

7.

Imperial

Perlanggaran elektron dengan antielektron atau positron, mengakibatkan kemusnahabisan dan penghasilan tenaga tulen, dalam bentuk foton. Ini membabitkan elektrodinamik kuantum, yang agak difahami. Juga, proses ini agak bersih berbanding perlanggaran hadron, yang membabitkan berbilang kuark dan gluon.

Penjerumusan saya ke dalam dunia fizik zarah pada mulanya ialah menerusi perlanggaran elektron-positron. Pengajian PhD saya di Imperial College London membabitkan analisis perlanggaran elektron-positron di pelanggar PETRA di DESY, Hamburg, Jerman, pada tahun 1980an. Pada waktu itu, setelah kuark b ditemui menerusi penemuan zarah J/ψ dalam perlanggaran elektron-positron, harapannya ialah itu menemui kuark keenam, kuark t.

Saya menyambung PhD terus dari BSc di Makmal Blackett di Imperial. Kampusnya di South Kensington agak nyaman, dengan cara pembelajarannya agak niskala. Pelajarnya agak nerda sombong (dengan 'sombong' yang bukan jahat; cf bodoh sombong). Ada yang bergrafiti, "*An economist is someone who says that free electrons carry no charge,*" di tandas lelaki dekat pintu masuk utama Blackett.



Pintu ke Makmal Blackett dari Prince Consort Road.

TASSO

DESY, atau Deutsches Elektronen Synkrotron, ialah suatu kompleks makmal penyelidikan yang terletak di bahagian barat daya kota Hamburg. Kepadatan yang terdekat ialah Altona, sedikit ke selatan, di mana terdapat bilangan orang Turki yang besar, dan punyai masjid dan

kedai halal. Kalau ke DESY untuk seminggu-dua dari London, kami biasanya menginap di penginapan untuk tetamu di dalam. Penginapan mempunyai dapur dan banyak petang yang dihabiskan memasak bersama sambil membincangkan fizik dan lain-lain perkara.



DESY (latar depan) di Hamburg. Di sebelah kanan, litar lumba kuda, sementara stadium (di sebalik pokok-pokok di taman) dan lapangan terbang di latar belakang. Pusat kota berada jauh ke kanan.

DESY adalah di antara pusat fizik zarah yang terawal. Ia mula dibina dalam tahun 1960. Selepas Perang Dunia ke2, minat dalam fizik nukleus bertambah. Pada tahun 1955 Willibald Jentschke, seorang Jerman Austria yang waktu itu berkerja di Amerika dan telah membuat sumbangan besar kepada fizik nukleus, ditawarkan kerusi professor di Universiti Hamburg. Jentschke, yang telah mengetuai makmal sinkrotron di Universiti Illinois di Urbana, dikatakan telah memberi syarat di atas penerimaan penawaran itu; beliau mahukan kemudahan pemecut zarah dibina. Beliau berjaya memperolehi peruntukan DM 7.5 juta, suatu amaun yang tidak kecil pada waktu itu. DESY ditubuhkan disember 1959, dan Jentschke menjadi pengarahnya yang pertama, sehingga beliau dilantik Ketua Pengarah CERN di Geneva pada tahun 1971.



Pandangan udara kompleks penyelidikan DESY.

Saya mengambil bahagian dalam pakatan TASSO. Di pelanggar PETRA, ada empat titik pelanggaran, yang setiapnya di kelilingi himpunan pengesan yang canggih. TASSO adalah satu daripadanya, dan merupakan hasil kerjasama beberapa institusi dari Eropah dan Amerika, iaitu Aachen, Bonn, DESY sendiri, Hamburg, Imperial College, Rutherford (UK), Oxford, Weizmann (Israel) dan Wisconsin (AS). Ada lebih-kurang 100 ahli fizik dalam pakatan itu, yang mengkhusus setiapnya dalam pelbagai aspek pengesanan, dan pada satu-satu masa itu ada bilangan bermakna di antara mereka yang hadir di situs di DESY. Ada pelajar PhD bermastautin lama di sana, tetapi saya cuma pergi sekejap-sekejap beberapa kali. Penyelia saya, Profesor Peter Dornan, begitu jetset dan berulang setiap minggu di antara mengajar di London dan berada di DESY dan juga di CERN hampir setiap minggu. Penyelia Peter semasa PhDnya di Cambridge ialah Otto Frisch, yang mempelopori penemuan belahan nukleus yang membawa kepada bom atom.



Peter J. Dornan.

Imperial

Waktu itu, memang agak berfesyen jika anda buat fizik zarah. Tahun 1979, Abdus Salam, asal Pakistan, dari Imperial telah memenangi hadiah Nobel dalam Fizik, bersama Steven Weinberg dan Sheldon Glashow, kedua-duanya dari Universiti Harvard pada waktu itu. Weinberg, seorang Yahudi terbuka, pernah bekerja bersama Salam, seorang Islam terbuka, di Imperial pada tahun 1960an. Weinberg dan Glashow pernah satu kelas di suatu sekolah di Brooklyn, New York.

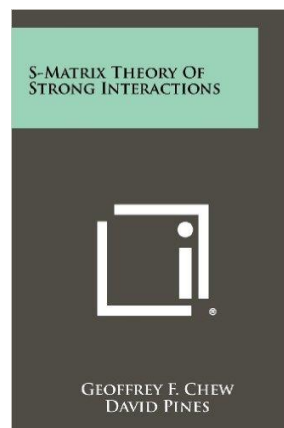


Glashow, Salam dan Weinberg memenangi Hadiah Nobel 1979.

Saya sebenarnya sepatutnya membuat PhD dalam bidang fizik teori. Semasa tahun akhir, saya telahpun bertemu Tom Kibble selaku Ketua Jabatan untuk mendapatkan tempat dalam kumpulan teori. Namun, setelah Salam dikalungi Nobel, ramai pula yang berminat untuk mengaji fizik teori di Imperial. Profesor Tom Kibble telah menemui saya di koridor aras 5 dan menerangkan kepada saya bahawa nampaknya permohonan saya untuk bersama kumpulan teori terpaksa ditolak. Saya cuba tidak menunjukkan kedukacitaan dan memberitahu yang saya juga dapat penerimaan untuk pengajian PhD fizik teori daripada Massachusetts Institute of Technology. Akhirnya, saya tidak pula ke MIT (persatuan Islamnya telah menghantar

warkah selamat datang!), tetapi terus di Imperial tetapi bersama kumpulan fizik nuklear tenaga tinggi yang menjalankan penyelidikan fizik zarah bereksperimen.

Pada tahun-tahun sebelum 1970an-1980an, teori yang mendominasi fizik zarah ialah teori matriks S . Matriks ini mengandungi segala maklumat serakan zarah. Teori medan kuantum, yang hari ini mendasari model piawai untuk fizik zarah, disokong hanya di beberapa tempat di dunia, termasuk di Imperial dan di tompok-tompok tertentu di pantai barat Amerika Syarikat. Kejayaan Elektrodinamik Kuantum, yang berasaskan teori medan kuantum, merupakan kejayaan awal teori itu pada tahun 1960an, tetapi masalah dalam menggunakannya untuk daya nukleus kuat dan daya nukleus lemah selepas itu telah merencat kepopularannya. Hadiah Nobel 1979 itu merupakan satu titik tolak kepada penerimaan teori medan kuantum sebagai teori dasar fizik zarah, setelah daya lemah akhirnya dapat diperihalkan, bersama keelektromagnetan.

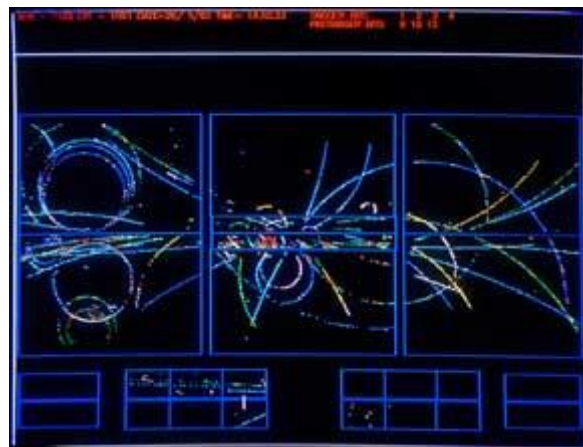


Teori matriks S .

Tahun-tahun selepas Hadiah Nobel itu begitu mengujakan untuk fizik zarah di Imperial. Penemuan “arus lemah neutral” iaitu kesan boson pengantara daya lemah, Z^0 , telah memastikan Hadiah Nobel untuk kerja-kerja teori Salam dan Weinberg. Ini dilihat dalam eksperimen membabitkan kebuk buih di CERN pada tahun 1973, di mana suatu neutrino telah bersalingtindak tanpa perlu berubah menjadi muon yang bercas, yang diperlukan untuk mengabadikan cas jika zarah pengantara arus lemah itu bercas. Teori lama daya nukleus lemah mengandaikan saling-tindak titik dengan arus bercas yang dapat menghasilkan lepton bercas, seperti muon dan elektron, bersama pasangan bicas mereka, neutrino muon dan neutrino elektron, dalam reputan beta. Teori Salam-Weinberg, berasaskan teori medan kuantum, mengandaikan zarah-zarah W^+ , W^- dan juga Z^0 yang mengantarakan daya lemah. Boson Z^0 belum ditemui, tetapi kesannya sebagai arus neutral telah dilihat. Weinberg datang ke Imperial pada pertengahan 1982 dan dalam ceramahnya menyebut Z^0 , beliau dengan yakin menyambung, “...yang akan ditemui di CERN Ogos ini.” Sebenarnya Z^0 ditemui di CERN lebih lewat sedikit daripada masa yang diramalkan itu, tetapi memang ia ditemui.



Arus neutral dilihat oleh eksperimen kebuk buih Gargamelle di CERN pada 1973. Satu daripada neutrino muon dalam bim tuju bersalingtindak dengan elektron dalam atom yang diserak (jejak mendatar, berbengkok-bengkok kerana ringannya elektron), tanpa berubah menjadi muon (tiada jejak muon). Proses $\nu_{\mu}e^{-} \rightarrow \nu_{\mu}e^{-}$ berlaku melalui saling-ganti Z^0 , dan tidak boleh berlaku melalui pertukaran arus bercas W^{\pm} .



Zarah Z^0 ditemui oleh pakatan UA1 di CERN. Pasangan elektron dan positron dari reputan Z^0 dilihat di antara zarah-zarah lain.

Di Imperial pada waktu itu, ada nama-nama terkenal seperti Salam, Kibble, yang dikaitkan dengan mekanisme Higgs-Kibble bagi pecahan simetri dalam teori Salam (namun Kibble tak termasuk senarai pemenang Nobel setelah penemuan zarah Higgs), dan David Olive, yang pernah memenangi hadiah Dirac anugerah ICTP (International Centre for Theoretical Physics, di Trieste, Italy, yang didirikan oleh Salam, dan kini dikenali sebagai Abdus Salam ICTP). ICTP telah banyak memberi kemudahan kepada ahli-ahli sains dari dunia ketiga, dan saya sendiri merasakan bahawa Salam layak mendapat Nobel keamanan (satu lagi Nobel) untuk

konsepnya dan untuk perjalanannya. Saya ingat David Olive yang mengajar saya kursus pascasiswazah 'Algebra dan Kekumpulan' dengan cara yang begitu jelas dan mengujakan. Olive di antara yang awal-awal membawa konsep dualiti, yang telah menyelamatkan teori tangsi dari kekecamukan kepelbagaian dengan menyatukan teori-teori berbeza menerusi dualiti ini. Ramai lagi nama yang hebat seperti Chris Isham dan Michael Duff. Saya ingat suatu Disember saya agak, Kumpulan Teori mahu adakan makan-makan Krismas, dan diletak poster untuk ini, yang menjemput peserta-peserta membawa *pot-luck* seperti *salami*, *kibbled ...* (saya dah lupa apa – mungkin *kibbled turkey* – ayam belanda cincang), dan *olives* (buah zaitun).



Makan-makan Krismas.

Salam memang seorang yang lincah dan berkarisma, seperti diceritakan Kibble. Beliauah yang mengasaskan kumpulan teori di Imperial pada tahun 1956, semasa umurnya 30, dan Kibble telah menyertainya pada tahun 1959. Salam seorang ketua yang menginspirasi. Beliau telah menyumbang dalam pernormalan semula teori medan elektrodinamik kuantum, iaitu kaedah pengiraan yang dapat melenyapkan infiniti yang melanda. Dengan itu pengiraan pada tahap anggaran yang lebih tinggi dapat dibuat dan dibandingkan dengan ukuran eksperimen yang mula dibuat. Elektrodinamik kuantum cepat menjadi teori yang paling tepat disahkan dalam sejarah fizik. Salam dipilih Felo dalam Persatuan Diraja ('Royal Society'), persatuan akademik tertinggi Britain, pada umur yang termuda, 33 tahun.

Kejayaan teori Elektrodinamik Kuantum dengan semulajadinya mencetus usaha untuk menerangkan daya-daya lain dalam bentuk medan kuantum. Sasaran pertama ialah daya nukleus kuat, yang mengikat proton dan neutron di dalam nukleus mengatasi tolakan elektrostatik di antara proton yang bercas sama-sama positif. Namun di sini, pengiraan

menggunakan teori medan, yang berlandaskan anggapan bersiri teori usikan, tidak berguna kerana pemalar usikan tidak kecil seperti dalam elektrodinamik kuantum, jadi sebutan-sebutan pada penghampiran lebih tinggi tidak menjadi lebih kecil dengan gandaan lebih besar pemalar ini, dan hasil pengiraan mencapah dengan bertambahnya sebutan. Proses pernormalan semula untuk mengekang sebutan-sebutan mencapah, seperti yang digunakan dalam elektrodinamik kuantum, tak terpakai untuk daya kuat ini. Inilah yang menyebabkan ramai orang meninggalkan teori medan pada 1960an dan menyokong teori matriks S. Yang masih berpegang kepada teori medan pula, seperti Salam dan lain-lain di Imperial, memilih untuk meneliti dahulu daya nukleus lemah pula. Kepercayaan kepada teori medan berlandaskan andaian bahawa simetri tolok tempatan, seperti yang ada dalam elektrodinamik kuantum, menentukan pernormalan semula.

Tahun 1982 juga memberi kami peluang mendengar ceramah Sir Karl Popper yang datang melawat. Beliau ialah ahli falsafah sains tersohor, yang mempopularkan konsep kepemalsuan. Sesuatu cerapan yang menyetujui teori tidak boleh membuktikan teori tersebut; hanya cerapan semua kes boleh berbuat demikian. Ini seperti teori yang semua angsa berwarna putih, tidak dibuktikan oleh pemerhatian angsa-angsa putih. Namun ia boleh dipalsukan dengan mudah dengan pemerhatian contoh bertentangan: seekor angsa hitam! Menurut Popper, kebenaran suatu teori tak dapat dibuktikan, tetapi kepalsuannya boleh. Bahkan, menurutnya, sesuatu teori saintifik itu harus dapat dipalsukan. Sesuatu teori yang tak dapat dipalsukan, yakni tak dapat diuji dengan kemungkinan pemalsuan, bukanlah suatu teori sains.



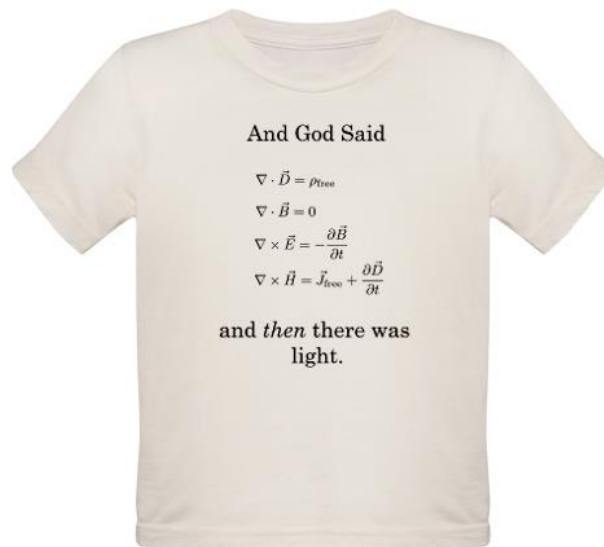
Nesan kubur Karl Popper. Saya sempat mendengar ceramahnya secara hidup pada tahun 1982.

Simetri dan penyatuan

Di Imperial memang tak kurang orang bijak dan kreatif. Saya ingat satu contengan di tandas lelaki apabila anda memasuki Makmal Blackett (bangunan Jabatan Fizik), “*An economist is someone who says that free electrons carry no charge*”, yang memainkan makna perkataan ‘free’ dan ‘charge’.

Yang menarik tentang teori Salam-Weinberg ini bukan sahaja kerana ia menerangkan daya nukleus lemah, tetapi juga kerana ia dapat menggabungkan daya ini dengan daya keelektromagnetan. Penyatuan merupakan tema yang berulang kali muncul dalam sejarah sains. Antara yang awal dalam sains moden ialah penyatuan graviti bumi dengan graviti samawi oleh Isaac Newton. Beliau memahami bahawa daya yang menarik jatuh epal ke

permukaan bumi adalah daya yang sama dengan yang mengikat planet dalam orbit keliling matahari. Kemudian pada kurun ke-19 James Maxwell menyatukan fenomena elektrik dan fenomena magnet dan sekaligus menunjukkan bahawa cahaya adalah rambatan gelombang elektromagnetan. Salam dan Weinberg menyatukan daya elektromagnet dengan daya lemah menjadi daya elektrolemah pada tenaga tinggi. Rendah daripada tenaga tertentu, daya tunggal elektrolemah ini, dengan simetri tolok $SU(2) \times U(1)$, mengalami pecahan simetri spontan, menghasilkan daya lemah dengan simetri $SU(2)$ terpecah, dan daya electromagnet dengan simetri $U(1)$.



Persamaan Maxwell menyatukan fenomena keelektrikan, kemagnetan, dan cahaya.

Dalam teori medan kuantum yang mendasari teori fizik zarah kini, simetri memainkan peranan yang utama. Zarah-zarah yang diwakili medan-medan, boleh transformasi di antara mereka menghormati simetri tertentu. Sesuatu teori medan kuantum itu dikaitkan dengan sesuatu simetri yang dipanggil simetri tolok, dan adanya simetri tolok ini bersifat tempatan dikaitkan dengan bolehnya pernormalan semula. Simetri tolok tempatan memerlukan zarah pengantara yang berjisim sifar, seperti foton. Pada tahun-tahun 1960an, daya kuat difikirkan diantarakan oleh pion, yang berjisim; jadi daya kuat tak ternormalsemulakan. Begitu juga daya lemah dianggap diantarakan oleh zarah berjisim kerana julat daya itu yang kecil. Menurut prinsip ketakpastian Heisenberg, ketakpastian yang kecil dalam nilai masa (yang memberikan jarak rambatan kecil zarah pengantara) memerlukan ketakpastian besar dalam nilai tenaga (tenaga-jisim "dipinjam" untuk mewujudkan zarah pengantara maya itu). Jadi daya nukleus lemah menurut teori awal juga tidak ternormalsemulakan.

Dari awal lagi, Salam telah melihat ketunggalan peranan simetri dan dia menulis, "kami terpegun dengan keindahan yang dahsyat cara simetri tolok menjana tindakan bersaling", dan menyatakan bahawa penentuan bentuk tindakan bersaling dengan mengenakan ketakvarianan tolok tempatan bermakna daya-daya timbul secara semulajadi. Beliau telah mula dalam jejak ini bersama John Ward seawall 1959 dan telah meneruskannya walaupun

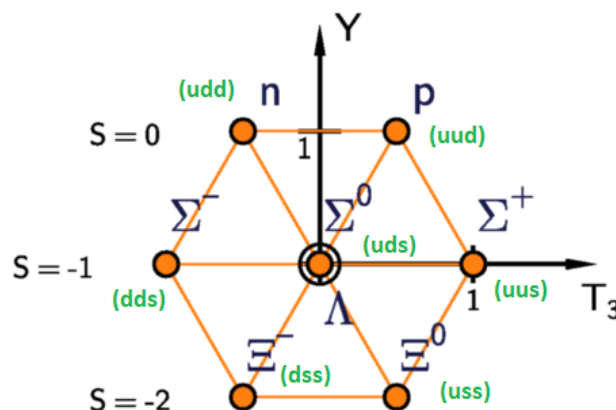
setelah Ward meninggalkan projek itu. Kepercayaan bahawa simetri dan ketakvarianan memandu heuristik teori zarah merupakan suatu yang agak baru ketika itu. Glashow di antara yang awal yang kagum dengan simetri, bahkan pada 1961 dia cadangkan penyatuan keelektromagnetan dengan daya lemah menerusi simetri tolok tempatan walaupun dengan simetri yang sah 'sebahagiannya'. Namun masalah dengan zarah pengantara daya yang berat masih menjadi penghadang. Nambu dan Giovanni Jona-Lasinio, seorang saintis Itali, memberi harapan dengan cadangan simetri tersorok yang dipecahkan spontan, daripada bandingan dengan fenomena kesuperpengkonduksian. Kebanyakan teoritikus menganggap pecahan simetri spontan sebagai mekanisme untuk menerangkan perbezaan jisim di antara zarah-zarah. Namun, Salam dan Weinberg menyarankannya sebagai cara untuk memastikan teori yang ternormal semula, terutama untuk teori tolok bersatu bagi saling-tindak elektromagnet dan nukleus lemah.

Di antara simetri paling mudah ialah simetri U(1), iaitu simetri putaran dalam satu dimensi, mewakili kemungkinan mengubah fasa gelombang fungsi kuantum zarah tanpa mengubah kesan fizik, dalam keelektromagnetan. Simetri SU(2) ialah simetri matriks uniter khas 2×2 , di antara fungsi kuantum 2-komponen. Daya lemah melihat 2 komponen ini sama – elektron dan neutrino, kuark naik (u) dan kuark turun (d), dan seterusnya. Bahkan simetri di antara u dan d menjadi asas kepada simetri di antara proton dan neutron yang dikenali sebagai isospin. Seperti zarah berspin $\frac{1}{2}$, yang mempunyai nilai komponen arah-z-nya samada $\pm \frac{1}{2}$, begitulah nucleon yang mempunyai isospin $\frac{1}{2}$ mempunyai komponen berupa proton (isospin-z nya $+\frac{1}{2}$) dan neutron (isospin-z $-\frac{1}{2}$). Isospin ialah simetri daya nukleus kuat antara neutron dan proton, yang dipecahkan oleh saling-tindak elektrik; namun pada jarak dekat, daya nukleus kuat menguasai daya elektromagnet, jadi ini suatu simetri penghampiran yang agak baik. Simetri SU(2) isospin di antara proton dan neutron, yang menerangkan juga 3 keadaan pion, diamkan menjadi simetri SU(3) secara bebas oleh Murray Gell-Mann di Kalifornia, Amerika Syarikat, dan Yuval Ne'eman pada tahun 1961, supaya dapat menerangkan kewujudan pelbagai jenis zarah-zarah yang baru ditemui. dapat menerangkan kewujudan pelbagai jenis zarah-zarah yang baru ditemui. Ne'eman ialah atase pertahanan Israel di London, yang juga menjalankan pengajian PhD di bawah seliaan Salam di Imperial pada masa itu. (Beliau kemudiannya ada menjawat jawatan menteri dalam kabinet Israel.) Seperti SU(2) isospin digunakan untuk menerangkan proton, neutron dan pion pada awalnya tanpa merujuk kepada struktur dalaman, begitulah SU(3) ini memberikan mutiplet-multiplet 8 ahli (oktet) yang menerangkan meson-meson pion dan kaon dan 10 ahli (dekuplet) yang menerangkan baryon-baryon seperti proton, neutron dan lambda. Keadaan oktetuplek mengilhamkan Gell-Mann untuk menamakan skemanya "jalan 8-lipat".



Jalan 8-lipat anjuran Gell-Mann dan Ne'eman.

Selepas proton didapati mempunyai struktur dalaman daripada ukuran SLAC, simetri SU(3) ini dikaitkan dengan komponen-komponen dalam proton, dan lain-lain hadron, iaitu kuark. ("Kuark" juga dinamakan oleh Gell-Mann.) Dengan adanya kuark ringan ketiga, kuark aneh (s), SU(2) isospin yang difahami secara lebih asas sebagai simetri antara kuark u dan d, diamkan menjadi simetri SU(3) di antara u, d dan s.



Jalan 8-lipat: oktet baryon bersama singlet Λ , bersama kandungan kuark masing-masing

Simetri SU(3) di antara jenis (atau 'perisa') kuark ini namun cuma simetri penghampiran, kerana jisim aneh agak lebih berat berbanding naik dan turun. Kemudian difahami bahawa keberadaan 3 kuark dalam baryon itu didasari simetri SU(3) yang memerihalkan cas daya nukleus kuat yang dinamakan 'warna'. Berbeza dengan cas elektromagnet yang hanya sejenis, cas kuat ini tiga jenis – dinamakan 'merah', 'hijau' dan 'biru'. Simetri SU(3)_{warna} merupakan simetri tepat, berbandingkan SU(3)_{perisa}.

Daya nukleus kuat, yang diperihalkan oleh kromodinamik kuantum atau QCD, mematuhi simetri SU(3)_{warna}, dan tidak membezakan di antara 3 cas warna dalam kuark dan gluon. Dengan itu hadron-hadron yang tak berwarna ("putih") yang dilihat, terdiri daripada tiga

kuark berlainan warna (baryon, seperti proton dan neutron), atau daripada kuark dengan warna tertentu dan antiquark dengan antiwarnanya (meson, seperti pion dan kaon).

Teori medan kuantum untuk daya elektromagnet, elektrodinamik kuantum atau QED, yang dipelopori Paul Dirac, Richard Feynman, dan lain-lain mengandungi ketakvarianan tolok, dan dengan itu dikatakan suatu teori medan tolok. Ketakvarianan tolok ini merupakan suatu simetri dalaman dalam medan-medan kuantum. Ia adalah suatu simetri tempatan, bukan sejagat, yang membenarkan keadaan dalaman yang berbeza pada kedudukan berbeza.

$$\psi(x) \rightarrow \psi(x)e^{ie\alpha(x)}$$

$$A_\mu(x) \rightarrow A_\mu(x) - \partial_\mu\alpha(x)$$

Matematik transformasi tolok ke atas medan-medan.

Salam dan lain-lain percaya bahawa teori tolok mendasari teori-teori saling-tindak antara zarah. Setelah QED, Chen Ning Yang dan Robert Mills, yang berkongsi bilik di Brookhaven National Laboratory di Amerika, telah mencadangkan teori tolok dengan simetri SU(2) isospin pada tahun 1954. (C. N. Yang pernah melawat Universiti Malaya sekitar tahun 2004, bersama isteri baru, yang berusia 28 tahun ketika itu. Beliau pula berusia 82 tahun. Dengan kombinasi umur sebegitu, mereka sempat juga menari bersama!) Sebenarnya teori yang sama seperti teori Yang-Mills juga telah dicadangkan oleh Ronald Shaw, seorang pelajar Salam di Universiti Cambridge. Namun ia hanya diterbitkan dalam tesisnya. Yang berasal dari China dan berpindah ke Amerika Syarikat, dan untuk berapa lama kini telah pulang ke China. Beliau memenangi Hadiah Nobel untuk fizik, pada umur muda 35 tahun, bersama Tsung-Dao Lee, juga berasal dari China dan bekerja di Amerika Syarikat, juga pada umur yang muda 31 tahun. Lee merupakan pemenang Nobel yang kedua paling muda dalam sejarah. Yang dan Lee merumuskan teori bahawa daya lemah tidak menghormati ketakvarianan pariti, iaitu simetri pantulan cermin, pada tahun 1956, yang telah dibuktikan pada tahun yang sama oleh Chien-Shiung Wu, seorang lagi China yang berpindah ke Amerika, bersama pasukan beliau. Lee dan Yang dihadihkan Nobel pada tahun 1957. Kecepatan ini agaknya mencerminkan minat dan kepentingan yang diberikan kepada pemahaman daya dan zarah keunsuran terutama dari aspek simetri pada tahun-tahun itu, termasuk kepada teori medan kuantum yang mula muncul. Pembuktian Wu menggunakan reputan Kobalt-60 pada suhu yang sangat rendah untuk meminimumkan hingar, yang memerlukan kebolehan bereksperimen yang handal. Wu tidak dianugerahkan Nobel. Kertas Lee dan Yang dalam Physical Review punyai abstrak hanya dua ayat, dan kadungannya banyak berbincang fenomenologi ukuran-ukuran yang telah dibuat: teori hanya terisi dalam appendix.



C. N. Yang bersama isteri.

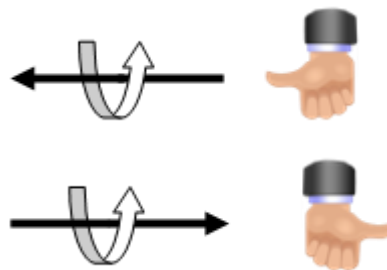
Saling tindak nukleus lemah telah mula diserang oleh teoritikus medan setelah cetusan teori V-A oleh Gell-Mann dan Richard Feynman, dan George Sudarshan dan penyeliaanya Robert Marshak, pada tahun 1958. Sudarshan asal India dan berpindah ke Amerika Syarikat. Saya pernah bertemu beliau di International Centre for Theoretical Physics (ICTP), yang ditubuhkan Salam untuk membantu ahli sains dari dunia ketiga, di Trieste, Itali, di birai Laut Adriatik, pada akhir 1980an atau awal 1990an. Ada dia ceritakan kepada saya tentang kisah V-A ini ketika kami mengongsi lif. Dia kata yang dia menemui teori itu dan ada menghantar kertasnya kepada Gell-Mann, tapi Gell-Mann pula yang mencadangkan teori sama selepas itu.

Teori V-A membolehkan salingtindak lemah diantarakan oleh boson-boson pengantara, seperti foton dalam salingtindak elektromagnet. Julian Schwinger, yang sebelum itu telah bersama membina teori QED dengan Feynmann dan lain-lain, telah mencadangkan teori tolok untuk daya lemah dengan pengantaraan boson dinamakan W (yang bercas: W^{\pm}). Bahkan dia menanya jika keelektromagnetan dan lemah dapat disatukan, dengan pengantara-pengantara W^+ , W^- dan foton. Glashow yang merupakan pengongsi Nobel bersama Weinberg dan Salam, yang menyaran model penyatuan elektrolemah, merupakan pelajar Schwinger. Sebenarnya empat daripada pelajar Schwinger telah memenangi hadiah Nobel, termasuk seorang dalam bidang Kimia! Apabila beliau berpindah dari Harvard ke Los Angeles, bilik pejabatnya diambilalih oleh Weinberg. Sepasang kasut lama ditemui di situ, seolah mencabar, "bolehkah anda membuat perjalanan sehebat saya?"

Masalah dengan ide W bersimetri dengan foton adalah pada perbezaan jisim. W perlu berjisim dalam lingkungan $100 \text{ GeV}/c^2$ untuk menerangkan julat kecil salingtindak lemah. Prinsip ketakpastian Heisenberg dalam teori kuantum mengatakan bahawa tenaga darab masa tak dapat dipastikan pada skala kurang daripada pemalar Planck (yang sangat kecil, hanya relevan pada skala atom). Tenaga boleh dipinjam dari vakum untuk mewujudkan W maya ini, tapi hanya untuk masa terhad. Lagi berjisim W, lagi banyak tenaga diperlukan, maka lagi sekejap dibolehkan, dan oleh itu lagi dekat jarak yang sempit ia bergerak. Jadi W yang berat dapat menerangkan julat salingtindak yang kecil yang diantarakan olehnya. Dengan

foton yang tak berjisim dan W yang begitu berjisim, jelaslah bahawa simetri di antara kedua ini, jika ada, terpecah dengan sangat dahsyat.

Satu lagi masalah dalam menyatukan daya lemah dengan daya elektromagnet ialah berkenaan pariti. Pariti adalah berkenaan simetri pantulan cermin. Apabila dipantul dalam cermin, sebelah kiri jadi sebelah kanan dan sebaliknya. Biasanya, kita tidak mempunyai alasan kenapa fizik di sebelah kiri harus berbeza dengan fizik di sebelah kanan – inilah landasan simetri pariti. Namun, seperti yang disebut di atas, daya elektrolemah didapati mencanggahi pariti. Ia tangan kiri, iaitu hanya zarah-zarah berkeheliksan tangan kiri (keheliksan negatif) mengalami daya lemah, dan zarah berkeheliksan positif tidak dipengaruhi daya elektrolemah. Keheliksan ialah hasildarab titik spin dengan halaju zarah, jadi keheliksan negatif bermakna vektor spin zarah di arah bertentangan dengan pergerakannya, iaitu diperihalkan oleh genggam tangan kiri – ibu jari menunjuk arah halaju sementara jari-jari lain menggambarkan putaran spin.



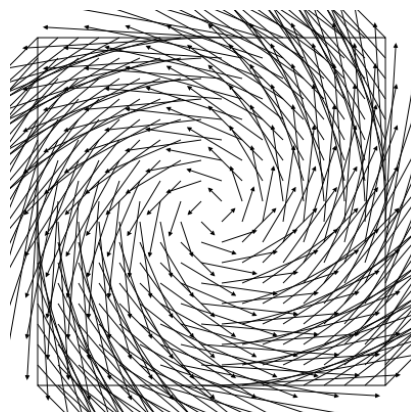
Ketangankananan dan ketangankirian

Daya elektrolemah ini memang pelik. Bagaimana mahu disatukannya dengan daya elektromagnet yang menghormati pariti? Masalah ini telah diselesaikan oleh Glashow dalam tahun 1961 dengan model yang mempunyai simetri lebih besar, iaitu $SU(2) \times U(1)$, dan satu lagi boson pengantara, Z^0 . Beliau menunjukkan bahawa apabila dua boson tolok asal bercampur dengan cara tertentu, akhirnya kita boleh mendapat satu boson, iaitu foton, dengan saling-tindak mengabadikan pariti, dan tiga yang mencanggahi pariti, iaitu, W^+ , W^- dan Z^0 . Pada tahun 1964, Salam dan rakan penyelidikinya John Ward, seorang fizikus Britain yang kemudiannya berhijrah ke Australia, juga menyarankan model berasaskan simetri $SU(2) \times U(1)$, nampaknya tanpa mengetahui tentang tulisan Glashow sebelum itu.

Untuk memberikan julat pengaruh yang pendek kepada daya elektrolemah, seperti yang diperhatikan, boson-boson pengantara, W dan Z , diberikan jisim. Dengan itu lebih banyak tenaga yang perlu dipinjam apabila boson-boson maya itu diwujudkan untuk mengantarakan daya, dan dari prinsip ketakpastian Heisenberg, ia boleh dibuat untuk masa yang lebih singkat. Jadi jarak pergerakannya lebih pendek. Namun, jika jisim W dan Z ini diletakkan dengan tangan dari awal, teori berkenaan tidak ternormal semula, yakni pengiraan-pengiraan menghasilkan nilai-nilai infiniti yang tak terkawal. Teori $SU(2) \times U(1)$ ini harus bermula dengan boson-boson yang tak berjisim, dan sesuatu mekanisme diperlukan untuk sekali gus menghasilkan foton dan Z^0 dari campuran boson-boson neutral, dan memberi jisim kepada W dan Z . Di sinilah peranan pecahan simetri spontan.

Pecahan simetri spontan memang berleluasa dalam fizik keadaan pepejal, terkait dengan peralihan fasa. Keadaan dasar sistem mempunyai simetri yang lebih kecil daripada sistem asal, seperti hablur ais yang tidak lagi punyai simetri putaran penuh, tetapi serupa hanya dalam orientasi tertentu. Simetri besar terpecah kepada simetri kecil dengan arah paksi hablur terbentuk secara spontan. Begitu juga suatu ferromagnet yang disejukkan melepasi titik Curie, memperoleh pemagnetan dalam satu arah atau arah terbalikinya, yang mana satu kita tak boleh ramalkan sebelumnya. Pada tahun 1960, Yoichiro Nambu, seorang fizikus Jepun yang menetap di Amerika, telah menjelaskan bahawa simetri tolak terpecah dalam suatu superpengkonduksi apabila ia beralih daripada keadaan biasa kepada keadaan superkonduksi, dan ini memberi jisim kepada plasmon, keadaan teruja plasma dalam bahan berkenaan yang seakan zarah, dan menyarankan bahawa mekanisme serupa boleh memberi jisim kepada zarah keunsuran. Nambu berkongsi Hadiah Nobel Fizik 2008 untuk kerjanya dalam pecahan simetri spontan.

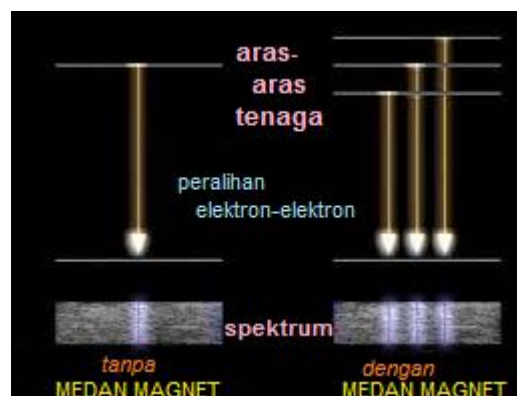
Namun, Jeffrey Goldstone, ketika itu di Universiti Cambridge, telah membuktikan teorem yang menyatakan bahawa pecahan simetri selanjur (misalnya simetri putaran) sejagat mesti menghasilkan boson tak berjisim. Ada arah simetri terpecah yang keupayaannya mendatar. In bermasalah, kerana selama ini tiada boson jisim sifar dilihat berkaitan daya lemah. Keadaan ini diselamatkan oleh mekanisme Higgs, untuk simetri tempatan, yang memerlukan ketakvarianan tolak. Kita boleh memilih tolak yang mana boson tak berjisim ini memperolehi jisim. Penyelesaian ini telah ditemui secara bebas oleh Francois Englert dan Robert Brout dari Brussels, Belgium, Higgs dari Edinburgh, dan Kibble, Gerald Guralnik, dan Carl Richard Hagen, dari Imperial, pada tahun 1964. Yang menerima Hadiah Nobel hanyalah Higgs and Englert (Brout meninggal dunia 2011), pada tahun 2013 setelah zarah Higgs ditemui di CERN tahun 2012. (Hanya 3 orang boleh menang Nobel fizik dalam setahun). Guralnik datang ke Imperial sebagai zamil pasca-kedoktoran; dia merupakan pelajar Walter Gilbert di Harvard, sementara Gilbert sebelum itu pelajar Salam di Cambridge. Hagen juga adalah pelawat dari Amerika ke Imperial.



Simetri $U(1)$ membenarkan pilihan arah putaran di setiap titik ruang.

Dalam pecahan simetri spontan elektrolemah, daya lemah dan elektomagnet bersatu pada tenaga tinggi dengan simetri yang lebih besar, tetapi pada tenaga tertentu, keadaan simetri besar itu menjadi metastabil, sementara keadaan yang lebih stabil membabitkan simetri yang lebih kecil. Jadi pecahan simetri berlaku secara spontan, dan set zarah yang dahulunya tidak dibezakan kini menjadi berlainan. Dalam kes elektrolemah, boson-boson pengantara yang sebelumnya serupa, kini menjelma menjadi foton yang tidak berjisim, dan W^\pm dan Z^0 yang agak berat.

Pecahan simetri ini boleh difahami seperti dalam kesan Zeeman. Dalam kesan Zeeman, keberadaan medan magnet luar tambahan memecah simetri sferaan keupayaan atom yang asal. Oleh kerana cas positif nukleus berpusat, pada asalnya elektron-elektron dalam sesuatu atom ini merasai keupayaan berpusat, yang bersimetri sfera. Oleh kerana simetri ini, ada beberapa tatarajah keadaan elektron-elektron yang serupa terhadapnya, dan dengan itu mempunyai tenaga keadaan yang sama. Tetapi apabila medan magnet luar pada satu arah tertentu dikenakan, simetri ini terpecah dek arah khas ini. Keadaan-keadaan bertenaga sama kini mengalami nilai tenaga yang berbeza-beza menurut nilai momen magnet dalam arah z masing-masing. Begitulah apabila simetri elektrolemah berpecah, zarah-zarah boson pengantara memperoleh jisim-jisim berlainan. Medan luar yang menyebabkan pecahan simetri elektrolemah ialah medan Higgs.

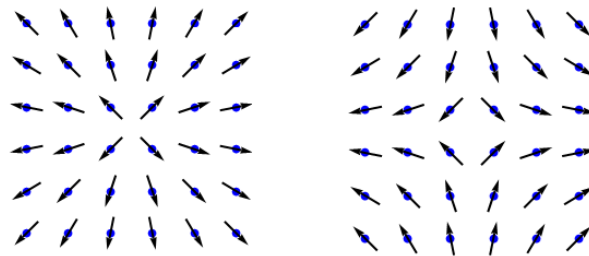


Kesan Zeeman: arah medan magnet luaran memecah simetri sfera dalam atom, menyebabkan pembelahan aras tenaga.

Pada tahun 1966, ia mula semakin diyakini bahawa simetri tolok tempatan boleh dipecahkan secara spontan oleh medan zarah skalar tak berjisim ini. Ini bermakna secara prinsipnya boleh dibina model dengan simetri tolok tempatan "tersorok" dan boson daya yang berjisim. Namun, tiada bukti teori dengan simetri tolok tempatan itu ternormal semula setakat itu. Kebanyakan masa itu menganggap pecahan simetri spontan sebagai cara untuk menerangkan beza jisim zarah, dan bukan cara untuk membuat sesuatu teori itu ternormal semula. Salam dan Weinberg sebaliknya menyarankan pecahan simetri spontan boleh menjamin keternormalan semula teori penyatuan keelektromagnetan dan daya lemah. Oleh kerana sebelum pecahan simetri zarah-zarah pengantara berjisim sifar, teori Weinberg-Salam dianggap boleh dinormalkan semula, dan tidak mempunyai masalah nilai-nilai mencapah. Dalam mendepankan teori mereka Salam dan Weinberg lebih merujuk kepada 'keindahan' simetri, dan pecahan simetri spontan yang lebih 'semulajadi' dan 'lembut',

daripada ketegasan matematik. Jadi Salam dan Weinberg tidak membuktikan bahawa teori mereka ternormal semula, tetapi hanya menganggapnya sedemikian kerana sebab estetik.

Mekanisme pecahan simetri yang dicadangkan Higgs telah dikukuhkan oleh Kibble di Imperial dengan mengkajinya untuk sistem-sistem tak-Abelian, iaitu di mana simetri terbabit tidak kalis tukar tertib. Ini ialah apabila jujukan transformasi-transformasi simetri berkenaan bergantung kepada aturannya, dan inilah kes yang lebih lumrah dalam fizik zarah. Kibble juga mengkaji cacat topologi yang terhasil daripada pecahan simetri spontan yang bersifat tempatan. Oleh kerana pecahan simetri bersifat tempatan, arah-arah pilihan dalam proses itu tidak perlu sama di semua kedudukan ruang, cuma ia perlu selanjur. Dengan itu, boleh berlaku keadaan di mana timbul pusat-pusat di mana arah-arah ini menumpu tanpa dapat dihapuskannya, dan juga pusat-pusat dengan arah mencapah.



Contoh cacat topologi – pusat itu tak boleh hilang jika diurut arah anakpanah-anakpanah tanpa melanggar keselanjuran jiranan.

Kibble telah menyelidik cacat topologi akibat pecahan simetri ini dalam kosmologi. Jenis titik mempunyai sifat ekakutub magnet, iaitu magnet dengan hanya satu kutub, berbeza daripada magnet lazim. Bahkan, ada eksperimen di Imperial semasa saya di sana, yang mencari ekakutub magnet ini, dijalankan oleh pelajar PhD setahun junior daripada saya. Caranya ialah dengan memantau arus elektrik dalam satu gelung superpengkonduksi – amplitudnya melompat dengan nilai tertentu apabila suatu ekakutub magnet melalui gelung tersebut. Saya ingat beliau ada mendapati beberapa calon ekakutub magnet ini, tetapi, hasilnya tidak terulangi penyidik lain, jadi masyarakat fizik berpegang kepada jujum yang ekakutub magnet masih belum ditemui.

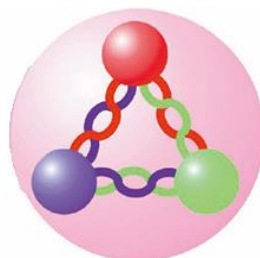
Ide-ide pecahan simetri 1964 itu tidak begitu menarik perhatian. Hanya lewat 1967 baru Weinberg mencadangkan teori lemah dan elektromagnetan untuk lepton. Salam memberi kuliah di Imperial pada musim gugur tahun yang sama tentang model yang serupa yang dia panggil teori elektrolemah. Dia hanya menerbitkannya pada tahun berikutnya setelah bercakap di symposium Nobel, mungkin kerana kesibukannya mengasaskan Pusat Antarabangsa Fizik Teori (ICTP) di Trieste, Italy, di bawah naungan IAEA di antara lain. ICTP ialah wawasannya bagi memudahkan ahli fizik (terutama teori) dunia ketiga berkerjasama di persada antarabangsa. Mungkin kerana asas estetik (dan bukan matematik) ide-ide mereka itu, teori ini tidak begitu menarik perhatian. Ini berubah cuma dalam tahun 1971, apabila fizikawan Gerard van't Hooft, ketika itu pelajar Martinus Veltmann, telah membuktikan keternormalan semula teori Salam-Weinberg, atas gesaan penyeliannya, yang mempunyai

kepercayaan kepada teori tolak. Pengiraan 't Hooft juga mencerminkan kedatangan era baru: pengiraan (pengiraan simbolan) dibuat menggunakan komputer. 't Hooft dan Veltmann memenangi hadiah Nobel fizik mereka sendiri, "kerana menjelaskan struktur kuantum saling-tindak elektrolemah dalam fizik" dalam tahun 1999. Walaupun dapatan 't Hooft inilah yang menyumbang kepada semangat baru (yang merupakan usaha eksperimen) pembuktian model Weinberg-Salam ini, jarak masa yang lama penganugerahan Nobel setelah penganugerah kepada Weinberg, Salam dan Glashow, seolah-olah memberi gambaran bahawa hasil 't Hooft itu hanya butiran teknikal kemudian.

Jika 20 tahun diperlukan untuk perakuan bukti keternormalan semula model elektrolemah dengan pechan simetri spontan, masa yang lebih lama diperlukan untuk mencari bukti eksperimen pechan simetri itu setelah bukti eksperimen untuk model elektrolemah ditemui. Selang hampir 30 tahun setelah zarah-zarah W dan Z ditemui di CERN, yang menjadi bukti teori elektrolemah itu, zarah Higgs ditemui, di CERN juga, hanya pada tahun 2012. Yang merumitkan pencarian zarah Higgs ini ialah fakta bahawa teori tidak memberikan petunjuk kepada nilai jisimnya, dengan itu tiada julat tenaga carian diketahui. Akhirnya "boson yang menyerupai Higgs" ditemui pada jisim 125 GeV, di pelanggar besar hadron (LHC) dalam perlanggaran proton-proton dengan tenaga beberapa TeV. Yang perlu disemak kini ialah samada Higgs yang ditemui itu betul-betul mempunyai ciri-ciri yang dijangkakan. Kini teori medan kuantum telah tertegap teguh, sementara teori matriks S terlupakan di mukasurat berdebu sejarah fizik zarah.

Menurut teori medan kuantum, medan sesuatu daya sebenarnya dihuni zarah-zarah maya. Hentaman zarah maya inilah yang memberi kesan daya. Daya bukan lagi tindakan-di-jarak, tetapi adalah akibat tukarganti zarah pengantara. Foton, zarah cahaya, mengantarakan daya keelektromagnetan, sementara boson tolak pengantara bagi daya nukleus lemah ialah zarah W dan Z.

Teori medan kuantum bagi daya nukleus kuat, yang mengikat proton dan neutron dalam nukleus, dan kuark di dalam proton, neutron dan hadron-hadron lain, juga memerihalkan daya berkenaan akibat tukar ganti boson tolak. Teori ini bernama Teori Kromodinamik Kuantum (QCD) sementara boson ini bernama gluon. Kuark bersalingtindak menurut cas QCD yang dibawanya, dikenalkan dengan cas 'warna', dan dalam QCD ada tiga jenis cas (dalam keelektromagnetan hanya satu jenis – cas elektrik) yang dinamakan 'merah', 'biru' dan 'hijau'. Yang menjadi kelainan dalam QCD juga ialah bahawa boson pembawa dayanya, gluon, juga boleh punyai cas warna yang bukan sifar. Ini bermakna gluon juga bersalingtindak sesame sendiri.



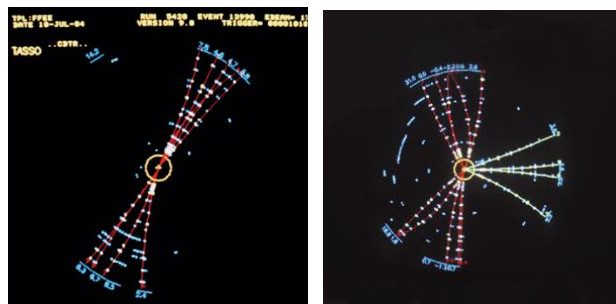
Tiga kuark berlainan warna dalam proton, keseluruhannya putih, diikat gluon.

Warna telanjang tidak kelihatan. Hanya 'putih' (singlet perwakilan simetri warna) dilihat bebas. Maka kuark dan gluon tidak dikesan bersendirian – jika tidak, cas elektrik pecahan menjadi lumrah. Yang dilihat adalah hadron – meson yang terbina daripada pasangan kuark dan antikuark, dan baryon yang terbina daripada 3 kuark. Suatu proses penghadronan disebut 'serpihan' berlaku ke atas kuark (dan gluon) berkelajuan tinggi, apabila kuark dan antikuark muncul rawak dari vakum, untuk menghasilkan 'jet' hadron-hadron. Setiap kuark atau antikuark atau gluon menghasilkan jetnya sendiri.

Gluon ditemui, atas tak ditemui

Menurut QCD, gluon juga punyai cas warna. Ini membenarkan saling-tindak gluon dengan gluon sendiri. Ini diteka sebagai sebab keupayaan QCD meningkat secara linear dan warna terkurung.

Dalam perlanggaran elektron-positron, satu proses yang asas ialah pengeluaran kuark-antikuark, yang terzhahir sebagai dua jet belakang ke belakang. Kalau proses bremsstrahlung dalam zarah bercas elektrik membuat ia menyinarakan sinaran, maka begitu juga bremsstrahlung QCD menyebabkan gluon disinarkan daripada kuark. Apabila ini berlaku, kita jangkakan peristiwa tiga-jet dalam perlanggaran elektron-positron: satu untuk kuark, satu untuk antikuark, dan satu untuk gluon yang disinarkan. Satu kejayaan pakatan TASSO ialah penemuan terawal peristiwa tiga-jet yang membuktikan kewujudan gluon. Sehingga kini (2015) saya rasa Jawatankuasa Nobel masih terhutang Hadiah Nobel kepada penggerak-penggerak berkenaan dari TASSO.

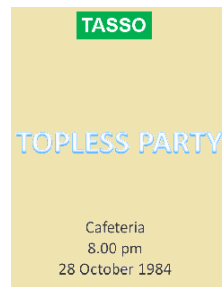


Peristiwa 2 jet daripada pengeluaran kuark-antukuark (kiri) dan peristiwa 3 jet daripada bremsstrahlung gluon.

Mungkin Hadiah Nobel itu patut dianugerahkan kepada Paul Soeding, Guenter Wolf dan Sau Lan Wu. Seorang lagi penggerak, Bjorn Wiik, telah meninggal dunia pada tahun 1999. Soeding dan Wolf adalah dari tuan rumah, sementara Wu mengetuai pasukan dari Wisconsin. Beliau memperolehi kedoktoran di MIT dalam kumpulan S. C. C. Ting, yang telah menerajui satu daripada dua kumpulan yang telah menemui zarah J/ψ , yang membuktikan kewujudan kuark pesona. Beliau pelopor dalam mencari peristiwa-peristiwa tiga jet. Selepas TASSO, Sau Lan Wu telah menyertai ALEPH di pelanggar elektron-positron LEP di CERN, dan kemudiannya ATLAS di LHC. Semasa pengisytiharan penemuan zarah Higgs di CERN pada 2012, beliau

berkata kepada Peter Higgs, “saya telah mencarimu selama lebih 20 tahun.” Higgs menjawab, “sekarang anda telah temui saya.”

Walaupun bagaimanapun, kuark keenam yang dicari tak ditemui. Saya teringat sekali itu, setelah tamatnya satu sesi larian perlanggaran yang telah berjalan beberapa minggu, mereka telah menganjurkan suatu ‘*topless party*’. Mati-matian saya ingatkan kehadiran ke *party* tersebut memerlukan pendedahan bahagian atas badan. Jadi saya tidak hadirinya kerana malu mahu menunjukkan dada bogel. Setelah sekian lama barulah saya faham tentang mainan kata penganjur.

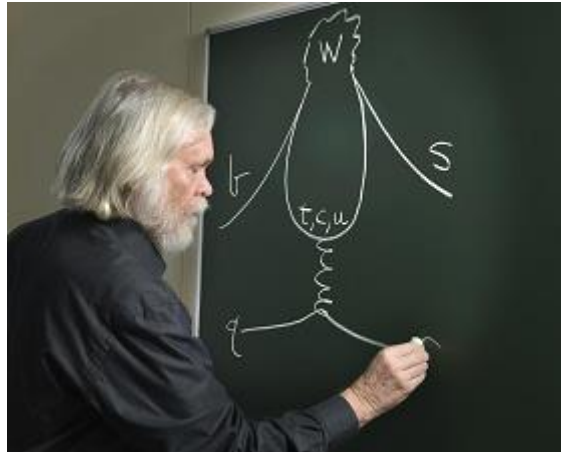


'Topless Party'.

Namun meletop

Zaman-zaman itu fizik zarah, eksperimen dan teori, memang meletup. Ratusan kertas penyelidikan dihasilkan setiap bulan. Pula ahli fizik dan kekreatifan mereka. Teori supertangsi sangat popular. Pelbagai jenis teori supertangsi dicadangkan. Sehingga saya pernah lihat pracetak suatu kertas penyelidikan kelakar yang berpura-pura serius yang menyebut *G-strings*. Ya, ‘G’ mungkin juga berkait dengan graviti, yang cuba dimodelkan teori supertangsi dalam kerangka teori medan kuantum.

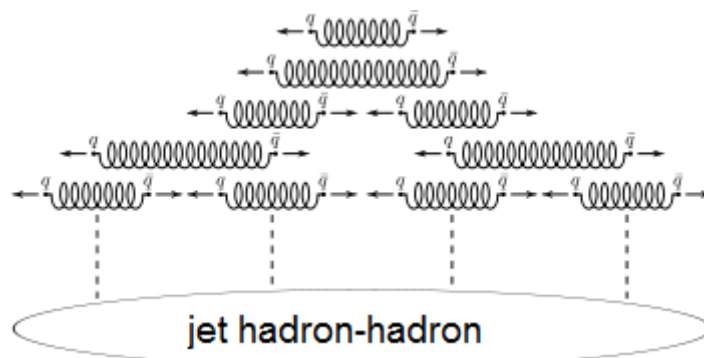
Satu lagi cerita perihal kancangnya pengeluaran kertas penyelidikan adalah seperti berikut. Seorang ahli teori yang agak prolifik ialah John Ellis, ketika itu di CERN. Pada tahun 1984, saya ada menghadiri Sekolah Musim Panas (*Summer School*) fizik zarah di Kupari dekat Duvrovnik (ketika itu dalam Yugoslavia), di pantai Laut Adriatik, yang mana salah seorang tenaga pengajarnya ialah John Ellis. Di celah-celah program kuliah, beliau ceritakan bagaimana gambarajah penguin mendapat namanya. Oleh kerana keprolifikannya mengeluarkan kertas-kertas penyelidikan, beliau telah dicabar oleh seorang rakannya untuk memasukkan perkataan ‘penguin’ dalam kertas seterusnya dia. Jadi beliau telah melukis suatu gambarajah saling-tindak, atau dikenali gambarajah Feynman, sedikit berbentuk penguin (walaupun pada saya ia tidak begitu meyakinkan!) dan menamakannya gambarajah penguin.



John Ellis dan gambarajah penguin.

Tangsi dan bertih jagung

Kerja PhD saya utamanya ialah mencari baryon dengan kuark aneh dalam hasil perlanggaran elektron-antielektron. Baryon, seperti proton dan neutron, terbina daripada tiga kuark. Apabila elektron dan positron, antizarahnya, berlanggar, ia musnahabis meninggalkan hanya tenaga, dalam bentuk foton, yang kemudiannya boleh menjelmakan pasangan zarah-antizarah seperti pasangan kuark-antikuark. Kuark berwarna; malu; tiada kuark bebas dilihat; kuark (dan antikuark) yang terhasil 'menyerpih' yakni membentuk hadron-hadron. Kuark yang dihasilkan bermomentum tinggi, jadi hadron yang terjana terhad ke dalam suatu kon dalam arah asal kuark – tatarajah ini digelar 'jet'.



Penghasilan jet daripada kuark.

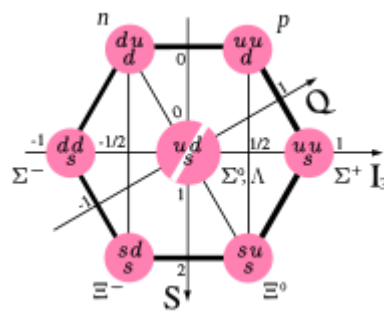
Penghasilan meson dalam proses ini mudah difahami. Kuark yang laju 'menarik keluar' pasangan kuark dan antikuark dari vakum; ia berpasang dengan antikuark itu untuk memberikan meson, sementara kuark yang baru itu pula meneruskan penyerpihan. Namun baryon terbina daripada tiga kuark, dan proses penerbitan baryon perlu difikirkan.

Untuk penyerpihan memberikan baryon, dua kuark harus diambil daripada vakum sebagai pelengkap kepada kuark asal. Bagaimana ini dilakukan menjadi misteri.

Pada waktu itu, ada model yang mengatakan sebagaimana pasangan kuark-antikuark boleh dimunculkan daripada vakum, begitu juga pasangan dwikuark-antidwikuark. Ini kemudiannya

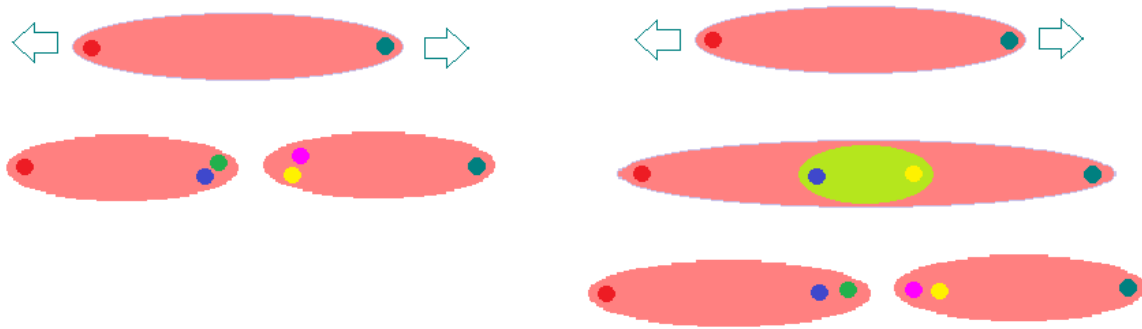
bergabung dengan kuark (atau antiquark) asal menghasilkan baryon (atau antibaryon). Ada model alternatif di mana dua kuark dimunculkan dari vakum secara berjujuk. Kuark pertama yang muncul berwarna lain dari kuark yang menyerpih, oleh itu masih ada medan warna lebih untuk menarik keluar kuark ketiga, dengan warna ketiga, memberikan baryon yang keseluruhannya putih. Model ini digelar model 'popcorn' atau 'bertih jagung'. Bertih jagung boleh dibezakan daripada dwikuark kerana bagi yang pertama itu, ada kemungkinan meson dikeluarkan di antara baryon dan antibaryon yang muncul. Kerja PhD saya membabitkan kajian pengeluaran baryon ini.

Satu lagi aspek kajian saya ialah keanehan. Kuark s, kuark aneh, punyai sifat ("nombor kuantum") digelar keanehan. Kuark aneh mereput menerusi daya nukleus lemah dengan masahayat yang agak panjang, yang boleh dilihat dalam pengesan jejak. Kerja PhD saya ialah mencari baryon multianeh dalam perlanggaran elektron-positron. Ia bagi meneliti mekanisme pengeluaran baryon dalam serpihan, ke arah memahami kromodinamik kuantum terutama pada rantau medan kuat. Keanehan pula boleh memainkan peranan penyurih – pengesanannya membantu memahami rentetan apa yang berlaku. Lagipun, baryon aneh dan multianeh mudah dikesan menerusi masahayatnya yang lebih panjang.



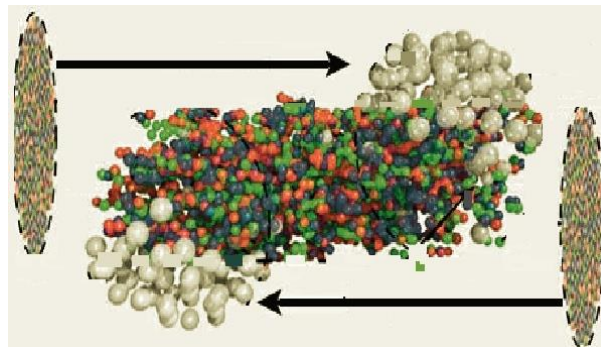
Oktet baryon-baryon yang terbina daripada kuark-kuark u, d dan s.

Baryon aneh Lambda, Λ^0 , mereput kepada satu proton dan satu pion. Lambda dicari menerusi pola reputan ini. Xi, Ξ , baryon dengan dua kuark aneh, dicari pula menerusi reputannya ke Lambda dan pion. Begitu juga Omega, Ω , baryon dengan ketiga-tiga kuarknya aneh, mereput kepada Xi dan meson K, dan dicari menerusi pola reputan ini. Kadar pengeluaran zarah-zarah ini, dan korelasi di antaranya dan juga dengan zarah-zarah lain, membolehkan kajian ke atas mekanisme pengeluaran baryon dalam serpihan. Kalau cuba diingat kembali, saya rasa kami tidak dapat menentukan samada baryon terhasil menerusi dwikuark atau bertih jagung dengan jelas.



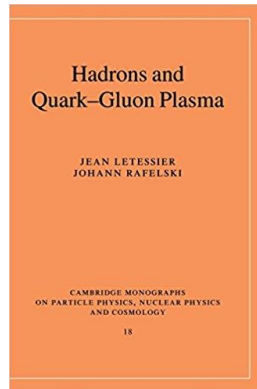
Pengeluaran baryon: menerusi dwikuark (kiri) dan bertih jagung (kanan).

Pada masa berkenaan, ada minat dalam mengesan zarah aneh dalam fenomena yang lain. Perlanggaran ion berat, ataupun nukleus-nekleus atom, seperti plumbum dan emas, sedang bermula. Oleh kerana jisim yang besar, dijangkakan akan terhasil keadaan yang bertenaga tinggi (atau bersuhu tinggi) dan padat, dinamakan plasma kuark-gluon. Diwarwarkan bahawa keadaan seperti semesta pada awal kejadiannya dalam teori letusan besar, akan muncul. Zarah aneh penting di sini kerana daripadanya, suhu keadaan tersebut dapat diukur. Oleh kerana kuark aneh lebih berat daripada kuark-kuark biasa, kelumrahan bilangannya menandakan suhu tinggi.



Nukleus bertenaga tinggi berlanggar menghasilkan plasma kuark-gluon di bahagian perlanggaran.

Seorang pelopor bidang berkenaan ialah Johann Rafelski, yang semasa itu di Afrika Selatan. Agaknya menemui tajuk tesis saya, beliau telah menulis kepada saya mengajak menceburi bidang keanehan dalam plasma kuark-gluon. Saya merasakan ia bukan kaitan yang rapat dengan bidang semasa saya, jadi saya tidak beri sambutan. Ukuran zarah aneh dari perlanggaran ion berat kemudiannya telah menjadi perdana. Rafelski kemudiannya berkhidmat di Amerika Syarikat.



Buku tulisan Johann Rafelski. Beliau kini terkenal dalam bidang plasma kuark-gluon.

Dalam penyerpihan, medan daya QCD yang kuat di antara kuark dan antiquark yang laju berpisah, dari mana pasangan kuark dan antiquark baru menjelma, berbentuk memanjang seperti tangsi. Bibit-bibit permulaan teori tangsi adalah di sini, pada tahun 1960an. Kemudian, setelah 20 tahun, ahli teori mula menghipotesiskan bahawa zarah keunsuran bukan sebenarnya berbentuk titik, tapi mempunyai panjang dalam satu dimensi, iaitu berbentuk tali atau tangsi. Titik bermasalah kerana sering timbulnya nilai infiniti dalam pengiraan, misalnya apabila sesuatu dibahagi saiz titik yang bernilai sifar. Teori supertangsi meletup apabila ia didapati dapat dikira dan tidak memberi nilai-nilai infiniti. Pelopor revolusi ini ialah Michael Green dari Queen Mary College di London dan John Schwarz dari California Institute of Technology (CALTECH) di Amerika Syarikat. Paling dekat saya dapat capai kepada mereka ialah apabila seorang pelajar Green dari Jepun, mengongsi bilik asrama pascasiswazah Lillian Penson Hall bersama saya di London, untuk beberapa hari, setelah pulang daripada beberapa tempoh di CALTECH.



Suatu pandangan Lillian-Penson Hall di Talbot Square, London.

Penyatuan Agung

Kejayaan Salam dan Weinberg menyatukan daya lemah dan elektromagnet memicu percubaan untuk menyatukan elektrolemah ini dengan daya kuat pula. Ini semulajadi, kerana daya kuat juga berlandaskan teori medan kuantum. Jika elektrolemah dan kuat bersatu, maka

harus ada boson-boson (boson 'X') yang mengantarkan saling-tindak di antara lepton seperti elektron dan muon, dan kuark. Ini belum dilihat, maka boson X ini kemungkinan sangat berat, dan kadarnya sudah tentu sangat rendah. Namun secara prinsipnya kita jangkakan misalnya, proton mereput, walau pada kadar sangat rendah.

Suatu anekdot yang dirujuk kepada Salam ialah bahawa dia telah mengajar anaknya bahawa proton tak terabadi. Jadi dalam ujian di sekolah dia menjawab sebegitu dan ditanda salah oleh gurunya!