



Majelis Guru Besar
Institut Teknologi Bandung

Pidato Ilmiah Guru Besar
Institut Teknologi Bandung

Profesor Freddy Permana Zen

**UNIFIKASI INTERAKSI DI ALAM SEMESTA:
DARI EINSTEIN SAMPAI SUPERSTRING**

25 April 2009
Balai Pertemuan Ilmiah ITB

Judul: Pidato Ilmiah Guru Besar Institut Teknologi Bandung
**UNIFIKASI INTERAKSI DI ALAM SEMESTA:
DARI EINSTEIN SAMPAI SUPERSTRING**

Hak Cipta dilindungi undang-undang.

Dilarang memperbanyak sebagian atau seluruh isi buku ini dalam bentuk apapun, baik secara elektronik maupun mekanik, termasuk memfotokopi, merekam atau dengan menggunakan sistem penyimpanan lainnya, tanpa izin tertulis dari Penulis.

UNDANG-UNDANG NOMOR 19 TAHUN 2002 TENTANG HAK CIPTA

1. Barang siapa dengan sengaja dan tanpa hak mengumumkan atau memperbanyak suatu ciptaan atau memberi izin untuk itu, dipidana dengan pidana penjara paling lama **7 (tujuh) tahun** dan/atau denda paling banyak **Rp 5.000.000.000,00 (lima miliar rupiah)**.
2. Barang siapa dengan sengaja menyiarkan, memamerkan, mengedarkan, atau menjual kepada umum suatu ciptaan atau barang hasil pelanggaran Hak Cipta atau Hak Terkait sebagaimana dimaksud pada ayat (1), dipidana dengan pidana penjara paling lama **5 (lima) tahun** dan/atau denda paling banyak **Rp 500.000.000,00 (lima ratus juta rupiah)**.

Hak Cipta ada pada penulis

Data katalog dalam terbitan

Freddy Permana Zen

Unifikasi Interaksi di Alam Semesta:

Dari Einstein sampai Superstring

Disunting oleh Freddy Permana Zen

Bandung: Majelis Guru Besar ITB, 2009

vi+56 h., 17,5 x 25 cm

ISBN 978-979-19147-6-5

1. Pendidikan Tinggi 1. Freddy Permana Zen

Percetakan cv. Senatama Wikarya, Jalan Sadang Sari 17 Bandung 40134

Telp. (022) 70727285, 0811228615; E-mail:paulusuyanto@yahoo.co.id

INTISARI

Telah lama diyakini orang bahwa pada awal terbentuknya jagad raya, semua hukum dan interaksi yang kita pelajari secara terpisah-pisah saat ini sebetulnya bersatu (*unified*). Awal kejadiannya dimulai dari titik tak berdimensi, kemudian meledak (*bigbang*) dan membentuk ruang dan waktu yang kita tempati sekarang. Setelah itu perjalanan jagad raya berakhir pada *bigcrunch*. Tulisan ini membahas masalah penggabungan (unifikasi) interaksi dan hukum fisika. Interaksi itu adalah interaksi lemah, elektromagnetik, kuat serta gravitasi dan hukum fisika yang kita ketahui masing-masing fisika klasik, kuantum dan relativitas. Keempat interaksi dibedakan oleh kekuatan kopling interaksi dan sifat-sifat simetri yang mendasarinya, sedangkan hukum-hukum fisika di atas ditandai oleh tiga konstanta universal, konstanta gravitasi G , konstanta Planck h dan kecepatan cahaya c . Konstanta-konstanta ini merupakan "alat ukur" yang tersisa dari pembentukan alam semesta. Dari kombinasi ketiganya, dapat dihitung besaran panjang l_p , waktu t_p , energi E_p serta temperatur T_p . Akibatnya pada ukuran-ukuran inilah semua hukum dan interaksi bersatu. Teori yang berlaku pada keadaan ini dikenal sebagai *Theory of Everything* (TOE), karena orang mengira semua peristiwa fisis dapat dijelaskan oleh TOE. Usaha unifikasi telah dimulai sejak zaman Einstein (*Einstein dream*). Saat ini, kandidat TOE adalah superstring, walaupun secara fenomenologis belum memuaskan. Selanjutnya TOE yang ada harus dapat menjelaskan model-model partikel yang ukurannya sangat kecil maupun dinamika benda-benda yang sangat besar (kosmologi). Berikutnya dikembangkan model *D-brane*. Aspek lain yang muncul berupa pemanfaatan hukum dan model dalam fisika untuk membuktikan beberapa teorema di matematik, terutama dalam bidang geometri. Tulisan ini juga membahas secara singkat beberapa aspek fisika (elektromagnetik, kuantum dan relativitas) yang berdampak pada pengembangan teknologi.

DAFTAR ISI

	Halaman
INTISARI	iii
DAFTAR ISI	v
I. PENDAHULUAN DAN LATAR BELAKANG	1
II. KLASIK, RELATIVITAS, KUANTUM DAN PRINSIP SIMETRI	5
II.1. Mekanika Klasik (Newton)	5
II.2. Relativitas Khusus Dan Umum Einstein	6
II.3. Dunia Kuantum	12
II.4. Prinsip Simetri	17
III. MIMPI EINSTEIN DAN GRAND UNIFIED THEORY (GUT)	18
III.1 Teori Kaluza dan Klein	18
III.2. Partikel Elementer dan Interaksi Fundamental	20
IV. GRAVITASI KUANTUM	25
IV.1. Gravitasi Kuantum dalam 2- dan 3- Dimensi	25
IV.2. Gravitasi Kuantum dalam 4- Dimensi	27
V. TEORI STRING, BRANE, DAN KOSMOLOGI	29
V.1. Superstring dan TOE	29
V.2. Dimensi Ekstra dan Dunia Brane	33
V.3. Pelanggaran Lorentz dan Kosmologi	34
VI. BORDER AREA MATEMATIKA DAN FISIKA	37
VII. FISIKA DAN DAMPAKNYA	39
VIII. PENUTUP	43
UCAPAN TERIMA KASIH	44
DAFTAR PUSTAKA	46
CURRICULUM VITAE	53

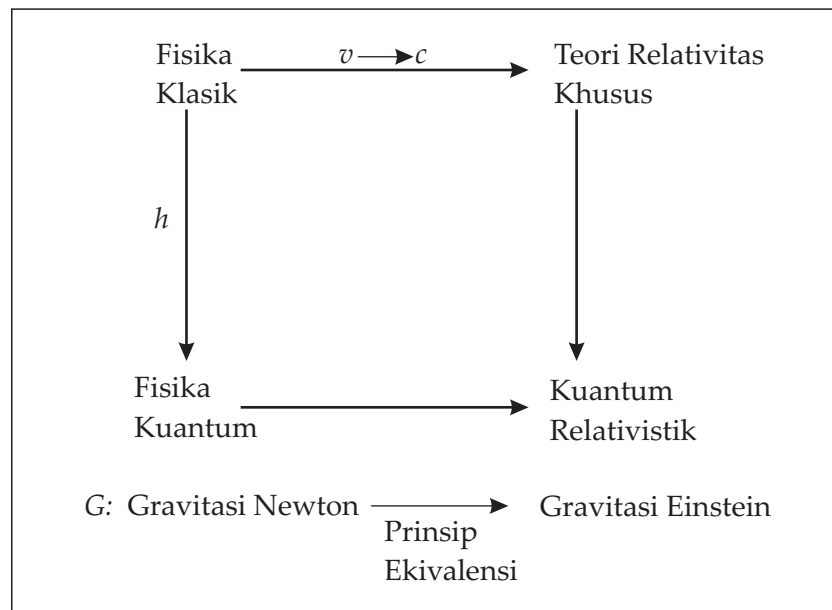
I. PENDAHULUAN DAN LATAR BELAKANG

Salah satu tema utama dalam penelitian fisika adalah mencari teori unifikasi yang dapat menjelaskan semua fenomena alam, termasuk perilaku partikel dan interaksinya di alam semesta. Dalam terminologi fisika, teori seperti ini disebut *Theory of Everything*, TOE. Usaha tersebut sudah ada sejak lama, pada era Newton bahkan mungkin era sebelumnya, walaupun belum mendapat jawaban yang memuaskan. Sebagai contoh, mulanya listrik dan magnet dianggap dua fenomena yang tidak berkaitan, tetapi kemudian dipahami bahwa kedua fenomena tersebut dapat dijelaskan dalam satu teori, yaitu elektromagnetik (EM). Kegagalan mekanika Newton menjelaskan dinamika sistem pada skala mikroskopik dan kecepatan tinggi (mendekati kecepatan cahaya) telah mendorong orang mencari teori yang lebih sesuai dengan hasil eksperimen yaitu kuantum dan relativitas.

Keinginan di atas, menurut hemat saya, didasari pada keyakinan bahwa alam semesta yang diciptakan Maha Pencipta, dimulai dari ketiadaan ruang dan waktu, kemudian meledak (*bigbang*) dan membentuk alam semesta yang ditempati semua makhlukNya, termasuk manusia. Maka wajarlah jika diasumsikan bahwa saat awalnya, semua hukum dan interaksi di jagad raya bersatu (*unified*), kemudian dengan berjalannya waktu setelah momen penciptaan (sekitar 15 milyar tahun yang lalu), bertransisi fasa menjadi seperti yang kita amati sekarang. Interaksi fundamental yang kita ketahui, elektromagnetik (*electromagnetic interaction*), kuat (*strong interaction*), lemah (*weak interaction*) serta gravitasi (*gravitational interaction*) dibedakan berdasarkan jarak, energi dan kekuatan interaksi.

Dilain pihak, hukum alam yang kita kenal meliputi fisika klasik, kuantum, relativitas dan gravitasi, dapat ditandai melalui konstanta universal. Konstanta tersebut masing-masing gravitasi (Newton) $G=6,67 \times 10^{-11} Nm^2 kg^{-2}$, Planck $h=6,63 \times 10^{-34} J s$ dan kecepatan cahaya $c=3 \times 10^8 ms^{-2}$ (Gambar 1). Jika G, h dan c konstan, maka di awal terbentuknya alam semesta juga bernilai konstan. Artinya "alat

ukur" atau besaran sisa pembentukan jagad raya terekam dalam ketiga konstanta tersebut.

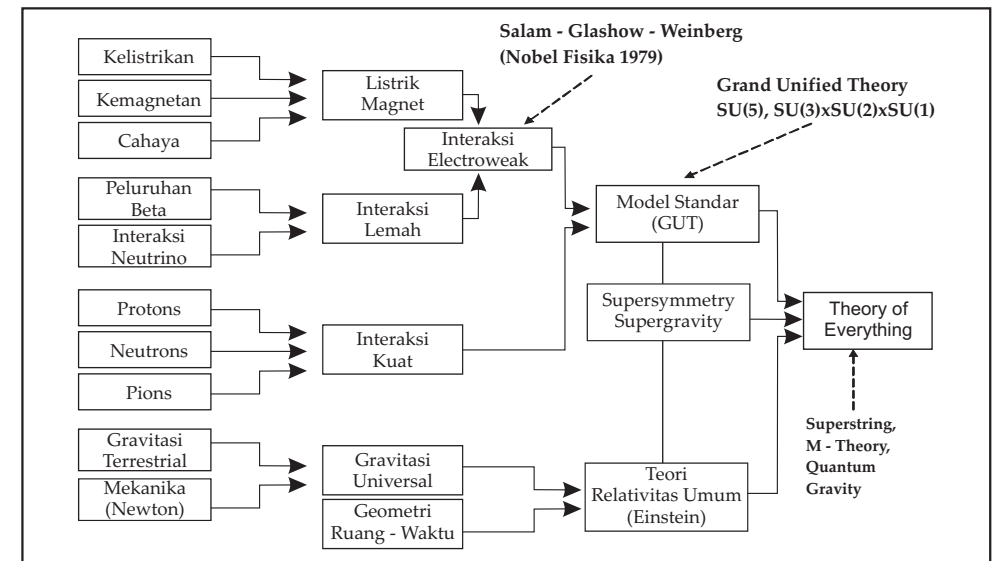


Gambar 1.

Fisika klasik, kuantum, relativitas dan gravitasi dibedakan oleh konstanta c , h dan G

Dengan melakukan kombinasi dari ketiganya, dengan mudah dapat dihitung panjang Planck $l_p = \sqrt{\frac{Gh}{c^3}} = 1,6 \times 10^{-35}$ meter, waktu Planck $t_p = \frac{l_p}{c} = 0,5 \times 10^{-43}$ detik, energi Planck $E_p = 1,3 \times 10^{19}$ GeV (1 Giga electron Volt atau GeV ekuivalen dengan energi yang diperlukan elektron untuk melawan beda potensial yang ditimbulkan oleh 670 juta batere disusun serial) dan temperatur Planck $T_p = 1,4 \times 10^{32}$ Kelvin. Pada besaran-besaran diataslah TOE signifikan, begitu juga dengan gravitasi kuantum (Gambar 2A dan 2B). Jadi, jika kita runut waktu kebelakang (*backward in time*), mula-mula semua interaksi bersatu dalam TOE, kemudian berpisah seiring dengan menurunnya temperatur dan meluasnya jagad raya. Untuk memberikan beberapa latar belakang fisika, pada Bab II dibahas secara singkat tentang mekanika Newton, konsep relativitas Einstein,

dunia kuantum serta prinsip-prinsip simetri.

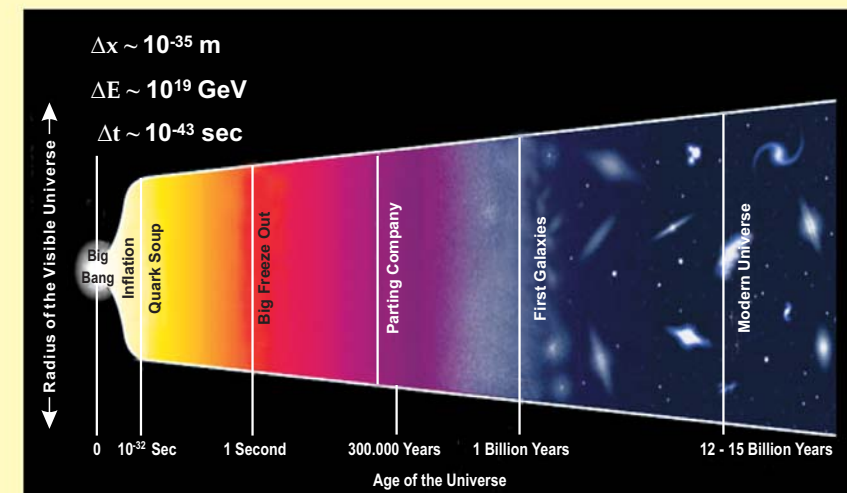


Gambar 2A.

Skema unifikasi interaksi.

Gambar 2B. (sumber Gambar dari internet)

Efek Kuantum pada Awal Pembentukan Alam Semesta



$\Delta x, \Delta E$ dan Δt diperoleh dari tiga konstanta universal: konstanta Planck (h), kecepatan cahaya (c) dan konstanta gravitasional (G) yang merupakan *ground tone of the universe*.

Pada Bab III, dibahas usaha yang telah dilakukan untuk unifikasi interaksi, dimulai dari awal abad 20 setelah adanya teori Einstein, yaitu menggabungkan gravitasi dan EM. Kemudian diikuti usaha unifikasi yang melibatkan prinsip kuantum. Ketiga interaksi (EM, kuat dan lemah) diunifikasi dalam model standar (*standard model*) dan klasifikasinya sesuai dengan simetri internal atau simetri gauge dan kekuatan interaksi ketiganya.

Bab IV membahas unifikasi gravitasi dan kuantum. Pada bagian ini dan sampai Bab terakhir, pembahasan dititikberatkan pada apa yang telah kami lakukan, dimulai dari gravitasi kuantum 2-dimensi, dilanjutkan dengan 3-dimensi dan diakhiri dengan mengkaji secara komprehensif masalah unifikasi pada 4-dimensi. Bagian selanjutnya, Bab V mendiskusikan lebih detil bagaimana cara unifikasi semua interaksi dengan memandang partikel sebagai objek berdimensi satu (*string*), sehingga dalam "perjalanannya" membentuk permukaan 2-dimensi yang dimasukkan (*embedded*) dalam ruang-waktu berdimensi D. Dengan memandang aspek supersimetri dan bebas anomali kemudian ditemukan dimensi ruang-waktu berjumlah $D=10$ sehingga terdapat 6 buah dimensi ekstra. Disini dibahas pula *extended object* lain yang berupa *D-brane* (diambil dari *membrane* untuk objek string, sehingga untuk objek yang lebih luas diistilahkan dengan *Dimensional-brane* disingkat *D-brane*). Karena superstring merupakan salah satu kandidat TOE, teori ini dapat menjelaskan aspek kosmologi serta partikel-partikel yang ada dalam model standar pada energi lebih rendah dari energi Planck.

Bab VI membahas hubungan matematika dan fisika. Seperti kata Euler, matematika merupakan "ratu" dan "pelayan" ilmu pengetahuan, tak terkecuali fisika. Tapi, perkembangan teori medan topologi akhir-akhir ini (*Topological Field Theory*, TFT) menunjukkan keadaan sebaliknya, bahwa beberapa teorema dalam matematika (*Morse theory*, *Jones polynomial invariant* dalam 3-dimensi, *Donaldson invariant* dalam 4-dimensi) dapat dibangun dari teori medan kuantum (*Quantum Field Theory*, QFT) dengan memilih aksi berbentuk *topological invariant*.

Konsekuensinya, sekarang banyak fisikawan dan matematikawan melakukan riset dalam wilayah "border" ini. Bab VII digunakan untuk mendiskusikan peranan fisika dalam pengembangan teknologi dewasa ini. Di mulai dari peranan teori kuantum pada penemuan bahan semikonduktor dan pengaruhnya dalam teknologi komputer serta manfaatnya untuk mengembangkan kriptografi (sandi) serta komputer kuantum. Bagian penutup diberikan pada Bab VIII. Tulisan ini bersifat semi populer dan saya berharap dapat menceritakan perkembangan fisika fundamental dari awal abad 20 sampai memasuki milenium ke 3. Sebagai acuan, di bagian akhir tulisan saya cantumkan beberapa daftar pustaka.

II. KLASIK, RELATIVITAS, KUANTUM DAN PRINSIP SIMETRI

II.1. MEKANIKA KLASIK (NEWTON)

Tahun 1687, dalam bukunya "*Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*", I. Newton menguraikan dinamika atau gerak benda dalam ruang dan waktu. Jika sebuah benda tidak mengalami "gangguan" (istilahnya gaya), maka benda tersebut diam atau bergerak dengan kecepatan tetap (sistem inersial). Tapi, jika benda tersebut mendapat gaya maka percepatannya berubah, besar dan arahnya sebanding dengan jumlah besar dan arah gaya yang menggangukannya. Selain itu, jika benda mendapat gaya aksi, maka benda akan memberikan gaya reaksi yang besarnya sama tapi arah berlawanan dengan gaya aksinya. Ketiga hukum di atas dikenal sebagai mekanika klasik, yang bersama dengan elektromagnetik J. C. Maxwell membentuk fisika klasik. Sifat-sifat fisis benda ukuran meter dan kecepatan rendah (dibanding kecepatan cahaya) dapat dijelaskan dengan sangat akurat oleh hukum di atas. Dalam teorinya, Newton berasumsi bahwa waktu bersifat absolut, artinya tidak ada perbedaan waktu di antara dua pengamat dalam dua kerangka acuan yang berbeda kecepatannya. Dilain pihak, ruang bersifat relatif, sehingga ruang dan waktu mempunyai derajat yang tidak sama. Hal ini sesuai dengan pengalaman sehari-hari bahwa kecepatan gerak benda

sangat kecil dibanding kecepatan cahaya dan gerak dalam ruang bisa maju ataupun mundur, sedangkan waktu selalu maju, tidak pernah mundur. Jarak yang kita ukur selalu positif atau nol, $ds^2 \geq 0$

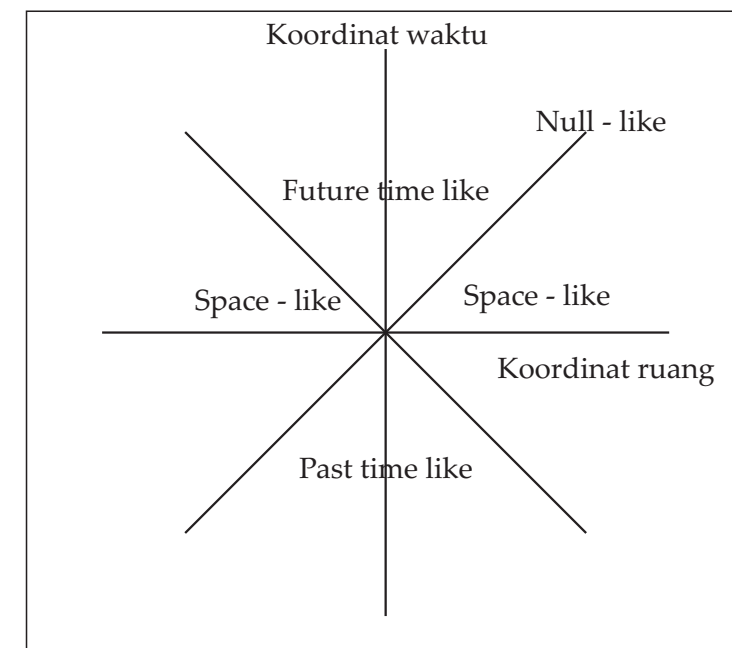
Untuk berlakunya hukum Newton, ruang dan waktu harus ada terlebih dahulu, kemudian gerak benda mengikuti kaidah serta hukum tersebut. Bentuk alam semesta jadinya tak jelas, dapat berbentuk bola, kubus, atau apapun, apalagi asal mulanya. Sehingga dari sini orang dapat berasumsi alam semesta mempunyai awal, jika ia percaya alam semesta diciptakan atau sebaliknya, menganggap ruang dan waktu terjadi dengan sendirinya, aksidental. Hal ini kemudian menjadi berbeda dengan adanya relativitas Einstein, yang membuktikan bahwa ada singularitas di alam semesta yang merupakan awal ruang-waktu (*Bigbang*) dan ada pula kebalikannya, yang merupakan akhir alam semesta (*Bigcrunch*).

Pertanyaannya, apakah hukum Newton berlaku juga untuk benda yang sangat kecil, ukuran mikron (10^{-6} meter) misalnya atau benda-benda bergerak dengan kecepatan tinggi, mendekati cahaya? Ternyata tidak berlaku. Pada awal abad 20, orang mencari hukum yang lebih sesuai dengan fenomena fisis yang ada dan akibatnya dimulailah era relativitas dan kuantum.

II.2. RELATIVITAS KHUSUS DAN UMUM EINSTEIN^[1]

Ada dua teori relativitas yang diajukan A. Einstein. Tahun 1905^[2], ia merumuskan Teori Relativitas Khusus (*Special Theory of Relativity*, SR) yang menjelaskan perilaku benda bergerak dengan kecepatan tinggi, mendekati **kecepatan cahaya c**. Dia mendasari SR dengan dua postulat berikut. Pada sistem-sistem inersial, hukum fisika invarian dan kecepatan cahaya konstan (tidak berubah). Akibatnya pengukuran ruang dan waktu dalam sistem-sistem inersial dihubungkan oleh transformasi Lorentz, sehingga ruang dan waktu (sekarang menjadi satu kesatuan ruang-waktu 4-dimensi) bersifat relatif, bergantung acuan

pengukur. Jadi interval ruang-waktu harus dikalikan dengan faktor Lorentz $\gamma = \{1 - (\frac{v}{c})^2\}^{-\frac{1}{2}}$, dan jarak ds^2 dapat bernilai positif, nol atau negatif yang disebut sebagai wilayah *time-like* $ds^2 > 0$, *null-like* $ds^2 = 0$ dan *space-like* $ds^2 < 0$ (Gambar 3). Ketiga wilayah ini ditandai oleh kecepatan gerak benda, masing-masing lebih kecil dari cahaya $v < c$ (*time-like*), gerak cahaya sendiri dengan kecepatan $v = c$ (*null-like*) serta partikel hipotetik tachyon yang bergerak dengan kecepatan $v > c$ (*space-like*). Dinamika partikel *tachyon* melanggar prinsip sebab akibat, karena partikel ini ada sebelum dipancarkan. Konsekuensi lainnya, bentuk momentum dan energi pun berubah dan dikalikan dengan faktor Lorentz di atas. Dalam perumusan SR inilah terdapat energi diam serta kesetaraan massa dan energi, yang kemudian menjadi dasar untuk pengembangan energi nuklir serta menjelaskan mengapa bintang dan galaksi bersinar.

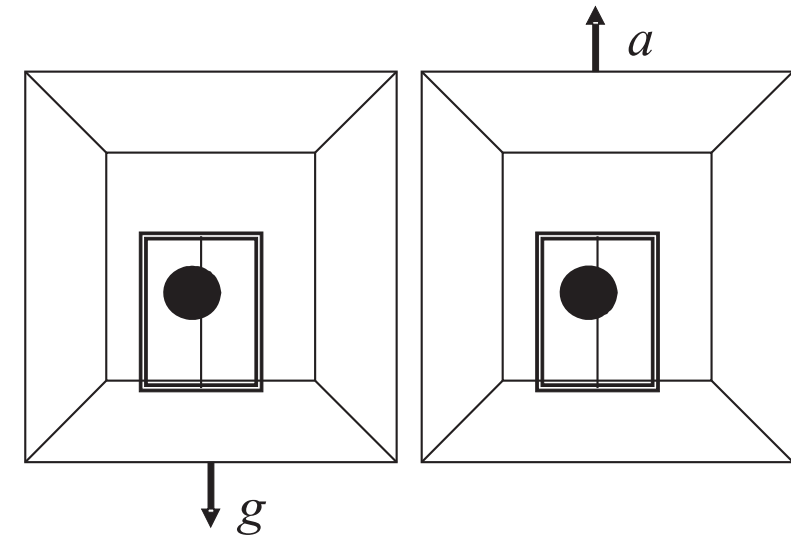


Gambar 2A.

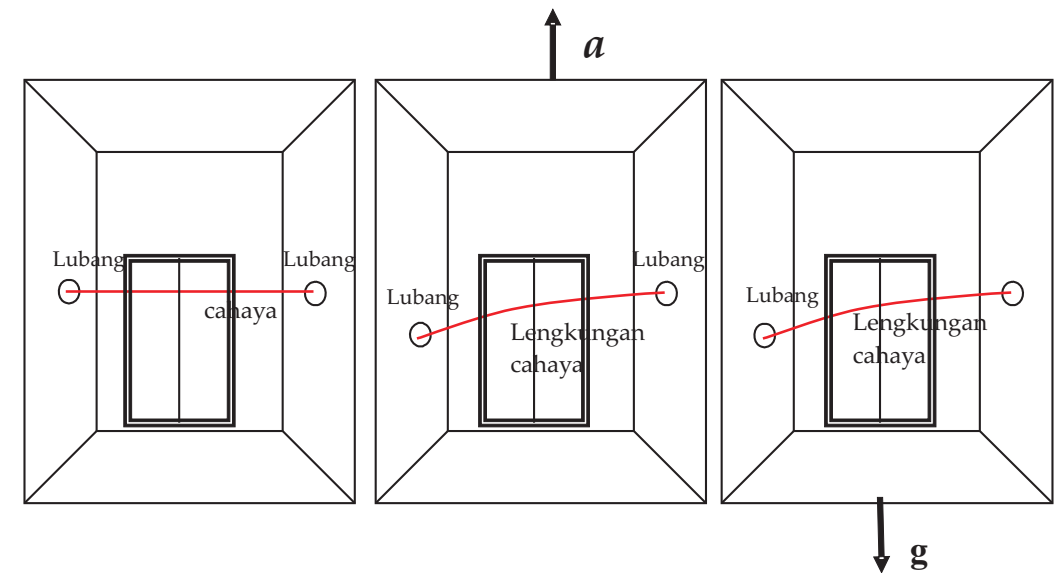
Wilayah *time-like*, *null-like* dan *space-like* dalam ruang - waktu Minkowski. Disini jarak $ds^2 > 0$, $ds^2 = 0$ dan $ds^2 < 0$.

Dalam eksperimen pemercepat partikel, misalnya di CERN, Eropa, partikel-partikel bergerak dengan kecepatan tinggi, sehingga aspek SR harus diperhitungkan atau interaksinya haruslah memenuhi SR. Hal ini dicapai dengan memasukkan kondisi bahwa sistem yang kita tinjau tidak berubah (*invariant*) terhadap transformasi Lorentz (secara umum disebut *Lorentz covariance*).

Tahun 1915^[3], selanjutnya Einstein mengajukan Teori Relativitas Umum (*General Theory of Relativity, GR*), yang menjelaskan dinamika benda bermassa di bawah pengaruh gravitasi. Gaya gravitasi selalu atraktif atau tarik-menarik, besarnya sebanding dengan $(\frac{1}{r})^2$ dan bersifat *long-range*, artinya tidak ada benda bermassa yang tidak mengalami gaya ini. Gayanya sangat lemah karena kekuatannya sebanding dengan **konstanta G**. Sebagai misal, perbandingan gaya gravitasi dan EM antara dua proton sebesar 10^{-40} . Untuk memahami GR, kita analisa prinsip ekuivalen Einstein (*principle of equivalence*) yang menyatakan massa inersia dan massa gravitasi sebuah benda besarnya sama $m_{inersia} = m_{gravitasi}$. Massa inersia didapat jika benda mengalami gaya F sehingga mengalami percepatan a , atau $F = m_{inersia} a$. Massa gravitasi muncul ketika benda tersebut berada dalam medan gravitasi, dengan percepatan gravitasi g atau $F = m_{gravitasi} g$. Perhatikan Gambar 4. Untuk $a = -g$ dan massa inersia bola sama dengan massa gravitasi bola (prinsip ekuivalen), pengamat (yang mengamati bola jatuh) dalam kotak tak dapat membedakan apakah ia berada dalam pengaruh gravitasi atau mengalami percepatan. Berikutnya eksperimen bola jatuh kita ganti dengan foton atau partikel cahaya "jatuh" (Gambar 5). Jika tidak ada gaya yang mempengaruhi gerak foton, maka foton bergerak dalam lintasan lurus. Tetapi akibat prinsip ekuivalen, gerak foton dalam pengaruh gravitasi akan melengkung atau "jatuh". Eksperimen mengukur lengkung atau "jatuh"-nya foton telah dilakukan oleh Pound dan Rebka tahun 1960. Mereka mengukur pergeseran frekuensi foton "jatuh" dari ketinggian 50 meter sebesar $\frac{\Delta f}{f} = 5,4 \times 10^{-15}$, ukuran yang sangat kecil.



Gambar 4. Prinsip ekuivalen Einstein. Orang yang berada di dalam lift tidak dapat membedakan apakah ia berada dibawah pengaruh gravitasi dengan percepatan g atau mengalami percepatan a .

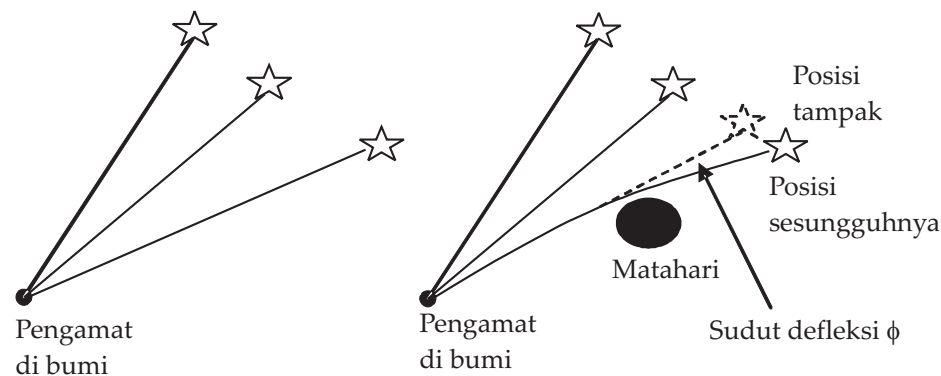


Gambar 5. Prinsip ekuivalen yang berlaku pada partikel cahaya atau foton. Jika tidak ada gaya, lintasan cahaya berupa garis lurus. Jika lift mengalami percepatan sebesar $a=-g$, dari prinsip ekuivalen, lintasan cahaya melengkung ke bawah atau "jatuh".

Berlakunya prinsip ekivalen mempunyai implikasi yang sangat jauh. Bintang-bintang yang berada dibelakang matahari akan terlihat, karena lintasan cahayanya melengkung (Gambar 6). Pembuktian lengkungan cahaya ini diamati saat gerhana matahari. Pada Mei 1919, ketika terjadi gerhana matahari di Afrika, A. Eddington mengamati fenomena tersebut dengan sudut defleksi $\phi=1,75''$, yang sesuai dengan prediksi teori Einstein. Ini berarti bahwa disekitar benda bermassa, *geodesic* atau lintasan ekstremumnya berbentuk lengkungan ruang-waktu yang sebanding dengan distribusi massa benda tersebut. Persamaan yang menunjukkan fenomena ini disebut persamaan medan Einstein,

$$R_{\mu} - \frac{1}{2} g_{\mu} R = \frac{1}{8\pi G} T_{\mu}$$

dimana ruas kiri menyatakan kelengkungan ruang-waktu sedangkan ruas kanan menggambarkan distribusi materi di jagad raya.



Gambar 6.

Akibat melengkungnya ruang-waktu (*geodesic*) disekitar matahari maka lintasan cahayapun mengikuti lengkungan tersebut. Bintang yang berada di “belakang” matahari akan terlihat ketika terjadi gerhana matahari.

Solusi persamaan di atas lebih menarik lagi. Untuk jagad raya bersifat homogen dan isotropi, solusi persamaan Einstein diparameterisasi oleh sebuah faktor skala $a(t)$, yang berubah terhadap waktu t . Nilai $a(t)$ secara umum dapat

mengecil dan membesar. Dari observasi yang dilakukan E. Hubble, diprediksi bahwa nilai $a(t)$ membesar dan percepatannya (derivasi kedua $a(t)$ terhadap waktu t) positif. Ini berarti alam semesta yang kita tempati saat ini mengembang dan pengembangannya makin cepat yang bermula sekitar 15 milyar tahun lalu. Akibatnya, jika kita dapat kembali ke 15 milyar tahun lalu, jagad raya semestinya “lahir” dari titik tak berdimensi (*singularity*) dan kemudian meledak (*bigbang*) dan menjadi ruang-waktu saat ini. Keberadaan titik singular tersebut telah dibuktikan oleh S.W. Hawking dan R. Penrose^[4] dengan memanfaatkan persamaan Einstein. Kemudian, dalam perkembangannya, ruang-waktu akan menghilang atau “mati” (*bigcrunch*). Jika gaya gravitasi saja yang berpengaruh terhadap objek alam semesta (planet, bintang atau galaksi), semestinya ruang-waktu kita menciut karena materi-materi tersebut saling tarik-menarik, sesuai dengan hukum Newton. Kenyataan sebaliknya, seperti yang diuraikan di atas. Berarti harus ada materi dan energi dalam bentuk lain yang menyebabkan alam semesta mengembang serta dipercepat. Dari observasi memang demikian. Materi yang kita lihat (planet, bintang atau galaksi, termasuk foton dan neutrino) yang berkontribusi pada ruas kanan persamaan Einstein hanya sebesar 5%, sedangkan 95% sisanya berupa materi dan energi yang tidak terdeteksi (karena tidak berinteraksi dengan medan EM). Materi dan energi seperti ini disebut *dark matter* (DM, kontribusi 23%) dan *dark energy* (DE, kontribusi 72%)^[5]. Kemunculan DM dan DE pertama kali diprediksi oleh F. Zwicky tahun 1930. Dia menghitung perbandingan massa dan luminositas pada galaksi *Coma* yang hasilnya 50 kali lebih besar dibandingkan jika kontribusinya hanya materi yang terlihat (*visible matter*) saja. Dari sini disimpulkan bahwa harus ada *invisible matter* (dalam bentuk DM dan DE) yang jauh lebih besar dari *visible matter*, yang sampai saat ini bentuk interaksi serta asal mulanya belum dapat dijelaskan. Dalam perkembangan selanjutnya, orang memanfaatkan dimensi ekstra (dimensi yang lebih besar dari 4), untuk menjelaskan kemunculan efek gravitasi, *dark energy* serta *dark matter*, walaupun hasilnya belum memuaskan. Penelitian kearah ini masih berlangsung (lihat Sub bab V.3).

Singularitas ruang-waktu yang lain berupa *blackhole*. *Blackhole* merupakan solusi persamaan Einstein yang singular dengan mengambil simetri ruang-waktu tertentu. Massa *blackhole* sangat besar, walaupun “ukurannya” sangat kecil, sehingga lengkungan ruang-waktunya tertutup, karena cahaya yang keluar dari *blackhole* ditarik masuk kembali. Sebab itu benda ini disebut lubang-hitam (*blackhole*). Keberadaan benda ini dideteksi secara tidak langsung, dengan mengamati perilaku benda-benda lain disekitarnya. Di pusat galaksi Bima Sakti terdapat *blackhole* yang sangat masif (*supermassive blackhole*). Bersama dengan *dark matter* (yang berperan seperti lem) membuat sistem tata surya kita yang berjarak 100 tahun cahaya dari pusat galaksi tetap stabil mengorbit pada galaksi ini. Dari jenisnya, *blackhole* dapat diparameterisasi oleh massa (*Schwarzschild blackhole*), momentum sudut (*Kerr blackhole*) atau muatannya (*Reissner-Nordstrom*).

II.3. DUNIA KUANTUM^[6]

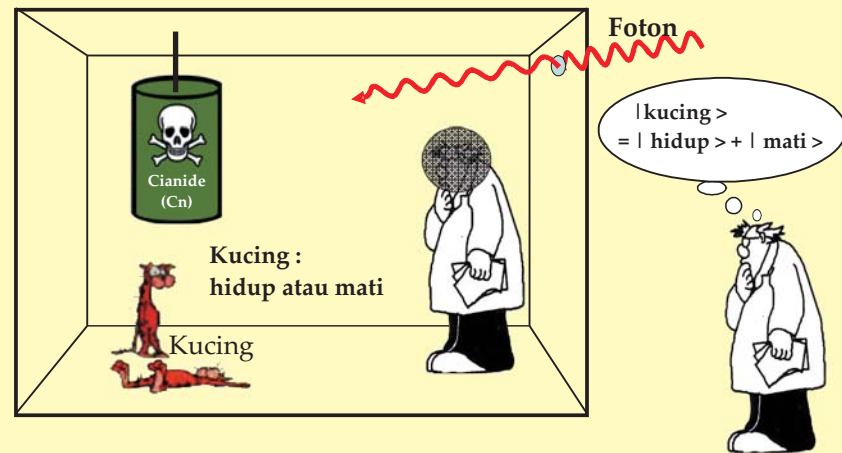
Subbab diatas membahas dinamika benda ukuran galaksi (biasanya digunakan ukuran parsec, 1 parsec = 3,086x10¹⁶ meter atau 3,262 tahun cahaya) serta kecepatan tinggi. Bagaimana halnya untuk benda mikroskopik, misalnya elektron dengan radius orde Angstrom = 10⁻¹⁰ meter atau *quark* yang jauh lebih kecil dari elektron, bahkan string dengan ukuran 10⁻³⁵ meter? Dengan ukuran elektron tersebut saya dapat menempatkan di ujung jari (sepanjang 1 sentimeter) dengan elektron sebanyak lebih dari 100 juta. Jika dikatakan bahwa ada sebuah elektron di ujung jari saya, apakah anda percaya? Karena kemungkinannya lebih kecil dari 1 dibagi 100 juta atau 10⁻⁸. Jadi, pada pengukuran benda mikroskopik diperhatikan juga efek kemungkinan atau probabilitas. Hal ini dinyatakan dalam prinsip ketidak-pastian Heisenberg. Hasil pengukuran secara serentak antara posisi partikel x dan momentumnya p selalu menemui ketidakpastian berikut:

$$\Delta x \Delta p \geq \frac{h}{4\pi}$$

dimana **konstanta Planck** $h = 6,63 \times 10^{-34} \text{ J s}$. Pembatasan hasil pengukuran sebesar h di atas tidak bergantung pada presisi alat yang dipakai atau kepandaian pengukur, tetapi merupakan hukum alam. Sehingga hasil pengukuran, misalnya posisi partikel, merupakan nilai rata-rata posisi dengan fungsi probabilitas berupa kuadrat harga mutlak fungsi keadaan $|\psi|^2$. Interpretasi probabilitas ini diajukan M. Born. Fungsi keadaan ψ memenuhi dinamika kuantum, persamaan Schrodinger. Interpretasi Born di atas nampaknya tidak disetujui Einstein, sehingga ia mengirim *postcard* kepada Born yang salah satu isinya menyatakan “Tuhan tidak bermain dadu”. Maksudnya ia yakin bahwa hukum alam bersifat deterministik, bukan probabilistik. Sampai saat inipun, perdebatan tentang konsep deterministik dan probabilistik dalam kuantum masih berlangsung. Skema eksperimen dalam pikiran (*gedanken experiment*) pada Gambar 7A (*Schrodinger Cat*) menjelaskan perbedaan pandangan tersebut. Misalkan pengamat di dalam kotak dan di luar kotak tidak dapat berkomunikasi satu sama lain, maka kesimpulan keduanya tentang keadaan kucing berbeda. Akibat foton mengenai racun sianida (CN) yang berada dalam kotak, racun CN menyebar. Pengamat dalam kotak secara pasti melihat keadaan kucing, hidup atau mati. Sedangkan pengamat di luar kotak menghitung keadaan kucing sesuai dengan prinsip kuantum yang berlaku pada foton, yang merupakan kombinasi linier keadaan hidup dan mati, sehingga keadaan kucing mempunyai probabilitas setengah untuk hidup dan setengah untuk mati. Mana yang benar? Untuk mengetahui secara pasti kedua keadaan tersebut, kotak dibelah atau dirusak. Berarti pengukuran dalam sistem kuantum merusak sistem dan hasil pengamatan akan berada pada keadaan yang sesuai dengan operasi pengukuran.

Gambar 7A

• Schrodinger Cat



Dalam limit klasik, untuk dinamika benda-benda berukuran meter, tentunya konstanta Planck h diabaikan. Persamaan di atas menjadi:

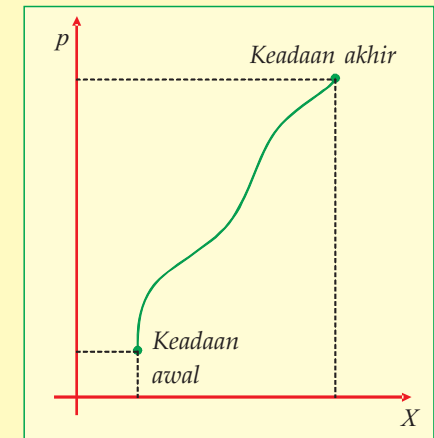
$$\Delta x \Delta p \geq 0.$$

Jika digambar dalam ruang posisi dan momentum (biasa disebut ruang fasa), lintasan sistem klasik hanya berupa sebuah lintasan saja. Pada lintasan kuantum, luas kotak dalam ruang fasa yang dibentuk ketidakpastian posisi Δx dan momentum Δp sama atau lebih besar $h/4\pi$, maka lintasan sistem kuantum menjadi sangat banyak, sehingga semua lintasan harus dijumlahkan (Gambar 7B dan 7C). Ide ini diambil dari R. Feynman dalam melakukan kuantisasi sistem fisis atau yang dikenal dengan *Feynman Path Integral*, FPI. Pendekatan kuantisasi cara FPI lebih intuitif dan banyak dimanfaatkan untuk mempelajari proses hamburan partikel dalam akselerator energi tinggi (CERN Eropa, KEK Jepang atau akselerator di Amerika).

Gambar 7B

Dunia Klasik

- Keadaan (*state*) sistem dikarakterisasi oleh momentum $p(t)$ dan posisi $X(t)$.
- Solusinya dinyatakan oleh himpunan $\{p(t), X(t); t \geq 0\}$.
- Pengukuran dalam sistem ini hanya bergantung kepada kepandaian pengukurnya. Secara prinsip, pengukuran ketidakpastian momentum (Δp) dan ketidakpastian posisi (ΔX) secara serentak memenuhi $\Delta p \Delta X \geq 0$.

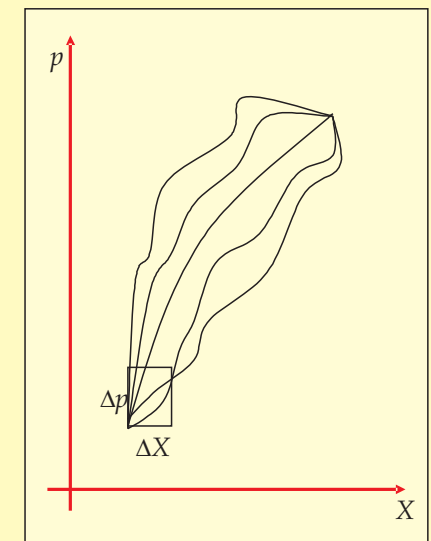


Trayektori Sistem Klasik

Gambar 7C

Dunia Kuantum

- Pengukuran dibatasi oleh ketidakpastian Heisenberg $\Delta p \Delta X \geq h$, h adalah konstanta Planck. Sehingga pengukuran momentum dan posisi secara simultan mengandung ketidakpastian, yang dibatasi oleh konstanta Planck h .
- Akibatnya: Keadaan **sistem tidak** dapat dikarakterisasi oleh himpunan p dan X .
- Untuk mengkarakterisasi sistem diambil fungsi gelombang ψ yang disimbolkan sebagai $|\psi\rangle$. Sebagai contoh *spin up* $|1\rangle$ dan *spin down* $|0\rangle$.
- Dan $|\psi|^2$ diinterpretasikan sebagai fungsi probabilitas (Max Born).



Trayektori Sistem Kuantum

Einstein: "Tuhan tidak bermain dadu"

Pendekatan lain untuk mengkuantisasi sistem fisis menggunakan formulasi kanonik. Formulasi ini mengharuskan variabel-variabel kanonik, contohnya posisi dan momentum, secara serentak atau dalam waktu yang sama, memenuhi hubungan komutasi tertentu. Jika variabel-variabelnya komutatif, maka hasil pengukuran serentak kedua variabel tersebut tidak saling mempengaruhi. Tapi jika tidak, maka pengaruhnya ada sehingga hasil pengukurannya mengandung ketidakpastian. Disinilah masuknya konsep probabilitas. Jadi konsep probabilitas berada pada level pengukuran atau fisis, bukan pada level formulasi. Pada level formulasi, misalnya dengan menggunakan persamaan Schrodinger, hasilnya fungsi keadaan ψ . Fungsi ini tidak mempunyai arti fisis walaupun informasi dapat dikorek dari fungsi tersebut. Solusinya deterministik, karena memenuhi persamaan diferensial dengan syarat batas tertentu. Pada level pengukuran, barulah konsep probabilitas muncul, karena $|\psi|^2$ diinterpretasikan sebagai fungsi probabilitas sistem (lihat tabel di bawah ini).

Tabel

	Sistem Klasik	Sistem Kuantum
Formulasi Keadaan Sistem	Deterministik: - Posisi, X - momentum, p	Deterministik: Fungsi Gelombang (State) Ψ
Pengamatan	Deterministik: - Posisi, X - Momentum, p	Probabilistik: Interpretasi Max Born Fungsi Probabilitas $ \psi ^2$
Pengukuran	Tidak ada interaksi antara objek yang diukur dan pengukur (pengamat)	Pengukur merusak informasi asli, sehingga menjadi keadaan yang sesuai dengan pengukur (pengamat)

Tahun 1975, S. W. Hawking menyelidiki efek kuantum di sekitar *blackhole*. Hasilnya sungguh di luar dugaan, karena benda ini memancarkan energi dengan entropi sebanding dengan luas "permukaannya" (*Hawking radiation*), sehingga *blackhole* tidak sesungguhnya hitam. Fakta ini memberi harapan baru untuk menggabungkan prinsip kuantum dan relativitas.

II.4. PRINSIP SIMETRI^[7]

Prinsip ini muncul berdasarkan fakta pengamatan bahwa ada kuantitas pengukuran yang bersifat "kekal" (*conserve quantities*), contohnya energi, momentum linier, momentum sudut, muatan. Ide dasarnya sebagai berikut. Misalkan kita mempunyai sebuah sistem, katakan tangan kita (kiri dan kanan). Jika ditangkupkan, bentuk jari di tangan kita tidak berubah. Ini berarti bentuk jari tangan *invariant* (tidak berubah) terhadap transformasi (operasi) penangkupan, walaupun waktu berjalan (dinamik). Ide ini kita terapkan pada sistem fisis yang direpresentasikan oleh aksi S. Jika aksi tersebut tidak berubah terhadap operasi translasi ruang-waktu, rotasi ruang-waktu, berarti ada kuantitas yang invarian. Kuantitas ini masing-masing energi, momentum linier, momentum sudut. Semua hasil di atas dituangkan dalam sebuah teorema yang bagus oleh Emmy Noether (*Noether's theorem*). Dalam dunia matematika, kesimetrian dipelajari dalam teori grup dan aljabar. Khususnya untuk operasi variabel kontinu seperti ruang-waktu dirumuskan oleh S. Lie (disebut *Lie group* dan *Lie algebra*) dan telah diklasifikasi oleh E. Cartan.

H. Poincare mempelajari operasi simetri ruang-waktu, yang berupa translasi dan rotasi. Hasilnya terdapat 10 parameter yang sekaligus menyatakan generator dari aljabar Poincare. Jika sistem fisis invarian terhadap operasi ini berarti kuantitas-kuantitas yang disebut di atas "kekal". Untuk rotasi saja (tanpa translasi), kita mengenal pula grup Lorentz (simbol $SO(3,1)$) dengan 6 parameter. Ada grup $U(n)$ yang mempertahankan sifat uniter selama operasi. Bagaimana halnya jika fungsi gelombang atau vektor ψ yang tidak berubah selama operasi?

Transformasi seperti ini (yang bukan transformasi pada variabel ruang-waktu) disebut transformasi *gauge*. Transformasi ini dipakai untuk menandai simetri pada interaksi lemah, kuat dan EM. Kuantitas kekal dalam operasi ini disebut "muatan".

Simetri pertukaran antara partikel boson dan fermion disebut supersimetri. Akibat langsung dari simetri ini adalah jumlah partikel spin bulat dan spin setengah bulat di jagad raya sama banyak. Tapi faktanya tidak demikian. Sebagai contoh kita mengamati partikel cahaya photon (spin nol), tetapi belum pernah diamati pasangan supersimetrinya *photino* (spin setengah). Banyak contoh lagi pelanggaran prinsip supersimetri di jagad raya, yang sampai saat ini belum dapat dijelaskan. Kemungkinan lain adalah partikel-partikel supersimetri berupa *dark matter* dan *dark energy*, sehingga tidak dapat diamati secara langsung, yang datang dari dimensi ekstra. Penelitian kearah ini sedang dilakukan oleh beberapa kelompok riset di dunia (lihat Subbab V.2).

III. MIMPI EINSTEIN DAN GRAND UNIFIED THEORY (GUT)

III.1. TEORI KALUZA DAN KLEIN^[8]

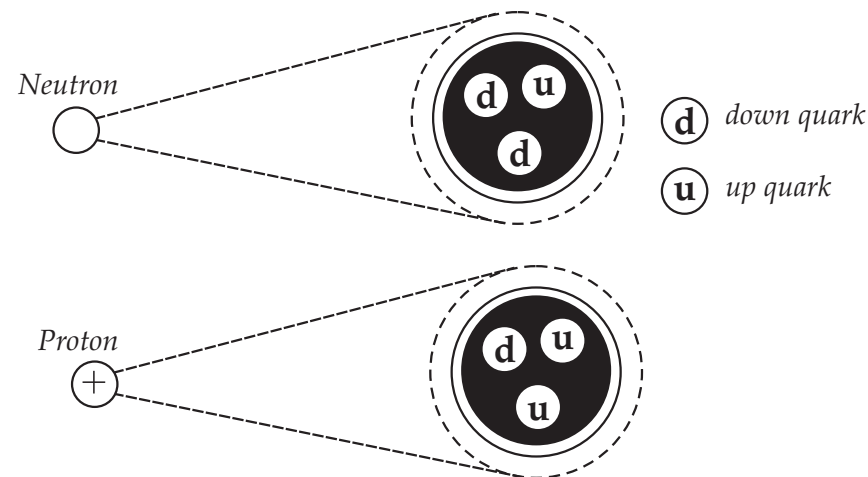
Beberapa tahun setelah Einstein menerbitkan papernya tentang Relativitas Khusus (*Special Relativity*, SR) dan Relativitas Umum (*General Relativity*, GR), dia memimpikan ada sebuah teori yang dapat menjelaskan semua gejala alam, paling tidak teori yang dapat menjelaskan sekaligus GR dan EM (karena dia tidak percaya dengan teori kuantum). Keinginannya kemudian direalisasikan oleh Th. Kaluza dan O. Klein. Dalam papernya Kaluza mengenalkan sebuah cara baru bagaimana menyatukan gravitasi dan elektromagnetik dengan menggunakan dimensi ekstra. Sebagaimana diketahui, elektromagnetik dapat dijelaskan oleh persamaan-persamaan Maxwell yang memiliki simetri *gauge* internal $U(1)$. Dilain pihak, gravitasi dalam GR, simetri eksternalnya (simetri ruang-waktu)

memiliki simetri *Lorentz* lokal. Agar kedua teori di atas dapat disatukan, Kaluza kemudian menambahkan satu dimensi ruang ekstra sehingga menjadi gravitasi dalam ruang-waktu 5-dimensi (1 buah dimensi ekstra). Ide Kaluza hanya model matematis dan melalui asumsi bahwa semua kuantitas dalam komponen-komponen metrik tidak bergantung pada dimensi ekstra, maka diperoleh kembali elektromagnetik Maxwell dan gravitasi. Klein melakukan riset yang sama, namun memberikan argumentasi bahwa dimensi tersebut sangat kecil (berukuran skala Planck) dan terkompaktifikasi pada sebuah lingkaran. Penggabungan EM dan GR dalam model ini dikenal dengan teori Kaluza-Klein.

Dari geometri Kaluza-Klein, medan-medan lain ditambahkan di dalam metrik. Bagian tambahan ini akan menghasilkan elektromagnetik Maxwell dan sebuah medan skalar yang dinamakan *dilaton*. Sedangkan foton adalah komponen dari graviton dimensi ke 5. Spektrum massa untuk modus ke- n kemudian berbanding terbalik dengan besarnya dimensi ekstra, sehingga massa menjadi sangat besar. Dengan demikian, untuk mengamati efek dari penambahan dimensi ruang, diperlukan energi yang sangat tinggi. Karena itu modus-modus bermassa (*massive*), efektif pada energi yang sangat tinggi, pada energi rendah hanyalah modus-modus tak bermassa (*massless*) yang diamati. Meskipun Kaluza-Klein berhasil dalam menyatukan gravitasi dan elektromagnetik, kehadiran medan skalar dilaton masih merupakan masalah. Teori ini kurang tepat ketika menjelaskan mengapa gravitasi lebih lemah daripada elektromagnetik dan mengapa dimensi ekstra sangat kecil. Walaupun teori ini secara geometri sangat "indah", tetapi secara fisis tidak dapat diterima, karena tidak mengakomodasi hukum kuantum. Meskipun Einstein tidak percaya dengan realitas kuantum, tetapi tidak dapat dipungkiri bahwa ketakpastian Heisenberg merupakan prinsip fundamental di alam, sehingga teori unifikasi *a'la* Kaluza-Klein harus juga memenuhi kaedah kuantum. Namun demikian, ide kompaktifikasi Kaluza-Klein menjadi populer kembali setelah kelahiran teori-teori dimensi ekstra, misalnya superstring, *D-Brane* dan teori M.

III.2. PARTIKEL ELEMENTER DAN INTERAKSI FUNDAMENTAL^[9].

Hal yang mendasar agar dapat menjelaskan perilaku partikel dan interaksinya di alam semesta adalah mencari penyusun materi yang paling fundamental. Telah diketahui bahwa semua materi dibentuk dari atom-atom yang berukuran Angstrom (1 Angstrom = 10^{-10} m) dan membentuk molekul-molekul setelah melalui proses kimia. Namun demikian, atom bukanlah penyusun materi yang paling fundamental karena atom masih terdiri dari inti yang dikelilingi oleh elektron-elektron yang bermuatan negatif. Inti atom jauh lebih kecil dari atom, hanya menempati satu persepuluh ribu bagian dari ukuran atom. Inti atom terdiri dari proton bermuatan positif dan neutron yang tidak bermuatan (netral), secara kolektif dinamakan sebagai nukleon. Proton dan neutron itu sendiri ternyata bukan partikel fundamental penyusun materi. Substruktur yang lebih fundamental dinamakan *quark*. Proton terdiri dari tiga quark: dua *up quark* dan satu *down quark*, sedangkan neutron terdiri dari satu *up quark* dan dua *down quark* (Gambar 8). Quark-quark tersebut terikat bersama-sama melalui interaksi kuat.



Gambar 8. Neutron dibangun dari sebuah *up quark* dan dua buah *down quark*, muatan listrik nol, warna netral. Proton dibangun dari dua buah *up quark* dan sebuah *down quark*.

Sampai saat ini, elektron dapat dikatakan fundamental karena elektron tidak dapat dibagi lagi menjadi partikel yang lebih kecil dan tidak mengandung substruktur serta telah diketahui secara lengkap sifat-sifatnya seperti massa, spin dan muatan. Elektron merespon gaya magnetik ketika bergerak melalui medan magnetik lintasannya akan membelok. Kedua fenomena ini akibat dari muatan negatif elektron, yang menyebabkan elektron merespon medan listrik dan magnetik.

Ada tiga tipe dari setiap varitas quark. Label untuk perbedaan ini dinyatakan dengan warna atau *color* (disamping muatan listrik): merah (*red*), hijau (*green*) dan biru (*blue*). Jadi ada up quark merah, up quark hijau dan up quark biru. Begitu pula untuk down quark. Quark yang berwarna tersebut selalu ditemukan dengan quark lain dan antiquark, terikat bersama-sama dalam *kombinasi warna-netral*. Ini adalah kombinasi dimana warna interaksi kuat dari quark dan antiquark saling menghilangkan satu sama lain, analog dengan warna-warna yang menghasilkan warna putih dalam kombinasinya. Selain varitas warna, *up quark* memiliki muatan listrik $+2/3$ dan *down quark* memiliki muatan $-1/3$ maka proton memiliki muatan listrik: $2(2/3)+(-1/3)=+1$ dan neutron memiliki muatan listrik $(2/3)+2(-1/3)=0$.

Dengan dikembangkannya akselerator partikel, misalnya pusat laboratorium riset partikel elementer di Eropa CERN, DESY di Hamburg, Fermi National Laboratory di Chicago dan SLAC di San Fransisco, banyak sekali penemuan partikel-partikel berenergi tinggi yang merupakan resonansi dari proton dan neutron. Penemuan partikel *muon* dari radiasi sinar kosmik mempunyai sifat sama dengan elektron tetapi berbeda massanya. Selain itu ada pula *neutrino* yang berasal dari radioaktivitas, yaitu neutron meluruh menjadi proton, elektron dan neutrino. Sampai saat ini telah ditemukan lebih dari 200 partikel baru. Partikel-partikel tersebut kemudian dikelompokkan dan dicari pola bagaimana sebenarnya partikel-partikel berinteraksi. S. Weinberg memberikan suatu istilah yang dinamakan Model Standar (*Standard Model*).

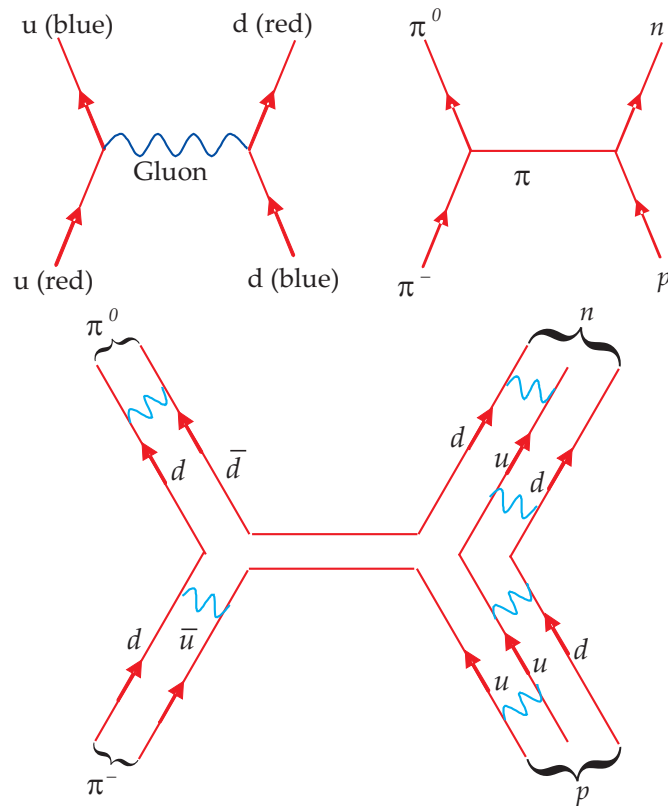
Partikel yang ditemukan kemudian dikelompokkan ke dalam teori ini. Model Standar juga menggambarkan tiga (dari empat) interaksi yang dialami partikel-partikel elementer: elektromagnetik (*electromagnetic*), lemah (*weak*) dan kuat (*strong*). Sedangkan interaksi gravitasi tidak dimasukkan karena asumsinya interaksi ini terlalu lemah untuk berperan dalam interaksi antar partikel elementer. Ini adalah salah satu problem yang belum terpecahkan dalam Model Standar. Model Standar kemudian dapat menerangkan interaksi yang kompleks hanya dengan 6 quarks, 6 lepton, dan partikel pembawa interaksi.

Empat interaksi yang disebutkan di atas diyakini sebagai pembentuk alam semesta. Interaksi antara dua partikel bergantung dari tipe partikel dan jarak antara partikel tersebut. Tiap interaksi selalu ingin membuat setiap partikel meluruh menjadi partikel dalam keadaan energi yang lebih rendah. Kekuatan relatif dari interaksi sering digambarkan dengan kekuatan kopling. Keberadaan interaksi lemah misalnya tidak dapat dirasakan dalam kehidupan sehari-hari karena sangat lemah, interaksi ini esensial untuk beberapa proses peluruhan inti (nukleon), misalnya peluruhan neutron menjadi proton, elektron dan neutrino. Energi yang dilepaskan kemudian menjadi daya nuklir. Teori untuk interaksi lemah pertama kali dikenalkan oleh Fermi pada tahun 1933, lalu dikaji ulang oleh Lee dan Yang, Feynman dan Gell-Mann dan lainnya pada tahun 50-an dan disempurnakan teorinya oleh Glashow, Weinberg, dan Salam pada tahun 60-an^[10]. Dalam teori ini, mediator untuk pertukaran partikel adalah boson gauge lemah (*weak gauge boson*). Ada tiga boson gauge lemah: W^+ , W^- dan Z^0 (kapital W menyatakan interaksi lemah sedangkan tanda + dan - adalah muatan boson lemah). Boson gauge yang Z^0 ketiga adalah netral dan dinamakan Z^0 karena muatannya nol (*zero charge*).

Interaksi kuat bekerja pada proton dan neutron dalam inti. Karena kuatnya maka mereka tidak pernah dapat dipisahkan. Sebagai contoh energi ikat deuteron yang terikat dalam sebuah sistem proton sebesar 2 MeV. Jika dibandingkan dengan energi ikat elektromagnetik elektron dalam atom

hidrogen, besarnya sekitar 100 ribu kali kuatnya. Gaya ini bekerja pada rentang skala 10^{-15} meter. Gaya kuat diusulkan oleh Hideki Yukawa tahun 1934 dan dikaji melalui kromodinamika kuantum (*Quantum Chromodynamics, QCD*), yaitu teori yang dapat menjelaskan pertukaran boson gauge kuat. Boson gauge kuat dinamakan *gluon*, yang mengkomunikasikan gaya untuk partikel-partikel yang berinteraksi secara kuat terikat bersama-sama, seperti lem atau "glue" (Gambar 9).

Interaksi yang ketiga adalah elektromagnetik. Secara klasik, EM bekerja antara dua buah partikel bermuatan listrik, misalnya sebuah elektron yang bermuatan negatif dan sebuah proton yang bermuatan positif tarik menarik satu dengan yang lain dengan besarnya interaksi sebanding dengan muatan listrik dan kuadrat jarak keduanya. Dalam kajian fisika partikel, EM meliputi prediksi-prediksi persamaan Maxwell serta efek kuantumnya. Foton merupakan partikel kuantum interaksi EM dan sebagai mediator pertukaran partikel. Elektron yang masuk pada daerah interaksi ini mengemisikan foton dan kemudian merambat ke elektron yang lain, mengkomunikasikan interaksi EM, kemudian lenyap. Tidak semua proses meliputi foton yang kemudian lenyap (sebagai *partikel internal*), ada juga proses riil yang melibatkan *partikel eksternal*, partikel yang masuk atau meninggalkan daerah interaksi. Partikel-partikel seperti ini seringkali dibelokkan dan pula dapat berubah menjadi partikel lain. Partikel-partikel yang masuk atau meninggalkan suatu daerah interaksi merupakan partikel-partikel fisis riil. Karena tidak bermassa, jangkauan potensial elektromagnetiknya tidak berhingga. Keberadaan foton sebagai *boson gauge* mendorong P. Dirac, R. Feynman dan J. Schwinger serta S.I. Tomonaga yang bekerja secara terpisah, mengembangkan mekanika kuantum dari foton dan melahirkan elektrodinamika kuantum (*Quantum Electrodynamics, QED*). Sampai saat ini, QED merupakan salah satu teori yang sukses secara fenomenologi.



Gambar 9.

Diagram Feynman interaksi $\pi^- p \rightarrow \pi^0 n$ dalam model quark.

Interaksi ke empat adalah gravitasi yang berupa atraksi antara dua partikel dan besarnya sebanding dengan massa-massa dari partikel dan berbanding terbalik dengan kuadrat jarak antara kedua partikel. Sehingga kuatnya gravitasi bergantung pada jarak antara kedua massa tersebut. Gaya ini efektif bekerja pada jarak yang jauh seperti gaya antara planet dan galaksi. Partikel perantara yang mengkomunikasikan interaksinya dinamakan *graviton*. Secara detil interaksi ini dibahas pada Bab berikut.

IV. GRAVITASI KUANTUM

IV.1. GRAVITASI KUANTUM DALAM 2- DAN 3-DIMENSI^[11]

Gravitasi kuantum 2-dimensi memiliki kesesuaian baik pada superstring, maupun konsistensinya untuk dimensi lebih tinggi. Pendekatan konvensional terhadap teori ini bersifat perturbatif. Pada level kuantum, fungsi partisi Z menjumlahkan seluruh geometri 2 dimensi yang dikarakterisasi oleh *genus*, selain medan kuantum. Namun penjumlahan tersebut memiliki sifat divergen, karena suku-sukunya melonjak tajam sejalan dengan meningkatnya jumlah genus secara faktorial.

Pendekatan berbeda kemudian diterapkan untuk mengatasi soal divergensi di atas. Caranya dengan membuat aproksimasi triangulasi dinamik (*dynamical triangulation*) bentuk segitiga atau segiempat pada permukaan 2-dimensi. Untuk topologi tertentu, kemudian diambil bentuk triangulasinya menuju nol, sekaligus diambil banyaknya bentuk triangulasi menuju tak hingga (*double scaling limit*). Dengan mengambil aproksimasi ini, bentuk energi bebas $E=lnZ$ memenuhi suatu persamaan tertentu yang dapat dipecahkan secara analitik maupun numerik.

Dinamika triangulasinya sendiri berupa matrik (NxN) yang hermitian, yaitu *dual diagram* dari diskritisasi yang berbentuk diagram Feynman. Sebagai contoh, model yang berhubungan dengan gravitasi (muatan sentral $C=0$) mengandung matrik hermitian tunggal dan Ising spin ($C=1/2$) mengandung dua buah matrik hermitian. Dengan menggunakan pendekatan ini, divergensi yang timbul dapat diatasi. Solusinya kemudian dapat dinyatakan dalam suseptibilitas string (turunan kedua E terhadap temperatur pada titik kritis) yang memenuhi persamaan diferensial non-linear dalam hierarki K-P (Kadomtsev-Petviashvili). Problemnnya beralih sekarang mencari solusi persamaan diferensial tersebut. Untuk kelas-kelas tertentu, solusinya dapat ditemukan secara eksak, yang berarti pula gravitasi kuantum 2-dimensi dapat dipecahkan, sekaligus deret perturbatifnya konvergen.

Pendekatan triangulasi ini kemudian diaplikasikan untuk dimensi lebih besar dari dua, misalnya $D=3$ atau $D=4$. Walaupun secara matematis formulasinya konsisten, tetapi ada masalah yang timbul, terutama dalam hal penjumlahan bentuk topologi serta sifat konvergensi dalam orde perturbasinya. Kegagalan ini mendorong orang untuk mencari formulasi yang lebih baik.

Kuantisasi gravitasi berikutnya yang menarik adalah dalam 3 dimensi (2 dimensi ruang ditambah 1 dimensi waktu). Di sini, aksinya diambil bentuk *Chern-Simons-Witten* (CSW) yang merupakan invarian topologi dalam ruang berdimensi 3, sehingga jika digunakan formalisme FPI, dengan cara integrasi seluruh ruang, didapat bentuk yang eksak. Fakta yang menarik, invarian terhadap transformasi gauge ekuivalen dengan invarian terhadap transformasi koordinat umum, sehingga prinsip gravitasi Einstein otomatis terkandung dalam teori ini. Jelasnya, koneksi berbentuk medan gauge A_μ yang berada dalam aksi CSW di atas dilengkapi dengan grup Poincare 3 dimensi $ISO(2,1)$. Grup ini non kompak atau parameternya tak berhingga. Secara lokal manifold 3-dimensi didekomposisi dalam $M_3 \approx M_2 \otimes R$, sehingga dinamikanya diparameterisasi oleh koordinat R . Kuantisasi untuk kasus ini memanfaatkan hasil-hasil yang telah dicapai dalam teori medan konformal (CFT) pada M_2 .

Dalam level kuantum, observabel atau hasil pengamatannya dapat direpresentasikan oleh *knot* dan *link* yang dalam istilah fisika dikenal sebagai operator *Wilson loop*. *Knot* dan *link* dibangun melalui hubungan rekursif *skein relation*. Untuk grup gauge $SU(2)$, *knot* dan *link*-nya berupa *Jones polynomial invariant* (suatu polinomial dalam 3-dimensi yang dibangun oleh Field Medalist tahun 1990, V. Jones), sedangkan untuk grup $SU(N)$ dikenal dengan polinomial HOMFLY (diambil dari nama Hoste, Ocneanu, Millet, Freyd, Lickorish, Yetter). Sampai saat ini, bentuk invarian polinomial untuk seluruh *Lie group* dalam klasifikasi Cartan serta *graded Lie group* telah dihitung oleh beberapa kelompok riset.

Jadi, walaupun teori ini dapat dipecahkan secara eksak tetapi

interpretasinya lebih bersifat topologi dan geometri. Sisi fisis yang muncul lebih banyak pada pemanfaatan konsep QFT, CFT dan observabelnya. Perhitungan hamburan gravitasi memberi hasil yang menarik, karena dapat pula direpresentasikan dalam formula yang ekuivalen dengan *skein relation* di atas. Akibatnya *knot* dan *link* tiada lain merupakan hamburan gravitasi dalam model ini, sehingga interpretasi matematisnya lebih menonjol dibanding fisisnya (lihat kaitannya dengan Bab VI).

IV.2. GRAVITASI KUANTUM DALAM 4-DIMENSI^[12]

Pada Subbab di atas, sebagai model telah dipecahkan masalah gravitasi kuantum, cuma sayangnya pada 2-dimensi dan 3-dimensi, sedangkan kita berada pada 4-dimensi (1 dimensi waktu ditambah 3 dimensi ruang). Oleh sebab itu, kita sekarang meninjau teori ini dalam 4-dimensi.

Dalam perspektif kanonik, variabel dinamik dalam GR berupa metrik ruang-waktu $g_{\alpha\beta}(X) \approx 1 + h_{\alpha\beta}(x)$, dimana α, β bernilai 1 sampai 4 (banyaknya dimensi ruang-waktu) dan diaproksimasi sampai suku pertama dalam $h_{\alpha\beta}$ yang berperan sebagai graviton, beserta momentum konjugatnya. Dalam level kuantum, kedua variabel yang berbentuk operator tersebut haruslah memenuhi hubungan komutasi tertentu untuk waktu t yang sama (*equal-time commutator*). Dilain pihak gravitasi bersifat invarian terhadap transformasi "gauge". Sifat ini merupakan konsekuensi langsung dari *diffeomorphism* pada *manifold* ruang-waktu yang ditinjau. Invarian *gauge* dalam gravitasi berarti bebas untuk memilih sistem koordinat, sehingga komutator antara variabel dinamik dan konjugatnya untuk waktu tertentu menjadi tidak berarti. Karena tidak ada waktu yang unik, maka parameter lainpun boleh diambil untuk mewakili variabel waktu. Akibatnya formulasi kanonik gagal diterapkan untuk mengkuantisasi teori gravitasi. Masalah waktu ini merupakan problem tersendiri dalam GR. Kemudian dicari cara lain, yaitu dengan memandang GR sebagai medan gravitasi, sehingga teknik untuk QFT dan prinsip kuantum dapat diaplikasikan bersama-sama, yaitu

Medan Kuantum Gravitasi. Yang harus dicari pertama sekali adalah label partikel kuantumnya graviton. Secara prinsip harus dibangun teori yang memenuhi SR atau *Lorentz covariance*. Ini berarti bahwa persamaan gerak (*Equation of Motion*, EOM) bertransformasi terhadap representasi grup Lorentz $SO(3,1)$ yang dapat diimplementasikan dengan mengambil medan gravitasi sebagai representasinya dan membangun fungsi skalar pada aksinya. Dari fakta matematik terdapat bilangan yang dapat melabelkan representasi grup di atas, yang disebut spin dari medan, yang bernilai bulat $(0, 1, 2, 3, \dots)$, biasa disebut *boson* dan setengah bulat $(1/2, 3/2, \dots)$ atau *fermion*. Konfigurasi medan gravitasi, seperti halnya medan elektromagnetik, terdiri dari superposisi keadaan yang mengandung banyak kuantum (bersifat "sosial", tidak menyendiri hanya satu kuantum). Dari prinsip eksklusi Pauli, yang mengatakan bahwa partikel spin setengah bulat bersifat "soliter" sedangkan partikel spin bulat bersifat "sosial", disimpulkan bahwa graviton haruslah berspin bulat. Dilain pihak, spin 0 pun tidak memenuhi syarat karena harus berinteraksi dengan foton spin 0 (kuantum medan EM) misalnya, supaya dapat terjadi defleksi cahaya oleh benda bermassa. Demikian pula halnya dengan spin 1, karena partikel ber spin 1 interaksinya bisa atraktif atau repulsif, sedangkan gravitasi interaksinya selalu atraktif atau tarik-menarik. Jadi kemungkinannya adalah graviton berspin 2 dan tidak bermassa (*massless*) untuk menjaga sistemnya invarian terhadap transformasi *gauge* yang telah disinggung di atas. Dengan argumentasi ini, bentuk aksi Einstein-Hilbert dapat ditulis sebagai

$$S = \int \sqrt{-g} R d^4x + k S_{matter}$$

dimana konstanta $k = \frac{8\pi G}{c^4}$ dan S menyatakan aksi, R menyatakan skalar *Ricci* yang mengandung suku perkalian metrik sehingga nonlinier dan S_{matter} menggambarkan aksi medan materi. Prosedur standar untuk kuantisasi dengan suku nonlinier pada graviton adalah teori perturbasi (gangguan), dimana terdapat suku yang bebas dari perkalian metrik (*free part*) dan kemudian suku nonlinier yang diambil sebagai perturbasi. Dari analisa dimensi, suku perturbasi

pada *tree level* berbentuk $1+GE^2$. Dari sini dapat disimpulkan bahwa dimensi $G \sim [E]^{-2} \sim [M]^{-2}$ atau G (dalam notasi $\hbar = c = 1$) sebanding dengan minus kuadrat massa E . Ini berarti pula suku-suku perturbasi berikutnya akan bertambah besar. Hal ini dikatakan bahwa gravitasi kuantum tidak *renormalizable* karena suku perturbasinya bersifat divergen. Akibatnya gravitasi dan kuantum tidak dapat digabung dengan menggunakan kerangka teori di atas.

Seperti dijelaskan dalam Pendahuluan, energi sebesar itu ada pada saat pembentukan alam semesta. Ini berarti efek kuantum gravitasi signifikan pada awal alam semesta, sedangkan energi jauh di bawah itu misalnya sekarang ini, efek tersebut dapat diabaikan. Dari uraian diatas dapat pula disimpulkan bahwa pada saat alam semesta terbentuk, yaitu pada waktu $t=10^{-43}$ detik, panjang alam semesta $l=10^{-35}$ meter dengan energi seperti tersebut di atas, maka gravitasi, kuantum serta interaksi elektromagnetik, lemah dan kuat haruslah bersatu (unifikasi) dalam satu kerangka teori (lihat gambar 2A dan 2B). Orang menamakannya sebagai *Theory of Everything* (TOE), karena dikira bahwa dengan TOE maka semua gejala alam seyogyanya dapat dijelaskan oleh teori tersebut. Bab berikutnya, saya akan membahas teori superstring, sebagai salah satu kandidat TOE.

V. TEORI STRING, BRANE, DAN KOSMOLOGI

V.1. SUPERSTRING DAN TOE^[13].

Dengan memodelkan partikel sebagai string, timbul banyak pertanyaan, misalnya bagaimana menghubungkan string yang berbentuk tali, dengan partikel titik yang ada sekarang, misalnya elektron, proton, neutron. Dan yang lebih penting, bagaimana model string dapat mengakomodasi gravitasi. Dalam QFT, medan merupakan objek yang dapat menghasilkan partikel-partikel dalam ruang, yang merupakan eksitasi dari beberapa medan dan interaksi. Dalam

model string, objek ini dapat berosilasi dan menghasilkan spektrum massa atau energi yang terkait dengan keadaan osilasi yang berbeda. Ini berarti bahwa segala sesuatu, termasuk elektron dan quark adalah akibat dari osilasi string. Ada dua jenis string: string terbuka (*open string*) yang memiliki dua titik ujung dan string tertutup (*closed string*) yang berupa *loop* dan tidak memiliki ujung.

Menurut prinsip *least action*, trayektori menempuh lintasan yang paling optimum. Dalam kasus partikel, panjang lintasan (*worldline*) digambarkan oleh

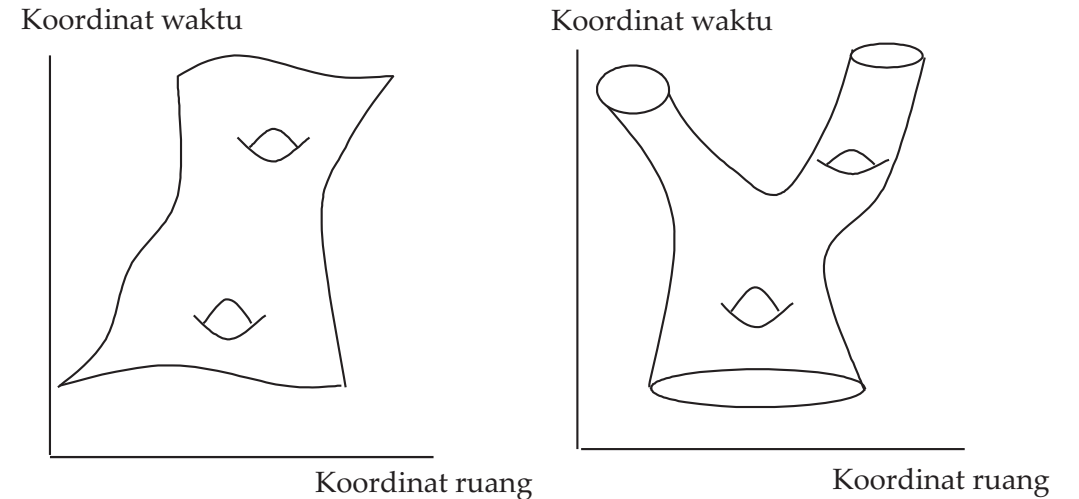
$$S = -m \int ds$$

dimana ds adalah elemen panjang. Pada level kuantum, lintasan yang mungkin menjadi sangat banyak, sehingga dengan menjumlahkan semua lintasan yang mungkin tersebut, secara otomatis kita telah melakukan kuantisasi teori ini. Konsep yang sama dapat digunakan untuk model string. Bedanya dengan partikel titik adalah, disini yang dijumlahkan berupa luasan (*worldsheet*) yang digambarkan oleh

$$S = -\frac{T}{2} \int d^2 \sigma \sqrt{-\gamma} \gamma^{ab} \partial_a X^\mu \partial_b X_\mu \quad \text{suku fermion}$$

Notasi X^μ di atas, dalam pandangan *worldsheet* adalah boson dan dalam *background* ruang-waktu bersifat vektor, sedangkan γ^{ab} metrik 2-dimensi yang menampung semua bentuk geometri dalam dimensi 2, yang bentuknya bisa bermacam-macam, misalnya bola, bentuk kue donat dan lain-lain (Gambar 10). Berikutnya suku fermion dimasukkan supaya model string bersifat supersimetrik dan menjadi *superstring*. Untuk menghubungkannya dengan dunia partikel yang telah ditemukan terlebih dahulu, maka eksitasi string yang frekuensinya berbeda-beda diinterpretasikan sebagai massa partikel yang ada. Misalnya pada keadaan yang paling dasar, yaitu keadaan tanpa eksitasi, partikelnya disebut *tachyon* yang bermassa diam imajiner, kecepatan geraknya melebihi kecepatan cahaya (wilayah *space-like*). Karena belum pernah ditemukan, biasanya orang "meniadakan" partikel ini. Eksitasi berikutnya adalah partikel dengan massa diam nol. Disinilah terdapat partikel graviton

(partikel kuantum gravitasi), foton, *dilaton* dan *axion*. Dengan cara ini, gravitasi digabung dengan teori kuantum tanpa menimbulkan masalah divergensi.



Gambar 10.

String terbuka (open string) dan string tertutup (closed string) yang berpropagasi dalam ruang-waktu dimensi D.

Jikapun timbul anomali, hal ini dapat diabaikan asal saja ruang-waktunya berdimensi $D=10$. Terdapat 5 jenis superstring yang konsisten dengan gravitasi, kuantum dan supersimetri yaitu, Tipe I, Tipe IIA, Tipe IIB, Heterotic $SO(32)$ dan Heterotic $E_8 \times E_8$. Tipe I adalah superstring terbuka tak terorientasi, Tipe II berbentuk superstring tertutup terorientasi. I dan II bergantung pada jumlah generator supersimetrinya sedangkan A dan B menandai kiralitasnya (*chirality*), yaitu kiralitas sama untuk A dan berlawanan untuk B. Superstring heterotik adalah teori yang menggunakan string bosonik (26-dimensi) untuk mode kirinya dan menggunakan superstring (10-dimensi) untuk mode kanannya. 16 dimensi, yang merupakan sisa dari 26 dimensi string bosonik pada mode kiri, dikompaktifikasi sehingga dapat dipandang sebagai medan dengan 16 komponen pada 10-dimensi. Teori-teori ini supersimetrik, mengandung partikel

graviton spin-2, dan partikel tak bermassa lainnya. Sehingga limit energi rendahnya menghasilkan model yang kita kenal dalam 4-dimensi yaitu *Standard Model* dan teori relativitas umum ditambah dengan partikel-partikel lain yang belum pernah ditemukan. Sebagai contoh, dalam limit energi rendah dan keadaan tak bermassa (*massless states*) superstring Heterotic mempunyai 8064 states, yang terdiri dari partikel-partikel *supergravity* dan *superpartner*-nya, anti-simetrik tensor, serta partikel *Yang-Mills* dari model standar serta *superYang-Mills*. Jika dilihat sekilas, keadaan pada level ini terlalu banyak, sehingga tidak dapat ditampung dalam model standar yang ada. Dari fakta ini, orang masih meragukan kebenaran teori string.

Walaupun masih meragukan, secara prinsip TOE yang kita kenal saat ini diwakili oleh superstring, karena dapat menggabungkan gravitasi, kuantum dan model standar dalam ke 5 jenis teori di atas. Melalui simetri dualitas (*duality symmetries*), ke 5 jenis teori tersebut dapat digabung dalam satu kerangka teori M (diambil dari kata *Mother* atau *Matrix* mungkin juga *Mystery*) pada ruang-waktu dimensi $D=11$.

Masalahnya, bagaimana membuang sisa dimensi ekstra (sebanyak 6 dimensi), karena kita sadari ruang-waktu yang kita tempati berdimensi empat (satu dimensi waktu dan tiga dimensi ruang), yang dapat ditulis menjadi $M_{10}=M_4 \otimes M_6$? Caranya dengan kompaktifikasi (seperti yang pernah dilakukan pada teori Kaluza-Klein), yaitu mengecilkan dimensi ekstra M_6 menjadi panjang *Planck*. Jadi wajar saja jika kita hanya merasakan ruang-waktu berdimensi 4, karena dimensi ekstranya terkompaktifikasi sangat kecil dan tidak dapat dideteksi oleh akselerator yang ada sekarang. Ada beberapa metode kompaktifikasi, misalnya dengan membuat M_6 berbentuk torus atau silinder, bentuk *Calabi-Yau* dan *orbifold*.

V.2. DIMENSI EKSTRA DAN DUNIA BRANE^[14]

Selanjutnya para ahli fisika meluaskan konsep string lebih jauh. Bentuk partikel, bahkan jagad raya pun mengambil konsep ini. Kita bukan hanya menjumlahkan luas (*membrane*) tetapi juga objek lain yang diperluas dimensinya, atau dikenal istilah *D-branes*. Misalnya untuk dimensi $D=1$ disebut string (*1-branes*), dengan $D = 2$ dinamakan *membrane* dan seterusnya. Alam semesta kita mempunyai dimensi ruang $D=3$ dikenal sebagai *3-branes*. Termotivasi dari teori-M heterotik dalam ruang-waktu $D=11$, dan kompaktifikasinya menuju ke lima dimensi melalui *Calabi-Yau manifold*, sebuah skenario dunia brane (*braneworld*) 5-dimensi telah memperjelas hubungan antara gravitasi, fisika partikel dan kosmologi yang sebelumnya sulit untuk dipahami dengan hanya tiga dimensi ruang. Dimensi yang dikompaktifikasi memiliki ukuran yang sangat kecil yang direpresentasikan sebagai panjang Planck yaitu 10^{-35} meter, dan sampai saat ini belum ada alat untuk mengamati ukuran sekecil ini.

Konsekuensi yang menarik dari konsep *braneworld*, dapat menampung kehadiran *dark radiation* dan *dark matter* dalam kosmologi. Kehadiran kedua "dark" tadi untuk menjelaskan mengapa alam semesta berekspansi mengembang dan dipercepat, bukannya mengecil. Dalam geometri lengkung, ruang dan waktu terintegrasi menjadi sebuah ruang-waktu tunggal yang dapat terdistorsi oleh distribusi materi dan energi. Dari konsep ini dapat dipahami bahwa jika *D-brane* dimasukkan dalam ruang-waktu yang dimensinya lebih tinggi dari dimensi brane itu sendiri maka brane akan mendistorsi ruang-waktu tersebut. Selain itu, model-model *D-brane* diharapkan sebagai suatu pencerahan baru tidak hanya untuk gravitasi kuantum dan isu unifikasi namun juga dalam masalah-masalah kosmologi seperti konstanta kosmologi dan radiasi gelap (*dark radiation*), serta dalam fisika partikel seperti permasalahan hirarki (*hierarchy problem*). Ada pula sebuah alternatif dunia brane yang digunakan sebagai standar *big-bang* dengan skenario inflasi. Skenario ini terdiri dari sebuah *bulk* 5-dimensi dimana *D-brane* ditempatkan pada titik-titik tetap dari orbifold S^1/Z_2 . Dalam *brane*

world, semua partikel model standar terikat dalam *brane* dan hanya gravitasi yang dapat berpropagasi kemana-mana, baik di *brane* maupun di *bulk*.

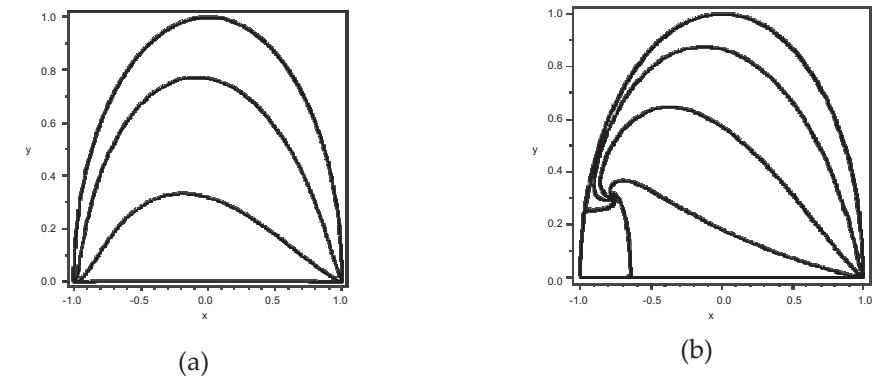
Sejauh ini, dinamika alam semesta pada skala Planck atau saat jagad raya terbentuk, secara teoretik belum tersentuh baik oleh model superstring maupun *D-brane*. Dari fenomenanya, orang memahami bahwa dalam skala ini, momentum maupun energi belum merupakan besaran kekal. Dengan kata lain, invarian Lorentz dilanggar pada skala ini.

V.3. PELANGGARAN LORENTZ DAN KOSMOLOGI^[15]

Kosmologi merupakan kajian sains tentang struktur, evolusi, dan awal alam semesta yang berlandaskan pada relativitas umum (GR), prinsip kosmologi, dan deskripsi materi sebagai fluida sempurna. Variabel dinamik dalam GR diperankan oleh tensor metrik yang dinamikanya memenuhi persamaan medan Einstein dan tereduksi menjadi dinamika faktor skala (setelah mengambil model kosmologi Friedmann, Robertson dan Walker). Menurut prinsip kosmologi, alam semesta homogen dan isotropik pada skala besar. Meskipun GR dapat memprediksi evolusi dari setiap sistem gravitasi di alam semesta, teori tersebut tidak dapat diterapkan pada skala jarak yang ekstrim, misalnya skala Planck. Pada skala ini, invarian *Lorentz* dilanggar. Aspek fenomenologi pelanggaran ini pada energi Planck telah ditunjukkan dalam berbagai model gravitasi kuantum misalnya superstring dan *braneworld*.

Jika invarian Lorentz tidak berlaku di awal pembentukan alam semesta, maka harus ada interpolasi invarian Lorentz pada keadaan sekarang ini. Akibatnya ada sejumlah kecil pelanggaran Lorentz pada setiap skala energi yang akan mempengaruhi dinamika alam semesta. Kosmologi menyediakan sebuah cara untuk menguji pelanggaran tersebut. Sebuah model gravitasi yang kami kembangkan saat ini, yaitu teori gravitasi pelanggaran invarian Lorentz, dapat menjelaskan beberapa aspek keadaan alam semesta. Misalnya dalam hubungannya dengan inflasi alam semesta yang terjadi disekitar energi Planck,

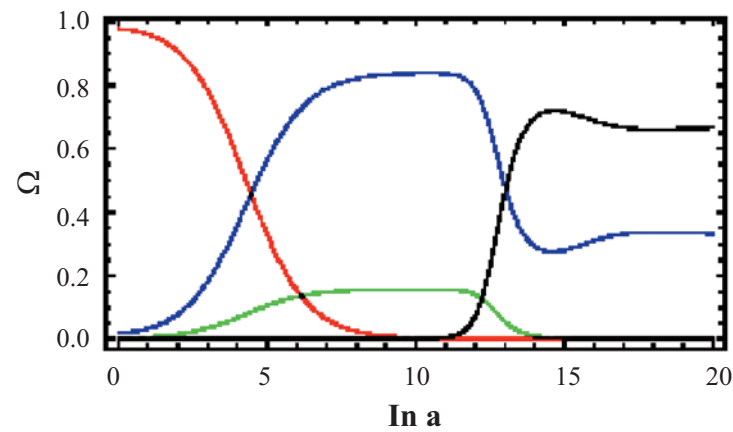
aspek ini mempengaruhi responsibilitas fluktuasi kerapatan spektrum berlatarbelakang gelombang mikro kosmik (*Cosmic Microwave Background, CMB*). Gambar 11 (a) menunjukkan plot bidang fasa dari atraktor *superinflation* untuk solusi dominasi energi kinetik, yaitu energi kinetik dari medan skalar *inflaton* dominan terhadap energi potensialnya.



Gambar 11. (a) Atraktor *superinflation* untuk solusi dominasi energi kinetik.
(b) Atraktor untuk solusi dominasi energi kinetik dan energi potensial.

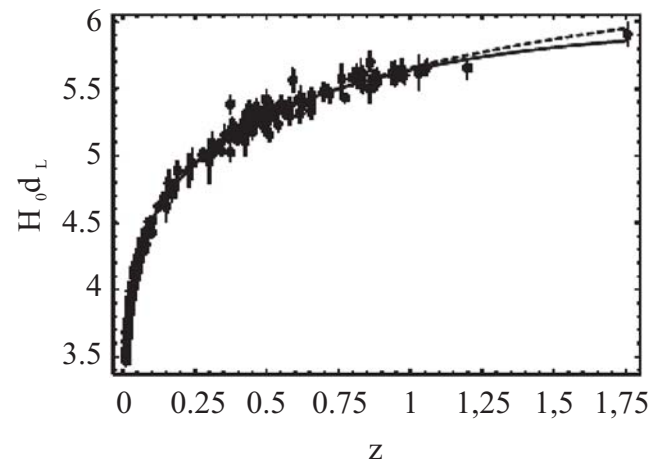
Gambar 11(b) menunjukkan plot bidang fasa untuk solusi dominasi energi kinetik dan energi potensial. Solusi di atas relevan untuk menjelaskan alam semesta saat ini. Hamburan materi dan medan-medan lain di alam semesta mempengaruhi dinamika alam semesta. Alam semesta yang mengembang dan dipercepat oleh keberadaan *dark energy* dan *dark matter* merupakan salah satu akibat dari dinamika fungsi-fungsi parameter kopling. Sebagaimana dipresentasikan pada Gambar 12, melalui analisa sistem dinamik, kemudian dihitung jumlah kerapatan energi relatif (dibandingkan dengan kerapatan kritis) *dark energy* dan *dark matter*. Sekitar 72 % *dark energy* (ditunjukkan oleh warna hitam dalam Gambar 12) dan 23 % *dark matter* (warna biru) mempengaruhi dinamika alam semesta. Komponen-komponen lain seperti baryon (warna hijau) dan radiasi (warna merah) tidak dominan saat ini, jumlahnya sekitar 5 % dari total energi alam semesta. Materi dalam bentuk radiasi hanya dominan di awal alam semesta. Dari Gambar 12 tampak pula dominasi *dark matter* terjadi pada

pertengahan umur alam semesta, sekitar 6 miliar tahun lalu setelah dominasi materi radiasi.



Gambar 12. Evolusi dari kerapatan energi relatif, Ω , sebagai fungsi dari logaritmik faktor skala, a , dari alam semesta.

Model yang kami tinjau dapat pula disesuaikan dengan data Supernova Ia 194. Gambar 13 menunjukkan model yang ditinjau (garis kontinu) dengan data dari Supernova Ia (garis putus-putus).



Gambar 13. Observasi jarak luminositas Hubble SnIa 194 dibandingkan dengan model (garis kontinu) yang diperoleh dari teori gravitasi pelanggaran Lorentz.

Kami memperoleh persamaan keadaan, yaitu rasio antara tekanan dan kerapatan *dark energy* sebesar $\omega = -1.13$. Hasil negatif pada persamaan keadaan tersebut menunjukkan bahwa *dark energy* memiliki gaya repulsif cukup besar untuk menolak materi-materi yang terdapat dalam alam semesta. Dengan demikian alam semesta menjadi mengembang dan mengalami percepatan oleh gaya repulsif *dark energy* tadi.

VI. BORDER AREA MATEMATIKA DAN FISIKA^[16]

Dalam seminar memperingati Hermann Weyl tahun 1988, matematikawan M. Atiyah mengusulkan dua masalah kepada komunitas fisika teoretik. Masalah pertama adalah memberikan interpretasi fisis pada teori Donaldson, yang berupa invarian dalam ruang 4-dimensi. Teori Donaldson merupakan kunci untuk memahami geometri ruang-waktu. Masalah kedua adalah menemukan definisi secara intrinsik pada polinomial (*knot* dan *link*) Jones dalam 3-dimensi. Tak berapa lama kemudian, kedua problem di atas dijawab oleh fisikawan E. Witten dari Institute of Advanced Studies, Princeton University. Dalam paper yang diterbitkannya secara serial, ia membangun model QFT dengan mengambil bentuk aksi berupa invarian topologi sehingga sering disebut teori medan topologi (TFT). Teori ini mempunyai *finite number degree of freedom*, bahkan tak bergantung metrik, sehingga justifikasi TFT lebih bersifat geometri dibanding fisis.

Walaupun TFT lebih condong pada arti matematis, tetapi terdapat setidaknya dua alasan mengapa TFT menarik secara fisis. Pertama adalah kaitannya dengan GR Einstein. TFT yang dibangun atas dasar *path integral* bersifat *general covariance*, karena sudah diintegrasikan untuk seluruh metrik, sehingga dalam level kuantum dapat dikaitkan dengan gravitasi kuantum. Kedua adalah kaitannya dengan teori medan konformal CFT dan klasifikasinya. Dari sisi historisnya, TFT muncul ketika E. Witten menunjukkan bagaimana teori

Morse dapat dibangun dari model kuantum supersimetrik. Teori Morse sendiri mengklasifikasi manifold berdasarkan titik-titik kritis dari fungsi Morse, dimana bilangan Euler dari suatu manifold kemudian dikaitkan dengan bilangan Betti B_p (p menyatakan *harmonic p-form*). Witten kemudian mempelajari aljabar supersimetrik dan bentuk harmonik fungsi Hamilton dalam kuantum dan kemudian ia berhasil membuktikan keabsahan teori Morse diatas dari sisi fisika. Atas usaha ini, ia dianugerahi Field Medal tahun 1990.

Semangat ini selanjutnya mengilhami beberapa kelompok riset di dunia untuk mencari relasi antara fisika dan matematika lebih luas. Muncullah kemudian *mirror symmetries*, yang menggunakan beberapa analisa dalam geometri untuk menjelaskan sifat "kembar" (*duality*) dalam manifold Calabi-Yau dan antara model dalam superstring dan beberapa model teori *brane*. Salah satu perkembangan yang menarik adalah *Ricci flow* yang dikembangkan oleh matematikawan Rusia, G. Perelman (pemenang Field Medal tahun 2008, tapi kemudian dengan suatu alasan ia menolak hadiah tersebut). Kelompok kami, kelompok riset Fisika Teoretik Energi Tinggi dan *Indonesia Center for Theoretical and Mathematical Physics* (ICTMP) menggunakan konsep *Kahler-Ricci flow* untuk memecahkan beberapa sifat kritis dalam manifold Kahler (dalam semangat teori Morse). Masalah flow disini mungkin berkaitan dengan evolusi geometri alam semesta, yang ditampung dalam bentuk metrik bergantung parameter waktu dan memenuhi flow diatas.

Bidang lain yang dapat mewedahi *interface* fisika dan matematika adalah sistem integrabel, yang persamaan dinamikanya berbentuk non-linier. Salah satu solusinya berupa soliton, yang secara klasik berupa "gelombang" dan "partikel". Bersama R. Sasaki di Yukawa Institute for Theoretical Physics, Kyoto University, kami menganalisa sistem integrabel yang disebut sistem *affine Toda*. Riset dalam bidang ini berlanjut, kolaborasi dengan N. Akhmediev dari Institute of Advanced Studies, The Australian National University, Canberra, Australia, menghasilkan solusi stabil "soliton" yang berpropagasi dalam *fiber optic*^[17].

VII. FISIKA DAN DAMPAKNYA^[18]

Sejauh ini, saya telah membahas konsep-konsep fisika yang abstrak, dimulai dari benda yang sangat amat kecil, seperti string, quark (dunia kuantum) sampai benda-benda yang sangat besar ukuran jagad raya, galaksi (GR dan kosmologi). Rentang temperaturnya dari 3 derajat Kelvin (temperatur radiasi latar, *Microwave Background Radiation*) sampai ukuran jutaan derajat Kelvin dan energi 10^{19} GeV, dengan rentang waktu antara 10^{-35} detik sampai 15 milyar tahun. Teori yang dibahaspun membawa nama yang aneh, *Theory of Everything* (TOE). Lantas pertanyaan yang wajar muncul, apakah "makhluk" yang dibicarakan di atas mempunyai dampak dan kaitan dengan umat manusia? Apakah masalah yang "mengawang" diatas dapat "membumi"? Manusia adalah salah satu makhluk yang hidup di alam semesta, sehingga apapun perubahan yang terjadi di dalamnya akan mempengaruhi manusia dan makhluk lainnya.

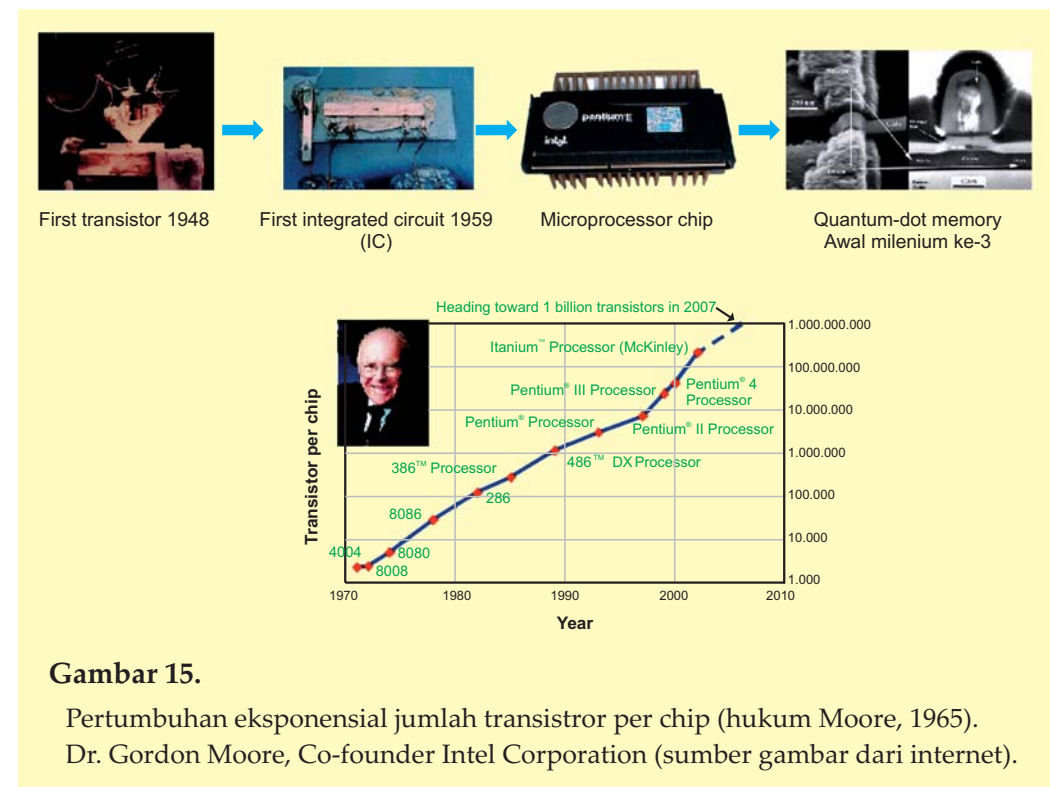
Ada beberapa sisi perkembangan teori fisika yang dapat mempengaruhi umat manusia, baik langsung maupun tidak, diantaranya pengembangan teknologi serta kehidupan sosial masyarakat, termasuk budaya dan agama. Dampak Sains pada kehidupan umat manusia telah banyak dibahas. Dalam kesempatan ini saya memfokuskan pada aplikasi sains, khususnya fisika, terhadap perkembangan teknologi.

Di abad 19, J. C. Maxwell (sebelumnya telah didahului Biot-Savart, Ampere, Lenz dan lainnya) menjelaskan dinamika dan fenomena gelombang elektromagnetik (EM) dalam bentuk empat persamaan diferensial. Pada saat itu, tidak ada yang mengira bahwa di abad berikutnya, abad 20, fenomena tersebut digunakan di seluruh dunia untuk komunikasi radio, televisi bahkan internet. Betapa tidak, persamaan Maxwell mendeskripsikan gerak gelombang EM sebagai akibat gerak elektron (listrik dan magnet). Elektron adalah makhluk yang sangat kecil, lebih kecil dari ukuran mikron (10^{-6} meter), sehingga kehadiran benda ini abstrak, tidak dapat dipegang apalagi dilihat. Tetapi sekarang pengaruhnya sangat besar, tidak ada sistem komunikasi saat ini yang tidak bersandar pada fenomena gelombang EM.

Kita beranjak ke awal abad 20. Dari dinamika klasik, material atau bahan yang diketahui manusia saat itu berupa konduktor, yang dapat mengalirkan arus listrik (misalnya besi) dan isolator, yang bersifat sebaliknya (misalnya kayu). Disisi lain, kemunculan teori kuantum (teori yang sangat abstrak, karena menjelaskan dinamika benda yang sangat kecil, tak dapat dilihat apalagi dipegang) telah membuka cakrawala orang mengenai sifat-sifat bahan dan material. Kemudian ditemukanlah bahan semikonduktor. Bahan ini bersifat antara konduktor dan isolator, artinya untuk tegangan tertentu bersifat isolator dan pada tegangan yang lebih tinggi bersifat konduktor. Hal ini diizinkan karena adanya pita energi (*energy band*) pada bahan. Keberadaan pita energi tersebut hanya dapat dijelaskan dari dinamika kuantum. Sebagai misal, pada temperatur biasa (temperatur kamar) besarnya pita energi pada bahan germanium (Ge) 0,67 eV dan silicon (Si) sebesar 1,14 eV. Tidak berapa lama setelah itu, tepatnya tahun 1948, Bardeen, Brattain dan Shockley berhasil membuat transistor dari Ge dan Si, sehingga orang dapat membuat radio dengan memanfaatkan empat buah transistor. Sebelum itu, orang menggunakan tabung radio untuk mendengar berita dari pemancar tertentu. Tabung radio ini terbuat dari kaca dan mudah terbakar, selain ukurannya cukup besar (Gambar 14).



Komputer digital pertama (dikenal dengan ENIAC) dibuat dengan memanfaatkan 18 ribu tabung radio, dengan daya listrik 200 kilowatt dan beratnya 30 ton. Sekarang ini, orang telah dapat membuat Pentium-4 Prescott yang didalamnya berisi jutaan transistor. Bahkan dalam waktu singkat, selama 40 tahun (hukum Moore, Gambar 15) dan di awal milenium ini, orang telah memperluasnya menjadi milyaran transistor per chip. Akibatnya, komputer dengan kemampuan yang sangat tinggipun dapat dibuat dalam ukuran yang semakin kecil. Mungkin Planck, Bohr, Heisenberg bahkan Einstein pun tidak membayangkan besarnya pengaruh dan manfaat teori kuantum dalam pengembangan teknologi.



Di millennium ini, ada dua hal setidaknya-tidaknya yang merupakan pengaruh lanjut teori kuantum, yaitu *nanotechnology* (1 nanometer = 10^{-9} meter) dan

komputer kuantum, yang *bit*-nya memenuhi prinsip kuantum dan disebut *quantum bit* (qbit). Qbit ini direncanakan berbentuk titik kuantum (*quantum dot*) yang berisi lima elektron. Ada juga yang mengusulkan qbit dibuat dari hewan bersel satu. *Nanotechnology* atau rekayasa dalam ukuran nano tentu memanfaatkan hukum kuantum. Jadi berkembang atau tidaknya teknologi ini bergantung pula pada pemanfaatan konsep kuantum untuk membuat alat-alat maupun merekayasanya.

Di lain pihak, qbit dalam operasi komputer kuantum merupakan anggota ruang *Hilbert*, sehingga operasi dalam sistem ini menggunakan prinsip superposisi linier serta prinsip probabilitas yang telah dijelaskan pada Subbab II.3. Konsekuensinya step dan langkahnya menjadi lebih pendek dibanding komputer konvensional. Ada sifat-sifat lain yang dimiliki komputer jenis ini, akibat berlakunya prinsip kuantum, diantaranya qbit tidak dapat diduplikasi (*no cloning theorem*). Selain itu data yang telah diambil tidak dapat direkonstruksi kembali, karena pengambilan data berarti merusak sistem. Sifat ini nantinya dimanfaatkan untuk membuat kriptografi kuantum, karena sistem sandi yang ada sekarang (sandi RSA atau Rivest, Shamir dan Adleman) tidak aman lagi karena dengan mudah dapat dipecahkan oleh algoritma P.W. Shor. Sifat lainnya adalah fenomena *quantum teleportation*. Misalkan kita mempunyai dua elektron dengan spin arah atas dan bawah. Kedua elektron tersebut dirangkai dalam keadaan EPR (EPR kependekan dari Einstein, Podolski, Rosen). Setelah itu, salah satu elektron, ambillah spin atas dipindahkan ke tempat yang sangat jauh sekali. Jika elektron ditangan kita arah spinnya kita ubah, maka elektron lainnya yang terpisah sangat jauh tadi, pada saat yang sama arah spinnya berubah pula. Einstein tidak setuju dengan hal ini, karena melanggar prinsip relativitas khusus, dimana kecepatan informasi dijalarakan paling tinggi dengan kecepatan cahaya, sedangkan perubahan arah spin tadi terjadi saat yang sama, tidak memerlukan waktu penjalaran informasi. Dengan memanfaatkan fenomena ini, nantinya kita dapat memindahkan data dan informasi (bahkan benda) dari jarak yang sangat jauh (misalnya antar galaksi) menggunakan saluran EPR.

Dengan menggunakan konsep Einstein tentang kesetaraan massa dan energi, orang membuat reaktor nuklir berdasarkan reaksi fisi inti atom. Begitu juga halnya dengan bom hidrogen. Sebenarnya pengaruh Einstein tidak hanya disitu. Walaupun ia kurang setuju dengan konsep kuantum, tapi dengan menggunakan konsep energi kuantum ia menjelaskan efek fotolistrik dari material logam. Fenomena ini kemudian menjadi dasar pengembangan teknologi *solar cell* atau *photovoltaic devices*.

VIII. PENUTUP

Telah dibahas di atas, bagaimana usaha manusia dalam mencari TOE. Secara fenomenologi, hasil tersebut belum memuaskan. Usaha ini dapat disejajarkan dengan kemajuan fisika di awal abad 20 (bahkan mungkin lebih rumit dan sulit), ketika teori kuantum dan relativitas belum ditemukan. Pada saat itu, fenomena fisis yang muncul tidak dapat dijelaskan dalam kerangka teori Newton. Kemudian beberapa fisikawan, seperti Planck, Bohr, Heisenberg, Pauli, Dirac, Born, Einstein membuat hipotesa dan postulat sehingga teori dapat menjelaskan hasil eksperimen. Dari sini mereka sadar bahwa harus ada teori baru (selain mekanika Newton) yang dapat menjelaskan fenomena yang ada. Maka lahirlah kuantum dan relativitas. Saat inipun orang yakin bahwa teori yang ada tidak dapat menjelaskan beberapa masalah yang muncul. Masalah tersebut berupa gabungan seluruh interaksi yang disebut di atas, terutama menggabungkan interaksi yang lain dengan gravitasi. Masalah lainnya berupa besarnya energi dan tingginya temperatur awal, ketika alam semesta terbentuk, kemudian terjadi perubahan fasa sehingga membentuk jagad raya saat ini (masalah hirarki). Masalah-masalah tersebut belum dapat dijawab, mungkin pengetahuan fisika dan matematika yang ada belum memadai.

Kemudian terjadi pergeseran paradigma dalam riset fisika teoretik di abad 21. Yang tadinya verifikasi sebuah teori lebih bersandar pada fakta

fenomenologis, sekarang menjadi bersandar pada konsistensi matematis, selain sifat "sederhana". Maka berkembang teori medan topologi (TFT), *Kahler-Ricci flows* serta *mirror symmetries*. Tak dipungkiri bahwa teori-teori ini menjadi makin "rumit" sehingga dipahami oleh kalangan dan kelompok-kelompok riset tertentu, yang umumnya berada di negara maju. Di lain pihak, riset di bidang ini tidak memerlukan "biaya" tinggi, karena memang tidak membutuhkan peralatan mahal. Peralatan yang adapun bersifat konvensional, seperti kertas, alat tulis, jurnal yang bisa didapat dari internet serta buku-buku. Lantas mengapa kita tidak memulai saja? Kelompok kami di kelompok riset Fisika Teoretik Energi Tinggi dan *Indonesia Center for Theoretical and Mathematical Physics* (ICTMP) telah memulainya. Kami memfokuskan diri pada bidang-bidang riset yang telah saya uraikan di atas, walaupun dalam perkembangannya mungkin saja bergeser, asal saja masih dalam koridor *roadmap* yang telah kami rancang. Sekarang mulai banyak dana riset yang dapat diraih secara kompetitif, misalnya dana riset dari ITB sendiri, dari DIKTI (Depdiknas) serta dari Alumni, melalui Hibah Riset Alumni ITB.

Kalau pendapatan para peneliti "cukup", bukan tidak mungkin banyak karya-karya anak bangsa dan kelompok riset muncul di lembaga-lembaga riset maupun perguruan tinggi di seluruh Indonesia, yang pada akhirnya akan menumbuhkan budaya riset di masyarakat kita dan dapat mengharumkan nama bangsa di dunia internasional.

UCAPAN TERIMA KASIH

Dalam kesempatan ini, pertama sekali saya mengucapkan puji syukur ke hadirat Allah SWT atas nikmat dan karuniaNya sehingga saya diberi kesempatan olehNya mendiskusikan masalah fisika fundamental dan TOE dihadapan ibu-ibu dan bapak-bapak yang terhormat.

Ucapan terima kasih yang tulus saya sampaikan kepada kedua orang tua saya, papa M. Yusuf Zen (alm.) dan mami Sumarsila (almh.), yang dengan penuh kasih sayang telah membesarkan dan mendidik saya sehingga dapat menjadi orang yang bermanfaat bagi orang lain, insya Allah. Kepada bapak A. Somad (alm.) dan ibu Maria Winni (almh.), saya ucapkan banyak terima kasih atas dukungannya. Kepada isteriku Rini Sukawati dan anak-anakku Andalucya S. Zen dan Adrian P. Zen, saya haturkan terima kasih sebesar-besarnya atas cinta kasih dan kepercayaan yang diberikan selama ini, sehingga kita dapat melangkah bersama-sama sampai saat ini dan saat-saat berikutnya. Kepada kakak-kakak dan adik-adikku, terutama yuk Irma sekeluarga dan kak Meta sekeluarga, terima kasih atas dorongan semangat serta bantuannya selama ini, yang tidak dapat disebut satu persatu. Begitu juga halnya dengan Pakcu Prof. M.T. Zen dan Makcu Cinta, terima kasih banyak atas nasehat dan dorongan yang diberikan.

Ucapan terima kasih yang sebesar-besarnya saya sampaikan kepada para guru saya, baik guru mengaji maupun guru sejak di SD, SMP, SMA maupun di Perguruan Tinggi atas didikan dan nasehat yang banyak manfaatnya bagi saya dalam mengarungi kehidupan. Terutama guru saya di ITB, Prof. P. Silaban, Prof. M. O. Tjia, Dr. J. Ibrahim, Dr. H. J. Wospakrik (alm), Prof. M. Ansyar, terima kasih atas didikan ilmu yang telah saya terima dari beliau-beliau di atas. Begitu juga dengan guru-guru saya pada saat saya menimba ilmu di Hiroshima University dan Yukawa Institute for Theoretical Physics, Kyoto University, Jepang, diantaranya Prof. R. Sasaki, Prof. M. Ninomiya, Prof. K. Fujikawa, Prof. T. Muta, ucapan terima kasih yang tulus saya sampaikan atas jerih payah dan kesabaran mereka dalam mendidik saya.

Kepada kolega dan mantan mahasiswa (yang sekarang menjadi kolega) di Kelompok Keahlian (KK) Fisika Teoretik Energi Tinggi dan Indonesia Center for Theoretical and Mathematical Physics (ICTMP), diantaranya Dr. B. E. Guanara, Dr. Arianto, Dr. Triyanta, Dr. J. S. Kosasih, Dr. H. Alatas, Dr. M. Djamal, terima kasih atas diskusi dan kolaborasinya. Saya banyak belajar dari mereka selama

melakukan diskusi. Semoga kolaborasi kita berlanjut.

Saya sampaikan pula ucapan terima kasih kepada kolaborator saya, diantaranya Prof. N. N. Akhmediev (The Australian National University, Australia), Prof. H. Kasai (Osaka University) Prof. H. Yamamoto (Hiroshima University), Dr. R. Muhida (Islamic International University Malaysia), Dr. H. Zainuddin (Universiti Putra Malaysia) serta Prof. Mohd. Noor (UniMAP, Malaysia). Kerjasama dan diskusi yang amat bermanfaat telah banyak saya petik dari mereka.

Kepada rekan-rekan di Ikatan Alumni ITB (IA ITB), Bang Hatta Rajasa, Bang Bakti Luddin, Amir Sambodo, Bu Jetti R. Hadi, Rinaldi Firmansyah, Pak Hermanto Dardak, Ustadz Eddy Zanur, serta rekan-rekan Pengurus Pusat (PPIA ITB), terima kasih atas kepercayaan dan kerjasamanya. Terutama kepada Ketua Umum IA ITB, Bang Hatta, terima kasih yang tulus saya sampaikan atas kepercayaan yang telah diberikan kepada saya selama ini dan atas dorongannya sehingga saya tetap berada di jalur riset.

Semoga Allah Yang Maha Rahman dan Maha Rahim membalas amal dan kebaikan ibu-ibu dan bapak-bapak semua. Amin ya Robbal Alamin. ♦

DAFTAR PUSTAKA

- [1] (i) Freddy P. Zen, *Teori Relativitas Einstein*, Bahan Kuliah, Laboratorium Fisika Teoretik ITB, 2007;
- (ii) P. G. Bergmann, *Introduction to the Theory of Relativity*, Prentice-Hall, Inc. 1959, ninth Edition (foreword by A. Einstein).
- [2] A. Einstein, *Zur elektrodynamik bewegter Korper*, Ann. Phys., **17**, 1905, p. 891-921.
- [3] (i) A. Einstein, *Zur Allgemeinen Relativitatstheorie*, Preuss. Akad. Wiss. Berlin, Sitzber., 1915a, p.778-786 (published November 11);

- (ii) A. Einstein, *Der Feldgleichungen der Gravitation*, Preuss. Akad. Wiss. Berlin, Sitzber. 1915b, p.799-801 (published November 18);
- [4] (i) S. W. Hawking, R. Penrose, *Singularities of Gravitational Collapse and Cosmology*, Proc. Royal Society of London, **A314**, 1970, p. 529-548;
- (ii) S. W. Hawking, G. F. R. Ellis, *The Large Scale Structure of Space-Time*, Cambridge University Press, 1973.
- [5] (i) J. Bahcall, T. Piran, S. Weinberg, *Dark Matter in the Universe*, World Scientific, 2004;
- (ii) G. Kane, A. Pierce, *Perspectives on LHC Physics*, World Scientific, 2008.
- [6] (i) Freddy P. Zen, *Fisika Kuantum*, Bahan Kuliah, Laboratorium Fisika Teoretik ITB, 2005;
- (ii) M. O. Tjia, *Mekanika Kuantum*, Penerbit ITB, 1999;
- (iii) S. W. Hawking, *Particle Creation by Black Holes*, Communication in Mathematical Physics, **43**, 1975, p. 199-220;
- (iv) K. Fujikawa, H. Suzuki, *Path Integrals and Quantum Anomalies*, Oxford University Press, 2004.
- [7] (i) W.-K. Tung, *Group Theory in Physics*, World Scientific, Reprinted Edition, 2005;
- (ii) P. Silaban, *Teori Grup dalam Fisika*, Penerbit Angkasa, Bandung, 1981.
- [8] (i) Th. Kaluza, Sitzungsber. D. Preuss. Akad. D. Wiss, 1921, p. 966;
- (ii) O. Klein, Z. Phys., **37**, 1926, p. 895;
- (iii) O. Klein, Nature, **118**, 1926, p. 516.
- [9] (i) P. Langacker, *Grand Unified Theories and Proton Decay*, Physics Report, **72**, No. 4, 1981, p.183-385;
- (ii) A. Salam, *Gauge Unification of Fundamental Forces*, On The Occasion of the Presentation of the 1979 Nobel Prizes in Physics, The Nobel Foundation, 1980.
- [10] (i) A. Salam, Proc. 8th Nobel Symposium, Almquist and Wilksell,

- Stockholm, 1968, p. 367;
- (ii) S. Weinberg, *Physical Review Letter*, **19**, 1967, p. 1264.
- [11] (i) Freddy P. Zen, *Universality of the Matrix Model Approach to 2-Dimensional Quantum Gravity*, *Modern Physics Letters A* **6**, 1991, 1387-1396.
- (ii) M. Hayashi, Freddy P. Zen, *Gravitational Scattering in (2+1)-Dimensions and Wilson Loop Operators*, *Progress of Theoretical Physics*, **91**, 1994, p. 361-377;
- (iii) Freddy P. Zen, *Chern- Simons-Witten Theory and (2+1)-dimensional Quantum Gravity*, Seminar Given at International Center for Theoretical Physics, Trieste, Italy, 1995;
- (iv) Freddy P. Zen, *Gravitational Scattering Amplitude in Chern-Simons-Witten Theory*, Proc. Conference Frontiers in Quantum Physics, Springer, 1998, p. 314-318;
- (v) Freddy P. Zen, A. Y. Wardaya, J. S. Kosasih, Triyanta, *Tetrahedron Diagram and Perturbative Calculation in Chern-Simons-Witten Theory*, *Advanced Studies in Theoretical Physics*, **2**, No.18, 2008, p. 871-901;
- (vi) Freddy P. Zen, *Witten Invariant in 3-Dimensional: Stationary Phase Approximation*, Proc. One Day Seminar 65 tahun J. Ibrahim, Dept. Astronomy, FMIPA ITB, Bosscha Observatorium, 2001, p.101-108.
- (vii) Freddy P. Zen, *Teori Medan Konformal dan Gravitasi Kuantum dalam 2-dimensi*, Diktat Kuliah, Laboratorium Fisika Teoretik, ITB, 2004.
- [12] (i) Freddy P. Zen, *Lecture on Superstring Theory and Quantum Gravity*, Universiti Putra Malaysia, Malaysia, June 1997;
- (ii) T. Saito, B. E. Gunara, H. Yamamoto, Freddy P. Zen, *Astrophysical Condition on the Attolensing for a Possible Probe of a Modified Gravity Theory*, *International Journal of Modern Physics*, **A23**, No. 1, 2008, p.167-179.
- [13] (i) Freddy P. Zen, *Superstring dan Teori M*, Diktat Kuliah, Laboratorium Fisika Teoretik ITB, 2004;
- (ii) Freddy P. Zen, B. E. Gunara, Arianto, Z. Abidin, A Azwar, *String Theories and Their Non-Perturbative Aspects : M-Theory and D-Brane*, Invited Talk at Workshop on Theoretical Physics 2004, Universitas Indonesia, May 2004;
- (iii) Freddy P. Zen, *Introduction to String Theory*, Invited Lecture delivered at Kasai Laboratory, Dept. of Precision Science & Technology and Applied Physics, Graduate School of Engineering, Osaka University, May 2006;
- (iv) Freddy P. Zen, J. S. Kosasih, *D-Branes and M-Theory in Superstring Theories*, *Indonesian Journal of Physics*, **14**, No. 4, 2003;
- (v) Freddy P. Zen, B. E. Gunara, Z. Abidin, *Compactifying of Type II String Theory on Calabi-Yau 3-fold*, *Physics Journal of Indonesian Physical Society*, **C8**, No. 0501, p. 2004;
- (vi) Freddy P. Zen, J. S. Kosasih, *D-Branes and M-Theory in Superstring Theories*, *Indonesian Journal of Physics*, **14**, No. 4, 2003;
- (vii) Freddy P. Zen, B. E. Gunara, A. Wardaya, *Z6-II Orbifold Model of The Heterotic String*, *Journal of Mathematics and Sciences*, **10**, No.3, 2005;
- (viii) Freddy P. Zen, Arianto, *Black Hole Formulation in M-Theory*, *Physics Journal of Indonesian Physical Society*, **C5**, 2002, p. 0564.
- [14] (i) Freddy P. Zen, B. E. Gunara, Arianto, H. Zainuddin, *On Orbifold Compactification of N=2 Supergravity in Five Dimensions*, *Journal of High Energy Physics*, IOP Institute of Physics, *JHEP* **08** (2005) 018, 2005;
- (ii) Arianto, Freddy P. Zen, H. Zainuddin, B. E. Gunara, *The Effective N=1 Action from Orbifold Compactification*, International Conf. on Advances in Theoretical Sciences (CATS 2005), Putrajaya, Malaysia, Dec. 2005;
- (iii) Freddy P. Zen, Arianto, B. E. Gunara, H. Zainuddin, *The Effective Equation of Motion on the Brane World Gravity*, Proc. ITB on Science and Technology, **38A**, No. 1, 2006;
- (iv) Freddy P. Zen, B. E. Gunara, Arianto, S. Feranie, *S-Brane Solution with Accelerating Cosmology in M-Theory*, *Journal of Mathematics and*

Sciences, **11**, No. 1, 2006;

- (v) Arianto, *Gravitasi Einstein dan Braneworld dalam Daerah Efektif Energi Rendah dan Dimensi Ekstra*, Disertasi Program Doktor, ITB, 2007;
 - (vi) Freddy P. Zen, Arianto, B. E. Gunara, H. Zainuddin, *The Low Energy Effective Equations of Motion for Multibrane Worlds Gravity*, e-print archive: <http://lanl.arXiv.org/hep-th/0511257>, 2005.
- [15] (i) Arianto, Freddy P. Zen, B. E. Gunara, Triyanta, Supardi, *Some Impacts of Lorentz Violation on Cosmology*, Journal of High Energy Physics, IOP Institute of Physics, JHEP **09** (2007) 048, 2007;
- (ii) Arianto, Freddy P. Zen, Triyanta, B. E. Gunara *Attractor Solutions in Lorentz Violating Scalar-Vector-Tensor Theory*, Physical Review D, **77**, No. 12, 2008, p.123517-1;
 - (iii) Freddy P. Zen, Arianto, B. E. Gunara, Triyanta, A. Purwanto, *Cosmological Evolution of Interacting Dark Energy in Lorentz Violation*, e-print archive: <http://lanl.arXiv.org/hep-th/0809.3847>, 2008.
- [16] (i) M. F. Atiyah, *New Invariants in Three and Four Dimensional Manifolds*, Proc. Symposium in Pure Mathematics, **48**, American Math. Society, 1988, p. 285-289;
- (ii) E. Witten, *Topological Quantum Field Theory*, Communication in Mathematical Physics, **117**, 1988, p. 353-386;
 - (iii) E. Witten, *Quantum Field Theory and the Jones Polynomial*, Communication in Mathematical Physics, **121**, 1989, p. 351-399;
 - (iv) B. E. Gunara, Freddy P. Zen, *Kahler-Ricci Flow, Morse Theory and Vacuum Structure Deformation of N=1 Supersymmetry in Four Dimension*, Advanced in Theoretical and Mathematical Physics (ATMP), Springer Verlag **13** (2009), 217-257;
 - (v) B. E. Gunara, Freddy P. Zen, *Deformation of Curved BPS Domain Walls and Supersymmetric Flows on 2d Kahler-Ricci Soliton*, Communication in Mathematical Physics, **287**, Springer Verlag, 2009, p. 849-866;
 - (vi) B. E. Gunara, Freddy P. Zen, Arianto, *BPS Domain Wall and Vacuum*

Structure of N=1 Supergravity Coupled to a Chiral Multiplet, Journal of Mathematical Physics, **48**, 2007, p. 053505;

- (vii) B. E. Gunara, Freddy P. Zen, *Flat BPS Domain Walls on 2d Kahler-Ricci Soliton*, e-print archive: <http://lanl.arXiv.org/hep-th/0901.0303>, 2009;
 - (viii) B. E. Gunara, Freddy P. Zen, Arianto, *N=1 Supergravity BPS Domain Wall on Kahler-Ricci Soliton*, e-print archive: <http://lanl.arXiv.org/hep-th/0901.0416>, 2009.
- [17] (i) Freddy P. Zen, *Two-Loop S-Matrix for $A_1^{(1)}$ Affine Toda Field Theory*, Vistas in Astronomy, **37**, 1993, p. 149-152;
- (ii) R. Sasaki, Freddy P. Zen, *The Affine Toda S-Matrices vs Perturbation Theory*, International Journal of Modern Physics, **A8**, 1993, p. 115-134;
 - (iii) N. N. Akhmediev, Freddy P. Zen, P. Chu, *Pulse-pulse Interaction in Dispersion-Managed Systems with Nonlinear Amplifier*, Optics Communication, **201**, 2002, p. 217-221;
 - (iv) Freddy P. Zen, H. I. Elim, *Lax Pair Formulation and Multi-soliton Solution of the Integrable Vector Nonlinear Schoedinger Equation*, e-print archive: <http://lanl.arXiv.org/solv-int/9902010>, 1999;
 - (v) H. J. Wospakrik, Freddy P. Zen, *CPT Symmetries and the Backlund Transformations*, e-print archive: <http://lanl.arXiv.org/solv-int/9909007>, 1999;
 - (vi) H. J. Wospakrik, Freddy P. Zen, *Inhomogeneous Burgers Equation and the Feynman-Kac Path Integral*, e-print archive: <http://lanl.arXiv.org/solv-int/9812014>, 1998.
- [18] (i) Freddy P. Zen, *Dunia Kuantum: Dampaknya Pada Perkembangan Teknologi dan Kehidupan Manusia*, Presentasi pada Penganugerahan Habibie Award 2006, The Habibie Center (THC), 2006;
- (ii) M. T. Zen, Freddy P. Zen, *Symphony in Our Universe*, Bandung Society for Cosmology and Religion (BSCR), Bosscha Observatorium, Lembang, 2005;

- (iii) Freddy P. Zen, Nurcholish Madjid, *Kosmologi Baru, Religiusitas Baru*, Seri KKA Paramadina 115, tahun XI, 1996;
- (iv) A. Purwanto, *Ayat-ayat Semesta, Sisi-sisi Al-Qur'an yang Terlupakan*, Penerbit Mizan, 2008.
- (vi) H. J. Wospakrik, *Dari Atomos Hingga Quark*, Penerbit Universitas Atmajaya, 2005.
- (vi) M. Kaku, *Visions: How Science Will Revolutionize the 21st Century*, Anchor Books, 1998.

CURRICULUM VITAE



Nama : **Freddy Permana Zen**
 Tempat dan tanggal lahir : Pangkalpinang, 1 Maret 1961
 Alamat : KK Fisika Teoretik Energi Tinggi dan Instrumentasi FMIPA-ITB, Jl. Ganesa 10 Bandung 40123, Indonesia
 E-mail : fpzen@fi.itb.ac.id
 Nama Istri & Anak : Rini Sukawati Somad
 Andalucya Sukawati Zen
 Adrian Permana Zen

PENDIDIKAN:

- Doctor of Science, Hiroshima University 1991 – 1994
(Riset di Yukawa Institute for Theoretical Physics, Kyoto University)
- Master of Science, Hiroshima University 1989 – 1991
(Riset di Research Institute for Theoretical Physics, Takehara)
- Magister Sains, Institut Teknologi Bandung 1986 – 1988
- Sarjana, Institut Teknologi Bandung 1980 – 1985

DIKTAT DAN BUKU YANG DITULIS:

- Freddy P. Zen, *Superstring dan Teori M*, Laboratorium Fisika Teoretik ITB, 2004.
- Freddy P. Zen, *Kapita Selekta Fisika Teori*, Laboratorium Fisika Teoretik ITB, 2005.
- Freddy P. Zen, *Teori Medan Konformal dan Gravitasi Kuantum dalam 2-dimensi*, Laboratorium Fisika Teoretik ITB, 2004.

RIWAYAT PEKERJAAN DAN JABATAN:

- 2008 – : Guru Besar pada FMIPA – ITB
- 2000 – 2008 : Lektor Kepala pada FMIPA – ITB
- 1997 – 2000 : Lektor pada FMIPA – ITB
- 1994 – 1997 : Lektor Madya pada FMIPA – ITB
- 1991 – 1994 : Lektor Muda pada FMIPA – ITB
- 1988 – 1991 : Asisten Ahli pada FMIPA – ITB
- 1987 – 1988 : Asisten Ahli Madya pada FMIPA – ITB
- 1986 – 1987 : Tenaga Pengajar pada FMIPA – ITB

PENUGASAN:

- 2008 – : Anggota Komisi Budaya Akademik MGB ITB
- 2007 – 2010 : Ketua Tim Renstra FMIPA ITB
- 2000 – 2005 : Asisten Deputi Kementerian Riset dan Teknologi Republik Indonesia
- 1998 – 2000 : Sekretaris Pusat Matematika ITB (P4M)
- 1996 – 1998 : Ketua III Koperasi Keluarga ITB
- 1994 – 1996 : Sekretaris Bidang Kemahasiswaan Jurusan Fisika ITB

KEANGGOTAAN DALAM ORGANISASI PROFESI:

- 2007 – 2011 : Sekretaris Jenderal Ikatan Alumni ITB
- 2007 – : Direktur Indonesia Center For Theoretical and Mathematical Physics (ICTMP).
- 2005 – : Anggota Himpunan Grup Fisika Teoretik Indonesia
- 2004 – : Anggota Steering Committee Konsorsium Fisika Teoretik Indonesia
- 1991 – 1993 : Ketua Umum Persatuan Pelajar Indonesia di Jepang
- 1990 – : Anggota Elementary Particle Physics Group, Japan

1989 – : Anggota The Japanese Physical Society

1985 – : Anggota Himpunan Fisika Indonesia

PENGHARGAAN DAN SEJENISNYA:

- 2006 : HABIBIE AWARD.
- 2006 : Reviewer Journal Sigma Ukraine Academy of Sciences, Mathematical Review, American Mathematical Society.
- 2003 : Satyalancana Wira Karya.
- 2001 : Satya Lancana Karya Satya X.
- 1999 - 2000 : Visiting Professor, Institute of Advanced Studies, The Australian National University.
- 1988 – 1994 : Monbusho Scholarship.

LAIN - LAIN:

- Mempopulerkan fisika.
- Penggagas dan Direktur Indonesia Center for Theoretical and Mathematical Physics (ICTMP).
- Publikasi di jurnal nasional dan internasional sebanyak lebih dari 100 makalah dalam bidang fisika teoretik.

