

在微觀世界深層 頂夸克的踪跡

● 陳方正 楊綱凱

今年4月《時代》和《新聞周刊》都以顯著地位登載了費米實驗室四百多位物理學家經過兩年努力，終於發現頂夸克存在的初步證據的消息。頂夸克到底是怎樣的事物，值得幾百位科學家經年累月去尋找？又為甚麼僅僅是它「存在的初步證據」，就足以成為轟動全球的國際新聞？問題雖然簡單，答案卻牽涉到漫長的一段歷史，以及人類最鍥而不捨的一個探索旅程。要說明這歷史和這旅程，我們還得從頭講起。

世界的三種基本質料

自古以來，人類最感到好奇的是：物質世界是怎樣構成的？在這問題背後的想法是：世上千變萬化的事物都是由少數基本不變的原素組合而成。找到這些原素和它們的組合規則，那麼也就可以掌握萬象變化的奧秘了。

古希臘哲學家對基本原素最感興趣，說法也最紛紜：有認為是水，有認為是火，是空氣，甚至是抽象的數，是細微的「原子」，或者是地、水、氣、火四者的混合。最後這一說，和我國傳統的五行(金、木、水、火、土)或者印度哲學上的四大(地、水、風、火)都有些相似。然而，所有這些說法都只不過是猜臆，既沒有定量理論，也沒有實驗證據，所以只能停留在「前科學」階段。

對「物質世界由甚麼構成」這一問題的突破，要以十八世紀下半葉法國的拉瓦錫辨明空氣的成分和將水分解為氫、氧兩種元素為起點，以十九世紀中葉，

俄國的門捷列夫發現周期表(periodic table)為初步的解決。到本世紀初，「世界是由數十種化學元素構成」已不成問題了。可是，這並不是旅程的終結，而只是開始而已。

因為，很自然地，我們要追問：那麼化學元素又是由甚麼構成？化學性能的周期性從何而來？這些問題的探索，令「物質世界構造」從化學問題轉為物理問題，將我們從可觸摸、感覺的宏觀世界帶到必須借助儀器探測，必須用理論推斷的微觀世界。這是本世紀初的事①②。

一個世紀前(1897年)，英國物理學家湯遜(J.J. Thomson)發現首顆微觀粒子——電子，為人類開啟了微觀世界之門。隨後三十年間，原子的構造弄清楚了：它是由極小的核，加上圍繞其外運行的多顆電子組成的：原子的類別，便是由核決定。同時，微觀粒子(特別是電子)的力學法則也發現了：它不再是牛頓力學，而是複雜、奇特到不可思議地步的一套新規律——量子力學，它和人類「常識」可說是完全相悖的。

原子只不過是微觀世界的表層而已。從30年代開始，物理學家的注意力就集中到更深層的微觀世界——原子核上去。在1932年，另一位英國物理學家察維克(James Chadwick)發現了電子、質子(氫原子核)之外的第三顆微觀粒子——中子，由是開啟了核世界之門。

跟着，原子核的構造很容易就弄清楚了：它裏面只有質子和中子；不同類的原子核，只不過是不同數目的質子和中子的結合而已！這樣，在微觀世界第二層，即原子核的層次，也就是在宏觀世界百萬億分之一(10^{-14})左右的尺度，世界只需要三種基本質料，即電子、質子、中子就夠了。2,300年前德莫克里托斯(Democritus)的推想雖然還沒有完全證實，但已相差不遠。

理論上，量子力學繼續發展，成為可以描述粒子的產生、湮沒和衰變等各種變化的量子場論。同時，新的作用力，即所謂弱作用力和

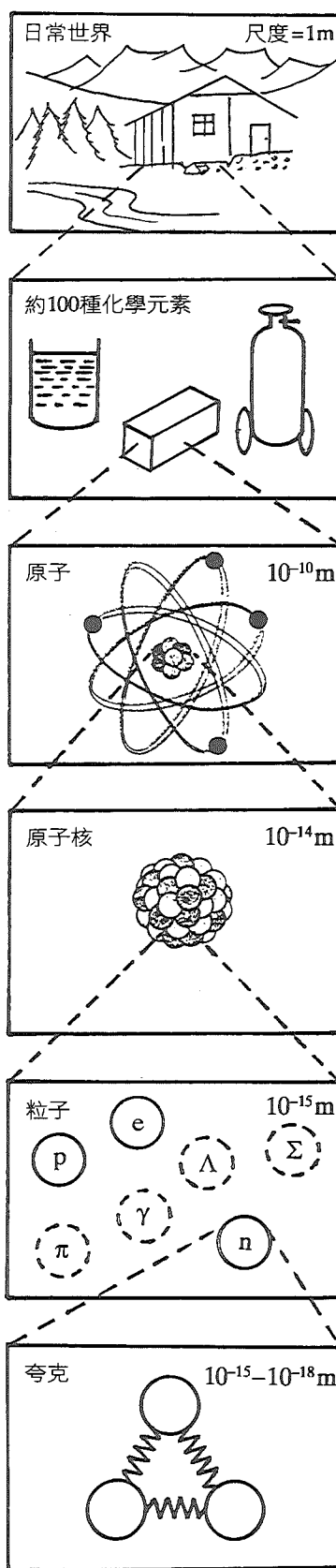


圖1 找尋世界基本質料的過程：把日常世界分解為大約100種元素，元素又再依次分解成原子、原子核、粒子和夸克等四層。原子的尺度大約是宏觀世界(約1米為度)的百萬分之一，夸克是千萬億至百億億分之一左右。

強作用力發現了，它們是「短程的」(在 10^{-15} 米以內才有效)，因此和早就知道的萬有引力以及電磁作用等「長程」力迥不相同。這樣，粒子種類雖然大大減少，它們之間的動力關係卻變得複雜起來。

紛亂的粒子世界

其實，在30年代，人類所知的粒子已經不止三種。首先，光作為一種粒子，即光子，以及它是電磁作用媒介這一觀念，早已形成。然後，在1929—1934短短五年間，從理論推測出來的粒子就有三個：即英國狄拉克(P.A.M. Dirac)預測的正電子，它是電子的孿生兄弟；德國的保里(Wolfgang Pauli)和意大利的費米(Enrico Fermi)推測在原子核衰變中產生的中微子；以及日本湯川秀樹預言的核作用媒介粒子，即介子。當時，尋找新粒子主要靠觀測來自太空深處的高能粒子流，即宇宙線。果然，1932年在宇宙線中就發現了正電子，

反粒子

根據狄拉克的相對性量子力學，每一種粒子都有性質完全相同，但電荷和其他量子數(例如重子數)符號相反的「反粒子」存在，正電子就是電子的反粒子。反粒子一般都以粒子符號上加橫槓表示，例如 \bar{p} 、 \bar{n} 、 $\bar{\Lambda}$ 分別是質子 p 、中子 n 、 Λ 子的反粒子。有些不帶電粒子的反粒子和它本身相同：例如光子和 π^0 的反粒子就等於本身。

五年後又發現了當時認為近似湯川所預言的介子，命名為 μ 介子。這樣，到了二次大戰前夕，已經有種種先兆說明，世界的原質並非只有電子、質子、中子、光子那麼簡單。基本理論和觀測都迫使我們面對比原子和原子核更深一層的微觀世界，即粒子的世界。

粒子物理學也許可以說是從1947年開始的。當時二次大戰剛

結束，經過曼克頓計劃洗禮的大批物理學家滿懷自信和精力，重新回到微觀世界的探索工作上來。1946—1947年間，羅倫斯(Ernest Lawrence)最新的同步加速器開始產生能量比戰前高將近100倍的高能粒子。1947年1月美國批准建立長島的布魯希文(Brookhaven)國家實驗室，標誌着由國家直接撥款大規模建造加速器和支助實驗工作的開始。同年5月，在宇宙線中發現了 π 介子，隨後證實這才是湯川預言的強作用介子。到6月，在著名的舒爾特島(Shelter Island)會議上，年輕的施溫格(Julian Schwinger)和費因曼(Richard Feynman)提出計算量子場高階效應的新微擾算法(其實，較早時日本的朝永振一郎 Sin-Itiro Tomonaga 已有相類構想)，量子電動力學，即所謂QED由是誕生。

然而，所有這些進展帶來的不是秩序，卻是令人目瞪口呆的混亂。首先， π 並非唯一的介子，不久就出現了 K 介子，以及相類於核子的 Λ 、 Σ 、 Ξ 等所謂超子(hyperon)。其次，QED式的微擾算法不能簡單地移用於這些粒子間的強作用。更要命的是：隨着加速器能量增加，新粒子源源不絕地湧現，它們的數目和種類因而爆炸性地上漲。到60年代初期，粒子的種類已經近百，它們的

性質也越來越複雜，並且大都無法從基本原理加以推算。顯然，像原子或原子核一樣，在微觀世界第三層的粒子，其本身也是具有內在結構的小天地，而非單純不可變化的「原質」。因此，在50、60年代之交，粒子的分類和內在結構就成為主要問題了。

在紛亂中找尋規律：八正道

遠在30年代，物理學家就已發現：除了電荷之外，質子和中子基本上是相同的，因此可以視為同一粒子，即核子的兩種不同狀態。數學上，這觀念可以用同位旋(isospin)這一內部(即與時空無關的)量子數來描述。因此，「核作用與電荷無關」這概念可以用它「在同位旋空間有對稱性」來界定；電磁作用之與電荷有關，則可以用其打破這一對稱來說明。

到50年代，物理學家進一步應用更多內部量子數來把粒子分類，從而有重子數 B ，奇異性 S ，以及其他數值(例如 $0, 1, 2, \dots$)同位旋 T 的出現。1961年格爾曼(Murray Gell-Mann)和尼厄曼(Yuval Ne'eman)提出來一個他們稱為「八正道」(Eightfold Way)的理論，全面應用群論，特別是特殊正么群 $SU(3)$ ，把 B, S, T 這三個內部量子數結合起來，成為可以容納當時已經發現

的大部分強作用粒子的一個結構。1964年 Ω 粒子發現了：它恰恰好嵌進這結構中的一個空位，而且量子數、質量都和預測相符。這一令人驚喜的發現表明，「八正道」的確是客觀的自然規律，也就是說：粒子周期表似乎已經找到了。

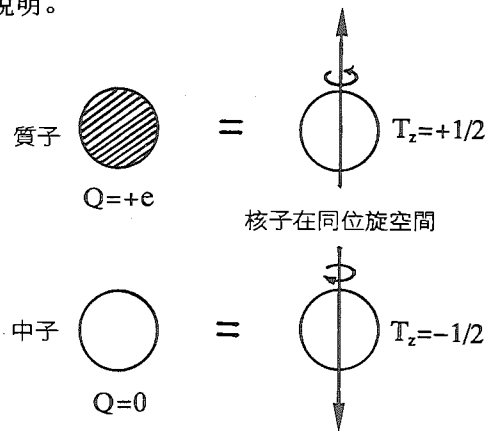


圖2 質子和中子可以視為同一粒子(核子)的兩種不同狀態，這狀態由內在量子數 T_z (同位旋的z-分量)決定。

從規律到標準模型：幽閉中的夸克

但「八正道」只是表象規律，它無可抗拒地吸引物理學家進一步解剖粒子，找尋它的內部結構——也就是說，進軍原子、原子核、粒子之下更深層的微觀世界。

格爾曼本人起步最早：1964年他已經提出，用三種更基本的，他稱之為「夸克」(quark)的基本粒子，來建構所有已觀測到的粒子。茲維格(George Zweig)也有相同想法，但沒有正式發表。夸克的構想很有吸引力，但同時也帶來很多問題，例如：夸克的電荷是否基本電荷 e 的分數？它有多少種類？它如何黏結成粒子？粒子在撞擊下是否會分散成個別夸克？等等。總的來說，基本問題是：決定夸克性質的動力方程式是甚麼？

八正道 原是佛家語，指正見、正思維、正語、正業、正命、正精進、正念、正定等八種修持成正果的途徑，相傳為釋迦牟尼在鹿野苑所親自傳授。但現在 Eightfold Way 一般譯作「八重式」。

夸克 是格爾曼從喬伊思 (James Joyce) 的名著《為芬尼根守靈》(Finnegans Wake) 中找出來的怪字，它出現的原文是「給馬克少耶三夸克」(“Three quarks for Muster Mark”)，夸克(quark)很可能是夸脫(quart)的歪音拼法，因為原書是有關酒鋪老闆的夢的。格爾曼自己說，他之選這個歪音字，是「鬧着玩，是對堂而皇之的科學詞語的反動」。

其後二十年(1964–1983)，是物理學家在焦慮、掙扎、興奮之中，以急促步伐和無限驚喜心情發現微觀世界第四層的時期。在這時期結束的時候，一個大體上足以解釋粒子世界的「標準模型」終於建立起來，這和1932年的時候，物理學家經過二十年奮鬥，終於明白了原子和原子核構造，因而可以喘一口氣的情況，有些相似。

所謂標準模型，大體上是這樣的(表一)：微觀世界最深層有兩大類基本粒子：可直接觀測的

輕子，以及不可直接觀測的夸克。輕子一共有三對，即電子 e 、 μ 粒子和1975年才發現的 τ 粒子，以及它們各自的中微子 ν_e 、 ν_μ 、 ν_τ 。輕子只有電弱作用(也就是電磁作用和弱作用，這兩者是基本相同的機制)，產生這作用的媒介是：光子、 W 粒子以及 Z 粒子。

至於夸克一共應該有對應的三對，或所謂六味(flavor)：即上(u)、下(d)；異(s)、粲(c)；還有底(b)和頂(t)等六種。它們不但有電弱作用，還有強作用，媒介是8種無質量的膠子(gluons)。可直接觀測的強作用粒子(hadrons，即強

(a) 構成物質的基本粒子

夸 克	輕 子
d (0.3 , 1975)	e (0.0005 , 1897)
u (0.3 , 1975)	ν_e (0 , 1956)
s (0.5 , 1975)	μ (0.106 , 1937)
c (1.5 , 1974/76)	ν_μ (0 , 1962)
b (5 , 1977/80)	τ (1.78 , 1975)
t (174 , 1994?)	ν_τ (0 , ?)

(b) 產生作用場的中介粒子

強作用中介	電弱作用中介
膠子 g_i (0, 1979) $i = 1, 2, \dots, 8$	γ (0 , 1905)
	W (82 , 1983)
	Z (94 , 1983)

表1 世界的原質：表中左欄(夸克和膠子)是有「顏色」而不能獨立存在的基本粒子；右欄則是「無色」的基本粒子。括弧中是粒子質量(以Gev為單位)和發現年份。「有色」粒子的質量只是粗略估計，因為沒有明確定義，發現年份也是大約的。

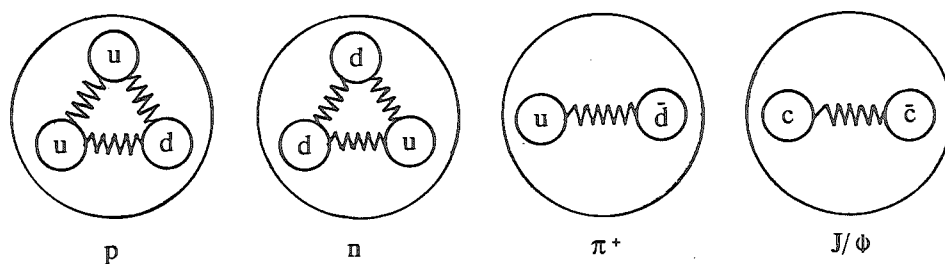


圖3 粒子是由多個夸克(u, d, \bar{d} 等)被膠子(以W代表)牢結而成。

子), 例如質子p、中子n、 π 介子、 Λ 、 Σ 等等, 都是不同的夸克(或反夸克)被膠子牢結而成, 例如 $p = uud$, $\pi^+ = u\bar{d}$, $\Lambda = uds$ 等等。強子的量子數是由它裏面夸克的量子數組成, 而強子之間的相互作用, 則可以理解為它們內部的夸克通過中介膠子而產生的作用。這和原子之間的作用, 主要是由其外層電子通過中介光子的相互作用而來, 或者原子核之間的作用, 是由其內部核子通過中介介子的作用而來, 是一樣的。

但粒子作為一個系統, 和原子、原子核有一個極大、極基本的分別: 後兩者受到猛烈撞擊, 它們的「餡」——電子、質子、中子等等, 就會飛散出來。粒子卻不然: 我們現在相信, 它無論受到如何強烈撞擊, 都只會變成其他粒子, 或者產生許多(可以成千上百)額外粒子, 但始終不會把內餡——夸克和膠子漏出來, 因為這兩者不能獨立存在。這也就是說, 微觀世界第四層有如地底的冥域, 夸克和膠子永遠禁閉其中, 它和其上三層是幽明兩界, 截然分割的。

在夸克背後：楊一米場

為甚麼夸克有這種詭譎奇特的性質, 而其他粒子, 例如電子、質子卻沒有? 夸克既然不能觀測, 又怎麼知道它確實存在? 以上第一個問題, 是夸克動力理論的問題。「八正道」和原始夸克構想都沒有包含動力理論; 這個問題是由楊一米場的理論突破解決的。

所謂楊一米場, 是遠在1954年楊振寧和當時還未正式取得博士學位的米爾斯(Robert Mills)所提出的規範場理論。它的中心思想是: 基本粒子的內部結構(例如同位旋)不能獨立於時空變化, 所以內部結構的對稱性質(例如核作用在同位旋空間有旋轉不變性)就決定相互作用的形式, 甚至決定傳遞這作用的中介場的方程式^③。這是一個比傳統場論精巧也複雜得多的理論: 它第一次把量子場的時空變化和內部結構全面地結合起來, 使兩者融合為有必然內在關係的整體。

然而, 高度非線性的楊一米場論太複雜了, 它雖然美妙, 但實際意義還未明確, 而且一時難以運算和應用。1971年, 年輕的荷蘭學者胡夫特(Gerardus 't Hooft)證明有質量的楊一米場仍然可以「重正化」, 即在微擾算法中產生的無限大項必然完全相消, 而且其效應都可以歸併於可觀測量之中, 這樣就打開了以它作為短程力理論的大門。1973年, 波列察(H.D. Politzer)、格

羅斯(David Gross)和韋爾則(Frank Wilczek)進一步發現，某類(即帶「顏色」的，見下文)楊一米粒子具有極其特別的性質：當它們互相接近時，彼此間的耦合趨於消失，因此像是相對自由運動的粒子，這是所謂漸近自由(asymptotic freedom)；但當它們互相遠離的時候，彼此間的吸引力卻反而不斷增加，以致它們絕不可能各自獨立分離出去，這就是所謂禁閉(confinement)。

這樣，在多個實驗突破的前夕，標準模型獲得了相應的理論架構。在這架構之中，所有基本粒子，即夸克和輕子，都是與楊一米場作用的費米子(fermions)；而膠子、光子、W、Z等等則是產生楊一米場的中介玻色子(bosons)粒子。換言之，強作用和電弱作用都同樣是楊一米場的表現。至於夸克和膠子之所以在短距離有漸近自由，在長距離有禁閉現象，主要是由於它們帶「顏色」(這是比喻說法，它是指夸克的費米場和膠子的楊一米場都有一個額外指數)，因此只能以組合成「無色」粒子的方式存在，而不能獨立存在。至於輕子和電弱作用的中介粒子卻本來是「無色」的，因此能獨立存在。

這樣一個令人目瞪口呆的特殊架構，雖然有道理，但並不容易讓人信服。它之能成為標準模型的基礎，主要是由於1974-1983這十年間，多個粒子的產生、衰變和反應率的測定，幾乎毫無例外都證實了從這理論衍生的量子色動力學(quantum chromodynamics, 即QCD)的計算結果。

微觀世界第四層的發現

上一節提出的第二個問題，即怎樣知道夸克存在，是實驗問題。答案是：直接觀測雖不可能，間接觀測卻可能。粒子經過猛烈撞擊之後，其中個別夸克

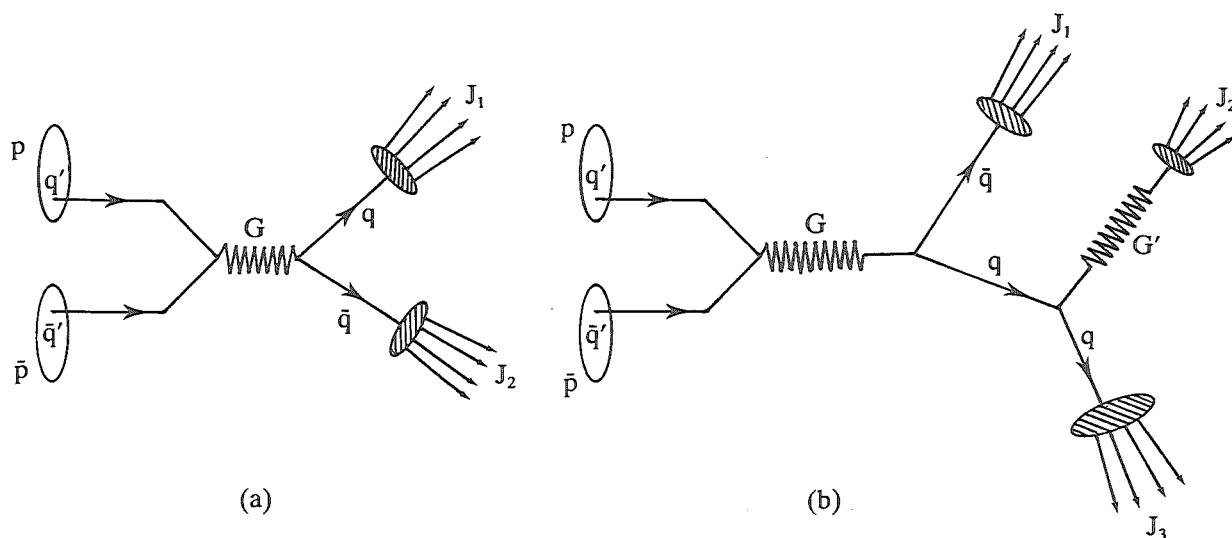


圖4 (a) 由 pp 對撞產生的夸克對 $q\bar{q}$ ，後者各自「強子化」，形成背向的兩個強子噴流 J_1 與 J_2 。(b) 上述作用產生夸克對 $q\bar{q}$ 之後，其中一個夸克因為與膠子作用，再產生新的膠子 G' (「輻至輻射」)，後者也強子化，由是形成三個噴流。

可能向不同方向飛散：至終它們會通過一系列作用（包括「強子化」hadronisation以及弱作用衰變）變成另一組可觀測的粒子。從這一組產品粒子的能量、量子數、動量分布等等，就可以回過頭來推算原來夸克的狀態。其實，可觀測的粒子中也有半衰期極短（ 10^{-22} 秒）的「諧振子」(resonances)，例如 ρ ， ω 等粒子，它們也一樣不會遺留可以測度的飛行軌跡。所以，單從觀測角度而言，夸克並非那麼特別。

1974年丁肇中和里希特(Burton Richter)循不同途徑同時發現了 J/ψ 粒子，它的高質量(3.1Gev)和相對長的半衰期(10^{-12} 秒左右)立即引起轟動，不久這就被判斷為由粲(c)和反粲(\bar{c})夸克組成的粲素原子(charmonium)，由是第一次為純由理論推測存在的粲夸克提供了證據。兩年後，由反下夸克(\bar{d})和粲夸克(c)組成的 D 粒子，也就是帶有粲量子數($C=1$)的「裸粲」粒子發現，粲夸克的存在遂不再成問題。

到70年代下半，由於下面幾個重大發現(圖4)，夸克的真實性就完全建立起來了：(1)1975年發現一對高能夸克(q)和反夸克(\bar{q})各自重組成為多個粒子時，所產生的背向「粒子噴流」(jet)；(2)1977年發現多種 Υ 粒子，證明是由底(b)和反底(\bar{b})夸克組成的系統，即「底素原子」 $b\bar{b}$ ；(3)1979年發現產生三個噴流的作用，其後證實這是由夸克的「軀至輻射」產生膠子，膠子又「強子化」造成的現象。(4)在1980—1983年間，「裸底」(即包含單獨底夸克的)粒子 B，還有電弱作用的中介粒子，即質量極高的 Z 和 W 粒子，也都終於相繼出現。至此，標準模型中幾乎所有的基本粒點都已經證實存在——只有 τ 的中微子 ν_τ (但它恐怕是極難探測的)和頂夸克 t 還未有踪影。

找尋最後的拼圖板

1984年，露比亞(Carlo Rubbia)和米爾(Simon van der Meer)因發現 W 和 Z 粒子而得了諾貝爾獎。當時，距夸克構想的提出才不過二十年，而標準模型的十幾塊拼圖板——輕子、夸克、楊—米場的各種中介玻色子，都幾乎已經找到，並且拼合起來了。整個模型所缺少的，就只剩下頂夸克這塊拼板。但它的尋找，竟足足花了十年功夫，直到幾個月前才算有了端倪。

找尋頂夸克，說來似乎簡單：第一，先要產生它；第二，須得檢測它的確存在。但實際上做起來，這兩者都是十分困難的。

甲 產生頂夸克

首先，從理論知道，高能質子 p 和反質子 \bar{p} 相撞，那麼它們所分別包含的夸克和反夸克可能通過強作用產生一對頂(t)和反頂(\bar{t})夸克(圖5a)。問題是：要多高能量的質子和反質子？如何相撞？產生的機會有多大？實驗是在芝加哥費米實驗室做的，它的同步加速器可以把質子能量提高到900Gev(質子的質量

相當於0.938Gev)。另一方面，從 Z 粒子的實際衰變情況，以及理論上頂夸克對這衰變應有的影響來推算，知道頂夸克質量 m_t 應該在150至180Gev之間。所以，質子能量不成問題。

不過，反質子卻是困難重重。首先，得加速一束質子，令它撞擊一個鎢靶，從而產生反質子。但這樣每次所得的數目很少，因此必須暫時把它們注入貯流圈，並且用極特殊的感應和調節設備，把這多束反質子壓縮成為高密度的單包束，然後全部注入主加速器，加速到和質子同樣高的能量，再令它和反向運行的質子束迎頭對撞。

這過程之困難在於貯流需時甚長，往往要十數小時乃至整日才能獲得足夠密度的反質子束。在這段時間之內，貯流圈中必須維持極高的真空(約達大氣壓 10^{-13})，環流的反質子包束更必須維持極準確的軌道和同一步伐，以避免反質子與殘餘氣體分子或者管壁碰撞而湮沒。由於包束中的反質子各以接近光速的高能運動，而它們又由於同帶正電荷而互相排斥，要長時間把它們約集在細小的包束內，困難可想而知。

然後，當質子和反質子束都準備好，都有足夠密度和能量的時候，還得極精確地把它們同時聚焦在同一位置，令它們迎頭相撞——那困難和神槍手要以子彈擊落迎面射來的子彈，恐怕不遑多讓，稍有差池，對撞的機率就會大大減低，而整個實驗也可能失敗。

當然，這些困難並非在這個實驗初次遇到：露比亞在日內瓦的歐洲原子實驗室(CERN)發現 W 和 Z 粒子，用的就是 $p\bar{p}$ 對撞方法。然而，由於頂夸克的質量比 W 和 Z 粒子大得多，產生的機會也相應減低，因此對 p 和 \bar{p} 包束的密度和準確性要求相應提高，這就牽涉到離子源的強度、能量和整個對撞機的聚焦調校等等問題，那都是需要長期耐心的工作。所以四月間費米實驗室

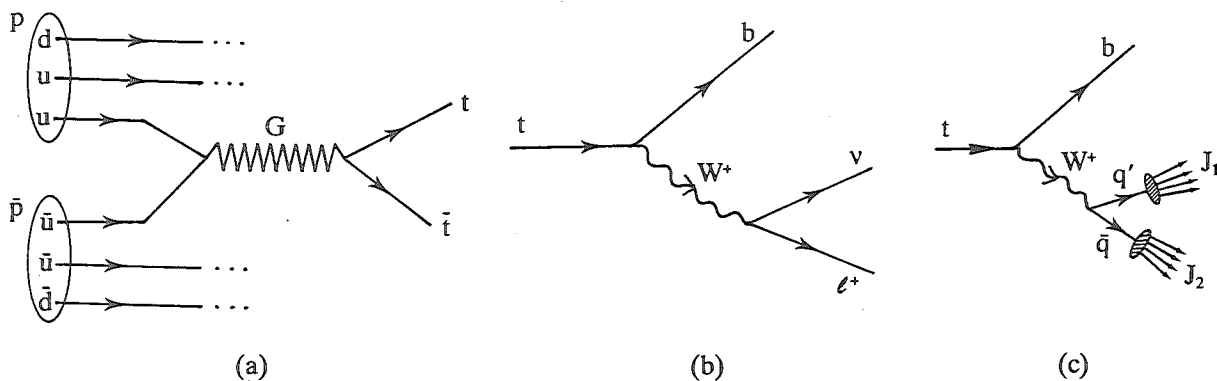


圖5 產生和探測頂夸克的有關反應

(a) 質子 p 和反質子 \bar{p} 的對撞中，上 u 和反上 \bar{u} 夸克湮沒成虛膠子 G，然後產生頂夸克對 t 和 \bar{t} 。(b) 頂夸克 t 衰變成底夸克 b 和 W^+ 粒子，後者再衰變成輕子 e^+ 和中微子 ν ，這是能清楚辨認的輕子事件。(c) 頂夸克產生的 W^+ 衰變成一對夸克 $q'\bar{q}$ ，後者各「強子化」成為兩個噴流。

倘若 t 和 \bar{t} 都以 (b) 形式衰變，就形成「雙輕子」事件；倘若 t 和 \bar{t} 一者以 (b) 的形式，一者以 (c) 的形式衰變，就形成「輕子+噴流」事件。見內文說明。

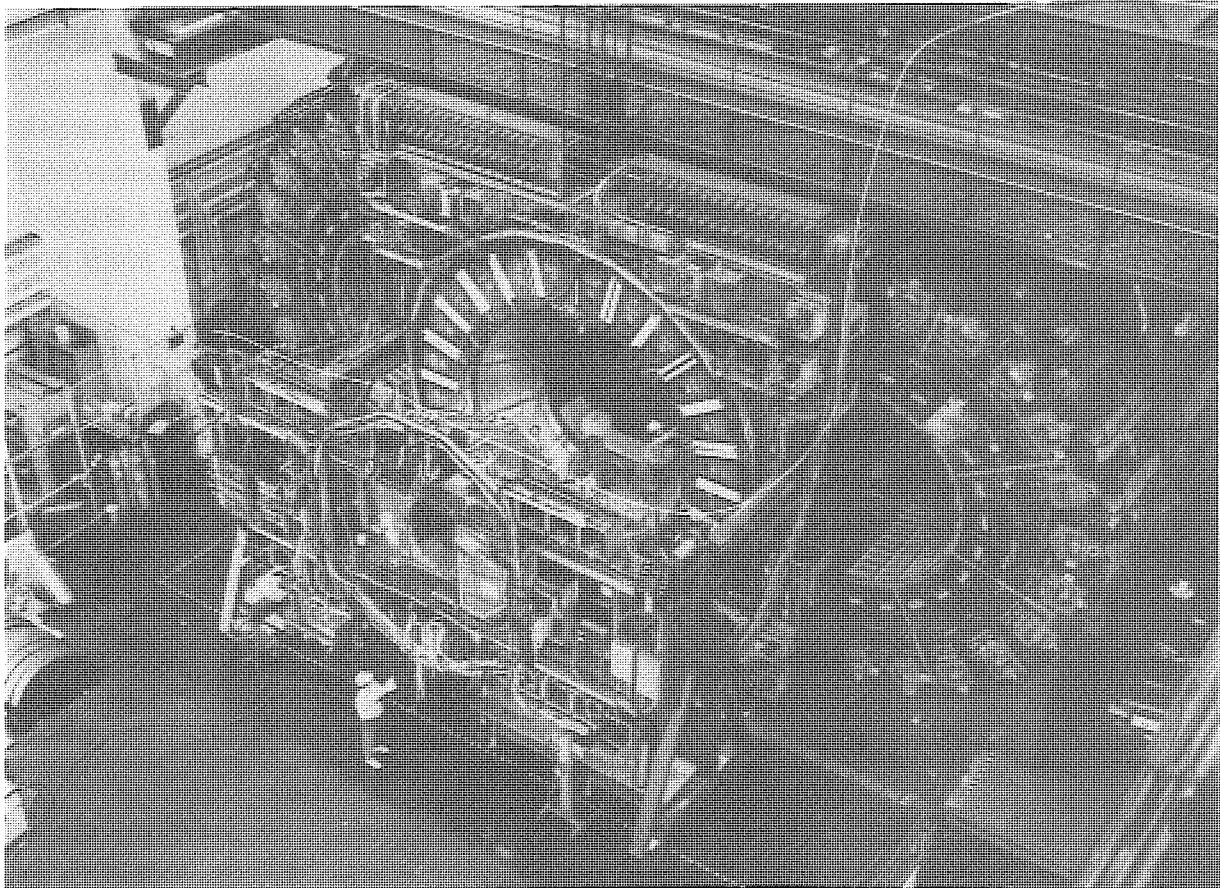
CDF實驗組所報導的實驗④-⑥本身雖然只做了大約一年(1992-1993)，但其實以前已經有過嘗試，而整個設備是在不斷改進之中的。

乙 測定頂夸克

即使 $t\bar{t}$ 對已經產生，要測定它確實存在也是十分困難的：第一， $p\bar{p}$ 相撞，所產生的除了 t 以外還有大量其他粒子，這些都是非常之複雜，只會淆混注意力的「背景噪音」。其次，頂／反頂夸克本身無從直接觀測，我們只能從它的衰變產品反過來推測它的存在。

這些產品的「訊號」有兩種：(1)最清楚明確的是「雙輕子」事件(圖5b)，即 $t\bar{t} \rightarrow W^+/W^- \rightarrow (e^+ \nu)/(e^- \bar{\nu})$ 這一弱衰變鏈。它最終產生一對電荷相反的輕子 e^+e^- ：它們可能是電子對 e^+e^- ， μ 對 $\mu^+\mu^-$ ，或者電子- μ 對 $e^+\mu^-$ ， $e^-\mu^+$ ，基本上以大致相反的方向射出，而且能量與「上輩」粒子 W^+/W^- 和 $t\bar{t}$ 有可以確切計算的關係。但這類事件只佔 $t\bar{t}$ 衰變可能性的10%左右。(2)「輕子+噴流」事件(圖5c)，它有30%可能性，可是背景噪音大得多。此外，在以上兩種情況，產品都還應該包括一對底夸克，即 b 和 \bar{b} 。測定頂夸克 t 和 \bar{t} 的出現，主要就是靠尋找底夸克產生的噴流，以及符合上述兩種條件之一的產品輕子，然後根據計算機紀錄將對撞事件重建。

圖6 費米實驗室中5,000噸重的CDF (Collider Detector Facility)探測器鳥瞰。注意圖中兩個戴白帽工作人員的比例。



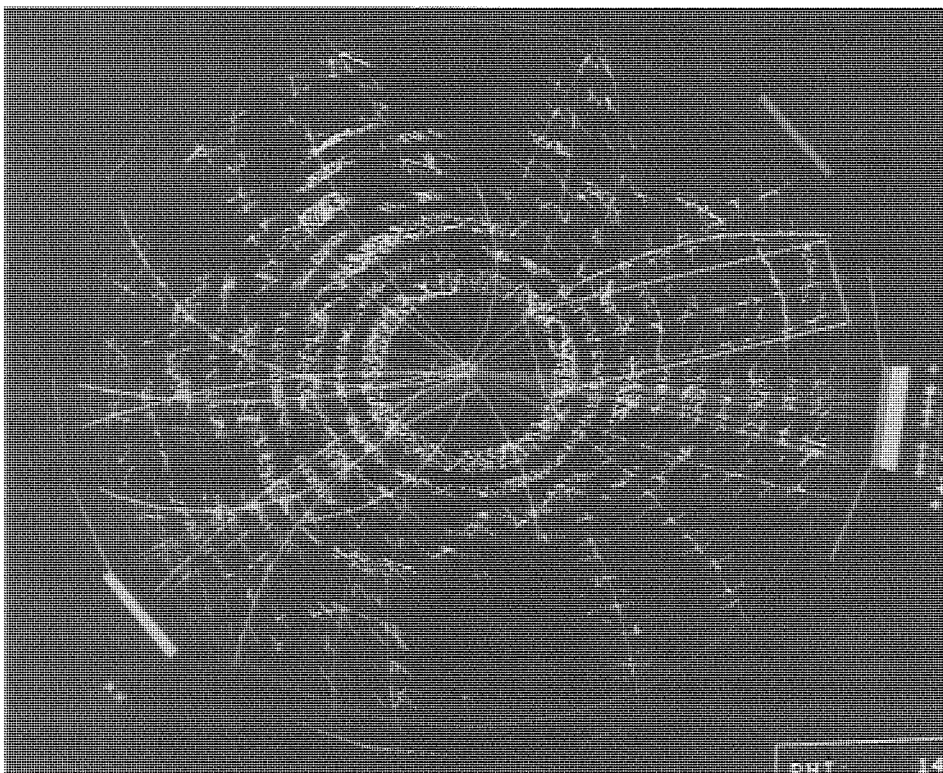


圖7 頂夸克事件在
線室中所產生的多個
粒子軌跡的電腦重構
圖。

By courtesy of Fermilab

但實驗進行時，每秒鐘質子和反質子束會有數十萬次相遇，由是產生數十萬個對撞事件，每一事件又牽涉到千百個穿透力極強的高能粒子，那麼上述訊號的偵測、分析和事件重建為何能夠進行呢？籠統的答案是：靠寬、高達20米以上，重達數千噸、裏面充滿高速電子儀器的綜合「線室」(wire chamber)探測儀(圖6)，特別是它具有高度選擇性的電子觸發機制。由此獲得的大量紀錄直接輸出到電子計算機上，然後根據預先編好的程序加以檢測分析，其結果則自動繪圖顯示。

這一個實驗總共做了十個月，產生了20億(2×10^9)個對撞事件，但判斷為可能產生頂夸克的，只有12個事件，這其中又只有兩個是比較清晰的「雙輕子」事件，其他是「輕子+噴流」事件(圖7)。這12個寶貴的事件，有沒有可能是由於其他作用巧合產生的呢？通過電腦模擬，可以知道巧合機會是0.26%。因此，目前只能說已經發現了頂夸克「存在的初步證據」，根據這12個事件，它的質量可能在 $174 \pm 10 \text{ GeV}$ 的位置(圖8)。至於它的正式「發現」仍有待證實^⑦。在目前，由於費米實驗室中另一組相同的實驗還未能印證這一結果，所以仍不免令人持保留態度。

丙 今後的展望

當然，質量的數值既已大致找到，那麼今後五、六年間這兩個實驗組集中努力，產生數百個清楚的 $t\bar{t}$ 事件，那是可以預期的。倘若這一期望落空，那

末就不免證明目前的結果畢竟是巧合，大家空歡喜一場了。

找到最後的一片拼圖版，是否就意味標準模型的完全定局呢？那倒也不然。首先，光子沒有質量，W和Z粒子質量卻將近有質子的100倍。電弱媒介粒子這巨大的質量差，也就是對稱的破缺，到底從何而來？赫斯(Peter Higgs)曾在1964年深入研究過這類問題，並且提出一個能「自然地」產生質量差的機制，關鍵是必須先有一個「赫子」，即赫斯玻色子(Higgs boson)，作為產生對稱破缺的「引子」。在目前，這是唯一能解釋W和Z粒子的巨大質量，而又保存理論完整性的機制。因此，「赫子」的找尋就成為下一個目標了：它的質量可能就在100–300GeV之間，而CERN正在計劃之中的強子對撞機(LHC)正好是搜索這一質量範圍的理想工具。

然而，對楊一米場理論而言，赫斯機制是個額外理論，它並沒有內在必然性。因此，看遠一些，科學家恐怕不會以目前的標準模型為滿足，而要追問：不同夸克的巨大質量差從何而來？基本粒子質量本身又從何而來？輕子（夸克亦然）為甚麼恰恰有三對，而不是更多或更少？夸克和輕子為甚麼不同？它們是否可以在一個大統一(grand unification)理論中視為基本上相同的事物，由是令質子能衰變成正電子？——其實，找尋質子衰變的實驗已經進行多時了。甚至，萬有引力是否也終於有一天會和所有其他作用在理論上統一起來？人類的好奇心，恐怕是不會長久停留在微觀世界第四層的吧？

無盡的探索

哥倫布發現新大陸，麥哲倫環航世界之後，人類向非洲叢林、向深海、向地底岩洞、向太空的探索一直未曾停止。科學家向物質內部、向微觀世界深層的探索也是一樣。這種探索的動力、精神有它非常之現實的一面：正如西班牙人在美洲找到了大量黃金和整座銀山，科學家也從元素、原子、原子核和量子力學找到了大自然的奧秘，獲得以非常神妙方法控制大自然的能力。

然而，並非所有探索都一定有實用價值。就「物質世界是怎樣構成」這問題而言，假如人類停留在質子、中子、電子、光子的認識階段，而從來沒有找到過 π 和K介子、超子、夸克……等等，這對今日的文明，對我們控馭自然的能力，在短期(譬如一個世紀以內)可能是沒有甚麼大關係的(當然僅只是「可能」，

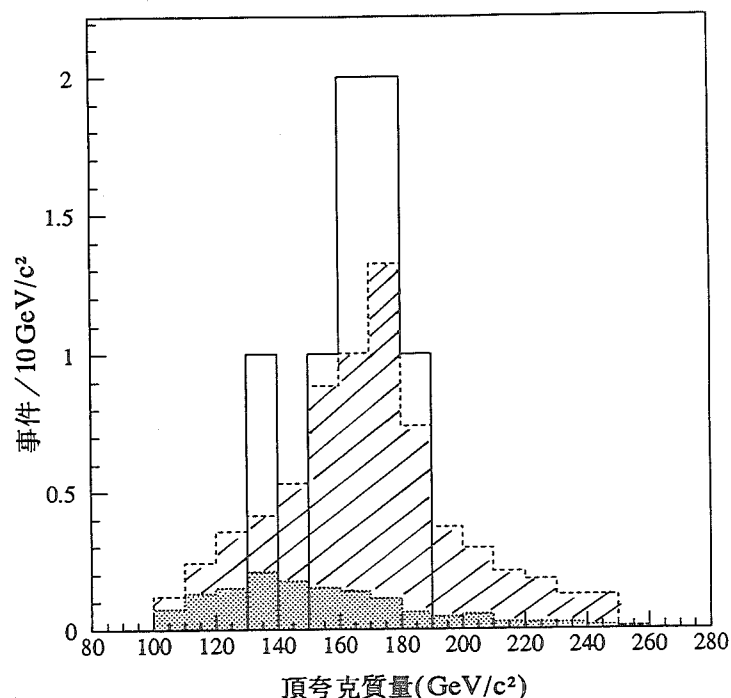


圖8 12個實測頂夸克事件的質量分佈(粗實線)，以及背景事件(陰影)和電腦模擬偶發事件加上背景事件(斜線)的分佈。

如所周知，像盧瑟福那麼偉大的物理學家也曾錯誤地斷言：企圖應用核能是妄想！^③。事實上，物理學奇妙的地方在於：在某些層次，它似乎是相當自足的：對下一層無知並不一定妨礙對上一層有十分全面的了解。

因此，頂夸克和赫子的意義也許和億萬光年以外的黑洞、中子星和類星體有相似之處：它們純粹是對人類智力、好奇心和探索精神的挑戰，是真和美的結合點。克服這挑戰，可能只是為了滿足人類精神生活的需要，至於對物質生活的影響，卻不一定重要。這也許將成為二十一世紀文明的一個新形態。

鳴謝 本文蒙香港中文大學楊振寧教授以及密支根大學姚若鵬教授過目，提出寶貴意見，並蒙姚教授協助搜集圖片及資料，謹此致謝。

參考資料與註釋

介紹基本物理學特別是粒子物理發展的書籍很多，其中最詳盡，最認真(但不免稍為艱深)的是：

① A. Pais: *Inward Bound* (New York: Oxford University Press, 1986).

寫得最俏皮輕鬆，最可讀的是：

② A. Zee: *Fearful Symmetry* (New York: MacMillan, 1986).

關於場論與對稱觀念深切關係的介紹，見：

③ 楊振寧：〈對稱和物理學〉，《二十一世紀》6, 69 (1991年8月)。

有關頂夸克的普及報導，見《二十一世紀》23, 95 (1994年6月)以及：

④ John Ellis: "On Top of the Particle World", *Nature* 370, 101 (July 1994);

⑤ *Scientific American* (July 1994), p. 14;

⑥ Faye Flam: "Taking a Gamble on the Top Quark", *Science* 264, 659 (April 1994).

至於報導頂夸克的專業論文，是：

⑦ F. Abe *et al.* (CDF Collaboration) *Phys. Rev. Lett* 73, 225 (1994); 以及FERMILAB-PUB-94/097-E.

有關基本物理學實用價值問題的討論，見：

⑧ Leon Lederman: "The Value of Fundamental Science", *Scientific American* (November 1994), p. 40.

此外，粒子物理學實驗中所發展的高科技，例如高真空和極精密的粒子束調控技術，亦可能被轉移而產生實用價值。

陳方正 原任教香港中文大學物理學系，現任中國文化研究所所長。

楊綱凱 香港中文大學物理學系講座教授。