

Model piawai fizik zarah memerihalkan daya keelektromagnetan, daya nukleus lemah, dan daya nukleus kuat sebagai medan kuantum tolak elektrolemah bersimetri  $SU(2) \times U(1)$  dan kromodinamik kuantum  $SU(3)$ . Graviti pula dengan jayanya diperihalkan oleh kerelatifan am, yang membabitkan geometri ruang-masa. Suatu keinginan ialah untuk menyatukan kesemua daya-daya ini menggunakan satu landasan tunggal. Pemerihalan daya secara bersepadu seperti ini, jika juga dapat menerangkan jirim, merupakan Teori Semua Benda.

### 13.1 Menyatukan graviti

Pendekatan langsung menyatukan graviti dengan daya medan kuantum lain ialah samada menerusi pengkuantuman teori kerelatifan am, atau merangkakan daya-daya lain dalam bahasa kelengkungan ruang, biarpun ia memerlukan dimensi tambahan. Ini kita telah bincang sebelum ini. Di sini, kita khusus lihat model penyatuan berdimensi tinggi dengan kemasukan supersimetri.

### 13.2 Supersimetri

Supersimetri ialah simetri di antara boson dan fermion. Bagi penjana supersimetri  $Q$ ,

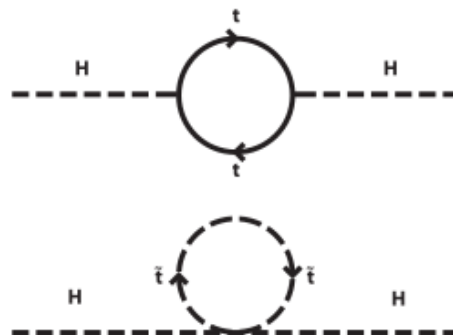
$$Q |boson\rangle = |\text{fermion}\rangle$$

dan

$$Q |\text{fermion}\rangle = |boson\rangle.$$

Untuk ini,  $Q$  seharusnya spinor. Dalam ruang-masa 4 dimensi, spinor yang minimal ialah spinor Weyl. Ini bermakna supersimetri yang minimal punyai 4 cas (4 'supercas'). Oleh kerana transformasi boson-fermion ini, multiplet supersimetri mengandungi keadaan-keadaan boson dan fermion, dalam bilangan yang sama.

Supersimetri bermakna setiap boson ada pasangan fermionnya, dan juga sebaliknya. Ini menyebabkan pembatalan rajah-rajah gelung, yang tanpanya membawa kepada terma-terma infiniti dalam pengiraan teori medan kuantum.



*Gambarajah gelung top batalkan gambarajah gelung stop (stop – top skalar: pasangan supersimetri top) dalam pengiraan jisim Higgs*

Kerelatifan khas punya ketakvarianan terhadap transformasi Lorentz. Operasi yang memberikan transformasi Lorentz (galakan kerelatifan), dan putaran dalam ruang membentuk suatu kumpulan simetri bernama Kumpulan Lorentz. Galakan dijana oleh  $K$  dan putaran oleh  $J$ . Simetri kerelatifan khas sepenuhnya memberikan ketakvarianan Poincare, yang termasuk translasi dalam ruang-masa, dijana  $P$ , dan simetri Lorentz. Supesimetri diandaikan mengandungi simetri Poincare dan simetri dalaman medan-medan yang dikandungi.

Perluasan supersimetri termudah ke atas algebra Poincare mengandungi dua spinor Weyl, yang mempunyai hubungan antikomutasi berikut,

$$\{Q_\alpha, \bar{Q}_{\dot{\beta}}\} = 2\sigma^\mu_{\alpha\dot{\beta}} P_\mu$$

dan semua hubungan antikomutasi lain di antara  $Q$  dan  $P$  menghilang.  $Q_\alpha$  dan  $\bar{Q}_{\dot{\alpha}}$  merupakan supercas (spinor dan spinor konjugat), dengan indeks  $\alpha = 1, 2$ . Indeks yang bertitik bertransformasi lain berbanding indeks tak bertitik, dan tiada pengecutan di antara keduanya.  $P_\mu$  merupakan penjana translasi dan  $\sigma_\mu$  matriks Pauli.

Supercas boleh ditambah, memberikan supersimetri perluas  $N = \text{bilangan supercas}$ . Di atas tadi ialah supersimetri  $N = 1$ .

### 13.3 Supergraviti

Seperti mana simetri tolak tempatan membawa kepada daya-daya tolak, supersimetri tempatan membawa kepada daya graviti. Ini dipanggil supergraviti. Supersimetri tempatan bermakna penjana supersimetri punyai pergantungan kepada kedudukan, dengan itu membawa sebutan tambahan dalam pembezaan terhadap ruang. Supergraviti ialah teori tolak supersimetri tempatan.

Dalam pendekatan formulasi metrik, metrik  $g_{mn}(x)$  diambil sebagai medan tolak, dan transformasi tolak ialah

$$\delta g_{mn} = \nabla_m \xi_n + \nabla_n \xi_m$$

di mana  $\xi = \xi^m(x)\partial_m$  ialah medan vektor menjana difeomorfisme infinitesimal.

Untuk membina model supergraviti, kita perlu pilih jirim dan daya yang hadir dalam Lagrangean. Medan berspin  $\frac{1}{2}$  biasanya dikaitkan dengan jirim, dan medan berspin 1 dengan daya. Boson pengantara graviti, disebut graviton, haruslah tak berjirim, kerana daya graviti berjarak infiniti dan merambat pada halaju cahaya, dan berspin 2, olehkerana sumber gravitian ialah tensor tegasan-tenaga  $T_{\mu\nu}$ , yang merupakan tensor peringkat kedua. (Kalau keelektromagnetan, foton berspin 1, yang sumbernya vektor-empat arus-empat, suatu tensor peringkat pertama.) Jika ada zarah spin 2 dalam multiplet, maka juga harus ada rakan supersimetrinya, berspin  $3/2$ , dinamakan gravitino. Setiap jenis medan dalam multiplet bertransformasi dengan cara berkenaan masing-masing. Kehendak supersimetri tempatan bermakna tolak supersimetri bergantung kepada kedudukan, dan oleh itu memberi sebutan tambahan. Ketakvarianan tolak bermakna perlu penambahan terma tertentu mendefinisikan pembezaan takvarian, misalnya, yang membawa kepada daya tolak.

### 13.4 Supertangsi

Teori tangsi memperluaskan konsep zarah sebagai titik kepada zarah sebagai tangsi, atau objek satu dimensi. Saiz tangsi yang bukan sifar ini membolehkan kamiran terhingga terhadap saiz bagi terma-terma yang ada pembahagian saiz. Ia memberi pangkasan tenaga (“had ultralembayung”) dalam kamiran yang membabitkan gambarajah gelung. Capahan ultralembayung timbul daripada gambarajah Feynman dengan sekurang-kurangnya dua gelung. Kerelatifan am terkuantum tidak ternormal semula secara usikan. Tidak seperti elektrodinamik kuantum, yang ternormal semula. Jadi pewujudan tangsi membolehkan pengiraan dalam graviti kuantum. Ini berlaku pada skala Planck, dan saiz tangsi diandaikan pada skala berkenaan. Jarak Planck diterbitkan daripada gabungan pemalar Planck, bersama pemalar-pemalar asas lain, yang memberikan dimensi jarak,

$$l_P = \sqrt{\hbar G/c^3}.$$

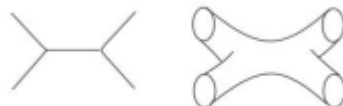
Secara berkesan, pada tenaga rendah, jarak ini terlalu kecil dan zarah dilihat sebagai titik.

Dengan tangsi, sifat-sifat zarah boleh diberikan oleh keadaan tangsi – jadi hanya satu (jenis) tangsi diperlukan. Apa sahaja zarah yang akan ada, diwakili keadaan getaran yang berbeza dalam satu tangsi asas. Kelainan yang ada hanyalah samada tangsi itu terbuka atau tertutup.



*Tangsi terbuka dan tangsi tertutup*

Pengiraan gambarajah Feynman yang membabitkan tangsi menggantikan graf garisan kepada manifold berdimensi 2, yang disebut helaian dunia tangsi. Tiada kesingularan diperlukan untuk manifold ini. Juga, tiada verteks di atas helaian dunia tangsi ini, jadi kita tiada kebebasan untuk menentukan bagaimana tangsi bersalingtindak.



*Suatu gambarajah Feynman untuk tindakbalas dua zarah titik, dan gambarajah serupa untuk tindakbalas dua tangsi (tertutup).*

Namun kenapa perpanjangan ke dimensi satu sahaja? Unsur satu-dimensi tangsi boleh diseluruhkan kepada membran dua-dimensi dan seterusnya  $p$ -bran  $p$  dimensi.

### 13. 5 Dimensi tinggi

Teori supertangsi dan bran boleh diselesaikan bila dimensi ruang-masa ditambah daripada 4.

Teori supertangsi memerlukan ruang-masa dimensi tinggi untuk kekonsistenan matematikanya. Seperti teori Kaluza-Klein, dimensi lebih mengikal menjadi sangat kecil dan tidak tercerap, dalam pemadatan ruang-masa ini. Ada teori tangsi dalam 10, dalam 11, dan dalam 26 dimensi. Namun tidak

semua pemadatan memberikan model dengan ciri-ciri yang betul untuk memberikan fizik zarah yang ada. Untuk pemadatan yang menyokong fizik zarah, dimensi padat berbentuk manifold Calabi-Yau. Manifold Calabi-Yau di sini merupakan manifold kompleks 6 dimensi yang mempunyai ciri topologi dan geometri tertentu.

Sebagai pilihan kepada pemadatan ialah pendekatan di mana ruang-masa 4 dimensi dunia yang tercerap terkandung dalam ruang dimensi lebih tinggi. Ini disebut gambaran bran-dunia. Tangsi terbuka yang mewakili boson pembawa daya terikat hujung-hujungnya ke atas subruang 4 dimensi tadi, sementara tangsi tertutup yang membawa graviti merambat dalam ruang berdimensi tinggi. Ini dapat menerangkan kenapa graviti begitu lemah berbanding daya-daya lain.

### 13.6 M

Ada pelbagai versi teori supertangsi yang berpotensi. Namun didapati bahawa versi teori yang berbeza semuanya sebenarnya berkaitan dengan cara yang tidak remeh. Satu hubungan ialah menerusi kedualan-S, di mana dalam beberapa kes, kumpulan zarah yang bersalingtindak kuat dalam satu teori dapat dilihat sebagai kumpulan zarah yang bersalingtindak dengan lemah dalam teori yang lain. Apa yang dikenali sebagai teori tangsi Jenis I sepadan dengan yang disebut teori tangsi  $SO(32)$  heterotic menerusi kedualan-S, dan begitulah teori tangsi Jenis IIB terkait dengan dirinya sendiri. Satu lagi hubungan ialah menerusi kedualan-T, yang menghubungkan pergerakan dengan dimensi lebihan berjajari  $R$  dengan yang dengan jejari  $1/R$ . Misalnya, momentum dual dengan bilangan lilitan (tangsi keliling bulatan menerusi kedualan-T. Kedualan-T menyetarakan teori tangsi jenis IIA dengan jenis IIB, dan mengaitkan dua versi teori tangsi heterotik. Kedualan juga menyetarakan teori lain, seperti kesepadanan AdS/CFT yang menghubungkan teori tangsi dengan suatu teori medan kuantum.

Dengan kedualan, teori-teori supertangsi yang kelihatan berlainan menjadi sudut-sudut pandangan berlainan bagi suatu teori tunggal. Ini digelar teori M. Teori M menjadi satu calon 'Teori Semua Benda'. Kini ia menunggu bukti eksperimen. Ketidaktemuan kesan supersimetri di eksperimen-eksperimen LHC di CERN dan lain-lain, merupakan cabaran kepada teori supertangsi dan M.