Bab 2: Dunia Klasik sebagai Titik Berangkat

Mekanika kuantum akan lebih mudah dipahami jika kita terlebih dahulu memahami dunia klasik dengan adil. “Adil” berarti dua hal. Pertama, kita tidak boleh meremehkan mekanika klasik: teori ini sangat kuat, sangat berhasil, dan masih menjadi bahasa utama untuk banyak sistem fisis sehari-hari, teknik, astronomi, fluida, dan mekanika benda makroskopik. Kedua, kita tidak boleh membawa asumsi klasik ke wilayah kuantum tanpa pemeriksaan.

Bab sebelumnya menunjukkan bahwa beberapa gejala—radiasi benda hitam, efek fotolistrik, spektrum atom, dan stabilitas materi—memaksa kita melampaui mekanika klasik. Tetapi sebelum bertanya “apa yang berbeda dalam mekanika kuantum?”, kita harus tahu dulu “apa yang diasumsikan oleh mekanika klasik?”

Bab ini membangun titik berangkat itu. Kita akan membahas keadaan, lintasan, gaya, energi, momentum, ruang fase, dan determinisme. Semua konsep ini akan muncul kembali nanti, tetapi dengan makna yang berubah ketika kita masuk ke mekanika kuantum.

2.1 Apa yang dimaksud dengan teori klasik?

Dalam buku ini, teori klasik berarti teori fisis yang menggambarkan sistem fisis dengan besaran-besaran yang, pada prinsipnya, dapat memiliki nilai tertentu secara bersamaan. Misalnya, sebuah bola pada suatu saat dianggap memiliki posisi tertentu, kecepatan tertentu, momentum tertentu, dan energi tertentu. Jika kita mengetahui keadaan awal dan hukum gaya yang bekerja, teori klasik memberi aturan untuk menghitung keadaan berikutnya.

Mekanika Newton adalah bentuk paling terkenal dari mekanika klasik. Dalam Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica, Newton merumuskan hukum gerak yang menghubungkan gaya dengan perubahan gerak benda (Newton, 1687/1999). Dalam bentuk modern, hukum kedua Newton sering ditulis

$$F = ma,$$

untuk benda bermassa konstan, dengan F gaya total, m massa, dan a percepatan. Percepatan adalah laju perubahan kecepatan terhadap waktu:

$$a = (dv) \square (dt).$$

Jika posisi benda adalah $x(t)$, maka kecepatan adalah

$$v(t) = (dx) / (dt),$$

dan percepatan adalah

$$a(t) = (d^2x) / (dt^2).$$

Jadi, dalam mekanika Newton, hukum gerak biasanya menjadi persamaan diferensial untuk posisi sebagai fungsi waktu:

$$m(d^2x) / (dt^2) = F.$$

Persamaan diferensial adalah persamaan yang melibatkan suatu fungsi dan turunannya. Dalam konteks gerak, fungsi yang dicari adalah posisi $x(t)$, sedangkan turunannya memberi kecepatan dan percepatan. Mekanika klasik mengajarkan bahwa jika gaya diketahui dan kondisi awal diberikan, maka gerak dapat dihitung.

Contoh sederhana: sebuah benda jatuh dekat permukaan Bumi, dengan hambatan udara diabaikan. Gaya gravitasinya kira-kira konstan:

$$F = mg,$$

dengan g percepatan gravitasi. Maka

$$ma = mg,$$

sehingga

$$a = g.$$

Massa benda hilang dari persamaan percepatan. Ini menjelaskan mengapa, dalam model ideal tanpa hambatan udara, benda ringan dan benda berat jatuh dengan percepatan yang sama.

Perhatikan cara berpikir klasik di sini: benda memiliki posisi, kecepatan, dan lintasan tertentu sepanjang waktu. Pengukuran mungkin tidak sempurna, tetapi teori klasik menganggap besaran-besaran itu sudah ada sebagai sifat benda.

Inilah asumsi yang nanti akan diuji kembali dalam mekanika kuantum.

2.2 Keadaan klasik: informasi minimum untuk memprediksi gerak

Kata keadaan berarti informasi yang diperlukan untuk menentukan perilaku sistem fisis menurut teori tertentu. Definisi ini penting. Keadaan bukan sekadar "apa yang terlihat", melainkan paket informasi yang, bersama hukum gerak, cukup untuk membuat prediksi.

Dalam mekanika klasik Newtonian, keadaan sebuah partikel pada waktu t biasanya diberikan oleh posisi dan kecepatan:

$$(x(t), v(t)).$$

Jika massa partikel diketahui, kecepatan dapat diganti dengan momentum. Untuk partikel nonrelativistik bermassa m, momentum adalah

$$p = mv.$$

Maka keadaan dapat ditulis sebagai

$$(x(t), p(t)).$$

Mengapa posisi saja tidak cukup? Karena dua benda dapat berada di tempat yang sama pada saat yang sama, tetapi bergerak dengan kecepatan berbeda. Misalnya, bayangkan dua bola berada di titik yang sama di lantai pada t=0. Bola pertama sedang diam, sedangkan bola kedua sedang bergerak ke kanan. Posisi awalnya sama, tetapi masa depannya berbeda. Untuk memprediksi gerak, kita perlu posisi dan kecepatan, atau posisi dan momentum.

Contoh lain: sebuah mobil berada di kilometer ke-10 suatu jalan lurus. Informasi ini belum cukup untuk memprediksi posisinya satu menit kemudian. Apakah mobil diam? Apakah bergerak ke timur dengan 20 m/s? Apakah bergerak ke barat? Keadaan klasik harus memuat informasi gerak, bukan hanya lokasi.

Untuk satu partikel dalam tiga dimensi, posisi memiliki tiga komponen:

$$x = (x,y,z),$$

dan momentum juga memiliki tiga komponen:

$$p = (p_x, p_y, p_z).$$

Jadi keadaan klasik satu partikel memerlukan enam bilangan:

$$(x, y, z, p_x, p_y, p_z).$$

Untuk N partikel, diperlukan 3N komponen posisi dan 3N komponen momentum. Totalnya 6N bilangan. Ini adalah salah satu ciri mekanika klasik: keadaan sistem fisis dapat dibayangkan sebagai daftar nilai besaran-besaran tertentu.

Dalam mekanika kuantum, gagasan “keadaan” tetap ada, tetapi bentuknya berubah secara mendasar. Keadaan kuantum bukan daftar posisi dan momentum pasti. Bab-bab berikutnya akan memperkenalkan fungsi gelombang dan vektor keadaan. Untuk saat ini, kita hanya perlu mencatat perbedaannya: keadaan klasik adalah informasi berupa nilai posisi dan momentum, sedangkan keadaan kuantum menyimpan amplitudo probabilitas untuk berbagai kemungkinan hasil pengukuran.

2.3 Lintasan: jejak gerak dalam ruang dan waktu

Dalam mekanika klasik, lintasan adalah kurva yang menunjukkan posisi benda sebagai fungsi waktu. Jika posisi satu dimensi ditulis $x(t)$, maka lintasan adalah seluruh riwayat nilai x ketika t berubah. Dalam tiga dimensi, lintasan ditulis

$$x(t) = (x(t), y(t), z(t)).$$

Lintasan adalah salah satu gambaran paling intuitif dalam fisika klasik. Ketika bola dilempar, kita membayangkan jalurnya melengkung. Ketika planet mengitari Matahari, kita membayangkan orbit. Ketika mobil bergerak di jalan, kita membayangkan posisi mobil berubah secara kontinu dari satu titik ke titik berikutnya.

Sebagai contoh, untuk gerak satu dimensi dengan kecepatan konstan v, lintasannya adalah

$$x(t) = x_0 + vt,$$

dengan x_0 posisi awal. Jika $x_0 = 2$ m dan $v = 3$ m/s, maka setelah 4 s,

$$x(4) = 2 + 3(4) = 14 \text{ m}.$$

Dalam contoh ini, benda tidak hanya “mungkin” berada di 14 m. Dalam kerangka klasik ideal, benda memang berada di 14 m.

Untuk gerak vertikal dekat permukaan Bumi, jika sumbu y ke atas dan percepatan gravitasi -g, lintasannya adalah

$$y(t) = y_0 + v_0 t - \frac{1}{2} g t^2.$$

Jika sebuah bola dilempar ke atas, persamaan ini memberi tinggi bola pada setiap saat. Lagi-lagi, gambaran klasiknya jelas: bola melewati titik-titik tertentu secara kontinu.

Namun, lintasan klasik bukan hanya gambar. Ia adalah pernyataan konseptual: partikel dianggap memiliki posisi tertentu pada setiap saat. Inilah salah satu asumsi yang tidak dapat langsung dipindahkan ke mekanika kuantum. Dalam eksperimen celah ganda, misalnya, pertanyaan “elektron melewati celah yang mana?” tidak selalu memiliki jawaban klasik yang sah jika eksperimen tidak dirancang untuk mengukur jalur tersebut. Kita akan membahas ini lebih hati-hati pada Bab 3 dan Bab 4.

Untuk sekarang, simpan ide utama: mekanika klasik adalah teori lintasan. Mekanika kuantum bukan teori lintasan dalam arti klasik yang sama.

2.4 Gaya: penyebab perubahan momentum

Dalam bahasa sehari-hari, gaya sering dibayangkan sebagai dorongan atau tarikan. Dalam mekanika klasik, gaya didefinisikan lebih tepat melalui pengaruhnya terhadap momentum. Bentuk umum hukum kedua Newton adalah

$$F = \frac{dp}{dt}.$$

Jika massa konstan dan $p=mv$, maka

$$F = m\frac{dv}{dt} = ma.$$

Bentuk $F=dp/dt$ lebih umum daripada $F=ma$, terutama jika massa sistem berubah atau jika kita perlu berhati-hati dalam formulasi yang lebih luas.

Gaya penting karena ia menentukan bagaimana keadaan berubah. Jika gaya total nol, momentum benda tetap. Ini adalah hukum pertama Newton dalam bentuk modern: tanpa gaya total, benda mempertahankan keadaan geraknya. Jika gaya total tidak nol, momentum berubah.

Contoh: sebuah balok di atas lantai licin ditarik dengan gaya konstan F ke kanan. Jika massanya m, percepatannya

$$a = \frac{F}{m}.$$

Jika balok mula-mula diam, kecepatannya setelah waktu t adalah

$$v(t) = \frac{F}{m}t,$$

dan posisinya adalah

$$x(t) = x_0 + \frac{1}{2}\frac{F}{m}t^2.$$

Hukum gaya memberi lintasan.

Banyak gaya dalam mekanika klasik bergantung pada posisi. Misalnya, pegas ideal mengikuti hukum Hooke:

$$F = -kx.$$

Di sini k adalah konstanta pegas, dan tanda negatif berarti gaya pegas mengarah ke titik setimbang. Jika $x>0$, gaya ke kiri; jika $x<0$, gaya ke kanan. Sistem ini disebut osilator harmonik. Ia sangat penting karena banyak sistem fisis yang sedikit terganggu dari keadaan setimbang dapat didekati sebagai osilator harmonik. Pembahasan matematis osilator harmonik klasik dan kuantum merupakan tema standar dalam mekanika karena model ini muncul di getaran molekul, gelombang, dan medan (Goldstein, Poole, & Safko, 2002).

Dalam mekanika kuantum, gaya tetap dapat muncul, tetapi sering kali teori lebih nyaman dirumuskan melalui energi potensial atau Hamiltonian, bukan melalui lintasan dan percepatan langsung. Ini bukan sekadar pilihan gaya bahasa; struktur matematis teori kuantum memang berbeda. Karena itu kita perlu memahami energi dan Hamiltonian sejak dunia klasik.

2.5 Energi: kemampuan melakukan kerja dan besaran yang sering terjaga

Energi adalah besaran fisis yang memungkinkan kita menganalisis perubahan sistem tanpa selalu mengikuti detail gaya setiap saat. Dalam mekanika klasik, dua bentuk energi yang paling sering muncul adalah energi kinetik dan energi potensial.

Energi kinetik adalah energi yang terkait dengan gerak. Untuk partikel nonrelativistik bermassa m dan kelajuan v, energi kinetiknya adalah

$$K = (1)/(2)mv^2.$$

Energi potensial adalah energi yang terkait dengan konfigurasi sistem, misalnya posisi dalam medan gaya. Untuk benda dekat permukaan Bumi, energi potensial gravitasinya sering ditulis

$$V = mgy,$$

dengan y tinggi dari titik acuan. Untuk pegas ideal,

$$V = (1)/(2)kx^2.$$

Energi mekanik total adalah

$$E = K + V.$$

Dalam banyak sistem tanpa gesekan dan tanpa gaya luar yang bergantung waktu, energi mekanik total terjaga. “Terjaga” berarti nilainya tetap selama gerak. Prinsip kekekalan energi menjadi salah satu alat paling kuat dalam mekanika klasik dan merupakan bagian penting dalam formulasi modern mekanika (Taylor, 2005).

Contoh: benda jatuh bebas dari ketinggian h, mula-mula diam, hambatan udara diabaikan. Pada awalnya,

$$K_0 = 0, V_0 = mgh.$$

Sesaat sebelum mencapai tanah, jika kita ambil tanah sebagai V=0,

$$K_{f} = (1)/(2)mv^2, V_{f} = 0.$$

Karena energi terjaga,

$$mgh = \frac{1}{2}mv^2.$$

Massa hilang dari persamaan, sehingga

$$v = \sqrt{2gh}.$$

Dengan energi, kita dapat memperoleh kelajuan akhir tanpa menghitung posisi pada setiap saat.

Hubungan antara gaya dan energi potensial dalam satu dimensi diberikan oleh

$$F(x) = -\frac{dV}{dx}.$$

Jika energi potensial naik ke kanan, gaya mengarah ke kiri. Tanda negatif menyatakan bahwa sistem cenderung terdorong ke arah energi potensial yang lebih rendah.

Contoh pada pegas:

$$V(x)=\frac{1}{2}kx^2.$$

Maka

$$F(x)=-\frac{d}{dx}\left(\frac{1}{2}kx^2\right)=-kx.$$

Kita memperoleh kembali hukum Hooke.

Dalam mekanika kuantum, energi menjadi lebih penting lagi. Banyak masalah kuantum diselesaikan dengan mencari keadaan-keadaan yang memiliki energi tertentu. Tetapi ada perbedaan besar: dalam sistem kuantum terikat, energi sering kali hanya dapat mengambil nilai diskret tertentu. Dalam mekanika klasik, energi osilator harmonik dapat bernilai kontinu; dalam mekanika kuantum, energi osilator harmonik terkuantisasi. Perbedaan ini akan menjadi pusat pembahasan Bab 8 dan Bab 10.

2.6 Momentum: ukuran gerak yang terkait dengan simetri ruang

Momentum dalam mekanika klasik didefinisikan, untuk partikel nonrelativistik bermassa konstan, sebagai

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

Secara intuitif, momentum mengukur “jumlah gerak”. Truk yang bergerak pelan dapat memiliki momentum besar karena massanya besar. Bola kecil yang bergerak sangat cepat juga dapat memiliki momentum besar karena kecepatannya besar.

Namun momentum bukan hanya mv. Dalam mekanika yang lebih dalam, momentum terkait dengan simetri translasi ruang. Simetri translasi berarti hukum fisis tidak berubah jika seluruh sistem digeser sejauh jarak tertentu. Misalnya, jika percobaan dilakukan di meja sebelah kiri atau meja sebelah kanan dalam laboratorium yang sama, hukum dasarnya tidak berubah. Dalam formulasi Lagrangian dan Hamiltonian, hubungan antara simetri kontinu dan besaran yang terjaga dijelaskan oleh teorema Noether; teorema ini menyatakan bahwa setiap simetri kontinu dari aksi suatu sistem berkaitan dengan suatu hukum kekekalan (Noether, 1918).

Untuk momentum, ide dasarnya begini: jika hukum fisis tidak bergantung pada posisi absolut, maka momentum total sistem tertutup terjaga. Misalnya, dua bola biliar bertumbukan di atas meja licin. Sebelum dan sesudah tumbukan, momentum totalnya sama:

$$p_{\text{awal}} = p_{\text{akhir}}.$$

Ini tidak berarti masing-masing bola mempertahankan momentumnya. Bola pertama dapat melambat dan bola kedua dapat bergerak lebih cepat. Tetapi jumlah momentum keduanya tetap, selama tidak ada gaya luar total yang bekerja.

Contoh satu dimensi: bola A bermassa $m_A=2$ kg bergerak ke kanan dengan $v_A=3$ m/s. Bola B bermassa $m_B=1$ kg mula-mula diam. Momentum awal total adalah

$$p_{\text{awal}} = m_A v_A + m_B v_B = 2(3)+1(0)=6 \text{ kg m/s}.$$

Setelah tumbukan, nilai kecepatan masing-masing dapat berubah, tetapi jika sistem tertutup,

$$m_A v_A' + m_B v_B' = 6 \text{ kg m/s}.$$

Kekekalan momentum adalah alat prediksi yang sangat kuat.

Dalam mekanika kuantum, momentum tetap menjadi observable penting, tetapi maknanya berubah. Momentum tidak selalu dapat dianggap sebagai nilai pasti yang dimiliki partikel bersamaan dengan posisi pasti. Struktur ini terkait dengan relasi ketidakpastian Heisenberg, yang akan dibahas pada Bab 9.

2.7 Ruang konfigurasi dan ruang fase

Untuk memahami mekanika klasik dengan matang, kita perlu memperkenalkan dua ruang matematis: ruang konfigurasi dan ruang fase.

Ruang konfigurasi adalah ruang semua kemungkinan posisi sistem. Untuk satu partikel yang bergerak di garis lurus, ruang konfigurasinya satu dimensi, dengan koordinat x. Untuk satu partikel dalam ruang biasa, ruang konfigurasinya tiga dimensi, dengan koordinat (x,y,z). Untuk dua partikel dalam tiga dimensi, ruang konfigurasinya memiliki enam koordinat:

(x□,y□,z□,x□,y□,z□).

Ruang konfigurasi menjawab pertanyaan: “Di mana semua bagian sistem berada?”

Namun, seperti sudah kita lihat, posisi saja belum cukup untuk menentukan masa depan sistem klasik. Kita juga perlu momentum. Karena itu kita memperkenalkan ruang fase.

Ruang fase adalah ruang semua kemungkinan keadaan klasik, biasanya ditulis sebagai pasangan koordinat posisi dan momentum. Untuk satu partikel satu dimensi, titik dalam ruang fase adalah

$$(x,p).$$

Untuk satu partikel tiga dimensi, titik ruang fase adalah

$$(x, y, z, p_x, p_y, p_z).$$

Untuk N partikel dalam tiga dimensi, ruang fase memiliki 6N dimensi. Setiap titik dalam ruang fase menyatakan satu keadaan klasik lengkap.

Contoh paling sederhana adalah partikel satu dimensi. Jika pada suatu saat partikel berada di x=2 m dengan momentum p=5 kg m/s, maka keadaan klasiknya adalah titik (2,5) dalam ruang fase. Ketika waktu berjalan, titik ini bergerak dalam ruang fase dan membentuk kurva. Kurva ini bukan lintasan di ruang biasa, melainkan lintasan keadaan.

Untuk osilator harmonik klasik, energi totalnya adalah

$$E = \frac{p^2}{2m}+\frac{1}{2}kx^2.$$

Jika energi E tetap, maka titik (x,p) dalam ruang fase bergerak pada kurva

$$\frac{p^2}{2m}+\frac{1}{2}kx^2=E.$$

Kurva ini berupa elips di ruang fase. Artinya, ketika benda bergerak bolak-balik, posisinya dan momentumnya berubah secara periodik, tetapi energi totalnya tetap. Saat x maksimum, momentum p=0. Saat melewati titik setimbang x=0, momentum maksimum. Ruang fase membuat hubungan ini terlihat jelas.

Formulasi ruang fase menjadi sangat penting dalam mekanika Hamiltonian. Dalam pendekatan Hamiltonian, keadaan sistem dinyatakan oleh koordinat umum q dan momentum umum p, lalu evolusinya ditentukan oleh fungsi Hamiltonian H(q,p,t). Hamiltonian sering kali sama dengan energi total, terutama untuk sistem mekanik standar tanpa ketergantungan waktu eksplisit, tetapi secara umum Hamiltonian didefinisikan sebagai fungsi yang menghasilkan evolusi melalui persamaan Hamilton (Goldstein, Poole, & Safko, 2002; Arnold, 1989).

Untuk satu derajat kebebasan, persamaan Hamilton adalah

$$\dot{q} = \frac{\partial H}{\partial p},$$

$$\dot{p} = -\frac{\partial H}{\partial q}.$$

Titik di atas huruf, seperti dotq, berarti turunan terhadap waktu:

$$\dot{q} = \frac{dq}{dt}.$$

Contoh: untuk partikel satu dimensi dalam potensial V(q), Hamiltoniannya adalah

$$H(q,p)=(p^2)/(2m)+V(q).$$

Maka

$$\mathrm{dotq}=(\partial H)/(\partial p)=(p)/(m),$$

dan

$$\mathrm{dotp}=-(\partial H)/(\partial q)=-(dV)/(dq).$$

Persamaan pertama mengatakan bahwa kecepatan adalah momentum dibagi massa. Persamaan kedua mengatakan bahwa laju perubahan momentum adalah gaya:

$$\mathrm{dotp}=F.$$

Jadi persamaan Hamilton memuat kembali hukum Newton, tetapi dalam bahasa ruang fase.

Mengapa ini penting untuk mekanika kuantum? Karena struktur kuantum modern banyak dibangun dengan mengganti beberapa besaran klasik oleh operator. Posisi dan momentum tidak lagi sekadar koordinat ruang fase yang memiliki nilai pasti bersama, melainkan menjadi operator yang tidak selalu komutatif. Tetapi untuk memahami perubahan itu, kita harus terlebih dahulu mengenal gambaran klasiknya.

2.8 Derajat kebebasan: berapa banyak cara sistem dapat berubah?

Derajat kebebasan adalah jumlah koordinat independen yang diperlukan untuk menentukan konfigurasi sistem. Kata “independen” berarti satu koordinat tidak dapat dihitung dari koordinat lain karena batasan tertentu.

Untuk partikel bebas dalam satu dimensi, hanya diperlukan satu koordinat, x. Maka sistem memiliki satu derajat kebebasan.

Untuk partikel bebas dalam tiga dimensi, diperlukan tiga koordinat, (x,y,z). Maka sistem memiliki tiga derajat kebebasan.

Untuk bandul sederhana ideal, benda kecil bermassa m terikat pada tali ringan dengan panjang tetap L. Walaupun benda bergerak di bidang dua dimensi, posisinya tidak memerlukan dua koordinat bebas, karena jaraknya dari titik gantung selalu L. Cukup satu sudut θ untuk menentukan posisinya. Maka bandul sederhana memiliki satu derajat kebebasan.

Contoh ini penting karena keadaan klasik tidak selalu harus ditulis dengan koordinat Kartesius (x,y,z). Kita dapat memakai koordinat yang sesuai dengan sistem, misalnya sudut untuk rotasi atau panjang dan sudut untuk gerak dalam bidang. Koordinat semacam ini disebut koordinat umum.

Jika suatu sistem memiliki n derajat kebebasan, maka ruang konfigurasinya berdimensi n, dan ruang fasenya berdimensi 2n, karena setiap koordinat memiliki momentum pasangan. Untuk bandul sederhana, ruang konfigurasi berdimensi satu, misalnya θ, sedangkan ruang fasenya berdimensi dua, yaitu (θ,pθ).

Dalam mekanika kuantum, derajat kebebasan juga penting. Tetapi ada derajat kebebasan yang tidak memiliki padanan klasik langsung, misalnya spin elektron. Spin bukan bola kecil yang sungguh-sungguh berputar secara klasik. Ia adalah derajat kebebasan intrinsik kuantum. Kita baru akan membahasnya secara serius pada Bab 13.

2.9 Determinisme klasik: masa depan dari keadaan awal

Salah satu ciri paling terkenal dari mekanika klasik adalah determinisme. Dalam konteks ini, determinisme berarti: jika keadaan awal sistem diketahui secara tepat dan hukum geraknya diketahui, maka keadaan sistem pada masa depan dan masa lalu ditentukan secara unik.

Contoh: partikel satu dimensi dengan gaya konstan F. Jika pada t=0 kita tahu x_0 dan v_0, maka

$$x(t)=x_0+v_0 t+\frac{1}{2}\frac{F}{m}t^2,$$

$$v(t)=v_0+\frac{F}{m}t.$$

Tidak ada pilihan lain dalam model ini. Untuk setiap t, nilai x(t) dan v(t) sudah ditentukan oleh data awal.

Determinisme klasik sering dikaitkan dengan pandangan Laplace: jika suatu kecerdasan mengetahui semua posisi dan momentum partikel serta semua gaya yang bekerja, maka masa depan dan masa lalu alam dapat dihitung. Laplace menyatakan gagasan ini dalam konteks filsafat probabilitas dan mekanika pada awal abad ke-19 (Laplace, 1902). Dalam fisika modern, kita harus membaca gagasan itu dengan hati-hati. Ia mencerminkan struktur deterministik persamaan klasik tertentu, bukan klaim praktis bahwa manusia benar-benar dapat mengetahui semua data awal dengan ketelitian tak hingga.

Ada satu hal yang perlu dibedakan dengan teliti: determinisme tidak sama dengan kemudahan prediksi.

Beberapa sistem klasik bersifat chaotic. Dalam sistem chaotic, dua keadaan awal yang sangat dekat dapat berkembang menjadi keadaan yang sangat berbeda setelah waktu cukup lama. Ini disebut kepekaan terhadap kondisi awal. Namun sistem chaotic klasik tetap deterministik jika persamaan geraknya menentukan evolusi secara unik. Masalahnya adalah kesalahan kecil dalam data awal dapat membesar sangat cepat sehingga prediksi jangka panjang menjadi praktis sulit. Pengembangan modern teori chaos menunjukkan bahwa ketidakpastian prediksi dalam sistem klasik dapat muncul dari dinamika nonlinier, bukan dari indeterminisme fundamental seperti dalam pengukuran kuantum (Strogatz, 2015).

Contoh sederhana adalah cuaca. Atmosfer mengikuti hukum fisis klasik dan termodinamika fluida dengan sangat baik pada banyak skala. Tetapi cuaca memiliki kepekaan besar terhadap kondisi awal, sehingga prediksi jangka panjang menjadi sulit. Ini bukan berarti atmosfer "kuantum" dalam arti sehari-hari. Ini berarti sistem klasik pun dapat sulit diprediksi secara praktis.

Mekanika kuantum berbeda. Ketika keadaan kuantum diketahui sebaik mungkin, hasil pengukuran tertentu masih dapat bersifat probabilistik secara fundamental. Misalnya, jika sebuah elektron disiapkan dalam keadaan spin tertentu, pengukuran spin pada arah berbeda tidak selalu memiliki hasil yang dapat diprediksi satu per satu, melainkan hanya probabilitasnya. Ini bukan sekadar karena alat ukur kasar. Ini berasal dari struktur teori kuantum sendiri. Perbedaan ini akan menjadi pusat Bab 6, Bab 7, dan Bab 9.

2.10 Probabilitas dalam teori klasik: ketidaktahuan, bukan struktur dasar

Mekanika klasik dapat memakai probabilitas, tetapi biasanya probabilitas muncul karena ketidaktahuan kita tentang keadaan sebenarnya. Misalnya, jika kita melempar dadu, kita memakai probabilitas 1/6 untuk tiap sisi dalam model ideal. Namun dalam gambaran klasik, dadu tetap memiliki posisi, kecepatan, orientasi, kecepatan sudut, gaya kontak, dan interaksi dengan meja yang pasti. Jika semua informasi itu diketahui dengan ketelitian sempurna dan persamaan gerak dapat diselesaikan, hasil lemparan pada prinsipnya ditentukan.

Probabilitas klasik semacam ini disebut probabilitas epistemik. Kata “epistemik” berasal dari gagasan tentang pengetahuan. Artinya, probabilitas mencerminkan ketidaktahuan pengamat, bukan ketiadaan nilai fisis yang pasti.

Contoh lain: gas dalam kotak. Satu mol gas mengandung sekitar $6{,}022\times 10^{23}$ molekul. Secara praktis mustahil melacak posisi dan momentum semua molekul. Maka fisika statistik memakai distribusi probabilitas untuk menggambarkan keadaan makroskopik seperti tekanan dan suhu. Tetapi dalam mekanika klasik, setiap molekul tetap dianggap memiliki posisi dan momentum tertentu pada setiap saat. Pendekatan probabilistik dipakai karena jumlah partikel sangat besar dan informasi rinci tidak tersedia. Kerangka ini merupakan fondasi mekanika statistik klasik seperti dibahas dalam teks standar fisika statistik (Pathria & Beale, 2011).

Dalam mekanika kuantum, probabilitas memiliki peran yang lebih mendasar. Fungsi gelombang tidak sekadar menyembunyikan daftar posisi dan momentum pasti yang tidak kita ketahui. Interpretasi Born menyatakan bahwa kuadrat modulus amplitudo gelombang memberi probabilitas hasil pengukuran. Dengan kata lain, teori kuantum secara langsung memprediksi distribusi hasil, bukan lintasan tersembunyi klasik. Kita akan membahas ini pada Bab 4.

Untuk menghindari salah paham, kita belum mengatakan bahwa semua interpretasi mekanika kuantum sepakat dalam bahasa filsafat yang sama. Namun dalam praktik perhitungan standar, probabilitas kuantum bukan sekadar probabilitas dadu klasik yang berasal dari ketidaktahuan terhadap lintasan rinci.

2.11 Observable klasik: besaran yang dapat diukur

Dalam fisika, observable adalah besaran fisis yang dapat diukur, setidaknya secara prinsip. Dalam mekanika klasik, observable biasanya berupa fungsi dari keadaan. Jika keadaan satu partikel adalah (x,p), maka energi

$$E(x,p)=(p^2)/(2m)+V(x)$$

adalah observable. Posisi x, momentum p, energi E, momentum sudut L, dan gaya F juga dapat diperlakukan sebagai besaran yang nilainya ditentukan oleh keadaan.

Contoh: untuk partikel satu dimensi dengan x=2 m, p=4 kg m/s, dan m=2 kg, energi kinetiknya adalah

$$K=\frac{p^2}{2m}=\frac{4^2}{2(2)}=4\ \text{J}.$$

Jika potensial di titik itu V(2)=3 J, maka energi totalnya

$$E=K+V=7\ \text{J}.$$

Dalam mekanika klasik, jika keadaan diketahui, nilai observable juga diketahui. Pengukuran ideal hanya membaca nilai yang sudah ada. Tentu dalam eksperimen nyata, alat ukur dapat mengganggu sistem. Tetapi gangguan itu dianggap gangguan praktis, bukan bagian tak terhindarkan dari struktur teori.

Dalam mekanika kuantum, observable direpresentasikan oleh operator. Hasil pengukuran berkaitan dengan nilai eigen operator tersebut, dan keadaan kuantum tidak selalu memiliki nilai pasti untuk semua observable sekaligus. Ini merupakan perbedaan besar. Tetapi agar perbedaan itu tajam, kita harus mengingat dulu gambaran klasiknya: observable klasik adalah fungsi pada ruang fase.

2.12 Pengukuran dalam mekanika klasik

Dalam idealisasi klasik, pengukuran dapat dibuat pasif: alat ukur dapat dianggap membaca sifat sistem tanpa mengubahnya secara signifikan. Misalnya, radar mengukur posisi mobil; termometer mengukur suhu air; kamera merekam lintasan bola. Dalam praktik, setiap pengukuran membutuhkan interaksi. Tetapi mekanika klasik memungkinkan kita membayangkan batas ideal di mana gangguan pengukuran dibuat sekecil mungkin tanpa mengubah konsep dasar bahwa sistem memiliki nilai tertentu sebelum diukur.

Contoh: mengukur posisi bola tenis dengan kamera. Kamera menerima cahaya yang dipantulkan dari bola. Cahaya memberi sedikit tekanan radiasi, tetapi untuk bola tenis efeknya sangat kecil. Secara klasik, kita dapat mengatakan bahwa bola sudah berada di posisi tertentu sebelum kamera merekamnya.

Contoh lain: mengukur kecepatan mobil dengan dua sensor yang dipasang pada jarak tertentu. Sensor mencatat waktu lewat mobil, lalu kecepatan dihitung. Dalam gambaran klasik, mobil sudah memiliki kecepatan tertentu. Alat ukur hanya memperkirakannya.

Mekanika kuantum tidak mengizinkan penyederhanaan ini secara umum. Untuk sistem mikroskopik, proses pengukuran tidak hanya mengungkap nilai yang sudah pasti untuk semua besaran. Pengukuran dapat mengubah keadaan kuantum dengan cara yang tidak dapat dipahami sebagai gangguan kecil biasa. Misalnya, jika kita mengukur posisi elektron dengan ketelitian tinggi, keadaan momentumnya berubah secara signifikan. Ini terkait dengan struktur matematis posisi dan momentum sebagai operator tak komutatif, bukan hanya keterbatasan teknologi.

Tetapi sekali lagi, kita belum masuk ke detail kuantum. Yang penting di Bab 2 adalah mengenali asumsi klasik: pengukuran ideal membaca nilai yang sudah dimiliki sistem.

2.13 Tiga formulasi klasik: Newton, Lagrange, dan Hamilton

Mekanika klasik tidak hanya memiliki satu bentuk. Ada beberapa formulasi yang secara fisis setara dalam banyak situasi, tetapi berbeda dalam bahasa dan kegunaan.

Formulasi Newton memakai gaya dan percepatan:

$$F=ma.$$

Formulasi ini sangat intuitif untuk benda yang bergerak di bawah gaya tertentu. Misalnya, gerak proyektil, gesekan, pegas, dan orbit planet dapat langsung dianalisis dengan hukum Newton.

Formulasi Lagrange memakai besaran yang disebut Lagrangian, biasanya

$$L = K - V,$$

yaitu energi kinetik dikurangi energi potensial. Gerak sistem diperoleh dari prinsip aksi stasioner. Secara ringkas, sistem mengikuti lintasan yang membuat aksi

$$S=\int L\,dt$$

stasioner terhadap variasi kecil lintasan. “Stasioner” tidak selalu berarti minimum; bisa juga maksimum atau titik pelana. Formulasi ini sangat berguna untuk sistem dengan kendala dan koordinat umum (Goldstein, Poole, & Safko, 2002; Taylor, 2005).

Contoh: bandul sederhana lebih mudah ditulis dengan sudut θ daripada koordinat x dan y yang harus memenuhi kendala panjang tali tetap. Formulasi Lagrange memungkinkan kita bekerja langsung dengan θ, sehingga persamaan gerak lebih bersih.

Formulasi Hamilton memakai Hamiltonian H(q,p,t) dan ruang fase. Gerak diberikan oleh

$$\dot{q} = \frac{\partial H}{\partial p}, \quad \dot{p} = -\frac{\partial H}{\partial q}.$$

Formulasi Hamilton sangat penting karena menjadi jembatan konseptual menuju mekanika kuantum. Banyak struktur kuantum—Hamiltonian, operator momentum, komutator, evolusi waktu—memiliki akar historis dan matematis dalam mekanika Hamiltonian. Teks klasik seperti Arnold menekankan bahwa mekanika Hamiltonian bukan hanya cara lain menulis hukum Newton, tetapi struktur geometri pada ruang fase (Arnold, 1989).

Dalam buku ini, kita tidak akan mengembangkan mekanika analitik klasik secara lengkap. Namun kita perlu mengenal gagasan dasarnya karena mekanika kuantum sering ditulis dalam bahasa Hamiltonian. Ketika nanti kita melihat persamaan Schrödinger,

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

simbol $\hat{H}$ adalah operator Hamiltonian. Ia memainkan peran sebagai pembangkit evolusi waktu keadaan kuantum. Ini menggemakan peran Hamiltonian klasik sebagai pembangkit gerak di ruang fase, meskipun objek matematisnya berbeda.

2.14 Apa yang berhasil dijelaskan mekanika klasik?

Sebelum menyoroti batas klasik, kita perlu menghargai keberhasilannya. Mekanika klasik berhasil menjelaskan banyak sistem fisis:

1. gerak proyektil,
2. orbit planet dan satelit dalam banyak kondisi,
3. getaran pegas dan bandul untuk simpangan kecil,
4. tumbukan benda makroskopik,

5. gerak fluida dalam banyak rezim,
6. mesin dan struktur teknik,
7. gelombang mekanik seperti gelombang pada tali dan gelombang suara.

Keberhasilan ini bukan kebetulan. Pada skala makroskopik, aksi khas sistem sering jauh lebih besar daripada konstanta Planck hbar, dan efek kuantum sering teredam atau tidak tampak langsung dalam besaran yang kita amati. Selain itu, interaksi dengan lingkungan dapat membuat perilaku sistem tampak klasik melalui proses yang nanti akan kita sebut dekoherensi. Tetapi penjelasan rinci tentang batas klasik akan kita simpan untuk Bab 18 dan Bab 22.

Contoh konkret: lintasan bola basket dapat dihitung dengan mekanika klasik. Jika kita memperhitungkan gaya gravitasi, hambatan udara, putaran bola, dan interaksi dengan ring, model klasik dapat menjadi sangat akurat. Tidak perlu menyelesaikan persamaan Schrödinger untuk seluruh bola basket. Secara fisis, deskripsi klasik sudah cukup.

Contoh lain: satelit buatan yang mengorbit Bumi dianalisis dengan mekanika klasik dan relativitas jika ketelitian sangat tinggi diperlukan. Untuk banyak tujuan orbit, hukum Newton memberi pendekatan yang sangat baik. Sistem navigasi satelit membutuhkan koreksi relativistik, tetapi bukan karena mekanika kuantum menggantikan lintasan satelit sehari-hari.

Maka pesan pentingnya: mekanika kuantum tidak membuat mekanika klasik “salah total”. Mekanika klasik adalah pendekatan yang sangat baik dalam domain tertentu. Yang salah adalah menganggap domain klasik berlaku universal hingga skala atomik.

2.15 Apa yang diasumsikan mekanika klasik?

Mari kita kumpulkan asumsi-asumsi utama yang telah muncul. Ini bukan daftar kaku untuk semua formulasi klasik, tetapi ringkasan konsep yang penting sebelum masuk ke mekanika kuantum.

Pertama, sistem memiliki keadaan yang dapat dinyatakan (selanjutnya >>)

Document information

Bab 2: Dunia Klasik sebagai Titik Berangkat

Project	Mekanika Kuantum dari Prinsip Pertama
Document	Document 1.6
Author	mujirin
Verifier	Not verified
Downloaded	July 04, 2026 20:54 KST
Status	Working
Document link	https://www.theorytrace.com/projects/mekanika-kuantum-dari-prinsip-pertama/documents/bab-2-dunia-klasik-sebagai-titik-berangkat/