

Dampak Perkembangan Komputer pada Perluasan Arena Garapan Ilmu Fisika

B. Suprpto Brotosiswojo
Departemen Fisika, ITB
Jl. Ganesa 10 Bandung 40132 Indonesia
E-mail : bensupra@fi.itb.ac.id

Abstract

The dramatic progress in computer technology has inspired physicists to broaden their field of research into several areas. Computing is no longer considered as just a fast, accurate and efficient calculating machine, but also as a thinking tool in their effort to describe and understand the way nature behaves. With its fast logical-inference processing, and its capability to accommodate very large amount of data and memories, physicists are no longer afraid of dealing with complex systems and phenomena, which were usually avoided in the past. On computing itself another concern has surfaced, i.e. an anticipation that the basic elemental processing will have to be carried out on an atomic or subatomic scale. To give an illustration, this article exposes just two examples of progress, namely "Quantum Dot Cellular Automata" and "Quantum Teleportation". The first example indicates an alternative way of classical computing using quantum dots with a size in the order of hundreds of atomic scale. The second example goes deeply into a real quantum computing, where strange behavior which looks 'counter intuitive' actually takes place in nature.

Keywords : quantum dot CA, quantum teleportation

Abstrak

Perkembangan teknologi komputer yang sangat cepat telah menggugah para fisikawan untuk memperluas arena garapannya. Komputasi tidak lagi dipandang sekedar sebagai mesin hitung yang cepat serta akurat, tetapi juga sebagai alat bantu berpikir dalam upaya memahami serta melukiskan perangai alam ini. Kemampuan untuk melakukan inferensi logika dengan kecepatan sangat tinggi, serta kemampuan untuk menampung catatan data dalam jumlah yang sangat besar, membuat fisikawan tidak lagi takut menggarap system yang sifatnya kompleks, yang di masa lalu sejauh mungkin dihindarkan. Di bidang komputasi sendiri, sudah diantisipasi seandainya nanti ukuran prosesor maupun satuan penampung data harus diwujudkan dalam obyek skala ukuran atom atau yang lebih kecil lagi, ketika aturan-aturan klasik sudah tidak berlaku. Untuk memberi sedikit gambaran, makalah ini menyajikan dua contoh. Yang pertama adalah Cellular Automata dengan elemen Quantum Dot, sebuah alternatif bagi cara komputasi klasik dengan mengandalkan kehadiran Quantum Dot. Contoh yang kedua adalah Teleportasi Kuantum, sebuah cara memindahkan informasi kuantum jarak jauh yang tidak ada padanannya secara klasik, suatu hal yang terasa tak masuk akal tetapi yang ternyata benar-benar terjadi di alam ini.

Kata kunci : selular automata, kuantum dot, teleportasi quantum

1. Pendahuluan

Pada awalnya kehadiran mesin komputer oleh para fisikawan lebih dilihat sebagai alat bantu melakukan perhitungan yang rumit dan panjang dengan cara yang cepat dan akurat. Ilmu Fisika memang memerlukan alat bantu 'berhitung' semacam itu, karena sifat ungunya yang bukan hanya kualitatif, melainkan juga kuantitatif. Tetapi kemudian disadari bahwa bahwa komputasi sebenarnya berisi olah-inferensi-logika. Maka maraklah upaya melihat mesin komputer sebagai alat bantu berpikir, termasuk dalam menyimpulkan apa yang ingin diungkapkan sebagai 'hukum-dasar' dalam ilmu fisika.

Otak manusia yang selama ini diandalkan sebagai alat pengolah logika tidak mampu untuk mencerna perangai dan perilaku alam yang kompleks sifatnya, dan akan sangat terbantu dengan kehadiran mesin komputer. Gejala seperti CHAOS tidak akan dapat dipahami tanpa bantuan mesin olah-logika yang cepat dan berkapasitas memori yang sangat besar itu.

Dalam menggarap agregat obyek fisika yang banyak, seperti kumpulan atom atau molekul dalam bahan

padat atau cair, interaksi antar atom atau molekul itu sifatnya interaksi jarak dekat. Selama ini fisika menggunakan penyederhanaan lewat sifat periodik untuk zat padat single crystal atau sifat acak (dengan pendekatan statistik) ketika membahas kumpulan elektron pada logam atau semikonduktor, sehingga agregat tersebut ungunya berupa beberapa parameter yang pembahasannya terjangkau oleh otak manusia.

Contoh klasik model Ising, barangkali dapat dijadikan arena yang menarik dilihat dari sisi pendekatan cara menggarap persoalannya. Secara eksplisit interaksi yang dimunculkan adalah interaksi antar tetangga dekat. Tetapi ketika harus mencari konsekuensi-konsekuensi perangai agregat keseluruhan terpaksa dilakukan dengan cara perata-rataan seperti pendekatan mean field, self consistency model kisi Bethe, ... dll.

Cellular Automata (CA) adalah salah satu arena memanfaatkan bantuan mesin komputer, yang memungkinkan kita mengamati prosesnya lebih rinci. Model Conway pada Cellular Automata dengan aturan lokal yang sederhana membuktikan bahwa banyak ragam perangai agregat yang ternyata muncul dari proses iterasi,

yang tak pernah terbayangkan oleh otak manusia sebelumnya. Sekarang CA banyak digunakan sebagai simulasi artificial life yang melibatkan sintesa antara fisika dan biologi.

Selain itu, keberhasilan teknologi komputasi dan komunikasi yang sanggup merubah pola hidup masyarakat, juga telah memicu ilmu fisika memperluas ranah garapannya untuk membawa obyek-obyek dalam skala nanometer ke dalam garapan teknologi informasi.

Contoh pertama yang dibahas pada tulisan ini berupa alternatif lain untuk melakukan proses komputasi lewat Cellular Automata yang isinya Quantum Dot. Pada alternatif ini informasi disalurkan dari satu tempat ke tempat lain dengan disipasi energi yang diperkirakan menjadi sangat kecil, karena tidak melibatkan perpindahan elektron ke tempat yang jauh. Teknik komputasinya masih tetap menggunakan cara-cara klasik, hanya elemennya adalah quantum dot yang ukurannya sekitar puluhan nanometer.

Contoh yang kedua menyajikan pengenalan proses komputasi jika harus dilakukan pada skala yang lebih kecil lagi, yaitu skala ukuran atom, sekitar sepersepuluh nanometer. Pada skala ini tentunya aturan yang berlaku adalah Mekanika Kuantum dengan aturan kerja sangat berbeda dengan yang klasik. Salah satu topik yang menarik untuk dimunculkan, yaitu Quantum Teleportation. Satuan kuantum yang tak diketahui isinya dapat beralih lokasi dari satu tempat ke tempat lain tanpa harus dipindahkan secara fisik, mirip dengan teleportasi manusia dalam film Star Trek itu. Di situ jalan berpikir kita digugah untuk mempertajam pemahaman kita tentang mekanika kuantum yang secara mekanistik hitungan-hitungannya sudah lazim kita lakukan dalam ilmu fisika.

2. Cellular Automata dengan Quantum Dot

Hal yang menarik mengenai mesin komputer yang ada dewasa ini adalah 'modal'nya yang relatif sangat sederhana. Dimulai dengan peranannya sebagai mesin hitung, bilangan-bilangan diubah basisnya menjadi sistem 'biner' yang hanya mengenal angka 0 dan 1 saja. Hal itu dilakukan agar dapat dioperasikan bukan secara manual melainkan dalam bentuk rangkaian listrik dengan misalnya menyatakan bahwa 0 itu berarti lampu *padam* dan 1 itu berarti lampu *menyala*. Elemen dasar yang menjadi andalannya dinamakan 'gate' yang jumlahnya hany ada 3 saja, yaitu : NOT, OR dan AND.

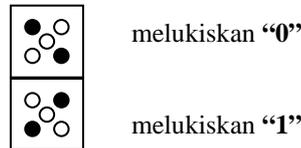
NOT mengubah nyala menjadi padam dan sebaliknya. OR memerlukan dua masukan dengan hanya satu keluaran, begitu pula dengan gate AND. Aturannya dapat dibayangkan sebagai rangkaian dua switch. Untuk AND dua switch tadi diletakkan secara seri, sedangkan untuk OR kedua switch tadi diletakkan secara paralel. Hanya dengan modal gate NOT, OR dan AND tadi seluruh komputasi seperti yang kita saksikan sekarang ini berfungsi, termasuk untuk musik, lukisan, animasi, dsb.

Ukuran transistor yang digunakan untuk elemen mesin komputer kita sekarang nilainya sekitar satu mikrometer. Saat ini teknologi telah memungkinkan orang membuat obyek yang namanya *quantum dot*, berupa keping logam atau semidoduktor, yang menjerat

sejumlah elektron di dalamnya. Ukurannya yang terkecil dapat mencapai sekitar 30 nanometer. Maka dipikirkanlah alternatif lain untuk menggarap cara kerja mesin komputer dengan menggunakan obyek ini. Gagasan ini pertama kali diungkapkan oleh Craig Lent dari The University of Notre Dame (USA) di tahun 1995 pada seminar di MIT¹⁾. Andaikan kita punya elemen quantum dot yang satu berisi satu elektron, yang lain kosong :



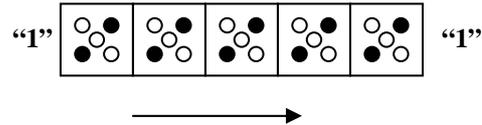
Pada skala nanometer itu, ada peluang untuk memindahkan elektron dari satu quatum dot ke quantum dot lain yang berdekatan lewat quantum tunneling. Sel satuan yang akan digunakan untuk melukiskan bilangan biner, terdiri atas 5 quantum dot, dua diantaranya yang berisi elektron. Gaya elektrostatis akan membuat hanya dua pilihan konfigurasi, yaitu :



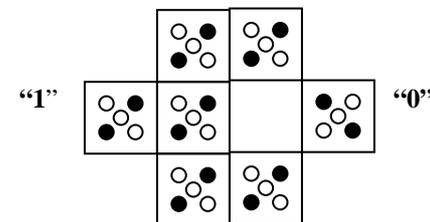
Kalau dua buah sel berdampingan, maka aturan kerja menurut fisika yang berlaku adalah pilihan sistem konfigurasi dengan nilai energi elektrostatis total yang paling kecil.

2.1 Operasi komputasi dasar

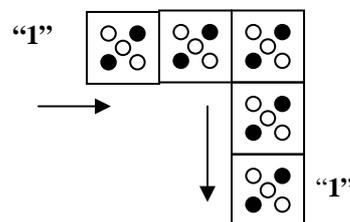
Deretan sel seperti pada gambar di bawah ini akan melukiskan cara membawa informasi "1" dari suatu tempat di kiri ke tempat lain di kanan. Sel-sel yang di sebelah kanan akan mengikuti konfigurasi yang ada pada sel di kirinya. Informasi "1" terbawa ke kanan tanpa memindahkan elektron dalam jarak jauh.



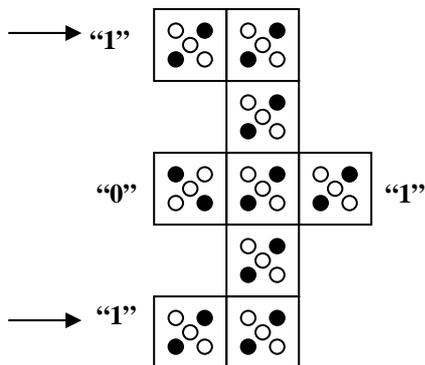
Untuk mengubah dari "1" ke "0" (gate NOT) digunakan pasangan sel seperti di bawah ini



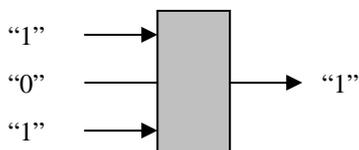
Konstelasi berikut ini melukiskan bagaimana cara membelokkan kabel pembawa informasi.



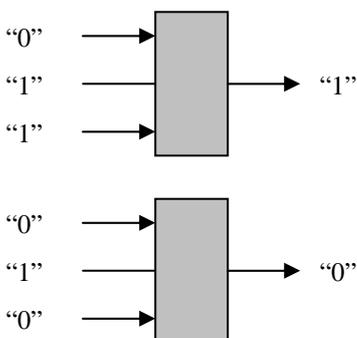
Logic-gate digantikan oleh pasangan berikut yang boleh disebut ‘majority gates’



atau secara simbolik



Pada logic-gate ada dua masukan : baris yang paling atas dan yang paling bawah. Baris ditengah digunakan sebagai semacam pengendali. Keluaran yang ada di paling kanan bergantung pada mayoritas lingkungan. Kalau pengendali itu nilainya “0” maka gate ini berfungsi sebagai gate AND. Sebaliknya jika pengendali ditengah itu “1” maka gate berfungsi sebagai gate OR. Misalnya untuk OR :



Jadi, pada skala beberapa puluh nanometer ada alternatif lain untuk melakukan komputasi secara klasik, dengan disipasi energi yang tentunya jauh lebih kecil, karena tidak terjadi perpindahan elektron seperti yang terjadi pada rangkaian dengan kabel.

Meskipun namanya Quantum Dot, sesungguhnya yang dilakukan dalam kasus ini tetap aturan-aturan klasik, istilah kuantum hanya tercermin pada proses tunneling antara quantum dot yang ada di dalam satu sel.

3. Komputasi dalam wilayah Kuantum

Para fisikawan juga sudah mengantisipasi bagaimana jika nantinya proses komputasi harus dilakukan pada skala subatomik. Karena pada wilayah tersebut aturan-aturan klasik tidak akan berfungsi, maka

dipelajarilah cara-cara mekanika kuantum yang dapat diterapkan dalam kaitan dengan proses komputasi.

Tentu saja perlu diingat bahwa ilmu dan teknologi komputer telah berkembang dengan menakjubkan. Ungkapan komputasi klasik yang sudah berfungsi dengan baik itu sebaiknya dimanfaatkan. Salah satu basis dasarnya adalah penggunaan ‘bahasa’ bilangan ‘biner’ angka 0 dan 1. Karena itu sebagai satuan *register* untuk menyimpan data dipilih juga obyek kuantum yang dapat diungkapkan dalam Ruang Hilbert R yang dimensinya-2. Vektor basisnya boleh dinamakan $|0\rangle$ dan $|1\rangle$. Kalau dalam bahasa klasik pasangan angka (0,1) disebut bit, maka dalam komputasi kuantum pasangan $\{|0\rangle, |1\rangle\}$ diberi nama **qubit**.

Berbeda dengan satuan bit yang bisa dibaca secara langsung, status satuan qubit $|\varphi\rangle$ pada umumnya berupa vektor yang boleh diungkapkan sebagai kombinasi linier dari $|0\rangle$ dan $|1\rangle$. Informasi yang ada di situ tidak bisa dibaca, seperti pada kasus klasik.

$$|\varphi\rangle = a |0\rangle + b |1\rangle \tag{1}$$

Maksimum informasi yang dapat diperoleh adalah : pada keadaan seperti itu, jika kita melakukan pengukuran, yang akan kita peroleh adalah $|0\rangle$ dengan peluang $|a|^2$ atau $|1\rangle$ dengan peluang $|b|^2$, tentunya dengan $|a|^2 + |b|^2 = 1$. Di satu sisi perbedaan ini ‘merugikan’ karena ada kalanya kita tidak memiliki kepastian akan isi qubit tadi, tetapi di pihak lain juga ada ‘keuntungan’ yang dapat diperoleh dari qubit. Qubit menjadi lebih efisien dibanding dengan bit, karena satu qubit sanggup menampung dua informasi sekaligus.

Misalkan kita ingin melakukan proses komputasi yang dilambangkan dengan sebuah operator F , yang dapat bekerja pada qubit. Dalam komputasi klasik kita memerlukan dua langkah untuk melakukan proses tadi. Pertama dengan bit 0 dan kedua dengan bit 1. Pada qubit, kalau F dioperasikan pada $|\varphi\rangle$, maka berdasarkan sifat linier operator F diperoleh

$$F|\varphi\rangle = a F|0\rangle + b F|1\rangle \tag{2}$$

Artinya, hanya diperlukan satu langkah untuk proses komputasi dengan F tadi. Efisiensi tersebut akan semakin tinggi jika yang kita garap bukan hanya satu qubit melainkan 50 qubit.

Aspek lain yang membuat perbedaan antara bit dan qubit adalah makna dari pengukuran dalam mekanika kuantum. Tadi sudah dikemukakan bahwa pengukuran terhadap $|\varphi\rangle$ tidak memberikan kepastian, melainkan sekedar peluang (probabilistik) bahwa hasilnya bisa $|0\rangle$ atau juga bisa $|1\rangle$. Masih ada lagi kelainan yang ‘aneh’ dalam aturan kerja mekanika kuantum, yaitu kalau pengukuran pada $|\varphi\rangle$ itu hasilnya $|0\rangle$ dan kita melakukan pengukuran sekali lagi, maka hasilnya pasti yaitu $|0\rangle$ bukan lagi probabilistik seperti pada pengukuran semula. Maknanya : apa yang terjadi pada pengukuran pertama adalah sebuah proyeksi (dalam pengertian ruang vektor Hilbert) dari vektor $|\varphi\rangle$ ke salah satu komponen basisnya, yang dalam hal ini adalah vektor $|0\rangle$. Setelah pengukuran pertama itu vektor $|\varphi\rangle$ tidak ada lagi, yang tertinggal adalah vektor $|0\rangle$. Dengan perkataan lain pengukuran

pertama tadi menghapus sama sekali informasi yang dikandung dalam $|\varphi\rangle$.

Keanehan ini sekarang justru dimanfaatkan untuk melakukan proses komunikasi ‘kunci’ yang terkait dengan kriptografi melalui cara yang dijamin aman. Ungkapan sederhana tentang kriptografi kuantum ini dapat dibaca misalnya dari makalah penulis yang diterbitkan majalah Integral.

Sifat-sifat lain yang lebih mengusik pemahaman kita tentang mekanika kuantum akan muncul jika kita membahas obyek yang berupa dua qubit.

4. Misteri pasangan dua qubit.

Misalkan qubit pertama kita lambangkan sebagai $\{|0\rangle_A, |1\rangle_A\}$ yang membentuk Ruang Hilbert R_A berdimensi dua, dan qubit kedua sebagai $\{|0\rangle_B, |1\rangle_B\}$ yang membentuk Ruang Hilbert R_B . Maka ruang baru kita untuk dua qubit tadi menjadi produk tensor dari R_A dan R_B , dengan dimensi empat. Vektor-vektor pembangunnya bisa

$$\begin{aligned} &|0\rangle_A|0\rangle_B, |0\rangle_A|1\rangle_B, \\ &|1\rangle_A|0\rangle_B, \text{ dan } |1\rangle_A|1\rangle_B \end{aligned} \quad (3)$$

Seperti kita ketahui dari mekanika kuantum, basis vektor tersebut dapat kita ubah menjadi pasangan lain dengan menerapkan transformasi *unitary* U . Transformasi semacam ini tidak akan merubah nilai eigen operator besaran fisika yang ada. Salah satu yang dikenal dengan nama Hadamard adalah transformasi U_A yang bentuk matriksnya

$$U_A = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{pmatrix} \quad (4)$$

Jika dalam representasi matriks $|0\rangle$ ditulis sebagai $\begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}$

dan $|1\rangle$ sebagai $\begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}$ maka akan kita peroleh basis baru di R_A :

$$|+\rangle_A = (1/\sqrt{2})(|0\rangle_A + |1\rangle_A) \quad (5a)$$

$$|-\rangle_A = (1/\sqrt{2})(|0\rangle_A - |1\rangle_A) \quad (5b)$$

Begitu pula dengan ruang R_B dengan basis baru

$$|+\rangle_B = (1/\sqrt{2})(|0\rangle_B + |1\rangle_B) \quad (6a)$$

$$|-\rangle_B = (1/\sqrt{2})(|0\rangle_B - |1\rangle_B) \quad (6b)$$

Jadi, kita dapat juga membuat ruang dimensi-4 kita R_A R_B berbasis

$$\begin{aligned} &|+\rangle_A|+\rangle_B, |+\rangle_A|-\rangle_B, \\ &|-\rangle_A|+\rangle_B, \text{ dan } |-\rangle_A|-\rangle_B \end{aligned} \quad (7)$$

Tentu saja, basis-basis baru itu tetap ortonormal satu sama lain.

Tetapi pada ruang Hilbert kita yang berdimensi empat itupun dapat dibuat transformasi *unitary* dimensi-4,

yang melibatkan 4 vektor basisnya. Salah satu transformasi *unitary* berdimensi-4 yang sangat menarik adalah yang disarankan oleh John Bell. Kalau hasilnya diungkap dengan notasi $|0\rangle, |1\rangle$ empat vektor basis itu bentuknya sbb:

$$|\varphi^+\rangle = (1/\sqrt{2})(|0\rangle_A|0\rangle_B + |1\rangle_A|1\rangle_B) \quad (8a)$$

$$|\varphi^-\rangle = (1/\sqrt{2})(|0\rangle_A|0\rangle_B - |1\rangle_A|1\rangle_B) \quad (8b)$$

$$|\psi^+\rangle = (1/\sqrt{2})(|0\rangle_A|1\rangle_B + |1\rangle_A|0\rangle_B) \quad (8c)$$

$$|\psi^-\rangle = (1/\sqrt{2})(|0\rangle_A|1\rangle_B - |1\rangle_A|0\rangle_B) \quad (8d)$$

Basis semacam ini tidak dapat dibangun dengan melakukan transformasi *unitary* di R_A dan melakukan transformasi *unitary* di R_B lalu dibuat produk tensor antara keduanya. Proses transformasi *unitary*nya harus dilakukan langsung pada ruang Hilbert dimensi-4nya.

Dalam basis semacam ini dikatakan bahwa qubit A dan qubit B *entangled* (terikat satu sama lain). Sudah sejak awal pengembangan mekanika kuantum, bentuk seperti ini merisaukan Einstein. Tahun 1935 Einstein beserta dengan Podovsky dan Rosen mempermasalahkannya pada sebuah publikasi, karena itu ‘keanehan’ ini dikenal dengan nama **EPR**-paradox waktu itu.

Ada sifat yang menarik dari pasangan 4 basis yang dikenal dengan nama ‘Bell states’ itu. Agar kita dapat memahaminya dengan jelas, akan kita definisikan 4 buah transformasi *unitary* untuk ruang Hilbert 2 dimensi sbb. :

$$\begin{aligned} \tilde{U}_1 &= \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad \tilde{U}_2 = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}, \\ \tilde{U}_3 &= \begin{pmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}, \quad \tilde{U}_4 = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (9)$$

Masing-masing transformasi itu *unitary*, inversnya $\tilde{U}_1^{-1} = \tilde{U}_1, \tilde{U}_2^{-1} = -\tilde{U}_2, \tilde{U}_3^{-1} = \tilde{U}_3$. Jika kita operasikan pada komponen A pada salah satu ‘Bell state’, yang akan kita peroleh adalah juga salah satu dari 4 ‘Bell states’ yang ada. Misalnya :

$$\tilde{U}_1^A |\varphi^+\rangle = |\varphi^+\rangle, \quad (10a)$$

$$\tilde{U}_2^A |\varphi^+\rangle = |\psi^+\rangle, \quad (10b)$$

$$\tilde{U}_3^A |\varphi^+\rangle = |\psi^-\rangle, \quad (10c)$$

$$\tilde{U}_4^A |\varphi^+\rangle = |\varphi^-\rangle \quad (10d)$$

Saat ini keanehan mekanika kuantum tersebut telah dimanfaatkan. Salah satu ‘keajaiban’ yang menarik adalah proses yang namanya “*quantum teleportation*”. Inti sarinya, kalau kita bekal pada *quantum entanglement*, kita dapat mengirimkan sebuah qubit yang tidak diketahui isinya dari satu tempat ke tempat lain dalam bentuk yang tetap utuh, hanya dengan mengirimkan 2 bit klasik.

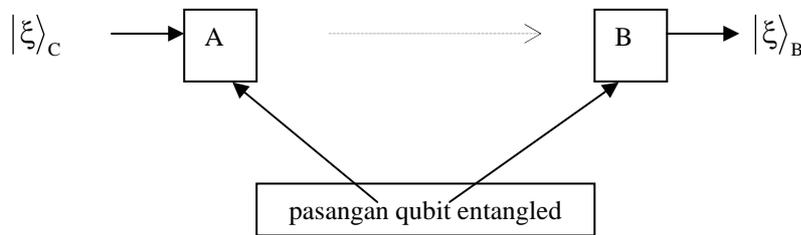
Berikut gambaran sederhananya. Si A dan si B berbagi sepasang qubit yang telah ada dalam status *entangled*, misalnya $|\varphi^+\rangle_{AB}$. Si A memiliki komponen qubit A dan si B membawa komponen qubit B.

Suatu saat Si A mempunyai sebuah qubit $|\xi\rangle_C$ yang perlu segera diinformasikan kepada si B. Modal yang dimiliki si A hanyalah 2 bit klasik, dan tentunya sebagian dari pasangan $|\varphi^+\rangle_{AB}$. Sebelumnya, memang sudah ada perjanjian untuk memberi label pada 4 transformasi *unitary* yang dipakai itu. Katakanlah perjanjiannya operasi *unitary* yang pertama diasosiasikan dengan 2 bit (00), yang kedua dengan 2 bit (01), yang ketiga dengan 2 bit (10), dan yang keempat dengan 2 bit (11).

Kemudian si A menggabungkan qubit pasangannya dengan qubit $|\xi\rangle_C$ yang akan

dikirimkannya ke si B itu. Lalu ia melakukan pengukuran serentak pada pasangan qubit A dan C itu. Hasil pengukurannya menunjukkan bahwa pasangan AC tadi ada pada status $|\psi^+\rangle_{CA}$. Menurut daftar perjanjian, si A

telah melakukan transformasi jenis \tilde{U}_1 . Maka ia mengirimkan 2 bit (01) kepada si B. Tentu saja qubit $|\xi\rangle_C$ maupun $|\varphi^+\rangle_{AB}$ dengan sendirinya telah musnah. Berdasarkan informasi 2 bit (01) yang dikirimkan oleh si A, maka si B melakukan operasi *unitary* \tilde{U}_1^{-1} pada qubit yang dimilikinya. Apa yang terjadi? Sekarang muncul qubit $|\xi\rangle_B$ tepat sama dengan qubit $|\xi\rangle_C$ yang musnah di tempat A itu, dan sekarang ada di tempat B. Ajaib !



Gambar 1

Penjelasannya begini :

Misalkan $|\xi\rangle_C$ yang tidak diketahui itu isinya itu = $a|0\rangle + b|1\rangle$. Maka pasangan $|\xi\rangle_C |\varphi^+\rangle_{AB}$ dapat dituliskan sebagai :

$$\begin{aligned} & (a|0\rangle_C + b|1\rangle_C) \frac{1}{\sqrt{2}} (|00\rangle_{AB} + |11\rangle_{AB}) \\ &= \frac{1}{\sqrt{2}} (a|000\rangle_{CAB} + a|011\rangle_{CAB}) + \\ & \quad + \frac{1}{\sqrt{2}} (b|100\rangle_{CAB} + b|111\rangle_{CAB}) \\ &= \frac{1}{2} a (|\varphi^+\rangle_{CA} + |\varphi^-\rangle_{CA}) |0\rangle_B + \\ & \quad + \frac{1}{2} a (|\psi^+\rangle_{CA} + |\psi^-\rangle_{CA}) |1\rangle_B + \\ & \quad + \frac{1}{2} b (|\psi^+\rangle_{CA} - |\psi^-\rangle_{CA}) |0\rangle_B + \\ & \quad + \frac{1}{2} b (|\varphi^+\rangle_{CA} - |\varphi^-\rangle_{CA}) |1\rangle_B \end{aligned} \tag{11}$$

kalau dijabarkan lagi menjadi :

$$\begin{aligned} &= \frac{1}{2} |\varphi^+\rangle_{CA} (a|0\rangle_B + b|1\rangle_B) + \\ & \quad + \frac{1}{2} |\psi^+\rangle_{CA} (a|1\rangle_B + b|0\rangle_B) + \\ & \quad + \frac{1}{2} |\psi^-\rangle_{CA} (a|1\rangle_B - b|0\rangle_B) + \end{aligned}$$

$$+ \frac{1}{2} |\varphi^-\rangle_{CA} (a|0\rangle_B - b|1\rangle_B) \tag{12}$$

Dengan memperhatikan operator $\tilde{I}, \tilde{U}_1, \tilde{U}_2, \tilde{U}_3$ yang dioperasikan pada B bentuk di atas juga dapat dinyatakan sebagai :

$$\begin{aligned} &= \frac{1}{2} |\varphi^+\rangle_{CA} \tilde{I} |\xi\rangle_B + \\ & \quad + \frac{1}{2} |\psi^+\rangle_{CA} \tilde{U}_1 |\xi\rangle_B + \\ & \quad + \frac{1}{2} |\psi^-\rangle_{CA} \tilde{U}_2 |\xi\rangle_B + \\ & \quad + \frac{1}{2} |\varphi^-\rangle_{CA} \tilde{U}_3 |\xi\rangle_B \end{aligned} \tag{13}$$

Artinya, ketika si A melakukan pengukuran pada pasangan qubitnya, ada 4 peluang yang sama bahwa ia menemukan satu dari antara keempat Bell state yang ada. Misalkan bahwa hasil pengukuran itu adalah $|\psi^+\rangle_{CA}$, berarti pilihan jatuh pada suku kedua dari ungkapan [13] itu. Si A tahu bahwa hasil itu akan didapat apabila si A melakukan transformasi \tilde{U}_1 pada qubitnya yang *entangled* dengan yang dipunyai si B. Maka menurut perjanjian dia harus mengirim 2 bit kode (01) kepada si B, yang artinya kode \tilde{U}_1 . Ketika B menerima informasi itu,

maka B melakukan operasi \tilde{U}_1^{-1} pada qubitnya sehingga qubitnya berubah menjadi $\tilde{U}_1^{-1}\tilde{U}_1|\xi\rangle_B = |\xi\rangle_B$.

Apa yang dilukiskan di atas bukan lagi impian saat ini. Tahun 1998, sekurangnya ada dua institusi yang telah berhasil mewujudkannya, yaitu kelompoknya Jeff Kimble²⁾ di California Institute of Technology, dan kelompoknya Anton Zeilinger³⁾ di University of Innsbruck, Austria.

Kerisauan Einstein di tahun 1935 tidak terjadi pada kasus ini. Memang betul bahwa ketika si A mengukur 2 qubit pasangan secara serentak itu, otomatis pasangan EPR milik si B berubah menjadi $\tilde{U}_1|\xi\rangle_B$. Tetapi si A harus mengirimkan berita (01) tadi kepada si B yang tentunya tidak harus berjalan dengan kecepatan melebihi kecepatan cahaya. Baru setelah hal itu dilaksanakan dan si B melakukan transformasi *unitary* menurut petunjuk si A, qubit $|\xi\rangle_C$ itu betul-betul pindah dari lokasi A ke lokasi B. Jadi proses pindahnya qubit tadi

masih tetap dalam rangka pengertian teori relativitasnya Einstein.

Hasil-hasil eksperimen tsb menunjukkan bahwa *entanglement* itu memang proses alam yang nyata, meskipun tak ada padanannya dengan cara berpikir kita yang klasik. Dua komponen qubit yang sudah *entangled* boleh berada di tempat yang terpisah jauh. Keduanya tetap selalu terkait. Karena itu ada yang mengatakan Mekanika Kuantum memiliki sifat *non-locality*, sanggup melukiskan dua elemen yang tidak terletak pada satu lokasi. Yang perlu disadari adalah perbedaan antara status kuantum yang sering kita tuliskan sebagai *state-vector* dalam ruang Hilbert, dengan informasi yang kita peroleh dari hasil pengukuran. Untuk memahami lebih mendalam diperlukan bentuk ungkapan lain Mekanika Kuantum yaitu lewat *density matrix*.

Rujukan

1. Goldhaber (1995), www.mit.edu/research/nanotech/
2. D Bouwmeester, dkk., *Nature* **390**, 575-579 (1997).
3. H. Jeff Kimble, dkk., *Science*, Oct 23, (1998) issue.