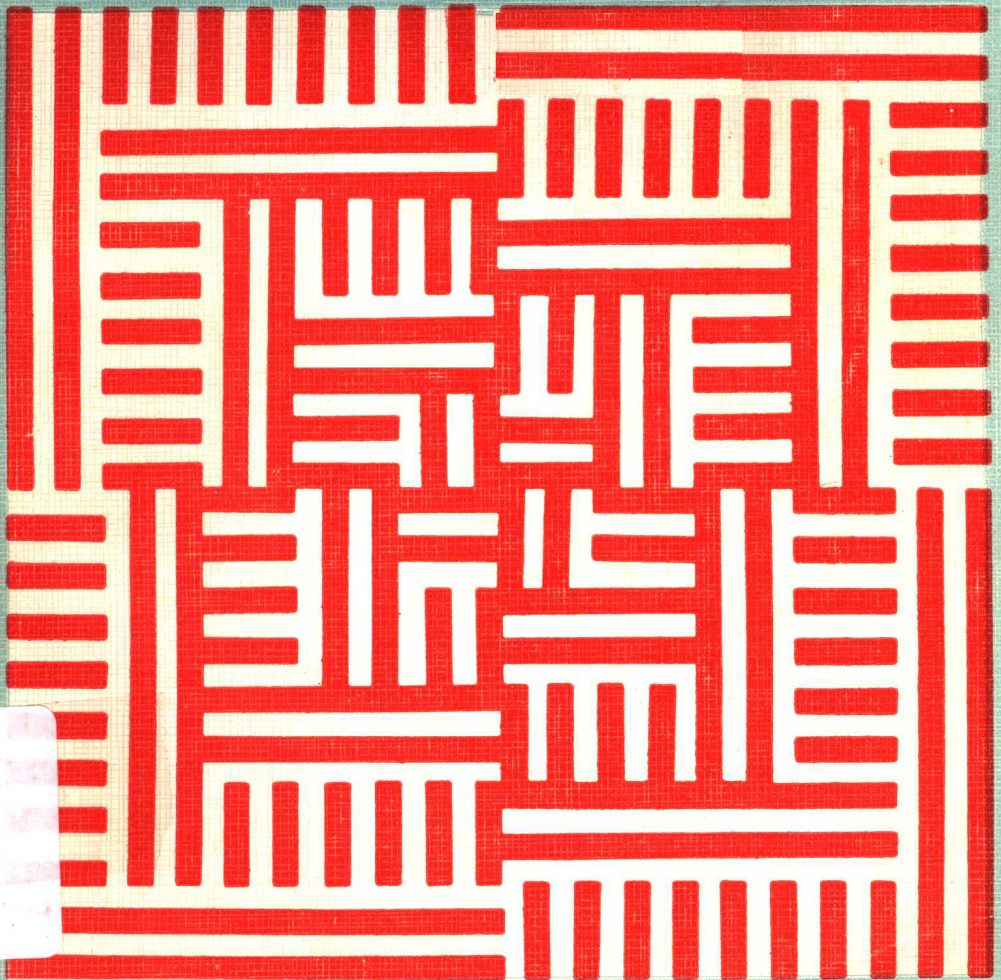


PHYSICS
ALONSO-FINN

物理學

第三冊

謝芳生譯



東華書局印行

42
5

物理學

第 三 冊

著 者

艾 隆 索 斐 恩

(MARCELO ALONSC) (EDWARD J. FINN)

譯 者

謝 芳 生 博 士

東 華 書 局 印 行

前 言

物理學是一門基本科學，它對其他一切科學都有深遠的影響，所以不只是以物理為主科和工程方面的學生必須對它的基本觀念有澈底的瞭解，而是任何一個準備以科學為職業的人（包括主修生物，化學，以及數學的學生們）都必須具有同樣的瞭解。

對理學院和工學院的學生而言，普通物理這門課的主要目的（同時也許是它之所以被列在課程中的唯一原因）是給學生們一個統一的物理觀念。這一點應當由分析各個基本原理和它們的涵意，以及它們的限度來辦到，所以這本書設計為理學院和工學院學生的一門二學期用的普通物理課——所介紹的是我們認為構成今日物理學核心的基本觀念。

直到最近為止，物理學被教得彷彿是由幾門科學聚積而成的，它們之間多少有些關係却又沒有一個真正統一的觀點。傳統式的分為力學、熱學、聲學、光學、電磁學，以及近代物理學（…“學”）不再合用。我們脫離了這種傳統的方法。採用一個較更合邏輯而統一的介紹法，強調各項不滅定律，場和波的觀念，以及物質的原子觀。特殊相對論的基本原則在全書中均被用來作為輔導原理之一，任何物理理論必須符合這點。

主要題材可分為三部份：(1) 質點，(2) 相互作用及場，(3) 波。在第一篇中我們由力學開始以便建立一些基本原理，這些原理在敘述我們所觀察到的在我們周圍的運動時是必須的。在這一篇中我們由統計力學的觀點，來討論熱力學；我們相信這種方法比較簡單而合理。然後，因為自然界的一切現象都是相互作用的結果，而這些作用又是以場的觀念來分析的，所以我們在第二篇內考慮現在所認出的各種作用和它們相關的場，重心吸引作用和電磁作用被討論得非常詳細，因為它們是

2 物理學 四

大多數所見的巨觀現象 (Macroscopic phenomena) 的起因; 和核子現象以及涉及基本質點的過程有關的各種強、弱作用則討論得很簡明。在第三篇中我們將波當作場的觀念的結果來討論。一般包括在聲學和光學內的材料我們都列在這部份內。但是重點則在電磁波方面。最後一章是量子力學的簡短介紹。在全書內我們一再地談到物質的構造, 即是原子, 分子, 原子核, 以及基本質點。

這本書很新穎, 不只是它的介紹方法不同, 它的觀念也特出, 因為我們加入了一些基本題材是一般普通物理教本中所沒有的; 同時也略去了一些傳統上所談到的問題。所用數學限於微積分內的非常基本的觀念。許多基本原理的應用以及一些特殊題材均以做好的例題形式出現。這樣, 教師可以趁方便的時候說明, 或者選擇地來討論, 是以在課程的編組方面伸縮性較大。證明以及限於物理涵義內的數學計算均和教本的主體分開(*用灰色的底) 以免讀者在閱讀時失去物理推理的主源。這樣安排同時又使教師在要略去某些證明時可以較為自由。

我們採用 IUPAP 的符號, 單位及名稱委員會的推薦。我們一直用的是 SI 單位, 以米, 千克, 秒, 以及庫侖為基本單位 (即 MKSC 制)。然而我們同時也介紹了一些 CGS 制和英制中常用的單位。

所有物理常數, 到小數第四位為止, 都是用 1964 年的值。自從本書付印之後又有一些常數被發表出來 (B. N. Taylor, W. H. Parker, 及 D. N. Langenberg, Rev. Mod. Phys. 41, 375, 1969), 它影響書中所列的幾項數值。

所有各項科學的課程都受到很大的壓力要將新近變得有關的各門課包括進去, 我們期望這本初級物理的書能減少一些這種壓力, 因為它在不需要不適當的努力下在學生們大學教育的早期提高了學生對物理觀念的瞭解以及運用它們的能力。

我們要對某些人, 由於他們的鼓勵和協助才使此書得以完成的人,

譯註: * 在本書中用小號字體以示區分。

表示謝意。我們特別要感謝我們傑出的同事 D. Lazarus 教授，他是這本書的顧問編輯，他的批評和指教幫助我們修正並改進這書的許多地方。我們對 Addison-Wesley 工作人員的才能和努力也十分感激。末了，我們至少應該感謝我們的妻子們，她們一直非常耐心地陪着我們。

艾 隆 索 M. A.
斐 恩 E. J. F.

華 盛 頓
1969 十月

第三册 目 錄

18. 原子的電性結構619~655

- | | | | |
|-------|-------------|-------|---------|
| 18-1 | 引論 | 18-2 | 電解 |
| 18-3 | 原子的核子模型 | 18-4 | 波爾的原子說 |
| 18-5 | 角動量的量子化 | 18-6 | 電子自轉 |
| 18-7 | 自轉與軌道間的相互作用 | 18-8 | 原子內的電子層 |
| 18-9 | 分子中的電子 | 18-10 | 固體內的電子 |
| 18-11 | 導體、半導體、及絕緣體 | | |

19. 靜態的電磁場660~720

- | | | | |
|--------|------------------|-------|----------|
| 19-1 | 引論 | 19-2 | 一個向量場的通量 |
| 19-3 | 一個向量場的線積分和環流 | | |
| I. 電場 | | | |
| 19-4 | 電動勢 | 19-5 | 電場的高斯定律 |
| 19-6 | 放在一個電場中的一個導體的性質 | 19-7 | 物質電性的極化 |
| 19-8 | 極化向量 | 19-9 | 電位移 |
| 19-10 | 電的極化係數和介電係數 | 19-11 | 電容量、電容器 |
| 19-12 | 電場的能量 | | |
| II. 磁場 | | | |
| 19-13 | 磁場的 <u>安培</u> 定律 | 19-14 | 磁通量 |

2 物理學 (三)

- | | | | |
|-------|-----------|-------|-------------|
| 19-15 | 物質的磁化 | 19-16 | 磁化向量 |
| 19-17 | 磁化場 | 19-18 | 磁的極化係數和導磁係數 |
| 19-19 | 靜態場各定律的總結 | | |

20. 與時間有關的電磁場721~757

- | | | | |
|-------|-----------------------|-------|------------|
| 20-1 | 引論 | 20-2 | 法拉第一亨利定律 |
| 20-3 | 由於導體和磁場間的相對運動所引起的電磁感應 | 20-4 | 電磁感應和相對論 |
| 20-5 | 電位和電磁感應 | 20-6 | 自感應 |
| 20-7 | 磁場的能量 | 20-8 | 耦合的電路 |
| 20-9 | 電荷不滅原理 | 20-10 | 安培—馬克士威爾定律 |
| 20-11 | 馬克士威爾方程式 | | |

21. 電路758~800

- | | | | |
|-------|-----------------|-------|-------------|
| 21-1 | 引論 | 21-2 | 歐姆定律 |
| 21-3 | 電功率 | 21-4 | 電阻器的組合 |
| 21-5 | 直流電路 | 21-6 | 計算電網中電流的方法 |
| 21-7 | 有自感的電路中電流的建立與衰減 | 21-8 | 電容器的充電與放電 |
| 21-9 | 自由的電振盪 | 21-10 | 被迫的電振盪、交流電路 |
| 21-11 | 轉動向量法應用到交流電路上 | 21-12 | 非歐姆式導體 |

22. 強與弱的相互作用801~836

- | | | | |
|------|----|------|-----|
| 22-1 | 引論 | 22-2 | 原子核 |
|------|----|------|-----|

22-3	原子核的性質	22-4	原子核的束縛能
22-5	核子力	22-6	殼模型
22-7	放射蛻變	22-8	放射蛻變的定律
22-9	核子分裂	22-10	核子熔合
22-11	基本質點		

第三篇 波

23. 波動839~888

23-1	引論	23-2	波動的描述
23-3	波動的一般方程式	23-4	一根固體棒和一條彈簧上的彈性波
23-5	氣柱內的壓力波	23-6	絃上的橫波
23-7	棒上的一個橫波	23-8	液體內的表面波
23-9	什麼在波動中傳播？	23-10	二維及三維內的波
23-11	流體內的球形波	23-12	羣速
23-13	<u>都卜勒效應</u>	23-14	聲音、聲學

24. 電磁波889~928

24-1	引論	24-2	平面電磁波
24-3	一個電磁波的能量和動量	24-4	振盪偶極的輻射
24-5	被加速的電荷的輻射	24-6	電磁波在物質中的傳播；分散
24-7	電磁波中的 <u>都卜勒效應</u>	24-8	電磁輻射的光譜

單號習題答案929~934

18

原子的電性結構

(Electric Structure Of Atoms)

引論

電解

原子的核子模型

波爾的原子說

角動量的量子化

電子自轉

自轉與軌道間的相互作用

原子內的電子層

分子中的電子

固體內的電子

導體, 半導體, 及絕緣體

18-1 引 論 (Introduction)

根據我們在前面各章中所累積的資料，我們現在已經可以來對原子的構造——我們在第一章中已經簡略地(同時也只是表面地)談了一下——重新予以考慮了，我們要提醒讀者，我們將原子當作包括一個小的中心區或原子核，大約是 10^{-14} 米的大小，由質子和中子所構成的，以及若干電子在大約是 10^{-10} 米大小的一個區域內圍繞着原子核運行，我們的目的是要檢查這個原子模型的實驗基礎，同時看我們對於電子的運動能學到些什麼。

18-2 電 解 (Electrolysis)

電解 (electrolysis) 是一種很有趣的現象，不只是由於它的實際應用同時也因為它提供了物質的電性構造的最早的索引之一，讓我們假定一個電場 \mathcal{E} 被加到 (圖 18-1) 一種熔了的鹽 (例如 KHF_2) 或者一種含酸 (例如 HCl)，或鹼 (例如 NaOH)，或鹽 (例如 NaCl) 的溶液上，我們是將被稱為電極 (electrode) 的二個相反地充電的棒或片浸在這溶液中而產生電場的。我們於是會觀察到一項電荷的流動，或電流，這時帶一種電荷的原子移向正的電極或陽極 (anode) 而另一種則移向負的電極或陰極 (cathode)，這現象建議說被溶解的物質的分子已經分開 (或分離) 成爲二種不同的帶電部份，或稱離子，有些帶的是正電而在和電場相同的方向運動；別的帶的是負電而在與電場相反的方向運動。舉例而言，在 NaCl 的情形下 Na 原子移向陰極所以是正離子，被稱

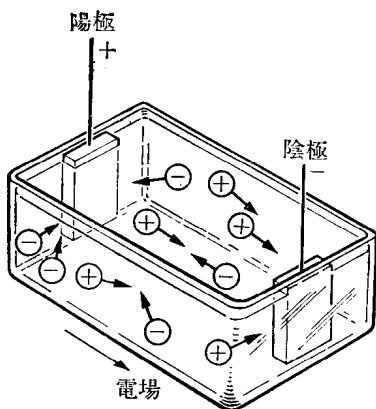
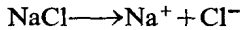


圖 18-1 電解，離子在帶電的極片所產生的電場的作用下運動。

為陰向游子 (cations), Cl 原子則移向陰極而是負離子, 被稱為陽向游子 (anions), 這項分離可以被寫成下列形式:



因為正常的 NaCl 分子並不呈顯任何明顯的電荷, 我們可以假定它們是由等量的正電荷與負電荷所組成的, 當 NaCl 分子分離時這些電荷並不是平均地分開的, 分子的一部份帶有超量的負電, 而另一部份則有超量的正電, 是以各部份都是一個離子。

我們已經說過了所有電荷都是一個基本單位電荷 e 的整倍數。讓我們假定正離子帶有一個電荷 $+\nu e$, 負離子則有一個電荷 $-\nu e$, 其中 ν 是在後面要被決定的一個整數。當各離子到達各極時, 藉着將它們的電荷與極上所有的電荷交換它們就變成中性的。通常, 隨之而來的是一串化學反應, 這些對我們是沒有關係的, 但却可以被用來認明移向各電極的各種離子的本質。

在某一時間 t , 每一種原子都已經有 N 個到達電極了, 在每個電極處所交換的總電荷 Q 在絕對值上就是

$$Q = N\nu e$$

假定各個分子的質量是 m , 沉澱在各電極的總質量就是

$$M = Nm$$

將第一式除以第二式我們得到

$$\frac{Q}{M} = \frac{\nu e}{m} \quad (18-1)$$

但是, 如果 N_A 是亞佛加德羅常數 (Avogadro's constant) 的話 (任何物質在一克分子量中的分子數), 這物質一克分子量的質量就是

$$M_A = N_A m$$

所以 (18-1) 式可以被寫成下面的形式:

$$\frac{Q}{M} = \frac{\nu e}{m} = \frac{N_A \nu e}{N_A m} \text{ 或者 } \frac{Q}{M} = \frac{F \nu}{M_A} \quad (18-2)$$

其中我們所規定的一個量

$$F = N_A e \quad (18-3)$$

是一個一般性的常數，被稱為法拉第常數 (Faraday's constant)。它代表 $\nu=1$ 的離子一克分子量中的電荷。它的實驗值是

$$F = 9.6487 \times 10^4 \text{ 庫/克分子量}$$

從這值以及前面所求得的 e 值我們得到亞佛加德羅常數為

$$N_A = 6.0225 \times 10^{23} / \text{克分子量} \quad (18-5)$$

(18-2) 式已經由實驗證實了，同時已找到 ν 等於所談及的離子的化學當量 (chemical valence)。 ν 是化學當量這一事實建議當二個原子結合在一起而形成分子時它們交換 νe 的電荷而使一個變為正離子而另一個成為負離子，這二離子之間的電性作用使它們保持在一起。我們也可以安全地假設電子就是被交換的質點因為它們比質子輕得多同時很容易被移動。我們必須將這種化學結合的構想——稱為離子的 (ionic) 結合——只當作是初步的討論而需要再加以改正及批評。

在 §15-10 節中我們指出了重力太弱不足以產生二個原子結合成分子或二個分子形成一塊物質時所需要的吸引，它們弱了 10^{35} 倍。現在讓我們來比較電力和重力大小的程度，假定距離是一樣的，電性作用的強度是由耦合常數 $q_1 q_2 / 4\pi\epsilon_0$ 來決定的，而重力作用的則是由 $\gamma m_1 m_2$ 來決定的。所以

$$\frac{\text{電性作用}}{\text{重力作用}} = \frac{q_1 q_2}{4\pi\epsilon_0 \gamma m_1 m_2}$$

要算出大小的程度，令

$$q_1 = q_2 = e \text{ 同時 } m_1 = m_2 = m_p,$$

所以對二個質子或二個氫離子而言，

$$\frac{\text{電性作用}}{\text{重力作用}} = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0\gamma m_p^2} = 1.5 \times 10^{36},$$

這正好差不多就是在產生所要的相互作用時重力所缺的倍數。對於一個質子和一個電子之間的作用而言，

$$m_1 = m_p, \quad m_2 = m_e,$$

則上面的比例就更大了，是： 2.76×10^{40} ，所以我們結論：

電性作用的大小是若干原子要形成分子或電子和核子要形成原子時所需要產生的結合力的程度。

現在很明顯地可以說：化學過程（以及一般成堆的物質的性能）都是由各原子和各分子之間的電性作用所引起的。因此，對於原子和分子的電性構造方面的澈底的瞭解在對化學過程的解釋以及，一般而言，對於我們現在所觀察到的在我們周圍的所有現象——有生命物體內的及無生命的——的解釋而言都是很主要的。

18-3 原子的核子模型 (The nuclear model of the atom)

我們知道在正常情形下原子在電性方面是中和的，因為成塊狀的物體並不呈顯總體的電力，所以原子必須含有等量的正電和負電，或者，換句話說，相等數目的質子和電子，質子和電子的這個相等的數目被稱為**原子序數** (atomic number) 而是以 Z 來代表的，所以一個原子包括一個由質子而來的正電荷 $+Ze$ 及一個由電子而來的相等的負電荷。

我們腦中就想到了原子的一種可能的模型，我們可以假定：因為質子的質量比電子的大得多，它們是聚在原子的質量中心附近形成**原子核** (nucleus) 一類的東西，電子羣則是繞它而轉的，一如在我們的行星系統中（圖 18-2）。由於我們對太陽系的熟稔這模型很易令人接受，但是在我們採用這模型時所面對的許多困難之一是我們需要能解釋各

質子在原子核中是怎樣克服它們之間強烈的電性相斥而保持在一起的，這一事實要求在電性作用之外尚有其它相互的作用存在。

爲了明瞭電子和質子在一個原子中的分佈起見我們必須以實驗方法來偵察原子的內部，這是藉着將一束快速的帶電質點例如氫離子（即是質子）或氦離子（被稱爲 α 質點，alpha particles）射到原子上而觀察所產生的相互作用。這種實驗是散射（scattering）之一，關於它的一些觀點已經在例 7-11 中提過了。

我們可以將原子當作一個半徑約爲 10^{-10} 米數級的圓球，我們還記得根據第 16-6 節一個半徑 a 的帶電圓球，電荷 Q 是均勻地分佈在它整個體積上的，在外面各點 ($r > a$) 所產生的一個電場是

$$\mathcal{E} = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 r^2}, \quad r > a, \quad (18-6)$$

而在球內各處 ($r < a$) 所產生的電場則是

$$\mathcal{E} = \frac{Qr}{4\pi\epsilon_0 a^3}, \quad r < a \quad (18-7)$$

如果一個質量 m 及電荷 q 的質點被扔向一個速度 v_0 及碰撞參數 b (參考例 7-11) 的帶電球體，我們可以證明只要這質點不穿透球體 (於是在所有時間下它都是受一個反平方力作用的)，質點被偏轉的角度 ϕ (圖 18-3) 是如下式所示的：

$$\cot \frac{1}{2}\phi = \frac{4\pi\epsilon_0 m v_0^2 b}{Qq} \quad (18-8)$$

注意：碰撞參數 b 愈小，偏轉的角度 ϕ 愈大。

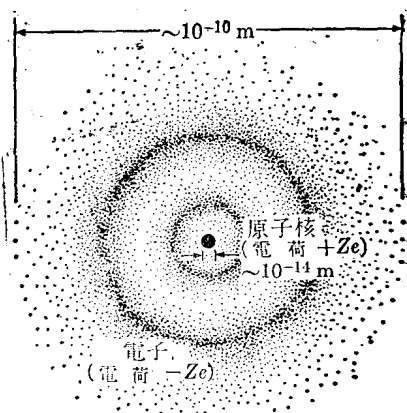


圖 18-2 一個原子中電子的分佈。

在原子核模型中核子的 Q 等於 Ze ，來撞質點的 q 則等於 νe （對質子而言 $\nu=1$ ，對質點 α 而言 $\nu=2$ ），在實驗設備上，幾個質點是對準了一片薄箔來的同時再觀察被偏轉了的質點，由於 b 不是能被控制的

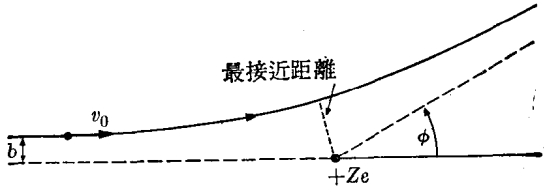


圖 18-3 由原子核的庫侖斥力所引起的一個正離子的偏轉。

（因為不可能直接對準某一個原子），在解釋實驗的結果時我們必須作一項統計分析。

假定薄箔的厚度是 t ，同時每單位體積內有 n 個原子，如果薄箔的每單位面積上有 N 個質點射到箔上，有些會在離箔的一個原子近一點的地方經過（碰撞參數較小），所以受到較大的偏轉。有的則將在離箔內原子略遠一些的地方經過（碰撞參數較大），於是所受偏轉就較小。統計分析的結果指出：偏差在立體角 $d\Omega$ 以內的質點數 dN （相當於對入射方向的散射角為 ϕ 和 $\phi+d\phi$ 的，如圖 18-4 中斜線圈所示）是

$$\frac{dN}{d\Omega} = \frac{Nn\nu^2 Z^2 e^4 t}{4(4\pi\epsilon_0)^2 m^2 v_0^4} \csc^4 \frac{1}{2}\phi \quad (18-9)$$

(18-9) 式指出每單位立體角內散射的質點數，在統計方面，必須依照 $\csc^4 \frac{1}{2}\phi$ 的定律分配，為所有角度證實這項預測就是間接地證明所有正電荷都是集中在原子的中心附近的。這項證明是由蓋革 (H. Geiger) 和馬士登 (E. Marsden) 在英國物理學者魯德福 (Ernest Rutherford, 1871-1937) 的指導下於 1911-1913 之間首先作的實驗上獲得的，這些實驗是原子的核模型的基礎，從那時起它就被接受為一個準確的模型。

對於碰撞參數 b 的每個值而言，就有一個最接近的距離在這距離下來撞的質點和中心最為接近，最小的距離發生於正對的碰撞時 ($b=0$)。在不同的實驗情形下計算這距離就知道對於能量約為 10^{-13} 焦耳

(或一百萬電子伏)的程度的質子及 α 質點而言這距離大約是 10^{-14} 米的級數。這距離告訴我們原子核半徑的一個上限,所以我們的結論是:質子是集中在一個大小約為 10^{-14} 米的級數的區域內的。當我們考慮到原子的半徑的級數 10^{-10} 米時我們發覺原子的大部份體積是被在動的電子所佔據的,因而事實上是空的。

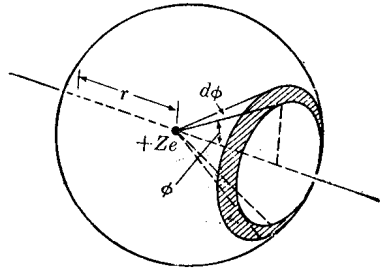


圖 18-4

對於十分小的碰撞參數和極高的能量而言,當進入的質點到了十分近於原子核時, $\csc^4 \frac{1}{2}\phi$ 定律就不再被遵守了,這就說明了另一種作用的存在,即核子力 (nuclear forces),藉着分析與 (18-9) 式所示的純庫侖散射之間的不相符處,我們可以得到關於核子力的非常有價值的資料。

例18-1 一個帶電質點正對了一個原子核碰撞時的最接近的距離,如果原子核的電荷是 Ze ,同時射體的電荷是 νe ,射體加原子核這系統的總能量——假定原子核的質量比射體的質量 m 要大得多(或者這核是埋在一個晶體中)——就是:

$$E = \frac{1}{2}mv^2 + \frac{\nu Ze^2}{4\pi\epsilon_0 r},$$

其中 $\frac{1}{2}mv^2$ 是射體的動能,當質點是很遠時所有它的能量都是動能且等於 $\frac{1}{2}mv_0^2$ 。能量的不滅規定了,

$$\frac{1}{2}mv^2 + \frac{\nu Ze^2}{4\pi\epsilon_0 r} = \frac{1}{2}mv_0^2.$$

在最接近的距離 R 處時,如果是正對的碰撞,速度 v 是零,所以

$$\frac{\nu Ze^2}{4\pi\epsilon_0 R} = \frac{1}{2}mv_0^2 \text{ 或者 } R = \frac{\nu Ze^2}{4\pi\epsilon_0 (\frac{1}{2}mv_0^2)}. \quad (18-10)$$

18.4 波爾的原子說 (Bohr's theory of the atom)

所有原子中最簡單且最輕的是氫原子，它是由一個電子繞着一個質子旋轉而形成的。於是 $Z=1$ ，同時氫原子的核就只是一個質子。

對於比氫重的原子而言，質量比它們所含的 Z 個質子的質量要重。這差額可以被認為是有中子 (neutrons) 存在於原子核中而引起的，一個原子核中的總質點數被稱為質量數 (mass number) 而是以 A 來代表的，所以，一個原子有 Z 個電子， Z 個質子，及 $A-Z$ 個中子。顯然地，中子是使原子核穩定所必需的，如果質子只是受到它們自己間的電性作用的話，它們將互相排斥，因為它們帶的都是正電，它們之能夠一起存在原子核中這一事實說明了在它們的電性作用之外還有其他非常強的作用存在，相當於被稱為核子力 (nuclear forces) 的，後者抵消掉電性斥力。中子對核子力有貢獻而不增加電性斥力，因而能產生穩定效果。

一個原子的化學性能，因為它是一種電性效果，是由原子序數 Z 來決定的，所以每一種化學元素是由具同一原子序數 Z 的原子所組成的，但是，對於一個已知的 Z ，質量數 A 可以有幾個值，換句話說，對於一個原子核中一定數目的質子而言，相當於它的核子的數目可能有幾個不同的，我們還記得具有同一原子序數而不同的質量數的原子被稱為同位素 (isotopes)，它們都相當於同一種化學元素，一個化學元素的各種同位素都是以這化學元素的符號（它同時也表明原子序數）來表示的，只是在左上角加以代表質量數的一個號碼，舉例而言，氫 ($Z=1$) 有三種同位素： ^1H ， ^2H 或重氫，及 ^3H 或氚，同樣地，碳 ($Z=6$) 的二種最重要的同位素是 ^{12}C 及 ^{14}C ， ^{12}C 這種同位素是規定原子質量單位時用的一種。

因為原子中的電子是受到原子核所產生的一項 $1/r^2$ 的吸力的作用的，我們可以預期（根據第 15 章中為行星運動所提出的同一理由）軌道是橢圓形的，而以原子核作為其中的一個焦點，所以讓我們來考慮只有一個電子的一個原子；即是氫 (H , $Z=1$)，單游離化的氦 (He^+ , $Z=2$)，及雙游離化的鋰 (Li^{2+} , $Z=3$) 等，作為初步近似我們將假定