

天下文化

Science Culture

超對稱

當今物理學界的超級任務

科學大師系列 (16)

SUPERSYMMETRY

Unveiling the Ultimate Laws of Nature

By Gordon Kane

By Gordon Kane

郭兆林、周念榮 譯

郭兆林、周念榮 譯

科學人文 ⑩

Science Culture

超對稱

科學大師系列 (16)

Supersymmetry

Unveiling the Ultimate Laws of Nature

by Gordon Kane

凱恩／著 郭兆林、周念榮／譯

「科學大師系列」總序

激發出「半」個愛因斯坦

高希均

在人類的歷史長河中，不論中國、希臘、埃及、印度，都曾經在早期有過許多珍貴的科學貢獻，使科學成為他們文化中不可分割的部分。可惜，由於歷史的擲掄，及各種錯綜複雜的因素，科學在中國並沒有真正生根。

我們的祖先也曾經有過三件偉大的發明：指南針、印刷術、火藥。可惜的是，指南針沒有繼續發展成全球衛星定位，印刷術沒有發展出電腦，火藥沒有蛻變成登月火箭。

一九一九年的五四運動中，中國的知識份子極有遠見地提出了「賽先生」與「德先生」。又極其可惜的是：在稍後四分之三的世紀中，「科學」與「民主」仍然沒有能夠在適當的環境中茁壯。

台灣提供了一個前所未有的安定環境，使我們的年輕一代能夠很幸運地接受較為完整的教育。一個完整的教育，必須要以通才教育為核心。通才教育必須要同時注意科學與人文。重科學，輕人文，似乎少了「氣質」；重人文，輕科學，似乎少了「理性」。中國的年輕一代是應當兼有氣質與理性的。

就科學而言，我們——特別是這一代的中國人——是否真了解科學文化的真諦？我們的社會是否真的重視科學？科學家？以及求是、求真的科學精神？要在世界上揚眉吐氣的中國人，都希望西方的科技能在中國的土壤上生根發展。可是，要做到這點，恐怕大家首先必須要對科學文化有所了解，有所執著，有所鼓吹。

這就是為什麼「天下文化出版公司」自九〇年代起，決心開拓出「科學人文」這個系列（最初的六種八冊稱為「全方位思考系列」）。我們希望讓大家認識到，科學與人文是文化中最重要、最重要的兩根支柱。這系列從第一本的《混沌》到《別鬧了，費曼先生》、《基因聖戰》、《複雜》，以及《台灣蛇毒傳奇》的出版，已經在中文世界中引起了極大的迴響。

現在，透過全球知名的科普出版人布羅克曼（John Brockman），我們更邀集了二十二位以上當代科學大師，分別就本身最專精、最負盛名的學問，以深入淺出的方式，寫出人人可以親近的書冊。每一本書的最大吸引力，就是讓普羅大眾了解在這瞬息萬變的時代中，這門學問的最新發展及研究近況。讀完這些書，我們不一定會變成科學家，但我們一定已不再是科學文盲了！

在當前推廣通識教育的過程中，適當教材的缺乏是一個很嚴重的瓶頸。天下文化所出版的「科學人文系列」，特別是包含其中的「科學大師系列」，或可稍稍填補科學通識教材的缺乏。正如本系列總策畫林和教授所說：「這套書應該成為通識教育的教材，也應該成為二十一世紀人人必讀的科學知識系列。」

如果由於這一系列的推廣，能在我們莘莘學子及廣大讀者群之中激發出「半」個愛因斯坦、多幾位像楊振寧和李遠哲的科學家，那麼這將是我們最豐碩的收穫了。

作者簡介

凱恩 (Gordon Kane)

美國密西根大學物理學家，美國物理學會會士，發表過上百篇關於粒子理論的學術論文，是國際知名的粒子物理學者。

凱恩也是頗受歡迎的通俗科學演講人，著有《粒子花園》(*The Particle Garden*)。

譯者簡介

郭兆林

台灣大學物理系、物理研究所畢業，現就讀美國加州大學柏克萊分校天文物理研究所博士班。譯有《固、特、異的軟物質》（與周念榮合譯，天下文化出版）。

周念榮

台灣大學法律系、台灣大學新聞研究所畢業，曾任《聯合報》編輯。

超對稱

● 目錄

總序 激發出半個愛因斯坦

高希均 2

序 當今物理學界的超級任務

維敦 10

前言 弦論預測大自然是超對稱的

凱恩 17

第一章 科學法門

23

我們把理論看成是一道方程式或幾道方程式，

另一方面，我們用方程式的解來描述世界，兩者構成所謂的科學。

第二章 標準模型

45

過去的研究已經建構了粒子物理學標準模型，它能完整描述建構世界的基本粒子和作用力。

第三章 有效理論

83

超對稱理論也是有效理論，它可說是能將我們從標準模型帶領至基始理論（約一蒲郎克長度）的倒數第二個有效理論。

第四章 超對稱

103

超對稱並不是為了解決理論矛盾或實驗難題而量身訂作的，但它居然做到了。

第五章 搜尋超伴子

131

粒子偵測器就像是全世界最大的電視遊樂器，能找到新物理的人便「贏」得遊戲。

第六章

宇宙的質量

169

將標準模型粒子的總質量相加，也不足以解釋宇宙中的所有質量，而最輕超伴子卻可以。

第七章

希格斯物理

185

希格斯玻色子是完全不同於已知粒子的全新粒子。希格斯物理是目前為止解決質量問題的唯一天途徑。

第八章

超對稱面臨的挑戰

199

超對稱理論只是有效理論，而非基始理論，一定有它不能解決的問題。

第九章

超對稱、弦論及基始理論

217

即使弦論是正確的，它仍然不是基始理論。

第十章

真能瞭解宇宙起源與自然律嗎？

227

科學就是這樣，在抵達目標前我們不會知道那裡有什麼，唯有成功時，我們才會確定問題的答案。

附錄

245

附錄 A

標準模型下的希格斯機制

附錄 B

超對稱下的希格斯機制

附錄 C

超荷子與超中性子

附錄 D

額外維度？大尺度額外維度？

建議書目

譯後記

郭兆林

序

當今物理學界的超級任務

維敦①

站在二十世紀末回顧，這百年來物理學的進展真是驚人。二十世紀初最具啓發性的理論，首推相對論與量子力學：從愛因斯坦的狹義相對論中，我們認識到快速運動物體的特別行爲，在更驚人的廣義相對論中，我們學會以「物質造成時空曲率」重新詮釋重力。至於量子力學，則讓我們領會到一項事實：原子世界之迷人，比小說更精采呢！

量子場論（quantum field theory）將狹義相對論和量子力學合併，在一九三〇年宇宙射線②的實驗中，證實了反物質（antimatter）的存在，這也成為量子場論最著名的預測。不過，量子場論相當艱深不容易了解，連專家也不例外。一代又一代的頂尖物理學家，青絲成白髮，就只是爲了搞懂量子場論。

二十世紀下半葉則是實驗的黃金時代，充滿令人驚訝的發現。例如怪異的粒子、左

右的對稱破缺、過去未來之間的對稱破缺，以及微子③、夸克④等粒子的問世。理論物理學家匯整這些發現，在量子場論的架構下建立粒子物理學⑤標準模型⑥，藉以整合基本物理；在標準模型的架構下，已經可以同時描述電、磁、弱作用力（造成原子核貝他衰變）、以及核力。

這趟發現之旅是否已經航行至終點？二十一世紀能否再讓我們驚嘆連連？未來的發現能不能媲美過去種種呢？我相信，今日留待解答的問題如同過去一樣，精采可期。未來如果我們繼續保持航道，一定可以找到一些答案的。

例如過去幾個月以來，新聞媒體連番報導令人振奮的消息：在目前及將來測試微子奇特性質的實驗中，可能證實這些由費米⑦所提出的「微小中性粒子」質量雖然極小，但並非為零。天文學家也揭開嶄新且具挑戰性的一頁：廣義相對論可能需要用上愛因斯坦的宇宙常數⑧來加以修正。尋找暗物質⑨的各種新奇又具創意的研究，將可探索宇宙中看不見的物質。在接下來幾年，人造衛星將偵測大霹靂⑩之後殘留輻射的起伏，極可能挑戰我們對宇宙大尺度結構的認識。

但在這些研究當中，找尋超對稱⑪則是超級任務。因為，在粒子物理學標準模型下未能解決的問題，理論物理學家寄望超對稱理論能加以突破。例如，標準模型並未解釋粒子質量的問題，如果自然界中粒子質量真如標準模型可能容許之大，則宇宙將會面目

全非，根本不可能有恆星、行星、或是人類存在，因為只要是一丁點基本粒子齊聚，都會崩塌形成黑洞^⑫；現代物理看似深奧的現象，如時空曲率、黑洞和量子重力等，都變得在日常生活裡俯拾可見，只不過在這種狀況下，根本就不會有所謂日常生活了。

重新改造愛因斯坦的觀念

超對稱（如果正確）屬於量子力學之時空建構。在日常生活裡，我們向來以古典概念的「數字」表示時間和空間，例如「現在是三點鐘，這裡是海拔兩百公尺高」等，雖然二十世紀量子力學的發明，幾乎全盤改變了物理學，但是基本上我們對於時間和空間的認知絲毫未受影響。

如果自然界具有超對稱性，時間與空間便具有量子維度（quantum dimension），已非傳統數字所能測量表示。若能利用加速器^⑬製造新的基本粒子，證明其行為受超對稱定律控制，便能彰顯量子維度的存在。目前依實驗數據推測，製造新粒子所需能量只比現有加速器所能提供的稍高一些，如果一切如我們預期，則超對稱很可能在下一代粒子加速器中就能夠現身——有可能是在美國伊利諾州巴達維亞（Batavia）的費米實驗室，也有可能是在瑞士日內瓦的歐洲粒子物理研究中心（CERN）。

當愛因斯坦在一九〇五年提出狹義相對論、一九一五年提出廣義相對論時，量子力

學才初具雛型，那時愛因斯坦假定時空可用傳統數字來測量。雖然他對時空的概念至今仍然適用，但是超對稱的發現將會以量子力學重新改造愛因斯坦的觀念。

超對稱的發現將會樹立物理學界重要的里程碑，它與一些企圖心更大的想法關係密切，令人不禁拭目以待。例如在弦論^①的架構下，理論物理學已經能初步統一重力和其他基本粒子的作用力，而超對稱是弦論的基本要件，未來若發現超對稱，勢必使弦論的研究獲得一大助益。

找尋超對稱是當今物理學界的一齣重頭戲，衷心希望本書能夠引介更多讀者恭逢其盛！

——一九九九年六月三十日於美國紐澤西州普林斯頓

【注釋】

①編注：本文作者維敦（Edward Witten, 1951-）是美國數理物理學家，一九八五年國際理論物理學中心狄拉克獎得主，一九九〇年菲爾茲獎得主。菲爾茲獎（Fields Medal）相當於數學界的諾貝爾獎，每四年頒發一次。

②原注：宇宙射線（cosmic rays）是指在外太空中穿梭的質子及其他粒子，它們據信是從恆星（特別是超新星）噴射出來的。宇宙射線自各個方向轟擊地球，與大氣中的其他原子核碰撞，產生次級粒子產物，如電子、鈾子等。在每一秒當中，有許許多多的宇宙射線粒子穿過我們的身體，它們也會被偵測器所捕獲而與新粒子事件混淆。因此實驗設施必須能夠隔絕宇宙射線，或是能夠偵測出宇宙射線，使困擾不致產生。

③編注：微子（neutrino）亦稱微中子，為電中性的穩定粒子，質量很小（亦可能等於零），不帶電荷，但具有內秉自旋、動量和能量。

④原注：夸克（quark），物質的基本粒子。夸克與電子類似，不過它帶有強荷，因此參與了電子不參與的強交互作用，使夸克結合成為質子與中子。夸克共有上（up）、下（down）、魅（charm）、奇異（strange）、頂（top）、底（bottom）六種。

⑤原注：粒子物理學（particle physics）是研究粒子行為與性質的物理學分支。廣義的說，粒子物理學不僅要描述粒子之間的交互作用，並且要知道為何自然律必須如此，宇宙如何從這些自然律中誕生……等問題。

⑥原注：標準模型（Standard Model）是現存用以描述夸克、輕子以及它們的交互作用的理論。這是

個相當成功的理論，名稱是在發展期間所取，但大家在理論漸趨完備之際卻改不了口，仍稱之為「模型」。標準模型是自然界的數學理論中最完備者，而且已經通過許多實驗檢驗。

⑦編注：費米（Enrico Fermi, 1901-1954），原籍義大利的美國物理學家，用中子輻射的方法產生新的放射性元素，以及在這研究發現慢中子引起的核反應，一九三八年諾貝爾物理獎得主。費米也是一九四二年十二月在芝加哥大學進行的世上第一次受監控核反應實驗的負責人。

⑧原注：宇宙常數（cosmological constant）是描述宇宙的方程式中，可能會出現的一項。如果宇宙常數不為零，代表宇宙間存在一種力使擴張速度漸漸增加。宇宙常數的困擾有兩方面，首先，宇宙常數的觀測值遠遠小於估計值；其次，近來觀測顯示其值並非為零，因此有必要解釋為何會有這樣特別的非零值。

⑨原注：暗物質（dark matter），由標準模型推廣而來的粒子物理理論所預測的新穩定粒子。這種粒子可成為宇宙物質的一大部分。移動緩慢的稱為冷暗物質，運動速度快的稱為熱暗物質。由星系運動、星系的形成以及其他種種宇宙學研究，都顯示這樣的暗物質是存在的。

⑩原注：大霹靂（Big Bang）學說是當今宇宙學關於宇宙如何創生的主流學說，許多強烈的證據顯示，我們的宇宙是由一小團向外噴發的粒子氣體擴張而來。換句話說，宇宙起源於一個溫度無限高、密度無限大的「熱霹靂」。

⑪原注：超對稱（supersymmetry），假想中的一種對稱性。雖然費米子與玻色子（見第三、四章）看似不同，但在超對稱理論中它們卻以對稱方式出現。如果超對稱為正確，所有的粒子皆有其超伴子。

⑫原注：黑洞（black hole），當足夠的物質被擠壓在一個狹小空間時，使得表面的重力大到所有物體（包括光線）都無法逃脫時，黑洞就形成了。黑洞小至微觀尺度，大至由數十億個恆星所形成，其性質的理論研究對釐清粒子物理學的基本問題頗有助益。

⑬原注：加速器（accelerator）是利用電場加速帶電粒子（如電子、質子、反粒子等）到較高能量的機器。加速器當中的線型加速器必須要很長，粒子才能達到所需能量。因此，許多加速器利用磁鐵將粒子軌跡彎折回原點，每繞一圈都可給粒子多一點能量。

⑭原注：弦論（string theory）試圖統一所有作用力及粒子，並希望對為何自然界必須如此，作出解釋。在弦論當中，十維時空中只存在一種作用力（重力），而在我們的四維時空觀測時，這些額外的時空看起來就像是其他各種作用力。此外，弦論以不同振動態的弦來描述具不同性質的基本粒子；弦論似乎也提供了重力與量子理論結合的途徑。弦論至今仍算是發展中的研究（RIP，定義請見第一章）。

前言

弦論預測大自然是超對稱的

凱恩

如果你不厭其煩，你便能透徹瞭解真理，

因為一個謎將解開另一個謎；

如果你看透自然最幽暗的祕密，即使夜晚一片漆黑，也不會迷失道路，

因為真相自然會照亮真相。

——取自盧克利修斯（Lucretius，古希臘哲學家，創原子論）之〈宇宙的本質〉

對於老式鐘錶的運轉有興趣的人，能夠將鐘錶的內部構造講得一清二楚，這是大眾所能夠理解的事。不過，若說到現在物理學家對於次原子世界的運作機制也有清楚的圖像，能夠理解的人就不多了。這個圖像是建立在粒子物理的「標準模型」上，是對宇宙

基本結構的描述。研究鐘錶的人不僅能夠描述鐘錶如何運轉，也能夠解釋為何它們會這麼運轉：為什麼大大小小的齒輪會一個帶動一個，模擬時間的運行。現在，物理學家也漸漸能夠看透宇宙的運作，並說明他們研究的定律為何能夠創造和維持自然界的運行。

想瞭解鐘錶的構造，看鐘錶師拆裝是個好方法，而瞭解大自然的好方法，則是和自然學家散個步。這本書就是讓有好奇心的人，藉由輕鬆的散步，能夠觀察粒子和粒子的行為。我們不僅可以漫步在標準模型現有的領域中，也能夠漫遊在尖端的範疇裡。或許我們的知識很快就會碰上突破，帶領我們到達更遠的地方。基於實驗和理論上的理由，許多粒子物理學家認為，下一個重大的發現將是超對稱存在的直接證據。本書的主題，就是要探討科學家的推論，以及若找到直接證據的意義。

標準模型仍有未竟之功

在探求物質世界運作的過程中，隨著近幾年來標準模型的發展和驗證，第一個求知階段的研究已近大功告成。標準模型（在第二章會介紹）對於基本粒子以及自然作用力的描述很清楚，至於我們所看到的許多物理現象，也能夠成功描述。標準模型包含質子、原子核、原子、分子、凝體、恆星等等諸多行為的基本原理，它已經解釋了許多以前所不瞭解的事，做了數百次成功的預測，其中還有許多深具戲劇性。在標準模型的適

用範圍裡（見第三章），沒有現象是不能夠解釋的——雖然，有些計算太過複雜而無法運算。儘管標準模型未臻完美，例如希格斯物理學^①，不過，這些並不會影響大多數的解釋和測試。

如果標準模型能成功描述世界，怎麼會有物理學（如超對稱理論）超越它呢？有兩點原因：第一、標準模型無法解釋宇宙學上的一些問題；宇宙學是一門從大尺度研究宇宙的學問。例如，標準模型無法解釋為何宇宙是由物質而非反物質（見第八章）所構成的，也不能解釋宇宙的暗物質（見第六章）是什麼？超對稱理論卻能夠對這兩個謎題提出解釋。

第二點，物理學的疆界正在改變中。現在，科學家不但問世界如何運作（標準模型可以回答這個問題），還會問，為什麼世界是如此運作的（標準模型卻不能回答這個問題）？愛因斯坦在二十世紀初問「為什麼」，但是一直到最近十年來，問「為什麼」才成為粒子物理學的常態科學研究，而非僅是哲學性的思考。在回答「宇宙為何如此運作」的理論中，建立在十一維世界的弦論是最具企圖心的，雖然，目前對弦論的研究僅限於研究理論本身，而非像過往一樣採用理論與實驗交流並進的方式，不過，弦論研究已經獲得重要的進展，令人相當興奮與期待。倘若弦論真的成功了，大家都會很高興。而正如維敦在本書的序提到，弦論預測自然界應該是超對稱的。

期待超對稱理論打開新疆界

超對稱理論的想法是驚人巧妙的：如果方程式中的某些粒子互換，這些代表自然界基本定律的方程式並不會改變。這就像是將紙張旋轉九十度，紙上的正方形看起來仍然相同一樣，當施予某些操作後，若方程式不改變，這些方程式便被視為具有對稱性。「超對稱」正是一種對稱，之所以冠上「超」這個字眼，是因為這種對稱更令人驚訝（見第四章），比以往發現的對稱更不易在日常生活中看到。對於標準模型不能夠解釋的現象，特別是希格斯物理，超對稱理論已達成重要的結論，我們將在第四章、第八章談到。

超對稱理論最重要的意義是，它提供了一扇窗，使我們能夠從自身的「大世界」看到弦論的「小世界」，透過實驗來測試弦論、發展弦論。超對稱理論可謂開啓了第二個求知階段。

在我寫這本書的時候（一九九九年），超對稱理論還只是個想法，有許多間接證據指出超對稱是自然律（law of nature）的性質，不過還沒發現有直接證據可以證實，也沒有證據可以反駁。目前設有加速器的機構正開始在訊號可能出現的範圍裡尋找（見第五章），我希望若找到超伴子②和希格斯玻色子③後，本書所呈現的資料仍是有效又有

趣的，所以本書的重點在介紹超對稱理論、闡釋超對稱理論與弦論的關係，以及說明如何驗證超對稱理論。以後我們從實驗獲得正面訊息時，便可以再深入討論。

如果超對稱性確實存在（縱使現在還沒有辦法看到），我們就可以用系統性的方式分析自然界基本定律，如果超對稱不存在，那就辦不到了。雖然有不少間接證據指向這個世界確實是超對稱的，不過現在還未獲得證實，這值得我們繼續努力。

誌謝

最後，我由衷感謝很多人的幫助使本書增色不少。我感激我最無怨無悔的編輯——我的太太露易絲，她讓本書更明瞭易懂；Jim Wells 和 Lisa Evertt 提供許多有益的建議；Kate Logan 給予廣大的協助，尤其是在插圖方面。我特別感謝珀修斯圖書公司（Perseus Books）給予我的勇氣；Steve Mrenna 的評論；Judy Jackson 幫忙取得費米實驗室的照片；以及 Jane Nachman, Andrei Nomerotski, Daniel Treille, Jianming Qian, Saul Youssef 等人提供粒子碰撞事件的圖示。

【注釋】

①原注：希格斯物理學（Higgs physics），解釋希格斯場存在、希格斯作用方式、希格斯玻色子行為與性質的物理理論，請參閱第七章。

②原注：超伴子（superpartner），又稱為超對稱夥伴。如果超對稱是自然界滿足的對稱律之一，則所有的正常粒子皆具有與其相對應、但具不同自旋及質量的粒子，即超伴子。

③原注：希格斯玻色子（Higgs boson）是希格斯場的量子。如果希格斯粒子如理論預測真的存在，歐洲粒子物理研究中心（CERN）的大型電子—正子對撞機（LEP）就有可能偵測到它（如果它們夠輕的話），而費米實驗室幾乎是肯定會在二〇〇二年至二〇〇六年之間發現它們（視希格斯玻色子質量、與對撞機及偵測器的運轉情形而定）。CERN的大型強子對撞機（LHC）可望在二〇〇五年開始大量製造希格斯玻色子。

第二章 科學法門

這就是科學進步的模式：

某個理論一旦歷經完整的測試和建立，
即使描述大自然的方法又有所進展，

也不代表應棄置原有理論，

而是將它整匯在新描繪、新圖像之中。

高更（Paul Gauguin, 1848-1903）曾將一幅自以為是遺世之作的油畫題名為：「我們從哪裡來？我們是什麼？我們要往哪裡去？」他寫道：「這幅畫滿是數學錯誤，而且全部出自於想像。」高更這段話語讓我聯想到今日的科學家，他們追尋宇宙真理，利用數學建立模型，運用想像力提出假說，試圖解開宇宙之謎：「我們從哪裡來？我們是什麼？我們要往哪裡去？」具體來說，科學家企圖解答：「為什麼有宇宙？宇宙如何運作？宇宙為什麼要如此運作？人類是什麼造成的？沒有生命的物質，如何生成有感覺、會思考的人類呢？」

每個文明都問過類似的問題，也試著用過一些方法尋找答案。我們稱為「科學」①的方法結果豐碩，能對一些問題提出回答，因為科學是為研究大自然而創的，這個方法起源於兩千五百年前的希臘愛奧尼亞人時代，到了四百年前，伽利略（Galileo Galilei, 1564-1642）和刻卜勒（Johannes Kepler, 1571-1630）開始提供可信的自然界知識。於是乎，科學結合想像力，並依據實驗結果講求證據，人類的科學文明便有了進步。

不少物理學家為高更的題名所吸引，進而持有這幅畫作的複製品。但是注視這幅畫時，我無法看透高更心中蘊藏的答案。這幅畫是他個人探尋宇宙的方法，而我們每個人也各自有探求宇宙的方法。然而，科學卻允許大家一起尋找答案，並向任何有興趣的人闡釋所得到的答案——我希望這本書也能幫助讀者達此目的。

科學所欲解開的問題，和高更或其他藝術家所追問的問題並無不同，科學要瞭解動詞「存在」(to be)的真正意義。科學不是像某些人認為的完全與人文學科站在對立面，不過，現在還很難用完純語文或圖畫來表達科學，例如，我們不能以蓄白鬚穿白袍來表示夸克，磁場也不能畫成帶弓箭帶翅膀的丘比特。我們現在用方程式與數學解來代表宇宙結構，用圓與圓周、或是砲彈軌跡所描繪出來的拋物線，來成就正確又漂亮的自然圖像！如果有一天出現一套完整的方程式（有可能統成一道最基本的方程式），我們就可以用純數學完整描繪出宇宙圖像。到時候，改用純語文描述也不是什麼難事了。

今日我們正處於一個階段：我們有一個中心想法，也知道下一步實驗要怎麼做，才能更趨近於瞭解宇宙運行的基本定律；不過，基於某些實際的理由，要獲得我們所需要的證據以及得知這個想法是否正確，是非常困難的。這本書將重心擺在這個中心想法，即超對稱理論上。現在已經有間接證據指出，超對稱是正確的宇宙描述，如果現在我們能瞭解超對稱及其意義，或許幾年內就可以從實驗中找到超對稱存在的直接證據了。我們將看到超對稱理論的重要性，它不僅可能是部分先前不為人知的大自然，它也使我們能夠更直接去探測最終的自然律。

這一章我會先解釋本書的主題，並且說明超對稱理論的假設及目標。我們要談：科學如何運作？如何獲得進展？這一行的科學家如何確信某種對大自然的描述是正確的？

或說是對宇宙、對世界的描述是正確的？（在本書中，大自然、宇宙、世界都是同義詞，我們會交替使用。）要瞭解這些並不容易，要瞭解結果也不容易，接下來幾頁就是要避免讀者產生誤會，以讓我們更順利的進入主題。

想瞭解大自然，要先知道粒子、力和法則

爲了要瞭解自然世界，我們必須先知道至少三件事情。當我們探索世界時，會發現世界是由粒子（particle）構成的，所以我們必須先知道基本粒子是什麼。遠在兩千多年前，希臘人已經正確認識到，如果萬物都是由許多基本的、不可分之物（即粒子）組成，我們所看到的令人驚嘆、複雜又完美的宇宙將可以獲得解釋。然而，一直到了二十世紀，我們才發展出所需的技術來驗證「粒子」的概念，也才證實粒子的存在和特質，我將在第二章說明實驗結果。

粒子經由交互作用而創造出宇宙萬物，所以我們必須知道粒子是如何受到作用力的影響而發生交互作用；但是縱使知道了所有粒子和作用力，我們仍然無法做出完整解釋，還得透徹理解大自然的法則，並運用數學式來表示才行。如此一來，才能妥當說明粒子行爲如何受作用力影響。比如說，即使我們知道在萬有引力的作用下，兩個粒子會互相吸引而彼此靠近，但是除非我們有方程式來計算這兩個粒子的速度，否則無法得知

粒子碰撞後產生多大的能量。

所有粒子和交互作用都有其適用的自然法則。當初，第一條法則是由牛頓（Isaac Newton, 1642-1727）所創，現在，牛頓法則②已融合其他法則，蛻變成適用範圍更廣的兩大法則，即愛因斯坦的狹義相對論以及量子理論。這兩大法則將在本書扮演吃重的角色，但是要看懂本書，讀者不需要知道這兩個法則如何運作，重要的是，它們是書中的背景，它們是完整又經測試過的方法，用來計算粒子在某些作用力下所產生的交互作用。

有人可能會問：當我們向終極理論邁進一步時，我們對量子理論和狹義相對論的表述，可不可能修正或擴充呢？至少就現實的理由而言，這是不太可能的。因為，代表自然法則的方程式和演算法已經徹底通過測試，而且我們有更堅強的信念，相信這些數學式將會保持有效。因為數學方程式和演算法是理論的一部分，共同融合成完好的架構，若任何一部分的理論發生改變，則改變可能會擴散到其他部分，我們原先認為是對的數學可能變成是錯的，結果會違背原本所建立的種種測試，這是讓人難以接受的。（我們稍後會在本書看到，對於超高能量的交互作用模式或許有一點改變的空間，但是沒有理由相信這種改變會發生。）

要徹底瞭解這個世界，我們要瞭解的不僅是自然法則是什麼，而且也要知道為什麼

是這些法則？目前為止，物理學家才剛剛進入這個研究主題。不過我們現在已經有足夠的自信知道：要表述、瞭解和測試超對稱理論，我們目前對自然法則的知識已經足夠了。

如我在前面所強調的，本書的讀者只需要知道自然界有上述兩個基本法則存在的事實就行了，我只在這裡稍做說明。狹義相對論的限制來自兩個簡單的公設：（一）不管在哪裡形成表述、進行測試，自然法則不會有所不同；（二）不管在何種情況下測量，光在真空的速度（記為 c ）不會改變。第一個原理很明顯，正如字面的意思：不管你是在地球或是在某個星系的某個星球上研究自然法則，你都會得到相同的結果。第二個的道理較不明顯，但是「光在真空中的速度都是一樣的」，已經由許多不同的方法徹底驗證過，這當中包括直接檢驗或者是透過狹義相對論來檢驗。

「相對論」的名字很容易產生混淆，因為狹義相對論的真意其實是：兩件事是絕對的，而非相對的。「相對論」的命名是截取理論中的部分意涵：如果實驗是在具相對運動的某些實驗室進行，例如一個在地球表面、另一個在等速行進的飛機上，則某些實驗的結果可能會不相同；但是，如果將運動效果也計入，則即使是相對運動中的實驗，對結果的描述也會是一樣的。

我們在此對狹義相對論感到興趣，主要是因為它限制了有效理論（見第三章）可能

的形式，而且這限制強而有力，譬如牛頓定律就必須重新表述，因為它們並未完全符合狹義相對論的限制。現在，當某個理論合乎狹義相對論的限制時，我們就會用科學行話說這個理論「相對論性不變」③，或是說這個理論合乎「相對論性不變」的限制。狹義相對論由愛因斯坦在一九〇五年提出，它的可信度已經在過去數十年來經過理論（它必須與其他所有經證實的描述自然的方法一致）和實驗的驗證，而每當新檢驗科技出現時，狹義相對論仍然會不斷被測試。

另一個基本定律是量子理論，在一九一三年到一九二七年間由幾位科學家提出。在本書中，我們無須知道量子理論如何運作，只要知道量子理論存在，並且能夠幫助我們利用已知作用力來計算粒子行為，就足夠了。在稍後的章節中，我們會針對需要，多少學習一些量子理論的特性。狹義相對論和量子理論已經成功合併成為「相對論性量子理論」，不管這個詞出現在本書何處，皆意味著我們所討論的概念已經發展成熟，能夠同時滿足狹義相對論和量子理論的法則。

模型，理論，方程式

在一九六五年以前，我們對於構成物質的基本粒子瞭解不多；我們知道有哪些作用力，但是不知道它們如何塑造世界。到了一九八〇年代末期，我們已經知道物質的基本

構成物為何，也知道粒子和作用力如何一起創造世界，這知識就叫做「粒子物理標準模型」，這是下一章的主題。標準模型已經通過良好測試，能描述世界如何運行，雖然我通常僅簡稱為「標準模型」，但別忘了修飾詞「粒子物理」的存在。如果大自然是超對稱的，則標準模型將會延伸成為「超對稱標準模型」，到時候，標準模型並不是錯了，而是融合成更完整的針對大自然的描述。這就是科學進步的模式：某個理論一旦歷經完整的測試和建立，即使描述大自然的方法又有所進展，也不代表應棄置原有理論，而是將它整匯在新描繪、新圖像之中。

標準模型與傳統意味的「模型」有所區別，標準模型是代表至今發展得最完整的數學理論。對物理學家而言，理論（theory）和日常用語的意思不同。通常，科學理論是指一項或一套適用於自然世界特性的原理；在物理學上，理論多採用方程式的形式，表達出定義完整的符號之間的關係，其中，符號代表自然世界的部分特性，方程式則可以求出解答，將自然行為量化表示。所得到的數字，還可以預測自然行為。

例如，狹義相對論的成果之一，就是愛因斯坦著名的方程式 $E=mc^2$ ，其中， E 代表能量， m 是質量， c 是光速。假設有一定質量 m 被轉換成能量，愛因斯坦的方程式可以告訴我們獲得多少能量。要求得這個方程式中的 E 解，是很容易的，我們只要將 m 乘以 c^2 。但一般而言，解方程式可能並不容易。（我們確信狹義相對論是正確的原因之一，

是因為 *E=mc²* 的關係式是放諸四海皆準的，而且每天都在對撞機和核反應器中測試。）

科學界使用「理論」這個詞，多少意味著理論的預測大多都被測試和驗證過了。當科學家開始進行某個領域的研究時，他們會先提出模型，來引導思考、規劃實驗，並且發展量化的預測。模型通常都是先對大自然進行有限的數學描述，如果模型運作不錯，就可以加進更多的自然現象，之後，不斷改進的模型就能夠較完善的描述自然，我們就叫它為標準模型。隨後此模型的某個版本發展得特別健全，而變成這個領域的理論，但是因為之前的模型已經冠上標準模型的稱呼，名稱就繼續延用，即便它不再是最理想的模型了。為了紀念這段崎嶇的發展過程，在英文中通常以首字母大寫來代表這個標準模型，即 *Standard Model*。

不過，在日常用語中，「理論」的意義可就大不相同了，它代表「一種解釋事情的模糊概念」，例如我們可能說：「一種關於犯罪率下降的理論是……」而「模型」在日常用語和在科學上的用法差不多——至少在模型被發現能夠成功描述大自然之前，是如此。但是「理論」的用法大不相同，很容易引起誤解；我在本書中只會採科學上的用法，必須先澄清的是，理論、方程式以及所代表的物理系統架構，幾乎可以劃上等號，所以物理學家在寫作及討論時，傳統上都交替使用（雖然這可能會讓人產生混淆）。

成熟的科學

造成對科學的混淆和誤解的來源（這並非責怪新聞記者、哲學家、歷史學家、社會學家，甚至責怪科學家），主要是不能仔細區分哪些是在概念上或實驗上皆已發展成熟的科學，而哪些是發展中的科學。科學愈進步，能研究的範圍也隨之增廣，甚至探索到原本無法觸及的領域。而新領域的開拓，往往也是受助於新科技的發明，就像在顯微鏡發明之前，人們只能夠研究肉眼所見的現象。研究新領域的機會，有時候是靠科學過往的成功，由前導領域中發展出次領域來；有時候則有賴新觀念的引介。最後，這些想法建立了描述自然的理論基礎，並且經過實驗驗證。這段過程不斷重演，好比光學、電磁學、原子物理、粒子物理標準模型和其他的領域，都是如此一路走來的。

當次領域被研究、解決之後，模型、解釋和曾提出的概念會不斷改變。實驗通常不會第一次就正確，但是實驗會不斷重做、改進，所以透過實驗而非口舌之爭，科學家將問題解決了。

不過，實驗只能在方程式變數的限定範圍內進行，這些變數指的是像速度、天文物理距離、顯微鏡的鑑別率等等。以過去的經驗而言，一旦理論在給定變數範圍內測試成功，則理論在這變數範圍內都將適用。然而，如果理論擴展到新的變數值，如較快的速

度、較短或較長的距離等等，理論可能在此新定義域內成功適用，也可能會失敗，如果失敗的話，我們就得找到適用於比較大定義域的新理論。而當適用於舊變數值時，新理論可再縮併為舊理論。舊理論並不是錯誤的，它只是變成某個更完整理論的一部分；所有曾一度認為有效、但後來被發現不足的著名理論或法則，大致上就是這種情況。這樣一直到最後，所有的領域都會包括在新理論之中。例如，對運動的描述已經在各種可能的速度下（從零到光速）測試過，在未來它也不會改變。

以前並沒有「科學方法」，所以我們只好一邊做一邊學。我剛剛描述的過程，起初人們並不瞭解，就像牛頓科學相當成功，使人們理所當然的認為它代表全宇宙，直到後來，人們才知道牛頓科學只是大致有效：當速度和質量不太大時，它是成立的，而且在原子尺度的系統下，它是失敗的。到了一九三〇年代，科學家終於瞭解，若要將理論擴展到超出變數有效的領域之外，所有的理論都必須重新測試。

儘管許多物理領域（以及其他科學分支）的基礎都已建立，但這不表示它們不再屬於活躍的研究領域，相反的，很多人對於在舊基礎上挖掘新蘊涵更感興趣。而對於立足在舊基礎上的次領域研究而言，舊基礎代表已存在的基本方程式；但是，尋找方程式的答案可能很困難。這一點我們前面曾經簡要的討論過，以後還會再提到。這次找到某個系統的解，不代表我們在別的系統也找得到，所以當找到基本原理後，大部分的次領域

仍然可以提出許多有趣的問題。當理論愈複雜時，隨著研究和實驗不斷推進，就會出現愈多的預測和結果，即便過了很久的時間也是如此。換句話說，大多數領域在發現基本原理後，會發展更多的運用，而且還會持續下去。

發展中的研究

我們的用意，是要請讀者區分哪些是已有基礎的次領域研究，哪些是發展中的研究。爲了提醒讀者哪些領域是發展中的研究（research in progress, RIP），本書會用RIP的簡稱穿插表示。雖然有的RIP獲得實驗數據支持或漂亮得引人注目，但它們有可能部分或全盤皆錯了。當然人非聖賢，所以實驗和計算都可能出錯，幸好如果事關重大，這些錯誤通常很快就會被找出來修正。不過這種錯誤不是重點，我們要討論的情況是當尚未發現描述自然行爲的根本法則前，RIP所代表的意義。目前的RIP如超對稱理論和弦論，有一天可能被發現完全與自然運作無關。這與標準模型非常不同，因爲標準模型在其適用範圍內可以描述自然界如何運作，有朝一日標準模型只會融入成爲更廣義的理論的一部分，而不是遭到淘汰。就算是這個更廣義的理論以完全不同的方法詮釋事件，但在標準模型的適用範圍內，新舊理論在技術上是完全等效的。

現在的物理學研究生學到的相對論，比愛因斯坦所懂得的還多；每天也都有數千位

科學家使用量子理論。某個領域一旦成熟，解釋的方法也紛紛出籠。但相對來說，要談論或寫作RIP是較為困難的，因為最終的答案仍未提出或尚未被驗證，同時也還沒有足夠的時間讓人去發展非技術性的比擬和解釋。未來如果超對稱理論成熟完備後，就會比現在容易解釋了。

要向大眾傳達科學研究結果的難題之一，是愈新的東西才有新聞價值，因此通常是RIP獲得注意，尤其是其中尚未確定的部分。雖然研究結果會隨著實驗改進和再測試加以修正，可是新聞媒體卻極少強調這一點：RIP的成果都只是暫時性的，有可能需要不斷更正。

對於RIP，一般人感興趣或關心的不是細節問題，而是想瞭解科學家正在研究的題目及可能的答案。以前有些領域只屬於哲學範疇，但現在隨著科技的進步，科學能探索的領域愈來愈寬廣，更不斷擴大人類對世界的認識。然而，縱使是RIP目前最中意的答案，也有可能發生改變（也有可能維持不變）。

根據歷史法則，一旦某個次領域成為科學研究探索的目標，終極答案遲早會水落石出。照過往的經驗，這段過程約莫要花上幾十年時間。研究者隨著新資料證實或改進理論，終將對這段演變瞭若指掌。目前，有些RIP領域頗值得懷疑，很可能要大改特改才能苟延殘喘，如果要介紹或描寫這些不成熟的領域，恐怕混淆讀者多於提供資訊。相

對的，超對稱理論已幾近成熟，只差一步即可證實它是正確的描述大自然的方法，所以深入瞭解其內容和意義將是可行、也是值得的。

別怕方程式

有些科普書籍的作者會建議說：「不要放進方程式，否則會嚇跑讀者！」如果這是指科學論文專用的方程式，可能言之有理，不過方程式最棒的地方之一，就是你可以從一個已經建立共識的起點出發，而在幾個正確推導過程之後獲得驚人的結果，這可不是文字敘述所能辦得到的。用簡單的方程式來打比方，還能夠化繁為簡，比說上一大堆有用。這也正是為什麼本書要用到一些簡單的方程式。

同樣的，讀者倒不需要被書中提到的各式粒子和特性搞昏頭，即使記不住某某粒子的名字，還是能夠看懂插圖並理解本書內容。

方程式與它的解，本質有極大的不同。我們把理論看成是一道方程式（或幾道方程式），在另一方面，我們用方程式的解來描述世界，兩者構成所謂的「科學」。原理包含在方程式中，一旦求出方程式的解並研究其表現，我們就能夠描述真實世界。不過方程式的解常常不具備原來方程式的特性。大部分讀者可能不熟悉這個概念，讓我們舉例來說明，雖然這完全與真實情況不符。就像我們慣用例子和模型來解釋科學，在此我們也

舉一個儘可能接近實況的難題：為何宇宙存在三種性質一模一樣而質量不同的粒子？

現在假設某個理論表示，上述三種粒子——電子、繆子④和陶子⑤（下一章將會說明為何取這三種粒子）的質量關係是 $EMT = 64$ ，其中E代表電子質量，M代表繆子質量，T代表陶子質量。事實上這個方程式並不存在，不過可讓大家知道實際上方程式可能如此表示。這個方程式只是說，將三個質量相乘，你可以得到64（在此我們忽略單位），並且我們可看出這方程式完全是對稱的：置換任意兩個質量，所得到的結果仍然一樣。通常我們會希望自然律具有對稱性。而假若你未深入思考，甚至會猜想這三種粒子的質量應該完全一樣，因為它們都是這個「對稱方程式」的解嘛！

讓我們先列出這個方程式的解。為簡化起見，我們只考慮整數解。有好幾組三個數的乘積是64的解，其中一組是 $E = M = T = 4$ ，因為 $4 \times 4 \times 4 = 64$ 。在這組解中，每個質量的確相等，所以這是「對稱解」。但若是另一組解： $E = 1, M = 2, T = 32$ ，三者皆不同，不過三者乘積仍是64，還有更多組解例如 $(E, M, T) = (1, 1, 64), (1, 4, 16), (1, 8, 8), (2, 2, 16)$ 或是 $(2, 4, 8)$ ，在每一組解中，將三個數字相乘都可以得到64（我們在例子中視E、M、T為三種性質相同、僅質量不同的粒子，故可定義E為最輕的粒子，T為最重的粒子）。

如果這些組合皆是解，如何才能知道哪一組解能正確描述大自然呢？在這個過度簡

單的例子中，我們可以找出所有的解，但是在真實世界裡，解方程式通常非常困難，而且光找答案還不夠，因為我們必須知道在衆多答案中，哪個答案才能真正描述大自然。

實驗數據會有決定性的影響。假設質量並未經過精密測量，不過從實驗數據中，我們得知三個質量都不相等，所以上述組合中只有三組符合實驗數據。如果我們又從數據中得知沒有一個質量比其他的大上五倍，則我們只得到一組解（2.4.8）。

以上的舉例說明幾件事情。方程式中所包含的原理與定律，通常都具有高度對稱性（如超對稱）。粒子所構成及運作的世界，可由方程式的解來描述，這些解沒有必要表現出方程式的對稱性，通常也不會表現出對稱性；如果我們只分析方程式的解，並不容易找出基本定律的對稱性。科學家面對最嚴厲的挑戰之一是，自然律把對稱性給隱藏了起來，並非隨意可辨（例如標準模型的粒子交換對稱，見第二章），我們以後會學到，超對稱即被視為「隱對稱」。除非我們再藉由觀測與實驗得到的數據資料來分析，否則即使我們已知道基本定律，仍然不可能猜出哪個解才是「正解」。

必須一提的是，理論本身也有可能強到成功挑中了正確解。我們再舉例說明：假設理論提出第二個方程式 $E+M+T=14$ ，再加上原先的方程式 $EMT=64$ ，兩者都是完全對稱的，這時候，同時符合上述兩個方程式的就只有一組解了，即（2.4.8），我們已無需再依靠數據分析來推論出正確解。請注意，這兩個完全對稱的方程式只有一個並非對

稱的解，也許我們的世界正是如此。但即便如此，我們仍然經常得藉由實驗數據來測試所找到的解究竟能否正確描述大自然。

「預測」與「後測」

科學的目的在於求知。「先作出預測 (predict)，再以實驗檢測」，是科學家在求知過程中所運用的方法與工具。想法或理論發展出預測，讓我們藉此檢驗世界。「預測」在實驗後會產生三種結果：如果預測獲得證實，我們對預測背後的理論，信心會增強；如果預測錯誤了，理論則須修正或廢棄；但若屬於RIP，情況通常沒這麼簡單。大體上，預測是根據一些所知不完全的參數（如質量）而產生的。如果是這樣，則科學家會採用迭代 (iterative) 過程：正面的實驗結果會鼓勵研究者再進一步對這些不確定的參數做測量或估算，預測與實驗會愈來愈精準，最終得以判定理論的真偽。

另外還有個複雜之處在於，有時我們會對已知事物進行預測，例如電子質量、重力的存在或是我們存在三維空間裡。有時這些預測稱為「後測」(postdiction)。雖然在理論形成前我們已經知道實驗結果，但由於該結果是理論必然的結論，因此理論仍然算是受到檢測。

還有一些情況是，某理論或許能夠探討電子質量的問題（以前的理論不能回答這個

問題），但是卻無法提出一個有確定數字的預測，因為有些待輸入的參數未知。即使如此，我們或許仍可以進行計算，預測電子質量介於某個範圍內。若已知電子質量真的落在這範圍，總比得到錯誤的範圍或是什麼都不知道強得多。在這種情況下，我們一般不說理論預測結果，而是說理論與結果相容，若有一天能更瞭解理論或是能獲得輸入值時，就可以進行更好的預測和實驗了。如果所有實驗都有清楚的結論，能夠讓我們更瞭解物理學，那是再好也不過了，但是RIP的情況通常多像是在迷霧中摸索。

超伴子在何方？

標準模型的粒子包括電子和夸克（見第二章），人體和宇宙萬物都是由此構成。我將在下面幾章向大家說明，一組前所未有的粒子「超伴子」是否存在，攸關世界是否超對稱。

當我寫這本書時，超伴子尚未被直接觀測到，它們在哪裡呢？為什麼我們看不到它們？我想可分兩個部分回答這個問題：

第一，絕大部分超伴子都與標準模型的粒子一樣重，而且會快速衰變成更輕的粒子（只除了一種以外，見第二章）。如果自然界真是超對稱的，按理所有超伴子都能在實驗室裡碰撞產生（見第五章），同時在地球大氣層中，宇宙射線每數分鐘也會因碰撞而產

生一個超伴子。但是超伴子衰變得太快速了，而且也不可能在大氣層裡偵測到，因此如果我們對超伴子的想法是正確的，那就唯有在研究中心裡的對撞機和偵測器⑥才能達到進行偵測所需的能量和靈敏度。

當超伴子衰變時，它們變成比原先更輕的粒子，最終所有超伴子皆衰變成標準模型粒子如電子、夸克或光子，以及最輕超伴子⑦。最輕超伴子是穩定的粒子，因為它再也無法衰變成其他更輕的粒子了，而不論它是在大霹靂時因碰撞直接產生的，或因衰變而生成的，除了有些會成對湮滅之外，最輕超伴子都一直散布在宇宙間（見第六章）。這些殘存的最輕超伴子，稱為暗物質，將構成宇宙總物質的一大半，就在我們周遭，每個葡萄柚大小的區域約有一個超伴子。

超伴子在何方？理論上說，就在我們身邊。

科學疆界大挪移

現代科學的誕生，一部分要歸功於人類思考的革新，先將焦點擺在世界「如何」運行，而非追問世界「為何」運行。四個世紀以前，「為什麼」還屬於哲學領域，而在現代科學誕生兩個半世紀後，科學才問「為什麼」。這場變革始自生物學，由達爾文率先將「為什麼」合法化成科學領域，而物理學在百年過後才開始觸及「為什麼」的領域。

在一九八〇年代以前，物理學能講清楚說明白的問題仍然有限，大問題如「自然律從何而來？為什麼有宇宙存在？」仍屬未知的領域。有些人辯稱，問題會不斷衍生問題，所以科學知識一定有空白無法填滿的領域，科學不但最終要訴諸於信念，有些事情更是永遠不可知。

但是現在情況已經開始改變，目前物理學也已經開始研究大問題，雖然現在不知道是否能找到科學解答，不過這屬於RIP。這一行的大部分研究者期待有朝一日答案會出現，況且今日多數活躍的科學家不認為物質宇宙的根本問題必然是不可知的，他們也不認為最終理論一定會再衍生新問題。我們將在第十章再回到這個主題。

超對稱理論本身並非大問題的最終解答，不過如果目前想法正確，超對稱理論將能保證大問題和其他一般科學一樣都能研究，而超對稱理論所提出的答案也能以一般方法進行實驗。在接下來幾章，我們將會學習如何確定大自然是否超對稱，以及若其為真，則大問題該如何著手研究。

【注釋】

①原注：科學（science）可視為以下兩者的總稱：不斷自我修正以獲取自然宇宙知識的方法，以及以這種方法獲得的知識本體。科學方法包括建立模型、解釋現象、實驗測試、修正模型的過程。科學的目標在於瞭解，而科學知識也可能因而促成應用的發明。發展應用的過程通常稱為技術（technology），以與科學做區分。雖然科學通常會導致新技術，但科學不一定是為技術而生，而且技術往往會反過來促進科學進展。在伽利略之前，技術的發展通常是獨立於科學之外的。自從馬克士威發展出電磁理論以來，幾乎所有的技術發展都是以先前的科學為基礎。近年來科學與技術通常被混做一談，但事實上它們兩者並不相同，「科學」與「技術」這兩個名詞最好還是分開使用較佳。

②原注：牛頓寫下了一道描述重力的方程式（包含牛頓常數 G ），以及三道描述運動的方程式，亦即牛頓定律（Newton's laws）：第一定律為不受力的物體以等速率行直線運動；第二定律則說物體的質量與加速度的乘積即為其所受到的外力（ $F=ma$ ）；第三定律則為，若物體對另一物體施力，則必受到來自另一物體大小相同、方向相反的反作用力。

③原注：相對論性不變（relativistic invariance），即：當粒子運動速度接近光速，或是考慮場的作用時，描述大自然的方式必須滿足愛因斯坦狹義相對論的要求。

④原注：鈰子（muon），不參與強交互作用的六種基本粒子之一。鈰子在約百萬分之一秒之內便會衰變成電子及微子。一般鈰子可在對撞機中經由對撞或衰變產生，或在宇宙射線碰撞產物中找到。

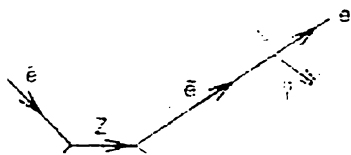
⑤編注：陶子 (tau particle)，不參與強交互作用的六種基本粒子之一，質量大於質子，帶電荷，可在電子與正子對撞時的共振中觀測到。

⑥原注：偵測器 (detector)，粒子的特性及其交互作用的性質可經由觀測粒子的衰變及交互作用而瞭解。偵測器即是觀測過程所需借助的儀器。偵測器和照相機有類似處，但它們不以底片進行記錄。為了推測知識的前沿，偵測器通常十分龐大，並且要借助最新科技。粒子物理實驗通常需要一到多座偵測器。

⑦原注：最輕超伴子 (LSP, lightest superpartner)，是超伴子中質量最小者。最輕超伴子可能扮演著幾個重要的角色，首先，它可能是宇宙的冷暗物質；此外，最輕超伴子的性質對於在對撞機中辨認超伴子事件相當重要，因為所有比它重的超伴子都會衰變為最輕超伴子。

第二章 標準模型

一百年來，實驗總是走在理論前頭。
然而在一九七〇年代標準模型誕生之後，
理論倒是率先解決了許多難題，
並作出驚人的正確預測。



為何我們認為終將發現超對稱？超對稱又將如何擴展描述宇宙的方法呢？在進一步瞭解之前，我們得先對這兩百年來物理學主要的進展大概瞭解一下。

過去的研究已經建構了粒子物理學標準模型，它能完整描述建構世界的基本粒子和作用力，在本章中，我們先探討五種作用力，接著再來看粒子。基本上，世界就由三種粒子構成：電子以及兩種類似電子、叫「夸克」的粒子。然而，世界上還有許多其他種粒子存在，如反粒子①、微子、以及不同的夸克、類似電子的粒子、希格斯玻色子等。這些「額外」粒子中，我們只瞭解其中某幾種為何存在。

此外，我們還要稍微瞭解費曼圖②，這是用圖形表示粒子交互作用③的方法，這也是實驗學家計算粒子行為的方法。接著，我們要思考粒子的共通特性——自旋④，以及瞭解為何自旋會導致粒子分成兩群：玻色子⑤和費米子⑥。之後我們會認識到超對稱理論會合併這兩群粒子。最後，我們會探究為何標準模型已經能成功的描述現象和實驗，但它卻不是粒子物理學發展的最終階段。

作用力

當高更創作「我們從哪裡來？我們是什麼？我們將往哪裡去？」這幅畫時，人們只知道電力、磁力和重力而已，對於原子是否存在，尚有爭議。那時，首次發現的粒子

「電子」，才剛剛找到；而原子核的放射性衰變⑦，也才剛受到注意。因為已知的作用力無法解釋這些衰變，所以物理學家體認到，必定有其他的相互作用存在，才能描述大自然；這種作用力就稱為弱作用力，因為它的效果很微弱，而且如果物體間的距離大於原子，則基本上這些作用力也不會發生。

一九一一年時，科學家發現原子有原子核，而較重的核心部分有很多質子。因為物理學家知道同性相斥的電力會使質子間彼此推開，顯然另一股作用力（核力）必須存在，以便將質子綁成穩定的原子核，而只有在距離極小（不超過原子核大小）的情況下，才感受到核力的作用。儘管遠在三個世紀以前，牛頓已預見可能有某些力只在極小距離內作用，不過要等兩百年後才發現佐證。

這五種作用力——電力、磁力、重力、弱作用力和核力，能夠解釋我們所觀測到的大自然。粒子在希格斯場進行交互作用（詳情見第七章），使粒子產生質量，所以也可以將希格斯交互作用當成另一種作用力。還有其他形式的作用力也許存在，不過，它們和粒子行為完全沒有關係，也無法解釋粒子如何結合組成世界。（為求完整，我在此提兩種作用力：第一種作用力促使宇宙擴張速率加快，而不受制於宇宙自身重力的影響，這已獲新近發現的證據支持；不過，這種作用力絲毫不影響個別粒子的行為。此項效應因歷史因素稱為「宇宙常數」；另外一種可能被考慮的作用力，僅能在遠比質子還小的

距離才能發揮作用。）

我們現在只需要知道這五種作用力很重要就行了，稍後再簡略談談其他作用力，因為這些作用力或許對於認識自然律有所幫助，不過卻不會影響周遭世界的運行。

兩百多年前庫倫（Charles-Augustin de Coulomb, 1736-1806）發現，電力和重力同樣都取決於進行交互作用的物體之間的距離，用來表示這兩種作用力的方程式也是同一形式，自此之後，物理學家便一直嘗試結合對兩者的認識。在十九世紀下半葉，馬克士威（James Clerk Maxwell, 1831-1879）結合法拉第（Michael Faraday, 1791-1867）等人的成就，成功使得電力與磁力連繫起來，即電力會隨時間或空間的改變而產生磁力，反之亦然。到一九六〇年代，我們已知道這五種作用力的存在，其中電力與磁力被合稱為「電磁力」，至於弱作用力和核力，則完全沒有理論，只知道它們的某些行為法則而已。

然而，到了一九八〇年代，標準模型出現了，並且經過完整的測試。它能完整描述弱作用力、電磁力和強作用力（核力），又與量子力學和狹義相對論完全一致。短短二十年來物理學成果輝煌，我們從對強、弱作用力的懵懂，跨躍到全盤瞭解。

科學家用以下的畫面來描述電磁力：電子與帶電粒子交換光子⑧，產生交互作用；光子將能量自一個電子帶給另一個電子；電子之間也因光子的交換，而互相散射；電子和質子交換許多光子，互相吸引而形成穩定的氫原子。

所有作用力的運作方式都與這樣的畫面十分類似，例如重力作用是源自於交換重力子^⑨；在弱作用力中，扮演光子角色的粒子稱為W玻色子和Z玻色子，至於在強作用力時，則是由膠子^⑩上場。在這些情況中，我們說光子、W玻色子、Z玻色子、膠子和重力子媒介作用力。

於此，當我提到強作用力時，有一點小細節需提醒大家：為顧及歷史發展，當我之前提到核力時，我稍微作弊了一下。雖然核力將質子和中子綁在一起成為原子核，但它並不是基本作用力之一，真正的作用力是夸克間的強作用力，而核力^⑪不過是強作用力將夸克各自綁成質子和中子後所剩餘之力。待我們講完夸克之後，會再回頭來談談核力。

質量、衰變與量子

談到粒子時，常有兩個字容易搞混：一是質量，二是衰變。在此，我們只要知道質量本質上是指重量即可，不需要更精確的定義。有些粒子如光子，是沒有質量的。測量粒子質量最主要的方法，是觀察粒子之間的散射，因為粒子如何散射與其質量有關。

幾乎所有的粒子都不穩定而會衰變成其他粒子。衰變^⑫在物理學上帶有技術意味：當某種粒子消失時，表示它衰變成其他兩個或三個粒子。物理學上和日常生活或生物學

上所謂的衰變，主要不同在於，最後階段的粒子絕非先存在衰變前的粒子中，而是原先的粒子真的消失了，最後的粒子出現了。舉光線中的光子作說明，當點亮燈泡時，發射出的光子並非等候在燈泡中的粒子，稍後，光子藉由物體反射而照進我們眼中，光子就被眼球吸收、消失了。當粒子進行交互作用時，所有粒子都可能被創造或是吸收。大部分粒子創造於大霹靂時，粒子也能經由碰撞產生，例如在粒子束加速對撞機當中。在交互作用時，何種粒子會出現或消失並非任意，而是完全由標準模型（以及超對稱理論）所決定。

粒子能否產生衰變，有兩種限制條件：首先，在整個過程中，總能量不能改變，我們稱能量守恆。請想像一靜止的粒子進行衰變，其生成粒子的能量來自原先粒子，換句話說，原來粒子的質量會等於衰變後粒子的質量總和，再加上生成粒子的動能。因為能量不會無從生有，所以衰變產生的粒子必定比衰變前的粒子輕。第二點，多數粒子帶有「荷值」（如電荷以及其他作用力對應的荷值），而這些荷值也是守恆的，如電荷總量在衰變過程會保持不變。

由於這兩種守恆律的限制，有幾種較輕的粒子（如電子）並不會產生衰變，至於其他不穩定的粒子，衰變過程通常極為迅速，往往在遠少於一秒的時間內完成。

電磁波將能量從電台和電燈泡帶到收音機和我們的眼睛裡。量子理論告訴我們，能

量是透過光子一團團傳送的；電荷在自身周遭建立電場，當電荷振動時（比如說在天線中），會發射電磁波或光子。另外，質量會產生重力場，物質中的電子和某些粒子也會造成其他幾種力場^⑬，所有的粒子都可以想成是力場中的量子^⑭。在本書中，我們不會技術性地表述這些觀念，不過，當談到力場時，就應該聯想到量子和粒子，反之亦然。

粒子：我們真的瞭解物質的基本組成嗎？

從粒子的角度看，標準模型真是不可思議！人類是什麼構成的？如果將蘋果或是一個人一直切成小片，會切到最小片嗎？最小片又是什麼？而星星是什麼構成的？這些是每個人都想過的問題。

我們的答案是，宇宙中從最小的細胞到花朵到人類到星球，所有的東西都是由三種物質粒子所構成的，粒子之間則是由膠子和光子束縛起來。較大的物體如行星或恆星，重力也起了束縛作用。

這三種基本粒子是電子、上夸克和下夸克。電子是我們極為熟悉的，上、下夸克則是類似電子的粒子，雖然「上、下」具有特定意義，但在此不重要。所有基本粒子都帶有電荷、弱荷與強荷^⑮。弱荷、強荷有點像電荷，不過它們在原子外部發揮不了作用，我們在日常生活無法感受到弱荷與強荷的存在。電子和夸克之間最大不同之處，在於夸

克帶強荷，而且夸克藉由交換膠子發生交互作用，但是電子和膠子並不會發生作用。電子和夸克都具有電荷與質量，只是大小不同。我們將電子記為 e ，上夸克記為 u ，下夸克記為 d 。（關於各種基本粒子，請隨時參閱第101頁的表一。）

這些「種子」如何形成世界呢？經由交換膠子進行強交互作用，夸克先結合成中子與質子，中子有一個上夸克與兩個下夸克，質子有兩個上夸克與一個下夸克。質子和中子的外緣不完全齊整，因為膠子被夸克間的引力拉回之前，會稍微向外伸出去，結果這些探出頭的膠子，又對其他質子和中子形成吸引力。這「殘餘」的強作用力，就是約束質子與中子成為原子核的核力。

核力相當強，能夠形成許多穩定的原子核。原子核可由一個或多達九十二個質子構成，並再加上林林總總的中子數。不過，質子彼此間的排斥力會隨著質子數目而增加，如果原子核擁有超過九十二個質子，則原子核便難以保持穩定，這就是為何只有九十二種天然化學元素。

電磁力由光子媒介，將電子約束在原子核周遭，以形成原子；原子即為化學元素之母。在原子外，殘餘電磁力（類似剛剛描述的質子與中子外面的殘餘強作用力）將原子結合成分子，原子與分子便構成岩石、細胞，並打造了整個世界。這個精巧繁複、形形色色的世界，就是由這些簡單的基石創造而成的。

過去的研究總能在更小尺度下，找到物體的更小結構。構成九十二種天然化學元素的原子，並非希臘人想像中物質不可分割的基本單位，因為人們最後發現原子擁有原子核以及外圍的電子，而原子核又是由質子和中子構成，質子和中子又是膠子約束夸克所成。為什麼我們罔顧歷史教訓，而認為電子和夸克真是希臘人所謂的「原子」呢？我們怎麼知道不會再度發現它們有更小的結構？這是基於以下三點理由，使粒子理論物理學家相信我們已經到達底限了。

第一個理由很明顯，但並不是最重要的：研究者已經用盡種種方法去測試電子、夸克、W玻色子和膠子是否具有更小的結構，但截至目前為止還未有任何發現。現在探測組成的方法較過去要精細數萬倍以上，但是電子和夸克仍然只像「一點」，再也沒有其他部分了。

第二點理由，是，早先解釋原子、原子核或質子的理論，老是與實驗結果不吻合，除非我們假設它們具有更小的結構。標準模型則不同，因為標準模型是量子理論，所以可以回答作用力在更小更小的距離下如何運作。假設基本粒子果真是「一點」，而我們以小於現在實驗所能及的 10^{-18} 公尺的尺度來檢視作用力，例如再以億兆分之一的距離來檢視，則作用力有多強呢？透過計算顯示，在標準模型之下，若距離變小則交互作用力減弱；不管距離多小，標準模型並不會產生矛盾。此外，標準模型理論中不存在能提供

「次結構」尺度的參數，標準模型的完備性也使這種參數無容身之處。我剛剛說過，第一個理由並非顛撲不破，因為下個實驗可能會找到更小的結構（雖然我們並不如此認為），但若理論已經過許多測試驗證，而且能延伸適用到極小距離，這就構成了強而有力的論證基礎。

第三個理由也相當具有說服力，雖然以後會再深入詳談，但值得在此先作說明。如前所述，即使無法將作用力放在極小的尺度做實驗，我們依然可以預估作用力的表現：「如果」電子或夸克無法再分割的話，結果會是距離愈小，不同的作用力就愈相似，一直小到某個距離，作用力將不可區分。這個特質暗示了兩百年來統一作用力的企圖得以實現。如果電子和夸克具有結構，則這目標無從實現，而除非統一作用力的趨勢純屬巧合，否則「粒子再也無從分割」便由此得到強而有力的佐證。

當我們說夸克、電子、光子和其他的玻色子是真正的基本粒子時，並非說它們只能是點狀物，而不可能像是振動的弦線或類似形狀。也許就像小提琴振動發出各種音符，粒子以「弦」為基礎，發出某些振動，成為電子、上夸克、光子等。但即便如此，這些基本粒子也不會被取代的。如同兩千年前羅馬詩人盧克利修斯對科學與自然之洞見：「……構成自然萬物之基礎原子，稱曰基本粒子。」

粒子與場

牛頓的重力理論能夠成功解釋月球、拋體以及潮汐等，但是在概念上有缺漏：似乎重力能夠在瞬間對遙遠的物體產生作用，例如，月球為何知道該在何時彎向地球而非朝外太空奔去？許多人，尤其是哲學家，便因為如此而無法接受重力理論，滋生排斥心理。物理學家則從思考「為何」自然如此運作，轉變成先思考「如何」運作，所以他們跳過眼前的爭議，對牛頓定理加以發展和應用，直到兩個世紀後，才完全弄清楚真相。

科學家最初不是為解開這個問題而進行研究的，但無意中卻邁出了一大步，最終並真正解開難題。計算太陽系的運動時，所有行星間的相互影響都需要考慮在內，為了簡化運算，於是發展出一套與牛頓定律異曲同工的方法。這套方法先不計算太陽和其他行星加諸某行星上的各種作用力，以避免問題過於複雜，而是每次只考慮一個行星，想像它創造了空間的「重力場」。「重力場」定義為，若某處另有行星，則兩者間的作用力結果符合牛頓定律。取空間中的任一點，我們可以將來自各物體的力場相加，得出位於該點行星所承受之總力場。這正是典型簡化計算的好方法。

法拉第繼續扮演推手的角色，他說服物理學家將力場視為物理學上的實體，而非僅是計算工具，並首先將此概念運用到電場和磁場上。大多數人都看過白紙上的鐵粉受底

下磁條的作用，連接成串而排成一片彷彿可見的磁場。如今，我們已視電場、磁場和重力場等為實體，與石頭或人類並無分別。通常我們並不會意識到這些場的存在，但是一打開收音機，你就知道「場」無所不在。

愛因斯坦證明了「沒有其他的訊號或訊息快過光速，而電磁場和重力場的展布速度等於光速」之後，自此物理學的第二大進展快速邁開大步，雖然未立即獲得成功，但是古典物理的「超距問題」獲得解決了。接著當量子理論登場時，終於塵埃落定：首先，光子被解釋成是電磁場中的量子，科學家繼而認識到電子和所有粒子都應該被視為不可分割的量子；粒子各有其力場，而力場的作用是靠量子傳遞。今日，我們視力場為宇宙的基本成分，並且我們也會交互使用粒子和場等用語。

現代科學家在描述粒子層次的自然現象時，是以所謂「拉格朗日方程」^{①6}來表示。拉格朗日方程包括了代表所有基本粒子（電子、夸克、光子、膠子、W和Z玻色子）的量子場符號，而且僅代表基本粒子。所有組合物，如質子、原子核、原子等，都是由拉格朗日方程所描述的粒子組成的。給定拉格朗日方程，理論上量子理論就能告訴我們如何計算所有系統的行爲，不過實際上有些計算過於複雜而無法運算出來。認識拉格朗日方程，等於認識基本粒子和基本作用力。標準模型的成就正是發現我們所見的世界的拉格朗日方程。

基本粒子，還不只這些

在本章前半部，我過度簡化了一點。雖然我們觸目所及，萬物皆是由電子與上夸克、下夸克所組成，科學家卻發現其他更多粒子的存在。這些形形色色的粒子並不直接在日常生活中出現，不過卻可以在實驗中讓它們現身。我們知道其中一些粒子為何會存在，但許多粒子的存在仍是謎。接下來，我向大家介紹一下這些粒子：

反粒子：一九二八年，狄拉克^①統合量子理論與愛因斯坦的狹義相對論，用以描述電磁作用。在這過程中，他發現所得到的方程式有個令人訝異的性質：這些基本方程組的解代表了基本粒子，而狄拉克證明，如果電子是以方程組的其中一解來描述，則方程組必定會有另一個電性符號相反、質量相同的解存在。

由於電子帶負電，這新的粒子必須帶有正電荷，如果一個解存在於自然界，另一個解也一定存在，這就像是說4的平方根是 ± 2 ，因為它們的平方都是4，道理是一樣的。在這個例子中的方程式可寫為 $x^2 = 4$ ，其解為 $x = +2$ 與 $x = -2$ 。如果一個解滿足方程式，另一個解也會滿足。同樣的，如果狄拉克方程組所解出來的一個粒子存在，另一個也必須存在，我們稱這一對粒子為彼此的「反粒子」。狄拉克的結果對於所有的量子或粒子都適用，對於不帶電的粒子，如光子，它為本身的反粒子，在這種情形下，我們無

法區分正反粒子。

以理論預測新粒子的存在，這在當時還是頭一遭，而且所預測的新粒子數目還不只一個而已，而是將已知粒子的總數乘以二倍，因為所有粒子皆有對應的反粒子。這當中最神奇的並不是「反物質」的存在，而是純粹理論上臆測的新粒子，在隨後居然真的被找到了。在理論的幫助下，人類的認知能力大為提升，揭開了自然界先前不為人知的一面。在後面的章節中，我會告訴大家，超對稱又再一次預測所有粒子數量會變為雙倍。

一般大眾總誤以為反物質是離奇怪誕的，其實不然。粒子與反粒子不過是具有不同電荷的粒子而已，所有反粒子的存在也已經由實驗證實。至於這兩者中，哪一個是粒子，哪一個是反粒子，則只是約定俗成。反粒子本身和粒子一樣穩定，而且除了電荷不同外，反粒子的行為與粒子完全一樣。舉例來說，反電子（又稱為正子），與反質子會結合而形成反氫原子。然而，正子、電子具有相反的電荷，一旦它們碰上了，就會成對湮滅，形成光子對，帶走能量。因此倘若正子闖入物質世界，它立刻會碰上電子而湮滅。也因為如此，自然界中甚少正子存在。同樣的，反質子也會與質子成對湮滅，所以自然界中也甚少反質子。在本書後半部，會進一步探討為何我們的世界多為物質而少有反物質。

微子：一九三〇年代實驗顯示，一些衰變反應似乎不遵守能量守恆律，換句話說，

反應後的產物似乎帶有較少能量。鮑立^⑩提出的解釋是，額外的能量被一種看不見的粒子帶走了，這種粒子不帶電荷，而且只參與弱作用，因此會躲過偵測器的感測而帶走能量。如果這個說法為真，我們可以據此計算其他衰變粒子產物的運動，結果這些計算都與實驗吻合，因此在幾年之內，多數專家都藉由這項間接證據，相信微子的確存在。不過，一直要到幾乎三十年之後的一九五八年，科學家才直接測到微子的存在。通常我們以希臘字母 ν （讀作 nu）代表微子。

其他的夸克與輕子：科學家發現還有兩種粒子和電子十分類似，它們的質量較大，並各自擁有對應的微子，除此之外，性質也和電子十分相近。雖然我們並不知道為何它們會存在，但標準模型理論卻可以成功描述它們的行為。在粒子物理實驗中，這些各式各樣的粒子被製造出來，並向各個方向行進，由於這兩種粒子皆為不穩定粒子，在少於百萬分之一秒內就會衰變為電子、正子、微子和光子，因此它們不會跑到自然世界中，變成我們可見的事物。標準模型可以正確預測產生粒子的數量、行進方向、能量、生命期，以及其他各種特性。第一種類似電子的粒子為繃子，以希臘字母 μ （讀作 mu）表示。另一種粒子為陶子，以希臘字母 τ （讀作 tau）表示。電子、繃子、陶子以及它們所對應的微子由於行為類似，科學家通稱為「輕子」^⑪。

在夸克方面，上夸克也有另外兩個與之類似，但質量較大的粒子作陪，標準模型再

度成功預測了它們的性質。這兩種粒子分別是魅夸克 (charm quark)，以 c 來代表，以及頂夸克 (top quark)，記為 t。下夸克也一樣，有兩個與之類似而質量較大的粒子，分別稱為奇異夸克 (strange quark)，記為 s，以及底夸克 (bottom quark)，記為 b。再次強調，雖然標準模型正確描述了這些輕子、夸克的性質，理論本身卻無法告訴我們為什麼它們會存在。

通常夸克和輕子都可區分成三個所謂的「家族」，類似的組合明顯重複出現於不同的家族中。每個家族的成員可以相互對應，差別只在於質量不同。這是過去一個世紀以來，粒子物理學上最令人意外、也最不可理解的發現，通稱為「家族問題」。第一個家族的成員，組成我們所見自然界的各種物體，包括電子和上夸克、下夸克，以及電子所對應的微子——電微子。第二個家族則有緲子，它像電子但較重，另外還有與緲子對應的緲微子，以及和上夸克、下夸克類似，但較重的魅夸克、奇異夸克。第三個家族的成員則是更重的電子型粒子——陶子、陶微子，以及更重的夸克——頂夸克與底夸克。

實驗上的證據顯示，這三個「夸克與輕子家族」是僅有的三個，我們不知道為何大自然要有三個家族而非一個家族，看起來，只要第一個家族就足以構成現有的世界了。問題並不在於我們不夠聰明，以致於無法從標準模型中解釋「家族問題」，而是標準模型根本就不具有解決這個難題的基本原理。科學家只能冀望未來標準模型的延伸理論能

夠圓滿解釋。弦論的一項吸引人處，就在於它似乎有希望能解決這問題。不過，目前我們還不知道行不行得通。

希格斯玻色子：標準模型預測希格斯玻色子的存在，若實驗證明它們真的存在，標準模型就算是大功告成。希格斯玻色子的性質和種類，會告訴我們如何去拓展標準模型，舉例來說，超對稱預測希格斯粒子至少有五種之多。希格斯粒子之所以扮演這樣特別的角色，是因為它和其他所有粒子完全不同。從某方面來說，夸克與輕子其實和電子都差不了太多，它們只是帶有不同的電荷、強荷及弱荷而已。同樣的，媒介強弱作用力的粒子也都和光子差不多。然而，標準模型所預測的希格斯粒子是貨真價實的新種粒子，如果真的找到了，這預測／發現的過程，將是人類認知能力的一項輝煌成果。

在第七章我們會再回到希格斯玻色子上來。在我撰寫此書時（一九九九年末），有許多間接證據顯示，希格斯玻色子是存在的，而且質量大致上與超對稱的預測相符合。二十一世紀初，位在瑞士日內瓦的歐洲粒子物理研究中心的LEP對撞機，應該就可以直接測到希格斯玻色子。位於芝加哥西方的費米國家實驗室，若其對撞機升級後，能以足夠大的強度運轉，加上探測器運作順利，應能在五年內蒐集到足夠資料，屆時也可望探測到希格斯玻色子。不過，這些都還端賴希格斯玻色子的特性以及對撞機、偵測器的表現而定。如果希格斯玻色子真的存在，費米實驗室也可能發現希格斯玻色子具有超對

稱所預測的性質。歐洲粒子物理研究中心建造中的大型強子對撞機（LHC），預計二〇〇五年啓用，將能製造很多希格斯玻色子（當然，如果它們存在的話）。

標準模型的兩個基本原理

標準模型是建立在兩個重要的理論性原理上。第一個原理是自然律不因一些粒子的對換（interchange）而改變，我們一般以「理論在粒子對換下不變」來描述這個原理，這種不變性是一種對稱形式。例如，電子和微子，一個帶有電荷，一個不帶電，兩者質量不同，若想像在一個抽象空間（不是我們的實體空間）中，粒子以箭頭表示，也就是說，如果箭頭指向某一邊，則代表這是個電子，指向另一邊，代表這是個電微子。電荷便是箭頭方向的標記，當粒子不進行交互作用時，箭頭並不會改變指向，然而當它與其他粒子交互作用時，箭頭方向就可能改變。此外，上夸克與下夸克也屬於這種可能對換的粒子對。

方程式必須滿足粒子對換不變性，是一個很強的限制，能使理論形式定案並做出許多預測。這些預測之一便是，如果這種可對換粒子的其中一個存在於自然界，另一個也必然存在。物理學就是據此推論出魅夸克與頂夸克的存在，並在隨後證實其性質正如預測一般。

另一項根據粒子對換不變性所作出的預測是，粒子具有相同的質量，才可以互相對換，這是因為方程式本身與質量有關。技術性的計算顯示，這也就是說所有粒子（W、Z 玻色子與輕子、夸克）都必須不帶質量才行，不幸的是，這顯然不符事實。粒子具質量，因此物理學家引入了希格斯物理來解釋這項觀察。他們相信，一般粒子與希格斯玻色子的交互作用使它們不但帶有質量，更帶有不同的質量。該交互作用的特殊形式，使方程式在粒子具有不同質量下，仍得以保有對換不變性。光子、重力子與膠子不直接與希格斯玻色子作用，因此這幾種粒子不帶質量。希格斯物理的存在，對於描述真實粒子的一致理論是不可或缺的。

標準模型的粒子對換不變性是一種隱性的對稱，物理學家假設其存在，並據此作出預測，隨後獲得實驗確定。這項成功使物理學家認真考慮其他的隱對稱是否存在，費米子（fermion）—玻色子（boson）對換不變性，亦即「超對稱」的想法，便自然蘊藏而生了。（我們在本章後半段會定義費米子和玻色子。）

標準模型的第二個基本原理並非新創，而是量子理論的自然結論。即便如此，科學家還是花了幾十年的光陰，才完全瞭解，並與標準模型一起提出。第二個基本原理的敘述如下：任何粒子，以電子為例，若帶有電荷，則必定要存在一個與該粒子交互作用的外加場，才能夠建構出一套不自相矛盾的量子理論。

在電子的例子所預測的外加場，性質與我們已知的電磁場分毫不差，所以我們可以說電磁場便是理論需要的這個場。由於電磁場的量子即為光子，故根據量子理論對自然界的詮釋，必然產生的結論是：光子的存在就是電子存在的結果。因此在標準模型中，光子與電子不再是兩個湊巧會進行交互作用的粒子而已，而是有相依關係。因此，光子的存在獲得了合理的解釋。這真得歸功於標準模型，我們終於瞭解「光」是什麼。

同樣的理論也適用於強荷、弱荷上。一旦某粒子帶有強荷或弱荷，自然界必定存在行為像光子，但可分別媒介強、弱作用力的粒子。媒介弱作用力的是W玻色子及Z玻色子，而媒介強作用力的則是膠子。最早人們以這種論證方式預言這些粒子的存在，隨後在計劃中的實驗證實其存在。這項成功，更使我們對於標準模型信心大增。

實驗扮演關鍵角色

單是描述標準模型，無法使我們瞭解實驗促使理論發展、增強人們對理論正確性的信心，這段又複雜又引人入勝的歷史。實驗得到多方面的數據，如氫原子的蘭姆移位⑳、電子與微子的非彈性散射、宇稱不守恒、微子束、派子㉑衰變、W玻色子與Z玻色子的生成及衰變、魅夸克的生成等不計其數，要不是這些實驗，標準模型絕不會有今日的成功。想要與真實世界隔絕而憑空創造理論是絕不可能的事。

雖然上述這些實驗都扮演了關鍵角色，我們卻無法在篇幅之內一一介紹。進行這些實驗需要加速器物理、偵測器物理，以及電腦科技方面的新發展，以及洞察重要實驗並正確執行的能力。在本書後面的章節，我們會討論建立、檢驗超對稱所需要進行的實驗，屆時大家對於粒子實驗所扮演的角色就會有較好的瞭解。在書末「建議書目」所列的書單中，某些書籍是專門針對標準模型的實驗基礎做介紹，有興趣的讀者請參閱。

圖解標準模型——費曼圖

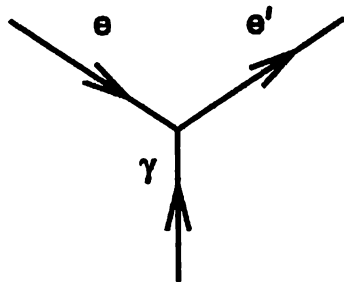
粒子的任務，就是與其他粒子進行交互作用。因此要瞭解粒子，便要瞭解它如何與其他粒子發生交互作用。

要計算各種交互作用，以及某交互作用發生的結論，是非常技術性且耗費時間的工作。一九四〇年，費曼^②發展了一套聰明的辦法，大大簡化了計算過程。他的一系列圖示，不僅本身代表了演算法則，而且有助於人們瞭解交互作用是如何發生，以及發生的頻率。這套辦法比費曼之前的計算方法簡便甚多，這是非常重要的，因為簡化的結果使物理學家得以從事原本不可能進行的複雜計算，與實驗進行比對並修正理論。或許更重要的是，有了費曼圖的幫助，物理學家就可以在黑板上或紙上瞭解及解釋粒子的行為。像費曼圖這種有助於清楚思考的創新工具，其重要性無論你如何吹捧，都不會言過其

實。在本節中，我要向各位介紹費曼圖的幾項特性，這會有助於大家在想像粒子交互作用時有個清楚圖像。我們首先討論標準模型的部分，在後面的章節中，再討論由超對稱所預測的交互作用。

大多數的基本交互作用，能以三個在時空中交互的粒子來表示。更複雜的過程則可由許多基本的交互作用組合而成。費曼圖中的箭頭指向，代表了粒子是交互作用之前的初態還是之後的終態。現在假設，我們想表示的是一個運動中的電子吸收了一個光子。一般習慣以希臘字母 γ (gamma) 代表光子，交互作用前後的電子則分別以 e 及 e' 表示。 e 右上方的一撇，表示電子在交互作用之後，可能得到或失去能量或動量，並改變行進方向。這個過程可以圖一來表示。

電子也可能在吸收了媒介弱作用力的 W 玻色子之後，轉變為電微子，這個過程可以圖二表示。



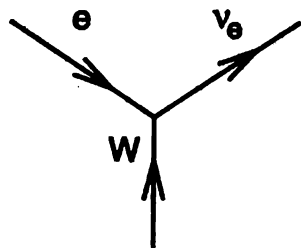
圖一

標準模型允許的所有基本交互作用，都可以這種費曼圖表示，只要選定適當的粒子種類和正確的箭頭方向即可。

除了圖一、圖二之外，標準模型允許的交互作用還包括： $u + W \rightarrow d$ ， $z \rightarrow e + e'$ 以及 $u + g \rightarrow u$ 等。並非所有的交互作用都被標準模型允許，違反電荷守恒者就不被允許。例如， $e + \gamma \rightarrow \gamma$ 在初態帶有電荷，但終態卻不帶電，所以這項交互作用不會發生。此外，一些看似合理的交互作用過程也被標準模型所禁止，例如 $\gamma + \gamma \rightarrow z$ ，或 $e + \gamma \rightarrow \mu$ 等。的確，我們從未看見這些過程在自然界中發生。

費曼訂下了以下的法則：

(A) 給定初態及終態後，填入標準模型允許的所有可能的費曼圖，這些便是連結該初態與終態的所有可能的交互作用過程。



圖二

(B) 想要得到某一過程在自然界發生的機率，就須遵循一定的程序來計算。對於較弱的交互作用（包括了所有需要以高能粒子束才能製造出來的過程），或重粒子的衰變，只要圖中的頂點（線條交會點）愈多，該過程的機率就愈小。也就是說，大多數的情形下，我們只要計算機率較高的幾種簡單圖形，就能夠知道總機率為何。

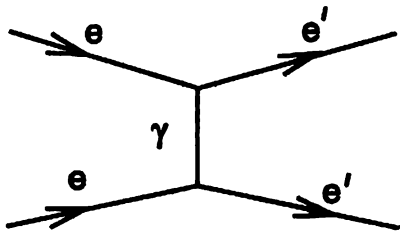
在本書中，我們不會嘗試去計算機率，讀者也不必更進一步瞭解它，然而有時我會以簡單的費曼圖來解釋交互作用。雖然費曼的法則看起來有些隨興，其實不然。他本人和其他研究人員已證明了這種圖示法完全與完整的數學理論吻合，而且簡單許多。物理研究生必須學習有系統的建構費曼圖的程序，瞭解費曼圖的蘊涵。讀者要記得的是，費曼圖不僅是用以瞭解交互作用的工具，也同時可使物理學家得以詳細計算出可觀測量的現象，包括原子核、原子、分子、生物、行星、恆星等如何形成，行為又如何。這真是令人驚嘆。

讓我們看看兩個交互作用過程的圖例，它們具有兩個或兩個以上的頂點。我們知道，兩個帶同性電荷的粒子互相接近時，它們會相斥、分開，並交換一個光子。這個過程顯示在圖三中。請注意，費曼圖僅是引導我們思考用，而非真正的交互作用圖像。在圖中，兩個電子並不全是迎頭對撞。我們可以想像時間是由圖的左方走向右方。兩個電

子靠近，交換光子（交互作用），然後分開。一個電子吸收了來自另一個電子的光子，這張圖代表的就是電磁力交互作用。

其他的交互作用力也是以類似方式進行，粒子間交換光子、W、Z 玻色子、膠子或重力子。（在此，我們可嗅到一點超越了標準模型，可能導向超對稱甚或弦論的想法，在本書後面我會向大家介紹。）力是由粒子交換而產生，所以只要粒子存在，再加上費曼圖容許粒子被發射或吸收，則像圖三這種組合圖的存在是必然的結論。換句話說，力的存在是一個很自然的結論，而非獨立的新效應。

最後，我們來看頂夸克衰變的其中一種模式，請見次頁的圖四。夸克（c、u 及 d），以及正子（ e^+ ）會被偵測器所探測，而電微子（ ν_e ）則逃逸並帶走能量。在圖中，W 與 b 夸克僅是中間態，並非終態，和圖三的光子扮演同樣角色。



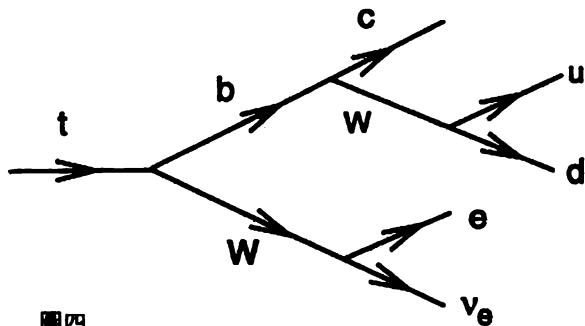
圖三

稍後，我們將會介紹包含超對稱粒子的交互作用，並以費曼圖來增進瞭解。跟隨箭頭的走向，便能理解過程。我希望這會帮助大家瞭解超伴子的生成及衰變過程。如果讀者認為費曼圖無助於理解，也不用放在心上，別看它便是。

自旋，費米子與玻色子

所有粒子都具有所謂「自旋」。就像標準模型中的其他詞彙一樣，「自旋」這個名詞只有輔助的功能，而不盡精確。最多只能把名稱本身當作是一種比擬而已。我們並不知道粒子究竟為何具有自旋，自旋的本質又是什麼，但我們卻能夠完全正確描述自旋性質，並計算自旋對物理系統的影響。

自旋是一種量子現象，一個粒子的自旋數只能是零、二分之一整數倍或整數倍的基本自旋量，而不能是其他值。在本書的範圍內，這個基本自旋量



圖四

是多少並不重要。

除此之外，給定了自旋數的粒子，還具另外一種形式的量子化現象。以自旋數為 $\frac{1}{2}$ 的粒子為例，它具有兩種取向：你可以想像是箭頭沿著某方向指向上或指向下，至於究竟沿何方向並不重要。

量子效應使粒子可自然分為兩類：費米子與玻色子。其中的原因有些技術性，不過並不難理解。首先我們要知道所有的電子都是完全一樣的，所有的光子也都完全一樣而不可區分，這對其他各種粒子也都適用。這沒什麼好奇怪的，電子是電子場的量子，而某種場的量子應該都是完全一樣的。如果只考慮單獨一個粒子的話，同種類的粒子之間不可辨別，其實不礙事；但當考慮許多粒子時，量子理論就會告訴我們，有好些意料之外的事要發生了。

自然界的量子法則如下：具有二分之一整數（ $\frac{1}{2}$ 、 $\frac{3}{2}$ ……）自旋的粒子，若是同種粒子相互對換，其（波函數）會改變正負號，而整數自旋（0、1……）者則不會。前者就稱為費米子，後者便是玻色子。夸克和輕子是費米子，而光子、膠子、W、Z等媒介作用力的粒子皆是玻色子。

對單獨粒子而言，身為玻色子或費米子並不重要，然而一群玻色子和一群費米子是完完全全不一樣的。費米子的存在，使物質具有穩定性，而所有用以媒介作用力的粒子

都是玻色子。因此通常物理學家把玻色子和費米子區隔得極為分明。但超對稱理論似乎能夠連結這毫不相干的兩種粒子，這真是令人十分驚訝的發現。

有了標準模型之後

從某個角度來說，標準模型已經達成傳統科學的目標。藉由標準模型，我們終於得以完整描述物質世界的運作，而不再有任何困擾或理論與實驗不相符的狀況。標準模型也是化學、物質科學、恆星物理以及日常現象的底層理論。不過，我要再說明一次，這並不代表科學已經走到了盡頭，因為描述許多系統的方程式仍有待解答，而且複雜系統常有出乎意料之外的性質（請參見第三章）。

有了標準模型，我們能夠更進一步探索關於整個宇宙的問題，並研究為何標準模型會以這種形式存在。許多在過去屬於哲學範疇或純為空想的問題，現在都變成物理學、天文物理學及宇宙學中的課題。在這一章結束之前，我會列出幾個這樣的例子，目的不在於向大家介紹細節，只是想大略解釋，為何許多理論物理學家相信：標準模型之外的新物理（如超對稱）已經不再遙不可及。

第一，從前面幾節中，我提到要正確描述粒子的質量，必須以很特別的方式修正標

準模型裡的粒子對換不變性，而希格斯物理成功的辦到了這一點。標準模型本身無法解釋希格斯物理，因此我們必須用到標準模型之外的物理。超對稱則可以提供所需的希格斯過程，且至目前為止，這是唯一可行的路。

第二，我曾提到，如果我們以量子理論來檢視電磁、弱作用，以及強作用力，會發現隨著尺度的減小，這些交互作用就愈來愈相近。乍看之下，這現象並沒有發生的理由，然而，在超對稱標準模型中，已足以解釋，只要尺度夠小，所有的作用力都會變得完全一樣。這個結果大大鼓舞了相信所有作用力都可統一的樂觀人士。

第三，太陽系愈外層的行星，繞日一周所需要的時間就愈長。這是四個世紀前所發現的刻卜勒定律告訴我們的。然而，當我們研究星系時卻發現，若只考慮目前可觀測到的恆星的重力，則恆星的運動並不遵守刻卜勒定律。因此，我們必須假設有大量的不可見物質（暗物質）存在，才不會違反刻卜勒定律。這和即使我們看不見月球，還是可以根據潮汐現象推論出它的存在，道理一樣。

關鍵在於，我們瞭解重力的運作。當人們把這套辦法用在比星系更大的尺度上時，才發現暗物質的數量龐大，不是標準模型粒子所能解釋的。已有許多理論企圖解釋暗物質，其中最被看好的是超對稱預測的質量最輕超伴子。我們還不知道最輕超伴子究竟是何種粒子。在第六章，我們會回到這個課題，告訴大家實驗如何揭開暗物質的真面目。

第四，人、行星、恆星都是由質子與中子所組成，而不是由它們的反粒子所組成。標準模型允許的所有交互作用，沒有一個能夠解釋如何從一個粒子與反粒子完全對稱的宇宙，演化至目前所見的不對稱景況。請注意，這是一個不知是否有答案的問題。或許，宇宙從一開始就有過剩的物質，而較少反物質。不過這個解釋在哲學意涵上並不為大多數的物理學家所接受。想像宇宙初始時，粒子與反粒子數目完全相等，也就是淨粒子數為零，這會比想像一個初始就不對稱的宇宙，要合理得多。事實上，如果標準模型以某種形式稍加推廣，確實有可能使一個完全對稱的宇宙演化出不對稱的結果。此外，某些以超對稱為基石的理論也可以推出同樣的結果。在第八章我們會再回到這個課題。

第五，不論微子是否有質量，標準模型都是一致的理論。技術上來說，微子若是具質量，標準模型可借用描述電子的方式來描述微子，也就是訴諸希格斯交互作用。然而實驗顯示，微子的質量至少比電子小上百萬倍，很難相信電子和微子會是以同樣的機制獲致質量。最近的實驗證據顯示，至少有一種微子具有極小但不為零的質量。一九七〇年代以來，理論物理學家一直絞盡腦汁給予微子質量。而自八〇年代中葉以來，所有這行的專家都同意微子非常不可能不具質量，因此他們試圖在標準模型中加入新物理，使微子很自然的具有質量。目前，超對稱在這方面的觀念表述上，是有幫助的，但仍未能扮演更關鍵的角色。

第六，我們到目前為止所列出的現象（希格斯物理、物質—反物質不對稱、微子質量，以及暗物質），都是根據實際數據所提出的，我們也希望能夠藉著標準模型的延伸理論得到解答。除此之外，我們還可以問許多「為什麼」的問題，現在終於有希望瞭解這些問題了。

為什麼基本粒子是夸克和輕子，而不是別的？夸克和輕子的本質又是什麼？為什麼在標準模型當中，電子—微子對、上夸克—下夸克對可滿足粒子對換不變性，而電子—緲子對、電子—上夸克對卻不然？把這個問題推廣：標準模型為什麼是以我們所看到的這個形式存在？（還有許多聽起來合理、漂亮的理論試圖解釋粒子物理現象，但卻沒有像標準模型一樣通過實驗的檢驗。）此外，為何自然界會有三個夸克—輕子家族？為什麼重力的量子理論會如此困難？所有的作用力真的在小尺度之下無法區分，變成同一種作用力嗎？如果這是真的，那代表我們可以將宇宙裡的各種交互作用，以一個統一的力來描述，只是這個作用力在大尺度下看起來像是幾種不同的力。

這一連串的問題可以一直繼續下去，不過以上這些已經足以代表了。這些問題到底有沒有答案，誰也不知道，不過我們可以想辦法來回答。目前為止，已有跡象顯示可能的答案，有一些訴諸超弦理論（參閱第九章）；而在每一種案例，解答都牽涉到超對稱。我們在後面的章節裡會陸續討論這些問題的可能答案。

對粒子物理不熟悉的讀者，當看到這些譬喻性名詞，如「上」、「魅」、「頂」夸克、「膠」子、「家族」、「弦」等，或許會感到莞爾（或其他反應……）。當然，這些詞彙在理論和方程式中都是有嚴謹定義的。雖然它們不出現在日常生活中，我們還是得給它們稱呼，物理學家所持的方式是，以擬人化或擬物化的方式給它們取名字，以提醒我們該粒子或交互作用在微觀世界裡扮演的角色。有些人不認同這樣看似輕浮的命名法，認為這毫無用處，其實如此命名，用意在展示我們所發現的世界新特性，凸顯我們探索大自然的新方式。

想要對標準模型進一步瞭解的讀者，請參閱我所著的《粒子花園》（*The Particle Garden*）一書。那本書對於標準模型有較深入的討論，不會太過繁瑣，也不會假定讀者已有相關知識或背景。那本書也述及了粒子物理學史、相關的實驗設施、實驗基礎，以及粒子物理與天文物理和宇宙學的關係。

至於「實驗」與「理論」在整個物理學發展歷程上扮演的角色，有個有趣的現象值得一提。粒子物理學的誕生，有人說是起源自電子的發現，有人說是肇始自幾年後粒子束在原子核研究上的使用，不論如何，這些都是一百年前的事。從那時候以至一九七〇年代標準模型的誕生，科學家總是意外發現不少理論未能解答的實驗現象，換句話說，實驗總是走在理論前頭。然而在標準模型之後，理論倒是率先解決了許多難題，並作出

驚人的正確預測。這二十多年來，實驗未曾發現出乎意料之外的現象，所有結果都在理論的預料之中！

現在我們要走出標準模型之外了，理論和實驗的關係就變得複雜起來，它們同時在發現新事物上都有斬獲。情勢改變的根本原因是，現在我們已握有標準模型，使我們能夠在新的方向上，思索更多未曾想過的問題。

【注释】

①原注：反粒子（antiparticle），每一個粒子都有對應的反粒子，也就是質量相同、但電荷相反的粒子。不帶電的粒子，如光子，則是自身的反粒子。通常，反粒子符號的記法是在對應的粒子符號上劃一橫，因此，電子 e 的反粒子（正子），記為 e^+ 。

②原注：費曼圖（Feynman diagram），物理學家費曼（Richard P. Feynman, 1918-1988，一九六五年諾貝爾物理獎得主）所發明的粒子物理學圖解，以一系列圖形表示各種可能發生的過程，並給予每個圖形發生的機率。所有的量子場論法則都可用這種方式表述，這些圖對於瞭解何種交互作用會發生，非常有用，而理論本身則決定了哪一個圖是容許發生的。

③原注：在基本粒子物理中，交互作用（interaction）與力（force）是同義詞。自然界所見到的各種現象可以五種作用力來描述：重力（gravitational force）、弱作用力（weak force）、電力（electric force）、磁力（magnetic force）、強作用力（strong force）。請見內文下一節「作用力」的敘述。這幾種作用力之中，電力與磁力可統一以電磁力（electromagnetic force）來描述；而雖然電磁力與弱作用力看起來不同，卻也可用更基本的電弱力（electroweak force）來描述；有一些跡象顯示電弱力與強作用力也有類似的統一趨勢。把所有的交互作用都統一描述，是理論物理學家夢寐以求的目標。

④原注：所有粒子皆具有自旋（spin）性質。自旋可比喻為粒子持續以定速自轉（速率可為零），雖然這不完全正確，因為粒子並沒有可占據空間的實體來自轉。量子力學要求自旋量是某個基本單位的整數倍，此基本單位即為蒲朗克常數 h 的一半。換句話說，自旋可以具有零自旋、 $h/2$ 自旋、 h 自旋等等。例如電子（electron）便具有 $h/2$ 自旋量。

⑤原注：帶有整數倍自旋（0、1、...）的粒子稱為玻色子（boson）。他們與帶半整數自旋的費米子性質不同。在粒子物理中，玻色子還代表更進一步的意義：玻色子（光子、膠子、W玻色子、Z玻色子）是電磁場、強作用場、弱作用場的量子，負責媒介夸克、輕子、與玻色子本身之間的交互作用力。希格斯玻色子是希格斯場的量子，在本書寫作之際，尚無直接證據支持希格斯玻色子的存在。

⑥原注：具有半整數倍自旋的粒子稱為費米子（fermion）。它們的性質與整數倍自旋的玻色子大不相同。夸克、輕子等物質粒子皆屬費米子。

⑦原注：有些不穩定原子核具有相當長的生命期，當這些原子核衰變時，會發射出光子、電子、正子、微子、中子甚至氦原子核等各種粒子，由於歷史因素，這種衰變被稱為放射性衰變（radioactive decay）。科學家常以這類發射出的粒子做為研究工具。

⑧原注：光子（photon）是組成光的粒子，傳遞電磁交互作用，換句話說，光子是電磁作用的規範玻色子。一旦電子存在，量子理論便要求光子存在，並正確預測其性質。

⑨編注：重力子（graviton）是將重力場量子化所得到的粒子，其靜質量為零，自旋為2，至今仍然只是理論產物，從未真正被觀測到。根據量子場論，重力子是傳遞重力的媒介粒子，正如同光子是傳遞電磁力的媒介。

⑩編注：膠子（gluon）是傳遞強交互作用的玻色子，其自旋為1，靜質量為零。正如光子源為電荷，膠子源則為色荷。由於膠子本身具有色荷（請見本章注釋⑮），因此可以發射其他膠子。根據所攜帶的色彩，膠子可分為八類，每類至少攜帶一種色彩與一種反色彩。

⑪原注：雖然中子或質子的淨強荷（色荷）為零，但在近距離之下其組成物的夸克與膠子之強作用力抵銷得並不完全。殘餘的強作用力，即核力（nuclear force），使得質子、中子相互結合形成原子核。

⑫原注：標準模型中，夸克、輕子、玻色子的交互作用容許粒子可以轉變為其他種類，此即衰變（decay）。重粒子可以特定機率轉變為較輕的粒子，我們多半稱重的粒子「衰變」為較輕的粒子。衰變是一種本質上的轉變，新產生的粒子並非躲在原來的粒子中。原來的粒子消失，而新的粒子在衰變中生成。在標準模型中，上夸克、電子、微子不會衰變，其他的費米子與

W 玻色子、Z 玻色子皆會衰變。在超伴子中，僅有最輕超伴子不會衰變。

- ⑬原注：所有粒子皆是場（field，力場）的來源，只要粒子所攜帶的某種荷值不為零，粒子便會提供該種力場。當粒子感受到其他粒子建立的場時，交互作用便發生了。我們已知的場有電磁場、弱作用場、強作用場等。所有具能量的粒子（別忘了質量亦為某種形式的能量）皆建立有重力場。在標準模型中，粒子經由與希格斯場交互作用而獲致質量，然而希格斯場的來源至今仍不清楚。

- ⑭原注：在量子理論中，構成力場的粒子就稱為量子（quanta）。簡單的說，量子是所有事物的最小單位。

- ⑮原注：每種粒子都帶有幾種不同的荷值，這些荷值決定了與其他粒子間的交互作用。在這當中，電荷（electric charge）是大家在日常生活中所熟悉的，粒子可帶有正、負電荷，或是不帶電。讀者對於色荷（color charge）與弱荷（weak charge）可能不熟悉，因為它們的效應在小於原子核大小的距離內才能彰顯。色荷又稱為強荷（strong charge）。粒子不能帶有任意的荷值，只能從允許的離散值中選一。粒子會感受多大的力，與它的荷值成正比。夸克與膠子帶有電荷，而夸克、輕子、W 玻色子、Z 玻色子則帶有弱荷。

- ⑯原注：拉格朗日方程（Lagrange's equation）的命名，在紀念最早用這種方式表述牛頓定律的義裔法國數學家拉格朗日（Joseph Louis Lagrange, 1736-1813）。拉格朗日方程是一道方程式，包含了自然界中所有基本粒子的表示，並指定其交互作用的方式。給定拉格朗日方程，物理學家便可以運用量子理論法則計算粒子的行為，確立粒子如何形成複合系統，以及基本理論的

所有結論。

⑮編注：狄拉克（Paul A. M. Dirac, 1902-1984），英國理論物理學家，創立相對論性量子力學，他展現了原子理論新而有效的形式，因而獲得一九三三年諾貝爾物理獎。

⑯編注：鮑立（Wolfgang Pauli, 1900-1958），原籍奧地利的瑞士理論物理學家，發現「不相容原理」，一九四五年諾貝爾物理獎得主。生平充滿了笑話，以自負及語言尖酸出名。

⑰編注：輕子（lepton）是具有自旋 $1/2$ 、不帶色荷，並具不同輕子數（因家族而異）的一系列粒子。輕子不參與強交互作用的粒子，目前已知共有六種，即電子與電微子（第一代輕子）、μ子與μ微子（第二代輕子）、陶子與陶微子（第三代輕子）。三代輕子與三代夸克間有微妙的對應關係，同為目前所知最「基本」的粒子。電子質量的確很小，μ子質量接近介子（一個夸克與一個反夸克組成的粒子），陶子質量則大於質子，因此輕子這名稱已不能顧名思義。

⑱編注：蘭姆移位（Lamb shift）是氫原子（或類似氫的離子）的實際能階與狄拉克的電子理論預測的能階之間的微小偏移。此為電子自旋和質子自旋處於平行和逆平行這兩個狀態之間的能量差。此偏移吻合量子電動力學原理。

⑲編注：派子（pion）是在原子核中傳遞核力（屬強交互作用力）的介子，可分為正電性、負電性與電中性三種，質量約為電子的三百倍，是最輕的強子。由於質量最輕，因此是對撞機中最常產生的強子，是最早被發現的一族介子。又，參與強交互作用的粒子統稱為強子（hadron），分為重子（baryon）與介子（meson）兩大類。重子是三個夸克組成的費米子，例如質子、中子；介子是一正一反兩夸克組成的玻色子。

②編注：費曼（Richard P. Feynman, 1918-1988），美國物理學家，以費曼圖及路徑積分法詮釋量子電動力學，一九六五年諾貝爾物理獎得主。為人幽默風趣，對科學教育與物理學有獨到的見解，請見〈別開了，費曼先生〉、〈你管別人怎麼想〉、〈物理之美〉、〈這個不科學的年代〉、〈費曼的六堂 Easy 物理課〉、〈費曼的六堂 Easy 相對論〉、〈費曼的主張〉等書（以上皆由天下文化出版）。

第三章

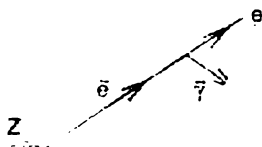
有效理論

有效理論彼此息息相關：

一個有效理論是另一個有效理論的基石，

如此一路下去，直到終極有效理論出現為止。

每個層次的有效理論都可解釋該層次的統合結構。



欲瞭解物理學的某部分，卻要求先搞懂所有物理學，到頭來我們可能一無所獲。如果原子的性質與其先前的歷史有關，或因位於恆星、人體或實驗室裡而有所變異，我們可能到現在都還摸不清楚原子的特性。在生物學或生態學等領域中，整個系統受到許多因素影響，連人類行為也牽繫於人際互動，因此研究進展相對上比較緩慢。但是，在研究物理學時，可將幾乎互不影響的部分分開來研究。如果我們的目標在於瞭解物質世界，「分開式」的方法還頂有效的。

物理學是最簡單的科學，這也就是為何它的發展早於其他科學又成果豐碩的原因之一。（至於其他的理由還包括，實驗時可以逐次調整單一變數，其他變數則維持不變，使實驗相對變得容易；縱使意義未明之前，要改進實驗也不困難；另外，實驗結果常能以簡單的數學式表示，有助於科學家推導出可檢驗的預測等等。）

一旦我們瞭解各個部分，便能融會貫通、加以統合，這是根據我們對自然行為的真正瞭解，而非來自於哲學臆測。物理學史可謂是藉由技術和知識所及，先瞭解各個部分，再把所有已知的部分繼續合成一個整體。今日的物理學，可說是已經進展到這個過程的高潮：研究重心集中於統整粒子間所有的交互作用。這真是刺激大腦、令人興奮的時刻！

近年來物理學家對於這個過程的瞭解漸深，並加以系統化。現代這套統整各理論關

係的方法，行話便稱做是「有效理論」①法。這個稍微帶點專業的術語，在本章和以後的章節會用得上。也有人稱這個方法為「化約」②，不過，化約對於不同的人有不同的意義和用法，所以我不打算採用。對物理學家而言，所謂的化約，即謂先理解各領域，再統合為一。

不同尺度下的有效理論

組織有效理論最佳之道，是先用特定的有效理論來研究某特定尺度的結構，再一一統合各尺度的有效理論。

現在，我們先以極大的尺度來想像宇宙，尺度大到我們的太陽與所有恆星都成了極小的物體。在這個宇宙級尺度的有效理論下，星球受重力吸引而匯聚成星系，星系再彼此吸引而成為星系團。整個宇宙除了均勻的擴張之外，受到重力作用，所有的物體也都在運動。在這個尺度下，重力成為唯一關鍵的作用力，我們可以用簡單的牛頓定律描述運動（由量子理論引入的修正極小，可以忽略不計）；可以瞭解恆星、行星和星系如何形成、大小如何、在宇宙的分布狀況如何。至於構成星體的粒子是否是由夸克組成，無關緊要；而在原子核之中，有多少作用力也不重要。

以大尺度看宇宙，我們可不管宇宙的成分，只在意其中的質量和能量。因為不計較

許多細節，所以儘管人類不瞭解恆星如何發光，或質子是否由夸克構成，宇宙學仍然可以不斷發展。例如，我們可以從天文資料中，推知暗物質的存在，但假使暗物質是由粒子構成，我們就無法從天文學或宇宙學中得知究竟屬於何種粒子，因為宇宙的尺度過大，無法區辨粒子的特性如質量和電荷，因此無從區分粒子。

接下來請考慮如恆星大小的尺度，我們可以研究恆星如何形成、如何獲得能量、可以發光多久。也就是說，我們能夠找出關於恆星的有效理論，此時，可以忽略恆星是否在星系中，忽略是否有頂夸克或人類存在。

現在，我們以更小的距離來研究物理學，例如以人類大小的尺寸來研究。重力使人類留在地球上，但是電磁力對我們卻更重要，因為人類的知覺全部來自电磁力的力學和化學作用：光線中的光子和人類眼睛中的電子作用，接著再由電子訊號傳到腦子裡；觸覺的產生是因為壓力作用在皮膚細胞上，再由電子訊號傳到大腦；聽覺始於空氣分子撞擊鼓膜，也是電磁力作用的一種；摩擦力攸關人類的移動、靜止，也是透過原子間电磁力的作用。

想要研究人類尺寸的物理學，我們不需要知道強作用力或弱作用力，或是與星系相關的作用力。我們知道太陽照耀地球，提供人類食物以及多數的能量，但我們不需要知道太陽是如何發光發熱的。在這個例子當中，一個有效理論（恆星物理）的現象以非常

特定的方式影響另一個有效理論：除了太陽能的輸入，我們可視地球為一個封閉的系統；從地球的有效理論觀點來看，太陽如何產生能量與地球無關。

現在請考慮原子尺度，我們將會見識到有效理論的強大功能。要使用原子的基本方程式，必須先輸入一些資料，基本上是某些電子的特性，如質量、電荷、自旋；如果要描述元素週期表，也必須輸入每一個原子核的特性。但是，描述原子無須考慮恆星、星系或人類是否存在，也不必管原子核是否由質子與中子構成，更不必理會質子是否由夸克所組成。

有效理論層層相依

且不急於討論更小的尺度，現在是個很好的時機，停下來深入思考有效理論。

當我們對原子有個暫時的理論時，會想要試試它的預測是否正確，以便測定它是否能解釋已知的現象。預測原子生命期、預測原子所發射的光子能量、或是預測原子大小，這些都依資料（電子及原子核的質量、電荷、自旋等資料）輸入的多寡而定。不管是哪種有效理論，都會有類似的參數待輸入，否則的話，我們只能求出方程式的通解，卻無法以數值來評價結果，以致無法檢驗理論是否能做有效的預測，更不用說判斷理論是否正確了。舉個例子，理論預測氫原子的半徑是 $\hbar^2/m_e e^2$ （ $\hbar$ 是蒲郎克常數， m_e 是電子

質量， e 是電子的電荷量），除非你已知道質量、電荷量和蒲郎克常數（這些數據倒是在一百年前就測量出來了），否則即便測量得氫原子的大小，我們也無從檢驗理論是否正確。

現在我們要強調有效理論很重要的一個面向。當探討到原子核的有效理論時，我們希望能夠計算原子核的質量、自旋和電荷，這些參數是由這層次的有效理論演算得知的。當探討到更高層次（原子）時，以上的參數便成了輸入值；這些輸入的參數只要能測量即可，不必管它們是否已在原子核的有效理論中得到理解。同樣的，電子是很重要的基本粒子，我們希望有朝一日基本理論如弦論能計算電子的電荷與質量，但是在原子物理學的有效理論之下，能否計算或是能否瞭解，都不是我們關心的問題，我們只要測量其值即可。

早在二十世紀初，電子的質量就已經測出來，但人們不懂為何是這個數值。現在，電子的質量可輸入任何與電子有關的有效理論中。每個有效理論都有一些參數，它們是給定值，而非問題本身。以原子的有效理論為例，電子的質量就是給定值。

如果一個理論有輸入值，它便是一個有效理論。從這觀點來看，粒子物理的目標就在於找到一個以最小尺度來研究粒子的終極理論，它不需要輸入任何參數來計算其預測。終極理論不會滿足於只輸入電子質量，終極理論必須以基本原理計算出電子質量，

並且解釋為什麼會是這樣的數值。

有效理論彼此息息相關：一個有效理論是另一個有效理論的基石，如此一路下去，直到終極有效理論出現為止。每個層次的有效理論都可解釋該層次的統合結構，例如恆星、原子、原子核和質子。以恆星的有效理論而言，恆星是由重力結合成的一團原子核和電子，但是就宇宙學的有效理論來說，恆星不過是以質量和亮度表現的輸入值。再來看原子核的有效理論，原子核是中子和質子結合的產物，但就原子的有效理論而言，原子核僅是「一點」輸入值。

突現的複雜特性

在有效理論中做為輸入值的系統和結構，往往能夠在更小尺度的有效理論下推算出來，且予以解釋。可以說，已知的有效理論能夠以更小尺度的有效理論來解釋，並且從中獲取輸入值。

狄拉克表示，他統一狹義相對論和量子理論所獲得的方程式，能夠解釋電子和原子核的交互作用，也解釋了所有的化學。狄拉克的說法確實有道理，因為狄拉克方程式將所有電子和原子核的參數計入，大體上是可以解釋全部的化學變化。不過，狄拉克也不完全對，因為單靠狄拉克的方程式，無法計算出分子的特性、結構，或是如何組合我們

所要的新分子。狄拉克的方程式太複雜了，根本無法求解。比如說，從狄拉克方程式中，無法推測得知水是溼的。

每個有效理論都會發現新規律，從中冒出來的性質往往是預測不到的，通常科學家稱之為「突現（emergent）特性」。生命正是具備了突現特性。物理學能夠告訴我們分子會發生以及不會發生什麼事，特別的是，物理學也能告訴我們哪些星球因為環境過於惡劣不會出現生命，但是物理學不能保證在條件適合的星球上會出現生命，儘管冒出生命的機會還頂高的。

基始理論

我們也可以換個角度，以「瞭解的層次」來分析有效理論。有效理論對物理的瞭解是在「如何」的層次，換句話說，它描述物體「如何」運作，當提高到大尺度的有效理論時，小尺度的有效理論便能夠解釋輸入值，闡明「為何」事物如此運作。例如，當核物理描述原子核的特性時，以質子、電荷、自旋、質量和磁性為已知的輸入值，但無法提出解釋。而小尺度的標準模型能夠提供解釋，並且能夠以夸克（由膠子結合而成）計算出質子的特性。

然而，奇特的是，基本上所有科學領域如化學、材料的物理、地球科學或生物學等

等，因為人們可以不斷找到新系統和新變化來學習研究，本質上就不會有終結的時候。不過，粒子物理和宇宙學不同於一般學科，如果我們能找到統治宇宙的基本定律並且加以瞭解後，得到的就是最終的答案，而這兩個研究領域也就到了盡頭。

在探討過有效理論的意義後，現在回到較小尺度上，我們可以透過原子核、質子、中子等有效理論，先瞭解原子，再進一步探討夸克和輕子。更重要的是，當我們跨越不同層次，如躍進到更小尺度而發現新結構時，曾經適用的有效理論可能便無效了，例如，我們在質子內部可以發現夸克，因此若不瞭解夸克和其交互作用，則也無從建立質子理論了。

若想更深入物質內部，就需要以實際數值記錄距離尺度了。因為涵蓋尺度很廣，我們得用到10的乘幕（請記住每一次方都是十的倍數），好比¹10是一角，²10是一分錢，而³10則是一千元。有兩個尺度很適合做紀錄，一是公尺，恰巧是人類身高的尺度，另一是蒲郎克長度，這是在紀念蒲郎克^③的貢獻：蒲郎克在一八九九年首開量子理論研究後，便引進這個尺度。蒲郎克長度相當小，稍後大家能更清楚瞭解到。

人類的尺度大約是一兩公尺，或說是³⁵10蒲郎克長度。（此處，所有的分析只取大約值，所以不用理會尺度究竟指的是系統的長度、高度還是半徑；我們在意的僅是數量級，也就是10的幾次方，並不計較是否差個兩倍。）原子的半徑大約是¹⁰10公尺，或²⁵10

蒲郎克長度。質子比原子小十萬倍，大約是¹⁵10公尺，或²⁰10蒲郎克長度。目前，大多數的粒子物理學家期待，若能在一個蒲郎克長度（³⁵10公尺，在小數點後有三十四個0再接一個1）的尺度下觀看，夸克、輕子、光子、W、Z和膠子都呈現似弦的結構，在比蒲郎克長度大的尺度下，它們可視為點狀。

應用本章的術語，我們可以將標準模型想成是：夸克和輕子在¹⁷10公尺，或¹⁸10蒲郎克長度下的有效理論，約莫比質子和中子小一百倍。有時候，我們把這個尺度稱做「對撞尺度」，因為它所對應的能量約莫與對撞機實驗類似。

粒子物理學的目標是找到適用自然世界的終極理論，該稱做什麼呢？有人提出「萬有理論」（theory of everything），但是這個名字會導致誤解，因為它並非在講天氣、星體、心理學和宇宙間萬事萬物無所不包的理論。「終極理論」是較好的名稱，不過當我首次看見這個名字時，我誤解成是一連串互相取代的理論中的最後一個理論，彷彿之前所有的理論都該被棄置一般。

事實上，所有的有效理論是同時並存的，也都可以用來描述大自然的一部分，因此，我想另外選個不一樣的名字「基始理論」（primary theory），意指此理論是透過一連串愈來愈小尺度的有效理論而獲致的。基始理論是用一個蒲郎克長度（或³⁵10公尺）來描述大自然。至於我們要怎樣由標準模型航越層層尺度，到達一蒲郎克長度呢？

超對稱也是有效理論

如果大自然也是超對稱的，我們所能獲得的犒賞之一，便是實現航越層層尺度的旅程。超對稱理論也是有效理論，它可說是能將我們從標準模型帶領至基始理論（約一蒲郎克長度）的倒數第二個有效理論。

超對稱理論屬於有效理論，是因為它仍然需要輸入一些參數，如粒子的質量和交互作用強度等，這些輸入值應該能由接近蒲郎克尺度的理論，如弦論所預測。本質上，超對稱的標準模型將可做為在¹⁷ 10^{-17} 或¹⁸ 10^{-18} 公尺的有效理論。不過，在接近蒲郎克尺度下，超對稱標準模型仍然可做為有效理論，它獨特的性質容許它涵蓋大範圍，而不像一般的有效理論在更小的距離下即豎起白旗。

在過去，只要是科技發展的進程足以支持更深一層的研究，我們就能夠做實驗，追求突破。但是蒲郎克長度太小了，在這種尺度下，永遠不可能直接進行實驗！不光是目前的科技和經費辦不到，即使發明更高能的加速器也無法解決問題。因為對撞機需要把能量集中在比欲研究的尺度更小的範圍內，這會遭遇到自然的限制。

幸好，仍有許多方法來測試蒲郎克尺度的物理學（見第十章），目前也已經有一些間接的方法可進行研究。不過，超對稱理論將讓我們增加許多系統性的測試機會，使得

我們能夠對蒲郎克長度下的情況作預測，並且針對未來幾年對撞機所能達成的¹⁸ 10公尺下的物理性質探究，預作計算。超對稱理論也能根據對撞機取得的數據，計算蒲郎克長度下會出現何種理論。藉由超對稱理論，我們可以測試弦論（見第九章）或是研究基始理論的形態，否則，我們將會無所適從。這個「搞賞」並不能保證大自然真的是超對稱的，不過，它的確能激勵我們研究理論並且不斷實驗。

蒲郎克尺度下的物理學

當我們描述大自然的某部分時，對於計數的單位，例如公尺、秒、公斤等，必須要確實。在美國著名天文學家、科普作家薩根（Carl Sagan, 1934-1996）的小說《接觸未來》（Contact）中，來自外星生物的訊號被偵測到，指示人類如何製造傳輸機。故事中，科學家和官員有一段對話：

「不要問我為什麼需要兩噸鉀元素。沒有人猜得到。」

「這不是我想問的。我只想知道他們怎麼告訴你一噸是多少。」

「他們用蒲郎克質量計算。一蒲郎克質量是……」

「夠了，夠了。全宇宙的物理學家都知道，對不對？只是我沒聽過。」

每一個有效理論都有自然的單位系統，可用以簡單描述現象，而不必訴諸可笑的天

文數字。如果只因爲基始理論以蒲郎克長度爲單位，便硬要以蒲郎克長度來丈量教室的長寬高，還真是傻氣。

再以原子的單位爲例，原子的半徑可以用電子性質與蒲郎克常數 h 來表達， h 可做爲所有量子的尺度，它也是量子理論最基本的常數。將電子的電荷記爲 e ，電子的質量記爲 m_e ，最簡單的氫原子其半徑 R 即等於 $\frac{h^2}{2e^2m_e}$ ，原子大小全由這些輸入值而決定，其他的都無關緊要，像原子核不過是位在中央的小不點。一旦求得 R ，我們就可以用 R 來表示所有原子的大小，不需要再輸入 h 或其他電子性質的資料， R 即成爲原子大小的自然單位。原子的電子數目不同，原子的大小也就不同，例如半徑是一·二 R 或二·四 R ，但範圍不會超過 R 的數倍。在原子物理學中， R 是已知參數；或許有一天，我們可以用弦論計算出 e 與 m_e ，不過原子物理學終究無法計算出來。

以上的分析讓我們受益良多。因爲，用 R 來表達原子大小，具有重大意義，表示本質上原子大小是共通、普適的物理量；若給定了基本的物理量，如蒲郎克常數、電子質量和電荷，則宇宙間所有原子的大小都決定了。再者，山巒、動植物都是由原子構成，其大小也多由原子大小和電磁力、重力來決定。將原子集成基因和細胞，進而演化出俯仰於天地間的生命，需要龐大數目的細胞；若要擁有做決策的大腦，更需要夠多的神經元做複雜的連結，而這也需要不小的規模。這些構造的體積總是有個下限，欲小不

能，原因在於原子大小已經由半徑 R 決定了，原子可沒辦法再縮小。因此，無論在宇宙哪個角落，像蝴蝶一般大小的生物都是無法作複雜思考的。

假設我們現在已經發現了基始理論，爲了展現成果，必須要用適合的單位來表達預測和解釋。然而，應該用何種單位呢？我們希望基始理論的自然單位也具有普適性，與宇宙是否有人類或星體存在無關。

目前僅有一種方法能得出普適單位，因爲只有三個自然常數對宇宙中所有粒子和其交互作用均能適用，就是蒲郎克常數 h 、光速 c ，以及牛頓常數 G （測量重力強度）。因爲愛因斯坦證明質量與能量可以互相轉換，而重力與系統內的能量多寡成正比，所以宇宙中的萬物都能感受到重力。事實上，運用 h 、 c 、 G 三個數值，有可能建立長度、時間、能量等等的普適單位，所以我們希望基始理論也能以 h 、 c 、 G 來表達。

蒲郎克長度是 $(hG/c^3)^{1/2}$ ，約等於 10^{-35} 公尺；蒲郎克時間是 $(hG/c^5)^{1/2}$ ，大約等於 10^{-44} 秒；蒲郎克質量是 $(hc/G)^{1/2}$ ，大約是 10^{-8} 公斤。蒲郎克長度與蒲郎克時間非常小，不過，蒲郎克質量（與能量等效）對粒子而言是巨大的。

蒲郎克完全瞭解蒲郎克單位的普適性，他在自己的著作《熱輻射論》中寫道：

目前所使用的單位系統，皆是因應偶發環境而起，彷彿是系統本身挑選好的單位。

只能滿足特定需求，不具普遍性，一旦時間地點不同，就失去用處了。目前我們所使用的長度、時間單位，都是依照地球的大小和運動而設定……相對的，有件事值得一提：現在已經有方法來重建長度、質量和時間單位……它們與物體或物質無關，不論在何時或何種環境下必然維持其意義，也不因是否為人類或外星生物而有所差別，所以這些單位可稱為「自然單位」……係利用常數 h 、真空光速 c 和重力常數 G 來組成，只要重力定律和真空光速（以及量子理論）為真，這些數值自然為真。所以不管是哪一種生物用差異極大的方法測試，這些數值依然恆常不變。

在蒲郎克的時代，量子理論發展尚在起步、尚未完全，所以我加注了括號〔〕。

在符合量子力學描述以及萬有引力存在的世界中，蒲郎克長度和蒲郎克時間是人們所能理解的最小長度與最短時間。其中的道理有趣又不難理解，不過，我們得先談談黑洞的定義，才能解釋得清楚。

基本上，黑洞的概念很簡單，設想在星球上要發射火箭，必須要給火箭足夠的速度，才能脫離星球的重力吸引，發射到太空裡。一旦星球的質量愈大，則火箭脫離的速度也必須增加，但是若星球的質量大到需要超越光速才能脫離的程度時，火箭肯定是無法脫離了，因為所有速度不可能快過光速，所以，不但是火箭，甚至連星球上的任何物

體，都被困住了。因為光也會感受到重力，所以連光束也困住了。又因為重力會隨著距離縮減而增強，若將星球的巨大質量局限在半徑很小的球體內，星球上的物體就更難脫離了。所以黑洞的成立條件有二：質量多寡和球體大小。

有趣的是，如果將具有蒲郎克能量的物體，放進半徑為蒲郎克長度的球形空間中，黑洞便誕生了！這個空間無法細分，也無法以測量獲取資訊，換句話說，蒲郎克長度是最小的空間尺度。此外，距離等於速度乘以時間，而速度的極限是光速，因此若可定義最小距離，即可定義最小時間（即蒲郎克時間）。

從之前的分析，我們知道由基本常數 h 、 c 、 G 構成的蒲郎克尺度，可做為描述基始理論的自然單位。現在，我們又找到第二個理由，支持蒲郎克尺度為基始理論的距離尺度：因為不可能有更小的距離或時間尺度了。而且除了採用蒲郎克時間之外，我們無法更精確的區分事件發生的時間，甚至先後順序。

第三個論點也很有趣。兩物體間的重力與兩者能量成正比，但隨著兩者距離的減少而增加。以兩個質子為例，通常兩者間的排斥力會大於吸引力，但是若質子的能量增加到蒲郎克能量，則兩者間的重力幾乎相當於兩者間的電力。在蒲郎克尺度下，所有作用力的強度並無軒輊，不像平日天差地遠，因此我們預期在蒲郎克尺度下，重力與其他作用力終將統一，這也是我們對基始理論的期許。

本章已逐步將觀念從有效理論推導至蒲郎克尺度。不同的有效理論，適用於不同的距離尺度，統一作用力的基始理論則能適用最小尺度——蒲郎克尺度。當然，這些推論尚未獲得證明，不過，蒲郎克尺度小歸小，但並非是人類天馬行空毫無根據的想像。有的讀者可能會想起設計家埃姆斯夫婦（Charles and Ray Eames）的書籍及影片《十的威力》，它從最大的宇宙距離開始，以每次小十倍的照片呈現宇宙。埃姆斯夫婦的作品發表的時代，標準模型尚屬蘊釀期，人們仍無法想像比質子小的距離，而現在標準模型已經帶領我們到達比質子小一千倍的距離。從宇宙到標準模型，相差了十的四十六次方，從標準模型到蒲郎克尺度，相差約十的十六次方，如此看來，成功似乎不遠了。

有效理論取代重整化

這裡要提個題外話，探討一個有趣的觀點：有效理論能夠解釋並取代粒子物理的一個老問題。熟悉粒子物理發展的讀者，或是曾看過以前研究資料的人，可能會對這一小節有興趣。

從一九三〇年代到一九五〇年代，某些粒子交互作用理論的運算會產生無限大的解，科學家於是發展了一套「重整化」（renormalization）的過程來解決這個問題。雖然這個過程其來有自，且計算結果正確，但在觀念上卻顯得薄弱。若以有效理論的眼光來

看，重整化是可以容忍的，因為在超出適用範圍的更小距離或更大能量下，任何有效理論本來就會瓦解。重整化可視為更小距離的理論參數（如質量、電荷）輸入的過程，當研究尺度進展到更小距離或更大能量時，可預期有效理論都必須再一次重整化（這不算問題或是理論失敗了）。然而，基始理論已是終極理論了，若基始理論出現重整化或輸入值，那可是不能容忍的事。

人類尺度

自從哥白尼指出地球並非宇宙中心以來，對於認識世界，人類已領悟到「跨過表相、尋求證據」。人們也瞭解到：俯仰天地，萬物無異；人如星土，源生原子；生物皆自細胞演化而來，下意識影響人類行止，而地球不過是星系裡千億星球之一。

我們也已經學習到：自然法則（量子理論和狹義相對論）並不是常人生活所能體會；自然律具有對稱性（如標準模型的粒子對換對稱性），雖隱匿難見，卻相當重要；甚至，世界或許不只有三維空間呢（請見附錄D）！

現在，我們必須體認到，隱匿未知的自然律可能從完全不同於人類尺度的地方冒出來，而我們必須學會如何發掘。

超對稱，可能就是大自然隱而未現的一個面向吧。

表一 基本粒子

費米子 (具有半整數自旋的粒子)				
	6種輕子		6種夸克	
第一家族	電子 e 質量=1/1836 電荷=-1 強荷=0 弱荷≠0 自旋=1/2	微中子 ν_e 質量<10 ⁻⁶ 電荷=0 強荷=0 弱荷≠0 自旋=1/2	上夸克 u 質量=1/235 電荷=+2/3 強荷≠0 弱荷≠0 自旋=1/2	下夸克 d 質量=1/135 電荷=-1/3 強荷≠0 弱荷≠0 自旋=1/2
第二家族	渺子 μ 質量=1/9 電荷=-1 強荷=0 弱荷≠0 自旋=1/2	渺中子 ν_μ 質量<1/3500 電荷=0 強荷=0 弱荷≠0 自旋=1/2	魅夸克 c 質量=1.6 電荷=+2/3 強荷≠0 弱荷≠0 自旋=1/2	奇異夸克 s 質量=1/6 電荷=-1/3 強荷≠0 弱荷≠0 自旋=1/2
第三家族	陶子 τ 質量=1.9 電荷=-1 強荷=0 弱荷≠0 自旋=1/2	陶中子 ν_τ 質量<1/30 電荷=0 強荷=0 弱荷≠0 自旋=1/2	頂夸克 t 質量=165 電荷=+2/3 強荷≠0 弱荷≠0 自旋=1/2	底夸克 b 質量=5.2 電荷=-1/3 強荷≠0 弱荷≠0 自旋=1/2
玻色子 (具有整數自旋的粒子)				
電磁場的量子	強作用場的量子	弱作用場的量子		希格斯場的量子
光子 γ 質量=0 電荷=0 強荷=0 弱荷=0 自旋=1	膠子 g 質量=0 電荷=0 強荷≠0 弱荷=0 自旋=1	W [±] 玻色子 質量=85 電荷=±1 強荷=0 弱荷≠0 自旋=1	Z玻色子 質量=97 電荷=0 強荷=0 弱荷≠0 自旋=1	希格斯玻色子 質量=65~160 電荷=0 強荷=0 弱荷≠0 自旋=0

說明：1. 表中各種粒子的質量，是與質子質量的比值。例如電子的質量是質子質量的 1/1836。

2. 電子、微子（不帶電荷）藉發射或吸收W玻色子而互相轉換。
3. 參與強交互作用的粒子統稱強子（hadron），分為重子（baryon）與介子（meson）兩大類，前者是三個夸克組成的費米子，例如質子、中子，後者是一正一反兩夸克組成的玻色子。
4. 重力場的量子是重力子，質量=0，電荷=0，強荷=0，弱荷=0，自旋=2。
5. 光子、膠子、重力子不與希格斯玻色子交互作用，故不帶質量。

【注釋】

①原注：物質世界的每一部分，皆可由于理論來描述。這些子理論即為有效理論（effective theory）。各具有固定的距離尺度或能量尺度。在某一個有效理論的架構下進行研究，可以忽略世界上其餘部分對整個系統造成的影響（通常這些影響僅以幾個輸入參數便可充分描述）。除了終極理論之外，我們用來描述物質世界各個部分的正確理論，都是有效理論。

②原注：化約（reduction）是研究大自然的方法之一，是將物質細分，看看它是由什麼構成，並將重點集中在微觀過程上。這個方法十分有效，使我們建立了相當完整的大自然圖像。如果可能的話，科學家也會在次領域徹底瞭解之後，再把它們統合起來。近年來在粒子物理方面，統合已經漸趨成功。對物理學家來說，化約法也包括統合的過程。

③編注：蒲郎克（Max Planck, 1858-1947），量子理論的開山鼻祖，一九一八年諾貝爾物理獎得主。物理學上有許多重要名詞，都以蒲郎克為名，例如蒲郎克常數、蒲郎克長度、蒲郎克時刻、蒲郎克溫度。

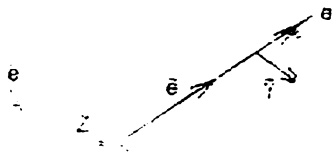
第四章 超對稱

如果世界不是超對稱的，

則我們便失去了可與蒲郎克尺度聯繫的唯一途徑。

反之，若世界是超對稱的，

我們能表述基始理論並加以測試的機會便大大增加。



經過前三章的基本說明之後，我們終於可以來看看超對稱究竟是什麼了。現在我們知道在標準模型所描述的世界中，有兩類不同的粒子：

(一) 物質的基本組成：夸克與輕子，此類粒子皆為費米子。

(二) 媒介交互作用的粒子：光子、膠子、W、Z 粒子及重力子，皆為玻色子。

不論是在凝體物理、原子物理、核物理，或標準模型當中，科學家對費米子與玻色子的處理方式都大不相同。

超對稱是什麼？

超對稱的想法或假設，是說在最終的基始理論當中，如果以適當的方式將費米子代換為玻色子，或是玻色子代換為費米子時，描述粒子的方程式仍然維持不變，即便在標準模型和量子理論的表述中，費米子和玻色子有很明顯的差異。當然這裡所謂的代換，是發生在方程式而非真實世界中。

從現存描述大自然的理論延伸出來的想法，一旦提出來後，總要經過重重關卡的驗證，才能確定是否為真。新想法必須和量子理論、狹義相對論並行不悖，而且不能改變已通過實驗測試的標準模型預測。

由於費米子或玻色子的性質是從粒子自旋推導出來的，而粒子的自旋與量子理論和

狹義相對論有關，且這兩者的方程式都牽涉了時間與空間，因此超對稱的理論除了牽涉到費米子與玻色子的代換之外，也必須包含對時空的適當處理。我們在依照這些準則寫下超對稱理論時，居然能避免與許多已經建立的結果互相違背，這是很值得注意的事。

讀者可能覺得這沒什麼好大驚小怪的。誰管起始理論是否具有費米子與玻色子對換的不變性？好吧，就算這和相對論性量子理論可以並行不悖，頗有意思，但那又怎麼樣呢？許多物理學家一開始也是這麼覺得。超對稱理論在技術上十分美麗，所以理論物理學家很狂熱的加以研究；然而這也招致了「還找不到問題的答案」之譏。我本身之所以進入這個領域，是因為在一九七〇年代，我在許多演講中提出「要如何才能知道自然界是否為超對稱」的問題。我所得到的答案多半是，還沒有人認真想過這個問題。由於這個理論太漂亮了，我當時就強烈感覺到用實驗加以檢驗的重要性。直到現在我還是在這麼覺得。

我的同事達夫（Michael Duff）回憶他年輕時在倫敦國王學院任講師時，所遇到的兩件事。一九七九年，該校的理論物理小組申請研究經費以聘請博士後研究員，雖然最後經費獲得核發，但附帶條件是：經費不得用在超對稱的研究上。幾年之後，達夫申請補助參與霍金^①在劍橋所辦的超重力研討會時，遭到拒絕。理由是，這種研究並不屬於粒子物理理論的範疇。

超對稱可能解開的謎題

雖然超對稱的確有令人振奮之處，但這點在最初並不明確。這和超對稱在科學史上與眾不同的起源有關。包括標準模型在內的理論概念，多半是爲了解釋所觀測到的自然運作規律，或是解決現有理論所遭遇到的困難及矛盾，而提出的。超對稱則是在研究某個特定模型（空間維度小於三）的性質時，偶然注意到的。當初，科學家只因爲這些模型本身有趣而去研究，並沒有特別目的。換言之，超對稱並不是爲了解決理論矛盾或實驗難題而量身訂作的。

令人注目的是，在理論物理學家經過十年仔細研究，並充分瞭解這個理論後，他們發現超對稱可以用來解決許多粒子物理學中的重要謎題，或是提供新的思考方向。超對稱本身並不是設計來解決這些問題的，但它居然做到了。對許多物理學家來說，這強烈暗示超對稱是自然界的一部分。

不是設計來解決問題的概念，卻在後來被發現可用來解決重要問題，這在物理學發展史上是絕無僅有的。

在接下來的幾章中，我們會探討這些重要的謎題以及超對稱的解釋。在此我先將這些謎題列出，並加上簡短的解釋，替超對稱在各個方面的重要影響作個導言。我使用的

「謎題」這個字眼，和偵探小說中的「謎題」一樣，也就是說，我們將在本書結束前將謎底揭曉。看了接下來幾段文字，讀者應該不難理解，為何許多物理學家費心研究超對稱理論、或是用實驗加以檢驗，也能夠瞭解為何在沒有任何直接證據支持下，就有上萬篇有關超對稱的論文發表在期刊上。

● 謎題一：關於希格斯物理

爲了將粒子質量加入標準模型中，物理學家假設了希格斯場的存在。他們同時也假設希格斯場的交互作用是以非常特別、甚至有點神奇的方式進行。對許多物理學家來說，希格斯物理是標準模型中很難解的一環：在技術上雖然解決了所欲解決的問題，但本身卻在概念上難以令人接受，在實驗上又難以檢驗。

由於標準模型無法在不自相矛盾的情形下，圓滿解釋質量問題的希格斯交互作用，科學家相信標準模型之外一定有新的物理來提供希格斯場。到了一九八二年，幾個理論物理學家發現，超對稱標準模型可對希格斯物理的來源提供非常簡潔的物理解釋。對許多物理學家來說，這項發現使他們相信自然界確實是超對稱的，整個理論並非只是漂亮的數學而已。更重要的是，若要超對稱版的希格斯物理成立，頂夸克的質量與其他的夸克、輕子相比，必須大得不尋常。到了九〇年代，在這項預測提出了十年之後，頂夸

克找到了，資料顯示其質量的確相當大。這是超對稱為真的一項重大間接證據。

● 謎題二：關於標準模型的尺度差異

標準模型有項嚴重的概念性困難，即所謂的層狀結構問題。從第三章我們知道，起始理論的自然尺度是蒲郎克尺度，大約是 10^{-35} 公尺。標準模型所描述的夸克、輕子，以及其間的交互作用，尺度大約是 10^{-17} 公尺。這中間的困難在於，根據量子理論，任何尺度下的物理會對其他所有尺度下的物理造成影響，所以上面這兩個尺度相差這麼多，是很不合理的一件事。換句話說，標準模型的尺度應該要和蒲郎克尺度十分接近才對。這也就是說，標準模型中的粒子質量，如電子、夸克、W、Z 粒子等的質量，應該接近蒲郎克質量，不然就應該等於零。

雖然這只是概念上的困難，並不會直接對標準模型所預測的實驗結果造成影響，但這確實是理論上的嚴重問題。問題來自兩方面：首先，即使我們先不管這兩個尺度的巨大差異，為何標準模型的尺度不是別的，而是 10^{-17} 公尺？其次，更重要的概念問題是，要怎麼在數學上正確處理這兩個尺度間的巨大鴻溝？

超對稱標準模型解決了第二個問題，並給第一個問題新的指引。在超對稱當中，費米子與玻色子只是一體的兩面，它們同時進入方程式當中。這種特殊性質使得方程式中

雖然有各種尺度同時存在，卻能夠完全相消，問題因而有解。

● 謎題三：關於作用力大一統

兩個世紀以來，物理學家積極企圖以統一方式描述自然界的作用力。若忽略隱藏其中的一貫性，我們可將自然作用力分成五種。馬克士威成功的統一了電力與磁力，標準模型則統一了弱作用及電磁力的描述，這些都是非常重要的進展。在量子理論中，對於力的正確描述，來自於對短距離的交互作用的瞭解。根據標準模型理論計算，電磁作用力、弱作用力、以及強作用力在距離愈短的情況下，就變得愈相像，然而最後不論尺度多小，它們的強度仍然有所不同。

但值得注意的是，若以超對稱標準模型進行同樣的計算，在距離小到蒲郎克尺度的百倍左右時，這三種作用力的強度基本上變得一樣大。這並非理所當然，因為標準模型並沒有要求作用力要有相同的強度。即使它們真的強度相當，標準模型更沒有要求它們在蒲郎克尺度的一百倍附近變得相同——而這正是所有作用力將在蒲郎克尺度完全統一的徵兆。這個線索或許會引導人們加深對大自然的瞭解。在這種尺度之下，我們對於完整的理論將以何種面貌存在，所知有限，因此並不知道怎麼將結果推廣到更小尺度。然而，一些合理的嘗試顯示，重力在蒲郎克尺度之下，的確會變得和其他作用力一般大

小，這對於相信科學家終究能夠找到大自然的簡潔描述的人，是一大鼓舞。

在這個問題當中，超伴子似乎扮演著一定角色。

● 謎題四：關於暗物質

超伴子都應該是不穩定粒子，會衰變成其他質量較小的超伴子。唯一的例外是最輕超伴子（LSP），它由於無法再衰變成更輕的超伴子，所以是穩定粒子。超對稱理論所引進的這種新的穩定粒子，已加入光子、電子、微子和質子等的行列，成為組成宇宙的一份子。光子組成了來自恆星的可見光，質子與電子組成星球，而微子與最輕超伴子（如果它們真的存在的話）則充滿了整個宇宙。

微子與最輕超伴子只能感受到弱作用力與重力，完全感受不到電磁作用及強作用力，因此不會參與恆星的形成。它們將成為暗物質。宇宙中充斥著最輕超伴子所形成的暗物質，是超對稱理論的預測。在宇宙剛從大霹靂誕生之際，各種粒子的數目大致相近。瞬間後，大多數種類的粒子衰變成較輕的粒子，一部分則在宇宙擴張、冷卻之際與其他粒子成對湮滅。現有的理論已可以描述它們之間的交互作用，因此我們能夠計算有多少數量的粒子能在這過程中殘留下來。如果這些粒子夠多的話，即使它們不會聚集成發光的恆星，我們仍然可以從重力效應得知其存在：暗物質的存在影響了星系中恆星的

運動，以及各個星系間的相對運動。

一九八〇年代，科學家瞭解到超對稱所預測的最輕超伴子暗物質總量，甚至超過星球中的一般物質。同時，天文學家已經注意到宇宙的確具有可觀數量的暗物質，因為觀測到的恆星和星系運動無法以可見物質的重力影響來解釋。只不過在當時，仍然沒有證據顯示暗物質究竟只是不發光的一般物質，如星際塵，抑或是前所未有的物質形式。

我們將在第六章討論暗物質，以及關於暗物質的實驗。

● 謎題五：關於粒子對撞實驗

位於歐洲粒子物理研究中心的大型電子—正子對撞機（LEP），以及史丹福的直線型電子—正子對撞機（SLC），皆是一九八〇年代所建造，目的在於檢驗標準模型，找尋能夠使之更加穩固的新物理現象。在LEP及SLC開始運作之前，理論物理學家已經預測到，若超對稱是對的，實驗物理學家會看到什麼現象。他們的預測是，超伴子可能在實驗中產生，並且被偵測到；若非如此，則是超對稱的效應過小，實驗仍應該滿足標準模型的計算。

一般來說，用「非超對稱」研究路數來解釋希格斯物理，通常會導出顯著偏離標準模型的預測。雖然在歷經十年的精確實驗之後，超伴子很不幸並未出現，但是實驗結果

確實和標準模型甚為吻合。

我們面對的是這樣的狀況：一方面我們需要標準模型以外的理論來解釋希格斯物理，一方面在LEP和SLC的數據中，卻又看不出偏離標準模型的結果。據此我們應該可以知道，超對稱的的確確是大自然的特性之一——如果你對間接論證有信心的話。當然，多數物理學家希望有更直接的證據。

● 謎題六：關於重力

超對稱以兩種不同而相容的方式，暗示電磁、以及強、弱作用力的描述終將和重力統一：首先，在蒲郎克尺度下，所有作用力的強度變得相近；其次，由於超對稱牽涉時空的對稱，它必然與重力描述有所關連（待會兒我們會再回到這個問題）。

雖然科學家對於超對稱與重力的關係還不完全瞭解，但在標準模型與重力無啥關連的現況下，這個觀察還是相當具有鼓舞作用。

● 謎題七：關於弦論

在第九章中，我們會檢視弦論與超對稱的關係。弦論似乎總是以超對稱做為理論的核心，雖然科學家並不清楚超對稱是否為弦論的必要條件。超對稱進入弦論當中的原因

是：爲了瞭解弦論如何運作，並評估弦論是否與實驗相符，我們必須知道怎麼解弦論方程式。如果超對稱成立，由於必須滿足所增加的約束條件，方程式的求解就變得容易許多。在某些情形下，若不假設超對稱，方程式完全不可能解得出來。

● 謎題八：關於其他問題

超對稱也對其他許多標準模型不可能解答的重大問題，提供新線索。在第八章我們會討論這個問題，在此我只將它們列出，讓大家能感覺到超對稱所帶來的契機。超對稱能夠提供新思維的問題有：

- 一、宇宙是如何變成大多數是物質、卻沒有反物質的？
- 二、質子會不會衰變？若會，又是如何衰變的？
- 三、為何宇宙的年齡和大小會是現在這般？
- 四、為何夸克和輕子罕有衰變？

● 謎題九：關於蒲郎克尺度

最後一點，如果超對稱真確，或許最重要的結論就是：因為我們和蒲郎克尺度距離是如此的遙遠，超對稱將成爲科學家從現實世界瞥見蒲郎克尺度的唯一一扇窗。雖然我

們有許多理由相信基始理論對蒲郎克尺度將會有很自然的表述，但是我們卻不能希望有朝一日能進行蒲郎克尺度的實驗，因為它實在太小了。

然而，如果自然界是超對稱的話，我們就可以利用基始理論計算蒲郎克尺度下的物理機制，在對撞機實驗、微子質量、質子衰變等等能夠檢驗的能量之下，會有什麼表現；同樣的，我們也可以利用實驗量測基始理論的各項參數，再計算這些參數在蒲郎克尺度下的值（有許多參數的值與距離尺度有關）。第二種模式是比較可能發生的情況，因為科學家多半需要實驗數據的輔助，才能夠進一步發展基始理論的各項細節。

你當然可以寄望某個聰明人憑空猜出基始理論，但如果這沒有發生，我們還是可以一點一滴的累積知識，瞭解基始理論必須具備何種性質，並且從實驗和理論兩方面來達成目標。這也是物理學家一貫遵循的進路。即使某個人猜出了基始理論，在沒有辦法以實驗確定其正確性的情況下，也將無法取信於人。

如果世界不是超對稱的，則我們便失去了可與蒲郎克尺度聯繫的唯一途徑。反之，若世界是超對稱的，我們能表述基始理論並加以測試的機會便大大增加。

以上的推論大致可以分為兩方面：第一類的問題是關乎真實現象的合理解釋，另一類則純粹是希望能夠更深入瞭解宇宙。

第一類的推論提供了世界爲超對稱的證據；雖然是間接證據，但卻個個貨真價實、不容忽視。第二類的論證，當然不能證明自然界就是超對稱的。超對稱有助我們理解弦論，或能夠做爲通往蒲郎克尺度的一扇窗，但並不代表自然界就必須如此。

不過，第二類推論與第一類擺在一塊兒，相輔相成之下使得物理學家對超對稱更加興致勃勃。我要再次強調的是，超對稱並非因應上面任何一個問題而發明的；那些問題都是在研究超對稱的蘊涵時才冒出來的。前面的許多實例只是清楚描繪了一個基本理論的輪廓，至於內藏的性質則有待更進一步在理論、實驗兩方面的進展，才能完全揭露。

超對稱之所以有以上這些結論，是因為「在費米子與玻色子對換下，方程式仍然維持不變」的這項約束條件，使得理論必須以某種一定的形式存在才行。當科學理論的約束加強時，一些前所未知的性質往往會凸顯出來。這在歷史上已有前例，譬如馬克士威當年試圖將已知描述電磁現象的幾道方程式結合，他發現若要使它們並行不悖，其中一道方程式必須加入新的一項。新的方程組有一個新的解，是以電磁波來描述光。因此，原本不相干的兩件事「光」與「電磁現象」便結合在一起，而我們現在用以通訊的電磁波的存在，也成爲自然的結論。

另一個例子是狹義相對論。愛因斯坦發現，所有平移的系統或具相對速度的系統，若要擁有同樣的電磁學定律，時間與空間必須結合。在任何一門數理科學中，方程式的

新約束條件幾乎都代表著重大的新物理現象，超對稱就是一例。

超伴子

從第二章我們知道，特定粒子的對換不變性是標準模型非常重要的一環。這些具有對換不變性的粒子，包括電子與電微子、上夸克與下夸克等等。在標準模型誕生之際，具對換不變性的粒子有某些已經爲人所知，而其他應該存在的粒子也隨後一一被發現。

我們又知道，唯有反粒子存在，才能使方程式同時滿足量子理論與狹義相對論。雖然一開始理論所預測的反粒子都未被觀測到，但是物理學家心裡有個準，知道目標為何，所以後來所有反粒子都一一現身。同樣的，若超對稱成立的話，除了標準模型的粒子之外，一些前所未知的粒子也必須存在才行。由於費米子和玻色子各具有不同的自旋數，新的粒子也必須各具有與費米子、玻色子不同的自旋數。舉例而言，自然界應該存在和光子一樣不具電荷、弱荷、強荷的粒子，它與光子不同之處在於自旋數並非1，而是 $\frac{1}{2}$ 。自然界也應該存在和電子具有同樣的電荷、弱荷，但不帶強荷的粒子，它與電子不同之處在於自旋數爲零（電子具 $\frac{1}{2}$ 的自旋）。在我們已知的粒子中，沒有一個具有這種性質。現在的狀況就像是反粒子的歷史重新上演：理論所預測的粒子都未被發現。

物理學家稱這些新的粒子爲「超伴子」或「超粒子」。由超粒子組成的物質，我們

稱為「超物質」。

在過去一百年中，隨著我們對大自然的瞭解增進，我們看到「電子」的種類也跟著增加。自一八九五年到一九二〇年代，人們只知道一種電子。在原子能階被發現，並在狄拉克統合量子理論及狹義相對論之後，物理學家知道電子具有 $\frac{1}{2}$ 的自旋。根據量子理論，這代表相對於任意給定方向，電子的自旋可以是向上或向下，這解釋了觀測到的原子能階。現在我們就像是有了「上自旋」或「下自旋」兩種電子。接下來反粒子被提出並發現了，使「電子」的種類變為四：上自旋或下自旋的粒子與反粒子。

從一九七〇年代標準模型建立以來，人們總算瞭解到電子與微子其實是同一個基本粒子的不同表象，它們可藉著發射或吸收W玻色子相互轉換。而反電子與反微子間也有類似的關係。這麼一來，同樣的粒子可以上自旋或下自旋、正或反、電子或微子等各種不同形式存在。超對稱理論又更進一步了，這些已知的「電子」形式，都具有自旋數為零的超伴子。

聽起來粒子的種類似乎無止盡的膨脹之中。然而，如果為數衆多的粒子只要存在其中一個，理論便自動要求所有其他種粒子都存在，則這個「人口暴增」的表象下，所隱藏的其實是在概念上更為簡潔的圖像。就像是在複雜無比的自然世界背後，隱藏的是電子、上夸克、下夸克以及它們的交互作用，道理沒什麼兩樣。在新而簡單的觀念架構之

下，我們只需要標準模型的一小部分粒子，再加上它們的反粒子及超伴子，即可構成世界。

科學家以一套簡單的命名法則及符號，來表示超伴子。某個粒子的超伴子以粒子符號上方加一條彎曲的短線 $\sim$ 來表示，如代表電子的 e ，其超伴子記為 $\tilde{e}$ ，而光子 γ 的超伴子為 $\tilde{\gamma}$ 等等。

標準模型中的費米子，其超伴子的英文命名法則為：在粒子英文名稱前加上 s ，例如超費米子 (sfermion)、超電子 (selectron)、超夸克 (squark)、超頂夸克 (stop)、超微子 (sneutrino) 等。標準模型中的玻色子，其超伴子的英文名稱處理方法為：如果原來以 on 結尾，則去除 on ，加上 ino ，否則直接加上 ino ，例如超光子 (photon)、超重力子 (gravitino)、超 W 粒子 (Wino)、超希格斯玻色子 (higgsino) 等。由於標準模型在這些超對稱粒子上也適用，保持名稱的一貫性有助於掌握這些粒子的交互作用，並做出正確的預測。表二列出了粒子及其超伴子。

我需要在此強調一點：超對稱所要求的，是自然律在費米子與玻色子對換下維持不變。這並不是說，我們將基本方程式中的電子換為超電子時，仍然可以成立；而是原來的基本方程式就要包含代表電子及超電子的符號，且在這些符號對換之後，方程式仍然成立。

表二 粒子與超伴子

粒子	名稱	感受交互作用 ^a	媒介交互作用 ^b	超伴子
e, μ, τ	帶電輕子（電子、 μ子、陶子）	EM, W	—	超輕子（超電子、 超μ子、超陶子）
ν_e, ν_μ, ν_τ	微子	W	—	超微子
u, c, t	上、魅、頂夸克	EM, W, S	—	超上、魅、頂夸克
d, s, b	下、異、底夸克	EM, W, S	—	超下、異、底夸克
γ	光子	^c	EM	超光子 ^d
$W^\pm$	W玻色子	EM, W	W	超W玻色子 ^d
Z	Z玻色子	W	W	超Z玻色子 ^d
g	膠子	S	S	超膠子
G	重力子	GR	GR	超重力子
h	希格斯玻色子 ^e	W	產生質量	超希格斯玻色子

^a 所有粒子都感受重力交互作用

^b EM = 電磁力；W = 弱作用力；S = 強作用力；GR = 重力

^c 光子只感受到重力，不過光子和所有帶電粒子都會行交互作用

^d 這些粒子混合成超荷子（chargino）和超中性子（neutralino），見附錄C

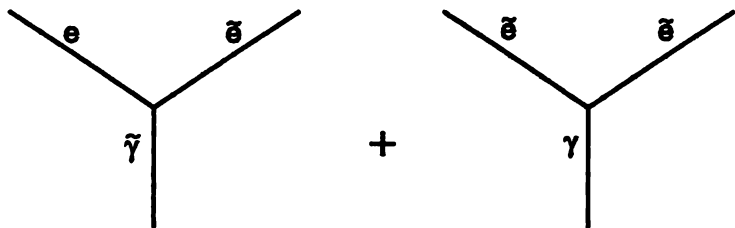
^e 超對稱理論所預測的其餘希格斯玻色子未列入表中

超粒子的存在，是超對稱理論最重大的預測。

所以超粒子的存在與否，將對理論之真偽作出定奪。除此之外，還有一些較為間接的驗證。到目前為止，超對稱理論已通過了已知的所有間接驗證，這使許多物理學家相信超對稱確實是對的。在本章前半，我們已經簡單列出這些間接驗證了；在本書後面幾章，我們還會進一步探討這些驗證。

超對稱理論不僅預測新粒子的存在，並對包含新粒子的交互作用作出預測。在費曼圖的輔助下，要寫下這些新的交互作用並不困難，只需要把通過費曼圖頂點的一對粒子換成它們的超伴子，即可滿足超對稱理論。（至於為何只能替換偶數個超粒子，則與自旋性質有關。）

舉例來說，圖五的超對稱標準模型是由第二章的圖一而來的，為簡單起見，我並未畫出箭頭。箭頭方向是可以隨意自訂的，只要留意電荷在交互作



圖五

用前後必須維持不變。和以前一樣，許多簡單的頂點可以組成複雜的圖形，而理論計算會告訴我們交互作用過程發生的機率。

超對稱要求圖五與圖一的交互作用具有同樣的強度，如果真的出現了超電子及超光子，這將是理論的一項關鍵測試。同樣的，第二章的其他交互作用也可以代換成超對稱交互作用。超對稱世界裡所有可能的交互作用，都是由這些基本交互作用以各種可能的方式組合而成的。量子理論的法則可告訴我們，根據「超費曼圖」如何去計算出「超交互作用過程」發生的機率。

超對稱是一種時空對稱

在前文中，我們已經提到兩種理解超對稱的辦法。這兩種方式當然不互相矛盾，但解釋某特定現象時，通常以其中一種方式來看待超對稱，會較容易理解。

第一種較普遍理解超對稱的方式，是自然律的費米子——玻色子對換不變性，自然界必須存在標準模型裡所有的玻色子、夸克、輕子的超伴子。關於超對稱的實驗、以及實際的計算，多是在此架構之下進行的。

第二種理解超對稱的方式，是把它看作打開蒲郎克尺度一扇窗的有效理論，使我們能夠建構並測試尚不存在的基始理論。這條進路使得超對稱在我們追求宇宙定律的過程

中，扮演相當重要的角色。

我們還未提到的，是第三種理解超對稱的方式。若把超對稱視為一種存在於所謂「超空間」的對稱，有時候會為我們帶來意想不到的收穫。這條進路對於解開超對稱的數學性質最有幫助。這一節接下來的內容比較具技術性，讀者若略過，對之後的理解也不會有影響。

一個以某能量及動量運動中的粒子或物體，若不受外力，我們發現它的能量及動量不會改變。物理學家稱此為能量守恆、動量守恆。當我們說能量、動量在不受外力的情形下守恆時，其實是做了假設，我們假定時空是連續均勻的，當物體處在時空之流中，絲毫不會感受到任何效應。如果這是一個完全孤立的物體，不管它在這裡或在幾公里外，甚至它在轉動，都不應該有什麼差別，因為我們相信時空本身不會影響物體。當物體在改變之下仍然維持守恆時，我們稱之為「對稱」。每個守恆量必定有其對應的對稱性，而且反之亦然。

我們改變物體在空間或時間中的位置，而找到對稱性；同樣的，改變粒子在超空間的位置，使我們找到了對應的超對稱。

物理學上的對稱有兩種。前段所提的這種對稱為幾何對稱或時空對稱。第二章我們提到，在標準模型中有所謂的「內部對稱」。也就是說，在粒子對換之下，理論維持不

變（第62頁）。有個很重要的問題是，是否存在某種對稱，混合了幾何對稱與內部對稱？舉例來說，把一個上夸克移動幾公分遠，並不會使它變成下夸克，這一點我們很確定。但或許某種時空上的微妙改變會觸發這種對換。在處理時空問題的標準方式下，我們的簡單想法是對的：內部對稱與幾何對稱涇渭分明。在傳統架構下，可用理論證明這是唯一可能的結果。然而，如果在時空中加入「費米維度」，我們會發現還有一種對稱是允許成立的，那就是超對稱。超對稱的一項吸引人之處，便是它是最後一個在數學上可以存在、但自然界尚未測量到的對稱性。

超空間

既然超對稱是費米子——玻色子的對換不變性，我們在前文中又提到不變性與對稱性有相對應的關係，這意味著什麼呢？在我們熟悉的時空裡，玻色子與費米子有著很不一樣的性質，但我們可以在四維時空疊上另外四個維度，使得在新的空間中我們得以弄混玻色子與費米子之間的差異。這種新的空間就稱為超空間。在超空間中，費米子與玻色子可以用完全對稱的方式來描述。

新的時空維度並不像我們的一般維度：它們沒有大小，它們與弦論中的超小維度也不一樣（參見附錄D）。在超空間中，玻色子與費米子是同樣粒子的不同投影，就像電

子和微子可視為同樣的粒子在內部空間的不同投影。超空間純粹是量子理論的產物，因為費米子只能夠以量子理論來描述。一般的時空可視作「玻色維度」，而超空間的額外維度是疊在玻色維度上的費米維度。這概念是否為確，是可以經實驗檢視的。當然，最簡單也是最重要的測試，便是超粒子的存在與否。找到了超粒子，也等於是告訴我們超空間的性質。

也許有人可以顛覆一下科學史：如果當初量子理論就在超空間架構下建立，則第一個預測就會是，所有粒子都兼具費米形態與玻色形態。因為超空間的超對稱性要求費米子的存在；從另外的角度來說，超對稱解釋了為什麼費米子會存在。

愛因斯坦的廣義相對論把重力看作是質量（如行星、恆星）扭曲了時空所造成的影響，所以廣義相對論是重力的幾何理論。超空間的概念一經提出後，人們立刻希望能以這想法為基礎，發展更加廣義的重力幾何理論，這就是所謂的超重力（supergravity）理論。超重力理論包含了廣義相對論並加以推廣，所以媒介重力的重力子，也有其超伴子「超重力子」。

超對稱與重力的關係使物理學家大受鼓舞，認為要結合標準模型與重力理論，關鍵就在於超對稱。有趣的是，超重力理論的幾何結構在十一維時空中（有一些為超空間維度），以簡潔的形式存在；妙的是，十一維也是建立可信的重力理論的最大可能維度。

瑕超對稱

目前為止，我一直論證自然律是超對稱的。事實上，真正的情形更微妙。從兩件事實，我們知道自然界不是完全超對稱的：第一點，如果自然界還存在除自旋數外、其他所有性質與電子完全一樣的超電子，我們早就發現它了。其他種類的超伴子也是如此。其次，即使無法在實驗室製造這種超電子，我們也可以推論出，如果與電子等質量的超電子存在，這個世界將大不相同，因為世界將無法孕育生命。原因在於，如果玻色電子存在，它們會全都落入原子的最低能階，屏蔽原子核的正電，而無法產生用以束縛原子形成分子的價電子。（這個理由雖然不能用來解釋為何超對稱是破缺的，但可以顯示間接的推論有助於瞭解世界運作。）

在物理學中，系統的對稱性對行為有重大影響。有些對稱是完美的，但許多對稱並非完美。即使如此，這些不完美的對稱對於系統的行為仍然扮演重要角色。舉個簡單的實例，具有軸對稱性的童玩陀螺，它相對於自轉軸是對稱的。如果陀螺表面凹凸不平，某一邊較輕，它仍然會轉，只不過它會一邊轉動、一邊稍微抖動，或較快停止轉動、並固定倒向某一邊。雖然有些毛病，但總括說來它還是個陀螺。當對稱性只有部分成立，或有些不完美時，物理學家稱之為「瑕對稱」（broken symmetry，又稱「對稱破缺」）或

「隱對稱」(hidden symmetry)。

再舉一個和超對稱較相近的例子：狄拉克所建立的粒子—反粒子對稱，稱為「電荷共軛不變性」(charge conjugation invariance)，因為當電荷改變符號時，狄拉克的方程式仍維持不變。對於單一粒子，這是成立的；對於藉電磁力或強作用力進行交互作用的多粒子系統，這也是成立的。然而，對於藉弱作用力進行交互作用的多粒子系統，這個對稱卻不成立。很重要的是，雖然這只是部分的瑕對稱，卻導致所有的反粒子都存在，這是實驗已經一一證明過的。

超對稱的情形也應該類似：超伴子應該都存在，但質量會不同於其粒子夥伴。超伴子的交互作用也應該與粒子夥伴類似，若有不同是由於質量有異或相關原因造成的。超伴子的質量較大，使它們到目前為止，尚未在實驗中被觀測到。

瑕超對稱的問題，顯示物理學在這幾年的進展。一九六〇年代以前，描述基本粒子交互作用的理論還不存在，接著標準模型出現了，它對於粒子與交互作用有非常好的描述。剩下的問題是，希格斯物理究竟是以什麼形式存在，使得粒子的質量可以放入理論之中？還有，希格斯物理是如何從更基礎的底層物理冒出來的？

超對稱的出現，對於標準模型、希格斯物理的難題有所助益，它解釋了希格斯物理的來源。然而確切的答案與超對稱是如何出現破缺的有關，這一層關係使得瑕超對稱和

標準模型的希格斯物理之間緊密結合（在下一段將對此作進一步討論）。我們並不瞭解超對稱是如何出現破缺的，這或許無法以超對稱理論本身來解釋，而有待更基層的物理來釐清。這就像是雖然希格斯物理可用來解釋質量的起源，物理學家卻不能在標準模型的架構下解釋希格斯物理本身的起源一樣。然而，超對稱理論畢竟相當完備，使得我們知道瑕超對稱的理論形式。

有一種目光短淺的說法是，我們解決了一個難題，卻換來了另一個難題，淨的來說好像沒什麼進展。這樣的說法並不正確。首先，新的超對稱標準模型解釋了之前許多無法理解的現象；其次，超對稱是更接近基始理論的有效理論。然而，我們必須承認的是，如果自然界真為超對稱，解釋其破缺起因將成為理論與實驗的核心問題。

超對稱解釋了希格斯物理學

超對稱美妙的解釋了希格斯物理學，這左右了超對稱的實驗測試。由於這部分相當具技術性，我留待附錄再詳細討論。簡略來說，在標準模型中，希格斯物理有三個部分，首先，希格斯場必須存在；其次，希格斯場與其他粒子必須以某種方式進行交互作用；最後，至少一種希格斯場的量子（即希格斯玻色子）必須存在，這是希格斯場存在的必然結果。

在超對稱的框架下，與希格斯場類似的場已然存在，不需要硬拗進理論裡。此外，超對稱也提供了交互作用——希格斯機制。希格斯機制要成功運作，關鍵在於該理論的一個可解釋為質量平方的參數（姑且稱為 M ），必須為負值，而不是單純想像中的為正值。雖然這看來像是個錯誤，但更深層的研究發現，這給予粒子所需的質量，所以我們只要檢查希格斯理論的 M 參數，看它是否為負值，就知道該理論能否運作。我們在附錄A再進一步討論希格斯機制。

在超對稱理論中， M 在蒲郎克尺度下是正值，也就是說，所有的夸克、輕子、 W 粒子、 Z 粒子在這個尺度皆不具質量。然而 M 並不是常數，會隨著距離尺度而改變。因為我們已經藉實驗證實夸克、輕子、 W 、 Z 等粒子皆具質量，因此我們需要知道的是，在比弱作用尺度更大的距離下， M 的符號是否真為負。

令人驚奇的是，我們發現，若加上一個條件， M 就會自蒲郎克尺度的正值，隨著尺度增加而減少，最後在大尺度下變為負值，使粒子具有質量！

這個能使希格斯機制成功的條件，便是夸克家族中必須有一個夸克具有相當大的質量，其質量要大過 W 玻色子。一九八〇年代物理家提出這點時，還不知頂夸克的質量，當時已知的質量最大的夸克仍遠較 W 玻色子輕。因此，超對稱的預測是頂夸克的質量必須遠大於單純的估計值。一九九〇年代，物理學家終於測到頂夸克的質量，是 W 玻色子

的兩倍大，完全符合超對稱的預期。如果當初超對稱在標準模型之前便發展出來，那麼希格斯機制一點兒也不顯得神祕，而只是超對稱一項意料之外的結論罷了。

推測超伴子的質量

超對稱對於希格斯機制還有一項重要推論：由於這是已知能連結超伴子質量與已知粒子質量的唯一方法，所以我們可據此推算超伴子的質量大小。

希格斯機制使我們得以將標準模型粒子的質量以未知的超伴子質量來表示。我們得到的是一道方程式，一邊包括已知粒子的質量，而另一邊則帶有未知的超伴子質量。像這樣的方程式，如果左右兩邊所牽涉的數字大小相差太多，即使等式成立，我們也不該相信其結果，原因在於所有的物理理論所預測的物理量都有某些程度的誤差，因為所使用的實驗數據帶有誤差，使用的近似法也帶有誤差。

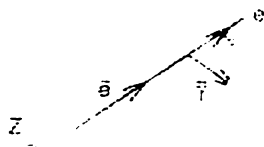
因此，若超伴子的質量和根據它們計算而來的標準模型粒子質量相差太大，整個過程就變得不合理了，這使得我們在尋找超伴子時心裡有個底，知道它們大概的質量；而這也告訴我們，當超伴子一直未能發現時，是否該開始擔心超對稱的正確性。這些計算只能估算個大概，不過幸運的是，這些計算告訴我們，超伴子的質量不是太大，我們應該很快就可以在實驗中找到。下一章，我們就來討論如何在實驗中尋找超伴子。

【注釋】

- ①編注：霍金（Stephen Hawking, 1942-），英國理論物理學家，劍橋大學天文物理學教授，以發現黑洞會自動衰變而著稱，他是發展量子重力理論的首席權威，《時間簡史》、《胡桃裡的宇宙》作者。因患肌萎縮性脊髓側索硬化症（或稱爲路蓋里格氏病，Lou Gehrig's disease），而終日身陷輪椅上。

第五章 搜尋超伴子

超對稱理論最讓人期待的一點是，利用現有興建中或重新設計的實驗設備，我們便可以蒐集到足夠的資料，來測試和表述基始理論。



目前，對撞機實驗的主要目標便是尋找超伴子和希格斯玻色子，或是證明它們不存在（如果我們在間接證據和有利的理論佐證之下，還是錯了的話）。希格斯玻色子的存在將會填補標準模型的空缺，並提供拓展標準模型的線索。尋找希格斯玻色子是第七章的主要課題，而本章則要探討在實驗中辨識超伴子的方法，並介紹可能找到超伴子的實驗設施。第六章則要描述暗物質的候選者——最輕超伴子的特異性質，並討論直接偵測它們的辦法。

粒子加速器

科學家想要研究的世界通常太微小、或是太遙遠，而不能直接觀測。在這種情況下，我們怎麼能夠從中得到實驗證據呢？整個科學發展史可以說是在這問題上面打轉。要回答它，首先要自問：我們是怎麼看見這個花花世界的？自物體反射的光子進入我們眼睛，在經過腦部複雜處理之後形成影像。人們以玻璃製作透鏡，首次能夠看得比肉眼所見更詳盡。接著，光學顯微鏡使人們能夠看見比肉眼可見更小數千倍的物體，不過要看再小的物體，如原子，光學顯微鏡就派不上用場了。

很明顯的，到了這個階段，想要瞭解愈多，就要探測到愈小的尺度，而能量愈高的粒子可以探測得愈深。自然界中我們所能控制並用以探測物質的最高能量粒子，是來自

原子核的衰變產物，它們所具有的能量約是可見光的百萬倍。這也就是說，科學家可利用這種射線探測比可見光所見更小百萬倍的物體。若要看得更小，我們就得找到增加粒子能量的辦法。發明於一九三〇年代、至今仍不斷改良的粒子加速器，就因此而生。

當然，我們觀測粒子的方式和看一般物體的方法並不一樣，我們得在這當中加入一道機關：能夠蒐集粒子行為的資訊，並為我們呈現影像的偵測器。

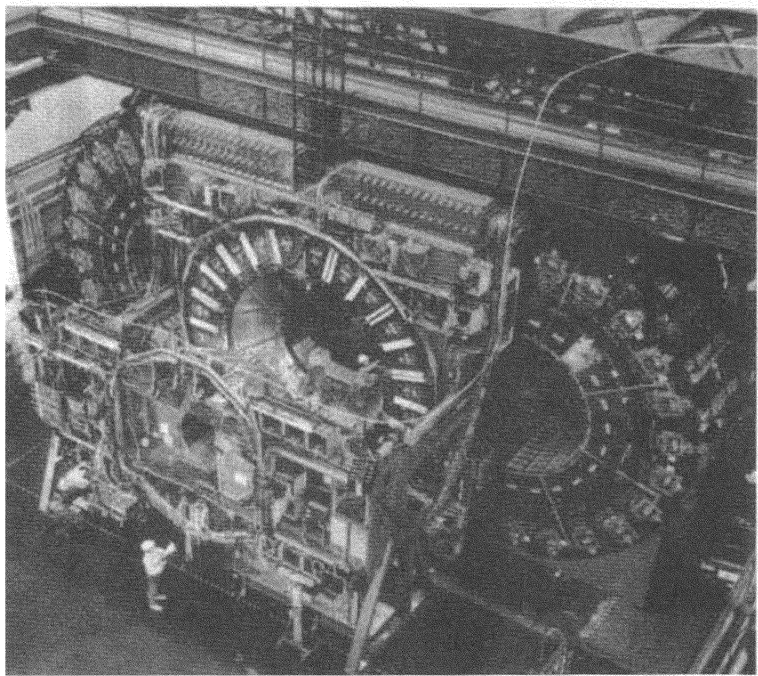
我們最後所看到的明確影像，常常是經過許多步驟處理後的產物。例如，現代望遠鏡通常為我們提供的是電腦處理過後的數位化、非可見光影像。早期運用原子核衰變的射線束做為探測工具的實驗，在標靶的四周設立螢光屏，當粒子撞上螢光屏時會發出螢光，藉以檢視射線如何被標靶原子散射。由於螢光屏的介入，肉眼在觀測過程中又被往後推了一個步驟。如果我們以相機記錄螢光屏的結果，隨後再研究照片，這又再添加了更多的中間程序。

現代科學研究中，在資訊被人們研究之前，通常歷經了許許多多的程序。相機是一種偵測器，它藉由記錄光子而讓我們看見物體。粒子物理學所使用的偵測器必須要「看見」電子、綫子和其他粒子，用以重建粒子對撞資訊，所以它們要比相機複雜得多。從另一種角度看，粒子偵測器就像是全世界最大的電視遊樂器，玩家從中竭力獲取資訊，再從中推測這些事件究竟是標準模型所預測的，或是全新的物理現象。能找到新物理的

人便「贏」得遊戲。

費米實驗室的對撞機一共有兩具偵測器，下面這張照片是其中之一。這兩具偵測器能找到新物理的機率是一樣的，兩組人馬正互相較勁，希望能夠比對方先一步有大發現。

事實上，遊戲的比喻有點輕率，因為要設計、建造、並使用能夠探測到我們可見尺度千兆分之一（ 10^{-15} ）的偵測器，必須投入極大的心力才行，這是一項非



費米實驗室的偵測器（費米實驗室提供）

常認真、且劃時代的工作，可不只是好玩而已。從費米實驗室偵測器的照片中，我們便可約略看出計畫複雜、龐大的程度。這種用以尋找超對稱的偵測器是探視大自然的最小尺度「顯微鏡」，或許「超」顯微鏡才是它的適當名稱。

愛因斯坦教導我們，能量與質量是可以互換的。科學家後來瞭解，這項原理可用在瞭解粒子性質上：如果能夠使粒子獲得高能量，並與其他粒子碰撞，其能量的一部分將可做為形成前所未知的粒子之用。

有時我們稱新發現的粒子為「新」粒子，雖然它們原本就存在大自然當中，一點兒也不新。最早的幾個新粒子，是在一九三〇年代科學家以偵測器研究宇宙射線時所發現的。宇宙射線粒子在偵測器附近碰撞原子核，把能量轉換為新的粒子（宇宙射線是自外太空撞擊地球的粒子。有一部分宇宙射線粒子具非常高的能量，專家相信多數高能粒子宇宙射線粒子來自超新星爆炸）。隨後物理學家發明以電場加速電子或質子，並更進一步成功使兩束粒子對撞。這麼一來，可用來生成粒子的能量更多了，就像揮棒擊出的球會比觸擊的球飛得高遠得多一樣的道理（因為擁有較多能量）。

由於只有費曼圖容許的過程才會發生，因此實驗必須仔細策劃，我們稍後再回到粒子交互作用這個課題上作討論。先要說明的一點是，對撞事件中產生的粒子並不是躲在原來的對撞束中，而是貨真價實的由對撞能量轉換為質量而誕生的。對撞後究竟會產生

何種粒子，則與質量有關：在其他性質都相同的前提下，較輕的粒子一般來說較容易製造出來，而實際的機率可藉由費曼圖計算出來。

本章的焦點在於，如何在實驗中製造並偵測超伴子。如果物理學家找到了超伴子，將會證明大自然的確是超對稱的，反之則否。我們也會介紹正進行搜尋中的現有對撞機，以及計畫中能夠告訴我們超伴子性質的未來對撞機。

對撞機的能量問題

對撞機是否能夠在對撞事件中製造出超伴子，與對撞粒子束的能量、強度、以及超伴子的質量有關。超伴子愈重，對撞粒子的能量就要愈高。要製造更多超伴子事件而使偵測明確，就需要強度更大的粒子束。這裡所謂強度是以粒子束中的粒子數目、集中程度，以及其他種種考量而定。在此讀者只需要知道對撞的粒子能量愈大，愈容易製造新粒子；而一旦可製造出新粒子，粒子束愈強，就會製造愈多的新粒子。

目前一共有兩座可能製造超伴子的對撞機，其一位於瑞士日內瓦的歐洲粒子物理研究中心（CERN）。通常人們以LEP簡稱此對撞機（其意為大型電子—正子對撞機，Large Electron-Positron Collider）。LEP是以一束電子射向正子束，使其其中的一些粒子對撞。另一座對撞機座落在美國的費米國家加速器實驗室。費米實驗室位於芝加哥

西方四十英里處，以質子與反質子對撞。

LEP 每年都增加其粒子能量，現在能量已進入希格斯玻色子和超伴子預期中的質量範圍，不過LEP 尚未能覆蓋所有的可能範圍。如果超伴子的能量確實落在其可及範圍，以LEP 現有的粒子束強度運轉幾個月，便有望偵測到一個超伴子事件。在二〇〇〇年底LEP 已經停轉，把位子讓給能量、強度都高出許多的新質子—反質子對撞機LHC（大型強子對撞機，Large Hadron Collider）。與LEP 同屬歐洲粒子物理研究中心的LHC 預計自二〇〇五年開始運轉。

費米實驗室也進行了一項強度的升級計畫（同時也小幅增加能量），已於二〇〇一年三月一日正式開始進行數據蒐集工作。

由於科學家想要探索大自然的最深處，需要愈來愈大而且昂貴的「超」顯微鏡——對撞機，以及龐大數量的科學工作人員，才辦得到。對此，有些人會很感傷的緬懷一兩位科學家工作個幾星期，便能完成一項實驗的那個逝去的黃金年代。其實，也不盡然如此，二十世紀初居禮夫人攪拌一爐又大又臭又危險的瀝青，為的便是萃取其中一丁點兒的鐳，她所花費的光陰，可不下於費米實驗室為了增加在二十一世紀製造超伴子的機會，進行升級計畫所花的時間呢！

在對撞中，能量轉為質量，所製造的大質量粒子個數與粒子性質有關，可能是一到

多個。由於新粒子通常帶有電荷，而交互作用前後的電荷總和必須相等，而交互作用前電荷總和為零，因此一般來說，新粒子會成對產生（帶有相反的電荷）。也因為這樣，通常能夠製造出來的粒子質量，最多只有可使用總能量的一半。

對撞機的可用能量並不是唯一需要考量的因素。新粒子的製造率與粒子質量有關，也與交互作用的性質有關。假設某對撞機的粒子強度平均每年只能製造一個新粒子，然而在一年當中，這種事件可能一次也沒發生，即便發生了，單靠一次事件也很難讓我們相信新粒子存在。偵測器發生錯誤，和宇宙射線發生的對撞事件，以及其他各種可能發生的怪事，這些雜訊看起來都可能像單一事件。我們必須視雜訊的普遍程度而定，或許要偵測到一、二十個或更多事件，才會相信事件的真實性。換句話說，有時候單單提高粒子束強度，而不改變每個粒子的能量，便有助於提供新粒子存在的證據。基本上，費米實驗室的升級計畫走的就是這條路。

費米實驗室對撞機

讓我們多談談費米實驗室的對撞機。在這兒對撞的質子和反質子，約為LEP的電子正子對的十倍能量。由於反質子很快與質子成對湮滅，因此自然界中找不到反質子。費米實驗室以質子撞擊原子核，製造了大量的反質子，接下來在它們碰上質子之前，以

電磁場將它們區分出來，引入一個超高真空的容器中儲存。超高真空是爲了使容器中的質子愈少愈好。當蒐集到足夠的反質子之後，便可用來加速，與質子對撞。

像LEP這種電子—正子對撞機，所有對撞粒子的能量都可用於新粒子的製造。而費米實驗室的質子—反質子對撞機，則只能利用其中一部分的能量。這是因爲質子其實是由膠子所綁在一起的幾個夸克，而對撞時能夠轉換成質量的，只有膠子、夸克等「質點」所帶的能量。夸克和膠子在質子當中運動，大多數時候，能量平均分配在夸克和膠子上面。因此真正碰撞的那個粒子，只帶有質子總能量的一部分（約五分之一到十分之一不等）。換句話說，費米實驗室的對撞機典型的有效能量，和總能較低的LEP其實差不多。

所幸，由於機率的關係，有時候碰撞的可利用能量會高達LEP的十倍之多。難就難在怎樣使粒子束具有足夠強度，使得能製造新粒子的高能對撞事件發生較多次。費米實驗室所進行的粒子束強度升級計畫，就是爲了達到這一目標。在升級之前，費米實驗室的強度太小，幾乎沒有希望找到超伴子。當然，偵測器也進行了改裝，以便處理因強度變大而增加的事件，以增加對超伴子事件的辨識度。

雖然二〇〇一年三月，費米實驗室的對撞機已經開始升級後的運轉，但科學結果不會立即產生，因爲要做許多調整，才能使對撞機以所允許的最大強度運轉，而物理學家

要闡釋偵測器提供的資料，不免也需要一段時間。

辨識超伴子很困難

要辨識超伴子並不是簡單的事。難處並不在於我們不知道超伴子事件的特徵，這些都可以超對稱理論計算；我們不知道的是，超對稱理論是否真的能描述自然界，或只是空中樓閣。

實際上，我們還需要知道的是超伴子的質量，以便預測衰變模式。除此之外的物理性質，都可經計算獲得。如果我們能計算或是猜測超伴子的質量，便可預測LEP或費米實驗室能夠製造多少超伴子，而這些粒子在偵測器中看起來又是什麼樣子。缺乏超伴子質量這道資訊，我們只好以各種假設的質量進行計算，接著檢視結果，看看超伴子事件是否有共通的特徵，而我們只要在實驗中找尋這些特徵即可。

不過其中有幾個困難。首先是在實務方面。若要在樹叢中找鳥，好的雙筒望遠鏡比爛雙筒望遠鏡有用得多。同樣的，以高品質的偵測器做研究，將更容易區別各種不同的粒子，當然成本也較高。然而偵測器的經費十分有限，現階段只是勉強足夠而已。此外，雖然我們有時候會希望偵測器具有某些功能，但現有技術卻無法達成目標。而且，一起研究、使用偵測器的各個物理小組，有時候也會對科學目標有不同想法。在固定的

經費之下，滿足了某個科學目標的偵測器，在其他科學目標的表現上可能就差強人意。

現今的希望在於，如果新一輪的實驗顯示了超對稱的跡象，就比較可能再獲得經費來改良偵測器，以確認訊號，並充分瞭解其中隱含的物理意義。

除了實務上的問題之外，辨識超伴子也有其他困難。標準模型的過程也預測如W、Z、及頂夸克等重粒子會在對撞中產生。有時候，這些標準模型過程看起來會與超對稱過程十分類似。物理學家稱這些過程為新物理的「背景」事件。偵測器所得到的訊號，就像以相機所攝得的人像一樣，有時候會有點模糊不清。完美無瑕的清晰訊號當然利於區分背景和真實事件，難就難在獲取清晰訊號沒這麼容易。

本章後半，我會介紹一些超對稱訊號的特徵，和對應到的一些背景事件。一般來說這是一件相當棘手的事。例如，一九九五年費米實驗室測到了一個疑似超伴子的事件。這雖然很令人興奮，但在確定這是新發現之前，我們必須測到更多這種事件，或其他應該發生的事件才行。在進行一些研究之後，我們發現了一種沒有標準模型背景超伴子過程。如果之前測到的真的是超伴子，則我們發現的這個過程也應該會發生才對。若能順利找到這種用作檢驗的事件，或許就可以證實超伴子的存在。但很不幸的，當時費米實驗室的兩具偵測器中只有一具能辨識該事件，而且該偵測器又蒐集到可能是魚目混珠的另一種過程。因此，這種事件找是找到了很多，但根據計算結果，所測到的事件數與

誤判率相當，所以不能下結論說是測到了真正的訊號。費米實驗室的下一輪實驗所使用的改良式偵測器，以及高強度的粒子束，應該能夠輕易解決這樁懸案。總之，能否測到超伴子，與偵測器品質有著絕大的關係。

最後，超對稱本身的性質也增加了辨識超伴子的困難度。所有的超對稱過程都產生兩個超伴子。這兩個粒子若不是最輕超伴子，終將會衰變為最輕超伴子。（在某些狀況下，超伴子會在偵測器記錄之後才衰變，不過為簡單起見，我們不去討論這種特例。）換句話說，每個超伴子事件都會製造出兩個最輕超伴子，而它們會帶著能量，逃過偵測器的記錄。

以往當對撞機發現新粒子時，只要仔細檢視便會發現衰變產物總是具有一個特定的總能量，使它不易和其他背景事件搞混。而由於兩個最輕超伴子逃脫之故，超對稱實驗永遠辦不到這一點。因此當那一天到來時，要說服非專業人士我們確實看到了超伴子事件，仍然是一件困難的事。從另一個角度來講，也正因為超對稱事件總是伴隨著「能量失落」(missing energy)，與典型的標準模型過程不同，因此辨識超伴子的一個重要辦法，便是建造能夠測量粒子產物的能量，並立即計算其總和的偵測器。「能量失落」成為新舊對撞機，如LEP、費米實驗室、以及計畫中的未來設施所要尋找的首要特徵，也是唯一的直接特徵（請參見第152頁的圖十）。

偵測器的觸發

偵測器的建造還牽涉到一個迷人的課題。這往往也是為何建造偵測器如此困難、能探測新物理的設施為何如此昂貴的一大原因。

物理學家已經研究粒子碰撞超過半世紀的時間，對撞機中幾乎所有的碰撞過程對他們來說都稀鬆平常。根據預測，只有極少數事件（少於百億分之一）可能產生超伴子。如果偵測器記錄下所有的事件，要在這當中找到超伴子事件是完全不可能的事。以實際的數字來說明：如果判斷某事件是否產生超伴子需要一秒鐘的時間，則找到一個超伴子可能要花上一千年。因此，偵測器必須在十億分之一秒鐘之內便決定一事件是否可能帶有超伴子，而加以記錄。這個動作稱為觸發（triggering）。如果偵測器觸發錯誤，即使超伴子事件發生了，偵測器也無動於衷。要建造能夠獲致新發現的偵測器，需要一群高智慧的人，才辦得到。

觀測到一個可能的訊號之後，我們倒是知道怎樣進一步確認。首先，科學家仔細計算標準模型所允許的背景事件，證明這當中沒有一個可被錯認為訊號。其次我們必須證明所觀測到的訊號產生率、衰變模式、質量，都與理論預測相符合。這是個很強的約束條件。如果訊號產生率比預期高出太多，我們會知道這並非真實訊號；有可能是分析過

程中出了錯，或者是會隨著更多資料的蒐集而消失的統計誤差。而如果看到的事件對應的是次要的衰變模式，則主要衰變模式也應該出現才對。如果主要衰變遲遲未出現，則之前所看到的可能也只是假訊號。

某個事件若已通過重重考驗，就應該被認真看待了。最後，只要找到一個超伴子事件，其他超伴子事件也應該就在附近才對。我們可以藉由質量，都把它們找出來。一開始當然有高度的不確定性，但一旦第一個事件被找到，人們知道了一個超伴子的質量，也就能夠估計其他超伴子的質量了。這些測試之所以可能，是因為超對稱理論十分完整。通常在其他科學領域較難精確預測會看到什麼現象，但在這裡，一旦知道超伴子的質量，所有其他性質都可計算而得。

超伴子有哪些行為模式？

像我們這種對超伴子朝思暮想的科學家，在腦海中已經建立其行為模式的圖像。我們對其中一些超伴子也有所偏好。超電子和超緲子不參與強作用力，它們與光子、Z玻色子產生交互作用，而轉變為電子或緲子以及最輕超伴子。不過，除非極度小心檢視，正反W粒子對的生成，看起來會很像超電子或超緲子事件。W粒子的超伴子（超W粒子）和帶電的超希格斯玻色子，行為更複雜：當希格斯機制作用時，它們將無法分開而形成

一種稱為超荷子（見附錄C）的混合態粒子。同樣的，超光子、超Z粒子，則與中性超希格斯玻色子形成混合態的超中性子（見附錄C）。超膠子是所有超伴子中交互作用最強的，如果它的質量不是太大，將是費米實驗室中最容易製造出來的超伴子。

我現在要向大家介紹超伴子交互作用的幾個例子。未來，LEP和費米實驗室可能藉由這些交互作用製造出超伴子來。在此，費曼圖或許是最能夠清楚表達粒子的生成與衰變的一項工具。

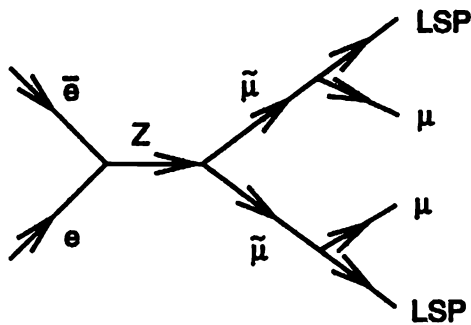
交互作用的初態是對撞機的兩束入射粒子，在LEP為電子、正子，而在費米實驗室則為隱藏於質子與反質子中的夸克或膠子。理解費曼圖的方法是想像時間自圖的左方向右方前進。這裡將要提到的交互作用，如圖六至圖九、以及圖十一，都是由第二章的基本交互作用圖（第66頁至第70頁），再以第四章的法則（如第120頁的圖五）加入新頂點，使交互作用成為超對稱的。

過程大體如下：首先，超伴子在對撞中產生，接著經過一連串的衰變成為圖右方的最終產物，並由偵測器所記錄。交互作用中產生的微子和最輕超伴子是以間接方式測量的，因為雖然我們無法直接看見它們，但可由帶走的能量得知其存在。由於我們還不知道質量最輕的超伴子究竟是何種粒子，因此在費曼圖中僅以LSP來標記。如非必要，我不再區分粒子與反粒子，以及電性正負，以簡化符號。而且，有些時候偵測器也無法

區分粒子與反粒子。（不想再深入瞭解如何偵測超伴子的讀者，可以略過以下幾段，請直接從圖十二以後的內文繼續讀下去。）

超紕子和超電子或許質量夠輕，而能在LEP誕生。圖六為超紕子的生成模式之一。圖中，電子、正子對撞形成Z玻色子，而Z玻色子隨後形成一對超紕子，接下來超紕子衰變為紕子和最輕超伴子。對於這種事件，偵測器會記錄下兩個以任意方向前進的紕子，並藉由失落的能量推算出最輕超伴子的存在。

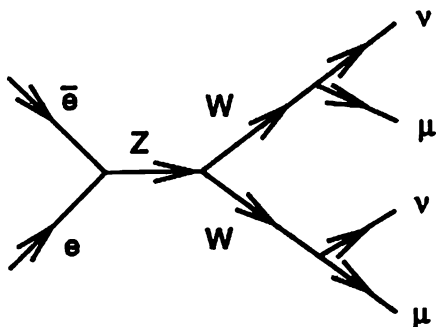
要辨認出這種事件並不難。紕子的能量很容易測量，將它的能量與入射的電子、正子做比較，立刻就知道能量有無短少。不幸的是，會冒充這種事件的標準模型背景比比皆是，因為W玻色子的衰變模式之一便是產



圖六 LEP製造超紕子的可能途徑之一。順著箭頭的方向，圖右方的兩個紕子和最輕超伴子（LSP）為最終產物。紕子為偵測所記錄，而LSP則帶著能量逸失。

生繃子，再加上一個和最輕超伴子一樣帶著能量逸失的微子。如圖七所示，即使超伴子不存在，標準模型也容許一對W玻色子在對撞中產生，而當W粒子以上述模式進行衰變時，整個事件的最終產物——兩個繃子與能量失落，乍看之下和超繃子事件一模一樣。

所幸，如果超繃子事件真的存在，而且對撞機的粒子束強度夠，產生了夠多的事件，我們仍然可以靠著仔細的分析，得到訊號。首先，我們以理論計算WW事件發生率的預期值。如果LEP所觀測到的這些事件數比預期數高出許多，超出統計波動所能解釋，超繃子事件很可能就混在其中。其次，圖六與圖七的交互作用過程，各自失落的能量並不相同，因此如果偵測到夠多的事件，我們也能看出端倪。

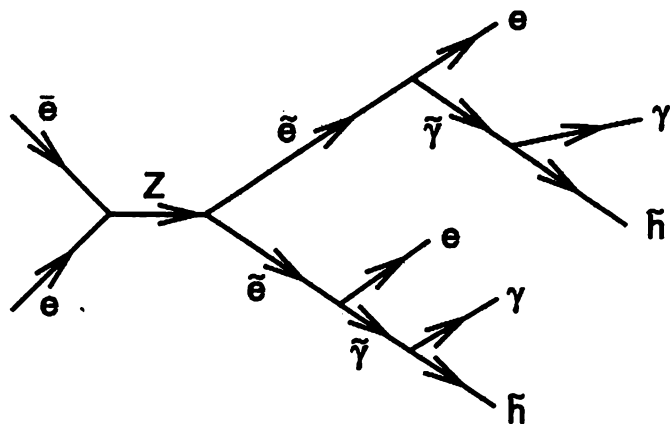


圖七 這個標準模型交互作用的最終態看似圖七的超繃子事件，發生機率不容忽視。圖中的微子（ ν ）同樣帶走能量、並逃過偵測。

我們並不知道最輕超伴子是什麼，但若最輕超伴子恰好為超希格斯玻色子，則LEP便多了一個可能發現超伴子的過程。

由於技術性的理由，對撞產生的超電子對，多半會衰變為電子及超光子，而非直接變為電子及最輕超伴子（在此情況下為超希格斯玻色子），碰撞事件先製造一對超電子——反超電子對，隨後衰變為一個電子、一個正子、及兩個超光子。本身不穩定的超光子則又衰變為質量更輕的超希格斯玻色子和光子。最後偵測器所測到的是一個電子、一個正子、兩個光子，以及被兩個超希格斯玻色子帶走的失落能量（圖八）。

能冒充這個事件的背景事件非常罕



圖八 當最輕超伴子為超希格斯玻色子($\tilde{h}$)時，LEP可能以圖中的途徑製造超電子。

有，而且製造的光子能量、運動方向也和圖八的超伴子事件大相逕庭。因此如果找到這些事件，我們立刻就會知道是否為背景事件。

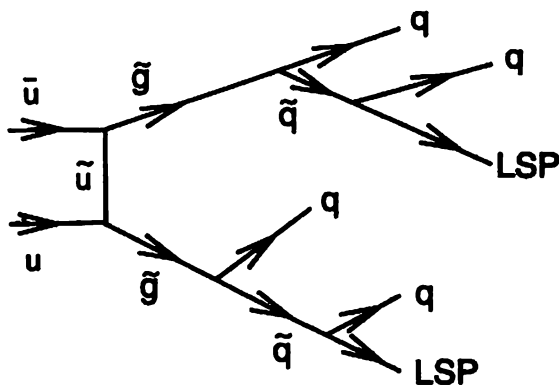
LEP在二〇〇〇年仍持續運轉。最輕超伴子的候選者是超電子、超緲子、超陶子、超頂夸克、超荷子，以及超中性子。如果這些粒子其中一個的質量在LEP的可及範圍，它就會生成並被辨識出來；否則就代表超伴子的質量還要更高，LEP的能量還不夠高。因此即使我們什麼都沒觀測到，也不代表超伴子不存在。第七章我們會談到LEP在發現希格斯玻色子的可能前景。

從二〇〇一年三月起，費米實驗室便會以LEP的數倍能量及強度運轉，因此製造超伴子的機會比LEP更大。而且，LEP所使用的電子—正子對不參與強作用力，因此不會產生任何超膠子；費米實驗室的質子—反質子對則含有夸克、膠子，因此可以產生超膠子。根據理論臆測（並非證明），由於超膠子的質量不應太大，費米實驗室的希望頗為濃厚。這一點使費米實驗室贏面較LEP大。

然而，費米實驗室可能發生的交互作用種類較LEP來得多，因此在背景事件的排除上更為棘手。但在一群志在做出新發現的實驗家手裡，這並非不可能辦得到。可能發生在費米實驗室的超伴子事件之一，看起來與圖八也很類似——只要把入射的電子與正子，換為質子與反質子所提供的上夸克與反上夸克即可，最終態則是一個電子、一個正

子、兩個光子、以及失落的能量。費米實驗室能夠有效辨認出這種事件，而且其背景極低。我在前面已經提到，已經有這樣一個事件在費米實驗室記錄下來了。後續的分析顯示，該事件通過一切篩選，已成為一個真正的候選超伴子事件。兩個偵測器實驗群的工作夥伴，此刻正焦急的等候新改裝的對撞機是否會再度製造這種事件來。

圖九及圖十一所示為其他兩種可能發生在費米實驗室的超伴子事件。圖九是由對撞質子中的夸克出發，產生超膠子的途徑之一。超膠子在生成後立即衰變為超夸克及夸克，而超夸克再度衰變為夸克及最輕超伴子。最



圖九 超膠子($\tilde{g}$)可能以圖中的交互作用在費米實驗室產生。超膠子誕生後，會先衰變為中間產物超夸克($\tilde{q}$)，最後則生成四個可觀測的夸克、反夸克，以及兩個帶走能量的最輕超伴子。

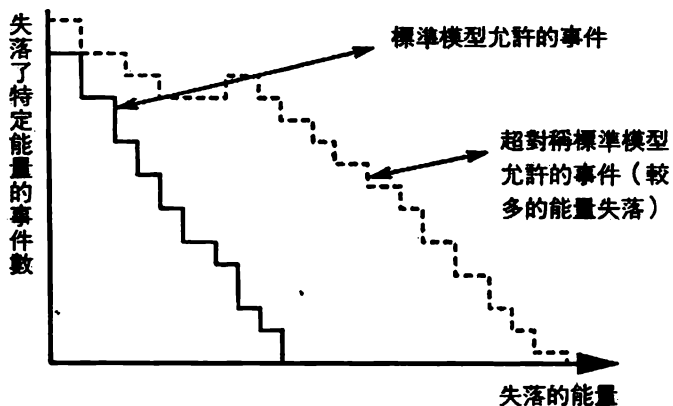
終態包含了四個夸克（在圖中，我刻意簡化了，不去區分正反粒子）以及兩個最輕超伴子。夸克與膠子參與強作用力，因此在偵測器中會製造出許多高速運動的粒子。圖九裡，每一個生成的夸克都會在偵測器中造成一束高能粒子。

許多標準模型交互作用也以夸克為最終態，但由於它們不生成最輕超伴子，所以失落的能量比圖九的交互作用少得多。換句話說，研究人員如果發現類似的事件發生頻率比標準模型所預期的高，所伴隨的能量失落也較預期大時，就有可能觀測到超伴子事件。

實際上，這些當然都要以定量方法來研究。屆時，研究人員可能會以次頁的圖十這樣的圖解來作裁決。結果若真如圖中虛線所示（請參閱圖說），物理學家便會相信超對稱已被發現。然而，要說服所有大眾，這些能量失落過多的額外事件便是超對稱存在的證明，則是比較困難的一件事。

圖十一為費米實驗室可能觀測到的超W玻色子與超Z玻色子生成模式。（實際上，更正確的說，它們皆為混和態超伴子——超荷子與超中性子。在此為簡單起見，我們不考慮複雜的混和態粒子。讀者請參閱附錄C。）

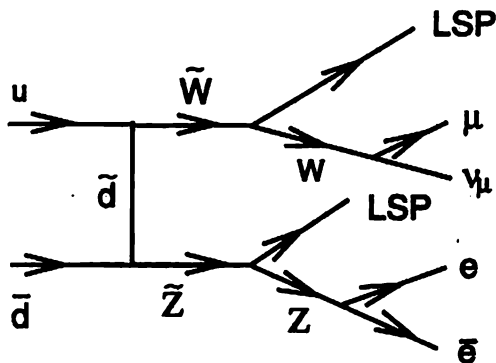
一開始，來自質子的上夸克，與來自反質子的反下夸克進行對撞，在交換一個超下夸克之後，形成超W粒子，而超W粒子隨即衰變為W玻色子及最輕超伴子。本身不穩定



圖十 許多標準模型過程在偵測器中看起來，與圖九的交互作用十分類似。本圖是判別超對稱事件是否為真的辦法。由於最輕超伴子帶走較多的能量，因此超伴子事件總是伴隨著較多的能量失落。實驗物理學家於是把「失落了特定能量的事件數」對「失落的能量」作圖，如果超伴子事件沒有發生，得到的結果應該是圖中代表標準模型的實線。倘若超伴子事件確實發生，則結果應如圖中代表超對稱標準模型的虛線。

的W玻色子再度衰變為繃子和繃微子。繃子可被偵測器直接記錄，而繃微子和最輕超伴子則帶著能量逃逸。在交互作用的另一端，反下夸克形成超Z粒子，接著衰變為最輕超伴子及Z粒子，Z粒子再衰變為電子及正子。電子—正子對被偵測器記錄到，而最輕超伴子逸失。

總計偵測器會觀測到電子、正子、繃子，並測到能量失落。這個交互作用不產生常見的強作用高能粒子束。由於輕子在偵測器中的行為很容易瞭解，標準模型對於輕子事件又有相當準確的描述，因此這種事件成為十分理想的研究對象。物理學家稱之為「三輕子事件」



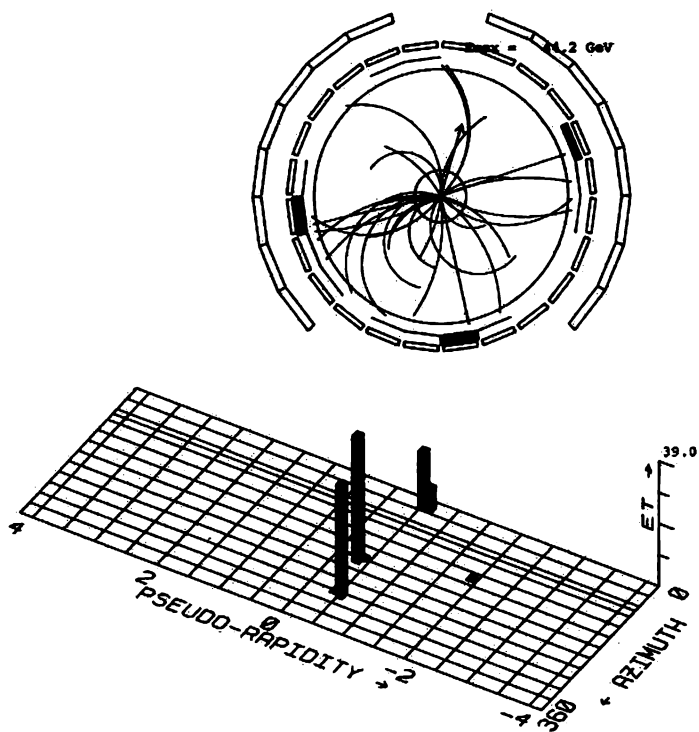
圖十一 費米實驗室製造W超伴子與Z超伴子的可能途徑。超W粒子與超Z粒子先衰變為中間產物W粒子與Z粒子，再形成三個可偵測的輕子（三輕子事件），而部分能量則被兩個最輕超伴子和一個繃微子帶走。

(trilepton)。在費米實驗室升級之後，三輕子事件將成為尋找超對稱的利器。倘若屆時超伴子已經發現，三輕子事件還是可以扮演重要的驗證角色。

次頁的圖十二則是三輕子事件在費米實驗室中看起來的樣子。這並非真實事件，而是由費米實驗室CDF偵測器小組的納克曼（Jane Nachman）所做的電腦模擬。在計算中，她假設W超伴子與Z超伴子的質量約為Z玻色子的一·三倍，並以圖十一的模式進行衰變（唯一不同處為繃子以電子代替）。

圖十二上方的圓形圖，為粒子軌跡在平面上的投影，入射粒子與紙面垂直。圓形之中的許多弧線為粒子軌跡，彎曲的軌跡是外加磁場的結果，愈高能的粒子其彎曲程度就愈小。箭頭代表的是被兩個最輕超伴子帶走的能量大小及方向。圍繞著對撞點的長條盒子，能夠告訴我們電子所釋放的能量大小。若把這些排成環狀的偵測器鋪平，看起來會像是圖十二下方所示：我們可以看出三個電子釋放了大量的能量。從電腦重建的事件當中，我們可以推測出事件的性質，並判斷這其中是否牽涉了標準模型之外的過程。

我們有理由相信，費米實驗室有能力逮到超伴子的生成。最重要的理由之一是根據標準模型中，希格斯物理的超對稱詮釋而來。我們在前一章說過，由於超對稱說明了W與Z等粒子的質量，因此超伴子的質量不會比W或Z的質量大得太多。費米實驗室已經製造了數以千計的W粒子與Z粒子，詳細計算的結果顯示，超膠子、超荷子、超中性子



圖十二 電腦模擬的三輕子事件

與超頂夸克應該已經在費米實驗室能力可及的範圍內。要不然，第四章所列關於超對稱那些令人印象深刻的「成功」，將淪為無意義的巧合。

假定費米實驗室真的找到了超對稱，接下來呢？人們一定會非常興奮，因為這代表人類的知識又向前邁進了一大步，而且打開了通往最終的基始理論的一道大門。證實自然界以超對稱運作，使我們知道先前的努力是走對了方向，繼續前進將會有更多斬獲。超對稱或許是科學家追求基始理論的過程中，最後一項可藉實驗測試的理論了。

隨著超對稱的證實，更精采的研究將展開序幕。超伴子的性質將告訴我們許多關於基始理論的運作模式，因為不同模式所推導出來的超伴子都具有不同的質量和交互作用性質。擁有高品質的數據在手邊是非常重要的。這並非易事，因為圖六至圖十一的各種交互作用，都與超伴子的許多性質有關。要決定超伴子的質量和各種交互作用性質，我們需要大量的事件才辦得到。這是一項極具挑戰性、也是非常令人振奮的工作。

參觀費米實驗室

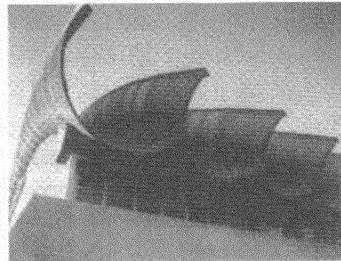
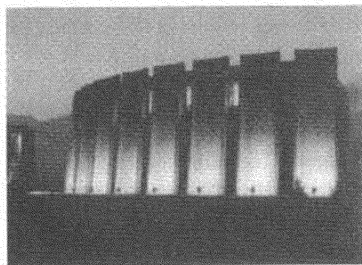
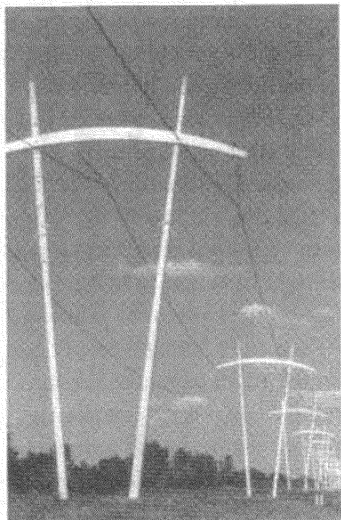
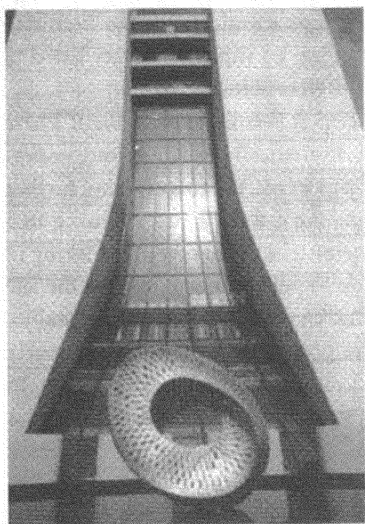
如果超伴子和希格斯玻色子在費米實驗室找到，並加以研究，這將是一項重大的科學成就。然而，費米實驗室還有另外一個特點：來這裡參訪之所以令人興奮，不只是因為它的科學地位，也因為來這兒一遊是視覺和美學上的饗宴。

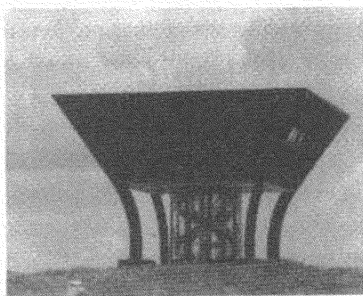
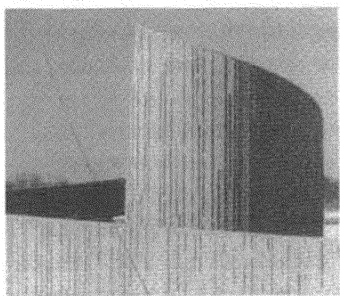
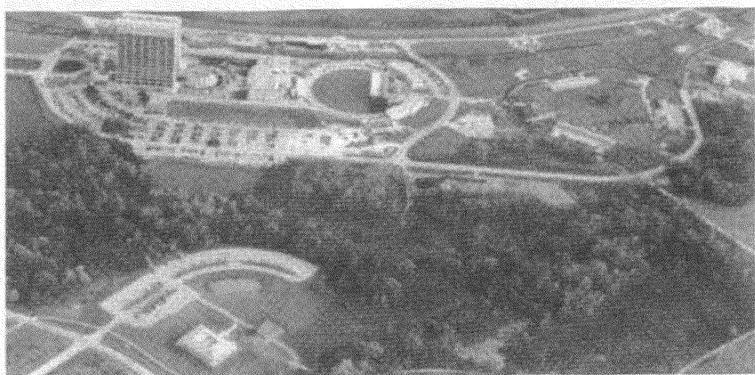
一九六〇年代負責設計、建造，以及管理第一年運轉的實驗室主持人威爾森^①，不僅是一位很好的物理學家，也是優秀的雕刻家。他使費米實驗室外觀美不勝收（這個形容詞並不常使用在政府或科學機關上），大家可在下面三頁的一系列照片中看到。威爾森甚至說服了國會和能源會允許他把百分之一的建造經費用於美化。

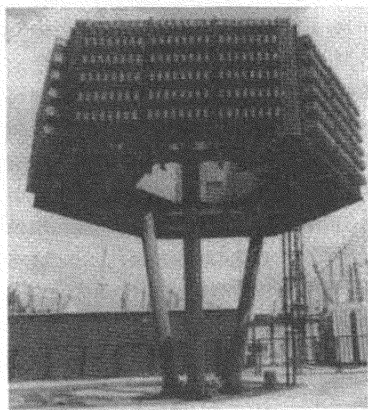
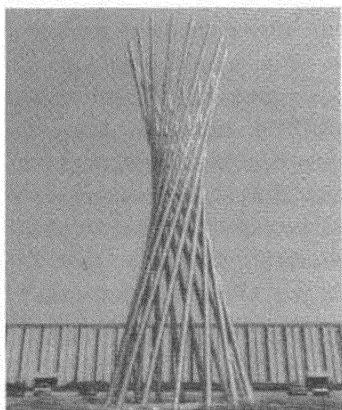
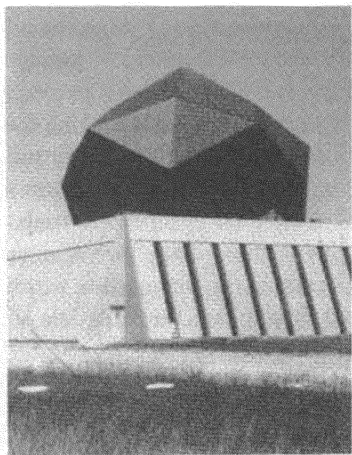
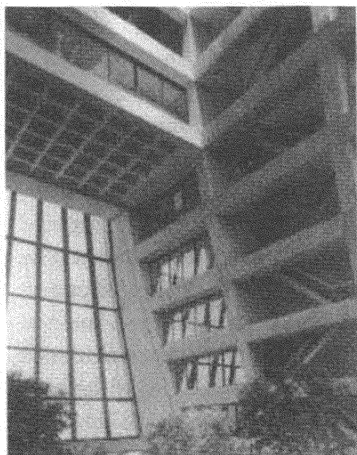
最近，美國航空暨太空總署的主持人戈爾丁（Dan Goltin）在參觀費米實驗室時聽到了這回事，據稱他的反應是，「現在政府單位可不能這般搞法。」

費米實驗室的主建築物——威爾森館，是一棟高聳的大樓，也是人員辦公及從事各種會議活動的地方。下一頁最左上方的照片為威爾森館外觀，第三頁左上圖為威爾森館內部一景，第二頁上方是鳥瞰圖。其他照片為費米實驗室園區各樣建築與景觀雕塑。

來費米實驗室可參觀其加速器長達四英里的主環、偵測器，以及各式實驗設施。登上威爾森館可對整體景觀一覽無遺。實驗室方面會安排參觀行程，遊客也可自行前往，不過這將無法見到加速環和偵測器。在那兒有個自助餐廳，甚至還有一間由某位科學家的配偶所經營的美食餐廳（目前供應週三午餐及週四晚餐）。想知道更多資訊的讀者可以上網查詢（www.fnal.gov），費米實驗室是個非常好的去處。







下一代對撞機

雖然超對稱的最初證據應該很快就會被LEP或費米實驗室發現，然而根據現有的資料顯示，這兩座對撞機將無法進行下一波的基始理論研究。費米實驗室在未來十年左右應可以進行許多實驗，得到重要資料。但就我們對理論的瞭解，單靠費米實驗室的數據是不夠的。

首先，有一部分的超伴子和希格斯玻色子的質量過大，費米實驗室無法製造出夠多的粒子以構成發現。歐洲粒子物理研究中心的LHC計畫，將會達到費米實驗室的七倍能量，以及十倍左右的粒子束強度，這將使它輕鬆勝任偵測與研究大質量粒子的任務。費米實驗室所能測到的超伴子個數，將不足以對某些問題作出定論。

其次，最近科學家發現，即使能量高如LHC，也無法進行某些重要的基本量測。除了高能量、高粒子束強度之外，我們還需要能選擇粒子束自旋投影方向的輕子對撞機（電子—正子、或緲子—反緲子的所謂「偏極束」對撞機）。這是因為要完全瞭解超伴子的性質，就必須對未知的參數進行測量。科學家發現唯有將不同偏極方向的粒子束的粒子生成率、分布等等資料納入，才算是完整探索了未知的參數。當然，這種對撞機的入射粒子能量也必須高到能夠產生某些超伴子才行。

美國加州帕洛奧托（Palo Alto）的史丹福直線型加速器中心（Stanford Linear Accelerator Center）已經花了超過十年的時間研究這種新型加速器，日本、德國，以及歐洲粒子物理研究中心也在進行同樣的研究。到目前為止，我們還不知道它將來會設在哪裡，也不知道要以哪一種科技來加速粒子束。一九八七年，我給它取了個NLC（Next Linear Collider，下一代直線型對撞機）這個名字，結果一直沿用至今。一旦研發工作告一段落，地點也確定下來之後，它將會有個新名字。

十年來的研究顯示，NLC的建造是可行的，一旦完成，它將有能力製造並研究超粒子。接下來的挑戰，是怎麼把預算壓低，並說服預算單位。NLC會彌補費米實驗室和LHC的不足，結合三者可以使我們推導出超粒子的性質。

最近，有另一種輕子對撞機的構想提出來了。繆子通常在生成後的百萬分之一秒就衰變為其他粒子，所以看起來不像是用來形成對撞機粒子束的好選擇。不過，狹義相對論一再經實驗印證的結果之一，便是運動中的時鐘走得較慢。不穩定的粒子就像時鐘一樣，因此運動中的繆子生命期會較長。在對撞機的能量尺度下，繆子的生命期已經足夠讓科學家將它們聚集成強束，並加速至高能量。我們必須再進一步研究許多技術細節，才能知道利用繆子對撞機進行物理實驗究竟能不能行得通。長遠來看，這或許是以偏極粒子束研究大質量超粒子的可行途徑。科學家多以FMC（First Muon Collider，第一繆

子對撞機）來稱呼這個未來加速器，但它的運轉能量、建造地點都還是未知數。

由於對撞機走在知識的尖端，其設計與建造往往也需要拓展現有科技才行。單要研究新技術是否真的可行，並找到在預算內建造成功的辦法，往往就要耗去十年左右的時間，而真正建造又要花上十年左右的時間。因此，我們不能期待新設施突然冒出來製造新的粒子供我們研究。

歐洲粒子物理研究中心的大型強子對撞機 LHC 已經在建造當中，由於它用到許多剛剛發展出來的技術，再加上經費有些短缺，因此真正完工的時間可能是預期的二〇〇五年，也可能比這還遲許多。NLC 自一九八〇年起就在評估中，樂觀的話可望在二〇〇二年通過預算，一切順利的話，可能於二〇一〇年完工啓用。FMC 則是相當新的點子，還需要長時間的研究來評估可行性。能量更高、粒子束更強的未來對撞機，則需要更新的科技撐腰，要到更遙遠的未來才會出現。

我在次頁的表三總結了全球現有、以及計畫中能夠製造超粒子的粒子對撞機。

我們能夠做所有必須做的實驗嗎？

有朝一日，我們會不會需要製造比表三的設施更大能量的對撞機呢？我們能夠建造出這樣的機器嗎？實驗的限制因素當中，有一項是經費問題。要能夠探測大自然的更深

表三 對撞機的現況與未來

對撞機	對撞粒子	總能量	位置	現況
LEP	電子、正子	200	CERN, 日內瓦	於2000年停轉
費米實驗室	質子、反質子	2,000	芝加哥	於2001年升級後開始運轉
LHC	質子、質子	14,000	CERN, 日內瓦	預計2005年啟用
NLC	電子、正子	500-1,500 ?	?	完整計劃書正準備中
FMC	繚子、反繚子	?	?	研究階段

說明：這張表列舉了現存或計畫中能夠製造超粒子或希格斯玻色子的對撞機。歷經十三、四年的研究後，美國科學家將在近期提出NLC的正式企劃書，其他國家也可能會提出別的提案。順利的話，NLC的地點可望在申請建造經費的過程中決定，實際的建造大約要花七年時間。NLC可以很自然的擁有瞭解超對稱所需的偏極粒子束，而繚子對撞機在某些狀況下也可以具備這能力。表中總能量的單位為十億電子伏特，不過讀者只要注意其相對大小即可。要說明一點的是，使用質子的對撞機，其總能量無法全都用於製造新粒子。

層規律，使人類更進一步瞭解宇宙，我們就需要更大更複雜的實驗設備，並需要新科技的支援；而舊的設施也必須擴充，以提供新的知識資源。這些都需要大筆經費，唯有政府或是最大的財團才有能力出資興建。

事實上，建造新的對撞機對社會一直有幫助，這個幫助不僅是無形的知識，甚至包括實際的金融方面，因為新的研究發展工作往往會有肇致億萬產業的「副產品」，最新的例子便是由粒子物理學家爲了應付龐大的資料分析而引進的全球資訊網（WWW）。其他還有許多例子。遺憾的是，握有決定權的決策者往往不知道這是一項投資，因為這類投資的報酬通常得在決策者下台後才看得見。

我認爲，社會應該要贊助在科學上和技術上站得住腳的實驗。經驗告訴我們，這並不是分享預算大餅的零和遊戲，社會的每個部分都會從這類計畫受益。

另外的限制可能是來自人力資源的缺乏。要建造最新的設施，並使之成功運轉，需要爲數衆多具有天分並努力工作的人。要從零出發是不可能的。在現有的粒子物理實驗室工作的人，大多具有相當經驗，也一直跟著時代進步，這些人知道如何利用新的對撞機解答重要的科學問題。若有一天，現有設施停止運轉，這些人只好另謀出路，許多人可能就此離開研究圈。一旦人去樓空，就不可能再度召集他們回來，這對社會來說是雙重損失。如果美國不繼續支持新設施的建造，這個研究領域將會萎縮消失。最優秀的人

員或者前往他國，或者離開研究工作，而剩下的人面臨人才缺乏和設施老舊的窘境，也將無法施展。

我們會不會需要更大的加速器？這和超粒子與希格斯玻色子能否在未來幾年發現有關，也要看LEP、費米實驗室和LHC會不會給我們帶來意外的發現而定。說不定，這些機構就足夠提供關於基始理論的證據，不過在那天到來以前，誰也說不準自然界是否像我們想像的一般。

話說回來，科學家能以如此的精確度來「想像」自然界，真是一項在歷史上前所未有的成就了，這必須歸功於標準模型，以及開啓了蒲郎克尺度及基始理論之窗的超對稱，使我們能繼續研究宇宙之謎。（我們除了利用對撞機去研究新粒子、新交互作用之外，還需要知道微子的質量，瞭解暗物質。而由於質子的交互作用在時間倒流下是不變的，因此研究質子衰變將對C P守恒②與否提供資訊。這些實驗的困難度都很高，但都是可能辦得到的。）

即使我們需要更高能或粒子束更強的對撞機，也未必建造得出來。增加粒子能量的唯一辦法是施加電場，而能用以加速粒子的電場強度是有實際限制的。對於直線型加速器來說，能量愈高，表示加速器的總長度就需要愈長——很有可能長到太過於昂貴，或是根本不太可能建造的地步。對於迴旋加速器來說，用以彎曲粒子軌跡的磁場強度和磁

鐵的耐久度，也限制了粒子能量。由於能量愈高，製造或發現新粒子的機率就愈小（這並非顯然如此，但卻是量子理論的結論之一），所以高能對撞機也要有高強度的粒子束才行。有許多將粒子加速至高能量的想法，雖然深具創意，但因為無法提供夠大的粒子通量，所以用處不大。對撞機的研發工作雖然還不到技術和經費的盡頭，但我們已經可以感覺到盡頭正逼進中。

基始理論在望

超對稱理論最讓人期待的一點是，利用現有興建中或重新設計的實驗設備，我們便可以蒐集到足夠的資料，來測試和表述基始理論。超伴子的質量和產生率，會告訴我們許多關於基始理論的重要資訊。當然，宇宙中的暗物質本性、中子與電子在電場中可能存在的微小效應、甚至質子是穩定或終將衰變，都與基始理論密不可分。不到最後一刻，我們並不知道能否獲得足夠的資料。

不過，這畢竟是有史以來第一次，我們有足夠的理由相信，基始理論可能將在幾十年內完成。

【注释】

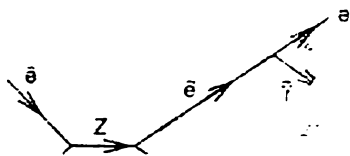
①編注：威爾森（Robert R. Wilson, 1914-2000），美國物理學家，早年曾參與曼哈坦原子彈研發計畫，並在康乃爾大學紐曼實驗室（Newman Laboratory）從事核物理研究。威爾森負責設計、建造了費米國家加速器實驗室，並擔任實驗室第一任主持人（一九六七年至一九七八年）。

②編注：C P守恒（conservation of charges and parity），即電荷守恒與奇偶性守恒（宇稱守恒），這是物理學裡面的基本守恒律之一，它是說在一個交互作用的前後，全部的電荷及奇偶性總值不會改變。奇偶性是次原子粒子的內秉對稱性質。

第六章

宇宙的質量

現在把所知物質的質量全部加起來，包含恆星和星際物質，我們還是只能解釋全宇宙最多約五分之一的總質量。不論剩下的五分之四是什麼，都不太可能是已知的粒子。



一九八〇年代初期，科學家瞭解到，若超對稱世界中存在穩定的最輕超伴子，會導致令人訝異的結論。如果超對稱理論為真，大霹靂後宇宙會充滿最輕超伴子，數量多到其重力作用足以顯著減緩宇宙的擴張。

宇宙中大量的各式基本粒子，包括夸克、輕子、W、Z粒子、光子及膠子等，皆在大霹靂中誕生，超伴子也不例外。這些粒子在誕生之後穿梭在擴張的宇宙當中，並相互碰撞。當時的宇宙（譯注：指「可見宇宙」而言）仍然很小，大概只有足球一般大。較重的超伴子衰變成較輕的超伴子或是標準模型中的粒子，不久之後，所剩下的只是穩定的粒子，如上下夸克、膠子、光子、電子、微子，以及最輕超伴子。我們稱這些粒子為「殘骸」，因為它們是大霹靂的遺留物，或是在大霹靂後由其他粒子迅速衰變及成對湮滅所形成的。

隨後夸克和膠子結合成為中子和質子，中子和質子又更進一步形成最輕的原子核（氫、鋰，以及極其穩定的氦），原子核和電子再結合成為原子。最初幾分鐘的宇宙中，大約有百分之二十四的原子是氦——這已經過科學家的研究及證實，可說是宇宙學理論最大的成就之一。

在宇宙接下來的發展中，一團團的氫及氦因重力作用而聚集，形成恆星。除了恆星之外，一些原子成為塵埃等星際物質。藉由星光及X射線的觀測，天文學家知道，宇宙

中有百分之十幾的物質是以恆星或星際物質的形式存在。

宇宙質量知多少？

我們怎麼知道宇宙中總共有多少物質呢？基本上，天文學家是藉由觀測星系中星球的運動，以及星系團中星系的運動……來測知的。這些運動軌跡符合牛頓的運動及重力定律，也就是說，星球或星系所受的引力與吸引它們的物體質量成正比，而引力會因距離變大而減弱。以太陽系為例，行星離太陽愈遠，行星的「一年」就愈長。天文學家本來預期在星系中的星球運動也會有同樣的現象，然而所觀測到的星球運行速度卻遠遠超出預期。雖然從星光亮度看來，星系的質量似乎集中在中心，但分析結果卻顯示，質量大致均勻的分布於整個星系。

估計宇宙物質總量的另一個方法，是測量宇宙近期的擴張速率，將它與極早期的擴張速率做比較。若宇宙擁有愈多物質，則在重力作用之下，它的近期擴張速率就會愈慢。做這項測量的工具之一是原子發光所受到的都卜勒頻移（Doppler shift）。

宇宙中的氫原子皆發出一定組合色彩的光（光的顏色是由波長或振盪頻率來決定；波長、頻率這兩者皆可用來描述光的各種色彩效應）。同樣的，碳原子所發出的是另一特定組合格色彩的光。日常生活中一個大家都熟悉的經驗是，當發出聲音的物體（如救護

車）朝你移動時，警笛聲的音調（頻率）聽起來就比較高；反之，遠離中的物體則會發出較低沉的聲音。而光也和聲音一樣有這種效應：接近中的光源會使頻率看來比靜止中的同樣光源高（色彩較藍），而遠離中的光源看起來則較紅——這種現象稱為「紅移」。一九二〇年代，科學家就是經由觀測遙遠星光的紅移，而發現宇宙正在擴張中。星體的紅移程度可告訴我們宇宙擴張的速率。

得知宇宙中有多少物質和能量的第三種方法，是研究宇宙早期遺留下來的光子的能量。這些光子的能量也會受到其他重力源的影響。天文學家及宇宙學家結合了來自各方面的訊息，便得以推算出宇宙中物質的總量。

宇宙中有哪些粒子？

宇宙中有大量的光子，每一立方公分約有四百個光子。家裡的電視機沒有節目播放時所出現的雜訊，約有百分之一來自宇宙中的這些光子。這些光子的能量可占有一定頻譜範圍，科學家早已推算出具有某能量的光子個數，並在一九六〇年代的實驗中證實這個數字。這是大霹靂學說另一項重大的預測，這項成就使科學家對於瞭解宇宙更具信心。由於能量具有重力效應，宇宙中的光子對宇宙的擴張速率當然也會有影響，只不過影響力微乎其微。

雖然科學家至今尚未偵測到大霹靂殘留下來的微子，卻能夠運用預測了光子個數和氦豐度的同樣一套理論去計算微子的數量。由於先前的成功，我們對於所得到的結果有一定信心：微子的數量和光子類似。要知道微子對宇宙擴張的影響，我們不僅要知道微子的數量，還要知道微子的質量才行。我們預期微子具有質量，因為這是標準模型之後的理論所預測的，然而至今仍然缺乏對微子質量大小的可信估計。截至目前為止的實驗也顯示微子具有質量，但這些實驗並無法測量微子的質量大小，只能告訴我們質量上限。這些實驗真正測量到的是兩種微子具有不為零的質量差，至於它們個別的質量至今仍不得而知。

天文學上一個有趣的推論指出，宇宙中至多只有百分之二十的質量來自微子。原因在於微子的質量小，作用力又微弱，若宇宙的質量全由微子組成，微子只會直線前進而不會聚集成現在所見的星系。總之，證據顯示微子可能組成宇宙百分之十至二十的質量，但這個數目只會更少而不會更多。現在已在進行或建構中的實驗，可望在未來十年內給這個問題一個確切的答案。

現在把所知物質的質量全部加起來，包含恆星和星際物質，我們還是只能解釋全宇宙最多約五分之一的總質量。不論剩下的五分之四是什麼，都不會是和構成我們的粒子一樣的物质，甚至不會是我們所知道的基本粒子。在一九八〇年代早期，科學家尚未做

這項研究，因此並不知道我們必須引入新的物質以解釋宇宙質量。當研究人員發現到最輕超伴子的存在可能會影響宇宙擴張速率之後，就開始計算超對稱物質到底有多少，以及它們對宇宙擴張速率到底有多大的影響。

這已經是對超對稱理論的正確性提供了一個強而有力的檢驗，因為在最輕超伴子具合理質量的前提下，科學家大可推論出宇宙是「過度封閉」的，也就是說，最輕超伴子提供了太大的吸引力，而使宇宙在抵達現在的大小之前就停止擴張而塌縮下去。如果這是真的，你就不會在這兒閱讀本書了。事實上研究人員發現，最輕超伴子所提供的重力大致能夠解釋宇宙的质量總和。不過若要做更進一步的確認，科學家必須測得最輕超伴子的質量及其交互作用的性質。

由於最輕超伴子的交互作用過於微弱，超對稱物質不會參與恆星製造星光的反應。然而，不但超對稱物質彼此之間確實有交互作用，它們也和標準模型的某些粒子有些微的交互作用。這些物質也有聚集而形成星系的傾向，因為所有物質都具有重力作用。但是，就如同微子一般，如果只有它們而無其他物質存在，宇宙將會是一片漆黑。超對稱物質因而得名「暗物質」。科學家認為最輕超伴子的質量大約與W粒子相當，比質子或輕原子核重許多，所以最輕超伴子的能量大多不以運動形式存在，而是儲存在質量當中。我們知道高溫代表粒子運動速度快，而由於最輕超伴子運動緩慢，因而獲得「冷暗

物質」的稱號。微子比最輕超伴子輕得多，因此能量多以運動形式存在，因而得名「熱暗物質」。

標準模型不足以解釋宇宙質量

不瞭解這段歷史的人，常誤以為超對稱理論之所以提出最輕超伴子的存在，是為了解釋暗物質；甚至有人以為超對稱理論本身就是為暗物質而量身訂作的。這其實並不正確。研究人員是在完全不知最輕超伴子與暗物質有任何關聯之前，便提出超伴子以及穩定的最輕超伴子等想法；在知道我們「需要」新形式的暗物質之前，科學家就已預測到超伴子可以形成暗物質。

說得更正確一點，在這個預測提出之際，科學家固然已經知道宇宙中有許多除了恆星與星際物質之外的質量存在，但天文學家卻以為這些「失蹤」的物質可由存在於類似木星的巨大行星，或黯淡的白矮星①裡的尋常核種（由質子和中子組成），以及微子來解釋。今天，我們知道這些物質並不足以解釋失蹤的物質。換句話說，將標準模型粒子的總質量相加，也不足了解釋宇宙中的所有質量，而最輕超伴子卻可以。

好罷，超對稱理論提供了瞭解釋宇宙大半質量的正確物質，那又如何？這個重要性在於：如果超對稱理論在這上面對了，它在解釋希格斯機制以及其他很多方面，也可能

是對的（請參閱第四章及後面數章的詳細解釋）。也難怪許多物理學家對此感到非常興奮。在興奮的同時，大家也別忘了這個領域仍是RIP，新的數據或新的點子可能都會改變我們的理解。例如，科學家猜測其他物質形式也可能可以解釋暗物質。

最輕超伴子是不是冷暗物質？

我們要怎麼知道最輕超伴子是否就是宇宙中的冷暗物質？要回答這個問題，必須做下面這兩件事：首先在實驗室中找到最輕超伴子，對其性質做一番瞭解；其次，用以計算在大霹靂結束、並經歷了成對湮滅的時期之後，到底還有多少最輕超伴子遺留下來。

在第五章，我們已經詳列了對撞機可能找到超伴子的方法。超伴子事件發生時，會有一對最輕超伴子逃過偵測器的捕捉，因此對撞機「觀測」超伴子的辦法是間接推論，而非直接觀測。聽起來好像要多費一番手腳，事實上不過是由「來自物體的反射光進入眼睛」變為「分析來自偵測器模組的數位訊號」，只在一串推論中多加一個步驟罷了。

如果最輕超伴子真的就是冷暗物質，對撞機將能夠偵測到超伴子，而最輕超伴子則可以用間接方法推測是否存在。一旦這種事件發生，我們就可更進一步推論出最輕超伴子的性質，並計算宇宙到底有多少比例是由最輕超伴子組成的。

事實上，這當中還有一項有趣的微妙之處。要成為冷暗物質，最輕超伴子的生命期

至少必須和宇宙年齡（約一百二十億年）相當。如果最輕超伴子是穩定粒子，那當然沒有問題。不過我們知道，超伴子的生命期通常遠短於十億分之一秒；如果最輕超伴子可以逃過對撞機偵測器的捕捉（只要生命期長於十億分之一秒即可），就表示它們已經活得比自然壽命久得多了，這或許暗示最輕超伴子是穩定粒子。但也有可能是：最輕超伴子逃出了偵測，卻立刻就衰變了（所謂的立刻是指一秒或一年之後），這樣一來它們就不可能是冷暗物質了。

既然我們想要回答的是「宇宙大部分是由什麼組成」這樣重大的問題，當然不能只憑偵測器捕捉不到，就論斷最輕超伴子是穩定粒子。我們還需要有更扎實的證據，最好的方法是直接以實驗證明最輕超伴子的生命期至少和宇宙年齡一樣，並且現在還遍布全宇宙。

明確偵測到最輕超伴子，並證實它們正是冷暗物質，大致上有三種方法。第一種方法，同時也是最希望的方法，是直接偵測。若最輕超伴子真是冷暗物質，則它們存在於宇宙的每一個角落。我們的太陽繞著銀河中心運行，而地球又繞著太陽運轉，也就是說，我們本身以及實驗室的偵測器，都穿梭在一團可算是靜止於宇宙中的最輕超伴子「雲」當中。科學家估計一個棒球大小的空間裡，大約會有一個或數個最輕超伴子存在。有時候（非常罕有）我們體內的原子核，或是實驗室裡的偵測器，會和這些粒子迎

頭碰撞，導致粒子的反彈。因此想偵測最輕超粒子，科學家必須製造出對於這種反彈非常靈敏的偵測器，而這是很困難的事。科學家試過了幾種方法，其中之一是以超導物質製造偵測器。超導體能夠攜帶電流而毫無耗散，然而超導性質對溫度十分敏感，反彈事件的極小能量會對超導體有很大影響。

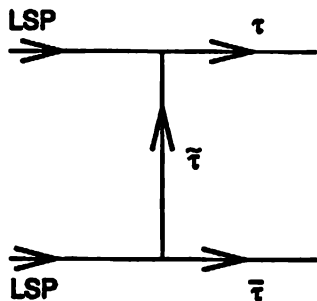
即便製造出這樣靈敏的偵測器，也不見得能明確偵測到最輕超粒子。舉個例子，如果偵測器中的一個原子核發生放射性衰變，衰變的產物也會將能量釋放至偵測器中，由於能量近似，這看起來就像是超粒子事件。實驗科學家記錄到可疑的事件後，有幾種方法可以進一步確認是否真是超粒子事件。例如，地球的繞日運動在一年當中有一半時間和太陽本身的運動同方向，速度相加的結果是地球在這段期間的行進速度較大，而這會導致較高的交互作用事件發生率；反之在剩下的半年期間因速度相消，事件發生率應該會較低。因此，冷暗物質碰撞事件發生率在一年當中應該會呈現可預測的消長。

第二種測量最輕超粒子的方法，利用了最輕超粒子的一項完全不同的性質。太陽與地球的強大重力場會擄獲許多最輕超粒子，這些粒子掉向太陽或地球的中心並在該處聚集。偶然，一對最輕超粒子相遇而成對湮滅。圖十三的費曼圖是表示：一對最輕超粒子交換一個超陶子，而湮滅形成陶子與反陶子。

成對湮滅的產物——陶子與反陶子，接著會衰變，約有五分之一的機率會生成渺微

子。生成的渺微子所具有的能量大約是典型太陽微子的一萬倍，大多數這種粒子並不起任何作用，少部分的渺微子則可能和地底的岩石起交互作用，生成渺子。爲了偵測從地底岩石產生的渺子，義大利和日本已經設立了偵測器。最輕超伴子製造出來的渺子數量究竟能不能多到偵測得到，就要看最輕超伴子的質量和性質而定了。

第三種方法是將偵測器射上太空。如果最輕超伴子充滿了星系，則到處都可能發生成對湮滅的事件，進而產生正反夸克對、電子與正子、光子以及微子等。在太空中，電子、微子、夸克的數量原本就很多，要特意偵測出由最輕超伴子湮滅生成的這些粒子是不可能的。至於正子，由於在外太空較難遇上它的反粒子——電子，因此還能夠存活一陣子。反夸克偶爾會結合成反質子，在地球上會立刻湮滅，但在太空也可以多存活一



圖十三 成對湮滅的暗物質「最輕超伴子」

陣子。而且雖然光子的總數過多，使得偵測過剩光子困難，但如果我們只看具特定能量的光子，或許就偵測得到。這就是為什麼科學家企圖將偵測正子、反質子、以及特定能量光子的儀器送上太空。

截至目前為止，所有的這類實驗都是在高空氣球上進行的，這些氣球能在空中停留幾個小時，或是幾天。我的同事塔爾（Greg Tarte）就帶領這樣一個小組，他們已經得到許多有意思的數據，並且正在建造更先進的儀器，準備在下次升空時使用。另一個野心更大的研究小組由麻省理工學院與歐洲粒子物理研究中心的丁肇中所帶領，他們正建造將在太空站上使用數個月的大型偵測器，該實驗的目標之一就是偵測冷暗物質的湮滅產物，特別是反質子。

需要繁複仔細的驗證

然而，所有的「明確偵測（explicit detection）實驗」都沒辦法立刻告訴我們所測到的就是冷暗物質。瞭解這點是十分重要的。若要知道宇宙中冷暗物質的總質量，我們必須知道冷暗物質的數量，以及粒子質量。這些數字也與如何解釋實驗結果息息相關。此外，爲了得到確切的科學結論，我們也得知最輕超伴子和原子核發生交互作用或成對湮滅的機率。當然，如果真的測到了一些事件，我們在心理上定會信服，但若要宣稱我

們已瞭解宇宙的組成，那得做得更好才行。

我們可能先在對撞機中發現最輕超粒子，接下來不久，某個明確偵測實驗或許就能印證最輕超粒子的確和宇宙具有一樣長的生命期。從對撞機實驗，我們可以推算出最輕超粒子的所有物理性質及交互作用，進而得知它們究竟占宇宙質量多大比例。

就像我在前一章所說的，這不是一件容易的事。爲了得到最準確的結果，我們或許需要結合來自三個對撞機的數據（費米實驗室、LHC、和具有偏極粒子束的輕子對撞機，如NLC或綽子對撞機等，請參見第五章）。初步結果或許可容許我們開始進行粗估，使我們知道最輕超粒子在宇宙中的比例至正負二倍的準確度。這很不錯，但距離我們需要的準確度還遠得很。結合幾個對撞機的數據，物理學家可以計算這個比例至百分之十或二十的準確度，得以和宇宙學家以獨立方法得到的結果進行比對，而證實我們對宇宙組成的瞭解。如果一切順利，這個目標可望在十五年內達成。

這個領域就像其他的RIP一樣，有個弱點。（我提出這個弱點的唯一理由，是因爲這樣就沒有人能說我沒講。如果對撞機找到了超粒子，並偵測到逃離的最輕超粒子，或者某個明確偵測實驗找到了暗物質，這個弱點當然就不成立了。）

有些版本的超對稱標準模型可容許最輕超粒子爲不穩定粒子，這使得自然界確爲超對稱，而冷暗物質卻非最輕超粒子。雖然在邏輯上這完全可能，但基於幾項原因，我和

其他研究人員並不認為這種情況會發生：

第一，這些版本的超對稱理論作出了一些已經證明為非的預測，如質子的生命期小於一秒（如果這是真的，我們就不會在這裡了）。你當然可以再修改理論使質子有很長的生命期，但這種做法過於刻意，而少有理論上的正當理由，修補過的理論也不再一體成形。

第二，理論物理學家嘗試發展的主要理論，如各種弦論，都有穩定的最輕超伴子。

第三，即使最廣義的超對稱理論並不要求最輕超伴子為穩定，然而在某些版本的理論中，當宇宙抵達最低態後，最輕超伴子自然會變為穩定。

第四，如果超對稱真是大自然的一部分，但最令人振奮的結論卻只是巧合，那真是太不可思議了。在基礎物理當中，不可解釋的巧合為數並不多。

宇宙中存在各式各樣的物質。科學家以前認為：宇宙和我們人類一樣，大多由夸克和電子組成；宇宙也包含光子和微子，這些粒子則不受星系束縛，自由前進。現在我們加入了最輕超伴子。此外，尚有人提出其他可能的物質形式，不過我們就不在此討論了。就目前的科學知識而言，科學家必須先分開估計各種物質形式的含量，而且各種物質的含量似乎與其他物質的含量無關。我們的最終目標當然想要打破這個限制，而已經有一些RIP正朝這方向努力。

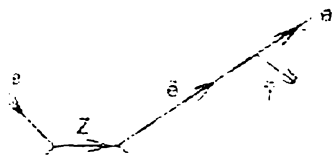
最輕超伴子的質量、微子的質量、質子及最輕超伴子的個數等等，原則上都是由同樣的基礎物理來決定，近年來已經有這方面的初步模型陸續在研究中。當我們愈來愈能夠表述基始理論時，我們預期那不但能對宇宙的組成有整體的瞭解，還能夠進一步解釋為何宇宙的組成必須如此。

【注释】

①編注：白矮星（white dwarf）是恆星演化的一個可能終點。所有質量較小的恆星（低於錢卓斯卡極限，Chandrasekhar limit），當核心的氦核全部聚變成碳核後，其中的電子因量子效應而提供足夠的壓強，使恆星不致因重力作用而崩陷，但碳核也無法繼續進行反應，因此這種恆星的光度很低。

第七章 希格斯物理

超對稱標準模型最令人興奮的成就之一，便是它解釋了為何希格斯機制會成功；而比超對稱標準模型更廣義的基始理論，則可望完全解釋希格斯物理為何存在以及如何運作。



在第二章和第四章中，我簡短描述了重要卻又有點神祕的「希格斯物理」（以其創始人希格斯①為名）。在本章中，我們把重點擺在希格斯物理在標準模型和超對稱中所扮演的角色。我們要討論物理學家以什麼方法找尋希格斯玻色子——如果希格斯物理的想法是正確的，則超對稱標準模型所預測的希格斯玻色子已在實驗的可及範圍內。

書末的附錄A及附錄B，對於希格斯物理如何運作，以及超對稱如何使它更合理，都做了更進一步的說明，請有興趣的讀者自行參閱。附錄的討論比內文更具技術層面，不過也不需要特別知識就可理解。

解決質量問題的唯一途徑

希格斯物理在標準模型中所扮演的角色有哪些？首先，希格斯玻色子是完全不同於已知粒子的全新粒子。

電子和夸克是組成物質的粒子（兩者皆為費米子），其實可歸類於同一種粒子，不同之處僅在於帶有不同量的各種荷值（電荷、強荷、弱荷等）。同樣的，媒介標準模型交互作用力的玻色子雖然也有品種之分，例如光子、膠子、以及W、Z玻色子等等，不過它們與光子都很類似，不同之處僅在於這些玻色子彼此之間、以及玻色子與費米子之間的交互作用。所有的粒子都是場的量子，例如光子即是電磁場的量子，而各種場與大

家熟悉的電磁場都十分類似。同樣的，希格斯玻色子是所謂「希格斯場」的量子，然而希格斯場的起源，科學家並不瞭解。從標準模型的角度來看，希格斯場似乎與其他的場都不一樣。

最早的標準模型理論只有在所有粒子都沒有質量的情形下，才能成立。如果刻意加入質量，理論會變得互相矛盾，使我們無法進行計算，進而預測或闡釋實驗結果。這個困難在引入希格斯場之後，就漂亮的解決了。假想中的希格斯場僅與具有質量的粒子進行交互作用，而使理論保有原來的完整性。引入希格斯場的理論，可以描述粒子質量並計算可觀測量，圓滿解釋許多科學家已經知道、卻不瞭解的實驗結果，成功作出後來被證實的預測。希格斯物理是目前為止解決質量問題的唯一途徑。

希格斯物理的重大成就可顯現在下面這個例子中： W 與 Z 玻色子，以及夸克、輕子，都要經由希格斯機制獲得質量。由於技術上的理由，玻色子與費米子要以完全不同的方法獲得質量，然而希格斯機制簡潔而自然的處理了這兩種情況。簡言之，標準模型下的希格斯機制對大自然的描述十分正確，它在技術上完全成功是無庸置疑的；然而標準模型下的希格斯機制在概念上卻未臻完善，因為我們並不瞭解希格斯場。由於與實驗吻合，標準模型下的希格斯機制在技術的計算層面或許不會改變了，但理論的詮釋方法、拓展標準模型並加強其基礎的蘊涵等問題，都還有待開發。

超對稱標準模型最令人興奮的成就之一，便是它解釋了為何希格斯機制會成功；而比超對稱標準模型更廣義的基始理論，則可望完全解釋希格斯物理為何存在以及如何運作。我們將在本章稍後介紹超對稱所作出的一些可供檢驗的預測。

希格斯物理無法令大多數物理學家信服的源頭之一，是在處理 W 與 Z 粒子質量的方法上。媒介交互作用力的零質量玻色子的自旋可以投影在兩個方向，而帶質量的玻色子的自旋則可以投影在三個方向，這是量子理論法則。舉例來說，在電子及正子對撞生成 Z 玻色子時，若 Z 玻色子是零質量，則其自旋只可能指向電子束或正子束方向；而若 Z 玻色子的質量不為零，則自旋有第三個態存在。量子理論教我們將 Z 的不同自旋態看作不同的量子，所以這樣一來，原本的零質量標準模型理論預測兩個 Z 的量子態，而帶質量的版本卻要求 Z 要有三個量子態！我們要去哪兒弄來第三個量子態呢？

仔細檢驗數學過程，我們會發現 Z 玻色子的第三個量子態源自希格斯場量子。原來它竟是希格斯玻色子的化身！（當我們教學生這個過程時，通常說 Z 玻色子吃了希格斯玻色子以增重，也就是獲得質量。）由於真正的 Z 玻色子皆擁有這個額外的量子態，我們便希望能夠藉由研究這個量子態以檢驗希格斯物理。詳細的理論顯示這或許辦得到，不過卻極為困難。研究人員想出了可以研究這個量子態的技術，並證明這可用來測試希格斯物理。不過由於技術層面的原因，這個現象並不十分明顯，所以我們得使用極高能

量的Z玻色子，記錄非常精確的數值，並研究大量的實驗數據。一度開始建造、隨後在一九九三年取消的超導超能對撞機（SSC），設計構想之一便是提供此項測驗所需的能量和強度。未來的儀器是否有能力達到檢驗希格斯物理的要求，則還是未知數。

希格斯玻色子芳踪何處？

檢驗希格斯物理的最直接方法，是在實驗中製造並偵測到希格斯玻色子。如果希格斯物理的超對稱版本正確，費米實驗室或者歐洲粒子物理研究中心的LEP一定會在接下來的幾年找到希格斯玻色子。

雖然尋找希格斯玻色子在理論上可行，但由於現實上的問題使之深具挑戰性。

首先，希格斯玻色子有一項獨一無二的性質：它和其他粒子間的交互作用與該粒子的質量成正比。然而製造希格斯玻色子（將碰撞能量轉換為質量）需要的極高能量，卻只能藉由加速電子、上夸克、下夸克、膠子（後三種粒子來自質子）這幾種質量甚輕的粒子來達成，因此生成希格斯玻色子的機率極為渺茫，比製造W或Z粒子要困難百萬倍。

其次，在標準模型中，希格斯玻色子的質量是不能計算的，所以我們並不知道要在什麼能量尺度搜尋，使這項差事又困難許多。（在超對稱標準模型當中，希格斯玻色子

的質量是可以估計的。）

第三，希格斯玻色子在極短的時間內就會衰變，偵測器能記錄到的僅是衰變產物，因而很容易和其他事件搞混。要確定所看到的是希格斯玻色子，必須蒐集到許多事件並加以分析才行。事實上，如果希格斯玻色子的質量真如超對稱標準模型所預測，費米實驗室已經製造出一些這種事件了，然而要從一般事件挑出這些希格斯玻色子事件是不可能的。

對希格斯玻色子的特殊性質，以及所牽涉問題的困難度有所認識，就不難理解為何至今尚未找到它。不過，截至目前為止並沒有實驗推翻希格斯玻色子的存在。

蛛絲馬跡

事實上，現在已經有間接證據強烈暗示希格斯玻色子的存在。

我們知道，標準模型是相當有效的理論，科學家引用這個理論已成功的解釋許多實驗。然而標準模型的描述，與夸克、輕子、玻色子的質量以及它們彼此之間的交互作用強度有關。知道了這些參數，科學家可以據此計算許多可觀測量，並在實驗中予以證實。科學家已經知道了大多數這些參數的價值，唯一的未知數就是希格斯玻色子的質量。我們可以利用下述方法估計希格斯玻色子的質量：由於標準模型所預測的可觀測量

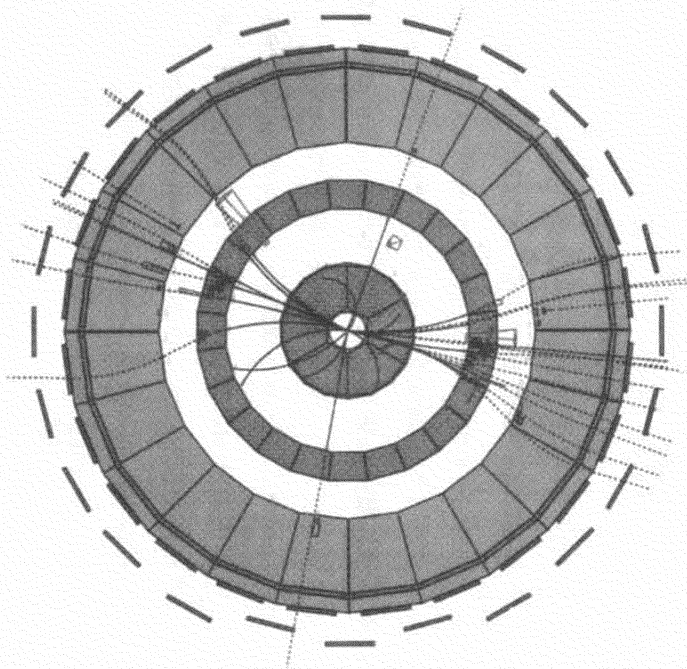
與一開始假設的希格斯玻色子質量有關，我們可以用不同的質量做計算，再看哪一個質量所得到的結果與實驗最接近。

科學家所得到的結果是，如果希格斯玻色子存在的話，現有的實驗數據與理論會更加吻合；當希格斯玻色子的質量與Z玻色子差不多時，理論與實驗的吻合程度最高。雖然這個方法的精確度並不高（因為以二到三倍希格斯玻色子的質量進行計算，所得到的結果和實驗也差不了太多），然而這項研究告訴我們的是一個相當確切的基本結論：實驗暗示希格斯玻色子存在，而且質量大約在這個範圍內。所以我們有很好的理由預期希格斯玻色子可在LEP或費米實驗室偵測到。

次頁的圖十四是LEP的DELPHI偵測器實際事件的電腦數位重建圖，顯示希格斯玻色子事件很有可能在LEP發生。兩條孤立的直線代表Z玻色子衰變而成的繃子；藉由詳細的分析可知，兩團噴射狀的粒子束代表底夸克。

這個事件有可能是以下的過程：對撞產生Z玻色子和希格斯玻色子，接著Z玻色子衰變成繃子，而希格斯玻色子衰變成爲一個底夸克與一個反底夸克；這也是我們預期中希格斯玻色子的衰變途徑。這兩團噴射狀粒子，即呈現出希格斯玻色子在偵測器中的面貌。

不巧的是，這事件也符合兩個Z玻色子的產生過程：其中一個Z玻色子衰變成繃



圖十四 在 LEP 的 DELPHI 偵測器發生的事件，顯示希格斯玻色子有可能在偵測器現身。一點鐘方向及七點鐘方向的兩條孤立直線，代表 Z 玻色子衰變而成的繃子；三、四點鐘方向及九、十點鐘方向的兩團噴射狀的粒子束，代表底夸克與反底夸克。

子，另一個Z玻色子衰變成一個底夸克與一個反底夸克。所以，我們很難論斷是哪一種對撞事件發生。如果蒐集到更多的對撞事件，便有可能區分這兩種過程。

從衰變模式來驗證

超對稱標準模型優於標準模型的衆多理由之一，是超對稱標準模型能讓我們對希格斯玻色子的質量進行近似估算，而標準模型對希格斯玻色子的質量並無有效限制。在超對稱標準模型最陽春的版本中，我們已能夠將希格斯玻色子的質量限制在小於一點五倍Z玻色子質量。雖然這估算並不精確，不過讓人興奮的是，整個範圍恰在費米實驗室於二〇〇〇年升級的對撞機所能蒐集資料的涵蓋範圍內，如果對撞機和偵測器運作順利的話，幾年之內就能完全涵蓋這個範圍。LEP的資料則已經檢測了比Z玻色子質量稍小的範圍；在費米實驗室不斷累積結果時，LEP也還能有所進展。

我們知道，縱使真實世界不是最簡單版本的超對稱標準模型所描述的，而是需要更複雜的版本，並且需要更多交互作用、粒子和統一作用力等，但是希格斯玻色子質量的上限絕對不會超過兩倍Z玻色子，而費米實驗室到二〇〇六年就能涵蓋這整個範圍。若這差事對費米實驗室太困難而無法辦到，到時候歐洲粒子物理研究中心的LHC也能涵蓋這整個範圍來蒐集資料。

我們可以從希格斯玻色子的衰變方式，來判斷對撞機製造出來的粒子是否為希格斯玻色子。儘管希格斯玻色子可能衰變成任何粒子、反粒子對，但因為希格斯玻色子本身在交互作用時會產生質量，所以衰變模式與生成粒子的質量有關。例如，頂夸克很重，所以頂夸克加上反頂夸克會過重而不可能成為衰變模式；底夸克與反底夸克是次重的組合，所以它們占衰變群中最多數。陶子是第三重的，其餘粒子則相當輕。在標準模型下，希格斯玻色子有百分之八十會衰變成底夸克和反底夸克，百分之十衰變成陶子與反陶子，其餘百分之十衰變成其他幾種狀態。

超對稱希格斯玻色子（我們真正期盼觀測到的粒子）的數量也類似如此，不過，在超對稱情況下，可能依幾個技術細節不同而有所變化。在偵測器中特別容易觀測到的衰變模式是繃子與反繃子，而繃子非常輕，這種模式的發生機率應該只有陶子模式的三分之一；這類不同模式的相對數量，因粒子而異。所以我們很容易確定新粒子的行為是否符合所預期的希格斯玻色子的性質，例如，Z和W在衰變時都具有相同數目的繃子和陶子，即使真正觀測到的繃子衰變事件過少，我們也很容易得知陶子衰變的次數是否真如預測遠遠超過繃子衰變。我們也可以從其他特性推知，所觀測到的粒子是否是希格斯玻色子，只不過這些證據不像衰變模式那麼具有決定性。

費米實驗室的希格斯玻色子研究

不論是在費米粒子實驗室或LEP，一旦偵測到希格斯玻色子，便可以知道它的質量。費米粒子實驗室主要有兩種方法製造希格斯玻色子，其中一種方法所製造的希格斯玻色子數量雖然只是另一種方法的三分之一，但由於W和Z玻色子也是產物，因此我們可在偵測器尋找W和Z玻色子，藉以標記可能有希格斯玻色子存在的事件。

到二〇〇六年時，費米實驗室所製造的希格斯玻色子事件將會超過五萬個以上，這意謂著有些極罕見的衰變可供我們研究。預期其中大約有二十次的繃子和反繃子衰變事件，這也許足夠確認新粒子的行為果真符合希格斯玻色子。另外一個非常重要的衰變模式是衰變成兩個光子，這並非直接產生，而是經由幾個複雜的中間階段而產生。在標準模型中，對這個結果有一個獨特的預測：每一千次事件中，有一點五次這種事件。（因此在此費米實驗室應會發生七十五次這種事件，足以測試這項預測。）在超對稱標準模型中，有可能比一點五次更頻繁一些，一旦超粒子質量已知時，就可以計算結果。

我們預期的底線是，如果超對稱標準模型中的最輕希格斯玻色子存在的話，費米實驗室幾乎確定在二〇〇六年之前就能偵測到，並加以研究。（當然，這是假設對撞機的經費穩定，對撞機和偵測器運作良好，而且優先研究希格斯玻色子。）但是我們也不能

太過樂觀，因為有些可能性不高，卻並非完全不可能發生的狀況，也會使偵測工作更具挑戰性。例如，如果最輕超伴子的質量不到希格斯玻色子的一半，則希格斯玻色子會衰變成兩個最輕超伴子，又因為最輕超伴子在偵測器中不發生交互作用，我們就沒有可見的線索可以得知希格斯玻色子是否在偵測器中。幸好，最輕超伴子會帶走能量及動量，所以我們還是可以計算出希格斯玻色子究竟是否出現在偵測器中。

希格斯玻色子能告訴我們什麼？

我們已經討論過幾種確認希格斯玻色子訊息的方法，其中最重要的是經由實驗確認它獨特的可能衰變模式。一旦找到希格斯玻色子，便可以研究其他幾項特質。再者，基於技術上的理由，超對稱標準模型還預測有其他更重的希格斯玻色子存在，它們非但質量不同，其他的特質也不同。其他粒子可能不像最輕希格斯玻色子在質量上有限制，所以它們有可能太重而無法在費米實驗室裡發現。不過，LHC則有可能發現並研究這類希格斯玻色子。

超對稱標準模型要求希格斯玻色子存在，若是發現了希格斯玻色子，則它能告訴我們什麼事呢？這當然要看它的特性。在一開始除了知道希格斯玻色子的存在之外，我們所能獲得的訊息可能不多，這是因為不論在標準模型或超對稱標準模型下，希格斯玻色

子的特性都差不多。

我們在第四章提過，標準模型的希格斯玻色子在概念上不能令人滿意，雖然發現希格斯玻色子會被視為超對稱理論獲得初步確認，但若要獲得完全確認，還必須要有其他的證據。這證據可能來得早，例如發現了超伴子；也可能來得晚，例如發現了超對稱所預測的其他希格斯玻色子，或是發現了希格斯玻色子的某個特性偏離了標準模型允許的特性。如果希格斯玻色子是在費米實驗室而非LEP首先發現，則基於技術上的理由，可能在這之前已經先找到超伴子了。一旦找到超伴子，毫無疑問，希格斯玻色子便是超對稱理論所預測的粒子。

希格斯物理在標準模型中扮演必要的角色，同時，也必須存在某種物理效應才能扮演這個角色。至於希格斯粒子的形式，物理學家依態度不同可分為三種。我們把有些人稱為基本教義派，他們相信在理論最簡單的形式中，會如超對稱理論所預測的，有基本粒子希格斯玻色子存在。另一派人士認為根本就沒有所謂的希格斯基本粒子，他們認為粒子在高能狀態下具有某些未知的作用，會扮演希格斯物理的角色。我們可稱第二派人士為「無神論者」。有些無神論者已經發明非常複雜的理論，引入不知名的夸克與輕子的交互作用，使其中一些粒子結合成為類似希格斯玻色子的玻色子，目的只是為了避免引進像光子和電子一樣基本的希格斯玻色子。第三群是由不可知論者組成，因為他們

仍然不確定結果會是如何。這些不同主張的人互相激盪，幫助了實驗物理學家設計出更好的實驗方法，去瞭解自然界到底是如何解決希格斯物理的問題，成果算是相當豐碩。

如果費米實驗室在二〇〇五年左右從實驗數據中找到答案，則自這個問題首度提出後，已經過了四十年的光陰，這也是典型回答物理學基本問題所需耗費的時間。當我們知道答案的形式後，不但能完成標準模型，同時也能幫助我們發掘標準模型如何延伸運用。如果超對稱標準模型果真是邁向基始理論的下一步，則費米實驗室一定能偵測到希格斯玻色子。

【注释】

①編注：希格斯（Peter Higgs, 1929-），英國理論物理學家，愛丁堡大學理論物理學教授，專事電弱理論研究，一九六四年提出希格斯場及希格斯玻色子的機制。

第八章

超對稱面臨的挑戰

超對稱理論擴展了標準模型，

同時也在許多方面改進了標準模型。

不過，至少在三方面，

超對稱標準模型比起未擴展之前的標準模型顯然不如。



如果大自然真是超對稱的，超對稱理論將影響其他物理學議題，甚至超出我們在前四章所介紹的主要問題。有許多現象我們希望解決，但無法從標準模型獲得答案，例如宇宙的物質—反物質不對稱性。這我們在第二章提過，以下我們都簡稱爲物質不對稱性（matter asymmetry）。

如果超對稱理論真是基本的自然律，它可能有助於我們瞭解物質不對稱性及其他現象，或根本就是問題的鎖鑰。在本章中，我們將會討論超對稱理論似乎能提供新解釋的幾個課題。同時，我也會提到超對稱理論似乎表現不如標準模型的幾個現象。

在第四章中，我們已看過超對稱理論可能解開的謎題清單：解釋希格斯物理、解決蒲郎克尺度和強弱作用力不同的問題（層級問題）、允許作用力統一，以及描述冷暗物質。超對稱理論原本並不是設計來解決這些問題的，但是當超對稱的想法出現後，科學家開始研究這理論而瞭解到它有這層意義存在。

在本章中，我還要多談談超對稱理論可能扮演主要角色的一些現象，這些都仍是萌芽中的RIP問題。超對稱的各項解釋之間息息相關，因此若要超對稱有額外效果出現，它在其他方面得表現成功才行。任何超對稱的額外效果都緊緊受限於其他方面的成功。我們還不知道這一章所提的現象的正確解釋，但是超對稱理論建立的路數，正在這些領域引發出新想法，也具有可測試的蘊義。

物質不對稱

我們能夠瞭解宇宙如何起源，以及為何宇宙呈現今日的面貌嗎？要辦到這一點，必須對一個重要的宇宙性質提出解釋：物質不對稱。而重點是在「不對稱」。

我們一向猜測，如果宇宙所有特性都是淨值為零，就比較有希望揭開宇宙起源之謎。例如，倘若宇宙有非零的電荷淨值或能量淨值，則這些淨值從何而來？反之若淨值皆為零，就沒有這個問題了。如果宇宙從無到有，則所有數量都必須無淨值。就電荷而言，已有證據指出正電荷和負電荷一樣多，淨值的確為零。科學家相信若能正確計算的話，能量也是如此。能量在某些情況是正值，某些情況是負值，若你能讓它做功，則能量為正值，反之若你需要做功，則能量為負值。宇宙中多數的負能量以位能存在，例如星球因相互吸引而約束成星系，必須做功才能將這些星球從星系中分開；而宇宙中多數的正能量是指星體移動時的動能，有些則是以星體或其他物體質量的形式存在。如果計算出個別能量並相加，則總能量將會是零。

因此，當我們研究宇宙不同的特質時，發現宇宙淨值似乎都是零，而延續著這個概念，我們可望解釋宇宙起源。但是，有一種特質明確不為零：中子加質子的淨額不為零，也就是宇宙的物質淨額不為零。由於宇宙的淨電荷為零，每有一個質子就得有一個

電子相對應，所以我們在討論中可以忽略電子，只要能解釋為何質子有淨額，便能解釋為何電子有淨額。當能量轉換成質量時，總是能製造出相同數目的粒子與反粒子，如果宇宙從空無開始，我們應當期待宇宙間會有相同數量的物質與反物質。那麼，我們看到的多的出來的物質究竟從何而來呢？

首先，我們看看實驗上如何得知物質比反物質多？如果有星系是由反物質構成的，當這種星系與物質組成的星系偶然發生對撞時，粒子會成對湮滅並製造光子，光子帶有我們可預測的能量。雖然科學家試圖尋找這種光子，但從未發現過。這種由物質、反物質成對湮滅製造出來的光子，典型特性（能量）與大霹靂遺留下的光子是不相同的。我們確實已測到大霹靂遺留下的光子，它們的特性如我們所預期，不帶有物質、反物質成對湮滅光子的成分。以上的論證顯示，至少宇宙大部分（或可能宇宙全部）都是物質構成的，而非反物質。

在經歷許多歲月的努力後，這個困難仍然存在，這似乎暗示我們不可能瞭解宇宙的源起。終於，偉大的蘇聯理論物理學家兼政治異議份子沙卡洛夫^①在一九六七年指出，如果滿足某些條件，宇宙有可能起源於同數量的物質與反物質，再演化成物質的天下。基本上有三個條件要獲得滿足：第一，質子與反質子不是恆久、穩定的物質。第二，物質與反物質的交互作用必須不同。第三，宇宙會隨著時間冷卻和擴張。

早在一九二〇年發現宇宙擴張時，第三個條件已經獲得滿足了。但宇宙擴張又是如何促成物質不對稱呢？我們可以這樣解釋：宇宙擴張之前，原本存有某種過程，例如，大霹靂產生了一些迄今未明的粒子與反粒子，而它們衰變成爲的物質多過反物質。如果宇宙維持靜止不擴張，衰變產物最後皆會對撞形成原生粒子，因此能達成平衡，不會造成淨物質不對稱。不過，若在衰變產物對撞前，宇宙即已擴張和冷卻，這些產物將會因動能減少而無法製造相同數目的原生粒子，以致淨物質不對稱的現象繼續存留下來。

沙卡洛夫的第二個條件，在一九五四年也有一項實驗滿足了；換句話說，當一九六七年沙卡洛夫提出以上三個條件時，只有第一個條件仍未發現任何過程可符合，因此許多人懷疑，不認爲這個條件能融合出一致的理論。

隨後的一九七〇年代，科學家開始著手統一夸克和輕子的描述。不久後科學家明白，如果夸克和輕子能理解成是相同物體的不同面向，則夸克有可能轉變成輕子，反之亦然。這暗示質子與反質子會發生衰變，那麼第一個條件就滿足了。到了這個階段，終於很明確的發現有機會解決物質不對稱的問題。

接下來二十年的研究顯示，在宇宙演化的過程中，物質不對稱確實能以幾個方法出現。直到現在，我們還不知道哪一個是正確的，說不定不只一種方法有貢獻。基本上今日我們明瞭兩件事情：一、在現今的理論架構下解釋物質不對稱性是可能的。二、然而

這不能只靠標準模型，我們必須擴展標準模型才辦得到。

對於物質不對稱的成因，我們目前主要有三個理論，超對稱理論在其中兩項扮演關鍵角色，在另一項中則是間接角色。物質不對稱的議題屬RIP，所以我們還不知道最終的解釋，但有很好的理由相信，在經過更多分析、測試所有可能的方法以及產生其他相關預測後，我們最後會得到答案。例如，有人主張物質不對稱是在宇宙演化末期才產生的，不過，這只有當希格斯玻色子很輕而能在費米實驗室觀測到，並且超頂夸克（頂夸克的超伴子）的質量小於頂夸克，因而也能輕易在費米實驗室偵測到時，以上的假設才能成立。

質子衰變？

讓我們回到質子是穩定或會發生衰變的問題上。戈德哈伯（Maurice Goldhaber）是首先想到這個問題的其中一人，他指出一個簡單的事實：「不是所有的人在早年都會得癌症死亡」，這使我們推導出：質子的生命比宇宙年齡更長久。因為，如果生物體內的質子發生衰變，就會釋放足夠摧毀全身數以千計的分子的能量。如果質子數量不多的話，這也沒什麼大不了的；但質子是無所不在的，人體約有²⁹10²⁶個質子，如此衰變的結果必會造成癌症，而依據戈德哈伯的推估，人類在十幾、二十幾歲時就會死亡了。

標準模型暗示質子不會衰變，但檢視後可發現「質子不會衰變」似乎是偶然的，而非是遵循某項大原理的結果。這種偶然也讓人聯想到以下的可能性：在標準模型的擴展版本，質子可能會發生衰變。一九七〇代中期，有人首度估算預測出質子生命期超過戈德哈伯限制，同時，衰變實驗也獲得一些令人印象深刻的結果。如果質子生命期超過宇宙，想看質子衰變的讀者可能會等得不耐煩。但是在量子理論所描述的世界中，衰變發生時間是隨機的，而且任何衰變物體如放射性原子核或質子，都有半衰期②。從開始觀測，直到半衰期時，衰變的機率一直都存在，因此如果有足夠的質子被聚集在一起做觀測，若質子不穩定，我們就可以看到一些質子發生衰變。若半衰期非常長，則必須要有相當大的樣本，以便在觀測第一年時，就讓觀測者看到衰變。

第一個大實驗是在奧運會泳池大小的水池裡進行的。水池內壁必須遍布光電管，靈敏到能夠捕捉質子衰變所射出的任何光子。同時，水質必須維持純淨，以免光子通過水介質時被吸收。因為宇宙射線會偽裝成假訊號，所以水池必須建在地底，例如美國建造在克利夫蘭（Cleveland）附近的一處鹽礦底下。這個實驗並未發現質子衰變的證據。現在，日本還有一個更大的水池在進行觀測。

統一理論認為質子可能會發生衰變。它主張在足夠小的範圍內，會有額外的作用力將夸克變為輕子，道理就像是電子和微子能變成彼此一般（參考第67頁的圖二），只不

過夸克變為輕子的可能性較小。例如，在某些統一理論中，兩個夸克能變成一個反夸克和一個正子。質子是由三個夸克緊緊束縛而成的，若其中有兩個夸克變成一個反夸克和一個正子，則反夸克將會很快與第三個夸克湮滅，造成在水中穿行的兩個光子（加上一個正子）。正子也會很快與電子湮滅，又形成兩個光子。因此，總共會產生四個光子，總能量恰為質子的質量。

最早期的想法預期在克利夫蘭的實驗中應能測到質子生命期。但在實驗進行得如火如荼時，有些人瞭解到統一理論必須符合超對稱性，這非但是基於理論須一致的原因，同時也是基於技術上的理由。因為超對稱統一理論所預測的質子生命期遠較最初所預測的大上一千倍，已非最初實驗所能觀測到的了。（目前在日本所進行的實驗，正開始測試超對稱的預測範圍。）

質子的衰變期是否夠短，最終是否能為人類所偵測？目前的理論對這個議題的答案仍不清楚。有些理論版本認為質子會衰變，有些版本則持不同看法。如果觀測到質子衰變，從它們衰變的方式我們能多學習到一些額外的事情，增進我們對基本理論的瞭解。例如，不同形式的理論和不同方式的超對稱預測了不同的質子半衰期。衰變模式也可能有好多種，例如上面提到的一個正子和兩個光子是一種模式，另外還有一個繃子和兩個微子的模式，以及兩個正子和一個電子的模式等等，這些都能告訴我們更多的事情。

簡單的超對稱統一模型預測「一個繃子和兩個微子」將是最常發生的模式。

在日本進行的實驗，只觀測到超對稱統一理論所預測生命期的部分範圍，而非全部。研究人員正籌劃在義大利進行另一項實驗，以探索更廣的範圍。如果連他們也不能觀測到質子衰變，那麼很可能我們無法從實驗得知質子究竟會不會衰變，因為所需要的實驗範圍過大、也過於昂貴，無從實現。主要的原因在於，我們需要聚集足夠數量的質子，才有可能看到一個衰變發生。

稀有衰變

超對稱理論也改變了我們對「稀有衰變」(rare decay)的看法。標準模型預測很多衰變壓根兒不會發生，例如 $\mu \rightarrow e + \gamma$ ，在這個例子中，雖然因為電子與光子的質量小於繃子，依能量守恆原理，是允許衰變發生的，但是標準模型的各種頂點（見第二章第68頁第三行）無法結合此衰變途徑，因此為標準模型預測所不容。到目前為止，物理學家已經檢視超過一兆個繃子是否會衰變成電子和光子，但是從來也沒有觀測到。

如果仔細檢查標準模型的理論形式以瞭解預測的根據時，我們會發現這種預測似乎只是偶然的，而非有更基本的理由。但若放在超對稱標準模型下檢視，偶然之說就不再只是偶然了，因為超對稱標準模型預測這種衰變會發生。如果在超對稱標準模型中能結

合頂點，就有可能畫出一個稍微複雜的費曼圖，始自一個繃子而以一個電子與光子為結束；一旦畫得出費曼圖，就表示相關過程有可能發生。發現這個衰變以及其他類似的衰變，將能構成超對稱的另一項間接證據。

儘管在還沒有實驗佐證前，我們仍然能根據超對稱標準模型估計衰變發生的頻率（這個初步的預測指出，現有的實驗樣本已經夠大，理當會有衰變發生），不過，科學家一個衰變也觀測不到。我們現在還不知道如何解釋這個情況，當然這有可能暗示宇宙根本就不是超對稱的，因此依據超對稱理論的任何理解都是無意義的。讓我們將這點可能性謹記在心、不要完全忘記。不過我們也要知道，預期衰變會發生，暗示著當實驗持續改進後，我們最終應能偵測到 $e^+ \gamma$ 衰變。反之，若這種衰變未現身，那便暗示超對稱有破缺，這也是研究人員常用來測試超對稱的方法。

繃子衰變並不是超對稱唯一預測的頻率少於實驗值的稀有過程，其他一些陶子和夸克的衰變也是如此。如果能觀測到它們衰變，也可說是超對稱理論的一大勝利；雖然它們不能和超伴子的發現相提並論，但是能解釋超對稱理論的間接角色並做出其他詮釋。像這種稀有衰變發生率的資料，能對超對稱提供重要資訊，同時也能解釋理論真正的形式。

進行實驗找尋稀有衰變是令人佩服的。實驗者必須檢視超過一兆個衰變，才能發現

其中幾個衰變能提供新訊息。在進行實驗的一整年裡，科學家每一秒都要檢視超過一百萬個衰變，不能漏失任何有趣的衰變，同時也不能被一些特別的衰變所愚弄，例如兩個粒子重疊看起來像一個粒子（這雖然可能性極低，但也不是完全不可能），或是有的粒子移動過慢，以致偵測器無法捕捉到。重要的是，研究人員必須充分掌控偵測器特性，比用筷子夾花生米還來得熟練。

CP破壞

現在我要提到的是個很有趣的問題，稱為CP破壞（CP violation，或稱CP違反），C代表在過程中由反粒子代換粒子（反之亦然），P代表在鏡中觀看此過程，以術語來說C是電荷共軛（charge conjugation），P是宇稱變號（parity inversion，奇偶性變號），但我們在此處不用這些術語。

在標準模型中，如果將任何過程中的粒子以其反粒子取代，或是反過來以粒子取代反粒子，則在鏡子中將會觀測到另一個過程。如果這兩個過程的機率一樣，我們可稱為CP守恆。有一組粒子（K介子）其兩個過程所測得的機率幾乎相同但並非完全一樣，大約一千次中有幾次不同，因此我們稱之為CP破壞了。CP破壞是獲得物質不對稱性的必要條件，所以若物質不對稱性存在的話，可做為發生CP破壞的間接觀測。

到目前為止，CP破壞只有兩個例子。我們同時也知道，K介子CP破壞的效應強度並不足以解釋所觀測到的物質不對稱性，所以顯然至少有兩種CP破壞效應，除非這兩種效應的根本起源相同。

「b工廠」(bottom-factories)在一九九九年開始蒐集資料，新穎的設備專門用來找尋底夸克交互作用時的CP破壞效應，這些b工廠設置在史丹福直線型加速器中心、日本的KEK實驗室（「高能加速器研究機構」，位於東京近郊的筑波）以及康乃爾大學升級的CESR (Cornell Electron Storage Ring) 中。除此之外，費米實驗室的CDF偵測器也能辨識底夸克，並且利用蒐集到的資料選擇適用的範圍以尋找CP破壞效應。同時，德國漢堡的DESY (Deutsches Elektronen-Synchrotron) 實驗室，也正在進行相關實驗。如果能得知底夸克CP破壞效應的形式，對於解開CP破壞效應的根源之謎有極大幫助。

超對稱理論容許許多超伴子在交互作用時發生CP破壞效應，當超伴子製造出來時，尋找這些交互作用是非常有趣的。更重要的是，超對稱理論能夠製造CP破壞效應，解釋觀測到的物質不對稱性以及少量的CP破壞效應，這卻不是標準模型所能辦到的。如果所有CP破壞效應都源自於超對稱交互作用而非幾個不相關的機制，將會讓人眼睛一亮，令科學家感到相當興奮。這種可能性聽來合理又能經測試來驗證。

暴脹

最後要在這裡提到的領域是暴脹 (inflation) ③。有強烈的理由主張，宇宙在極早期（即大霹靂之前）歷經瞬時急速擴張，稱為暴脹。我們可以將暴脹時的宇宙想成充滿能量，會產生巨大膨脹壓，到了某個階段，能量會輻射成林林總總的各式粒子，此散發成粒子的過程即稱為大霹靂。

早期宇宙的能量密度是以單個場或幾個場的形示表現，這些場又稱為暴脹子 (inflaton)。科學家利用「場」的觀念對暴脹進行大量研究，雖然有場才能使暴脹發生，不過起初科學家很少考慮到這些場是否真實存在，也很少考慮到這些場的物理起源。超對稱理論能提供這種場，因為超對稱理論有許多無自旋場，特性正好滿足暴脹所需的真實物理場，而非將場視為無理由獨自存在的假設場。這方面的研究才剛起步，我們現在不知道暴脹究竟會被如何理解，不過，超對稱理論可在其中扮演一個角色，雖然這不是超對稱理論發明的緣由。

超對稱的破缺

到目前為止我所談的種種現象中，可看到超對稱理論擴展了標準模型，同時也在許多方面改進了標準模型。不過，至少在三方面，超對稱標準模型比起未擴展之前的標準模型顯然不如。基本上，這些現象未見發生在真實世界裡，而且標準模型預測它們並不會發生，不過超對稱標準模型的預測則相反。

第一種現象是質子的快速衰變，這種特殊的衰變發生在幾分之一秒之間，而非數十億年才衰變一次。第二種現象是繃子、陶子和夸克的某種衰變或轉變。第三種現象是過量的CP破壞效應——對專業術語有興趣的人，這三種效應分別可稱為重子和輕子的數量守恒問題、變「味」(flavor)的中性流問題，以及超對稱性CP問題。由於牽涉到相當技術性的問題，我們可以跳過這部分細節。重點是在標準模型中不允許這些現象發生，但是在超對稱標準模型中，這些現象是有可能發生的。雖然還不能確定真相，但我們可能必須對超對稱標準模型加上獨特的限制，使它不會出現這些效應。這是否暗示多方成功的超對稱標準模型存在錯誤呢？

目前對這個疑問的答案仍然沒有共識，我的看法有兩點。

首先，我不認為標準模型在避免這些效應上成效顯著，因為它似乎是偶然的，也就

是說，沒有理由保證標準模型禁制這些過程，因為標準模型是有效理論（見第三章）而不是基始理論，我們只能信賴標準模型（或者其他任何理論）中某些符合廣義原理的基本觀點。

第二，這些廣義原理可能限制超對稱標準模型，禁制以上三種過程。如果我們也將超對稱標準模型視為有效理論，而其形式則由四維世界中，大於蒲郎克尺度的距離所觀察到的基始理論來決定，則我們很容易想像基始理論的特性會限制超對稱標準模型，令它產生正確的預測。反之，如果沒有辦法在超對稱標準模型裡加上廣義原理，使它表現合當，則我們應該非常憂慮。但是因為的確有改進的希望，所以這些明顯的弱點可能暗示著基始理論的結構以及超對稱的破缺。事實上，我和許多人已將這些「問題」視為洞見基始理論的良機，期盼基始理論會關連到我們世界的超對稱性。

宇宙常數問題

因為超對稱理論是有效理論而非基始理論，一定有它不能解決的問題。我們在此提幾點做為本章結尾，下一章再來詳細討論超對稱理論、弦論和基始理論之間的關係。

超對稱理論並未告訴我們為何夸克和輕子形成三個家族，也沒有說明夸克和輕子的質量數值。之前我們看到藉由超對稱性，標準模型作用力能夠統一，同時我們也看到超

對稱理論必須與重力有所關連，但是超對稱理論並未解釋為何作用力應該統一，或是為何作用力應該與重力統一。除此之外，雖然作用力統一時，各作用力的強度比率已決定了，但是個別強度大小卻不是由超對稱性來決定的。

物理學中最深奧的問題之一為宇宙常數問題。任何人寫下統御某個物理領域的方程式時，都應當是量子理論和相對論性不變性（請見第43頁的注釋③）的原理與規則所允許的最廣義方程式。以重力方程式為例，最廣義的方程式包括了一項宇宙常數，當宇宙常數用在描述重力的方程式中，可將它詮釋為宇宙能量密度，此能量密度在時間和空間中保持不變。在宇宙的時空中，能量密度向外推出，並且加速宇宙的擴張速率——宇宙常數愈大，則宇宙擴張愈快。所以我們可以觀測宇宙的擴張速率來估算出宇宙常數的最大可能值，也可以用最簡單的方式直接猜猜看宇宙常數的大小。問題在於：我們所觀測到的宇宙常數最大值，比直接猜測值要小上幾個十次方。

我們的理解一定出了問題！如果只錯了兩三倍，那我們可以預期，將來一旦更瞭解理論而能夠正確計算時，也許可以解決問題。但是如果差了十的幾次方倍，那一定是錯失了某個原理，而這個原理一定相當重要，攸關我們對宇宙結構的認知。超對稱理論確實能提供一點幫助，因為如果超對稱是無瑕的（如弦論中的超對稱，請見第九章），則宇宙常數有可能為零。在瑕超對稱超重力理論中，宇宙常數仍然可能為零，但它不會圓

滿的自動變成零，而是需要修正為零。如果未固定為零，則雖然宇宙常數的實驗值與猜測值的差距已經縮小，但差值仍然是很大的。許多弦論學家相信，一旦瞭解了瑕超對稱，我們也將瞭解宇宙常數的問題。的確有理由如此相信，不過卻不能保證。

最近我們對宇宙擴張速率獲得進一步的資料，使這個問題更具挑戰性。我們的宇宙顯然正在一點一點加速中，此意謂著宇宙常數並非為零，雖然它仍比猜測值小很多。這更增加了問題的困難度，尤其是對千方百計想讓宇宙常數為零的人來說，更是如此。同時，因為宇宙常數對宇宙能量密度的貢獻，非常接近物質的能量密度，對於這個令人困惑的問題，我們至今仍無頭緒。在這個領域中，人造衛星(MAP④或蒲郎克號⑤等等)和高空汽球實驗將在下個十年裡提供資料，對我們瞭解宇宙能量密度分布有莫大助益。

最後，為何超對稱是隱超對稱、瑕超對稱，這也是重要議題。如同標準模型不能解釋如何及為何它的對稱是破缺的，超對稱理論也不能為瑕超對稱提供解釋，這個解釋必定要來自超對稱理論之外。

【注釋】

①編注：沙卡洛夫（Andrei Sakharov, 1921-1989），蘇聯物理學家。為蘇聯氫彈主要設計人，一九七五年諾貝爾和平獎得主。

②編注：半衰期（half-life）亦稱「半生期」，一大群放射性原子核衰變一半數量所需的時間。

③編注：暴脹（inflation）是美國麻省理工學院物理教授谷史（Alan Guth, 1947-）在一九八一年提出的想法，認為宇宙在演化的早期，曾經歷一段體積急劇增加的時期，用以解釋宇宙發展成為目前狀態的原因。

④編注：MAP（The Microwave Anisotropy Probe，微波各向異性探測船）是美國航空暨太空總署（NASA）於二〇〇一年六月三十日發射升空的太空船，任務是探勘宇宙微波背景輻射的溫度起伏。MAP比一九八九年末發射的COBE（Cosmic Background Explorer，宇宙背景探索者）更靈敏，獲得的資訊將會有更高的準確度。MAP於二〇〇一年十月一日到達永久的觀測位置，位在地球背向太陽的上空一百五十萬公里處。二〇〇二年四月一日已經完成它第一個全天域的觀測。

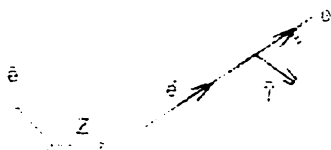
⑤編注：普朗克號（Planck）是歐洲太空總署（ESA, European Space Agency）預定二〇〇七年發射的太空探測船，專門執行宇宙背景輻射的觀測任務。

第九章

超對稱、弦論及基始理論

超對稱標準模型、弦論和M理論都是RIP，雖然已經獲得很多進展，

不過要讓理論完全建立或成功運作，仍然有一段長路要走。



這一章可以加上兩個子題：「爲什麼我選擇當個超對稱理論學家而非弦論學家？」以及「弦論的確是可以測試的，如果世界在對撞機尺度是超對稱的，則即便以保守角度來看，弦論也是可以測試的。」

讓我們回想粒子物理學的目標。首先我們想知道自然律以及它們是否能用一個或幾個基本原理來統一。我們想知道物理定律從何而來，以及爲何它們呈現今日的面貌。我們想發現基始理論（請回想第三章有關有效理論的探討），特別是我們想要解釋世界：爲何有宇宙？爲何它呈現今日的面貌？

爲了達成以上所有目標，我們不但要瞭解粒子、作用力以及法則，同時也要學會時空的意義、爲何計算所有作用力及粒子行爲的自然法則符合量子理論與相對論性不變性？我們必須瞭解爲何能量有最小值（爲何蒲郎克常數 h 不是零）以及爲何光速 c 有上限？重要的是 h 不是零、 c 不是無限大；至於 h 和 c 的眞正大小，倒沒那麼關鍵。我們也必須瞭解基始理論是否獨一無二：它是否爲唯一可能的理論，是否能取得數學一致性？

如第二章及第三章所解釋的，我們基本上已經成功的瞭解各種尺度下的世界如何運行，甚至小到接近蒲郎克尺度（假設眞的發現了超對稱）。我們認識了基本粒子：夸克和輕子；我們也認識作用力以及它們如何經由 γ 、 W 、 Z 、 g 、 G 等玻色子交換中介，

但我們還不知道為什麼世界如此運作。區分「如何瞭解」以及「瞭解為什麼」是很重要的。在物理學中，我們首先知道「如何」，然後我們渴求「為什麼」，這個次序是不可避免的，所以我們現在企圖尋找基始理論。

而在其他科學領域，情況可能有所不同。以生物學為例，根本的組織原理（探討「為什麼」）有兩個：天擇導致的演化，以及根據化學分子記載的基因代碼。地球上生物的多樣性和特性可以追溯到第一個自我複製的分子，它藉由生物載體在不斷改變的環境中倖存而演化^①。生物的所有變化都可以追溯到它們基因結構上的改變，但是卵子和精子如何發育成為有眼睛、手指和頭腦的個人，我們對分子細節上的瞭解並不清楚，雖然近年來從研究中已獲得許多進展。因此可以說，生物學能解釋「為什麼」（即基本架構），但是實際上這些原理如何導致我們所觀測到的現象，則仍待進一步研究。

弦論和M理論

即使弦論是正確的，它仍然不是基始理論。想瞭解這點，我們得先討論弦論的梗概。弦論將量子理論、相對論性不變性、重力以及標準模型作用力和粒子融合成為一貫理論。為了達成這個目標，弦論必須以十維空間來表述（而非以我們日常世界所用的三個空間維度加上一個時間維度），同時也得將粒子詮釋成弦狀物體，而非標準模型中的

點狀物體。但是弦論還不只如此，基本上在十維的世界裡，宇宙只有一種作用力即重力，而當弦論中三維空間較其他維度大時，弦論的世界看起來應該就像我們的世界，具有這個世界的各種作用力。

我們至今仍不明瞭如何及為何會發生這種情況，但是弦論學家已經顯示這可能會發生。再者，我們知道在超對稱標準模型中有幾個根本問題無法獲得回答，例如為何會有三個粒子家族，以及為何粒子具有那般質量。弦論能提供這些問題的解答，但是我們還不知道弦論的答案是否正確，因為到目前為止弦論還無法發展出量化的答案。如果有理論能回答以上所有問題，可真是破天荒的進展呢！

要徹底研究弦論及認真看待弦論的根本理由在於，弦論是史上第一個理論能總括（或推導出）重力、量子理論、標準模型作用力和狹義相對論，同時也能解釋例如「為何有三個粒子家族」的問題。

然而，弦論並未能更深入探討時空定義的問題，也不能顯示為何法則中必須包括量子理論。相反的，弦論假設了背景時空，也假設法則成立。弦論的某些部分暗示它已接近回答這些議題的邊緣，不過仍待擴展。同時，弦論也不是獨一無二的，似乎有幾個版本各可預測顯然不同的現象。過去幾年，科學家已經開始著手研究後面這個問題，將理論研究推展到另一個階段，稱為M理論（對M所代表的意義仍未有定論，有人說是代表

魔術 magic，有人說是代表神祕 mystery，有人說代表母親 mother）。M 理論是以十一個維度來表述，事實上現在已經發現十維弦論中的五個不同版本，其實是觀看十一維的 M 理論之不同方法。這種觀點有助完成目標，得到獨一無二的理論。這些進展都是最近才發生的事，而且都相當複雜，所以需要一點時間整理清楚。或許藉由這些進展，研究工作正在基本理論上聚合，也有可能我們還差目標一大截。

M 理論通常也是先假設時空和量子理論成立（而非探討它們為何存在），所以它也不是基本理論。

瑕超對稱、隱超對稱

弦論若要維持一致性，則它可能必須是超對稱的。它一定得具備完全超對稱而不是瑕超對稱（見第四章），這是很重要的區別。我們預期兩件事：接近蒲郎克尺度的十維弦論（九個空間維度加一個時間維度）是完全超對稱的，而在對撞機尺度下的四維（三個空間維度加一個時間維度）超對稱標準模型則具有隱超對稱或瑕超對稱。若是隱超對稱，它並非完全不可見——超伴子仍然存在，只是粒子和其超伴子可具有不同的質量，一些交互作用也要修正。不同方式造成的瑕超對稱會形成不同形式的質量和交互作用，所以當質量和交互作用可測得時，我們就可以從實驗獲得資料，得知瑕超對稱是如何形

成的。

我們還不知道為何及如何造成瑕超對稱，回想以下這點可能有所幫助：在標準模型能夠將質量成功融入理論的描述之前，標準模型中的粒子對換對稱性並不成立。這個研究難題，引進了希格斯物理學。或許要解釋瑕超對稱的問題，也需要援用另一種物理機制來幫助。

數據扮演的角色

弦論學家研究蒲郎克尺度，而且他們的理論具有非瑕超對稱性；雖然他們仍然關心瑕超對稱的可能性。現在有想法也許能夠解釋為何蒲郎克尺度下的完全超對稱，在大尺度下會變成瑕超對稱。有一部分的問題在於，我們尚未獲得超伴子的資料，所以即使已經有正確的方法能發現瑕超對稱或是額外捲縮的維度，我們也沒有辦法知道。

超對稱學家如我，則以對撞機尺度思考物理學。超對稱學家正努力研究如何辨識所製造的超伴子，以及如何利用實驗所測量的數據（例如各種過程發生的可能性，以及偵測器中所出現粒子的方向和能量），將資訊轉換成各模式，以便和弦論的可能解釋做比對。我們重建實驗的原因在於，若只是站在弦論層次上（或是M理論、基始理論層次）簡單的思考世界，則不太可能導向一條可信的道路，允許我們從十維的超對稱性理論推

展到四維的瑕超對稱性理論。我們預期，首先必須靠實驗數據引發洞見，這也是向來物理學得以有所進展的方法。這也是我為何寧願當個超對稱理論學家的原因了。

支持（瑕）超對稱的實驗證據以及超伴子特性的數據，為什麼「超重要」，原因在於這些調查研究將能開啓一扇窗，讓我們探測到小如蒲郎克尺度的物理學。把接近蒲郎克尺度、十維非瑕超對稱的弦論，與對撞機尺度下、四維瑕超對稱的標準模型連結起來，可能需要談到三個主要議題。

第一個議題是要找出為何三個空間維度大，而其他維度小（這通常稱為壓縮問題 compactification，雖然需要解釋的其實是那些大維度），以及這些小維度如何捲縮成爲球形、圈形以及其他形狀（即它們的拓撲學）。

第二個議題是找出超對稱如何變成瑕超對稱、隱超對稱——對稱仍然存在，因為超伴子存在，而且所有必需的交互作用也存在，只是質量數值、相關的一些物理量與非瑕超對稱理論中不同。

第三個議題是找出宇宙最低能量狀態，即宇宙將會到達的狀態，目前理論似乎允許宇宙變成許多可能的狀態，而且似乎也導致不同的預測。

以上這三個議題可能是連結在一起的（例如，造成某些維度變大的機制也能夠造成瑕超對稱），也可能各自獨立。一如過往，一旦我們得知正確的描述大自然的方式，微

底瞭解的日子便將到來。

邁向基始理論的里程碑

現在引導我們思考的數據，皆來自似乎僅顯示部分超對稱的三維空間，而基本理論則具有十維空間和完全超對稱。記得在第三章時，我們學到理解大自然時，每個層次都可以用某個有效理論來描述。以下我就把直到基始理論為止的各種有效理論都整理出來，這可能有助於讀者想像理論的推展。M理論雖尚未定義完整，但因為M理論通常視時空與量子理論為已知，我便把它與基始理論區分開來。不過，M理論最終會和基始理論合併。當然在最後的真相大白之前，以下的里程碑都只是假定。

從有效理論到基始理論的里程碑：

一、標準模型

二、超對稱標準模型

（從對撞機尺度到作用力統一的尺度皆有效——隱超對稱。）

三、弦論

(M理論的十維近似——完全超對稱。)

四、M理論

(十一維，完全超對稱，只有一個版本，以量子理論和時空結構為前提。)

五、基始理論

(推導出時空、維度的意義和數目，解釋為何量子理論和相對論性不變性是自然法則，解釋物理定律來自何處，以及為何M理論是描述我們世界的絕無僅有的理論。)

我們已在第三章描述過距離尺度比標準模型大的有效理論，這些有效理論離完備階段各不相同。標準模型除了希格斯物理外，大抵已經完備，但是標準模型如何擴展到包括微子質量，而這個里程碑又應該安插到何處，目前我們都沒有答案。超對稱標準模型、弦論和M理論都是RIP，雖然已經獲得很多進展，不過要讓理論完全建立或成功運作，仍然有一段長路要走。當然如果蒐集到超伴子的數據，研究進展也可能一日千里。我們只能這麼說：研究基始理論的問題已經邁出第一步！

【注釋】

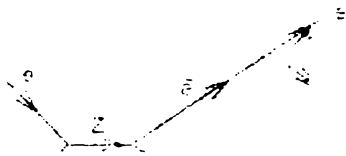
- ①編注：關於「生物是基因的載體」的觀念及闡釋，請看英國著名演化理論學者道金斯（Richard Dawkins, 1941-）的著作《自私的基因》與《盲眼鐘錶匠》，中文版由天下文化出版。

第十章

真能瞭解宇宙起源與自然律嗎？

追求最基本理論的道路的確可能走到盡頭，
這個盡頭不是因為科學家無法找到基始理論，
而是他們找到了基始理論。

當然，這不代表科學已經終結。



假設本書中樂觀期待的進展確實發生了，也就是說，實驗果真偵測到超伴子和希格斯玻色子，而且它們的特性暗示弦論的其中四維時空能夠解釋粒子世界和宇宙學的種種特徵。接下來，在自然律與宇宙起源的奧祕上，我們還能夠做出什麼進展？有沒有局限呢？即使我們最後能瞭解宇宙，現在是不是還嫌太早？有人主張基始理論應當在蒲郎克尺度來解釋宇宙，不過這麼微小的距離是我們永遠不能直接觀測的，也永遠無法在這個尺度測試想法，所以弦論也許只是美妙的想法但卻不是科學。這會不會變成弦論的最後命運？

物理學家的樂觀理由

科學就是這樣，在抵達目標前我們不會知道那裡有什麼，唯有成功時我們才會確定問題的答案。有些人認為我們永遠不可能發展及測試基始理論。對此仔細探究之後，我們可以知道懷疑論者所持的理由不夠充分。

首先，讓我們想想是否有希望發現基始理論。請記住，我們的目標是瞭解我們的世界，「瞭解」和「我們的」是兩個關鍵詞。有許多人列舉不少辯證，指出我們不可能達到目標。有一個說法是我們不瞭解世界的地方太多，而且科學愈發展，就發現愈多問題。譬如，因為光速有極限，我們不能知道火星此刻發生什麼事，更不用說半個宇宙外

的事情；由於測不準原理，我們不能同時正確的知道粒子的位置與動量。

但是，我們的目標並不是想「知道」宇宙間萬事萬物，而只是想瞭解世界如何運作而已。如以上所舉的例子，我們瞭解到有些事情非能力所及，而這正是整個認知的一部分。但是這並非暗示科學家不能瞭解世界如何運作、為何如此運作。比如說，我們不能瞭解所有可能的化學分子，但是卻有希望完全瞭解所有支配化學分子的形成與行為的基本原理。

其次，也有論點是根據哥德爾^①的不完備定理（incompleteness theorem）。哥德爾在一九三〇年代證明這項簡潔而驚人的數學定理。基本上此定理指出，在任何數學理論裡，有些敘述為真，卻無法獲得數學證明。同時任何數學系統，也不能用來證明系統本身的一致性。對數學家而言，這個理論涵意深遠，也有許多人擔憂這意謂物理學家同樣不能證明基始理論適用於自然界。但是，科學不是如此運作的，這當中有兩點重大差別。

第一點，我們不需要證明所有可能的理論，也不需要證明整個系統的一致性。我們已經有了世界，而且也知道「我們的」世界由一致的定律所描述，否則世界將崩解；如果原子的方程式隨著時間而改變，或是與其他作用力方程式不一致，則原子將不會存在，也不會形成世界。唯有方程式一致，才能獲得解答。（「我們的世界能完全由科學

理解」常常會讓人覺得不可思議，但是這真的很令人驚訝嗎？事實上，世界要存在，就必須符合數學常規；而因為有這些常規存在，所以我們才能加以學習與認識。」

第二點，科學結果從未被證明是真理，「證明」是用在數學定理上。所謂的科學事實，只是在科學研究的某個階段，某項敘述的佐證非常有力，使得研究者一致接受其真確性。所有的科學結果都與某些參數有關（如距離或時間等），當支持理論的證據僅來自參數的某個範圍內時，我們無法知道若是在其他參數範圍進行實驗時，該理論是否仍然成立（參見第三章的討論）。

舉例來說，重力理論以往從不會在小於一公厘的尺度下測試過，現在許多實驗正積極進行小尺度的重力測試，以便檢驗弦論及額外維度的一些想法②。而對於作用力在各種運動速度下的行為，我們則已經在所有的參數範圍（從靜止不動到以光速前進）下進行過實驗，因此可以算是定案。此外，已獲得認可的科學理論若在許多方面都能與其他理論相互連貫，那也會增強研究者對它的信心。由於科學方法的本質，以及科學研究者之間的理論實驗互動，透過科學方法所獲得的自然知識是最為可靠的。簡單的說，哥德爾定理對我們能否瞭解自然界是起不了影響的。

另外還有一種質疑，起源於科學家面對宇宙不可思議的複雜與美麗時，所油然而生的謙遜之感。渺小的人類，怎麼可能瞭解宇宙的秩序，並回答所有的為什麼？有個譬喻

是，狗永遠學不會量子理論。達爾文是第一個使用這個譬喻的人，他寫道：「我深深覺得這個課題對人類來說過於艱深。也許狗兒也像牛頓一般思索過大自然，但卻徒勞無功。」達爾文會這麼感覺，是很可以理解的，因為他未能恭逢過去一個世紀以來的偉大發現。在成功或完全失敗之前，我們不會知道科學家找不到基始理論。科學，本來就是盡可能的瞭解大自然，看看最後知識帶領我們到哪兒去。我個人相信，若狗兒也能蒐集足夠的原子數據，並且能夠思考其潛在意義，或許牠也會發現量子理論。我對這個問題仍然保持樂觀。

測試弦論和基始理論

我們會因為無法測試理論，而錯失瞭解宇宙的機會嗎？這是個複雜而有趣的問題。有人認為，由於我們永遠無法建造可直接測試蒲郎克尺度的對撞機，我們永遠無法測試基始理論。這是錯誤的。這麼說的人，等於是假設必須到過某個地方，才會知道那兒有什麼。我們不需要親眼看見大霹靂，才知道它的確存在。大霹靂的許多重要結果至今仍影響我們的宇宙，而且是可以測試的。我們也不必親眼看見恐龍滅絕，才知道牠們為何滅絕。許多蛛絲馬跡都可以讓我們漸漸解開謎題。我們也不必以光速前進，才確認這確實是所有物體的最高速度。

簡言之，總會有線索讓我們檢驗理論。尋找這些線索，需要一群辛勤工作且具有高智慧的科學人員。這當中沒有僥倖，首先科學家提出假說，接著便想到測試假說的方法。以往科學家也曾經振振有詞的宣稱永遠不能證明原子或微子存在；最後連帶證實了一句諺語「所謂不可能，代表要花久一點時間」。

同樣的，弦論可以解釋許多標準模型不能解釋的問題。例如，夸克與輕子的三個家族，夸克與輕子的質量，何種過程屬於CP破壞（第八章），以及質子是否穩定等問題。如果弦論最後能夠統一量子理論、重力理論、以及標準模型，並在沒有外加參數的情況下對三個家族、粒子質量等問題做出基本解釋，那我們可以肯定的說，弦論已經成功。問題在於，理論計算上要證明這一切，是極為複雜而困難的，而且與額外空間維度是以何種方式捲曲、自然界如何在方程式的衆多答案中選擇……等等問題有關。在我們做出這些計算，並證實一切都如預期般運作之前，即使弦論為真，我們也無從得知。

這個困難有部分是由於心理因素。例如，當年由於許多物理量的計算得到無窮大的答案，量子電磁理論曾經有段時間遲遲沒有進展。到了一九四七年，實驗物理學家測量到了這些物理量中的其中一個，隨後理論物理學家想到如何使計算收斂而得到正確結果的方法。進展的原因在於，當他們手邊有實驗數據時，不僅在計算上會較認真，而且還有個確切答案可供比對。對於弦論來說，問題也在於是否會有聰明人認真看待這個理論

的潛能，雖然明白幾年之後有可能一無所獲，仍然願意挖空心思投入這些極端困難的計算。

基始理論同樣也可能遇到這種情況。如果我們找到的理論能夠解釋為什麼自然界滿足量子理論和相對論性不變性，並且使我們對時空做出一致的定義，無疑的這就是我們的答案。或許其他的測試也會出現，但是在得到基始理論之前，我們不會知道新的測試為何。從以往的經驗我們知道許多測試是在理論提出、而且瞭解其蘊涵之後，才開始進行的，譬如大霹靂、馬克士威方程式所預測的電磁波，都是如此。

我們可以猜測一些可能的基始理論測試，例如有些對稱性是所有相對論性量子場論都應該滿足的，但這並不代表這些對稱在基始理論當中必須是完美的。（基本上這個對稱性如下：任意物理過程都有另一個物理過程與之得到完全相同的結果。第二個過程是把第一個過程的所有粒子換成它們的反粒子之後，再經過鏡像反射及時間反演）。一旦我們瞭解量子理論「是否」及「為何」能描述自然，也許我們會發現它到了蒲郎克尺度也是需要修正的——而這在其他尺度下或許已留下可檢驗的特徵。

以上這些討論可以讓大家都清楚看到，基始理論絕非在根本上無法測試。

現實的限制

另有一種可能限制我們理解大自然的原因，是社會不願意資助基本研究，以致無法測試這些想法。正如我在本書（尤其第五章）所主張的，如果超對稱在碰撞機尺度發生，則一旦這些設備照預定計畫升級或建造後，再配合實驗研究微子質量、暗物質、質子衰變、CP破壞以及宇宙學資料等，將提供我們足夠的數據來表述基始理論，並加以測試。然而即使這些實驗設施真的出現了，經濟風險仍然存在。對撞機需要許多專業人士投入建造與維持運轉，如果經費核准得過慢，許多人會被迫離開這個領域，造成人才短缺的窘境。當年美國國會刪除超導超能對撞機（SSC）計畫時，就出現了這種狀況。通常這類研究都是在最頂尖的大學和國家級實驗室進行的，若這些單位抽手，理論物理學家與實驗物理學家將無處安身，使得無處、也無人可訓練聰明的年輕人如何研究宇宙的運作與起源。

仔細檢視粒子物理學經費的支出是否有價值，是很有意思的一件事。近年來，大家已經理解到經濟發展的一大部分是來自先前科學研究投資的報償。有些人會認為是科研成果促進了經濟發展，這說法並沒有錯，但並不完整。對科學知識的想像，和理解自然萬物的嚮往，吸引了許多年輕人投身科學與工程研究。在他們學成之後所從事的工作，

不一定是一開始吸引他們的領域；這些受了科學教育的人，常常在研發工業產品或資訊產品上做出貢獻。科學帶來的知識豐富了人類文化並改變了人與宇宙的關係，以及基礎科學研究對年輕人帶來的影響衝擊，或許是社會應該慷慨支持基礎研究的兩項最重要原因。

除了這些好處之外，基礎研究往往還有另一種以周邊效應報答社會的辦法。希格斯玻色子、超粒子、暗物質等研究成果，不太可能導致有利經濟民生的產品問世。不過由於這些研究走在科技的尖端，科學家必須發展新的工具或技術，這些技術總是會導致工業革新。最近的一個例子便是歐洲粒子物理研究中心爲了使LEP對撞機的國際合作者都能獲取資料，所發展出來的全球網際網路（WWW）。李克特（Burton Richter）常說，如果當初他們命名爲HEP（指高能物理）而非WWW，或向每個使用者收取一分錢，粒子物理的經費就不再有問題了。

加速器是另一個例子。當初發明加速器是爲了探測原子核與質子等粒子物理研究，現在加速器則用來研究物質，提供更堅固安全的材料，或是探測病毒結構等等。全球現在有數以千計的加速器，其中只有少數用於粒子物理研究。加速器的醫學應用廣泛，美國國家衛生研究院不僅提供加速器的人事經費，也投注經費在加速器本身。除此之外，粒子物理實驗所促成的產業技術移轉案例以及市場保障，也使一些剛起步的公司得以生

存。這些周邊效益可以一直列下去，這充分顯示了即使忽略所得到的純知識，粒子物理與宇宙學研究確實是社會的好投資，將會有很大的經濟回報。

人本問題

在不同的自然律之下，生命會不會存在呢？宇宙是否必須以某種形式存在，我們才會在這裡？說得更精確一點，決定宇宙裡大大小小事件的各式粒子及作用力，若其範圍、強弱等性質與觀測到的不同，會發生什麼事？如果蒲郎克常數或光速是其他的數值，世界還會一樣嗎？這些問題於一九六〇、七〇年代首度引起世人的注意。有人指出，若自然律、自然常數與現在所見不同，宇宙會是完全不一樣的地方，生命也會變得不可能。這稱為「人本的」③問題或論點。

在這本談超對稱的書中，加入人本原理的討論是有道理的。首先我們要知道，如果世界是超對稱的，或更進一步，如果世界滿足超對稱弦論，則以往許多傳統的人本論點便會發生錯誤。其次，大多數人本問題可望在基始理論裡得到（非人本的）回答。再者，愈來愈多人賦予人本論點非科學、甚至宗教解釋，這種趨勢有必要加以澄清。舉例來說，捷克共和國的總統兼著名作家哈維爾（Vaclav Havel）曾說：「我認為宇宙學人本原理帶來一個與人類文明一樣古老的想法：或許人類並不是無情宇宙中無數粒子運轉下

的偶然產物。或許，冥冥中我們與整個宇宙奇妙地聯繫著……」

現在我們先來看看一則人本論證。中子與質子間具有強作用吸引力，使它們兩兩結合為氦核。這反應在太陽當中發生。當氦核與另一個質子碰撞後，氦三便形成，而光子帶走反應釋出的能量——最後這光子會形成太陽光。要不是氦將中子和質子綁在一起，接下來的氦三反應便不會發生。換句話說，氦的存在對於太陽發光發熱具有必要性。然而從強作用力的觀點來看，質子與中子基本上並無二致，因此兩個質子之間也會有強作用吸引力。質子所帶的正電使質子不會兩兩結合，如果強作用力再強一點，這個電斥力將無法阻止質子互相結合。在這種狀況下太陽的反應速率會增加，經計算結果發現，恆星將會加速燃燒，而使周圍的行星來不及演化出生命。總的來說，強作用力必須足以束縛氦，卻不可強到連兩個質子都束縛住，這使強作用力的強度只能介於一個狹窄範圍內。

我們要如何看待這種人本效應呢？有些人據此宣稱，這種人本效應不可能純因自然過程而產生，因為強作用力剛好具有適宜生命的強度值，是非常不可能的事。這種人本觀點顯然無法以實驗檢驗，不過，理論或許可以作出回答。很顯然，基始理論可以回答這問題。即使是弦論，只要有朝一日證實了，也可以檢測人本論證。舉例來說，要估計某種情形發生的可能性，我們對所有可能的範圍必須瞭解。以下我將指出，在超對稱或

弦論中，機率的計算與先前的宣稱大有不同。

人本論證有兩種。第一種只是將「生命存在」這件事實考慮進去：宇宙必須足夠老，使恆星、行星能夠存在而孕育生命。這一點也不具爭議性。人類的存在是事實的一部分，運用此項資訊是應當的。或許有許多宇宙存在，而只有其中一些具有孕育生命的條件。我稱這一類人本詮釋為「極小」人本論證。我把所有人本論證區分為「極小」（如上述）與「非極小」（所有其他的人本論證）兩大類。我們在此並沒有進一步細分下去的必要。「非極小」人本論證的一例為：強作用力的強度若有所不同，人類就不會存在；而科學無法解釋強作用力強度這項事實，暗示著強作用力是爲了使人類存在，才會具有這個觀測到的強度。

反駁這種論證的好理由之一是恐龍的存在。地球適宜恐龍生存，它們也曾擔任地球霸主達一億五千萬年之久（這段時間是哺乳類時代的三倍，人類世代的百倍）。若不是六千萬年前一顆小行星撞上地球，恐龍至今仍然盤踞地球。所有對現在宇宙意義的論證，在一億年前也適用。如果當年的宇宙是爲了人類所準備，怎麼會弄出恐龍橫行的局面呢？說真的，說不定某一天人類也會因小行星的撞擊而滅絕，地球也可能因其他星體的重力而拋離太陽系。這些事發生的機率並非無窮小。如果這真的發生了，難道就會改變物質宇宙的起源或成因嗎？說歸說，我們還是以技術層面來分析「非極小」人本論

證，因為這是個有趣的問題，而且對基始理論來說也提供了試煉機會。

出現生命的機率可不小！

幾乎所有的科學家都相信「非極小」人本論證皆可找到科學破解之道。例如，如果我們不瞭解演化的過程，大可認為人類精密的身體及心智必定是精心設計下的產物。這就是一種人本論證。然而，一個半世紀以來的生物學研究，已為人類的眼睛、大腦及身體的演化提供無數證據。強作用力強度，或許就是下一個遭到破除的人本詮釋。在我們確定之前，進行更多的理論計算是必要的。

先前談到在超對稱標準模型或弦論中，所有的作用力都是統一的。換句話說，不同作用力間的強度比率是由超對稱結構決定的，而且比率是固定的。如果強作用力強度增加，電磁作用也必須增強，否則理論將自相違背。如果依比率同時增加兩種作用力的強度，氘便會將中子和質子束縛得更緊密，但是質子之間的電斥力也更大了，恆星的演化不一定會受影響。更重要的是，科學家認為基始理論應該是唯一的，也就是說，它是宇宙唯一可能的描述。如果這是對的，則不僅作用力間的比率相同，個別強度也應該是固定的，且被科學理論圓滿解釋，不需訴諸生命條件等問題。

有些「非極小」人本派人士將論證以機率方式呈現，以便更加凸顯結果。他們的算法是這樣的：作用力以及某些粒子質量，都以某個很小的機率在孕育人類的數值區間內取值；再把個別的機率相乘，以計算同時滿足這些條件的機率，也就是人類自然出現的機率。將機率相乘的結果產生了一個極小的數字，例如 $0.1 \times 0.1 \times 0.1 \times 0.1 \times 0.1 \times 0.1$ 。這個結果被解釋為，宇宙自然出現生命的機率非常微茫。

三十年前這個論證提出之際，的確獲取了它應得的注意。但是，唯有獨立事件的機率才能彼此相乘。例如，若我們一旦知道作用力A具有某強度，便可以推知作用力B具某強度，則在計算機率時就不應該再將作用力B納入。這正是在超對稱中的情況，因為各種作用力強度都環環相扣。在弦論中，所有作用力更是必須具有固定值。

另一個「非極小」人本論證指出，中子質量必須比質子質量稍微大一些，核反應才會向孕育生命的途徑走。這等於是說，上夸克質量必須比下夸克輕。理論上，弦論可以計算夸克的質量，雖然迄今還沒有成功。如果弦論確實可描述世界，夸克的質量就是彼此相關的，上述機率相乘的辦法也是不可行的，總機率便不像「非極小」人本論證人士宣稱的那麼小。事實上，出現生命的機率可能一點兒也不小。

在我們研究出基始理論並瞭解計算方法之前，人本論證還是無法完全塵埃落定，因此其研究仍有意義。此外這也不失為有趣的議題。即便如此，大多數的科學家並不從事

這種研究。原因在於，多數人認為人本論證中的大半終將被科學論證所取代。

即便如此，科學家還是認為，有兩項人本效應會發生：其一就是「極小」人本論證。基於「人類已經存在」這個事實，我們知道宇宙必須存在得夠久，讓恆星、行星演化出來，生命才得以出現。

第二個可能存在的人本效應，更具有挑戰性。雖然我們還不知道宇宙的起源，一些有趣的論證卻指出，宇宙是無中生有的。理論臆測宇宙最初於蒲郎克尺度下形成，旋即暴脹成為一定大小，總能量為零。其中大部分的能量釋出成為大量粒子，這便是大霹靂事件。這暗示著宇宙是由隨機的起伏所產生的，而且這個隨機創生的過程持續不斷，於是宇宙不只一個。或許各個宇宙具有不同的自然律。雖然大多數研究人員相信基始理論在所有宇宙都適用，但理論中的常數如作用力強度、蒲郎克常數、光速、重力常數、宇宙常數（真正重要的其實是這些常數的相對大小），或許各有不同。生命在某些宇宙中會誕生，在其他宇宙中則否。如果宇宙個數衆多，也許其中一些便可以孕育出生命。

科學之終結？

假設我們最後的確發現基始理論，而且加以測試，使多數研究者同意我們已經瞭解了宇宙如何運作，以及為何有些宇宙能孕育生命等等問題，這意味著什麼呢？雖然人類

可能早在四萬年前就開始思索宇宙，並在兩千六百年前的希臘開始以系統性方式探索大自然，不過，直到四百年前的一六〇〇年之前，科學僅在簡單的描述上小有進展。隨著現代科學啟蒙，我們漸漸瞭解大自然的運作，一九七〇年代以降，科學家已經大致瞭解自然法則，現在已開始著手起始理論本身的研究。或許再過幾十年，科學家便可以達到最終目標。

對我來說，瞭解為何有宇宙，為何宇宙是這個樣子，將是值得萬分驕傲的一件成就，我希望有更多人同意這個看法。

如果我們能達到這樣的徹底瞭解，對某些人來說，卻很可能是深層的悲哀。因為，這趟為許多人生增添意義的旅途已經到達終點。這將是未來一代的悲哀，未來的一代無法分享我們窮究了自然界之謎的亢奮。許多人，包括科學家在內，都說學習永無止境，因為新發現總是導致新問題。但誰說這一定是對的？我們沒有理由相信探索之旅永遠不會抵達終點。這就像是探索地球一樣，幾世紀以來科學家一直向未知之處探險，直到有一天，全球大致都被踏遍了。

當然，歷史上總是有人宣稱物理學即將結束，但如果仔細推敲一八六〇年代以來的這段歷史，你會發現真正積極從事研究的科學家從不相信這些宣稱。然而，當今的情勢確實有所不同：我們的研究已經溯至宇宙初始，遠達宇宙邊緣，下至物質的最小單元。

這當然不代表最終瞭解已在眼前，但至少告訴我們，歷史教訓不一定在此適用。

總之，追求基本理論的道路的確可能走到盡頭。這個盡頭不是因為科學家無法找到基始理論，而是他們找到了基始理論。當然這不代表科學已經終結，我們知道統御大自然的方程式與定律，並不代表能知道方程式所有可能的解。除了粒子物理、宇宙學之外的科學，都是無止無境的。找到了基始理論的那一天，我們對於生命的認知也將改觀。

【注释】

①編注：哥德爾（Kurt Godel, 1906-1978），原籍奧地利的美國數學大師，證明純數學世界是無止境的。一九三一年提出哥德爾定理，論點是：沒有任何形式的數學公理系統，能夠同時具有一致性和完備性。哥德爾認為數學無法當做廣泛邏輯系統，這迫使數學家必須接受某些問題沒辦法判定真偽的事實。

②譯注：近年來重力實驗正快速向小尺度發展。截至二〇〇一年中，尺度最小（ 0.218 公厘）、最精確的重力實驗，仍然顯示牛頓的平方反比律正確無誤。

③編注：人本原理（anthropic principle）認為宇宙的創生及萬物的演化，都是爲了「產生人類」這一目標而逐步進行的。其中可分兩種觀點，一是弱命題（weak form），也就是本書作者所謂的「非極小」人本論證，認為我們存在的這個世界是很特殊的。這並不解釋任何現象，只強調有必要解釋這個世界爲什麼變得這樣特殊。另一是強命題（strong form），也就是本書作者所謂的「極小」人本論證，認為自然定律之所以如此，是爲了形成具有智慧的人類。

附錄

附錄 A 標準模型下的希格斯機制

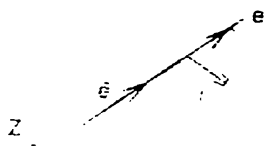
附錄 B 超對稱下的希格斯機制

附錄 C 超荷子與超中性子

附錄 D 額外維度？大尺度額外維度？

建議書目

譯後記



附錄 A

標準模型下的希格斯機制

本附錄較詳盡的解釋了標準模型下希格斯機制的運作。雖然其中我引進了一道方程式，並採用稍具技術性的論證，然而要瞭解它並不需要特別的數學背景，只要一步步跟隨論證即可。此附錄將使讀者更加瞭解，標準模型的希格斯物理雖然在技術上成功，卻有不自然的斧鑿之痕。在附錄 B 中我會向大家介紹，為何在超對稱中這些是水到渠成的自然結果。

宇宙中充滿了場：質量建立了重力場，而電荷建立了電場。所有的粒子皆是場的量子，而場帶有的能量則使空間的能量密度增加。當場為零時，為其最低能量狀態，這一點相當重要，因為任何系統都會趨向最低狀態，宇宙本身也不例外。換句話說，除了由粒子建立的場之外，宇宙的最低態基本上是空無一「場」。雖然由於測不準原理，以及可能的非零值宇宙常數，以上的說法並不完全正確，不過在此我們不考慮這些效應。

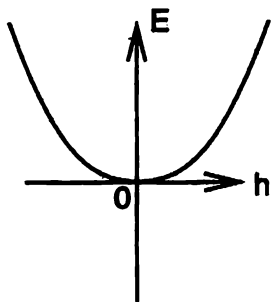
通常我們就把宇宙的最低能態稱做「真空」(vacuum)。真空態是宇宙空無一物時的背景狀態。

在標準模型中，為了解釋粒子質量，我們刻意引入「希格斯場」，而不去管它的來源（通常場皆有來源，如重力場源自質量，電磁場源自帶電粒子等）。希格斯場（以 h 表示）增加了宇宙的能量密度。若 h 所增加的能量密度為 E ，我們假設 E 與希格斯場 h 有下列關係：

$$E = Mh^2 + \lambda h^4$$

其中 λ 是一未知的正值常數（我們只要記得其為正值即可）。方程式中的單位不影響這裡的分析，因此我們不去管它。通常式中 M 視為希格斯場量子質量的平方。如果我們知道 M 及 λ 的數值，就能夠計算給定 h 場的能量密度 E ，不過在標準模型中它們屬於未知量。所幸，單是研究關係方程式的行為，我們便可得到許多重要資訊。

我們將 E 對 h 作圖，看看當 h 由 0 開始增加時， E 做何反應。首先當 h 等於 0 時，方程式右邊的兩項皆為零，

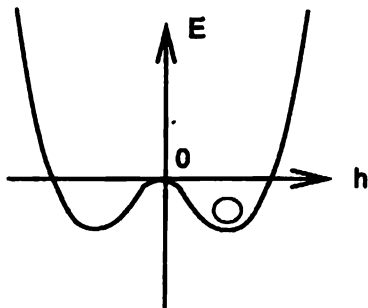


圖十五

因此 E 等於 0 。當 h 很小時（如 0.1 ），只要 2M 與 A 皆為正值， E 亦為正值。因此 E 隨著 h 的增加而增加，如圖十五所示。

2M 之所以稱為 2M ，而非 B ，是因為它通常被視為希格斯場量子「希格斯玻色子」的質量平方。因此照理來說 2M 應該為正值，而 E 的表現應該如圖十五所示。然而如果我們大膽假設 2M 為負值，希格斯場會有何表現呢？

一開始這個做法顯得無理，因為質量的平方應該為正，不過我們先看看它令人驚訝的結果再作定奪。首先，當 h 等於 0 時， E 等於 0 。當 h 不為 0 時，由於我們假設 2M 為負值，方程式右邊第一項永遠是負值，而第二項則恆正。當 h 很小時， E 會小於 0 。舉例來說，若 A 與 2M 數值大小相近，則當 h 等於 0.1 時， h 的平方等於 0.01 ，而 h 的四次方等於 0.0001 。如果 A 比 2M 大許多，則 E 在 h 更小時為負。隨著 h 漸漸變大，等式右邊的第



圖十六

二項變得愈來愈重要，最後使 E 大於 0，如圖十六所示。我們不知道 E 的正確圖示，例如它凹得多深或在哪兒變為 0 等等，但是其基本形狀與圖十六近似，我們只要記住這點即可。

若將此圖想像為宇宙能量的地貌，在高高低低的山谷間有個代表宇宙態的球在其中滾動，最終這個球會滾到代表最低能量狀態的谷底。我們從圖中看得出來，這最低點所對應的希格斯場 h 並非零值。換句話說，宇宙的真空態充滿著非零的希格斯場！

和其他場一樣，希格斯場與標準模型粒子進行交互作用。這當中的例外是光子、微子、膠子，它們不與希格斯場直接作用。與充滿宇宙真空態的希格斯場作用就像在水中行走一樣，會受到比在空氣中行走更大的阻力，就像是自己變重了一般。粒子就是藉由這個過程獲致質量。在標準模型中，夸克、帶電輕子、 W 、 Z 玻色子都是因這個機制而帶有質量。

標準模型中的希格斯物理包括三部分：第一，我們必須假設希格斯場的存在；其次，我們必須假設能量與希格斯場的關係，如前面所示，且 M 為負值。這一點將成為附錄 B 的主軸；第三，我們在第七章已經提過，希格斯場的量子，即希格斯玻色子，必須存在，而其存在將成為整個理論最重要的測試。附錄 B 我將向大家介紹超對稱如何改進希格斯物理。

附錄B

超對稱下的希格斯機制

在附錄A中，我們看到要使宇宙中充滿希格斯場的條件相當不自然：²M 這個一般為正值的參數必須為負。在標準模型中這個條件是強放進理論中，不是自然發生的。

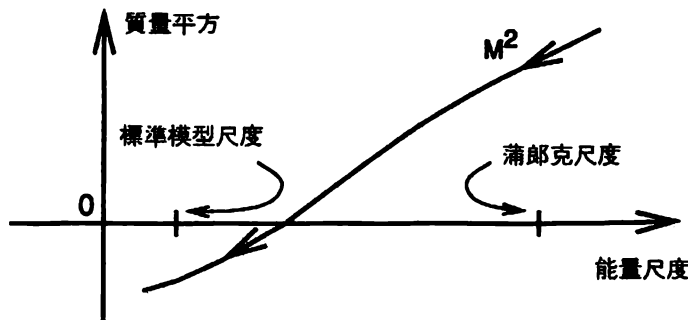
超對稱很自然的得到負²M 值的關鍵，是因為超對稱理論在蒲郎克尺度附近建立，而在這個尺度下各種作用力是統一的，理論形式也較簡單。雖然我們不知道所有粒子的質量或其他重要作用參數的正確數值，然而我們卻知道²M 與其他參數一般為正常的正值，²M 既不是負值，也不必是任何特殊值。要瞭解希格斯物理的運作，便要以第三章所提的有效理論做為討論基調。

我們必須知道²M 以及其他參數在「標準模型為有效理論」的尺度下的值（即對撞機尺度下的值）。由於超對稱理論是量子場論，如果我們知道交互作用強度或粒子質量在某個尺度下的值，便可據以計算它們在其他尺度下的值。因此，我們可以計算²M 的

數值自蒲郎克尺度增加至標準模型尺度時的變化。量子場論容許我們計算 M 在不同尺度下的量值，這種性質並不明顯，科學家發現量子理論四十年之後才注意到，並花了更長的時間才完全理解。我們也成功的以此過程計算各種作用力在不同尺度下的強度，並得到「所有作用力在蒲郎克尺度附近的強度變為一樣」這個結論（詳見第四章）。

總之，這是應當要認真看待的推論過程。實際的計算相當技術性，我僅以圖十七來表示其結果。圖中縱軸為質量平方 M^2 ，橫軸為能量（蒲郎克尺度對應於高能量，因此此在標準模型尺度的右邊）。在圖中也可以繪出其他粒子質量，在此我略去不表。

我們從圖中看出，當從蒲郎克尺度漸漸增至標準模型尺度時（能量漸漸減少），原



圖十七

本為正值的 2M 漸漸減小，最後變為負值。即便蒲郎克尺度下的 2M 值稍有不同， 2M 仍會在某個地方通過零點，在大尺度成為負值。在 2M 成為負值之前，W玻色子、Z玻色子、夸克、輕子等皆不具質量，因為如附錄A的圖十五所示，這時的宇宙最低能態為零希格斯場，因此粒子無法藉希格斯作用獲致質量。換言之，在大霹靂時這些粒子皆不具質量（因為能量極高，作用距離極短，與蒲郎克尺度相當），一直要等到宇宙冷卻至標準模型或對撞機尺度時（大霹靂後千分之一秒左右）， 2M 為負，宇宙真空態如圖十六所示，非零的希格斯場才使粒子獲得質量。

以上這個理論要先通過兩個重要的實驗檢測，才知道它是否正確詮釋了希格斯物理。其中之一已獲得成功，使科學家對這個推論信心大增。要解釋希格斯物理， 2M 必須在能量小於標準模型的尺度成為負值，使粒子在標準模型尺度下具有質量。決定 2M 在何處變號的方程式（圖十七的曲線）包含了一個不能由超對稱理論決定的參數，即頂夸克與希格斯場的交互作用強度。欲使 2M 在標準模型尺度為負，「頂夸克與希格斯場的交互作用強度」必須和「W、Z玻色子與希格斯場的交互作用強度」相當。

這聽起來沒什麼不對，但頂夸克之外所有的其他夸克、輕子與希格斯場的交互作用強度都比這要微弱得多。因為如此，當一九八二年這個條件為人發現時，科學家十分訝異。由於當時頂夸克尚未現身，因此這成為一項超對稱理論的驚人預測。如果這個預測

爲真，則當時許多進行中的實驗會因能量不足根本找不到頂夸克。在一九九〇年代頂夸克終於在費米實驗室發現，該預測竟獲得證實。這項成功，使我們對於超對稱希格斯物理信心大增。

第二個實驗測試牽涉到另一項極爲重要的預測。希格斯物理把我們已經測得的物理量（如W、Z玻色子的質量）和蒲郎克尺度附近的未知參數（如 M 等）做連結。這些未知參數中也包含了超伴子的質量。我們現在得到一道方程式，一邊包含Z玻色子質量，而另一邊則帶有未知的超伴子質量。欲使這道方程式成立，等式兩邊不應該包含大小相差太多的項。以方程式 $a=b+c$ 爲例，若a值約爲2，而b與c約爲100,000，則我們不應相信此方程式的結果，因爲要計算或測量b、c的值至十萬分之一這麼高的精確度是相當困難的。因此，若超伴子質量比Z玻色子大太多，超對稱希格斯物理就破功了。

至目前爲止，希格斯機制是連結超伴子質量與已知粒子質量的唯一辦法，因此一方面這項預測成爲超對稱希格斯物理的重要檢驗，另一方面，它也是科學家預期費米實驗室、甚至LEP即將製造出超伴子的最重要原因。反之，若超伴子的質量遠大於Z玻色子質量，則代表超對稱所「解釋」的希格斯機制只不過是巧合。

附錄C

超荷子與超中性子

超伴子中，質量最輕的幾個最可能率先找到，因為所需的能量最小（在可用能量給定的情形下，質量輕的粒子出現頻率較高，因此較容易辨認）。我們不知道哪一個超伴子質量最輕，但現有的理論顯示超光子、超W粒子、超Z粒子以及超希格斯粒子都是較為可能的候選者。也許不久的將來，超伴子就會現身，而新聞媒體將會興奮的報導這個大發現。

有朝一日讀者或許會在報導中聽聞此事，然而，由於一項微妙而少有人知的效應，率先發現的超伴子雖然屬於上述粒子之一，卻有個不同的名稱，例如超荷子或超中性子。這個效應並非超對稱的專利，許多物理系統也具有此一普遍性質。想要將新聞報導與本書介紹的粒子做連結的讀者，應該要對此一現象稍作瞭解。

一般我們以一連串的性質，如質量、電荷、弱荷、自旋等，來區分各種基本粒子。

在這些性質當中，自然界有時候允許多種粒子擁有相同的性質。如果兩種以上的粒子擁有相同的一些性質，而且其他不同的性質皆非守恆量，則這些粒子可以混合態出現。例如，具有同樣電荷與自旋的粒子能以混合態出現，因為在粒子與希格斯場的交互作用（決定粒子的質量）中，弱荷並不守恆。實驗中製造出來的總是具備特定質量的粒子，這些粒子可以是具不同弱荷的粒子的混合態。

例如，W 玻色子的超伴子和帶電希格斯玻色子的超伴子的行為，即受此法則影響。這兩種超伴子會互相混合，因此特定質量的超伴子既非超 W 粒子也不是超希格斯粒子，而是兩者的混合態，所謂超荷子（chargino）。超荷子和超 W 粒子有何不同，對於企圖瞭解超對稱性質的物理學家有其意義，除此之外差異不大。

另一組以混合態出現的粒子為超光子、超 Z 粒子，以及兩個不帶電的超希格斯粒子。在實驗中產生的特定質量粒子為這些粒子的混合態，稱為超中性子（neutralino）。特定質量狀態和特定弱荷狀態的差別主要在技術性方面，但卻有一點例外。特定質量狀態（超中性子）中最輕的一個，很可能是最輕超伴子，也就是宇宙中冷暗物質的絕佳候選粒子，詳見第六章。粒子的混合現象使超中性子成為超希格斯粒子、超光子、超 Z 粒子的結合態，性質因而較難建立。混合現象不僅使超對稱的語彙更加複雜，也使科學家研究超對稱與暗物質的關係時，更加困難。

附錄D

額外維度？大尺度額外維度？

當我們達到對大自然的終極理解時，就必須放棄熟悉的時空概念，甚至修正我們對空間維度的認識。令人訝異的是，科學家很早就開始認真的自問，為何我們生活在三維空間中？

第一個發表這方面研究結果的可能是荷蘭物理學家艾倫費斯特（Paul Ehrenfest）。他於一九一七年指出，描述行星繞日和電子繞原子核的運動方程式，只有在三維空間中才有穩定解。這似乎是人本原理的濫觴：宇宙必須是三維空間，原子和太陽系才會穩定，而我們才能在此生活。科學家對這個問題發生興趣，可能是受愛因斯坦的狹義相對論（一九〇五年，該理論連結了時間、空間）以及廣義相對論（一九一五年，此理論的數學架構在更多維空間下亦成立）所影響。

一九一九年卡魯扎（Theodor Kaluza），以及幾年之後的克萊因（Oskar Klein），各自

獨力導出一個令人震驚的結果。他們假設某個世界具有四維空間，再加上時間維度一共五維，而作用力僅有重力一項。這是合理的假設，因為重力對於所有物體皆有影響。卡魯扎與克萊因寫下那個世界的廣義相對論，再假設有一個空間維度較其他小得許多，所以我們無法感覺到這個維度存在。這就像是房間地板上的任一點，都垂直向上伸出另一維空間一樣，四維空間中的任一點也一樣伸展出第五維空間，只不過這個額外的空間維度很小，使我們不能察覺其中的運動。

卡魯扎與克萊因檢視理論時發現，所得到方程式分成兩組：一組是一般四維時空中的愛因斯坦重力方程式，另一組竟然便是馬克士威的電磁方程！五維時空中的重力，在微小維度方向的分量遵守馬克士威方程，因此可視為電磁場，理論中也可以定義一個行為與電荷一樣的物理量。或許，我們真的居住於五維時空中，而電磁作用則是微小維度中的重力場。

在當時，科學家對基本粒子與作用力的瞭解不夠深，因此無法在這方面更進一步發展，額外維度的研究因而停滯了不只半個世紀。然而，發人深思的卡魯扎—克萊因理論仍然廣為理論物理學家學習及討論。一直到了一九八〇年代，弦論開始受到矚目，科學家才重提額外維度。弦論要求粒子是在九維空間維度和一個時間維度中振動的弦。對於作用力來說，這個時空維數也正好是正確的：當六個空間維度微小而不可查覺時，十維

時空裡唯一的作用力——重力，在較大的四維時空中看起來恰好像是重力、電磁力、強作用力以及弱作用力。和卡魯扎—克萊因理論類似，額外的微小維度看起來就像是作用力一般。雖然，理論的細節仍然在研究階段。

如果額外維度的尺度真的這麼小，我們該如何檢驗它真的存在？事實上，它們的存在確實可能對我們的世界造成一些效應，而我們可望藉此檢驗理論。我們剛剛已提到，額外的維度解釋了基本粒子為何那樣交互作用，為何電磁、強弱交互作用力存在且具有那樣的性質。在弦論中，粒子本身為十維時空中的弦，而不同的粒子則是弦的不同表現狀態，因此我們可以將額外維度和電荷、色荷等粒子性質搭上關係。

描述宇宙的理論——宇宙學，在四維世界中，與在十維世界的四維時空中，各有不同的表現。舉例來說，作用力隨著距離減弱的程度與時空維度有關。或許，使部分空間維度保持微小的機制，會影響費米子與玻色子間的關係，而這可能與四維時空中的隱超對稱有關。科學家也猜測，微小維度的數目以及它們的「捲曲」模式，與基本粒子「家族」的數目有關。總之，與時空維度有關的實驗資料相當多，只要我們能建立完整的理論，或許就能將一切拼湊在一塊兒。

或許有一些讀者曾經被額外空間維度的總數搞昏頭過：有一些地方說是十維，有些地方說是十一維。這個額外的第十一維是爲了理論的一致性而增加的，但在一九九五年

以前，科學家對弦論只知道個大概，並不瞭解這點。新增的維度扮演的角色與其他空間維度有所不同：理論中的弦仍然在九個空間維度中振動，而弦本身卻擁有某種類似厚度的性質，使空間維度再增加一維。像弦論這種發展中的學問，進行類似的修正是常有的事。

額外維度對超對稱的影響仍屬未知領域。弦論必須具備超對稱性以及多維空間，才能成為一致性的理論，但在這種狀況下隱超對稱是如何出現的，則還不得而知。或許最重要的是，對超伴子質量、交互作用的預測，也同時對額外維度以及造成其捲曲的機制提供了線索。超伴子的實驗結果，也許能夠增進科學家對額外維度的理解。

若是額外維度的尺度大於預期……

一九九〇年理論物理學家開始考慮，如何以理論或實驗方法得知額外維度的大小。在此之前，科學家假設額外維度的大小約為蒲郎克尺度；雖然，至今這個說法仍然最爲可能，但隨時檢視現有證據是很重要的事。物理學家原本以爲，若額外維度大過蒲郎克尺度，則以往的成功將不復存在。後來科學家發現，在某些情況下這並不爲真。科學家猜測或許某些作用力（如重力）在較大的額外維度下能進行作用，而其他作用力則否。如果這爲真，將會有許多有趣的實驗結論。

舉例來說，科學家從來不曾研究重力在小於一公厘下的行為，說不定，在小於一公厘的距離下，重力作用和長距離作用大不相同（這種情況正是我在第32、33頁所說的，理論拓展至新定義域的活生生實例）。或許，在粒子對撞實驗中，重力子會射向額外維度，偵測器捕捉不到；或許，世界在³¹10公尺以上為四維時空，小於這個尺度而在³³10公尺以上，卻是五、六維，最後在蒲郎克尺度才成為十維……科學家正在研究這些極其有趣的點子。

即使實驗未發現有大於蒲郎克尺度的額外維度的跡象，先假設其存在，仍然可能有助於理論的發展。在科學家開始研究這個課題之前，大多數的理論物理學家相信額外維度確實存在，但他們多半以數學而非物理學來構思這額外維度。現在科學家開始以較為實際的方式考慮這個問題，許多人因而從中得到物理直觀以及經驗，這對於瞭解理論並將之運用到物質世界，有莫大幫助。

如果比蒲郎克尺度大上許多（如十億倍或更多倍蒲郎克尺度）的額外維度真的存在，則本書中的一部分觀點就得改寫了。本書的大多數內容仍然是正確的，超對稱仍然是弦論的基本特質，但由於額外維度對世界的影響，許多先前的結論就有修改的必要。

建議書目

過去二十年來，市面出現了許多非常好的科普書籍或文章。這其中包括科學家相當瞭解、或正在研究發展中的課題。我在此列舉一些本書讀者可能會有興趣的書籍。

本書主題「超對稱」，坊間尙少有值得一讀的非技術性書籍。一些期刊文章如：〈Supergavity and Unification of the Laws of Physics〉(D. Z. Freedman and Peter van Nieuwenhuizen, *Scientific American*, February 1978) · 〈Is Nature Supersymmetric? 〉(Howard E. Haber and Gordon L. Kane, *Scientific American*, June 1986) · 〈Desperately Seeking SUSY〉(Hans Christian Von Baeyer, *The Science*, September/October 1998) 皆值得一讀。〈*Many Faces of the Supeworld*〉(Yuri Golfand Memorial Volume, ed. M. Shifman, Singapore: World Scientific, 1999) 一書則相當詳盡的介紹了早期理論的發展史。

想要對粒子物理標準模型做更進一步認識的讀者，可以參閱我先前的科普著作《The Particle Garden》（Addison-Wesley, 1995）。受過科學訓練的讀者，或許應該讀讓我寫的標準模型教科書，是為大學高年級學生所寫的《Modern Elementary Particle Physics》（Addison-Wesley, 1993）。另外兩本關於標準模型歷史的優良科普書籍為《The Second Creation》（Robert Crease and Charles Mann, Rutgers University Press, 1996）以及《The Rise of the Standard Model》（ed. Lillian Hoddeson, Laurie Brown, Michael Riordan, Max Dresden, Cambridge, England: Cambridge University Press, 1997）。這兩本書包含許多關於實驗基礎的資訊。

令人驚訝的是，介紹量子理論的科普書籍並沒有想像中多。《Physics for Poets》（4th ed, Robert March, New York, McGraw-Hill, 1996）一書中關於量子理論的部分相當不錯，而關於量子力學詮釋的書籍（雖然量子力學的技术層面已經完全建立，其詮釋仍然屬於熱門的研究領域），則有《Where Does the Weirdness Go?》（David Lindley, New York: Basic Books, 1996）以及《The Quark and the Jaguar》（Murray Gell-Mann, New York: Freeman, 1994）中的部分章節。

最近有許多關於宇宙學、宇宙學與粒子物理學之間關係的書籍問世：《時間簡史》（霍金著，藝文印書館，二〇〇二年）、《宇宙的六個神奇數字》（芮斯著，天下文化，

11001年)・《*Inflationary Universe*》(Alan Guth, Reading, MA: Addison-Welsey, 1997)・《預知宇宙紀事》(費瑞斯著・商周出版・一九九八年)・敘述宇宙學發展史的《*Blind Watcher of the Sky*》(Rocky Kolb, Reading, MA: Addison-Welsey, 1996)・以及探討宇宙命運的《*The Five Ages of the Universe*》(Fred Adams and Greg Laughlin, New York: The Free Press, 1999)。

關於弦論及額外維度的文章書籍有：〈The Theory Formerly Known as String Theory〉(Michael Duff, *Scientific American*, February 1998)・《*Beyond Einstein*》(Michio Kaku and Jennifer Thompson, Oxford University Press, 1995)・《穿梭超時空》(加來道雄著・商周出版・一九九八年)與《*The Elegant Universe*》(Brian Greene, New York, Norton, 1999)。

廣泛猜臆基始理論研究的有以下兩本書：〈最終理論：自然界基本法則的探尋〉(溫伯格著・牛頓出版・一九九五年)以及《*Theories of Everything*》(John D. Barrow, Oxford, England: Clarendon Press, 1991)。

譯後記

郭兆林

〈超對稱〉於一九九九年底成書，而現在則是二〇〇一年中。在這不到兩年的時間，物理學家並沒有閒著。二〇〇〇年，義大利的DAMA暗物質直接偵測小組（直接偵測的方法及意義請見第六章）宣稱偵測到碰撞事件的季節消長。如果這個消長效應真的是因為地球在暗物質雲中運動所造成，這將是科學史上的一大發現。就在幾個月之後，柏克萊的CDMS小組也提出了他們的結果——基本上，他們什麼也沒看到。雖然兩邊所使用的偵測器材不同，但根據理論推算，若DAMA所見真為超對稱冷暗物質，CDMS應該會偵測到相當程度的訊號。兩派人馬至今仍為他們互相矛盾的結果爭論不休，但在實驗技術日新月異之下，誰是誰非應該很快就會有個結論。

接著，歐洲粒子物理研究中心的LEP在運轉了十一年之後，發現了一個疑似希格斯玻色子的事件（關於希格斯玻色子，請見第七章）。當時由於LHC的施工，LEP

停轉在即。興奮的科學家極力遊說行政人員暫緩LHC的動工，使他們有機會再次確認這個結果。年底，在未有進一步結果的情形下，決策者仍然以大局為重，宣布LEP停止運轉。

二〇〇一年二月，進行緲子 $g-2$ 實驗多年的紐約長島布魯克哈芬國家實驗室（Brookhaven National Laboratory）又有重大的宣布：標準模型的預測出現誤差了！雖然誤差是在小數點以下第九位才出現，而且該實驗的統計信心水準仍然不盡理想，也有人對於所引用的標準模型計算提出懷疑，但這仍然是前所未有的大新聞——自標準模型建立以來，雖然在概念上有困難，但技術上它一向是完美的（見第二章）。不過同樣的，這個結果仍然有待進一步證實。

在宇宙學方面，科學家也有驚人的發現：二〇〇〇年五月，以及二〇〇一年四月，三個獨立的實驗小組（加州理工學院的Boomerang、柏克萊的Maxima、以及芝加哥的Dasi）分別發表宇宙背景輻射的實驗結果。三個小組的結論一致，其中最重要的可歸納為三點：一、暴脹宇宙理論最重要的幾項預測得到證實。二、暗物質的確存在，而且它大部分必定不是重子（質子及中子等一般物質粒子）。三、令理論物理學家萬分頭疼的宇宙常數（或真空能量）並非零值（參見本書第八章後半）。

「超對稱」這個單一理論雖然未臻完美，卻有希望同時解釋及解決前段所提的這些

似不相干的現象與問題，即便是最頑固的實證派人士也要為之動容。我必須承認在幾年之前，超對稱對我而言，只是理論物理學家喝了太多咖啡之後的產物。我最初聽說超粒子的直覺反應是「拜託，基本粒子還不夠多嗎？」儘管在物理系的長廊經常和匆忙的粒子物理學家擦肩而過，但做宇宙學實驗的我和超對稱的「交互作用」大概也僅限於此了。無巧不巧，進行本書翻譯之時，正好是我本身開始認真面對超對稱這個課題的時候。這當然和這段期間的種種引人注目的大發現有關。但更重要的，還是因為超對稱本身的潛力。

暗物質是當今天文物理的一個大問題，試圖解釋暗物質的理論不可勝數，除了本書所提的最輕超伴子之外，axion、quark nugget、Q-ball、mirror matter、磁單極等，都有人下注。然而在這些候選者中，超對稱的最輕超伴子解釋十分自然合理，使這個理論漸漸走出理論粒子物理學的圈子，而廣受討論。實驗物理學家也多看好最輕超伴子，設計許多困難的實驗（如前述的CDMS等）試圖與對撞機一較長短，率先發現超伴子。

也在這段期間，台灣開始在基本粒子與宇宙學方面的研究扮演積極的角色。二〇〇一年四月，報載我國加入歐洲粒子物理研究中心的LHC計畫，正式加入搜尋希格斯玻色子與超對稱的行列；七月底，台灣與日本KEK加速中心合作的Belle實驗發表了顯著的CP破壞效應（關於b工廠及CP破壞，請參閱第八章）；由台大物理系及中研院

天文所主導的AMIBA計畫，更試圖在下一代宇宙學實驗中居於全球的領先地位。不過，以台灣學術界的標準來說，這些預期得到豐碩科學成果的計畫，花費也比一般科學研究來得大，因此引發了一些爭議，論辯投入這類大型計畫是否真為納稅人之福，會不會對其他經費發生排擠作用等等。

本書作者凱恩身為粒子物理學家，當然對這類爭議不陌生。本書的基調，除了對超對稱的樂觀預測之外，便是為耗資龐大的粒子物理實驗辯駁。作者提出許多社會應該支持基礎研究的理由，散見本書各處，我也不再贅述。這些都無庸置疑是很正當的動機，但其中最令我感到共鳴的，是基礎科學對年輕人的影響。在我的大學同學當中，有許多人當初並不是因為物理的應用價值而選擇物理系，而是被物質世界本身的奇妙所吸引。若對物理系大一新生做問卷調查，可能有一大半希望將來從事基礎物理研究。大夥兒畢業多年，雖然許多人已經不再從事物理；進入物理這行的人當中，也因個人品味不同而僅有少數人搞基礎物理，但這不代表之前這遭是白走了。大家所受的物理訓練，無疑有其價值。什麼是物理學的訓練方式呢？有一則物理學家用以自嘲的笑話是這麼說的：某物理學家失業而來到牧場工作，牧場主人要他研究增加牛乳產量的辦法。研究了幾天之後，這位老兄信心滿滿的繳出一篇報告。牧場主人翻開一看，當場啼笑皆非：「假設乳牛為球形且其半徑為 R ，在無重力真空中以定速 f 攝食牧草……」

這當然是個荒謬的例子，但簡而言之，物理學家習慣在簡化問題之後，以數學解決難題。一般來說，「簡化」與所謂「化約」(reduction)具有不同意義。「化約論者」有時是非線性物理學家或電漿物理學家用來揶揄「天真」的粒子物理學家所專用的詞彙，但若依本書作者的詮釋方法，所有物理學都可視為「化約論」(見第三章關於有效理論的探討)。物理學生所受的化約訓練，除了在電機、電子、資訊等行業派得上用場之外，在生物、經濟、數學、甚至心理學上，往往也能夠提供新思維。

更廣泛的來看，在選擇自然組的高中生當中，對於吸收新知最熱中的一群，往往有許多人有當科學家的夢。這些人熱忱的學習物理、化學、生物等知識，最後成為企業家、工程師、醫師、或其他對社會有卓越貢獻的人。若將沒有直接應用價值的基礎科學留給美、日等國研究，而將科學視為替工業或經濟服務的產業，乍聽之下是對有限資源的最佳利用，但社會中一旦沒了基礎科學家這個職業，年輕人學起科學來不免意興闌珊了。

總之，超對稱是一門熱鬧的領域，翻譯本書也是個愉快的經驗。一般來說譯者若能隱身，忠實的將原書呈現給讀者，即是功德圓滿。在這個時空點翻譯這本書，使我忍不住要畫蛇添足一下，給本書加了個「跋」。



物理學的疆界正在改變中。

現在，科學家不但問世界「如何」(how)運作，
還會問「為什麼」(why)世界是如此運作的。

愛因斯坦在二十世紀初問「為什麼」，
但是一直到最近十年來，
問「為什麼」才成為粒子物理學的常態科學研究。

在回答「宇宙為什麼如此運作」的理論中，
建立在十一維世界的弦論是最具企圖心的，
而弦論預測：大自然應該是超對稱的！

「超對稱」也是一種對稱性質，
之所以冠上「超」這個字眼，
是因為這種對稱太令人驚訝了。

超對稱理論最重大的意義在於：它提供了一扇窗，
幫我們從自身的「大世界」看到弦論的「小世界」。
找尋超對稱，正是當今物理學界的一齣重頭戲！

ISBN 986-417-027-9 (339)



9 789864 170272



3 8888 10484 088 3

BOOK 天下文化書坊
www.bookzone.com.tw

書號：CS116 定價：260元