

新粒子簡介

林文隆

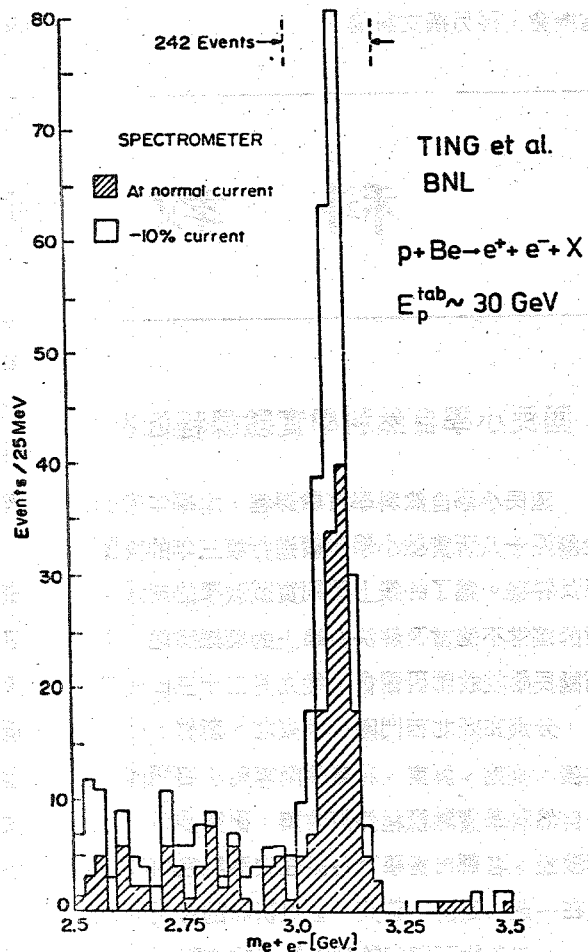
國立臺灣師範大學

丁肇中博士獲得本屆諾貝爾物理獎的消息傳來時，國人咸感振奮。早在一九七四年十一月，新粒子剛發現時，即引起高能物理學界極大的震撼。這項發現是由美國東西兩岸兩個不同的實驗小組同時宣佈的，東岸小組在布魯克海芬國家實驗室（Brookhaven National Laboratory）由丁肇中主持，西岸小組在史坦福線性加速器中心（SLAC）由雷契特（Burton Richter, Jr.）主持。他們宣佈發現新粒子後，隨即全世界的高能物理學家都把當時的研究工作暫擱一旁，嘗試著要解釋新粒子。什麼是新粒子？何以它們的發現會是如此重要？且詳細介紹於下。

一、J 粒子的產生

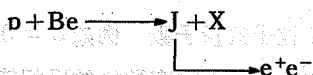
第一個新粒子是由東西兩岸兩組物理學家，應用不同的實驗技巧，各自獨立發現的。因為英文字母的 J 很像中文丁字的外形，所以東岸的科學家就取名為 J 粒子。西岸的科學家則叫它為 ψ 。丁肇中他們的實驗，J 粒子是由質子去撞擊鈹（Be）而產生的。撞擊的結果產生電子和正子（positron）及其它的東西： $p + \text{Be} \rightarrow e^+ + e^- + X$ 。實驗數據

260



圖一：丁肇中他們實驗的結果，發現在 3.1 GeV 附近有一高峰出現，由此可知有一新粒子產生。

顯示出當電子和正子對 (electron-positron pairs) 的不變質量 (invariant mass) 在 3.1 GeV 附近時，有一高峯 (peak) 出現 (見圖一) 由此可推斷撞擊的結果，先產生 J 粒子，而後 J 粒子再蛻變 (decay) 成電子和正子對。粒子的質量就是在產生高峯的地方，即 3.1 GeV 左右。此反應過程可由下式表之



這項實驗需要極為高明的實驗技巧，因為平均起來上萬次的碰撞中才有一次機會產生 J 粒子！其實在一九七四年的八月，丁肇中他們即已看到新粒子產生的跡象，為了謹慎起見，他們小心地核對，到了十一月時才發表這項發現。另一組在 SLAC 的實驗，則使用一種精心設計的機器，取名為 SPEAR，直接把電子和正子迎面對撞而產生新粒子，它和丁肇中他們所發現的是同一個粒子，不過在 SLAC 的科學家，稱呼它為 ψ 。且讓我們仍叫它做 J 粒子吧！

二、迷人的 J 粒子

根據後來比較精確的測定，J 粒子質量為 3.095 GeV，遠比一般常見的粒子為重，例如質子的質量為 0.938 GeV， π 介子更輕才 0.14 GeV，再如 ϕ 向量介子，也不過是 1.02 GeV。當然還有許多不穩定的粒子 (稱為 resonance)，它們的質量不一，從小於一個 GeV 到大於兩個 GeV 不等。目前所知粒子總數有幾百個之多。或許有人會問，在這麼多粒子中再發現一個新粒子，何以會如此重要，究竟它有何迷人之處？原因是根據已知理論推測，則質量在 3 GeV 左右的強子其寬度 (width) 當在 50 MeV 到 200 MeV 之間，而 J 粒子的寬度却出奇的窄，約為 70 KeV。換句話說，如果它是一般的介子，則其生命期 (lifetime) 應為 10^{-23} 秒，而 J 粒子却長達 10^{-20} 秒，比預期超出一千倍。這

是很不尋常的現象，無法用已知的理論解釋。因此 J 粒子發現之後，幾天之內科學家們隨即提出各種可能的解釋，例如 (1) J 粒子不是強子，即它不參與強作用。而是弱作用中所交換的媒介物 Z^0 ，通常叫做媒介向量玻子 (intermediate vector boson) (2) 它是規範場論 (gauge theory) 中的赫格斯純量粒子 (Higgs scalars) (3) 它只不過是重子 (baryon) 和反重子 (antibaryon) 的束縛態而已。 (4) 它是強子，不過由於有一種新的量子數 (quantum number) 之存在，使得它不能任意蛻變，所以寬度非常狹窄。除上述四種解釋以外，尚有更多的解釋，真是衆說紛紜，不知誰對誰錯。當時的情形，像是在山中迷了路一樣，不曉得那一條路是正確的。後來一連串的實驗，使得上述各種模型，除了第四種以外，無法自圓其說。茲將 J 粒子最重要的特性列於表一，以供參考。

質量	3.095 GeV
寬度	70 KeV
分類	強子
自旋角動量	1
宇稱	負
電荷	中性

表一：J 粒子的特性

三、媚量子數(charm)及夸克模型 (quark model)

新粒子發現一年多以來，實驗結果顯示上節所述第四種模型比較符合，即有一新量子數的存在。新量子數的引進，需把原來的 SU (3) 群增廣，其法有二：(1) 將 SU (3) 擴展為 SU (3) $\times$ SU (3)，此法所引進的新量子數，稱做顏色量子數 (color)。(2) 將 SU (3) 群放大為 SU (4) 群，則所引進來的新量子數稱為媚量子數 (charm)。本文只討論 charm 和新粒子的關係。

首先讓我們複習一下夸克模型。已知的基本粒子可歸類成三種 (1) 光子 (2) 不參與強作用的輕子

(lepton)，例如電子即是一種輕子。(3)強子。其中強子又可分類成介子(meson)和重子(baryon)兩種。一般的夸克模型假設所有的強子皆由三種夸克 u, d, s 及反夸克 $\bar{u}, \bar{d}, \bar{s}$ 所組成。 u, d, s 三種夸克即構成 $SU(3)$ 群的基本表張(fundamental representation)。每一個介子是由一個夸克和反夸克所構成，每一個重子則由三個夸克所構成。例如 π 介子的夸克成分是($u\bar{d}$)，而質子的成分是(uud)。如果媚量子數存在，則 $SU(3)$ 群需增大為 $SU(4)$ 群，因而要有第四種夸克，叫做媚夸克(charmed quark)，用 c 表示。茲將這四種夸克的量子數列於表二。

從表二可知媚夸克的 $C = 1$ ，其它三種夸克 C 為零。附帶提一下，原來的Gell-Mann and Nishijima formula 必須推廣為 $Q = I_3 + Y/2 + 2/3 C$ 。現在我們有了四種夸克(u, d, s, c)，那麼 J 粒子是什麼？我們相信它是由($c\bar{c}$)

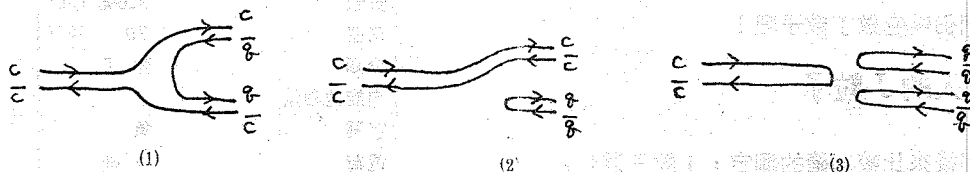
表二：夸克的量子數。有趣的是夸克的電荷不是整數。

名稱	B	Q	Y	I	I_3	C	S
u	1/3	2/3	1/3	1/2	1/2	0	0
d	1/3	-1/3	1/3	1/2	-1/2	0	0
s	1/3	-1/3	-2/3	0	0	0	-1
c	1/3	2/3	0	0	0	1	0

$c\bar{c}$)所構成的介子。根據這項假設，由表二可求得 J 粒子的量子數，例如 $B = 0, Q = 0, I = 0$ 等，這些都和實驗的結果相符。注意 $C = 0$ ！因為媚夸克的 $C = +1$ ，反媚夸克的 $C = -1$ ，所以加起來等於零。有人稱呼這種粒子為隱媚粒子(hidden charm)，即因它雖由具有charm的夸克所構成，但粒子本身則把charm隱藏起來，也就是所謂曖曖內含光吧！

四、為什麼 J 粒子的生命期特別長

假設 J 粒子確實是($c\bar{c}$)所構成的束縛態



圖二：史懷格法則的說明。 c 表媚夸克， q 則為一般夸克。

，何以它的生命期就會特別長？我們不妨考慮當 J 粒子蛻變時，其夸克成分 c 和 $\bar{c}$ 三種可能的下場(見圖二)：(1) c 和 $\bar{c}$ 分開，各自成為蛻變後所產生強子的成份。(2) c 和 $\bar{c}$ 不分開，蛻變後其中一個強子仍包含 c 和 $\bar{c}$ 。(3) c 和 $\bar{c}$ 互相消滅(annihilation)，蛻變後所形成的強子不含 c 或 $\bar{c}$ 。史懷格(Zweig)首先提出，在這三種蛻變過程中，只有第一種可以很快進行，其它兩種都很慢。物理學家稱之為史懷格法則(Zweig's rule)。讓我們看看 J 粒子如何蛻變呢？第一種蛻變產生兩個媚粒子(charmed particle)其中一個 $C = 1$ ，另一個 $C = -1$ 。一般相信媚粒子

質量大於 J 粒子質量的一半，即大於 1.6 GeV ，所以第一種蛻變不會發生。又因($c\bar{c}$)所構成的束縛態，以 J 粒子質量最小，所以第二種情形也不允許。如此說來， J 粒子蛻變時， c 和 $\bar{c}$ 逃避不了先行互相消滅的命運。根據史懷格法則，此種蛻變相當緩慢，因而 J 粒子的生命期特別長，也就是蛻變寬度很窄。

五、隱媚體粒子(charmonium)

J 粒子發現之後不到兩個禮拜，在SLAC的科學家又發現了第二個寬度仍然很窄的新粒子，取名為 ψ' ，其質量為 3.7 GeV ，寬度約為 0.5

MeV，雖比 J 粒子寬，但仍比預期在 50 MeV 到 200 MeV 之間小很多。後來發現在 4.1 GeV 附近又有一個，取名為 ψ' ，它的寬度相當大，約為 240 MeV。 ψ' 和 ψ'' 都不帶電荷，自旋角動量為 1，宇稱為負，這些性質都和 J 粒子相同。究竟 ψ' 和 ψ'' 又是什麼？既然 J 粒子是 $(c\bar{c})$ 的束縛態，就應有更多的能階存在，一般認為 ψ' 和 ψ'' 即是 J 粒子的徑向激發態 (radial excitations)。換言之，J 粒子是 c 和 $\bar{c}$ 所構成的 1S 態， ψ' 為 2S 態， ψ'' 為 3S 態 (見圖三)。讀者們不妨和氫原子的能階做一比較。

以上所說只限於 c 和 $\bar{c}$ 間沒有環繞的運動，即 $l = 0$ 的情形。若考慮 $l \neq 0$ 的情形，尚有其它狀態存在。有人假設夸克之間的作用位是線性的 (linear potential)，計算結果，發現 1P 態 ($l = 1$) 應在 1S 和 2S 之間，到了去年夏天果然發現兩個狹窄的狀態——為 3.5 GeV，一為 3.4 GeV (見圖三)。實驗上偵測到 ψ' 會蛻變成 J 而放出兩個各有固定能量的光子，這可由下式解釋：

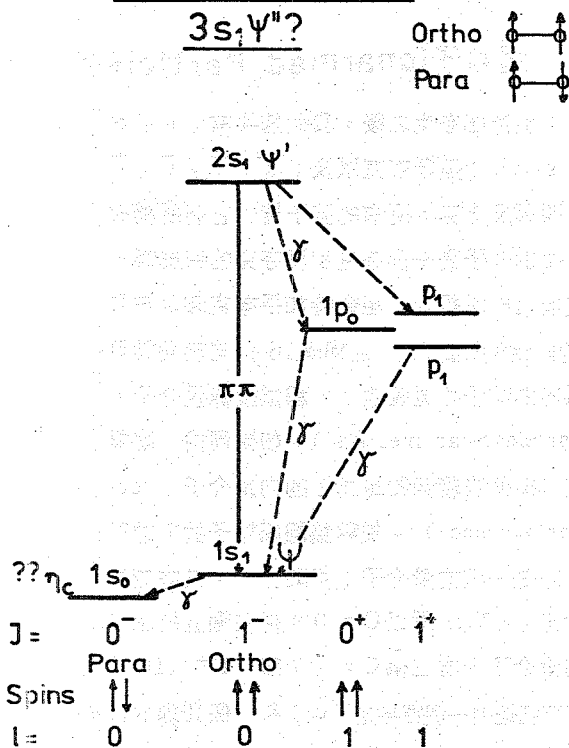
$$\begin{aligned} \psi' &\longrightarrow P_c + \gamma \\ &\quad \quad \quad \downarrow \\ &\quad \quad \quad J + \gamma \end{aligned}$$

有趣的是 c 和 $\bar{c}$ 的自旋角動量可能互相平行 (parallel)，構成自旋角動量為 1 的粒子，如 J、 ψ' 、 ψ'' 等；但也可能反方向 (antiparallel)，構成自旋角動量為 0 的粒子。在德國的加速器 (稱爲 DESY) 所做的實驗，似乎看到了以下蛻變

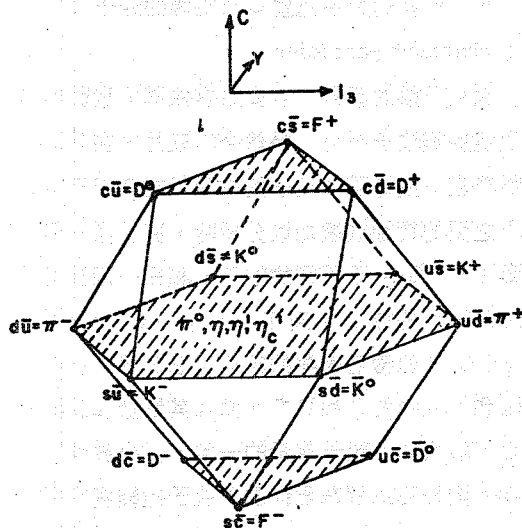
$$\begin{aligned} J &\longrightarrow X + \gamma \\ &\quad \quad \quad \downarrow \\ &\quad \quad \quad 2\gamma \end{aligned}$$

其中 X 的質量約為 2.8 GeV，很可能就是自旋角動量為 0 的 $(c\bar{c})$ ，目前還未完全肯定。 P_c 和 X 等狀態的存在，使得媚量子數的假設，獲得了有力的支持。所有這些 $(c\bar{c})$ 的束縛態 (J, ψ'

Charmonium $c\bar{c}$



圖三：由媚夸克和反媚夸克可以構成許多的束縛態，在本文中稱之為隱媚體粒子。



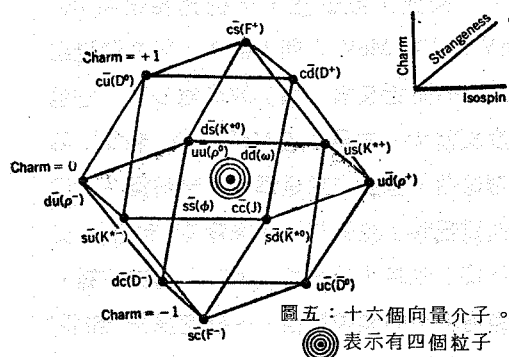
圖四：十六個擬純量介子。其中三個 $C = +1$ ，三個 $C = -1$ ，其餘 $C = 0$ 。

, ψ'' , P_c 和 X 等) 統稱為隱媚體粒子 (charmonium)。

六、媚粒子(charmed Particles)

引進媚夸克之後，我們總共有 (u, d, s, c) 四種夸克以及 ($\bar{u}$, $\bar{d}$, $\bar{s}$, $\bar{c}$) 四種反夸克，所有的強子皆由它們所構成。由於介子是一個夸克和反夸克的束縛態，就有 16 種組合。組合時如果夸克和反夸克的自旋角動量反向，即構成 16 個自旋角動量為零的粒子 (見圖四)，稱為擬純量介子 (pseudoscalar mesons)。如果同向，則構成 16 個自旋角動量為 1 的向量介子 (vector mesons)。被稱為隱媚粒子的 J 粒子，即是一個向量介子 (見圖五)，其夸克成分是 ($c\bar{c}$)，所以 $C = 0$ 。但在圖五所示 16 個向量介子中有三個 $C = 1$ ，即 (D^{*+} , D^{*0} , F^{*+}) 它們是由一個媚夸克 (c) 和一個普通的反夸克 ($\bar{u}$, $\bar{d}$, $\bar{s}$) 所構成。它們的反粒子 (D^{*-} , $\bar{D}^{*0}$, F^{*-})， $C = -1$ 。同理在擬純量介子中，也有六個 C 不為零的粒子 (D^+ , D^0 , F^+ , D^- , $\bar{D}^0$, F^-)，我們稱呼這些 C 不為零的粒子為媚粒子 (charmed particles)。

媚量子數的假設，若要站得住腳，實驗非得發現這些媚粒子不可。果然今年五月，在 SLAC 的科學家，把電子和正子的總能量在 3.9 到 4.5 GeV 之間的實驗數據加以分析時，發現了一個質量為 1.86 GeV 不帶電的粒子，和另一個質量為 2.02 GeV 的粒子。到了七月初又發現質量為 1.86 GeV 但帶有電荷的粒子。它們很可能就是圖四和圖五中的 D 和 D^* 。而且其質量和預測相符合，即大於 J 粒子質量的一半，但小於 ψ'' 的一半。剛好可以解釋為什麼 J 粒子蛻變寬度很窄，而 ψ'' 却很寬。當然囉，由於在強作用或電磁作用， C 必須守恆，在 SLAC 的實驗中，媚粒子必須成對產生，所以上述實驗可以解釋為：



$$e^+ + e^- \longrightarrow D(1.86) + D^*(2.02)$$

細心的讀者一定會問，既有媚介子，自應有媚重子 (charmed baryons) 才對。不錯，只是它們的質量比媚介子重。其實在 SLAC 發現媚介子之前，在 BNL、FNAL 及 CERN 所做的實驗，使用高能量的微中子 (neutrino) 去撞擊核子 (nucleon) 時，似乎有質量大於 2 GeV 的粒子產生，被認為是媚粒子。到了今年八月更傳出在 FNAL 的實驗，發現用光子 (photon) 去撞擊核子時產生了質量約為 2.26 GeV 的媚重子的消息。

由以上所述，可知丁肇中發現 J 粒子後不到兩年的時間，世界各加速器中心一連串的實驗，發現了許多個質量很重的新粒子。它們似乎和媚量子數的解釋大體符合，果真如此，我們可以期待著在最近的將來，有關更多新粒子的消息。其實早在 1964 年，理論上即根據輕子和強子的對稱性，提出 SU(4) 的假設。至 1970 年，該假設和規範場論很成功地解釋了 $K_L \rightarrow \mu^+ \mu^-$ 的蛻變率何以很小時，即獲得相當有力的支持。這假設果真能成立的話，更加強了夸克模型的地位，即強子不是最基本的東西，它們是由少數幾種夸克所組成。我們可以說新粒子的發現使我們對物質的基本結構有了更深一層的了解。

(有關新粒子的著作，兩年來成千上萬，不勝列舉，初學者可參考

S. Glashow, Scientific American, 233, No. 4, 38 (1975))