

第四十五冊

物質的微觀構造

譯者：徐定國

目 錄

導 言.....	1
粒子的本性.....	4
它們的真實性.....	4
波 - 粒子雙重性.....	5
相對論效應.....	9
識別性質.....	11
交互作用或力.....	20
萬有引力.....	20
電磁.....	22
強核力.....	23
弱交互作用.....	24
各交互作用的比較.....	25
粒子交互作用的模式.....	26
守恒定律.....	27
質 能.....	27
動 量.....	31
角（轉動）動量.....	31
電 荷.....	31
微子和貝子.....	32

奇異性和同位自轉.....	32
對等性.....	32
粒 子.....	34
強核交互作用下穩定而不衰變的粒子.....	34
強核交互作用下衰變的粒子.....	37
附錄一 探查的工具.....	41
附錄二 微觀世界的語言.....	47
附錄三 跟蹤粒子.....	49

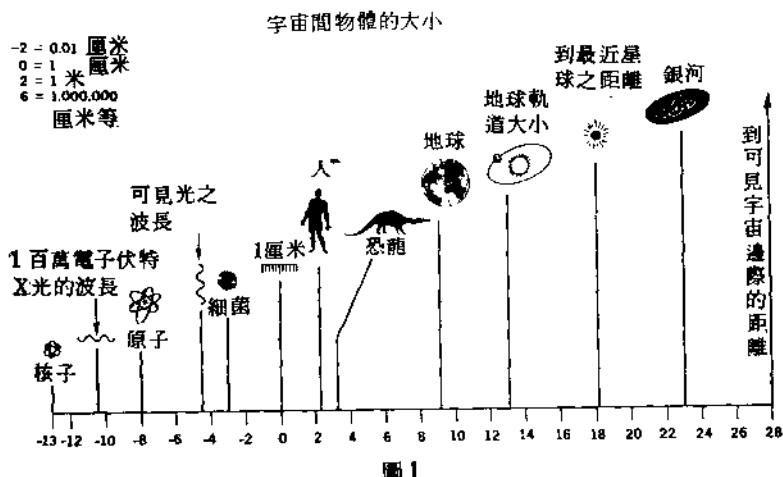
物質的微觀構造

原 著 CLIFFORD E. SWARTZ

譯 述 徐 定 國

導言

遠在我們的太陽系和銀河之外，有百億個其他的銀河系湧向宇宙的邊際。而在我們的每隻指頭內，大小為人的頭髮寬度百萬分之一的原子，又是它自己中心的核的一萬倍大。這個龐大的尺寸範圍看來使得我們對物質不能作一個合一的解釋了。（見圖一）



大小不是瞭解物質性質的唯一障礙。宇宙間的材料顯出幾百萬種形式——氣體、液體、固體、有生命的、無生命的——使任何大概的分類都很困難。

一直到今天，人們還有一種感覺，或者，至少一種不滿足似的希望，那就是說，大自然或許可以用一種能依簡單方式結合或分離的建構塊（building block）來解釋。希臘人認為可能有基本的原子，每一樣東西都可由它們形成。紀元前四百年，安培陶克里斯（Empedocles）教人們：萬物都由四元（element）四素（essence）所造成。他的四元四素的幾何排列見圖二。他把普通的物質想像為由不同的元組合，而用不同的素連結而成。木頭也許看起來是由土造的，但是如果你加上熱，就會見到，它還包括火和空氣。這個系統圓滿而無用，它是神秘家的一套，只導致鍊金術和想把鉛變成金，徒勞無功的努力。

不過，今天我們也得到了一套建構塊，它表面上看來差不多和希臘人的一樣稀疏。在過去四十年內，我們已經把組成傳統的 92 元素的原子撕扯開來，學習到如何處理那些原子的核心，而終於得以實現那些鍊金方士們的夢想，不過，不是把普通物質變成金，而是轉化成更有價值的放射性物質。自二次世界大戰以來，我們就一直忙於將構成原子核的質子、中子扯開。我們發現，宇宙間除了質子、中子和電子以外，還有一些其他的粒子，現在人們已經慣於稱它們為「基本」粒子。我們把一些基本粒子列於圖三內一個介紹性的表格裏。在 28 頁的圖二十一和 38 頁的圖二十六可見到更詳盡的表格，載明粒子及其性質。如果我們把這些表內的微中子、光子和引力場量子（質量為零）都算作粒子，粒子就幾乎和元素一樣多。當然，它們不能全是「基本」的，後面會看到，有方法把它們再行分類，歸入一些更基本的形式。

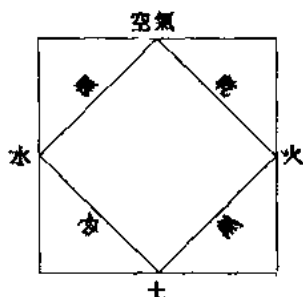


圖 2 希臘世界的四元素

初步的粒子圖表

族	名稱符號	質 量	電 荷	作用及行爲
像質子 粒子	歐米茄 Ω	1.78 倍電子	+或-	衰變成拉目達及 K - 介子。
	克 斯 Ξ	1.40 倍電子	+或 0	衰變成拉目達及 π - 介子。
	西格馬 Σ	1.27 倍電子	+或 0	衰變成質子及 π - 介子。
	拉目達 Λ	1.19 倍電子	零	衰變成質子及 π - 介子。
核 力 能 因	質 子 p	1839 倍電子	+或-	原子核的主要組成份子；在我們的世界內，質子通常是正常的。
	中 子 n	$(1.7 \times 10^{-24} \text{克})$	零	
	η - 介子 η	1070 倍電子	零	質子和中子非常靠近時的一個核力能因。
	K - 介子 K	970 倍電子	+或 0	質子和中子非常靠近時的一個核力能因。
	π - 介子 π	270 倍電子	+或 0	核子能因之一。質子和中子間的介子互換產生“核膠”。
像電子 粒子	牟 子 μ	207 倍電子	+或-	介子衰變的後裔。形成半數在海平面的“宇宙線”。
	電 子 e	1/1839 倍質子	+或-	原子的負電子，平衡核的正電荷。
	微中子 ν	零	零	伴隨電子，從放射性貝他衰變中發放出來。
無質量 波松子	光 子 γ	零	零	電磁力的能因（光、x 射線等）。
	引力場 量 子	零	零	萬有引力能因；至今尚未偵測到。

上表中只有質子、電子、微光子、光子和引力場量子穩定而不產生放射性衰變。有上標的符號表示帶特定的電荷。例如， π^0 （派零）表零電荷 π - 介子。

圖 3

不管粒子是如何組織的，它們確構成這本小冊子要討論的物質的微細構造。（這門科學通常叫做粒子物理學或高能物理學，因為大多數和粒子有關的實驗都需要極高能量的粒子射柱。）（註一）

在考慮分類體系之前，我們先要在下一節裏檢查一下粒子的本性和一些得以識別它們的性質。大多數我們所知道的有關粒子的種種都來自其間互施之力。這些力將於第二節——交互作用或力——內出現。這些力附屬於在第三節裏扼要介紹的守恒律。最後，在第四節裏，我們敘述了一些新觀念。由那些新觀念，許多粒子都可以想成是一些很少的建構塊的不同表現。

雖然這本小冊子主要關注的是粒子本身，而非產生它們，或觀察它們的機器，通常還是必須知道所用儀器的性質，以瞭解我們是在觀察什麼。附錄一對探測微觀世界所用的工具作了一個簡短的描述。附錄二列出一些粒子群並定義一些粒子世界的語言。附錄三則告訴我們如何去解釋本冊所用的粒子徑跡照片（particle-track picture）。你或許願意參考這些資料以幫助你明白隨後所講的東西。

粒子的本性

它們的真實性

幾乎每一個人都熟悉所有物質都是由很小的原子所構成的概念。說到極小，也許我們想下結論說：「因為我們不能藉普通光看到原子粒子，它們一定只是理論上的概念，而不大會是實在的物體。」但是我們確能“看到”原子，甚至其中的粒子，清楚得跟看到電視上的人一樣，而前者的過程並不比後者複雜。

在電視攝影棚裏，光從人的臉反射到電子管的前屏上而改變了部

〔註一〕如果要參考有關這個題目的基本科學的資料，請看本文庫中「我們的原子世界」和「加速器」這兩冊。

份電視屏的電荷。一束電子掃描電視屏，並反射於一放大器，因而產生一像信號（image signal）。一組複雜的電路將此像信號轉變成電磁波信號。你自己的電視機在數哩之外接收到這個信號，把它轉變成含磷質屏上的發光區域。因此你“看到”了這個人的臉。

現在我們考慮用來偵測高能量粒子的氣泡室（bubble chamber）的作用。我們急速減小一盛有熱液體容器內的壓力，因而此液體的溫度突然超過沸點。但是就在液體開始沸騰，並產生氣泡前，我們把一些從高能量“原子擊碎器”（atom smasher）放出來的核粒子送經此容器。這些核粒子就會破壞液體中的原子，使其成為氣泡形成的“種子”，而留下痕跡。這時如果使一道光閃一下，我們的眼睛，或照相機，就能“看到”這些粒子。

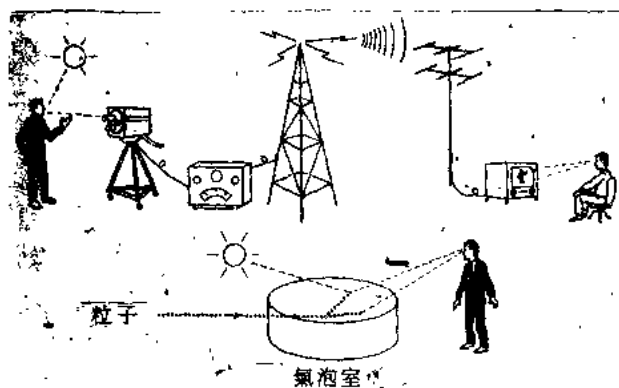


圖4 與在電視機上看見一個人比較之下，可見在氣泡室中見到粒子的容易。

事實上我們觀察氣泡室內粒子的清楚程度，可以比我們面對面還要甚。粒子顯然只有一些性質，其中每一性質都保持不變，也都可以量到。和粒子的真實性比較之下，複雜如人的東西反而幾乎變成理論上的概念了。

波—粒子雙重性

我們所熟悉的原子構造的觀念，顯示於圖五的模型中。今天，人



圖5 波爾原子

們認為數學模型更接近實體，這是因為我們不能很精確地量到一個電子的位置去證明它確如圖五所顯示，位於圍繞核的軌道上。而數學的描述可以預測在離核不同距離處找到電子的或然率，並且這些預測和實驗極為吻合。圖中的電子軌道的模糊性是難於描述所有粒子的行為的典型說明。

我們量一個非常小的物體的“位置”時，一定會用度量工具擾動了它，並且變更了一點點它的速度。同樣地，在一段非常短的時間裏，一個運動系統的“能量”也是不定的，它有一個未知不定量。這些極小的變動在我們的日常世界裏並沒有什麼了不得，但是在時間和距離的原子尺度上，它們就產生了一些未料到的結果。這些位置的度量和速度的度量之間，與能量和時間之間的關係，叫做“海森堡測不準定律”（註二），扼要地敘述於圖六中。

描述粒子運動的等式告訴我們一個粒子將位於某個位置和具有某種速度的或然率。實驗認定，量得的位置和速度值有一範圍，或“或然率分布”。具有較大動量的粒子的行為和硬子彈極相似，所以我們料想，描述它們的等式也和描述子彈作用的式子相似。在一給定時刻

〔註二〕由海森堡，1932 年一個德國的諾貝爾物理獎得主首先敘述。

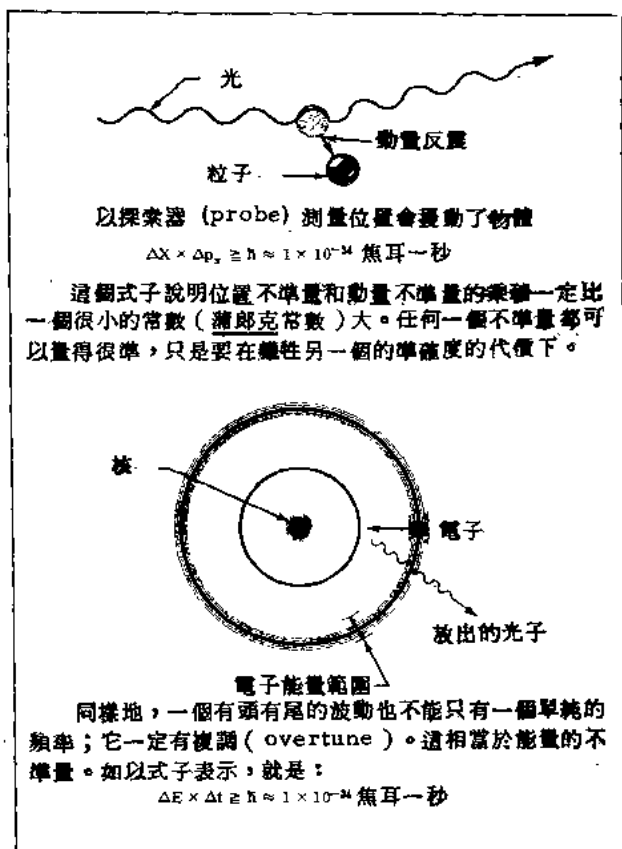


圖6 海森堡的測不準關係

，它們的位置應當十分確定。相反地，低動量粒子交互作用後，位置就比較不確定。數學以或然率來表示這種不準性。低動量粒子等式的解和描述波動的等式的解非常相似。

這並不意味著我們一定得用兩組等式或兩種不同的理論去描述粒子。大多數描述物理事件的等式都沒有完全而簡單的解，取而代之的是近似的解法。

比方說，我們考慮一個描述落體的等式：

$$F - KV^2 = MA$$

此式告訴我們，重力（ F ）減去與物體速度（ V ）的平方成正比（ K ）的空氣摩擦力，等於物體的質量（ M ）乘上其加速度（ A ）。不過，假設空氣摩擦和速度平方成正比就是一種近似。此式的正解不但複雜而且需要微積分。不過，對兩個極端的例子來說，進一步的近似方法可以把解變得很簡單。首先，如果落體為流線形， K 值就很小，摩擦力也就極小，因此我們就得到一個真空中自由落體的簡單公式，而降落的距離和降落所花時間的平方就成正比：

$$\Delta x = \frac{1}{2}at^2 \quad \text{解一}$$

在另一種情況下，摩擦力可能很大。降落傘以等速下降，彈珠在糖蜜裏也以穩定的速率下降。在這種情形下，此式之解為：

$$\Delta x = vt \quad \text{解二}$$

這個情況下的近似法是令摩擦力等於重量，因而加速度等於零，才能簡化原式。

雖然同一個落體方程式得到兩組不同型的解，沒有人認為這樣有什麼矛盾的地方。對描述粒子作用的方程式，我們也應該這樣。在某種實驗情形下，最好的近似法可以把描述粒子作用的方程式變得和波動方程式相似。而在其他的實驗情形下，適當的近似法可以產生和描述堅實的粒子相似的方程式。在這裏，我們並不主張這個粒子“是”一種波或“是”一個堅硬的粒子；它只不過在特殊的情形下表現出不同的樣子罷了。我們也不應該把粒子想成以搖搖晃晃，波樣的方式在運動。有波特性的只是“或然率函數”，而且此函數只預測在一特定時刻一所予粒子位於某位置，或具有某種速度的機會。

圖七表明粒子的波動性。這個干涉形狀是由電子射過一張薄箔所造成。當然，並沒有電子真正沿波狀的路徑運動，但是電子的波樣“分布”確是由波動的數學來描述的，照片中明暗相間的線和水波或光的干涉現象類似。

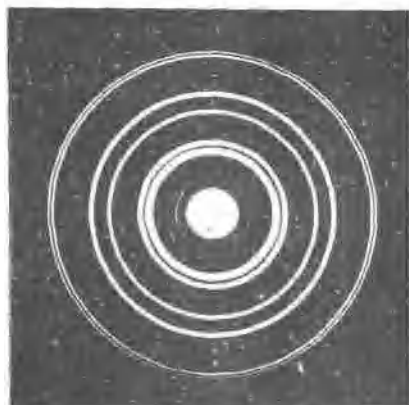


圖7 粒子的波動性質。

這些值得注意的事項都可以應用到電磁輻射的自然單位——光子——和其他的粒子上。對波長較長的無線電波來說，描述光子最好是用波動模型。對高能量 x 光來說，通常粒子模型最好。對可見光來說，如果與它作用的物體大小與它的波長大約相等，波動模型就可對二者間的效應作一簡單的解釋。比方說，如果光穿過一個非常小的孔，它就會像波一樣散播開來。反之，如果和光作用的物體與光的波長比較之下，顯然很大的話，其間作用的效應用粒子模型描述就比較容易。這兩個模型的用處，可見於通過一個刀鋒的平行光（由一極遠射源所發）所投射的陰影的例子。一瞥之下，陰影有一非常明確的邊界，就像一束要就擦過刀鋒，要就被擋住的粒子所產生的一樣。不過，仔細檢查陰影邊界之下就發現，在一段很短的距離之內，陰影邊緣既不清楚，又包含一組很接近的光帶和波動才有的陰影。不管怎麼樣，這裏並沒有“雙重性”的問題。對某些目的來說，光用粒子模型去描述確實最好。光不是波或粒子，光就是光。

相對論效應

粒子的另一特徵是：粒子經常運動得幾乎和光一樣快。當它們趨近這個速率極限時，相對論效應（由特殊相對論所闡述）就扮演起一

個重要的角色來。其中我們最熟悉的是能量和質量變成可以互換的效應。那就是：

$$E = mc^2$$

具有質量的粒子能由其他粒子所剩餘的能量所創造出來，也能丟失質量而衰變回去。圖八為這種創造的一個例子。在這裏，有一高能量 γ 光（或伽瑪射線）把它全部的能量轉變為一正一負，兩個電子的質量和動能。其相反效應可見圖九。一反質子（將於後面談到）與一普通質子碰撞，兩者的質量全部消滅（annihilate）而轉變成一些新的粒子——介子（meson）——的質量和動能，而後介子又衰變，幾乎把它們所有的質量用於產生更輕粒子的能量。

對於接近光速運動的物體來說，“持續時間”（duration of time）的改變是另一種相對論效應。就在你讀這頁書的時候，許多叫做“ μ 子”（muon）的粒子會射過你的身體。它們是宇宙線（質

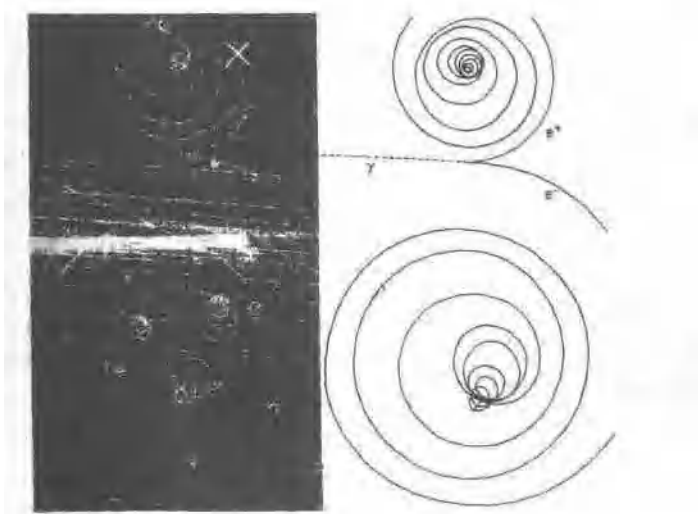
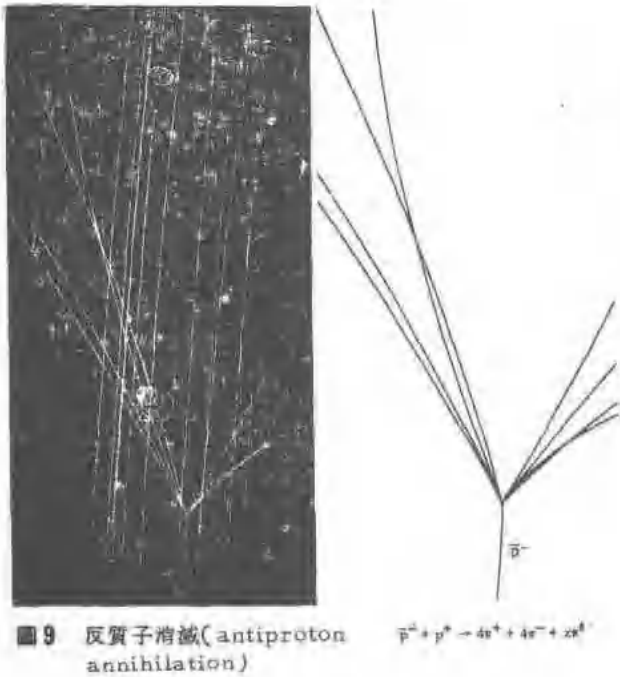


圖 8 電子成對產生



子) (圖十) 在大氣頂所產生的。靜止 (相對於我們) 時, 它們以一秒的百萬分之一的速率衰變。在那麼短的半生期下, 即使以光速, 它們也只能運行幾百碼。而事實上許多車子都活著到達了地球, 這就表示: 在近光速的情況下, 時間對它們慢了下來。

識別性質

質—能

我們已經說過基本粒子只具有一些性質, 其中有些是夠明顯的。粒子具有質量。雖然在一些情況下質量為零, 可是零和任何其他數字

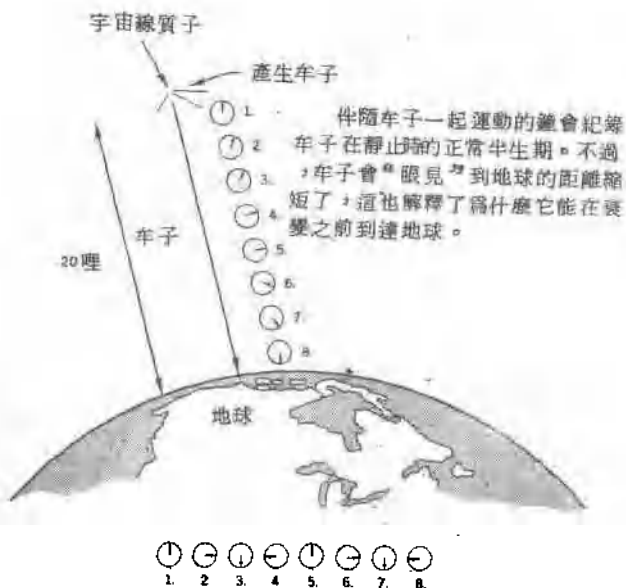


圖 10 同時，地球上的鐘紀錄較長的车子半生期。

一樣合理。在磅、克的尺度下，粒子的質量顯得很小，所以通常它都以產生一粒子所需的能量表示。在原子的尺度上，自然的能量單位（**nature's unit of energy**）大約是一電子伏特大小的量。這是把一個電子（或任何具有電子電荷的粒子）提昇一伏特電位差所需要的能量。

我們把電子伏特叫做自然的能量單位，因為所有分子級的化學作用都包含大約一伏特的能量。能刺激這些化學變化的可見光的光子，具有一對電子伏特大小的能量。每當手電筒的電池有一次分子作用，就有一個電子被提昇 $1\frac{1}{2}$ 伏特的電位，而花掉 $1\frac{1}{2}$ 電子伏特的化學能。在人的尺度上，這些能量極小，大約每秒要費 10^{19} 那麼多次變化才能閃亮一個手電筒的燈泡。

在藉加速器產生高能粒子的工作中，能量通常以百萬電子伏特（

Mev)表。譬如，一個牙醫生的X光機能夠把電子加速（以產生它的X光）到0.1 Mev的能量。只花費1.0 Mev的能量就能產生一個電子對的質量。

電 荷

粒子可以具有 $+1$ 、 -1 ，或0再乘上電荷基本單位的電荷。而至少有一個最近發現的短命共振粒子（short-lived resonance particle）具有 $+2$ 單位的電荷。

自 轉 (SPIN)

另一種性質是角動量，或自轉。許多粒子動得好像是在繞著一個中軸自轉一樣，不過，顯現出來的自轉值只有某幾種。按照自轉的基本單位來表示，大多數的粒子具有0單位、 $\frac{1}{2}$ 單位、或1單位。半整數自轉和整數自轉（0、1、2等）有極大的差別。具有半整數自轉的粒子，如電子、質子和中子，遵循一個排斥“定律”，“禁止”一個以上的粒子存在同一個地方；具有整數自轉的粒子，如光子和介子，就不遵循這樣的定律。

粒子的自轉一定得產生一些可以觀察到的效應，否則這個觀念就沒有意義了。我們可以用電子對這種情形作最好的解釋。如果電子真是一個自轉電荷，它應該具有一個小磁鐵的種種特性，在磁場裏面應該順著場的方向排成一線，就像羅盤針放在地磁場中會指向南北一樣。強度在一小段距離內從強變到弱的磁場裏，一個極小的磁鐵會移向較強的地方。

1924年所作的一個有名的實驗裏，兩個德國科學家奧圖史特恩（註三）和格拉合觀察到了這種運動。圖十一顯示了這個實驗是如何作的。如果電子射過這個不均強磁場，橫方向的運動一定比上下的運動大得多，這是因為在磁場內運動的帶電粒子是受一垂直於運動方向

〔註三〕史特恩年青時曾和愛因斯坦共事，在1943年得諾貝爾物理獎時住美國。

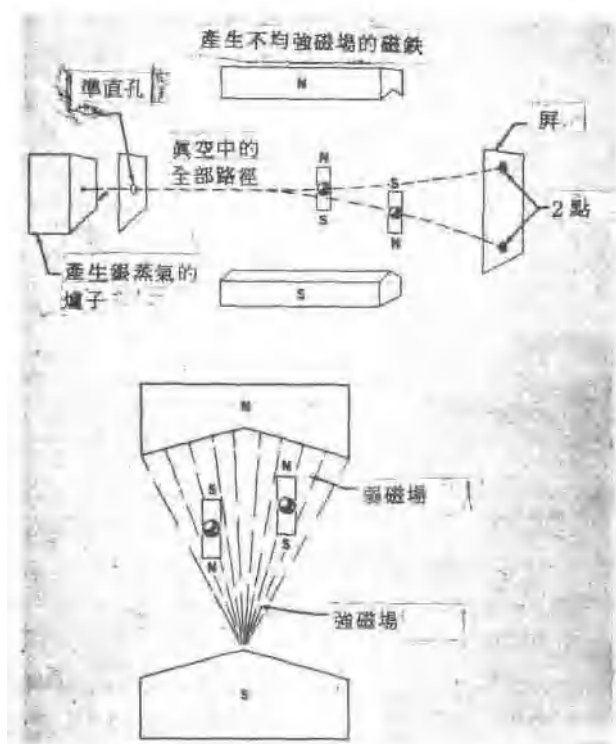


圖 11 表明電子自轉為量化的史特恩—格拉合實驗。

及磁場方向的力。為避免這個力的影響，實驗家把中性的銀原子射過這個系統。大家推測，因為原子是中性的，應該不會受到磁場的影響而會沿著中線射到屏上。不過，結果却變成，雖然磁場對整個原子系統沒有影響，它對這個中性原子最外面的一個電子却的確發生影響，因為這個電子是不受其他電子的影響的。換句話說，對這個實驗而言，除了最外層電子本身的自轉外，這個中性系統不受磁場影響。

假如這個自轉電子真像一個磁鐵，銀原子就會沿著一條接收板上的垂直線，全部附著上去。在磁場中的偏折量視此電子磁鐵的方位而定。如本來就和磁場同向，它就會向下動；如果本來和磁場反向，它