

8

Perspektif Baru Fisika Partikel

Tujuan Perkuliahan:

Setelah mempelajari bab ini, mahasiswa diharapkan dapat:

1. Mengetahui perkembangan terbaru dari fisika partikel.
2. Mengetahui kelemahan-kelemahan teori model standar dan usaha untuk mengatasinya.
3. Memahami makna dimensi ekstra dan kaitannya dengan artikel dan string.
4. Mengenal super simetri.
5. Mengenal teori *string/superstring*.
6. Mengenal konsep *brane* dan hubungannya dengan teori lain.

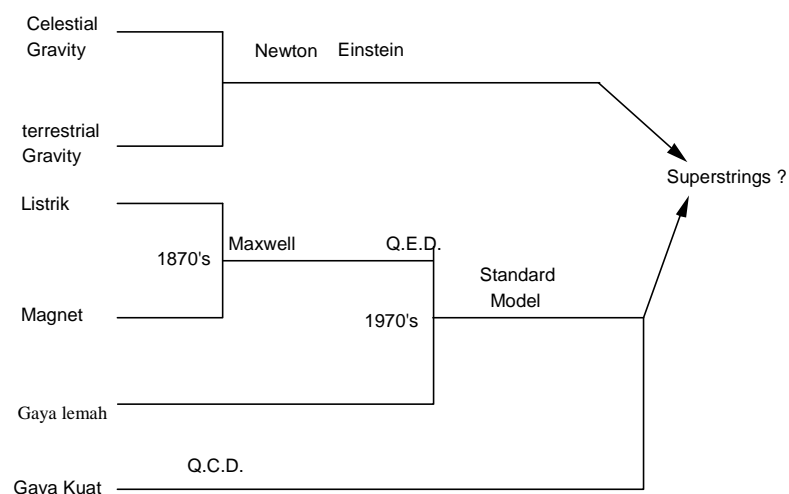
Perkembangan riset di bidang fisika pada saat ini adalah mencari teori terpadu yang dapat menjelaskan perilaku partikel dan interaksinya di alam semesta. Pada mulanya dianggap bahwa listrik dan magnet adalah dua fenomena yang tidak berkaitan, tetapi kemudian dipahami bahwa kedua fenomena tersebut dapat dijelaskan dalam satu teori, yaitu elektromagnetik. Kegagalan mekanika Newton dalam skala mikroskopik dan kecepatan tinggi (mendekati kecepatan cahaya) mendorong fisikawan untuk mencari teori yang lebih sesuai dengan verifikasi eksperimental yaitu mekanika kuantum dan relativitas. Pada akhir tahun 1940 diformulasikan teori medan kuantum yang menggabungkan konsep kuantum dan relativitas. Teori ini dapat pula digunakan untuk memadukan prinsip-prinsip kuantum dengan elektromagnetik, yang dikenal sebagai elektromagnetik kuantum.

Model standar menjawab banyak pertanyaan tentang struktur dan stabilitas materi dengan hanya dengan 6 tipe quark, 6 tipe lepton dan 4 gaya, tetapi model standar ini belumlah lengkap. Pertama teori ini mengandung 19 parameter bebas yang dianggap terlalu banyak. Selain itu terdapat beberapa pertanyaan seperti: mengapa ada tiga famili? atau bagaimana menentukan parameter dalam lagrangiannya? Mengapa partikel –partikel telah banyak ditemukan tetapi tidak diiringi dengan ditemukannya

anti partikel, jika memang ada simetri antara keduanya di alam? Mengapa standar model tidak dapat memprediksikan massa partikel? Sebagai contohnya adalah bahwa partikel foton dan W adalah sama-sama partikel pembawa gaya, tetapi mengapa foton tidak bermassa sedangkan W bermassa? Apakah quark dan lepton benar-benar fundamental atau terdiri dari partikel-partikel yang lebih fundamental? Apa itu "dark matter"? Bagaimana gravitasi dapat masuk ke dalam teori ini? Kelemahan yang lain adalah penyatuan teori gravitasi dengan kuantum menghasilkan teori medan kuantum yang tidak dapat direnormalisasi (*nonrenormalizable*).

Kelemahan-kelemahan ini mendorong fisikawan untuk mencari teori yang lebih baik. Upaya-upaya yang telah dilakukan untuk memperoleh satu kesatuan teori diperlihatkan pada Gambar 8.1.

Salah satu cara mengatasi kelemahan Model Standard adalah dengan memasukkan aspek supersymmetry, yaitu simetri antara fermion dan boson dalam model yang dibangun. Selain itu dikenal pula Grand Unified Theory, yang memadukan tiga interaksi di atas menjadi satu. Teori ini berhasil menentukan salah satu parameter bebas yaitu *weak mixing angle*. Cara lain adalah dengan menganggap bahwa kita hidup dalam ruang-waktu yang lebih besar dari 4-dimensi, dengan dimensi yang lainnya sangat melengkung sehingga tidak teramati (dikompaktifikasi), misalnya dengan mekanisme Kaluza-Klein. Hal menarik dari teori ini adalah bahwa sebuah medan dalam ruang-waktu yang lebih besar menghasilkan banyak medan dalam ruang 4-dimensi. Kandidat yang paling menjanjikan adalah teori superstring.



Gambar 8.1. Usaha unifikasi empat gaya interaksi

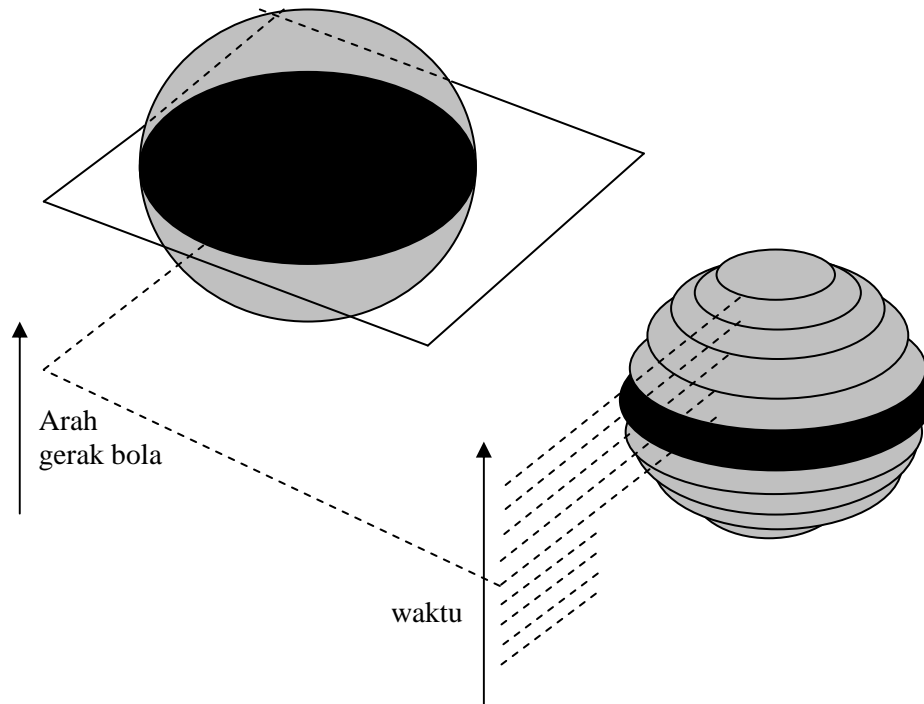
String adalah objek satu dimensi yang menyapu permukaan 2-dimensi dalam ruang-waktu D -dimensi. Konsistensi teori kuantum dengan teori string menghasilkan batasan-batasan bagi teori ini. Salah satunya adalah dimensi ruang waktu harus 10 dimensi. Dengan demikian menurut teori ini partikel dalam 10-dimensi dapat dipandang sebagai eksitasi dari string. Salah satunya adalah ditemukannya keadaan eksitasi dengan spin-2 yang diidentifikasi sebagai *graviton*.

Masalah utama dari teori string adalah jumlah dimensi yang lebih besar (10-dimensi) dibanding ruang-waktu yang kita amati (4-dimensi). Untuk mengatasinya dapat digunakan reduksi Kaluza-Klein, kompaktifikasi Calabi-Yau, dan orbifold. Asumsi dasar dari kompaktifikasi adalah bahwa beberapa dimensi dari ruang-waktu 10 dimensi sangat kecil dan melengkung, sehingga hanya 4-dimensi yang teramati. Dianggap bahwa ruang-waktu 10 dimensi merupakan hasil kali langsung (*direct product*) dari ruang Minkowski 4-dimensi dan suatu manifold internal 6-dimensi.

8.1 Dimensi Ekstra, Partikel dan String

8.1.1 Dimensi Ekstra

Kata "dimensi", seperti juga halnya dengan kebanyakan kata, menggambarkan ruang atau gerak di dalam ruang dan memiliki banyak tafsiran. Jumlah dimensi adalah jumlah kuantitas yang kita perlukan untuk mengetahui secara lengkap sebuah titik dalam ruang. Arti ruang yang dimaksud disini adalah daerah dalam mana ada materi dan proses-proses fisis. Sedangkan dimensi ekstra yang dimaksud adalah dimensi tambahan ruang dari ruang tiga dimensi yang telah kita ketahui, bukan tambahan waktu. Sebagai contoh, untuk ruang-waktu D -dimensi dapat kita tuliskan dengan $D = 1 + 3 + n$, dimana 1 menyatakan jumlah dimensi waktu, 3 adalah jumlah dimensi ruang yang telah kita kenal dan n adalah jumlah dimensi ekstranya.



Gambar 8.2. Jika sebuah bola bergerak melewati sebuah bidang, seorang pengamat dalam bidang dua dimensi akan melihat sebuah cakram/piringan. Cakram yang dilihat sesungguhnya sebuah bola tiga dimensi.

Berikut ini kita ingin mempelajari bagaimana mengetahui keberadaan dimensi ekstra meskipun kita tidak dapat mengamatinya. Andaikan kita adalah pengamat dua dimensi, artinya kita hanya dapat berada atau menempel dalam sebuah bidang. Sebuah bola bergerak melalui bidang dimana pengamat tersebut berada (perhatikan Gambar 8.2). Apakah yang dilihat oleh pengamat dalam bidang? Tentunya, pengamat hanya melihat sederetan gerak cakram (*disk*) dari ukuran kecil kemudian membesar dan mengecil sebagai fungsi dari waktu. Tetapi obyek sesungguhnya adalah bola 3-dimensi. Pengamat tidak akan pernah melihat bola ini secara keseluruhan. Meskipun demikian kita dapat mendeduksi dari hasil pengamatan dalam bidang bahwa obyek yang bergerak tersebut adalah bola 3-dimensi.

Dengan analogi bola 3-dimensi, sekarang kita bayangkan sebuah bola yang memiliki empat dimensi ruang bergerak melalui ruang tiga dimensi yang kita tempati. Apa yang dapat kita amati? Bola 4-dimensi didefinisikan oleh persamaan

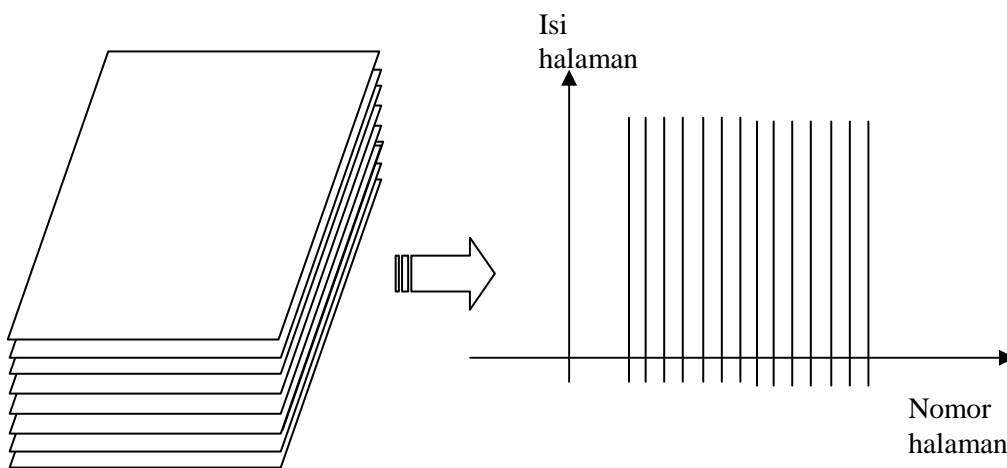
$$x_1^2 + x_2^2 + x_3^2 + x_4^2 = r^2. \quad (8.1)$$

Penampang bola ini ketika memotong suatu kedudukan tetap dalam dimensi ke-4, $x_4 = d$ digambarkan oleh persamaan

$$x_1^2 + x_2^2 + x_3^2 = r^2 - d^2. \quad (8.2)$$

Persamaan ini tidak lain adalah persamaan bola 3-dimensi dengan radius $\sqrt{r^2 - d^2}$. Kita dapat membuat deduksi tentang bagaimana obyek tampak dalam ruang dari suatu obyek yang dimensinya berbeda. Dalam hal ini, sebuah bola 4-dimensi lewat melalui ruang 3-dimensi akan terlihat sebagai sederetan bola 3-dimensi.

Dari contoh di atas dapat kita pelajari bahwa keberadaan dimensi ekstra dapat kita pahami melalui apa yang kita amati dalam ruang yang dimensi lebih rendah. Tentunya, apa yang kita amati adalah bagian dari sesuatu yang dimensinya lebih besar dan berarti pula kita tidak dapat memperoleh informasi obyek secara lengkap.



Gambar 8.3. Buku tiga dimensi dibangun dari tiap lembar halaman dua dimensi.

Namun demikian kita dapat menggunakan informasi dua dimensi untuk membangun tiga dimensi. Perhatikan Gambar 8.3, sebuah buku adalah tiga dimensi dan halaman dari buku adalah dua dimensi. Satu-kesatuan dari halaman dua dimensi membentuk sebuah buku.

8.1.2 Teori Kaluza-Klein

Pada tahun 1919, Kaluza memperkenalkan sebuah cara baru bagaimana menyatukan gravitasi dan elektromagnetik dengan menggunakan dimensi ekstra. Sebagaimana telah kita ketahui, elektromagnetik dapat dijelaskan oleh persamaan-persamaan Maxwell yang mana memiliki simetri gauge internal $U(1)$. Keberadaan $U(1)$ dalam teori tersebut mengharuskan adanya medan elektromagnetik. Di lain pihak, gravitasi dalam relativitas umum memiliki simetri Lorentz lokal. Dalam relativitas umum, kita dapat mempelajari gravitasi dengan meninjau sebuah aksi Einstein-Hilbert,

$$S_{EH} = \frac{1}{16\pi G_4} \int d^4x \sqrt{-g} R, \quad (8.3)$$

dimana $g = \det g_{\mu\nu}$ dan R adalah skalar Ricci. Dalam elektromagnetik, persamaan Maxwell adalah

$$\partial_\nu F^{\mu\nu} = -J^\mu, \quad (8.4)$$

yang dapat diturunkan dari aksi berikut

$$S_{EM} = -\frac{1}{4} \int d^4x \sqrt{-g} F^{\mu\nu} F_{\mu\nu}, \quad (8.5)$$

dimana

$$F^{\mu\nu} = \partial^\mu A^\nu - \partial^\nu A^\mu. \quad (8.6)$$

adalah tensor medan elektromagnetik. Agar kedua teori di atas dapat disatukan, Kaluza kemudian menambahkan satu dimensi ruang ekstra pada teori gravitasi sehingga kita sekarang memiliki teori gravitasi dalam ruang-waktu 5-dimensi,

$$S_5 = \frac{1}{16\pi G_5} \int d^4x dy \sqrt{-g_5} R_5, \quad (8.7)$$

disini y adalah dimensi ekstra, G_5 adalah konstanta gravitasi 5-dimensi, g_5 adalah determinan dari metrik 5-dimensi, $g_5 = \det g_{AB}$ ($A, B = 0, 1, 2, 3, 5$), dan R_5 adalah skalar Ricci 5-dimensi. Ide Kaluza untuk menyatukan kedua teori hanya berupa model matematis. Ketika kita mengintegrasikan persamaan (8.7), dengan asumsi bahwa semua kuantitas dalam komponen-komponen metrik tidak bergantung pada dimensi ekstra yang kelima, yaitu koordinat- y , maka akan diperoleh kembali teori elektromagnetik Maxwell dan gravitasi. Klein melakukan riset yang sama dengan komponen-komponen metrik masih tidak bergantung pada koordinat- y namun memberikan argumentasi bahwa besarnya dimensi ekstra adalah sangat kecil (berukuran skala Planck) dan terkompaktifikasi pada sebuah lingkaran. Penggabungan kedua teori ini dikenal dengan Teori Kaluza-Klein.

Teori Kaluza-Klein hanyalah tinjauan geometri, karena kita dapat memulai dari sebuah medan tanpa materi dalam 5-dimensi, kemudian menambahkan medan-medan lain dalam metrik. Bagian tambahan ini akan menghasilkan teori elektromagnetik Maxwell dan sebuah medan skalar yang dinamakan *dilaton*. Foton hanyalah komponen dari graviton 5-dimensi.

Misalkan kita tuliskan metrik 5-dimensi sebagai berikut

$$g_{AB} = \begin{pmatrix} g_{\mu\nu} & g_{\mu 5} \\ g_{5\nu} & g_{55} \end{pmatrix}. \quad (8.8)$$

Koordinat ruang-waktu 5-dimensi dinyatakan oleh $x^A = (x^\mu, y)$, dengan y adalah koordinat dimensi ke-5 dan x^μ adalah koordinat 4-dimensi, $\mu = 0, 1, 2, 3$. Komponen-komponen matriks $g_{\mu 5}$, $g_{5\nu}$ adalah bagian boson gauge 4-dimensi. Sedangkan komponen matrik g_{55} adalah medan skalar 4-dimensi. Dalam 5-dimensi g_{AB} adalah fungsi dari x^μ dan y , $g_{AB}(x^\mu, y)$, sedangkan $g_{\mu\nu}$ adalah komponen-komponen matrik dari bagian 4-dimensi dan hanya bergantung pada x , $g_{\mu\nu}(x^\mu)$. Jika arah y dikompaktikasi pada lingkaran (radius L) dengan mengidentifikasi lingkaran sebagai titik-titik, $y = 0$ dan $y = 2\pi L$ yaitu

$$y \leftrightarrow y + 2\pi nL, \quad n = 0, 1, 2, \dots \quad (8.9)$$

maka integrasi dalam arah- y dari aksi persamaan (8.7) adalah

$$S_5 = \frac{1}{16\pi G_5} \int d^4x \int_0^{2\pi L} dy \sqrt{-g_5} R_5. \quad (8.10)$$

Metrik 5-dimensi dapat diekspansi dalam deret Taylor

$$g_{AB}(x^\mu, y) = \sum_{-\infty}^{+\infty} g_{AB}^{(n)}(x^\mu) \exp\left(\frac{iny}{L}\right). \quad (11)$$

Massa untuk mode ke- n didefinisikan oleh

$$m_n^2 = \frac{n^2}{L}. \quad (8.12)$$

Sekarang kita tinjau besarnya L dari dimensi ke-5 adalah sangat kecil yaitu pada panjang Planck, 10^{-33} cm maka massa menjadi sangat besar. Untuk mengetahui akibat dari dimensi ke-5 maka diperlukan energi yang sangat tinggi. Karena mode-mode bermassa (*massive*) adalah efektif pada energi yang sangat tinggi, pada energi rendah hanyalah mode-mode tak bermassa (*massless*) yang efektif. Metrik mode nol ($n = 0$) kemudian diberikan oleh

$$g_{AB}^{(0)} = e^{\frac{\phi}{\sqrt{3}}} \begin{pmatrix} g_{\mu\nu} + e^{-\sqrt{3}\phi} A_\mu A_\nu & e^{-\sqrt{3}\phi} A_\mu \\ e^{-\sqrt{3}\phi} A_\nu & e^{-\sqrt{3}\phi} \end{pmatrix}. \quad (8.13)$$

Metrik (8.13), terhadap transformasi koordinat umum memiliki simetri elektromagnetik U(1). Jika kita meninjau hanya mode nol, integrasi terhadap dimensi ekstra akan menghasilkan aksi

$$S_5^{(0)} = \frac{2\pi L}{16\pi G_5} \int d^4x \sqrt{-g} \left[R - \frac{1}{2} \partial_\mu \phi \partial^\mu \phi - \frac{1}{4} e^{-\sqrt{3}\phi} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu} \right]. \quad (8.14)$$

Bandingkan persamaan (8.14) dengan aksi Hilbert-einstein dalam persamaan (8.3) maka kita memperoleh sebuah hubungan antara konstanta gravitasional 5-dimensi dan konstanta gravitasional 4-dimensi,

$$\frac{1}{16\pi G_4} = \frac{2\pi L}{16\pi G_5} \Rightarrow G_4 = \frac{G_5}{2\pi L}. \quad (8.15)$$

Persamaan (8.14) adalah persamaan yang mengandung gravitasi dan elektromagnetik dalam ruang-waktu 4-dimensi. Meskipun Kaluza-Klein berhasil dalam menyatukan gravitasi dan elektromagnetik, kehadiran medan skalar dilaton ϕ masih merupakan suatu permasalahan. Teori ini kurang tepat ketika menjelaskan mengapa gravitasi lebih lemah daripada elektromagnetik dan mengapa dimensi ekstra sangat kecil. Teori Kaluza-Klein juga tidak menyatukan gravitasi dan mekanika kuantum.

Sekarang ini, ide untuk mengurangi dimensi dari teori dengan dimensi yang lebih besar dari empat telah banyak dikembangkan dalam dunia riset. Contohnya, dalam teori string, ide kompaktifikasi Kaluza-Klein menjadi populer kembali karena teori string bosonik konsisten pada 26-dimensi dan teori superstring atau M-teori konsisten pada 10-dimensi dan 11-dimensi. Berikut ini kita akan mempelajari teori dimensi ekstra secara sekilas, untuk lebih mendalami silahkan baca referensi 1 dan 2.

8.2 Supersimetri

Dalam sebuah dunia supersimetrik, setiap partikel dipasangkan dengan partikel lain, pasangan supersimetrik dari partikel dinamakan *superpartner*. Pasangan partikel tersebut dapat dipertukarkan melalui sebuah transformasi supersimetri. Setiap fermion dalam sebuah teori supersimetrik dapat ditransformasikan menjadi boson pasangannya dan setiap boson menjadi fermion pasangannya,

$$|fermion\rangle = Q|boson\rangle, \quad (8.16a)$$

$$|boson\rangle = Q|fermion\rangle. \quad (8.16b)$$

Disini Q adalah operator yang mentransformasikan boson menjadi fermion dan sebaliknya. Jadi supersimetri adalah mungkin hanya jika boson dan fermion secara eksak berpasangan. Boson dan fermion yang berpasangan memiliki massa dan muatan yang sama satu dengan yang lain dan interaksinya dikontrol oleh parameter yang sama. Jika sebuah boson mengalami interaksi kuat, maka pasangan supersimetriknya

juga mengalami hal yang sama. Dari persamaan (8.16) dapat dilihat bahwa supersimetri mempertukarkan partikel-partikel yang memiliki spin berbeda. Karena spin-nya berbeda, boson dan fermion bertransformasi dengan cara berbeda ketika mereka berotasi dalam ruang.

Tabel 8.1.

	Partikel	Superpartner
	lepton	slepton
contoh	elektron	selektron
	quark	squark
contoh	top	stop
	Boson gauge	gaugino
contoh	Foton W boson Z boson gluon	Fotino Wino Zino gluino
	graviton	gravitino

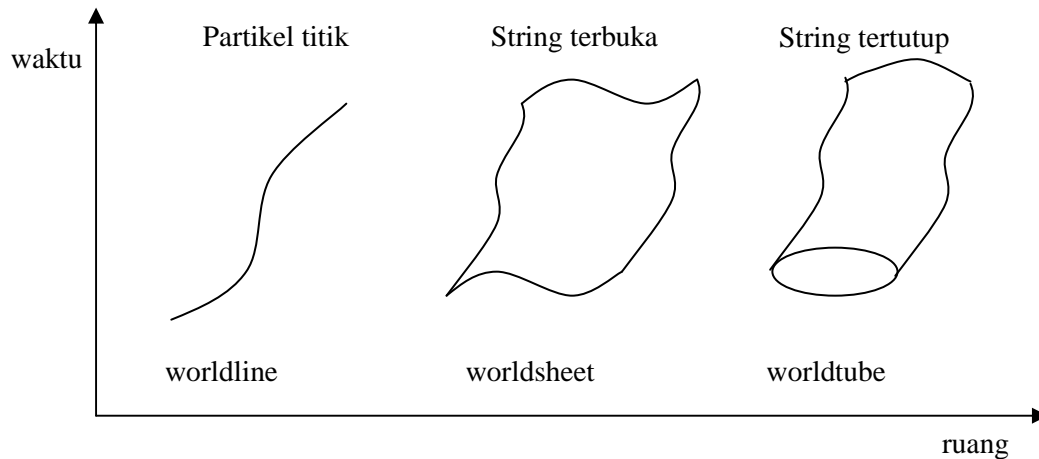
Seperti telah disebutkan di atas, dalam teori supersimetri jumlah boson dan fermion adalah sama. Dalam Model Standar, kriteria ini belumlah dipenuhi. Jika alam semesta kita supersimetrik, maka akan ada banyak partikel-partikel baru lainnya. Setidaknya dua kali banyaknya dari partikel-partikel yang telah ditemukan secara eksperimen. Semua fermion dari Model Standar, yaitu tiga generasi quark dan lepton, haruslah berpasangan dengan superpartner boson-boson baru yang belum ditemukan. Fisikawan memberikan nama pasangan dari quark dan lepton sebagai *squark* dan *slepton*. Secara umum, pasangan supersimetrik boson dengan fermion memiliki nama yang sama seperti fermion tetapi dengan menambahkan "s" pada huruf awalnya¹. Sebagai contoh, elektron dipasangkan dengan *selektron*, top quark dengan *stop quark*. Lihat Tabel 8.1.

¹ Superpartner fermion memiliki nama yang sama seperti boson, namun diakhiri dengan "ino". Misalnya pasangan fermion dari partikel gauge dinamakan partikel gaugino, pasangan fermion dari partikel Higgs adalah Higgsino.

8.3 Teori String/Superstring

Paradigma benda dalam fisika selalu diambil sebagai titik tak berdimensi (berdimensi nol), bergerak dalam ruang-waktu yang membentuk garis berdimensi satu atau trayektori. Pada akhir abad 20, para ahli fisika mulai memandang bahwa benda atau partikel bukanlah titik tak berdimensi, tetapi berupa garis atau tali (*string*) dengan ukuran yang sangat kecil (panjang *Planck*) sekitar satu dibagi angka dengan tiga puluh lima buah angka nol meter (10^{-35} meter). Ukuran sekecil itu dapat diukur dengan menggunakan energi yang sangat tinggi, konon dengan energi sebesar saat alam semesta terbentuk. Dengan menggunakan pemercepat partikel yang ada sekarang, belum mampu mengukur panjang "partikel" string. Akibatnya kemunculan paradigma baru ini bukan didorong oleh observasi tetapi lebih kepada hipotesa dan konsistensi dalam merumuskan teori kuantum gravitasi, yaitu penggabungan teori gravitasi Einstein dan teori kuantum.

Empat interaksi yang telah kita pelajari, mempengaruhi dinamika benda, dari galaksi yang sangat besar sampai partikel yang sangat kecil seperti *quarks*, masing-masing interaksi elektromagnetik, lemah dan kuat serta gravitasi. Karena teori yang ada mencakup juga benda-benda yang sangat kecil, maka teori yang dibangun haruslah konsisten dengan teori kuantum. Ketiga interaksi yang pertama dapat dirumuskan secara konsisten. Sebagai contoh, interaksi dalam model kuantum elektromagnetik di mediasi oleh foton, partikel cahaya yang tidak bermuatan listrik dengan massa diam nol. Seharusnya, interaksi kuantum gravitasi di mediasi oleh graviton, partikel tidak bermuatan dan tidak bermassa dengan spin dua. Tetapi masalahnya interaksi gravitasi tidak konsisten (inkonsistensi) dengan kuantum. Kalau dipaksakan perumusannya, timbul suku tak hingga (*divergensi*) dalam orde perturbasinya (*unrenormalizable*). Dengan memandang partikel sebagai string, gravitasi dapat digabung dengan kuantum. Namun ada yang harus "dibayar", yaitu berupa ruang-waktunya bukanlah berdimensi empat seperti yang kita alami sekarang, tetapi berdimensi sepuluh (satu dimensi waktu dan sembilan dimensi ruang).

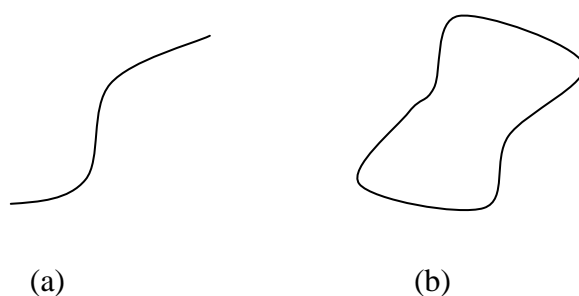


Gambar 8.4. Lintasan yang ditempuh oleh partikel titik dan string.

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 lain-lain ? Dan yang lebih penting, bagaimana model string dapat mengakomodasi gravitasi. Dalam teori medan kuantum, medan merupakan obyek-obyek yang dapat menghasilkan partikel-partikel dimana-mana di dalam ruang, yangmana merupakan eksitasi dari beberapa medan dan interaksi secara lokalnya digambarkan oleh pertukaran partikel-partikel gauge. Dalam teori string, string dapat berosilasi dan menghasilkan spektrum massa/energi yang terkait dengan keadaan osilator 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 seperti ditampilkan pada gambar 4.

Kita perhatikan Gambar 8.4, partikel dimodelkan sebagai titik yang tidak berdimensi, kemudian berpropagasi dalam ruang dan waktu sehingga membentuk trayektori. Dari prinsip *least action*, trayek ini harus menempuh lintasan yang paling optimum. Dalam kasus partikel, energinya yang diambil optimum, sehingga harus dijumlahkan tiap titik pada trayek tersebut. Dengan cara ini, didapat persamaan gerak yang menggambarkan hasil optimum tadi dan telah diverifikasi kesesuaiannya antara teori dan eksperimen. Perlu ditambahkan bahwa untuk partikel yang sangat kecil, dimana konsep kuantum berlaku, trayektorinya banyak sekali, dan yang dioptimalisasi adalah jumlah semua trayek yang mungkin. Dengan konsep yang sama, dapat digunakan untuk model string. Bedanya dengan partikel titik adalah, disini menjumlahkan luas (*membrane*), lihat pasal berikutnya, yang bentuknya bisa

bermacam-macam, misalnya bentuk bola, bentuk kue donat dan lain-lain. Untuk menghubungkan 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 (berarti partikel selalu bergerak, tidak pernah diam), sehingga kecepatan gerakannya melebihi kecepatan cahaya. 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 dan banyak lagi. Dengan cara ini, gravitasi digabungkan dengan teori kuantum tanpa menimbulkan masalah divergensi. Jikapun timbul anomali, hal ini dapat diiadakan asal saja ruang waktunya berdimensi sepuluh. Pertanyaannya, bagaimana membuang sisa dimensi yang ada (sebanyak 6 dimensi), karena kita tahu bahwa ruang waktu yang kita tempati berdimensi empat (satu dimensi waktu dan tiga dimensi ruang). Caranya adalah kompaktifikasi, dengan cara mengecilkan dimensi sisa itu menjadi panjang *Planck*, sehingga tidak diamati. Dengan metode ini, teori string paling tidak merupakan salah satu teori unifikasi (penggabungan interaksi) yang cukup sukses secara matematis. 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 Gambar 5, dan trayektorinya diberikan pada Gambar 8.4.



Gambar 8.5: (a) String terbuka (b) string tertutup.

Dari kedua jenis string dapat diperoleh 5 jenis teori string yang konsisten yaitu, Tipe I, Tipe IIA, Tipe IIB, Heterotik $SO(32)$ dan Heterotik $E_8 \times E_8$. Tipe I adalah teori superstring terbuka dan tertutup tak terorientasi, Tipe II adalah teori superstring tertutup terorientasi. I dan II adalah bergantung pada jumlah generator supersimetrinya sedangkan A dan B bergantung pada kaeraliti-nya (*chirality*),

kaeralitinya sama untuk A dan berlawanan untuk B. Sedangkan teori string heterotik adalah teori yang menggunakan string bosonik (26-dimensi) untuk mode kirinya dan menggunakan superstring (10-dimensi) untuk mode kanannya. 16 dimensi dari 26 dimensi string bosonik pada mode kiri dikompaktifikasi sehingga dapat dipandang sebagai medan 16 komponen pada 10-dimensi. Teori-teori ini supersimetrik, mengandung partikel graviton spin-2, dan partikel tak bermassa lainnya. Sehingga limit energi rendah teori string diharapkan menghasilkan teori yang kita kenal dalam 4-dimensi yaitu Standard Model dan teori relativitas umum.

8.4 Aksi Partikel titik relativistik dan String

Dalam ruang-waktu partikel akan bergerak membentuk kurva yang disebut sebagai *worldline* (Gambar 8.4), aksinya diberikan oleh

$$S = -m \int ds, \quad (8.17)$$

dengan ds adalah elemen panjang *worldline*

$$ds^2 = -\eta_{\mu\nu} dX^\mu dX^\nu. \quad (8.18)$$

Dengan menggunakan notasi, (variabel τ adalah parameter sepanjang worldline),

$$\dot{X}^2 = \eta_{\mu\nu} \frac{dX^\mu}{d\tau} \frac{dX^\nu}{d\tau}, \quad (8.19)$$

aksi diatas dapat ditulis menjadi

$$S = -m \int d\tau \sqrt{-\dot{X}^2}. \quad (20)$$

Aksi ini invarian terhadap reparameterisasi $d\tau \rightarrow \tilde{\tau}(\tau)$ dan transformasi Poincare

$$X^\mu \rightarrow \tilde{X}^\mu = \Lambda^\mu_\nu X^\nu + a^\mu. \quad (8.21)$$

Variasi dari aksi diatas menghasilkan persamaan gerak

$$\dot{u}^\mu = 0, \quad (8.22)$$

dengan u^μ menyatakan kecepatan

$$u^\mu = \frac{\dot{X}^\mu}{(\eta_{\mu\nu} \dot{X}^\mu \dot{X}^\nu)^{1/2}}. \quad (8.23)$$

Berbeda dengan konsep partikel titik, menurut teori String, elektron, photon, graviton dan partikel elementer lainnya merupakan eksitasi "partikel" 1-dimensi (string). Jika partikel titik yang bergerak dalam ruang-waktu membentuk worldline maka string yang bergerak dalam ruang waktu akan menyapu permukaan 2-dimensi yang disebut

worldsheet. Pada partikel titik, aksinya berbanding lurus dengan panjang *worldline*, maka aksi string berbanding lurus dengan luas *worldsheet* yang berbentuk

$$luas = \int d\tau d\sigma \sqrt{-h}, \quad (8.25)$$

dengan h determinan dari metrik permukaan yang diinduksikan oleh metrik ruang-waktu. Dari sudut pandang *worldsheet* $ds^2 = h_{ab} d\sigma^a d\sigma^b$ dengan $\sigma^0 \equiv \tau$, dan $\sigma^1 \equiv \sigma$, sedangkan dari sudut pandang ruangwaktu $ds^2 = \eta_{\mu\nu} dX^\mu dX^\nu$, sehingga

$$h_{ab} = \eta_{\mu\nu} \partial_a X^\mu \partial_b X^\nu, \quad \left(\partial_a \equiv \frac{\partial}{\partial \sigma^a}, \quad X^\mu \equiv X^\mu(\sigma, \tau) \right), \quad (8.26)$$

Kemudian aksi (8.25) dapat dinyatakan sebagai

$$S = -T \int d\tau d\sigma \left(-\det(\eta_{\mu\nu} \partial_a X^\mu \partial_b X^\nu) \right)^{1/2}. \quad (8.27)$$

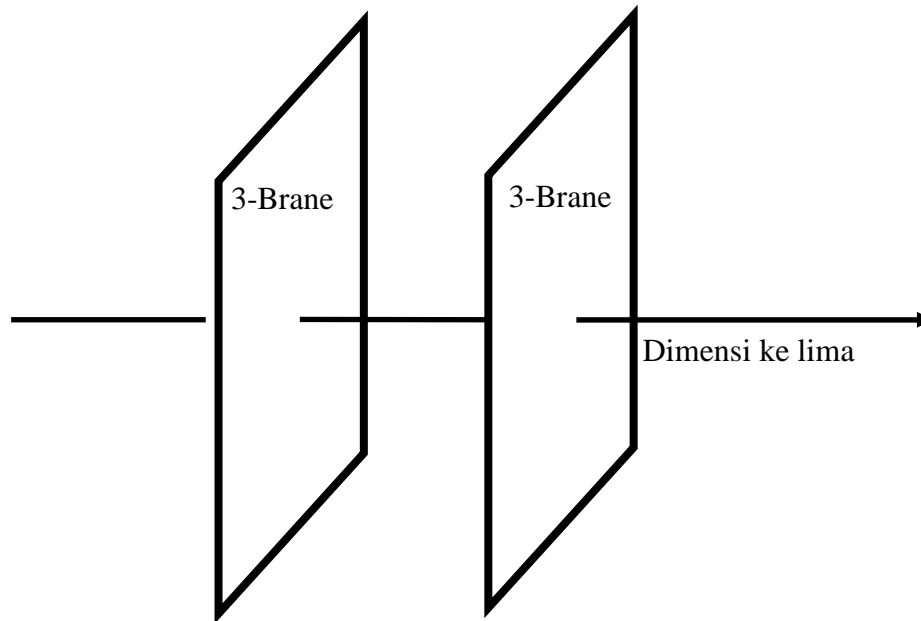
dengan T sebagai konstanta perbandingan yang diinterpretasikan sebagai tegangan string.

8.5 Brane

Sekarang ini, 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 balok atau bentuk berikutnya, atau dikenalkan istilah *D-branes*. Misalnya untuk dimensi $D=1$ disebut string (*1-branes*), dengan $D = 2$ dinamakan *membranes* dan seterusnya. Alam semesta kita mempunyai dimensi ruang $D=3$ dikenal sebagai *3-branes*. Termotivasi dari teori-M heterotik dalam ruang-waktu sebelas dimensi, 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^{-33} cm dan tidak ada cara untuk mengamati dimensi yang kecil ini.

Konsekuensi yang menarik pada konsep *braneworld* adalah dapat dijelaskan kehadiran *dark radiation* dan *dark matter* dalam konsep kosmologi. Kehadiran kedua "dark" tadi untuk menjelaskan mengapa alam semesta berekspansi mengembang, bukannya mengecil. Selain itu, penelitian tentang *braneworld* dan dimensi ekstra menuju ke sains fiksi seperti alam semesta paralel dan geometri melengkung (*warped geometry*). Dalam geometri melengkung, ruang dan waktu terintegrasi menjadi sebuah

pabrik ruang-waktu tunggal yang dapat terdistorsi oleh distribusi materi dan energi. Dari konsep geometri melengkung dapat pula dipahami bahwa jika sebuah objek serupa membran yaitu *brane* ditanam (di-embed) dalam ruang-waktu yang dimensi lebih tinggi dari dimensi *brane* itu sendiri maka *brane* akan mendistorsi ruang-waktu tersebut.

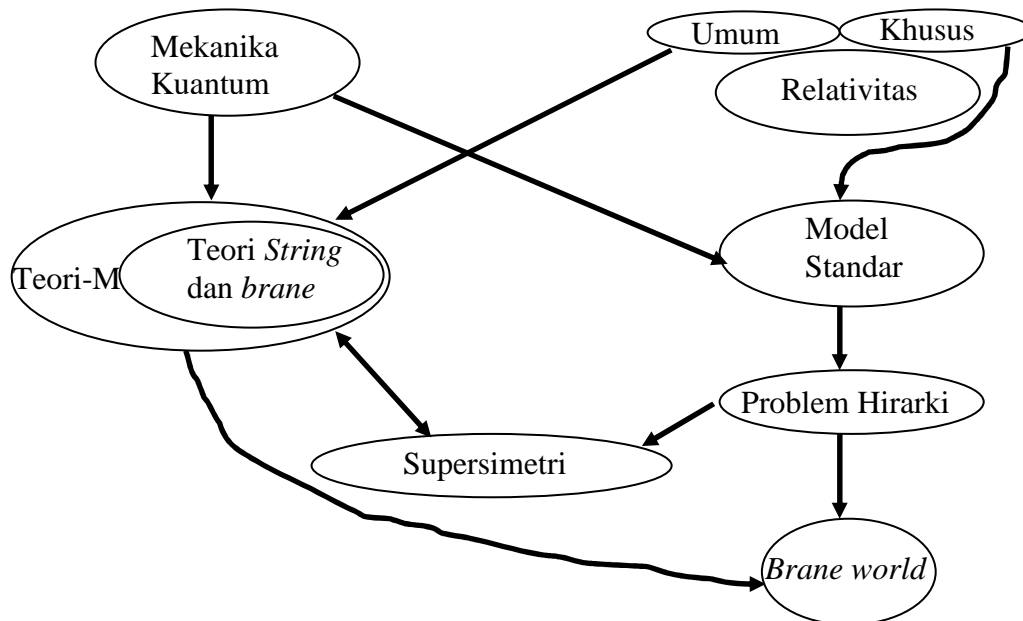


Gambar 8.6. Model brane world Randall-Sundrum I (RS1).

Randall dan Sundrum (Gambar 8.6) memperkenalkan dua buah skenario dunia *brane* yang serupa meskipun secara fenomenologi adalah berbeda. Skenario pertama terdiri dari dua buah *3-brane* yang masing masing memiliki tegangan positif dan negatif, dinamakan RSI. Dalam skenario ini, ruang-waktu 5-dimensi dengan semua medan materi (termasuk partikel-partikel Model Standar) diasumsikan terlokalisasi pada *brane* yang berada pada titik-titik tetap (*fixed point*) dari orbifold S^1/Z_2 . Selanjutnya, ruang dimana *brane* tersebut berada (dinamakan *bulk*) berlaku persamaan medan gravitasi Einstein dengan konstanta kosmologi negatif. Dalam skenario ini, dimensi yang ke-lima adalah kompak.

Sedangkan pada skenario kedua terdiri dari sebuah *3-brane*, dinamakan RS II, yang memiliki tegangan positif. Model kedua ini dapat diperoleh dengan mengirim *brane* yang memiliki tegangan negatif ke tak hingga. Dalam kasus ini, dimensi kelimanya menjadi tak berhingga namun *3-brane* yang memiliki tegangan positif masih memenuhi simetri Z_2 . Dalam kedua skenario, eksistensi dari *brane* dan

konstanta kosmologi *bulk* mengakibatkan sebuah geometri *bulk* melengkung atau melintir sesuai dengan konsep geometri melengkung.



Gambar 8.7. Keberadaan *brane world* dan bagaimana dihubungkan dengan teori-teori yang ada dan sedang berkembang.

Selain itu, model-model dunia *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 yangmana *brane* masih pula ditempatkan pada titik-titik tetap dari orbifold S^1/Z_2 . Walaupun banyak model dunia *brane* telah disederhanakan, pada dasarnya semua model digunakan dalam upaya membantu dalam mempelajari dan memahami sifat-sifat dari sebuah teori efektif yang diturunkan dari suatu aksi dalam ruang waktu berdimensi $d > 4$. Gambar 8.7 memperlihatkan bagaimana korelasi antara beberapa teori dan permasalahan dalam fisika partikel khususnya permasalahan hirarki sampai lahirnya konsep *brane world*. Di dalam konsep *brane world*, semua partikel-partikel model standar terjebak dalam *brane* dan hanya gravitasi yang dapat berpropagasi kemana-mana, baik di *brane* maupun di *bulk*.

Rangkuman

1. Teori model standar belum dapat menjawab pertanyaan-pertanyaan berikut: Mengapa ada tiga famili? atau bagaimana menentukan parameter dalam lagrangiannya? Mengapa partikel-partikel telah banyak ditemukan tetapi tidak diiringi dengan ditemukannya anti partikel, jika memang ada simetri antara keduanya di alam? Mengapa standar model tidak dapat memprediksikan massa partikel? Sebagai contohnya adalah bahwa partikel foton dan W adalah sama-sama partikel pembawa gaya, tetapi mengapa foton tidak bermassa sedangkan W bermassa? Apakah quark dan lepton benar-benar fundamental atau terdiri dari partikel-partikel yang lebih fundamental? Apa itu "dark matter"? Bagaimana gravitasi dapat masuk ke dalam teori ini? Kelemahan yang lain adalah penyatuan teori gravitasi dengan kuantum menghasilkan teori medan kuantum yang tidak dapat direnormalisasi (*nonrenormalizable*).
2. Salah satu usaha mengatasi kelemahan Model Standard adalah dengan memasukkan aspek supersimetri, yaitu simetri antara fermion dan boson dalam model yang dibangun. Cara lain adalah dengan menganggap bahwa kita hidup dalam ruang-waktu yang lebih besar dari 4-dimensi, dengan dimensi yang lainnya sangat melengkung sehingga tidak teramati (dikompaktifikasi), misalnya dengan mekanisme Kaluza-Klein.
3. Perluasan dari konsep *string* adalah *brane*. *String* adalah *1-branes* ($D=1$), *membranes* adalah *2-brane* dan seterusnya. Alam semesta kita mempunyai dimensi ruang $D=3$ dikenal sebagai *3-brane*. 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. Konsekuensi yang menarik pada konsep *braneworld* adalah dapat dijelaskan kehadiran *dark radiation* dan *dark matter* dalam konsep kosmologi
4. Konsep *brane world* adalah semua partikel-partikel model standar terjebak dalam *brane* dan hanya gravitasi yang dapat berpropagasi kemana-mana, baik di *brane* maupun di *bulk*.

Soal-soal Latihan

1. Sebutkan beberapa permasalahan dalam model standar dan berikan argumentasi anda!
2. Mengapa para fisikawan mulai mengembangkan dimensi ekstra!
3. Apakah keberadaan dimensi ekstra dapat dipercaya, jelaskan!
4. Model Standar fisika partikel masih menyimpan permasalahan salah satunya adalah permasalahan Hierarki, jelaskan apa yang dimaksud dengan ini!
5. Jelaskan dengan dimensi ekstra mengapa gravitasi lebih lemah dari gaya elektromagnetik, lemah dan kuat!
6. Jelaskan perbedaan antara partikel, string dan brane!
7. Jelaskan masing-masing perbedaan antara ke-5 teori superstring!
8. Jelaskan mengenai panjang skala Planck, waktu Planck dan massa Planck!
9. Jelaskan konsep brane world!
10. Jelaskan, apakah model brane world dapat menjelaskan permasalahan Hierarki!