

物質的終極結構 - 丁肇中教授的貢獻

朱明中 香港中文大學物理系

在物質世界千變萬化的表象背後，是否存在不變的基本規律？各種各樣的物質又是否有共通之處？物質的終極結構又究竟是甚麼呢？自古以來，人類不斷追索這系列問題的答案。例如佛家與亞里士多德(Aristotle)，都相信所有物質皆由氣、火、水、土（即四大）和合而成¹。古希臘哲學家德謨克利特(Democritus)²提出原子論(atomic theory)，認為萬物由不可分割的原子組成。柏拉圖(Plato)則相信終極的「原子」是純意念、非物質的³。當然中國古代亦有陰陽五行等學說。及至近代，探索物質的結構及規律，經已成為物理學的中心議題之一；而在上世紀取得的突破性發展，對現代科技文化影響深遠，更可說是人類文明的重要成就。丁肇中教授是其中傑出的探索者之一，他的貢獻—**粲夸克**(或譯魅夸克 charm quark)的發現⁴—在粒子物理學裡佔有承先啟後的重要地位。

究竟粲夸克是甚麼？它又有何重要呢？讓我們回到原子論說起。沒錯，萬物皆由原子組成。但現代科學所講的原子，並不同德謨克利特的「原子」。科學家很久以前便發現，原子雖然只有納米大小（一納米為一千萬份之一公分），卻仍可以分拆為**電子**(electron)及**原子核**(atomic nucleus)兩部份。

第一個「看見」原子結構的人，是**盧瑟福**(Rutherford)。他於約一百年前所做的一系列碰撞實驗，既帶來原子物理上突破性的發現，亦樹立了現代實驗粒子物理的一個典範。盧瑟福以高速度的 α 粒子(即氦核子)撞擊一片很薄的金箔。如他所料，大部份的 α 粒子如入無人之境，穿過金箔。但是竟然仍有一小部份的 α 粒子，在金箔裡撞上非常堅固的東西，倒射回來。如盧瑟福所言，「……這就像用十五吋砲彈轟擊一張衛生紙，卻竟被反彈回來！」⁵ 盧瑟福因此推測原子內大部份物質皆集中於很細小的空間內，稱為**原子核**。原子核的直徑只有原子直徑的十萬分之一。而在原子核以外的空間則由**電子**佔據。這個今天連中學生也懂得的原子模型可說是大致正確的⁶。

既然原子可分割，它便不是最基本的「原子」了。物理學家當然要追問，這些次

¹ 佛學中，除了四大之外，還有色、味、香、觸等四觸合成萬物。佛學大師世親提出著名的論點認為不可能有不可分割的原子，可參閱達賴喇嘛所著，「相對世界的美麗」(天下文化，2003)。

² <http://plato.stanford.edu/entries/democritus/>

³ W. Heisenberg, 'The Debate between Plato and Democritus', in 'Quantum Questions', ed. Ken Wilber, (Shambhala, Boston, 2001). <http://plato.stanford.edu/entries/atomism-ancient/>

⁴ http://www-zeus.physik.uni-bonn.de/hilger/QuarkPhys/2.4_Charm_Quark_-_The_Discovery_Story.pdf

⁵ Lord Rutherford, in "The Development of the Theory of Atomic Structure", *Background to Modern Science* (Macmillan Company, New York, 1940).

⁶ 關於盧瑟福實驗，可參閱<http://www.physics.rutgers.edu/meis/Rutherford.htm>,

<http://library.thinkquest.org/19662/low/eng/exp-rutherford.html>,或拙作「原子內的世界」

http://resources.ed.gov.hk/physics/articleIE/insideatom/insideatom_c.htm.

原子粒子(subatomic particles)－電子及原子核－是否還有結構？盧瑟福重施故技，用更高能量的 α 粒子撞擊原子核，發現可以釋放出一種帶正電荷的粒子，稱為質子(proton)，證明原子核亦有結構。他的學生查德威(Chadwick)亦以類似實驗發現原子核內另一種不帶電荷的粒子－中子(neutron)⁷。中子的發現，直接引發原子核分裂的研究⁸，催生了原子彈及核能技術⁹；這不單是科學的突破，同時亦改變了世界。

物理學家當然不會就此罷休，而是要進一步追問質子及中子(統稱為核粒子)的「內涵」。核粒子直徑只約為百萬分之一納米，要把它爆破，需要用更高能量的「子彈」。大約四十年前，以費德曼(Friedman)、肯道(Kendall)及泰勒(Taylor)為首的研究組利用史丹福線性加速器(圖一)，以能量約為一百億電子伏特的電子轟擊核粒子¹⁰。當時很多物理學家都以為電子應穿透核粒子，毫無障礙。然而結果卻出人意料：縱使是最高能量的電子仍有小部份被大角度反射，情形就跟盧瑟福的實驗一樣。費曼(Feynman)教授很快便得出結論：核粒子內有極細小而堅硬的粒子！隨後的實驗證明，這些粒子的性質與吉曼(Gell-Mann)教授及他的學生滋威(Zweig)於一九六四年提出的夸克(quark)¹¹相若，因此我們相信核粒子是由夸克所組成。



圖一 史丹福線性粒子加速器。Photo Courtesy Stanford Linear Accelerator Center.

⁷ <http://online.cctt.org/physicslab/content/PhyAPB/lessonnotes/dualnature/Chadwick.asp> ,

<http://www.chemcases.com/nuclear/nc-01.htm>

⁸ <http://library.thinkquest.org/17940/texts/fission/fission.html>

⁹ <http://www.atomicarchive.com/>

¹⁰ 三人因這實驗贏得一九九零年的諾貝爾物理學獎。

<http://nobelprize.org/physics/laureates/1990/index.html>

¹¹ <http://nobelprize.org/physics/laureates/1969/>, <http://pdg.lbl.gov/1999/quarkmodrpp.pdf>, http://www.ph.rhul.ac.uk/course_materials/PH352/chapter5.pdf

夸克的發現，有着劃時代的意義。當時物理學家知道的次原子粒子，除了電子、中子及質子外，還有上百種只維持極短暫壽命的粒子，故此很難從這一大堆粒子中整理出頭緒來。吉曼教授指出，這些粒子其實只是幾種夸克的不同組合而已。他的夸克模型，成功地解釋了眾多的次原子粒子現象，把對物質結構的理解，推向更深層次。然而問題又來了，自然界中究竟存在多少種夸克？

根據吉曼的夸克模型，質子和中子皆由兩種夸克組成，稱為上(up)、下(down)夸克。質子是兩上一下，而中子則剛好相反，兩下一上。另外也有一些粒子如 K 粒子，包含第三種夸克—奇異(strange)夸克。在上世紀七十年代以前知道的粒子，似乎大部份都可以用這三種夸克的組合來解釋。但到了後來，夸克模型逐漸顯得不足以解釋新的實驗數據。其中最著名的是一粒稱為 K^0_L 粒子的衰變，用夸克模型計算的半衰期比實驗測度到的要長得多。格雷修(Glashow)、李爾普羅斯(Iliopoulos)和邁阿寧(Maiani)於一九七零年指出需要第四種夸克¹²，才可解釋理論與實驗間的差異，同時亦可使粒子物理學的標準模型¹³更趨完整，他們稱這種新夸克為粲，而粲夸克亦因而成為基本粒子理論模型中關鍵的一環。但新夸克的存在，須有直接證據的支持！

上世紀七十年代初，第一顆粲夸克組成的粒子由丁肇中教授及雷克特(Richter)教授分別帶領的研究小組在差不多同時獨立地發現，稱為 J/Ψ ，而二人亦因此分享一九七六年的諾貝爾物理學獎¹⁴。 J/Ψ 的質量比質子還要大三倍多，但壽命卻非常短暫，只有約一萬億億份之一秒！要找尋這樣一種粒子當然是非常困難的。丁肇中教授的方法是利用美國布克海文國家實驗室(Brookhaven National Laboratory)加速器¹⁵ (圖二)的高能量(幾百億電子伏特)質子撞擊鈹核子，過程中一部份能量可能以愛因斯坦著名的質能互換方程式($E = mc^2$)轉變成粒子，若其中製造出 J/Ψ ，它很快便衰變，可成為一粒電子及它的反粒子¹⁶ (正電子)，而這對電子/正電子便會瓜分 J/Ψ 的能量 (圖三)，所以在相應 J/Ψ 質量的能量便可觀測到大量的電子/正電子對了 (圖四)。

¹² <http://particleadventure.org/particleadventure/other/history/smt.html>

¹³ <http://particleadventure.org/particleadventure/>, <http://www.bbc.co.uk/dna/h2g2/A666173>

¹⁴ <http://nobelprize.org/physics/laureates/1976/index.html>

¹⁵ http://www.bnl.gov/bnlweb/history/nobel/nobel_76.asp

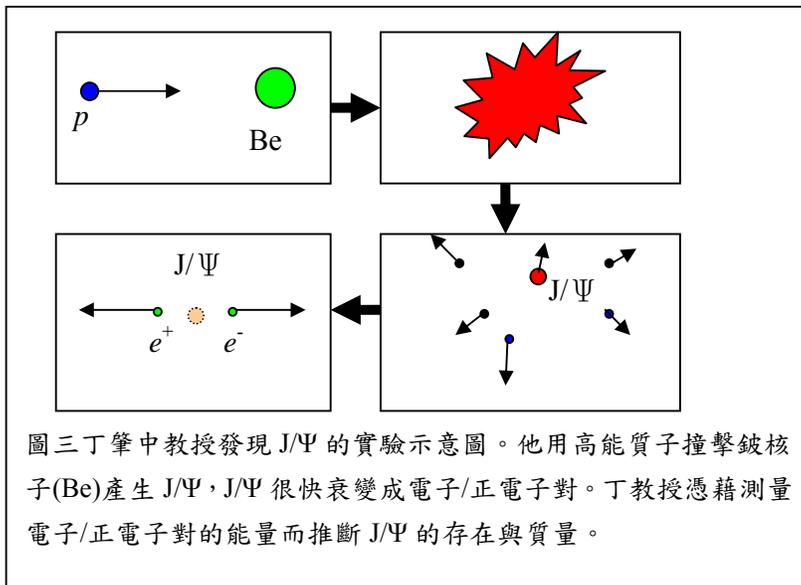
¹⁶ 物理學家發現，自然界每一種粒子，都有相對應的反粒子。反粒子統稱為反物質(anti-matter)，它們的性質和物質幾乎完全一樣，除了有一些物理量剛好相反。例如電子帶負電荷，它的反粒子卻帶正電荷，質量完全相同，所以稱為正電子(positron)。詳情可參閱

<http://livefromcern.web.cern.ch/livefromcern/antimatter/>,

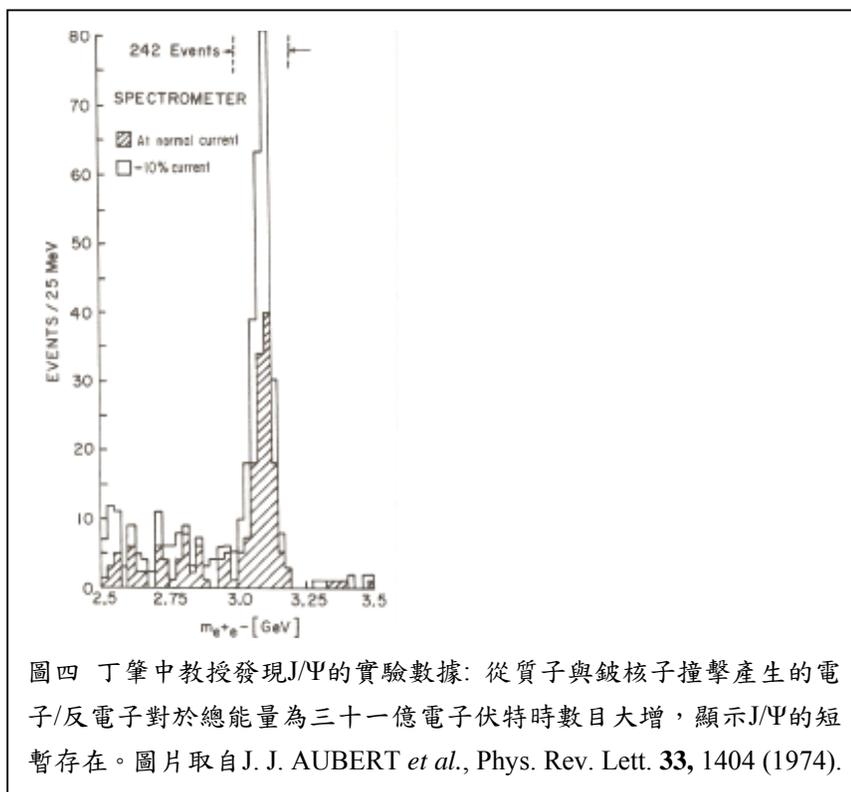
<http://www.phy.ntnu.edu.tw/demolab/particleadventure/frameless/antimatter.html>



圖二 美國布克海文國家實驗室(Brookhaven National Laboratory)AGS 加速器。照片由布克海文國家實驗室提供。



圖三丁肇中教授發現 J/ψ 的實驗示意圖。他用高能質子撞擊鉍核子(Be)產生 J/ψ ， J/ψ 很快衰變成電子/正電子對。丁教授憑藉測量電子/正電子對的能量而推斷 J/ψ 的存在與質量。



黎夸克的發現揭開了粒子物理新的一頁。物理學家隨後亦引入第五及第六種夸克（底 bottom 及頂 top）¹⁷，並確立粒子物理學的標準模型，這模型至今天仍然非常成功。我在唸大學時曾聽曾聽一位本身亦是粒子物理學界很有名的教授說，丁肇中教授本來很早（比雷克特還早）便已發現 J/Ψ 粒子，但因他做研究極之謹慎，不斷反覆查證才遲遲未發表結果。

最後，讓我們回到文章開首的問題：物質的終極結構是甚麼？今天的答案是：萬物基本上由電子及夸克組成。直至今日，科學家仍未找到夸克和電子有任何內部結構的跡象。因此相信它們和 **中微子**(neutrino)¹⁸及傳遞四種基本力的粒子（如**光子** photon）都是基本粒子，相當於德謨克利特的「原子」。然而，物理學家都相信這不過是個臨時的答案。我們對於這些「原子」，仍有很多疑問待解，例如為甚麼自然界沒有自由的夸克¹⁹，粒子的質量從何而來等。我自己及一班中大物理系的同學，聯同香港大學物理系的幾位師生，亦參加了一個國際合作的中微子研究計劃²⁰。探索物質的本質仍將繼續是我們努力不懈的研究方向。

¹⁷ http://www.fnal.gov/pub/inquiring/physics/discoveries/top_quark.html

¹⁸ <http://cupp oulu.fi/neutrino/>. 關於中微子的天文物理，請參閱拙作「中微子天文學」

<http://www.phy.cuhk.edu.hk/gee/mctalks/neutrinoast.pdf>

<http://www.phy.cuhk.edu.hk/gee/mctalks/neutrino ppt>

¹⁹ <http://www.phy.cuhk.edu.hk/gee/mctalks/quark-3.ppt>

²⁰ <http://theta13.phy.cuhk.edu.hk/>