

Daya elektromagnet dan daya lemah dapat diterangkan oleh teori medan tolok, dan disatukan menjadi kesan tunggal. Apakah mungkin daya yang lain, terutama daya nukleus kuat yang diperihalkan QCD, juga boleh disatukan dengan daya elektrolemah? Kita bincangkan beberapa kemungkinan.

### 10.1 Model Piawai

Model piawai (*Standard Model*: SM) fizik zarah menerangkan daya-daya nukleus kuat, lemah dan elektromagnet sebagai medan tolok. Daya elektromagnet dan daya lemah dilihat sebagai hasil pecahan simetri medan elektrolemah yang tersatu. Penyatuan agung merujuk kepada penyatuan QCD dengan sistem elektrolemah ke dalam simetri yang lebih besar. Model piawai diperihalkan oleh salingtindak tolok tempatan bersimetri  $SU(3)_c \times SU(2)_L \times U(1)_Y$ , maka kumpulan penyatuan harus lebih besar.

Dalam model piawai, ada 3 keluarga atau generasi multiplet  $[Q, u^c, d^c; L, e^c]$ , yang asasnya kuark u dan kuark d tangan kiri (Q), neutrino elektron dan elektron tangan kiri (L), dan konjugat cas  $u^c, d^c, e^c$  tangan kanan. Versi-versi dengan jisim lebih besar tetapi ciri sama memberi generasi muon dan generasi tauon.

Terhadap  $SU(3)_c$ , kuark bertindak sebagai perwakilan-3 (3 keadaan warna), sementara konjugatnya (antikuark) sebagai perwakilan- $\bar{3}$ , dan yang lepton, sebagai singlet, perwakilan-1. Kuark dan lepton tangan kiri adalah perwakilan-2 bagi  $SU(2)_L$ , sementara yang tangan kanan adalah singlet. Jadi transformasi multiplet  $[Q, u^c, d^c; L, e^c]$  itu terhadap  $SU(3)_c \times SU(2)_L \times U(1)_Y$  boleh ditulis sebagai

$$[(3, 2, \frac{1}{3}), (\bar{3}, 1, -\frac{4}{3}), (\bar{3}, 1, \frac{2}{3}); (1, 2, -1), (1, 1, 2)].$$

Nombor-nombor yang ketiga itu mewakili  $U(1)_Y$  dan merupakan nilai hipercas lemah  $Y = 2(Q_{EM} - T_3)$ , dengan  $T_3 \equiv I_3$ .  $Q_{EM}$  ialah cas elektromagnet, dan  $I_3$  ialah komponen ketiga isospin lemah.  $I_3$  bernilai  $+\frac{1}{2}$  dan  $-\frac{1}{2}$  untuk ahli doublet  $SU(2)$  dan 0 untuk singlet. Perhatikan bahawa simetri  $SU(2) \times U(1)$  elektrolemah tidak menghormati  $U(1)_{EM}$  elektromagnet (kumpulan  $U(1)$ nya mewakili simetri lain), jadi  $Q_{EM}$  sahaja tidak cukup untuk menjadi cas takvarian baginya.

Model piawai dapat menerangkan fenomenologi daya kuat, lemah dan elektromagnet bersama ciri zarah-zarah keunsuran jirim, dari segi simetri tolok yang mendasari. Namun ada 19 parameter sembarangan yang tidak diramalkan nilainya oleh model piawai. Contoh termasuk nilai cas elektrik (atau kekuatan gandingan elektromagnet) dan jisim-jisim zarah fermion.

### 10.2 Penyatuan Agung (*Grand Unified Theory*: GUT)

Bagaimanakah QCD boleh disatukan dengan elektrolemah?

Apabila QCD disatukan dengan elektrolemah, maka akan ada kaitan kuark dengan lepton, yang bermakna bahawa cas elektrik kuark dan lepton berhubung. Ini berita baik, kerana sebelum penyatuan pun, cas elektrik kuark adalah dalam kuantum tepat-tepat  $1/3$  daripada cas elektrik lepton bercas. Penyatuan juga mengurangkan bilangan parameter sembarangan yang diperlukan. Misalnya, penyatuan bermakna kekuatan gandingan daya-daya berlainan itu berkait. Seperti penyatuan daya elektromagnet dengan daya lemah menjadi elektrolemah, begitulah elektrolemah mungkin boleh disatukan dengan QCD dalam suatu teori tolok tersatu, dalam kumpulan simetri yang lebih besar. Inilah penyatuan agung.

Penyatuan agung perlu merangkumi QCD dan elektrolemah, maka kumpulan tolaknya mesti mengandungi  $SU(3)_C \times SU(2)_L \times U(1)_Y$  sebagai subkumpulan.

Satu model awal yang dicadangkan ialah model Pati-Salam. Model ini adalah berasaskan simetri merangkum berbentuk  $SU(4)_C \times SU(2)_L \times SU(2)_R$ .  $SU(4)_C$  merangkumi 3 warna QCD dan lepton sebagai warna keempat. Untuk mengelakkan kekiralan atau ketertangan menjadi asas, kesamaan sektor tangan kanan dengan sektor tangan kiri disemat dengan kumpulan simetri  $SU(2)_L \times SU(2)_R$ . Simetri bagi sektor tangan kanan,  $SU(2)_R$ , membawa kepada wujudnya neutrino tangan kanan  $\nu^c$  yang tidak ada dalam Model Piawai, dan oleh itu tidak bersalingtindak dengan zarah-zarah Model Piawai. Kita ada neutrino mandul.

Model termudah ialah model Georgi-Glashow yang menyatukan ke dalam simetri  $SU(5)$ , dengan satu gandingan tolok tunggal,  $\alpha_G$ , yang terdefinisi pada tenaga di skala penyatuan agung  $M_G$ , iaitu lebihkurang jisim boson tolok berkenaan. Dalam model ini, zarah-zarah keunsuran merupakan perwakilan 10 bagi  $SU(5)$  itu, iaitu  $[Q, u^c, e^c]$  dan  $\bar{5}$  iaitu  $[d^c, L]$  untuk setiap generasi atau keluarga. Pada tenaga yang lebih rendah daripada  $M_G$ , simetri  $SU(5)$  berpecah menjadi  $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$ . Dalam model ini, ada salingtindak antara kuark dan lepton, kerana kedua-duanya dalam multiplet yang sama. Ini membolehkan reputan proton kepada lepton, yang lebih ringan. Maka proton mereput. Pencarian bukti untuk reputan proton tidak terhasil.

Bagaimana hendak mencari reputan dengan masahayat yang begitu lama? Kita boleh gunakan fakta yang reputan ini bersifat kebarangkalian. Jadi jika kita gunakan bilangan proton yang banyak, ada kebarangkalian reputan dilihat walaupun masahayatnya panjang, kerana bilangan besar itu. Reputan proton boleh dicari dalam amaun air yang banyak. Air itu menjadi sumber proton dan juga bahan pengesanan sinaran Cherenkov dari zarah-zarah terhasil reputan. Eksperimen lama dalam tanah (untuk mengurangkan sinaran latar belakang) tidak melihat reputan proton, dan menghasilkan had rendah masahayat proton  $\tau > 10^{31} - 10^{33}$  tahun (bergantung kpd mod reputan). Ini mengekang model Georgi-Glashow ini.

Model dengan simetri yang lebih besar, ialah model  $SO(10)$ , berdasarkan simetri diwakilkan matriks berortogan  $10 \times 10$  khas (determinan 1). Semua salingtindak adalah dengan gandingan tolok tunggal  $\alpha_G$  dan setiap keluarga adalah dalam perwakilan  $16 = (10 + \bar{5} + 1)$ . Singlet di situ senangnya ialah  $\nu^c$ .  $SO(10)$  ini hendaklah berpecah supaya akhirnya memberikan  $SU(3)_C \times SU(2)_L \times U(1)_Y$ .

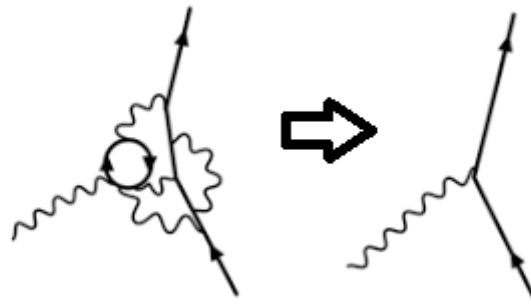
Ada juga model yang berasaskan kumpulan simetri lagi besar, misalnya  $E_6$ . Masalah dengan kumpulan simetri yang besar ialah multiplet zarah pun besar, maka banyak zarah baharu diramalkan. Ini memerlukan ditemukan zarah-zarah tambahan ini, maka ia tidak begitu menarik.

### 10.3 Penyatuan gandingan tolok

Menurut penyatuan agung, pada tenaga tinggi  $E \gg M_G$ , hanya ada satu daya, dengan kekuatan gandingan tunggal,  $\alpha_G$ . Pecahan simetri berlaku pada  $E \sim M_G$ , dan proses ini memberi jisim kepada zarah-zarah di luar model piawai yang biasa, seperti yang berlaku kepada boson Z dan W dalam pecahan simetri elektrolemah. Pada  $E \ll M_G$ , gelung zarah-zarah ini dalam gambarajah Feynman tidak menyumbang.

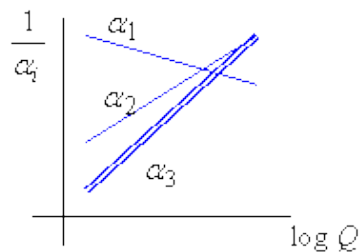
Dalam pengiraan daya medan kuantum, ada proses pernormalan semula. Pernormalan semula ialah proses matematik untuk membetulkan julat nilai yang bebas berubah tanpa mengubah telatah fizik (misalnya bila fizik bergantung kepada terbitan sesuatu parameter dan bukan kepada nilai mutlak

parameter itu) supaya tidak timbul nilai-nilai yang tak terhingga. Pernormalan semula bergantung kepada gambarajah Feynman berbentuk gelung yang dimasukkan. Ini kerana gambarajah gelunglah yang membawa kepada infiniti. Pernormalan semula bergantung kepada zarah-zarah yang menyumbang. Setelah pernormalan semula, nilai kekuatan gandingan dinormalkan apabila infiniti diubahsuai menjadi nilai terhad. Ini bergantung kepada gambarajah-gambarajah gelung yang menyumbang.



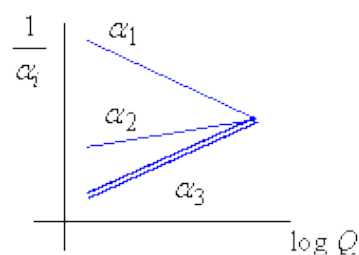
*Pernormalan semula gelung-gelung supaya terhilang.*

Jadi pada tenaga berbeza, di mana daya berbeza berkesan, menurut simetri semasa, pernormalan semula memberikan nilai kekuatan gandingan yang berbeza. Jadi daya elektromagnet, daya lemah dan daya kuat mempunyai kekuatan gandingan berlainan. Dan, gandingan ini berubah terhadap skala tenaga yang berkenaan. Dikatakan pemalar gandingan berlari. Kajian di LEP pada 1991 mendapati telatah dalam gambarajah berikut. Tiada titik penemuan tunggal nilai-nilai gandaan ini.



*Telatah kekuatan gandingan daya-daya teori medan terhadap skala tenaga Q.*

Namun, jika diandaikan wujudnya supersimetri (SUSY), iaitu simetri di antara fermion dan boson, yang bermakna setiap fermion ada pasangan bosonnya, dan begitu juga sebaliknya, larian pemalar gandingan ini berubah. Dengan SUSY minimum kepada model piawai (*Minimally Supersymmetric Standard Model - MSSM*), di mana pasangan-pasangan SUSY dalam lingkungan TeV, kita ada SUSY-GUT yang memberikan telatah pemalar gandingan seperti di bawah. Dengan SUSY, ada titik pertemuan nilai-nilai pemalar gandingan, yang dijangkakan kalau penyatuan agung berlaku.



### *Larian pemalar gandingan dengan SUSY-GUT.*

Ada justifikasi untuk SUSY. Namun, SUSY meramalkan superpasangan – skuark (berspin integer) bagi kuark, slepton (seperti selektron dan sneutrino) bagi lepton, fotino (berspin  $\frac{1}{2}$  integer) bagi foton, wino dan zino bagi W dan Z, gluino bagi gluon, dan sebagainya, yang belum ditemui.

#### **10.4 Penyatuan daya-daya medan kuantum**

Kejadian penyatuan agung lebih-kurang diterima, walaupun model yang betul belum ditentukan.

Sokongan eksperimen pun belum ada. Reputan proton belum dilihat, yang harus berlaku jika kuark bergandingan dengan lepton. Jika SUSY terbabit, superpasangan zarah-zarah belum ditemui. Begitu juga, boson X, boson pengantara daya tersatu, belum ditemui. Jisimnya dijangkakan pada skala tenaga penyatuan agung itu. Juga, sektor Higgs, medan pemecah simetri untuk GUT, belum ditemui.