

開明青年叢書

原子能與原子彈

——核物理學發凡——

陳嶽生編



政治大學圖書館



A090336

539.2
440

原子能與原子彈

—核物理學發凡—

陳嶽生編



開明書店

開
明
書
店

發
行

國立政治大學圖書館典藏
由國家圖書館數位化

090336



原子能與原子彈

(核物理學發凡)

三十七年八月初版

每冊定價國幣一元六角

編著者 陳 嶽 生

發行者 關 明 書 店
上海福州路
代表人范洗人

印刷者 關 明 書 店

有著作權 不准翻印

(79 P.) K

核

曹 序

陳子嶽生，好學之士也。近於授課之餘，編成‘原子能與原子彈’一書，索序於予。予觀其書，篇幅雖小，而體系完備，材料可靠，插圖醒目，行文流利，對於現代青年之從事科學研究者，實為有益之作。

書中所載核反應之分類，中質子數比與安定性之關係，遲發中子與鈾囤之控制，爆炸理論及原子彈之效率，中鈾提取法之理論與實際，各種高能量粒子產生器之討論及性能，聚變與裂變之對比，臨界體積之討論，廣島被炸之官方報告等等，均屬本書之特色。而發展年表之搜輯，尤見編者之經營也。

曹惠羣 民國三十六年十月於上海

姚 序

提倡科學，在我國已經喊了幾十年了；其結果，除富有的人們，得能享受人家現成的科學之賜而外，僅有少數不計利鈍的科學家在艱苦中奮鬥而已。人人都說現在是原子時代了，但是在我國所見者，不過作為商業廣告的什麼‘原子糖’‘原子筆’之類。要找一本有系統而明白易曉的‘原子書’，恐怕還是不大容易。

大夏大學教授陳嶽生先生最近寫成‘原子能與原子彈’一書，源源本本，從最基本的原子觀念說起，一直到原子能的應用，搜羅周詳，文字流暢，深入淺出，引人入勝。書中力避艱難的數學，而奧妙的理論還是能曲曲道出。即使初中學生，稍有理化常識，亦不難一讀。所用譯名，除教育部已有公布者外，都是經再三考慮過的，簡捷而不失原意。本書對於我國科學普及化，是有相當貢獻的。

姚啓鈞三十六年十月於上海大同大學

自序

講論原子能的零碎文章，整本書籍，用中文寫成的也已不在少數，但是有的太散漫，有的太偏重描摹，有的太專門，都不能使一般的讀者，對於原子能和原子彈有正確的概括的認識，並對於原子核的基本知識有初步的全盤的領悟；除非他能博覽，他能遍讀。這對於一般的讀者似乎不是一個經濟的辦法。因此，我就寫成了這本小書，希望它可以適應一般讀者的程度與需要。

全書大部分以最近美國海軍部准許刊行的關於核物理學的材料為根據，並參考 Smyth, Born, Loeb, Wilson, Grimshl, Richtmyer, Birkhoff 等等的著述，以及新出版的中外雜誌與通俗書籍二十餘種，編為一個有獨立系統的整體。數學的公式並不摒除，惟仍以不涉高深為原則。凡對中等數學及初等理化已有相當了解者，閱讀本書是應該不覺得困難的。

正像任何專門研究一樣，原子能的研究也可以納入四個題目：（一）純粹學術性的研究——原子核物理學；（二）有利人羣的效果——工業及醫學方面的應用；（三）有害人羣的效果——原子武器的製造；（四）發展簡史。本書第一至第七章講的是第一個題目，第八至第十章講的是第二個題目，第十一章講的是第三個題目，第十二章講的是第四個題目。

名詞方面，差不多全照通行的規定，但有少數出於新撰。我將 'transformation' 譯作 '轉變'，以別於普通的變化；又因為 'disintegration' 既譯作 '蛻變'，'decay' 既譯作 '衰變'，故將 'fission' 譯作 '裂變'，'fusion' 譯作 '聚變'，以收統一之效。

‘pile’一字我譯爲‘囤’，似比較‘堆’字好一些，因爲‘囤’有四面包圍及儲藏的意思，而且形狀也有些和所謂‘uranium pile’的‘pile’相同。‘particle’一字用來指原子內的各‘子’時，它的意思並不是一個‘mass-point,’而是一個‘minute part of matter’,所以我們不必拘泥於力學上的意思，定要把‘minute part of matter’也譯成意義不符合的質點。有人說，可以譯成質粒，但是我們也未嘗不可將它譯成能粒，因這些粒是具有雙重性格的。我以爲原子、分子、電子、中子、等等既然都是‘子’，而‘particle’一字指的就是這一大批‘子’，那麼爲何不將它譯成‘粒子’呢？所以我在本書中用此字指這些‘子’的時候，將它譯成‘粒子’，不過在討論力學上的問題時，仍保留‘質點’的舊名。‘deuteron’一字，有人譯爲‘陽雙質子，’殊嫌不妥，因爲它是一個質子和一個中子結合而成的。所以我乾脆把它譯成‘氘子’。關於名詞的話，即此而止。不過還得聲明一句，本書中所有新撰的譯名，也只好算是我所提出的愚見罷了。

宇宙射線對於介子及介子對於原子核的關係，這方面的學說，尙在初生階段中，故本書未曾收入。第十二章發展年表，亦祇輯到原子彈在廣島長崎投下爲止，因爲這是一個天然的段落。

至於原子能的前途，爲禍爲福，現尙在未定之天。不過最近密立根博士有一段談話，卻值得轉錄於此。他的大意是：

‘鈾祇占地殼百萬分之六，雖不像黃金那樣的希罕，卻也是夠希罕的了。……即使別種重元素也有用爲原子能源的可能性，世界的原子能源還是有限得很。這些東西是容易用完的，所以價值必將愈來愈貴。利用氫元素的聚變以求原子能的釋放，也像太陽上的過程一樣，這在地球上

一種永遠做不到的事情。世界上重要產鈾區祇有四處，比屬剛果，捷克斯拉夫，加拿大的大熊湖，以及美國科羅拉多州西南部。原子彈的新資源也許可以發見，但是鈾必將成爲極希罕的元素，所以鈾不應該用爲主要燃料或供大規模發電之用。……原子炸彈與原子能對人類的最大益處，還是在於使人類徹底了解，侵略性的戰爭有絕對消除的必要。

又據波斯特博士(Dr. Lyle B. Borst)最近在美國工程師協會開會時宣稱，原子能可與煤競爭而爲能源，須在十年二十年之後。最初的應用或許在艦船及潛艇方面。由此可知，至少在十年之內，原子能的應用將專限於軍事方面。這種情形，實在是很危險的。我深望我在兩年前的預測，沒有說中。

本書得在開明書店印行，多虧了老友顧均正先生的幫助和督促。他對於本書的內容，也提供過很多好的意見，‘裂變’一名就是他的建議。又蒙曹惠羣師及姚啓鈞同學作序，黃藝農先生繪圖，盧錫疇先生鄭績女士等任校讎之責，統此一併道謝。書中錯誤脫漏之處，在所難免，尚希讀者隨時予以指正。

硯廬主人民國三十六年十月於上海大夏大學

目 次

- 第一章 物質的結構:分子和原子.....1
物質的不連續性(1) 氣體分子運動說(2) 原子(6) 熱能與化學反應(7)
- 第二章 原子的結構:質子,電子以及中子.....11
物質的電性(11) 羅德福—波爾原子型(13)
- 第三章 核的結構:聚變與裂變..... 19
同位素(19) 核液比喻(22) 聚變與裂變的激發能(27)
- 第四章 核轉變:鐳與放射蛻變..... 30
鐳的放射性(30) 放射衰變(34) 核的轉變(36) 韋爾生霧室(38)
- 第五章 核轉變續:質量與能量的等價..... 43
核轉變與核裂變(43) 核反應中的質量變更(43) 核反應的預示(46)
緊束分數(46) 熱核反應(49) 核裂變(51)
- 第六章 核轉變的種類:各附重要例子..... 52
五類核轉變(52) 第一類——中子誘發核反應(52) 第二類——氘子誘發核反應(54) 第三類——亞爾發粒子誘發核反應(56) 第四類——質子誘發核反應(59) 第五類——茄瑪射線誘發核反應(61) 核轉變的彙述(62)
- 第七章 高能粒子的產生:靜電機與迴旋益能器..... 65
轟擊原子核所用粒子的來源(65) 最初所用獲得高能粒子的方法(66)
范德格拉甫靜電高壓機(69) 迴旋益能器(73) 倍打益能器(78) 其他產生高能粒子的機器(80)

第八章	鈾的裂變:曼哈坦區	82
	用中子轟擊原子核(82) 鈾的裂變(83) 曼哈坦區的工作(88) 離心機法(89) 擴散分離法(92) 熱擴散法(95) 電磁分離法(95) 產鈾問題提要(97)	
第九章	慢中子反應:鏷的製造,漢福德廠	99
	怎樣補救中子的損失(99) 臨界體積(100) 慢中子反應(103) 遲發中子(108) 延緩劑(109) 鈾圓的輸出功率(111) 鏷——漢福德計劃(111)	
第十章	原子炸彈與廣島:爆炸的理論與實際	115
	爆炸概論(115) 原子炸彈的拼合與起爆(121) 原子炸彈的爆炸效果(122)	
第十一章	原子能的面面觀:生物學及醫學上之應用	124
	三個重要問題(124) 工作人員的保護(126) 治療上的應用(127) 生物學研究方面的用處(128) 原子能之和平時代的應用(128)	
第十二章	發展小史:從臆說到原子炸彈的誕生	134
附	各種單位轉換互算表	148

第一章

物質的結構：分子和原子

1. 【物質的不連續性】 關於原子和分子，我們多少總聽到過一些，把這些聽到過的暫時忘掉一下，然後查考查考我們自己對於週遭世界的觀念，這倒是一件很有益處的事情。查考的時候，讓我們祇拿五官所感覺到的來做根據，這樣便是天真的辦法。譬如說，有一塊鉛，我們要考究它的結構。假使這塊鉛是一個每邊長六英寸的立方體，我們可以把它切成較小的立方體，毫無困難。即使要把它切成每邊十分之一英寸，甚至每邊百分之一英寸那樣小的小立方體，也是辦得到的。再要切得小一點呢？也還是可以，祇要我們有細巧的機器。有一種精密的劃線機，能在一英寸之內劃分一萬條線；我們若用同樣精細的劃分機，就不難把鉛塊切成每邊一萬分之一英寸的立方體了。

照這樣說來，我們有了適用的機器，便可以把鉛塊愈切愈小。但是要問，有沒有最小的限制呢？有的，假使我們要保留鉛的性質，就有最小的限制。我們祇管切而再切，切到每邊約為 10^{-8} 厘米時 ($10^{-8} = \frac{1}{10^8} = 0.00000001 =$ 一萬萬分之一)，倘若再切下去，就要不成其為鉛了。這最小的鉛粒子，依舊保留着鉛的各項特性的，我們就叫它做鉛的分子。對於其他任何物質，我們也作同樣的規定：任何物質的最小粒子，依舊保留着該物質各項特性的，便是該物質的分子。

我們的思想，當然不必限於固態物質。設想把一滴水分而又分，直分到成功了水的分子為止。分子是小極小極的東西，所以在很少量的物質裏面，也就有很大很大的數目。例如一茶匙的水中，便有 10^{23} 個水分子（在 1 的後面跟着 23 個圈，說起來便是一千萬萬萬萬萬）。凡是普通的液體與固體，密度相差不大的，分子結構不太複雜的，一茶匙大小的體積裏，差不多都有這麼多的分子。

氣體的密度比液體與固體小得多；所以，在同樣大小的體積中，任何物質成氣態時的分子數，比了成固態或液態時的分子數少得多。譬如加熱於一茶匙的水，讓它變成蒸汽，它的壓力等於大氣壓力，那麼它的體積就有 300 立方英寸左右。體積的增加在一千倍以上，而分子數並未增加，所以我們不得不斷定，蒸汽或氣體的大部分是真正虛無的空間。這一定是對的，除非分子本身也跟着膨大。然而分子膨大的假定已被證明是不確的。

從上面的論述，可知氣體或蒸汽並非連續的物質，只是很大的虛無空間，其中散布着物質的分子罷了。即使是比較緊密的固體和液體，它們所佔空間的大部分，也都可以證明它是虛無的空間。這一層，下文就要講到。

2. 【氣體分子運動說】 氣體有很多通常的性質，可以根據分子的假定加以解釋。

我們都知道，在裝有活塞的圓筒中，活塞與筒底之間的氣體，它的體積是可增可減的；在活塞上加重壓力，這一團氣體的體積便減少，壓力減輕，它的體積便增加。又若加熱於此氣體，並不改變它所受的壓力，那麼它便要膨大；冷卻的時候，體積便縮小。倘然在冷卻的過程中，欲保持體積不變，則活塞上

的壓力必須減低。

從這樣的觀察，就產生了所謂氣體分子運動說 (kinetic theory of gases)。簡單的說來，這種學說所假定的是：氣體分子猶如堅硬的小球，且在容器中久動不息，依很高的速率在種種方向內飛來飛去。又因分子與分子間的空隙很大(就分子的大小比較而言)，所以它們總能夠在飛行一段距離之後，再互相碰撞，或同容器壁碰撞。當真碰上了，也是完全彈性體的碰撞；換句話說，毫無能量的損失，動能僅從此一分子移到別一分子上去而已。假使氣體冷卻，它的分子便動得慢些；假使受熱，便動得快些。

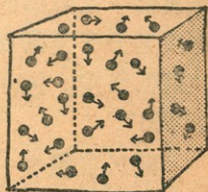


圖1 依照氣體分子運動說，氣體分子在容器中永動不止。

我們對於氣體所作的觀察，有很多可以用這些假定來解釋。氣體的壓力，即由分子向容器壁屢屢撞擊而生。假使容器的容量(亦即氣體的體積)減少，那麼分子便將擠得格外緊一些；於是在一定的時間內分子撞擊器壁的次數也格外多一些。因此，壓力便增加了。一定量的氣體，它的體積與壓力之間，有一個很簡單的關係，用式子來表示，便是

$$P_1V_1 = P_2V_2 = \text{常數},$$

式中的 P 是壓力， V 是體積，右下角的數字指的是開始情況與最後情況。氣體的質量當然必須始終不變，而 P 與 V 的單位也必須前後一貫。此外，從開始情況到最後情況，溫度也必須不變。

溫度對於氣體的效應，也可以用氣體分子運動說來解釋。氣體受熱時，它的分子動得格外快，因此對於容器壁有更多更猛的撞擊。這更多更猛的撞擊使我們覺得氣體的壓力已經增

加。假使一方加熱於氣體，一方欲維持它的原來壓力，則氣體的體積非增加不可，因為分子對器壁的撞擊既然格外猛烈，則每秒鐘對一定面積的撞擊次數必須減少，方可維持原來的壓力，而體積的增加，可使分子疎散，也就可以減少分子撞擊器壁的次數了。體積不變時，壓力與溫度的關係是

$$P_1/T_1 = P_2/T_2;$$

壓力不變時，體積與溫度的關係是

$$V_1/T_1 = V_2/T_2。$$

這裏的 T 是氣體的溫度，用絕對零度以上的度數來表示。絕對零度是分子運動完全停止時的溫度，又是理論上不可以超過的最低溫度。它的數值是攝氏溫標零下 273° ，即華氏溫標零下 460° 。

關於氣體有一個更有用的概念，包藏在所謂亞佛加德羅定律 (Avogadro's Law) 之中。該定律說：在等壓力等溫度下的等體積氣體含有等數的分子。這條定律，起初根據着各種氣體化合時加以觀察而得的實證，現在更有物理學方面很多實驗的證明。從這條定律，還引出了不少有用的結論。

我們還要回頭再講一講關於氣體分子的運動和碰撞。一個氣體分子在剛剛碰撞第二個氣體分子後而又與第三個氣體分子碰撞以前所行路程的平均值，在物理學上稱為平均自由路程 (mean free path)。氣體分子的平均自由路程，其長

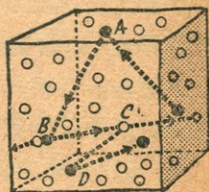


圖2 氣體分子的平均自由路程。粗虛線虛擬一個分子(用黑點代表，以別於用圈代表的其他分子)的一段路程，此分子在 A 與 D 處撞擊器壁，在 B 與 C 處碰撞別分子。在 B, C 之間不再與此外的分子碰撞時所行的平均距離，叫做平均自由路程。

短視氣體本身的溫度，壓力以及性質而定。在平常的壓力與溫度之下，凡是普通的氣體，其分子的平均自由路程大約在 10^{-5} 厘米左右。

我們切勿貿然斷定，一切分子的結構都很簡單，須知有許多分子都是很複雜的。上文為簡明起見，我們曾假定氣體分子是球狀，然而多數分子並非球狀。實際上，從極簡單的氮分子到很複雜的玻璃分子，蛋白質分子或合成橡皮分子，大小和結構都相差得很遠。複雜的分子，它們的克分子量有高到一百萬克的。所謂克分子量的定義，可以說是某種物質一定數目的分子的質量（用克做單位）。這個固定的數目叫做亞佛加德羅常數(Avogadro's number)，約等於 6.0×10^{23} 。這個數目，記得也好，不記得也好，所須記住的是根據上述克分子量定義而得的一個重要結論。因為一個克分子量的一種物質所含有的分子數（即是亞佛加德羅常數），等於一個克分子量的任何別種物質所含有的分子數，所以單個異種分子的質量比（分子量的比）即等於克分子量的比。這就是我們要記住的重要結論。

若要知道分子有多大，那麼下述測定油分子直徑的簡單實驗，可使我們略得其梗概。取油少許，稱定其質量，然後舖在水面上，成薄膜一層。用一邊活動的鐵絲框圍住此薄膜，再將活動的一邊向外拉開，拉到一定地位時，即見油膜伸展到最大限度，過此限度，油膜即被撕裂，而顯出破綻來。我們很合理的可以假定，油膜伸展到最大限度，它的厚度便祇有一個分子的直徑，所以不能再拉，一拉便要破裂。測定這框子所能拉到的

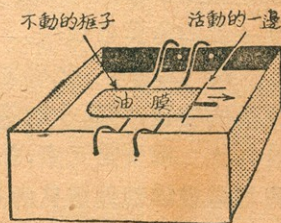


圖 3 決定油分子的直徑。

最大面積，並用另外獨立的實驗決定油的克分子量。從這兩個數值以及油的質量，即可推得油的分子個數。然後再推算每個油分子所佔的面積，由此即可算出油分子的直徑。我們的答案是：——油分子直徑 = 10^{-8} 厘米左右。普通分子的直徑，差不多也是這樣大。

我們都已知道，分子是保留着某物質各項特性的最小粒子。地球上既有盈千累萬種不同的物質，就非有盈千累萬種不同的分子不可。例如水分子、糖分子、鹽分子、玻璃分子、氫分子等等，都是各不相同的。化學家所知道的天然產物質，何止數十萬種，然而化學家還嫌不足，合成了人造絲、耐綸、人造橡皮、蘇發藥物、各種染料，把許多分子剪裁搭配，以求成品之適合於他們的特殊需要。時至今日，他們已經合成了五十萬種以上自然界中找不到的不同的分子。此後呢？我們當然沒有理由說他們不能夠再造出更多的新型分子來。因此，除了用組成物質的分子來區別物質之外，倘然沒有別的更簡單的分類方法，那麼化學必將比現在更為繁複，不但使一般人目迷五色，而且要使一般化學家也覺得眼花撩亂了。總算僥倖，我們還有更進一步的物質分類法。

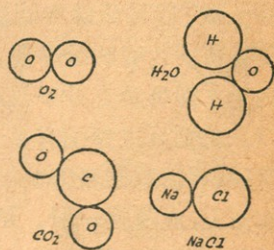


圖 4 簡單物質的分子。

3. 【原子】 化學家把分子再加剖析之後，發覺這些盈千累萬的物質，實由少數基本的物質組織而成，這些基本物質便是九十二種安定元素，和它們的幾百種同位素（解釋見下文），再加以幾種新近發見的不安定元素。凡是元素，都不能用任何化學方法分成更簡單的物質。這便是我們給元素下的定義。

把元素分成不可再分（再分即不成其為原來的元素）的最小粒子，我們稱之為原子。我們有氧、碳、氫、鐵、鉛等等元素，我們就可以談到這些元素的原子。不過有些物質如糖，卻非元素，因為它是碳、氫以及氧的原子所組織成功的，這些原子化合起來便成為糖的分子。糖分子是可以用化學方法分成較小較簡單的單位的，所以我們不能有糖原子。同樣，食鹽是氯原子和鈉原子的化合物（ NaCl ），所以也祇有食鹽分子而無食鹽原子。

4. **【熱能與化學反應】** 在適當的條件之下原子互相化合而成分子時，常有能的效應伴同發生。（有少數物質的分子由單個原子所成，例如氮與氫。）例如一磅氫與八磅氧化合（或說燃燒）而成九磅水時，就有約60,000 英國熱單位（btu）的熱能放出來。一個英國熱單位的熱可使一磅水的溫度升高華氏一度。所以一磅氫與八磅氧化合時放出來的熱，可使340 磅水的溫度從冰點昇到沸點，也可以使44 磅冰變為蒸汽。像這一類的化學反應叫做放熱反應（exothermic reaction）。

假使要從這九磅的水，再得原來的氫與氧，我們就必須加入60,000 btu的熱能，或他種形式的等值之能，方始可以把水分子分解。要達到這個目的，有兩條路：一是加熱於水，熱到充分高的溫度；一是通電流入水。後一個辦法比較實際一點，所需等值的電能，約為16 仟瓦小時（即通俗所謂電表上的16 度）。用這樣大的能量，祇能把九磅的水分子分解，成為氫原子與氧原子，可見它們的化合為水分子，必有很大的力把它們束縛在一起。

還有一種收熱反應（endothermic reaction），必須加入熱能以使反應進行；這種反應的例子也很多。例如我們取一磅氫

與十二磅碳，使它們在適當的情況之下化合而成乙炔，則知必須加入 52,000 btu 的熱能，反應方得進行。就因為這個緣故，我們不應當希望乙炔的分子是很安定的分子。實在說起來，乙炔是極不安定的，它的分子刻刻有破裂而成碳原子和氫原子的趨勢；一旦發動，便將有很大的能量放出來。把乙炔裝入氣罐中以備隨時取用，事先必須作多種預防的措置，其原因即在於此。我們必須把特殊的質料加入乙炔中，藉以防止它的自燃分解，而可免除不幸的後果。

化學家往往說，像乙炔這一類的物質是在半安定 (meta-stable) 狀態中，所謂半安定，即是能夠自燃分解，放出熱能的意思。在化學上說，水便是安定的物質。在室內溫度之下，水決沒有分解成爲氫與氧的機會，除非有鉅額能量加進去。

我們可以拿一個水力學的比喻，來說明安定，不安定，以及半安定三種狀態。將水一桶潑在平地上，水並無流動的趨勢，且不能作功。對平地而言，它並沒有位能；我們說它在安

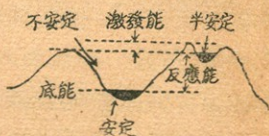


圖 5 安定，不安定以及半安定三狀態的水力比喻。

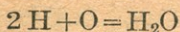
定狀態中。將水一桶潑在山腰，水便流下山來，且能作功，其所能作功之量，視水流起點到平地的高度而定。這樣的水是在不安定狀態中。第三種情形是把一桶水倒在山頂的坑穴裏面。

我們都知道，水從山上流下來，可以從它獲得功，但若欲使山頂坑穴中的水流下山來，就非先把它提出穴口不可。所以我們說這樣的水是在半安定狀態之下。水從山上流下來，可以從它得到的能，相仿於氫氧化合成水時或乙炔分解時所放出來的熱。至於將山頂坑穴中的水提出穴口所需的能，則相當於化學家口中的所謂激發能 (activation energy)，即在反應開

始前必須從外加入的能。

讀者對於反應，激發能，安定狀態，不安定狀態，以及半安定狀態諸概念，應該有深切的認識，因為以下的討論是常常用到這些概念的。

扼要地再說一遍，原子作種種不同的化合而成分子，而分子的安定程度則視化合時能的關係而定。化學家為記述便利起見，常用所謂化學方程式來表示反應。例如上述氫與氧的化合而成水，可以寫成下面的方程式：

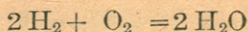


用普通的話來講，兩個原子的氫與一個原子的氧化合成功一個分子的水。也可以說是二百萬個氫原子與一百萬個氧原子化合成一百萬個水分子。也可以說 $2 \times 6.0 \times 10^{23}$ 個氫原子與 6.0×10^{23} 個氧原子化合而成 6.0×10^{23} 個水分子。我們總還想得起， 6.0×10^{23} 是亞佛加德羅常數，亦即是一個克分子量的任何物質所含的分子數。凡是質量等於一個克分子量的任何物質，我們叫它做一個克分子 (gram molecule)，仿此， 6.0×10^{23} 個原子的集團也可以叫做克原子 (gram atom)，它的質量就叫做克原子量。單個異種原子的質量比（原子量的比）當然等於克原子量的比。^{*} 所以我們又可以說，兩個克原子的氫與一個克原子的氧化合而成一個克分子的水。

剛纔說過，分子是原子作種種化合所成，大多數的分子由異種原子化合而成，但是有些分子則由同一元素的原子兩個或兩個以上構成。例如氫分子由兩個氫原子構成，氧分子也由

^{*} 克分子量與克原子量，在數值上等於分子量與原子量，可是意義卻絕不相同。前者乃是集團的真正質量，而後者則係單個的質量比；換言之，前者是名數，而後者是不名數；前者猶如密度，後者猶如比重。

兩個氧原子構成，但是氮分子祇有一個氮原子，而硫分子在某種一定情況下可有八個硫原子。元素與元素之間起化學反應時，通常總是它們分子間的作用，所以化學家寫反應方程式時常不寫原子式而寫分子式。上舉之例，即應改爲



$$4\text{克} + 32\text{克} = 36\text{克}$$

一個克原子的氫(6.0×10^{23} 個)，它的質量差不多是1克；每一氫分子有兩個氫原子；而我們所用的是兩個克分子的氫。所以氫的質量 $1 \times 2 \times 2 = 4$ 克。一個克原子的氧，質量是16克，每一個氧分子有兩個原子，而我們所用的是一個克分子；故有 $16 \times 2 \times 1 = 32$ 克之氧。每一個水分子有兩個氫原子和一個氧原子，故一克分子的水有 $2 \times 1 + 16 = 18$ 克。因有兩個克分子的水，故水的質量爲 $2 \times 18 = 36$ 克。

有應注意者，方程式左邊各元素的原子個數，等於右邊同一元素的原子個數，而兩邊的總質量相等。化學方程式之得名即在於此。這是不足爲奇的，因爲上文已經說過，原子不能夠用任何化學方法去毀壞它，而從常識判斷，在反應過程中也不應當有質量上的得失。不過到下文講論所謂核反應時，我們便要知道這兩句話還須加以修正。

第二章

原子的結構：質子，電子以及中子

5. 【物質的電性】 前一章開始時，我們曾講到分子的直徑大約是 10^{-8} 厘米。分子有輕有重，有複雜有簡單，重而複雜的分子，比了輕而簡單的分子，理應大些。然而我們倘若回憶幾何學上的定理，球的體積與它的半徑立方成正比例，那麼假定分子是球狀，它的直徑稍有增減，分子的體積與質量也可以有很大的變更。

原子的大小怎樣呢？我們可以相信原子在分子裏面是靠得很緊的，甚而至於緊到互相疊合一部分（疊合的可能性，下文就要講到），所以原子的直徑與分子的直徑可以有差不多同樣的大小。爲求簡單起見，我們假定原子的直徑也是 10^{-8} 厘米左右。

現在要講到原子結構的問題了。原子是否僅係一個小而且堅的球？假使說是的，那麼原子何以能聯合而成分子？束縛原子在一處的力，它的本性怎樣？

我們且看一看，回答這些問題時，有什麼可以說的。關於原子結構的知識，雖然大部分是在過去五十年內揭露的，但是這個問題早在十九世紀中葉，就已經有人予以深切

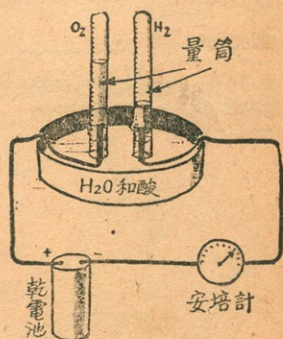


圖 6 法拉第之實驗，水的電解。

的研究了。著名的英國科學家法拉第(Michael Faraday),使直流電通過混有少許酸液的水,發見水被分解成氫與氧,氫在陰極捕集,氧在陽極捕集。氫的體積恰為氧的二倍。這正是我們意料之中的結果,因為一分子的氧是同兩分子的氫化合成水,而從亞佛加德羅定律,等體積的氣體在同一壓力同一溫度的情況之下,是含有等數的分子的。

法拉第又發見,等量的電通過水中,恆析得等量之氫。欲析得一克原子或半克分子的氫,所需的電量約是 96,500 庫倫(coulomb),以此為單位,就叫做一法拉第。所謂一庫倫,就是一安培的電流在一秒鐘內所輸的陰電荷量。研究多種物質的電解後,法拉第氏發見,欲析得一克原子的某元素,所需電量自一個,兩個,三個到八個法拉第不等,須視所析者是什麼元素而定。例如欲析得一克原子的氫、鈉、氯、或銀,需要一法拉第;銅或鎂,需要兩法拉第;鋁,需要三法拉第。法拉第氏所得此等結果,我們將如何解釋呢?

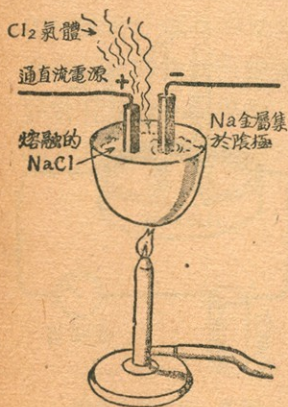


圖 7 食鹽的電解。

使電流在熔融的氯化鈉(即食鹽)中通過,食鹽即分解成為氯與鈉兩元素,氯集於陽極,鈉集於陰極。這一個實驗說明起來比了法拉第的實驗容易懂一些,然而原理卻是相同的。

因為同性電荷相斥,異性電荷相引,所以我們可以斷定,鈉原子帶着陽電荷,氯原子帶有陰電荷,且可斷定這些原子的電荷都被兩電極上的異性電荷中和。

帶有電荷的原子，並非正常的原子；它們在化學上叫做離子(ions)，產生離子的過程叫做電離(ionization)，食鹽的分子是不帶電的，但在熔融的狀態下，氯化鈉就起電離的作用，產生氯離子與鈉離子。氯離子帶陰電荷，趨向陽電極；鈉離子帶陽電荷，趨向陰極；在電極上被中和以後，便成普通的元素而出現。

電解時所消耗的電量，即消耗在中和離子上邊。用電解法析出一克原子的鈉或氯，需電一法拉第，析出一克原子的銅或氧，需電兩法拉第，故可推知氧離子或銅離子所帶電荷必兩倍於氯離子或鈉離子。同理，鋁離子所帶電荷必為三倍。

從上述各種實驗的結果，以及其他方面的研究，科學家斷定，束縛原子於一處的力多半源出於電，原子的本身即係一團帶電的粒子，陽的陰的都有。因為陽電量等於陰電量，所以整個原子是中和的。然而原子的各部分並不中和。至於電離，則可解釋為原子失去或獲得電荷所致。例如一個原子失去一個陰電荷，即成為陽離子，獲得一個陰電荷(或失去一個陽電荷)即成為陰離子。

6. 【羅德福—波爾原子型】 我們剛剛說過，原子實在是物質的帶電粒子的集團，一半帶着陽電，一半帶着陰電。早期的原子研究家，如湯姆生(J. J. Thomson)，以為原子猶如一隻豆囊，其中充滿着等數的“陽”性豆與“陰”性豆，均勻配布於全囊。但據羅德福勳爵(Lord Rutherford)以及其他諸家的實驗，則知這個比喻不能夠代表真正原子型。

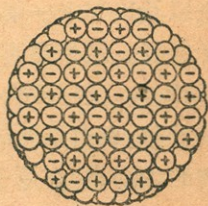


圖 8 湯姆生原子型。

我們可以先想一想，若把高速機鎗彈或低速步鎗彈射入這個豆囊，則將有何結果。我們必將預料，鎗彈入囊後，因與囊中之豆碰撞，速率便要減低一點，路徑也要略偏一點。在實際上，假使我們已經知道豆囊的大小和密度，並知鎗彈的質量與出口速度，即不難推算鎗彈入囊後速率如何減低，及其路徑的如何偏斜。

羅德福勳爵即曾做過這樣的實驗，不過他所射擊的並非豆囊而是原子，所用的鎗彈則為高速粒子，叫做“亞爾法粒子”(alpha particles)。這些亞爾法粒子的來源與本性，將在下文第四章中講到。

羅德福曾根據充分可靠的理論而精密計算過，他的亞爾法粒子應當偏斜多少，但是他實驗的結果與他的計算完全不符合。他發見他所射發的那些鎗彈中，多數僅微有偏斜，極少數偏斜很大，有幾粒竟然倒退回來。若照他的計算，並依豆囊假定，全數彈丸都應該有中間數值的偏斜。羅德福能夠解釋他實驗結果的唯一辦法，便是假定原子並非均勻的物質所組成，而有一個極小極密的中心或核，外加一層輕粒子的殼，離開核很遠。核帶陽電，外層的輕粒子帶陰電。

數年以後，丹麥物理學家波爾 (Niels Bohr) 蒐集物理學上以及化學上一切有關原子結構的有效數據，闡明了他的原子學說。這學說可以解釋許多觀察過的現象，價值甚大，故在1912年，波爾獲得了諾貝爾獎金。波爾教授對於這次原子彈的計劃，也有重要的貢獻。依照他的學說，原子看起來極像我們的太陽系。在原子中心的那一個質量很大，結構很密而帶陽電的核 (nucleus)，相當於我們的太陽。離中心很遠的那些輕得多而帶陰電的粒子，繞着核各循不同的圓形或橢圓形軌道

迴旋，猶如地球以及其他行星繞着太陽運行一般。在整個太陽系內，大部分是虛無空間，同樣，在整個原子內，大部分也是虛無空間。我們知原子的直徑是在 10^{-8} 厘米左右，這已小得無可想像了，可是核的直徑還不到 10^{-12} 厘米，而繞核運行的粒子大小也同核差不多。設想把一滴水放大到地球那麼大，其中的原子也依同樣的比例放大，那麼原子的直徑不過幾米，而核的直徑不過 $1/100$ 毫米左右。從這個比喻，原子內部的如何空虛，我們總不難想像了罷！原子與原子在分子中有疊合一部分的可能，就爲了原子內部是虛無空間的緣故。

自從羅德福與波爾兩人的原子學說問世以後，原子研究家對於原子的內幕日漸明瞭。根據這些學說而假定的原子模型，叫做羅德福—波爾原子型。依照這個原子型，原子核是由帶陽電荷以及不帶電的重粒子密集而成。這些重粒子帶陽電荷者叫做質子 (proton)，不帶電者叫做中子 (neutron)。繞核而行帶有陰電荷的輕粒子則稱爲電子 (electron)。質子數與中子數隨元素之不同而異，但每一元素的正常原子，其質子數常等於電子數。正常原子是中和的，故知質子的電荷與電子的電荷異性而等值。

電子同核的大小差不多，然而質量遠不及質子，祇有質子的 $1/1840$ 分之一左右。中子的質量差不多等於質子。所以一個原子的質量，差不多由原子核擔負，也可以說由核中的質子與中子來擔負。各元素的原子核內所有質子數與中子數的總和，叫做各元素原子的質量數 (mass number)。例如氫原子核祇含有一個質子，我們就說氫原子的質量數是 1；氦原子核含有 2 個質子和 2 個中子，我們就說氦原子的質量數是 4；鋰原子核含有 3 個質子和 4 個中子，故鋰原子的質量數是 7；氖原子

核含有 10 個質子和 10 個中子，故氖原子的質量數是 20，其餘的依此類推。這些質量數並沒有單位，只是爲比較便利而取的整數罷了；然而它們差不多等於根據 C. G. S. 制測定的克原子量，因此它們的比差不多等於克原子量的比，也差不多等於原子量的比。這也是化學發展史上一件極幸運的事情。

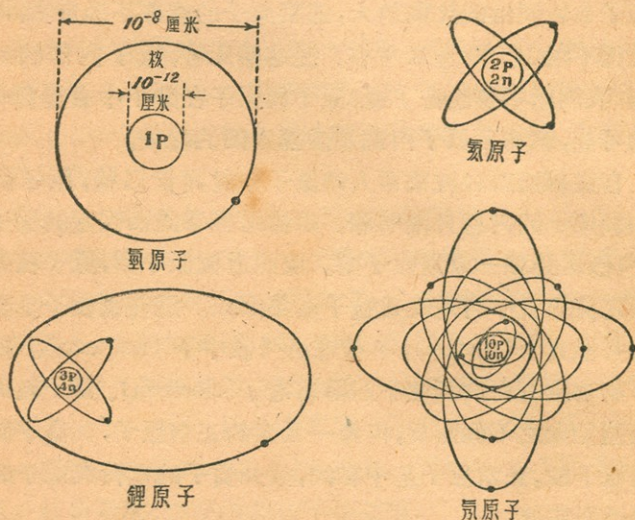


圖 9 電子軌道想像圖；原子核特別放大。圖中 p 代表質子， n 代表中子，小黑點代表電子。

質子的多寡，除影響元素的原子量而外，還影響到元素的化學性質，因為元素的化學性質由繞核運行的電子數來決定，而此等電子數前已述及是等於核內質子數的。原子核中的質子數，稱爲原子序數(atomic number)。氫的原子序數是 1，氖的原子序數是 10。至於中子的多寡，差不多祇影響到元素的原子量而已。

中子是英國人查德威(Chadwick)所發見的，它與質子有何組織上的關係，現在尙未能明瞭。從實驗的結果，我們所可說的是：中子可以放出一個電子來，成爲質子；質子可以放出一個正子(positron)來，成爲中子。這正子也是原子內部的粒子，與電子有相等的質量，相等的電荷，不過是陽電荷。發見正子的是安德生(Anderson)。

電子繞核運行的軌道，並非祇有一條，這一點與我們的太陽系微有不同。各種元素各有一定數目的電子軌道，這些軌道與核之間都有一定的距離。這些軌道裏面，有幾條叫做安定軌道或“未激發”軌道，因爲電子在這些軌道上運行時，原子處於安定狀態或未激發狀態。其他的軌道便是不安定軌道或“已激發”軌道，相當於原子的較不安定的狀態。電子從已激發軌道躍入安定軌道時，即有能量放出，成爲電磁輻射，如紫外線，可見光，或紅外線，因而產生光譜線，可在分光鏡中窺見。每一元素有它自己的特殊光譜線，研究這些光譜線，對於原子的結構便可多多知道。

元素愈重，原子中的電子軌道排列愈複雜。不過電子的排列最引起化學家注意的乃是最外層的電子，因爲這些電子的數目決定元素的原子價(valence)。週期表上九十二種元素，除鈹(Pd)外，最外層的電子數不會超過八個。一元素的原子價即等於最外層的電子數或此數與八之差。例如氧原子，最外層電子有六個，它的原子價等於 $8-6=2$ ；又如鋅原子的最外層電子有兩個，它的原子價也等於2。至於最外層電子數爲八的，原子價便等於0，這樣的元素祇有氖、氬、氪、氙、氡五種，都是不活潑氣體。

決定一元素的原子價，還有一個方法，就是電解它的化合

物。析得此一元素一克原子所需的法拉第數，即等於它的原子價。用此方法，尚可得正原子價與負原子價的區別。該元素若析出於陽極，它的原子價是負；析出於陰極，它的原子價是正。換言之，凡有正原子價的元素，它在溶液中成爲離子時常帶陽電，亦即失去電子；凡有負原子價的元素，在溶液中成爲離子時常帶陰電，亦即獲得電子。例如食鹽被電解時，鈉集於陰極，它的原子價是正一；氯集於陽極，它的原子價是負一。

關於原子的結構，上面已講得不少，最應注意的有兩點：（一）核中的質子數變更，亦即原子序數變更，則元素的化學性質即變更。原子序數我們常用 Z 來代表。（二）核中質子數與中子數的總和，即質量數，對於原子的研究也是非常重要，尤其在決定物理性質這一方面。此數我們常用 A 來代表。在以後的論述中，我們將不時用到這兩個數。

第三章

核的結構：聚變與裂變

7. 【同位素】 我們已經說過，元素的結構與性質，完全是由原子序數和質量數決定。這兩個數目之中，原子序數較為重要，因為化學性質，反應能量等等是由它來決定的。假定原子核內的中子數或增或減，但質子數不變，那麼元素的化學性質不變，而其質量數則變。這一個假定早已成爲事實。科學家早已發見了週期表以外的天然存在的許多元素，其原子序數與週期表上各元素的原子序數相同，而質量數不同；不但如此，他們還能夠用人爲的方法造出這樣的元素來。

凡是原子序數相同而質量數不同（即核內中子數不同）的元素，叫做同位素 (isotopes)。例如氧，有五種同位素，它們的原子序數都是 8，質量數是 15, 16, 17, 18, 19（即核內中子數是 7, 8, 9, 10, 11）。這五種同位素之中，發見最早，在地球上天然存在量最多的，便是質量數等於 16 的一種。

天然存在的元素，差不多都是兩種或兩種以上同位素的混合品。例如平常的氫，即由三種同位素混合而成，這三種同位素的原子序數都是 1，但其原子質量數則爲 1, 2, 3。其中質量數等於 1 的那一種同位素，約佔氫的總量的 99.98%。質量數等於 2 的同位素稱爲氘 (deuterium, 氘讀如刀)，又叫做重氫，祇佔氫總量的 0.02%。第三種同位素叫做氚 (tritium, 氚讀如川)，更比氘少得多，對於我們的討論並無多大關係。

氫的原子序數是 1，而其質量數爲 2，可知它的原子核必

定含有一個質子和一個中子，而繞核迴旋的電子也祇有一個。假使把氘原子的電子拿去，我們就得到一個叫做氘子 (deuteron) 的離子。這個離子的質量差不多是質子的兩倍，但所負陽電荷則相等。在羅德福氏實驗及相仿的實驗裏面，氘子是用來轟擊原子核的重要“彈丸”。

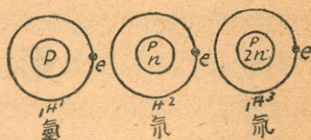


圖 10 氫的同位素
H 的上角數字是質量數，下角數字是原子序數。

氫的同位素不但以元素的狀態而存在，而且以化合物的成分而存在。其他元素的同位素也是如此。氫與氧化合而成水時，不但化合成分子量 18 的水 H_2O ，而且化合成少量的所謂重水 (D_2O ，D 是重氫的記號)，它的分子量是 20。在核物理學上，重水是非常重要的東西；此次大戰期間，德國人所以未能發明原子炸彈，即因重水工廠給挪威人炸毀之故。重水在平常的水裏面雖祇佔 0.02%，但是有方法可以把它提取出來。

就大多數元素而論，每一元素的同位素之中，總有一種比其他各種特別多得多，以致混合品的原子量差不多就是這種最多的同位素的原子量，其與氫原子量之比就極近於整數。這是應當在意料之中的，因為原子的絕大部份質量是在原子核內，而核內又含有質量差不多相等的質子與中子，個數都是整數。精密測定的各元素的原子量，雖以氧原子量等於 16 做標準，但大多數原子量差不多是氫原子量的整數倍數，這一事實可以說是核內粒子存在的初步證據，也是原子學說的有力基礎。

然而混合品中的各同位素所佔成分也許差不多相等，以至於原子量不近於整數。例如氯，它的原子量約為 35.5，離開

整數很遠。化學家對於這件事，很久莫明其妙。到後來發見了同位素的存在，方纔知道平常的氯是兩種同位素的混合品，這兩種同位素的原子量約為 35 與 37，它們的混合比是 3：1。35.5 就是三分 35 和一分 37 的平均數。即 $(35 \times 3 + 37 \times 1) \div (3 + 1) = 35.5$ 。

發見同位素與測定同位素所用的工具叫做質譜儀 (mass spectrograph)。它的作用根據下述的原理：凡是質量不同的同位素離子，當通過一個磁場時，它們的路徑就要發生偏轉，偏轉的多少需視質量之不同而異。待研究的原子，先使它們成為離子，然後使這些離子穿過一串狹縫，受拘束而成狹小的一注。再使這離子注通過一個強磁場，各離子的直線徑路即發生不同的偏轉而成為彎曲不同的曲線弧。

熟悉“電動機右手定則”的讀者總記得，垂直於磁場的導線上若有電流通過，則此導線即起運動，其方向既垂直於導線本身，又與磁場的方向（即磁力線的方向）垂直。當一注離子在磁場內通過，情形是與此相仿的，所以它的路徑要起偏轉，偏轉的方向與磁場垂直，偏轉的多少與離子的質量成反比例。於是較重的離子在磁場內便走彎曲得較少的曲線，較輕的離子便走彎曲得較多的曲線。兩種離子可分別在兩個不同的隙縫處收集，或使其射在一張照相片的不同地位上。質譜儀的發明人阿士登 (Aston)，即從照片上不同地位的留痕，測定了同位素的原子量，非常準確。同位素的原子量必須測得非常準確，這在原子能的研

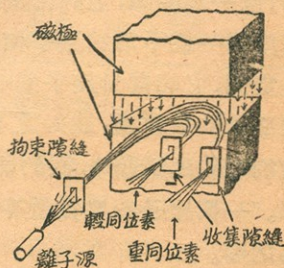


圖 11 簡單的質譜儀。

究方面乃是一件極重要的事情。

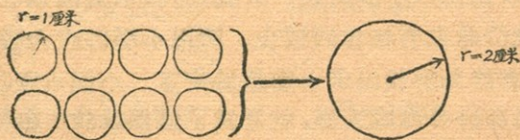
8. 【核液比喻】 物質的分析，由分子而至原子，更由原子而至質子、中子，以及電子、正子，可謂已盡精細，深刻，簡化之能事。但是現代物理學家猶以為未足。現代物理學家通曉量子力學 (Quantum Mechanics) 者，以為可以有更進一步的“簡化”方法。量子力學中必須有若干假說，與舊物理學中的概念不能相容。依照量子力學，實在並沒有各種不同的粒子這一類東西；這些粒子不過是可用數學方程式來代表的能團罷了。在量子力學家看來，我們能不能作一幅圖畫或設想一個模型，使它同我們對於空間和物質的通常概念相容，那是無關緊要的。因此，一般的讀者若非對於高等物理學有很深切的認識，就要覺得難於看透量子力學的內容是什麼。所以在我們的討論裏面，依舊充分利用電子、質子等等概念，以求講述之簡單明瞭。

為便利起見，我們可以假想，原子核裏面的質子與中子，猶如某種液體的小滴，而原子核本身則為這些小滴聚成的較大一滴。像這樣的“核液”，它的性質當然與平常的液體大不相同；舉一端而論，它的密度遠較平常的液體為大。假使把它的密度同一個平常的原子相比，也是大得多。因為原子的大部分是空間，它的質量幾乎集中於體積小得多的核裏面。知道了一個原子的真質量，並知道了核的體積（約等於直徑 10^{-12} 厘米的球體的體積），我們即可很容易的推算出核密度的數值來。一個原子的真質量等於克原子量除以亞佛加德羅常數所得之商。

用這個方法，我們算得核的密度大約是 10^{14} 克每立方厘米。若與水的密度每立方厘米一克作比較，則核密度約大一百

萬萬萬倍。具體一點說，大得可以看見的一滴核液，它的重量是一千萬噸。讀者如懷疑是否真有這樣重的東西存在，那麼我們可以告訴你一件有趣味的事實。據天文學家的研究，天空中有所謂白矮星(white dwarf, 天狼星的伴星)者，其密度約為水之十萬倍，而在我們這個宇宙未形成以前，尚有密度更高的物質已存在於太陽及衆星裏面了。

液體有一個很重要的特性，那便是“表面張力”。表面張力



$$\text{每滴} \begin{cases} \text{面積} = 4\pi r^2 = 4\pi \text{ 厘米}^2 \\ \text{體積} = \frac{4\pi r^3}{3} = \frac{4\pi}{3} \text{ 厘米}^3 \end{cases}$$

$$\text{面積} = 4\pi(2)^2 = 16\pi \text{ 厘米}^2$$

$$8 \text{ 滴} \begin{cases} \text{總面積} = 8 \times 4\pi = 32\pi \text{ 厘米}^2 \\ \text{總體積} = 8 \times \frac{4\pi}{3} = \frac{32}{3}\pi \text{ 厘米}^3 \end{cases}$$

$$\text{體積} = \frac{4\pi(2)^3}{3} = \frac{32\pi}{3} \text{ 厘米}^3$$

$$\frac{\text{面積}}{\text{體積}} = 32\pi \div \frac{32}{3}\pi = 3$$

$$\frac{\text{面積}}{\text{體積}} = 16\pi \div \frac{32\pi}{3} = \frac{3}{2}$$

圖 12 小滴聚成大滴，總面積減小。

有使液體表面取最小值的傾向，從而有使小滴聚成大滴的傾向，因為一大滴與數小滴的體積（亦即質量）若相等，則一大滴的面積較小。液體的表面大小是可以衡量位能之大小的，而任何系統皆有使其位能取最小值的傾向，因為位能最小是最安定的條件。一大滴面積較小，位能也較小，數小滴面積較大，

位能也較大，所以一大滴比數小滴安定。讀者學過立體幾何學的，總記得球表面的面積是 $4\pi r^2$ ，球的體積是 $\frac{4}{3}\pi r^3$ ， r 是球的半徑。例如半徑是 1 厘米的一滴，它的面積是 4π 平方厘米，它的體積是 $\frac{4}{3}\pi$ 立方厘米。又，半徑是 2 厘米的一滴，它的面積是 16π 平方厘米，體積是 $\frac{32}{3}\pi$ 立方厘米，從這些數字，我們可以推知八小滴的體積等於一大滴的體積，都等於 $\frac{32}{3}\pi$ 立方厘米；但是八小滴的面積等於 32π 平方厘米，是一大滴面積的兩倍。假使把八小滴併成一大滴，體積未變而面積卻減去一半，因此位能也有相當的減少。所以小滴併成大滴，位能減少（亦即有能量解放出來）而趨於安定。小滴水銀在桌面上相接觸，迅即併合而成大滴，就是爲了這個緣故（由較不安定的狀態趨於較安定的狀態）。表面張力所代表的位能，就水而論，約爲每平方厘米的表面有 75 耳格 (erg)。化成英國單位，約爲每平方呎的液體表面有 10^{-2} 呎磅。這是一筆很小的能量。然若就假想的核液而論，情形就大不相同了。它的表面能 (surface energy) 約爲每平方厘米 10^{19} 耳格。按英國單位計算，每平方呎的核表面約有 10^{15} 呎磅，這就是一筆很大的能量。

核液的表面張力既然非常之大，那麼核液的小滴併合成大滴，大滴併合成更大滴，從而放出更多的能量，似乎沒有限制。換言之，小而輕的核應該可以經由聚變 (fusion) 而成很大很重的核。然而實際上我們所見到的天然存在的核，沒有一個含有多於 238 小滴的。這個理由很簡單，因爲另外有一種力阻止了這些小滴（質子中子，以及它們的集團）之無限制聚變。這便是同性電荷之間的電斥力，也叫做庫侖力，因爲第一個立出數學公式來計算這斥力的是庫侖 (Coulomb)。所謂庫侖定律是很簡單的。這定律說，同性電荷間的斥力與兩電荷的

乘積成正比例，與其距離的平方成反比例。若電荷是異性的，則斥力變為引力。用式子來表示，便是

$$F = k \frac{e_1 e_2}{r^2}$$

式中 F = 力的達因數， k 是常數，視所處介質而定，在空氣中差不多等於 1， e_1 與 e_2 是兩個電荷的靜電單位 (esu) 數， r 則為距離的厘米數。由庫侖定律可知，若欲把兩個質子拉攏而使

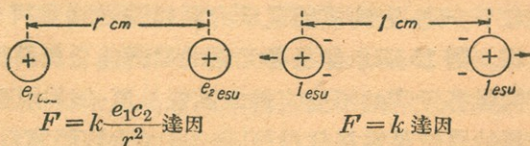


圖 13 庫侖定律。

其聚成一個核，那麼就要遇到一個斥力，使它們分開，因為質子帶有同性電荷，而同性電荷是要互相斥拒的。然而表面張力要它們聚攏的趨勢，大於斥力要使它們分開的趨勢，所以兩小滴核液可以聚變成一大滴核液。

假定兩個質子的聚變已經成功。倘若再要使兩個這種雙質子核聚變成一個四質子核，那麼所遇到的電斥力就要四 (2×2) 倍於使兩個單質子聚變時所遇的斥力 (1×1)。因此可知，核液由小滴愈聚愈大時，庫侖力是在很快的增加着。在另一方面，使小滴聚變成大滴的表面張力，並不很快的增加。所以庫侖力也很快的追上了表面張力，而使核與核的聚變不再

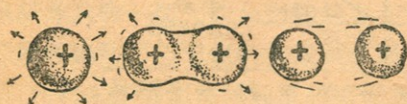


圖 14 靜電斥力使核起裂變。

可能。當庫侖力與表面張力互相平衡的時候，核最安定，因為既無庫侖力使它裂成小核的趨

勢，也無表面張力使它與別的核聚攏的趨勢。

這樣的平衡，顯然是應該發生於不大不小的原子核，據推算，應近於銀的原子核；銀的原子序數是 47，質量數是 108，差不多在週期表的中央地位。按照理論，凡是輕於銀的元素，都應當經由核的聚變，成爲銀而自趨於安定。反之，凡是重於銀的元素，都應當經由核的裂變(fission)，成爲較輕的銀元素而自趨安定。再進一步說，重元素在週期表上的地位，離銀愈遠的就愈不安定，它的核因電斥力而起裂變時愈可解放出多量的能來。圖 15 所示即是各元素的聚變能量與裂變能量，由此即可衡量各元素的不安定性之高低。原子核物理學家所用計算能量的單位是電子伏特(electron volt)，簡寫爲 ev，等於 1.59×10^{-12} 耳格。這一個單位實用起來殊嫌太小，故常用百萬電子伏特爲單位，簡寫爲 Mev (mega-electron-volt)。Mev 與其他能量單位的轉換，見附錄中的單位轉換表。圖 15 中的正數表示裂變不安定能(fission instability energy)，負數表

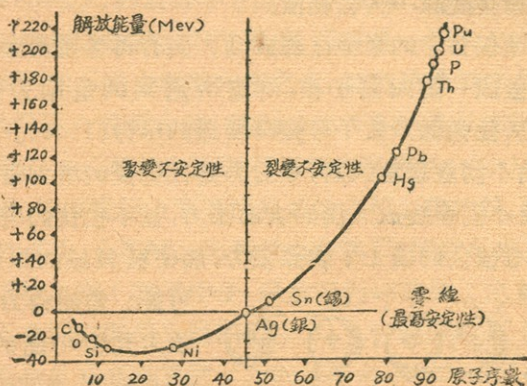


圖 15 各元素的聚變與裂變不安定能量。

示聚變不安定能 (fusion instability energy)。若欲使銀以下的元素裂變，須加入能量，故為負數。適當的聚變與裂變，都有能量解放出來，但是就原子能的利用而言，現在似乎裂變更為重要得多。注意圖中鈾核的裂變不安定能在天然元素中為最高。

以上的討論，僅限於質子，讀者不免要問，中子在核內對於核的安定性有沒有什麼影響？中子既然沒有電荷，我們大可推想，把很多的中子塞到核內去，就可以增加核的安定性，因為表面能是降低了。這個推想固然不錯，但是也有限制。除掉最輕的元素氫以外，凡是安定的核，其所含中子個數至少等於質子個數。中子在核內的作用，可以比諸緩衝地帶，使質子與質子隔離，不能靠得很近以致破壞全核的平衡而將全核炸開。核內的質子數一增加，互斥之力便很快的增加，故需有更多的中子加入，以維持平衡的局勢。例如就氦、碳、氧、氮而論，核內中子數與質子數之比即等於 1:1。就較重各元素而論，這個比是大於 1。在週期表的中央地位，中子數與質子數的比是 1.3:1（銀的原子核）。到週期表的末位，就鈾而言，這個比增加到 1.6:1。安定核的中子質子個數比，是合於量子力學上最安定的條件的。下文就要見到，中子太多了與中子太少是一樣的不安定。

9. 【聚變與裂變的激發能】 從上面所述關於核的安定性，聚變，以及裂變各項討論，馬上就發生了下面的問題：“除銀以外其他一切元素如何能夠存在？它們為什麼不都聚變或裂變成銀呢？”這問題的答案就在以前討論過的激發能概念上邊。在尚未能夠使任何核聚變或裂變以前，必須先供給一些激發能。最容易被攻擊的核，當然是需要激發能最少的核。這猶

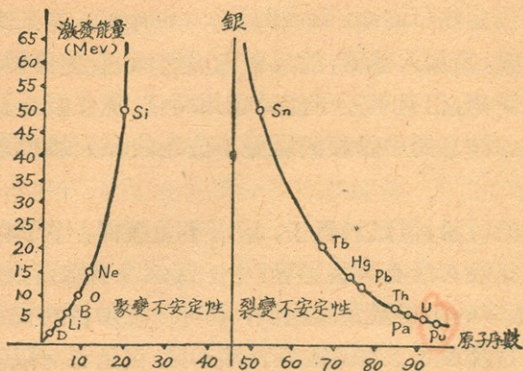


圖 16 各元素的聚變與裂變激發能量。

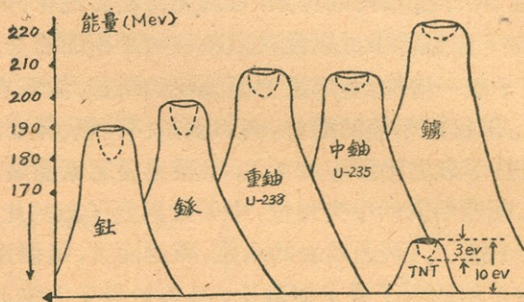


圖 17 幾種不安定核的激發與裂變不安定能量。

如使硝化甘油爆發，比了使 TNT 爆發容易得多。前者裝在瓶子裏，祇要稍受震動，便要轟然作聲；後者即使有子彈穿過，也很安定。

圖 16 所示便是各原子核聚變或裂變所需的激發能。注意鈾的裂變激發能是如何之低。從這低的激發能量，以及圖 15 中所示的很高的裂變不安定能量，立刻就可以知道，鈾核的裂變必可放出鉅額的能量。至於怎樣加入那必需的激發能，俾可

解放這鉅額的能量，即將在以下各章中討論。圖 17 係將幾種不安定元素的裂變不安定能，畫成幾個山峯的高度（仿照前面講過的水力比喻），而將所需激發能畫成山頂坑穴的深度。注意在這圖中 TNT 的爆發能與激發能，並不依照同樣的比例尺畫成。從註明的數字看來，一個原子的 U^{235} 發生裂變時所解放的能量，約為一個分子的 TNT 發生化學反應時所解放的能量的 20,000,000 倍（二千萬倍）。

單從這一個倍數，已可見到原子炸彈比了人爲的炸彈有怎樣大的差別；若把真正的差數寫出來，那個數目是太大了，將使我們無從想像。總而言之，這裏邊包含着一個完全新的能量尺度，以及一個完全新的概念。

第四章

核轉變：鐳與放射蛻變

10. 【鐳的放射性】 居禮夫人(Mme. Curie)發見鐳和鑑定鐳的功績，差不多每個人都知道。她的工作，乃是現代物理學與現代化學的重要進展之一。在她發見鐳以前，柏格勒爾(Bequerel)先曾發見，一張遮蔽着的照相底片放在鈾的化合物附近時，宛如露在日光裏面一樣。儘管遮蔽照相底片的紙很厚，厚到最強烈的光線決不能透過的程度，也還是有露光般的現象發生。柏格勒爾就推測鈾必定具有某種性質，可以放出貫穿性極強的射線，不在可見光的範圍之內，而有相仿於光的特性，使照相底片變黑。這些射線不能夠被平常包照相底片的紙擋住，這就是它們具有強烈貫穿性的證據。

居禮夫人將柏格勒爾所發見的現象再加以研究，證明了發出這些射線的活性物質並不是鈾，而為一種前此所未發見的元素，天然存在量極微，常與鈾在一起。她就稱此新元素為鐳。鐳在天然的礦中何以常與鈾在一起，那是因為鈾為不安定元素，徐徐自行變成鐳之故。實際上的過程是很複雜的，鈾經過變遷(transmutation)為中間其他幾種不安定元素，然後變成鐳。鐳也徐徐自行變化，經過中間的幾個元素，最後變成安定元素鉛。這樣的一串元素叫做放射系，其中每個元素就叫做放射元素(radioactive element)，都有射線放出來；這種特性叫做放射性(radioactivity)；而一元素經放射後變成他一元素的變化，叫做放射蛻變(radioactive disintegration)。

放射系有三個，分別出自鈾、釷及錒。天然產量極少的鈾同位素 U^{235} （祇有平常的 U^{238} 的 $1/140$ ），其實並不在鈾系之內，而應在錒系之內。然因它們的化學性質很相同，所以它們在自然界內常居於一處。三個放射系經過中間各階段後都變成鉛，不過它們並非一種的鉛，而是鉛的三種同位素 (Pb^{206} , Pb^{207} , Pb^{208})。天然產的鉛便是這三種同位素以及第四種同位素 Pb^{204} 的混合品。

現在，我們且把注意集中於鐳。鐳依固定的可以測定的速率，蛻變為另一重元素，即不活潑氣體氦。

在蛻變時，鐳放出三種不同的射線。第一種叫做亞爾法射線 (alpha ray)，或亞爾法粒子，乃是許多動得很快的氦離子。氦原子是兩個質子，兩個中子，兩個

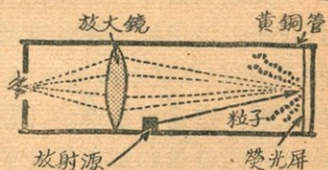


圖 18 閃爍鏡。

電子構成的，剝去一個電子或兩個電子，就可成功氦離子。實際上，兩個電子都剝掉，而亞爾法粒子就是氦核。亞爾法粒子的存在，可用一種叫做閃爍鏡的簡單儀器來檢視。

閃爍鏡內有一塊螢光屏，上面敷着一層螢光質例如硫化鋅，另有目鏡一片，可將此屏放大。當亞爾法粒子射擊此屏時，硫化鋅即起變化而有所謂螢光的閃光發出來。這閃光即由目鏡將它放大。所謂“夜光鐘”或“夜光錶”的盤面上，亦有同樣的現象發生。在這種盤面上，塗有極微量的鐳化合物和硫化鋅的混合物，故有亞爾法粒子常與硫化鋅的分子碰撞，發出閃光來。盤面放在黑暗之中，即可因此閃光而辨認指針與字。

亞爾法粒子運動的速度非常之大，介於每秒 2,000 英里到 20,000 英里之間，約等於光速度的百分之一到百分之十。

因爲速度很高，所以它們具有很大的動能。它們能夠貫穿數厘米厚的空氣層，或不到一毫米厚的薄金屬片，方始失盡動能。它們每同別的原子撞一次，便失去一點兒能量，直到最後不再前進爲止。撞擊時失掉的能量，並不成爲熱能而散逸，卻消耗於把所撞原子的電子撞掉。這樣一來，就有離子產生了。所以亞爾法粒子前進時，在空氣中沿路留下很多離子，假使我們有辦法察知這些離子的蹤跡，我們至少能夠曉得亞爾法粒子的路徑。關於如何觀察的方法，下文就要講到。

從鐳放出來的第二種射線，叫做倍打射線(beta ray)或倍打粒子。這倍打射線其實就是從鐳原子內放出來的快速電子注，它們在空氣中或金屬中，可以比亞爾法粒子進行數百倍遠的距離。這是很合理的，因爲亞爾法粒子(兩個質子再加兩個中子)的質量約爲倍打粒子的7500倍。假使一個倍打粒子與一個亞爾法粒子有相同的能量，那麼倍打粒子必定比亞爾法粒子快得多，而要走較長的距離，它的速度方因沿路撞擊別的原子(它所電離化的原子)而趨於零。故若它與亞爾法粒子因有同能量而可造成同數的離子，則在等長的一段路程上，它所造成的離子數顯然比亞爾法粒子所造成的要少一些。亞爾法粒子與倍打粒子的能量實際上雖不恰恰相等，但亦相差不遠，故上述的結論頗近於實況。

從鐳放出來的第三種射線叫做茄瑪射線(gamma ray)，根本不是粒子。它與光很相像，尤其像頻率很高的X射線。茄瑪射線的速度等於光的速度，且係一種波動的進行。它們與光不同之處，只在於頻率很高；換言之，它們的波長很短。其實種種電磁輻射的區別，都在頻率之不同，例如無線電波，雷達波，輻射熱，紅外線，可見光，紫外線，X射線，茄瑪射線以及宇宙

射線，它們的頻率就在按次遞增着，同時它們的貫穿本領也隨之而遞增。要遮斷茄瑪射線，須有幾英寸厚的鉛板，而原子炸彈所產生的輻射，則須幾英尺的鉛板或水泥，方始擋得住。茄瑪射線的貫穿本領，顯然比亞爾法射線比倍打射線都大得多，因為亞爾法射線與倍打射線祇要用薄金屬片就可以擋住了。茄瑪射線在物質中進行時，亦能產生離子。

講到這兒，讓我們說一說放射蛻變過程中所生粒子的檢查與計數法。最簡單的方法是用金箔驗電器，這是讀過初等物理學的人都知道的一種儀器。驗電器帶電時，銅球、銅棒以及棒端所附的兩條金箔上，都分布着同性的電荷。假定這電荷是正的，如圖 19 所示。金箔上因為有同性電荷，互相斥拒，所以兩箔張開。金箔又薄又輕，很小的斥力即可使它們張開到可察的程度。

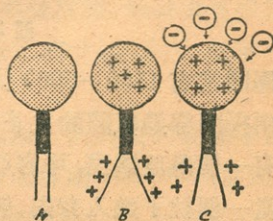


圖 19 金箔驗電器

A 未帶電時；B 已帶電時；

C 電荷的中和。

銅球附近若有離子產生，陰離子即被吸到帶陽電的銅球上而與其所帶陽電中和。金箔上的電荷也跟着消失，兩箔即垂下。垂下的速率正比例於離子在銅球附近產生的速率；這個速率又視亞爾法粒子或倍打射線或茄瑪射線進入銅球附近空間的速率而定。所以金箔下垂的速率，與亞爾法或倍打或茄瑪射線進入銅球四週空間的速率，有直接的關係。根據這簡單的驗電器原理而作適當的精細的改良，即可得一很靈敏很準確的檢查與計數的儀器。

第二個方法是用一種叫做蓋革計數器 (Geiger Counter) 的儀器，約如圖 20 所示。此器有兩個電極，一個是金屬圓筒，

還有一個是與圓筒絕緣的一條金屬細線的尖端，地位在圓筒中央。兩電極間有低壓氣體隔開，全部密封於玻璃套內。兩電

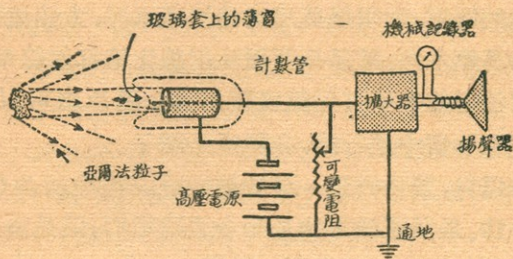


圖 20· 蓋革計數器。

極間常有 1500—2000 伏特的電位差保持着。這個電位差僅比兩極間穿過氣體的火花放電所需電壓稍低一些。玻璃套前部有一個薄玻璃窗，可容亞爾法、或倍打、或茄瑪射線穿入套內。當一個粒子進入套內，經過細線尖端附近時，氣體內即有足數的離子產生，於是兩極間即行放電。

放電時，外電路內有暫時的電流通過。然而粒子一過去，這放電立刻停止，因為外電路中的電阻具有限制電流及漏電入地的功用。這外電路與一個擴大器通連，放電的作用經擴大後，可使揚聲器發出一個聲音，或轉動記錄器上一個數字，或使一具示波器的屏上顯出可見的一個脈動。

蓋革計數器對於研究核反應非常有用處，而且可以製造得非常靈敏，即使一個亞爾法粒子，一個倍打粒子，一瞬間的茄瑪輻射，也能檢查得出。在玻璃套的薄窗前面放一個適當的屏，即可將觀察者所注意的那種粒子以外其他各粒子，完全濾去。

11. 【放射衰變】 放射元素蛻變為他一元素，其原來的

原子數逐漸減少，這種減少的過程叫做衰變(decay)。衰變實屬所謂“統計過程”的一例。這句話的意思是說，在某一特別過程中進行的原子數，與當時所有的原子總數成比例。此種過程也可以稱為或然率過程。人口的增減便是一個大家熟悉的普通例子。設在某一地方，人口出生率超過死亡率千分之四十，那麼在一年之內，十萬人的口將增為十萬零四千人，二年之內將增為 108,160 人，因為千分之四十是以每年所有人口為準的。這樣的遞增趨勢，還可以用另外一種說法來表示，那就是約十八年人口增加一倍。倘若人口不增反減，那麼也可推得相仿的關係。例如人口遞減率是千分之四十，則約十七年人口減少一半。

放射元素的衰變相仿於人口的遞減。例如鐳的衰變率是每約 1580 年減為一半。換言之，一克鐳經過 1580 年的衰變，剩下半克，再經 1580 年的衰變，祇剩四分之一克。一定量的放射元素，經衰變而剩下一半量所需的時期，叫做半衰期 (half-life period)。

下列各點，甚為重要：——半衰期的長短與當時該元素所有的分量並無關係，祇要此原子的數目還是非常之大；任一放射元素（或同位素）的半衰期是一個常數。半衰期因放射元素種類之不同而大有差別。例如重鈾(U^{238})的半衰期是 4.5×10^9 年，而其衰變至鐳，再由鐳至鉛所經中間各放射元素，半衰期有短到不過百萬分之一秒的。半衰期較長的放射元素，當然比半衰期較短的安定。

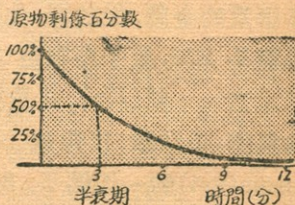


圖 21 鈾的同位素 Po^{218} 的衰變曲線。

鈾的同位素 Po^{218} ，它的半衰期祇有三分鐘。如圖 21 所示，即為 Po^{218} 的衰變曲線。開始的時候若有一克，則三分鐘末祇剩半克，六分鐘後祇剩四分之一克。任何時刻剩下的多少，可從此曲線求其略值。注意衰變的速率在曲線頂上較高，在曲線下端較低。理論上講來，未化之量永不能到零，不過在實際上，降低到不可測的微量時，也就不見蹤跡了。下文我們要討論一個新元素，叫做鏷(plutonium, 略號 Pu)，是近年來研究原子炸彈時所發見的。它的半衰期祇有 25,000 年。如果在數萬萬年以前地球初成形的時候，頗有一點鏷存在，那麼到今日也已經少到不復可察了。所以我們可說，自然界中沒有鏷存在。

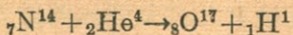
與放射元素的衰變期有關的，還有一件值得注意的事實，即衰變期的長短，與溫度、壓力、催化劑之存在，以及可以影響化學反應的其他因素，都無關係。截至現在為止，所有得到的證據都證明任何放射元素的衰變期是常數。

12. 【核的轉變】 在第一章內我們說過，原子是能夠存在而又保留其所組成的某元素特性的最小粒子。我們又說過，原子不能用任何化學方法毀損它。由此可知，放射性元素的蛻變乃是新的現象，不在平常化學變化範圍之內。例如鐳 (Ra)，是很重的金屬，很活潑，化學性質很像普通的鈣 (Ca)。它的質量數是 226，原子序數是 88。但鐳經蛻變即成一種完全不同的元素——氡 (Rn)，質量數是 222，原子序數是 86，氡是很重的氣體，不活潑，很像氖 (Ne)。這便是核轉變 (nuclear transformation) 的一個例子。所謂核轉變，即是一元素轉變成另一不同的元素。這種轉變的發生與進行，雖然未經我們的推動，未受我們的控制，但是我們卻由此看到了一個新奇動人的可

能性。因為我們現在知道，原子並不是不可打破的，而且知道一種原子能夠變成另外一種原子，所以我們覺得有使一元素任意變成另一元素的可能性，甚至可以製造自然界中未曾前聞的新元素。古代鍊金術士的夢想恐怕有實現之一日，我們也許能夠從鉛造出黃金來。讓我們來看一看，我們的工作需要些什麼工具。

使元素轉變（就是使原子核轉變），我們有兩種方法可以達到這個目的。我們可將粒子加入核內，以增加原子序數與質量數；我們也可以從核內取出粒子來，以減少原子序數與質量數。怎樣實行呢？現在所知的任何化學方法，是都沒有用的。我們必須直接對原子核着手。四十年前的物理學家，早已成竹在胸，開始利用那天然產生的亞爾法粒子與電子，去轟擊種種原子核。後來，別的粒子如質子、氘子等等，可用人工產生了，也就用它們來做轟擊原子核的彈丸。（在第七章內，我們要討論到人工產生這些粒子的種種方法。）

他們起初轟來轟去轟不開那堅壁固守的原子核，直到1919年，羅德福方始發覺，用動得很快的亞爾法粒子轟擊氮原子核，他便能夠得到氧的同位素，這些亞爾法粒子的來源便是蛻變中的鐳。用方程式表示，當如下式：



元素略號的下角數字表原子序數，上角數字表質量數。注意方程式兩端的原子序數總和（質子總數）應相等，而質量數總和（質子中子總數）也應相等。試查週期表，氧的原子量是16，而這裏的氧的質量數是17。所以這個核轉變產生了氧的同位素 O^{17} ，這種同位素非常安定，在空氣中約佔平常氧素的0.04%。

從這種所謂核轉變或核反應 (nuclear reaction) 產生的重氧，為量是極微的。其實任何核轉變所產生的東西，直到目前的原子炸彈副產物，都是微乎其微，不能直接衡量其多寡。那麼羅德福又怎能夠知道轟擊氮核的結果是什麼呢？

13. 【韋爾生霧室】 要回答上面的問題，我們必須說明一種現代物理學上不可缺少的利器，仗此利器，原子核專家方能解釋他的實驗結果。這件利器叫做韋爾生霧室 (Wilson Cloud Chamber)，它的作用與原理實在是非常簡單的。這霧室是一個圓筒，筒底有一個活塞，筒內藏有空氣(或其他氣體)。筒底活塞上有

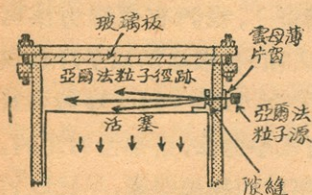


圖 22 韋爾生霧室。

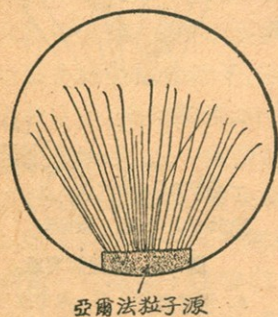
水少許，飽和水汽充滿於空氣之中。

今若使活塞很快的向下移動(移動活塞另有巧妙的裝置，不在圖內)，則圓筒內的空氣突然膨脹，它的溫度便要稍稍降低一點。在物理學上，這現象叫做絕熱膨脹(adiabatic expansion)。被壓縮的氣體若從噴口急劇地噴射出來，噴口便要冷卻，也就是這種現象的一例。筒內空氣的溫度既已降低，其中水汽即從飽和狀態變為過飽和狀態，亦即空氣中所含的水分子比了應含的更多。換言之，空氣的相對濕度已超過了 100%。然空氣中倘若沒有塵粒或離子可為水汽凝結的中心，則過多的水分子仍能以汽態暫時存在於空氣裏邊。水汽凝結之必需有凝結中心，可以證諸英京倫敦的常有大霧，因為倫敦上空的塵煙是很多的。

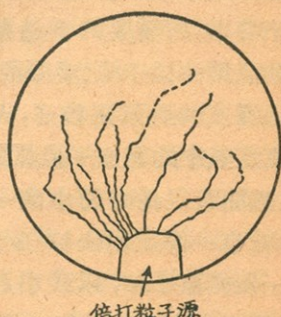
韋爾生霧室的活塞向下移時，因為筒內空氣起初並不潔淨，其中含有塵粒，足供凝結中心之用，所以室內即有霧生成。

霧向下沈，落於圓筒底（即活塞頂）上，空氣中的塵粒隨霧同降。於是命活塞上升，再很快的使它降下，則空氣再起絕熱膨脹，霧又生成，又有塵粒隨霧落下。如是循環數次以後，室內空氣中的塵粒差不多除盡，即有剩下來的，也不足以在空氣作絕熱膨脹時使霧生成。現在，設取鐳一塊，移近霧室側面的薄雲母片窗口，則有亞爾法粒子，倍打粒子，以及茄瑪射線，穿入室內，使離子在空氣中產生。此時令活塞下降，使水汽到達過飽和程度，則在所生成的離子上即有水汽凝結，猶如霧之生成一般。霧室頂假使是透明的，我們就可以看見一條條白色的霧跡，襯着黑幽幽的圓筒底，非常清楚。所以我們有一個差不多直接的方法，來觀察帶電粒子的徑跡。注意，這是帶電的粒子的徑跡。不帶電的粒子是不能產生離子，不能使霧生成的；所以不帶電的粒子，不能夠在霧室中檢查它們。

粒子在霧室中造成的徑跡，我們加以查察，即可獲得關於粒子本性的很多知識，且可藉以鑑定未知的粒子。如圖 23 與 24 所示，即為鐳蛻變時所放射的粒子在霧室內的徑跡草圖。



亞爾法粒子源



倍打粒子源

圖 23 霧室中亞爾法粒子的徑跡。

圖 24 霧室中倍打粒子的徑跡。

亞爾法粒子的徑跡短而略粗，因為它們的速度低；所以走不多遠，動能盡失。至於徑跡之粗，則因其每行一厘米所生離子很多之故。

較輕而又較快的倍打粒子，在尚未失盡動能前可走較長的路程，所以在霧室內造成的徑跡也較長。又因其每行一厘米所生的離子為數較少，故徑跡也較細。此外更有一個顯著的不同之處，即亞爾法粒子的徑跡，是直的連續的，倍打粒子的徑跡則為彎彎曲曲的不連續的，這是因為倍打粒子的質量太小以及所引起的電離化很弱的緣故。

茄瑪射線也能夠在韋爾生霧室內產生離子，因而也有徑跡留下。然而茄瑪射線的引起電離化，情形與亞爾法粒子及倍打粒子不同，而且頗為複雜，此處不擬細講。所可說的是，茄瑪射線的徑跡很多，很細，很散亂，極容易辨別，不致同亞爾法粒子或倍打粒子的徑跡相混。

我們現在可以把羅德福當時的實驗來講一講了。這個實驗做起來並不費事，所需要的不過是一個霧室和亞爾法粒子源（參閱圖 25, A）。進入霧室的亞爾法粒子，大多數不過使空氣中的氧原子或氮原子電離化；然而在很長時間中的一剎那之際，總有一個亞爾法粒子恰好撞着了——個氮原子核，以致引起了核轉變，產生重氧核，放出一個質子來，如圖 25, C 所示。圖 25, B 是這個過

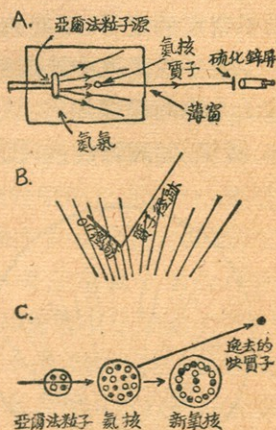


圖 25 羅德福實驗。

A, 儀器簡圖；B, 霧室照片簡圖；C, 核轉變之說明，黑點表質子，白圈表中子。

程的霧室照相的簡圖。注意亞爾法粒子的徑跡，有一條頭上有粗細不同的兩個分枝，短而粗的一條是所成新氧核的徑跡，長而細的一條是放出質子的徑跡。因為質子的質量祇有新氧核質量的 $1/17$ ，所以質子動得較快，徑跡也就應當較長較細。故將徑跡的長短粗細測定後，即可鑑定它是何種粒子所留下的。

欲知這個反應的完全情況，實際上須要用兩具照相機放在不同的地位來攝取相片，俾可決定三種徑跡間準確的角度關係。爲了決定各粒子的動量起見，角度是非知道不可的。動量是質量與速度的乘積，所以知道了動量，及測定了徑跡的長度，就可以推算質量與速度了。羅德福就是根據這樣實測的結果，再與理論相參證，鑑定了重氧核的產生與質子的放出。

射入霧室內的許多亞爾法粒子，祇有極少數能夠引起氮的蛻變。這是不難了解的，祇要我們想到原子的直徑比核的直徑大得多，而核轉變的發生又非直接擊中原子核不可。我們總還沒有忘掉，原子的直徑是 10^{-8} 厘米左右，而核的直徑不到 10^{-12} 厘米。圓與球的面積是與直徑的平方成正比例的，現在核的直徑祇有原子直徑的一萬分之一不到，故若以核爲目標，則此目標的大小，差不多祇有整個原子的一萬萬分之一。於是擊中原子的亞爾法粒子，它的擊中核的或然率，也差不多是一萬萬分之一。換句話說，平均需要約一萬萬個亞爾法粒子去轟擊一個氮原子，或一個亞爾法粒子須穿過約一萬萬個氮原子，方能擊中一個氮核。須知亞爾法粒子穿過原子時，是要使原子成爲離子而本身失去一點能量的。通常一個亞爾法粒子的動能約爲一百萬電子伏特 (1 Mev)；它在尚未停止運動以前，約可使兩萬個原子電離化。照這樣的推算，我們至少要用五千個亞爾法粒子，方可保得定擊中一個氮核。然而這個數目也還是

靠不住的，因為尚有一種力要阻止亞爾法粒子與氮核的碰撞。這便是帶陽電的亞爾法粒子與帶陽電的氮核間的庫侖斥力。即使擊中了原子核，尚有第三個因素要使核轉變的或然率減低。這便是核的安定性很大，亞爾法粒子進去了之後，未必破壞那安定的局勢而引起任何變化。核受擊中後，也許仍把亞爾法粒子拋出來；換句話說，亞爾法粒子正好比打在橡皮的障壁上。物理學家說起來，有所謂“位能屏障”(potential barrier)也者，非先打開它不可。這位能屏障與第一章所說山頂積水的坑穴相仿。

因此，把核轉變的或然率弄得很低，有三個因素：(一)核的目標面積太小；(二)兩個帶電粒子間的斥力；(三)位能屏障必先打開。三種因素聯合起來，遂使亞爾法粒子擊入核內的或然率，低到祇有十萬分之一。因此，十萬個亞爾法粒子齊向氮原子轟擊，祇有一個能使氮核變成重氧核，其餘的都廢了。

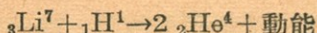
回頭再講到霧室照相，我們就知道必須要照好多張，方能得到一張有蛻變徑跡的照相。爲了避免麻煩起見，我們可以利用自動的裝置，剛剛在霧室內空氣膨脹的當兒攝取。照相攝取以後，霧室必須再收小，且須清除室內的霧。清除之法，係將電荷加於室壁，此電荷吸引離子，同它們中和，水滴便都附着在壁上。於是便可準備下一次的膨脹。所覺困難的是，用來清除的時間差不多四十倍於膨脹的時間，以致作此實驗的時間祇有百分之二多一些可供觀察之用。不過現在的霧室，已經利用真空管電路予以更進一步的改良，可使照相祇在核轉變發生而有徑跡出現的時候攝取。不但如此，還可以使它祇對於某一特殊的核轉變發生作用。這樣一來，實驗觀察的時間以及照相底片，都可以大大的節省。

第五章

核轉變續：質量與能量的等價

14. 【核轉變與核裂變】 前一章中我們已知用高速亞爾法粒子轟擊氮核，即能把氮變成氧的同位素。自從羅德福發見此事以後，別的物理學家紛紛繼起仿效，用速率不同（即動能不同）的亞爾法粒子，以及其他粒子如質子、中子、氘子等，轟擊其他元素，得到了很多種不同的核轉變。這些不同的反應，到下文再分別細說，但是我們可以先總括一句話，這些粒子擊中某元素或其同位素的原子核時，該元素或同位素的原子序數，以及（或）質量數，就增加或減少一，或二，或三，或四。其結果，也許生成不安定的過渡元素。若此過渡元素有放射性，它就會放出電子或正子，亞爾法粒子或茄瑪射線來。茄瑪射線雖非粒子，也可以刺激原子核，使它發生蛻變。這些核內的變化，雖然都祇限於極少數的質子中子個數之增減，卻也有一個重要的例外。這個重要的例外即是全核劈開成兩塊或不止兩塊。這種現象就是所謂核裂變(nuclear fission)。例如鈾核被中子轟擊，即成兩塊或三塊或四塊，而原子能與原子炸彈的可能性，就是從分成兩塊的核裂變而來的，下文我們就要專講鈾的這一種裂變。

15. 【核反應中的質量變更】 現在讓我們先來考察一個核反應中質量變更的例子，這便是用質子轟擊鋰（原子序數3，質量數7）的結果。據實驗所得，已知每一個鋰原子核被質子轟擊，就有兩個氦原子產生出來。用方程式表示就是：



假使我們不用一個原子做單位而用一個克原子做單位，比較作用物 (Li, H) 與生成物 (He) 的質量，我們就得到一個重要而有趣的報告。採用那用現代質譜儀所決定的最準確的克原子量，我們有下面的數字計算：

Li 的質量——	7.01818 克	He 的質量——	4.00389 克
H 的質量——	<u>1.00813 克</u>	He 的質量——	<u>4.00389 克</u>
作用物總質量	8.02631 克	生成物總質量	8.00778 克

從這計算，我們立即知道兩個總數不能平衡。實際上，生成物的質量確比作用物少 0.01853 (8.02631 - 8.00778) 克。假使我們的實驗做得非常仔細而準確，也並沒有產生別的粒子來彌補這缺少的質量，那麼我們似乎祇可以論定，這一點物質是毀滅了。但是這一個結論與我們的常識相矛盾，且與物理學上化學上的基本定律“質量不滅不生”相抵觸。況且我們還有一條定律“能量不滅不生”，氦核的動能來自何處亦無從解釋。因此，我們就不得不把我們對於質和能的概念修正一下。相對論的發明人愛因斯坦 (Einstein) 證明過，“在某一個系統之內質量與能量的總和是常數，但質量與能量可以互相轉換。”根據這兩句話，上述質量消失能量產生的現象便有了解釋：消失的質量轉換為產生的能量。最仔細最精確的實驗告訴我們，在鋰核與質子的反應中，那些飛出來的氦核，速度非常之高，約等於光速度的二十分之一，可見它們都具有很高的動能。愛因斯坦又證明過質量與能量之間，有一個很簡單的轉換公式：

$$E = mc^2 = km$$

式中 E 是能量的耳格數， m 是質量的克數，而 $k=c^2$ 則是一個常數，等於 9×10^{20} 。“ c ”的數值是 3×10^{10} ，而光的速度亦

是 3×10^{10} 厘米/秒，就上面所舉的例子而說，0.01853 克的質量不見了，就有 $(0.01853) \times (9 \times 10^{20}) = 1.67 \times 10^{19}$ 耳格的能量出現。一耳格的能量是太小了，我們可以將它化成較大而較熟悉的單位。一耳格 = 9.48×10^{-11} 英國熱單位 = 7.38×10^{-8} 呎磅 = 2.77×10^{-13} 仟瓦小時。所以 1.67×10^{19} 耳格的能量就等於 1.58×10^9 英國熱單位。燒煤一磅所生的能大約是 15,000 英國熱單位，所以燃燒一噸煤所生的能就是 $(2000) \times (15000) = 3.0 \times 10^7$ 英國熱單位。拿這個數值同 1.58×10^9 英國熱單位一比較，就知道祇要 7 克的 Li 同一克的 H 起了核反應，所生的能量等於燃煤 50 噸所得的能量。一磅等於 454 克，所以一磅的 Li 發生核反應，其所生能量約等於燃煤 3250 噸或 7 百萬磅所得的能量。這真是一個很大的數目，然而在核反應方面還是平常得很。有的核反應所生能量，要比這個數值大得多；竟有比平常的化學反應能大至一萬萬倍的。平均約在一千萬倍左右。

質量轉換為能量這一個概念，在多數人看來還是一個很新的概念，他們從前學過舊物理學，以為質量不可滅而能量也不可滅。歡喜追根究蒂的讀者一定馬上要問，質量與能量的可以互相轉換，從前為什麼沒有查探出來。須知從前祇有平常的化學反應而沒有核反應，化學能的變更遠較核能的變更為小，以致質量的變更小到不可察覺，這便是從前沒有查探出來的理由。舉一個例來說，假定我們加熱於 500 加侖的水，使它的溫度從冰點 (32°F) 升到沸點 (212°F)。因為一加侖的水重 8.33 磅，所以我們加入水內的熱能祇有 $(500) \times (8.33) \times (212 - 32) = 750,000$ 英國熱單位。將此單位化成耳格， $(7.5 \times 10^5) \div (9.49 \times 10^{-11}) = 7.9 \times 10^{15}$ 耳格。依照愛因斯坦質能轉換方

程式，質量一克相當於 9×10^{20} 耳格，所以加入水中的熱能祇相當於 $(7.9 \times 10^{15}) \div (9 \times 10^{20}) = 0.000009$ 克。此量約為一毫克的一百分之一，而平常的化學天平所能準確測定的最小單位不過是一毫克。即使用微量天平來稱，要辨別 0.000009 克的增減，也祇有在衡量幾毫克的樣品時纔行。幾百加侖的水要稱出這樣小的質量差別來，顯然是一件不可能的事情。所以我們必須等到核反應的鉅額能量變更已被發見之後，質量的變更方始大到足以察知的程度。

16. 【核反應的預示】 化學反應的可能性是可以預示的，同樣，核反應的可能性也可以預示。所需做的事情不過是寫下一個方程式，使其兩端平衡，並且開列適當的原子量，一如我們計算鋰的核反應一般。假使生成物的質量小於作用物的質量，那麼必有能量解放出來，而反應即是可能的。在另一方面說，假使生成物的質量大於作用物的質量，那麼就必須將能量加入，方可使反應進行。一般地講來，解放能量的反應是可能性較大的反應。

我們既然知道了所有的原子核都由兩種基本粒子所組成，即質子與中子，那麼我們若將核的質量與它的成分比較一下，似乎可以得到有用的知識。據比較研究的結果，核的質量若比它的成分“自由”質子與中子的質量總和小，那麼核就是安定的，而所少之質量叫做質量虧 (mass defect)；倘若較大，就是不安定的，而所增之質量叫做質量超 (mass excess)。如果一個核是不安定的，它的不安定能量就與質量超成正比例，並且它有經由裂變或聚變而成為安定核的傾向。

17. 【緊束分數】 爲了衡量核的安定性須有簡便的尺度起見，我們就把圖 26 所示的緊束分數 (packing fraction) 曲

線利用一下。此曲線以氧爲零點；氧的質量數是 16，原子量也是 16。其他各元素的原子量，則比質量數略大一點或略小一

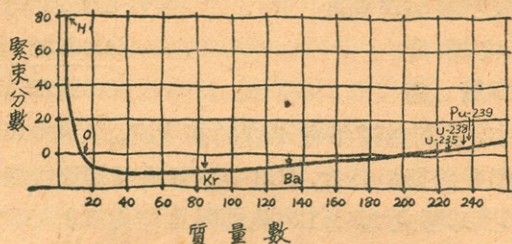


圖 26 緊束分數與質量數的關係。

點。例如氫的質量數是一，它的原子量是 1.00813（參閱第 15 節），比一略大。所謂緊束分數的定義就是，質量數與原子量的差，除以質量數，再乘以一萬。所以氫的緊束分數就是

$$\frac{1.00813 - 1.00000}{1} \times 10,000 = 81.3$$

又如氦，原子量是 4.00389（參閱第 15 節），質量數是 4，所以它的緊束分數是

$$\frac{4.00389 - 4.00000}{4} \times 10,000 = 9.7$$

注意氦的緊束分數比了氫的緊束分數小得多，這就表示 He 比 H 更安定。較輕的氫核聚變成較重的氦核，也是有能量解放出來的。現在我們來算算看，理論上每有一克原子的 He 生成時，解放出來的能量有多少。

氦核是由兩個質子與兩個中子組織成功的，所以可得算式如下：〔按 6.0×10^{23} 個粒子計算，數字根據史邁士 (Smyth) 著“軍用原子能”，該書有章康直譯中文本，由中國科學圖書儀器公司出版。〕

中子的質量	$2(1.00893) = 2.01786$ 克
質子的質量	$2(1.00758) = 2.01516$ 克
未成氦核前總質量	4.03302 克
氦核質量	<u>4.00280 克</u>
質量虧	0.03022 克

從這些數字，我們知道每有 4 克的氫生成，就有 0.03 克的質量虧。依照愛因斯坦公式，把這一筆質量虧轉換成能量，約可得 2.8×10^{19} 耳格或 2.7×10^9 英國熱單位或 1.9×10^5 仟瓦小時。

這一個反應，在自然界中非常重要，因為太陽的能量就是從它得來的。太陽一刻不停地把它的氫轉換為氦，因而每秒放出 3.78×10^{33} 耳格的能量來。這一筆損失相當於每秒五百萬噸的質量損失。然而地球所獲得的太陽能量很少很少，祇相當於每日增加質量 150 噸。太陽已存在了不止十萬萬年，它的氫還沒有耗去原來的十分之一，太陽之大，可想而知。

惟恐讀者對於核反應產生能量的可能性過分興奮起見，我們不得不鄭重說明，剛纔所講由氫到氦的轉變與計算，不過指示反應的可能結果，並不指示反應進行的速率與條件。實際上，要使這種反應進行，必須維持約二千萬度的高溫一如太陽內部那樣纔成。反應進行的過程也不像我們所假定的那樣直接而簡單，而須經過很複雜的幾個

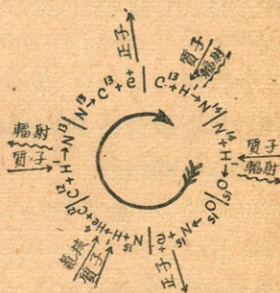


圖 27 碳的六步循環圖
太陽能量由此而產生。

中間階段，生成幾個過渡的不安定的元素。如圖 27 所示，乃是貝塞(Bethe)所擬的各步循環。第一步，碳十二(C^{12})的原子核被質子轟擊，生成放射氮十三(N^{13})，同時放出輻射能。第二步，氮十三放射正子，蛻變為碳十三(C^{13} ，碳的同位素)。第三步，碳十三的核與質子併合，變成氮十四(N^{14})，同時放出輻射能。第四步，質子撞進了 N^{14} 的原子核，生成放射氧十五(O^{15})，同時放出輻射能。第五步， O^{15} 放射正子，蛻變為氮十五(N^{15})。第六步，質子擊中了 N^{15} 的核，生成氦核 He^4 與碳核 C^{12} 。綜合六步，四個氫核沒有了，多了一個安定的氦核，放出了鉅量輻射能；此外，碳素在第一步中不見，到第六步又出現。它身經六變，依然故我，這也好說是造物的神妙奇蹟了。

18. 【熱核反應】 像上面舉例說明的那一類的核反應，它們的進行可能性或方向，單從參加反應的各元素的準確質量，即可預示。然此等反應的速率，卻受激發能的影響。設激發能很高，則須有很高的溫度方可使反應進行。設激發能較低，則低溫度即可促使反應進行。圖 28 的能量分佈曲線可以告訴我們溫度對於反應有怎樣的影響。這曲線所指示的是，在某溫度下具有某能量的原子（或分子）個數。注意能量很高的與能量很低的原子（或分子）個數都很少，能量適中的就很多。

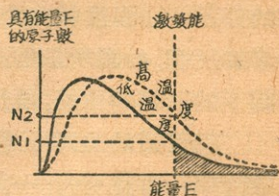


圖 28 能量分佈曲線。

在第一章內，我們講述氣體分子的運動時，好像假定氣體的各分子有同樣的速度，亦即有相等的動能。其實並非如此。盈千累萬的許多氣體分子中，有一小部分具有很低的能量，又有一小部分具有很高的能量，大多數的分子則具有不高不低

的平均能量。這是合乎統計學上的定理的。舉一平常的例子來說，一班學生之中，成績在甲等的很少，成績在劣等的也很少，成績在中等的為數最多。這樣的統計曲線，人數愈多時，愈近於圖 28 所示的樣子。

須知在許多分子（就核反應而言則為原子）中間，祇有那些具有超出於平均能量以上某能量的，方能很活潑的參加反應。這裏所謂平均能量以上某能量，即是激發能。當溫度增加之際，一切分子或原子的動能都有增加，於是有更多的分子或原子，它們的能量超過激發能，因而很活潑的參加反應。所以反應進行的速率也跟着溫度同增。

我們試看圖 28，即知在低溫度時有 N_1 個原子的能量等於激發能。凡具有這能量或更高能量的原子（都在激發能縱線以右），都能活潑地參加反應。這些原子的總數，可用低溫曲線，橫軸，以及激發能縱線所圍的面積來表示（圖中有陰影的即是）。溫度較高時，從圖可知有更多的原子，能夠活潑的參加反應。如圖所示的高溫曲線下的面積，差不多等於低溫曲線下的面積的兩倍，故反應的速率亦將增為兩倍。

就普通的化學反應而論，激發能大概在每克分子一萬到四萬卡 (calorie) 之間，而溫度每昇十度反應速率便加倍。但就核反應而言，激發能動輒數百萬卡，所以溫度必須提得非常之高（決非數十度與數百度可以應付得了），核反應的進行方有可以察覺的速率。平常純用加熱的方法，到此已感技窮。我們所加進

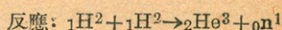
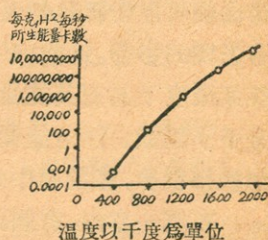


圖 29 溫度對於熱核反應的影響。

去的熱，真是杯水車薪，無濟於事。所以我們祇得捨此而另謀別法，以求得高速率的粒子。圖 29 所示，即是一個標準核反應所受溫度的影響，圖中溫度以千度為單位。由圖易知，溫度增高，反應即急劇進行，但是這樣高的溫度，豈是現在的人工可以弄得出來的！

19. 【核裂變】 在前面圖 26 中，我們看到元素的質量數增加時，它的緊束分數就減低——從氫的最高值下降，到中間的質量數時最低，然後又隨質量數的增加而同增。緊束分數愈小，表示元素愈安定，所以我們可以推知，輕元素其質量數較小者，可經聚變為週期表中段的元素而自趨於安定。仿此，質量數較大的重元素，可經裂變為週期表中段的元素而自趨於安定。兩種過程，皆有能量放出來。這與上文用核液比喻時所得結果相同。原子炸彈所根據的原理，則為核的裂變而非核的聚變。

我們應當注意，在週期表中重元素的一端，鈾的緊束分數最大；故就核裂變而論，它是地球上天然產的最不安定的重元素。同時，它的激發能很低，所以鈾核的裂變，不但在理論上是可能的，而且實行起來的可能性也很大。中鈾(U^{235})比了 U^{238} 更不安定，而且激發能也更低，所以利用原子能時，不管為了和平還是為了戰爭的目的，我們對於 U^{235} 要特別予以注意。從這一個立場來說，還有一個新元素鏷 (Pu)，也是一個能幹的角色。

第六章

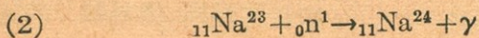
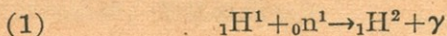
核轉變的種類：各附重要例子

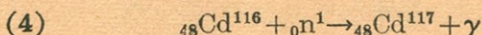
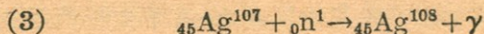
20. 【五類核轉變】 前章已經提及，核轉變的發生，可由不同的粒子轟擊原子核而引起。這些不同的粒子，固然引起不同的核轉變，即使是同一種粒子，也可以引起不同的核轉變。通常我們把這些核轉變分成五大類：(一)中子誘發；(二)氘子誘發；(三)亞爾法粒子誘發；(四)質子誘發；(五)茄瑪射線誘發。現在分別舉例說明如下：

21. 【第一類——中子誘發核反應】 這一類反應是用中子轟擊原子核而引起的。因為中子本身不帶電，所以在各種轟擊原子核的彈丸裏面，中子最容易穿透原子核電場所建的屏障。茲就反應的結果，分別舉例敘述於下：

(一)中子被捕獲，沒有粒子放出來。這種反應，我們常用(n capture)來表示。

在這種反應過程中，被轟擊的原子核捕獲一個中子後，它的質量數是增加了（也就是原子量增加了），但是原子序數及化學性質並不改變。故實際上的結果是產生了被轟擊元素的重同位素，同時往往有茄瑪射線放射出來，所以我們又常用略號(n, γ)來表示。這些同位素通常都有放射性（所放射的通常是電子），可用為化學研究或生物學研究方面的所謂“示蹤劑(tracer)”。現在舉四個例子於下：





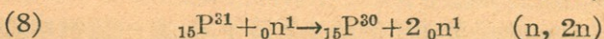
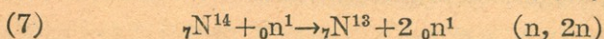
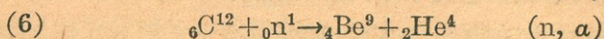
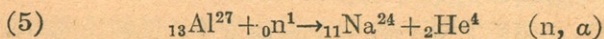
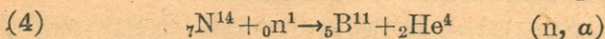
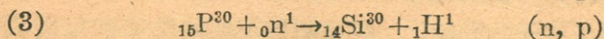
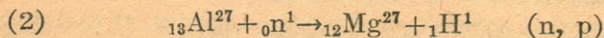
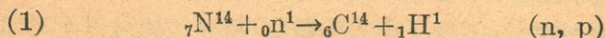
在這四個例子中，第三個很容易發生。身邊藏着銀幣或銀製物件，走近一架原子擊破機，銀幣或銀製物件便成功了放射銀。

中子被捕獲是“共振捕獲”(resonant capture)的一例。所謂“共振捕獲”的意思，是說祇在中子動能恰等於被轟原子核激發能的時候，這種反應方始發生。原子核的激發可以有很多階段，每一個階段相當於不同的一種反應。就某一種反應而論，假使中子的動能比了相當於該反應的激發能階段高一些或低一些，這個中子就不能夠引起反應。換言之，如果中子動得太快，必須使它慢下來，慢到動能恰等於某種反應所需適當的數值為止；如果動得太慢，那麼這個中子對於該種反應即是廢物。

太快的中子要使它們的速度降下來，有一個很明顯的方法，這就是讓它們同不起反應的別的原子核碰撞。這些碰撞後的中子，將它們的能量一部分，授與這些原子核，它們本身的速度就降下來了。兩個物體互相碰撞，引起最有效的能量遷移，這兩個物體的質量應當相等。例如一個象牙彈子與另一個象牙彈子碰撞，前者的能量即有全部給與後者的可能。但若這個象牙彈子撞在一個大皮球上，它便要跳回去，而大皮球則絲毫不受影響。又若這個彈子與一粒黃豆相碰，彈子便在黃豆上一直滾過去。所以最有效的質料可使中子慢下來的，乃是氫，因為氫的原子核質量與中子差不多相同。其他輕元素如氦，鋰、氘、硼、鈹以及碳，卻可以用來減低中子的速度，不過元素愈重，減速的效力愈低。又這些輕元素的化合物，也可以用為減速劑。使中子的動能減低因而可以提高其誘發核反應的效

力，這原是製造原子炸彈的基本問題之一，下文我們還要講一講。

(二)中子被捕獲，放出粒子來，這樣的反應，其所放出的粒子不外乎質子，和亞爾法粒子，但是也有把兩個中子放出來的。反應生成物，多數是別種元素，但也有生成同位素的。現在舉重要的例子於下：



以上八例後面的括弧中是表示各式核反應的略號。(n, p)表示中子轟擊，放出質子；(n, α)表示中子轟擊，放出亞爾法粒子；(n, 2n)表示中子轟擊，放出兩個中子。生成物往往有放射性，所放射的都是電子，但(n, 2n)這一種反應的生成物則放射正子。

圖 30 所示，即是第一例的霧室照片概略圖。中子因為不帶電，所以它的徑跡看不出。

22. 【第二類——氘子誘發核反應】這一類的核反應是用氘子即重氫核 (${}_1\text{H}^2$) 轟擊原子核而引起的。氘子誘發核轉變的效力很大，因

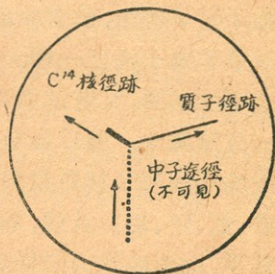
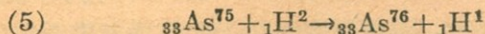
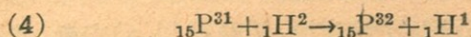
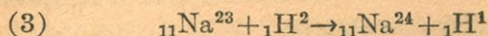
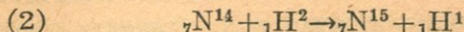
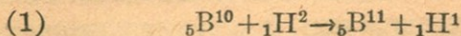


圖 30 中子轟擊氮核的霧室圖。

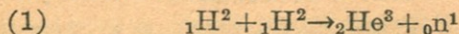
爲氘子本身的質量超頗高，具有大量“不安定”能之故。雖中子的效力比氘子要大些，但是氘子的來源，遠比中子容易得到。氘子誘發的反應，在製造人工放射元素方面是用得最廣的一個方法。

(一) 放出質子的反應，用略號(d, p)表示。因爲氘子由一個質子與一個中子構成，所以放出一個質子的結果，等於把一個中子加入被轟擊的原子核中去，猶如前一類反應中的捕獲中子一般。這反應又叫做“斐立普士—奧本哈墨”(Phillips-Oppenheimer)反應，因爲是他們兩個人所發見的。又因爲這種反應與中子捕獲有同一效果，所以在核反應中也是很重要的一種。現在舉例如下：



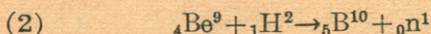
這些反應，多數在生物學的研究上很有用處，如上舉第(3)與第(4)例即有很廣的應用。又，(d, p)式反應的生成物若具放射性，則所放射者通常總是電子。

(二) 放出中子的反應，用略號(d, n)表示。這一種反應，常使被轟擊元素的原子序數(核電荷單位數)及質量數(核內粒子數)都加一，所以生成物是不同的元素，生成物若具放射性，通常放射正子。重要例子如下：

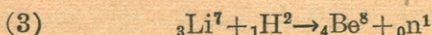


這一個反應是用氘子轟擊重冰(重水所結成的冰)而得到的。所產生的氦同位素質量數是3，在自然界中極少存在。圖 29

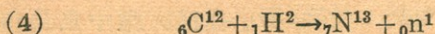
所示，便是溫度對於這個反應速率的影響。用氘子轟擊輕核，低能量粒子即足以勝過那小小的核電荷斥力，故在上述反應過程中，進入核內的氘子所需能量祇要 0.01 電子伏特已成。



這個反應是用以產生中子的最佳方法之一。Be (鈹) 的熔點是 1350°C ., 甚能抗熱，故用為靶子，非常適宜。

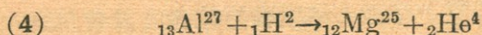
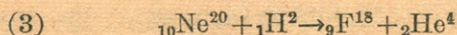
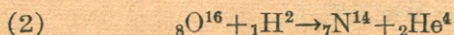
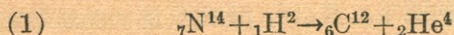


這個反應也適用於產生中子，且其所產生的中子速率很高，故具有高能量。



這又是一個很重要的反應，因為祇要有碳遭遇到氘子轟擊，它便立即發生。這句話的意思是說，差不多在氘子所誘發的一切核反應中，不論我們要它或不要它發生，它總有發生的機會，因為碳是多數物質中含有的雜質。

(三) 放出亞爾法粒子的反應，用略號(d, α)表示。這種反應的發生，為量甚微，因為亞爾法粒子帶有兩個電荷單位，不容易勝過位能的屏障而衝出核外。重要的例子是：

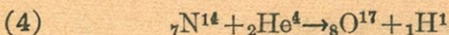
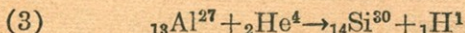
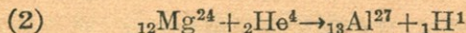
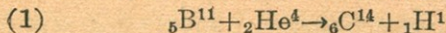


這種反應的生成物，通常都是安定同位素。又，生成物與被轟物比較，前者的原子序數減 1，質量數減 2。

23. 【第三類——亞爾法粒子誘發核反應】 用亞爾法粒子誘發核反應，因其所帶電荷較多，似頗難於衝破核電場，然又因其質量在轟擊用的粒子中最大，故與其他粒子相較，在速

度相同時，亞爾法粒子的動能亦最大。這一點，即可抵消一部分的困難。這一類的反應有兩種：

(一) 放出質子的反應，用略號(α, p)表示。重要例子如下：

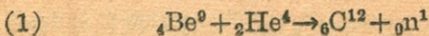


第(3)例所示的反應中，所放出來的質子有兩類，各類各自有其不同的能量。放出來的質子若屬於高能量的一類，則生成的新核即在安定狀態之下。放出來的質子若屬於低能量的一類，則生成核中即有一部分的能量留下來，成爲激發能。生成核於是即在不安定狀態之下，它就要放出此剩餘能量，以求安定。此項剩餘能量的放出，常成爲茄瑪射線。第(4)例所示的反應，有歷史上的重要性，因爲它便是羅德福發見人工核轉變的破天荒第一例。

請讀者注意，這種(α, p)式反應的結果，常使被轟元素的原子序數增1，質量數增3。所以這一種反應可用以造成重元素，不過生成量不大，因爲那要進入核內的亞爾法粒子帶有較高的陽電荷之故。不過研究起來，卻令人頗感興趣。

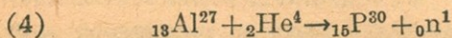
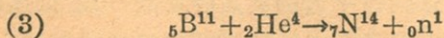
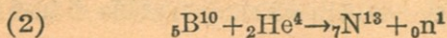
輕元素的原子核，電荷較少，核電場較弱，斥拒力較小，故用亞爾法粒子轟擊輕元素，生成量可以多一點。

(二) 放出中子來的反應，用略號(α, n)表示。這種反應比了(α, p)式的反應要進行得容易些，因爲那些不帶電的中子比了帶電的質子，容易逃出核電場的壁壘。又，這種反應較有實用，且爲中子的來源之一。例如：



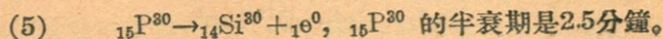
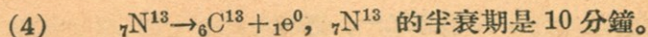
便是通常用以獲得中子的反應，且又爲此種反應第一次被發見的例子。將 Be(鈹)與少許鐳相混，即可促成這個反應，因爲鐳是放射亞爾法粒子的泉源。更有一點請讀者注意，即此一反應與 § 21 (二) 中所舉第(6)例(n, α)式反應宛如可逆。換言之，用中子轟擊碳核，可得鈹核與亞爾法粒子；用亞爾法粒子轟擊鈹核，可得中子。

(α, n)反應的重要例子尚有：



這(2)與(4)兩個反應，有歷史上的重要性，因爲它們是發見人工放射性的最初兩個例子，發見人是居禮夫人的女兒居禮伊倫娜(Irene)和女婿朱力奧(Joliot)。第(3)例則與 § 21 (二) 第(4)例宛如可逆反應。

有須注意的是，這(α, n)式反應的生成物，其原子核內的中子數與質子數的比，小於正常的安定同位素的中質子數比。如第(2)例所示，生成的氮核內，有六個中子與七個質子，中質子數比是 6/7；正常的氮同位素，其核內有七個中子與七個質子，中質子數比是 7/7 > 6/7。中質子數比 n/p 降低，核即呈不安定狀態，故常放出一個正子以求安定。這樣的反應，就將一個質子變成了一個中子。質子減少一個，中子增加一個，比數 n/p 就增加，而另一個較安定的元素也就生成了。例如：



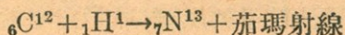
24. 【第四類——質子誘發核反應】 質子所誘發的核反應很重要，其理由不止一個。這一類的反應為數甚多，這便是理由之一。此外，質子可以大量獲得，而且容易使其加速至任何高速度，於是利用質子以研究核轉變，似頗合理；這也是理由之一。這一類核反應共有四種如下：

(一) 質子被捕獲，沒有粒子放出來。這種反應同第一類的第一種反應 (n capture) 頗相似，我們常用 (p capture) 來表示。這也是共振反應，祇在質子有適當的能量時，方得引起所欲引起的核變化。

在這種核轉變的過程中，常有高能量茄瑪射線產生，所以又常用 (p, γ) 表示。這就是說，這些茄瑪射線的頻率很高，因為茄瑪射線的能量是正比例於其頻率的。這些茄瑪射線與天然放射物質蛻變時所放射的相比較，前者的能量約為後者的二倍到六倍。

就較重的核而論，可以讓質子完成使命的共振能階不止一個。例如鋁 (Al)，這樣的能階有三十個，凡是能量範圍從零到 2.6 Mev. 的質子，都有入核的資格。

這種捕獲質子的核反應，有一個著名的例子如下：



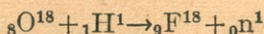
生成物若具放射性，常放射正子，本例中的 ${}_7N^{13}$ ，即是放出正子而蛻變的放射氮，亦就是 (α, n) 式反應第(2)例的生成物。

(二) 放出中子的反應，以略號 (p, n) 表示。這種反應，實際上是把被轟原子核內的一個中子換成了質子，不過有幾個特點，卻頗有趣味。第一個特點是轟擊用的質子有一個能量限值，假使質子的能量不到這個限值，就毫不能引起反應。其所以如此的理由，是因為(1)放出來的中子比了射進去的質子稍

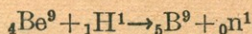
微重一點，(2)新核有較低的中質子數比，不及原來的核安定。兩個理由都需要把能量加入核內去。這能量不得取自質子的動能。

第二個有趣的特點是，生成物常為不安定元素，放出正子而蛻變。這也是由於 n/p 比數對於核安定度的影響而起。我們把核內的中子換成質子，就減少了核的安定度，所以它要放出一個正子，以求再趨於安定。這與前述 N^{13} 蛻變而成 O^{13} 的情形是一樣的。

(p, n)式反應的一個例子是：

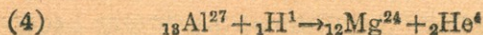
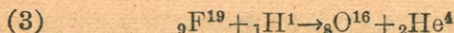
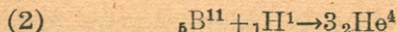
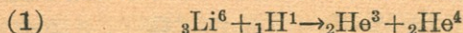


生成的放射鐵 ${}_9F^{18}$ 放出正子，再成為原來的 ${}_8O^{18}$ ，半衰期是 112 分。同位素 ${}_8O^{18}$ 在天然氧中雖祇佔百分之一，但由 ${}_9F^{18}$ 蛻變而成 ${}_8O^{18}$ 時，生成量頗為豐富，即用粗陋的儀器亦可以檢查到 ${}_8O^{18}$ 的存在。另外一個產生中子的反應是：



這一個反應同 Be 受亞爾法粒子轟擊的反應 (§ 23 第二種反應第一例)，以及 Be 受氘子轟擊的反應 (§ 22 第二種反應第二例)，都是產生中子的好方法，然用為彈丸的質子卻最易獲得。

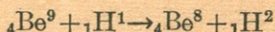
(三)放出亞爾法粒子的反應，我們用略號 (p, α) 來表示。這種反應的進行是頗困難的，因為進入核內的粒子與逸出核外的粒子都帶着陽電荷，就非克服那強固的電場屏障不可。所以這種反應非用高能量質子不能實現。重要例子有下面幾個：



第一例也是人工核轉變史上的重要例子之一，因為氦同位素 ${}^2\text{He}^3$ 就是從這一個反應發見的，發見人之一即為羅德福。第四例很有趣，因用 ${}^2\text{He}^4$ 轟擊 ${}_{12}\text{Mg}^{24}$ ，可得 ${}_{13}\text{Al}^{27}$ 而放出 ${}^1\text{H}^1$ ；換言之，此一反應也宛如可逆，好比前面講過的 § 21(二) 第 6 例 (n, α) 式反應與 § 23(二) 第 1 例 (α, n) 式反應一般。

(p, α) 式反應的生成物，通常都是安定元素。

(四) 放出氘子的反應，我們用略號 (p, d) 來表示。這一式的反應，目下還祇有一個例子成立。生成量很少。這已成立的反應是：



25. 【第五類——茄瑪射線誘發核反應】 在茄瑪射線所引起的反應過程中，一切能量用於破壞原子核者，都須由茄瑪射線的電磁能供給。就通常的情形而論，茄瑪射線至少必須具有 9 Mev. 的能量，方可去掉被轟擊原子核的一個粒子。這是能量限值的又一例，正與前面討論過的 (p, n) 式反應相似。關於這一點，讀者也許想知道，茄瑪射線的能量如何可從它的頻率推算出來。

四十年以前，德國人蒲朗克 (Planck) 首創量子論，設立輻射能量的公式

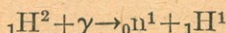
$$E = hf$$

式中 E 是輻射能量的耳格數， f 是振動頻率， h 是一個常數，稱為“蒲朗克常數”，它的數值是 6.62×10^{-27} 耳格秒。

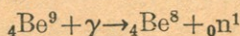
讀者當然知道，輻射波的波長等於它的速度被頻率除得的商。凡是電磁輻射，它在真空內的傳播速度是 3.00×10^{10} 厘米/秒，故可將蒲朗克輻射能公式簡化成 $E = \frac{0.012}{\lambda}$ ，式中 E 是射線能量的 Mev. 數，而 λ 則為射線波長的埃數。

埃就是 Angstrom 的略寫，又可寫作 A. U.，等於 10^{-8} 厘米，而茄瑪射線的波長約自 0.1 埃到 0.001 埃。故波長等於 0.001 A. U. 的茄瑪射線，它的能量是 12 Mev.；波長等於 0.1 埃的茄瑪射線，它的能量是 0.12 Mev.，其他波長，依此類推。須注意者，波長愈短，能量愈高；或說頻率愈高，能量愈高，也是一樣的。前面提及的茄瑪射線能量正比例於其頻率，現在已用蒲朗克公式說明了。

由茄瑪射線引起的核轉變，現在還不十分重要，主要的原因是天然物質所發茄瑪射線的能量，都在限值 9 Mev. 以下。不過較不安定的氘子卻可用茄瑪射線轟碎，成爲一個中子與一個質子。用式子來表示，即是



這一個反應，乃是 (γ, n) 式的一個例子，且與 §21 (一) 中 (n, γ) 式反應第 (1) 例宛如可逆反應。此外， Be^9 被茄瑪射線所照，也可放出一個中子而成爲 Be^8 。用式子來表示，即是



這一個反應乃是 (γ, n) 式的又一個例子。

上述兩個反應，就每一反應而言，生成的中子都有同一能量，故在研究方面頗有用處。

26. 【核轉變的彙述】 用各種粒子去轟擊原子核，所可引起的反應，實不止以上所說幾種。我們單說上述的幾種而不提到其他反應，並不是爲了此外的反應無成立之可能，只是爲了尙未有充分的研究。用新的工具來研究原子核，那是一定會開闢出一個新境界來的。其實美國製造原子炸彈的工廠裏，早已有很多祕密的實驗報告，這些報告若經公布，則其中定有很多有趣而重要的反應，爲本書所未收。將來真相大白之後，核

各式核反應一覽表

反應種類	生成量	生成物通常放射	反應舉例
n, γ	實有 100%	電 子	$H^1+n \rightarrow H^2+\gamma^*$ $Na^{23}+n \rightarrow Na^{24}+\gamma$
n, p	輕元素較多	電 子	$N^{14}+n \rightarrow C^{14}+H^1$ $S^{32}+n \rightarrow P^{32}+H^1$
n, α	同 上	電 子	$C^{12}+n \rightarrow Be^9+He^{4**}$ $Al^{27}+n \rightarrow Na^{24}+He^4$
n, 2n	少	正 子	$N^{14}+n \rightarrow N^{13}+2n$ $P^{31}+n \rightarrow P^{30}+2n$
d, p	輕元素較多	電 子	$Na^{23}+H^2 \rightarrow Na^{24}+H^1$ $P^{31}+H^2 \rightarrow P^{32}+H^1$
d, n	同 上	正 子	$Be^9+H^2 \rightarrow B^{10}+n$ $C^{12}+H^2 \rightarrow N^{13}+n$
d, α	同 上	生成物通常安定	$N^{14}+H^2 \rightarrow C^{12}+He^4$ $Al^{27}+H^2 \rightarrow Mg^{25}+He^4$
α , p	同 上	生成物通常安定	$Mg^{24}+He^4 \rightarrow Al^{27}+H^{1***}$ $Al^{27}+He^4 \rightarrow P^{30}+H^1$
α , n	同 上	正 子	$Be^9+He^4 \rightarrow C^{12}+n^{**}$ $B^{10}+He^4 \rightarrow N^{13}+n$
p, γ	多	正 子	$C^{12}+H^1 \rightarrow N^{13}+\gamma$
p, n	多	正 子	$Be^9+H^1 \rightarrow B^9+n$ $O^{18}+H^1 \rightarrow F^{18}+n$
p, α	多	生成物通常安定	$Li^6+H^1 \rightarrow He^3+He^4$ $Al^{27}+H^1 \rightarrow Mg^{24}+He^{4***}$
p, d	少	祇有一例成立	$Be^9+H^1 \rightarrow Be^8+H^2$
γ , n	少	正 子	$H^2+\gamma \rightarrow H^1+n^*$ $Be^9+\gamma \rightarrow Be^8+n$

註：——凡反應式後加星號者，宛如可逆反應。

轉變的內容將使我們目眩神迷而爲之讚嘆不已。

不過有一句話我們必須提一提。要使核反應有發生之可能，也有一個條件，這條件是：“參加反應的核與粒子總質量，加上粒子動能的等值質量，非超過生成物的總質量不可”。

當那轟擊核的粒子以及放出來的粒子都帶有電荷時，有一個能量屏障必須衝破，這就減低了反應的可能性，所以這樣的反應比了不帶電粒子所引起的反應，生成量通常祇有一千萬分之一。

上面所附的一張表，總括前面所述各種核反應，並各附標準例子，讀者由此可以獲得核反應的鳥瞰。

第七章

高能粒子的產生：靜電機與迴旋益能器

27. 【轟擊原子核所用粒子的來源】 用可以隨意使用的各種粒子去轟擊種種不同的原子核，即能引起種種不同的核轉變，此事在前章裏面業已論述過了。現在，讀者必然要想知道，這些高能量粒子是用什麼方法獲得的。最初轟擊原子核，所用的彈丸是亞爾法粒子，這些亞爾法粒子的來源便是鐳的天然蛻變。但因純鐳之獲得頗為困難，故亞爾法粒子也不易多得。研究原子核的專家，倘能弄到幾百毫克的鐳，可以自由使用，他便是一個幸運之人。

每一毫克的鐳，通常每秒約放射 3.7×10^7 個亞爾法粒子。這個數目，叫做一毫居禮 (millicurie)，乃是表示放射強度的單位。不論放射源是天然的還是人工的，都可用這個單位來比較它們的放射強度。前面已經說過，平均要用十萬個亞爾法粒子去轟擊一個原子核 (參閱 § 13)，方有擊中它而使它發生蛻變的可能，由此可見，若用天然亞爾法粒子源來研究原子核，所可造成的核轉變是如何稀少。所以我們必須要有人工的粒子源，可得到較高的放射強度，方能產生多量的人工蛻變生成物，足供檢查與研究之用，而快研究者之意。

大量產生轟擊用的高能量粒子，通常所用的工具是靜電高壓機與迴旋益能器 (cyclotron)，本章所論述的即是這兩種工具。這些所謂原子擊破機 (atom smasher) 的原理，不外乎產生多量的帶電粒子，而用靜電場或電場與磁場使這些粒子加

速。原子擊破機的型式雖多，它們的原理則一，所不同者，只是電場與磁場的用法以及加速的方法而已。

當一個帶電粒子例如電子受電場影響時，該粒子即沿電場的力線方向而被加速。該粒子所得到的能量，與該粒子所行路徑起迄兩端間的電位差成比例。比如有一條路徑，終點的電位比起點高出一百萬伏特，這電子在起點被拉至終點，它的能量就有一百萬電子伏特的增益。假使有一個粒子是帶陽電的，例如質子，氦子或亞爾法粒子，它在這樣一條路徑上就由高電位一端被拉到低電位一端去而增加它的能量（亞爾法粒子增二百萬電子伏特）。

因為天然放射源所放出來的帶電粒子，都有幾百萬電子伏特的能量，故人工放射源所用的電壓至少也須有幾百萬伏特。現在通用的原子擊破機，差不多能夠產生 100 Mev. 以上的高能粒子。採用高壓的益處，有非一般人所猜想得到的。因為電壓稍有增加，所用電流可以大減，故採用了高電壓，即可用小得多的動力來驅使那原子擊破機。舉一個例來說，中子的發見人英國物理學家查德威，先曾用 16 毫居禮的天然放射源。後用人工放射源，電壓六十萬伏特，需用電流 265 毫安培，方能得到 16 毫居禮的強度。後來把電壓增加到五百萬伏特，電流僅需 10^{-4} 毫安培，即可獲得 16 毫居禮的強度。易言之，若用 500 萬高電壓及 265 毫安培的電流，則所得強度將等於 $16 \times 265 \times 10^4 = 4.24 \times 10^7$ 毫居禮，增加到二十六萬五千倍。因為這個緣故，核物理學家都在想法子要把電壓儘量提高，提了再提，以求粒子的產量與能量都大大地增加。

28. 【最初所用獲得高能粒子的方法】 最初所用獲得高能粒子的方法，是將高壓變壓器串聯起來，以求得到所需的高

電壓。這個方法到 1930 年，可得電壓約為七十五萬伏特。其次的方法是用一串高壓電極；更有一個方法則用靜電場，此法現在尚在使用，且在繼續改進中。

利用一串高壓電極的原子擊破機，叫做直線加速器，如圖

31 所示便是此器的構造概略。此器的主要部分是一個抽空玻璃管，裏面直排着一串分開的空心的金屬管，各由外面的交流電壓充電至高電位。每相鄰兩金屬管

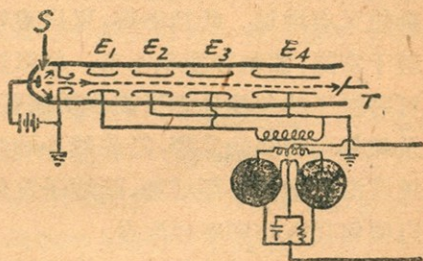


圖 31 直線加速器構造概略。

的電壓，它們的相(phase)有 180° 的差別。換言之，當任何一金屬管上的電壓例如 E_1 到達最高正值時，它的相鄰金屬管上的電壓 E_2 到達最低負值。故此等金屬管成為正負相間的高壓電極。

抽空玻璃管內有低壓氣體，或為氫，或為重氫，或為氦。在 S 處放電時，即有此氣體的離子產生，或為質子，或為氘子，或為亞爾法粒子，都帶陽電。當第一個金屬管為負極時，這些帶陽電的粒子即被吸引，向管加速而進，到達管口，它們因加速而得的能量，相當於進行路徑上起迄兩點間的電位差。入管以後，即不再受電場的影響，而按等速度（即初抵管口的速度）進行。

全機的布置，恰可使陽離子行至第一管尾時，第一管的電位已由負變正，而第二管的電位則已由正變負。於是離子即在第一第二管的空隙間，又被加速一次，動能又增加一些。交流電壓的頻率與金屬管的長短，經過精密的計算與規定，恰可使

相鄰兩管間的電壓差，當離子在兩管間的空隙內時，到達最大值。離子羣在第二管內按等速前進，一出第二管尾，即再被加速而入第三管 E_3 ，該管此時已成負極，而第二管則已成爲正極。帶電粒子在第三管內進行的速度比在第二管內更大，亦即動能又有增加。此種過程，可以重複至很多次；帶電粒子通過若干空隙，即被加速若干次。所以無需外來的直流高電壓，即可將粒子的動能任意提高到所需要的程度。金屬管的長度，以及相鄰兩管間的空隙，沿着離子的進行路徑遞增，因爲離子的速度沿着這條路徑增加，而離子在每一管內的時間必須相等，以便與交流的頻率相配合。

在直線加速器內，離子最後所能得到的能量，遠大於一次加速所能得到者。實際上，這能量是正比例於兩管間的電壓，以及兩管間的空隙數。史洛安(Sloan)與勞倫士(Lawrence)二人，先曾用三十個金屬管，以及僅有 42000 伏特的加速電壓，得到能量 1.26 Mev. 的粒子。後來又曾用 36 個金屬管，以及 79,000 伏特的電壓，得到能量 2.85 Mev. 的粒子。這第二架直線加速器，全長也不過 185 厘米。

離子在管內進行，宜收束成細小的一注，俾可集中轟擊靶子 T ，以增高擊破原子核的能效。僥倖得很，介於兩管之間的電力線是向內彎曲的，即有將離子聚成一注的傾向。這樣一來，就減少了設計者的麻煩了。

然而直線加速器有一個缺點，即通過金屬管的粒子，速度不齊，能量不一。這是因爲交流電壓時有消長，且因各粒子出管時不能都與電壓的換相完全配合。凡是與電壓的換相完全配合的粒子，皆可得到最大的加速度，且可在最後離開那加速空隙時，獲得最高的動能。然而那些與電壓換相稍有不配合的

粒子，即不能得到高電壓的全部加速作用，因而最後也不能得到很高的能量。所以各粒子的能量，高低各不相同，頗有很大的差別。下文就要講到的迴旋加速器，用的也是交流電壓，所以也有這同樣的弊病。惟有靜電高壓機，因為用的是直流電壓，所以被加速的粒子能量差不多很均勻一致。這便是靜電高壓機的優點。

29. 【范德格拉甫靜電高壓機】 利用靜電場的原子擊破機是范德格拉甫 (Van de Graaff) 所發明的，其後雖經別人加以改良，但是我們在習慣上仍稱這一型式的原子擊破機為范德格拉甫靜電高壓機。此機的主要部分有四個：一個巨大的空心金屬球裝於絕緣的空心圓柱上；一條頭尾啣接而由電動機拖動的絕緣帶；一個外面的直流電壓源；以及一個加速管。

如圖 32 所示，便是此機的構造概略。空心金屬球的作用猶如巨型高電容的容電器，球面琢磨得非常光滑，以免電暈放電 (corona discharge) 的容易發生。凡兩電極在氣體中，電位差超過一定值時，電極表面即罩上一層輝光，叫做電暈放電。其來由即因電極表面粗糙不平，有很多不易看見的尖端所致。所謂尖端放電現象 (例如避雷

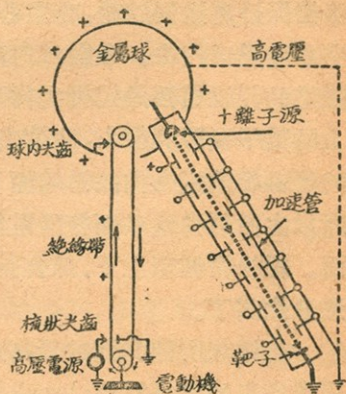


圖 32 范德格拉甫靜電高壓機。

針)想讀者都很熟悉。集很多尖端而成一片，尖端放電就成為電暈放電了。我們可以說，電暈放電乃是集團的尖端放電；而尖端放電則係單個的電暈放電。電暈放電的發生，是要招致損

失的，所以必須把金屬球的外表面琢磨得非常光滑，使電暈放電不容易發生。至於外來的電壓電路，用的是高壓整流管放大電路，可將交流電壓變為 10—30 仟伏特的直流電壓。

此機的作用原理如下。那條首尾啣接的絕緣帶，是用絲綢，或韌紙，或橡皮等絕緣質料做成的。它在兩個導體中間不停地移過，與兩導體靠得很近，但又不與它們接觸。導體之一是光滑的，還有一個則係一排梳狀的尖齒。高電壓源的正極通連梳狀尖齒，光滑的另一導體則與地通連。電壓之高，殆足以使兩導體間發生刷狀放電（即電壓極高的集體尖端放電），而電子有從通地的光滑導體被吸到梳狀尖齒上的傾向。但因絕緣帶介於兩導體之間，故電子即改從絕緣帶被吸到梳狀尖齒上。這麼一來，絕緣帶即因缺少了電子而帶着陽電。這一段絕緣帶保持着這個狀態，在空心絕緣柱內上昇，一直昇到那巨型空心金屬球內去。金屬球內部入口處，又有一排梳狀尖齒，帶陽電的絕緣帶經過這排尖齒時，齒與帶之間又起放電作用，齒上的電子被吸到帶上，與帶上的陽電中和，於是這一段沒有電的絕緣帶繞道球內的滑輪而下降。球內尖齒是與球殼通連的，所以尖齒放掉電子而帶陽電後，這陽電立即勻布於球的外表面。絕緣帶循環上下，球表面的陽電荷愈積愈多，它的電位就愈升愈高了。

金屬球所能到達的最高正電位，祇受絕緣柱的絕緣度及周遭空氣的破裂電壓（breakdown voltage）之限制。所謂破裂電壓，即開始發生放電之電壓。當金屬球的電位升高，破裂電壓已經到達時，球上便發生電暈輝光，閃動如生。金屬球之所以要做得很大很大，即因球表面的曲率愈小，破裂電壓愈大之故。又，上文所說把球面磨光，去掉表面的尖端及斷處，以使電

暈放電不易發生，這也是爲了要提高破裂電壓。據實驗結果，球的電位約可提高到半徑每一米一百萬伏特。若製一半徑十米的金屬球，電位可提高到一千萬伏特。

假使金屬球的周圍有高壓空氣環繞着，那麼破裂電壓卽有提高之可能。例如把周圍的空氣壓力從一大氣壓提高到二大氣壓，破裂電壓也有提高到二倍之可能。惟高壓空氣容易引起燃燒，不合實用。若用別種介質以代空氣來包圍金屬球，則破裂電壓更可提高。用六氟化硫，或四氯化碳，或二氯二氟化碳包圍金屬球，比了用一大氣壓的空氣，可使破裂電壓提高到二倍；易言之，半徑每增加一米，球的電位就可以提高二百萬伏特。

用兩個金屬球，電位亦可增至約二倍。將電極依照適當的方法布置，可將此一球上的電子移至彼一球上，而使第一球帶陽電，第二球帶陰電。美國麻省理工大學(M. I. T.)所造第一座范德格拉甫靜電高壓機，就用兩個 $1/4$ 英寸厚的空心鋁球，直徑是 15 英尺。絕緣空心圓柱高 22 英尺 6 英寸，厚 $5/8$ 英寸，在柱內移動的絕緣帶寬 47 英寸。兩球間的電位差是 5.1 百萬伏特。所用電流是 1.1 毫安培，故所耗於產生飛奔粒子的電功率是 5.6 KW (仟瓦)。

這種型式的裝置有一個特別的優點，卽運用電壓的易受控制，祇有 0.1% 的電壓變動。若用現代電子自動控制法，差不多可使電壓穩定不變。

靜電高壓機獲得高電壓的原理既已講明，我們就要說一說如何應用此高電壓以產生高能粒子注。初等物理學告訴我們，使帶有電荷 e 的粒子行過電位差 E 的路徑，所作的功是等於乘積 eE 。就自由運動的離子或電子而論，此功等於粒子

動能(K)的增加值。故若將一個電荷 e 質量 m 的離子或電子，從電位 E_a 的一點 A 移到電位 E_b 的一點 B ，我們就有

$$K_b - K_a = \frac{1}{2}m(v_b^2 - v_a^2) = e(E_b - E_a)$$

式中 K_b 與 K_a 表粒子在 B 點與 A 點的動能， v_b 與 v_a 則表粒子在 B 點與 A 點的速度。若粒子在 A 點時的起始速度是零，即粒子自靜止開始運動，則我們就有

$$\frac{1}{2}mv^2 = e(E_b - E_a)$$

由此方程式，可知粒子的速度與加速於粒子的電位差平方根成正比例。故若已知此電位差及粒子的電荷，即可計算粒子所得的動能，若又知道粒子的質量，即可計算得粒子所得的速度。

就速度不大於光速十分之一的粒子而論，其質量與電荷可視為常定不變，所以粒子所得能量之多寡，僅受加速電位差一個因子的限制。因為這個緣故，核物理學家都想把電壓愈提愈高，俾可使粒子的能量愈增愈大。

為利用上述靜電機所生的高電壓起見，核物理學家就將一個加速管放在地與帶陽電的金屬球之間。若有兩個金屬球，則此加速管即放在兩球之間。被轟擊的靶子裝在加速管最低



圖 33 加速管的構造。

負電位的一端，即通地的一端。圖 33 所示為加速管構造的概略。在分節抽空玻璃管的通金屬球一端（圖中左端）有離子源 S ，當 S 處的氣體經放電而產生陽離子時，此等離子即被靜電聚斂管 F 聚成細小的一束，然後進入加速管。離子在加速管中前進，速度不停的增加，直到擊中靶子為止。每兩節玻

璃管之間，插一金屬管，管口圓鈍。每一金屬管的中部外壁附一圓盤 D ，伸出玻璃管外，而緊緊夾在玻璃管兩節之間，密不漏氣。每一伸出管外的圓盤邊緣，套有一個環 C 。各環依適當的方法與地通連，俾可使過多的電荷從管內漏至地中，並可保持電位沿管降落之均勻。各絕緣表面通常皆有皺紋，目的亦在保持電位降落之均勻。

加速管的運用與構造，有很多實用上的困難。製管的材料，以瓷或特種玻璃最為適合。管須有充分的長度，以免高電壓加上去時在管的外面有電花跳躍。管內氣體的壓力必須在水銀柱 10^{-5} 毫米左右，約為一大氣壓的一萬萬分之一。維持這樣低的氣壓，實在是一件非常困難的事情；各節管子的連接處因有金屬圓盤伸出管外，必須加倍注意其是否漏氣。萬一管內氣壓升高，超過了上述的數值，則快速粒子與管內氣體分子碰撞，將減損管的作用。通常用油擴散型快速抽機，再加以輔助抽機，來維持管內的低壓。

30. 【迴旋益能器】 前面曾講過的用交流電壓的加速管，祇限於幾百萬伏特。在理論上說起來，那一串的金屬加速管，個數是沒有限制的，但在實用方面說來，管數超過五十或六十，全部儀器即嫌過巨而不合實用了。至於范德格拉甫靜電高壓機，其所產生的高能粒子注，固因所用電壓為直流電壓而能量均勻齊一，然電壓亦受限制而祇能高至數百萬伏特，

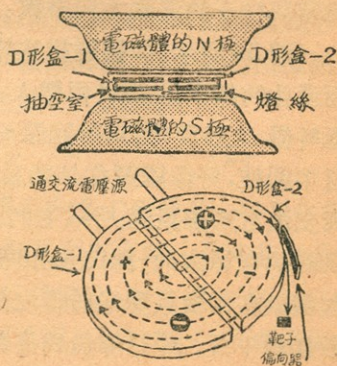


圖 34 迴旋益能器的運用原理。

若電壓過高，則用目下所能辦得到的設備，尚不能處理這樣的機器。

史洛安與勞倫士二人所發明的迴旋益能器，它的優點即在於能夠產生能量高到 25 Mev. 的粒子，而無需用外來的任何直流高電壓。這是一個很重要的優點，因為高能粒子的能量至少須有 6—8 Mev.，方可穿入較重的原子核內。

迴旋益能器的基本原理，是使帶電粒子在交變電場中接連被“踢”好多次，正與直線加速器的原理差不多。所不同者，迴旋益能器不採用一串的共軸加速管，卻使粒子循螺線進行，即循半徑逐漸增長的圓形路線進行。這麼一來，就不必佔據很多的地位了。欲使粒子循圓形迴旋，祇須加一不變的強磁場與粒子路徑成直角。根據物理學上著名的原理（右手定則），帶電粒子運動時，若有一不變的磁場與其路徑成直角，則此粒子即受到一不變之力的作用，此力的方向既與其路徑垂直，又與磁場垂直。於是粒子即繞圓形路徑而進行，此圓形在垂直於磁場之平面內，因為有一個不變之力作用於此粒子，此力的方向常與粒子的運動方向垂直。

圖 34 所示，即係迴旋益能器的運用原理。由氣體中放電而產生的離子，出現於兩個大電極之間的空隙內。這兩個大電極叫做 *D* 形盒（因為形狀像英文字母 *D*），乃是中空而扁的銅質半圓柱，好像罐頭食品的扁罐頭一切兩半。這兩個 *D* 形盒與交流電壓源通連，所以它們的正負電位互相交變。在這兩極之間的電場方向，因此也相間地作 180 度的改變。兩個 *D* 形盒都嵌在兩枚巨型電磁體之間，故有一不變的磁場垂直於 *D* 形盒的平面。兩 *D* 形盒的全部，都密封在抽空的室內。

假定現在有一個陽離子出現在空隙處，而此時左邊的 *D*

形盒適帶陽電，右邊的 D 形盒適帶陰電，則此陽離子即被加速而入右邊的 D 形盒內。一入盒內，這陽離子即不復受交變電場的影響，而依等速度（入盒時的速度）前進。但垂直於 D 形盒平面的不變磁場，卻對該陽離子施一不變之力，其值等於 Hev ， H 是磁場強度， e 是離子的電荷， v 是離子的速度。這個不變的力時時與離子運動的方向成直角，故使離子循半徑不變的圓形路徑在右邊 D 形盒內前進。若離子的質量是 m ，則使它作圓運動的向心力即為 $\frac{mv^2}{r}$ ， r 是圓的半徑。於是我們有向心力

$$F = Hev = \frac{mv^2}{r} \quad (1)$$

解此方程式求 r ，得

$$r = \frac{mv}{He} \quad (2)$$

由此式可知，就 $\frac{m}{He}$ 之一定數值而言， r 與 v 成正比例。換言之，帶電粒子的速度若有增加，則其所循圓形路徑的半徑，亦按比例而有增加。

帶電粒子在 D 形匣內迴旋，其速度既為 v ，而所循圓形路徑的半徑既為 r ，則環行半圈所需的時間，即入匣至出匣的時間，當為 $\frac{\pi r}{v}$ 。將(2)式中 r 之值代入，即得

$$T = \frac{\pi mv}{Hev} = \frac{\pi m}{He} \quad (3)$$

易言之，陽離子從兩盒間的空隙入右邊 D 形盒後，行畢半圈，即隔開 $\frac{\pi m}{He}$ 秒的時間，便出匣而又至空隙處。此時若左邊 D 形盒適已從最高正電位變至最低負電位，而右邊 D 形盒已從最低負電位變至最高正電位，則此剛出匣的離子，又受電場的作用而被吸入左邊 D 形匣，同時它的速度有相當的增加。故

它在左邊 D 形匣內雖仍循圓形路徑而行，但其半徑已增加了。

從 (3) 式可知，若 $\frac{m}{He}$ 不變，則帶電粒子在任一 D 形盒內繞行半圈所需的時間，亦即入匣後再出匣所經的時間，也是常數。祇要交流電壓每隔 $\frac{\pi m}{He}$ 秒有 180° 的變相，即本來是最高正電位（或最低負電位）的 D 形盒，變為最低負電位（或最高正電位），則帶電粒子每行經兩匣間空隙時即被加速一次；易言之，它每從此一 D 形匣進入他一 D 形匣時，動能即有增加，圓形路徑的半徑也有增加。通常我們稱“交流電壓從最高正值再變至最高正值所需的時間”為一週，故適合我們需要的交流電，其一週的時間是 $\frac{2\pi m}{He}$ 秒，而其頻率則為 $\frac{He}{2\pi m}$ 。

帶電粒子在迴旋益能器內所可得到的最大能量，與兩 D 形匣間的電位差及粒子被加速的次數成正比例。加速的次數等於粒子在兩 D 形匣內繞行全週次數的兩倍。粒子繞行的圈子愈繞愈大，等到快要靠緊 D 形盒的邊緣時，即被一個輔助直流電場吸引，使其沿着圓形路徑的切線方向，從一個隙縫射出。這高能粒子從隙縫射出來，便打在一個靶子上面，完成它轟擊原子核的使命。

實際上的情形，是要比上文所述複雜得多的。在上面的論述中，我們假定不管用那一種粒子——質子或氘子或亞爾法粒子，它的質量始終不變。但是這一個假定，祇有在粒子的速度不超過光速度十分之一時，方不會引起顯著可察的錯誤。依照愛因斯坦的相對論，粒子的速度倘若超過了光速度的十分之一，則其質量便有顯著可察的增加。例如粒子的速度到了光速度的十分之二，它的質量即比靜止時的質量大出 2%；到達光速度的十分之四時，質量即比靜止時大出 10%，到達光速度的十分之六時，質量即比靜止時超出 25%；若速度到達光

速度的百分之八十五時，質量差不多比靜止時加出一倍。由(3)式可知，粒子因高速度而增加的質量，將使它繞行一週的時間大大增加。如果對於這個差別不予以校正，則粒子的出入 D 形匣，便要不能與交流電壓的變換對應，因而不能得到所要的加速度，甚至會得到減速度。免除此項困難，有一個辦法是使磁場由中心向外逐漸加強，因為從(3)式可知，假使 H 跟着 m 增加，則粒子出入 D 形匣的週期便可以不變，或雖變而甚微，不致與交流電壓的週期完全脫節。然而我們還有問題。

使離子注在迴旋益能器內收聚得很細小，這也是運用迴旋益能器所遇諸種困難之一。靜電場的力線，其本性可以有助於離子的收聚；如此收聚的離子注，它的截面積約為一平方厘米。離子在兩 D 形盒中迴旋，最初十圈或十五圈，這種收聚作用最有效果。此後的離子注即將受磁場的影響而或聚或散，此項影響遠比電場的影響為大。若磁場由中心向外加強，則離子便要分散而不能集成細小的一注。所以我們顧了離子出入週期與電場交變週期的對應，就顧不了離子注的分散。通常採用折中的辦法，對這兩點都顧到，即既不使離子分散，也不使離子的加速度變成減速。這樣的條件，就必需有高明的技術，方可辦得到。

在美國使用着的巨型迴旋益能器有好幾架，其中加里福尼亞大學的一架所用產生磁場的電磁體重 200 噸，磁極面直徑 60 英寸。該迴旋益能器由一具 60 仟瓦振動器賦予所需要的動力。它可以產生能量 34 Mev. 的質子，能量 17 Mev. 的氘子，以及能量 34 Mev. 的亞爾法粒子。若將現有的設備改良一下，則大概可以產生 25 Mev. 的氘子，以及 50 Mev. 的亞爾法粒子。有一塊大磁體，本來打算用以製造一架迴旋益能器，

可生 100 Mev. 的亞爾法粒子，現聞已從加里福尼亞大學移往橡崗(Oak Ridge)地方，供製造巨型質譜儀之用。這一塊大磁體的磁極面直徑 184 英寸，兩極間的空隙寬達 72 英寸。

離子在迴旋益能器內所可獲得的總動能，可以證明其等於

$$E = \frac{1}{2} \cdot \frac{H^2 e^2 r^2}{m} \quad (4)$$

從這個式子可以知道， D 形盒的半徑，磁場的強度，或粒子的電荷，三者任增其一，便可以增加粒子的動能。但在實際上說來，目今各地的迴旋益能器，其磁場強度差不多已經提高到不能再提高的地步了。至於粒子的電荷與質量，則在一定速度下各種粒子各有其固定的數值。所以增加動能的辦法，除提高電壓以外祇有擴大磁極面以增加 D 形匣的半徑。美國及世界各地製造迴旋益能器，把磁體愈造愈大，就是爲了這個緣故。又，同一迴旋益能器所生亞爾法粒子的能量同於質子，而氬子的能量祇及質子的一半，原因也在此。

質子的來源，可從氫氣中放電取得；亞爾法粒子的來源，可從氦氣中放電取得；氬子的來源，可從氬氣中放電取得。不過充分供給純粹的氬氣，這還是近幾年來的事情。

31. 【倍打益能器】 倍打益能器(betatron)是最近發明的幾種原子擊破機之一，用於產生高速率的電子。這是倍打益能器與上述各種原子擊破機的不同之處，因爲上述各種原子擊破機是祇用於產生陽離子的。這些原子擊破機因何不適宜於產生高能量電子，理由不止一個。我們祇要想到電子的質量僅及質子的 1840 分之一，並且記住運動體的動能正比例於它的速度平方及質量，我們就不難推算，一個運動的電子和一個

運動的質子，若有相等的動能，則電子的速度非 $43 (\sqrt{1840})$ 倍於質子不可。然而依據愛因斯坦的相對論，我們有公式

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}}}$$

式中 m_0 是運動體在靜止時的質量， u 是運動體的速度， m 是速度到達 u 時的質量， c 是光速度，上節中的計算便是從此式而來。察看這個式子，立即可知運動體的質量，在速度很高時增加得很大。今若使電子有很高很高的速度，則其質量即跟着有很大的增加，於是在迴旋益能器這樣的原子擊破機中，欲加以校正，使電子注既不散，又不致與交流電壓的頻率不能配合，就非常困難了。

此外還有一層困難，也可以從上節的(4)式見到。試一考(4)式的右邊，若磁場強度 H 與粒子電荷 e 固定不變，則 r 跟着 m 縮小，能量 E 即不變。故在迴旋益能器中產生能量同於質子的電子，半徑非縮小到 43 分之一不可。這在實際上也是一件辦不通的事情。

倍打益能器所根據的原理，凡是讀過初等物理學的人都知道，即導體放在變動的磁場中，導體內即生感應電流。須知電流無非是一串運動的電子，故電流的強度實正比例於電子的速度與數目。美國的刻士特(Kerst)引申此理，以為電子放在變動的磁場中，便可以得到加速度。倍打益能器中有一尊小小的“電子礮”(electron gun)，把電子按固定的速度射入兩個形狀特殊的磁極之間。於是電子即在兩磁極間的抽空環狀管內繞圓形的路徑而行，此圓形路徑的半徑視磁場強度及電子速度而定。將交流電通入電磁體上的線圈，磁場強度即起很

快的變動，而使電子加速迴旋。大家知道交流電是有週期性的。在每週期的第一個 $1/4$ 週內，電流不絕增加，故磁場強度亦不絕增加，因而電子的速度亦不絕增加。到第二個 $1/4$ 週開始，電流即不絕減少，故磁場強度亦不絕減少，若電子仍在管內，其加速度將變為減速度，到第三個 $1/4$ 週開始以後，電子在管內將依反對方向加速進行，因為電流的方向改變，磁場的方向亦改變了。所以在每週期的第一個 $1/4$ 週末，即該用一個附加的臨時磁場，迫使電子脫離其圓形軌道，而依切線方向打在靶子上。

電子在環狀管中繞行，速度是很大很大的。設交流電壓頻率為 60，環狀管平均直徑是 33 英寸，電子初從“礮”口射出時的能量是 5 萬電子伏特，則在 240 分之一秒中，電子已繞行二十萬圈以上，其速度差不多等於光的速度，而能量可增至 100 Mev. 之多。

倍打益能器的確切構造和作用，詳情無法在這裏講述。所可說的，該器所產生的高能量電子注射在靶子上，可產生特別強烈的 X 射線，這 X 射線可使銀變鎘，可使銅變鎳，可使鋼板的質量增加，證實了愛因斯坦能質等價公式的另一方向——能量換成質量。

倍打益能器尚有幾個優點，即容易製造，成本低廉，以及佔地較少。它的電磁體不必過大，所用的銅線因而較省。

32. 【其他產生高能粒子的機器】 要產生比天然所產更多的高能量粒子，就不得不用複雜的機器。這些機器的構造雖不相同，但原理則一，即以高速度給予帶電的粒子，如質子、亞爾法粒子、氦子、電子等。加速的方法，不外乎利用電場，或磁場，或兩者合用。范德格拉甫靜電高壓機以及最初的直線型

加速器，都是利用電場加速；迴旋益能器雖然既有磁場又有電場，但用於加速者仍是電場；倍打益能器（也可以叫做感應益能器）則利用變動的磁場加速。范德格拉甫靜電高壓機可以產生速度幾乎一致的陽離子注；迴旋益能器可以不用外來高電壓而產生能量很高的陽離子；倍打益能器可以產生速度近於光速的電子。三者各有其優點，也各有其弱點。

除此三種機器以外，尚有最近發明的兩種。其一叫做同步迴旋益能器 (synchro-cyclotron)，是將迴旋益能器改造而成。此器與迴旋益能器在構造上與在原理上有三個不同之點：(一) 迴旋益能器有兩個 D 形匣，此器祇有一個 D 形匣；(二) 迴旋益能器中離子被加速，由於電場的吸引作用，此器中離子被加速，由於電場的吸引作用以及斥拒作用，因為它祇有一個 D 形匣之故。離子入匣時被引而加速，出匣時即被斥而加速。(三) 迴旋益能器的交流電頻率不變，此器的交流電頻率可加以調節，使其可與離子的出入 D 匣同步而不受質量增加的影響。

第二種新發明的儀器叫做同步益能器 (synclotron)，可以說是倍打益能器與同步迴旋益能器的合作品。它所產生的高能電子注，先依倍打益能器的作用加速，然後再依同步迴旋益能器的作用而加速。

這兩種新儀器，現正在試用改進中，它的構造詳情，目下尙未能查考。

第八章

鈾的裂變：曼哈坦區

33. 【用中子轟擊原子核】 在第四到第六章裏面，我們已知道怎樣可以用各種粒子（亞爾法粒子、中子、質子、氘子）做“彈丸”，轟擊原子核，誘發核轉變。這四種粒子，除中子以外，都帶着陽電。要把帶陽電的粒子打進帶陽電的核裏邊去，這是一件相當困難的事情，因為這些彈丸都要受到核電場的抗拒。若用中子做“彈丸”，則因中子不帶電之故，就應該很容易的穿入原子核，很容易的引起核轉變。實際上的情形，確與我們的預期相符，然而有一個問題把我們難住。中子的天然來源是沒有的，而大量產生中子的機器也還沒有發明。第七章裏面所講的各種機器，都祇能產生高能量離子，而不能產生大量的中子。這些離子的來源是很容易得到的。我們祇要在稀薄的氫氣，氘氣，氦氣中放電，就可以產生大量的質子，氘子，亞爾法粒子了。然而要產生大量中子，卻不得不求諸間接的方法，例如用亞爾法粒子轟擊鈹核，或用氘子轟擊鋰核，或用質子轟擊鈹核。但因這些核反應的本身，都受電場斥力的影響而遲緩，所以我們不啻繞了一個大圈子，依舊回到了老地方。

可是我們不要忘了，用中子轟擊原子核，也有仍舊放出中子來的。例如碳被中子轟擊，變成氮核，放出一個中子來。又如 N^{14} 被中子轟擊，變成 N^{13} ，放出兩個中子來。假定我們能夠找到一種核反應，由中子轟擊引起，結果有幾個中子產生，而這些中子都有充分的能量，足以轟擊其他的核，那麼我們便

有大量中子可以產生了。

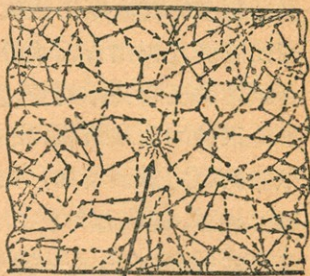
就 (n, n) 式的反應而論，每一個原子核受轟擊後祇產生一個中子，這中子再轟擊別的核，這樣的過程，是依照一定不變的速率而進行的，進行到全部材料用盡時為止。假使反應結果所生的中子不止一個，譬如說每一個原子核受轟擊後產生兩個中子，則在第一個原子被轟後，我們有兩個中子可用。這兩個中子轟擊另外兩個核，就有四個中子產生。這四個中子與另外四核起反應，產生八個中子。這樣的繼續下去，反應進行的速率就有很急劇的增加。如果每次反應有巨額能量釋放出來，而能量之釋放比能量之散逸於四週快得多，那麼在中子愈生愈多，和能量愈積愈多的條件下，就會有發生爆炸的時刻到來。

像這樣的一種反應，就是所謂“枝生鏈式反應”(Branching Chain Reaction)。在化學方面，枝生鏈式反應的例子是很多的。例如將氫氣與氧氣混合，在這混合氣體中發一個電火花，這電火花就可以供給充分的激發能，使火花附近少數的原子發生反應。這些原子化合起來，生成 H_2O ，放出熱能，這熱能又被更多的其他原子吸收，成爲它們所需要的足量的激發能，而使它們互相化合成水分子。如是輾轉授受，直至全部氫氧混合氣體的反應完畢為止。假使在這種反應過程中，所生的熱量不能很快的全被吸收，或有多餘而不能很快的散逸，以致混合氣體的壓力急劇增加，那麼就有發生爆炸的可能了。我們立刻就要知道，這種爆炸性的鏈式反應，當鈾核被中子轟擊時，在適當的條件之下，是一定要發生的。

34. 【鈾的裂變】 讀者若將第六章裏面所講的種種核反應再全部查考一下，必將注意到一件事情，即原子核不論受何

種“彈丸”轟擊，其生成物總是同位素或週期表上另一元素，再加上放出來的粒子或茄瑪射線，而這些粒子之中，沒有比亞爾法粒子更重的。一九三〇年以後的幾年裏頭，研究核物理學的各方工作人員，用中子轟擊鈾核，發見生成物有在所述各例之外的跡兆，因此引起了很多不同的說法。其中有一個最風行一時的說法是，鈾核捕獲一個中子，生成原子序數比鈾更高的元素。在那一個時期中刊印出來的週期表上，的確有第九十三，第九十四等等新元素加入。到一九三九年，德國的科學家哈恩 (Hahn) 與斯特拉斯芒 (Strassmann) 發見了久在疑雲中的真相。他們利用所謂示蹤劑化學 (tracer chemistry)，證明鈾核被中子轟擊後，產生鋇、氙、以及其他幾種元素，這些元素都在週期表的中段，它們的原子量約等於鈾原子量的一半。哈恩等立即把他們的發見告訴逃亡在瑞典的奧人梅特娜 (Meitner) 女士。梅特娜立即推斷，鈾核必已裂變為質量數大略相等的兩塊，所以生成此等元素。她又說必有鉅額能量解放出來。

消息傳至各地，各地的核物理學家紛紛作同樣的實驗，果然證明了梅特娜的判斷。這一來，不但增加了重核裂變的第一個新例，而且提示了原子能問題的新答案。通常核反應的能量變更，不過是幾個 Mev.，大概不到十個 Mev.。但是鈾核裂變的能量輸出，約有 200 Mev. 之多。這樣鉅大的能量輸出，挑動了核物理學家的雄心，紛起作更進一步的研究。物理學家對於取得鉅額能量藉以擴展有利人羣的實業，當



第一個鈾核開始裂變

圖 35 枝生鏈式反應產生無數中子

然是深感興趣的。不幸此一重要發見適當世界戰意方濃之際，以致原子能的研究與應用偏重在軍事方面，至今尚未能轉入和平應用的階段。

鈾核被中子轟擊，不但可以裂成兩塊，而且可以裂成三塊四塊，不過機會極少。大約每千個鈾核裂變時有三個可裂成三塊，每萬個鈾核裂變時有三個可以裂成四塊。這現象是我國物理學家錢三強、何澤慧夫婦二人，在法國發見的。

鈾核裂變發見後，再經研究，得知每一核裂變時有中子產生。每裂變一次究竟產生幾個中子，確數尚在美軍事當局嚴守祕密之中，據各家估計平均為兩個到三個。在此後的討論中，我們將假定為兩個，以求說明之簡單。

在此處，我們要順便提一提何謂示蹤劑化學，因為這示蹤劑對於化學家和生物學家都是重要的工具。假定我們現在要鑑定鈾核與中子反應的生成物。我們先將少許的生成物，與銀鹽溶液混和於水中，然後加入硫酸鹽，使銀沈澱。所得沈澱物，乃不可溶的硫酸銀。再經檢查，即可發見沈澱物有放射性，餘下的溶液沒有放射性。由此可知生成物內必含有放射銀，因為放射銀與平常的銀有相同的化學性質，故可一同沈澱。這放射銀即是示蹤劑。又若我們用別的鹽類以得銀、鋅或銅的沈澱，我們就不能發見沈澱物有放射性。由此可知生成物內不含銀、鋅或銅。哈恩就用這個方法，鑑定了中子轟擊鈾核的生成物。

現在再把核裂變的激發能拿來討論一下，俾可對於鈾核裂變之機構，有更清楚的認識。圖 16 所示的各種元素核裂變激發能曲線，我們若再把它考察考察，即見激發能的數值就一般元素而論都很高，直到週期表上很重的幾個元素，激發能的數值纔降低下來。例如欲使錫核裂變，非供給 50 Mev. 左右的

激發能不可。在目前，我們所能得到的高能量中子，它們的能量都遠在50 Mev.以下，所以我們決不能妄想可用中子做彈丸而使錫核裂變。沿着曲線往重元素一頭看，例如看到錒(Tb)，即見激發能約在20 Mev.左右。然即使我們能夠產生20 Mev.的中子，也還不能夠希望錒可以起枝生鏈式反應，因為錒核裂變不能產生如此高能量的中子。錒核裂變所生的中子，能量不過一個 Mev.到兩個 Mev.罷了。

再看到鈾與 U^{238} ，即見激發能的數值更低，祇有 5 Mev.左右。實際上說來，我們祇要用一個 Mev.的中子，即有引起核裂變的可能。這是因為中子不必有等於激發能那樣高的能量，即可穿透核的位能屏障之故。依據量子論，蓋莫(Gamow)提出假說謂，能量較低的中子“漏”過位能屏障而入核內，有一定的或然率。這或然率隨中子的能量一同增高，從低能量中子的很小數值起，增加到100%止，此時中子的能量與裂變激發能相等。這種所謂“障漏”(barrier leakage)的概念，是不容易解釋的，但是我們請讀者暫時信仰它而予以接受，至於解釋的工作，則讓量子力學專家去擔任。圖36所示，即是位能屏障與中子能量間的關係概況。

所以就鈾而論，雖其激發能約為5個 Mev.，然而能量不過一個 Mev.的中子，也有引起鈾核分裂的可能。在實際上，凡是穿得進鈾核的中子，每二十五個大概有一個可以引起核裂變。其餘二十四個則仍被踢出核外，而且它們

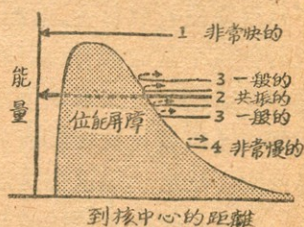


圖 36 位能屏障與障漏效應。

- 1, 非常快的中子，都可穿透屏障；
- 2, 共振的中子，可以漏過屏障；
- 3, 一般的中子，多數不能穿過屏障；
- 4, 非常慢的中子不能穿過屏障。

的能量都比進去時降低。這是因為再發射中子的激發能比核裂變的激發能低，所以再發射的過程比核裂變的過程容易發生。至於再被發射的中子，其能量所以降低之故，那是因為它的能量有很大一部分已分配給核內其他的粒子，使它們發生振動，振動時放出茄瑪射線，直到回復原來的正常狀態而止。

從鈾再上去到 U^{238} ，裂變激發能還要小，而且每五個穿進鈾核的中子，有一個可以引起核裂變。但是這還不足以使枝生鏈式反應開始。即使每次裂變放出兩個中子，仍舊是得不償失；我們拿五個中子換兩個，明明是虧本的生意。但是就稀有的鈾同位素 U^{235} 而論，核裂變的激發能小於 5 個 Mev.，換言之，核裂變的激發能比再發射的激發能低（一般原子核的再發射激發能都在 5 個 Mev. 左右），所以核裂變的或然率反而比中子再發射的或然率來得大。於是我們便可以做一筆賺錢的生意了。因為就每兩個穿入 U^{235} 核內的中子而論，核裂變的或然率大於二分之一，又因為每次裂變後放出來的中子是兩個甚至在兩個以上，所以生出來的中子比放進去的多，而枝生鏈式反應即有成功之可能。若用新元素銻(Np)與鏷(Pu)，也有同樣的情形，枝生鏈式反應也有成功之可能。這兩種新元素是研究原子能的產物，下文將有較詳細的講述。現在要提出的是，Pu 用為枝生鏈式反應的材料，非常適合，但是 Np 卻因有實用上的困難而不適用，主要的困難即該元素的半衰期太短。

上節曾說到 U^{235} 與 U^{238} ，都是天然產的鈾同位素，不過前者的天然產量遠比後者為少。在任何天然鈾礦內，較重的同位素 U^{238} 約佔總量的 99.3%，較輕的同位素 U^{235} 祇約佔 0.7%。此外尚有天然產的第三種鈾同位素 U^{234} ，但是它所佔的百分數不到 0.1%，所以我們不予以重視與討論。自從哈恩等發見

鈾核裂變現象以後，其他專家再加研究，證實鈾核被中子轟擊而起裂變的，差不多全是 U^{235} 的原子核， U^{238} 在裂變的過程中祇有沖淡劑的作用，即是使反應進行遲緩的作用。

U^{238} 的延緩作用是很大的。不要忘了每五個中子轟擊 U^{238} ，祇能夠換得兩個有用的中子。在天然鈾中的 U^{238} 約為 U^{235} 的 140 倍，所以 U^{235} 裂變所產生的中子，頗有多數被 U^{238} 捕獲的可能，於是在 U^{235} 身上賺來的中子，抵不過在 U^{238} 身上虧去的中子。這樣一來，有用的中子就祇會減少而不會增多，連保持原數都不可能。所以在天然鈾中，我們決不能發動一串不斷的或說自續的枝生鏈式反應，除非設法增加 U^{235} 的含量，或把雜質去淨，單留純粹的 U^{235} 。

這個辦法，雖然到一九三九年的年底尚未實現，但是研究原子能的專家們，都早已認為決有實現的可能。所以在一九三九年的七月裏，逃亡在美國的愛因斯坦就寫信給美國的總統羅斯福，建議由美政府支持，加強研究工作，俾可獲得使 U^{235} 起枝生鏈式裂變的方法，藉以利用 U^{235} 為軍用能源。三年以後，美國建立曼哈坦區 (Manhattan District)，專門從事於原子炸彈的設計與製造，接着又在田納西州橡岡 (Oak Ridge) 地方設廠提取純粹的 U^{235} ，並在美國全國各大學各研究所特闢原子能實驗室，其中最重要的一個便是芝加哥大學的所謂“冶金實驗室”。

35. 【曼哈坦區的工作】 現在且把在曼哈坦區研究的主要問題談一談。我們都已知道，用中子轟擊鈾核，可以使它裂變，同時可把鉅量的原子能解放出來。我們又已知道，假使這鉅量的原子能可以在很短很短的時間內放出來，就能夠產生強烈的爆炸，有極大的軍用價值。不過這樣的爆炸，祇在能夠

使鈾核裂變而起枝生鏈式反應時，方有發生的可能性。這種枝生鏈式反應，祇在純粹的 U^{235} 裏面，或在 U^{235} 加多的鈾裏面，方得發生；在天然鈾裏面是決不能發生的。於是曼哈坦區的專家們，首先覺得所應急求解決的問題，即是如何可從天然鈾提取純粹的 U^{235} 。

這一個問題有一個很明顯的解決方法，即是把鈾的兩種同位素分開來，因為分開之後，我們便有了純粹的 U^{235} 。然而這種分離的手續卻是一件非常艱鉅的工作。我們早已知道同位素有同樣的化學性質，所以不能夠用化學方法來使 U^{235} 與 U^{238} 分離。我們不得不借物理的方法來使它們分離，但因這兩種同位素的質量數 235 與 238 相差很少，所以分離的手續就很繁難了。有好幾種分離的方法，由專家們從理論方面與實用方面研究過，其中有兩種已有大規模的應用。這些方法，都要在下文裏面分別講述。它們的原理都很簡單，但在技術上是很複雜的，非有設備精良規模宏大的工廠不行。

36. 【離心機法】 離心機法 (centrifuge method) 所根據的原理是大家都熟悉的。有一個很普通的例子，便是把較輕的乳酪從較重的牛乳分出來。它的原理不過是：密度不同的液體或氣體混在一起，受到離心力的作用時，便很快的按照密度的大小而分成不同的層次，密度愈大，愈在外層。依據力學上的定律，一個質點沿着圓形軌道按等速率而運動時，這個質點必然受到向心力的作用，同時質點對於那個加向心力到它自己身上去的外物，就有一個反作用，這反作用就是離心力。離心力與向心力的作用方向雖反，大小卻相同，都等於 $\frac{mv^2}{r}$ ，式中 m 是質點的質量， v 是質點沿圓形軌道而動的速率， r 是圓

形軌道的直徑，單位是 *C. G. S.* 制。由此很容易推知，兩個大小相等的質點，譬如說乳酪的分子與牛乳的分子，在同一圓形軌道上按相等的速率運動時，倘若它們的質量不相等，那麼所需保持它們圓運動的向心力也不相等。乳酪分子的質量較小，所需向心力較小，它所加於外物的離心力也就較小；牛乳分子較重，所需向心力較大，它所加於外物的離心力也大。所以含有乳酪的牛乳在圓柱形容器中旋轉的時候，乳酪分子與牛乳分子決不能同處於同半徑的圓柱形表面上，因為它們從較外一層所得的壓力是相等的，這壓力足以維持內一層乳酪分子的圓運動，即不足以維持該一層內牛乳分子的圓運動，其結果，牛乳分子必須趨於外層，乳酪分子必須趨向中心，方始可保持平衡。

離心力，本是一個圓運動質點加於外物的力，但從上述的現象說來，愈重的質點愈要遠離旋轉軸，好像質點的本身也受到了離心力的作用而被離心力向外拉出去一般。實際上，一個質點祇有在作圓運動時，方始有向心力與離心力出現，等到它因為得不到充分的向心力而脫離圓形軌道時，向心力與離心力早已同時不存在，而這個質點的運動方向乃是圓形軌道的切線，並非從中心向外的輻線。不過當這個質點離開它本來的圓形軌道時，其它質點仍在旋轉，而且拉着這個質點在逐漸增大的圓形軌道上同轉，則此質點確似沿着從中心向外的輻線飛出去。故就容器中混合液體或混合氣體不停地旋轉的情形而言，不妨幻想有一個從中心向外的力作用於各質點，要把它們拉出去，所以最重的被拉在最外層，最輕的就留在最內層，正好比輕重不同的液體混在一起，攪和後，讓它們受重力的作用慢慢定下來，結果最重的在最下層，最輕的在最上層一般。

所不同者，重力作用小，各層分開得慢；這幻想的力作用大，分開得快而已。這種利用圓運動而將密度不同的液體或氣體分開的器具，就叫做離心機(centrifuge)。儘量增高離心機旋轉的速率，可得百萬倍於重力的“離心力”。

利用離心機來分開密度不同的液體或氣體，有一點不可不予以注意。這便是密度的差別愈大，愈容易分開。因為向心力是與質量成正比例的，就同體積而作比較，即與密度成正比例，密度比愈大，所需的向心力比也愈大。於是“離心”的作用自然就愈顯著了。例如水的密度是 1.00 克/cc，油的密度是 0.8 克/cc，它們的比是 $1.00/0.80=1.25$ ；牛乳的密度是 1.03，乳酪的密度是 0.97，它們的比是 $1.03/0.97=1.06$ 。1.25 比 1.06 大得多，所以把油與水分開，比了把牛乳與乳酪分開要容易得多。

這一點，對於 U^{235} 與 U^{238} 便是一重大的困難。分離鈾同位素，是必須先將鈾氣化的。氣體的密度比，在同溫度同壓力之下等於分子量的比，而 U^{235} 與 U^{238} 的分子量距離很近，它們在氣態時的密度比祇有 1.01。這一個比數實在是太小了，

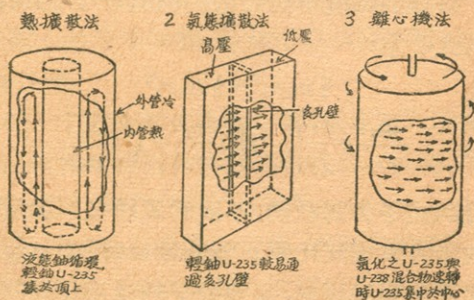


圖 37 分離鈾同位素的三種方法。

要把它們分開，非有很大很大的離心力不行。此外，氣體分子的自由運動，不斷地迅速地在一切方向中演進着，這也足以阻礙兩種氣體的分開，而增加了所需設備的繁雜與費用。

通常用離心機分離鈾的同位素，先使鈾與氟化合而成爲 $U^{235}F_6$ 與 $U^{238}F_6$ 兩種氟化鈾。氟化鈾的化學活動性很強，乃是容易處理的東西，然而它是理論上適用的少數鈾化合物之一，因爲它容易變爲氣體。氣態氟化鈾 $U^{238}F_6$ 與 $U^{235}F_6$ 的密度比，祇有 1.009，比 1.01 更小，若與水油密度比 1.25 相比，真是差得遠了。在實際上講來，如果兩種氣體的密度比是 1，那簡直無分離之可能。1.009 比 1 大不了多少，所以用離心機分離氣態鈾，真正是一件非常困難的事情。美國曼哈坦區的工作人員從計算與觀察，得知每天產生一仟克（約 2.2 磅）的 U^{235} ，需要二萬二千具超速離心機同時工作。這一個數字，是太不合實際了，因此，離心機分離法即被擯棄。

37. 【擴散分離法】 擴散分離法的原理，是根據氣體分子運動說而來的。我們總還想得起，在同溫度下的氣體分子，都有相同的平均動能。這動能是等於分子質量乘分子速度平方的一半。故就同溫度不同質量的氣體分子而論，我們可以寫出下面的式子來：

$$\frac{1}{2} m_1 v_1^2 = \frac{1}{2} m_2 v_2^2$$

$$\frac{m_1}{m_2} = \frac{v_2^2}{v_1^2} \quad \text{或} \quad \frac{v_1}{v_2} = \sqrt{\frac{m_2}{m_1}}$$

這最後的式子告訴我們，不同的氣體在同溫度下的速度，與分子量的平方根成反比例。我們總知道，在氣態下的分子，透過一層多孔薄膜的速率，是與分子的速度成比例的。所以若令由輕重不同的分子混合而成的氣體，透過多孔薄膜而入抽

空的空間，則較輕的分子比較重的分子容易透過而且透過得快。於是透過去的氣體中，所含輕而動得快的分子佔大部分；留下來沒有透過去的氣體中，所含重而動得慢的分子佔大部分。

由此可知，用擴散法來分離氣態同位素混合物，難易的程度視分子速度比而定。分子速度比若很小，則需連續擴散多次後，方有顯著的差別看得出來。新混合物中甲同位素對乙同位素的濃度比，除以原混合物中甲對乙的濃度比，叫做甲同位素的分離因子（separation factor）或加濃因子（enrichment factor）。就本例而論，氟化鈾 $U^{235}F_6$ 的分離因子，依照或然率的理論，等於 $U^{235}F_6$ 與 $U^{238}F_6$ 的分子速度比 1.0044（略），不過此數祇在起初一小部分氣體透過薄膜時纔對。如果透過的氣體一多，分離因子就要跌落下來。這是應當如此的，因為全部氣體透過薄膜後，就等於沒有分離，而分離因子就變為 1 了。不過大概可以定 1.003 為實用分離因子。據此推算，濃度為 0.7% 的 U^{235} ，經過分離 1000 次後，濃度增為 12.6% 左右。

分離因子雖然如是之低，氣態擴散法卻是大規模生產 U^{235} 的最佳方法。美國橡岡的大規模提鈾廠之一，即採用此法。不過技術上有許多困難，是非予以解除不可的。現在挑重要的幾種講一講。

氟化鈾 UF_6 這樣東西乃是一個“壞東西”。它同極少量的水汽一接觸，就會生成有腐蝕性的氫氟酸。此外，它在室內溫度下是固體，所以必須預防其“凍結”。

因為擴散分離的加濃速率太慢，不得不用很大的多孔壁，並須用大量的氣體。這就需要大規模的設備。使氣體在各階段中循環的問題，也非加以考慮不可。在每一階段中留在多孔

壁後面的氣體，必須仍送回第一階段去，因為其中的 U^{235} 並沒有提淨。透過多孔壁而進入次一階段預備再擴散的氣體，所含 U^{235} 的濃度是增加了，但是分量卻減少了。從這兩點看來，最初各階段的氣體體積，須比最後階段大得多，所用壓縮器與多孔壁也須大得多。不論任何時刻，在整個系統中循環的氣體總量，約為最後階段出產量的十萬倍。

獲得適當的多孔壁材料，也是一個大問題。要提高多孔壁的工作效率，就不可使孔的直徑大於分子平均自由路程的十分之一。我們在前面已經說過，氣體分子的平均自由路程約為 10^{-5} 厘米。所以孔的直徑必須在 10^{-6} 厘米以下，或千萬分之四英寸以下。此外，各孔不可讓氣流中挾帶的灰塵塞住，也不可讓氣體的腐蝕作用將它們擴大。孔的直徑既小，孔的面積當然很小，所以每單位面積的孔數必須很大，方可不必用很大的壓力以使擴散通暢。實際上在美國提鈾廠中所用的多孔壁兩側壓力差，約為一大氣壓，故多孔壁須有充分的耐壓強度以承受這壓力差。

在氣體擴散法提鈾廠裏面，還有一樁很大的困難事件要解決的，這便是對於工作人員須予以適當的防護，俾可避免為 U^{235} 與 U^{238} 衰變時放射的有害射線所傷害。這兩種鈾之中， U^{235} 的半衰期較短，大約是五萬萬年， U^{238} 的半衰期較長，大約是五十萬萬年，兩者幾成一與十之比。因此，在一定的時間內， U^{235} 所放出來的射線比同重量的 U^{238} 所放出來的多。但是 U^{238} 的天然存在量遠比 U^{235} 為多，所以這兩種同位素對於人體差不多有同樣的危險性。在提鈾廠內，需用的鈾原料是很多很多的。有了這大量的放射元素，就有大量的穿透力很強的倍打射線與茄瑪射線放出來；所以必須有很厚的水泥障壁，以

保護工作人員。在美國橡岡擴散提鈾廠中，差不多完全用自動控制裝置來推進提鈾的過程，因此，工作人員減至極少數，困難的解決也就容易了不少。

全部提鈾機器的形狀像一個很大的U字，原料從U的一端進去，成品從另一端出來。這個大U形裏邊包含着許多小U形，原料在小U形中流動，情形同於在大U形中流動。廠屋雖是六層樓房，但除頂上一層外，其餘五層都沒有。六層樓上人員的工作，也不過是巡察巡察，把六層樓四壁所裝各種儀器查看查看罷了。全廠的實際工作，僅由一小羣人控制着，這一小羣人是在廠外的一間總控制室之內。廠內所裝記錄與控制溫度、壓力、流動率等等的儀器，為數是非常之多的。據美國某權威可靠消息，此數超過美國戰時新興工廠全部所用的儀器。

38. 【熱擴散法】 熱擴散(thermal diffusion)分離法的原理是不容易了解的。簡單地說來，氣態或液態同位素的混合物，若放在一個四壁冷而中央熱的室內，則較輕的分子趨向中央較熱區域，較重的分子趨向四壁較冷的區域。在圓筒的中央貫一熱管或熱線，即可造成這樣的氣室，如圖37的1即是。美國的葛恩博士(Dr. Gunn)與亞培爾生(Abelson)博士，在美國海軍研究實驗室中，曾與他們的合作者，共同研究液體的熱擴散，做了很多的研究工作。還有別的專家們，也研究過用熱擴散以分離氣體的方法。他們所研究的方法，都可以用來分離鈾的同位素，但不及氣態擴散法的切合實用，因而未有大規模的應用。

39. 【電磁分離法】 電磁分離法(electromagnetic method of separation)的原理，同於前文所述質譜儀的原理。研究這

個方法的重要人物，先有美國明內索達(Minnesota)大學的聶爾(A. O. Nier)，後有加里福尼亞大學的勞倫士。這一個方法的主要困難有三樁：(一)不易產生所需要的陽離子；(二)這些離子祇能用到有限的一部分；(三)受空間電荷效應的影響。

離子須從隙縫中通過，俾可收成很細的一注，但是隙縫以外的離子卻被擋住了，以致所產生的離子祇有很小一部分可用。假使我們要用集中的離子注，則又將受空間電荷效應的影響。於是各個離子即將因其帶有同性電荷而互相斥拒，以致又使離子注散開。爲了提高分離的效率起見，細小而收聚得很緊密的離子注是必需的。這離子注雖然不必像阿士登精測原子量與同位素成分時所用的那樣細小，但亦須細小至相當程度，方可得比較純粹的產品。

利用質譜儀的原理來分離鈾同位素，最初的實驗工作是聶爾與他的合作者所做的。不過他每天工作十六小時，祇能提得一微克的純粹 U^{235} 。這寥寥之量，當然太小了，不足以供製造原子炸彈之作用，然而在最初的研究期間，原子能專家們就用了聶爾所提得的 U^{235} ，研究它的各種性質，並證明鈾核裂變即是這一種同位素的把戲。

爲了要提取多量的純粹 U^{235} 以供進一步的研究，勞倫士及其合作者就在加里福尼亞大學造成了“加大提鈾器”(Calutron)。此器所用磁體，是本來預備用來製造一架巨型迴旋加速器。該磁體的磁極面直徑爲184英寸，兩極間的空隙是72英寸。上文所述的三樁困難，加大提鈾器把它們都解除了。第三樁困難，即所謂空間電荷效應，由於離子注所經抽空室內殘餘氣體的電離化，已被消除了大部分，因爲室內若有大量陽電荷，即可以阻止離子注的散開。但此項改良的詳細情況，以及

其他兩樁困難如何去除的辦法，卻還未曾公諸大衆。在史邁士所著的“軍用原子能”一書中，固然提到加大提鈾器因其磁場中同時在作用的不止一條離子注而大大提高其效率，但方法也沒有說出來。

我們知道現在美國已經造成了幾具加大提鈾器，而且在使用之中，但是它們的生產率，恐怕不會多於每天幾克的純粹 U^{235} 。加大提鈾器的主要用途，顯然在於產生小量的純粹 U^{235} ，以供實驗室內的研究；至於大量生產 U^{235} ，目前仍靠氣態擴散廠。此外尚有其他的電磁分離法，經過各家的研討，而有所謂 Isotron（同位素電析器），以及 Ionic Centrifuge（離子離心機）等等發明。這些方法，目下尚未透露於外，恐怕都不及加大提鈾器之切合實用。此處順便提及，亦不過讓讀者得識其名而已。

40. 【產鈾問題提要】 自從發見了中子可使鈾核裂變並於同時解放鉅額能量以來，物理專家即忙於搜尋妥善的方法，以期獲得自續的鈾核裂變，而可利用其所釋放出來的大量之能。把天然鈾同位素分離之後，方知在裂變過程中的活動者，不是較豐富的 U^{238} ，而是較稀少的 U^{235} 。要使這種裂變的過程可藉枝生鏈式反應而自續進行，必須提得純淨的 U^{235} ，或 U^{235} 含量百分數遠較天然鈾為高的一種材料。因此，非有大量分離鈾同位素的方法，不足以言原子能之解放。又因化學方法沒有效用，不得不採取物理的方法，這種方法所倚賴的，也只是兩種鈾的原子量或分子速度之間略有差別而已。離心法與熱擴散法對於大規模生產不能合用。經過了很多的研究，解決了很多不平常而困難的生產技術問題之後，纔曉得通過多孔壁的氣態擴散法，乃是大規模生產的最佳方法。

至於電磁分離法，包括加大提鈾器，Isotron，以及 Ionic Centrifuge 在內，都祇能產生少量的 U^{235} ，不過產品非常純淨，故可專供研究之用。這些方法裏邊，祇有加大提鈾器最有前途。加大提鈾器的原理與質譜儀的原理相同，但因其構造較大，可用強力磁場，故出產量即多得多了。

第九章

慢中子反應：鎊的製造，漢福德廠

41. 【怎樣補救中子的損失】 中子對於週期表末幾個重元素有引起枝生鏈式反應的可能性，這在前面已經討論過了。我們已知道中子祇對於 U^{235} 方有引起這種反應的可能，對於每 140 個鈾原子中祇有一個是 U^{235} 的天然鈾，決無引起鏈式反應的可能，除非將 U^{235} 的含量充分提高。天然鈾中所含 U^{238} 對於自續反應的害處，前文也已講過，即捕捉入核的中子，多於放出核外的中子。這麼一來，中子非但不會愈發愈多，反而愈發愈少。我們又知道， U^{235} 本身所捕捉到的中子，不一定個個會引起核裂變。有很多 U^{235} 的核把中子再放出來，其能量遠較初入核時為低。這些“弱”中子是不能幫助枝生鏈式反應之進行的。此外尚有第三個因子，不得不加以考慮：在參加反應的作用物表面，有中子漏逃的損失。中子在大塊的作用物內，到處奔竄，毫無定向，而任何大塊堅實的材料，其大部分體積確然是虛無的空間，所以許多中子都從這虛無的空間，溜出作用物的外面，一去而不復返。這也是一筆不小的損失。

由此可知，能夠產生中子以維持枝生鏈式反應的，祇有 U^{235} 的裂變，然而有三種過程卻要虛耗中子而使有效中子的數目減少：(一) U^{235} 捕獲中子而不起裂變；(二) U^{238} 捕獲中子；(三) 中子透過作用物的表面而外逃。此外，中子尚有被雜質捕獲的可能，這一層亦須顧慮到。這些虛耗中子的原因，應當用什麼方法消除它們，俾可補救中子的損失呢？

要將雜質的影響減至最低程度，祇須把雜質去掉就是。這是一件說起來容易做起來難的事情，因為有些雜質即使含量低至百萬分之幾，也還有很顯著的影響，而純淨到如此程度的 U^{235} ，要使其大量生產，又是一樁不容易的工作。 U^{238} 的沖淡作用，欲加以補救，除了將 U^{238} 提去外，實在沒有別的好法子。可是把 U^{235} 與 U^{238} 這兩種同位素分離，已費盡了許多物理學家的九牛二虎之力。

42. 【臨界體積】 中子透出作用物的表面而逃失，這應該是我們能夠去除的困難。假使我們增加作用物的體積而保持其形狀不變，譬如常成立方體狀或常成球狀，則體積的增加與長度的立方 L^3 (L 為一邊長或半徑長) 成正比例，而表面積的增加僅按長度的平方 L^2 的比例而增加。作用物的質量，或說引起裂變的核數，是與體積 L^3 成正比例的，而從表面逃失



圖 38 鈾核因吸收中子而起裂變。

A, 中子趨近鈾核; B, 中子被鈾核捕獲; C, 受激發的鈾核因能量過多而振動; D, 受激發的鈾核開始裂變; E, 裂變後的兩片背道而馳, 動能甚大。



圖 39 中子被鈾核吸收而未起裂變。

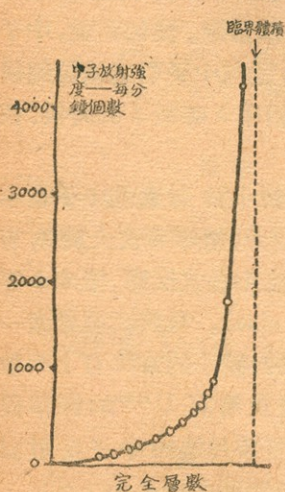
A, 中子趨近鈾核; B, 中子穿入鈾核; C, 核在激發狀態, 放出茄瑪射線; D, 過剩之能散逸, 核趨向安定; E, 成爲較重的 U^{239} 。

的中子數，則是與面積 L^2 成正比例的，故增加作用物體積而保持其形狀的結果，無異於增加了維持自續枝生鏈式反應的可能性，因為任何大於 1 的數目，它的立方比它的平方增加起來快得多。例如 $2^3=8$ ， $3^3=27$ ，由 8 到 27 增加了 237.5%；但是 $2^2=4$ ， $3^2=9$ ，由 4 增加到 9，祇增加了 125%。換言之，我們若用體積較大的作用物，即可使因 U^{235} 裂變而產生的中子，多於逃出表面而損失的中子。假定我們有一定量的相當純淨的鈾，其中 U^{238} 的含量以及雜質，業已減低到足使中子愈增愈多的程度，但體積太小，逃失太多。我們就把更多的同樣的鈾添加進去，使其體積增加而保持其形狀不變。加到後來，我們總可以達到某一充分大的體積，使核裂變所生有效中子的增加率，即除去被 U^{238} 或雜質吸收的中子以及 U^{235} 不裂變而吐出來的弱中子以外的中子增加率，適等於中子穿出表面的逃失率。此時全部鈾塊內的中子數是一個常數。換句話說，中子的倍率 k 等於 1，即原來有多少中子，這些中子引起核裂變後淨得的有效中子仍舊是原來的數目。倍率 k 等於 1 的時候，核裂變的過程依一定的速率穩穩進行。

現在若把體積稍稍縮小，倍率 k 便小於 1，有效中子愈來愈少，反應終於停止。若把體積稍稍增大，倍率 k 便大於 1，有效中子數很快的加多，因而即可引起枝生鏈式反應。倍率 k 等於 1 的體積，叫做臨界體積 (critical size)。我們祇要思索一下，即可知臨界體積是可以設法減小的，減小的方法有下列數種：(一)儘量減少雜質的含量；(二)儘量增高 U^{235} 的純淨程度；(三)以適當的物質包圍表面，俾可將外逃的中子反射回去；(四)將鈾塊製成球體，使表面積與體積之比最小。

即使用完全純淨的 U^{235} ，對於鏈式反應的發生也有臨界

體積存在。這是因為中子有很長的平均“自由路程”之故。前文早已說過，氣體分子的平均自由路程，乃是它接連兩次同別分子碰撞之間所行路程的平均值（參閱 §2）。在尋常的溫度與壓力下，氣體分子的平均自由路程約為 10^{-5} 厘米。中子的平均自由路程，乃是它從一核出來後，未撞他核前，所必經的路程。假使把各核看成靜止的，祇要知道了一核的受射面積，即該核面在中子路徑垂直面上的射影，以及同平面內原子數，即可計算任何一個特殊平面內的受射總面積。一個平面內的原子數，是可以從原子直徑及質料密度推算而得的。核的受射總面積被平面的面積除得之商（每單位平面內的受射面），即是中子擊中該平面內一核的或然率。又從質料密度及原子直徑，可以算得該質料每厘米所含原子的層數，各層都與中子路徑相垂直。擊中一平面內原子核的或然率倒數，即是中子擊



中一核前穿過的平面數，此數若為每厘米內原子層數所除，即得中子所經不與他核相遇的路程厘米數。這便是該質料的中子平均自由路程。中子擊中一核的或然率，與平均自由路程的關係，須用微積分推求，此處祇能從略。

中子的自由路程，大概是 10 厘米。這就是說，中子在擊中另一核之前，平均行過的路程在 10 厘米左右。故純淨 U^{235} 的球體，若其直徑小於 10 厘米，則第一次裂變所生的

圖 40 石墨鈾團臨界體積的決定。中子將全數衝出球外而絕無作用。

自由路程的確切計算是很複雜的，因為一個中子擊中一鈾核而使其裂變，常有不止一個中子再放出來；不過 10 厘米左右是大致不錯的。

前文所說每單位平面內的受射面積，可以直接計量中子擊中一核的或然率，祇要沒有其他的力須加以考慮。然若擊核者非中子而為帶陽電的粒子例如質子，則其抵達核的機會便要減少。換言之，電斥力的效應同於減少受射面。又若擊核者被核吸引，則入核的機會即增加，其效應同於擴大受射面。所以受射面不但視被擊核的真正大小而定，而且視其他的因子而定，最重要者為轟擊用粒子的性質及其速率。

到此為止，我們尚未討論到減少 U^{235} 捕獲中子而不裂變的機會，須用何種方法。關於這一層，目前還沒有好辦法。能夠引起核裂變的中子數，與再被放射的中子數，各視這兩種過程的激發能以及溫度而定。激發能之值由於天定，不由人力作主，而溫度的影響則非至極高時不顯，這極高的溫度又是超出現在的人智以外。因此，發生這兩種過程的 U^{235} 核，其比數至少在目下不能改變。

43. 【慢中子反應】 現在我們要來講一講一件很有趣而又很重要的事情。在以前的各項討論裏面，我們所提到的轟擊原子核或由核裂變而放出來的中子，都是快中子。這些快中子的能量在一至二 Mev. 左右，它們的速度約等於光速度的二十分之一。然而美國曼哈坦區的研究人員卻發見，用慢中子也

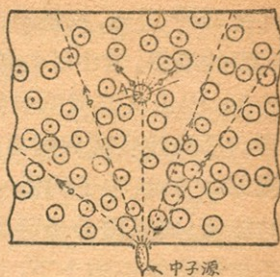


圖 41 中子在物質內的自由路程。中子在虛線所示的路徑上進行，經過了許多的核。在 A 處，它擊中了一核，被反射而改變方向；被擊中的核則向另一方移動。

可使 U^{235} 裂變，也很有效果。慢中子與 U^{235} 所起的反應乃是共振的過程，當中子的能量低至 $1/40$ eV 時，這共振過程便會發生。中子在這樣低的能階上，它的速度大大的減低下來。它們的平均速度實與同溫度的氫分子速度差不多，比能量有幾個 MeV 的快中子約慢一萬倍。因為這些中子的運動及其所具的能量，與氣體分子運動說中所說分子因熱而起的運動及其所帶的動能不相上下，所以又把它們叫做“熱中子” (thermal neutron)。熱中子之所以有效，完全因為它的能量相當於鈾核裏面的某一共振能階。它雖然不能硬衝過核的位能屏障，卻能夠“漏”過去，鑽進核內，教它裂變。

U^{235} 因共振吸收作用而捕獲中子一事發見之後，便有了新的方法，以增加鏈式反應繼續進行的可能性。我們在前面討論臨界體積時，曾說過 U^{235} 的濃度增加或 U^{238} 的含量減低，則臨界體積可以減小。據此，反過來說， U^{235} 與 U^{238} 的含量比減小，則臨界體積即須增大。然而務必注意， U^{235} 的含量與 U^{238} 的含量比，必須超過一定數值，臨界體積方有意義。例如天然鈾，其中 U^{235} 與 U^{238} 的含量比僅為 $1:140=0.7\%$ 。比數如此之小，我們把天然鈾的體積增加到無論多少大，也沒有維持自續反應之可能。即使把它的體積增加到充分大，以致逃出表面去的中子數與內部生出來的相比，少到可以不計，鏈式反應仍舊不能發生，因為被 U^{238} 捕獲的中子，以及穿入 U^{235} 核內而不引起裂變的中子，是太多了不可勝數，單就這筆虧損而論，已是得不償失，何況還有被雜質吸去的。現在，我們教中子慢下來，使它們的能量降低到 $1/40$ eV，它們就沒有幾個 MeV 的激發能，足以越過 U^{238} 的屏障了。我們可使這些中子在未被捕以前，與別種物質的原子相撞，能量降低到熱運動的階段

時，再回來與作用物接觸。那個時候，它們就不會被 U^{238} 捉住，卻會溜進了 U^{235} 的核內，引起核的裂變。

不過這裏還有一個小小的缺點。 U^{238} 也有共振能階，在這能階的中子，是要被捕的，而且被捕之後，並無裂變發生。有一個重要的吸收中子的共振能階，是25 eV左右。所以中子的能階在25 eV左右時，必須使其遠離 U^{238} 的附近，直至其能階已從25 eV跌落到1/40 eV為止。

根據上述原理來維持鏈式反應的裝置，即是所謂“鈾圍”(uranium pile)。簡單地說來，鈾圍是鈾或鈾的化合物小塊，與可以減低中子速度的別種質料小塊，相間疊置而成。疊置的方法與形式是有特殊設計的，但至今尚在美當局嚴守秘密之中。使中子的運動遲緩下來的質料，叫做延緩劑(moderator)。延緩劑的作用即在於降低中子的速率而且把它們反射回來，使它們與別的鈾塊相接觸，俾可引起核裂變。

現在讓我們把鈾圍的作用再講一講。鈾圍裏面置有中子源，例如少許鐳與鈹的混合物。從中子源發射出來的中子當然不少，我們祇把其中的一個說一說。我們可以假定它有充分高的速度，其動能足以勝過核裂變所需的激發能，因此它能夠射入一個鈾核而使它裂變。這個鈾核一裂變，即產生了兩種原子量較小的元素，產生了兩個中子，並且產生了200 Mev.的能量。這能量即是裂變成的較輕原子核，如氦核與鋇核的動能。這兩個核既具有很高的動能，它們當然飛快的分開來，而在圍中與別的原子猛烈地相撞相擊，直至全部動能轉變為熱能而散逸。倘若那用為延緩劑的材料，它的體積比了小鈾塊的體積大得多，而小鈾塊的大小又是遠比中子的自由路程為小，則每次裂變後所發出來的兩個中子，就要射到延緩劑裏面去。它們

在這延緩劑中同延緩劑的分子相撞，跳來跳去速度漸減，跳到最後，跳出延緩劑再到別的小鈾塊裏面，引起又一次的裂變。

假定這兩個中子裏邊祇有一個引起 U^{235} 的裂變，其他一個給 U^{238} 或別的雜質捕獲，捉住了不放出來，這便是損失。給 U^{235} 捉住而並未引起裂變的中子，是仍舊要放出來的，放出來的時候能量已經大大減低，再經延緩劑分子的碰撞，能量更要降低，而成爲熱中子。因此，這樣的一個中子並不算是損失，除

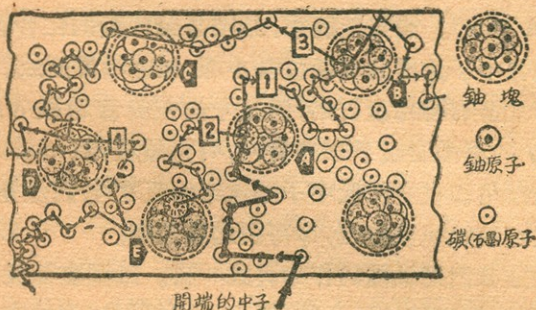


圖 42 石墨鈾團的作用概況。

從中子源出來的一個開端的中子，打通幾個碳原子後，擊中了 A 處的一個鈾核，而使它裂變。這個鈾核一裂變，放出兩個中子來。一個中子循路徑(1)前進，沿路與許多碳原子相撞，動能逐漸減低，減低到變成慢中子，在 B 處鑽進另一鈾核而使它裂變。這一個裂變的鈾核也放出兩個中子，其中一個循路徑(3)前進，途中穿過 C 處的鈾塊而未曾引起核裂變，並且繼續前進，與許多碳原子相撞，動能逐漸減低，直到與 D 處的鈾核相遇，鑽進去使它裂變而止。這次的裂變當然也有兩個中子放出來，其中一個循路徑(4)前進，逃出鈾團的外面。第一個裂變的鈾核所放出來的兩個中子，還有一個循路徑(2)前進，射入 E 處的鈾塊，給其中一個鈾核吸收進去，並未引起裂變，因為它的速率尚未減到充分低的程度。

中子與別的粒子每兩次碰撞之間的距離，與速度成正比例。

非半路上給 U^{238} 捉去或是逃出鈾圍的表面。一個鈾圍裏面每一個中子祇產生一個有效的中子以引起下一次的裂變，這個鈾圍中的反應便可自續而穩定。增加圍的大小，可使逃出表面的中子數減至最少的程度；延緩劑用很純淨的質料，可使雜質捕獲中子的損失減至最少程度；至於 U^{235} 捕獲中子而不起裂變，是可以不計的，因為這些中子仍有變為慢中子的可能性。由此可知，我們可以調節鈾圍的狀況，而使每次核裂變所生的兩個中子內，祇有一個再引起下一次的裂變，還有一個不起作用。

一九四二年冬季，美國芝加哥大學造成了這樣的一個鈾圍，初次實驗居然成功。這鈾圍用石墨做延緩劑，小鈾塊嵌在適當的地位，一層間一層疊置起來，直疊到稍大於臨界體積的大小而止。鈾圍發生作用時， U^{235} 裂變的速率，適可以使能量解放的速率，相當於半瓦特的功率。後來把速率增加，提高到 200 瓦特。現在把極重要的一點，即控制這鈾圍的方法，約略說一說。

鈾圍的體積比臨界體積稍有增加，有效中子的個數便立刻按照着指數定律而激增，倘若不予以控制，即有招致爆炸之虞。假定這鈾圍造成後，倍率 k 是 1.05，即平均每一個中子可生 1.05 個有效中子以引起下次的裂變。經過兩次以後，即有 $(1.05)^2$ 個有效中子；經過一百次以後，即有 $(1.05)^{100}$ 個有效中子。 $(1.05)^{100}$ 的數值大約是 130，故在一百次以後，即有 130 個有效中子。在三百次以後，即有二百萬以上的有效中子，對應於每一個初入鈾圍的中子。每一次反應所需的時間不過一百萬分之一秒左右，故若無適當的控制，則在遠比一秒為短的時間之內，全國必將同時發生反應，以致引起猛烈的爆炸。

反應的控制方法是很簡單的，祇要把雜質加入囤中，所加分量的多寡可任意調節，就可以收控制之效。現行的辦法是在囤中開幾條孔道，而將鎢棒或硼鋼棒插入孔道內。這兩種質料對於慢中子都有很大的親和力，要把它們捉住，因而便可減低反應的速率。假使祇須使反應的速率稍稍減低一點，那麼只消將控制棒稍稍推進一點就行；假使要教反應進行的速率大大減低，那就須把控制棒深深的推進去。又如要使反應完全停止，也可以辦得到。

44. 【遲發中子】 我們剛纔已說過，接連兩次反應中間所經的時間是很短的，所以倍率 k 如果比 1.000 稍稍超過一些，則反應的速率就會在很短的時間之內激增，也許短到管理人來不及把控制棒推進去，以致一發而不可收拾。

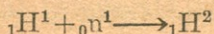
幸虧在鈾囤裏面另外還有一種現象，可以使這種變故不至於發生，這現象便是所謂“遲發中子”(delayed neutron) 的產生。據美國專家的發見， U^{235} 裂變時所放出來的中子，並非全部在幾百分之一秒內一齊放出，其中有百分之一至少要遲發 0.01 秒，還有千分之一竟要遲發一分鐘。因此，若有自動的記錄儀器與調節儀器，就可以有充分的時間，以調節控制棒，使囤內中子的濃度到達所需要的數值。試舉一例，假定有一個鈾囤，控制棒未插入時，它的倍率是 1.001。不論反應已進行至第幾次，每一千個有效中子引起核裂變，則在 0.01 秒內有 990 個中子再發生，在一分鐘內再發生的中子總數仍不過 1000 個，要稍稍超過一分鐘之後，再發生的中子總數方有 1001 個。這一千零一個中子裏面，祇有這最後的一個可使反應的速率增加，它的出現既然在一分鐘以後，我們當然有充分的時間，可以從從容容的調節控制棒，把這最後的一個中子控制住。

讓我們把遲發中子的原因研究一下。當 U^{235} 被轟擊而起裂變時，它除放出幾個自由的中子以外，還產生了兩個輕核，大小差不多相等（質量數與原子序數皆等於鈾的質量數原子序數一半左右）。現在把這兩個輕核拿來考究考究。 U^{235} 的核原來含有 92 個質子與 143 個中子，它的中質子數比約等於 1.6。假定這 143 個中子裏有三個因裂變而放出去，則留下的兩個輕核，應各含 $(143-3)/2=70$ 個中子，以及 $92/2=46$ 個質子，它們的中質子數比仍為 1.6 左右。然而原子序數是 46 的元素，乃在週期表的中央，我們在第三章中已經說過，週期表中央的元素，它們的最安定的中質子數比是 1.3 左右。因此， U^{235} 裂變時所產生的兩個輕核，若照上面的假定，即屬不安定元素，而有變為較安定元素的傾向。這裏的中質子數比是太大了一點，要使這個比數減小，可以有兩個方法，一個方法是增加質子的個數，還有一個是減少中子的個數。在實際上，這兩件事情，鈾核裂變時所生的兩個不安定核都幹。它們放出倍打射線來，即有若干中子變為質子，因為中子放掉了一個電子，留下來的就是質子。倍打射線的放射，依照平常放射衰變的定律；換句話說， U^{235} 裂變的產物，乃是放射性同位素，其所放射的是電子。就因為這個緣故，原子炸彈的殘燼以及鈾囤中的剩餘物，都有傷人的危險。放射倍打射線的激發能，低於放射中子的激發能，所以倍打射線放射的機會，遠勝於中子的放射。然而仍有少數不安定的裂變產物，有充分的能量足以放射中子。這樣放出來的中子，即是我們藉以控制反應速率的遲發中子。

45. 【延緩劑】 美國曼哈坦區的專家們，解決了好多問題，方始獲得了適當的延緩劑。有兩個主要的條件，延緩劑非

適合不可。第一，它必須能使中子的速度充分降低，降低到所需要的程度；第二，它本身必不可捕捉中子，使它們不能夠再盡引起下次裂變的責任。除了適合這兩個條件以外，又要延緩劑的來源豐富，不致供不應求；延緩劑的結構，必須合於鈾圓之用。

中子在延緩劑內減低速度，實由於碰撞了延緩劑的分子所致，每碰撞一次，中子的動能即有一部分傳給所碰撞到的分子。延緩中子速度最有效的分子，乃是質量與中子差不多的分子。氫原子的質量是與中子的質量差不多相等的，一個中子若與一個按熱速度而運動的氫原子互相碰撞，它便要失去它的動能百分之四十左右。由此可推知，大約連撞三十五次，中子的能量即可從 2 Mev. 降低到 1/40 ev。因為氫的化合物也有同樣的效用，所以水以及其他含氫物例如石蠟，往往可用為遮攔快中子的障壁。然而氫原子不能適合第二個條件，即必不可捕捉中子的條件。在實際上，氫原子核常同中子很快的結合起來，成為重氫核，反應式如下：



中子對於人體大有害處，其理由之一即是它與氫很容易結合，而人體的大部分是含氫的質料。

比氫略重的元素是重氫，它的質量數是二。用重氫做鈾圓的延緩劑，應該很合適，而在實際上的確有人用過。所用者乃是重水裏面的重氫，而這重水即以液態留在圓中。這樣，對於圓的構造頗不方便。重氫也有固態化合物，未嘗不可採用，然而還有一個缺點，這便是純品的不易得到足量。凡是含氫的天然產物裏面，雖然都可以找出重氫來，但其含量究嫌太少，祇有萬分之二左右。況且分離重氫與氫，又將遇到分離同位素時

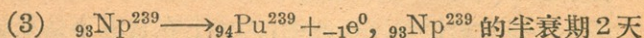
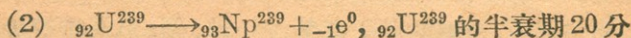
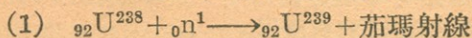
所常遇的困難，不過重氫與氫的分離，比了 U^{238} 與 U^{235} 的分離卻容易得多，因為 2:1 遠大於 1.009:1。製備重氫或其化合物的方法很多，其中最普通的商用方法叫做水的部分電解法 (fractional electrolysis)，即將一定量的水電解其一大部分，加入新水，再電解其一大部分，如是繼續不息，氫的濃度即大大的增加。這個方法，須有廉價的電源來維持，所以德國人把挪威的重水工廠搶去。波爾曾被德國人強迫着擔任製造重水的工作，後來幸虧挪威地下軍給予幫助，他纔逃到了美國，而挪威的重水工廠，也被挪威地下軍炸毀。德國的原子能研究，因此受到了致命傷而遲遲無有發展。

自氫以上，較輕的原子有氦、鋰、鈹、硼、以及碳等等的原子。氦是不適宜於用為延緩劑的，因為它在常溫下是氣體，而且沒有化合物。鋰與硼都要捕捉慢中子，若用為延緩劑，決不能有美滿的成績。至於鈹，產量甚少，決不能有足量的純品以供取用。惟有碳，經過提煉而有極純淨的品質後，即成為適合實用的優良延緩劑。

46. 【鈾圓的輸出功率】 鈾圓的作用由於自續的鏈式反應，這反應使 U^{235} 裂變為較輕的放射元素，而有 200 Mev. 的動能解放出來。這動能轉變為熱能，須從鈾圓移去。就功率較低的鈾圓而論，這熱能可由輻射對流等等而散逸於四週。但就功率較大的鈾圓而論，則非有其他迅速的移熱方法不可。這一點，用流水導管或用其他傳熱媒介，就可以辦到。這移去的熱量即是鈾圓的輸出，而關於原子能工業應用與和平應用的許多建議，即以此為根據。這在後面還要加以討論。

47. 【鎊——漢福德計劃】 上文屢屢提及中子給 U^{238} 捉住而不起變裂，究竟這反應的結果是怎樣的呢？據實驗結果，

這也不過是 (n, γ) 式的反應，其結果是生成更重的鈾同位素 U^{239} 。這同位素是不安定的，它放射電子而變為一種新的元素，叫做鏷 (neptunium, ${}_{93}Np^{239}$)。鏷也是不安定元素，它放射電子而成為另一新元素鏷 (plutonium, ${}_{94}Pu^{239}$)。這新元素是一個相當安定的放射元素，但其受不住中子的轟擊，則與 U^{235} 相仿。然而因為它的原子序數與鈾的原子序數不同，所以它是與鈾不同的元素，有不同的化學特性，而且可用化學方法把它同鈾分開。這些化學方法比了前文所討論的同位素分離法要容易得多。從鈾到鏷的各步反應，可以列式如下：



由此可知，鈾圈中有 Pu, Np, 以及 U^{239} 繼續不斷地產生出來。假定每一個 U^{235} 的原子裂變時，產生兩個中子，其中一個用於維持鏈式反應，另一個失落在 U^{238} 或雜質裏面，或逃出鈾圈表面。倘若我們用很純粹的質料，而且體積對表面的比很大，則就實用之目的而論，另一個中子可以看做祇失落在 U^{238} 裏面。因為每一個 U^{238} 的原子捉住了一個中子，最後產生一個鏷的原子，所以每有一個 U^{235} 的原子裂變，便有一個 Pu 的原子生成。據此而論，含有 U^{235} 0.7% 的鈾源，假使其中的 U^{235} 用盡，即可變成約含有 Pu 0.7% 的質料。

在 Pu 尚未大量製成以前，Pu 的物理性質與化學性質早經專家們予以研究。研究結果，發明了一個化學方法，可將少量的 Pu 從 U^{238} 及 U^{235} 的裂變生成物中提取出來。關於這種過程，因為美國的軍令嚴厲，外界絕無所聞。所能說的是，應

用平常化學上的沈澱法，溶解法，以及再沈澱法，Pu 即可提取出來，而且很純淨。

因為 Pu 可與鈾圓中的別種物質分離，又可給中子轟擊而裂變好比 U^{235} 一樣，因此可以代替 U^{235} 做原子炸彈的材料，所以就有幾座很大的鈾圓，在美國華盛頓州巴士哥 (Pasco) 附近地方建立起來。這便是著名的漢福德計劃 (Hanford Project)。廠地沿哥倫比亞河，

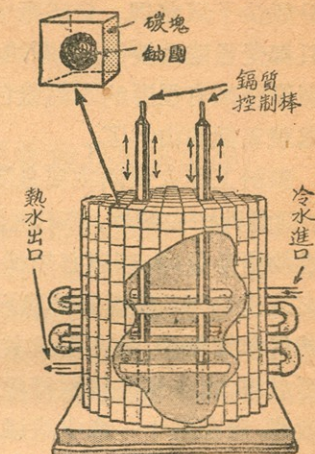


圖 43 石墨鈾圓及其控制裝置略圖。

河水既可供該廠化學工程之所需，又可供移去鈾圓中反應熱之用。河中冷水入廠後流過鈾圓之外再出廠而入河，竟能使近廠全河之水的溫度有顯著的增加，其所生熱量之大，由此可見。

在漢福德廠中，有很多實用上的困難問題，包括化學方面的，物理學方面的，生物學方面的，以及工程方面的，都須予以解決。一切過程的進行，都須受遙遠控制，司理人員都須用水泥厚壁障蔽，俾可不受放射物質的侵害。鈾圓中的鈾塊藏於“包”(can)裏面，猶如饅頭中的餡。做“包”的質料，須能抵抗輻射作用以及冷水的沖蝕作用等等，但是又不捕捉太多的中子。反應的進行，並不繼續到 U^{235} 全部耗盡為止。這樣需要很長的時間，是不切合於實際的。“包”在鈾圓中已歷充分長久的時間之後，即有自動的機構將它們推出來，另以新鮮的“鈾包”補缺。推出來的包及其餡都溶解在酸裏面，然後開始用化

學分離法予以處理。分離廠中的質料是一息不停的流動着，而且都受遙遠的控制。全廠的外形很像一連串的山谷，因為每一個單位都有很厚的水泥壁包圍着。以壁象徵山峯，壁裏面的空處就象徵着山谷了。

對於工作人員的主要危險，來自 U^{235} 裂變生成物的放射性。回到河中水的水，必不可沾着點兒這些物質。又因有些放射性物質是氣體，所以必須採用很多步的手續，以保證四週空氣之未受沾污。在漢福德廠以及克林頓 (Clinton) 廠裏面，都預防得非常嚴密，而在美國其他實驗室中，祇要有放射性物質待受處理，也是預防得同樣嚴密。此等放射性質料在生物學上的效應，將在第十一章中講述。

第十章

原子炸彈與廣島：爆炸的理論與實際

48. 【爆炸概論】 在以前各章裏面，我們已把原子及原子核的理論擇要敘述，俾讀者具有基本的知識，足以進一步了解原子炸彈究爲何物。下文即將論述原子炸彈的本身，讀者讀到這裏，一定感到非常興奮。然而不幸得很，我們拿不出很多的事實來，像以前各章一樣。在此軍事祕密時期，祇得根據基本的理論來一下推測。

我們已經知道，一塊純淨的 U^{235} 或鏷，或是 U^{235} 含量提高的鈾，倘若它的大小超過臨界體積，則將它放在中子源的旁邊，它就要很猛烈的爆炸起來。然若大小在臨界體積以下，則就無爆炸之可能。於是原子炸彈問題即分成兩部分，一是如何可以大量生產十分純淨的 U^{235} 與 Pu，一是如何可將小於臨界體積的爆炸質料合併起來，成爲大於臨界體積的質料，俾可發生鏈式反應而爆炸。

產生爆炸性質料的方法，在前面已經討論過了。戰時擔任此項工作的，在美國有克林頓廠與漢福德廠，有芝加哥大學的冶金實驗室，以及全國的其他許多科學研究所。至於問題的第二部分，即集合爆炸性材料以成能爆炸的原子炸彈，這一項工作的研究者，以美國新墨西哥州北部荒原上洛杉拉摩 (Los Alamos) 地方的原子炸彈實驗室爲主，領導人是奧本哈墨。一九四五年七月十六日，第一次人爲的原子爆炸，即發生於這片不毛之地。數千個科學家，工程師，以及技術人員殫精竭慮窮

年累月而得的這個結果，揭開了原子動力新時代之幕。

在尚未討論原子炸彈的構造與作用以前，讓我們先把爆炸的一般基本原理研究一下。所謂爆炸，它的定義可以這樣說：在作用物與生成物來不及顯著地分開以前，突然放出很多的能量。

在一團互相作用的物質裏面，決定有無爆炸發生的主要因子，乃是反應的速率。假使反應所生的能量，隨生隨傳到四週去，產能與傳能一樣快，就不會有爆炸發生。從另一方面說，生成物及能量的散逸不能像生成那樣快，就有爆炸發生。所以爆炸與不爆炸的區別，不在反應過程之不同，祇在反應速率之有高下而已。例如一隻汽鍋，平常產生蒸汽時並不爆炸，因為在膨脹中的蒸汽經過它所運轉的機器而出外，它的熱能變為機械能而對外作功之故。然若將蒸汽關閉在汽鍋內，不令膨脹，汽鍋就有炸裂的危險，因為壓力愈增愈大，終於勝過了汽鍋壁的材料強度。這時候，不但汽鍋炸破，鐵塊四飛，而且有很大的熱量突然放出，不及為汽鍋四週的東西所吸收。我們就說，爆炸是發生了。拿化學反應來說，也有如此的情形。例如煤在空氣中燃燒，燃燒的速率是很慢的，足使反應熱散逸於四週。然若將煤塊碎成粉末，燒紅，投入氧氣容器中，則反應便要進行得太快，所生之熱不及散逸，於是爆炸就來了。

所謂“高度炸藥”通常都是些半安定狀態的化合物，例如TNT或硝化甘油。祇要把少許激發能加進去，例如發一電火花，或震動一下，便可引起劇烈的反應，在百萬分之一秒左右的一剎那間，放出大量的氣體來。在這樣短的時間之內，生成物決來不及分開或膨脹，於是爆炸就發生了。這樣的爆炸發生之際，壓力往往高至每方英寸幾千萬磅。若按一磅鈾裂變所生

的能量約可抵二千萬磅 TNT 來計算，則原子炸彈爆炸時所生的壓力，應當比 TNT 所生的更要高得多。現在我們就把原子炸彈爆炸時的壓力，稍稍討論一下。

知道了何謂爆炸以後，我們就可以把那些對於爆炸有影響的因素間各項關係，拿來考查考查。我們所用的數字，固然是粗略的，但是頗可使我們對於各因素的輕重，知其大概。讓我們假定有一塊立方體的爆炸材料，譬如說 TNT 或鈾。設此立方體的每邊長 l 厘米，而它的密度是 D 克/厘米³。為求簡單明白起見，我們還要假定，爆炸的效果是把這個立方體分成相等的兩半，剖面適在居中而平行於立方體一面的地位。再假定作用於這剖開的兩個新平面上的壓力，當兩個半塊雖已分開而相離尚很近時，差不多始終處處等於 P （達因），而作用的時間則為 t 秒。每一個半塊的剖面上，所受到的力等於壓力乘面積，即

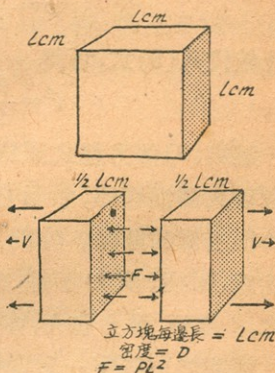


圖 44 爆炸的基本概念。

即

$$F = Pl^2 \quad (1)$$

此即為使兩半塊分開之力。因為兩半塊的質量都等於 $\frac{1}{2}l^3D$ 克，故從“反作用等於作用”一定律，可知每一半塊在任何時刻都按大小相等方向相反的速度向外飛出去。假定在 t 秒之末，每一半塊向外的速度是 v 厘米/秒。則按牛頓第二定律

$$F = \frac{mv - mv_0}{t}$$

可得

$$Pl^2 = \frac{l^3 D v}{2t} \quad (2)$$

因爲每一半塊本來是靜止的， v_0 等於零。(2)式化簡，可得

$$t = \frac{lDv}{2P} \quad (3)$$

更設在 t 秒之末，每一塊已前進 $\frac{1}{2}l$ 厘米，則按等加速度運動公式 $v^2 = 2as$ ，而得

$$v^2 = 2 \cdot \frac{v}{t} \cdot \frac{l}{2} = \frac{vl}{t},$$

$$v = \frac{l}{t} \quad (4)$$

將此值代入(3)式，可得

$$t^2 = \frac{l^2 D}{2P} \quad (5)$$

這第(5)個方程式雖然是根據很多假定而來的，這些假定的數目又都很粗略，然而它卻表示了 t ， D ， l 以及 P 各因素之間的很簡單的關係。特別重要的是 t 與 P 之間的關係。請讀者注意，假使 l 與 D 不變，則欲使 P 增加，即非縮小 t 不可。換言之， t 愈短，壓力愈大，亦即爆炸愈猛。

讓我們再假定一個實在的例子來說明一下。設爆炸物是 TNT， l 等於 1 厘米， $D=1$ 克/厘米³，而 $P=10^{12}$ 達因/厘米²（即每方英寸 10^7 磅）。將各數值代入(5)式，即可算得 t 的略值大約等於 10^{-6} 秒或百萬分之一秒。現在設有原子炸彈材料一塊，它的 l 與 D ，數值與上設之例相同。因爲原子炸彈爆炸時所生的壓力，大約是百萬倍於 TNT，故從(5)式可知，就原子炸彈的爆炸而論，所需時間約等於 TNT 的時間 $\frac{1}{10^3} = 10^{-3}$ 倍。換言之，原子炸彈的反應須在 $10^{-6} \times 10^{-3} = 10^{-9}$ 秒中，可使 1 立方厘米的材料分成兩半而離開一厘米，方有一百萬倍大的壓力產生。在這樣短的時間之內，反應是否有已經完成的可能性呢？

前面已經說過，中子在鈾塊裏面的平均自由路程大約是10厘米。假如中子的能量是一個 Mev.，將此代入動能方程式 $K.E. = \frac{1}{2}mv^2$ 裏面，即可求得中子的速度大約是每秒 10^9 厘米。由是可知，中子在兩個順次裂變的鈾核中間經過的時間，大約是 10^{-8} 秒。不過這僅是一次所需的時間。若欲使一克鈾的全部原子核裂變完畢，而暫時假定在如此小的一塊鈾裏面，鏈式反應可以進行，則我們即可以算出所需的次數。在一克鈾中，共有原子核 $6.03 \times 10^{23} \div 235 = 2.5 \times 10^{21}$ 個。假定在鏈式反應過程中每裂變一次每一核產生兩個中子，則 n 次分裂即有 2^n 個中子產生。於是得方程式

$$2^n = 2.5 \times 10^{21} \quad (6)$$

解此方程式，求得 n 約等於71，即約需71次，全部鈾核裂變完畢。但因實際上炸彈的材料不止一克，故需更多的次數方可。我們可以假定一個約略的數值，譬如說100，以求計算的簡化。據此，全部鈾核反應完畢所需的時間約等於 100×10^{-8} 或 10^{-6} 秒。所以就現在所討論的這個假定的例子而說，原子炸彈的反應全部完成的時間，約同於 TNT 炸彈的反應時間。

但是 10^{-6} 這個數目卻嫌太大，因為剛纔已經推算出來，應該在 10^{-9} 秒內使全體鈾核裂變完畢。這就有困難了。實際上反應剛一開始，全部材料尚未耗盡，已經炸成許多小塊，每塊的大小都在臨界體積以下，以後的反應即不能繼續而將很快的停止。所謂困難，即在於此。

要除掉這一層困難，有兩個方法可用。一個是教炸彈的大小遠超過臨界體積，俾可使其炸成小塊後，各塊仍在臨界體積以上，仍能繼續爆炸。然而這個辦法對於反應的持續實際上並無多大的幫助，因為把許多超過臨界體積的小鈾塊併成大鈾

塊，個數太多了是無法處理的。第二個方法是在鈾塊外面包一層又重又不活潑的質料，可使正欲散開的各小塊，在很短的一剎那間，暫時合併於一處。這種質料，叫做“束合劑”(tamper)，用重金屬例如鉛之類做成。據原子炸彈研究者的發見，束合劑品質之高低，實際上與其材料強度並無關係，最重要的性質乃是密度。密度愈大的質料愈適於做束合劑之用。束合劑除可約束那行將分散的小塊使其暫時合於一處外，尚有另外的好處。這好處便是把雜散的中子反射回去，沒有束合劑，這些中子也許要從炸彈表面逃掉。束合劑要用密度較大的質料來做，還有一個理由是它的封圍面每單位面積中有較多的原子核，因而有較大的反射中子的機會。此正同於在野外打高爾夫球時，球場四週有濃密的樹林，球即可被林木反射而趨於正路。樹林愈密，球被反射的或然率亦愈高。此外，束合劑還須具有一個特性，即與中子相遇時，絕不起以前所講過的任何一種核反應。

儘量使原子炸彈材料在爆炸期間反應完成，雖有這兩個方法可用，然而聽說原子炸彈的效率仍舊不高(即炸彈的材料並未完全用盡)，儘管它的威力甚猛。因此可知，這兩個方法還不是盡善盡美的好方法。

一個原子炸彈所放出來的能量，約等於20,000噸TNT所放出來的能量。每一磅TNT爆炸時放出來的熱量，大約是5000英國熱單位。所以20,000噸TNT所放出來的總能量是可以計算出來的。此值約等於理論上五磅 U^{235} 全體裂變後所解放的能量。然而原子炸彈裏面的材料，遠比五磅為多，恐怕有好幾百磅。由此可知原子炸彈的效率是很低很低的，大概祇有百分之幾。換句話說，原子炸彈的材料有百分之九十以上是白白的耗費掉了。今後的研究，必定以提高原子炸彈的效率為

目標無疑。據說投在日本長崎的原子炸彈，已經比投在日本廣島的效率高得多。

49.【原子炸彈的拼合與起爆】 原子炸彈的拼合與起爆，究竟用什麼方法，這是美國的最大軍事祕密，所以我們祇能夠在這裏作最粗略的推測。假使我們已把一塊鈾的大小增加到超過了臨界體積，那麼它必定要立刻自行起爆。反應的激發由於雜散中子，這些雜散中子在大氣裏面隨時隨地皆有，它們是宇宙射線所造成的。因此，我們必須先有小於臨界大小的原子炸彈材料，分開放置，然後在適當的時刻使它們在瞬息之間拼合起來。這拼合的時間必須非常之短，短至炸彈的各部分不會被初起的反應炸散，而有待於反應之進行到某一程度。因反應的時間非常短，不到百萬分之一秒，所以炸彈各部分拼合的時間，必須遠在百萬分之一秒以下。

讓我們假定有兩塊都比臨界體積小的 U^{235} ，它們拼合起來的大小是大於臨界體積，假使這兩塊相離的空隙是一厘米，則逃散出去的中子，其數即多至足以阻止鏈式反應之進行。假使原子炸

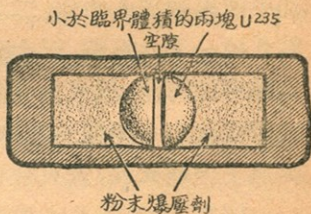


圖 45 原子炸彈拼合的想像。

彈的兩個半塊相離一厘米，而又須在不到百萬分之一秒的瞬息之間使它們拼合成一塊，則它們互相接近的速度即非大至每秒 10^6 厘米以上不可。此值在每秒一萬米左右，祇有槍彈破彈的速度可與比擬。這就使我們想到了一個辦法，即將 U^{235} 製成的栓狀物，用槍打入兩半塊的隙縫中，把兩半塊連成堅實的一塊，其大小超過臨界體積。這麼一來，鏈式反應就可以進行了。

另外還有一個辦法，如圖 45 所示。爆壓劑一起爆，即將兩半塊壓成超過臨界體積的一整塊。不過這些方法純屬推測，決非事實。在目前這個時候，我們對於原子炸彈的構造、拼合、束合劑，以及臨界體積等等，祇能提供極少的材料，僅足以指示不得不解決的各項問題，以及它們所牽涉的基本原理而已。

50. 【原子炸彈的爆炸效果】 美國飛機把原子炸彈擲在日本的廣島與長崎，造成如何的殘破局面，過去報章雜誌上已屢有揭載，所以我們大可不必再向讀者詳細敘述，來捧一捧原子炸彈的破壞本領。然而有須予以注意者，原子炸彈的主要性能，在於摧毀敵人的防禦，使他們完全不能夠自衛，不能夠反攻。現在把美國的國務院原子能委員會所聽取的一節官方報告，摘錄如下：“廣島三百個登記醫師，死傷二百六十個，傷者都不能再替別人治傷。二千四百個護士，巡察，急救員，一下子就死掉一千八百個。三十三處新式救火站，在炸彈爆發後二十六處不能再用，救火人員死亡或失蹤者達總數四分之三。廣島的醫院沒有一所能夠再療治病人。全城電話不通，電機停轉。街道上遺骸充塞，大火數百處在死傷堆中揮舞，無可阻遏。”

這些話，並不是小型報紙上的聳人聽聞之筆，而是出諸一個著名科學家之口。美國政府曾派科學家若干人調查廣島被炸情況，這位科學家便是這個調查團的一員。這調查團還有一位科學家描寫炸彈的猛烈，可使我們想見災害之大。他說：“炸彈在城市中心初爆時，好像一小塊的太陽突然生了出來。一個直徑約三分之一英里的大火球，又亮又熱，它的中心溫度恐怕高達華氏表一萬萬度。”這一小塊的太陽，煽動了一陣急風，速度每秒 500 到 1000 英里。跟着爆炸同時來的是大量射線。這些射線比 X 射線強得多，凡受其照射的，悉遭灼傷。

離開落彈地點一英里半的二層樓房，多被炸風吹倒。離開爆炸中心 5700 英尺以內的二層以上磚房，多被摧毀。鋼骨水泥建築物在 2000 英尺以內各地點者，三分之一不可復居。以上廣島被炸的損失數字，單指直接受炸風的影響而說，並不包括間接火災的損害在內。有很多處的大火，都是由於煤氣管的破裂以及火爐的震倒所致。

幸而未被炸死或燒死的，有很多人到後來終不免於一死，因為他們的內部已為炸彈的放射性產物所傷害。 U^{235} 裂變時的生成物，大都有放射性，要放出亞爾法，倍打，茄瑪諸射線，以及中子。這些射線對於骨髓中的造血組織有不良影響，血的功用因而大見減弱。它的膠凝性差不多全失，它往往從不破的皮膚冒出來，或在體內滲入空處。與病菌作戰的白血球也不能正常地產生。所以傳染病猖獗，患者常死。此等犧牲者受各射線侵害之後，通常的壽命不過再延續二星期至三星期。

防禦這些有害的射線，苟有方法，這方法當然受人注意。科學家大都認為防禦炸風，有五英尺厚到十英尺厚的水泥壁，已足應付，但若欲兼防射線的侵害，則尚須另加很厚的障蔽物方可。有些工程師以為最好是藏在地底下的防禦室內，室頂須用好幾英尺厚的鋼骨水泥做成。然因原子炸彈爆發後，附近地帶殆成為放射區，歷久不變，所以進入地底防禦室的人，必須留在地底好幾天，纔可以鑽出頭來。這樣的防禦室，若欲使其可容大都市的全部人口，建造起來已大成問題，更不必說到管理上的困難，例如要保證全部人口在炸彈落下時早已入室，這就是一件很難很難的事情。比較切合實際的辦法，似乎還是釜底抽薪，不要讓原子炸彈落下來。然而這弭兵息禍之舉，須有國際的誠意合作，國際的有效控制，纔會有實現之可能。

第十一章

原子能的面面觀：生物學及醫學上之應用

51. 【三個重要問題】 原子核裂變時必然產生許多放射性物質，對於這些放射性物質的處理，有三個重要的問題。第一個問題是，如何保護工作人員，使他們毫不受各種射線的侵害；第二個問題是，如何可以利用這些放射質來治療幾種特殊的疾病；第三個問題是，如何可以應用此等放射質為工具，以輔助生物學上及醫學上研究工作之進展。關於這三個問題，美國各研究機關已有不少重要的研究結果，但是都奉有當局的禁令，不能公布。尙未研究到的，當然也很多。現在我們祇能將大概的情況，約略說一說。

從生物學的觀點來看，最重要的射線是亞爾法、倍打、茄瑪射線，以及中子射線。此等射線通過人體的組織時，往往引起電離作用，這電離作用的生成物，對於人體大有妨害。人體組織的分子，也許因此而崩壞，繼之以不平常的化學反應。大概說來，組織崩壞的程度，與組織內電離化的程度成正比例。

為便於論述起見，我們在此處引用一個單位，叫它做倫琴(roentgen)。一叢射線若能使1立方厘米的“自由空氣”內產生一靜電單位的離子，則此一叢射線的強度即是一個倫琴。以帶有單位電荷的離子而論，強度為一倫琴的射線約可產生離子 2.08×10^9 個。(根據密立根的測定，一個電子的電荷約等於 4.803×10^{-10} 靜電單位。)在實際上，所謂自由空氣乃是一個不可求得之量，因為我們所用的任何測量儀器，都有不是空氣

的壁，這些壁對於壁內空氣的電離化是有影響的。倫琴在實驗方面雖有不易測定的困難，然仍不失為一個很有用的比較單位。

人體的種種組織，受到了輕微的損害之後，多數能夠經由正常的過程而自修自補。因此，暴露在強度不大的射線之下，通常不至於引起重大的創傷。譬如說，一個普通的人，全身每天暴露於十分之一倫琴的射線之下，大概不會受傷。在迴旋加速器或產生高能量粒子其他機器的附近，在鈾圓或提鈾機的附近，甚至在原子炸彈爆發地點的附近，皆須利用改良驗電器或新式蓋革計數器，以測定射線強度，俾可確保工作人員之不為射線所損害。

多數人體組織的細胞，稍有永久的改變，也許看不出來，但是與傳代有關係的細胞，卻不盡然了。在此等細胞之內，含有所謂遺傳因子 (genes)，遺傳的特性即由遺傳因子決定。遺傳因子暴露於射線中，也許起永久的改變，這永久的改變也許出現於後代，成為顯著的不正常狀態。遺傳因子大概都是又大又複雜的分子，一旦受射線電離作用的影響，它的化學組織不免崩壞，於是分子結構改變，遺傳因子的本性也就有了改變。對於下等動物如果蠅的實驗，已經證實了確有突變 (mutation) 發生，大概在受照射者的第二代或第三代。我們並非沒有理由來假定，在人類或高等動物方面，也可以產生同樣的突變，不過要從現有貧乏的數據來推斷，那還是十分可疑的。放射作用在人類之中是否造成突變，這是一個現實的問題，因為我們時時刻刻為天外來的宇宙射線 (cosmic ray) 所照射。(有人說過，宇宙射線也許是催人衰老的原因之一。更有人從實驗推測，宇宙射線或係癌症成因之一。)

52. 【工作人員的保護】 前面已經提及，在美國的克林頓廠與漢福德廠裏面，如何保護工作人員，使勿受放射作用的損害，這是一個重大問題，此問題若不解決，即不能平平安安的開工。那個地方的工作人員，若無妥善的保護，便要遇到非常強烈的射線，據說單從一座鈾園放出來的射線，已數千倍於鐳發見以來世界所提鐳之全部。凡受照射的有兩種病症頗易檢查，一是皮膚上生紅斑，宛如為太陽所灼，一是血液起變化。引起紅斑的射線強度，約在每克組織 100 倫琴左右。

血液的變化，最主要的是白血球數減少。因此，凡是在射線之下暴露過的人，每隔半月或一月，便要驗血一次。倘然白血球的個數有顯著的降低，就必須採取適當的步驟，以限制其不得不暴露的時間。

在一座鈾園附近的無論什麼生物，若無適當的保護，就要被射線很快的殺死，其強烈可知，而布置適當障蔽物之重要，亦由此可以想見了。除身體外面的放射源必須加以控制外，還有一個問題也不得不予以考慮，即須保證放射性物質不經由呼吸或飲食而入體內。鈾園中的生成物，有幾種的衰變時間也許很長，萬一進入人體，便將繼續在體內放出有害人體組織的射線，甚至歷數年之久。例如鐳在人體之內，就有這種情形。鐳的化學性質與鈣很相像，所以它一入人體，就鑽到骨頭裏面不再出來。它在骨頭中放射亞爾法射線，一放往往幾年，假使鐳的分量很多，就難免招致死亡的結果。第一次世界大戰時期，美國一家工廠有三十名女工，因為專塗磷光質於軍用夜光錶的錶面，以致中毒而死。原來她們常用嘴去潤那小刷子，使它光滑尖銳，便於塗繪。磷光質裏面是含有鐳鹽的，這三十名女工就在不知不覺中天天把鐳吸收進去；鐳積聚在她們的骨頭

裏，越積越多，終究把她們的性命送掉。

美國的幾處實驗室中，已用動物做了不少的實驗，這些實驗目下尚在進行。據他們的發見，凡受照射很多的動物，在十天到三十天之內，常因射線所引起的生理上的改變而死亡。凡是每次照射很少而照射次數頗多的，不死於癌症，即死於突然的衰老。

爲使鈾圍的管理人員確受保護起見，在鈾圍周圍就得築有水泥障壁，厚五英尺至十英尺。這一層障壁必須沒有絲毫裂縫與缺口，因爲中子以及氣態分子都很容易從這些弱點漏出來。鈾圍反應的調節，材料的更換，冷水熱水的循環，以及生成物的提取等等，都非採用遙遠遮蔽控制的辦法不可，因爲在全部過程中，危險的射線是一刻不斷的。此外，尚須非常小心地預防附近環境的被沾污。例如各種廢棄物料，都應該擱置在封閉的地方，讓它們的放射性充分減弱到無害的程度，然後再行棄去。鈾圍、製鏽廠、以及 U^{235} 提取廠，皆須有完密的障蔽設備與防護方法，纔可以安全無患。

53. 【治療上的應用】 癌腫性的組織比正常組織較易感受射線，這便是射線治療法的根據。處理之時，目的即在於照射患者，要使其體內的癌腫性組織死去，至少也要使它的生長遭受阻撓，同時不使健全組織受損。截至目下爲止，用在這一方面的射線，最有效的是茄瑪射線與中子射線，因爲前者具有強大的貫穿本領，而後者則容易透入組織。亞爾法射線的貫穿性太弱，祇要很薄的一片組織，就可以把它擋住，所以不能深入人體。至於倍打射線，更無用處。電子的質量太小了，決不能產生充分強烈的電離作用的。克魯格爾(Kruger)曾從實驗方面的研究，發見硼酸或銣鹽可被癌腫性組織吸收。吸收過硼

酸或鋰鹽的組織若受中子的轟擊，硼或鋰便同中子起核反應而產生放射性物質，此放射性物質即可在癌腫組織裏面發生治療的作用。

利用放射性物質以治療特殊病症，勞倫士及其合作者在這方面也有貢獻。他們發見放射性磷 P^{32} 可以治療幾種白血球過多症。他們又發見 P^{32} 可以治療紅血球過多症，比用 X 射線更好。這是因為放射性磷一入人體，即集中於產生血球的骨髓之內，於是就可抑低紅血球或白血球過高的生產率了。

54. 【生物學研究方面的用處】 放射性物質最重要的應用之一，是在生物學的研究方面。所謂“示蹤”的方法，即以少許放射性物質，與同樣的正常物質，一起送入人體。放射性物質與正常物質的化學特性是相同的，但是它卻成為全部物質的“標識”，因為它在組織內的蹤跡以及集中地點，可以很容易的用蓋革計數器探得。這麼一來，任何特殊元素在人體器管內進行的情況，就可以推知了。有一個頗有趣的例子，是用放射性碘為示蹤劑，求得了正常甲狀腺與不正常甲狀腺結構和過程方面許多珍貴的知識。

美國漢福德廠鈾園中所產放射性同位素，現在業經鑑定的已有三十餘種。有幾種在醫學上有用處的，在美國已可購得。迴旋加速器器的放大，以及其他轟擊原子的器具日見增加與改進，均使許多放射元素的來源益趨暢旺。

55. 【原子能之和平時代的應用】 從潛水艇的引擎，到穿出地球大氣而遠入太空的火箭，都有應用原子能以得動力之可能。假使報章雜誌上所刊種種聳人聽聞的“預言”，我們都相信，那麼簡直沒有一處地方將不因原子能的應用而改變，這種改變，下一個月不發生，明年也許要發生，五年之內不發生，

十年之內必定會發生，祇要原子炸彈不把地球上的一切文明毀掉。但是我們切勿太興奮了，先用比較冷靜些的頭腦，把這動力新源的優點與劣點考慮一下，雖然我們並不想把原子能及其將開闢的新境界，過於估低其價值。

原子動力的主要優點，在於可從少量的原子燃料獲得鉅額的能量，並可從核反應以得很高的溫度。它的缺點，在於保護工作人員須有笨重巨大繁複的障蔽控制機構，在於不易獲得可以忍受核反應所生高溫度的建築材料，在於伴同原子能一起放出的射線有毒害人類的作用。這些缺點未能改善以前，原子動力源恐未必勝於其他動力源如日光熱及瀑布等。

利用純淨 U^{235} 為動力源以供給商工業，這個念頭必須不加思索地立予拋棄，因為純淨 U^{235} 之原子能解放，不能加以控制。鏷及其他放射性元素，其衰變時間頗長的，其在蛻變時所放出來的原子能，或有利用之可能性。但是現在尚無辦法取用這種能量。故就目下的情形而論，鈾圍發展為利用原子能的工具，似乎最有希望，因為鈾圍中的反應速率，可以用控制棒加以調節。然而我們切莫忘了，活性材料 U^{235} 的含量，祇佔天然鈾的一百四十分之一；大塊的延緩劑非與活性材料放在一起不可；此外，必須有厚實的水泥壁或鉛壁，以保護工作人員的生命。從這幾點看來，我們已可想見，用鈾圍以取動力，比了用傳統的汽鍋，其所省去的地位，恐未必如初起想到這個問題時所虛擬的那樣多。

再從實際上說，祇有大規模的原子動力廠，方可與傳統的蒸汽動力廠相提並論。據估計，至少須在一萬到五千仟瓦以上，鈾圍所佔體積方比普通的動力廠少。如此高的輸出，祇在大工廠，大企業，大戰艦裏纔有。大工廠與大企業，似乎不甚希

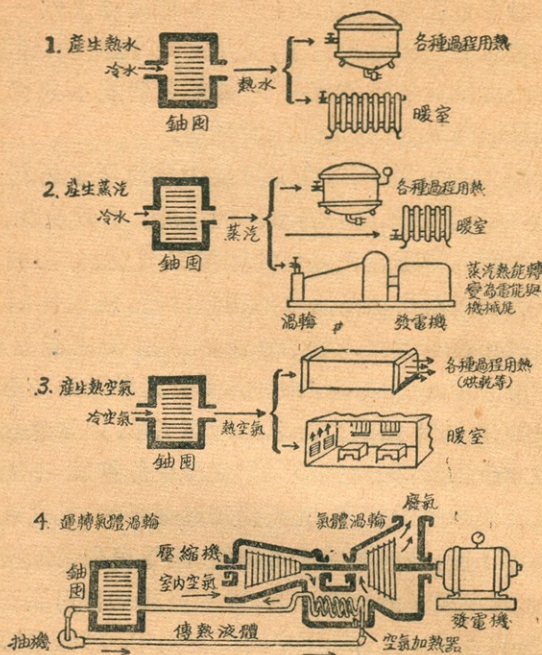


圖 46 原子能應用的理想。

鈾圓所生熱量，直接或間接（第 4 例）送至空氣加熱器，其溫度在 $1000^{\circ} F.$ 以上，即可運轉氣體渦輪。

望改用原子能以代平常的燃料能，因為大工廠與大企業對於節省地位並不會十分注意，除非可以兼省成本。然據最可靠的估計，原子能的成本現在仍大於煤、油、或煤氣，只是大得不很多罷了。就巨型戰艦而言，則成本與節省地位相比，前者佔次要地位，所以最先應用原子能為動力源的，恐怕是軍艦。

圖 46 所示的幾個簡圖，乃是理想之中的原子能利用方法。倘然有適宜的材料，其核裂變的速率可予以控制，則地位的節

省一定是最有便益的優點。不過繁複的障蔽，恐怕還是不能省。一般通俗的描寫，說得天花亂墜，預言汽車將用原子能，並未考慮到障蔽的問題，這實在是荒誕無稽之談。寫這種文章的作者，還忽略了一件事，即核反應必須有一定的臨界體積，而這臨界體積往往很大。一顆原子炸彈的總重量，大概不在千磅之下；至於鈾圓，連附屬物件算起來，當然更要重得多。

以煤為燃料的傳統動力廠，與用原子能為燃料的動力廠，二者的主要不同點，在於後者可節省火箱（fire box）。因此，最先將傳統的裝置改為利用原子能的裝置者，大概總是為了火箱不得不更換的緣故。據專家的估計，改裝費用約佔全廠投資的百分之六。若本來用的燃料是油，則改裝費用還要低一些。

以原子能暖室或供給小企業之取用，在實際上有幾個困難之點不易去除。若用鈾圓，因為臨界體積很大，就必須有大規模的房屋與設備。這一筆開辦費，一定是不不少的。為了很小的需要，花上一大筆開辦費，似乎太不合算。若用放射元素的蛻變能，即使有辦法取得，也是不合實用的，因為蛻變的速率，根本無法予以控制，在消費者停用時期，蛻變依舊進行，無異浪費。最後尚有一點，核反應所造成的高溫，目下尚無可用的耐火材料來忍受它。

此外，鈾的成本亦不得不算計一下。鈾在地球上的天然存在量雖不亞於銅，但是多數現已開採的鈾礦，雜質都很多。因此，提煉的費用就很貴。鈾的成本，究屬多少，尚由美官方守祕不宣，不過據可靠的估計，每磅約在美金一萬元至三萬五千元之間。如此的高價，實不能與現行的燃料相比，除非設法將成本減低。

即使鈾的成本可以減低到與其他燃料競爭，我們也應當

不要忘記鈾的來源並非無限。據估計，假使大小工商企業以及家庭都用鈾做燃料，則全部可用之鈾祇夠維持一百年到二百年。但是全世界的儲煤，照現在的消費率計算，尚可維持二千年。所以最聰明的辦法，是在別的燃料比不過鈾的地方，應用原子能。一個大家都知道的例子，即是用原子燃料為火箭的動力源。

火箭所根據的基本原理，是動量不滅律。應用此一定律，我們可以推知，若火箭從尾後噴出熱的氣體或其他小粒，則其剩餘部分向前的動量，必定等於其噴出物向後的動量。

現在假定有一支火箭，用汽油為燃料，且載有燃燒所必需的氧氣。我們可以再假定，汽油每燃燒一加侖所生的熱量是 10^4 卡（相當於每克 4×10^{11} 耳格之功），所噴出的東西是 4 克。如果熱能有 25% 轉變為噴出物的動能，則我們可寫出動能與熱能相等的方程式如下：

$$\frac{mv^2}{2} = \frac{4v^2}{2} = (0.25)(4 \times 10^{11}) \quad (1)$$

解此方程式求得 v 的數值約為 2.23×10^5 厘米/秒，或每秒 2.23 千米。現在命 m 與 M 代表噴出物與火箭的質量，命 v 與 V 代表噴出物與火箭的速度，則有

$$MV = mv = (4)(2.23 \times 10^5) \quad (2)$$

假定沒有空氣的阻力，一個直昇的拋射體若有每秒約 11 千米的初速度，即可脫離重力吸引的束縛，逕入太空而不返。使(2)式中的 V 等於此值，即得

$$(M)(11 \times 10^5) = (4)(2.23 \times 10^5) \quad (3)$$

解此方程式，求得 $M = 0.8$ 克。這就是說，火箭尾後每噴射 4 克的物質，祇能使 0.8 克的物質依每秒 11 千米的速度向

前衝出去。因為火箭在發射之前必須裝載燃料以及氧氣，所以欲使 0.8 克的質量前進，火箭原來的質量必為 $4 + 0.8 = 4.8$ 克。這個約略的計算，告訴我們火箭上升的質量，祇有全部質量的六分之一。換句話說，重一百磅的火箭，內部須裝五百磅的燃料及氧氣，方可射入太空。這似乎是一件辦不通的事情。

但若改用原子燃料，則每一克放出的能量，比了汽油何止百萬倍。因此，噴出物的動能也有百萬倍，而其速度即有千萬倍。於是 $v = 2.23 \times 1000 = 2230$ 仟米/秒，故從(2)式得

$$\frac{m}{M} = \frac{V}{v} = \frac{11}{2230} = \frac{1}{200} \quad (\text{近似值})$$

據此，則所需燃料僅及火箭本身質量千分之五。所以至少在理論方面，用原子燃料以推進火箭，前途是有希望的。不過在實用上的困難，例如障蔽物應如何裝設，忍耐高溫的材料如何覓得，種種問題尙待解決。

在 1250°F . 以上的高溫度時，金屬的特性變動得很大，以致不能忍受高壓。一般的氣體渦輪，雖其效率可隨氣體溫度之提高而大大的增加，然因缺乏適當的耐熱材料，祇能受一定的限制。由此可知，利用原子能於氣體渦輪，也要等材料問題解決後方成。

原子能的問題解決得太快了，以致現在的很多技術不能與它相配合。這在全部科學上實是一個畸形的發展，而就人類的全部知識說，更是一個畸形的發展。倘然這個畸形的發展長此繼續下去，恐怕原子能並不是人類之福。我們非等到平衡的局勢造成，不能使精神文明與物質文明互相調諧，即不能享受原子能給予人類的利益。我天天在禱告，有這樣的一天到來。

第十二章

發展小史：從臆說到原子炸彈的誕生

- 450** B. C. 希臘哲學家安那薩果拉 (Anaxagoras) 首先創設一種臆說，揣測萬物的或成或毀，都從不可見的微小粒子的或聚或散而來，此等微小的粒子，他稱它們為“精子” (Spermata)。
- 400** 希臘哲學家德謨克律忒士 (Democritus) 修訂安那薩果拉的臆說，想像宇宙是虛無空間內差不多無限數不可見不可分的粒子所構成，此等粒子的不同處，僅在於形式、位置以及排列，而物體的成形與滅跡，亦僅由於此等粒子的聚散。此等粒子叫做原子，原子的西文是 atom，意思就是“不可分的”。
- 80** 羅馬哲學家伊壁鳩魯學派 (Epicurean School) 巨子琉克里細斯 (Lucretius) 在他所著世界名作“物性詩” (De Rerum Natura) 裏面，暢論原子的臆說，並對氣體有近似於今日學者所作的想像。此後數百年中間，哲學家論述原子的文字，時有所見，各不相同，但都是臆說，不切實際。後一千九百年，方始有根據實驗而合乎科學理法的近代原子論問世。
- 1789** A. D. 德國人克拉普洛 (M. H. Klaproth) 從瀝青提得一種新金屬，就拿八年前所發見的天王星 (Uranus) 命名，叫做鈾 (uranium)。克拉普洛當時絕未夢想在一百五十年後，此種金屬被用為屠殺人類的原子炸彈材料。

- 1808 英國人道爾登 (John Dalton) 發表定比定律，並提出“化學元素都由原子構成”的假說來說明它的道理，於是古代哲學家原子的臆說，便進入新生階段，而近代原子論的苞芽，也就放出來了。
- 1809 瑞士化學家柏采理 (Berzelius) 首先創立“同溫度同壓力下同體積氣體含有同數原子”的假說。
- 1811 意大利人亞佛加德羅 (Avogadro) 為彌補柏采理假說的缺點起見，初次提出分子與原子的區別，並創立“同溫度同壓力下同體積氣體含有同數分子”的假說。
- 1815 英人普魯特 (Prout) 提出“一切元素皆由氫原子結集而成”的假說，但是因為沒有實驗上的支持，這個假說就被屏棄了。
- 1828 柏采理發見鈾素，但沒有知道它是有放射性的。
- 1835 英人法拉第 (Faraday) 宣佈電解定律，初從實驗證明原子與若干單位電荷有聯繫。
- 1859 德國人本生 (Bunsen) 與克啓荷夫 (Kirchhoff) 發明分光鏡，拿來觀察光譜並研究灼熱氣體的化學成分。這個儀器後來成為研究原子的有力工具之一。
- 1871 俄國人門德雷葉夫 (Mendelyev) 與德國人梅逸 (Meyer) 不謀而同，創作元素週期表。原子特性的研究更趨於系統化。
- 1891 愛爾蘭人史冬耐 (G. J. Stoney) 創造新名詞“電子” (electron) 來稱呼他意想中的“電之基本粒子”。
- 1895 德國人倫琴 (W. G. Röntgen) 發見 X 射線。這原是无意中的收穫，當時並不知道它有輔助原子研究的功用。
- 法國人潘林 (Perrin) 提出陰極射線運輸陰電的說法。

- 1896 法國人柏格勒爾 (Becquerel) 也在無意中發見鈾的放射性。原子能的天機，實在已經從此洩漏了。
- 1897 英國人湯姆生 (J. J. Thomson) 用磁場研究陰極射線的偏轉，斷定該射線實在就是帶陰電的粒子注，於是史冬耐的電子，便有了確實的證據。
- 1898 法國人居禮 (Pierre Curie) 的夫人，即波蘭人史曼麗 (Marie Skolodowski) 發見鐳與釷兩種放射元素，並發見釷也有放射性。研究原子的新途徑由是而開。
- 1900 德國人蒲朗克 (Planck) 發表量子論，以為輻射能量的消長，不按綿續數量而按一定量的倍數，叫做量子。此說之起因雖非出於原子的研究，但終究成為現代原子型重要根據之一。
- 1903 英國人羅德福 (Rutherford) 與索第 (Soddy) 根據亞爾法粒子 (α) 與倍打粒子 (β) 以及茄瑪射線 (γ) 的發見，共同宣布原子蛻變學說來解釋放射現象。古代鍊金術士的夢想因此復活。
- 德國人倫乃德 (Lenard) 以為原子有一個堅不可摧的微小中心，叫它做 dynamid，但他的說法，並未受到人的注意。
- 1905 德國人愛因斯坦 (Einstein) 發表狹義相對論，其中包括能質等價公式 $E=mc^2$ ， E 是能量， m 是質量， c 是光速度。此公式預示原子能解放的可能性。
- 1906 羅德福與蓋革 (Geiger) 發明亞爾法粒子計數器，其器歷經改良，成為現代的蓋革計數器，可以用來檢探種種粒子。研究原子能與原子炸彈，這是不可缺少的工具。
- 1907 湯姆生假想原子結構是一羣電子停留於一團勻布的

陽電勢力圈內，各居互相平衡的地位。

1909 英國人馬士登(Marsden)從實驗證明湯姆生的原子型不合理。

1910 美國人密立根(Millikan)首先測定電子所帶的陰電荷，其值約為 4.803×10^{-10} 靜電單位。

索第提出同位素存在的可能性。

1911 羅德福推翻湯姆生原子型，另外創立新型，他以為原子中心有一個核帶陽電，而原子的質量，差不多集中於核。核外有若干電子旋繞，好比行星系。羅德福設立此種原子型，曾受倫乃德假說的影響。

英國人巴克拉(Barkla)因研究 X 射線的散射，推得原子的核外電子數。

1912 英國人韋爾生(C. T. R. Wilson)發明霧室，供觀察射線徑跡之用。此器亦是研究原子核的基本工具。

奧國人海士(Hess)證實有射線來自大氣外的星際空間，叫它做宇宙射線。

德國人勞厄(Laue)，斐德立(Friedrich)，以及聶平(Knipping)用品體作 X 射線繞射的實驗。

英國人布拉格父子(W. H. 與 W. L. Bragg)發明 X 射線分光計，用品體做繞射光柵。

1913 英國人莫士來(Moseley)研究各元素的 X 射線譜，初定原子序數。

丹麥人波爾(Niels Bohr)修訂羅德福的核原子型，根據量子論，利用光譜線，說明核外電子繞核運行，有種種軌道，電子可以從這一個軌道跳到那一個軌道裏面去。

1914 馬士登發現，亞爾法粒子撞擊硫化鋅時有一強一弱

的熒光產生，但他並未作更進一步的探究。

1915 愛因斯坦發表廣義相對論。

1919 羅德福用 RaC' 所放射的亞爾法粒子轟擊氮原子核，得氧的同位素與質子（即氫核），開人工蛻變史的新紀元，實現古代鍊金術士的夢想，而將原子能解放的門戶打開。羅德福的此項發見，其動機實在是馬士登的實驗所引起。

英國人阿士登（Aston）發明質譜儀，用以精密測定多數化學元素同位素的原子量。此器後被用為提取原子彈材料的重要工具之一。

1920 羅德福在英國皇家學會演講，預言有不帶電的中性粒子存在於原子核內。

美國人哈金斯（Harkins）也預示有中性粒子存在於核內，並且提了一個名字叫做 neutron（即中子）。

1922 羅德福與英國人查德威（Chadwick）使硼、氟、鈉、鋁及磷起人工蛻變，皆告成功。

密立根及其合作者開始研究宇宙射線。

1930 狄拉克（P. A. M. Dirac）從理論的研究預示，有帶陽電的正子（positron）存在。

德國人波特（Bothe）與貝格（Becker）發見，以亞爾法粒子轟擊鋰、鈹、硼等輕元素，產生一種新射線，而不知它是什麼東西。

1931 美國人賴鐵墨（W. M. Latimer），尤雷（H. C. Urey），莊蓀（H. L. Johnson），柏奇（R. T. Birge）以及門柴爾（D. H. Menzel）共製同位素表，並預示若干同位素的存在。

美國人勞倫士（E. O. Lawrence）發明迴旋加速器，

供轟擊原子核之用。

1932 美國人尤雷，布律克威 (F. Brickwedde) 以及墨飛 (Murphy) 發見重氫，即氘 (讀如刀)。

查德威證實波特與貝格所發見的新射線就是羅德福與哈金斯所預示的中子注。

英國人費透 (Feather) 用中子轟擊氮核成功，後來各家都拿中子做轟擊原子核的彈丸。原子炸彈的作用就靠中子的轟擊。

美國人安德生 (C. D. Anderson) 用韋爾生霧室研究宇宙射線時發見正子，證實狄拉克之預示。

德國人海生堡 (Heisenberg) 提出，原子核由帶陽電的質子與不帶電的中子構成。

英國人柯克洛夫 (J. D. Cockroft) 與華爾登 (E. T. S. Walton) 初次用人工加速的質子，轟擊鋰，成功兩個氦核，放出巨額能量，證實愛因斯坦的能質轉換公式。

1933 意大利人費爾密 (E. Fermi) 證實正子與電子碰撞而互毀，同時有光子產生。

查德威，布拉開特 (Blackett) 以及奧卻利尼 (Oechialini) 證實茄瑪射線轟擊物質可生正子。

范德格拉甫 (Van de Graaff) 設計高壓靜電機，有產生電壓一千萬伏特的可能。

勞倫士用他所發明的迴旋益能器，拿重氫核 (即氘子) 轟擊鈹、硼、碳、鈉、氧、氟、鎂、鋁，均告成功。

1934 查德威與戈得哈柏 (Goldhaber) 拿茄瑪射線轟擊重氫核，使它裂變為質子與中子。

羅德福與奧立番特 (Oliphant) 以及哈台克 (Harteck)

用重氫核轟擊重氫核而得中子。

居禮夫人長女伊倫娜(Irene Curie)同她的丈夫朱力奧(F. Joliot)發見人工放射性。

費爾密用慢中子轟擊鈾核成功，並證明有所謂超鈾元素生成的可能性，此種超鈾元素的原子序數是九十三。

1935 美國人鄧思特(Dempster)發見鈾二三五。

德國人哈恩(O. Hahn)與斯特拉斯芒(F. Strassmann)等聲言已經發見了新元素十七種，打算題了名字，加入週期表。

居禮伊倫娜等駁斥哈恩等的發見，指摘他們的技術欠精，並認為十七種元素，都是實驗所用元素的同位素。

日本人湯川為求解釋原子核內的束縛力起見，預測應當有介子存在。介子就是帶有陰電而質量介於電子質子間的粒子，西文是 Meson。

1936 費爾密證實慢中子的共振作用。所謂共振作用，就是中子能量降到一定階段時，即可穿入原子核。此作用對於後來原子炸彈之成就，大有關係。

美國人屠甫(Tuве)改良范德格拉甫的高壓靜電機，造成三百七十五萬伏特靜電加速器，用來轟擊原子，成績很好。

美國人赫勃(R. G. Herb)造成二百五十萬伏特高壓靜電機，可將加速後的粒子集成一細流，非常穩定，用來轟擊原子，亦有成效。

安德生與納德梅逸(Neddermayer)因研究宇宙射線而獲得介子存在的實證，於是物理學家對介子，開始予以注意。

1938 美國人貝塞 (Bethe) 創立碳的循環說來解釋太陽能的由來，他說四個氫核由碳的居間作用，經過六步的變化，成功一個氦核，並且放出鉅額能量，但是碳素到第六步仍舊出現。這是宇宙中原子能解放的實例，然而同地球上現在的解放原子能過程完全不同。因為前者是合併的過程，而後者是分散的過程。

哈恩發表聲明，承認過去的錯誤，而說十七種新元素中多數是釷的同位素。

1939 哈恩與斯特拉斯芒在德國威廉研究院發見，鈾核受中子的轟擊而裂變為釷與氦，與亡命瑞典的奧國人梅特娜女士 (Meitner) 所推斷的完全符合。到這個時候，原子能問題的解決，便急轉直下。

梅特娜與另一德人傅律許 (O. Frisch) 提出理論，說鈾核裂變時，必定有鉅額能量，同時釋放。

費爾密提示有鏈式反應的可能性。

波爾在美國和他的弟子韋勒 (John A. Wheeler) 提出核裂變的理論。

波爾以為發生裂變者是鈾二三五。

梅特娜研究鈾核的裂變。

美國哥倫比亞大學，約翰霍布金斯大學，卡內基研究院，以及加里福尼亞大學各實驗室都證明鈾核裂變時確有鉅額能量解放出來。

在美國的科學家如費爾密，韋格納 (E. Wigner)，戴勒 (E. Teller)，席拉德 (L. Szilard) 等預示，原子能的解放有軍用價值。

在美國的愛因斯坦寫信給羅斯福總統，陳述原子能

軍用的可能性，並建議美國政府獎勵鈾核裂變的研究。

美國總統羅斯福任命專家組織鈾學顧問委員會，請布律格士(L. J. Briggs)做主席。

海生堡與波特在柏林威廉研究院分別領導原子能的研究。

德國人許芒(Schumann)替德國陸軍軍械處組織原子能研究團。

1940 美國鈾學顧問委員會擴大研究計劃，初次接獲德國也要把原子能用於軍事的情報。

美國人麥密倫(E. McMillan)與亞培爾生(P. H. Abelson)發見新元素鏷(Neptunium)與鏷(Plutonium)；鏷之原子序數是九十三，鏷之原子序數是九十四。費爾密超素元的理論，至此證實。

美國人聶爾(Nier)利用電磁法提得少許鈾二三五，並與鄧寧(Dunning)各自證實波爾及費爾密的預示。

美國加里福尼亞大學輻射實驗室發見，鏷有產生爆炸性鏈式反應的可能。

歐洲的朱力奧與在美國的費爾密等建議用重水或石墨做延緩劑來控制鈾核裂變的鏈式反應。

挪威重水工廠落於德人之手。

英國組織湯姆生委員會，羅致查德威、費透、派埃爾(Peirls)等，積極研究原子能軍用的可能性。

哈爾朋(Halban)與柯華司基(Kowarski)受朱力奧的囑託從法國逃避到英國，帶去重水一六五公斤，在英研究鏈式反應與延緩劑的作用。

美國設立國防研究委員會，下附設鈾學顧問委員會，

並邀請哥倫比亞大學與普林士登大學等予以襄助。

尤雷與鄧寧在哥倫比亞大學領導研究提取鈾二三五的氣態擴散法。

亞培爾生根據一九三八年德國人的研究，開始用熱擴散法提取鈾二三五。

1941 英國人賽孟 (Simon) 在牛津大學領導研究氣態擴散法來提取鈾二三五。

英國湯姆生委員會確定可用鈾二三五來製造炸彈，炸力遠勝於任何炸藥；並對鈾二三五的臨界體積，予以約略的初步估計。

費爾密在美國研究鏈式反應，提出初步報告。

美國威士康辛大學教授布雷特 (G. Breit) 開始作原子炸彈的初步研究。

美國開始研究用鑄代鈾二三五來製造炸彈。

美國國立科學院組織特種委員會，研究原子炸彈的技術問題與科學問題。

美國佛琴尼亞大學教授皮姆士 (G. W. Beams) 開始用離心法提取鈾二三五。

英國組織管齊指導會 (Directorate of Tube Alloys)，專門從事於祕密研究原子炸彈問題。管齊這一個名稱，實在是一種煙幕。

英美兩國科學家的交換情報與合作更趨緊密。英國派奧立番特 (Oliphant) 訪問美國，美國也派尤雷與配格蘭 (Pegram) 訪問英國。

美國鈾學顧問委員會再度擴大。

美國總統羅斯福寫信給英國首相邱吉爾，建議英美

科學家合作，來研究某項重要問題。所謂重要問題實在就是原子炸彈。

美國的副總統華萊士(Wallace)，陸軍部部長史汀生(Stimson)，以及科學研展局首長布許(Bush)建議，在國防研究委員會以外另設專門機構，擴大活動範圍，由陸軍部支持，重訂研究程序。

1942 英國管齊指導會代表團訪問美國，與美國人商討英美研究程序的配合。

英國管齊指導會積極推進各項研究工作，包括鏈式反應數據的測定，金屬鈾的提取，以及重水的製備等。

德國組織鈾研究會，由戈林任監督，孟柴爾(Mentzel)任會長。

在美國政府監護下的哥倫比亞大學專門研究機構表示，鈾核爆炸性鏈式反應有成功的可能。

美國人華爾(A. C. Wahl)發見鏷二三七。

美人史奈爾(Snell)，奈得柴爾(Nedzel)與伊柏塞(Ibser)發見遲發中子。此項遲發中子對於鏈式反應的控制大有關係。

美國加里福尼亞大學輻射實驗室在勞倫士指揮下，製成加大提鈾器(Calutron)，利用質譜儀原理(即電磁法)提取鈾二三五。

美國政府根據華萊士、史汀生、布許之計劃，正式設立“曼哈坦區”(Manhattan District)，專門從事原子炸彈的設計與製造。

美國設立軍事政策委員會，管理原子能軍用事宜，由布許任主席，而由格魯芙士(Groves)將軍任執行長官，監

督一切。原子炸彈的研究更趨祕密。

美國新墨西哥州洛杉拉摩地方，開始建築原子炸彈實驗室，指導人是奧本哈墨。

美國橡岡的大規模擴散提鈾廠開始設計。

美國第一座試驗鏈式反應的鈾圍，在芝加哥大學建造，指導人是費爾密，齊恩(W. H. Zinn)。十二月二日開始運用。

英國向加拿大提議，在加拿大設立英加聯合機構，來研究原子能問題，俾可就近與美國保持接觸。這個提議加拿大政府予以接受。

1943 加拿大國立研究院設立蒙特利爾實驗所。這是英加兩國聯合研究鈾學的龐大機構，自由法國當局也派人參加。所長是加拿大國立研究院的麥根齊(C. J. Mackenzie)主任是哈爾朋，副主任是加拿大國立研究院的史梯西(Steacie)。

美國新墨西哥洛杉拉摩原子炸彈實驗室開始工作。

美國人查爾登(E. E. Charlton)繼刻士特(D. W. Kerst)之後，根據德國人史汀佩(Max Steenbeck)的方法發明倍打益能器。該器可以產生強力X射線，使銀變鎳，使銅變鎳；射入原子核可以產生介子；射入鋼板後能量消失，質量增加，證實愛因斯坦能質可以互換的理論。

挪威重水工廠被毀，德國原子炸彈研究頓遇重大障礙。

英國管齊指導會多數人員遷到美國去工作。

波爾從丹麥逃出，任英國政府科學顧問。

英美加三國在魁北克會議(Quebec Conference)席

上議定，三國密切合作研究原子炸彈問題，並組織聯合政策委員會由美國陸軍部部長史汀生任主席，以推進該項工作。

德國柏林地下實驗室中製成類似原子炸彈雛型，性質近乎美國芝加哥大學的鈾團。

德國第一流科學家苟拉赫 (Gerlach) 代孟柴爾主持鈾研究會，因受人力物力種種限制，不能有充分的發展。

美國田納西州橡岡一千仟瓦的石墨鈾團造成，準備大量生產鏽。

美國華盛頓州漢福德地方設立大工廠，根據芝加哥大學冶金實驗室的研究而設計，準備製鏽。

大規模電磁法提鈾廠在美國橡岡建造。

1944 美國橡岡地方建立大規模熱擴散法提鈾廠。

英美加聯合政策委員會議定，由蒙特利爾實驗所設計辦理，在加拿大渥太華河南岸貝他華華附近闢地一萬英畝，建立重水鈾團製鏽廠，所用原料即取自大熊湖畔世界二大鈾礦之一。

蒙特利爾實驗所擴大，美國也派很多人參加，主任哈爾朋辭職，由柯克洛夫繼任。

1945 蘇聯人維克思樂與美國人麥密倫各自獨立發明同位素分离器。

德國原子炸彈研究在停頓狀態中。用離心法提取鈾二三五，僅能作小規模的試驗。重水工廠建立計劃失敗。對於英美加三國原子研究進展情況，絲毫不知真相，自以為仍居領導地位。

第一顆實驗用的原子炸彈，於七月十六日在美國新

墨西哥州亞拉摩哥陀(Alamogordo)附近沙漠地帶爆發。

第一顆軍用原子炸彈，於八月六日在日本廣島投下。
美總統杜魯門於同日發表使用原子炸彈的文告。

第二顆軍用原子炸彈於八月八日在日本長崎投下。

各種單位轉換互算表

名稱	英國制單位	米制單位	等值關係
質量	磅(質量); lb.	克; gm. 仟克; kg.	1 磅(質量) = 453.6 克
長度	英尺; ft. 英寸; in. 英里; mi.	米; m. 厘米; cm. 仟米; km.	1 米 = 3.280 英尺 1 英寸 = 2.540 厘米 1 英里 = 1.609 仟米
面積	平方英寸; in ² .	平方厘米; cm. ²	1 in. ² = 6.452 cm. ²
體積	立方英寸; in ³ .	立方厘米; cc., cm. ³	1 in. ³ = 16.39 cc.
溫度	華氏度, °F	攝氏度, °C	1 °C = 1.8 F°
力	磅(力); pd.	達因	1 磅(力) = 4.48 × 10 ⁵ 達因
能量	呎磅; ft.-pd. 英國熱單位; btu. 1 btu. = 778.0 ft.-pd. 馬力小時; hp. hr. 1 hp. hr. = 1.980 × 10 ⁶ ft.-pd. = 2545 btu. 1 btu. = 6.51 × 10 ¹⁵ Mev.	達因厘米, 耳格. 克卡; cal. 1 cal. = 4.186 × 10 ⁷ 耳格 仟瓦小時; kw. hr. 1 kw. hr. = 8.600 × 10 ⁵ cal. = 3.600 × 10 ¹³ 耳格 兆電子伏特; Mev. 電子伏特; ev. 1 Mev. = 1.00 × 10 ⁶ ev. 1 kw. hr. = 2.25 × 10 ¹⁹ Mev. 1 cal. = 2.62 × 10 ¹³ Mev.	1 ft.-pd. = 1.356 × 10 ⁷ 耳格 1 btu. = 252.0 cal. 1 kw. hr. = 1.341 hp. hr.
功率 (動力)	馬力; hp. 1 hp. = 550 呎磅/秒 = 33000 呎磅/分	瓦. 仟瓦; kw. 1 瓦 = 10 ⁷ 耳格/秒 1 仟瓦 = 10 ¹⁰ 耳格/秒 = 1.341 hp.	

期限卡

Date Due

30 APR 1962
- 4 MAY 1964

72.9.-5

首借到期

75.3.19

著者 陳嶽生 書碼 539.2
Author Call No. 440

書名 原子能與原子彈
Title

登錄號碼
Accession No. 090336

月日	借閱者	月日	借閱者
Date	Borrower's Name	Date	Borrower's Name
8/15	張永中 9211104		
2/5	邵德華 1484		

國立政治大學圖書館

書碼 539.2
440

登錄號碼 090336

