

Teori Kuantum dan Atomisme: Satu Tinjauan Ringkas

Iqbal

sangbeluncas@gmail.com

Teori kuantum sememangnya teori fizik yang paling membingungkan, bukan sahaja kepada para pelajar bahkan kepada para perintisnya. Neils Bohr, iaitu salah seorang pemenang Hadiah Nobel kerana sumbangannya dalam bidang fizik atom dan salah seorang ayah kepada teori kuantum, pernah mengungkapkan jika mekanik kuantum tidak membuatkan seseorang betul-betul terkejut-bingung, maknanya dia tidak faham mekanik kuantum. Namun di sisi lain, teori kuantum adalah teori yang menghasilkan hasil paling tepat dengan cerapan dan menjadi tunggak utama kemajuan teknologi abad ke-20. Mungkin kerana itulah buku-buku teks mutakhir teori kuantum, yang mana kebanyakannya ditulis untuk memenuhi silibus yang tunduk patuh kepada kehendak pasaran yang dipaksakan ke atas universiti, hanya menekankan aspek operasi dan meminimumkan penonjolan aspek dasar dan misterinya. Kebanyakannya hanya memaparkan hasil-hasil formula teori kuantum yang awal tanpa menunjukkan akar ideanya dan penerbitannya sedangkan formula-formula itulah yang menzahirkan anjakan paradigma dalam sains moden melalui teori kuantum. Proses mendapatkannya pula bukanlah semudah mengumpulkan semuanya ke dalam satu bab pengenalan yang pendek, tetapi melalui proses debat-debat ilmiah dan falsafah yang melibatkan minda-minda terhebat daripada kalangan ahli sains.

Atas renungan itu, makalah ini ditulis bertujuan menghubungkan jalin idea-idea dalam buku teks yang terpisah dan tiada hujung pangkal itu melalui sejarah teori kuantum; menayangkan hubungan erat falsafah dan sains; menampakkan proses debat dalam kemajuan sains; dan mencadangkan arah pengislaman dalam teori kuantum.

Perlu ditekankan di sini bahawa pertamanya, aspek yang dicakupi dalam makalah ini adalah teori kuantum pada peringkat awal iaitu sekitar tahun 1900 hingga 1920an – suatu tempoh yang disebut sebahagian sejarawan sains sebagai fizik semi-klasik. Kedua, atomisme pula hanya memfokuskan skop *atomos* (tak terbelah) dalam aspek tenaga, bukannya zarah atau atom yang biasa difahami sebagai sesuatu yang terbina daripada neutron, proton dan elektron. Pengertian ini lebih kaya dan mendekati konsep *jawhar* (juzuk tak terbahagi) dalam atomisme Islam, berbanding konsep *atomos* dalam falsafah Yunani yang didokong sebahagian para materialis dan hanya membincangkan ketakterbahagian jirim. Ketiga, sejarah yang dibentangkan di sini adalah sejarah fizik arus perdana dan belum mengambil kira pandangan-pandangan alternatif seperti pendapat Shahrir Mohd Zain.

Beberapa Perbezaan Mendasar

Sebagai permulaan, adalah baik jika kita tinjau semula perbezaan mendasar antara beberapa paradigma dalam ilmu fizik. Yang pertama adalah perbezaan termodinamik klasik dengan termodinamik statistik. Dalam termodinamik klasik, adalah menjadi kepercayaan ahli fizik bahawa tenaga mengalir secara selanjar. Sebagai contoh, haba dan arus elektrik dianalogikan sebagai cecair yang mengalir. Jirim dipercayai sebagai sesuatu yang selanjar dan sentiasa boleh dibelah dan dibahagi kepada bahagian-bahagian lebih kecil secara tak terhingga. Kehadiran termodinamik statistik yang dipelopori Ludwig Boltzmann menandakan permulaan semula anjakan paradigma kepada pandangan atomis iaitu tenaga dan jirim boleh dianggap, sekurang-kurangnya secara

matematik, sebagai mengandungi bahagian tak terbahagi. Kita akan lihat kemudian bahawa idea tenaga terdiri daripada sifat diskrit telah dibuktikan mempunyai makna fizikal (bukan hanya sebagai kaedah matematik) dalam teori kuantum.

Kedua adalah perbezaan mekanik klasik dengan mekanik kuantum. Mekanik klasik yang diformulasikan dengan jayanya oleh Isaac Newton pada abad ke-17 mempunyai sifat tentu (*deterministic*) dan melahirkan pandangan alam mekanistik (*mechanistic world view*) bukan hanya dalam ilmu fizik malah dalam bidang-bidang lain seperti psikologi (seperti behaviourisme) dan falsafah politik (seperti pandangan politik Thomas Hobbes). Sifat tentu dan mekanistik ini diungkapkan dengan dramatik oleh Simon Laplace melalui analogi syaitannya (rujuk: Laplace's demon). Secara ringkas, sifat tentu ini boleh diungkapkan sebagai kemampuan pencerap meramal masa depan satu sistem fizikal dengan pasti jika dia mengetahui dengan jitu beberapa perkara iaitu keadaan awal sistem tersebut (dalam konteks mekanik: kedudukan dan momentum awal), hukum fizik yang menjelaskan dinamika sistem tersebut dan faktor-faktor luaran yang mempengaruhi dinamika sistem tersebut. Walaupun perkembangan pada abad-abad berikutnya menunjukkan wujudnya kecelaruan (*chaos*) dan kerawakan (*randomness*) yang tidak memungkinkan ramalan tepat (contohnya dalam kasus cuaca) disebabkan ketidakmampuan mendapatkan keadaan awal dengan cukup jitu, namun secara prinsip ia masih bersifat tentu (*deterministic chaos*).

Sebaliknya menurut mekanik kuantum, alam bersifat tidak tentu (*indeterministic*). Ini adalah natijah daripada salah satu inpretasi prinsip ketakpastian Werner Hensenberg. Lebih spesifik lagi, alam bersifat barangkali (*probabilistic*), natijah daripada interpretasi fungsi gelombang Max Born. Bahkan kerawakan dan ketidaktentuan ini dikatakan intrinsik, iaitu bukan disebabkan oleh ketidakmampuan manusia melakukan cerapan jitu atau mendapatkan hukum alam yang tepat. Kononnya Tuhan juga tidak dapat tahu apa akan berlaku dengan tepat. Hal ini membuatkan Albert Einstein pernah membentak dengan ungkapan terkenal "dalam apa jua keadaan saya yakin Tuhan tidak bermain dadu dengan alam". Jika ini masih tidak kedengaran mengejutkan (seperti kata Neils Bohr), pertimbangkan kes ini: andaikan Lin Dan cuba menahan 'smash' Datuk Lee Chong Wei dalam dunia kuantum, ada beberapa keadaan dimana bulu tangkis itu dapat menembusi jaring raket Lin Dan tanpa merosakkannya, membuatkan Datuk Lee Chong Wei mendapat mata. Dalam istilah teori kuantum, fenomena ini dinamakan 'penerowongan'. Dalam interpretasi lebih canggih, wujud alam bersebelahan alam kita yang mana dalam alam itu Datuk Lee Chong Wei memenangi Sukan Olimpik 2012 dan mendapat hadiah RM3,000,000 daripada kerajaan Malaysia. Spekulasi ini dinamakan 'alam-alam berselari'. Namun sifat barangkali hanya satu daripada banyak misteri dalam mekanik kuantum. Sebagai contoh, 'smash' Datuk Lee Chong Wei membuatkan bulu tangkis itu berada pada banyak tempat pada masa yang sama membuatkan Lin Dan bingung. Lebih menambah teruk keadaan, semua keanehan itu wujud hanya jika Lin Dan melihat bulu tangkis itu (masalah pengukuran dan realisme) – untuk mengelakkannya, beliau perlu bermain sambil menutup mata dan telinga serta mengelak dari memukul bola tangkis.

Atomisme (I) : Kuantum Tenaga

Seperti yang telah disebutkan, perbezaan termodinamik klasik dengan termodinamik statistik adalah pada paradigma atomisme. Kita akan membincangkan dengan sedikit spesifik bagaimana paradigma ini membawa kepada kelahiran teori kuantum. Namun ruang yang terbatas tidak memungkinkan perbincangan terperinci tentang hal ini.

Termodinamik klasik telah dimajukan antara yang terutamanya oleh kajian 'kejuruteraan' dan teknologi seperti enjin wap yang dikatakan salah satu pencetus revolusi industri di Eropah. Pendekatan kajiannya adalah berdasarkan sistem dan pembolehubah makroskopik, contohnya tekanan udara. Melalui kajian-kajian ini, hukum-hukum termodinamik diungkapkan dan diinterpretasi secara makroskopik juga. Dengan latar belakang ini, kita memperkenalkan salah seorang pendokong utama mazhab klasik iaitu ahli fizik Jerman, Max Planck. Tesis kedoktoran Planck pada 1879 adalah berkenaan interpretasi hukum kedua termodinamik.

Termodinamik mazhab atomis pula menggunakan statistik sebagai alat mendapatkan semula pembolehubah makroskopik bermula dengan mempertimbangkan pembolehubah mikroskopik. Contohnya, mendapatkan nilai tekanan udara (makroskopik) daripada taburan halaju zarah-zarah (mikroskopik). Pada akhir kurun ke-19, kewujudan atom masih merupakan kontroversi menyebabkan kebanyakan ahli fizik Jerman belum dapat menerima kewujudan idea ketidakselajaran. Hal yang demikian merupakan cabaran terbesar kepada mazhab atomis dalam mengusulkan termodinamik statistik. Antara yang kuat mendapat tentangan adalah hasil kerja Ludwig Boltzmann yang menghubungkan entropi (objek hukum termodinamik kedua yang menjadi kajian kedoktoran Planck) dengan keteraturan. Keteraturan adalah konsep asing kepada kebanyakan ahli fizik Jerman era itu kerana ia mengandaikan kewujudan molekul dan permutasi molekul-molekul. Malah, statistik Boltzmann menurunkan sifat tentu fenomena makroskopik kepada kebarangkalian.

Planck menjadi salah seorang 'pendekar' utama dalam menentang mazhab atomis. Pembantu Planck, Ernst Zermelo pada 1895 menggunakan hujah entropi Planck berkenaan percampuran dua gas dengan suhu berlainan ke dalam satu bekas tertutup bagi menunjukkan kontradiksi hujah para atomis dalam masalah entropi dan ketakbolehunduran (*irreversibility*). Menurut pandangan klasik, apabila dua gas itu bercampur, yang terhasil menurut hukum termodinamik kedua adalah suhu kedua-duanya akan mencapai tahap keseimbangan dan entropi meningkat kepada nilai maksimum. Menurut para atomis, keseimbangan itu dicapai melalui interaksi mekanikal molekul-molekul kedua-dua gas dan hanya merupakan keadaan yang paling mungkin terjadi. Namun tiada apa yang menghalang kemungkinan proses mencapai keseimbangan itu berundur, iaitu interaksi molekul-molekul yang menyebabkan gas-gas yang bercampur tadi terasing semula. Pendapat para atomis, menurut mazhab klasik, adalah bercanggah dengan kenyataan kerana fenomena 'kebolehunduran' (*reversibility*) sebegitu tidak pernah dicerap.

Boltzmann membalas bahawa entropi tidak sentiasa meningkat. Keadaan berundur sebegitu dapat diperhatikan jika pencerap menunggu cukup lama – malah melalui pengiraan kebarangkalian, sangat lama melebihi umur alam semesta (seperti yang diketahui kini)! Jelaslah bahawa hujah Planck dan hujah balas Boltzmann itu tidak dapat dibuktikan secara saintifik. Seterusnya sebagai strategi mematahkan hujah Boltzmann, Planck memilih kajian radiasi kaviti (kes sinaran jasad hitam) yang menurutnya hanya berkaitan dengan sinaran elektromagnet dan termodinamik, serta tidak berkaitan dengan model statistik-mekanikal dalam mazhab atomis.

Jasad hitam adalah nama jolokan kepada jasad hipotetikal yang menyerap dan memancar semula semua sinaran elektromagnet (tanpa memilih julat frekuensi). Lama sebelum Planck memilih kajian bidang itu, pada 1860 Gustav Kirchhoff menunjukkan dalam kes sinaran jasad hitam, nisbah tenaga dipancarkan kepada tenaga diserap bergantung hanya pada frekuensi radiasi dan suhu kaviti dan

tidak bergantung pada keadaan sekeliling. Beliau meramalkan penemuan itu akan membawa kepada sesuatu yang sangat mendasar lalu mencabar komuniti fizik mencarinya. Wilhelm Wien pada 1896 menemui hubungan matematik frekuensi dan suhu (dipanggil hukum Wien) dan Planck menemui cara menerbitkannya. Namun eksperimen menunjukkan hukum Wien gagal pada julat frekuensi rendah dan suhu tinggi. Pada tahun 1900 Planck mengubahsuai formula Wien melalui persamaan entropi beliau yang didapatkan lewat intuisi. Bermula dengan persamaan yang didapati secara empiris dan disusuli dengan pelbagai manipulasi matematik, beliau dapat menemui hukum sinaran jasad hitam yang didapati menepati data-data eksperimen. Cabaran seterusnya adalah beliau perlu mencari asas teoretik bagi menjelaskan hukum tersebut.

Secara teknikal, dalam mengubahsuai formula Wien, Planck mengandaikan satu kaviti terdiri daripada sekumpulan pengayun resonans (*resonators*) bagi memastikan penyerapan dan pemancaran tenaga pada semua frekuensi radiasi mencapai keseimbangan secara selanjar. Peliknya, bertitik tolak daripada andaian yang merupakan prosedur biasa itu, Planck gagal menerbitkan formula tersebut melalui kaedah termodinamik. Beliau mencuba kaedah lain dan akhirnya dalam keadaan agak hilang arah, beliau mencuba-cuba kaedah entropi Boltzmann (dan permutasi yang mengandaikan kewujudan molekul dan keadaan-keadaan mikro itu) lalu berjaya mendapatkan semula bentuk persamaan beliau. Beliau menyifatkan minggu-minggu pencarian persamaan itu sebagai "the most strenuous work of my life". Manakan tidak, minggu-minggu itu terkandung detik-detik beliau mengubah kepercayaan yang bertahun-tahun dianuti.

Namun beliau tidak sepenuhnya mengikut cara Boltzmann. Dalam menentukan entropi suatu gas, Boltzmann mengandaikan jumlah tenaga gas tersebut boleh dibahagikan kepada unit-unit tenaga E , dimana molekul-molekul gas 'menempati' aras-aras tenaga bermula E , $2E$, $3E$ dan seterusnya. Prosedur terakhir ialah melakukan penghampiran $E \rightarrow 0$ pada akhir pengiraan. Planck membuat andaian yang sama bagi resonator kavitinya namun mendapati formula beliau tidak dapat ditemukan semula dengan prosedur akhir itu. Anehnya, formula itu hanya terjelma semula melalui andaian (yang beliau ungkapkan sebagai "*an act of desperation*") unit tenaga diskrit, $E = hf$. (h adalah pemalar dan f frekuensi radiasi). Tenaga pengayun Planck adalah tidak selanjar tetapi diskrit, iaitu dalam bentuk paket yang dipanggil kuantum. Merenung perbezaan ini, penulis meneka bahawa atomisme Boltzmann masih pada peringkat jirim dan inilah titik akhir atomisme Barat yang diwarisi daripada atomisme Yunani yang juga merupakan titik mula yang membawanya kepada kesimpulan yang serupa (walaupun tak semestinya sama) dengan atomisme Islam.

Seperkara menarik yang berbaloi disebut adalah Planck mendapatkan persamaannya dengan kerja terbalik iaitu meneka bentuk persamaan untuk mengakomodasi cerapan empirik lalu akhirnya mendapat formulasi teoretik yang betul sambil menemukan kesimpulan atomis. Lain halnya dengan persamaan Rayleigh-Jeans yang bermula dengan idea atomis iaitu teorem tenaga terbahagi sama rata (*equipartition of energy*). Ia diterbitkan hanya beberapa bulan sebelum Planck menemui cara penerbitan persamaan beliau. Walaupun ia berjaya menerangkan sinaran jasad hitam pada julat frekuensi rendah yang gagal dijelaskan oleh Wien, ia gagal menepati data empirik pada skala frekuensi tinggi iaitu pada julat yang berjaya diterangkan oleh hukum Wien (justeru menerima nama jolokan 'malapetaka ultralembayung' oleh Paul Ehrenfest, anak murid Boltzmann).

Hasil kerja Planck dibentangkan pada 14 Disember 1900 yang merupakan tarikh lahir teori kuantum menurut pendapat Max von Laue dan jumah ahli-ahli fizik. Walaubagaimanapun, hampir semua ahli

fizik yang menerima hipotesis itu percaya yang idea tenaga diskrit kaedah matematik semata-mata dan tiada makna fizikal. Penerbitan formula Planck berdasarkan idea tenaga diskrit tidak dianggap bukti kemenangan mazhab atomis. Bahkan perdebatan (dan penindasan) antara dua golongan ini berlanjutan sehingga Boltzmann menggantung diri pada 1906 akibat tekanan emosi. Planck memeluk mazhab atomis hanya pada tahun 1909. Bahkan kebanyakan ahli fizik tidak pun menerima hipotesis kuantum tenaga hingga Konferensi Solvay yang pertama pada tahun 1911. Dalam tempoh tahun-tahun itu, hanya ada beberapa orang yang mempercayai idea kuantum tenaga lebih dari sekadar kaedah matematik, termasuklah seorang kerani muda kelas ketiga yang tak dikenali, Albert Einstein.

Atomisme (II) : Kuantum Cahaya

Dalam kajian mekanik statistik beliau, Einstein mengesan dua kesamaan bentuk persamaan matematik yang akhirnya menjadi sumber ilhamnya. Pertama, kesamaan bentuk persamaan entropi pancaran jasad hitam dalam domain hukum Wein dengan persamaan entropi gas ideal. Kedua, kesamaan bentuk persamaan kebarangkalian semua zarah gas ideal menempati satu sub-isipadu dengan bentuk persamaan kebarangkalian semua kuantum tenaga menempati satu sub-isipadu. Beliau percaya kesamaan-kesamaan itu bukan sekadar formal, tetapi kesamaan perilaku (qiyasi?) yang bersifat fizikal. Fizik yang terhasil daripada ilham ini beliau ungkapkan sebagai “*a heuristic point of view*”. Rentetan daripada itu, dalam keadaan tanpa reputasi (kecuali sebagai kerani kelas ketiga berbangsa Yahudi), pada tahun 1905 beliau telah dengan berani mengusul hipotesis kuantum cahaya kepada komuniti fizik yang sedia bingung dengan penemuan Planck – hipotesis yang mengatakan sinaran elektromagnet dipancarkan bukan dalam bentuk gelombang yang mencapah ke semua arah, tetapi dalam bentuk ‘paket-paket’ tenaga (kuanta), tiap satunya bermagnitud hf . Paket cahaya ini dinamakan foton. Pada waktu itu, hipotesis ini dianggap terlalu radikal. Einstein pergi lebih jauh daripada Planck – terlalu jauh hinggakan Planck sendiri menentanginya.

Hipotesis itu walaupun bukan baru, namun terlalu sukar diterima. Ia bukan baru kerana pada abad ke-17 lagi teori cahaya dalam bentuk zarah (*corpuscular theory of light*) yang dibangunkan oleh Newton (bahkan boleh ditelusuri hingga kepada ibn al-Haytham) telah bersaing dengan teori gelombang cahaya yang disokong oleh Robert Hooke, Christian Huygens dan Leonhard Euler. Tetapi ia sukar diterima pada masa Einstein kerana kemenangan teori gelombang cahaya melalui eksperimen interferens Thomas Young lebih kurang seratus tahun sebelumnya dan dibangunkan lagi oleh teori elektromagnet James Clark Maxwell. Kejayaan besar itu membuatkan suara pendukung teori zarah cahaya tenggelam sekalipun dari kalangan mereka ada nama-nama besar seperti Simon Pierre de Laplace dan Jean Baptiste Biot. Pengusulan idea Einstein menambah kekusutan dalam komuniti fizik (yang kebanyakannya bermazhab klasik) dengan memarakkan semula debat lama.

Lebih menambah kekusutan, menerima hipotesis kuantum cahaya Einstein bermaksud membelakangi teori elektromagnet Maxwell yang telah menyatukan dua daripada tiga medan daya yang diketahui pada waktu itu, iaitu daya elektrik dan daya magnet. Bahkan teori elektromagnet Maxwell berjaya menentukan laju cahaya dengan tepat. Ia dianggap kejayaan hebat, walaupun baru-baru itu hipotesis eter dalam teori tersebut telah dicabar oleh eksperimen Michelson-Morley. Einstein menghantar lima makalah pada 1905 – *annus mirabilis* beliau. Dua daripadanya menyangkal teori Maxwell secara ‘head on’.

Einstein mengkritik teori elektromagnet klasik dengan menunjukkan ia hanya terpakai untuk fenomena optik 'masa purata' (*time-averages*) seperti dalam kes pembelauan dan pantulan. Ia tidak terpakai untuk interaksi 'detik tertentu' (*instantaneous time*) seperti kes pancaran dan penyerapan sinar. Tambahan pula, wujud asimetri antara proses pemancaran dengan penyerapan – sinaran elektromagnet yang dipancarkan satu jasad bercas boleh dianggap sebagai penghasilan gelombang yang merambat ke semua arah dalam bentuk sfera, sedangkan proses penyerapan tidak boleh dianggap sebagai keterbalikan daripada perambatan gelombang sfera kepada jasad yang menyerap.

Seterusnya, beliau mengambil contoh kesan fotoelektrik untuk menunjukkan kegagalan teori elektromagnet klasik dan menjelaskan kesan fotoelektrik dengan hipotesis kuantum cahaya dan meramalkan hubungan linear antara tenaga kinetik maksimum fotoelektron dengan frekuensi cahaya yang dipancarkan. Namun penjelasan kesan fotoelektrik melalui hipotesis kuantum cahaya mendapat tentangan hebat daripada para ahli fizik yang rata-rata menerima penjelasan Phillip Lenard (dengan model teori gelombang cahaya) bahawa kesan fotoelektrik adalah kesan resonans.

Sebagai menambah lagi kekuatan hujah menyokong hipotesis kuantum cahaya, pada tahun 1906 Einstein menunjukkan idea-idea tidak konsisten dalam cara Planck menerbitkan formula beliau. Planck telah menggabungkan dua persamaan yang saling bertentangan secara dasarnya. Persamaan pertama diterbitkan daripada elektrodinamik klasik (kembangan daripada teori elektromagnet klasik) dengan pra-andaian tenaga pengayun resonans yang selanjar. Manakala persamaan kedua pula diterbitkan daripada mekanik statistik dengan andaian tenaga diskrit dengan magnitud hf . Walaupun begitu, Einstein tidak menganggap formula Planck mesti ditolak, tetapi asas teori elektromagnet klasiklah yang perlu disemak semula. Berkemungkinan pandangan beliau ini didorong oleh idea kerelatifan khas beliau yang juga tidak selari dengan teori elektromagnet.

Yang menariknya, sikap Einstein tersebut berkhilaf dengan cara Peter Debye menghadapi masalah yang sama. Bagi Debye, konsep resonator dalam penerbitan Planck boleh dihapuskan dan persamaan Planck masih boleh diterbitkan dengan andaian tenaga kuantum sambil menggunakan beberapa pengiraan yang terilham daripada cara penerbitan persamaan Rayleigh-Jeans.

Walaupun bagaimanapun, masalah terbesar hipotesis kuantum cahaya bukanlah kedegilan para ahli fizik dalam berpegang pada teori Maxwell – mereka tidaklah terlalu dogmatik. Cabaran utama hipotesis kuantum cahaya datang dari sebab-sebab empirik, bukan dogmatik, iaitu kegagalannya menjelaskan fenomena interferens – fenomena yang menyebabkan teori zarah cahaya kalah kepada teori gelombang cahaya seratus tahun sebelumnya. Kegagalan ini diakui oleh Einstein bahawa sebarang usahanya menerangkan fenomena interferens dengan model zarah menemui jalan buntu.

Namun tentangan terhadap kegagalan itu akhirnya reda sedikit dengan bukti sokongan yang hadir dalam bentuk eksperimen kesan fotoelektrik pada 1912 dan yang lebih kuat oleh Robert Millikan pada 1915. Semua ramalan Einstein tentang hubungan linear tenaga kinetik elektron dengan frekuensi pancaran dan kewujudan fungsi kerja telah terbukti. Ironinya, Millikan tidak percaya pun pada hipotesis kuantum cahaya. Beliau malah menjelaskan kesan fotoelektrik dengan penjelasan lain. Perjuangan meyakinkan komuniti fizik tentang kuantum cahaya belum selesai hinggalah akhirnya pada 1922, kesan Compton dicerap dalam eksperimen dan didapati menepati hipotesis kuantum cahaya. Akhirnya, Einstein dianugerahi Hadiah Nobel pada tahun yang sama atas jasa beliau dalam menjelaskan kesa fotoelektrik.

Namun masih ada yang menentang kerana walaupun sudah terbukti, hipotesis kuantum cahaya tetap gagal menjelaskan fenomena interferens. Malah kegagalan ini kekal berlarutan hingga kini dalam bentuk kedualan zarah-gelombang, iaitu salah satu misteri terbesar teori kuantum. Daripada misteri kedualan ini, lahirlah misteri-misteri lain seperti masalah pengukuran dan realisme yang telah dicontohkan di atas.

Atomisme (III) : Pengkuantuman

Antara yang paling tidak dapat menerima hipotesis kuantum cahaya Einstein adalah Neils Bohr. Dapat dijangka, fenomena interferens menjadi sebab penolakan beliau. Kerana itu, dalam kajiannya tentang struktur atom, beliau tidak mengambil sedikitpun idea kuantum cahaya.

Berkenaan kajian beliau tentang atom, beberapa tahun sebelum itu, guru beliau Ernest Rutherford mengambil semula model atom Hantaro Nagaoka yang membayangkan atom terdiri daripada nukleus yang diorbit oleh elektron-elektron dalam orbit seperti cincin planet Zuhal. Bezanya, Rutherford tidak menghadkan orbit-orbit elektron itu kepada satu satah sahaja. Ia lebih mendekati model sistem suria. Namun seperti model Nagaoka, model Rutherford mengalami masalah menjelaskan bagaimana elektron yang mengorbit tidak akan ditarik ke nukleus dan kehilangan tenaga dengan memancarkan gelombang elektromagnet secara selanjar.

Dalam menyelesaikan masalah ini, Bohr memperkenalkan idea pengkuantuman ke dalam teori atom bermodelkan sistem planet Rutherford. Beliau berhipotesis bahawa elektron hanya boleh mengorbit dalam orbit-orbit tertentu sahaja – bukan orbit yang sebarang jarak daripada nukleus. Sebarang perpindahan daripada satu orbit ke orbit yang lain adalah melalui ‘lompatan kuantum’ – satu pergerakan diskrit yang tiada analogi dalam mekanik klasik (hal ini akan dibincangkan kemudian dalam makalah ini). Hipotesis ini sekalipun pelik, dengan cepat diterima oleh komuniti fizik kerana kemampuannya menjelaskan spektroskopi atom Hidrogen (siri-siri Lyman, Balmer dll) dengan cantik, dan menerbitkan semula formula Rydberg yang telah sedia terbukti secara empirik. Model ini walaubagaimanapun pernah diubahsuai dengan syarat pengkuantuman Sommerfeld-Wilson untuk mendapatkan orbit elips bagi meningkatkan darjah kebebasannya.

Namun tidak semua bersetuju. Idea lompatan kuantum menjadi topik perdebatan beliau bersama Werner Heisenberg dengan seorang lagi tokoh besar teori kuantum, iaitu Erwin Schrodinger (hal ini akan dibincangkan dalam bahagian berikutnya).

Idea pengkuantuman seterusnya mekar dan dikembangkan sebagai satu tatacara kaedah dalam disiplin mekanik kuantum. Pelbagai idea pengkuantuman dikemukakan. Antara yang terkenal adalah idea pengkuantuman kedua atau pengkuantuman medan yang melahirkan teori medan kuantum. Pelabelan zarah-zarah digantikan dengan pelabelan hal keadaan suatu sistem banyak zarah. Contohnya untuk kes tiga keadaan X, Y dan Z, satu vektor keadaan $|x,y,z\rangle$ boleh ditulis dimana x adalah bilangan zarah dalam keadaan X dan seterusnya. Kelebihan pelabelan ini antaranya bagi memudahkan pemerihalhan penciptaan dan pemusnahan zarah dalam satu sistem zarah. Misalnya penciptaan satu zarah dalam keadaan Z yang asalnya tiada zarah boleh ditulis sebagai $|1,2,0\rangle \rightarrow |1,2,1\rangle$. Namun pengkuantuman ini, setahu penulis hanyalah sebagai kaedah matematik dalam memudahkan penulisan, tidak seperti pengkuantuman tenaga yang membawa natijah kewujudan kuantum cahaya sebagai entiti fizikal.

Berbalik kepada Planck. Penemuan lain beliau termasuklah hubungan antara pemalar-pemalar fundamental seperti laju cahaya c , pemalar graviti G dan pemalar Planck h , pemalar Coulomb k_e dan pemalar Boltzmann k_B . Menggunakan analisis dimensi terhadap pemalar-pemalar itu, beliau mendapatkan nilai-nilai dengan dimensi ruang, masa, suhu, cas, jisim dan sebagainya yang kini dipanggil unit-unit Planck. Tidak seperti unit SI yang diterima atas sebab sejarah, unit-unit ini dianggap sebagai unit-unit istimewa yang nilai-nilainya tetap di seluruh alam, tak kira tamadun apa di planet dan galaksi mana pun yang menghitungnya atau mencerapnya (jika mereka mampu mencerapnya). Nilai-nilai yang menjadi perhatian khusus adalah jarak Planck dan masa Planck yang banyak digunakan dalam teori-teori baru seperti teori tali (*string theory*), graviti kuantum relung (*loop quantum gravity*), set-set kebersebaban (*causal sets*) dan lain-lain. Sebagai contoh, dalam teori tali jarak Planck dianggap sebagai jarak terkecil yang menjadi binaan fabrik ruang-masa itu sendiri dan sebarang jarak yang lebih kecil daripadanya tidak mempunyai apa-apa makna fizikal. Namun harus diingat bahawa jarak dan masa Planck adalah terlalu kecil hingga tidak mampu dicerap secara fizikal. Kebanyakan kajian berkenaan kedua-duanya adalah bersifat teori dan menurut pandangan penulis, terbuka kepada penghujahan falsafah.

Kebolehgambaran: Antara Niskala dan Kenyataan

Spektrum atom hidrogen dapat dihitung menggunakan persamaan Hamilton-Jacobi. Menurut sejarah persamaan itu asalnya diformulasi untuk pengiraan tempoh orbit planet. Ini telah dianggap petunjuk benarnya struktur atom bermodelkan planet seperti model Rutherford-Bohr yang telah dibincangkan. Namun idea lompatan kuantum Bohr mengadun konsep fizik klasik seperti orbit dengan konsep “moden” seperti kuantum tenaga. Ini menunjukkan sekalipun menggunakan model yang boleh digambarkan seperti model planet, terdapat perkara yang mungkin tidak dapat digambarkan dalam struktur atom. Malah, apabila idea kedualan zarah-gelombang diterapkan ke dalam model atom Bohr, ia menjadikan struktur atom lebih sukar digambarkan.

Akhirnya setelah banyak perkara yang lebih membingungkan ditemui (seperti kesan Zeeman dan eksperimen Stern-Gerlach) gambaran atom bersumberkan itu alam makroskopik yang didominasi hukum-hukum fizik klasik itu dikritik hebat, antaranya oleh Wolfgang Pauli dan Werner Heisenberg yang banyak dipengaruhi pemikiran Bohr. Mereka berhujah bahawa “prejudis” yang didasari konsep fizik klasik tidak sepatutnya dipaksakan kepada fenomena atom. Sikap yang betul menurut mereka adalah memfokuskan kepada pembinaan model matematik berdasarkan apa yang dapat dicerap, bukan berdasarkan tekaan apa yang ada di dalam atom.

Pandangan baru mendorong Heisenberg menganalisis garis-garis spectrum yang terhasil daripada pemindahan elektron-elektron ke ‘orbit-orbit’ berbeza lalu menghasilkan model abstrak dalam bentuk siri Fourier yang mana kemudiannya dapat disusun ke dalam satu jadual (baris dan lajur). Dalam mengira nilai-nilai lompatan kuantum itu, beliau perlu mendarab nombor-nombor dalam baris dan lajur berkenaan. Apa yang beliau dapati ialah jadual itu memberikan hukum pendaraban yang tidak difahaminya: xy tidak sama dengan yx . Apabila hasil ini ditunjukkan kepada Max Born, beliau akhirnya dapat mengingat semula bahawa hukum pendaraban tersebut adalah sama dengan hukum pendaraban matriks (waktu beliau belajar, beliau pernah secara kebetulan menghadiri kuliah matriks). Maka dengan kajian lanjutan oleh Born dan pembantunya Pascual Jordan serta Paul Dirac (secara berasingan), mekanik matriks dilahirkan. Formulasi baru ini bukan hanya sepenuhnya

abstrak, bahkan tidak difahami majoriti besar ahli fizik yang pada waktu itu. Salah seorangnya adalah Erwin Schrodinger.

Schrodinger mewakili 'kaum tua' dalam komuniti fizik yang rata-rata tidak tahu menahu tentang matriks. Untungnya, sebelum itu Louis de Broglie berjaya menemui persamaan yang mengabadikan kedualan zarah-gelombang ke dalam formula matematik. Ideanya, setiap zarah mempunyai sifat gelombang dan sebaliknya. Jika ada gelombang, mesti ada persamaan gelombangnya. Sebagai usaha mengembalikan kebolehgambaran beranalogikan mekanik klasik, Erwin Schrodinger cuba mencari persamaan gelombang tersebut dan akhirnya mekanik gelombang yang lebih mudah digambarkan telah diformulasikan.

Namun tak semudah yang disangka, fungsi gelombang yang didapatkan melalui persamaan Schrodinger itu lebih misteri. Persoalan interpretasi timbul: apakah entiti fizikal yang diwakili oleh gelombang itu? Menambah lagi kekusutan, Born (yang menurut beliau terilham daripada Einstein) menginterpretasi fungsi gelombang itu sebagai gelombang kebarangkalian. Ramai, termasuk Schrodinger, dan terutamanya Einstein membantah keras. Ada yang menyokong seperti Bohr dan Heisenberg. Akibatnya, debat hangat tentang sifat alam – adakah tentu atau barangkali – tercetus.

Walaupun mengalami masalah interpretasi, rata-rata ahli fizik (termasuk Born pada satu tahap) kembali kepada kaedah gelombang Schrodinger. Lantaran itu mekanik matriks semakin kehilangan populariti. Sebagai tindak balas, 'kaum muda' (terutamanya dua serangkai Bohr dan Heisenberg) mengkritik hebat mekanik gelombang. Bahkan diceritakan bahawa Bohr menjemput Schrodinger ke rumah beliau untuk berbincang. Sebaik sahaja Schrodinger turun daripada keretapi, Bohr dan Heisenberg terus memulakan "perbincangan" itu. Hinggakan apabila Schrodinger terlantar sakit di rumah Bohr pun (kerana tidak biasa dengan cuaca Copenhagen), sambil Schrodinger dirawat oleh isteri Bohr, mereka masih berdebat atas desakan Bohr.

Selepas perbincangan yang meninggalkan kesan ilmiah yang mendalam kepada kedua-dua belah pihak itu, Schrodinger akhirnya menemukan kesetaraan matematik antara kaedah Heisenberg dan kaedah beliau sendiri, mungkin sebagai jalan perdamaian. Namun itu tidak bermakna debat tentang kebolehgambaran telah selesai. Tahun berikutnya menyaksikan Heisenberg pula yang menggunakan kebolehgambaran bagi memformulasikan prinsip ketakpastian beliau – namun bukan untuk menyerah kalah, malah dengan tujuan mengkritik lagi kebolehgambaran.

Babak-babak perdebatan seterusnya membuahkan sintesis kaedah matriks dan gelombang dalam bentuk penulisan Dirac yang mendapat sentuhan matematikawan seperti David Hilbert, Hermann Weyl dan John von Neumann. Hilbert, matematikawan sekolah pemikiran Gottingen, dan yang lebih penting pelopor falsafah formalis, bertanggungjawab membawa masuk projek matematik formalisnya ke dalam fizik melalui pengaksioman fizik. Melalui kerja-kerja beliau yang niskala, Weyl membawa masuk teori kumpulan ke dalam fizik kuantum bagi mengkaji aspek simetri dan von Neumann meneruskan pengaksioman teori kuantum hingga ke peringkat logik, yang menghasilkan cabang baru fizik matematik iaitu logik kuantum.

Maka kaedah pembeza yang digunakan dalam mekanik gelombang Schrodinger digantikan dengan vektor-vektor abstrak dalam ruang Hilbert bagi memerihalkan sistem yang lebih kompleks. Seterusnya matematik niskala itu (yang pernah menjadi peramal kewujudan antizarah di tangan Dirac) digunakan untuk meramal perkara-perkara baru seperti kewujudan quark, zarah Higgs dan

tali. Keterpisahan antara keniskalaan dan kebolehgambaran mewujudkan hubungan misteri matematik-realiti hingga akhirnya diungkapkan oleh Eugene Wigner dalam makalah beliau yang masyhur, *The unreasonable effectiveness of mathematics in the natural sciences*.

Sehingga kini, keniskalaan ini seolah-olah memungkinkan seorang ahli fizik 'mencipta apa sahaja'. Contohnya dalam teori aditali, 10 dimensi (asalnya 26!) diperlukan untuk ia berfungsi (seperti mendapatkan semula hasil-hasil teori kuantum dan kerelatifan terdahulu). Satu daripadanya adalah dimensi masa, selebihnya dimensi ruang. Oleh kerana pada kita hanya dapat mencerap tiga dimensi ruang, maka menurut pendukung teori ini kewujudan enam dimensi ruang lagi tergumpal-ranap dalam skala yang terlalu kecil hinggakan kita perlu menunggu mungkin beribu-ribu tahun lagi sebelum dapat mencipta teknologi yang mampu mencapai tenaga teramat tinggi yang dapat digunakan untuk mencerap ruang-ruang tergumpal-ranap itu. Contoh yang lebih canggih lagi, dalam kosmologi bran (*brane cosmology*), dua bran yang berlanggar menghasilkan deguman-deguman besar (*big bangs*) yang menghasilkan alam-alam baru. Entah bagaimanalah ia dapat dibuktikan. Namun ramai yang nampaknya benar-benar percaya, mungkin bersandarkan *keimanan* terhadap kecantikan matematik abstraknya...

Renungan

Kita dapat lihat bahawa kemajuan-kemajuan kajian saintifik yang telah dibincangkan didasari dan didahului falsafah serta melalui proses debat ilmiah yang panjang. Bahkan, satu teori baru, terutamanya yang radikal, mengambil masa yang lama untuk menggantikan teori lama yang telah sebatu menjadi pandangan alam komuniti saintis. Sains adalah kegiatan manusia, dan factor kemanusiaan tidak dapat dipisahkan daripadanya. Selain itu, jarak dan masa Planck (dan idea ruang masa terkuantum) mengingatkan kita tentang konsep jawhar dalam atomisme Islam. Lama dahulu, Imam Fakhrudin al-Razi telah membincangkan tentang jawhar ruang dan masa.

Cadangan

Penulis mencadangkan penekanan semula terhadap sejarah idea-idea awal dan penerbitan persamaan-persamaan asas teori kuantum yang telah dilupakan dalam buku-buku teks mekanik kuantum. Jika ini sukar dilakukan dalam kuliah-kuliah universiti, ia mungkin boleh diusahakan di luar kampus oleh individu atau kumpulan ilmiah setempat melalui jalan wacana, seminar, syarahan berkala atau menggunakan media-media baru seperti Youtube. Tidak dilupakan, kajian pengkuantuman dan kosmologi kuantum yang bertunjangkan kalam dan falsafah Islam perlu dimulakan. Pengislaman ilmu semasa perlu melangkah ke tahap seterusnya dan para ilmuwan harus keluar dari polemik panjang yang entah bagaimana nampaknya semakin menjadi zon selesa. Hubungan kesempenaan yang dirumus oleh Imam Abu Hamid al-Ghazali dan atomisme seperti yang telah dirumuskan oleh Imam Fakhrudin ar-Razi adalah lapangan-lapangan yang telah dikenal pasti mempunyai potensi besar untuk diperkembangkan ke dalam ilmu fizik teori.

Rujukan

1. A Sarlemijn dan M J Sparnaay, *Physics in the Making: Essays on the Development in 20th Century Physics*, 1989, Elsevier
2. David Bohm, *Quantum Theory*, 1989, Dover Publication
3. Dugald Murdoch, *Neils Bohr's Philosophy of Physics*, 1987, Cambridge University Press
4. Jim Baggott, *The Quantum Story*, 2011, Oxford University Press
5. Max Jammer, *The Conceptual Development of Quantum Mechanics*, 1966, McGraw-Hill Inc

6. Micheal Dickson, Non-relativistic Quantum Mechanics dan N P Landsman, Between Classical and Quantum dalam Jeremy Butterfield (pengedit), Handbook of the Philosophy of Science: Philosophy of Physics part A, 2007, Elsevier

Nota: Penulis dapat dihubungi melalui alamat emel sangbeluncas@gmail.com