



Catatan Mekanika Kuantum 1
Seputar Lahirnya Mekanika Kuantum
Acuan utama Gasiorowicz, *Quantum Physics* Ed. 3, Bab 1

Ada beberapa fenomena yang memicu lahirnya mekanika kuantum. Fenomena-fenomena tersebut tidak dapat dijelaskan menggunakan fisika klasik yang sudah mapan. Untuk menjelaskannya fisikawan terdorong untuk berpikir keluar dari kerangka fisika klasik, baik secara sadar maupun tanpa sadar. Alhasil muncul pemikiran-pemikiran baru, yang tidak dapat dicari dasar pijakannya dalam fisika klasik, bahkan bertentangan dengan yang sudah kuat dipahami dalam fisika klasik, namun tidak dapat atau sulit ditolak, jika fisikawan ingin dapat menjelaskan fenomena-fenomena baru tersebut. Mekanika kuantum, meskipun demikian, tidak membatalkan fisika klasik. Banyak fenomena yang dapat dijelaskan oleh fisika klasik dan itu membuat fisika klasik menjadi mapan dan tetap mapan. Mekanika kuantum diperlukan untuk menjelaskan fenomena-fenomena dalam dunia mikro, seperti fenomena molekuler, atomik, nuklir, dan sebagainya dalam dunia mikro. Mekanika kuantum menjadi alat untuk memahami sifat dan perilaku dunia mikro, yang pada akhirnya sangat bermanfaat untuk menghasilkan teknologi modern, yang merupakan rekayasa sistem-sistem mikro.

A. Radiasi benda hitam

Setiap benda yang bersuhu di atas 0 K mengemisi radiasi elektromagnetik (ingat hukum Stefan-Boltzmann). Radiasi elektromagnetik itu terdistribusi di semua daerah frekuensi (atau di semua daerah panjang gelombang). Distribusi tersebut memiliki satu puncak, yang posisinya bergantung pada suhu benda itu (ingat hukum Wien): makin tinggi suhu benda, puncak distribusi radiasi elektromagnetik yang diemisinya bergeser ke frekuensi yang lebih tinggi (atau ke panjang gelombang yang lebih pendek). (Gambar-gambar distribusi radiasi elektromagnetik pada semua daerah frekuensi atau panjang gelombang mudah dicari di buku-buku dan internet.)

Benda hitam (suatu benda ideal) juga bersifat demikian (ingat kembali tentang definisi dan contoh benda hitam, atau lebih tepat dikatakan benda yang sangat mendekati benda hitam). Yang spesial dari radiasi benda hitam adalah bahwa distribusinya sama untuk semua benda hitam, tidak bergantung pada bahan dan bentuknya; distribusi radiasi elektromagnetik benda hitam hanya bergantung pada suhunya.

Fisikawan berusaha mendapatkan rumus untuk distribusi radiasi elektromagnetik benda hitam.

Yang paling dikenal adalah yang dihasilkan oleh Wilhelm Wien di 1896, Lord Rayleigh & James Jeans di 1900, dan Max Planck di 1900. Kerja Planck, pada akhirnya, melahirkan salah satu dasar mekanika kuantum.

- Wien:

Dari hasil kerjanya menggunakan termodinamika, Wien menyuguhkan rumus energi radiasi elektromagnetik per unit volume per unit frekuensi (rapat energi per unit frekuensi) $u(\nu, T)$ (ν adalah frekuensi, T adalah suhu) untuk benda hitam sebagai berikut:

$$u(\nu, T) = A\nu^3 e^{-\beta\nu/T}, \quad (1)$$

dengan A dan β suatu konstanta, yang nilainya ditentukan dengan cara *fitting* terhadap data eksperimen. Didapatkan bahwa rumus Wien hanya sesuai untuk daerah frekuensi tinggi.

- Rayleigh-Jeans:

Dalam menurunkan rumus distribusi radiasi elektromagnetik benda hitam Rayleigh-Jeans membayangkan energi yang diradiasikan dibangkitkan oleh osilator berupa vibrasi medan elektromagnetik dalam benda hitam. Vibrasi medan elektromagnetik tersebut terjadi pada suatu moda tertentu (moda osilasi). Tiap moda osilasi merepresentasikan satu derajat kebebasan (*degree of freedom*), sehingga jumlah derajat kebebasan sama dengan jumlah moda osilasi sama dengan jumlah osilator. Jumlah moda osilasi per volume dalam rentang infinitesimal frekuensi dari ν sampai $\nu + d\nu$ didapatkan sebesar

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

dengan c laju cahaya di vakum. Rayleigh-Jeans kemudian menerapkan teorema ekipartisi (*equipartition*) dalam mekanika statistik klasik bahwa tiap derajat kebebasan memiliki energi yang sama, yang dihitung sebagai energi rata-rata (energi total dibagi jumlah moda osilasi atau jumlah derajat kebebasan atau jumlah osilator). Diperoleh bahwa energi rata-rata tersebut sebesar kT , dengan k konstanta Boltzmann. Dengan demikian, energi per unit volume dalam rentang frekuensi dari ν sampai $\nu + d\nu$ adalah

$$\frac{8\pi\nu^2}{c^3} kT d\nu \quad (3)$$

atau

$$u(\nu, T) = \frac{8\pi\nu^2}{c^3} kT. \quad (4)$$

Berkebalikan terhadap rumus Wien, diperoleh bahwa rumus Rayleigh-Jeans hanya sesuai untuk daerah frekuensi rendah. Untuk frekuensi makin tinggi rumus itu jelas memberikan nilai energi radiasi yang makin besar menuju tak berhingga, yang tentu saja tidak mungkin. Hal ini dikenal dengan katastropi ultraviolet.

- Planck:

Rumus Wien cocok untuk frekuensi tinggi, rumus Rayleigh-Jeans cocok untuk frekuensi rendah, Planck menyuguhkan rumus yang orang-orang sebut sebagai suatu hasil interpolasi cerdas antara rumus Wien dan rumus Rayleigh-Jeans, sebagai berikut:

$$u(\nu, T) = \frac{8\pi\nu^2}{c^3} \frac{h\nu}{e^{h\nu/kT} - 1}, \quad (5)$$

dengan h suatu konstanta (kemudian disebut konstanta Planck). Dapat kita lihat:

$$\lim_{\nu \rightarrow \infty} \frac{8\pi\nu^2}{c^3} \frac{h\nu}{e^{h\nu/kT} - 1} = \frac{8\pi h}{c^3} \nu^3 e^{-h\nu/kT} \quad (\text{rumus Wien}) \quad (6)$$

$$\lim_{\nu \rightarrow 0} \frac{8\pi\nu^2}{c^3} \frac{h\nu}{e^{h\nu/kT} - 1} = \frac{8\pi\nu^2}{c^3} kT \quad (\text{rumus Rayleigh-Jeans}). \quad (7)$$

Planck menyuguhkan rumusnya pada pertemuan Himpunan Fisikawan Jerman, 19 Oktober 1900. Orang dapatkan kemudian bahwa rumus Planck benar-benar cocok dengan data eksperimen.

Setelah rumusnya terbukti berhasil menggambarkan radiasi benda hitam (cocok dengan data eksperimen), barulah kemudian Planck berusaha menurunkannya dari dasar, bukan dari rumus Wien dan Rayleigh-Jeans serta data eksperimen, dalam rangka untuk mendapatkan makna fisiknya. Makna fisiknya ternyata sesuatu yang mengubah dunia fisika, sesuatu yang bahkan Planck sendiri sulit menerimanya.

Untuk mudahnya, kita bandingkan rumus Planck terhadap rumus Rayleigh-Jeans. Menurut rumus Planck, dengan demikian, energi rata-rata osilator bukanlah kT , melainkan:

$$\frac{h\nu}{e^{h\nu/kT} - 1}. \quad (8)$$

Energi rata-rata tersebut diperoleh apabila kita anggap bahwa osilator dengan frekuensi ν tidak dapat memiliki atau mengemisi energi dengan nilai sembarang, melainkan dengan nilai sama dengan $h\nu$. Dengan demikian, radiasi elektromagnetik tidak bersifat kontinyu, melainkan diskrit. Radiasi elektromagnetik diemisikan sebagai kumpulan paket energi (Planck menyebutnya quanta), tiap paket energi besarnya $h\nu$. Pada frekuensi ν besar energi radiasi elektromagnetik yang mungkin adalah kelipatan bulat dari $h\nu$.

B. Efek fotolistrik

Efek fotolistrik ditemukan oleh Heinrich Hertz di 1887 dalam eksperimennya mengenai gelombang elektromagnetik. Apabila permukaan suatu logam disinari cahaya (di-iradiasi), elektron keluar dari logam tersebut. Ini bukan fenomena aneh menurut fisika klasik, karena orang sudah tahu bahwa cahaya, yang dipahami sebagai gelombang elektromagnetik, dapat memberikan energi ke elektron yang terikat di permukaan logam, sehingga apabila telah mendapat cukup energi elektron dapat lepas dari ikatannya pada logam. Namun, pada eksperimen itu diamati beberapa hal yang tidak dapat dijelaskan menurut fisika klasik:

- Elektron tidak keluar dari logam, apabila frekuensi cahaya kurang dari suatu nilai tertentu (frekuensi ambang), yang bergantung pada jenis logam, walaupun iradiasi dilakukan dalam waktu yang cukup lama dan / atau intensitas cahaya diperbesar. Ini aneh menurut fisika klasik. Menurut fisika klasik:
 - Pada frekuensi berapapun, cahaya (gelombang elektromagnetik) dapat memberikan energi ke elektron.
 - Pada frekuensi berapapun, pada intensitas tertentu dan konstan, energi cahaya diserap oleh elektron selama disinari, sehingga dari waktu ke waktu terakumulasi makin banyak, dan apabila telah cukup dapat memutuskan ikatan elektron pada logam.
 - Energi gelombang bergantung pada intensitasnya, yang berarti pada amplitudo, bukan pada frekuensi. Berarti, pada frekuensi berapapun, jika intensitas cahaya dinaikkan, energi yang diterima elektron makin besar dan pada suatu waktu energi tersebut cukup untuk melepaskan ikatan elektron pada logam.
- Sebaliknya, walaupun intensitas cahaya sangat kecil, tanpa perlu menunggu lama elektron langsung keluar, apabila frekuensi cahaya lebih dari frekuensi ambang. Ini tidak sesuai dengan pemahaman dalam fisika klasik. Menurut fisika klasik, apabila intensitas cahaya kecil, energi cahaya kecil, sehingga diperlukan waktu beberapa lama bagi elektron untuk mengakumulasi energi yang diserapnya dari cahaya sampai cukup untuk memutuskan ikatannya pada logam.
- Ketika frekuensi cahaya lebih dari frekuensi ambang:
 - jumlah elektron yang keluar dari logam sebanding dengan intensitas cahaya dan tidak bergantung pada frekuensi cahaya. Makin besar intensitas cahaya yang menyinari, makin banyak elektron yang keluar dari logam itu. Fisika klasik tidak dapat menjelaskan hubungan antara intensitas cahaya dan jumlah elektron yang keluar tersebut.
 - energi kinetik maksimum elektron yang keluar dari logam bertambah secara linier dengan frekuensi; makin tinggi frekuensi cahaya, makin besar energi kinetik maksimum elektron. Fisika klasik tidak dapat menjelaskan hal ini, karena menurut fisika klasik energi cahaya yang diberikan ke elektron ditentukan oleh intensitas cahaya, bukan oleh frekuensi cahaya.

Solusi atas masalah ini diberikan oleh Albert Einstein di 1905. Memperhatikan makna fisis rumus Planck mengenai radiasi benda hitam, bahwa radiasi elektromagnetik diemisi atau diserap dalam bentuk paket-paket energi (quanta), Einstein menyuguhkan gagasan bahwa berkas cahaya berperilaku sebagai kumpulan quanta cahaya, bahwa berkas cahaya monokromatik dengan

frekuensi ν merupakan kumpulan paket energi cahaya atau quanta cahaya, yang masing-masing besarnya $h\nu$. Pada peristiwa fotolistrik, dengan demikian, yang terjadi bukan transfer energi kontinyu dari gelombang elektromagnetik ke elektron, melainkan dari quanta cahaya ke elektron; secara lebih detil, dari satu quanta cahaya ke satu elektron. Perhatikan bahwa pada saat itu quanta cahaya tidak (belum) dianggap sebagai partikel, melainkan hanya paket energi. Sebutan foton untuk quanta cahaya juga baru dipakai kemudian, diawali oleh G. N. Lewis di tahun 1926. Menurut gagasan Einstein:

- Satu quanta cahaya sebesar $h\nu$ diserap sepenuhnya oleh satu elektron. Jika $h\nu$ kurang dari energi ikat elektron pada logam, elektron itu tidak keluar dari logam. Sebaliknya, jika $h\nu$ lebih dari energi ikat elektron pada logam, elektron itu keluar dari logam. Ini menjelaskan adanya frekuensi ambang pada fenomena fotolistrik.
- Energi suatu berkas cahaya monokromatik dengan frekuensi ν sama dengan jumlah quanta cahaya dalam berkas tersebut dikalikan dengan $h\nu$. Menurut teori gelombang, energi berkas cahaya sebanding dengan intensitasnya. Dengan kata lain, jumlah quanta cahaya sebanding dengan intensitas cahaya.
- Ketika frekuensi cahaya kurang dari frekuensi ambang, walaupun intensitas berkas cahaya tinggi, yang berarti jumlah quanta cahaya besar, namun tiap quanta cahaya tersebut tidak dapat melepaskan ikatan satu elektron pada logam, sehingga tidak ada elektron keluar dari logam, meskipun logam itu terus-menerus disinari.
- Ketika frekuensi cahaya lebih dari frekuensi ambang:
 - walaupun intensitas berkas cahaya rendah, yang berarti jumlah quanta cahaya kecil, namun tiap quanta cahaya tersebut dapat melepaskan ikatan satu elektron pada logam, sehingga elektron langsung keluar dari logam, tanpa perlu menunggu waktu lama.
 - jumlah elektron yang keluar dari logam sama dengan jumlah quanta cahaya yang diserap, yang berarti sebanding dengan intensitas cahaya.
 - satu quanta cahaya diserap oleh satu elektron, sebagian untuk memutus ikatan elektron pada logam dan selebihnya menjadi energi kinetik elektron, sehingga energi kinetik elektron bertambah secara linier dengan frekuensi cahaya:

$$E_k = h\nu - \phi, \quad (\phi = \text{energi ikat elektron pada logam (work function)}). \quad (9)$$

C. Efek Compton

Sifat utama partikel yang bergerak adalah memiliki atau membawa tidak hanya energi, tapi juga momentum. Proses fotolistrik berkaitan hanya dengan energi dan untuk menjelaskannya ide paket energi atau quanta cahaya mencukupi. Barulah beberapa tahun kemudian Einstein

berpikir bahwa mungkin quanta cahaya bukan sekedar paket energi, melainkan lebih dari itu quanta cahaya berperilaku sebagai partikel, yaitu membawa momentum dan energi. Bahwa ternyata benar quanta cahaya merupakan partikel, yaitu memiliki sifat membawa energi dan momentum, itu ditunjukkan oleh Arthur H. Compton dalam eksperimennya di 1923.

Pada eksperimen hamburan Compton sinar-X diarahkan ke lembar metal dan sinar-X yang dihamburkan pada sudut tertentu dideteksi. Menurut fisika klasik, peristiwa yang terjadi adalah sinar-X yang merupakan gelombang elektromagnetik membuat elektron bebas di metal (ingat, pada metal elektron relatif bebas bergerak di permukaan metal) berosilasi pada frekuensi yang sama dengan frekuensi sinar-X. Sesuai teori medan elektromagnetik, osilasi elektron menimbulkan gelombang elektromagnetik dengan frekuensi yang sama dengan frekuensi osilasi elektron, yang berarti juga sama dengan frekuensi sinar-X yang datang. Dengan demikian, akan teramati gelombang elektromagnetik terhambur dari metal dengan intensitas yang bergantung pada sudut / arah hambur dan dengan frekuensi yang sama dengan frekuensi sinar-X yang datang. Namun, yang didapatkan Compton adalah frekuensi sinar-X terhambur kurang dari frekuensi sinar-X yang datang (atau panjang gelombang sinar-X terhambur lebih dari panjang gelombang sinar-X yang datang). Pergeseran frekuensi (atau panjang gelombang) tersebut bergantung hanya pada sudut hambur sinar-X.

Compton dapat menjelaskan pergeseran frekuensi (atau panjang gelombang) tersebut dengan perhitungan tumbukan quanta cahaya dan elektron (karena melibatkan cahaya, tentu saja perhitungan menggunakan kinematika relativistik). Peristiwa tumbukan memenuhi bukan hanya konservasi energi, melainkan juga konservasi momentum. Dengan demikian, fenomena hamburan Compton menunjukkan bahwa quanta cahaya bersifat sebagai partikel, yaitu membawa energi dan momentum.

- Kecepatan quanta cahaya jauh lebih tinggi dari kecepatan elektron bebas di metal, sehingga dapat dianggap elektron mula-mula diam. Setelah tumbukan, elektron terpental (*recoil*), yang berarti memiliki energi kinetik. Energi kinetik tersebut diperoleh dari quanta cahaya yang menumbuk elektron. Akibatnya, energi quanta cahaya berkurang dan frekuensinya menurun (panjang gelombang cahaya bertambah).
- Pada peristiwa tumbukan, konservasi energi dan konservasi momentum kedua-duanya dipenuhi secara bersama. Dengan demikian, arah hambur quanta cahaya, arah pental elektron, energi kinetik elektron, pengurangan energi quanta cahaya semuanya itu saling terkait, tidak bebas. Akibatnya, pergeseran frekuensi (atau panjang gelombang) sinar-X bergantung pada sudut hamburnya.

D. Dualitas gelombang-partikel

Jauh sebelum teramatinya efek fotolistrik dan juga efek Compton, fenomena interferensi dan difraksi cahaya sudah dapat dijelaskan dengan baik dan itu menguatkan keyakinan bahwa cahaya merupakan gelombang, tepatnya gelombang elektromagnetik. Fenomena fotolistrik dan terlebih lagi hamburan Compton, sebaliknya, menunjukkan bahwa cahaya bukanlah gelombang, melainkan partikel. Dengan demikian, orang dapatkan bahwa cahaya dapat bersifat sebagai gelombang di suatu peristiwa dan sebagai partikel di peristiwa yang lain. Dua sifat tersebut, sifat gelombang dan sifat partikel, tidak muncul secara bersamaan di satu peristiwa.

Ada dualitas gelombang-partikel pada cahaya. Sebagai gelombang, cahaya memiliki panjang gelombang. Sebagai partikel, quanta cahaya memiliki momentum. Louis de Broglie di 1923 menunjukkan hubungan panjang gelombang λ cahaya dan (besar) momentum p quanta cahaya sebagai:

$$\lambda = \frac{h}{p}. \quad (10)$$

Kita dapat periksa relasi λ dan p di atas sebagai berikut:

$$\varepsilon = h\nu = h\frac{c}{\lambda}, \quad (\text{energi quanta cahaya}) \quad (11)$$

$$\varepsilon = \sqrt{m_0^2 c^4 + p^2 c^2} = pc, \quad (\text{energi quanta cahaya menurut teori relativitas, } m_0 = 0) \quad (12)$$

$$\rightarrow p = \frac{h}{\lambda} \quad \text{atau} \quad \lambda = \frac{h}{p}. \quad (13)$$

Selanjutnya, de Broglie mengusulkan dualitas gelombang-partikel (atau dapat disebut juga dualitas partikel-gelombang) tidak hanya ada pada cahaya, obyek yang sebelumnya orang yakini sebagai gelombang, melainkan juga ada pada obyek yang sejauh ini orang amati sebagai partikel. Dengan demikian, sebuah partikel yang bergerak dengan momentum p dapat memiliki sifat gelombang, dengan panjang gelombang seperti ditunjukkan pada persamaan (10). Ide de Broglie tersebut terbukti benar dan untuk pertama kali ditunjukkan dalam eksperimen difraksi elektron yang dilakukan oleh C. J. Davisson dan L. H. Germer di 1927, serta kemudian secara terpisah oleh G. P. Thomson. Difraksi elektron dapat terjadi, itu menunjukkan bahwa elektron, yang sebelumnya orang yakini sebagai partikel, dapat bersifat sebagai gelombang dan panjang gelombangnya sesuai dengan yang diusulkan de Broglie pada persamaan (10).

E. Model atom Bohr

Berdasarkan eksperimen hamburan yang dilakukannya, Ernest Rutherford di 1911 mengajukan model atom, yaitu bahwa atom terdiri dari inti di pusat dan elektron yang mengorbit inti, seperti halnya planet mengorbit matahari. Meskipun model atom seperti ini didukung data eksperimen Rutherford, namun masih tetap ada hal yang mengganjal:

- Elektron yang mengorbit inti tentu mengalami akselerasi. Menurut teori medan elektromagnetik, muatan yang mengalami akselerasi memancarkan radiasi elektromagnetik. Dengan demikian, energi elektron makin berkurang, sehingga elektron tidak dapat menjaga orbitnya dan pada akhirnya dalam waktu yang sangat singkat jatuh ke inti dan atom pun runtuh (*collapse*). Pada kenyataannya, benda-benda, yang tentunya tersusun dari atom-atom, tetap bertahan dalam waktu yang sangat lama, yang berarti atom-atomnya stabil, tidak runtuh.
- Menurut teori medan elektromagnetik, frekuensi radiasi elektromagnetik yang dipancarkan elektron sama dengan frekuensi osilasi elektron itu. Atom hidrogen hanya memiliki satu elektron, sehingga atom hidrogen sepatutnya memancarkan radiasi elektromagnetik hanya pada satu frekuensi. Namun, orang amati bahwa radiasi yang dipancarkan maupun diserap atom hidrogen memiliki frekuensi yang bermacam-macam, yang disebut spektrum atom hidrogen, yang dirangkum dalam satu rumus:

$$\frac{1}{\lambda} = R_y \left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right), \quad (14)$$

dengan n_1 dan n_2 bilangan bulat, R_y suatu konstanta (konstanta Rydberg).

Untuk menjelaskan permasalahan atom ini Bohr di 1913 menyatakan beberapa hal di luar pemahaman fisika klasik. Menurut gagasan Bohr:

- Atom berada pada suatu keadaan stasioner. Dengan demikian, atom stabil.
- Energi atom sesuai dengan keadaan stasioner yang ditematinya. Keadaan-keadaan stasioner yang mungkin ditempati atom tidak sembarang. Dengan demikian, energi atom tidak dapat sembarang. Jadi, keadaan dan energi atom bersifat diskrit.
- Atom dapat mengalami transisi keadaan, dari keadaan stasioner awal ke keadaan stasioner akhir, dengan menyerap atau memancarkan radiasi elektromagnetik. Radiasi yang diserap atau dipancarkan pada transisi atom antara dua keadaan yang berdekatan memiliki frekuensi sesuai dengan

$$\nu = \frac{1}{h} |E_{akhir} - E_{awal}|, \quad \begin{cases} E_{akhir} > E_{awal} & \text{(absorpsi)} \\ E_{akhir} < E_{awal} & \text{(emisi)} \end{cases}. \quad (15)$$

Spektrum atom hidrogen pada persamaan (14), dengan demikian, merepresentasikan transisi keadaan atom hidrogen.

- Memperhatikan model atom Rutherford, bahwa elektron mengorbit inti, tiap orbit merepresentasikan keadaan stasioner tertentu, berarti orbit-orbit yang mungkin ada di atom tidak sembarang (diskrit), karena keadaan atom diskrit. Apabila frekuensi dan kecepatan

orbit elektron berturut-turut adalah f dan v , energi kinetik elektron berhubungan dengan frekuensi f sebagai berikut:

$$\frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}nhf, \quad (m = \text{massa elektron}, n = 1, 2, 3, \dots). \quad (16)$$

Untuk orbit berupa lingkaran sempurna dengan radius r , $1/f = 2\pi r/v$, sehingga diperoleh:

$$mvr = n\frac{h}{2\pi} = n\hbar, \quad \left(\hbar = \frac{h}{2\pi}\right), \quad (17)$$

yang menunjukkan bahwa momentum angular mvr juga diskrit, tidak dapat bernilai sembarang.

Dengan menerapkan gagasan Bohr pada atom hidrogen orang dapatkan hasil-hasil yang sesuai dengan pengamatan, seperti contohnya, spektrum atom hidrogen.

F. Prinsip korespondensi

Fisika klasik berfungsi dengan baik untuk menggambarkan fenomena alam makro. Namun, telah dijumpai juga bahwa gagasan-gagasan baru, yang menjadi dasar-dasar mekanika kuantum, yang tidak sesuai dengan fisika klasik, diperlukan untuk menjelaskan fenomena alam mikro. Fisika klasik tidak berlaku untuk menjelaskan fenomena mikroskopik, sementara mekanika kuantum tidak diperlukan untuk menjelaskan fenomena makroskopik (Coba saja kita analisis gerakan sebuah kelereng bermassa beberapa gram sebagai suatu perambatan gelombang, kita akan segera dapatkan bahwa panjang gelombang de Broglie kelereng tersebut praktis sama dengan nol, yang berarti tidak perlu mekanika kuantum untuk menjelaskan gerakan kelereng tersebut.). Kedua-duanya, fisika klasik dan mekanika kuantum, berfungsi baik, hanya saja di daerah kerja masing-masing. Namun, alam makro dan alam mikro sesungguhnya berbagi alam yang sama. Alam makro tersusun dari alam mikro, seyogyanya ada hukum alam yang sama, yang tidak saling bertentangan.

Bohr menyatakan bahwa fisika klasik dan mekanika kuantum saling berhubungan. Pada suatu limit tertentu, mekanika kuantum bekerja atau menyuguhkan hasil seperti yang dikenal atau berlaku dalam fisika klasik. Ini dikenal dengan prinsip korespondensi. Dengan kata lain, fisika klasik merupakan mekanika kuantum pada limit tertentu. Seperti apa limit tersebut?

- Ambil saja sebagai contoh momentum angular di persamaan (17). Untuk nilai-nilai n kecil, nilai-nilai momentum angular yang berturutan terbedakan oleh suatu *gap* yang jelas. Tapi, untuk n sangat besar, beda antara nilai-nilai momentum yang berturutan sedemikian kecil, sehingga momentum angular tidak lagi terlihat bersifat diskrit, melainkan kontinyu. Jadi, untuk bilangan kuantum, dalam hal ini n , yang bernilai sangat besar, berlaku fisika klasik:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \text{mekanika kuantum} \rightarrow \text{fisika klasik}.$$

- Lihat kembali rumus de Broglie persamaan (10). Untuk benda makro, panjang gelombang de Broglie λ menjadi sangat kecil atau praktis nol. Dengan demikian:

$$\lim_{\lambda \rightarrow 0} \text{mekanika kuantum} \rightarrow \text{fisika klasik}.$$

- Kita juga telah kenal ketidakpastian Heisenberg dalam mekanika kuantum (kita akan membahas ini lebih jauh kemudian):

$$\Delta p \Delta x \geq \hbar, \tag{18}$$

yang bermakna bahwa pengukuran momentum dan posisi suatu benda mikro pada saat bersamaan tidak mungkin menghasilkan nilai yang untuk kedua-duanya momentum dan posisi sangat teliti. Hal ini tidak berlaku di fisika klasik, yang sistemnya merupakan benda makro. Di fisika klasik dapat diperoleh hasil pengukuran momentum dan posisi suatu benda pada saat yang sama, yang kedua-duanya sangat teliti, dengan kata lain, $\Delta p \rightarrow 0$ dan juga $\Delta x \rightarrow 0$, sehingga $\Delta p \Delta x \rightarrow 0$. Dengan demikian:

$$\lim_{\hbar \rightarrow 0} \text{mekanika kuantum} \rightarrow \text{fisika klasik}.$$