

# 靠越近 會越自由嗎？

## 2004年 諾貝爾物理獎

我們平常所說的重力與電磁力，都是粒子間的距離愈遠作用力愈小。

但構成質子與中子的粒子—「夸克」間的作用力，  
卻是距離愈遠作用力愈大，愈近反而愈小，夸克愈接近「自由」狀態。

物理學家稱這種現象是「漸近自由」。

■ 楊友偉



2004年諾貝爾物理獎頒給了格若司 (David Gross)、波立冊 (David Politzer) 與威切克 (Frank Wilczek)，因為他們證明了夸克間的強作用力理論「量子色動力學」(quantum chromodynamics, QCD) 具有「漸近自由」的特性。而當初波立冊與威切克發表論文時，還分別只是 24 與 22 歲的研究生呢！

## 重力與電磁力

古人記錄行星的運動，歸納出克卜勒的三條規律。牛頓由克卜勒的規律，用他發明的微積分導出了星球間的引力，知道力的大小與兩星體間距離的平方成反比，而與個別星體的質量成正比。牛頓並推斷，所有物體之間都有這樣的引力，稱為萬有引力，蘋果會從樹上掉下來就是這個原因。

古人從打雷和閃電知道電的存在，富蘭克林曾在雨天放風箏以研究電的性質。他們發現電荷有正與負兩種，電荷之間的作用力是同性相斥、異性相吸。庫倫用實驗證實了這種力的大小也與距離的平方成反比，與個別電量成正比，和重力情形類似。

磁鐵也有兩極，我們叫南極與北極，也是同性相斥、異性相吸。磁鐵可以使鐵針偏轉，若是在一塊大磁鐵附近撒些鐵粉，可以看到鐵粉規則地排列起來。這種現象在電流附近也會發生，因此安培發現了電流會產生磁場。後來法拉第發現

改變的磁場會在附近的導體裡產生電流，也就是會產生電場，這就是發電的原理。

因此電與磁其實是不可分的，我們把這兩種作用合稱為電磁作用，而電磁作用與重力作用都可以用力場的觀念來描述。例如有一個質量是  $M$  的物體，在空間中就產生一個重力場，另一個有質量的物體就會受力，我們說它因重力場的影響而受力。電磁的情形也一樣，帶電物體會產生電磁場，使得另一帶電物在電磁場中受力。

## 量子電動力學

當進入到原子的尺度時 ( $10^{-10}$ 公尺)，會發現所有的物質都是由不同的原子構成的，而原子是由不同的原子核與電子構成的，帶負電的電子與帶正電的原子核 (由質子與中子構成) 經由電磁作用緊密地結合在一起。但在原子的尺度時，我們必須用量子化的電磁場來描述，這種描述法就是把兩粒子之間的作用看成是在交換光子。其實光就是一種電磁波，量子化的電磁作用也就是光電作用。這樣的描述在 50 年代就已發展得相當完善了，稱作量子電動力學 (quantum electrodynamics, QED)。

在量子力學裡，每一顆粒子除了有質量與電量外，還有固定的自旋量 (自轉角動量)。雖然自旋的空間性質與物體的自轉很像，但它是純粹的量子觀念，不能多一些或少一些，電子必定帶  $1/2$  單位的自旋，而光子帶 1 單位。帶半整數單



2004年諾貝爾獎得主，都是美國人，由左至右：格若司，1941年生，任教於加州大學聖塔芭芭拉校區；波立冊，1949年生，任教於加州理工學院；威切克，1951年生，任教於麻省理工學院。

<http://nobelprize.org/physics/laureates/2004/index.html>

位自旋的叫費米子，帶整數單位自旋的叫玻色子。另外每個粒子還有對應的「反粒子」，反粒子的質量、自旋與粒子相同，但電荷與其他的「荷」則與粒子相反（相加後是零），正反粒子可互相湮滅成爲不帶任何「荷」的光子。

## 強作用力與夸克學說

當進入到更小的原子核尺度時（約 $10^{-15}$ 公尺），我們需要用核力來解釋質子與中子之間的作用力，這是一種很強的力，才能克服電磁力而把質子與中子束縛在這麼小的空間裡。

一直到50年代，一般都認爲組成物質的基本粒子就是電子、質子及中子。質子與中子結合成各種不同的原子核，再與等電量數的電子組成中性的原子，它們之間的作用力就是核

力與電磁力。

但是隨著加速器能量的增加，以及偵測技術的提升，人們發現與質子、中子類似的粒子愈來愈多，甚至有數百種，它們不可能都是基本粒子。因此物理學家開始思考：什麼粒子才是最基本的？質子與中子等粒子又是什麼粒子組成的？它們的基本性質是什麼？有幾種這樣的粒子？

1960至1962年，格耳曼與尼曼發表了夸克是基本粒子的學說，而夸克有個很奇怪的性質，就是它們的帶電量。在60年代以前，物理學家都相信電荷的最小單位是1個電子所帶的電量 $e$ （ $1.6 \times 10^{-19}$ 庫倫），可是照格耳曼—尼曼的理論，夸克帶有 $+\frac{2}{3}e$ 與 $-\frac{1}{3}e$ 的電荷。若是這樣，應該很容易在實驗室或宇宙射線中分辨出來，而用高能量的粒子打擊質子或中子

時，也應該可以把夸克打出來，但是一直都沒有發現單一的夸克。因此一直到1970年，即使研究夸克非常出色的學者都不是很相信夸克的存在。

## 夸克的存在

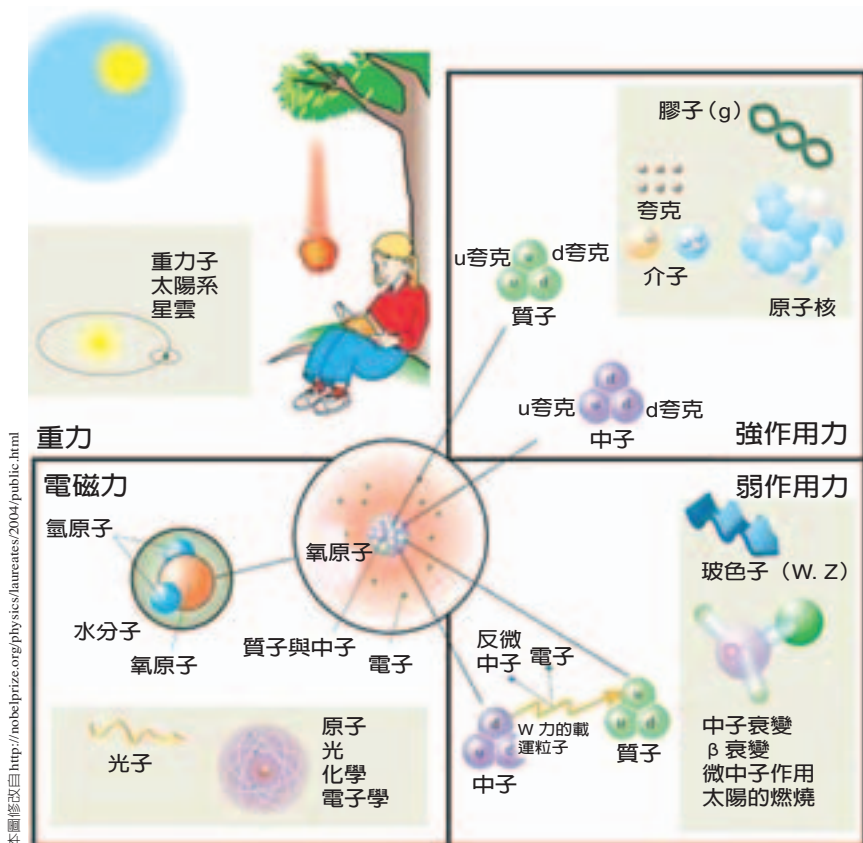
早期的夸克學說主張有3種夸克，它們組成基本粒子。用數學的群論理論可以把一些粒子歸類，也可以預測其他粒子的存在，其中最有名的是精準地預測了 $\Omega^-$ （1.675 MeV）子的存在，它的自旋量、電量、質量與所謂「奇異數」都與實驗符合，特別是它的質量預測值與實際值的差，僅在一、二個百分點左右。

雖然單一的夸克一直都沒有被發現，但是愈來愈多的跡象顯示夸克的存在。早期格耳曼等認爲自然界最少應有3種夸克，即上夸克u與下夸克d組成質子與中子，另有一種奇異的粒子K介子及 $\Lambda$ 粒子則需要第3種夸克，叫奇異夸克s。

日本物理學家小林誠和益川敏英認爲要解釋所謂的電荷宇稱不守恒，必須有第4種夸克。而格拉休等人在解釋 $\Lambda$ 粒子的 $\beta$ -衰變與中子的 $\beta$ -衰變的差異時，也需有第4種夸克來解釋。到了1973年，丁肇中的團隊及里希特的團隊都發現了J/ $\Psi$ 粒子，可以證明有第4種夸克，叫魅夸克c。這時夸克的存在已不容置疑，剩下來就是要解釋爲什麼沒有見到單一的夸克。

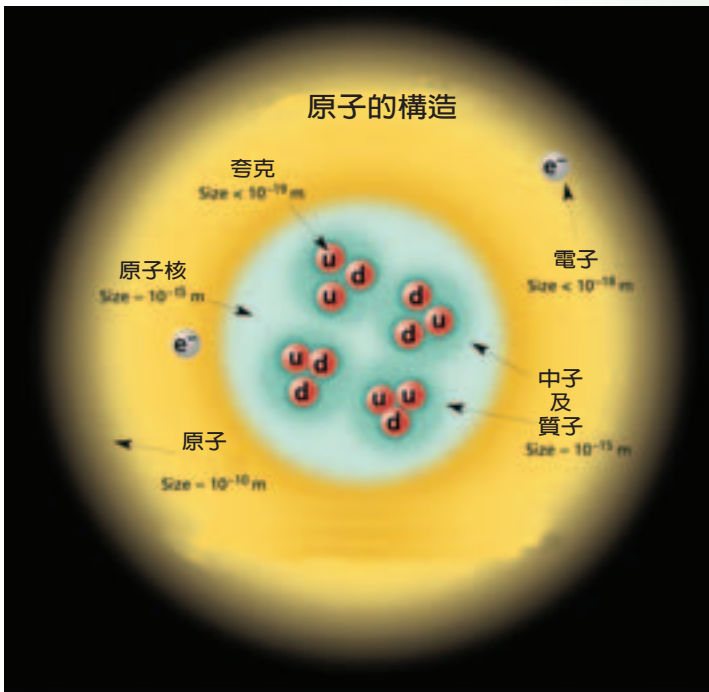
## 夸克帶有「顏色」

我們相信構成元素的基本粒子是質子與中子，它們之間的作用力是核力。要知道核力的性質，可以用質子



自然界中的4種基本力：重力、電磁力、弱作用力與強作用力。

本圖修改自 <http://nobelprize.org/physics/laureates/2004/public.html>



[http://particleadventure.org/particleadventure/frameless/chart\\_coutouts/structure.jpg](http://particleadventure.org/particleadventure/frameless/chart_coutouts/structure.jpg)

如果圖中的質子與中子大小是10公分寬，那麼夸克與電子就小於0.1毫米，而整個原子則有10公里寬。

或中子去碰撞原子核，也可以由原子核的能階去了解。而構成質子與中子的粒子就是夸克，但是我們沒有單一的夸克，因此研究夸克之間的作用力就不能像研究核力一樣了。

一個很奇特的現象就是不論在實驗室或是在宇宙中都沒有發現單一的夸克，它們似乎非常緊密地結合在一起，無法分離，所以我們要找的理論必須能解釋這種現象。1960年代物理學家提出

一個解釋，他們認為夸克帶有「顏色」，有「紅、綠、藍」3色（當然不是我們眼睛看到的顏色，只是代表1個夸克有3種不同的狀態，稱為色態，在弱作用時是說「味道」），而我們能看到的粒子一定是白色，這樣就能解釋為什麼看不到單一的夸克了。

因此當我們要真正探討夸克間的作用力時，就給了夸克色荷，就好像電荷有正有負，夸克有紅、綠、藍3種不同色荷，而由「群論」的理論發現，只有當這些顏色的夸克組成是白色時，它們之間才會是吸引力，否則就是斥力，不能構成粒子。當它們形成粒子之後，我們就要解釋為

什麼用強有力的粒子去打擊質子時仍不能打散它們。

1977年里德曼等人又找到第5種夸克（底夸克b）存在的證據，而直到1994年，美國費米實驗室的實驗群才又找到第6種夸克（頂夸克t）存在的證據。所以到目前為止，可以確定有6種夸克：u、d、s、c、b、t，以及它們的反夸克。每一類夸克又有3種不同顏色，也就是有紅u、綠u與藍u，而反夸克的顏色是夸克的互補色。

### 漸近自由的實驗證據

物理學家用能量非常高的電子或微中子去打擊質子，因為能量很高，就好像波長很短的波，可以穿透質子，看到它內部詳細的構造。就好像用光去看微小物體時，物體愈小需要的波長愈短，才能避免繞射。

電子是帶電粒子，與帶電粒子之間的作用是電磁作用，而微



<http://www.slac.stanford.edu/slac/media/info/photos/ig-aerial.html>

位於加州史丹福大學的直線加速器的鳥瞰圖，圖中白色直線部分就是2英里長的直線加速器，可把電子加速到50 GeV。

中子是只有弱作用的粒子，所以它們與夸克之間的作用力都是已充分了解的力，這樣就可以得到夸克的性質以及它們在質子中的情形。結論是夸克是自旋 $1/2$ 的粒子，就像質子、電子一樣具 $1/2$ 單位的自轉角動量，有的帶 $+\frac{2}{3}e$ 電荷，有的帶 $-\frac{1}{3}e$ 電荷，而最奇怪的是它們之間似乎沒有作用力！

所有的現象告訴我們，夸克之間的作用力與它們之間距離的關係恰和電荷作用相反，距離近的時候好像沒有作用力，距離遠時作用力就變大了，且愈遠作用力愈大。就好像橡皮筋，放鬆時沒有力，拉長就有力了，拉愈長力愈大，再拉就斷掉了。質子裡的夸克也一樣，再拉大距離就斷掉了。就像小磁鐵，再怎麼小也有兩極，夸克間被拉斷處會有新的夸克一反夸克產生，最後分開的夸克團一定是白色的粒子。

## 量子色動力學

夸克的顏色被提出後就有了量子色動力學（QCD）。量子電動力學（QED）在1950年代就已是成熟的場理論，在那個理論裡電磁作用是帶電粒子互相交換光子，而光子本身不帶電，所以1個光子不會變成2個光子。而在QCD場論裡，夸克間的作用是交換膠子。膠子也帶1單位的自旋，而由群論與場論結合的理論推出有8種膠子。膠子本身帶有色荷，因此也能產生膠子，膠子可以有3個或4個在一起的作用。所以兩夸克之間的膠子1個可變成2個、甚至3個，距離遠時膠子就更多了，作用力就更大了。

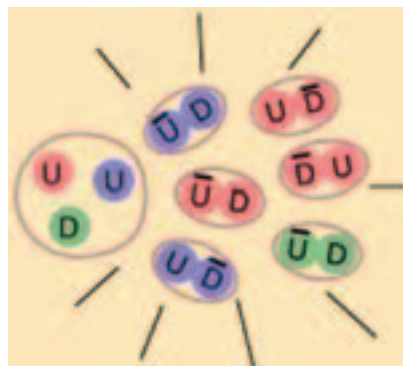


這是1968年泰勒、肯達爾與弗利德曼等人用高能電子打擊質子，發現「漸近自由」的實驗裝置，他們3位因此獲得1990年的諾貝爾獎。

<http://www2.slac.stanford.edu/vvc/NOBEL/1990nobel.html>

在1948年費曼、史文格與朝永振一郎等人所發展用來處理電磁作用的量子電動力學中，用耦合常數 $\alpha$ 代表作用力的大小，電磁作用的耦合常數 $\alpha$ 是 $1/137$ 。因為常數很小，所以可以用數學上的微擾方法來計算，也就是用無窮級數的方式來表示兩粒子間的電磁作用，但只取到前面幾項。這樣的計算與實驗可以符合到千萬分之一。

實驗告訴我們這個耦合常數 $\alpha$ 會



u夸克、d夸克以及它們對應的反夸克構成白色的粒子，反夸克帶的顏色是夸克的互補色。

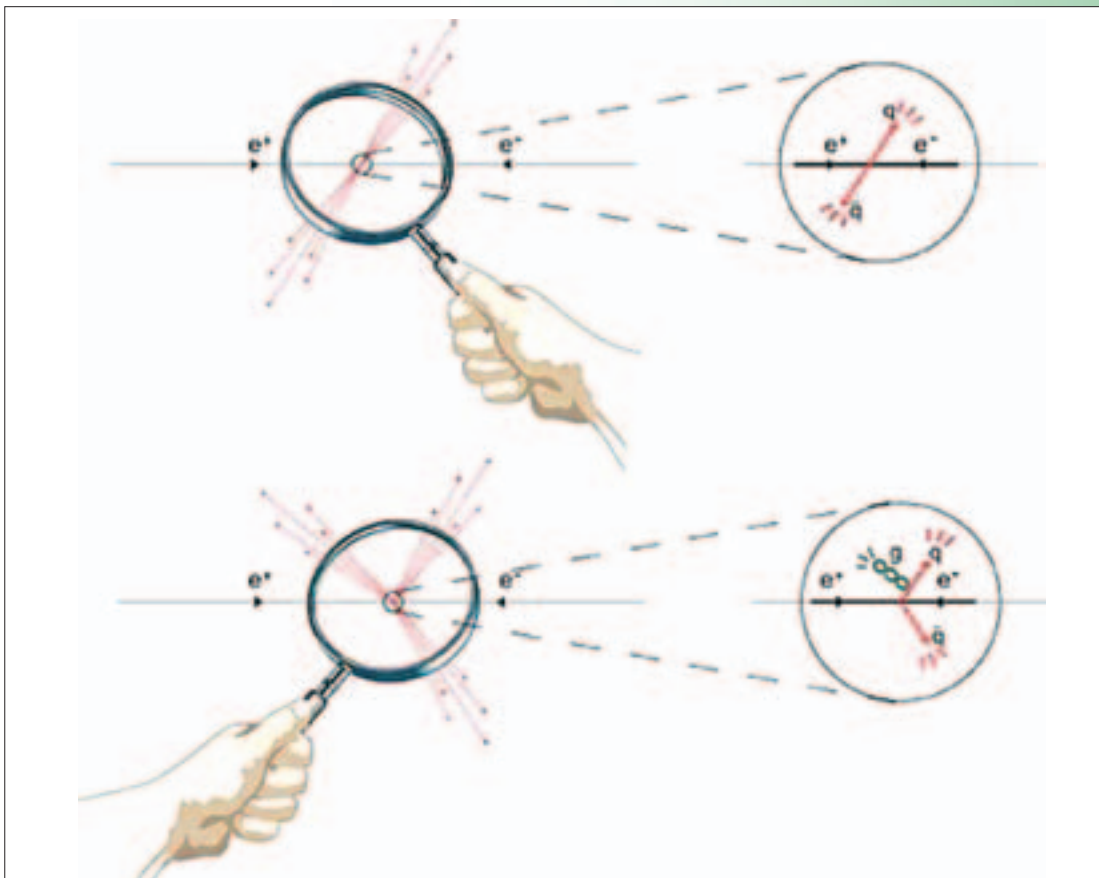
**所有的現象告訴我們，夸克之間的作用力與它們之間距離的關係恰和電荷作用相反，距離近的時候好像沒有作用力，距離遠時作用力就變大了，且愈遠作用力愈大。**

隨能量的增加而增加，例如能量到100 GeV（1 GeV是10億電子伏特）時， $\alpha$ 增為 $1/122$ ，這表示一個所謂的 $\beta$ 函數是正值。 $\beta$ 函數告訴我們耦合常數 $\alpha$ 隨能量

改變的情形， $\beta$ 是正表示 $\alpha$ 隨能量增加而變大。

夸克間的強作用的 $\beta$ 約等於1，因此不能用微擾方法計算。1970年代初期，大家都在找一個可以讓 $\beta$ 函數是負的理論。1973年，格若司、威切克一組，和波立冊分別在《物理評論快訊》（*Physical Review Letter*）上發表了背對背的兩篇文章，證明量子色動力學的 $\beta$ 函數可以是負的，這樣 $\alpha$ 在高能量時可以變小，就可以用微擾方式進行計算。

實驗的驗證是用高能量的電子去打質子，因為能量高 $\alpha$ 變小，所以可以計算，計算結果也與實驗符合。而且電子能感覺到的是帶電粒子，實驗



<http://nobelprize.org/physics/laureates/2004/public.html>

**電子與正子互相湮滅** 根據愛因斯坦公式  $E=mc^2$ ，它們所有的能量會變成一對夸克與反夸克，而夸克與反夸克的一部分動能又會再產生夸克、反夸克……如此形成 2 個粒子束。或者夸克對中的一個先立刻放出 1 膠子，再演變成 3 個粒子束。

發現這些帶電粒子（就是夸克）間沒有作用力，而且只帶有質子的一半動量，表示另一半是所謂的膠子帶的，間接證明了膠子的存在。

另外用高能的電子  $e^-$  及正子  $e^+$ （電子的反粒子）互撞，由愛因斯坦公式  $E=mc^2$  可知它們的所有能量可以變成夸克質量與動能。而當夸克與反夸克互相背離離開時，它們之間的作用力會愈變愈大，就會產生更多的夸克與反夸克，而形成一般的粒子，這就是電子與正子對撞實驗中所看到的兩束噴粒的現象。在產生夸克反夸克的同時，其中一個也可能放出膠子，這樣就形成 3 束噴粒。因此實驗都驗證了夸克與膠子的存在，以及它們之間作用的正確性。

知道強作用的耦合常數  $\alpha$  隨能量的增加而減少，電磁作用的  $\alpha$  則隨能量增加。另外一個作用叫弱作用，是解釋原子核  $\beta$  衰變的作用。這個作用是以交換有質量的粒子  $W^\pm$  或  $Z^0$  來描述，而且弱作用可以用所謂的「 $SU(2) \times U(1)$  的規範理論」和電磁作用統一起來。弱作用的  $\beta$  函數值是正的，且  $\alpha$  比電磁作用的小，因此當能量很高時，3 種作用力的  $\alpha$  值就可能變得一樣。

這樣一來我們可以把強作用、弱作用與電磁作用統一起來，甚至更進一步把重力也統合起來。這是理論物理學家夢寐以求的，愛因斯坦就曾試過，可惜沒有成功。 □

## 統一場論的可能性

因為格若司、威切克和波立冊的理論，我們

楊友偉

成功大學物理系