi, dilambangkan ν , adalah jumlah getaran per satuan waktu. Satuan SI-nya adalah hertz. Cahaya merah memiliki frekuensi lebih rendah daripada cahaya biru. Radiasi ultraviolet memiliki frekuensi lebih tinggi daripada cahaya tampak.

Dalam teori klasik, radiasi elektromagnetik di dalam rongga dapat dipandang sebagai kumpulan mode gelombang. Mode adalah pola getaran yang diizinkan oleh bentuk dan ukuran rongga. Mirip seperti senar gitar: senar tidak bergetar dengan sembarang pola, tetapi memiliki pola-pola tertentu yang cocok dengan panjang senar.

Teori klasik memakai gagasan equipartisi energi dari mekanika statistik: pada kesetimbangan termal, setiap derajat kebebasan kuadratik menyumbang energi rata-rata yang sebanding dengan $k_B T$, dengan k_B konstanta Boltzmann dan T suhu mutlak. Jika gagasan ini diterapkan pada mode-mode elektromagnetik di rongga, diperoleh hukum Rayleigh-Jeans:

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

Di sini $u(\nu, T) d\nu$ adalah rapat energi radiasi per satuan volume dalam rentang frekuensi antara ν dan $\nu + d\nu$, dan c adalah laju cahaya. Bentuk klasik ini sesuai dengan data pada frekuensi rendah, tetapi gagal parah pada frekuensi tinggi. Karena u_{RJ} bertambah seperti ν^2 , total energi yang diprediksi,

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

menjadi tak hingga. Ini jelas tidak mungkin secara fisis. Benda panas tidak memancarkan energi tak hingga pada frekuensi ultraviolet. Kegagalan ini dikenal sebagai katastrofe ultraviolet. Istilah tersebut merujuk pada ledakan prediksi energi pada frekuensi tinggi, bukan ledakan nyata di laboratorium. Hukum klasik ini dikembangkan dari gagasan Rayleigh dan Jeans pada awal abad ke-20 (Rayleigh, 1900; Jeans, 1905).

Max Planck menemukan cara yang cocok dengan data. Ia mengusulkan bahwa pertukaran energi antara materi dan radiasi tidak berlangsung sembarang kontinu, tetapi dalam paket-paket energi

$$E = h\nu,$$

dengan h konstanta Planck. Dalam model Planck, energi osilator dengan frekuensi ν hanya dapat mengambil nilai

$$E_n = nh\nu, \quad n = 0, 1, 2, 3, \dots$$

Dengan asumsi ini, rapat energi benda hitam menjadi

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

Rumus ini cocok dengan spektrum benda hitam dan tidak menghasilkan energi total tak hingga (Planck, 1901).

Perhatikan perbedaan konsepnya. Dalam teori klasik, sebuah mode gelombang dapat memiliki energi rata-rata $k_B T$ tanpa batasan paket energi. Dalam teori Planck, energi mode berfrekuensi tinggi membutuhkan paket energi besar, yaitu $h\nu$. Jika $h\nu \gg k_B T$, suhu lingkungan tidak cukup efektif untuk mengisi mode tersebut. Akibatnya, radiasi frekuensi tinggi ditekan secara eksponensial.

Contoh fisisnya begini. Bayangkan mesin penjual minuman hanya menerima koin Rp10.000. Jika Anda punya banyak uang receh Rp500 tetapi mesin tidak menerimanya, Anda tetap tidak dapat membeli minuman. Demikian juga, untuk mengisi mode frekuensi tinggi, energi harus datang dalam paket $h\nu$. Jika paket yang dibutuhkan terlalu besar dibanding energi termal khas $k_B T$, mode itu jarang terisi.

Inilah tanda pertama: alam tampaknya tidak selalu memperlakukan energi sebagai besaran yang dapat ditukar secara kontinu.

1.3 Efek fotolistrik: cahaya tidak selalu berperilaku sebagai gelombang klasik

Masalah kedua datang dari interaksi cahaya dengan logam.

Efek fotolistrik adalah peristiwa keluarnya elektron dari permukaan logam ketika permukaan tersebut disinari cahaya. Elektron yang keluar disebut fotoelektron. Dalam eksperimen, kita dapat mengukur energi kinetik maksimum elektron yang terlepas.

Dalam gambaran gelombang klasik, cahaya adalah gelombang elektromagnetik. Intensitas cahaya berhubungan dengan energi yang dibawa gelombang per satuan waktu per satuan luas. Maka, secara klasik, jika intensitas cahaya diperbesar, energi yang diberikan kepada elektron seharusnya bertambah. Frekuensi cahaya memang dapat memengaruhi detail interaksi, tetapi tidak diharapkan muncul batas frekuensi tajam di bawahnya elektron sama sekali tidak keluar.

Namun, hasil eksperimen menunjukkan pola berbeda:

- Untuk setiap logam, ada frekuensi ambang ν_0 . Jika frekuensi cahaya lebih kecil dari ν_0 , elektron tidak keluar, meskipun intensitas cahaya diperbesar.
- Jika $\nu > \nu_0$, elektron keluar hampir seketika.
- Energi kinetik maksimum fotoelektron bertambah dengan frekuensi cahaya, bukan terutama dengan intensitas.
- Intensitas yang lebih besar terutama menambah jumlah elektron yang keluar, bukan energi maksimum masing-masing elektron.

Einstein menjelaskan gejala ini dengan mengambil gagasan Planck secara lebih radikal: cahaya sendiri berperilaku seolah-olah terdiri dari paket energi, yang kemudian disebut foton. Energi tiap foton adalah

$$E = h\nu.$$

Untuk melepaskan elektron dari logam, diperlukan energi minimum ϕ , disebut fungsi kerja. Fungsi kerja adalah energi minimum untuk membawa elektron dari dalam logam ke luar permukaan logam. Jika satu foton diserap oleh satu elektron, maka energi kinetik maksimum elektron adalah

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

Jika $h\nu < \phi$, elektron tidak memiliki cukup energi untuk keluar. Karena itu frekuensi ambangnya adalah

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

Penjelasan ini diajukan oleh Einstein pada 1905 (Einstein, 1905), dan pengukuran presisi Millikan kemudian mengonfirmasi hubungan linear antara energi fotoelektron dan frekuensi cahaya serta memberikan penentuan eksperimental konstanta Planck (Millikan, 1916).

Contoh sederhana: anggap pintu keluar membutuhkan tiket bernilai 10 satuan energi. Jika setiap foton merah membawa 7 satuan, maka berapa pun banyaknya foton merah yang datang, satu elektron yang menyerap satu foton merah tetap belum cukup untuk keluar. Tetapi jika setiap foton biru membawa 12 satuan, elektron dapat keluar dengan sisa 2 satuan sebagai energi kinetik. Intensitas lebih tinggi berarti lebih banyak foton per detik, sehingga lebih banyak elektron dapat keluar, tetapi energi maksimum tiap elektron ditentukan oleh energi per foton.

Efek fotolistrik memperlihatkan sesuatu yang tidak dapat dijelaskan oleh gelombang klasik murni: cahaya, yang sudah diketahui menunjukkan interferensi dan difraksi seperti gelombang, juga membawa energi dalam paket-paket diskret ketika berinteraksi dengan materi.

Ini bukan berarti cahaya “sebenarnya partikel klasik”. Foton bukan bola kecil bercahaya. Ia adalah entitas kuantum. Bab 3 akan membahas ini dengan lebih hati-hati. Untuk saat ini, pelajaran pentingnya adalah: konsep klasik “cahaya hanya gelombang kontinu” tidak cukup.

1.4 Spektrum atom: atom tidak memancarkan semua warna

Masalah ketiga datang dari spektrum atom.

Spektrum adalah distribusi intensitas radiasi menurut panjang gelombang atau frekuensi. Jika cahaya putih dilewatkan melalui prisma, kita melihat spektrum kontinu: merah, jingga, kuning, hijau, biru, sampai ungu. Tetapi jika gas hidrogen bertekanan rendah diberi energi, cahaya yang dipancarkannya tidak membentuk spektrum kontinu. Yang tampak adalah garis-garis terang pada panjang gelombang tertentu.

Ini disebut spektrum garis. Artinya, atom hanya memancarkan atau menyerap cahaya pada frekuensi tertentu. Pola ini sangat tidak klasik. Jika elektron dalam atom dapat bergerak dengan orbit dan energi sembarang seperti sistem klasik, kita mungkin mengharapkan radiasi pada rentang frekuensi yang lebih kontinu. Namun atom menunjukkan “sidik jari” spektral yang sangat tajam.

Untuk hidrogen, Balmer menemukan rumus empiris untuk sebagian garis tampak:

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

Di sini λ adalah panjang gelombang cahaya dan R_H adalah konstanta Rydberg untuk hidrogen. Rumus ini awalnya bersifat empiris: cocok dengan data, tetapi belum menjelaskan mengapa hanya nilai-nilai itu yang muncul (Balmer, 1885).

Model atom klasik juga menghadapi masalah struktur. Setelah eksperimen hamburan Rutherford, diketahui bahwa atom memiliki inti kecil bermuatan positif, sementara elektron berada di sekitar inti (Rutherford, 1911). Jika elektron bermuatan negatif mengitari inti seperti planet mengitari Matahari, maka elektron mengalami percepatan sentripetal. Dalam elektromagnetisme klasik, muatan yang dipercepat memancarkan radiasi elektromagnetik. Akibatnya, elektron seharusnya kehilangan energi, spiral menuju inti, dan atom runtuh dalam waktu sangat singkat. Prinsip bahwa muatan dipercepat memancarkan radiasi adalah hasil standar elektrodinamika klasik (Jackson, 1999).

Tetapi atom nyata stabil. Hidrogen tidak runtuh begitu saja. Atom juga memancarkan garis spektral tertentu, bukan radiasi kontinu akibat elektron yang terus-menerus kehilangan energi.

Bohr mengusulkan model transisi. Ia menyatakan bahwa elektron dalam atom hanya boleh memiliki energi tertentu. Selama berada pada keadaan energi yang diizinkan, elektron tidak memancarkan radiasi. Cahaya dipancarkan atau diserap hanya ketika elektron berpindah antara dua tingkat energi, dengan energi foton

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

untuk emisi dari tingkat awal E_i ke tingkat akhir E_f . Untuk atom hidrogen, model Bohr menghasilkan tingkat energi

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

dan dapat menjelaskan rumus spektrum hidrogen secara mengesankan (Bohr, 1913).

Namun model Bohr bukan mekanika kuantum lengkap. Ia mencampur konsep klasik orbit dengan aturan kuantisasi tambahan. Meskipun demikian, ia menunjukkan arah yang benar: energi atom tidak kontinu, melainkan memiliki tingkat-tingkat diskret.

Contoh penting: jika elektron turun dari $n=3$ ke $n=2$, atom hidrogen memancarkan foton dengan energi tertentu. Karena energi foton hnu tertentu, frekuensinya tertentu, dan panjang gelombangnya juga tertentu. Itulah sebabnya muncul satu garis spektrum, bukan semua warna.

Di sini lagi-lagi mekanika klasik gagal bukan karena kurang teliti, tetapi karena konsep dasarnya tidak sesuai. Atom tidak dapat dipahami sebagai miniatur tata surya klasik.

1.5 Stabilitas materi: mengapa benda tidak runtuh?

Sekarang kita sampai pada masalah yang lebih mendasar: mengapa materi stabil?

Pertanyaan ini terdengar terlalu sederhana. Meja tetap meja. Batu tetap batu. Tubuh kita tidak runtuh menjadi titik kecil. Tetapi jika materi terdiri dari muatan positif dan negatif yang saling tarik-menarik, stabilitas bukan hal sepele.

Dalam mekanika klasik, elektron bermuatan negatif dapat tertarik ke inti bermuatan positif. Jika tidak ada prinsip tambahan, energi potensial Coulomb dapat menjadi semakin negatif ketika elektron semakin dekat ke inti. Ditambah lagi, seperti dibahas sebelumnya, elektron yang bergerak melingkar di sekitar inti seharusnya memancarkan energi menurut elektrodinamika klasik. Gambaran klasik menghadapi kesulitan besar untuk menjelaskan atom yang stabil.

Mekanika kuantum memberi jawaban berbeda. Elektron dalam atom tidak digambarkan sebagai partikel kecil dengan lintasan pasti yang mengelilingi inti. Keadaan elektron digambarkan oleh fungsi gelombang atau vektor keadaan. Ketika elektron dipaksa terlokalisasi sangat dekat dengan inti, ketidakpastian momentumnya meningkat. Momentum yang lebih besar berarti kontribusi energi kinetik lebih besar. Persaingan antara tarikan Coulomb dan kenaikan energi kinetik kuantum menghasilkan keadaan dasar dengan energi minimum yang berhingga.

Kita belum akan menurunkan relasi ketidakpastian di sini, tetapi gagasan kasarnya penting: dalam mekanika kuantum, "menempatkan elektron tepat di inti" bukan pilihan keadaan berenergi rendah yang sah. Lokalisasi ekstrem membawa biaya energi kinetik.

Untuk atom banyak elektron dan materi makroskopik, stabilitas juga memerlukan prinsip larangan Pauli. Prinsip ini menyatakan bahwa dua fermion identik, seperti elektron, tidak dapat menempati keadaan kuantum yang sama. Ini mencegah semua elektron jatuh ke keadaan terendah yang sama. Stabilitas materi biasa secara matematis terkait erat dengan energi kinetik kuantum dan prinsip Pauli; pembahasan modern yang ketat diberikan, misalnya, oleh Lieb dan Seiringer (2010).

Contoh intuitif: jika semua elektron dalam sebuah benda dapat menempati keadaan kuantum paling rendah yang sama, materi akan jauh lebih mudah runtuh ke konfigurasi padat ekstrem. Tetapi karena elektron adalah fermion dan tunduk pada prinsip Pauli, elektron-elektron dalam atom dan zat padat harus mengisi keadaan-keadaan berbeda. Struktur kulit atom, tabel periodik, ikatan kimia, dan sifat zat padat semuanya bergantung pada fakta ini.

Mekanika klasik tidak memiliki prinsip Pauli. Ia juga tidak memiliki fungsi gelombang, keadaan dasar kuantum, atau relasi ketidakpastian. Karena itu, stabilitas materi bukan sekadar detail teknis yang belum selesai dalam mekanika klasik. Ia membutuhkan prinsip kuantum.

1.6 Pola umum dari kegagalan klasik

Mari berhenti sejenak dan lihat pola besarnya.

Pada radiasi benda hitam, teori klasik memprediksi energi tak hingga pada frekuensi tinggi. Kuantisasi energi memperbaikinya.

Pada efek fotolistrik, teori gelombang klasik tidak menjelaskan frekuensi ambang dan hubungan linear energi fotoelektron dengan frekuensi. Foton memperbaikinya.

Pada spektrum atom, teori klasik tidak menjelaskan garis-garis spektral tajam dan kestabilan orbit elektron. Tingkat energi diskret memperbaikinya.

Pada stabilitas materi, teori klasik tidak menyediakan mekanisme dasar yang cukup untuk mencegah keruntuhan materi bermuatan. Keadaan kuantum, energi kinetik akibat lokalisasi, dan prinsip Pauli memperbaikinya.

Pola ini dapat diringkas dalam satu kalimat:

Mekanika klasik menganggap banyak besaran fisis dapat berubah secara kontinu dan bahwa sistem memiliki keadaan dengan nilai-nilai pasti seperti posisi dan momentum; mekanika kuantum menunjukkan bahwa pada skala mikroskopik, struktur keadaan, energi, dan pengukuran jauh lebih halus dan tidak dapat direduksi ke gambaran lintasan klasik.

Namun kita harus berhati-hati. Mekanika klasik bukan “salah total”. Ia adalah aproksimasi yang sangat baik dalam domain tertentu: benda makroskopik, aksi besar dibanding konstanta Planck, dan situasi ketika efek kuantum tidak terlihat secara langsung. Mobil, bola, bandul, dan satelit sering dapat dianalisis dengan mekanika klasik karena detail kuantumnya rata-rata tidak tampak pada skala pengamatan kita.

Yang keliru adalah menganggap mekanika klasik berlaku tanpa batas.

1.7 Apa yang dapat dilakukan mekanika kuantum tetapi tidak dapat dilakukan mekanika klasik?

Mekanika kuantum bukan hanya teori yang “lebih akurat” untuk angka kecil. Ia memungkinkan penjelasan dan prediksi yang secara prinsip tidak tersedia dalam kerangka klasik biasa.

Pertama, mekanika kuantum menjelaskan tingkat energi diskret. Atom hidrogen memiliki energi tertentu, bukan sembarang energi. Dari sini kita dapat menghitung spektrum atom. Mekanika klasik tidak menghasilkan struktur tingkat energi atom yang benar.

Kedua, mekanika kuantum menjelaskan probabilitas pengukuran dari keadaan fisis. Dalam teori kuantum, keadaan tidak selalu menentukan satu hasil pasti untuk semua observable. Ia menentukan distribusi peluang. Ini bukan sekadar ketidaktahuan praktis seperti “kita belum mengukur dengan cukup teliti”, tetapi bagian dari struktur teori.

Ketiga, mekanika kuantum menjelaskan tunneling, yaitu kemampuan partikel menembus penghalang potensial meskipun energi klasiknya tidak cukup. Fenomena ini tidak muncul dalam mekanika klasik. Tunneling penting dalam peluruhan alfa, perangkat semikonduktor, dan mikroskop tunneling.

Keempat, mekanika kuantum menjelaskan spin. Spin adalah momentum sudut intrinsik yang tidak dapat dipahami sebagai bola kecil yang berputar secara klasik. Spin elektron, misalnya, berperan dalam struktur atom, magnetisme, dan teknologi resonansi magnetik.

Kelima, mekanika kuantum menjelaskan partikel identik. Dalam mekanika klasik, dua partikel identik masih dapat dibayangkan memiliki lintasan masing-masing sehingga dapat dilacak. Dalam mekanika kuantum, pertukaran partikel identik mengubah struktur fungsi gelombang. Dari sini muncul perbedaan boson dan fermion, prinsip Pauli, struktur tabel periodik, dan banyak sifat materi.

Keenam, mekanika kuantum memungkinkan entanglement, yaitu korelasi antara bagian-bagian sistem fisis yang tidak dapat dijelaskan dengan variabel tersembunyi lokal klasik. Ini menjadi dasar informasi kuantum modern.

Bab-bab berikutnya akan membangun semua ini perlahan. Kita tidak akan mulai dari slogan “dunia kuantum itu aneh”, tetapi dari definisi matematis dan prinsip fisis yang dapat diuji.

1.8 Sikap belajar yang tepat

Ada dua kesalahan umum saat mulai belajar mekanika kuantum.

Kesalahan pertama adalah memaksakan gambaran klasik terlalu jauh. Misalnya, membayangkan elektron dalam atom sebagai planet kecil yang benar-benar mengitari inti pada lintasan tertentu. Gambaran ini berguna sebagai jembatan sejarah, tetapi menyesatkan jika dianggap harfiah.

Kesalahan kedua adalah menganggap mekanika kuantum berarti “apa pun bisa terjadi”. Ini juga salah. Mekanika kuantum sangat ketat secara matematis. Ia tidak memberi kebebasan sembarang. Ia memberi aturan tepat untuk menghitung peluang hasil pengukuran, evolusi keadaan, dan hubungan antarbesaran fisis.

Sikap yang benar adalah menerima bahwa beberapa konsep klasik perlu diganti, tetapi penggantinya harus dipelajari dengan disiplin. Kita akan belajar apa itu keadaan kuantum, bagaimana fungsi gelombang dinormalisasi, mengapa operator mewakili observable, dan bagaimana persamaan Schrödinger menentukan evolusi sistem fisis.

Untuk menutup bab ini, simpan empat pelajaran utama:

1. Radiasi benda hitam menunjukkan perlunya kuantisasi energi.
2. Efek fotolistrik menunjukkan bahwa cahaya membawa energi dalam paket hnu.
3. Spektrum atom menunjukkan bahwa atom memiliki tingkat energi diskret.
4. Stabilitas materi menunjukkan bahwa dunia mikroskopik membutuhkan struktur kuantum yang tidak ada dalam mekanika klasik.

Mekanika kuantum diperlukan bukan karena alam ingin tampak misterius, tetapi karena eksperimen memaksa teori fisis kita menjadi lebih dalam.

References

Balmer, J. J. (1885). “Notiz über die Spectrallinien des Wasserstoffs.” *Annalen der Physik und Chemie*, 25, 80–87.

Bohr, N. (1913). "On the Constitution of Atoms and Molecules." *Philosophical Magazine, Series 6*, 26(151), 1-25.

Einstein, A. (1905). "Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt." *Annalen der Physik*, 17, 132-148.

Jackson, J. D. (1999). *Classical Electrodynamics* (3rd ed.). Wiley.

Jeans, J. H. (1905). "On the Partition of Energy between Matter and Ether." *Philosophical Magazine, Series 6*, 10(55), 91-98.

Lieb, E. H., & Seiringer, R. (2010). *The Stability of Matter in Quantum Mechanics*. Cambridge University Press.

Millikan, R. A. (1916). "A Direct Photoelectric Determination of Planck's h ." *Physical Review*, 7(3), 355-388.

Planck, M. (1901). "Ueber das Gesetz der Energieverteilung im Normalspectrum." *Annalen der Physik*, 4, 553-563.

Rayleigh, Lord. (1900). "Remarks upon the Law of Complete Radiation." *Philosophical Magazine*, 49, 539-540.

Rutherford, E. (1911). "The Scattering of α and β Particles by Matter and the Structure of the Atom." *Philosophical Magazine, Series 6*, 21(125), 669-688.

Document information

Bab 1: Mengapa Mekanika Kuantum Diperlukan

Project	Mekanika Kuantum dari Prinsip Pertama
Document	Document 1.5
Author	mujirin
Verifier	Not verified
Downloaded	July 05, 2026 22:18 KST
Status	Working
Document link	https://www.theorytrace.com/projects/mekanika-kuantum-dari-prinsip-pertama/documents/bab-1-mengapa-mekanika-kuantum-diperlukan/