

原子彈

與原子彈

國家圖書館



000025004

JOHN K. ROBERTSON 原著

文 聖 常 譯

世界書局印行

6

籍



擊轟原子

與

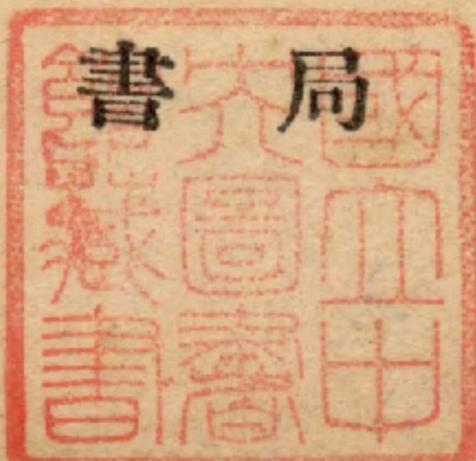
彈子原子

John K. Robertson 著

文聖常譯



世界書局印行





338.76
8543

38
40

原 序

在全部科學發現史中，第一顆原子彈的宣佈也許是最驚人的一幕。那是一樁轟動全球的新聞，報紙爲它寫了連篇累幅的文章。更具意義的，原子彈的軍事重要性固沒被忽視，這種最新科學應用的未來發展，尤其引起人們的關懷。鎖在原子核裏的能，第一次被大規模地釋放出來，這表示一個新時代誕生了，人類所需要的能不必再完全依靠煤和水力。可是，這種發現又引起另外一個反應；有人以爲，人類可能因濫用自己的發明而毀滅自己和地球上的一切。

無怪一般人都想知道一點使用原子彈的原理和報紙所預測的新時代究竟是怎樣的。這本小冊子即以通俗的文字，回答一些許多人提出的問題。它是著者 1937 年出版的原子轟擊 (Atomic Artillery) 的增訂，目的在“用門外漢也能了解的言語，解釋近代物理學在某些方面的有趣發展”。原書序言更說，“它記述電子、質子、正子、光子、中子和宇宙線的故事，但不涉及專門知識；它還逐步解釋如何發射原子，如何變化元素，以及如何從食鹽裏製取放射性的物質。”

原子轟擊的材料略事增加後就可解釋原子彈的發現，所以原子轟擊與原子彈能夠利用原書的大部分。著者在增訂本中曾



025004

南京 11725

注意到 1937 年後的重要發展，尤其是鈾分裂和連鎖反應等發現。原子轟擊中還提出像下面的問題：“物質之毀滅而變成能，已不僅是一種假說了。物質消失，能力出現，這種觀念有着驚人的發展。我們能控制原子的形成和這過程中所放出的能嗎？”還有，“這裏的可能性是驚人，不，簡直是可怖的。極微量的物質消失時所放出的能，如處理不當，可毀滅一個整的國家。”諸如此類的問題，於本書中也得到更充分的討論。

原子核反應放出的能雖極重要，但原子轟擊與原子彈裏的故事在其他方面也很有趣。它記述利用轟擊從事研究的經過，其中使用的彈丸，小得 10^{27} 顆才重一盎司，但快得，如有機會，不到一秒鐘繞地球一週。它解釋如何製造人爲的放射性物質，以及這些物質如何被當作偵探來追索某些元素在人體內的動態。它更說明已故魯斯福特勳爵如何首先發現真正的物質蛻變，以及這種發現後來如何確切地證明物質有時候消失而產生相當的能。

著者爲了表示他的謝意，特在這裏引用一段原子轟擊的序言。“本書中，迴旋增速器的照片爲勞倫斯教授所贈；質譜照片爲貝恩伯奇博士所贈；宇宙線擴大室的照片爲尼得米爾博士和安得生教授所贈；還有許多已印行過的插圖係經湯姆生爵士，阿斯登博士，威爾遜教授，伯萊開特教授，華爾通教授，狄博士，費塞博士，Julius Springer, ⊕ Longmans, Green and Company ⊕ 英國皇家學會，物理公報 ⊕，富蘭克林研究所公報 ⊕ 的允許，得在本書中翻印：著者統此深深致謝。

“著者還感謝他的同事撒津特 (B. W. Sargent) 教授, 他曾校閱一部分原稿。”

塞穆教授的珍貴報告“1940—1945 美國政府發展原子能之軍事用途紀要”^⑤對本書的增訂有很多幫助。該書係應美國陸軍格魯勿斯少將之請所寫, 文中陳述清晰, 著者極為感佩。

附頁 VII 翻印的照片為美國軍部通訊隊所攝, 著者和本書發行人特此致謝。至於有關原子核的常數, 如精確的原子量, 係根據伊凡斯博士於醫藥物理^⑥中所列的數值。(該書為格拉塞所編, 芝加哥年鑑印書局 1944 年出版。)

羅伯生, 於加拿大康斯通可恩斯大學,

1945 年 9 月 3 日。

① 德國 出版商。

② 英國 出版商。

③ The Physical Review。

④ Journal of the Franklin Institute。

⑤ 原名 “A General Account of the Development of Methods of Using Atomic Energy for Military Purposes under the Auspices of the United States Government, 1940—1945”, H. D. Smyth 著。

⑥ Medical Physics, Otto Glasser 編, 芝加哥 Year Book Publishers 出版。

注意：文中未註原文之人名, 請參看本書正文。——譯者註。



譯者序

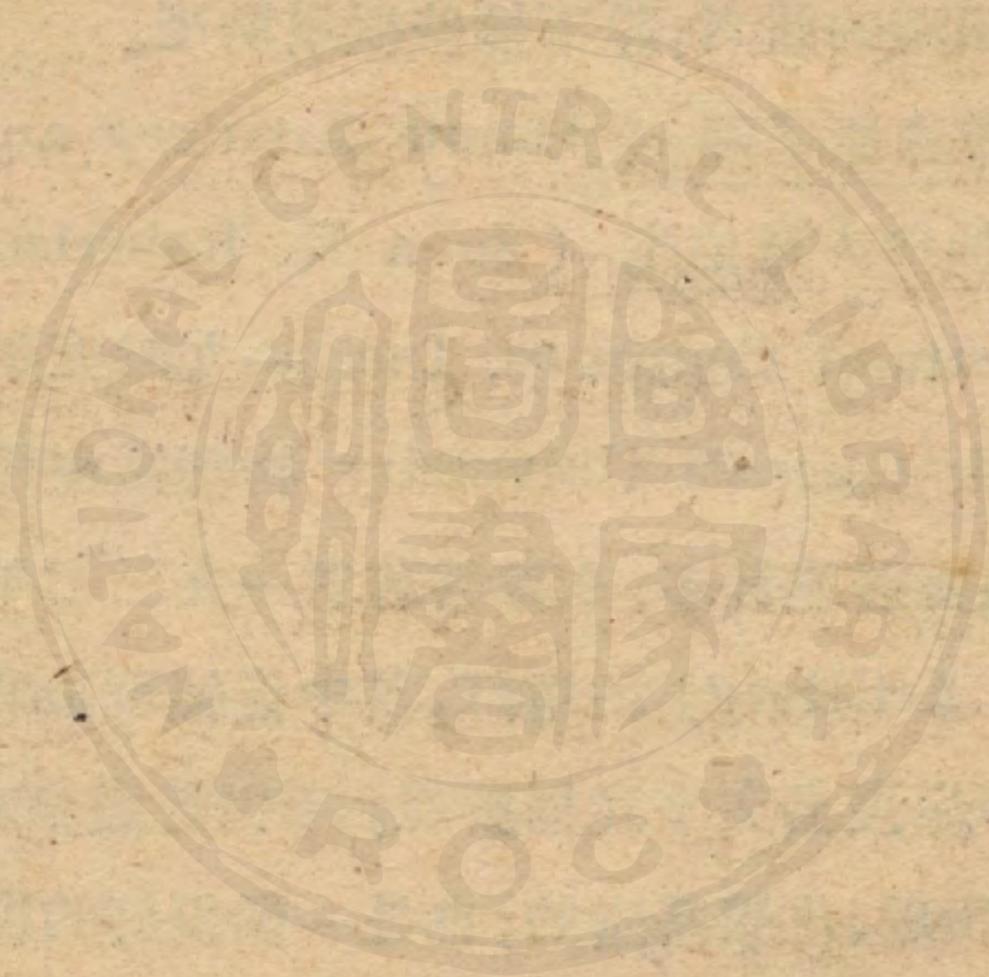
原子彈的使用，將人類文明帶入一個新的時代。做個現代國民，似乎應具一些原子方面的常識。所以在美國，除了廣泛的通俗讀物，電影、廣播中也有講述原子的節目。這本小書的譯出，對讀物貧乏的祖國的讀者，諒不無些微幫助吧。

原子轟擊與原子彈 (Atomic Artillery and the Atomic Bomb) 係加拿大羅伯生 (John K. Robertson) 著，紐約 D. Van Nostrand Company, Inc. 一九四五年九月印行。羅氏現任加拿大 Queen's University 物理系主任及加拿大皇家學會主席，通俗著述甚多。本書為著者一九三七年出版之原子轟擊 (Atomic Artillery) 的增訂，其中從純理論的研究到原子彈的發現，逐步以淺易文字詳加解說，不但普通讀者易於領會，即對已具相當物理、化學基礎的，也是一個很好的復習。

譯者幾月來行止不定，抽暇譯述，錯誤難免，請讀者指教和原諒。

譯者；一九四六年十二月十六日，

於美國加州首府。



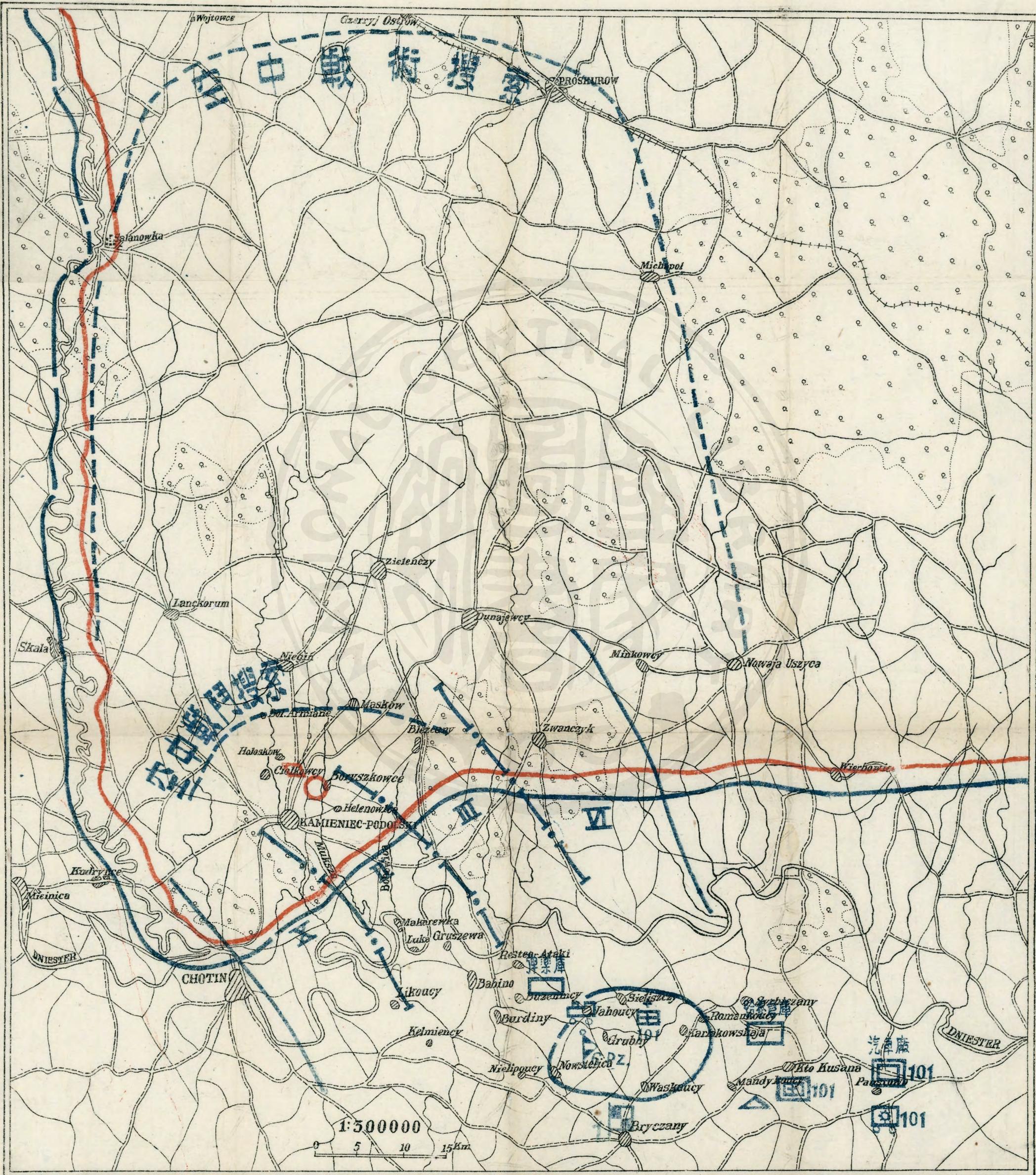
目 錄

譯者序

原 序

- 第一章 物質是微粒組成的 1
元素和化合物 原子與分子 原子量
- 第二章 發射帶電的質點 9
兩種不同的電 加速帶電質點的運動 電勢差與電壓
- 第三章 電子——最輕的彈丸 14
陰極線 原子的太陽系 離子化 電子轟擊 因碰撞
而產生的離化
- 第四章 一種較重的彈丸——正極線 26
一種新的化學分析方法 重水的發現 質子 質量和
能的互變 同位素的分離
- 第五章 天然的彈丸 44
放射性的發現 α , β 及 γ 線 自然界的蛻變 人爲的
蛻變 半世代 鈾的放射性
- 第六章 沒有物質的質量 55
光子 光電 γ 線 能的量度——電子伏特
- 第七章 宇宙線 63
正子 綜子 宇宙線的性質 宇宙線的最後來源

第八章	製造轟擊原子的巨礮	74
	靜電增速器 迴旋增速器	
第九章	近代煉金術	81
	作為彈丸的質子 重子作彈丸 電荷核驗 另一種新 彈丸——中子 中子的重要	
第十章	光子轟擊與一個新的核驗	94
	一個能量核驗的例子 我們能無中生有嗎？光子轟擊 中子的質量 電子偶的產生 放射的產生 太陽的放 射與原子能	
第十一章	放射元素的形成	105
	放射性同位素的製造 放射鈉 一個魅人的遊戲 金 的製造 鐳與鐳 原子作偵探	
第十二章	原子核的構造	115
	α 質點的結構 有負質子和小中子嗎？核裏的力量 用途何在？	
第十三章	核分裂與連鎖反應	125
	分裂的發現 連鎖反應 減低中子逃逸的損失 怎樣 更進一步減低中子的損失 調緩劑的使用 連鎖反應 的控制。一九四二年十二月二日	
第十四章	原子彈	136
	鐳的製造 製造廠 水冷却 放射的危險 原子彈 一九四五年七月十八日 一九四五年八月五日 將來	





第一章

物質是微粒組成的

我們從當孩子的時候起，都已熟悉周圍的一些事物現象。比如，一學會走路，就發覺自己的行動受到限制。偶不小心，便碰到桌子、椅子，或失掉平衡，跌到地上。成年人的情形，也是如此。無論走路、跑步或開車，我們必須經常改變方向，以免碰到別人或東西。在通常所謂的空間裏，我們的行動是受所謂物質的限制的。

但是，我們不能將物質解釋為限制行動的東西，因為如沒物質，人類根本不能行動。火車是物質，並在物質的鐵軌上滾進；船是物質，並在物質的水面滑行；飛機是物質，並在物質的空氣中翱翔；走路，也得把腳踏在物質上。食物是物質，我們長久不吃東西，便不能指使身體的任何部分，這些部分也是物質的。其實，離開了物質，地上的生活是不可想像的。有些東西，像無線電、光波，自不是物質，然而沒有物質這些東西便無法產生和察覺。電也是不可觸知的，但各種電的現象只有通過物質才能表現出來。

所以，幾乎遠在有史以前，好思想的人們已開始探究物質的構造和性質。紀元前幾個世紀的希臘哲學家，就思索過這個問題，而且他們的思想在整個物質觀念發展史上是不可忽略的。從

他們那裏，我們學得原子的基本觀念；一九四五年的八月，全世界爲這微小的物質單位驚動了。那時候，現代科學的成就已達到製造原子彈的階段，並預示着原子能不久可移到工業的用途上。這本小冊子的目的，在概略地用簡易的文字將物理學上的某些進步介紹給一般的讀者；原子彈和其他同等重要的發現，是因這些進步而成功的。但欲知道其中的經過，我們須先正確地了解原子和分子的意義。

元素和化合物

地球上的一切物質，可分爲兩類。一類可藉化學方法分解爲兩種或兩種以上更簡單的物質，或可由更簡單的物質結合而成。這些物質謂之化合物。另一類物質爲元素，不能如此分解或綜合。水爲化合物，因我們可通電使其分解爲氧和氫，或藉適當的放電使這兩種氣體化合爲水。但不論氧或氫，都不能分解爲更簡單的物質，所以皆爲元素。

糖爲化合物，由三種元素組成，即碳、氧和氫。藥房所售的碳酸氫鈉——普通的發酵粉——爲包含鈉（一種輕軟金屬）、氫、氧和碳等四種元素的化合物。如將綠色的氯通過銀色的金屬鈉，二者起猛烈作用，化合爲白色的食鹽。但像銀、銅、金、鐵和碘等，不能分解爲更簡單的物質，所以都是元素。

化學家研究化合物的分解、綜合以及它們彼此間的化學反應。他藉物理學家的幫助，已發現九十四種元素，並且不憚勞苦

地用定性和定量的方法去考驗無數的化合物。早在十九世紀的開始，化學家從他的研究中得到兩個簡單而重要的定律。

根據其中第一個定律，兩種或兩種以上的元素結合為一種化合物時，它們永遠依一定的比例化合。1[⊖] 盎斯的氫須和 8 盎斯的氧化合為水，不多也不少；2 盎斯與 16 盎斯化合；半盎斯與 4 盎斯化合，餘此類推。在任何分量的水中，氫和氧的重量永遠是 1 比 8。這有一個“定比定律”的例子。第二條定律是用來研究幾種一定的元素化合為不同的化合物。這裏，最好用具體的例子說明。氫與氧化合不僅成水，而且形成一種叫做過氧化氫的化合物。在這化合物中，1 單位重的氫與 16 單位重的氧結合。由此可知，與一定重量的氫化合時，所需要的氧在過氧化氫裏正好是在水裏的兩倍。這是“倍比定律”的一個說明。倍比定律的定義是：一種元素在不同的化合物中，其重量恰成整數比。[⊕]

原子與分子

事實上，上面兩個“定律”，不過是對事實加以記述而已，而且與現在的科學發現比較起來，已是人人習知的事實。然而，對於科學家，一般性的事實的發現，只是他們的工作的開始。他們

[⊖]嚴格說來，這裏的比例應為 1.008:8。以後我們還要討論這些精確數字的意義。

[⊕]倍比定律有個比較清楚的定義，即，甲乙兩元素結合為多種化合物時，甲元素在此等化合物中的重量，成簡單的整數比。——譯者註。

最注意的，是怎樣去解釋事實。我們在這裏提出這些定律，不過是因為能用物質的原子學說來解釋它們罷了。

原子學說是大化學家道爾頓(Dalton)在1807—8年間提出的；根據此說，元素由最終的、個別的、相同的、不可見的、以及不可分割的原子組合而成。這種觀念即在道爾頓時代也不新奇，因為原子的歷史非常久遠；不過沒人把它作為理論的基礎，再用數量的觀念去解釋事實。早期的希臘哲學家對於物質的構造，常作空洞的推考，但這和能藉實驗證明的科學學說截然不同。道爾頓的原子學說是科學的。

道爾頓的原子，顯然地，是參加化學反應的最小質點。化合物是由兩種或兩種以上不同的元素的原子結合而成的分子：分子是化合物能夠存在的最小單位。例如，一個食鹽分子包括一個鈉原子和一個氯原子；一個水分子包括兩個氫原子和一個氧原子；一個糖分子包括十二個碳原子，二十二個氫原子和十一個氧原子。

那麼，假如一種元素的所有原子都相同且不可分割，則在任何數量的化合物中，各種元素的比例自然也一定。一個水分子若包括兩個氫原子和一個氧原子，兩個水分子則包括四個氫原子和兩個氧原子，一百萬個水分子包括兩百萬個氫原子和一百萬個氧原子。在水中，這兩種元素的相對重量永遠是一樣。倍比定律也同樣容易解釋。假如一個過氧化氫的分子包括兩個氫原子和兩個氧原子，而非像在水中一樣只包括一個氧原子，那麼在這

兩種化合物中，不管其數量爲何，如所包括的氫相等，則其所包括的氧必恰爲另一化合物所包括的兩倍。

原子的存在，於十九世紀逐漸得到確切無疑的證據。化學家和物理學家發現許多可觀察與量度的現象，它們在性質和數量方面，與根據原子學說的預測相符合，或可利用原子及分子加以適當的解釋。其中如對氣體性質的研究，更爲重要。根據所謂氣體運動學說(Kinetic Theory)，氣體爲多數分子組成，它們迅速而不規則地運動着，經常彼此相碰，並撞擊容器的四壁。利用這種觀念，物理學家能夠證明氣體的壓力是分子撞擊容器四壁的結果；而且增加氣體的溫度，相當於增加其中分子的速度——其實，物理學家不難依此推出許多經驗定律，所以原子和分子的實在性，變成了十九世紀物理學理論部分的主幹。借馬克斯威爾(Clerk Maxwell)的話說，原子是“宇宙的基石”。利用這些磚瓦，大自然構成了千變萬化的建築物。一塊石頭，一朵花，人的本身，都不過一堆原子罷了。

原 子 量

假如原子真像十九世紀的科學所顯示的那樣實在，那麼必有一些問題發生。它們多大？多重？研究這些問題時，我們一定要區分原子的絕對 \ominus 重量和用以表示各種原子相對重量的數字。

\ominus 嚴格說來，這裏指原子的質量而言。但重量與質量成正比，而且原子量(atomic weight)一詞已普遍採用。所以大家仍用這個通用而不恰當的名詞“重量”。質量的嚴格定義見37—38頁。

根據各種實驗的結果，我們可以斷定，一克的氫中有 600,000,000,000,000,000,000,000 個原子，如將它們排成單行，本頁英文字母“i”上一點的寬度，就包括兩百萬個原子。這些都是絕對數值，因為是用長度和質量的標準單位表示出來的。但目前——其實，本書的大部分都如此——我們只考慮各種原子的相對重量，不必也不宜去討論怎樣得到絕對的數值。

各種原子的相對重量，可立刻由兩件事情知道：(1) 化合物中各種元素所佔的比例；及 (2) 化合物中一個分子包括幾個原子。比如，假設在水中 8 單位重的氧和一單位重的氫化合，而且一個水分子包括一個氧原子及兩個氫原子，則氧一定比氫重 16 倍。研究化合物中各種元素的相對重量，僅是一個化學分析的問題，而且，我們可從上面看出，不必依靠原子學說或其他任何理論。決定一個分子包括幾個原子，其情形大為不同，而且，詳細的解釋超過本書的範圍。不過我們應當知道，義大利物理學家亞佛加得羅 (Avogadro) 在 1811 提出一個假說，化學家又發現氣體的化合是以體積而非以重量作為反應的單位；將這體積的比例，亞氏的假說，以及其他化學定量分析所得的結果綜合起來，我們便不難推算出一個分子包括幾個原子。亞氏假說的要義是：在同溫度同壓力的狀態下，同體積的任何氣體，所包含的分子數相等——這不過是爲了便於解釋化學現象而把道爾頓的原子說加以擴張而已。根據這種假說，大多數元素在正常狀態下，其原子並非個別游離存在，它們多結合爲分子——在雙原子的 (diatomic)

氧、氫、氮、碘等元素中，分子常由兩個原子組成——而且，像剛才所指出的，決定一個分子中的原子數目時，亞氏學說是極重要的。

所以，我們能夠對所有的元素都指定一個數字，並使數字間的比例代表各元素間原子的相對重量。比如，指定氫為1時，氧必為16，而且，根據前面已講過的理由，在同一量度標準下，氮為14，氯為35.5，餘此類推。

這些數字謂之原子量；在科學界中，它們的精確測定，無論過去或目前，都是極重要的事。任何科學的進步，尤其是物理和化學，必具備的條件就是精確的量度。各種科學的早期發展，於數字方面通常不能十分嚴密，但當幾種競爭的假說同時出現時，須有精確的量度來判斷孰是孰非。第五位小數有時固無關重要，有時卻是辨別真偽是非的決定因素。我們將來就可知道，目前通用的原子量的測定，尤其需要精確。

原子量的數值，自然依作為標準元素的數字而定。比如，若指定氫為2，則所有其他元素的原子量都增加一倍。事實上，我們過去雖然指定氫1作為原子量的標準（根據精確的量度，如氫為1，氧將為15.87而非16.00），今日通用的原子量是以氧16做標準的。以氧16為標準時，氫的原子量雖為1.008，但其他多數元素的數值比以氫1作標準時較為接近整數；所以我們將比較的標準改為氧16。本書末尾第三表中，第四行為一部分元素的原子量。

從這表中，我們可以看出一個極重要的事實。雖然很多元素的原子量接近整數(如碳爲 12.0，鈉爲 23.0)，但氯爲 35.5，錫爲 118.7，與整數相差甚遠。假如所有的原子量都爲整數或與整數接近，我們似乎可以得到一個結論，即所有元素的原子都由氫原子組成。這自然否定了原子的不可分割性；但在原子量未得到精密測定之前，英國物理學家勃勞特 (Prout) 於 1815 確提出這種假說。勃氏的學說沒得到很大的結果，因爲試驗證明：有些元素的原子量不是整數。以後我們就可知道，勃勞特不自覺地做了一件重要的工作。

十九世紀末，科學家證明：原子是一個複雜的結構，不是不可分割的；而且，同元素的原子並不相同，異元素的原子則包括某些共同的單位。在這些觀念的發展中，原子轟擊佔着重要的地位。轟擊的彈丸通常爲帶電的質點，射擊的方法也多利用電力，所以在下章裏，我們將解釋一些電學的基本常識。

第二章

發射帶電的質點

兩種不同的電

如將橡皮或封蠟作成的棒——必要時，自來水筆亦可——與法蘭絨或羊毛摩擦，棒便具備一種特殊性質。將棒移近乾燥的紙屑，紙屑即被吸起：有的豎立起來，有的甚至跳到棒上。如不用紙屑，其他物質也可，只要它們輕小而乾燥。通常，我們把燈草木（一種極輕的物質）做成的小球用絲線懸掛起來，摩擦後的橡皮或封蠟棒移近小球時，也有強熱的吸引現象。

這種現象是由於棒的表面帶有電荷。棒與羊毛或法蘭絨密切接觸後，即被電化，故有吸引輕小物質的性質。電(electricity)與電化(electrified)等字由希臘文“electron”蛻變而來。electron的原意是琥珀；希臘哲學家泰理斯(Thales)在紀元前六百年就發現摩擦後的琥珀具有吸引的能力。

乾玻璃棒與絲摩擦後，也具上述的性質。它能吸引燈草木做成的小球或輕的紙屑，即它被電化了。但是橡皮棒和玻璃棒所帶的電，有極重要的區別。我們必須了解這點，因為原子質點的發射，就是利用這種區別。

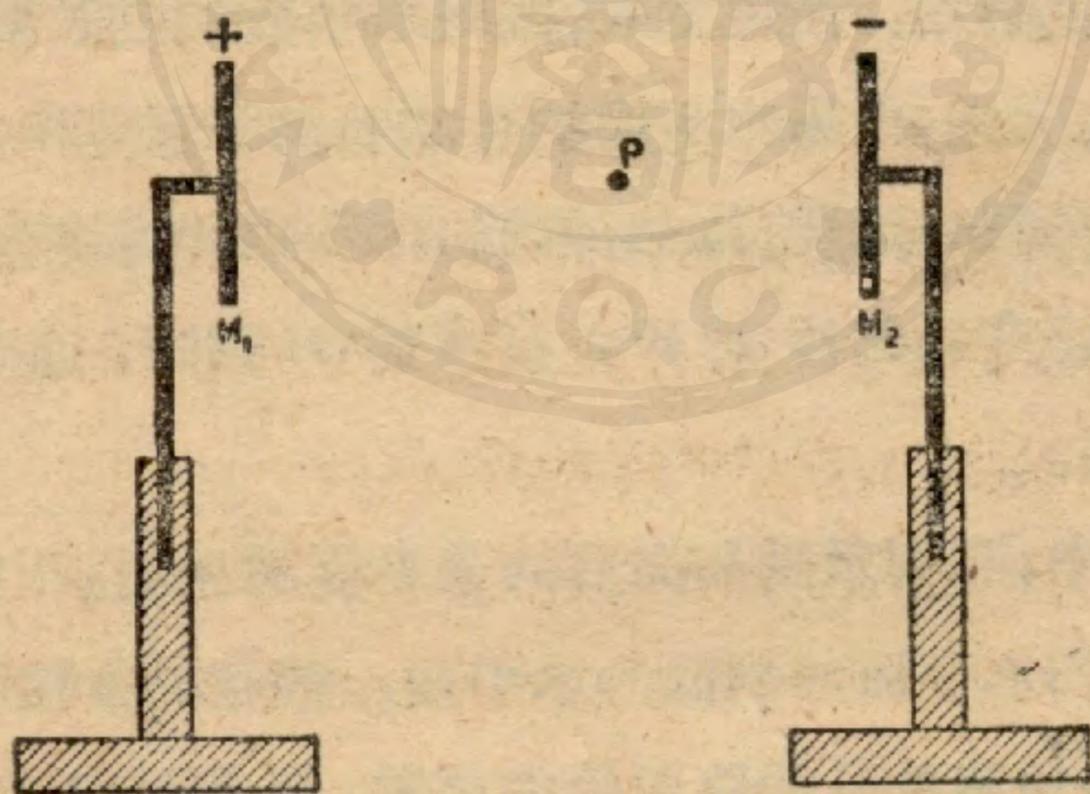
要解釋這種區別，我們又得回到簡單的試驗。現在，我們使用三隻棒：兩隻橡皮的，一隻玻璃的，並依剛講過的方法使它們電化。若將一隻橡皮棒懸繫空中，俾能自由擺動；然後使另一橡皮棒與之接近，次以玻璃棒與之接近，那麼在這兩種情形中，我們一定可看出一個顯著的差異。我們手中的橡皮棒將懸着的橡皮棒推走，但玻璃棒將它吸引過來。換句話說，那隻可以活動的棒與以同樣方法電化過的棒相斥，而與在絲上摩擦過的玻璃棒相引。這裏的結論是很明顯的：橡皮和羊毛摩擦後所帶的電，必與玻璃和絲摩擦後所帶的電不同。

法國科學家杜費 (Du Fay) 在十八世紀的開始發現這種現象，並且爲了區分這兩種電起見，便創用樹脂電 (resinous) 與玻璃電 (vitreous) 兩個名詞，但現在我們稱爲負電與正電，且常用“-”與“+”代表它們。這兩個數學上的符號，並沒特殊意義。所謂正電，不過是指與絲摩擦後玻璃棒上所帶的電；負電則指與毛皮、法蘭絨等物摩擦後橡皮或封蠟所帶的電；而且，我們必須記着，異性的電相引，同性的電相斥。

許多物質的表面互相接觸後，即發生電化現象。其中有的帶正電，即帶這種電的物體與上述的懸着的橡皮棒接近時，彼此相引；另外的物質則帶負電。再研究一下，我們可證明另一個重要的事實。兩種物質摩擦時，一個永遠帶正電，另一個永遠帶負電。所以，封蠟爲負，羊毛或法蘭絨爲正；玻璃棒爲正，但絲爲負。以後，我們就可知道其中理由。

加速帶電質點的運動

在圖一中， M_1 與 M_2 為兩塊金屬板，各支於絕緣的墊座上；其中一板帶很強的正電，另一板帶很強的負電。爲了使其帶電，我們可重複地將與絲摩擦過的玻璃棒和 M_1 接觸，次將與毛皮或法蘭絨摩擦過的橡皮棒和 M_2 接觸；但最好是把 M_1 ， M_2 與電機的兩極連結起來。現在，我們不必去問電機的構造。但不管這電機是發電機 (dynamo)、靜電機、感應圈，甚至於乾電池或蓄電池，它們都能將正電與負電分開：正電在一極出現，負電在另一極出現。所以，若將 M_1 和 M_2 連到感應圈的兩極，則一板帶正電，一板帶負電。



圖一——P 點帶正電時，向帶負電的 M_2 運動；反之，向帶正電的 M_1 運動。

在圖一中，今假設 P 爲帶電質點，位於兩帶電金屬板之間。P 因帶電之故，所以受一板的排斥，受另一板的吸引；如 P 可自

由移動，且所受的推力與吸力相當大，那麼在它到達與本身電荷相反的金屬板之前，可具備很大的速度。下面就可講到，我們可使原子電化，並應用和上面相似的原理，將它們以高速度射出。

電勢差與電壓

研究原子轟擊時，我們特別注意帶電質點受電力作用後所達到的速度。這視幾個因素而定，像質點的質量，質點所受電力的大小，以及電力作用的久暫；然而，這主要地是一個力學問題，我們不必去詳細解說。但有一個因素非常重要，而且在原子轟擊中應用極廣，所以讀者應當清楚了解。這裏最好用一個簡單的譬如說明。水由瀑布流下，每一水滴因重力作用所達到的速度，視其自何高度落下而定。高度愈大，或兩水平面相差愈懸殊，水滴的速度也愈大。而且，由兩水平面的差別我們不難算出水滴經過那段距離後所得到的速度。比如，水滴自 25 呎的高度自由落下時，它所得到的速度為每秒 40 呎；高度為 36 呎時，速度為每秒 48 呎；餘此類推。

在電學中，有個數量和高度的差別極為相似。正如物質因重力作用自高的水平面落到低的水平面，帶電的質點 \ominus 因電力作用而運動時，自高的電勢移至低的電勢；換句話說，如有電力作用使帶電質點從一個區域移到另一個區域，這兩個區域（或兩個導體）之間便有一個電勢差存在。這種電勢差是用伏特（volt）

\ominus 這裏，我們假定質點帶正電。帶負電時，其運動的方向相反。

量度的。普通住宅用電的電線間，電勢差為110或220伏特左右；在汽車所用的蓄電池中，每組電池兩極間的電勢差約為2伏特；X光管兩邊電線間的電勢差為100,000伏特或100,000伏特以上。

帶電質點自高電勢移至低電勢（即經過一段電勢差）時，如其運動不受限制，它所達到的速度視電勢差的大小而定。差別小，速度低；差別大，速度高，正和自由落體的情形一樣。所以在圖一的佈置中，我們如希望P的速度大，必須滿足兩個條件：(1) M_1 與 M_2 間的電勢差須大；(2) 質點運動時，所受的阻力須最小。滿足第一個條件時，我們可將兩金屬板與感應圈（或其他電機）的兩極連結起來，如此不但可使兩板帶兩種不同的電，而且在兩板間可維持10,000至1,000,000伏特的電勢差。實現第二個條件時，可將 M_1 與 M_2 置於一管中，並把管內大部分的空氣抽盡。在下章裏，我們將詳細討論高電壓施用到這管時所發生的現象。

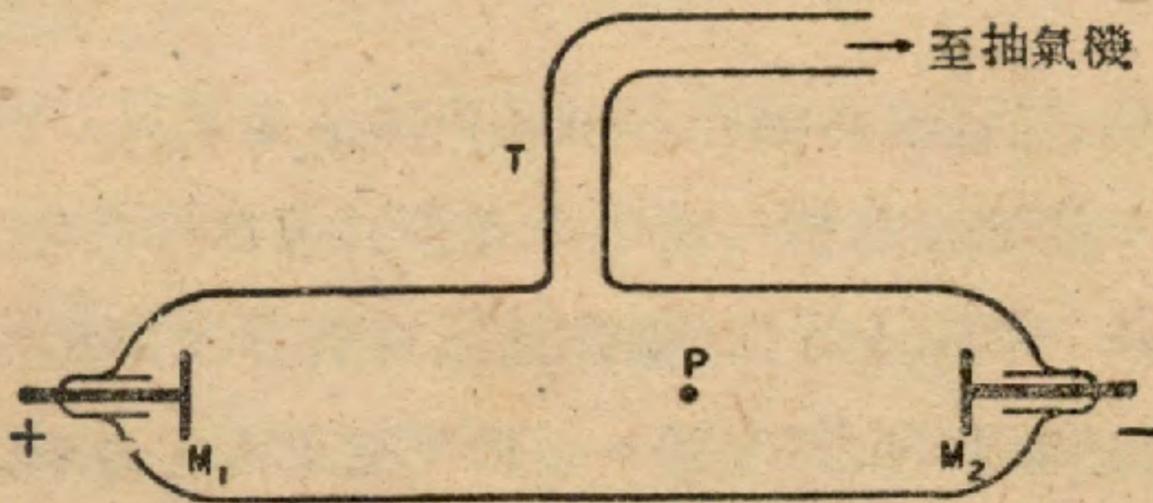
第三章

電子——最輕的彈丸

現在，大小城鎮的主要街道上，都點綴着五光十色的霓虹燈。這些已是司空見慣，然而很少人知道，這種電光是由於電流通過盛有氣體的長管。你如細心觀察，便不難看出這管是玻璃做的，但你不見得就想到：爲了產生彩色的電光，我們一定要在玻璃管壁的金屬上施用電壓。施用電壓後，電流通過氣體。這是一個氣體傳電的例子；十九世紀的後半，大家對此問題曾加廣泛的研究，並得到重要的結果。下面，我們開始討論這些現象。

陰極線

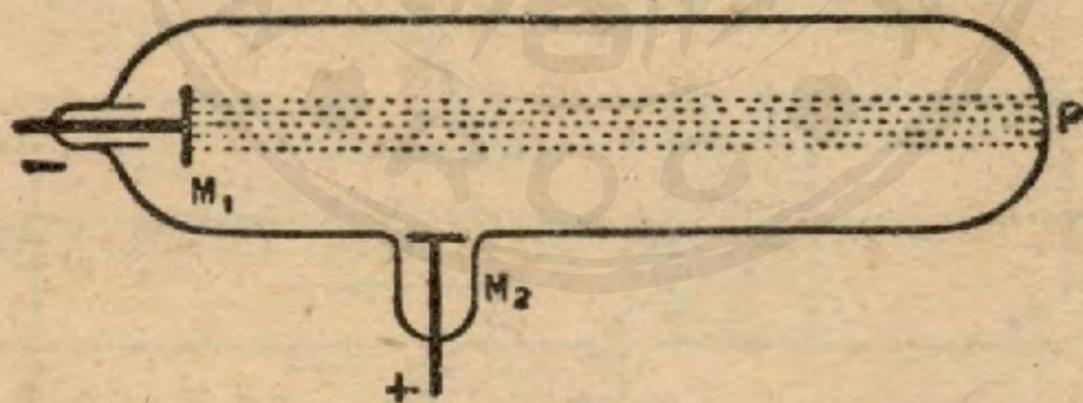
在圖二中， M_1 和 M_2 爲二金屬板——以後稱爲電極（ele-



圖二——管中的空氣被抽出後，一個帶電質點 P ，如其電爲負，便迅速向正極 M_1 移動；電荷爲正時，則向負極 M_2 移動。

ctrodes)——分別連於感應圈的兩極；T 爲一支管，與抽氣機相通。如利用感應圈在兩電極間維持很高的電勢差，並且將管中空氣逐漸抽出，即發生很美麗的現象。一支光柱自一電極伸至另一電極，並隨空氣被抽出的多少，逐漸變更形狀。開始，是一細束波形的光線，射到管的中部。接着光束擴散，充滿全管，放出明亮的光彩，和街上的霓虹燈相似。當更多的空氣被抽出時，管中現出許多接連更迭的明暗部分。這些消失後，光線逐漸暗淡，最後只餘一條細弱的光柱，從負極——即通常所謂的陰極 (cathode)——的中央射出。這時候管中的空氣，只有原來的十萬分之一。

這條細弱的光柱，變成許多先進學者研究的對象。他們證明：這條光線是一羣某種東西，自陰極以直線射出，故名之陰極線 (cathode rays)。在圖三的管中，正極或陽極 (anode) 被移



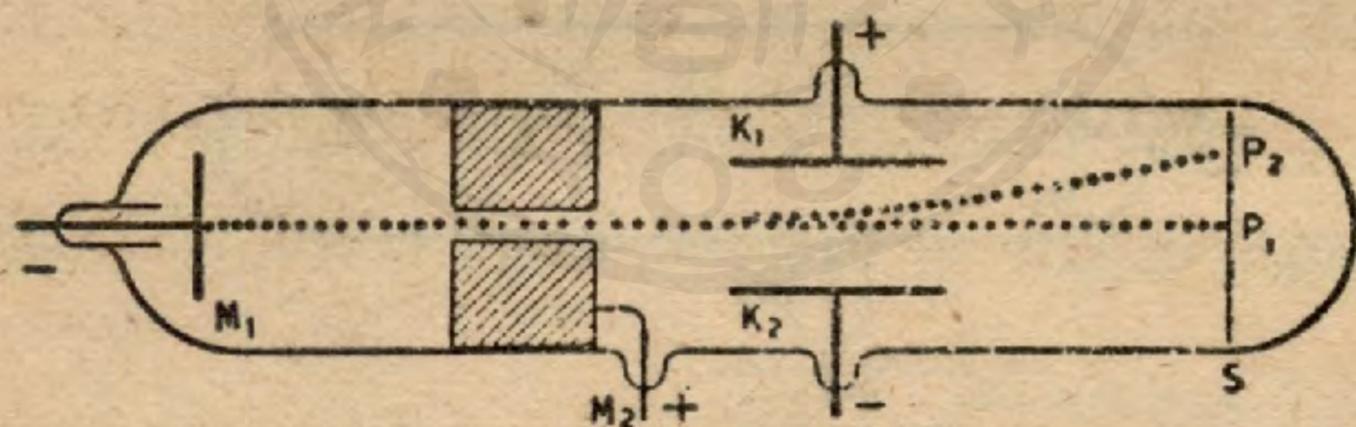
圖三——管中氣體幾已完全抽盡。圖中虛綫代表一束陰極綫自陰極 M_1 附近以直綫射出。

到一邊，但陰極線並不因此曲向陽極；它繼續直進，在 P 附近撞擊另一管端的管壁。我們並看不見有什麼東西在撞擊，但陰極線射達管壁的地方，出現一塊螢光。這種試驗經過英國物理學家克魯克斯 (Sir William Crookes) 改進後，更有力地證明：陰極

線以直線前進。如果我們採用一管，與圖三所示者類似，但在陰極 M_1 與管的另一端中間加上一個障礙，管端就現出極清晰的陰影。

此一段很長的時期中，陰極線的性質成爲大家爭論的題目。光 (light) 以直線前進，並能投下清晰的陰影；但以高速運動的質點，也有同樣的性質，無怪乎產生了兩種競爭的學說。根據第一種學說，陰極線爲一種以太振動 (ether disturbance)，和光不無關係；根據第二種學說，陰極線爲帶電的質點。最後，實驗結束了這椿爭論 (科學界的情形總是如此的)，試驗證明，只有後面一種學說是成立的。

現在，著者只從這些試驗中舉出一個例子。試驗時，我們採用如圖四所示的管，其中 M_1 爲陰極。陽極 M_2 由兩塊圓盤作成，



圖四——圖中黑點代表一束陰極綫由正極的細孔射出，經過兩金屬板 K_1 和 K_2 。如 K_1 帶正電， K_2 帶負電，則這束陰極綫於 P_2 處撞擊隔屏 S ，而不落於 P_1 ，因此證明陰極綫本身的電荷爲負。

各盤中心留有小洞；或以金屬圓筒代之，筒心鑿有細孔。不論陰極線的性質如何，當它射到這種陽極時，總有很細的一束經過小洞或細孔，由另一邊透出。這束射線繼續在管中行進，落於隔屏

S；屏上塗有某種物質，被陰極線撞擊時， P_1 處現出一片光亮。對於陰極線的性質，此種試驗並無新的發現；不過圖四的裝置有個特點，即於陽極 M_2 與隔屏 S 之間，裝有二金屬板 K_1 與 K_2 。在普通情形下，金屬板對於陰極線無可觀察出的影響。但若將 K_1 、 K_2 分別連於電池的兩極，使其一帶正電，另一帶負電，則兩板之間產生一個電勢差， P_1 處的光移至 P_2 。陰極線經過兩帶電板時，因受其間電場作用，故而偏折 (deflected)。這裏只有一個可能的結論，即陰極線是羣帶電的質點，受一板的排斥，受另一板的吸引。同時，偏折 (deflection) 係趨向正板而離開負板，所以，這羣質點的電荷必定為負。

陰極線之為一羣帶負電的質點，並非從上述的試驗得到第一次證明。比如，在這試驗之前，有人已經證明，陰極線自磁石兩極間經過時，亦被偏折；由此也可得到上面的結論，不過需要更深的電學知識來解釋這種現象而已。但是，使用帶電板的試驗是一串這類試驗的頂點，使陰極線的微粒性及帶電性成為毫無疑義的事。

我們如果接受這種結論，立刻有些問題發生。這些質點的大小如何？速度多大？體積是否一樣？帶電若干？利用圖四的裝置，我們不難尋出上面各問題的答案。在隔屏 S 上， P_1 、 P_2 間的距離代表陰極線偏折的程度；這是易於量出的，並和我們欲求的答案有密切關係。比如，假如陰極線中的質點的電荷愈大，而且金屬板 K_1 、 K_2 間的電勢差愈高，則推移質點趨向一方的力量也愈

大。但重的或快的質點不若輕的或慢的易於推移，所以偏折的大小，不但視質點所受電力大小而定，還與質點的質量、速度有關。物理學家用簡單的計算將這些因素聯繫起來；從他們的計算，以及使用電場、磁場試驗的結果，可以得到下面的結論：[⊖]

(1) 陰極線的質量約為氫原子的 $\frac{1}{1846}$ （氫原子一向被認為最輕的質點）。而且，不論試驗的方法為何，它的質量不變。管的陰極儘可用鐵、銅、銀、鋁或其他任何金屬物質作成，管中的氣體於未被抽出前，儘可為普通的空氣、氧、氫、二氧化碳或其他任何物質——但在各種情形下，所得的結果相同。所有陰極線的質量都相等。[⊖] 這是一個驚人的發現。一種為各種物質共同有的原質，從此被發掘出來。原子再不是一個整體或不可分割的東西了：它包括許多質量較氫原子約小二千倍的質點。

(2) 每支陰極線的負電荷絕對相等。但電量極小；在普通試驗的管中，每秒鐘內須射出 1,000,000,000,000,000,000 個質點，始可與普通 20 瓦鎢絲燈泡的電流相當。後來的研究工作證明，陰極線的電量是一個自然單位。

這種重要結論的建立，是先進學者們研究的結果，其中尤以墨利康（Millikan）的油滴試驗最為重要。墨氏試驗的美妙，在於它的簡易，正和一些其他著名的試驗一樣。他利用碎擊器

[⊖]使用圖四的設備，只可求出陰極綫中質點的電荷與質量之比。若想分別得到這些數量，須用其他試驗來計算電荷。

[⊖]參看 38 頁。

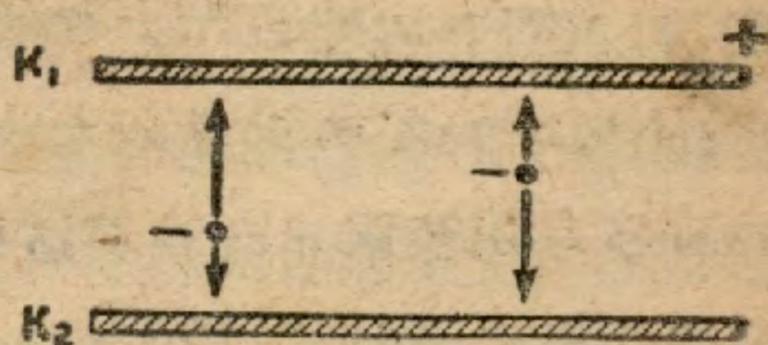
(atomizer) 將帶電的油滴噴入兩帶電板之間。油滴通常因本身重量慢慢降落，但若其電荷為負，而上面的板帶正電（見圖五），則油滴受到方向向上的電力，而且經過適當調整後，可以恰好平衡向下的重力。於是油滴懸於空際，像回教徒的棺材一樣。根據這種試驗，我們可以精確計算油滴所帶

的電量，並且證明，這電量永遠和陰極線所荷者相等或為其整數倍。試驗時，不會發現更小的電量，較大的電量則恰為這基本電荷的整數倍。本書中，說到多少電荷單位時，照例指這特殊的電荷單位而言。

陰極線的速度可達每秒數千哩之巨，但視陰極與陽極間的電勢差而定，像落體的速度視其原來的高度而定一樣。比如，電勢差為 10,000 伏特時，速度為每秒 37,000 哩，約為光速的五分之一；電勢差為 100,000 伏特時，速度達每秒 100,000 哩以上；一百萬伏特可使陰極線的速度達到光速的百分之九十五。無疑的，陰極線為高速的質點。

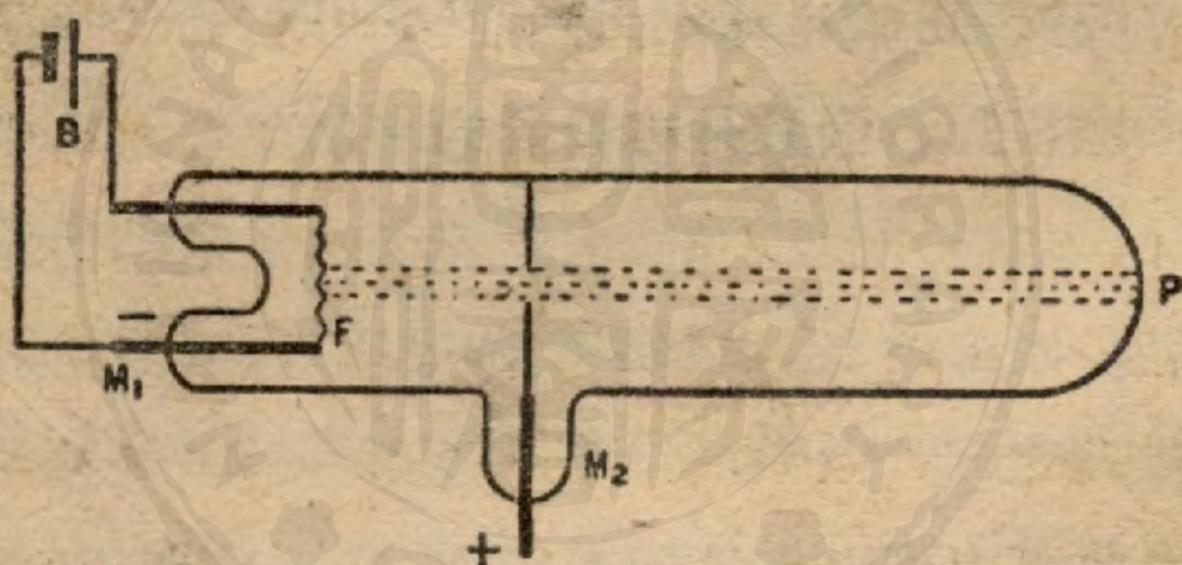
原子的太陽系

在研究標靶因陰極線轟擊所發生的結果，或引起的損害之



圖五——墨利康氏的油滴試驗原理。假如一個帶負電的油滴（圖中以黑點代表）存在於兩水平帶電板 K_1 與 K_2 之間，然上板為正，下板為負，則油滴因電力作用向上運動。重力作用使其向下運動。兩力相等時，油滴懸於空際。

前，最好重行考慮一下我們對於原子的看法。像在上節所說的，陰極線的發現，證明所有元素的原子都包括一些帶負電的質點，以後的研究工作也同樣有力地證實了這種結論。現在，我們稱這些質點為電子 (electron)，而將真空管中射出的電子謂之陰極線。電子有很多方法脫離原子。最普通的是金屬熱至白熱時，電子自金屬蒸發而出，或說得科學點，發生電子的熱離子放射 (thermionic emission) 現象。比如，在無線電的真空管中，我們將燈絲熱得發光，以便得到電子。所以，假設在圖六的真空管內，



圖六——這是一枝簡單的電子槍。細綫 F 與電池 B 連在同一電路中；F 受熱時放出電子。次將電壓加於 F 與電極 M₂ 之間，並使 M₂ 為正，則電子自燈絲經過電極上的細孔射出。

將圖四的陰極換為細線 F[⊖] (可藉電流使其熱至白熱)，並把它與陽極分別連於感應圈的負正兩端，則管中有一束陰極線射出。這種設備即構成所謂電子槍 (electron gun) 的主要部分。

這種包括電子的新原子，在構造方面，一定不是簡單的。整個的原子並不表現帶電現象，所以它本身必須具備足夠的正電

[⊖]通常，綫上塗有石灰(即氧化鈣)；後者受熱時，放出大量電子。

來中和電子。那麼原子究竟像什麼呢？正電又分佈在那裏？我們能想像一幅原子的圖畫嗎？這些問題的答案，通常不能一致，然而經過多年的研究，科學家已能構出一個原子模型，而且它對於解釋許多事實極為有用。這種原子包括一個帶正電荷的核 (neucleus) 與許多電子；核幾乎構成全部原子的質量，電子的負電總和恰與核的正電荷相等。核與電子都是極微小的東西；你如將原子放大，像一個直徑 60 呎的氣球一樣，核和每個電子還不過沙粒大小而已。根據這種見解，原子是個小型的太陽系，其中電子繞核心運轉，正像星球繞太陽運轉一樣。原子學說將一切物質歸納成一堆質點，而且是極稀鬆的一堆，像滄海中浮着一些粟粒。

欲區別不同的原子，我們必須知道兩個數量：(1) 原子量，即與原子質量成比例的數字；(2) 原子序數 (atomic number)。原子序數的意義可由幾個具體例子說明。我們有確切的證據證明，在最輕的元素氫原子中，只有一個電子，帶着一單位的負電，環繞帶正電的核運動；在第二最輕的元素氦原子中，有兩個電子和一個帶兩單位正電的核；在第三最輕的元素鋰原子中，有三個電子和帶三單位正電的核；在汞原子中，有八十個電子，核心帶八十個單位的正電。所謂原子序數，就是原子核所帶的正電數——自然也就是正常原子中的電子數。所以氫的原子序數為 1，氦的為 2，鋰的為 3，汞的為 80。在近代物理學上，原子序數比原子量尤為重要，因為元素的化學性質視原子核外電子的數目與排

列而定，而這數目與排列又視原子序數而定。

離子化

因爲正負電荷相引之故，每個電子受到原子核強的吸力。其實，電子如不運動，就有落到核心的可能。但利用向外的力量，我們可將一個電子完全脫離原子，使其不再受核的吸引。這時候，原子核的正電荷除用來中和剩餘的電子的負電荷外，尚多出一個單位，所以產生一個正原子離子 (positive atom-ion)，即通常簡稱的**正離子** (positive ion)。有時候，可將兩個電子自原子中移出，因而得到一個帶雙重電荷的正離子。在上述的兩種情形中，我們說一個原子被離子化 \ominus (ionized)，而使電子脫離原子的媒介，謂之離化物 (ionizing agent)。X光，鐳放出的 γ 線 (gamma ray) 以及高速的帶電質點都是離化物的例子，將來還要講到它們。電子脫離原子後，並不總是單獨存在；它通常附着於一個中性分子、原子，或幾個分子、原子而形成一個負離子。

根據這種見解，電並非創造出來的，而是物質的本體。橡皮棒與羊毛互相摩擦時，產生一種我們還不十分了解的微小力量使電子由羊毛移到橡皮上。棒每得到一百萬電子，羊毛即損失一百萬。所以，棒若得到一百萬單位的負電荷，羊毛則因損失電子而有一百萬單位的正電不能平衡，因之本身便帶與棒上負電荷相等的正電荷。

\ominus 以後簡稱爲離化。——譯者註。

電池與發電機並不是用來創造電的，而是將正負電荷分開，使兩極之間產生一電勢差。電流通過線路時，不過是電荷的移動而已——有時候只是電子運動；有時候負離子往一方向運動，正離子往相反的方向運動。

電 子 轟 擊

電子曾被廣泛地用來作為研究的彈丸，而且得到很多結果。詳細討論起來，這是一整部書的事；在本章中我們只將比較有趣的現象作個簡略的摘要。

第一，如將陰極線或高速電子突然阻止，便發生X光——這種不可見的射線，大家是頗熟悉的。在X光管裏，一束電子射到金屬的靶上，被撞擊的地方即X光的來源。我們並看不見這些微小電子的運動，但標靶所發生的熱，便是撞擊的證明。事實上，爲了避免X光管裏的高溫，我們必須採用特殊的裝置。在使用過久的管裏，甚至可在靶上發現小孔：因撞擊而發生的熱，能熔化被擊的金屬。小型的真空爐（Vacuum furnace）即利用此熱做成，其中欲加熱的物質：是放在陰極管中。

和陰極線的熱效應相對照的，是它能穿過薄的金屬片而不留下任何損害。在戰場上，炮彈的目的是毀壞目標；陰極線，像上段所說的，也能如此，不過有時穿過一塊物質而後者完整無缺。自然，這塊物質必須很薄，[⊖] 然而這種現象卻是不折不扣的事

[⊖]不超過千分之一，二吋。

實。更奇怪的，德國物理學家赫梯茲 (Hertz) 和蘭拉德 (Lenard) 分別在 1892 及 1893 發現這種現象時，他們還不知道陰極線的性質。蘭氏曾詳細研究這種現象，而且現在有種陰極線管——其中一端開有金屬薄窗 (window)，可使電子透到管外——就是因他而命名的。後來，美國奇異電器廠 (General Electric) 研究員柯力幾 (Coolidge) ——該研究所在紐約州新萊克他地 (Schenectady) ——採用這種陰極線管從事試驗時，曾使用一百萬伏特的電壓，使電子得到極大的速度，所以這種型式的管有時又稱爲蘭柯 (Lenard-Coolidge) 管。

利用上述的陰極線管，我們可將各種物質置於金屬窗外，來研究它們被電子轟擊時所起的現象。柯氏和其他科學家發現：在窗外陰極線的作用之下，酵母 (yeast)、ergosterol 以及另外幾種物質可製造了種維他命 (vitamin D)；有些植物和動物產生新種；玻璃等物改變顏色；而且，利用對於陰極線所起的不同反應，我們能鑑別天然的和人爲的寶石。

因碰撞而產生的離化

高速度的電子還有另外一個重要性質，即當它經過氣體或蒸氣時，能使後者離化。電子運動太快時，可穿過原子而無任何騷動，運動過慢時，則無力留下任何損害；但在一個很廣的速度範圍以內，它將途中許多原子的電子移出。我們曾經講過，原子失掉電子後變成一個正離子，所以高速電子經過的路是一串離

子。[⊖] 利用運動質點來製造離子，是使氣體傳電最普通的一種方法。在下兩章中，我們將詳細討論這種離化的方法。

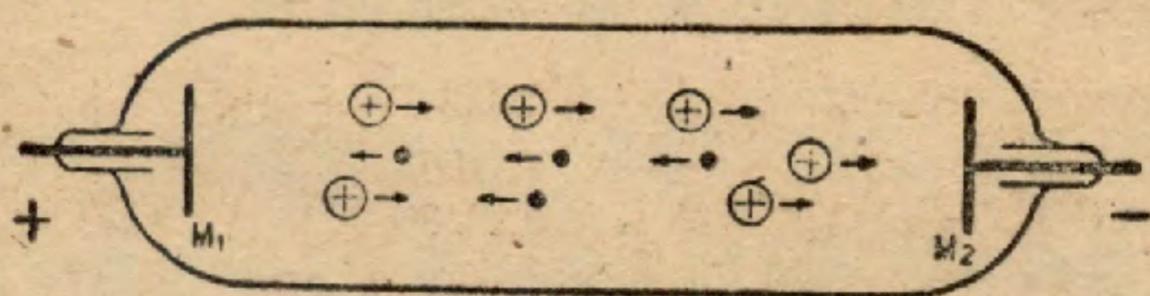


[⊖]見 46 頁。

第四章

一種較重的彈丸——正極線

在接近真空的管裏，欲使電流通過兩極，須將剩餘氣體離化；因為，前面已經講過，所謂電流，並非別物，而是一羣向某一方向運動的正離子及向反對方向運動的負離子或電子。這些離子可藉碰撞產生，空氣中更隨時存在着游散的離子， \ominus 作為碰撞的媒介。電壓加於管的兩極時，游散離子開始運動；它們在真空管中可以移動相當距離而不受阻礙，所以得到很大的能，並使和它們相碰的原子離化。被擊出的電子因電壓而以高速運動，因之產生更多的離子。在極短的時間內，管中積有很多離子，正的移向陰極，負的連同電子移向陽極，故有電流通過。我們如想得到陰極線，須增進管的真空，以便陰極附近產生的電子通過全管而不受阻礙。第七圖就是用來說明這種狀態的，其中管內的壓力較

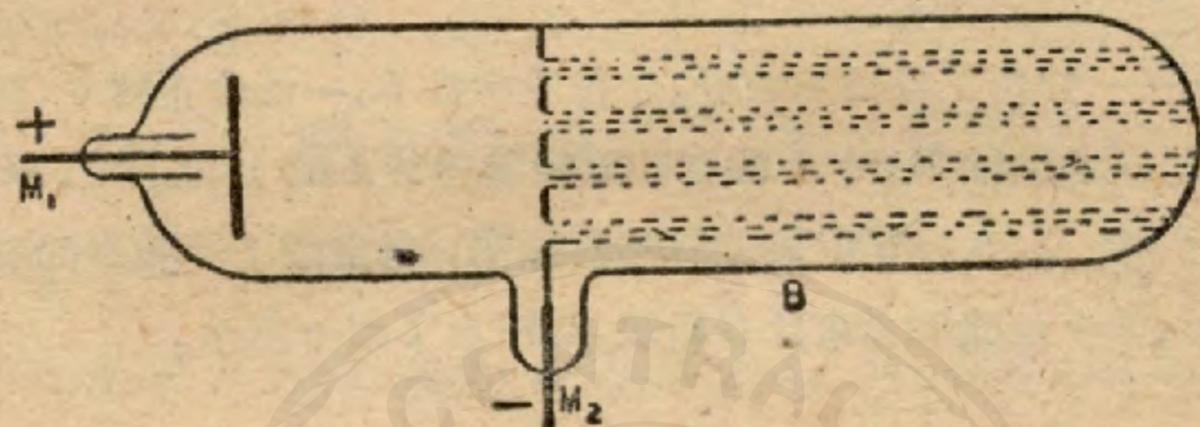


圖七——管中只餘少許氣體，壓力則不過低。正負離子以相反的方向運動，正的移向陰極 M_2 ，負的移向陽極 M_1 。

\ominus 宇宙線或係此等游散離子存在的原因之一，第七章中將討論之。

高，並充滿無數的正負離子，同時有光線射出，像普通的霓虹燈一樣。

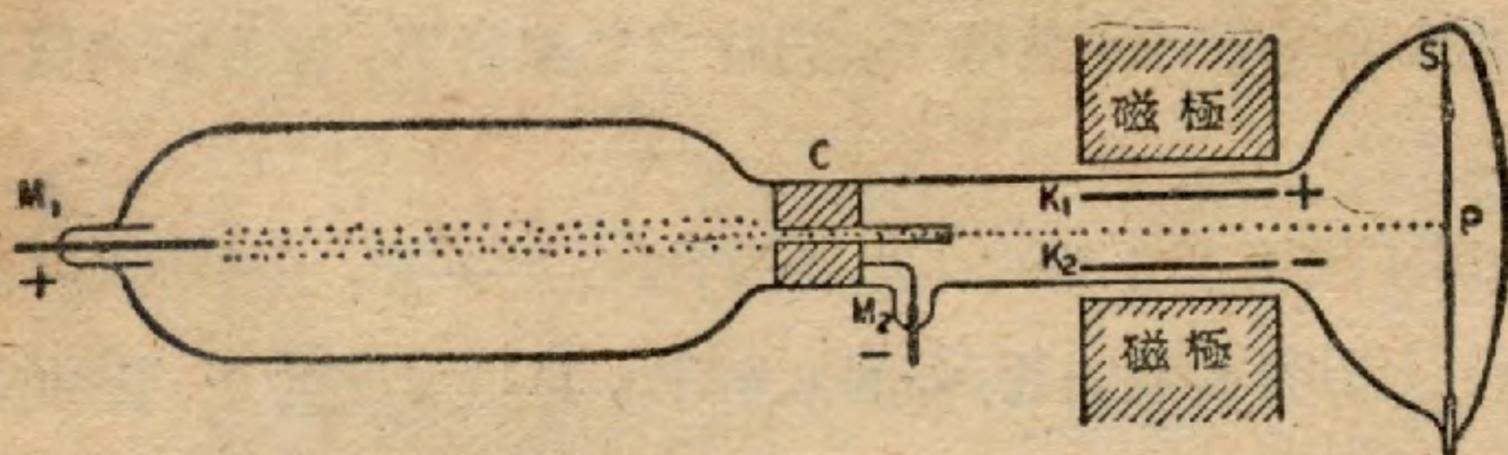
爲了證明正離子的存在，我們可使用一管，其中陰極（而非陽極）上留有多數小孔，如圖八所示。於適當壓力下，管的 B 部



圖八——正離子經過陰極 M_2 上的細孔，且在適當的壓力下發生彩色的光，如圖中虛線所示。

（陰極以外的部分）有細的光束自每一小孔射出。德國科學家格德斯坦（Goldstein）在 1886 發現這種現象，但當時人們還不知電子與離子的存在。格氏不了解這種穿過陰極細孔的射線的性質，所以稱它爲條形線（canal rays）。另外一個德國科學家文（Wien）在 1898 證明條形線經過電場或磁場時，折向一方，正和陰極線的情形一樣，所以也是帶電的質點。但條形線和陰極線有三種極重要的區別。

（1）條形線自兩帶電板之間經過時（如圖九），其偏折係趨向負板，而陰極線則反之。所以前者的電荷必定爲正。事實上，條形線是一羣移向陰極並穿過其上細孔的正離子，所以，研究這些射線的先進學者湯姆生（J. J. Thomson）易其名爲正極線（positive rays）。



圖九——分析正極綫的裝置。在普通情形下，一部分正離子(圖中以黑點點代表)經過陰極 M_2 中心的細孔射到隔屏 S 上的 P 處。如在板 K_1, K_2 之間維持一電場，並將管置於磁石的兩極間，則重離子所發生的偏折比輕離子為小，故正極綫的光束分為數組，如附頁 I 圖十所示。

(2) 正極綫不易偏折，故需用較強的電場和磁場。事實上，格德斯坦最初以磁場試驗時，就沒得到結果。討論陰極綫的偏折時，我們曾經指出，質點愈重，愈難使其離開正軌；故正極綫之難於偏折，是因其中質點比較陰極綫所包括者為重之故。

(3) 以量度陰極綫的方法來量度條形綫時，我們即可發現後者為原子組成，但其質量則不必盡同。如將放電管中的氣體變更，所得條形綫或正極綫的質量也因而不同。這並不足異，因為正極綫是由正離子產生的。如管內盛氫，則離化了的氫原子經過陰極上的細孔射出；管內盛氧時，產生氧離子；如盛這兩種氣體的混合物，條形綫便包括氧和氫兩種離子。

一種新的化學分析方法

如一束正極綫包括幾種質量不同的離子，則當其經過電場和磁場時，必依質量大小析為幾組。湯姆生最先將這種原理應用

到化學分析上，而且極為成功，所以我們應當充分了解。湯氏最初使用的管和圖九所示者相似。正極綫通過陰極 C 上的細孔後，便在高度的真空裏行進，一直射到管端的隔屏 S（或感光板）上。屏上若塗有特種物質，則被擊之處 P 發生螢光，如將感光板置於屏上，正極綫和普通光線一樣地使它感光，經過顯影後，被擊處有影像顯出。附頁 I 圖十為湯氏所攝，並允許著者將其翻印；圖中心的白點，即一束正極綫未被偏折前所產生的結果。

但是，如這束射綫經過兩帶電板 K_1 , K_2 間的電場，同時經過磁石的兩極，射綫或其中的離子即散為幾組。若將電場與磁場加以適當排佈，俾其一使質點沿垂直方向運動，另一使質點沿水平方向運動，則所有質量與電荷相等的質點，不論其速度為何，以一曲綫落於隔屏或感光板上。這種情形頗似大小不同的彈丸自一機關槍射出，但未中的之前，受到兩種力的作用，其一將彈丸向旁邊推移，另一向上下推移。於是，某種重量的彈丸在標靶上的軌跡為一條綫，另一種重量的彈丸，劃出另一條綫。假設正極綫中包括電荷為一單位的氫、氧和氮原子，則在感光板上每種原子都劃出一條對應的曲綫。附頁 I 圖十即利用這種分析方法所得的四條曲綫；其中與 1 相對的，係電荷為一單位的氫原子形成，與 2 相對的，係電荷為一單位的氫分子形成。（一個氫分子包括兩個氫原子，所以其質量為後者的兩倍。）

這種分析方法有許多優點。極微量的物質可以如此偵察出來。在湯姆生的早期研究裏，有個有趣的例子。當陰極綫轟擊金

屬的陽極時，有少量的氣體放出。這種氣體的一部分原子，參加管中的放電作用，並且可用正極線管加以分析。此法甚至比用光譜來偵察元素更為靈敏。它可顯示一些短暫而不安定的原子，後者在放電後往往變成其他的東西。同時，一張照片可將所有參加放電的物質記錄下來。附頁 I 圖十一是個很好的例子；原圖為德國科學家哈莫生 (Harmsen) 利用改良後的湯姆生管所攝，原載 *Zeitschrift für Physik*, [⊖] 著者並得到允許將其翻印於此。

在圖十一的照片裏，每條曲線的末端註有一個數字。這些數字依照普通原子量的標準代表各種質點的質量；讀者可從這裏看出利用正極線從事分析的優點——它能精確地比較原子量。比較時，我們須量度曲線間的相對位置。湯姆生的曲線已能滿足這個目的，他並得到很滿意的結果，但如要達到現代科學所需要的精確，湯氏的工具尚須改進。一度和湯氏共同工作的阿斯登博士 (Dr. F. W. Aston) 有鑒如此，故設計一種新的裝置；他得到極準確的結果，並因此榮獲諾貝爾獎金。阿氏及其他先進科學家——其中如美國的貝恩伯奇 (Bainbridge) 和戴蒲斯特 (Dempster) ——的工作在原子物理的進步上是很重要的。

近代科學家用來分析離子的工具，和原來的裝置相似，也是將電場和磁場適當地配合起來。我們不必去問它的詳細構造，但應注意其中的區別，即湯姆生的長的曲線已為短的直線所代替，

⊖為德國 Julius Springer 出版之著名物理學刊物——譯者註。

如附頁 I 圖十二或圖十三所示。

從上圖裏讀者不難看出與光譜相似的地方。正如同包括各種光波的光束經過三稜鏡後顯出由各波長組成的光譜一樣，一束正極綫經過電場和磁場後也分開為各種單位。因之我們將這分析的工具稱為質譜器 (mass-spectrograph)，而將所得的照片（其中每條直線都相當某種質量的離子）謂之質譜 (mass spectrum)。在這種質譜裏，我們可量出各直線間的距離，來精確地比較各種質量或原子量。

重水的發現

由上面的量度到重水的發現是近代物理學上最有趣的故事之一。湯姆生於 1912 分析放電管內的物質，管中原來盛有一種稀有氣體氖 (neon)，原子量為 20.2。在他的照片上，不但有條曲線與原子量 20 相當，還有一條與 22 相當。已知的元素雖然沒有原子量為 22 的，但它顯然與氖有關。第一次世界大戰後阿斯登繼續他的研究工作，並在 1919 證明上面的結論是正確的。氖元素是兩種原子的混合物，其一的原子量為 20，另一原子量為 22；它們以一定的比例混合，所以用化學方法所決定的氖原子量為 20.2。

我們記得，依據道爾頓的原子說，一種元素的所有原子都是相同的。然而，上面是個確切無疑的證據：一種普通元素可有兩種原子，其化學性質雖同，原子量則異。事實上，這種結論是易於

接受的，因為以往的研究工作證明，不安定的放射性元素發生過同樣的現象。科學家研究放射性時，曾發現幾組元素，其原子的電子數相等，化學性質也一樣，只是質量不同。其實，研究放射性的先進學者撒得 (Soddy) 於 1913 已創用同位素 (isotope) 一詞，用來表示一組元素中的每一份子。但湯、阿兩氏的發現卻證明，在非放射性的普通元素裏也有同位素存在。這是非常重要的。因為質譜器的改進，我們馬上發覺同位素是一般的情形，而非特例。本書末尾的第三表可說明這點。例如，錫的通用原子量為 118.7，但包括不下十種的同位素，質量在 112 到 124 之間，其中大部分可由附頁 I 圖十三看出。

最重要的，這些同位素都是錫元素。它們的質量雖然不同，但其原子序數，即原子核中的正電荷或核外的電子數，却都恰為 50。因為化學性質視元素的核外結構而定，所以我們不能用化學方法將同位素分開。上述的每種同位素都屬於錫。所以元素的名稱由其原子序數決定，而非原子的質量。錫的特殊標誌是原子序數 50；銀的，原子序數 47；鈉的，原子序數 11；汞的，原子序數 80；餘此類推。甚至有些不同的元素其原子的質量相等。例如，金屬元素鈣（原子序數 20）有種質量序數[⊖] (mass number) 為 40 的同位素，但氣體元素氬 (argon) 的質量序數也是 40，但原子序數為 18。

[⊖]質量序數代表各種元素或同位素依輕重排列時的次序，以氧的一種同位素為 16 作比較的標準。——譯者註。

假如氦有兩種原子，其質量序數分別為 20 與 22，[⊖]那麼這種元素的原子量是什麼呢？這樣得到的結果能和用化學方法決定的原子量 20.2 相符合嗎？在化學反應裏，元素的同位素並不分開，所以用化學方法決定出來的原子量是根據化合物所得的平均質。如欲從質譜的記錄求出這平均質，我們必須知道每種同位素的相對數量；根據這種相對數量，便不難用簡單的算術求出平均原子量。比如，在一籃柚子裏，有的重 10 盎斯，有的重 12 盎斯，假設這兩種柚子的數目相等，則每個柚子的平均重量為 11 盎斯。但是，如其中大多數為重 10 盎斯的，只有很少幾個重 12 盎斯，那麼平均重量一定接近 10，而且，如果我們知道每種柚子的數目，便不難算出準確的平均值。同樣地，我們能用質譜計算平均原子量，只要每種同位素的相對數量為已知。這種相對數量可由質譜上線條的深淺來決定，因為撞擊感光板的離子愈多，所得的影像愈深。例如，在氦的照相裏，重 20 的同位素比重 22 的多 9 倍，因此，我們能立刻斷定氦的平均原子量為 20.2。

所以，質譜器可以完全不依賴已知的化學方法來決定原子量。假如這兩種方法都可靠，它們得到的結果應當一致。其實，在 1929 這裏的一致性已極滿意，相差僅萬分之一。但同一年裏我們又發現，一向被認為只具一種同位素質量 (16) 的氧卻包括少量質量為 17 與 18 的兩種同位素。這表示，假如所有元素的原子

[⊖]於高度精確的試驗中，還有一種質量為 21 的同位素，但在照片上不很鮮明（見附頁 I 圖十一）。

量都以氧的主要同位素（質量 16.000）為標準，則氧的平均原子量（三種同位素的平均數）較 16.000 稍大；反過來說，假如用化學方法決定的原子量繼續以氧 16.000 為標準，則如此所得的結果比使用質譜方法所得者稍小。這裏應加的修正是很小的，然而用這種方法求出的氫原子量，其差別恰較應有的試驗差誤為大。美國物理學家伯奇（Birge）和孟德爾（Mendel）將這種差別歸諸於一種未被察出的氫的同位素，其質量序數為 2。另外幾個美國科學家如尤銳（Urey），波利克魏得（Brickwedde）和墨費（Murphye）着手用光譜的方法尋找這種同位素，並在 1932 宣佈重氫（heavy hydrogen 或 deuterium）的發現，其質量序數為 2。在普通的氫裏，重氫只佔幾千分之一，然而它被發現後不久，我們已有方法增加它的濃度或使之完全分離出來。

假如重氫僅僅是一種新的同位素，它的發現並沒什麼特殊的地方。然而，它卻驚動了全世界的科學家，並且立刻引起許多化學和物理實驗室裏的研究。理由是很明顯的。僅就原子核的正電荷與核外的電子數目而論，這兩種同位素的原子是一雙完全一樣的孿生，由電荷與電子數目決定的化學性質也無法區別。在幾種同位素中，如它們原子核的質量大約相等（比如，氯的兩種同位素為 35 與 37），則因質量不同產生的性質差異，只有用極精細的方法才能辨別出來。但質量若相差到 1 與 2 之比（如氫的兩種同位素），性質上的差異是易於察出的。所以重氫的發現在物理與化學界中引起許多試驗，用來研究化合物中的氫被重氫

代替後所引起的差異。

其中最重要的，是重水 (heavy water) 的研究。我們知道，普通的水是氧與氫的結合。重水則是與此對應的化合物，其中重氫代替了氫，換句話說，氫的第一種同位素被第二種同位素代替。肉眼並看不出這兩種水的區別，然而它們的性質卻有顯著的不同。普通水在華氏 32° 凝結， 212° 沸騰；對於重水，對應的溫度為華氏 38.8° 與 214.5° 。普通水可止渴，但重水不是飲料，雖然瑞典的漢孫 (Klaus Hansen) 曾喝三分之一盎斯的重水而未受傷害。就是它能吃吧，也很少人吃得起，他的製造成本太高了。

質 子

上面講過，我們可由分析離子得到一個決定原子量的物理

方法，而且發現許多同位素，

其中尤以重氫最出色。更重

要的，物理學上可將氧的主

要同位素做標準（質量定為

16.0000），再利用質譜器去

精確地量度其他各種同位素

的質量。我們一向使用整數

代表原子的質量——例如氯

的質量序數為 35 與 37；氫

的，1 與 2；氮的，20 與 22；

第一表

幾種同位素的準確質量

(氧=16.0000)

元 素	質量序數	質 量
氫	1	1.0081
重氫	2	2.0147
氦	4	4.0039
鋰	6	6.0168
鋰	7	7.0182
鈹	8	8.0080
硼	10	10.0160
硼	11	11.0129
碳	12	12.0039
氮	14	14.0075
氧	16	16.0000
氖	20	19.9989
電子的質量	—	0.00055

氧的，16，17 與 18——但不曾提到它們的準確數值。現在，因為儀器的進步，科學家能精確地去量度質譜上代表同位素的直線的相對位置。這樣得到的結果，可證明所有同位素的質量都非常接近整數。第一表的數字就是一個說明。

這個重要的事實，立刻復活了勃勞特的假說：它又以修正後的形式出現了。因為有些元素的原子量離開整數很遠，所以勃氏的主張——各種元素由氫原子構成——不曾受人很大的注意。但同位素的“非常接近整數律”被發現後，我們必須將氫原子，或更準確點，它的核質子（proton），視為構成其他複雜原子的最終單位。至少，所謂各種原子核由帶正電荷的質子與帶負電荷的電子所構成的理論，從此引起人們的密切注意。記着，這更離開了道爾頓的相同而不可分割的原子，因為根據上面的說法，除氫外，即令原子的核也必是一個複雜的東西——這種觀念於研究放射性時業已萌芽，在下章裏我們就可講到。

質量和能的互變

原子為質子和電子構成的學說，像其他學說一樣，必須經過數量上的核驗。現在，我們舉氦為例，它的質量為 4.004。根據剛講過的理論，氦原子的核必須包括四個質子， \ominus 每個質子的質量為 1.008。但是，

\ominus 見下註。

$$\begin{aligned} \text{四個質子的質量} &= 4 \times 1.008 = 4.032, \ominus \\ \text{氦原子的質量} &= 4.004, \\ \text{故二者相差} &= 0.028。 \end{aligned}$$

這個簡單的計算證明：當四個質子結合成一個氦的原子核時，它們在結合後的質量總和較結合前的總和為少；因為我們的量度非常精確，所以不能將此處的質量差別歸諸於試驗上的誤差。這裏，0.028 單位的質量消失了。後來的研究工作證明應損失的質量為 0.030 單位。總之，這似乎說，二加二不等於四。為了解釋這個差異，我們須暫時離開正題一下。

十九世紀的物理和化學建築在兩個基石上，即物質常住定律 (law of conservation of matter) 與質量常住定律 (law of conservation of mass)。根據第一定律，宇宙間物質的總和永遠不變。將兩粒甲種化學品與兩粒乙種化學品混合起來，不論所產生的是什麼，我們一定能得到四粒東西。所以，就物質而論，二加二總是等於四，這是沒人置疑的事。

但質量的常住並不如此簡單，因為質量不是物質的數量，也不是唯有物質才具備的東西——這和普通教科書的記載是不同的——而是用來量度一塊物質的慣性 (inertia) 或惰性 (laziness) 的。質量愈大，愈難使其運動；正極綫的質量愈大，愈難使其中運

⊖這是一個大概的計算，沒有考慮電子的質量，0.00055。然而這並不影響我們所要說明的事實。根據原子核為中子 (neutron) 及質子所構成的觀念，較精確的結果應為 0.030，而非 0.028。

動的質點離開正軌。物理學家一度以爲每種物質都有一個不變的質量，但他們的思想逐漸改變了。十九世紀末，湯姆生以理論的方法證明帶電體的質量因其速度而異，並用電磁 (electromagnetic) 作用來解釋質量。這種推論爲德國科學家考夫曼 (Kaufmann) 用試驗證明，他並指出，電子運動愈快，愈難使它離開運動的軌道，所以質量也愈大。因此，我們必須承認：一個質點在不同的情形下具有不同的質量。

愛因斯坦 (Einstein) 的理論出現後，人們對於質量的觀念起了一個更大的革命。根據他的相對論 (Theory of Relativity) 所推出的定律，(1) 物體的能 (energy) 增加時，它的質量也隨着增加；(2) 每種形式的能都相當一定的質量。你跑步時便具備動能，所以你的質量也比靜止時稍大。這是難於置信的事，而且效應極小，就是 200 噸重的火車頭以每小時 60 哩運動，因動能而增加的質量還是無法察覺出來的；然而這確是事實。質量與能的相當量可由試驗（我們再研究幾種原子彈丸後就可講到這些試驗）決定，而且近代物理學上最基本的觀念之一。它的真實性是不可否認的。惰性的物質具有質量，但也因此具有能。

我們如果接受愛氏的理論，則質子結合時所損失的質量可立刻得到解釋。在四個質子燻合成一個氦原子核的過程中，有能放出來，與所損失的 0.023 單位的質量相當。這裏，物質消失了，而產生了能。如果物質可以變成能，物質的常住定律便不能成立；如果一個質點的質量因其速度而變更，則質量常住定律似乎

也有了問題。那麼科學中沒有一樣東西能永遠存在嗎？有的，那便是能。十九世紀的科學的第三個基石即為能的常住定律。它像直布羅陀的巖石，經過了二十世紀的大小革命而依然屹立不動。各種形式的能互相變換時，不會有能的損失；變換前的總和永遠等於變換後的總和。科學上是不能無中生有的。在每種能的互變中，某種形式的能被產生了，但另一種形式的能被消耗了，而且兩者的數量恰恰相等。這個定律的真實性，常常發生動搖，但始終沒被推翻。它是一切科學的基礎。

如把這個原理和愛因斯坦的質量與能互變定律聯繫起來，我們便無須廢棄質量常住定律。質量的常住與能的常住是同時的。如在互變過程中沒有能的損失，也就沒有質量的損失。質點以高速運動時，因外力向其作功而得到動能，所以質量也增加。質點觸擊物體而靜止的時候，它失掉這額外的質量，因為它的能已傳到被擊的物體或周圍的介質去了。

四個質子結合時，0.028 單位的質量不見了，但並沒白白損失，而以和它相當的能出現。然而，0.028 單位的慣性物質從此消失了；這表示：我們可把物質毀滅而將它變成能。消滅物質而取得能——這是一個有無限發展的觀念。我們能控制原子的形成和因此放出的能嗎？我們能毀滅一粒物質而將和它相當的能加以利用嗎？如果這是可能的，那麼毀滅一盎斯的煤所得到的能可供二十五萬人一年中所需要的電力——假設每月的電費為五元，電價為每瓦小時二分。對於一個依靠動力存在的民族，這些

問題是極重要的。

自本書第一版印行後，上面的問題已得到部分的解答。原子彈出現了，原子變化過程中因物質消失而放出的能，被人類控制了。但是，爲了解釋這些驚人的發展，我們必須再研究一下原子轟擊。

同位素的分離

我們已經知道如何利用質譜器使各種同位素在感光板上留下紀錄，以及如何計算它們的質量與相對數量。然而，怎樣分離和集中這些同位素以便得到可以稱量的數量，卻是一個更實際的問題。例如，在一筒氫裏，每 5,000 個質量爲 1 的普通氫原子中始有一個質量爲 2 的重氫原子。我們能把兩者分開並得到相當數量的純粹重氫嗎？事實上是可能的，但沒講到所使用的方法之前，我們對於鈾 (uranium) 元素——人人都知道這種元素在研究原子彈的過程中佔極重要的地位——也可提出同樣的問題來討論。

鈾是極重的元素，原子序數爲 92；它有三種同位素，質量序數分別爲 234, 235 及 238。根據初步的分析，在任何數量的鈾裏，鈾 234 的存量極微，鈾 235 佔全部的 $\frac{1}{139}$ ，其餘的爲鈾 238。

利用質譜器，里爾 (Nier)，布斯 (Booth)，唐寧 (Dunning) 及格魯斯 (Grosse) 諸氏將鈾 235 自鈾 238 分開，但產量不及一百萬分之一克。他們連同其他許多科學家由這微量的產品證明：

因鈾原子分裂而放出的大量的能，主要地是由於鈾 235（第十三章）。我們在上述試驗裏所得到的鈾少得不可以稱量，至於如何製取以磅計算的產品而且其中大部分爲鈾 235，則是研究原子彈時一個重大問題。

本書的目的不在詳細解釋這些技術上的程序，不過下面用來增加鈾 235 的產量的方法和原理是易於了解的，一般讀者諒亦感興趣。

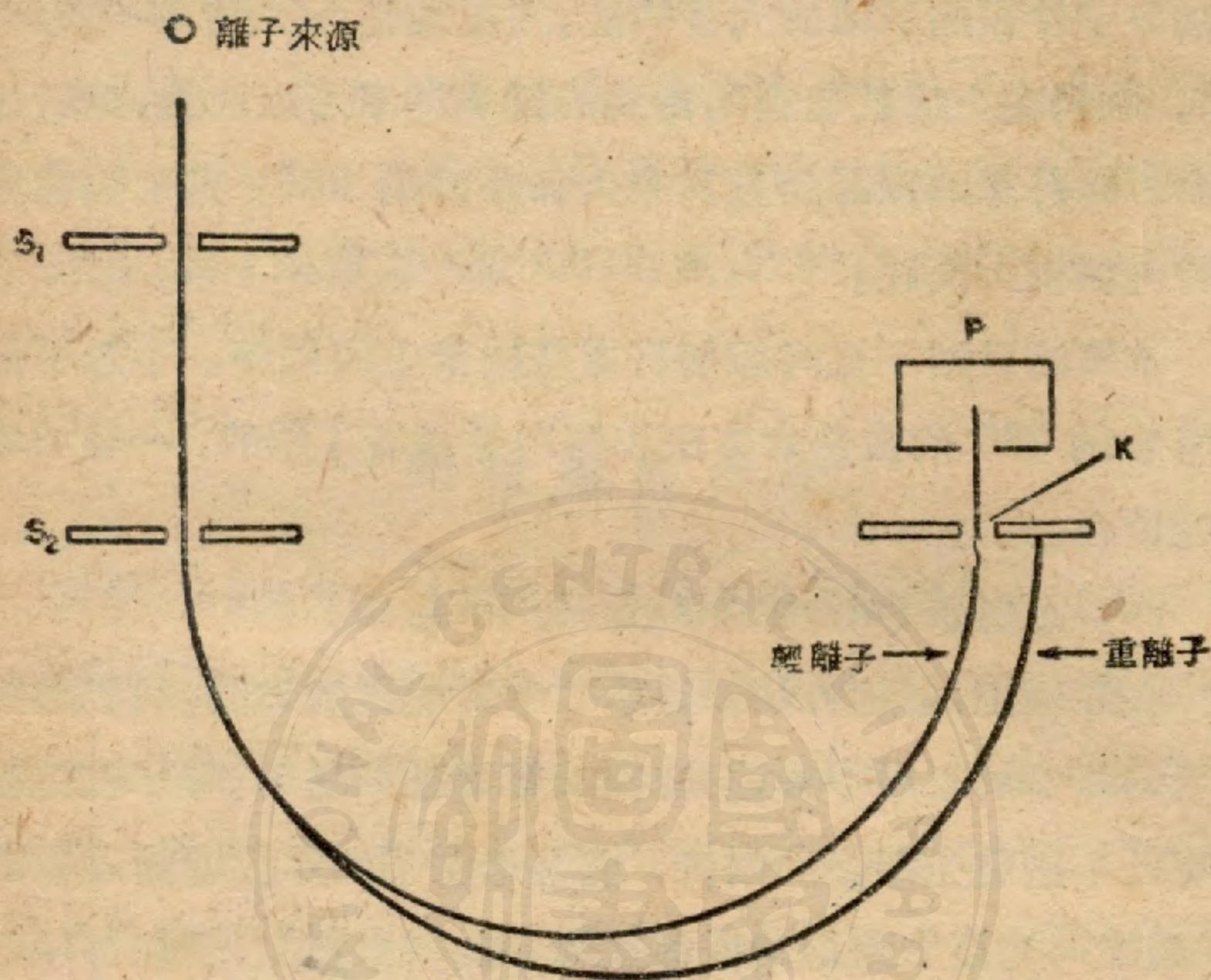
(a) 電磁法 (electromagnetic method)

在原理上，這種方法和質譜器中所使用的相同。我們將欲加研究的離子於電場中加速後，使其經過強的磁場。離子在這種磁場裏已不僅發生微微的偏折，而是沿圓形的路線運動（見附頁 IV 圖二一）。這些路線的直徑視離子的質量而定，所以每一束離子大約經過一個半圓後所落的地方與另一束所落的不同。我們如果留一條適當的細縫，如圖十三 (A) 中的 K，就可將任何一種特殊的同位素於縫外的容器裏收集起來。

經過許多試驗後，這種方法已很成功地被用來大規模分離鈾 235。在最後的程序裏，科學家曾使用世界最大迴旋增速器 (cyclotron) 中的巨大磁石（爲美國加里福尼亞大學所有），工作的艱巨，可以想見。於第八章中，我們將再講到這個迴旋增速器。

(b) 擴散法 (diffusion method)

如將幾種氣體的同位素混合起來，重質點的速度較輕質點



圖十三(A)——幾種同位素的離子的混合物由電場加速後，自細縫 S_2 溢出，並各具一定之運動量。它們經過強的磁場時分散，各沿略不相同的圓形路綫運動。如在 K 處留一適當細縫，則可將任何一種特殊的同位素收集起來。（上圖根據塞穆的報告。）

的為小。因此，它們若從多孔的障礙物擴散，輕的同位素具備較大的速度。利用這個基本原理，我們可逐步從同位素的混合物中將任何一種收集起來。

這種方法也曾很成功地被應用到鈾元素。然而問題並不簡單。塞穆 (H. D. Symth) 教授對於因利用原子能而引起的研究工作曾有動人的記述，且對那般從事工作的科學家備加讚揚；他

們努力了五年，經過“不少失望與悲觀”，終於建立了一個工廠，利用擴散的原理來製取鈾。

(c) 離心力法 (the centrifuge)

這種方法利用牛奶分離器 (cream separator) 的原理。如將幾種同位素的混合物以極高的速度旋轉，則輕的成分集中轉軸附近，重的集中容器的周沿。研究原子能的時候，這種方法也得到很成功的應用，不過不能大量生產罷了。

在結束這個問題之前，我們不妨提出一種製造重水的方法。重氫出現後不久，科學家便發現：普通的水因通電而分解為氫和氧後，重水在所餘的水中的百分數比在原來的水中為高。很明顯的，如將這剩餘的而且含重水較多的水收集起來，並使其再電解一次，則第二次餘下的水含重水更多。如此重複幾次，就可得到濃度很高的重水。自然，這不是製造重水的唯一方法，不過是一個例子而已。事實上，研究原子彈時，科學家曾使用其他方法大量製造重水。重水在製造原子彈中所佔的地位，將來就可看到。

第五章

天然的彈丸

放射性的發現

欲使質子或任何正離子達到足以轟擊原子的速度，我們必須使用極高的電壓，或在特殊裝置中斷續地將普通的電壓加以有規律的應用。然而，科學家並不完全依靠自己的工具來製造彈藥，因為大自然至少在兩方面可以將這些供給他們。一種來源是放射性物質，另一來源是宇宙線。

物理科學發展史中，十九世紀的八十與九十年代之間為成就最豐富的時期之一。在兩三年的工夫裏，科學家發現了電子、X光和放射性。這些不是獨立的發現，因為在科學上，和在生命中一樣。一件事往往引起另一件事。放射性物質的發現就是一個好的例子。氣體X光管的管壁呈現強烈的螢光，無怪人們最初把這看不見的射線和螢光連在一起。法國科學家柏克愛羅 (Becquerel) 將鈾的化合物曝於光中，以便能發螢光，然後研究它們是否可放X光。他因發現一種不可見的射線而得到獎金，但他馬上證明這射線與X光毫無關係。鈾的化合物在正常狀態下，即不受光或其他媒介的刺激，也能射出一種可透過黑紙並使紙後感光板發生變化的東西。而且，這種放射完全是自發的 (spontaneous)。

taneous), 不論熱冷都不能使其開始或停止。它是鈾化合物的一種自然性質。這裏, 我們發現了放射性 (radioactivity)。

這種發現得到迅速的發展, 不久, 科學家發現瀝青礦 (pitchblende) —— 鈾的來源之一 —— 的礦渣的放射性比純粹的鈾化合物更爲顯著。接着, 居里夫人 (波蘭人) 藉她丈夫 (法國物理學家) 的幫助將放射力極強的鏷 (polonium) 和鐳 (radium) 分離出來。鐳的原子量爲 226, 化學性質與安定的鋇 (barium) 元素相似。

但是, 我們所注意的, 是放射性物質的放射, 而非它們的化學性質。這些放射, 不論到底是什麼, 具有三種重要性質。它們使其經過的空氣或任何氣體離化; 它們能使感光板發生變化, 正像普通的光、X 光及正極線一樣; 而且, 當它們碰擊某種物質時, 可發出螢光。它們的離化作用可用來偵察極少量的放射性物質, 因之在放射性的全部研究中佔很重要的地位; 它們的感光作用引起柏克愛羅的發現; 至於它們之激發螢光, 大家已很熟悉, 因爲在黑暗裏發光的鐘錶指針, 就是鍍有鐳的。

α , β 及 γ 線

然而, 這些放射是什麼呢? 它們又爲什麼具有上述的性質呢? 研研時, 最好先使它們經過磁場, 看看有否和陰極線一樣的偏折。這時候, 我們發現上面的射線分爲三組。第一組謂之 β 線 (betarays), 易於偏折, 偏折的方向表示它們爲帶負電的質點。

使第二組偏折時，需要極強的磁場，而偏折的方向恰與 β 線的相反，故其電荷爲正。這一組謂之 α 線 (alpha ray)。第三組爲 γ 線 (gamma rays)，即在極強的磁場裏也不發生偏折，故不帶任何電荷。事實上， γ 線和X光的性質相同，這裏暫且擱下不論。但對 β 線和 α 線我們必須詳細研究一下。

β 線並非別物，而是由放射性物質射出的電子。它們的速度不同，但可超過光速的十分之九，即每秒鐘160,000哩。欲使陰極線達到最快的 β 線的速度——已被發現者爲光速的百分之九十九——我們必須使用三百萬伏特的電壓。無怪高速度的 β 線可穿過幾釐厚的金屬，於空氣中則能運動十呎之遙。它們經過空氣時，留下一串離子。離子和電子一樣，是看不見的，但威爾遜 (C. T. R. Wilson) 在劍橋大學設計一個很妙的試驗，使每個離子變成一個水滴的中心，故能清晰地看出來。

這種試驗的基本觀念是很簡單的。如空氣中充滿了水蒸氣，則有灰塵時比無灰塵時容易產生霧。有人說，如果能把倫敦上空的煤煙驅散或不讓它們離開焗肉，那麼倫敦的霧不比英格蘭其他地方更濃或更常有。這個假設是有物理學上的根據的，因爲如有灰塵質點作中心，水蒸氣便易於在上面凝結起來。威爾遜證明，離子也可作爲形成水滴的核心。在實際試驗中，我們於充滿水蒸氣而無灰塵的空氣裏，利用離化物 (ionizing agent) 製造離子，然後使空氣突然膨脹而冷卻，水滴便在離子上凝結；將光線通過其間，就可攝取“霧跡” (cloud-track) 照片。每個不可見

的離子上出現一個可見的水滴。在附頁 II 圖十四中， β 線的速度很大，不因碰撞而偏折，所以它的軌跡是一條由白點連成的直線。注意，這裏每一個白點代表一個水滴，也就是一個離子。同一圖上，還有一條不規則的曲線，它代表速度小的電子，因碰撞而經常改變運動的方向。附頁 IV 圖二一與二二中的平滑曲線清晰地顯出高速帶電質點（如 β 線）在均勻磁場中所發生的彎曲。

我們曾經指出， α 線在磁場中的偏折方向表示它的電荷為正。偏折的程度以及直接量出的電量表示它為比氫原子重四倍的質點，帶有兩單位正電。所以，事實上 α 線是個原子量為 4，原子序數為 2 的原子。各種 α 線的速度不同，可達到光速的十分之一，即每秒 18,000 哩。它的透射力不及 β 線，一張紙或幾厘厚的空氣就可停止它的運動。

α 線的霧跡照片和 β 線或電子的顯然不同。附頁 II 圖十五是兩個 α 質點的運動路線，讀者不妨將它們和附頁 II 圖十四或附頁 IV 圖二二比較一下。明顯的， α 線的路跡不是可看見的、分開的、代表水滴的白點，而是一條連續的光。 α 線運動時產生極多的離子，以致水滴不能單獨存在，故有上面的現象。在附頁 II 圖十五中，左邊的路跡發生兩次曲折；第一次微微向右，第二次在路跡末端附近突然向左。這些曲折代表 α 質點接近原子核時的狀態。通常，這種重的質點即穿過原子，其路線也不發生曲折。但有時候，它太接近原子核，因之改變運動的方向，如照片所示。由研究 α 線撞擊薄的金葉而引起的偏折（即所謂折

散[⊖]), 科學家能夠估計原子核的大小, 並構成 21 頁上那幅原子模型 (參看附頁 III 圖十七)。

附頁 III 圖十六很清晰地顯出一羣 α 質點離開放射性物質時的情形。這種照片使我們不得不將原子看作真實的質點。原子的實在性, 同樣可由“玩星幕”(spintariscope) 證明。它是所謂放射性“玩具”之一; 其中微量的放射性物質被置於塗有硫化鋅的隔屏附近, 在暗室中如以放大鏡視之, 可看到微小的閃光不規律地在屏上跳動, 像天空裏出沒的星一樣。每一個閃光相當一個 α 質點在屏上撞擊。我們把這稱為玩具, 但事實上, 它的原理曾被用來計算一定時間內放射性物質所射出的 α 質點數以及 α 質點和質子在喪失離化能力前所經過的距離。

自然界的蛻變

由本書末尾的原子量表中, 我們可以知道, 氦元素——空氣中的一種少量稀有氣體——的原子量為 4, 原子序數為 2。原子序數的觀念雖在放射性的初期研究裏還沒萌芽, 但一支 α 線的質量和一個氦原子的相等, 這表示這兩種質點在實質上是相同的。接着, 我們有了證據證明, 一個 α 質點的確是一個剝去兩個電子後的氦原子。放射性的礦石裏曾發現被閉塞住了的氦, 冉莫塞 (Ramsay) 和撒得 (Soddy) 則在 1903 證明鐳的“散發質”(emanation, 即一種由鐳散發出的氣體, 下面就可講到) 中也有

⊖ Scattering。

氦存在。魯斯福特 (Rutherford) 和羅愛茲 (Royds) 於 1909 由試驗中得到直接而更有力的證明。他們將放射性物質射出的 α 線集合於一封閉的容器中，然後使其經過一層極薄的玻璃滲透至另一容器。由光譜試驗可斷定第二容器中有氦存在，其數量依收集到的 α 質點數而增加。這裏是個決定性的證明： α 質點和離化了的氦原子是相同的東西。多年前，一個開文得西 (Cavendish) 實驗室的工作者因相信這種真理而不禁嘔歌起來，下面便是他所寫的一部分：

一個垂死的鐳原子，
在它一去不返地爆裂前，
飛繞在它周圍的微粒
聽到它最後的嘆息——
啊，我是一個鐳原子，
從瀝青礦裏我問世，
但我馬上又要變成氦，
我已耗盡所有的能力。

(開文得西學會記錄裏的打油詩)

所以，鐳元素射出氦原子。從什麼地方射出來的呢？這個問題的解答與整個放射性現象密切相關，且對研究原子轟擊有很大的意義。由於魯斯福特和撒得等先進學者的研究，我們現在已有把握答覆這問題。大概是這樣的。放射性元素的原子核和普通元素的不同，前者是不安定的。在一個放射性的原子裏，不時發

生爆裂，於是一個 α 或 β 質點被拋射出來。餘下的，必是一個新的原子核。這個新核通常也不安定，它也由爆裂而射出彈丸而變成第三種原子。這串過程繼續進行，直至得到一個安定的核為止。

上面的現象可由一個具體例子說明。金屬的鐳放出 α 線後變成鐳的散發質或氡 (radon)，一種有氣體性質的元素。這並不是鍊金術；一種元素的確因此蛻變成另一種元素。人類不能控制這種過程，但他們能，而且已經，利用它；比如，很多產鐳的地方設有工廠來收集鐳的散發質。我們之所以如此收集氡，是因為它也是放射性物質。氡原子爆裂時放出 α 質點而產生一種固體物質的鐳 A (radium A) 原子。崩解的過程繼續進行，鐳 A 放出 α 線後得到下面一連串的產物——鐳 B；鐳 B 放出 β 線後變成鐳 C；鐳 C 再放出 β 線後變成鐳 C'，C' 放出 α 線後變成鐳 D（或由 C 放出 α 線後變成 C''，C'' 放出 β 線後變成 D）；D 放出 β 後變成 E；E 放出 β 後變成 F；F 放出 α 後變成 G。這個過程便於此停止，因為鐳 G 就是普通安定的鉛。這裏，我們略去 γ 線，因為它們總是和 β 線相伴而生，且非帶電的質點。

注意，鐳只放射 α 線，而非三種放射物。但若將鐳放在封閉的管中，崩解的過程便經常進行着，鐳族元素的每一種放射物質都於管裏出現。所以，從普通的鐳裏，我們可以發現三種放射線。

我們可以應用最基本的算術來校驗上面的蛻變。母體的鐳變成不生育的鉛；在這出生和死亡的過程中，一共放出了五個 α

質點和四個 β 質點。 α 質點的原子量為 4, 五個質點代表 5×4 或 20 單位的質量。 β 質點(電子)的質量和其他數量比較起來極其微小, 所以除在特別精確的計算中可以忽略不計。鐳的原子量為 226, 因此鉛的原子量必為 $226 - 20$ 或 206。質譜器的記錄證明鉛有一種質量為 206 的同位素, 和上面計算出來的數值完全一致。遠在阿斯登研究同位素之前, 哈利西米得 (Hönigschmid) 已於維也納用化學方法測定鉛(瀝青礦中的)的原子量, 他得到的數值是 206.05。

我們還可利用原子序數來核驗放射性的蛻變。要知道, 欲完全鑑定一個原子, 我們必須知道它的質量和核上的正電數, 即原子序數。一個 α 質點帶兩個正電, 因之損失五個 α 質點即是減少了 5×2 或 10 單位的正電。一個 β 質點帶一個負電, 損失四個 β 質點即等於核的負電減少了四個單位。但損失四個負電使四個正電不能平衡, 故相當於增加四個正電。所以因損失五個 α 質點和四個 β 質點的最後結果是減少 $10 - 4$ 或 6 單位的正電。鐳的原子序數為 88, 所以鉛的原子序數應為 $88 - 6$ 或 82, 正和事實符合。

這裏是個無可置疑的事實: 寶貴的鐳最後變成了普通的鉛。在自然界裏, 蛻變的方向是錯誤了。珍奇的變成低賤的——的確使煉金術家頭痛啊!

人爲的蛻變

放射性的發現增加了科學家的轟擊設備。在射程和速度方面， β 線超過從電子槍射出的任何質點，而 α 線則比任何已存在的彈丸爲重。無怪這些重礫立刻得到應用：人們曾用 α 線將某些物質加以猛烈的轟擊。

崩解現象表示放射性原子的核是個複雜而不安定的東西，即安定原子的構造也不是簡單的。所以若把像 α 線重的質點直接射到一個原子的核上，我們可能將它擊碎，變成各個組成的份子。用這種方法把原子分裂和原子失去幾個核外的電子完全是兩件事。原子並不因爲移去幾個核外的電子而毀滅，如此形成的離子可以吸引其他的電子而回到正常的原子狀態。分裂核的情形則不同。它表示一個原子的完全毀滅，更因爲下面兩種理由而不易發生。第一，需要極大的能；第二，須直接命中核。有時候，一個 α 質點具有足夠的能，但直接中的的機會極微。原子裏的核像大教堂裏的一隻蒼蠅，雖有很多 α 質點穿射其間，原子則完整無損，只是間會被移去一個核外的電子而已。

有時候 α 線極接近核，因之折向一方，而被擊的原子——嚴格說來，它的核——因爲得到能而朝另一方向運動。附頁 III 圖十七的霧跡照相是個極好的例子，其中普通的氦被 α 線轟擊。圖中除一個質點外，其餘的路跡都是直線。這個例外有個X形的路跡，一枝相當被偏折的 α 線，另一枝相當被擊的氦核。

轟擊的質點有時候直接中的；如被擊的核很輕（如氫），後者便以高速飛出。比如，在一個早期試驗裏， α 線被用來轟擊氫，被

擊中的質子可在原來 α 質點不能達到的屏上發生閃光。

有時候 α 質點攢入被擊的核，形成一個不安定的原子，這原子則崩解而發生蛻變。魯斯福特在 1919 用 α 線轟擊氣體的氮，並因為上面的變化得到氫。這是人類第一次由一種元素製造另一種元素。自然，如此製造的氫少得不能用化學方法來察出，但最嚴密的測驗可以證明這種現象是實在的，毫無疑問。質子或氫核從氮核裏被敲擊出來了。這樣製取氫非常不經濟，因為射出的一百萬 α 質點中只有一個直接命中而形成氫原子。但，重要的不是氫的產量，而是一個事實：從此可以直接證明氮的原子核裏有質子存在。幾年之間，科學家證明質子也可由其他許多原子裏敲出，因之一切原子核為質子與電子所構成之說便被普遍接受。這裏不能詳細討論這個問題，因為我們還須研究一下原子轟擊。

我們在下一章裏就可知道， α 質點和氮核發生作用而放出質子時，還可得到一個氧原子。附頁 III 圖十八為這種蛻變的霧跡照像，該圖係於魯斯福特最初試驗後數年所攝。注意，這張照片裏，有條 α 線的軌跡末端發生一個 α 。其中長而細的一枝相當質子的路線，短而比較不規則的一枝相當氧原子的軌跡。

半 世 代

本章已解釋放射性元素的崩解。我們已知道鐳原子如何射出 α 質點而變成或“凋謝”為氦原子，氦原子又如何崩解為鐳 A 原子，並繼續變化下去，直到這一世系變成非放射性的鉛為止。

我們解釋這些現象時不曾提到一定量的放射性物質變成另一種時所需要的時間。爲了充分說明一種放射性的同位素，我們不但要指出它的原子序數，原子質量，以及放射的東西，還要指出它的半世代 (half-period)，這是一個表示時間的因素。

對於任何放射性物質，無法預斷某個原子何時爆裂，但由試驗我們不難決定一半原來的物質變成另一種時所需要的時間。這段時間謂之半世代。它因不同的放射性物質而有極大的差異。比如，鐳本身的半世代約 1600 年，氦爲 3.82 日，鐳 A 爲 3 分鐘。有些元素的半世代不及千分之一秒，有的則超過幾百萬年。

鈾的放射性

一種元素的半世代若以百萬年計算，我們不妨將它視爲安定的物質，至少就壽命而論，它是如此的。在這類物質裏，我們可舉出三種鈾的同位素——嚴格說來，它們都是放射性物質——一爲鈾 234，半世代略小於一百萬年；另兩種爲鈾 235，及鈾 238，半世代都爲幾百萬年。

最有趣的，鐳是鈾的後裔。鈾 238 經過兩種壽命短暫的物質蛻變爲鈾 234，鈾 234 凋謝爲鏷 (ionium)。鏷也是壽命極長的放射性物質，且爲鐳的母體。注意，鈾的自然放射性和原子能是不相關的。

第六章

沒有物質的質量

光子

上章僅僅指出 γ 線的性質和X光相似，沒加詳細討論。但這個題目只是暫時擱下，事實上我們必須把 γ 線歸入高速的質點加以研究。爲了了解它在原子轟擊中的重要，我們須先知道一些光學方面的常識。

關於光的性質，在牛頓時代有兩種學說。根據其一，發光體放出不可見的但爲物質做成的質點，它們撞擊眼睛時便引起光的感覺。根據另一學說，光爲一種波動現象，是光源振動的結果。十九世紀，科學家證明兩種光線相加可以產生黑暗；這個事實連同其他許多現象只有用波動學說才能解釋。在那一世紀裏，支持波動說的證據累積極多，所以德國著名科學家赫梯茲（Hertz）於1889說：“自人類的觀點言之，波動說是確切無疑的。”光的電磁說（the electromagnetic theory of light）爲波動說的一種特殊形式，並得到許多證明；無疑地，赫氏頗受此說影響。電磁說爲馬克斯威爾所創，他曾用理論方法證明光波與電波的性質必須相同；這種預斷接着由赫氏等科學家的試驗得到滿意的證明。我們現在知道，光線、紅內線、紫外線、X光線、 γ 線、電波、無



線電波都是一種電磁放射，以每秒186,000哩的巨大速度在空間進行。它們性質上的差異，完全由於波長的不同。

大家都知道，光代表能。太陽的光波被物質吸收後變成熱，熱可產生蒸氣，蒸氣可開動引擎。事實上，地球上的一切活動，分析到最後，都依靠太陽放射出的能。然而這些放射能並非完全以可看見的光的形式出現。有一部分能的波長長於或短於普通的光線。但不論波長的大小，一切電磁波都具備能，並可利用適當的吸收方法，將這能顯示出來。

如果光波具備電的性質，它們必須有個電源。那是什麼呢？這裏，我們馬上聯想到魯斯福特的原子。其中環繞核心迅速運動的電子，似乎正是產生光波的東西。而且，根據十九世紀的力學與電力學定律，運轉的電子一定送出電波。但當物理學家根據電子運動來推演已被發現的光學定律時，他們便一籌莫展。許多極簡單的事實得不到解釋。比如，根據這些動力學定律，一個繞着核作迅速運動的電子（如氫原子中的）應產生一個連續光譜，即一片整個的顏色。事實上，氫原子放出的光在光譜上是幾個狹細而分開的部分。和這類似的困難隨處都是。將十九世紀的動力學應用到魯氏的原子來解釋已被發現的放射方面的事實，那是一個完全的失敗。

爲了得到滿意的解釋，我們須有一個完全不同的新觀念。這種觀念爲德國著名物理學家勃蘭克（Max Plank）提出。他在1900解決了一個放射方面的問題，這問題曾使世界上最聰明的

頭腦迷惑了多年。根據勃蘭克，放射的能不是連續得像水龍流出的水，如十九世紀的動力學所要求的，而是不連續的，它分成叫做量子 (quanta) 的小丸，頗像由機關槍射出的子彈。勃氏的觀念雖和十九世紀的某些信仰完全矛盾，但他的工作一開始就沒使科學界驚疑。其中的理由之一或者是，這種斷續性最先只限於光的放射和吸收。至於離開來源以後的放射能，仍被認為連續而均勻地擴散出去，正像石子丟入池中後水面所起的波紋一樣。但人們——愛因斯坦是其中的先驅——不久便發現，即在自由的空間裏，有時也須將光視為能力集中的小丸，即今日所謂的光子 (photons)。如果我們把光或電磁放射的來源比為一挺機關槍，光子便是離開槍口後的子彈。所以，光子是個微粒，或放射的質點；它具有一定量的能，並以每秒 186,000 哩的速度在空間裏行進。

這似乎又回到牛頓的觀念，而且有些地方確是如此。但牛頓所謂的光的微粒，是物質的質點，服從普通力學定律，而光子則非物質。它們只在以每秒 186,000 哩進行時始能存在，一停止便完全消失。然而，它們是實在的東西；同時，因為它們代表一定量的能，所以具有質量，正如同物質的質點一樣。我們很難想像光是具有質量的東西，而且欲以試驗直接證明其存在也非易事，但，確有人這樣做了。在日全蝕的時候，星球的光經過太陽附近時，其路線略被彎曲。太陽之吸引光子如同它吸引一個物質的質點一樣。

光 電

還有許多其他的事實可證明光束碰到物體的表面時，在某些方面，很像一陣雨點或一串鹿彈[⊖] (buckshot)。最鮮明的說明便是光電現象 (photoelectricity)。所謂光電就是光落於某些金屬表面所放出的一羣電子。光束可產生電流，這種電流也可因遮斷光束而停止。此種原理在近代工業上應用很廣，其中照例使用光電池 (photoelectric cell) 作為管制的工具；光電池利用落於金屬表面的光束的強弱來調節電流。

如此放出的電子並不足以證明光束為一串微粒。事實上，遠在得到這種結論之前，人們已知道光束可激發電子。但如把光電現象的定律在數量方面加以仔細研究，我們發現只有用光的微粒學說才能解釋它們。比如，我們由試驗知道，電子離開金屬表面後的速度不因光的亮度 (brightness) 而異。電子放出的數目却如此，但不管光的明暗如何，電子離開原子所具的最大速度總是一樣。將電子由原子裏拉出，光源在一哩或一呎以外的效用是相同的。這是一個極重要的事實，因為如將它伸引到其他波動，如水波，則若將一塊巨石投入湖中，不論是遠處或近處的小船都同樣地被顛覆。我們知道，水波的情形不是如此的，但量子論 (Quantum Theory) 告訴我們，放射的情形能夠這樣，只要放射的能不像水波那樣分散，而卻在運動的時候集中為微粒或光

[⊖]鹿彈為一種打獵時所用的子彈。——譯者註。

子。光子觸擊原子時，不論距離遠近，其能量被“整個地吞入”，並傳到被放出的電子上面去。

因此，光子易於因被吸收而毀滅。它還有一個特殊性質。它的能量——也就是它的質量——因光的種類而異。一般說來，放射的波長愈短，其能量或質量愈大。一個紅光的光子的質量極小，將它增加 240,000 倍後才相當一個低速的電子。在波長較短因而與紅光不同的紫光裏，光子的質量稍大，不過也須乘上 170,000 後才達到電子的質量。有些 X 光和電磁波的波長極短，故能易於穿過磚牆，其光子的質量也大得多。在透射力最強的 X 光裏，四個光子的質量就等於一個電子。

γ 線

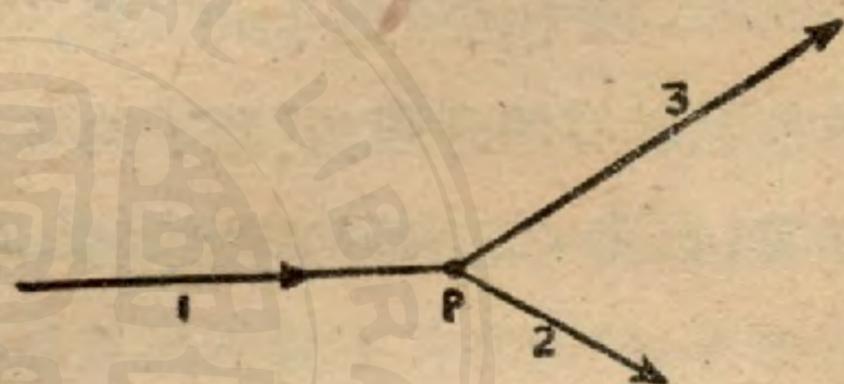
我們以前講過， γ 線為電磁波，性質與 X 光相似，不過波長更短而已。它們的透射力極強，可穿過幾吋厚的鉛板，並且，和 α 與 β 線一樣能使所經過的氣體離化。因為它們的波長極短，故其光子的質量比 X 光的為大。在波長最短的 γ 線裏，光子的質量大於電子的四倍，能量則相當於經過兩百萬伏特電壓後的電子。無怪乎，像我們將來還要講到的， γ 線會很成功地被用來轟擊原子核。

我們把 γ 線像光一樣地同時視為波動和質點，似乎是極矛盾的事，而且也難解釋這種可能性。近代科學雖證明質點（如電子和原子）的行動有時候像波動，但並不能解決這裏的困難，不

過這個事實可提醒讀者：這裏似乎存在着的一種二元性。物質和放射既是波動，又是質點。但是，這個問題雖然有趣，卻不是我們的正題，因之暫時把它丟開吧。

在另一方面， γ 線和 X 光的光子顯示了它們的個別和微粒性。光子碰擊電子（指離開了原子或與原子的聯繫很鬆的電子）和彈子相碰的情形類似。彈子相碰時，其中一個將一部分能傳到另一個上面去，然後各以不同的方向分開。在試驗中，一個光子

沿圖十九中的直線 1 運動，碰到 P 處的電子，並將一部分能傳到電子上。於是電子沿方向 2 離去，而能量減小因而質量也減少了的光子沿方向 3 運動。這種情形與 α 質點碰擊氦



原子時（附頁 III 圖十七）相

圖十九——一個光子沿直線 1 運動，與自由活動的電子 P 相碰，並將一部份能傳到電子上。電子沿方向 2 運動，能量減低後的光子則沿方向 3 離去。

似，雖然其中有個很重要的區別。物質的 α 質點損失一部分能量後，速度降低，但保持其質量（損失的能相當極微的質量，故可略去不計）；非物質的光子損失一部分能後，質量減少而速度則不變。記着，光子只在以光速運動時才存在。

能的量度——電子伏特

光子似乎是頗難捉摸的東西，它們雖無物質的軀體，卻具有能。而且，惟有具備能的轟擊彈丸才發生作用。在原子轟擊的計

算裏，彈丸的精確能量必須爲已知，所以我們應當懂得怎樣去量度它。一個物體如能作功，便具有能，反之，如沒能的供給，決不能作功。工廠裏的馬達可轉動機器，若沒電能的供給時則否。發電機可供給電能，若沒蒸氣機或水力使線圈在磁場中轉動時則否。蒸氣機如沒燃燒燃料所供給的熱便不能轉動，水如不升至高處也不致落下。在上面的分析中，太陽製造燃料，並將水由低的平面升至高的平面，所以它是人類一切能力的最終來源——原子能或者是例外。

計算能的互變時，我們有各種量度單位。物理學家使用呎磅 (foot-pound)、爾格 (erg)、或電子伏特 (electron-volt)，每月付電費的管家的，則很熟悉另外一種單位——瓦小時 (kilowatt-hour) 但在上面的單位中，我們只須注意一兩種。呎磅的含義是很明顯的。物體落下時便得到運動的能——謂之動能 (kinetic energy)——落下的距離愈大，動能愈多。一磅重的物體落下一呎時所具的能謂之一呎磅。同樣的，2,000 磅重的物體落下 300 呎時，能量爲 $2,000 \times 300$ ，即 600,000 呎磅。

原子轟擊中所用的彈丸大都爲帶電的質點，其中一部分，如陰極線和正極線，因電場使其加速而具備能。在這些情形中，質點所得到的能量視其電荷與所經過的電勢差而定。因爲任何質點上的電荷總比一個電子所帶的多整數倍，那麼一個方便的能量單位便是一個電子經過一伏特的電勢差時所得到的能。這個單位謂之電子伏特。比如，一支陰極線在 100,000 伏特的電極間

運動時，其最大的能量為 100,000 電子伏特。一個帶單位正電的離子（如氫的）在上面的管裏可得到同樣多的電子伏特數，雖然因質量較大不能達到同樣的速度。一個帶兩單位正電的離子（即失去兩個電子的離子），在這管裏可得到 200,000 電子伏特。

α 與 β 線的能量雖然是由於放射性物質的原子爆裂，而非由於電勢差，但也常用上面的單位來表示。速度不及光速二十分之一的 α 質點具有四百萬電子伏特的能。我們曾發現能量達八百萬電子伏特的 α 質點；極快的 β 線也可達到此數。

如欲利用高電勢差使帶電質點的能達到與此相近的數值，須用幾百萬伏特的電壓。我們將來就可看到，這種高電勢的取得和使用極其困難，幸而科學家在大自然的放射性物質裏找到了一些東西來代替那些精微、價昂的設備。

第七章

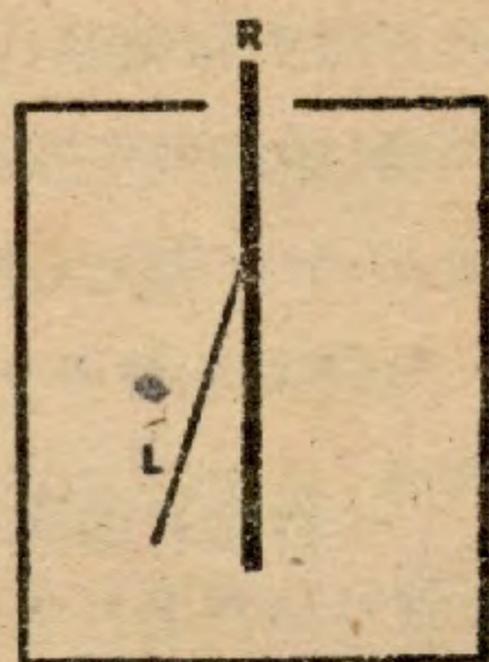
宇宙線

大自然曾慷慨把彈丸供給人類。我們已講過人類如何從大地裏發掘放射性物質，它們又如何不需要火藥和動力而放出重的 α 質點，輕的 β 線以及快速的光子。這種放射從不停止，我們必須小心處理它們，即把微量的鐳放在口袋裏也是一個禍患，未加管制的放射對於人體的轟擊是很危險的。鐳之燒傷人體，甚至可以致命。

大自然還供給另外幾種彈丸，我們且無法逃避它們。在任何時間，任何地點，總有一陣看不見的射線落於並穿過人體。它們所具的能，個別地講來，遠超過我們在放射線裏所遇到的。這些來源不明的射線從地球外面的空間衝入，因之很恰當地被稱爲宇宙線 (Cosmic rays)。

宇宙線的發現是在二十世紀的開始。那時候人們正熱心研究空氣的離化。我們已經講過，當 α 和 β 線穿過空氣時，它們劃出一條離子連成的路。因之，在放射性物質附近總有離化現象，而且爲了顯示此等物質的存在，這是最靈敏的方法之一。欲作數量上的研究，我們只須使用一種工具來指示這種物質所產生的離化程度。金葉驗電器 (gold-leaf electroscope) 即爲最簡單的

工具之一。它的主要部分爲一被絕緣了的金屬棒 R 及一片附於其上的輕金屬葉 L，如圖二十所示。若將電荷傳於棒和葉上，則因同性電荷相斥之故，棒將葉推開；驗電器所接受的電荷愈多，推開的距離愈遠。如果棒的絕緣很好，葉通常留於推開後的位置歷時幾小時乃至幾天之久；但若將一塊放射性物質置於驗電器附近，葉即落下，有時不要一秒鐘的工夫。這裏的解釋是很簡單的。空氣被放射性物質離化；如棒和葉帶負電，它們吸引正離子，如帶正電，則吸引負離子。因之棒與葉上的電荷逐漸損失，葉亦落下。離化的程度愈高，葉落得愈快。



圖二十——一個簡單的驗電器。R爲一絕緣了的金屬棒，其上附有一片輕的金屬葉L。棒帶電時，葉被推開。如棒的附近有離子（不論正負）存在，它將符號相反的離子吸引到自己上面，故而失去電荷。葉的逐漸落下即證明電荷的損失與離子的存在。

如把放射性物質自驗電器附近移開，被推開後的葉雖在幾小時裏不發生什麼變化，但若仔細觀察，便可看出一種極慢的降落。最後，驗電器失去它的電荷。這種情形是由於下面兩種原因或其中之一。棒與罩間的絕緣可能不澈底，同時罩內的空氣可能隨時有一種微量的離化。早期的學者曾仔細研究這兩種可能性，他們並指出，雖然第一種原因在某種限度內總是發生作用，但即令將它估計在內，第二種原因的存在也是毫無疑義的。空氣中隨時存在着一些游散的離子。

有離子，必有製造離子的東西。那是什麼呢？爲了回答這個問題，科學家曾用一層厚的鉛和水將驗電器包圍起來，又曾將它們放在結冰了的湖面和海洋上的船中，並得到一個結論：罩內的離化最少有一部分是由於罩外的放射。最初，人們把這放射歸諸於 γ 線，因爲地面和空中總有微量的放射性物質。1910—14年間，科學家利用氣球把儀器帶到大氣上層試驗，證明上面的理論是不能成立的。其中如奧人赫斯（Hess），德人科荷斯特（Kohlhörster）證明上述的放射的強度隨高度而增加；如果它來自地球本身，這種現象是不可能的。氣球愈高，放射愈強。赫氏下結論道，這種放射來自地球和它的大氣以外。它們是**宇宙射線**。

我們雖然能夠斷定宇宙線來自地球以外，但依舊不知道它們是什麼以及是如何產生的。高速的帶電質點能離化空氣，而且透射力很強，但光子的情形也是如此。宇宙線屬於那一類呢？磁場可以偏折運動的帶電質點，對光子則無影響，因之，我們似乎可以藉此來解答上面的問題。很明顯的，我們只須把宇宙線通過強的磁場，看它是否發生偏折。科學家曾做這種工作，並得到許多好的霧跡照片（見附頁 IV），其中有的軌跡和 β 線的相似。但在物理學界裏，宇宙線的性質依舊被熱烈討論着。無疑地，產生這種軌跡的射線是帶電的質點。然而，宇宙線撞擊物質時可激發新的射線；要辨別原來的宇宙線和這種續生的射線（secondary rays）是很困難的。原子吸收光子後可以放出電子，上述的帶電質點可能就是如此產生，至於原來的宇宙線也許爲頻率極高的

光子。或者，在照片上顯出軌跡的質點係由於一種不帶電的質點所撞出的電子。總之，我們有幾種方法解釋這些從磁場經過的質點的來源。

科學家曾以二十多年的工夫研究這些射線的最終性質；他們做過極多的試驗。在美國，有兩組科學家集體地研究這個問題，一組爲墨利康 (Millikan) 領導，一組爲康勃通 (A. H. Compton) 領導（他們都得過諾貝爾獎金）；在歐洲，科學家繼續赫、柯諸氏的工作。他們曾用氣球把儀器升到十七八哩的高空，又在水面以下三分之一哩的地方偵察和量度這種放射。他們還在高空的飛機和侵入同溫層的飛艇中獵取記錄。科學家走遍了地球，東西由新西蘭 (New Zealand) 到南美洲，南北由北加拿大到赤道。其中有個組織設有一百個測量站遍佈世界各地。他們得到寶貴的結果，並強有力地證明原來的宇宙線大部分爲帶電的質點，至於它們的來源，科學家的意見依然沒完全一致。現在讓我們看看他們的發現吧。

就透射力而論，這些射線可分爲兩組，一組的透射力較弱，另一組的則極強。我們曾在煤礦中發現那組透射力較強的，它可穿過七十五呎的鉛或幾百呎的水。這種強烈的透射力表示有些射線的能量極大。據估計，它們往往超過幾十萬萬電子伏特。

宇宙線“來自四面八方”，其中透射力較強的，在某一地點的強度不因任何時刻和季節而異。但你如走遍地球，這些射線的強度便因地而異。比如，在赤道附近的海面，其強度最小，向兩極

移動，強度逐漸增加，至緯度 40° 附近數值最大。同溫層裏的紀錄表示宇宙線的強度在十一哩的高空處最大。

宇宙線強度因緯度而異，這更足證明其中至少有一部分是帶電的質點。它們穿過大氣時，經過地球的磁場，因之，像已講過的，被磁場偏折。簡單的物理學定律可證明這些質點接近地球時應被折離赤道。

總括起來，這裏有個顯著的事實是毫無疑義的。有許多質點，不管它原來就存在或以後才產生，它們的能量比任何試驗室裏製造的或得自鐳元素的都大得多，並不停地轟擊地球和地面上所有的東西。它們穿過人的身體，但無可看出的傷害。那麼，我們再問一問，它們是什麼呢？不論這問題的答案為何，宇宙線和兩種新的質點有關，而且也是讀者必須知道的——正子 (positron) 和綜子 (mesotron)。

正子

關於宇宙線的性質，科學家已由霧跡照片得到很多資料。他們利用一種裝置增強宇宙線所產生的離化，並將這裝置放於照相室的一側，宇宙線經過其間時，立刻可藉電的操縱攝取霧跡相片。照相室是放在一個強的磁場裏，所以任何射線若為帶電的質點且速度不過大，則它們從照相室經過時，發生偏折，現出彎曲的軌跡。美國的安得生 (Anderson) 和英國的伯萊開特 (Blackett) 諸氏曾攝取許多這種照片並得到重要的結果。讓我們看

看這些照片吧。

有時候出現一條直的，即未被偏折的路跡，如附頁 IV 圖二一所示。由代表離子的白點，我們可斷定這條路跡相當於一個質量等於電子的帶電質點，但速度過大，故不發生偏折。我們攝製這張照片時，曾把一塊鉛板橫置於照相室的中間。照片上顯出一個帶電質點沿圖形軌跡運動，它的速度小得多。這個質點是電子撞擊金屬板而產生的，在照片左上方，投射的電子的足線微微彎曲。通常，照片比這複雜，其中有幾條彎曲的軌跡。附頁 IV 圖二二即是一例，圖裏的軌跡朝相反的方向彎曲，但，明顯地，它們自一中心射出，這中心在照相室的邊沿或恰在室外。

來源相同而曲度相反的質點強有力地表示它們屬於兩類，一帶正電，一帶負電，唯一已知帶負電的質點為電子，而已知的正質點卻有兩種，即 α 線和質子。我們有理由假定圖中向一方向彎曲的路線是由於電子，因為其中代表離子的小點和用 β 線或高速電子所得的完全相同。抑有進者，如假定這些質點為電子，並根據其曲度來估計它們的能量，則得到的結果與由觀察其透射力所求出的數值相符合。但如把曲度相反的軌跡歸諸於 α 質點或質子就有困難。它恰和電子的軌跡相同，而與代表 α 質點或質子的連續粗線完全兩樣（見附頁 II 圖十五）。即撇開這種與電子的相似性，假定它是 α 線或質子，並利用曲度計算能量，則所得的數值太小，不足以解釋它的透射力。這種證據表示上面的路跡是由於一個帶正電的質點，其質量和電子相仿。科學家最

初攝製宇宙線的霧跡照片時，還不知道有這類質點存在，但安得生和伯萊開特相繼得到這種結論。

這個新的基本質點的發現是極關重要的，所以安得生不馬上宣佈他的結果，而去研究那曲度與電子相反的軌跡是否可用另外一種方法去解釋。很可能的，它是由於運動方向相反的電子，因為負電向上運動和正電相下運動產生同樣的效果。自然，電子不致趨向和離開同一中心，但我們不能不探究這種可能性。爲了確切證明這個質點的電荷爲正，必須先決定它的運動方向。安氏曾用一個極簡單的試驗達到這個目的。他將一塊鉛板橫置於霧室中，所以宇宙線必須從它經過。射線穿過鉛板時，速度減低；速度既低，愈易受磁場的影響，因之它的路線彎曲得愈多。故射線的方向必趨向路跡彎曲較多的一方。如此，安得生證明他原來的假定——被研究的質點帶正電——是正確的，而且正子的存在也是毫無疑義的事。一個與電子相對立的東西從此被發現了，它的質量和電子相仿，但電荷爲正而非負。

我們已提過那組自同一中心射出的軌跡，他們清晰地在附頁1V圖二二裏出現。科學家會仔細研究這些陣雨般的東西（還有許多比此圖所示的複雜得多），並證明它們必大都發自照相室的四壁、頂部或周圍某些物質上的一點。顯然地，它們是由於宇宙線撞擊一個原子的核而起。能量高的質點或光子擊中一個原子核，因之一陣能量高的電子和正子被放射出來。這是原子轟擊中最動人的例子之一，但正確地去解釋其結果卻非易事。電子和

質子原來就在核裏呢？還是碰撞時因能量的交換而產生的呢？第一個意見似乎最自然，但各種證據支持第二個，後者是愛因斯坦質量與能互變定律的另一個例子。質點可以產生，也可以毀滅。那些陣雨般的東西的來源與整個原子核的結構問題有關，而且研究原子結構時，這是許多必須考慮的因素之一。

正子被發現後不久，我們就能不用宇宙線來得到這種型式的質點。比如，若適當地用 γ 線去轟擊一個原子的核，有時候可同時產生正子與電子。附頁 IV 圖二二 A 清晰地顯出如此出生的一對。還有一件頗具意義的事，那在正子的發現前不久，英國數學物理學家戴列克 (Dirac) 正研究一種學說，那學說的完成需要正子的存在。這裏，理論的預測又為試驗證明了。

讀者或許要問，正子既和無處不有的電子相對應，它為什麼不早出現呢？它的存在又為什麼不更豐富呢？答案是這樣的，正子是個壽命極短的質點，一遇電子便與之結合起來，於是兩者同時消失，產生一個光子。

綜子

正子是在 1932 發現的。五六年後，安得生、斯崔特 (Street) 及斯提文生 (Stevenson)——都是美國物理學家——分別利用霧室試驗發現一種新的質點綜子。根據試驗，它也帶電，電荷有時為正，有時為負，質量約為電子的 200 倍；他的壽命極短，通常只有幾百萬分之一秒。在海平面的高度，宇宙線大部分為綜子。

這個事實可以解釋某些宇宙線的高度透射力，因為，借一句世界宇宙線權威學者之一的斯萬 (W. F. G. Swan) 博士的話說，“綜子是物理學上透射力最強的東西。”

綜子從那裏來的呢？它們的透射力極強，因之人們很自然地假定，自地球以外射進大氣的宇宙線是由它們組成的。但所有的證據卻表示它們是在大氣中產生的。這裏自然不能列舉所有的證據，不過讀者可以看出，綜子的壽命既極短促，它們當然不能構成原來的宇宙線。

宇宙線的性質

很明顯的，所謂“宇宙線”，決不是指某一種質點，它們的性質也極複雜。這個問題雖然還沒得到最後的解決，但在某些方面大家的意見已趨一致。下面為一些概略的結論。

這些射到地球上的放射至少有一部分為高速的質子。它們進入大氣後，以一種我們還不了解的過程於原子核附近產生綜子。我們已講過，綜子可穿過很厚的物質。它們邁進的時候把原子中的電子敲出，待綜子消滅了，高速的電子被創造出來。

高速的電子在宇宙線中佔着重要的地位，因為有許多事實證明它們和原子核碰撞時，於適當情形下，可以失去本身大部分的能，產生不可觸摸的光子。這些光子，像圖二二 A 中的 γ 線一樣，馬上自殺，產生電子和正子。一部分這樣產生出來的電子。運動一段距離後，產生更多的光子，光子反過來產生更多的電

子；一個累積而連續的程序如此進行下去，直到原來的能被削弱到很低的數量。

我們由此知道，宇宙線包括電子、正子、質子、光子和綜子。即在這一串東西裏，已略去一兩種。第一種是中子 (neutron)，一種不帶電的質點，它們的性質將在第九章裏充分討論。這裏只須指出，當一個質子失去電荷而產生一個帶正電的綜子時，其本身即變成中子。第二種被省去的是帶單位電荷的氦原子；根據斯萬博士，“它藉綜子產生電子，這些電子則限於大氣的上層”。

宇宙線的最後來源

這裏剩下一個最後的問題。不管這種來自地球以外的放射的性質如何，它們的能是從那裏來的呢？對於這個問題，有幾個答案，其中最有趣的是墨利康、列爾 (Neher)、勃克林 (Pickring) ——都是研究宇宙線的著名學者——諸氏提出的。根據他們的假說，這種能的來源是由於星球間某些原子的完全毀滅，因此放出能量極大的射線與該原子相當。惰性的物質或所謂的“靜止質量” (rest-mass) 消失了，但能卻依據已講過的愛因斯坦定律被創造出來。贊成此說的人並指出，星球間有氦、碳、氮、氧和矽等原子存在，因之我們可把宇宙線分為幾組，它們的能量分別與這些原子相當。

斯萬博士提出另外兩個可能的解釋。第一，星球間可能存在着的一種磁場，磁場變化時產生電動力 (electromotive force)。帶

電的質點因電動力的作用而得到極大的能。斯氏的第二種學說則謂星球間可能存在着一種與雷電相當的現象，“它以某種形態發生，因之能產生二百萬萬伏特的電勢差。”這已是猜測範圍以內的事了，我們再回到原子轟擊的本題吧。



第八章

製造轟擊原子的巨礮

我們討論放射性時曾指出，魯斯福特在1919用 α 質點轟擊氮而得到質子。 α 質點擊中氮原子核時，它們之間發生一種相互作用，於是放出氫原子，產生氧原子（將來還要講到）。這個有價值的試驗連同以後和它類似的，說明幾件事情。（1）我們可藉轟擊使非放射性的元素人為地蛻變為另外的東西；（2）所謂安定元素的原子核是一個複雜的結構；及（3）質子為構成原子核的份子之一。於是，原子核的研究變成物理學上一個主要的問題。近幾年來，這種工作更形重要，所以在任何文字寫成的任何物理刊物裏，我們不難找出一兩篇研究原子核結構的文章。

這些研究中所用的方法，在原理上，多很簡易。我們只須對某種物質發射高速質點，然後研究因正中原子核而得到的碎片。如想得到成功的轟擊，我們必須儘量直接命中核，轟擊的質點則須具備高度的能量。核於原子中佔的空間極小，所以直接命中的機會很少（在魯氏的試驗裏，一百萬個原子中約有一個直接命中），且增加直接命中的唯一方法為增加轟擊質點的數目。但放射性物質所供給的彈丸有限，且只有重的 α 質點可以利用。很可能的，將其他原子作為轟擊質點可更有效地使原子核

崩解。事實上，我們可由理論上證明質子比 α 質點易於穿入原子核。

因此，科學家爲了集中攻擊原子核，從事研究其他的方法將由原子作成的彈丸以高速射出。其中明顯的一種便是在類似放射正極線的放電管（見 28 頁）中施用高電壓。要達到 α 質點的速度，須用一百萬伏特以上的電勢差。這種高電壓的產生與管制，其本身已是一個問題，工作時更得特別小心。如不將高電勢的導體妥爲絕緣，或上面留有尖角，長的火花就要跳到試驗室的四壁、屋頂或地板。

著者不擬詳細記述那些得到高速離子的人爲工具，但其中有些即對普通讀者也很有趣，故而值得記述一下。首先，曾有兩個德國人（或許還有別人）伯拉霍（Brasch）和蘭格（Lange）企圖控制雷電。他們在義大利一個多雷雨的地方將長約半哩的導線牽於兩山峯之間，得到高達一千五百萬伏特的電壓。這種方法所費無幾，然而限制太多，且不可靠，所以不能普遍採用。雷雨不是一揮即來，更不是沒有危險的。

靜電增速器

在美國，科學家曾用壯觀的直接方法得到高達一千萬伏特的電壓。他們應用的原理，主要地，與由轉動的玻璃板做成的靜電發電機相同，四十年前在醫院、在實驗室，這種設備是很常見的。一種與此類似的現代工具爲一個美國羅茲（Rhodes）獎

金[⊖]學者凡底格拉夫 (Van de Graaff) 發明，因之稱爲凡底格拉夫靜電增速器。其中正電逐漸積於一個大而絕緣的空球上，負電則積於另一球上，直到它們間的電勢差達到一千萬伏特。這裏所要解決的問題由這種發電機的大小就可想見。球的直徑爲 15 呎，分別支於相隔六呎、高達 24 呎的絕緣柱上。全部設備裝在一個大的水上船塢裏，高大的柱立於鐵軌上面的車上，故可移動。柱底和球內各有一個滑輪，由絲帶相連，馬達轉動柱底的滑輪時，絲帶循環運動。在一柱內，向上運動的絲帶荷正電——即法蘭絨和封蠟摩擦後所帶的那種電；在另一柱裏，向上運動的絲帶荷負電——即絲和玻璃摩擦後所帶的那種電。絲帶進入球內，放出它的電荷，故正電逐漸積於一球，負電積於另一球，直到它們之間達到一千萬伏特的電勢差。將這巨大的電壓施用於球間的大放電管時，每秒鐘即有十萬萬萬個高速離子射出。因爲電荷總是分佈於導體表面，我們可以絕對安全地在球裏面工作。自然，科學家通常不在試驗的器具裏邊工作，但於一個駕車不用馬的時代裏，這是不足爲異的。

迴旋增速器

在美國，因爲勞倫斯 (Lawrence) 與列文斯通 (Livingston) 等氏研究的結果，又有一種很妙的方法來取得高速離子而不使

[⊖]該項獎金係英人羅茲 (Cecil John Rhodes, 1853—1902) 於牛津大學所設，用以資助美國及英殖民地學者。——譯者註。

用極高的電壓。他們將低電壓斷續而規律地加於離子上面，直到離子達到與高電壓相當的速度。這和利用舊式長索鞦韆把兒童盪至高處的原理相同。爲了達到大的振幅，我們須隔一定的時間去推送兒童。同樣地，在迴旋加速器 \ominus (cyclotron) 裏我們當離子以低速度經過一個小半圓後把它推送一下，於是它以較大的速度在較大的半圓上運動；離子離開第二個半圓時受到另外一個推送，因之以更大的速度在更大的半圓上運動。這種過程繼續下去，離子以逐漸增加的速度於半徑逐漸增加的半圓周上運動，也許幾百個旋轉後就達到過高的速度，具備幾百萬電子伏特的能。圖二三(a)的彎曲虛線代表離子所經過的一部分螺旋路線。

爲了圓滿實現這種設計，我們須滿足兩個條件。(1) 離子必須沿半圓運動；(2) 推送的時間必須恰當。第一個條件是很容易實現的，而且讀者應當已了解其中的原理——運動的帶電質點經過磁場時發生彎曲。讀者於附頁IV圖二二裏曾注意到電子和正子的彎曲霧跡，其中質點係在均勻磁場中運動；從附頁IV圖二一我們可清晰地看出，帶電質點的路線幾乎恰爲一個半圓。同時，在這種情形中，物理學家能容易地證明上述的彎曲路線確是圓的一部分，而且質點的速度愈高，圓的半徑愈大，至於經過半圓所需的時間，不論質點的速度大小，總是一樣。換句話說，質點

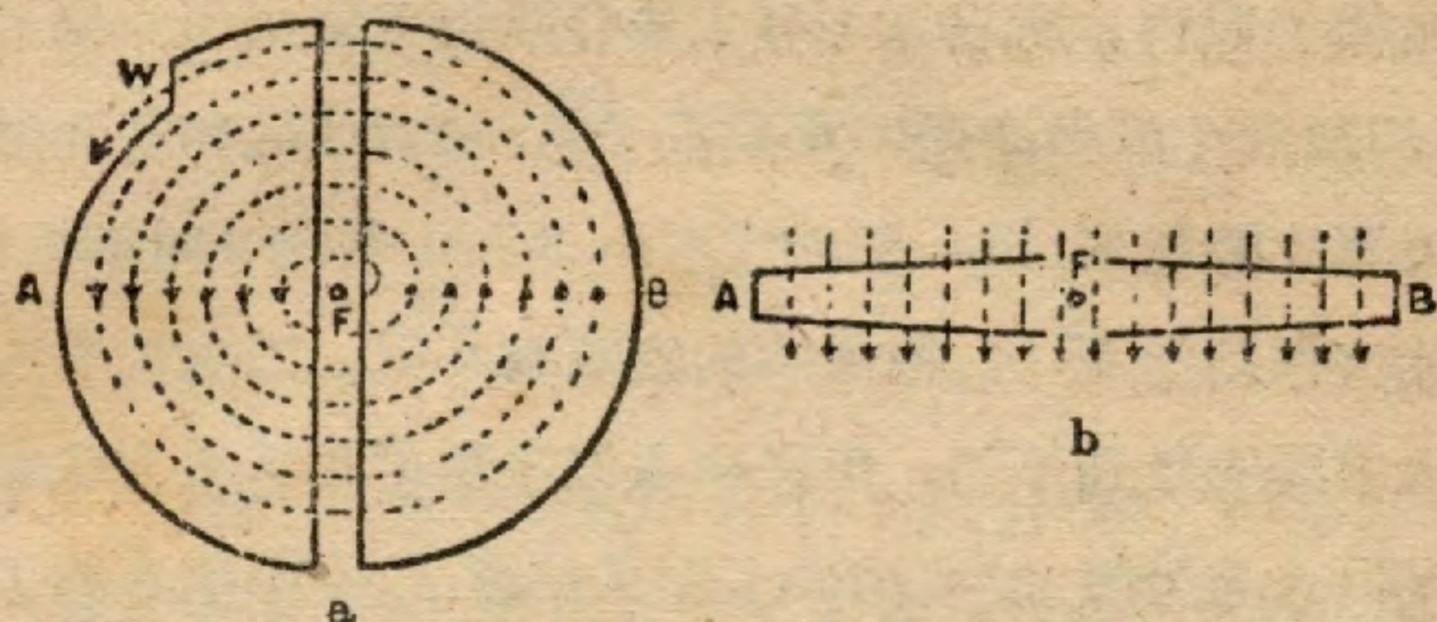
\ominus 迴旋加速器有時稱爲輪轉機加速器 (merry-go-round generator)。輪轉機係西洋一種玩具，爲一旋轉之圓盤，其上裝有假馬或假船，供兒童遊戲之用。迴旋加速器在原理和形狀上頗和這種玩具相似，故又有輪轉機加速器之稱。——譯者註。

沿長而曲度較小的路線運動時，它的速度比沿短而曲度較大的路線運動時為大，超過的數量恰好使它能在相等的時間內經過兩個半徑不等的圓。

偏折大小如原子的質點，需要強的磁場；一個良好的迴旋加速器所用的有力磁石，製造起來，其本身已是一樁巨大工作。附頁 V 圖二四為勞倫斯教授所用的迴旋加速器，其中磁石的大小如下。磁極的直徑超過兩呎。“磁路 (magnetic circuit) 由鑄鋼做成，分為七部，約重 65 噸。”傳送電流使鋼心磁化的銅線係浸於油中，重約 9 噸。照片中鼓狀的東西即這些導線的外罩。

滿足第二個條件時——即在適當的時間推送離子，使它每經一個半圓後便略增加速度——我們利用高頻率的電路於兩導體間維持一個迅速變更方向的電壓。這種電路現在已很普通，無線電波的產生即是一例，但我們不必去深究。總之，在如圖二三所示的兩導體 A, B 間，不難維持一個幾千伏特的電勢差，並使它們更替地由負變正，由正變負，且於一秒中變更幾百萬次。在實際的器具中，A, B 為兩個半圓的空箱，通常謂之“D”或“dee” (圖二三 b)，被置於強大磁石的兩極間。附頁 V 圖二四中，兩個 D 位於照片的中央，可以清楚地看出 (參看附頁 VI)。

使用這種器具時，先將空氣由箱中抽出，而留少量壓力甚低的氫或其他氣體，並在中心處利用熱燈絲之類的裝置製造離子。磁場的強度和電流的頻率應加適當的選擇，以便於 A, B 間電勢變更方向的一段時間內，加速了的離子能恰好經過一個半圓。所



圖二三——A, B 代表迴旋增速器的兩個 D 形導體，圖 b 中的虛綫箭頭表示經過導體的磁場。如使 A, B 更替地爲正或負，並適當地調整更替的頻率和磁場的強度，我們可使自 F 產生的離子作螺旋運動（圖 a 只繪出路綫的一部份），等它由窗 w 脫出時，已具極高的速度。（選自物理公報）

以，離子由 A 被推到右邊的 B 後，接着又由 B 被推到左邊的 A；它繼續着這種半圓周運動，半圓的半徑則在每半轉中因速度增加而放大。離子到達箱的邊沿時，便經過窗 W 進入研究室中。

有時候，離子經過一層薄的金屬窗射入附近的空氣。於是，它們撞擊空氣的分子，使後者放出淡紫色的光。故離子的軌跡是一段由窗口伸出的光柱。這些可由附頁 VII 圖二五清楚地看到，原圖爲勞倫斯教授利用能量達五六百萬電子伏特的重子（deuteron，重氫的原子核）所攝。

如果推送的電壓爲 10,000 伏特，離子經過 200 轉或受到 400 次推送後，即相當受到 $10,000 \times 400$ 或 4,000,000 伏特。事實上，勞倫斯曾利用這種迴旋增速器使質子與重子的能超過六百萬電子伏特。

這架增速器試驗成功後，各處相繼仿造起來。它在研究上的

功用是極明顯的，所以馬上有人集資建造美國加州大學的龐大儀器，以便產生能量高達一萬萬電子伏特的質點。和前面那個迴旋加速器比較起來，這一個的磁石由 3,700 噸的 2 吋鋼板作成，磁極的直徑超過 15 呎，兩極間的空隙為 6 呎。二次世界大戰使這巨大儀器的建造停頓，但後來人們發現可用電磁方法成功地將鈾 235 大量分離，故建造的工作又恢復了。幸而原來的工作在停頓的時候已做得很好，故新的磁石不久便完成了。我們已在 41 頁上講過，這個磁石對於發現原子彈是很重要的。

因此，科學家之能人為地、大量地製造質量如原子而能量高的彈丸，已是無疑的事。他們製造工具，工具也工作得滿意，並被用到核的轟擊上。但這類工具中，有些不是沒有缺點的。迴旋加速器費資巨大，非普通實驗室所能具備，製造起來，它和靜電加速器一樣，也是一個巨大的工程問題。同時，使用這種工具的人員，須受特別訓練，故只有少數機關能進行此類研究工作。魯斯福特研究原子蛻變時，只需一個人使用簡單的設備，現在大不相同了。然而，核卻極頑強地抵抗外來的攻擊，我們必須使用各種方法去擊碎它。如果氦的原子核包括兩個質子和兩個中子，而且 38 頁上對於損失的質量的解釋是正確的，那麼，將這核分為質子約需三千萬電子伏特的能。這種工作還沒實現。無怪科學家不遺餘力去尋求大量有力的質點來轟擊原子核。在下章裏，我們將對已往得到的結果加以比較詳細的研究。

第九章

近代煉金術

1919 以後，因魯斯福特所引起的蛻變試驗，都用放射性物質的 α 線作轟擊質點。氮和其他元素爲這些重的質點轟擊時，一百萬個原子中有一個原子的核被直接擊中，並放出一個氫原子——更準確點，氫的核質子。如此放出的質子能在屏上發生閃光，有時候則於離被擊的原子一呎處看見它們。

作爲彈丸的質子

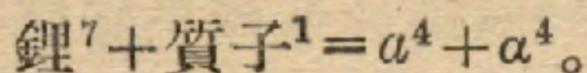
自從有了人爲的方法來取得大小如原子的高速質點，科學家便從事新的轟擊試驗。其中如英國卡克拉伏特 (Cockroft) 及華爾通 (Walton) 等先進的工作都是很重要的。他們用質子作彈丸去轟擊鋰 (lithium)，並得到 α 線 (氦的原子核)。所以，將氫加到鋰，可產生氦。這些試驗的原理是極簡單的。高速的質子經過正極線管射出，擊中鋰作成的靶，於是塗有硫化鋅而與質子嚴密隔開了的屏上發生閃光。閃光的性質有力地表示它們是由於 α 質點而起，以後的霧跡照相也證明確是如此。質子正中鋰的原子核，故而放出 α 質點。在霧跡照相中 (見附頁 VII 圖二六)，一個鋰原子被擊中時有兩支 α 線放出。事實上，這是必然的。我們

只消使用極簡單的算術就可說明這些，同時讀者從此可以認識一個於蛻變試驗中必須應用的數字核驗。在上述的情形中，這個核驗為

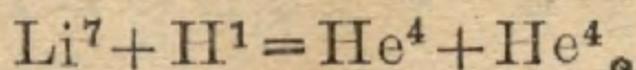
$$7+1=4+4。$$

現在讓我們看看上面核驗的正確意義吧。假如暫時以整數代表原子的質量(至於它們為什麼不恰為整數，以後還要討論)，則質子為 1， α 質點為 4，鋰的兩種同位素分別為 6 與 7。那麼，若一個質子攢入一個質量為 7 的鋰原子核中，而且我們略去因能力變換而引起的微小質量變化(這個問題留待將來討論)，則新原子核的質量必為 $7+1$ 即 8。這恰兩倍於 4，即氮原子核或 α 質點的原子量。所以，假設這個新核不安定而於形成後立刻又分裂為兩個 α 質點，上面的數字核驗恰與我們的假設符合。

如在元素的 **右** 上角用數字代表它的質量序數——如鋰⁷——我們能將轟擊的前後經過簡單地表示出來。下面即鋰被質子轟擊時的表示方法：

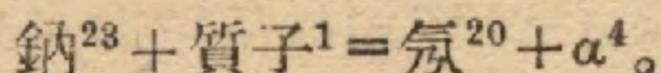


科學家用 Li 代表鋰，H 代表氫，He 代表氦，故上式更縮為

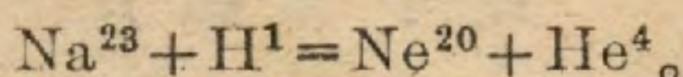


你如不愛使用符號，也不妨礙你研究原子轟擊。

還有一個用質子轟擊的蛻變例子，它滿足 $23+1=20+4$ 的核驗。即



這表示鈉的原子核與質子發生作用後，產生氖、氦等元素。鈉(拉丁文爲 natrium) 的記號爲 Na，氖爲 Ne，故上面的蛻變也可寫爲



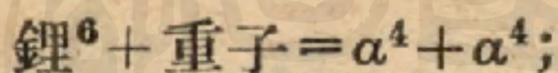
如將 α 質點因質子轟擊而被放出的經過細加研究，我們可證明極高的電壓並非總是必需的。卡克拉伏特與華爾通曾利用變壓器等設備得到 700,000 伏特以上的電壓，但他們實現上面的蛻變時只用了 150,000 伏特。另外的科學家曾利用 250,000 伏特的質子成功地去分裂原子核。這個事實是很重要的，因為它和近代理論物理學的預測相符：根據這些預測，低速的離子有機會透進原子核。這種機會雖不及高速質子的，但有一定的次數。例如，250,000 伏特的質子在 1,000,000,000 個射擊中有一個命中，在同樣數目的射擊中，500,000 伏特的質子則有十個命中。所以，我們能成功地利用低速質點，只要它的數目衆；任何能夠增加轟擊質點數目（即令它們的速度不高）的工具，對於原子蛻變是極有價值的。故用人爲方法所產生的質點的用途較得自放射性物質的爲大，因為我們可以，而且已經，製造人爲的工具，其產生的質點超過全世界所有放射性物質所能放出的。

雖然由低電壓質點所構成的濃密火網對於轟擊原子核極有價值，但這並不是說我們不需要那些產生五百萬伏特的工具。決不是如此的。我們剛剛開始發掘原子核的祕密，因之不應放過每個可能供給資料的機會。所有的核並不都像鋰的那樣容易蛻變，爲了突破其中的防線，往往須用人類所能達到的最高電壓。大自

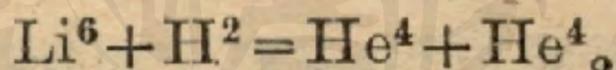
然總是將最高的報酬賜給最勤勞的發掘者。

重子作彈丸

我們在第四章裏已講過，氫有兩種同位素，其中輕的，質量序數為 1，重的為 2，且與前者相差很遠，故特謂為重氫。重氫既出現，自然有人將它的原子核——即所謂重子——作為轟擊的質點。例如，科學家曾用高速的重子轟擊鋰，並仔細研究所引起的結果。這裏發生幾種反應。有時候一個鋰原子放出兩個 α 質點，正如質子轟擊鋰⁷ 的情形一樣。但是，重子卻穿過鋰⁶ 的原子核，其變化為

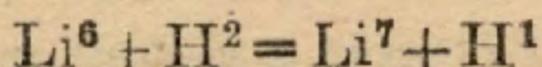
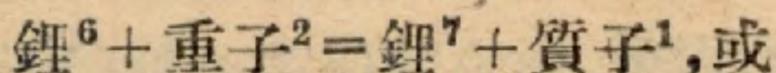


如以 H^2 (有時用 D) 代表重氫，上式變為



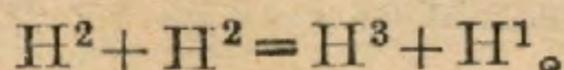
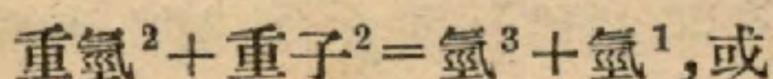
附頁 VI 圖二六的霧跡照相裏，有兩條清晰而方向相反的路跡，它們就代表上面蛻變過程中所放出的兩個 α 質點。

鋰被這樣轟擊時有時候放出質子。近來有人將鋰的兩種同位素分開，分別加以轟擊，然後研究其結果。鋰⁶ 被擊時放出大量的質子。這種結果除表示重子與鋰⁶ 間可起一種以上的作用外，並說明一個有趣的事實，即 $7+1$ 與 $4+4$ 都等於 $6+2$ 。前面一種反應可簡單寫為

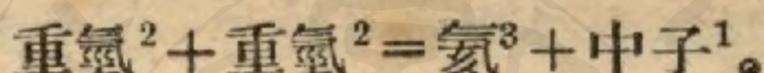


重氫的原子和一種鋰原子結合後產生普通的氫原子和另一種鋰原子。

重子轟擊重氫原子時，有些象蹟表示這種反應包括氫的三種同位素，它符合 $2+2=3+1$ 這個數字核驗，並可記為



質量序數為 3 的氫同位素於自然界中存量極微。同時，在重子碰擊重子的變化中也產生氦³，即



電 荷 核 驗

在轟擊核的試驗中去正確解釋所得的結果，有時不是一件容易的事，所以須應用一種比剛講過的數字核驗更嚴格的核驗。我們研究質量之非整數以及蛻變中的能力變換時，還要詳細討論這個問題。但現在不妨將由重子轟擊試驗所得到的推論提出一下，其中我們不只考慮質點的性質，而且注意它們被射出時所具的能。有些物質（包括一部分金屬如金、鉑等）被高速重子轟擊時，放出質子等物，質子的能可由它經過的最大距離——科學上謂之射程（range）——決定。我們有時發現幾組質子，但從幾種物質放出的質子中，總有一組的能恰好彼此相等。科學家認為這是重子擊中標靶後本身發生分裂的證明。數字 2 只可由一種方法分為兩個整數，即 $1+1$ 。然而我們不能驟下結論道，重子分

裂為兩個質子；因為這種變化雖然滿足核驗 $2=1+1$ ，卻不能滿足另外一個簡單而極重要的核驗。

要了解第二種核驗的性質，我們須記着：描述一個原子時，有兩個數量須為已知：(1) 它的質量(暫以整數代表)，(2) 核中的正電數或原子序數。所以，像在 34 頁上解釋的，普通的氫具有一個質量序數 1，和一個原子序數 1；重氫的質量序數為 2，但它是氫的同位素，故其核上的正電與氫的相等，即它的原子序數也為 1。氦原子或 α 質點的質量序數為 4，原子序數為 2；鋰的兩種同位素的質量序數分別為 6 與 7，原子序數則皆為 3。原子核互相作用或結合時，核上正電的總和於變化前後必須為一常數，即它們要滿足第二個數字核驗。例如，一個鋰⁷ 原子被質子轟擊時放出兩個 α 質點，在這變化中，我們已經講過，質量核驗為 $7+1=4+4$ 。電荷核驗則為

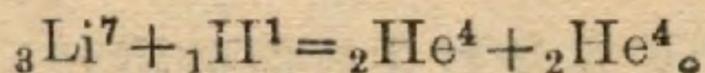
[鋰原子核上的電荷] + [質子上的電荷] =

[α 質點上的電荷] + [α 質點上的電荷]，或

[鋰的原子序數] + [氫的原子序數] =

[氦的原子序數] + [氦的原子序數]。

以數字表示出來，這個電荷核驗為 $3+1=2+2$ 。若使用化學符號，並在符號的左下角以數字代表原子序數，如鋰₃ 或 Li_3 ，則上面兩種核驗可合併為



但你如不喜歡符號，儘可省去它們。

將電荷核驗應用到重子的分裂時，我們發現重子不能產生兩個質子，因為崩解前的電荷總和為 1，而兩個質子的電荷總和為 2。但試驗證明，確有質子放出，故我們不得不寫着：

重子 = 質子 + ?，而且，

應用質量核驗時， $2 = 1 + 1$ ；

應用電荷核驗時， $1 = 1 + 0$ 。

所以上面的問號必須代表一個質量為 1、電荷為 0 的東西。它就是中子 (neutron)。

另一種新的彈丸——中子

中子的存在最先為劍橋大學的喬得維克 (Chadwick) 察覺，但德、法、英諸國對這項發現都有貢獻。德人柏克 (Becker) 和布士 (Bothe) 用鏷 (polonium) 的 α 線轟擊某些物質，尤其是鈹 (beryllium)，鏷族元素之一，它放射 α 線時，無 β 及 γ 線相伴而生) 時，他們發現一種可以透過很厚金屬的放射，並以爲它的性質和 γ 線相似。

接着，耶力阿特 (Joliot) 夫婦 (耶力阿特夫人爲居里夫人之女，居里夫人以發現鏷著名於世) 藉更強的 α 線證明，(1) 這種放射可穿過一吋以上的鉛，(2) 它撞擊石蠟等物質 (其中含有大量的氫) 時，可以放出能量頗大的質子。這裏，質子的產生分爲兩步。 α 線撞擊鈹，鈹發出透射力強且類似 γ 線的放射；這種放射撞擊石蠟，石蠟放出質子。

於是，喬得維克繼續研究。在劍橋大學，科學家曾屢番地去尋求一個質量等於質子而無電荷的質點。早在1920，魯斯福特於他的一篇演講中已提到中子存在的可能；那時，哈爾金斯 (Harkins) 在芝加哥也指出，如將這種質點做單位，重核由輕核構成的問題便很容易解決了。搜尋中子的工作雖然沒馬上得到成功，但開文得西實驗室的科學家們無時不在注意它存在的任何象徵。比如，喬得維克就看出，鈹的放射中至少有一部分為中子，他並設法證明它。本書的目的不是詳細討論這些專門問題，不過在證實喬氏預測的理論中，有一些是不難了解的。

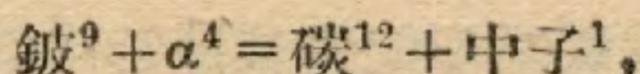
很明顯的，上面所說的放射將質子自石蠟中擊出，我們更不難由質子被驅出後所經過的距離來計算它的能。但如此得到的結果卻證明石蠟的質子決非由 γ 線所擊出。因為在這過程中約需五千萬電子伏特的能，遠非任何 γ 線所及。反之，如果這種放射是由質量約等於質子而具高速的物質質點組成，則上述的現象正與預測符合。用 γ 線來解釋這種現象不啻假定一粒用來打獵的鹿彈（因為光子的質量很小）可將一顆大的礮彈拋出，而用中子來解釋時，則是一個礮彈被另一個礮彈推走，故是合理的。

這種性質可疑的放射既易穿過厚的鉛層，則它們如為質點，多半不致帶電。當帶正電的質點穿過物質時，它和途中原子的電子之間有很強的吸力。故在這個質點所經過的路上，許多原子因其電子被拉出而離化，帶電質點的本身則因能力消耗而逐漸減低速度。對於不帶電的質點，沒有這種強的吸力，因之速度不致

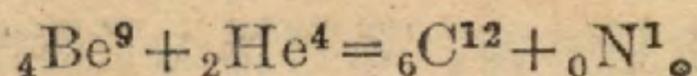
迅速降低。事實上，質點之所以在它經過的介質中被吸收，主要地是由於它直接擊中原子核。不帶電的質點正中原子核所發生的結果，視幾個因素而定：(1)核與中性質點的相對質量；(2)核的性質；及(3)不帶電質點的速度。我們暫時只考慮第一個因素。質量小而速度大的質點碰到極重的核時，只損失少許的能而跳開，但碰到輕核時，能的損失便很大。鈹的放射穿過鉛時比穿過輕的物質還要容易，這頗足證明它是一羣中子，即不帶電的質點，其質量遠較鉛的原子核為小。中子的質量如和質子相等，它們相撞時，大部分的能傳到後者；中子之所以於多氫的物質中驟然減低速度，在這裏立刻得到說明。

喬氏所謂鈹的一部放射為一束中子，不久於其他方面得到證實。例如，我們可用這種放射轟擊氮或其他物質，並攝取霧跡照片；照片中常出現一些短的離子路跡，但路跡的起點與鈹所在處之間沒有任何聯繫。這是不難解釋的。中子離開被擊的鈹原子於霧室中進行時不產生任何離化，但當它擊中另一個原子（如氮）的核且被吸收後，這種結合便產生具有離化力的質點，其路線即照片中那些短的軌跡。

中子出現了。蛻變的試驗證明了一種新的最終質點的存在。物理學家的質點是有增無已。除掉質子、重子、電子和光子外，又有了中子。我們如在開文得西實驗室樹立一塊紀念發現中子的碑，上面應鐫着：



若碑的面積不夠，我們可簡寫為，



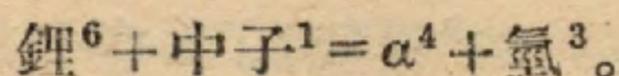
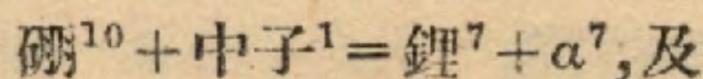
上式中，質量核驗為 $9+4=12+1$ ；電荷核驗為 $4+2=6+0$ 。

然而，這不是得到中子的唯一方法。我們曾指出，重子可能分裂為質子和中子。不久，科學利用高速的重子去轟擊鋰、硼、重氫等元素，如此可以有效地得到中子。這時候，迴旋增速器之類的設備是非常有用的。

中子的重要

物理學家因為兩個重要理由而特別注意中子。第一，這種彈丸穿透原子核的能力遠非其他任何質點可比。帶正電的質點如質子、重子、 α 線等，為帶正電的核所排斥，但無電荷的中子接近核時反受吸引。有時候，中子運動得太快，接近核時不易被捕獲，但它經過一層輕的物質點便緩慢下來。總之，中子被發現後，科學家將它們作為轟擊的質點，其促進蛻變的有效性也得到證明。

下面便是兩個例子：



在生物學界中，有許多試驗也是需要中子來轟擊的。自然，這種試驗可供給有價值的資料。

中子的轟擊和分裂能力可由下面一個事實得到很好的說明。已發現的最快 α 質點不能分裂原子序數大於 19 的元素，而

中子可立刻分裂原子序數很高的元素(如原子量爲 197, 原子序數爲 79 的金)。阜米(Fermi)爲利用中子轟擊重元素的重要先進學者。這種研究和人爲的放射性物質有關,所以我們另立專章討論這些重要的問題。

但現在不妨將 89 頁上的第(2), 第(3)兩個因素提出略加討論, 因爲無電荷的質點與原子核間的作用和這問題有關。我們最好舉出幾個具體例子來說明中子的速度及核的性質的重要性。

(1) 高速中子因碰擊某些輕元素(如氫)的核而降低速度, 但爲另一些輕元素(如鋰、硼)所吸收。所以, 如希望減低中子的速度, 同時避免它被吸收的損失——這在製造原子彈的過程中是個重要的問題——只有一部分輕元素適用。其中最主要的爲氫、重氫和碳。他們被用來達到此種目的時, 謂之調緩劑(moderators)。

5 百萬電子伏特的中子連續與質子碰撞 9 次後, 只具原來能量的 $\frac{1}{5,000}$; 再經幾次碰撞, 僅餘一個電子伏特的幾分之一。這時候, 我們說它們具有熱速度(thermal speed), 因爲其速度和水分子在室溫狀態下的速度相等, 熱中子(thermal neutron)對於利用原子能是很重要的。

(2) 熱中子, 即速度極低的中子, 與鈾²³⁵的核互相作用時發生分裂(fission), 這種重要型式的崩解將在第十三章中討論。

熱中子能爲鎘(cadmium)元素的核所吸收, 這對於控制

某些核反應是極重要的。例如，一束高速中子經過水、石蠟或碳後減速；若想把這些低速中子於達到某物體之前加以管制，可將幾層鎘板放在那物體與水（或石蠟、碳）之間。中子達到物體的數量，視鎘的多少而定，故可利用活動的鎘板加以控制。

(3) 速度極高的中子，因碰擊鈾²³⁸的原子而減速，但不被俘獲。在另一方面，具備普通速度的中子（例如能量為幾個電子伏特的）與鈾²³⁸碰擊時，因被俘獲而形成鈾²³⁹；這種核反應，我們不久就可看到，是製造鐳（plutonium）時一個基本的步驟。

從上面幾個例子看來，當某種速度的中子與某種原子的核接觸時，我們不易預斷所要發生的結果。一種現象發生的或然率，有時大，有時小。專家們用一個叫做斷面（cross-section）的數字來表示這種或然率，其大小多藉直接的試驗來決定。

中子被重視的第二個理由是它簡化了整個原子核的結構問題。這也是一個我們還要回到的題目，但現在不妨略提一下。中子發現以前，人們以為質量序數為4、原子序數為2的 α 質點或氦的核由4個質子和兩個電子組成。這種假定滿足質量與電荷等條件，但如認為氦的核由2個質子和2個中子構成，這些條件也同樣能滿足。不過，重子之分裂為質子與中子，像前面已講過且下章還要提到的，則表示討論核的結構時，質子與中子比電子更為重要。中子可能是由一個質子與一個電子密切結合而成，質子也可能是由一個中子與一個正子密切結合而成。我們不能輕率捨去這兩種可能性。不過最簡單的假說是將質子與中子當作

構成核的最基本單位。這對於研究同位素尤具價值，那時候我們將發現幾種原子的核帶有同量的電荷，而質量則相差1。此處質量增加而電荷不增加，故相當增加一個中子。我們還要回到這整個的問題。



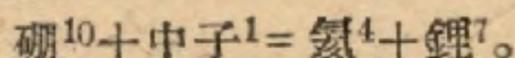
第十章

光子轟擊與一個新的核驗

上章曾舉出幾個例子說明因核轟擊所發生的蛻變。我們已看到， α 質點有時將質子、有時將中子自標靶中擊出；同時，利用質子、重子或中子也可得到 α 質點。這些質點的放出是由於轟擊的彈丸和被擊的核之間發生一種相互作用。這種作用非常密切，以致參加的雙方都失去了本性，並在自我犧牲的過程中創造新的原子。再重複一個已舉過的例子吧，鋰⁶的原子核與重子結合時，產生一個鋰⁷的原子核和一個質子。

在這些蛻變中，我們對最後的產物並無把握。參加反應的物質的數量，除掉極少的情形，大都少得不可以稱量或用普通化學方法去鑑定，故只有藉間接的方法來決定它們的真正性質[⊖]。我們可於霧室裏觀察它們的離化軌跡和經過的最大距離，並應用質量和電荷的核驗。但即令這些核驗都滿足了，我們對於最後的

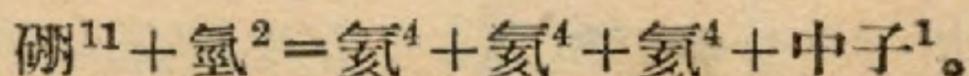
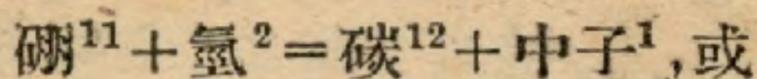
[⊖]至少有一種情形，其中某種蛻變產物是用光譜來鑑定的，它的體積也被量出。那就是潘理 (Paneth) 和他的同僚們在倫敦帝國學院 (Imperial College) 用中子去轟擊硼。這裏的蛻變是



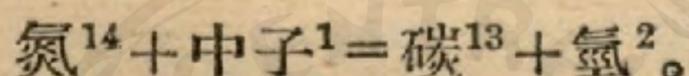
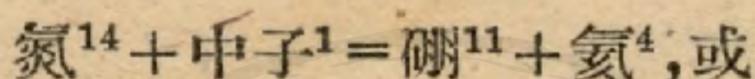
潘理不但藉光譜來鑑定氦，而且曾量中子於一定時間內放出的氦的體積。他研究的體積小到一千萬分之一立方糎，量度的精緻，可想而知。

產物還是沒有把握；下面的情形就是一例。

重子轟擊硼時，放出中子。這是一個無疑的事實，但下面兩種解釋中那個是正確的，便無法決定，即



同時，中子轟擊氮時，下面的反應都是可能的。



在上面每一反應中，質量與電荷的核驗都能滿足。要於這兩種可能的情形中決定一個正確的，我們必須應用另一個核驗。它比質量與電荷等核驗更明白且更可靠，所以在核反應中，如欲決定產物的性質，這個核驗是必須要滿足的。它是解疑釋惑的最高權威。我們爲了方便起見，將它謂之能量核驗 (energy test)。讓我們詳細討論一下吧。

前面曾特別指出，在一切能力互變中，變化前後的總和應當恰好相等。這個基本原則於二十世紀雖未爲任何革命性的觀念所撼動，但應用起來，我們必須考慮愛因斯坦的質量與能互變定律。讀者應當還記得，在四個質子(或兩個質子和兩個中子)結合爲一個氦原子核的過程中，爲了解釋那消失了的 0.030 單位的質量，我們曾利用愛氏的定律，並謂損失的質量代表反應中放出的能。

愛氏定律可用符號簡單記爲

$$E = mc^2,$$

其中 E 代表與質量 m 相當的能， c 代表光速。如舉一個數字的例子，則與 1 單位（根據本書所採的標準）質量相當的 E 為 10 萬萬電子伏特（準確說來，應為 9 萬 3 千 3 百萬電子伏特），約等於一個氫原子（質量序數為 1）完全毀滅時所相當的能。任何核反應中，只要有 0.001，即千分之一，單位的質量消失，所放出的能約為一百萬電子伏特。

愛因斯坦的定律也可寫為

$$m = \frac{E}{C^2}。$$

其實，這和原來的式子是一樣的。但以上面的形式寫出來，它表示任何能量都有一個與其相當的質量。例如，從迴旋加速器吐出的質子，具備 5 百萬電子伏特的能；因為這種運動的能，質子比靜止時的質量多 0.005（以 933,000,000 除 5,000,000）單位。

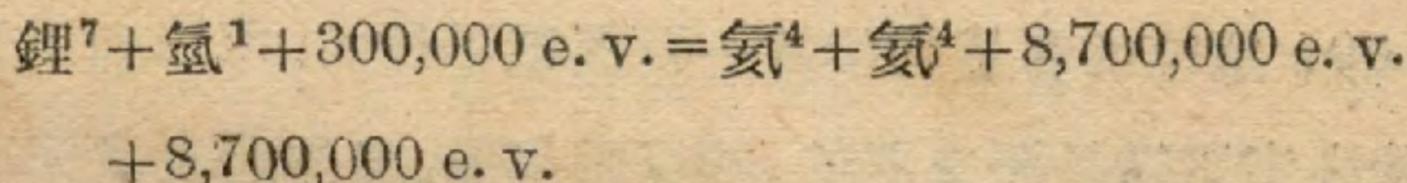
所以，如將能量核驗——其實，它就是二十世紀的能量常住定律——應用於核的蛻變，可得到下面的結論：

能量的總和，包括與質量相當的能，在反應前後是相等的；
或質量的總和，包括與能相當的質量，在反應前後是相等的。

一個能量核驗的例子

原子轟擊鋰⁷時，前面已講過，可產生 α 線或氦的核。在這變化中，一個質子與鋰核結合起來，放出兩個方向相反的 α 質

點。從這些質點的霧跡長度（見附頁 VI 圖二六）可準確計算每個質子離開母體後所具的能。例如，在某一次試驗中，以 300,000 e. v.（電子伏特）運動的質子擊出兩個各具 8 百 70 萬 e. v. 的 α 質點。其中全部變化可寫為



現在讓我們用簡單的算術求出變化前後的質量總和（計算時所有原子 \ominus 的質量序數以用質譜器所得的準確數值為標準）。

變化前	
鋰 ⁷ 原子的質量	= 7.0182
氫原子的質量	= 1.0081
與 300,000 e. v. 相當的質量	$= \frac{8000,000}{933,000,000} = 0.0003$
共	8.0266
變化後	
兩個氦原子的質量	= 8.0080
與 8,700,000 e. v. 相當的質量	$= \frac{3,700,000}{933,000,000} = 0.0093$
與 8,700,000 e. v. 相當的質量	= 0.0093
共	8.0266

在量度的差誤範圍以內，上面的兩邊恰恰平衡。所以愛因斯

\ominus 有人主張使用原子核而非原子的質量，後者比前者大 0.00055，即一個電子的質量。這是真的，但對上面的計算並無影響，因為在方程式的兩邊我們係同時以原子質量代替核的質量。

坦的質量與能互變定律由直接的試驗證明，而且能量常住定律在核蛻變中也成立。

我們可從上面的例子看出，能量核驗比質量或電荷核驗精細得多。自然，準確的質量若非已知，能量核驗根本不能應用。記着，0.001 單位的質量約相當一百萬電子伏特。所以利用質譜器來精確決定質量是極重要的，無怪阿斯登、貝恩伯奇諸氏不斷從事增進他們的量度的精確性。科學家對原子質量作最後決定時，須把各方面的結果加以比較，並代入表示蛻變的方程式中（轟擊的能和放出的能為已知），看看它們是否滿足能量核驗。有時候，所得的結果不像上面例子那樣恰好符合，故研究蛻變的科學家懷疑質譜器的準確性。我們只有仔細重複我們的觀察，直到所得的結果能滿足能量核驗並與質譜器的數值一致。35 頁上第一表就是這樣反覆核算所得的結果。

我們能無中生有嗎？

在上節自能觀點詳加研究的例子中，一個具有 300,000 e. v. 的轟擊質子可擊出兩個各具 8,700,000 e. v. 的 α 質點。這樁交易中產生的能量比質子所損失的多 60 倍。其中的利潤似乎很厚，但不過是表面上的利潤罷了，因為在發出的一千萬個質子中，只有一個直接擊中鋰原子。發射這大量質子的能是消費了，如把它計算在內，則蛻變過程中放出的能是非常不經濟的。大自然對於她所儲存起來的能是守護得很嚴密的。

光 子 轟 擊

我們討論 4 個質子（或 2 個質子和 2 個中子）結合為氦核時，曾屢次指出那消失的 0.030 單位的質量相當於這綜合過程中放出的能。在這情形中，產生的能不是由高速質點（因為沒有這種質點），而是由放射表現出來，即某種電磁波。少量的物質消失了，而產生了放射能。

我們還知道，放射可以消失而供給作功所需的能。例如，在第六章曾略加討論的光電現象中，放射的光子為原子吸收後把電子拋出來。這種反抗核的吸力而將電子拉出來所需要的能，是由放射供給的。

在同一章中我們又指出，光子與一個自由電子碰擊後，有時將它的一部分能傳給後者，而以餘下的能跳走。在這種情形中，一部分放射能變為電子的運動能。

所以，原子核之因吸收放射能而分裂並非奇異。為了實現這種分裂，核所吸收的光子，必須具備充分的能將核的各組成單位撕開。例如，若想把氦核分裂為兩個質子和兩個中子，至少要供給相當於 0.030 單位質量的能。記着，0.001 單位的質量約相當於一百萬電子伏特，所以這裏須用具有 3 千萬 e. v. 的光子。我們還沒發現如此有力的放射，而且也沒人曾這樣去分裂氦核。用一句專門術語說，氦核的縛繫能（binding energy）太大了。

但重氫的原子核的縛繫能只略大於兩百萬 e. v.，能量超過

此數的光子則是可以得到。放射性物質鈾 C'' (thorium C'') 放出的 γ 線的光子，就具有 2 百 62 萬 e. v. 的能，且被喬得維克和哥赫伯 (Goldhaber) 成功地用來分裂重氫。其經過如下：



我們曾提到某些試驗，其中用來轟擊的重子於碰擊時可能裂為一個質子和一個中子。但上例中卻由光子直接產生這種分裂。

這種分裂滿足質量核驗 $2=1+1$ 和電荷核驗 $1=1$ ，如更應用能量核驗，便得到一個很好的方法去精確決定中子的質量。現在讓我們再做一些簡單的算術工作吧。

中子的質量

在平衡表的一邊我們記下重氫原子的質量，以及相當 2 百 62 萬 e. v. (即 γ 線的光子所具的能) 的質量。前者的準確數值為 2.0147 單位，後者，根據愛因斯坦定律，為 $\frac{2.62}{933}$ 或 0.0028 單位。所以這邊的總和為

$$2.0147 + 0.0028 = 2.0175。$$

我們在平衡表的另一邊錄下一個普通氫原子 (它的核為質子) 的質量 1.0081，未知的中子質量以及相當這些質點的動能的質量。喬得維克和哥赫伯曾量度一個質子所產生的離化量，並證明質子和中子的運動能共約為 50 萬 e. v.。它相當 0.0005 單位的質量，所以平衡表這邊的總和為 $1.0081 + 0.0005$ 即 1.0086 再加上未知的中子質量。

平衡表的兩邊必須相等，即

$$2.0175 = 1.0086 + \text{中子的質量, 或}$$

$$\text{中子的質量} = 2.0175 - 1.0086 = 1.0089。$$

將蛻變前後的資料總括起來，我們可得到一張如下的清單：

蛻變前

重氫原子的質量	= 2.0147
相當 γ 線的光子的質量	= 0.0028
共	= <u>2.0175</u>

蛻變後

氫原子的質量	= 1.0081
相當運動能的質量	= 0.0005
中子的質量	= 1.0089
共	= <u>2.0175</u>

電子偶的產生

所以，我們已有充分證據足以證明物質可以變成能，放射能消失時也可作功，或將原子核分裂成各單位。但最奇異的，一個 γ 線的光子消失時，出現一對孿生產物——一個電子和一個正子。正子發現後不久，人們就發現短波的光子經過物質時，立刻產生這種質量等於電子而帶正電的質點。故波長適當的 γ 線穿過鉛層時，正子便被拋射出來。

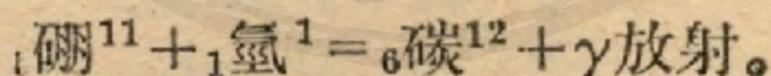
英、美及歐洲大陸的科學家如喬得維克、伯萊開特、安得生、

耶力阿特夫人及麥特納 (Meitner) 曾仔細研究這種現象，並一致承認常有一個正子和一個電子同時被拋出來。我們應用能量核驗就可確切證明光子於核附近全部或一部消失而產生電子偶 (electron pair)。這是一個放射能直接變成物質的例子。這幕變化中，核是一名啞角，它不直接參與交易。不，它具一種控制作用。

我們曾提到附頁 IV 的圖二二 A，它將電子偶的產生顯示出來。

放射的產生

在本章開始所討論的質子與鋰的反應中，因物質消失而放出了 8 百 70 萬電子伏特的能；這是動能，因為它表現於 α 質點的高速度。但核反應也常常釋出放射能或光子。下面就是一例，並足證明愛因斯坦的定律 $E = mc^2$ 。



這種普通的核反應謂之簡單擒捕 (single capture)。

硼 ¹¹ 的質量	= 11.0129,
氫 ¹ 的質量	= <u>1.0081,</u>
故總和	= 12.0210;
但碳的質量	= 12.0039。

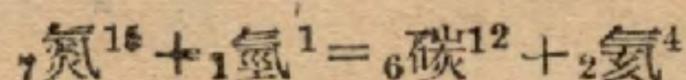
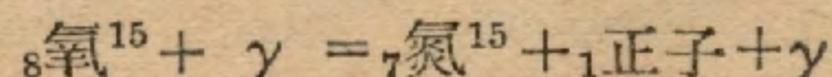
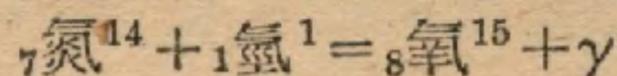
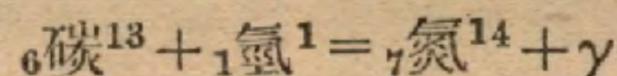
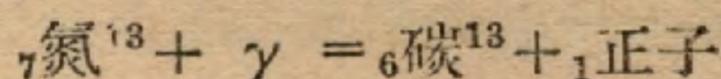
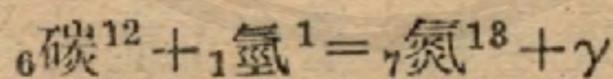
這項交易中損失了 0.017 單位的物質質量。0.001 單位約相當一百萬電子伏特，所以這裏應放出一千七百萬電子伏特的能。我們

可由試驗證明，在上面的反應中， γ 線的最大能量為一千六百六十萬電子伏特。少量的惰性物質又消失了，但出現了和它相當的能。

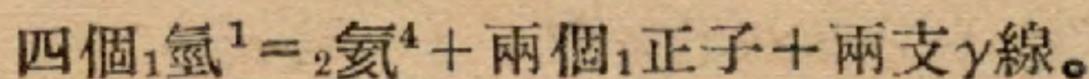
太陽的放射與原子能

幾年前，比斯 (Bethe) 提出一個解釋太陽的放射來源的學說，而且已被公認；關於大規模利用惰性物質的消失而放出能，這裏是個很好的例子。先讓我們看看事實吧。太陽在每秒鐘裏將約達 10^{20} 瓩小時的能傾入空間，並如此繼續了幾百萬年之久。換句話說，如將此能用相當的質量表示出來，則太陽每秒鐘釋出 2 萬 5 千萬噸的放射能。能量如此迅速地產生出來，且經過了天文學上的年代，那麼它的來源是什麼呢？

根據比斯，這種能的來源是與原子有關的，且發生於下面的核反應裏。



若將各式的兩邊相加，即可抵消許多產物而得到如下的簡式



我們一看就知道，上面的變化相當於由氫製造氦；自然，四個氫原子才製成一個氦原子。至於上式中的兩個正子，是因兩個質子（氫¹的核）變成兩個中子而產生的（氦核包括兩個質子和兩個中子）。

我們曾屢次講過，氦原子核的縛繫能約為三千萬電子伏特。換句話說，每有四個氫原子製成一個氦原子，即約可放出這多能。但這裏立刻發生一個問題。上面的過程能圓滿解釋太陽的放射嗎？答案是肯定的。我們如將每一克太陽質量中的質子估計一下——在地球上氫是最豐富的元素——則日球依上述的循環變化所供給的能，可支持三十萬萬年。貞斯 (Sir James Jeans) 說：“太陽的質量只要有五百分之一為氫，它就可供給像現在這樣的放射達二十萬萬年之久，同時，太陽中的氫決不止此數。”

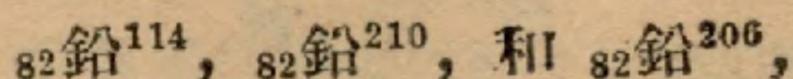
前面的一組方程式有時謂為碳循環 (carbon cycle)。它表示太陽中的氫一定在減少，氦一定在增加，碳與氮則不變。我們由光譜的研究知道，在年老的星球上氫的百分數較年青的星球為低。

第十一章

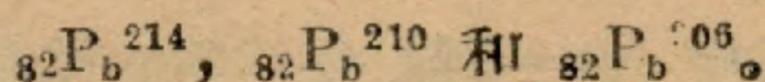
放射元素的形成

第五章中講過，有些所謂放射性的元素能自發地放出 α 質點 β 質點和 γ 線。我們又指出，這種放射的發生是由於這些元素的原子，或更準確點，它們的原子核，是不安定的，不時放出質點。核因爆裂射出帶兩單位正電的 α 質點後，餘下的核的原子序數比原來小二。反之，核放出一個帶單位負電的 β 質點後，多出一個正電，如此產生的新核的原子序數比原來的大一。

一簇放射性元素經過一串爆裂後，它們的原子序數有時增高，有時降低，故某一個原子序數可以出現幾次。例如，在鐳族元素裏，鐳 B、鐳 D 及鐳 G 的原子序數都為 82，質量則分別為 214、210 及 206。這三種同位素的前兩種是不安定或放射性的，因為它們能爆裂為其他的東西，但第三種，鐳 G，並不分裂，而且事實上就是安定的鉛原子。這種普通金屬是個好的例子來說明在自然界中一種原子序數為 82 的元素，同時具有不安定的（放射性的）和安定的同位素。它們可簡寫為



或更簡單點用 P_b 代鉛，則

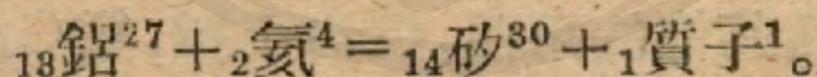


放射性同位素的製造

研究原子轟擊的主要結果之一，便是發現能夠製造元素的不安定或放射性的同位素，這些元素一向被認為只有安定的同位素。讓我們舉一兩個例子吧。

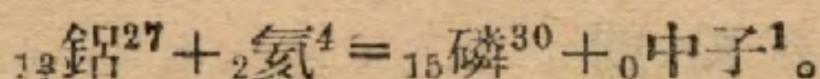
法國耶律阿特夫婦發現鋁葉被 α 線轟擊幾分鐘後，即令轟擊停止，仍可放出正子。他們將鋁葉自 γ 線的來源移開——移到另一間房子去——但葉和帶電的驗電器接近時，後者失去電荷，和自然放射體的情形一樣。鋁葉不久失去所得到的放射性（其強度約在三分鐘內減小一半），但這種現象卻是無可疑義的。鋁因 α 線的轟擊暫時具備放射性。究竟發生了什麼變化呢？

我們若將鋁被 α 線轟擊的蛻變產物研究一下，就可發現在轟擊的時候有時質子被放出，有時則為中子和正子。質子的放出可由下面的變化立刻得到解釋，



這種變化滿足質量和電荷核驗，它的兩種產物一為質子，一為矽元素的已知而安定的同位素，原子序數為 14。這裏沒有一點新奇的東西。

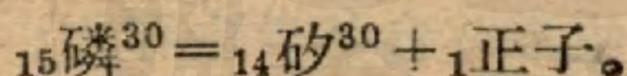
要解釋中子的放出，下面的蛻變必須發生。



這種變化的產物為中子和一種必定為磷的元素，因為它的原子序數是 15。磷是大家都知道的元素，它有一種質量序數為 31 的

安定同位素，但質量序數為 30 的同位素則非其所有。所以耶律阿特夫婦斷定這種同位素是不安定即放射性的，它“爆裂”時放出正子。全部的經過如下。鋁被轟擊時，產生一部分質量序數為 30 的磷的同位素。 α 線的炮火停止後，鋁葉裏便含有一些新的，不安定的，即放射性的原子。它們爆裂時射出正子。

正子的質量小得可以忽略不計，電荷為一個正單位，所以核因爆裂放出正子後的質量和以前相差無幾，但原子序數小 1。磷的放射性同位素的原子序數為 15，故在這種情形中，新核的電荷為 $15-1$ 即 14 個正單位，就是說，其原子序數為 14。因之它必定為矽。這種放射性的分裂可簡略記為



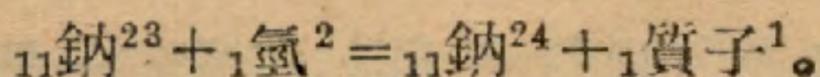
約在三分鐘內，不安定的磷原子變成矽。

爲了區分一種元素的安定同位素和不安定或放射性的同位素，我們使用放射 (radio) 一語。某種元素在自然界中只以安定的形式出現時，這種區分更爲重要。所以上面的例子是討論放射磷 (radio-phosphorous)，一種質量序數為 30 且具放射性的物質，可利用轟擊製取，半世代約 3 分鐘。

放 射 鈉

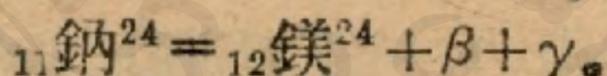
人爲的或誘導的放射性被發現後不久，科學家便證明許多元素具有放射性的同位素。他們發現質子、重子和中子都能有效地製造放射元素 (radio element)。在義大利，阜米及和他一起

工作的科學家用中子轟擊許多元素；在美國則由勞倫斯諸氏充分利用迴旋增速器從事轟擊試驗。藉迴旋增速器發出的重子去轟擊鈉而得到放射鈉 (radio sodium)，便是一個有趣的例子。(普通食鹽為鈉與氯的化合物，可用來代替純鈉。) 在這種情形中，首先發生的蛻變為



注意，鈉²³的原子捕獲一個重子（即重氫的核，原子序數 1，質量序數 2）後，放出一個質子（即氫的核，原子序數 1，質量序數 1），新原子的原子序數和原來的鈉原子一樣。所以新原子仍是鈉，但質量序數增加 1，即，它是鈉²⁴。

鈉²⁴ 這種同位素並不在自然界中存在；它不安定而具放射性，其原子爆裂時射出電子（即 β 線）及與電子相伴而生的 γ 線。放射鈉的爆裂經過如下：

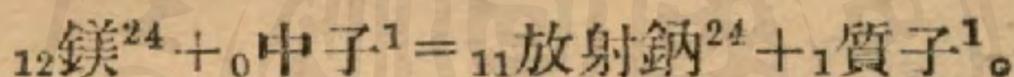


β 質點（即帶負電的電子）的放出，照例使原子核的正電總和增加一個單位；所以在上面的情形中，鈉的原子序數 11 提高為鎂的原子序數 12。質量序數為 24 的新原子是鎂元素的一種同位素；鎂在自然界存在，並很安定。

放射鈉²⁴ 和放射磷³⁰ 有兩個重要的差異。(1) 前者放出電子，而非正子；(2) 放射鈉需要 15 小時以上的時間才能把它本身的一半爆裂為安定的鎂，所以它的平均壽命比放射磷³⁰ 長得多。

勞倫斯及和他一起的工作者近來使用極重的重子羣去製取放射鈉²⁴，他們得到的產量，足以使我們相信人爲的放射性物質可補助——將來可能代替——自然界的放射。這是非常重要的，因為世界上鐳的存量有限，而人類卻需要大量的放射性物質。如使用5百萬電子伏特的重子去轟擊鈉，則一天之內所產的放射鈉²⁴，其 γ 線的功用相當於價值10,000 美金的鐳。

另一個製造放射鈉²⁴的方法是用中子轟擊金屬鎂（原子序數12，質量序數24）。這種蛻變是易於了解的，故不需要詳細的解釋。即



一個魅人的遊戲

我們已經講過，中子、質子、重子、氦的核以及光子都可用來變化原子。所有的元素共有280種已知的同位素，每種同位素——至少理論上是如此——都可作為這些彈丸的標靶，所以研究原子核的物理學家能夠從事千變萬化的轟擊。這種轟擊正在世界各處進行，對於原子核的進攻，幾乎每天都有進展的消息。其中工作的繁複可由下面一些例子想見一般。

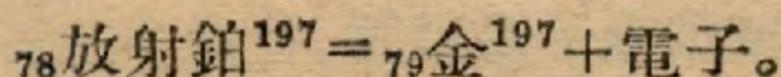
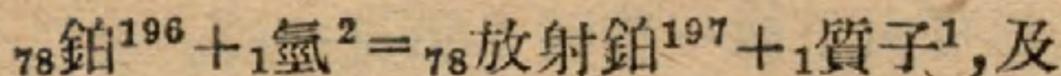
原子序數為16的硫被重子轟擊時，曾產生三種不同的放射元素；第一種的半世代為3分鐘，第二種為33分鐘，第三種為14天。這是可能的，因為硫有三種安定的同位素，質量序數分別為32,33及34，且皆於普通的硫中存在。其中每種同

位素被轟擊時，都產生一種不同的放射元素。著者還願把這些放射元素告訴給一般喜歡親自動手工作的讀者，即 $_{15}$ 放射磷³⁰， $_{17}$ 放射氯³⁴及 $_{15}$ 放射磷³²。寫下這些蛻變方程式不需要解決一個十字謎語 \ominus （cross-word puzzle）的時間，但至少是同樣的有趣。

上面的情形是由一種物質產生三種不同的放射元素，反轉來，一種放射元素可由幾種不同的方法產生。放射鉛便是最好的例子之一。這種放射性的同位素可由五種不同的方法來製造——用中子或重子轟擊鋁²⁷，用中子轟擊矽²⁸，用中子轟擊磷³¹，及用 α 質點轟擊鎂²⁵。

金的製造

古代的鍊金術家曾辛勞地去尋求那塊哲學家的石頭，想把低賤的金屬變成金子。他們失敗了。現代的鍊金術家卻很成功，因為他最近曾由另外的物質製出金子。可惜產量太微了，更糟糕的，那種另外的物質——鉑——比金本身更值錢。在這蛻變中，放射鉑是一種壽命短暫的過渡產物，如下面的過程所示。



這裏是不怕物理學家或任何人來專利這種方法的。

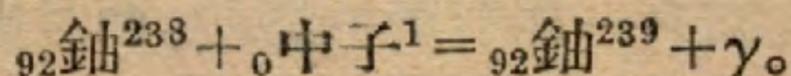
\ominus 即在一遍方格中填入英文字母，使沿縱橫或對角綫的方向都有意義。——譯者註。

鐳 與 鐳[⊖]

自原子彈的使用宣佈後，鐳 (plutonium) 便常在通俗讀物上出現。它是一種原子序數為 94 的新元素，其發現淵源於 1934 以後的幾年裏，那時候原子物理學家正苦心地尋求一些可能存在的超鈾元素 (transuranic element)，即比鈾的原子序數 (92) 還高的元素。這些研究發現了一種新的且今日已舉世皆知的原子核分裂，並證明兩種新元素的存在，即鐳與鐳。我們將在下章裏詳細解釋分裂的意義和重要，現在不妨將新元素的發現記述一下。

第九章中已指出，中子能比較容易地產生核變化。所以最重的元素鈾必應由各種速度的中子來轟擊，因為中子既較易為核擒捕，一種不安定的同位素鈾²³⁹極可能地如此產生出來。科學家發現這種過程確曾發生，尤其是當中子的能量約為 25 電子伏特——即介於高速度與低 (熱) 速度之間——的時候。

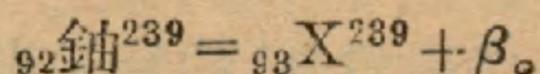
大家研究的最後結果，證明下面的簡單擒捕反應發生：



鈾²³⁹是種不安定的同位素，半世代為 23 分鐘，分裂時放出

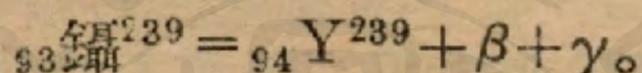
⊖ 鐳與鐳為最近發現的元素。在已知的元素中，鐳的原子序數最高 (94)，鐳的次高 (93)，和天文學上新近發現的海王星 (Neptune) 及天王星 (Pluto) 的情形類似，故分別謂為 neptunium 及 plutonium。中文尚無標準譯名，鐳與鐳係譯者暫就已有之漢字依音譯出。——譯者註。

β 線，即電子。我們已着重講過，爆裂的原子放出一支 β 線後，新原子的原子序數增加 1，質量序數則不變。所以鈾²³⁹的分裂可寫為



因之，X 必是一個原子序數為 93 的新元素。它被稱為鐳 (neptunium)。

試驗證明鐳也是不安定的，分裂的半世代為 2.3 天，並放出 β 和 γ 線。它凋滅時原子序數升到 94，因之我們得到



Y 為第二種新元素，謂之鐳 (plutonium)。和鐳不同的，鐳比較安定，因為它雖放射弱的 α 線，但半世代極長，能和鈾的同位素 234, 235 及 238 一樣地歸入安定的一類。

鐳的重要性，像將在下章講到的，在於它能發生分裂 (fission)。

原子作偵探

放射性的同位素有一個有趣的應用，而且非常重要，所以我們沒繼續討論主題前，值得順便解釋一下如何使用原子作偵探或指示劑。

要了解這種可能性，我們必須記着：元素的特殊標誌是它的原子序數。核上電荷相等（也就是核外的電子結構相同）的所有同位素，具有一樣的化學性質。第 105 頁上曾指出，同位素中的

一種或一種以上可能是放射性的，例如，鐳 B、鐳 D 的化學性質就和鉛相同。原子序數同為 83 的鐳 E 和鉍 (bismuth) 是另一個例子。這兩種同位素如混在一起，便不能用化學方法分開。

遠在人為的放射元素問世之前，人們已看出：少得根本不能稱量的放射性物質既然能因它的離化作用而藉電的方法將它偵察出來，那麼我們應當能夠應用微量的放射性同位素作為追尋或指示的工具。意思是這樣的。假如將大量的安定同位素如鉍和極微量的不安定同位素鐳 E 混合起來，並用醫藥方法將這混合物送入人的體內，那麼，因為其中的放射性同位素能發出射線，不論鉍從人體的那一部分出現，我們可在體外用靈敏的離化器將它偵察出來。

自從科學家發明以不甚困難的方法由普通安定的原素製取幾百種放射性同位素——自此以後，利用原子作顯示劑的工作，在許多方面變得很重要。其中有一兩個值得注意的例子。一般人都知道碘對扁桃腺的重要。自放射碘被發現後，我們能將碘與少量放射碘混合起來送入人體，並利用剛講過的方法證明“正常的和病態的扁桃腺可於施藥後幾分鐘內自血液中攝取碘。”上面是引用伊凡斯 (Robley D. Evans) 的話，伊氏為研究放射性顯示劑的專家。根據他的估計，在這種工作中， 10^{11} 至 10^{15} 個正常原子裏只有一個作偵探或顯示劑的原子。

半世代為 14.3 天的放射磷³²，是另外一個利用原子作偵探的例子；它在研究動植物的新陳代謝時應用很廣。例如，將微量

的放射磷和普通的磷化合物，如磷酸鈉，混合起來，我們可證明骨頭裏的磷原子經常由新鮮原子代替；在植物中，一個原子可於幾天之內由一片葉子移到另一片去。

最後一個例子，是說明放射鈉的利用。如將食鹽（氯化鈉）溶液中加入微量的放射鈉，然後由手上的靜脈注入人體，則二十秒鐘後鈉原子在另一隻手中出現。



第十二章

原子核的構造

對於急於知道原子能與原子彈的讀者，本章即被略去也無妨害。

十九世紀中葉的不可分割的原子已早是明日黃花了。馬克斯威爾所謂“宇宙的不可毀滅的基石”是個複雜的結構。自從電荷為負、數目不等而構成各種原子外圍的電子被發現後，我們又有力地證明重的、帶正電的原子核也是複雜的。在放射性裏，我們曾遇到放射 α 質點的原子；於原子轟擊的過程中，核反應往往拋出質子和中子。我們還講過，科學家因研究宇宙線發現正子，一種電荷為正而與負電子互為孿生產物的質點，並且後來被證明可由人為的放射原子射出。

所以原子的複雜性迅速地增加了，不同的基本單位如何構成各種原子，變成極重要的問題。這個問題離完全解決的階段尚遠，但已有很多進步，且得助於原子轟擊甚大。現在讓我們將原子構造的新觀念描成一幅想像的圖畫吧。

首先，魯斯福特的“太陽系”原子比以前更具權威了。如今大家依然認為原子具有一個重的、帶正電的核，周圍為輕的、帶負電的電子所環繞，電子的數目則恰足中和核的正電。這是一幅

無可疑義的圖畫。故今日的研究在試驗和理論兩方面都是關於核的本身。例如，複雜的核是由那些單位構成的呢？我們已發現很多基本質點，但使上面的問題更難回答。我們反因富有受窘了。質子、中子、電子和正子（見第二表）自然要考慮； α 質點（質量序數 4，原子序數 2）雖不十分基本，但它在放射性的爆裂和原子蛻變的過程中出現，故對原子結構也是特別的一角。同時，我們還不能忘記綜子。

第二表

質 點	電 荷	質 量
電 子	-1	0.00055
正 子	+1	0.00055
質 子	+1	1.0076
中 子	0	1.0089

不管基本的份子是什麼，它們構成的核必須具備正確的電荷和正確的質量序數。因為各種同位素的準確質量都極接近整數，所以我們可以結論道，原子核包括質子或中子，或由這些質量序數為 1 的質點混合而成。例如，質量序數為 2 的重氫可立刻用三種不同的方法解釋：由兩個質子或兩個中子或一個質子與一個中子結合而成。自然，準確地講來，兩個質子或一個質子與一個中子的質量總和略大於這種同位素的質量，但可以不去管它，因為，像以前指出的，質點熔合時，微量的物質可消失而變成能。

爲了辨別上面三種可能的結合，我們須考慮核的電荷，即它的原子序數（重氫的原子序數為 1）。對於這種同位素，我們應適當選擇基本的質點，以便核的電荷總和爲一個正單位。這裏自

然不是兩個中子，因為它們根本沒有電荷；也不是兩個質子，因為它們共帶兩單位的正電。所以在上面三種可能性裏只有一個是成立的，即一個質子與一個中子的結合。事實上，像 100 頁上所講的，重氫的原子吸收一個光子後，可以分裂為一個質子和一個中子。這個原子核的結構似乎是很明顯的：一個質子與一個中子無疑是它的組成單位。

然而，我們還有其他的方法來解釋它的結構。兩個中子與一個質量為 0.00055 單位的正子，可使質量序數為 2 與原子序數為 1；兩個質子與一個電子也能如此，因為電子的負電可將一個質子中和，而使原子核淨餘一個正電。我們能排除這些可能性嗎？事實上，中子與正子未被發現以前，唯有的構成單位為質子與電子，因之所有的原子核都被假定由它們組成。例如，科學家曾認為原子序數為 7 的氮¹⁴的核包括 14 個質子與 7 個電子。這雖能圓滿解釋質量與電荷，但也不無困難存在。普通的讀者即不涉及專門問題，也能了解這些困難的要點。對於原子核有個叫做旋轉 (spin) 的數量，可藉試驗來決定。我們還可由核中質點總和為奇數或偶數來預斷它的數值。由奇數得到一個結果，由偶數得到另一結果。根據核由質子與電子組成之說，氮的核中有 $14+7$ 即 21 個質點，總和為奇數；但根據質子與中子之說，它包括 7 個質子與 7 個中子，總和為偶數。因為根據偶數所預斷的結果與觀察的事實符合，而依據奇數則不然，所以質子與中子之說得到有力的證明。

現在大家公認原子核由中子與質子構成。鋰⁶的核具有 3 個質子和 3 個中子，恰使質量序數為 6 與原子序數為 3。增加一個中子時，質量序數升至 7，核的電荷則不變，故而產生同位素鋰⁷。至於 α 質點之必須包括兩個質子與兩個中子無須詳加解釋。這是極簡單的，而且更重的核的構成也不過是個好的算術練習罷了。但我們也不能輕率地把電子與正子丟開。在試驗中，有一個已被確定了的事實，即自然的或人為的放射性同位素確放出這些帶電的基本質點。它們是那裏來的？有人如此主張，即，核既射出這些質點，後者必為核的一部分。這種主張是很自然的，但我們不宜驟下結論。你當然不相信魔術家由帽子取出的兔子，不過電子與正子的產生或者可用另外的方法解釋。至少，理論物理學家們將原子核構造的全部問題加以分析後，已“假定 β 線的電子並不在原來的核中存在。”你如問這些質點從那裏來的，他們的答案是：“我想，它們是在被放出的時候產生的。”無中生有嗎？不，這正是能變物質的例子，我們還曾舉出證據支持它（見 102 頁）。

假如我們接受上面關於電子（正子的情形也是如此）恰在被放出前而被創造的觀念，則有一個有趣的結果。正子被放出時，核裏必有一個質子變成中子；電子被放出時，中子變成質子。這種必然性是不難解釋的。一個電子的放出使正電總和增加 1，但質量序數不變。所以我們必多得到一個質子（來解釋那增加的一個正電），但少了一個中子（解釋質量的不變）。因之，我們可

以寫着

$$\text{中子} = \text{質子} + \text{電子}。$$

同樣的，一個正子的放出表示它被創造時，一個質子變成一個中子，即

$$\text{質子} = \text{中子} + \text{正子}。$$

α 質點的結構

本書的目的不是詳細討論許多元素的核構造。那是很煩厭的，而且對於著者所欲介紹給讀者的一些基本觀念並無幫助。但氦的核，即 α 質點，值得注意一下。它在許多放射性的爆裂和核的蛻變過程中被放出，僅此一點，它是應當得到特別考慮的。雖然它從沒分裂為更基本的單位，但已往的證據表示它由兩個質子和兩個中子組成。我們早已指出，4 個質子結合為一個 α 質點時，即有 0.030 單位的質量損失。因為中子的質量幾乎和質子的相等（稍大一點），所以兩個質子和兩個中子的結合與 4 個質子的結合沒有什麼區別，無礙我們以前曾着重提出的結論，即，這裏“損失”的質量代表那些質點結合時放出的三千萬電子伏特的能。

從上面關於質量損失的解釋，我們可以看出，如將 α 質點分裂為它的組成單位，必須供給大量的能，而值得注意的，科學家還沒完成此項工作。 α 質點是個特別安定的物體，約具三千萬 e. v. 的所謂“縛繫能”。讓我們把重子（即重氦的核）的縛繫能

和這比較一下。這可立刻由下面的質量得到。

$$\text{質子的質量} = 1.0076; \ominus$$

$$\text{中子的質量} = 1.0089;$$

$$\text{重子的質量} = 2.0142. \ominus$$

一個質子與一個中子於結合前的質量總和為 $1.0076 + 1.0089$ 即 2.0165 單位。結合後僅為 2.0142 單位，所以損失的質量為 $2.0165 - 2.0142$ 即 0.0023 單位。這代表不及 250 萬 e. v. 的能。因之重子的縛繫能少於 250 萬 e. v.，比 α 質點的少得多。能量超過 250 萬 e. v. 的彈丸是可以得到的，故分解重子並非特別困難。

α 質點的情形則不同。它一經形成，就“保持原狀”，無怪這種質點總是“整個地”由放射性的複雜原子核放出。它是一個第二級的安定單位。這還可由另外兩個事實證明。(1) 質量序數為 8 (2×4 , 鈹)、12 (3×4 , 碳) 和 16 (4×4 , 氧) 的核都比它們之間的同位素為安定；及 (2) “在原子序數 30 以前，質量約為 $4m$ ，電荷為 $2m$ (m 為一整數) 的原子遠較其他型式的原子為多。”核愈安定，於自然界中遇到災難或爆裂的機會愈少，因之存量也愈豐富。

我們還記得，在某些轟擊試驗裏（如質子轟擊鋰⁷，81 頁）， α 質點被創造出來。這又是證明它的安定性。自然界裏有一個定律，即於各種過程中“儲存”的能有變成最小的趨勢。被舉起的

\ominus 這些數字可由原子的質量減去電子的質量 0.0005 得到。

重量趨向地球，以便它的位能最小；壓縮了的彈簧準備伸張；同樣的，基本的質點被重行排列時，質量最小的排列發生的或然率最大。 α 質點的形成，在質量方面代表一個比較大的減少，因之是個可能性很大的過程。

總之，原子物理研究的結果，有力地證明質子與中子為構成原子的基本單位， α 質點雖非基本，但因它的安定性而佔一個特殊地位；至於電子和正子的產生，是因為核蛻變時其中的質點發生重行排列的緣故。然而，研究核的結構，現在只是一個開始，而且假如科學上的任何基本問題能夠得到最後答案的話，解決上面的問題還需要許多理論與試驗的工作。

有負質子和小中子嗎？

第二表並不能包括全部基本質點。比如，有帶負電而非正電的孿生質子即負質子 (negatron) 嗎？它的存在只有間接的證明，而且依舊是種可能性而已。又，有種質量與電子或正子相仿（或更小）而無任何電荷的質點即小中子 (neutrino) 嗎？這種質點存在的可能性不斷地被討論着，因為它能解釋一個違反能量常住定律的事實。那些支持小中子存在的主張的要點是不難了解的。有些放射 β 線的核蛻變中，核於放射前與放射後的能顯然相差一定量。我們自有理由相信，這樣放出的 β 線（及連帶的 γ 線）的能，恰等於核所減少的。但事實上， β 線的能的變化範圍很大，有時小得不足以解釋核所損失的。因之有人假定，除 β 線

外核還放出小中子，它具有那部分無法解釋的能。不過這種質點難於捉摸得很，一直還沒人擒住它。

核裏的力量

本書的大部分限於解釋試驗中的事實，但試驗的後面有着基本的理論。理論物理學家的工作與試驗同時並進。核的研究便是最好的例子。讓我們討論一下一個主要的待解決的問題吧。在核裏將中子與質子束於一起的力量是什麼呢？二萬五千萬個原子才能排成一吋長的距離，而核的大小只有原子的萬分之一。但如此微小的核心，如 $_{47}\text{銀}^{109}$ 原子的，卻包括47個質子與62個中子，且束得極緊，很難將它們分開。我們知道，根據普通電學定律，擠在一起的正質點如質子，一定互相排斥，故核裏的質點間必另有一種極強的吸引力。這種力量既能把各質點束在一起，它的性質怎樣呢？這問題的解答是個理論科學家研究的主題。

又，爲什麼同位素銀 109 是安定的而銀 108 是放射性的？還有，溴 80 (bromine) 具放射性，但它凋滅的方法有二。屬於一種同位素(如溴 80)的兩種物質——謂之同位素的同位異性體 (isomer) ——有什麼不同呢？綜子是怎樣產生的？這些以及其他許多問題已在試驗與理論物理學家們共同努力下逐漸得到解答。關於綜子還有一個極重要的事實，即于喀瓦 (Yukawa) 於1935曾由理論上預斷這種質點的存在。

用途何在？

瀏覽這本原子轟擊的故事的讀者有理由問題，關於原子核結構的知識有什麼用呢？它對任何人有什麼好處？為什麼建造那些精細價昂的設備來擊碎原子？回答這些問題時，有幾個事實要說明一下。第一，那羣在試驗室裏度過冗長時刻去發掘原子祕密的科學家，不見得直接考慮到人類的福利。肯思想的人對於尋求自然界的祕密有種不可遏止的慾望。他經常向大自然發問“為什麼”，而且未得到解答前是不感滿足的。他有一種內在的渴求，驅使他從事那些恰足以滿足精神上的好奇的工作。任何創造裏都有快樂，但沒有比發現新事實或新原理更痛快的事。真理的最後目標還沒達到，但在坎坷不平的路上，旅行者不斷地從美麗的新景色裏得到報酬。

事實雖然如此，但當人們攢入大自然的祕密去滿足精神好奇的時候，他們常常從其他方面得到報酬。有些發現始而似乎沒有實用價值，但後來它的應用卻帶給人類無盡的福利。讓我解釋一下吧。很久以前，有人發現金屬線熱至白熱時可放出電子，或說得專門點，發生電子的“熱離子放射”。那些尋求關於這種放射的定律（如它和溫度的關係）的先進科學家，不曾注意到任何可能的應用。他們只想了解這種過程。然而他們的工作的直接結果之一便是熱燈絲的 X 光管，而且每架收音機都利用這種原理來控制。科學家最先研究光電（即金屬因光而放出電子的現象）

的情形也是如此。今天，因為他們研究的結果，我們得到無數光電池 (photoelectric cell) 的應用。康勃通博士於二次世界大戰前曾統計，只在美國，一年內與熱電有關的工業即達 50,000,000 美金。

還有，當馬克斯威爾研究電磁振動的傳播的數學定律之際，他沒夢想到他的工作會造成遍佈世界的無線電網。上面只是幾個例子，它們着重說明了一個事實，即科學上的研究在表面上雖沒有任何實用價值，但這決不是說它將來也不會有。精明的實業家，即一些以營利為最後目的的人們，是相信這個真理的。在那些工業組織所資助的大試驗室裏，許多研究者可以自由工作，他們之攢入每件事的根底，不論有否專利可圖，總是受到鼓勵的。公司的董事們相信，遲早總有基本的發現，而且它們最後可以增加紅利。

研究原子轟擊的基本工作者，是不考慮實用結果的。他們從事於一種魅人的知識的追求。但即令在這方面也有實用結果出現。製造放射性物質如放射鈉時，其產量之多可應用於醫藥問題上及作為研究上的偵尋劑。中子也被用來研究生物，將來的發展正無可限量。

最動人的，人類在 1945 的夏天親眼看到因原子核反應所釋放的能被控制住了。本書的剩餘部分就是解釋人類怎樣完成了這項工作。

第十三章

核分裂與連鎖反應

分裂的發現

我們記述原子轟擊的時候，曾屢番說明少量物質可在核反應中消失而產生與其相當的能。我們還指出，太陽放出的驚人的能，可圓滿地用氫原子製造氦原子來解釋。那麼有個問題必然發生，我們能控制核反應放出的能並利用它作動力的來源嗎？像著者在 39 頁上所表示及於本書第一版（1937）裏所說的“這裏的可能性是驚人，不，簡直是可怖的。極微量的物質的消失所放出的能，如處理不當，可毀滅一個整的國家。”那時候著者並無杞憂，因為，像在 98—99 頁上所說的，他深信着一個事實，即每次核反應雖釋出幾百萬電子伏特，但必須發射和浪費幾百萬轟擊的質點，才有一次直接命中。

1938 發現的分裂[⊖] (fission) 動搖了這個信心的基礎。分裂是個放出大量能力的核反應，並具有一種可能性，即反應一經開始，便自動進行下去。

[⊖]本書譯文中常用“分裂”一語，惟已往多指“disintegrate”而言，即原子核於變化時放出少數質點或射綫；此處所謂“分裂”則自“fission”譯出，特指重元素（如鈾）的核分為兩個約相等的核，並與連鎖反應有關。以後，“分裂”多指此種過程，讀者應特別注意。——譯者註。

幾個國家分享這個發現的榮譽。1938，德國海恩 (Hahn) 和斯達斯曼 (Strassmann) 繼續法國居里和斯維契 (Savitch) 的工作，發現鈾被中子轟擊時產生三種放射體，與鋇元素的化學性質相似；他們最後斷定鋇為鈾與中子反應的產物。極重的元素如鈾（原子序數 92）與中子結合後，分解為比較輕的元素如鋇（原子序數 56），這是一個新的，出人意料的現象，所以轟動一時。然而，它是千真萬確的事實。

接着出現了斯塔克霍姆科學院物理研究所[⊖]的麥特納 (Lise Meitner) 和哥平哈經理論物理研究所[⊙]的佛列西 (Frisch)。他們從理論出發得到結論道，“鈾核的安定性很小，擒獲中子後分為兩個約相等的核。”他們倡用“fission”一詞來表示此種現象，並預測“這兩個核互相排斥，其能量應共有兩萬萬電子伏特。”

假如這個關於分裂的描述是正確的，那麼高速的分裂產物應當使一段空氣發生強烈的離化。不久，佛列西利用鍍鈾的離化室證明果有這種情形。

分裂被發現後，歐美學者相繼研究此種現象，並馬上增加許多資料。下面，我們列出一些重要的事實，並將與發展原子能和原子彈有特殊關係的用大號字印出。

(1) 每一分裂放出的能約為兩萬萬電子伏特。

(2) 除鈾外，釷、錒 (protoactinium) 和釷也可因中子的轟

⊖ Physical Institute, Academy of Sciences, Stockholm.

⊙ Institute of Theoretical Physics, Copenhagen.

擊發生分裂。

(3) α 質點、重子和 γ 線亦能產生分裂。

(4) 熱中子和快中子都能分裂鈾²³⁵，但以前者為速。熱中子也可能分裂鈾，然對鈾²³⁸的作用極微。

(5) 鈾²³⁸的核極可能擒捕某種中間速度的中子而不發生分裂。

(6) 高速中子的放出與鈾分裂相伴而生。

(7) 高速中子與鈾²³⁸碰擊時，可能既不發生擒捕，也不發生分裂，但速度降低。

(8) 分裂雖然產生安定的最終產物(end-product)如碘¹²⁷，氙¹³¹ (xenon) 和鏷¹³⁹，但這些安定同位素都是放射性的中間產物連續蛻變的結果。例如，安定的碘¹²⁷的產生是因為放射性的銻¹²⁷蛻變為放射性的碲¹²⁷ (tellurium)；安定的鏷¹³⁹⊖是放射性的氙¹³⁹相繼蛻變為鏷¹³⁹⊖ (caesium)、銻¹³⁹、鏷而得到的最終產物。

因此，即令是一小塊鈾發生分裂，周圍便有強烈的放射。

從利用原子能的觀點言之，鈾分裂因兩個理由而重要：(1) 每一分裂放出的大量能；(2) 連鎖反應 (chain reaction) 的可能性。

關於(1)，我們已指出每一分裂約可釋放兩萬萬電子伏特，

⊖無標準譯名，此處係暫就已有之漢字依音譯出。鏷原名 lanthium —— 譯

大半表現於那兩塊以高速飛散的碎片的動能。在這過程中，能從那裏來的呢？這問題的答案可由一個極有趣的事實裏尋出，即對於原子量介於極輕的元素（如氫、鋰等）和極重的元素（如鐳、鈾等）之間的元素，它們核中質點（中子和質子）的平均質量，比輕元素和重元素的都小。一個具體例子可以說明這個意思。鈾²³⁸的準確原子量為 238.14，所以核裏中子或質子的平均質量比 1 略大。再來看看鉬¹³⁸。它的原子質量為 137.916，故其 138 個中子和質子的平均質量略小於 1。釷¹³⁹的情形也如此，它是另一種分裂產物，原子質量為 138.955。因此，當重核（如鈾原子的）因分裂而產生具備中間原子量的元素（如鉬，釷）時，便發生質量的消失和能的產生。如果讀者還記得 0.001 單位的質量約相當一百萬電子伏特，他可利用這個數字算出每一分裂應約放出兩萬萬電子伏特。

兩萬萬電子伏特用瓩小時表示出來是個極小的數量。但如有大量的原子發生分裂，即有大量的能。比如，我們由計算知道，若一盎斯的鈾原子都這樣分裂，釋放的能量總和約達兩萬萬瓩小時。

連鎖反應

我們已指出，在鋰被質子轟擊的反應裏，利用其中釋放的能是極不經濟的。這種崩解是將質點自外部射入而發生的，且一百萬顆彈丸中只有一顆能產生崩解。但鈾分裂的情形大為不同，因

爲中子產生分裂，分裂的過程又放出中子。故有一種可能性，即分裂一經開始，這些放出的中子，或其中的一部分，產生更多的分裂，分裂又放出更多的中子，於是發生一種連鎖反應；只要這崩解的連鎖繼續進行，即有能不斷地放出來。能如釋放得過急，就相當一顆炸彈；如放得慢並被控制，便是一個新的動力來源。

有件極重要的事，即讀者應清楚了解上面或其他任何型式的連鎖反應的意義。舉一個極習見的例子吧，如普通的燃燒。火一經點燃，只要燃料能支持，就燒下去。在這情形中，一根火柴使小部分燃料的溫度增高，直到着火。這一小部分的熱使它周圍的溫度升至着火點，於是一個連鎖反應繼續下去，使全部燃燒起來。燃燒雖是一個涉及原子的連鎖反應，然而和我們所探索的原子連鎖切不能混爲一談。在燃燒中，碳原子和氧原子化合爲一氧化碳和二氧化碳，但這些氣體不過是碳和氧的原子結合的分子化合物罷了。於核反應中，兩種元素的原子則完全消失而產生另外兩種新原子。

我們再來研究一下使鈾繼續分裂的連鎖反應的可能性吧。首先，我們要注意一個事實，即假如每個分裂只放出一個中子，連鎖反應便不可能，因爲這不啻說每個放出的中子都可用來分裂新的鈾原子，但前面講過，這是不可能的。中子易被鈾²³⁸的原子擒捕，鈾²³⁸又比易於分裂的鈾²³⁵多 139 倍。所以，假如每次分裂只放出一個中子，它馬上被鈾²³⁸的原子捕獲，連鎖反應也就被打斷了。

那麼連鎖反應發生的條件是什麼呢？明顯的，分裂一經開始，須有充分的中子產生，除彌補鈾²³⁸的擒捕和馬上就可講到的損失外，它還有裕餘來繼續分裂的反應。現在假定少量的鈾發生分裂，且於某一剎那間放出一百萬中子。其中大部分被浪費了，有一些則產生更多的分裂。如新被創造的中子超過一百萬，這種過程便繼續進行，如不及一百萬，連鎖反應便馬上停止。在連鎖反應裏，中子的數目必須維持一定，或更好一點，略有增加。

所以我們必須研究各種中子損失，即它們怎樣才不產生分裂。損失有二。(1)鈾原子、鈾內雜質的原子以及鈾內或附近其他物質將中子擒捕，故不發生分裂。像已指出的，鈾²³³的原子很容易捕獲某種速度的中子而形成鈾²³⁹。(2)中子從鈾簇[⊖]裏逃出。極明顯的，有些中子根本不由原子核附近經過便自它們發源的物質逃走了。

科學家爲了建立連鎖反應，發覺他們必須減少中子不發生分裂的擒捕和逃逸等損失，同時增加它們的產量，即分裂產生的中子數目。

減低中子逃逸的損失

逃逸所致的損失可藉增加鈾的體積而減少。因爲，雖然面積愈大中子逃出的愈多，但體積愈大，作用物質的產量也愈豐富。

[⊖]科學家研究鈾的分裂時，將鈾和用來減低中子速度的物質分層疊砌，這種擺佈謂之簇(pile)。——譯者註。

讀者應記得，球面積與半徑的平方成正比，體積則依半徑的立方而增減，故半徑增加兩倍時，球面增加四倍而體積增加八倍，因為 $2^2=4$ 及 $2^3=8$ 。所以當鈾的體積增加時，因面積而異的中子逃逸和因體積而異的中子產量比較起來，便相對地變得不重要了。科學家尋求連鎖反應時，必須首先估計鈾簇的大小來抵消逃逸的損失。記着，第一個成功的鈾簇用了 12,400 磅的氧化鈾和金屬。

怎樣更進一步減低中子的損失

普通鈾礦的雜質“吞食”極多的中子，以致連鎖無法建立起來。這些雜質必須予以清除。因此，要建立一個連鎖，有幾個附帶的問題必須獲得解決，如大量鈾礦的取得，原料的純化和純鈾金屬的製取。加拿大能供給原料，而且幾家大的商業組織和一羣科學家很成功地解決了純化與製取金屬的問題，所以美國在 1941 年底雖只有幾克[⊖]的鈾，但不到一年的工夫便約有六噸的鈾金屬放在一個簇裏使用了。

我們已講過，分裂主要地是由於鈾²³⁵，而鈾²³⁸則易捕獲中子（尤其是那些速度不大的），使其無法產生分裂。所以，明顯地，我們如能分離鈾²³⁵並單獨使用它，甚至於在一定量的鈾裏提高這種同位素的百分比，那麼中子因被擒捕的損失可以減少，分裂的有效性可以增加。故在連鎖反應和原子彈的研究中，分離鈾²³⁵為

⊖ 30 克約等於 1 盎司。

一個大問題。這個問題於第四章裏已被提到，現在我們只須着重說明它的艱巨。在一個早期研究原子彈的報告中，有人估計需用的鈾²³⁵“不能少於 2,000 克”或二十萬萬微克 \ominus (microgram)。問題的艱巨可由下面的事實看出。小型質譜器只分離微量的鈾，於是由於勞倫斯對於這問題的“極成功的”初步工作，他還是只能在一小時內得到一微克頗為純粹的鈾。接着許多大規模的工廠應用幾種方法從事工作，並分離出大量的同位素，其中最有效的方法曾利用美國加州大學迴旋加速器裏的巨大磁石。

調緩劑的使用

我們曾着重指出，熱中子比快中子更易使鈾²³⁵發生分裂。因此，在一定量的鈾裏增加中子產量的另一種方法，就是將分裂放出的高速中子降至熱速度。像 91 頁上所講的，中子碰撞某些輕元素的原子(謂之調緩劑)而自後者跳走時，就可達到這個目的。高速中子與氫、重氫或碳的核發生幾次“跳走”的碰撞後，即降至熱速度。

因此之故，科學家爲了發動連鎖反應，便把調緩劑和鈾一同使用。因爲使用的方便和純化的容易，石墨(碳)爲最常用的材料。40 呎，即一呎多厚的石墨能將分裂放出的中子降至熱速度。普通的水可作爲調緩劑，但重水的使用更成功。報紙上常有德國人因尋求原子彈而製造重水的消息。用重水裏的重氫作調緩劑

\ominus 一微克等於一百萬分之一克。——譯者註。

比用石墨有效，而且中子因被吸收的損失——這種可能性總是有的——也比用石墨時為少。但，極明顯的，石墨是種方便多了的調緩劑。

調緩劑的使用方法很多。比如，我們可將碳與鈾的相當均勻混合物做成小塊。但有人極端反對這種方法，因為分裂放出的中子達到鈾時，它的速度還沒充分降低，而且，像已講過的，鈾²³⁸易吞食某種中間速度的中子。因此，在試驗連鎖反應的簇裏，鈾與氧化鈾的混合塊為石墨層分開，排成交錯的格子形。在那個最先產生連鎖反應而將永為歷史記載的簇中，“石墨被切成磚形，分層疊砌，每隔一層，四方形的角上置有鈾塊。”這就是那個包含12,400磅金屬的鈾簇。

連鎖反應的控制

即令連鎖反應是可能的，還有重要的控制問題。這個問題有兩方面，視研究的目的為控制動力或製造炸彈而定。如果目的為產生動力，則所謂控制就是發動和停止這種反應。如果目的為製造炸彈，則控制不但指點燃或始動這個反應，而且要使炸彈於放出後在預定的時間發生作用。現在，我們只論動力的控制。

這是可能的，因為，像91頁上已講過的，有少數物質（尤其是鎳與硼）具有極大吸收低速度中子的能力。只要能將純鈾和石墨配合起來使其適於連鎖反應，則幾層包含鎳或硼的活動板便可控制這種反應。當所有的或幾乎所有的鎳板被移除後，反應即

開始；板回復時，反應便停止。塞穆教授在那篇令人欽佩的“發展原子能之軍事用途”中，關於那著名的第一個簇，曾說：“鎳片是插在一些槽裏。”運用這簇時，除留一層鎳片外，將其餘的都移除。簇的設計應使最後的鎳片稍被抽動時，連鎖反應便開始，而能的產生率應易被這片的位置所調節。

延滯中子的放出也可幫助控制。在精確的試驗裏，中子於分裂後並非全部立刻放出，比如，有百分之一被延滯百分之一秒，另有千分之幾則達一分鐘之久。放出的延滯相當於緩和連鎖反應，因之可幫助鎳的控制。

這裏讀者一定想到一個問題。產生連鎖反應的簇內既沒特別的中子來源，最初的中子從那裏來呢？誰開始這個過程？答案是很簡單的。實際上，空氣中總有少許由宇宙線產生的游離中子，同時簇裏還有一些意外的、自發的分裂。

一九四二年十二月二日

我們已看到，使鈾簇維持連鎖反應而釋放能的條件曾得到成功的滿足。一九四二年的十二月二日在歷史中將是一個大的里程碑，因為在那一天，科學家運用前面稱為第一個著名的鈾簇得到了成功。人類第一次利用了原子核的能，第一次證明這種能的來源應用於商業上的可能性，不是一個癡夢。的確，這個簇最先只產生了 $\frac{1}{2}$ 瓦，但十天之後增為200瓦，而且，像馬上要講到的，產生幾千瓩的簇接着被製造出來了。假如人類製造連鎖反應

簇[⊖]的主要目的在控制原子能，使其可應用於和平的商業用途上，我們的故事可在這裏作個愉快的結束。不幸的，那不是主要的，我們還要加上一章來完成這篇故事。



[⊖] chain-reacting pile, 即能產生連鎖反應的簇。——譯者註。

第十四章

原 子 彈

鎊 的 製 造

我們雖已着重指出大量分離鈾²³⁵對於釋放原子能是個重要的問題，但還不曾提及怎樣實際地去使用這種集中了的同位素。在上章所說的那個能加控制的連鎖反應簇中，我們使用的是自然鈾，即幾種同位素的混合物。製造炸彈的情形不同，因為這裏的目的是使分裂產生的快中子在一瞬間發生爆炸性的連鎖反應。快中子與熱中子都能使鈾²³⁵發生分裂，所以如能迅速把這種同位素充分集中起來而不使用調緩劑，猛烈的爆炸便可能了。根據早期的估計，鈾²³⁵的需要量“不能少於 2,000 克，也不能多於 100,000 克”（約 4 至 2,000 磅）。我們如再用每一分裂放出二萬萬電子伏特來簡單計算一下，則全部能量中如有百分之十以爆炸的形式釋放出來，1,000 克的鈾就約相當 2,000 噸黃色炸藥 (T. N. T.)。假設原子彈採用鈾²³⁵，大量分離這種同位素的需要是極明顯的。

但有一個代替的方法，因為鎊也因快中子而發生分裂，故宜於作為爆炸的原料。第十一章已解釋鎊的形成是由於鈾²³⁸捕取中間速度的中子。同時，我們討論利用普通的鈾建立連鎖反應的

可能性時，又指出分裂放出的中子的損失之一，便是它們被鈾²³⁸的原子所捕取。因此在連鎖反應簇裏，有些中子總是附於鈾²³⁸的原子而形成鈾²³⁹，後者，像 112 頁上所解釋的，經過兩次崩解便產生鐳。自然鈾中的鈾²³⁸比鈾²³⁵多 139 倍，所以用簇來製取鐳顯然比集中大量的鈾²³⁵為經濟。至少，我們希望能夠利用另外的爆炸原料來補助鈾²³⁵的不足。事實上，製造連鎖反應簇的主要目的，不是去控制它所產生的能，而是製取用於原子彈裏的鐳。

利用一次分裂等於二萬萬電子伏特以及其他資料，我們不難得到下面的估計。連鎖反應簇如每天製出 1,000 克鐳，則能的釋放率約為一百萬。或 1,000,000,000 瓦。像已講過的，第一個成功的簇只產生 200 瓦，那麼簡單的算術告訴我們，用這簇來製取 1,000 克，需時 $\frac{1,000,000,000}{200}$ 天或約為 14,000 年。著者之寫出這個數字，意在着重說明那個已被圓滿解決的問題的艱巨。第一個簇被運用後不到三年，大規模的工廠已能製取所需的鐳量。

製 造 廠

本書不是用來詳細記述那些龐大的工程設計，但下面的簡略說明或可幫助讀者了解這樁工作的偉大，以及一些必須克服的困難和危險。那個 200 瓦的簇試驗成功後，產生一百萬瓩的半科學的工廠便在美國田納西州的克林通⊖建立起來，它的主要目的是製取相當數量的鐳和研究如何自鈾塊裏提出這種元素。

⊖ Clinton, Tennessee。——譯者註。

自然，提煉的工作主要地是化學方面的問題。接着，在阿克利吉[⊖]和華盛頓[⊙] 可倫比亞河畔的漢福特 (Hanford) 建立了龐大的工廠，其工作包括製造一百萬。以上的簇和大規模分離鈾。我們可由下面的事實窺見問題的巨大；因為克林通廠的建立，阿克利吉不到三年變成一個約有 75,000 人口的城市。附頁 VII 為美國軍部所發表的照片之一，頗足說明那些製造工廠從事的極端祕密工作的偉大。這些工廠的詳情還沒發表，不過我們已知道，在漢福特，“第一個大簇於 1944 的九月成功”，而且，“全廠於 1945 的夏天從事工作，連鎖反應簇和化學分離工作都得到比預期為好的成績。”

還有幾件事情可以說明本書所欲解釋的基本原理。讓我們提出一兩個吧。

水 冷 却

分裂放出的能多半是運動的，即表現於碎片所具的動能。這能變成熱。所以一個生產能力為百萬瓦的工廠必須具有一個冷卻系，來移去它所放出的驚人的熱量。假如用水來冷卻，如一般大工廠所為，則這裏所需的水量可與一個普通城市所需的相近。在漢福特，可倫比亞河為給水的來源。經過冷卻系流回河中的水

⊖即 Oak Ridge，屬田納西州，克林通廠 (Clinton Engineer Works) 即在其地。——譯者註。

⊙指美國西北角的華盛頓州，而非東部的華盛頓首都。——譯者註。

竟使那河變熱了。

放射的危險

我們曾在 127 頁上說過，分裂產生的安定元素如銀與鏷，是一串放射蛻變的最終產物。我們還指出製造鈾時所發生的放射變化。所以，在一個大的連鎖反應中，積有多量的放射物質和相伴而生的放射。這些放射極端危險，故工作人員的掩遮在大工廠裏是個重要的問題。簇被厚的、富吸收性的物質如水泥和鋼所包圍，並由遠處加以控制。將包含鈾的鈾塊由簇取出並移至化學工廠去分離鈾時，須預備抵抗放射的掩蔽。即分離的過程也要由遠處的掩蔽室控制，他如放射性的氣體和溶解鈾塊所發出的酸氣，亦須用高的煙囪導出。同時，我們還得保證：“放射氣體和空氣的混合，不致為害附近的區域。”

自然，我們必須防止任何放射(包括中子)侵害工人的健康。舉一個已被注意到的例子吧，工人的身份牌裏放有沒曝光的感光片，後者對多數放射發生作用。這些感光片於一定的時間內被顯影和檢查，黑暗的程度可斷定它們是否受到過量的放射。

原子彈

這些龐大工廠的工作有個主要的動機，即製取相當數量的鈾²³⁵或鈾以供製造(假如可能的話)原子彈之用。因之除了克林通和漢福特兩處的製造廠外，第三個廠於 1943 的春天在歐本海

麥博士 (Dr. J. H. Oppenheimer) 主持下,於美國新墨西哥州洛撒拉摩斯 (Los Alamos, New Mexico) 的沙漠中建立起來,專事製造原子彈。他們成功了,這是舉世皆知的事。幸而只有少數人知道其中的祕訣,本書著者更樂於不是其中之一。然而,有關原子彈的工作雖依然在必要的祕密中,我們還能再解釋一些它所利用的明顯原理,尤其是那些與本書有關的。

像本章開始所講的,製造原子彈的目的是適當利用分裂放出的能,以便發生爆炸性的連鎖反應。這個問題包括(1)適當的控制,即爆炸於需要的時候(而非需要以前)開始或點燃;及(2)取得迅速的連鎖反應,以便大量的物質於炸彈破片飛散前發生分裂。

連鎖反應,不論是逐漸的或爆炸性的,都可加以制止,因為像131頁上解釋的,分裂物質不達到某種臨界體積,連鎖反應是不會發生的。真的,在早期的研究裏,人們總以為這種臨界體積必定極大,以致無法製造一個可以移動的炸彈。但事實上不是如此的,所以要制止爆炸性的連鎖反應,可將分裂的物質削至臨界體積以下的單位。這些小的單位於爆炸時必須迅速結合起來,使全部體積超過臨界數值。過早爆炸的危險,可藉中子吸收劑吸收游離中子而減少,但我們切不能忘記,各單位一經集合,爆炸性的連鎖反應的開始也依靠這些游離中子的存在。

炸彈破片飛散過速時,爆炸的效率減低,此種情形可藉所謂**箍** (tamper) 來制止。它是一層重物質做成的壁,並因其惰性之

故可延長炸彈裂成碎片的時間。做成重籬的物質還可反射中子，故能減少後者逃逸的損失和削縮臨界體積。（同樣的，連鎖反應簇的周圍是一層石墨籬，它削減簇的臨界體積。）

前面講過，關於爆炸，我們只須利用一種機構充分迅速地使彈內的分裂物質集合起來。至於這種機構和它的控制方法，除了下面幾句擇自塞穆教授報告中的幾句話外，便一無所知了。“迅速裝配原子彈的明顯方法，就是使一部分當彈丸，去射擊當作標靶的第二部分。”讀者不妨自己想像一種適當的設計吧。

一九四五年七月十八日

總之，炸彈製成了，而且它能作用。我們必須把1945的七月十八日和1942的十二月二日相提並論，因為第一次試驗在那天早晨五點半鐘舉行，而且證明最後的目標終被達到了。人類已能設計一種破壞力驚人的工具。大自然更加重這成就的可怖，因為幾乎試驗一開始就是雷雨交加，即令一個莎士比亞也形容不出那天空的凶惡。借麥克伯（Macbeth）的話說，“那是一個傷腦筋的夜。”於是，在黑暗中發生了爆炸，原子彈在鋼塔的頂上，最近的觀察者在六哩以外。

美國陸軍發列爾（T. F. Farrell）准將對於爆炸的情形有下面的記述（發氏為格魯勿斯[⊖]少將的代表，後者即全部原子彈計劃的主持人）：“那些閃電似的景象是無法形容的。一種熾熱

⊖ Lesli R. Groves。——譯者註。

的光照明周圍整個的地帶，比正午的太陽強烈幾倍。那是金黃的，深紅的，紫的，灰的和藍的。它照明附近山嶺上的每一個尖峯，裂縫和脊背，那種清晰和美麗是不可描述的，只有親眼看到後才能想像得出來……爆炸後三十秒，發生逼人的氣流，緊接着便是強的、持續的、可怖的吼嘯，像世界末日的警告，又使我們感到渺小的人類太褻瀆神聖了，他們不該染指那一向屬於上帝的力量。”

原子能真的被釋放出來了，那是美國軍部、工廠共同努力的結果，更重要的，成千成萬國籍不同的最優秀的科學家曾經合作，而且這裏用了兩百萬萬美金。這項工作雖在美國完成，如可倫比亞、芝加哥和加里弗尼亞等大學都有驚人的貢獻，但也得助於英國、加拿大和美國間的合作。英國科學家無保留地供給資料，其中如原子物理的權威學者卡克那伏特博士，喬得維克博士等都在大西洋的這岸積極工作。加拿大不但供給大部分的原料，而且在國家研究院 (National Research Council) 的保護下，“完成一樁加拿大歷史中最廣泛的研究工作。”

一九四五年八月五日

一九四五年八月五日，杜魯門總統發表一項聲明，其開始為“美國飛機一架於十六小時以前向日本重要陸軍基地廣島投彈一枚。該彈之威力超過 20,000 噸黃色炸藥……此即原子彈是也。”

將 來

我們展望將來，立刻看到兩個重要問題。(1) 我們能控制並利用原子能使其適於有益的商業用途嗎？(2) 人類將被自己的創造毀滅嗎？著者願對這些問題再講幾句話，作為本書的結束。

在連鎖反應簇中，科學家證明核變化放出的能是可控制的。那是一個珍貴的發現，但控制這裏放出的能而去開動機械便是另一回事了。將燃燒釋放的能應用到蒸氣機會經過長的時間。我們還得記着，連鎖反應的實現間接地需要驚人的能。在另一方面，我們未嘗不可這樣希望，即，既有了這種發現，為着有益的目的而專心研究原子能的科學家，自然能夠逐漸知道怎樣去實現。比如，分裂釋放的熱一定能被用來產生蒸氣。但這種發展必是一個逐漸的過程，用原子能開駛海洋上的巨艦，尚需一些時日呢。

在最近的將來，原子彈問題更為重要。它掀起許多政治和倫理問題，後者對於任何注意人類福利的人是極重要的。那不是本書範圍以內的事，不過著者深願這惡魔性的工具能立刻產生一種避免人類滅亡的世界觀。杜魯門總統在他的聲明末尾曾如此希望着：“余將進一步考慮，並貢獻意見於國會，如何使原子能變為一種維持世界和平的有力工具。”

還有，原子彈雖像一個惡魔，但它的使用正是幾世紀來一種發展的登峯造極。科學家發現新真理。科學有時被用來達到善的、有時惡的目的。科學家對於濫用他的發現所引起的結果負有

責任嗎？關於這個問題，著者幾年前曾說過下面的話。

事實是這樣的，當人類取食知識之果的時候，他於善惡之間有個選擇。但人類曾濫用科學知識，所以我們如責備那些基本真理的發現者，自然是不公平的。罪惡是人類缺乏善意的結果，並非科學本身有什麼過錯。在創世紀中，當蘭姆克（Lamech）殺死那個青年的時候，無疑地他選擇順手抓到的第一個工具，負責這種屠殺的，是那沒加控制的怒氣而非工具，我們不能因為那個工具能殺人而否認它的益處。不，科學不能因為它的罪惡應用而受責備，錯誤在於人類缺乏良善的精神。科學家和其他方面的工作者是一樣的，沒有更多或更少的罪過。為了達到善戰勝惡的進步，我們必須在人與人間、國與國間培植更多的善意，而非更少的科學。

科學家應當拒絕為原子彈工作嗎？有的拒絕過。那是一個舊的基本倫理問題，讀者自己去回答吧。

第三表

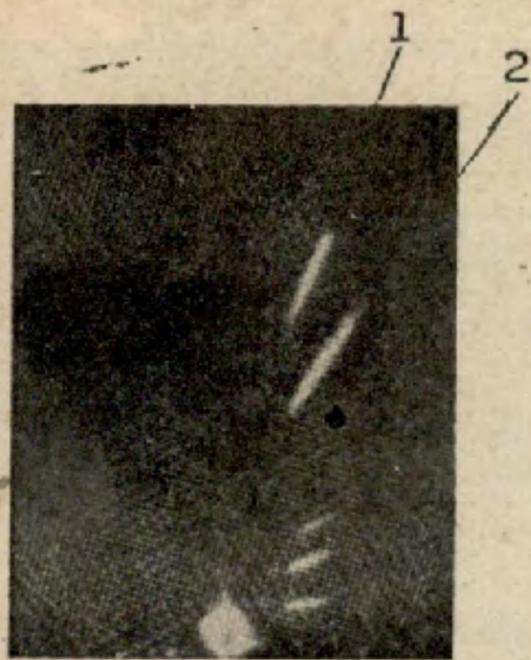
幾種代表元素的原子序數, 原子量, 和安定的同位素。

元素	符號	原子序數	原子量	同位素的質量序數
氫	H	1	1.0081	1, 2, 3.
氦	He	2	4.004	3, 4.
鋰	Li	3	6.94	6, 7.
鈹	Be	4	9.02	9.
硼	B	5	10.82	10, 11.
碳	C	6	12.01	12, 13.
氮	N	7	14.01	14, 15.
氧	O	8	16.00	16, 17, 18.
氟	F	9	19.00	19.
氖	Ne	10	20.18	20, 21, 22.
鈉	Na	11	23.00	23.
鎂	Mg	12	24.32	24, 25, 26.
鋁	Al	13	26.97	27.
矽	Si	14	28.06	28, 29, 30.
磷	P	15	30.98	31.
硫	S	16	32.06	32, 33, 34.
氯	Cl	17	35.46	35, 37.
氬	A	18	39.94	36, 38, 40.
鐵	Fe	26	55.84	54, 56, 57.
銅	Cu	29	63.57	63, 65.
鋅	Zn	30	65.38	64, 66, 67, 68, 70.
銀	Ag	47	107.88	107, 109.
錫	Sn	50	118.70	112, 114, 115, 116, 117, 118, 119, 120, 122, 124.
鋇	Ba	56	137.36	130, 132, 134, 135, 136, 137, 138.
鉑	Pt	78	195.23	192, 194, 195, 196, 198.
金	Au	79	197.2	197.
汞	Hg	80	200.61	196, 198, 199, 200, 201, 202, 204.
鉛	Pb	82	207.22	204, 206, 207, 208.
鈾 [⊖]	U	92	238.1	234, 235, 238.

⊖放射性的, 但半世代極長, 故可視為安定的。

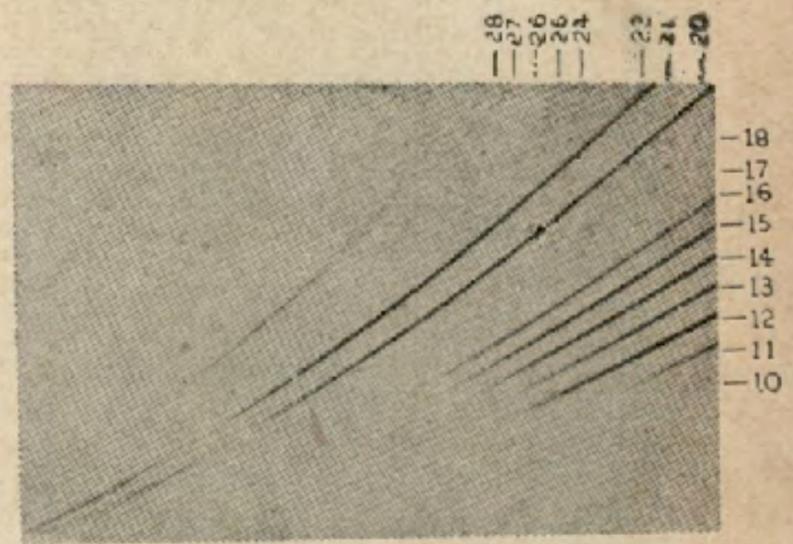






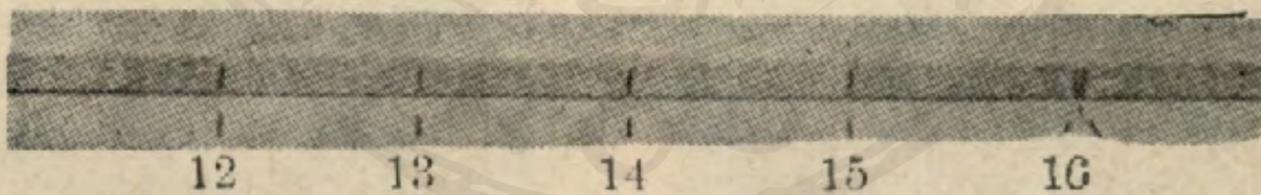
(根據湯姆生，原為英國皇家學會及 Longmans, Green and Company 所有。)

圖十——正極線分析 (早期的“拋物線法”)。每條白線皆為一羣離子碰擊感光板所致。和 1 相對的為氫原子(質量序數 1)形成,和 2 相對的,則由於氫分子(包括兩個原子)。



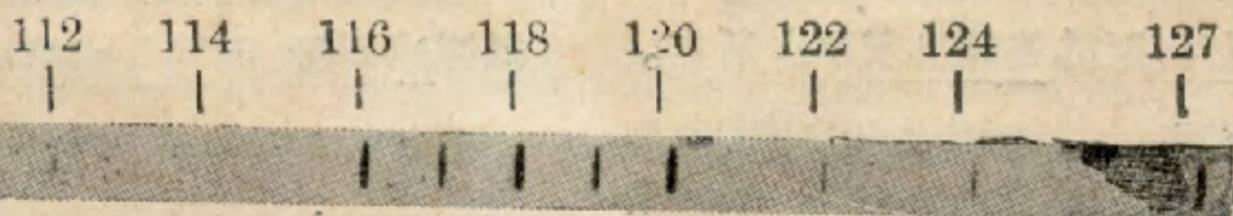
(原載 Zeitschrift für Physik。)

圖十一——正極線分析 (後期的“拋物線法”)。氦的同位素於圖中出現,其質量序數分別為 20, 21 及 22。



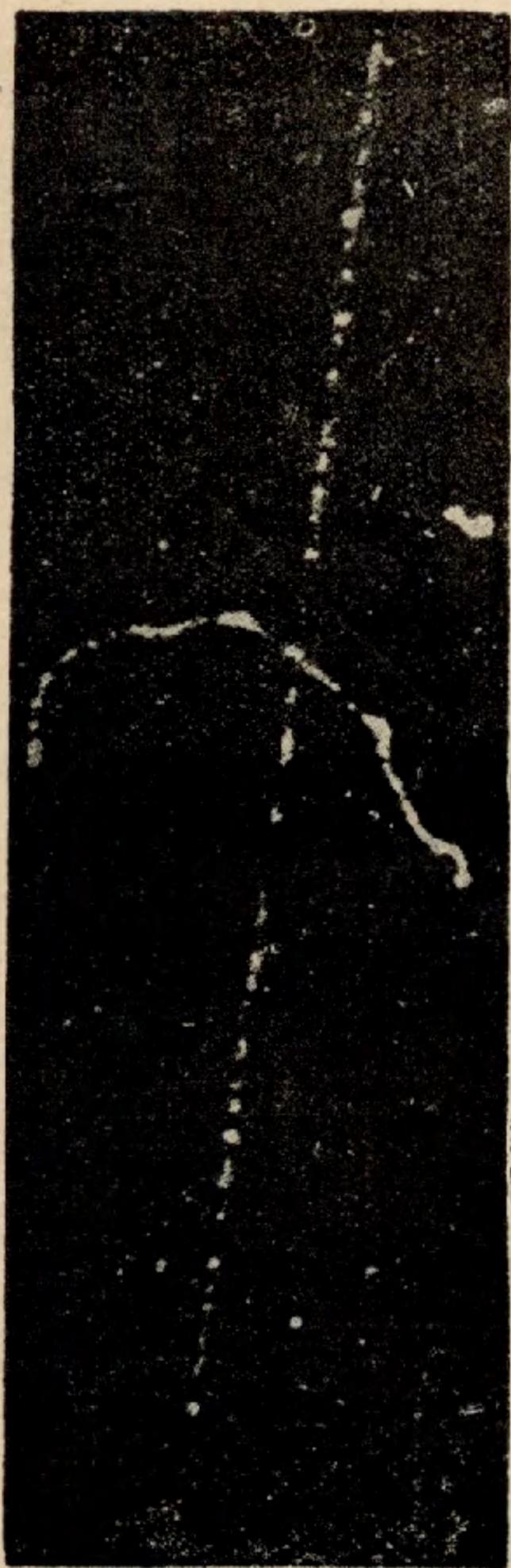
(根據阿斯登,原載富蘭克林研究所公報。)

圖十二——用質譜器分析離子。每條短線相當於一組質點,圖中所註的數字即質點的質量序數。16 處的兩條線,一由於氧原子,一由於質量幾乎等於氧的化合物。



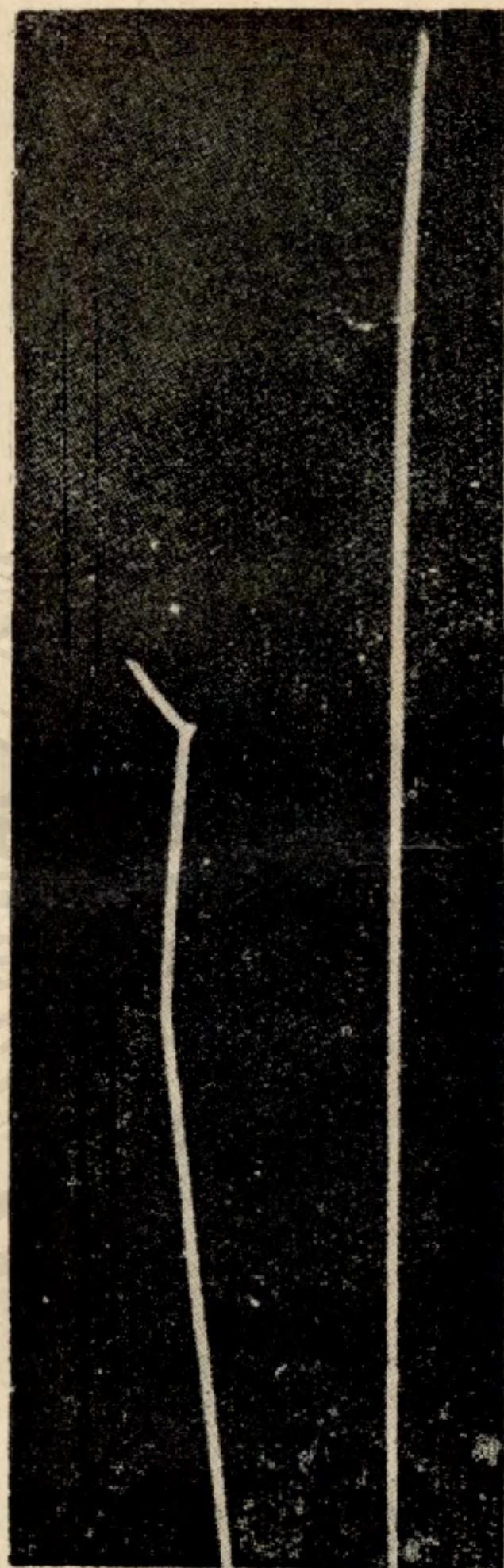
(根據貝恩伯奇,原載物理公報。)

圖十三——另一條質譜。圖中的線除 127 外,都代表錫的同位素。



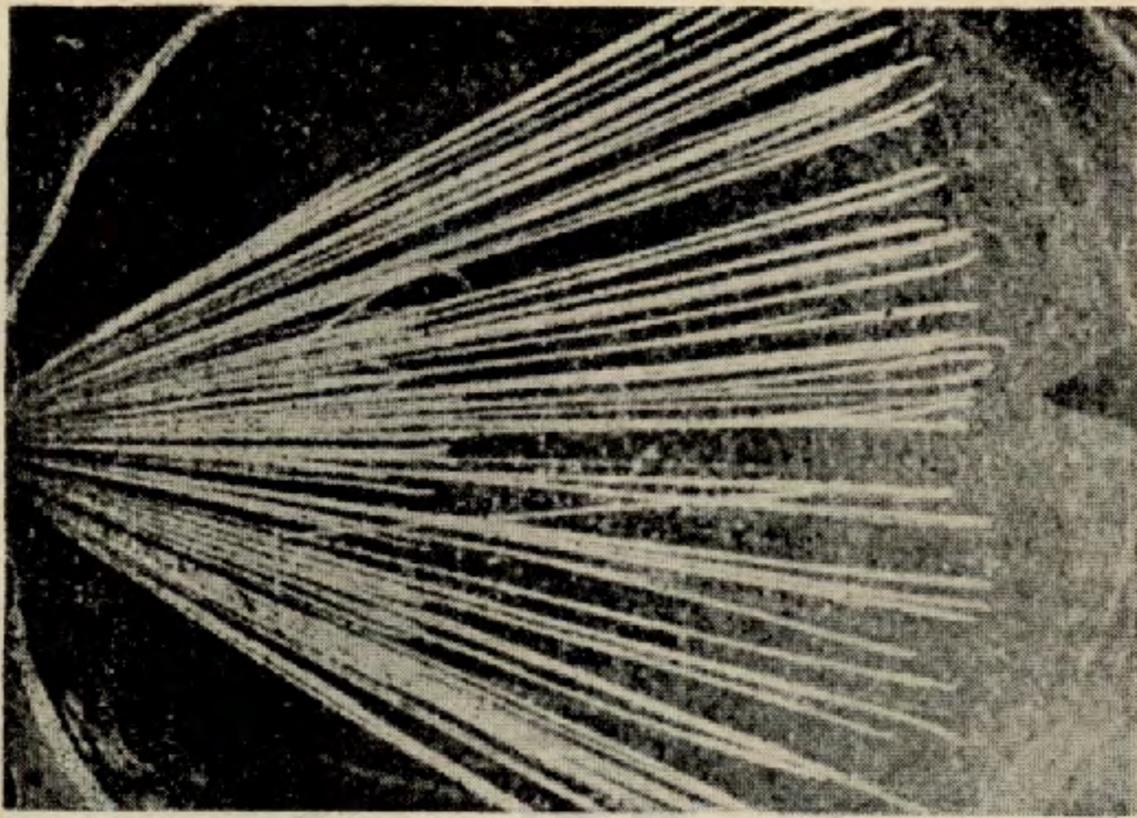
(根據威爾遜,原爲英國皇家學會所有。)

圖十四——高速 β 線的霧跡照相。直線上每一小點相當一顆凝結於離子上的水滴。那一串離子代表 β 線的軌跡。另一條由小點連成的不規則曲線,爲低速電子形成。



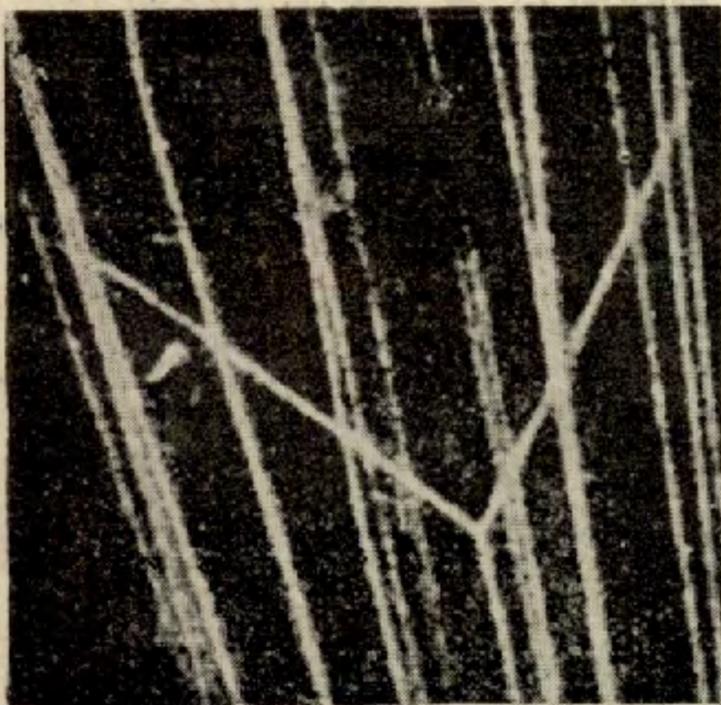
(根據威爾遜,原爲英國皇家學會所有。)

圖十五——兩個 α 質點的霧跡照相。 α 線產生的離子極多,所以個別的水滴形成連續的線。



(根據費塞[⊖]，原為英國皇家學會所有。)

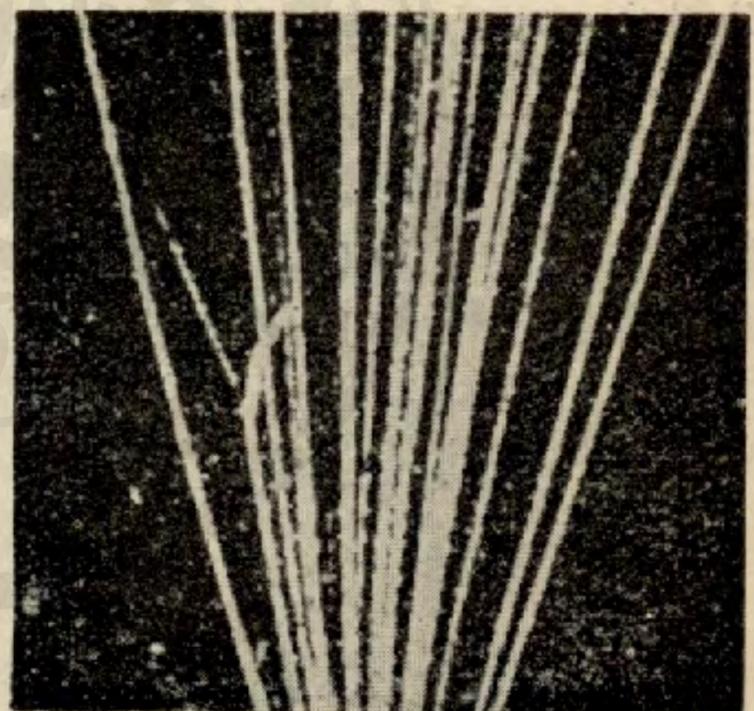
圖十六——上面的霧跡照相表示一陣 α 質點自一個小的來源放出。注意其中短的和長的射程。



a

(根據費塞，原為英國皇家學會所有。)

圖十七—— α 質點與氫核碰擊時所發生的折散。 α 質點沿 a 處的路線前進，碰到氫核，折而沿叉的一支運動，被擊的核沿另一支離去。

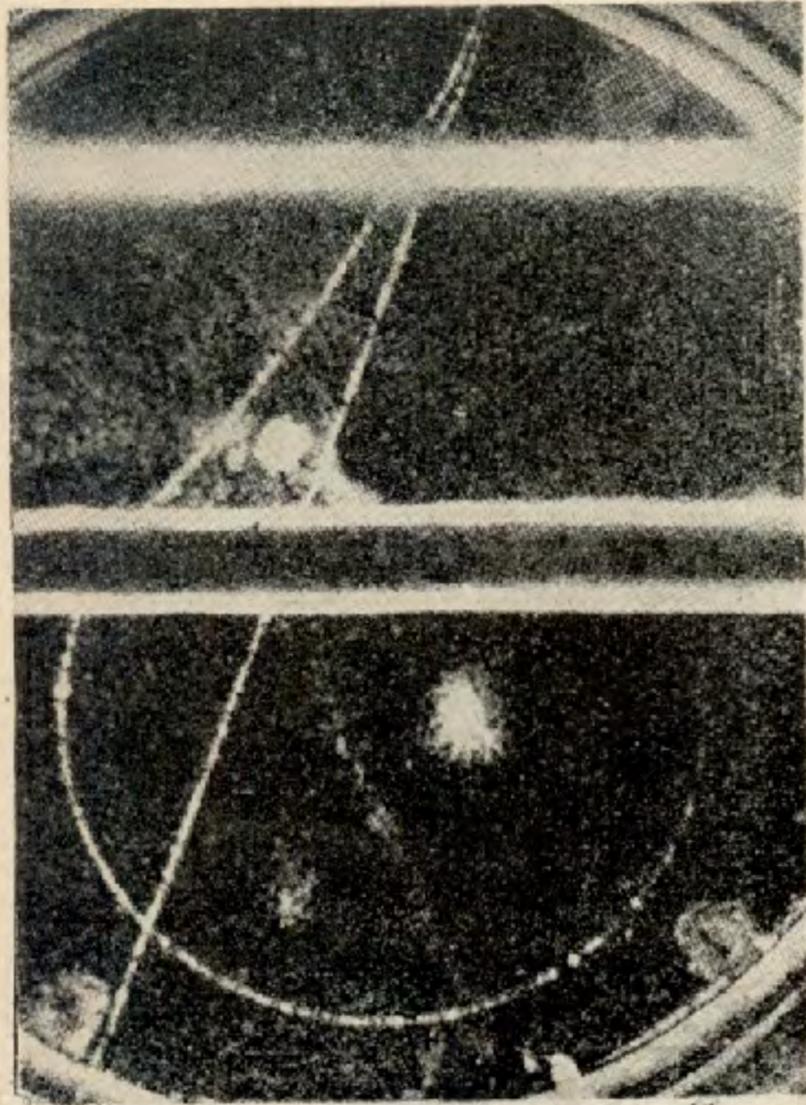


b

(根據伯萊開特，原為英國皇家學會所有。)

圖十八—— α 質點與氮原子碰擊時發生的崩解。 α 質點沿 b 處的路線前進，碰到氮核而被擒捕。接着發生崩解，叉的左邊長而細的一支，代表放出的質子的軌跡，右邊短而粗的一支，則為放出的氧原子的軌跡。

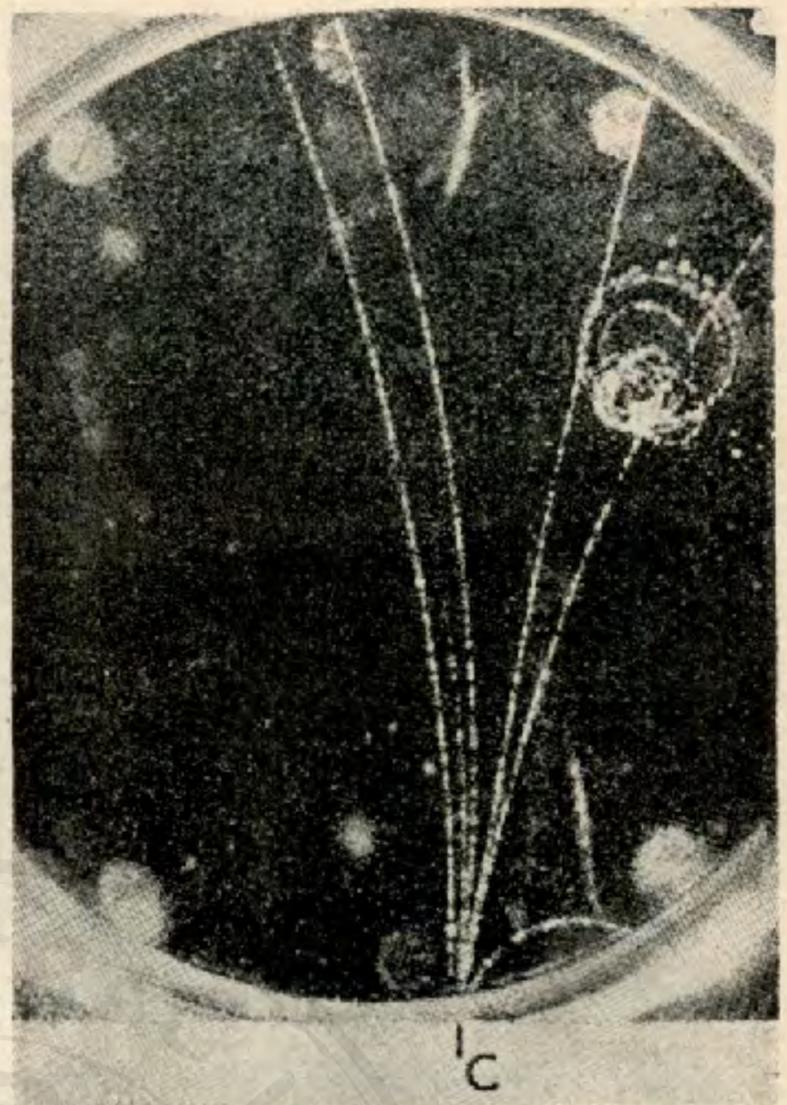
⊖ N. Feather。——譯者註。



(根據安得生與尼得米爾[⊖],原載物理公報。)

圖二一——直的軌跡為極快的宇宙線所致，下部的圓形路線代表比較緩慢而發自鉛板（即橫越相片中部的兩條白線）的正子。恰為圓形的路線，說明均勻磁場對於速度不大的帶電質點所發生的影響。

圖二二A——電子偶。圖中自一點出發而曲度相反的兩條路線，代表一支 γ 線消失後所產生的正子與電子。



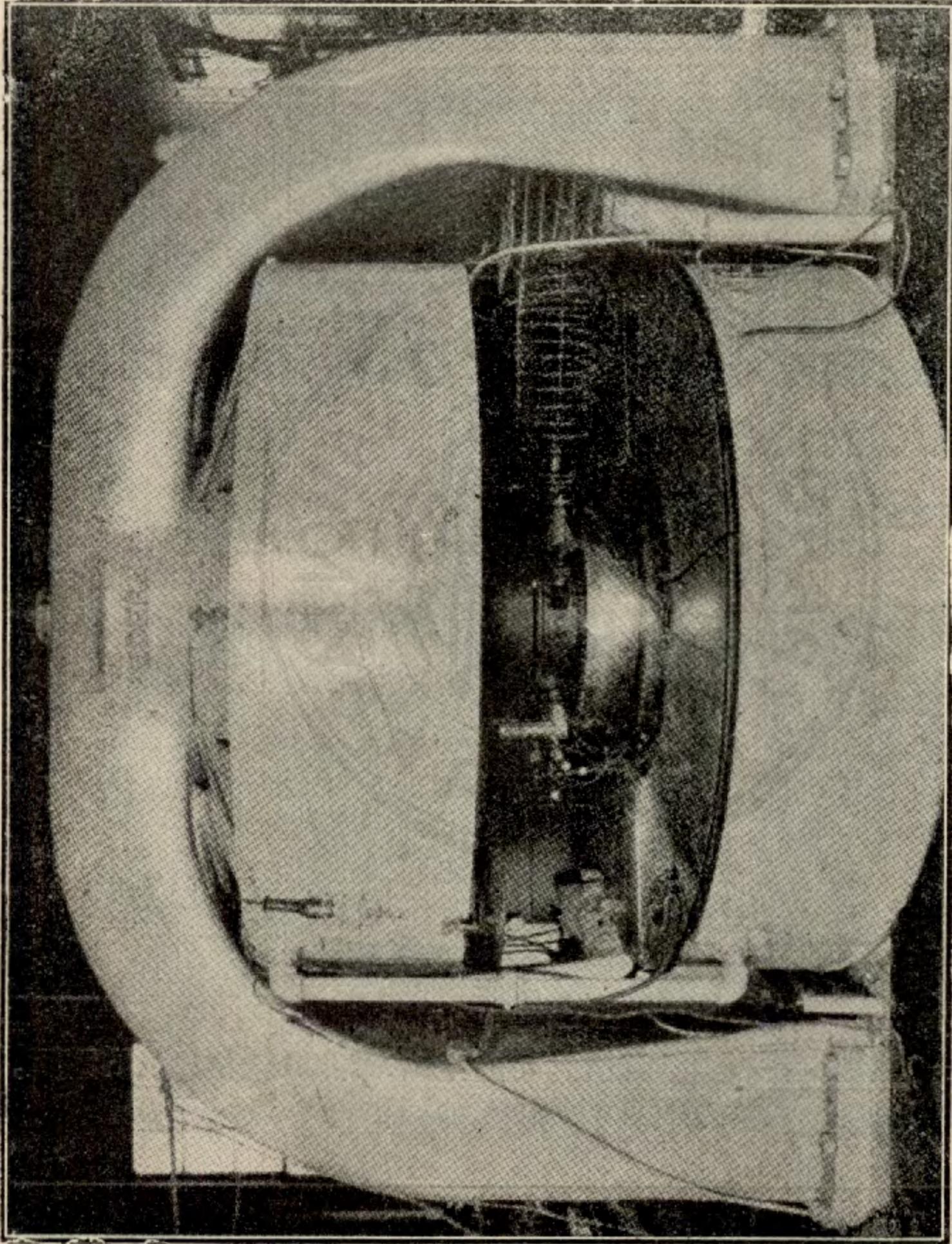
(根據尼得米爾)

圖二二——因宇宙線碰擊的結果，霧室周圍的物質產生電子和正子，上圖即表示一陣這樣的質點自中心C發出。注意那些慢質點的圓形封閉路線。



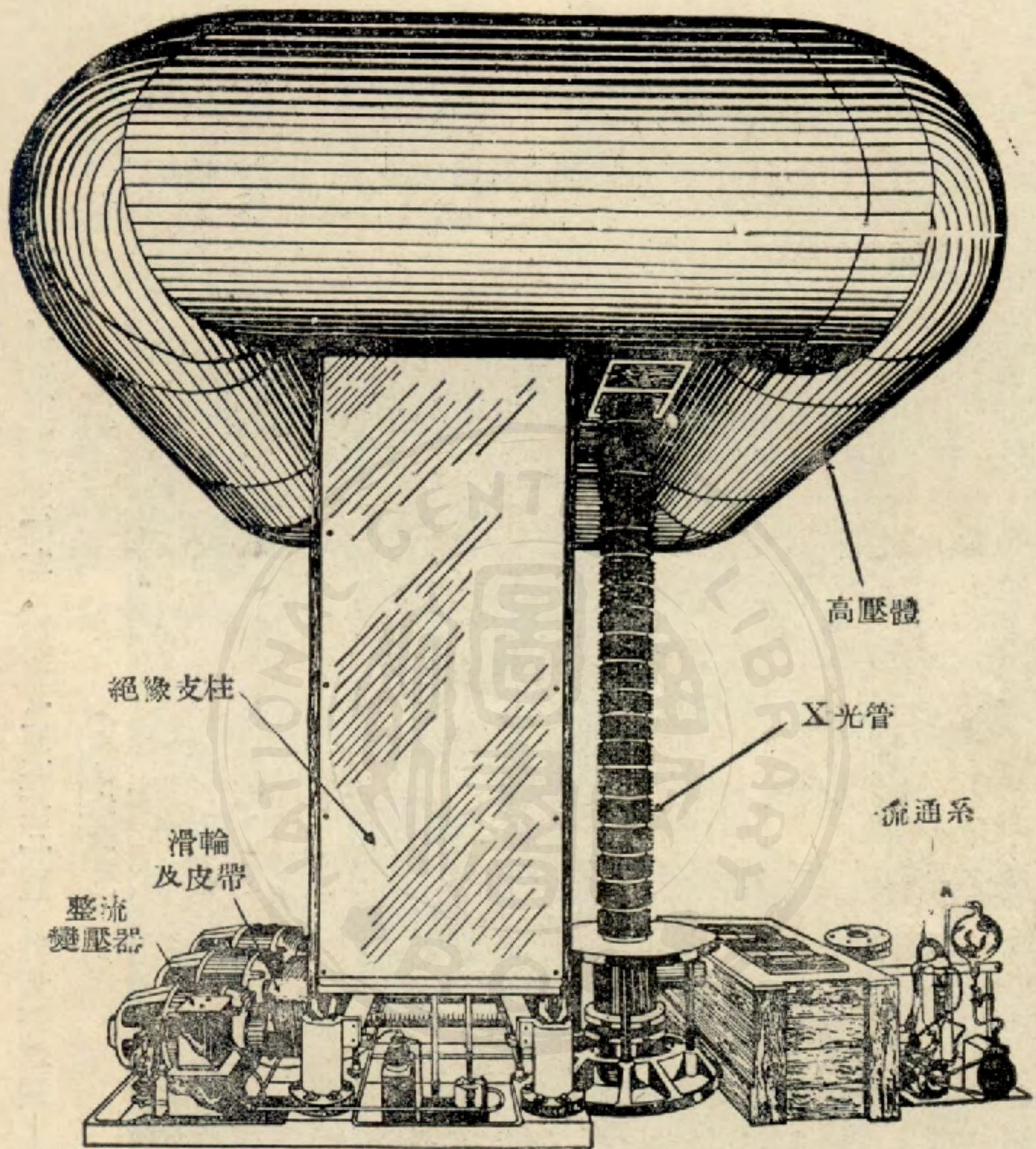
(根據耶力阿特夫婦)

⊖ Seth H. Neddermeyer。——譯者註。



(根據勞倫斯)

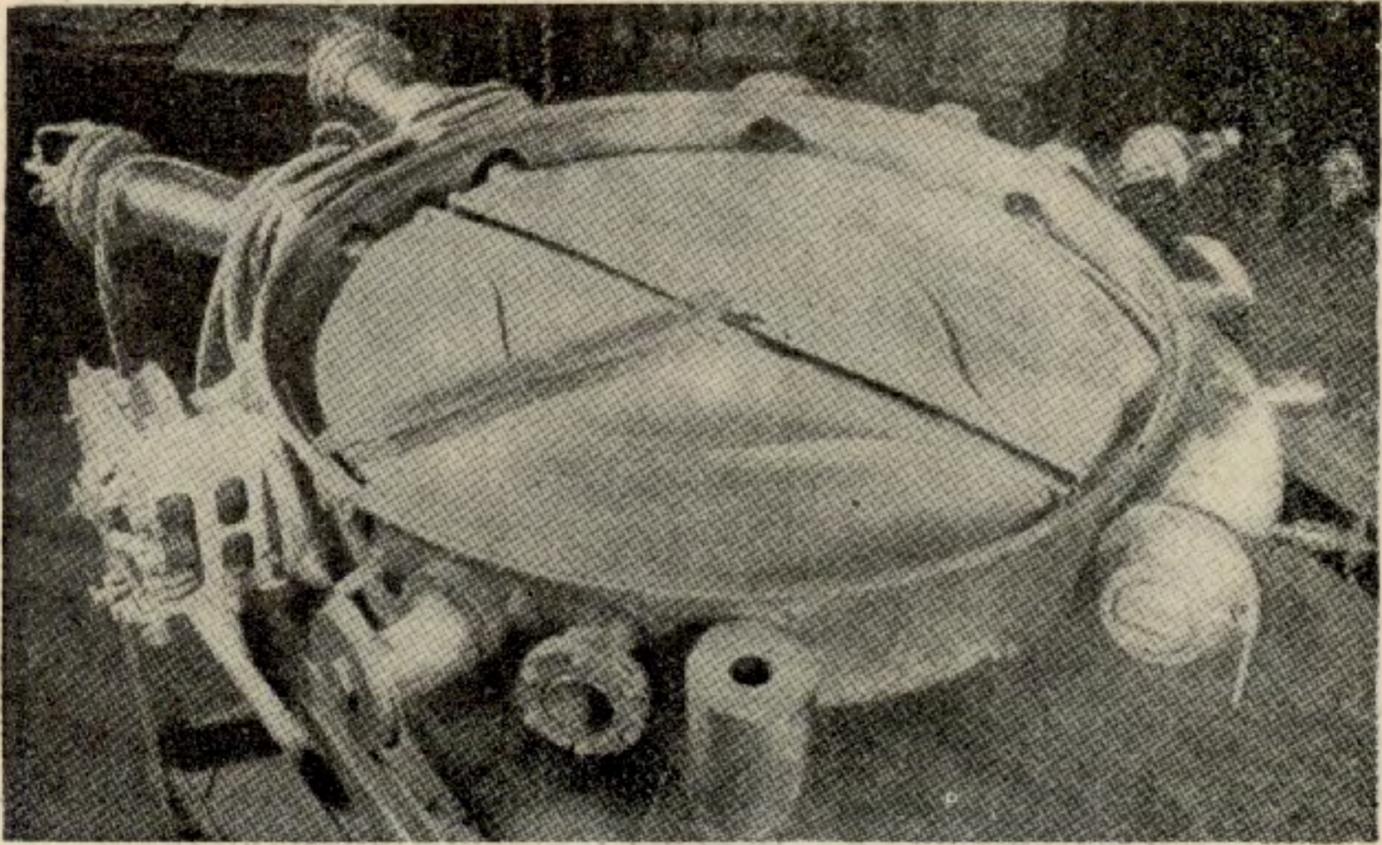
圖二四——迴旋加速器。圖中的兩個大鼓裏，封有通電的線圈，使斷面很大的鐵心磁化。圖二三所示的“D”，係置於巨大磁石兩極間的空隙中。



(根據特拉勃[⊖])

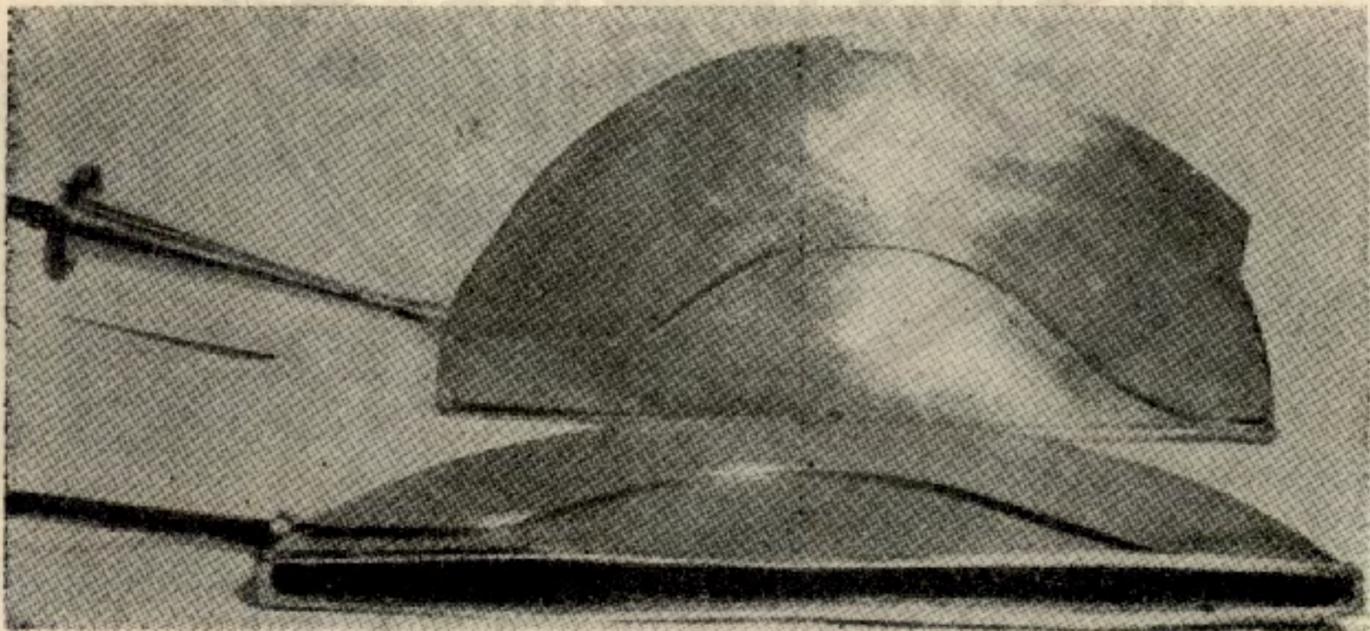
圖二三B——凡底格拉夫靜電增速器，可產生 1,000,000 伏特以上的電壓。

⊖ J. G. Trump。——譯者註。



(根據漢得生[⊖])

圖二四 A——普杜大學[⊖]迴旋加速器中的 D。

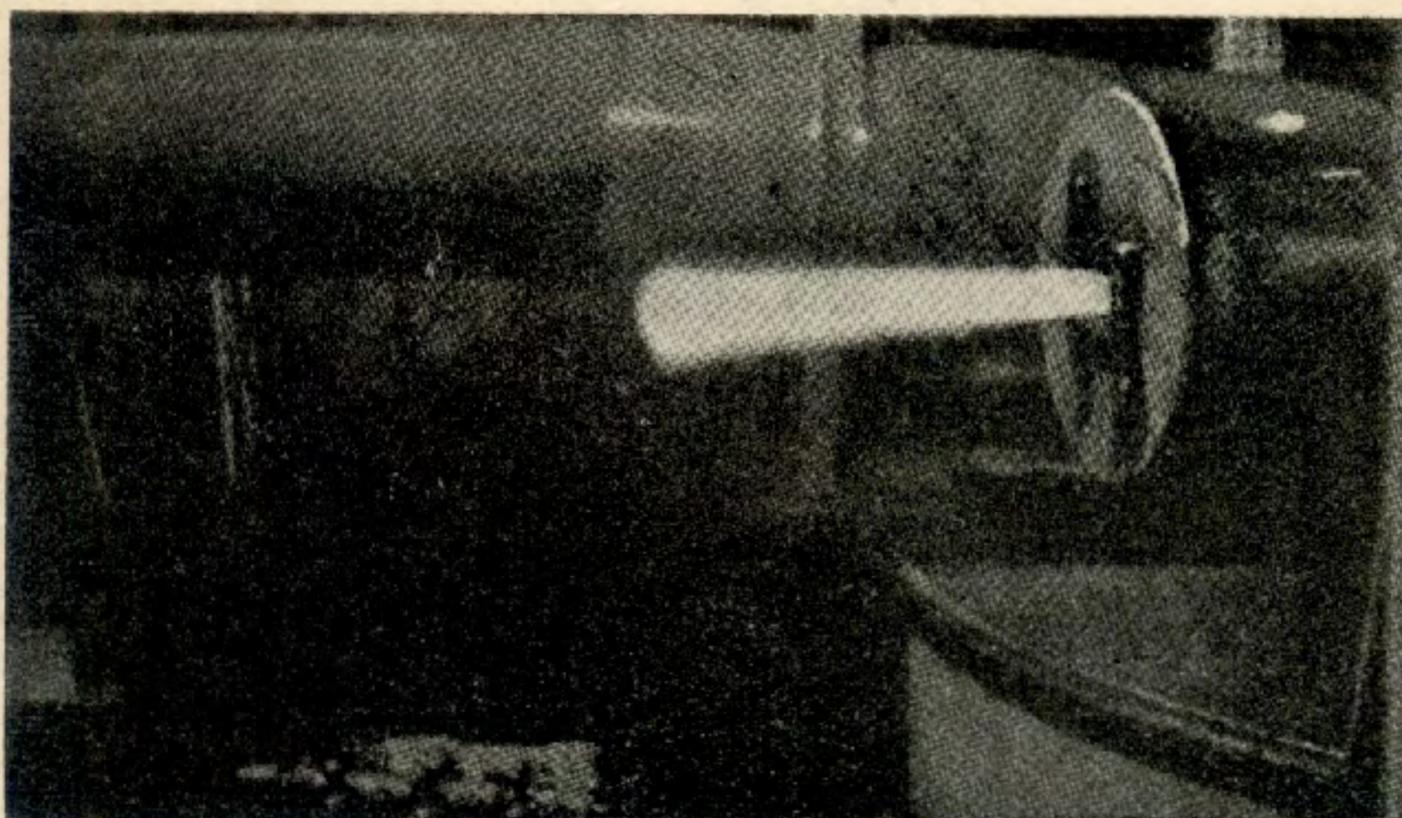


(根據漢得生)

圖二四 B——從另一個角度看普杜大學迴旋加速器中的 D。

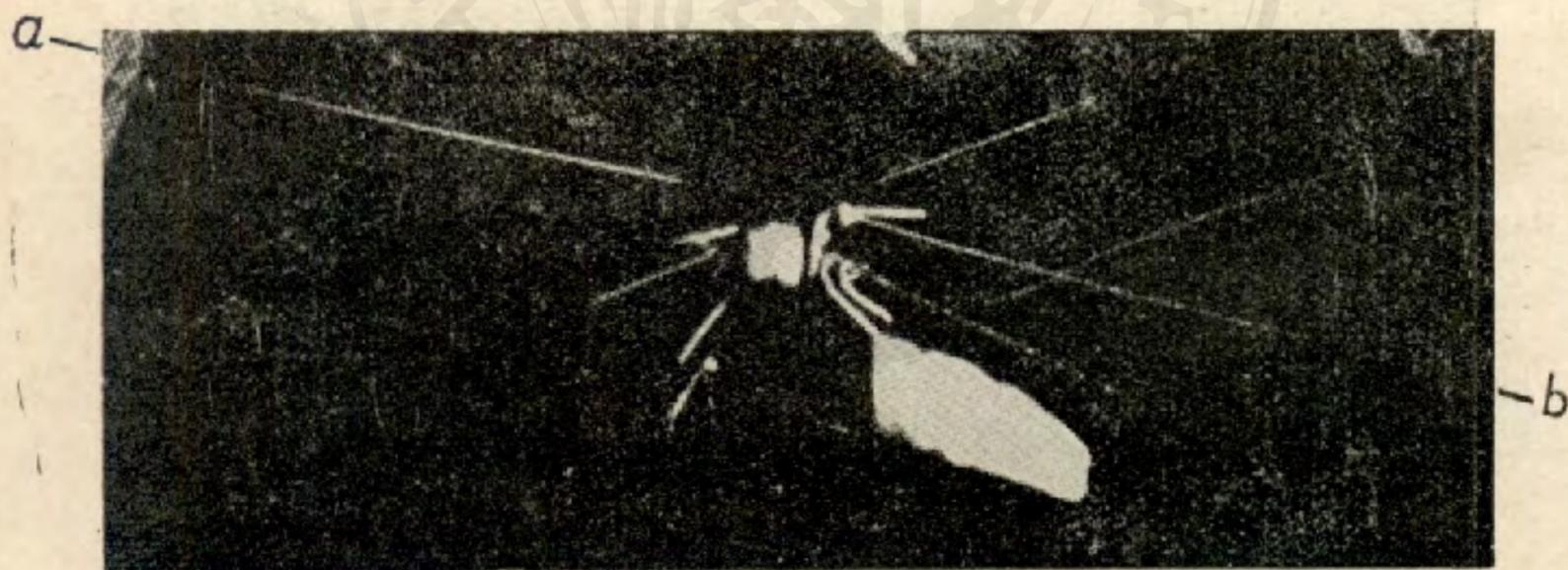
[⊖] W. J. Henderson。——譯者註。

[⊖] Purdue University, 在美國 Indiana 州。——譯者註。



(根據勞倫斯)

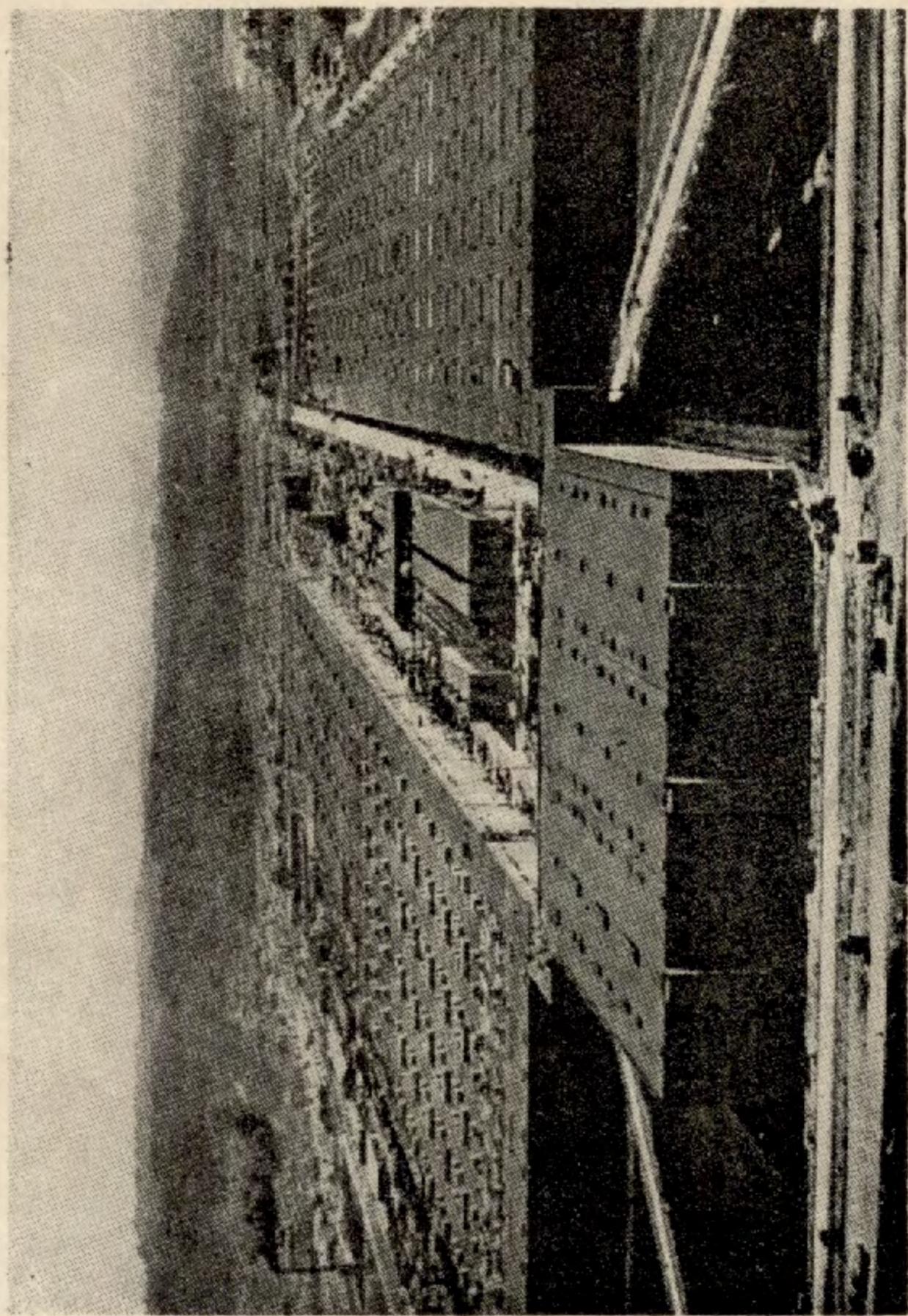
圖二五——一羣高能量的重子自迴旋加速器脫出，在空氣中發生螢光。上圖為這種情形的放大照相。



(根據狄[⊖]和華爾通，原為英國皇家學會所有。)

圖二六——重子擊中鋰⁶原子核時，兩個 α 質點同時朝相反的方向飛出，其軌跡分別為 a, b。

⊖ F. I. Dee。——譯者註。

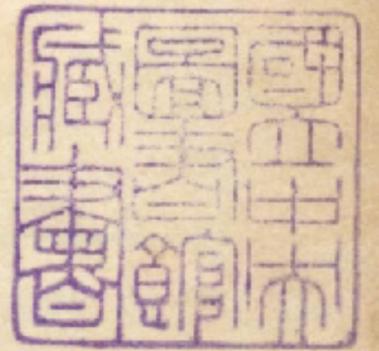


圖二七——阿克利吉的克林通廠，規模宏大，上圖為其中一部的鳥瞰。

(美國軍部通訊隊攝)

出版者贈

對



原子轟擊 與 原子彈

定價國幣三元五角

外加運費匯費

原著者 John K. Robertson

譯者 文 聖 常

發行人 李 煜 瀛

出版者 世界書局

發行所 世界書局

版權所有 不准翻印

中華民國三十六年六月初版



2156
9
38
40

舊