

6.

Michael Polanyi, dalam bukunya *Personal Knowledge* (pengetahuan Peribadi) terbitan 1958 telah memerhatikan bahawa sains fizik modern telah melalui tiga peringkat, setiapnya dengan nilai sains dan pandangan realiti masing-masing.

System nombor dan rajah geometrian

Jisim-jisim terkekang secara mekanikan

Sistem2 ketakvarianan matematikan

Benda atau objek dikatakan terdiri daripada jirim. Objek bersalingtindak dengan objek lain, melalui apa yang disebut 'daya'. Sesuatu itu bergerak dengan nalar sehinggalah satu daya dikenakan ke atasnya (Hukum dinamik Newton pertama). Jadi pergerakan nalar itu sesuatu yang tidak memerlukan daya. Bila objek merasai daya ia berubah arah atau halaju atau kedua-duanya sekali. Kadar perubahan ini dinamakan pecutan, dan ia berkadaran dengan kekuatan daya berkenaan (Hukum dinamik Newton kedua). Kadar pecutan diberi daya dikatakan 'jisim' objek berkenaan. Setakat ini, yang boleh diukur ialah kedudukan, halaju, dan pecutan sesuatu objek itu. Daya ditaakul daripada pecutan yang terhasil, dan jisim (atau sebenarnya jisim inersia secara lebih tepat) objek itu ialah perkadaran kekuatan pengaruh daya ke atas objek itu.



Hukum dinamik Newton pertama: tanpa terkena daya, angkasawan ini hanyut secara malar selama-lamanya.

$$F = ma$$

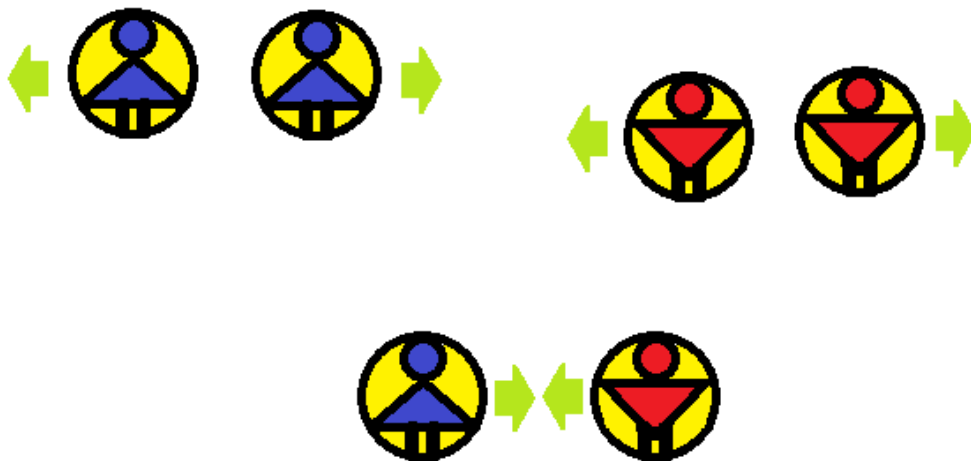
Hukum dinamik Newton kedua: pecutan (a) sesuatu jasad berkadaran dengan daya dikenakan (F). Kadarnya diparameterkan m , dinamai 'jisim' jasad tersebut.

Daya boleh diakibatkan oleh suatu objek yang jauh. Digambarkan suatu 'medan daya' mengelilingi objek tersebut, dan mana-mana objek kedua yang merentasi medan ini, merasai daya ini. Kekuatan daya bergantung kepada ciri tertentu objek-objek berkenaan. Ciri ini secara kasarnya disebut cas.



Daya.

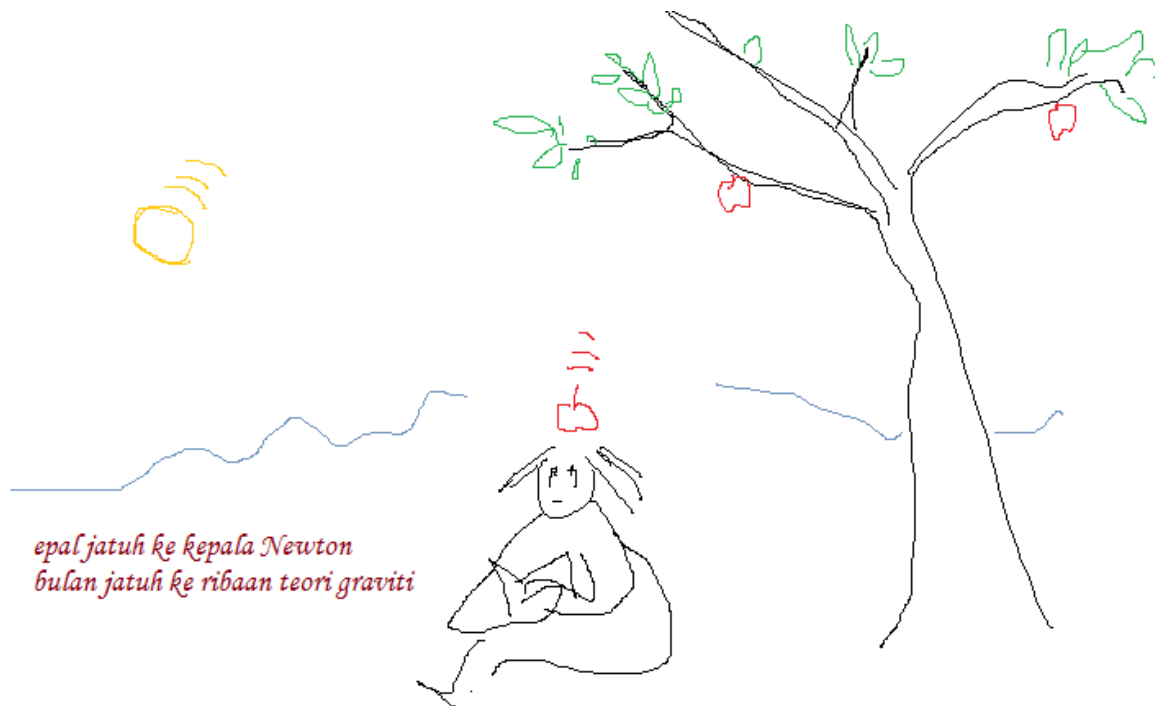
Objek bercas elektrik merasai medan daya dari objek bercas elektrik yang lain. Kalau casnya sama, dayanya menolak, dan kalau casnya bertentangan, dayanya menarik.



Yang sama menolak, yang berlainan menarik.

Graviti

Daya terawal dikenal manusia ialah yang menyebabkan objek-objek jatuh ke bumi. Ini disebut graviti. Ia mempengaruhi objek yang mempunyai apa yang disebut 'jisim'. Begitu juga pergerakan planet dan bulan sebenarnya adalah manifestasi graviti. Objek-objek langit ini jatuh ke objek lain, tapi oleh kerana gerakan mengufuknya, ia menjadi berbentuk orbit. Di antara penyatuan terawal dalam fizik ialah penyatuan graviti langit dan graviti bumi ini oleh Newton.



Peyatuan graviti langit dengan graviti bumi.

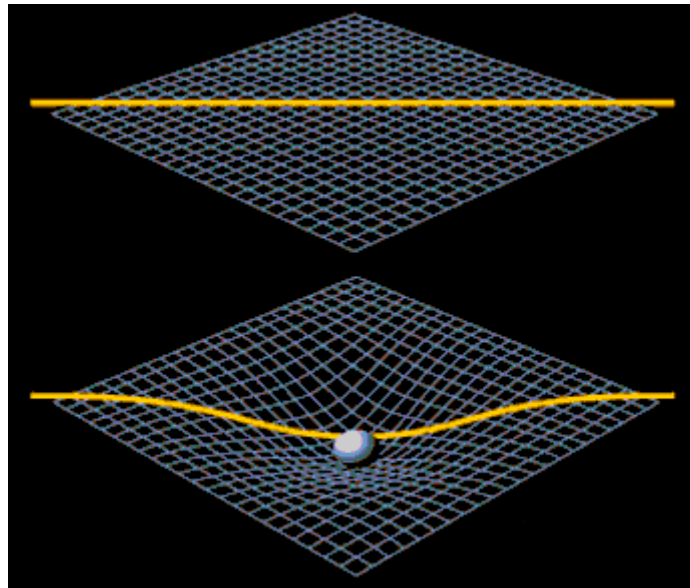
Apa yang menarik dalam teori kegravitian Newton ialah dalam penggunaan jisim. Dalam hukum kegravitian Newton, kekuatan daya berkadar dengan nilai jisim sesuatu objek. Yang ketara ialah jisim ini di samakan dengan jisim yang merupakan kadar pecutan terhadap daya dalam hukum dinamik Newton kedua, $F = ma$. Pada asasnya, tiada sebab kenapa jisim gravitian harus sama dengan jisim inersiaan. Penyamaan dua nilai ini disebut 'Prinsip Kesetaraan'.



Lif putus tali membawa pengalaman graviti sifar. Pecutan jatuhnya membatalkan daya graviti akibat prinsip kesetaraan.

Seterusnya, Einstein telah gunakan Prinsip Kesetaraan ini dalam teori kelatipan amnya yang menerangkan graviti sebagai kesan pergerakan inersiaan dalam ruang yang dilengkungkan

jisim. Daya graviti dapat dilakonkan oleh pergerakan bebas di dalam ruang yang melengkung berpadanan.



Graviti akibat kelengkungan ruang.

Kerelatifan am Einstein terbina di atas teori kerelatifan khasnya. Kerelatifan khas terbitan kerelatifan Galileo, di mana sesuatu sistem yang bergerak dengan halaju relatif yang malar terhadap sistem kedua, mengalami hukum-hukum fizik yang sama sebagaimana yang hukum fizik yang dilihat berlaku ke atasnya oleh sistem kedua itu. Yakni, seseorang dalam sistem yang bergerak dengan halaju malar tidak boleh ketahui bahawa dia mempunyai halaju tambahan tersebut. Misalnya, seorang yang bermain pingpong di dalam suatu keretapi (tertutup) laju dengan halaju malar dan nalar, memukul bola seperti biasa dibuatnya di luar keretapi tersebut tanpa mendapati apa-apa kelainan. Yang memberikan kebaruan ialah andaian bahawa halaju cahaya tidak berubah. Supaya ini benar sekaligus dalam dua rangka rujukan yang bergerak relatif, jarak mengecut, dan masa mendilat, dalam rangka yang bergerak relatif kepada rangka yang pegun.



Halaju cahaya sama dalam mana-mana rangka rujukan.

Kerelatifan khas membawa kepada persamaan masyhur $E = mc^2$. Ada kesepadanan di antara tenaga dan jisim. Dan, walaupun jisim rehat sesuatu zarah itu tetap, namun jisim dinamikanya berubah mengikut tenaganya atau halajunya.



Bedil elektron ini digunakan oleh Charles-Eugène Guye di Geneva lingkungan 1907-1915 untuk membuktikan $E = mc^2$. Elektron dipecut dan diukur jisimnya menerusi pesongan dalam medan magnet dan elektrik.

Jadi, pergerakan relatif mengakibatkan perubahan pada skala jarak dan masa. Kerelatifan am menangani pecutan menerusi siri pergerakan relatif malar, dengan halaju berubah, pada detik-detik masa berurutan. Ini membawa kepada ruang-masa yang melengkung. Dengan itu, pecutan akibat graviti boleh dilihat sebagai pergerakan malar, tapi dalam ruang yang melengkung. Sesuatu jasad berjirim melengkungkan ruang kelilingnya, dan suatu jasad kedua bergerak secara malar tetapi kelihatan seolah-olah dipengaruhi suatu daya.

Keelektromagnetan

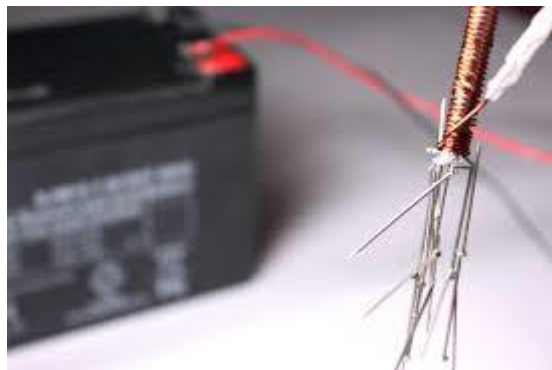
Satu lagi jenis daya yang diketahui awal ialah daya elektromagnetan. Pada mulanya, manifestasi daya ini dalam bentuk daya elektrostatik dan daya magnet dikenali. Kemudian hubungan di antaranya didapati: arus elektrik menghasilkan medan magnet, dan magnet yang bergerak mempengaruhi arus elektrik. Pada akhir abad ke-19 masehi, James Clark Maxwell telah menyatukan kesemua ini ke dalam satu kerangka tunggal. Persamaan-persamaan elektromagnetan Maxwell juga meramalkan penyelesaian dalam bentuk gelombang, dan gelombang ini merupakan gelombang cahaya. Jadi cahaya cumalah rambatan ayunan dalam kekuatan medan elektrik dan medan magnet.



Cas di permukaan belon yang digosok menarik molekul air menerusi daya elektrostatik.



Daya magnet.

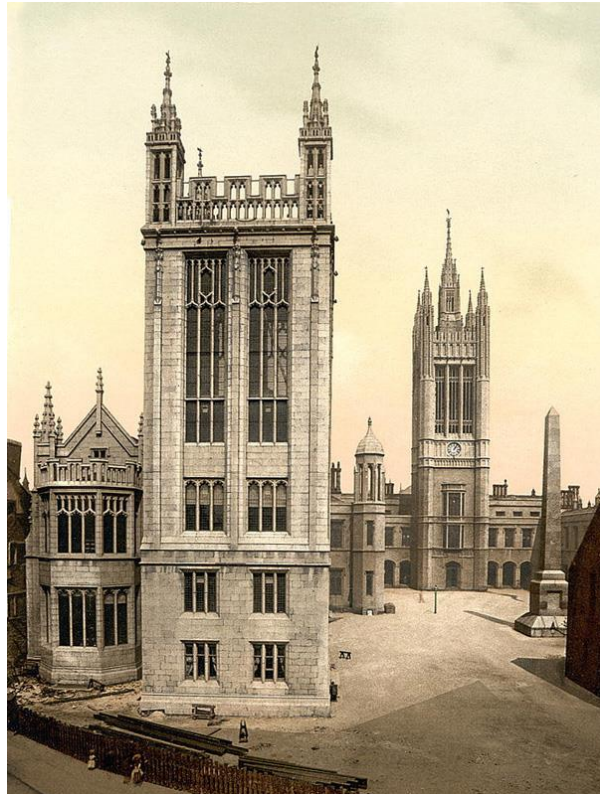


Aliran elektrik mewujudkan kesan magnet.



Pergerakan magnet dalam dynamo menghasilkan aliran elektrik.

Maxwell telah dilantik Profesor Falsafah Tabii (sebagaimana sains dikenali pada waktu itu) pada 1856 pada umur 24 tahun di Marischal College, sebuah universiti diasaskan 1593 di Aberdeen, bahagian utara Scotland. Untuk bergraduasi dengan ijazah Artrium Magister, seorang pelajar harus mengambil Kemanusiaan dan Bahasa Yunan dalam tahun pertama, Kemanusiaan, Bahasa Yunan, Matematik dan Sejarah Tabii (seakan biologi) dalam tahun kedua, Matematik dan Falsafah Tabii dalam tahun ketiga, dan Falsafah dan Logik Moral, dan Bukti Agama Kristian dalam tahun empat, sementara Ugama Amali diambil setiap tahun. Pada masa itu, ilmu belum lagi terserpih, dan keugamaan (Kristian) masih tunggak dalam pengajaran universiti. Graduan banyak yang meneruskan pengajian dalam bidang perubatan dan juga ketuhanan. Kerjaya mereka termasuk doktor, paderi, pengamal undang-undang, dan guru.



Marischal College, c1900.

Pada masa Maxwell, fenomena elektrik dan magnet seolah berlainan. Namun, pergerakan magnet boleh menghasilkan arus elektrik sementara arus elektrik boleh menghasilkan daya magnet.

Kemagnetan sebenarnya boleh difahami berkait dengan keelektrikan menerusi kerelatifan khas. Kesan pengecutan jarak akibat pergerakan relatif berhalaju malar konsisten dengan adanya medan magnet. Pengecutan jarak membawa kepada ketumpatan cas berbeza dan oleh itu daya elektrik berbeza. Pergerakan berhalaju malar membawa kepada wujudnya daya magnet, akibat cas bergerak. Beza daya-daya ini sama. Salingtindak magnet dan salingtindak elektrik sebenarnya dua sudut padangan bagi satu daya yang tunggal.

Daya nukleus lemah

Jadi dalam teori medan kuantum, zarah bercas dikelilingi medan, atau dihurungi zarah-zarah maya yang timbul dan hilang, selagi tidak mencanggahi prinsip ketakpastian Heisenberg. Cas elektrik dihurungi foton-foton maya. Begitulah daya nukleus lemah diantarakan oleh boson W dan boson Z. Zarah-zarah yang boleh mengalami daya lemah dihurungi oleh boson-boson ini. Zarah-zarah bercas warna dari daya nukleus kuat dihurungi oleh gluon-gluon maya.



Zarah bercas dihurungi zarah-zarah maya.

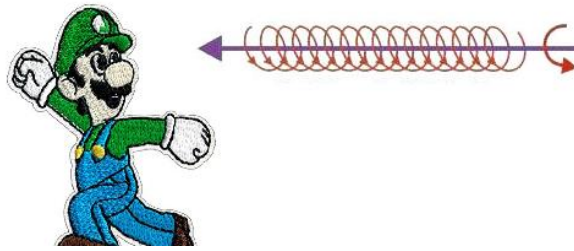
Penjelmaan zarah-zarah maya ini masih selari dengan kehendak teori kuantum. Dari prinsip ketakpastian Heisenberg, tenaga boleh dipinjam untuk menghasilkan zarah maya ini, selagi masa pinjaman itu bila didarab tenaga pinjaman memberikan nilai yang lebih kecil daripada pemalar Planck. Jadi daya elektromagnet, yang diantarakan oleh foton maya, bertindak dalam julat besar kerana foton berjisim sifar, sementara daya nukleus lemah, yang diantarakan oleh boson-boson W dan Z yang berat, bertindak dalam julat yang kecil. Begitulah kita lihat reputan beta yang berlaku secara setempat dan tidak membabitkan zarah-zarah pada jarak yang jauh.

Kewujudan daya nukleus lemah dipostulatkan untuk menerangkan reputan beta dalam fizik nukleus. Neutron mereput kepada proton dengan elektron dalam reputan beta. Untuk mengabadikan tenaga yang diukur, diperlukan satu lagi hasil reputan ini, zarah yang tidak bercas dan mungkin tak berjisim, yang dipanggil neutrino. Oleh kerana sifat neutrino yang pelik ini, persoalan tentang perbezaan di antara neutrino dan antineutrino timbul.



Ukuran reputan beta dari bahan radioaktif.

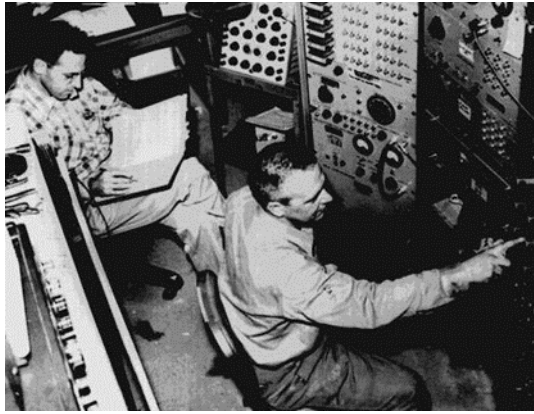
Jika neutrino tak berjisim, keheliksannya boleh digunakan sebagai parameter pemerihalan yang takvarian Lorentz. Keheliksian ialah arah spin terhadap arah pergerakan zarah. Bagi zarah yang berjisim sifar, yang bergerak pada halaju cahaya, keheliksian ini tetap kerana kita tidak boleh digalax ke suatu rangka rujukan yang bergerak lebih laju daripada zarah tersebut dan dengan itu melihat ia bergerak ke arah bertentangan, menterbalikkan keheliksannya. Jadi keheliksian tangan kiri (arah momentum sudut dari spin diberikan jari-jari menggenggam tangan kiri, sementara ibujari menonjol memberikan arah pergerakan) dikait dengan neutrino, dan keheliksian tangan kanan dengan antineutrino.



Yang tangan kiri jadi tangan kanan kalau pemerhati lebih laju daripadanya.

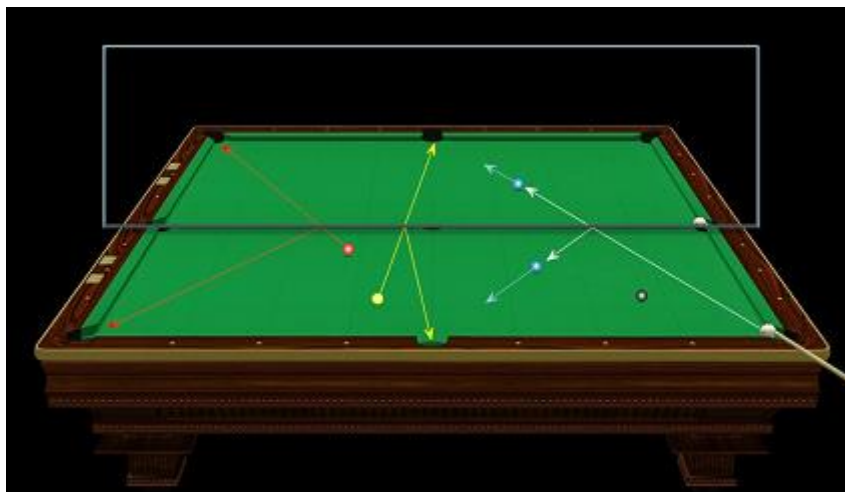
Neutrino mengambil masa dua dekad untuk ditemui. Pauli mula-mula menghipotesiskannya dalam tahun 1930an untuk menyelamatkan prinsip keabadian tenaga, sesuatu yang sejagat dan tabii. (*Tabii* diertikan sebagai sesuatu yang ekonomis, yang dapat menerangkan pelbagai fenomena dengan andaian yang minimum.) Sifat neutrino yang tidak berjisim atau punyai jisim kecil, tidak bercas elektrik dan tidak menjalani tindakbalas nukleus kuat menjadikannya susah ditemui. Hanya pada tahun 1950an neutrino dikesan oleh Fred Reines dan Clyde Cowan.

Reines, yang telah terbabit dengan pembinaan bom atom dalam Projek Manhattan, menyedari bahawa bom atom menghasilkan banyak neutrino dan telah memikirkan tentang cara untuk mengesannya. Cowan telah mula berpakatan dengan Reines setelah mereka berdua sekali itu terkandas bersama di lapangan terbang Kansas. Cadangan untuk mengesan neutrino daripada bom atom telah kemudian diubah supaya pengesanan dibuat ke atas neutrino daripada reaktor nuklear. Oleh kerana kadar tindakbalas neutrino yang rendah, bahan pengesan perlulah lumayan banyaknya, dan bahan yang cocok ialah air. Tindakbalas neutrino dengan proton (atau nukleus hidrogen) dalam molekul air hasilkan neutron dan positron iaitu antielektron. Positron musnahabis dengan antizarahnya, elektron, dari dalam atom berdekatan, menghasilkan tenaga tulen dalam bentuk foton iaitu zarah cahaya. Neutron pula bergerak seketika sebelum diserap ke dalam nukleus Kadmium, yang diletakkan dalam bahan pengesan secara larutan. Tandatanganan tindakbalas neutrino ialah pengesanan tiga foton oleh fotopengesan – dua daripada musnahabis positron-elektron dan satu daripada penurunan keadaan nukleus Kadmium setelah penyerapan neutron. Peristiwa seperti ini telah dilihat oleh Reines dan Cowan hampir 3 kali sejam, dalam pemerhatian mereka selama sejumlah 1371 jam. Pada 14 Jun 1956 mereka telah menghantar telegram berita gembira pengesanan neutrino melalui songsangan reputan beta ini kepada Pauli di Zurich, yang ketika itu berada di CERN. Kini, banyak minat telah berpaling kepada neutrino, dan alat-alat eksperimen dengan pengesan air bersaiz bertan-tan digunakan.



Reines dan Cowan di sistem pengawalan eksperimen mereka yang menemui neutrino.

Yang aneh dengan daya lemah ialah ketanganannya. Daya lemah hanya membabitkan lepton tangan kiri. Lepton tangan kanan tidak merasai daya lemah. Dengan demikian, daya lemah mencanggahi keabadian pariti. Ini satu daripada kepelikan daya nukleus lemah. Ia tidak mengekalkan kesamaan sistem fizik pada perubahan pariti, semasa pantulan cermin bilamana kiri menjadi kanan dan sebaliknya.



Bagi sistem yang mencanggahi pariti, pantulannya dalam cermin tidak mematuhi fizik.

Cas bagi daya lemah berkait dengan 'perisa' zarah. Muon merupakan zarah serupa elektron tetapi lebih berjirim atau lebih berat (dengan itu ia boleh mereput kepada elektron), begitu juga tauon. Jadi lepton yang serupa elektron berperisa elektron, muon atau tauon. Begitu juga ada neutrino elektron, neutrino muon dan neutrino tau. Bagi kuark pula, yang membina hadron, iaitu zarah-zarah yang merasai daya nukleus kuat, seperti proton dan neutron, ada kuark naik, turun, aneh, pesona, atas dan bawah.

G e n e r a s i		
I	II	III
u naik	c pesona	t atas
d turun	s aneh	b bawah
e elektron	μ muon	τ tauon
ν_e neutrino elektron	ν_μ neutrino muon	ν_τ neutrino tauon

Jadual perisa kuark (ungu) dan lepton (hijau).

Secara lumrah, perisa yang berlainan dikaitkan dengan berat atau jisim berlainan. Namun, satu lagi yang pelik bagi daya lemah, ini tidak sepenuhnya sempurna. Keadaan eigen tenaga tidak bertindih secara sempurna dengan keadaan eigen lemah. Ini bermakna setiap waktu kehendak dinamik mencampurkan keadaan-keadaan lemah, yakni perisa bercampur. Campuran perisa ini menyebabkan umpamanya, kuark bawah juga kadang-kadang mereput kepada kuark aneh walau kebanyakan masanya ia mereput kepada kuark pesona. Ini memang didapati berlaku.

Walaupun kepelikan yang ada dengan daya lemah ini, ia dan daya elektromagnetan menjadi dua daya yang berjaya mula-mula disatukan. Daya lemah dan daya elektromagnetan telah ditunjukkan oleh Abdus Salam dan Steven Weinberg sebagai dua wajah dari daya gabungan dipanggil daya elektrolemah. Pada rantau tenaga tinggi, ia merupakan satu daya tunggal. Pada tenaga yang lebih rendah pada suatu tenaga tertentu, 'pecahan simetri' berlaku, dan kita lihat dua jenis daya, iaitu daya lemah dan daya elektromagnetan. Inilah juga yang dikenali mekanisme Higgs atau Higgs-Kibble.

Pecahan simetri berlaku apabila keadaan yang bersimetri penuh itu hanya metastabil. Apabila sistem memilih keadaan dasar, ia memilih nilai medan tertentu, dan simetri keupayaan asal terpecah. Contoh yang pernah diberikan Abdus Salam ialah sekumpulan orang yang makan di suatu meja bulat. Gelas minuman berselang dengan pinggan makanan. Keadaan yang bersimetri. Apabila seorang memilih gelas, samada yang di sebelah kirinya atau yang di sebelah kanannya, maka simetri itu telah terpecah. Semua orang lain di meja itu sekarang kena ikut belah pilihan dia ini.



Pecahan simetri berlaku di meja bulat apabila seseorang memilih gelasnyanya di sebelah kiri atau sebelah kanan – setelah itu, semua orang kena ikut.

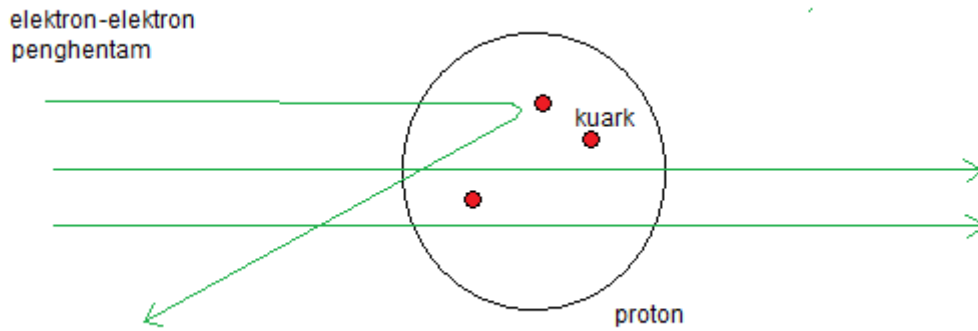
Daya nukleus kuat

Oleh kerana dalam nukleus sesuatu atom itu terdapat proton yang sepatutnya menolak masing-masing akibat cas elektrik yang sama, kita perlu menerangkan ikatan proton (dan neutron) dalam nukleus dengan mempostulatkan suatu daya lain, yang dinamakan daya nukleus kuat atau mudahnya daya kuat. Daya nukleus kuat antara nukleon, iaitu neutron dan proton, diantarakan oleh sejenis hadron disebut pion. Pion punyai jisim, jadi jarak pengaruh daya kuat terhad. Ini berkait dengan prinsip ketakpastian – masa tenaga dapat dipinjam untuk memberikan pion maya berkadaran songsang dengan tenaga tersebut, dan tenaga itu berkait dengan jisim pion menerusi hubungan kerelatifan Einstein. Oleh kerana nukleon mempunyai cas elektrik 0 atau +1, pion pengantara ada yang bercas -1, 0 dan +1.

Sementara itu, hadron didapati mengandungi zarah yang lebih kecil. Dalam eksperimen di SLAC (*Stanford Linear Accelerator Center* atau Pusat Pemecut Linear Stanford dekat San Francisco di Amerika Syarikat) dalam tahun-tahun 1967-1973 yang melanggarkan elektron tenaga tinggi ke atas proton, seperti eksperimen Rutherford yang melanggarkan zarah alfa ke atas atom, pola serakan elektron menunjukkan bahawa proton mempunyai substruktur. Proton, dan juga neutron dan pion, didapati terbina daripada zarah-zarah lebih kecil yang dipanggil kuark (dan antizarahnya, antikuark). Daya kuat di antara kuark diantarakan oleh boson-boson bergelar gluon. Daya antara nukleon difahami sebagai daya lebihan antara kuark, seperti daya van der Waals di antara atom adalah daya lebihan elektrik di antara elektron dan nukleus.

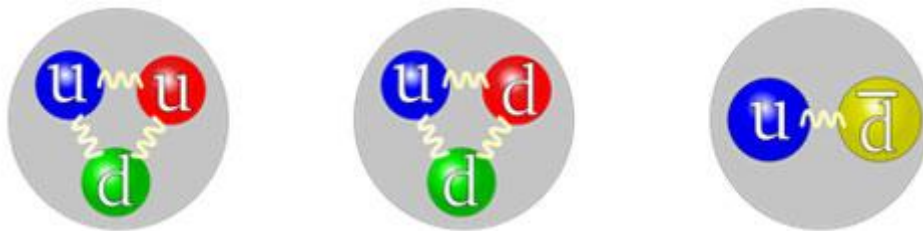


Pemecut linear 2 km di SLAC: garis lurus terpanjang atau garis panjang terlurus.



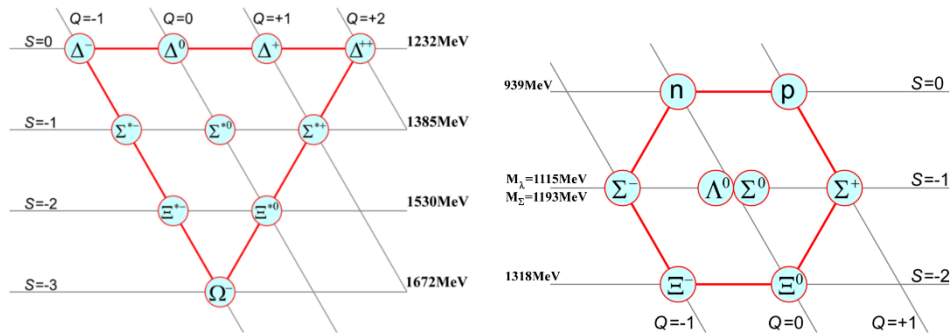
Serakan elektron tenaga tinggi ke atas proton membongkar substrukturnya.

Daya kuat pada tahap kuark dan gluon ini dipengaruhi oleh cas 'warna'. Ada tiga jenis warna, iaitu 'merah', 'hijau' dan 'biru', bersama antiwarna masing-masing. Kelainan gluon berbanding foton, yang neutral elektrik, ialah gluon boleh punyai warna (dan antiwarna). Dengan itu dikatakan daya nukleus kuat ini berjarak dekat, walaupun gluon tak berjisim – salingtindak multigluon berlaku di antara kuark.



Kuark u,u,d membina proton; u, d, d membina neutron; dan kuark u dan antikuark anti-d membina pion positif. Kuark berlainan cas warna menarik. Antikuark mempunyai antiwarna.

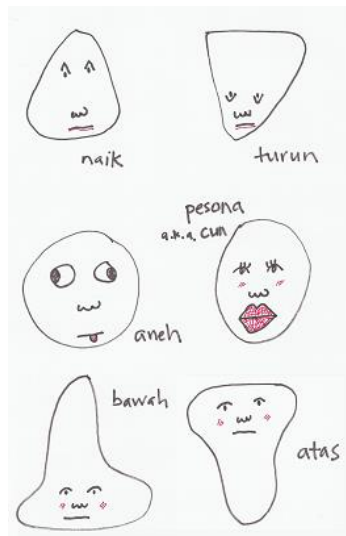
Ide kuark muncul sebelum penemuan substruktur dalam proton lagi. Setelah pemecut zarah direka, pelanggaran zarah telah menghasilkan banyak spesis-spesis zarah yang baru dikenali. Daripada dunia zarah yang terdiri daripada hanya beberapa jenis: proton, neutron, elektron, kini terdapat berpuluhan jenis, terutama yang disebut hadron, iaitu zarah-zarah yang merasai daya nukleus kuat. Ini telah mendorong Murray Gell-Mann dan lain-lain untuk mencadangkan komponen-komponen yang lebih dasar yang lebih mudah yang membina pola kompleks hadron-hadron baru ini. Baryon, seperti proton dan neutron, dicadangkan terdiri daripada tiga komponen unsur dipanggil 'kuark', sementara meson, seperti pion dan kaon, daripada pasangan kuark dan antikuark. Tiga komponen ini merupakan tiga unsur perwakilan asas bernama triplet, bagi simetri dinamakan SU(3), berbentuk seperti tigasegi. Apabila tiga tigasegi digabung, satu dekuplet dan dua oktet terhasil, bersama suatu singlet (ditulis $3 \otimes 3 \otimes 3 = 10 \oplus 8 \oplus 8 \oplus 1$). Baryon yang ada memang didapati boleh diatur dalam set-set dekuplet, oktet dan singlet. Meson pula terungkap dalam set oktet ($3 \otimes \bar{3} = 8 \oplus 1$).



Baryon-baryon diatur dalam dentuk dekuplet (kiri), dan oktet (kanan). Q ialah cas sementara S ialah nombor kuantum keanehan.

Pada awalnya, simetri SU(3) ini diseru untuk menerangkan spektrum hadron yang didapati. Hadron-hadron ini terbina daripada 3 jenis ('perisa') kuark teringan, iaitu kuark naik ('u', bercas elektrik $+\frac{2}{3}$), turun ('d', bercas elektrik $-\frac{1}{3}$) dan aneh ('s', bercas elektrik $-\frac{1}{3}$, dengan keanehan -1). Jadi ini adalah simetri di antara perisa, dan ditulis SU(3)_f. Simetri ini bukan simetri tepat kerana ada beza jisim di antara hadron-hadron dalam sesuatu multiplet. Lagipun, ia tidak lagi begitu berguna apabila perisa lebih berat, pesona 'c', dan seterusnya, ditemui. Simetri yang sebenarnya relevan untuk daya nukleus kuat ialah SU(3)_c, iaitu simetri di antara 3 warna kuark.

Cun



Kuark kini ada enam perisa.

Sebelum penemuan substruktur di dalam proton, kuark dilihat lebih sebagai unsur-unsur penjanaan pola spektrum hadron. Ada kontroversi dalam menentukan siapa yang merekacipta ide kuark ini, walaupun nama 'kuark' itu diberikan oleh Gell-Mann. Kertas penyelidikan Gell-Mann diterima jurnal *Physics Letters* pada 4hb Januari 1964, sementara kertas George Zweig, yang tak diterbitkan, muncul sebagai 'laporan kuning' CERN bertarikh

17hb Januari. Sementara itu, André Petermann telah menerbitkan kertas yang mengandungi ide serupa, pada tahun 1965, namun kertasnya diterima jurnal berkenaan 30hb Disember 1963. Kertasnya dalam Bahasa Perancis! Kini, penemu 'rasmi' teori kuark disebut Gell Mann-Zweig.

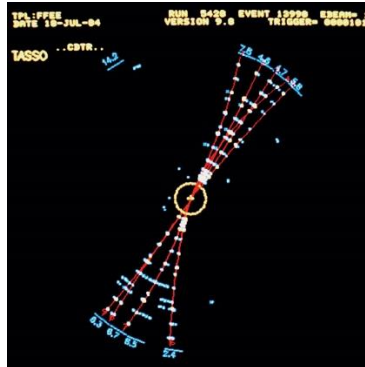
Cas warna disarankan oleh Greenberg pada tahun 1964 bagi mengadakan parameter tambahan untuk menerangkan simetri tukar-ganti kuark dalam baryon berspin $3/2$. Bagi kuark berspin $1/2$, ini bermakna keadaan spinnya sama, dan jika perisanya pun semua sama, seperti tiga kuark aneh dalam baryon Omega, kita ada masalah dengan prinsip eksklusi Pauli. Wolfgang Pauli mengatakan bahawa fermion, iaitu zarah-zarah yang punyai spin setengah integer, seperti kuark, tidak condong untuk berada dalam keadaan yang sama. Jadi suatu darjah kebebasan baharu dapat menerangkan kewujudan Omega, dengan semua kuarknya berada dalam keadaan ruang, spin dan perisa yang sama. Kuark-kuark itu mempunyai nilai-nilai warna yang berbeza. Pada tahun 1964, masih tiada bukti untuk kewujudan kuark secara fizikal jadi teori Greenberg mengambil masa untuk diterima. J. Robert Oppenheimer, yang terkenal sebagai perintis bom atom semasa Perang Dunia Kedua, apabila ditanya Greenberg samada beliau telah membaca kertasnya, beliau berkata, "Ia indah", dan kemudiannya, "tetapi saya tidak percaya satu perkataan pun daripadanya."

Daya kuat dianggap diantarakan oleh gluon, seperti foton untuk teori daya elektromagnetan Elektrodinamik Kuantum, tetapi setelah sekian lama Kromodinamik Kuantum dengan kuark diterima sebagai teori tunggal untuk daya kuat, ia masih tidak dicerap. Ukuran pecahan momentum proton yang dibawa oleh kuark didalamnya diukur dan didapati hanya separuh daripada nilai momentum jumlah. Adakah bakinya dibawa oleh gluon yang masih belum kelihatan itu? Walaupun proton mengandungi 3 kuark valens iaitu u,u,d medan warna di dalam proton itu sentiasa menghasilkan kuark dan gluon dari vakum (kuark dan gluon 'laut') secara maya yang dibenarkan oleh fizik kuantum. Terutama pada pecahan momentum rendah, banyak gluon laut ini kelihatan dalam proton.

Kromodinamik Kuantum (QCD) menyerupai Elektrodinamik Kuantum (QED). Daya elektrodinamik di antara fermion bercas elektrik, sementara daya kromodinamik di antara fermion bercas warna. Daya elektrodinamik diantarakan oleh boson dinamakan foton, dalam keadaan mayanya. Daya kromodinamik diantarakan oleh boson bernama gluon.

Yang bezakan di antara QCD dan QED ialah pemalar gandingannya yang lebih kuat, dan fakta yang gluon juga punyai cas warna. Gluon sebenarnya punyai warna dan antiwarna, dan salingtindaknya dengan kuark berwarna mengubah warna kuark tersebut dengan warna gluon, sementara warna lama kuark 'dipadamkan' oleh antiwarna gluon itu. Foton tidak punyai cas elektrik, jadi tiada salingtindak foton dengan foton. Namun berwarna gluon itu bermakna gluon boleh bersalingtindak dengan gluon yang lain. Ini membawa kepada salingtindak QCD yang kuat, terutama pada jarak yang jauh. Akibatnya, tiada warna 'telanjang' dilihat: kuark dan gluon lantas berkumpul dalam kumpulan-kumpulan tanpa cas warna yang tak diimbangi. Itulah kita lihat zarah-zarah hadron seperti proton, neutron dan pion, mempunyai saiz terhad lebih-kurang 1 fermi (fm, atau femtometer, iaitu 1 meter

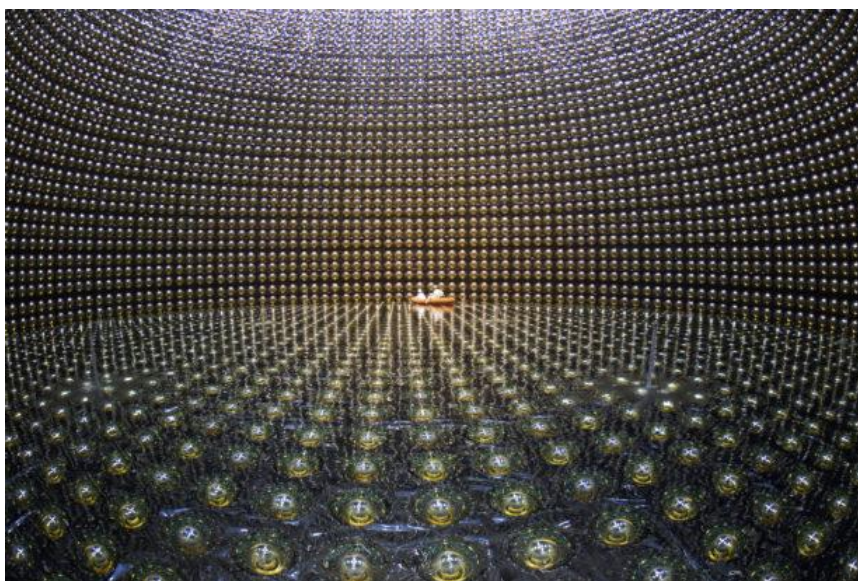
dibahagi 1 kuadriliun atau 10^{15} dengan 15 sifar di belakangnya). Apabila sesuatu objek berwarna cuba melepasi sempadan ini, ia membentuk kumpulan berwarna dengan zarah-zarah yang dipinjam daripada vakum. Ini disebut penghadronan. Apabila objek-objek berwarna itu laju, maka penghadronan berlaku dalam suatu koridor yang sempit, menghasilkan apa yang disebut jet. Jadi jet-jet boleh memaklumkan tentang quark dan gluon yang laju pada asalnya.



Dua jet belakang-ke-belakang daripada pasangan quark dan antiquark dikesan oleh pengesan TASSO.

Jika daya elektromagnetan dan daya lemah dapat digabungkan sebagai suatu daya tunggal, daya elektrolemah, bolehkah daya kuat pula digabungkan bersama daya elektrolemah? Adakah pada tenaga tinggi, wujud satu daya tunggal, yang pada tenaga rendah termanifestasi sebagai tiga daya berbeza menerusi pecahan simetri spontan? Inilah yang membawa kepada Teori Penyatuan Agung.

Dalam Teori Penyatuan Agung, quark dan lepton serupa, dan mengalami salingtindak di antaranya menerusi tukarganti boson X. Jika begitu, proton dijangka mereput, apabila quark dalamnya berubah menjadi lepton. Namun pencarian reputan proton belum menghasilkan keputusan yang dapat menyokong Teori Penyatuan Agung dalam bentuknya yang termudah.

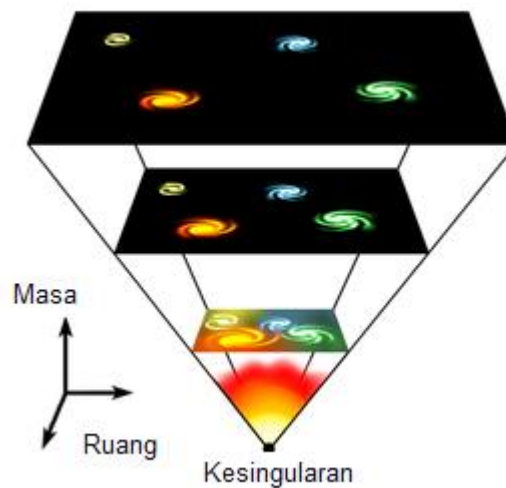


Makmal setinggi 13 tingkat Super-Kamiokande di Jepun, sedang diisi bertan-tan air tulen bagi mencari reputan proton dalamnya. Hasil reputan, jika ada, dikesan tiub fotopenganda yang diatur sekeliling.

Teori Semua Perkara

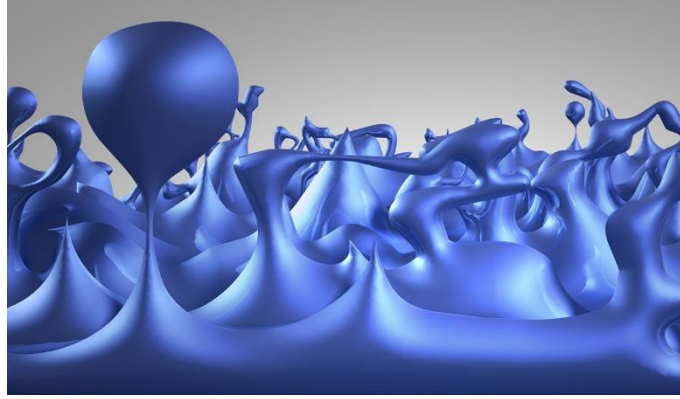
Jadi sekurang-kurangnya secara prinsipnya, daya keelektromagnetan, daya nukleus lemah dan daya nukleus kuat dapat difahami dalam satu gambaran yang tersatu, berasaskan teori medan kuantum. Daya graviti agak terasing, ia lebih selesa diperihalkan dalam bentuk teori geometri ruang-masa, dan cubaan menuliskan teori medan kuantum untuk graviti menemui masalah. Cuma pada keadaan yang tinggi tenaga, seperti semasa awal Letupan Besar, graviti kuantum menjadi relevan.

Pencerapan bahawa jasad-jasad astronomi berundur daripada kita, pada kadar yang bergantung kepada jaraknya masing-masing, mula-mula dipelopori Edwin Hubble, menunjukkan kepada alam semesta yang mengembang. Ini bermakna pada suatu waktu dahulu, semesta adalah berkeadaan ketumpatan tinggi dan panas. Inilah teori Letupan Besar.



Skema pengembangan semesta bermula dengan Letupan Besar.

Jadi, pada keadaan awal Letupan Besar, kita jangkakan graviti juga akan diperihalkan sebagai teori medan kuantum. Dalam teori kuantum, parameter menjadi kabur dan berkebarangkalian. Untuk kerelatifan am yang menerangkan graviti menerusi kelengkungan ruang masa, parameter utama adalah metrik ruang-masa, iaitu ukuran kecutan/kembangan sesuatu dimensi. Dalam graviti kuantum, kelengkungan dijangkakan menjadi kabur dan berkebarangkalian, menghasilkan ruang-masa yang berbusa.



Suatu gambaran ruang-masa dalam rantau graviti kuantum.

Gambaran ini membawa kepada kerumitan dalam pengiraan, dengan infiniti memunculkan di sana-sini, terutama dalam kamiran. Inilah sebabnya kenapa teori graviti kuantum belum dapat di muktamadkan.