

質子的衰變

蘇賢錫

國立臺灣師範大學物理系

科學家已知質子的壽命至少是宇宙年齡的 10^{20} 倍，但是理論顯示，它不是永恒的。如果它不是不朽的，那麼，一切普通物質終究都將衰變。

1896 年白克瑞爾（Antoine Heuri Becquerel）發現放射能，令人相信一切原子不是不變的。白克瑞爾所探查的高能粒子，後來始知它是放射性物質的原子核自發衰變成爲其他原子核時所釋放出來的。雖然原子核的不穩定性很有意思，但是這種性質似乎並不普通，只有某些重元素如鈾與鐳才有。氫與氧等普通元素的原子核，一般認爲絕對穩定。

目前有幾個理論上的理由可以來判斷，一切原子核終究可能會衰變，因此，或許一切物質都有微量的放射性。在這種衰變時，原子核內的兩種粒子之一（質子或中子）將自發轉變成爲高能粒子，極其不同於組成普通原子的粒子。甚至最輕的原子核（氫核，亦即質子）也會衰變。

很多證據顯示，物質是不會迅速消失的。倘若普通物質衰變了，它只是緩慢地衰變，而由於衰變得太慢，需要大規模的實驗來探查其衰變。白克瑞爾在數公克重的鈾鹽晶體中發現鈾原子核的放射性衰變。爲了觀察質子的衰變所產生的更弱放射能，勢必觀測好多噸的材料。雖然如此，現在研究人員正在進行實驗來尋找質子的衰變。

爲了明瞭這種實驗的問題所在，首先最好問一問：世界上爲什麼有的東西必須永遠保持不變？例如，電子仍被認爲絕對穩定。究竟什麼物理原理阻止它衰變成爲其他粒子？了解粒子（例如電子）的穩定性以後，我們就能判斷是否有物理原理可以阻止普通原子核的衰變。由基本粒子物理的經驗知，人能想像得到的任何衰變過程，都會自動發生，除非這過程被物理上的守恒定律之一所禁止。守恒定律是說，某種量的總值（例如能量或電荷）永遠不會改變。即使衰變過程不是直接由基本粒子的基本交互作用之一所產生的，如果它沒有受到守恒定律的禁止，某種比較複雜的粒子之接連釋放與吸收，將會產生衰變過程。因此，在考慮一種粒子的穩定性問題時，應該查看其衰變是否違背守恒定律。

能量守恒定律非常容易應用。它只是要求衰變粒子的質量（或相當的能量）大於衰變生成物的總質量。（只是兩者的質量相等是不夠的，因爲某些質量必須轉變成爲衰變生成物的動能。）因此，開始要判斷任何粒子的穩定性之最好方法是，列舉質量較小而有可能成爲衰變生成物的的粒子。

首先看看電子。衆已週知，截至目前，只有幾種粒子的質量小於電子者。其中最常見的是光子（Photon，亦即光子），其質量一般認爲完全等於零。同時，理論方面強力支持重力放射能的量子

(亦即重力子, graviton)的存在,而其質量也是等於零。最後,還有名叫微中子(neutrino)的各種粒子,其性質有點類似於電子。微中子是在1896年白克瑞爾所發現的那種所謂 β 衰變中釋放出來的粒子。一般認為微中子沒有質量,但其質量的測定是目前理論與實驗物理的焦點。雖然如此,至少有一種微中子,其質量確實小於電子質量的大約一萬分之一。

然則,電子為何不衰變成爲微中子與光子?這個答案是,雖然這種衰變是滿足能量守恒定律,但是它將違背另外一個守恒定律——電荷守恒定律。電荷的淨量(正電減去負電)永遠不增加也不減少,雖然符號相反的電荷可以分開或復合。富蘭克林(Benjamin Franklin)是知道這件事的第一個人。電子帶著一定的負電荷,但是質量較電子爲小而可能成爲電子衰變的生成物之候補粒子(光子、重力子,與微中子)碰巧沒有帶電。電子的衰變將使一定負電荷遭受破壞,因而完全被禁止。

現在再來看看這些守恒定律怎樣應用在原子核內的兩種成份粒子。暫且只想想這兩種粒子中的較輕者——質子,以後再回來看看中子。質子帶的電荷,其大小與電子相同,卻是符號相反,因此,它不能衰變成爲微中子、光子或重力子。然而,質子較電子重1820倍左右,而還有質量較小且帶正電的幾種粒子。質子可以衰變成爲這些粒子,而不違背能量與電荷守恒定律。例如,電子有一種反粒子,名叫正子(positron),其質量與電子相同,而帶著正電,其電量與質子相同。(每一種粒子都有反粒子,其質量相同,但是其他的性質——例如電性,則相反。在此附帶一提,正子是穩定的,其理由與電子相同。)能量與電荷守恒定律並不禁止質子衰變成爲一個正子與任何數目的光子與微中子。

質子衰變的另外一種候補生成物是反 μ 介子(muon)。 μ 介子的許多性質類似於電子,而且其電荷與電子相同,但它比電子重210倍左右。(μ 介子可以衰變成爲一個電子與幾個微中子。)反 μ 介子的電荷與質子相同,但其質量只有質子的1/9左右。因此,質子可能衰變成爲一個反 μ 介子加上輕的中性粒子,例如光子與微中子。

質子衰變的另外一種可能的生成物是介子(meson)(亦即質量介於電子與質子之間的一群不穩定粒子)。能量與電荷守恒定律將允許質子衰變成爲一譬如說——一個帶正電的介子與一個微中子,或衰變成爲一個中性介子與一個正子。任何這些衰變過程將導致氫原子的整個瓦解。對較重的元素而言,這些過程將改變元素的化學性質而釋放能量,其量較一般放射能大得很多。

由於這種衰變過程,到處的物質應該看來都在衰變,但是事實上並不是如此,這是爲什麼?這個問題似乎1929年威爾(Hermann Weyl)首次發問了。當時,人們還不知道正子, μ 介子與介子的存在,所以前面所推測的質子衰變方式不可能有人想到。雖然如此,威爾對物質的穩定性發生疑問;他覺得奇怪,原子內的質子爲什麼不吸收軌道電子而導致——譬如說——氫原子衰變而產生光子射叢(shower)?威爾提議說,假如有兩種電荷,一種是電子所帶的,另外一種是質子所帶的,那麼物質的穩定性可以獲得說明。如果各種電荷分別守恒,則質子與電子之間的相互湮沒將會受到禁止。當時,威爾的提議沒有受到太多的注意。

這個問題在1938年與1949年分別由史德科堡(E.C.G. Stuechelberg)與維格納(Eugene P. Wigner)再度提出。他們的提議終於成爲傳統的看法;即除了能量與電荷而外,另外還有物質的一種性質必須守恒,而這個性質從此被叫做重子數。重子(baryon)是一群粒子,包括質子與其他較質子爲重的許多粒子,例如中子以及極其不穩定的超子。一切重子的重子數都是+1,而一切較輕的

粒子（包括光子、電子、正子、重力子、微中子、 μ 介子以及介子），其重子數都是零。就一個原子或另外一種粒子的混合系統而言，其重子數等於成份粒子的重子數之和。因此，質量較質子為小的粒子，其任何集團的重子數都是等於零。重子數守恒定律是說，總重子數不能改變。質子衰變成爲較輕粒子的集團，會使重子數爲 1 的狀態變成重子數爲 0 的狀態，因此，這種衰變是被禁止的。

反粒子的重子數，其符號與所對應的粒子的符號相反。例如，反質子的重子數等於 -1 ；這是一個反重子。一個質子與一個反質子能夠彼此湮沒而不至於違背重子數守恒定律；質子與反質子的總重子數等於 $(+1) + (-1) = 0$ ，因此，它們可以變成介子或光子射叢。如此，重子數的守恒並不要求每一個質子必須是永恆的，而是要求普通物質（其中沒有反質子）內的質子不可以自發衰變。

到目前爲止，我們只在討論質子的衰變，但是大多數原子的原子核，當然除了質子以外還有中子。中子可能怎樣衰變呢？中子是一種重子，其電荷等於零，而其質量較質子略大。更正確地說，中子的質量略大於質子與電子的質量和。這種關係暗示著中子的一種可能的衰變方式：它可能衰變成爲一個質子，一個電子，以及一些沒有質量的中性粒子。在這過程中，能量顯然可以守恒。電荷也可以守恒，因爲質子與電子的電荷互相抵消。重子數也可以守恒，因爲中子與質子的重子數都是 $+1$ 而其他粒子的重子數都是零。

一個自由中子（沒有被束縛在原子核內的中子），其衰變過程確實如此。它衰變成爲一個質子，一個電子，與一個反微中子。自由中子的半衰期（半數中子衰變所需的時間），大約等於 10 分鐘。某些原子核內的中子，例如氚核（氫的重同位素，包括一個質子與兩個中子）內的中子，也可以衰變成爲質子；這就是 β 衰變的過程。然而，就大多數原子核而言，中子並不衰變，因爲在核內其他質子所產生的靜電排斥力中，要創造一個質子，需要大量的能量。在這種原子核內的中子，與質子一般地穩定。

另外還有一種可能性，亦即，被束縛在原子核內的中子，可能依其他方式去衰變，而不遵守重子數守恒定律。例如，它可能衰變成爲一個正子與帶負電的介子，或衰變成爲一個電子與帶正電的介子。在別的穩定原子核中發現這種中子衰變，其意義將與質子衰變的發現一樣深長。事實上，正在尋找質子衰變的實驗，同時也在尋找非自由中子的衰變。然而，由於自由中子的衰變已經衆所熟知，爲了證實重子數守恒定律而做的實驗，又叫做質子衰變實驗。

最近幾年來，科學家普遍認爲重子與介子是由更基本的粒子——夸克（quark）——所組成的。一個重子包含三個夸克，一個反重子包含三個反夸克，而一個介子包含一個夸克與一個反夸克。電子、 μ 介子，以及微中子是屬於另外一群粒子，叫做輕子，而不是由夸克所組成的。的確，輕子顯示不出具有內部構造的跡象。據此，任何粒子系統的重子數剛好等於淨夸克數的三分之一，亦即夸克數與反夸克數之差的三分之一。淨夸克數的守恒相當於重子數的守恒。

用重子數守恒定律來說明質子與束縛中子之穩定性，疑慮極深的讀者可能覺得不大滿意。筆者認爲這種感覺是正當的。重子數的發明，其目的是要說明爲什麼觀察不到質子的衰變以及有關的衰變，除此而外，它沒有其他的意義。在這方面，重子數與電荷非常不同，電荷有直接的力學意義：電荷創造電場與磁場，而電荷本身又受到這些場的作用，結果產生電荷的運動這種可以觀察出來的效應。假如電荷沒有守恒，那麼電學與磁學的理論必將失去意義。然而，重子數的守恒卻沒有這種力學上的論

證。

的確，正如電荷對電磁場的關係，重子數所對應的場〔叫做重迴場（barytropic field）〕，這種場的存在，被經驗上的證據所反對。地球包含大約 4×10^{51} 個質子與中子，所以地球的重子數非常龐大。如果地球是重子場的根源，我們可以預料該場將吸引或排斥地球表面上的普通物質內之質子與中子。重子力與重力可以區別，因為地球對物體作用的重力與該物體的質量成正比，而重子力必定與重子數成正比。由不同元素所組成而質量相同的物體，其重子數可能相差百分之一。幾次高精密度的實驗〔始於 1889 年厄佛斯（Roland Von Eötvös）所做者〕顯示，物體與地球之間的吸引力確實幾乎與物體的質量而不是與其重子數成正比。1955 年，哥倫比亞大學的李政道（T.D. Lee）與普林斯頓高級研究所的楊振寧（C.N. Yang）分析這些實驗，證明兩個原子核粒子之間的任何重子力應該比重力小得多，而重力本身又比電磁力小四十個數量級。我們不能絕對排除重子數像電荷一樣地扮演力學上的角色，但是李、楊二氏的論證認為這種可能性很小。

重子數在力學上沒有功用，這個結論並不是立即表示重子數不守恒。事實上，自從 1935 年，物理學家已經熟悉許多其他的量，這些量在力學上沒有像電荷那樣有意義，但是它們至少在某些場合は守恒的。這些量包括所謂奇異數（strangeness），同位旋（isospin）以及電荷變換（charge conjugation）。例如，質子與中子的奇異數等於零，有的超子（hyperon）的奇異數等於 -1，而有的介子（叫做 K 介子）的奇異數等於 +1。奇異數守恒定律的引進是為了說明，為什麼 K 介子或超子不能在普通原子核碰撞中單獨產生出來，卻是結伴出現？這是因為 K 介子與超子的淨奇異數等於零。

由於基本粒子交互作用的近代理論之進展，這種守恒定律的看法已經完全改變了。近代理論敘述基本粒子之間的一切已知力（萬有引力除外），其方法非常相似於純粹電磁交互作用的舊理論描述電磁學的方法：近來的理論叫做量子電動力學（quantum electrodynamics），是 1930 年代與 1940 年代所開發的。現在，物理學家認為類似於量子電動力學的電磁場者，一共有 12 個場。它們包括八個膠子（gluon）場，以提供強大核力來束縛重子與介子內的夸克，四個弱電場，以共同方式提供負責 β 衰變的弱小核力與電磁力本身。同時，有對應的 12 個守恒定律，相似於電荷守恒量包括色彩（color），弱電同位旋，以及弱電超電荷（hypercharge）。（色彩是夸克的性質之一，與視覺方面的色彩無關；電荷是弱電超電荷與弱電同位旋的特殊計權組合。）這些守恒量與重子數不同，它們都有直接的物理意義；帶著這些量的粒子會產生膠子場與弱電場，而這些場又反過來對這種粒子發生效用力。這種力完全由粒子所帶的 12 個量的數值而決定。

同時，這些新的守恒定律多少有點改良了舊的非力學上的守恒定律。例如，強大的核交互作用，其近代理論被色彩守恒定律（與其他原理）緊密地束縛著，所以它沒有辦法包含需要違背奇異數守恒定律的那種複雜情形。我們能夠設法引進奇異數不守恒的基本交互作用，但是結果始終變成我們能夠重新定義奇異數的意義，使得它仍然是守恒的。如此，現在物理學家了解，奇異數守恒定律不是像能量守恒定律或電荷守恒定律那樣的基本原理，而是強交互作用的精密理論之後果，尤其是色彩守恒定律這個真正基本定律的後果。因為奇異數守恒定律不是物理上的基本原理，所以它沒有理由在強力場的領域外受到重視。事實上，自從奇異量被發現以後，物理學家已知奇異數在弱核交互作用中是不守恒的。

其他非力學上的守恒定律也受到類似的改良；它們不再被視作像能量與電荷守恒定律那樣基本的守恒定律，而只不過是現代基本粒子交互作用理論結構的數學結果而已。現在看來似乎是基本的守恒定律表，將包括有關強與弱電力的 12 個量之守恒定律，有關萬有引力的能量與動量之守恒定律，以及不知與那一種力有關係的重子數守恒定律。

只是這件事實就足夠令人懷疑重子數守恒定律的真實性。重子數不必像能量、電荷、色彩以及類似量那樣的守恒，以維持基本粒子交互作用理論的意義。而且，另外還有一些肯定的暗示指出，重子數的守恒是不正確的。這些暗示之一，由弱電交互作用的近代理論所提供。烏特勒克（Utrecht）大學的特胡夫（Gerard 'tHooft）已經證明，在這理論中，不能用任何有限數目的基本粒子之釋放與吸收來代表的某些微妙的效應，導致重子數不守恒的過程，但是這些過程的速率低得令人驚奇。這些過程過份緩慢，無法探查，然而，有趣的是，這些過程純粹是因為重子數的守恒與任何種類重迴場無關而產生的；這種效應不能產生不守恒的量，例如與力場有關的電荷。

重子數可能不守恒的另外一個暗示，來自宇宙論。如果站在美學的立場來看，我們可能假設宇宙起始時，物質與反物質的量彼此相等，因而重子與反重子的數目也是彼此相等。根據這個假設，宇宙開始時的總重子數等於零。倘若重子數是守恒的，總重子數應該保持為零。幾乎所有的質子及中子應該分別與反質子及反中子發生碰撞而湮沒，因此，今天的宇宙應該僅僅包含光子與微中子的稀粥，而沒有星星、行星、或科學家。

宇宙開始時也可能是物質比反物質多，而粒子與反粒子湮沒後某些東西留存下來。此外，也可能（雖然一般認為機會不多）由於某種原因，物質與反物質互相隔離，而我們住在總重子數為零的宇宙中之一片土地，其重子數是正值的。然而，如果重子數沒有守恒，將有令人心動的可能性，即宇宙開始時的物質與反物質之量彼此相等，而重子數為正值的目前過剩粒子，是違背重子數守恒定律的物理過程之後果。〔普林斯頓大學的克里生遜（James H. Christenson），克羅寧（James W. Cronin），費其（Val L. Fitch）及脫爾雷（René Turley）在 1964 年所做的實驗已經證明，產生反重子與重子的過程，要其速率相等，物質與反物質的數目不一定要相等。〕這些想法，連同李政道與楊振寧所證明的重迴力之不存在，使一些理論物理學家〔包括蘇俄物理學家沙卡洛夫（Andrei D. Sakharov）〕在 1960 年代建議，重子數不一定要完全守恒。依據宇宙論的想法，至少也促進了在這段期間所做的質子衰變實驗之一。〔這項實驗是斯德哥爾摩（Stockholm）大學與諾貝爾研究所的阿耳維格（T. Alväger），馬丁生（I. Martinson）及萊德（H. Ryde）所做的。〕最近許多理論物理學家精細設計宇宙最早產生重子的方式。

重子數不守恒的任何建議，均皆立即面對普通物質都是非常穩定這件事實。布魯克海文（Brookhaven）國立研究所的哥爾黑伯（Maurice Goldhaber）說：「我們確切知道質子的平均壽命超過 10^{16} 年，但是不解其因。」假如質子的壽命比這個數目少，則人體內的大約 10^{28} 個質子將以每年 10^{12} 個以上的平均速率去衰變（亦即每秒衰變 30,000 次），而我們的健康一定受到威脅。

當然，我們可以積極尋找質子的衰變來求質子壽命的準確數值。1954 年，這種實驗首次由當時在洛塞勒摩斯（Los Alamos）科學研究所的萊尼斯（Frederick Reines）及柯贊（Clyde L. Cowan, Jr.）與布魯克海文國立研究所的哥爾黑伯所做。他們使用大約 300 公升的炭氫化合物磷光質（

質子衰變所產生的帶電高能粒子在這磷光質中會引起容易辨認的閃光。)正如後來的質子衰變實驗一般,儀器放在地下,以免宇宙射線的照射。(這種射線中的高能粒子所引起的效應,會令人誤以為是質子衰變所引起的。)如此慎重防備之下,他們每秒鐘只能看到幾次閃光,而且這些閃光幾乎都是由穿透過來的宇宙射線所產生的。萊尼斯,柯贊與哥爾黑伯所得到的結論是,質子或束縛中子的平均壽命一定大於 10^{22} 年左右。

後來許多物理學家所做的實驗逐漸提高了質子壽命的下限。到現在為止,最精巧的實驗結果來自開士(Case Western Reserve)大學,維瓦特斯蘭(Witwatersrand)大學及加州大學歐文(Irvine)分校的幾組研究人員。從1964年到1971年,他們把20噸的炭氫化合物埋在南非金礦地下3.2公里處,來進行研究工作。他們最近分析數據的結果,認為質子或束縛中子的平均壽命超過 10^{30} 年。

這實在是很長的壽命。爲了比較起見,且看宇宙。宇宙目前的年齡,根據估計,只不過是 10^{10} 年而已。這種壽命較長的粒子,只是因為放射性衰變過程依照統計學原理去進行,始能觀察出來。平均壽命爲 t 年的一堆粒子,不會全部生存 t 年後再一齊衰變,而是粒子總數的 $1/t$ 部分在第一年衰變;剩餘粒子總數的 $1/t$ 在第二年衰變。依此類推,質子壽命的下限不是依靠長期觀察一個質子,來等它衰變,而是花費數年時間去觀察20噸磷光質內的 10^{31} 個質子與中子,來等其中一小部分發生衰變。

導致重子數守恒定律之觀念的原因是,質子的長久壽命。它爲什麼能夠生存這麼久?在過去數年中,出現了一個答案。

記住,弱、電磁、以及強交互作用的最新理論受到高度拘束,例如,強交互作用不能違背奇異數守恒定律。由於該理論過份受到拘束,它不夠複雜(除了微小的特胡夫效應以外),無法允許違背重子數守恒定律,除非我們引進具有奇特的電荷值,色彩值等之新粒子。這種奇特粒子的性質應該不同於現在已知的任何粒子。

假如正確的奇特粒子被引進來,則質子的衰變就變成有可能性。電荷、色彩等數的常見守恒定律顯示,我們所需的奇特粒子,其電荷必須等於質子的 $+3/4$, $+1/3$, 或 $-2/3$, 其內稟自旋(intrinsic spin)角動量等於0或1,而其色彩必須相同於反夸克的。例如,當一個夸克轉變成爲一個反夸克,而另外一個夸克變成一個反輕子(antilepton)(例如:正子、反 μ 介子、或反微中子)時,該反夸克被毀滅,便可產生這種奇特粒子。如此,組成質子的三個夸克能夠衰變成爲一個反輕子與一個介子(由遺留下來的夸克與反夸克所組成)。

這種奇特粒子一定很重,否則它早就被探查出來了。如果它夠重,它不容易被釋放出來,也不容易被重新吸收進去,因此,它們大概只能引起輕微的質子衰變。如此,現在可以說明質子的長久半衰期,不必爲了確保其永久生存而假設任何守恒定律,並且可以證明它並不永遠生存。

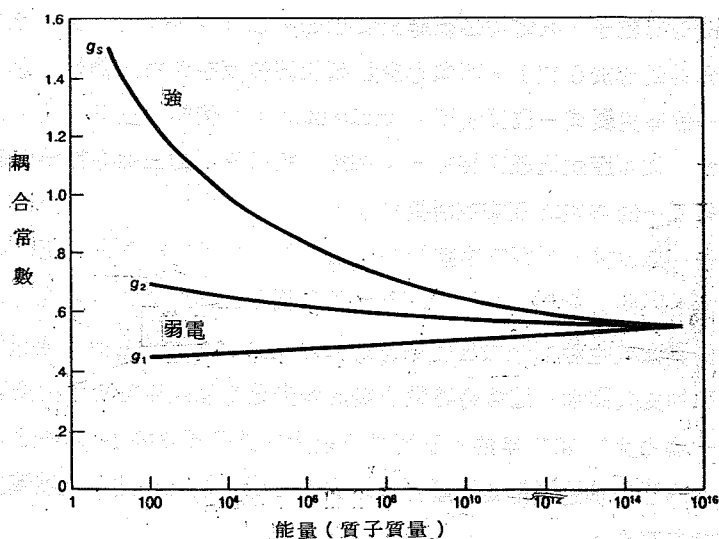
爲了說明質子的長久壽命,這種奇特粒子需要多少重?假設奇特粒子的交互作用有點像光子,我們可以初步估計,壽命大於 10^{30} 年的質子需要質量大於質子質量的 10^{14} 倍之奇特粒子。這是令人眩暈的大質量,現有的任何加速器都無法產生這麼大的質量。雖然如此,這種質量龐大的粒子,至少有兩點理由可以支持其存在。

第一點理由與重力現象有關。到現在為止,我們尚未考慮到重力現象。愛因斯坦的一般相對論,

在實驗能及的能量範圍內，提供粒子之間萬有引力交互作用的理論，相當令人滿意。然而，由於量子起伏的關係，這理論在極高能量（大約等於質子質量的 10^{19} 倍）之下，便告失效。這就是有名的蒲朗克質量，是爲了紀念蒲朗克（Max Planck）而命名的。蒲朗克在1900年發現，想要把他的量子論與重力理論結合時，這種質量會自然而然地出現。蒲朗克質量所對應的能量，大約等於粒子之間的萬有引力超過弱電力或強力的情形。爲了避免量子力學與一般相對論之間的不一致，能量等於或小於質子質量 10^{19} 倍的某種新東西，必須進入物理學的領域中。

第二點理由與弱電交互作用及強交互作用有關。這些交互作用的最新理論包括三個參數，叫做耦合常數（coupling constants）。其中之一是 g_s ，代表強力的膠子場與滿足色彩守恒定律的粒子之間交互作用強度；其他兩個耦合常數 g_1 與 g_2 ，代表弱電場與滿足弱電超電荷守恒定律及弱電同位旋守恒定律的粒子之間交互作用強度。我們相信這些交互作用都有某種共同的來源。果真如此，三個耦合常數的數量級應該彼此相同。但是，這個推測顯然與事實不符，測定的結果顯示， g_s 值比 g_1 或 g_2 大得很多。

爲了克服這個困難，1974年，哈佛大學的喬琪（Howard Georgi），昆因（Heleu R. Quinn）及維恩伯（Steven Weinberg）提出一個構想。在1954年的研究工作中，加州理工學院的格曼（Murray Gell-Mann）與麻省理工學院的羅（Francis E. Low）指出，耦合常數與測定過程所牽涉的能量之間，具有某種關係。1973年，哈佛大學的波里哲（H. David Politzer）與普林斯頓大學的葛洛斯（David Gross）及韋爾伽（Frank wilczel）分別計算的結果，強耦合常數 g_s 隨著能量的增大而緩慢減少。較大的弱電耦合常數 g_2 也減少，卻是減少得更慢，而較小的弱電耦合常數 g_1 隨著能量的增大而增加（參閱圖1）。喬琪、昆因及維恩伯注意到，強交互作用與弱電交互作用會聚處的能量，其刻度極高，因而提出一般假設（在本質上，強交互作用與弱電交互作用由數學上所謂「單」群的某一種對稱組所統一，沒有中間統一階段，而具有 $1/2$ 單位自旋的基本粒子，其所形成的分布樣



式或多或少相似於大家所熟悉的輕子與夸克的分布樣式)，結果發現強交互作用與弱電交互作用會聚處的能量刻度大約在於質子質量的 10^{15} 到 10^{16} 倍。

結合強交互作用與弱電交互作用在一起，且把輕子與夸克置於相同地位的任何理論，都需要牽涉到新粒子，以便填好分布樣式，而且正如前述，沒有正當的理由來相信這些新粒子的交互作用將會遵守重子數守恒定律。（喬洪等人計算所得的能量刻度——質子質量的 10^{15} 到 10^{16} 倍——這個數值頗大，因此，這麼重的奇特粒子所能引起的重子數不守恒交互作用，將不至於導致質子的壽命數值與目前實驗所得下限 10^{30} 年互相矛盾。喬洪等人估計的壽命大約 10^{32} 年。）

自從 1973 年，許多研究人員努力開發這種理論。這些人員包括馬里蘭大學的巴逖（Jogesh C. Pati），廸里雅斯德港（Trieste）國際理論物理中心的沙蘭（Abdus Salam），哈佛大學的喬洪與格拉霄（Sheldon Lee Glashow），加州理工學院的明可士基（Peter Minkowski）與符立其（Harold Fritch）以及耶魯大學的古爾塞（Feza Gürsey），拉孟（Pierre Ramond）與西基維（Pierre Sikivie）。這種模型通常以連結各種力的對稱數學群名來稱呼，例如 $SU(4)^4$ ， $SU(5)$ ， $SO(10)$ ， E_6 ， E_7 ， $SU(7)$ 等。這些模型都包含奇特粒子，而當這些粒子被釋放或被吸收時，會把一個夸克轉變成為一個反夸克以及一個輕子或一個反輕子；因此，正如巴逖與沙蘭在其有關強交互作用與弱電交互作用之統一的第一篇論文所指出，它們能夠違背重子數守恒定律。此外，這些模型都是多多少少滿足喬洪等人的一般假設，所以奇特粒子的質量可能等於質子質量的 10^{15} 到 10^{16} 倍左右，而質子的壽命應該大約等於 10^{32} 年。

最近，許多研究人員作過進一步的精密計算，這些人員包括歐洲原子核研究組織（CERN）的布拉斯（Audrzej Buras），艾里斯（John Ellis），蓋拉（Mary K. Gaillard）與那諾波洛（Demetres V. Nanopoulos），加州理工學院的高曼（Terrence J. Goldman）與羅斯（Douglas A. Ross），洛克斐勒大學與紐約大學的馬霞諾（William J. Marciano）與西爾琳（Alberto Sirlin），歐洲原子核研究組織與哈佛大學勞倫斯研究所的賈可科（Cecilia Jarlskog）與殷度連（Francesco Yndurain）。更新的計算提供更準確的數值——奇特粒子質量大約等於質子質量的 10^{15} 倍，而質子的壽命大約等於 10^{31} 年。不幸的是，質子衰變速率的計算，因為質子內與衰變生成物內的夸克與反夸克之間所作用的強大核力之存在，而變成極其複雜，即使完全清楚超重奇特粒子的性質，可能仍然不能在一兩個數量級內預卜更正確的質子壽命。

弱交互作用在實驗方面的研究已經證實喬洪等人的一般假設。三個耦合常數之中的任何兩個常數，其曲線會在某處相交，這可能不大令人覺得驚奇，但是，在耦合常數對能量的圖表中，為了使三條曲線通過同一點，在它們的起點必須加上一個條件：亦即，在低能時的耦合常數，其數值必須加上一個條件。喬洪等人利用這個條件來計算，發現在他們的一般假設之下，代表弱交互作用與電磁交互作用的統一程度之某種參數（與 g_1 與 g_2 的比值有關），其數值接近於 0.2。最近電子與微中子的交互作用之實驗顯示，這個參數大約在 0.2 與 0.23 之間。理論與實驗的數值非常接近，足夠激勵有關人員作進一步的研究。

10^{15} 倍大於質子的質量實在太龐大，因此，在實驗能夠運用的能量範圍內，這麼重的粒子之釋放與吸收幾乎是不可能的，所以在可能實現的任何實驗中，只能產生微小的效應。探查這種微小的效應

，其唯一的希望是它們可能違背一些本來被遵守的守恒定律，而產生本來完全被禁戒的過程。這些守恒定律之一是重子數守恒定律，而這定律可以尋找質子的衰變來試驗。不需要粒子交互作用理論的前後一致，因而可由超高能量效應所違背的其他唯一已知的守恒定律，這是輕子數（lepton number）守恒定律，亦即輕子（微中子、電子、 μ 介子等）總數的守恒。輕子數的不守恒可能出現的例子是，沒有微中子的雙重 β 衰變——原子核內的兩個質子衰變成爲兩個中子與兩個正子。在這反應中，重子數是守恒的，但是輕子數減少 2。（這反應並不違背能量守恒定律，因爲終態的中子不是自由中子，而是在原子核內具有負值的束縛能。）違背輕子數守恒定律的另外一個徵兆是，微中子的質量不等於零。

爲了求出質子的壽命，目前已有幾項新嘗試正在進行。實驗進行中的地區包括：明尼蘇達州的蘇丹（Soudan）礦場，印度南部的科拉爾（Kolar）金礦區，法國與義大利之間的勃朗山（Mont Blanc）隧道，以及蘇俄的高加索（Caucasus）山脈。今年年底以前，其他三個實驗單位應該報告實驗數據，這些單位分別在俄亥俄州的摩頓（Morton）岩鹽坑，猶他州的銀王（Silver King）礦場及勃朗山隧道的另外一個地點。其他的實驗正在籌劃中。

一切實驗的基本技巧是利用細心觀察質量龐大的材料，來補償極其緩慢的質子衰變。質量愈大，質子與束縛中子的數目愈多，因而觀察衰變的機率愈大。如此，我們希望能夠探查質子或束縛中子的衰變，其平均壽命必定比較目前的下限 10^{30} 年爲大。各地實驗的主要差別在於觀察所用的材料之質與量，探查質子衰變所用的儀器之性質與佈置方法，以及抑制來自宇宙射線的擬似訊號之方式，包括實驗室距離地面的深度。

由於需要觀察龐大的質量，這些實驗必須使用比較便宜的材料，例如水、水泥或鐵。蘇丹礦場，科拉爾金礦區及勃朗山隧道的實驗單位均用鐵或水泥。這些單位必須依靠比例管（proportional tube）或流光管（streamer tube）來觀測。這種儀器能夠直接探查質子衰變時所釋放的高能帶電粒子。這些帶電粒子在鐵或水泥中的射程很短，所以探查管必須緊密佈置於實驗材料中。

另一方面，摩頓岩鹽坑，銀王礦場及荷姆斯特（Homestake）金礦區的實驗單位，觀測水等透明材料，而運用稍微不同的方法。質子衰變所放出的能量足夠高，使得衰變過程中所釋放出來的電子、正子、 μ 介子或 π 介子具有極高速率。這速率當然較真空中的光速爲小，卻是比水中的光速爲大。當帶電粒子在透明介質中運動而其速率較光在該介質中的速率爲大時，即可發生所謂余楞科夫（Čerenkov）效應。它好像飛機在空中以超音速飛行時所產生的音爆，但是余楞科夫效應是一種光爆，帶電粒子放出的是光錐而不是音錐。〔余楞科夫效應的美麗藍光，居里夫人作放射線實驗時早已注意到，但其詳細性質卻在 1930 年代首次由余楞科夫（Pavel A. Čerenkov）所發現。〕余楞科夫光線與帶電粒子路徑之間的夾角，由帶電粒子的速率與光在該介質中的速率之比值而決定。大部分的光，幾乎都是那些以真空中的光速而運動的粒子所放出的，而在水中的夾角大約等於 42 度。

余楞科夫光錐的出現，表示該介質中發生某種過程而創造高速帶電粒子。除此而外，當初速一定時，光錐的厚度與放出的光量，只是由該帶電粒子的速率降低於光在該介質中的速率之前所行進的距離而決定，亦即由其初能而決定。因此，只要記錄光線的接收位置與光線的強度，即可算出初能與帶電粒子的運動方向。在某種情形之下，運動中的粒子本身可能會衰變，而放出能夠引起第二次余楞科夫光錐的其他粒子。質子衰變時所產生出來的 μ 介子或反 μ 介子能夠衰變成爲電子而發生余楞科夫

效應。帶電 π 介子可能衰變成爲慢 μ 介子（或反 μ 介子），進而衰變成爲快電子（或正子），遂發生余楞科夫效應。一個中性 π 介子可能衰變成爲兩個光子，而每一個光子可能產生帶電粒子射叢與隨伴的余楞科夫光錐。因此，利用余楞科夫光錐也是探查質子衰變的變通辦法之一。

運用余楞科夫光錐的方法，比質子衰變的其他探查方法，具有許多優點，其中之一是，光在水中能比帶電粒子本身跑得更遠。因此，當觀測材料的體積一定時，所需的探查器較少，而利用鐵或水泥等不透明材料的實驗所需的探查器較多。同時，水也比鐵或水泥更加便宜。另一方面，水專用的余楞科夫探查器只是對運動速率高於水中光速的帶電粒子有效。然而，密度較小的水，需要在地下挖掘大洞來維持一定量的觀測材料，而且水也必須經常保持純清，以便余楞科夫光錐可以透過。前面已經說過，利用水與其他密度較大的材料之實驗，正在積極推動。

這些實驗究竟能夠探查多少次的質子衰變？暫且以觀測材料最大的摩頓岩鹽坑爲例。所用的10,000噸水中，外側的大約5,000噸水是用以抗拒宇宙射線的。剩餘的大約5,000噸水包含 3×10^{28} 個質子（及束縛中子）。假如質子的平均壽命等於 10^{31} 年，則每年應有300次左右的質子衰變。即使壽命長達 10^{32} 年，繼續觀測幾年也應該可以得到幾次質子衰變。然而，衰變速率這麼低時，實驗將受到來自宇宙射線的擬似訊號之騷擾，而進一步的改進則頗爲困難。

果真質子的衰變被發現了，我們將理解什麼？當然，我們立即得到結論，說重子數是不守恒的，因而更加相信，一切守恒量都有類似於電荷那種力學上的意義。此外，如果不久的將來發現質子的衰變，則其壽命應該在 10^{30} 年到 10^{33} 年的範圍，而喬琪等人關於強交互作用與弱電交互作用的統一之一般假設，其可信性將隨之提高。

有一件事情，我們可以確定。如果質子的衰變被發現了，大家將再進一步去探討，而不久以後，第二代實驗將會出現。但是，這次的目的不在於探討質子衰不衰變，而是在於探討它們怎樣衰變？各種衰變方式的機率又是怎樣？

（資料來源：Scientific American, vol.244 No.6, June 1981）