

漢譯世界名著

新鍊金術

盧德福著
葛培根譯

商務印書館發行

漢譯世界名著

新 鍊 金 術

Lord Rutherford 著
葛 培 根 譯

商務印書館發行

目 次

放射性蛻變.....	2
基本質點	
高速質點的檢查.....	10
膨脹法 電的方法	
α 質點所產生的元素轉變.....	17
中子的發現 放射體的產生	
人工方法轉變.....	28
結論.....	40

新 鍊 金 術

在這次講演中，作者想把近來元素轉變的研究情形簡單敘述一下。所取题目的意義，就是針對着兩千餘年來對人類具有非常魔力的舊式煉金術作一個對照。早在西歷紀元初年的時候，人們就有一種信念，以為物質可以轉變。中世紀的時候，人們還不斷的追求點金石，想把一種元素轉變成另外一種元素，尤其是想把普通金屬變成金與銀。這種觀念所以能夠長時期存在，大半是受了亞力斯多德的物性哲學的影響。依他的說法，所有的物體都是由一種相同的原始物質以及土、風、水、火四種元素所形成。這四元素之所不同的，僅僅是他們具有冷、濕、熱與乾各種性質在程度上的不同而已。加多或減少這幾種物質性的程度，物質的性質就會改變。煉金家既然有了這種概念，所以他們覺得，祇要找到適當的方法，就可以將一種物質轉變成另一種物質。在有化學的初期，那時候化學化合方面的知識還知道得很少，有些物質因為化學作用而改變了牠們的外形同性質，這些事實都足以支持他們的信念。過些時候，竟有人聲稱他們發現了這個大祕密，但是我們絕對不相信他們曾製造出一絲一毫金子來。我們倘若用現在的眼光看回去，可以知道，要想那樣輕而易舉的去令元素轉變是不會有希望的，除非是靠了實驗家去探求。由於實驗科學的發展和化學知識的不斷進步，物質轉變的觀念纔被擯棄，而歇止了牠對於知識進步的影響。不過舊的煉金術觀念在一般人的腦子中還是固

持着，那些自欺欺人的甚至還聲稱他們已經有了祕訣，用轉變方法去大量製造金子。這種騙人的妄言，常常因為他們的巧妙說法，而使人家說服，甚至於有一個時期弄得那些最頑固的財政家也坐臥不安。我們知道，用新的方法去產生極少量的金子是可能的，不過要用價值更貴的鉑作為原料去轉變。

由於化學知識的進步，舊的元素轉變的概念已經站不住腳了。我們已經知道，所有的物質可以分解成八十幾種或者更多不同的元素。這些元素的原子是永恆不變的，不可毀滅的。凡是我們可能支配的一些普通的物理和化學力量，無論如何也不能改變元素的原子，但是這種原子永恆不變的觀念在一九〇二年受到了一個強烈的打擊，因為那時候發現有兩種有名的元素，鈾同釷的原子，確確實實是有蛻變的現象，不過蛻變的速度非常慢而已。這兩種重元素可以放射有透射性的射線，可以使照相底片感光，並且可以會帶電體放電。由這兩點便發現了放射現象，同時得到一個結論，就是原子可以轉變。這種放射現象，就表示原子的不安定性。當一個原子極劇烈的分裂時，就放出一個高速 α 或 β 質點， α 質點是帶電的氦原子，質量為四，牠射出的速率大約每秒一萬英里。 β 質點就是普通質量極輕的負電子的一個別名，牠射出的速度更快。有時候，在蛻變的程序中還隨同產生一種有透射性的，屬於 X 射線一類的 γ 射線。

放射 性 蛻 變

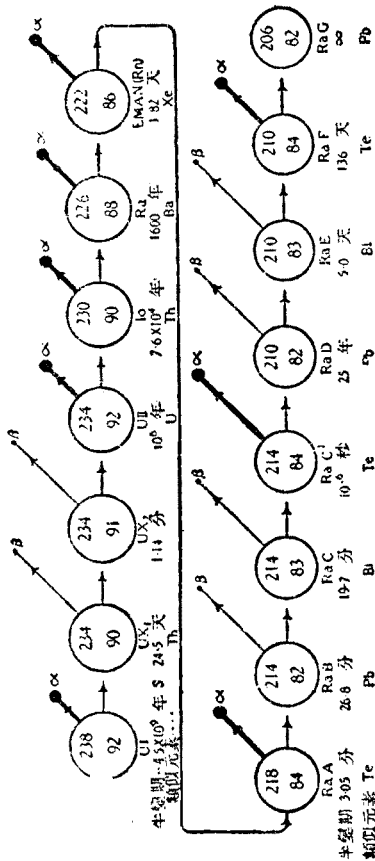
假若我們有一克鈾，那麼每秒鐘內大概有兩萬四千個原子分裂並且放出 α 質點。但是一克鈾元素中的原子也是太多

了，僅僅半克的鈾要用這種速度去蛻變，就約需四十五萬萬年。當質量為 238 的鈾原子放出一個質量為四的 α 質點後，結果生成一個原子質量為 234 的新原子。這個新元素的原子也非常不安定，牠很快的再度分裂，每個原子放出一個高速 β 質點。這種蛻變程序，一經開始，就會繼續許多階段，每一個不安定的原子又會變成另外一個新原子。著名的鐳元素就是從鈾開始蛻變而得來的，牠是鈾蛻變系中第五個產物。

放射性物體的放射性強度，要看牠放出的輻射而定，放射性強度與時間成幾何級數而減小。假若牠的強度在時間 T 內減小到一半，這時間我們也叫牠做半變期，在時間 $2T$ 內，牠便減小到 $1/4$ ，在時間 $3T$ 內，減小到 $1/8$ ，一直下減。我們可以很容易的計算出來，在時間 $20T$ 內，牠的強度將減小到不及牠原來數值的百萬分之一。這個放射定律可以普遍適用於所有放射性物體，不過每種放射性物體自己都有一個特定的半變期，而且各種元素的半變期可以差得很大。例如，鈾的半變期是四十五萬萬年，鐳的半變期卻是一千六百年，但是鐳有一個產物名叫鐳 C' 的，牠的半變期祇是百萬分之一秒。這個定律說明了一個事實，那就是，在單位時間內所分裂的原子的數目，平均總是與當時尚存在而未變的原子數目成比例。假若每個原子都依機會律而分裂，那末上述定律應為當然的結果。

鈾的蛻變系中所發生的一些奇妙結果，如第一圖所示，圖中各圓圈表示連續生成的原子核。蛻變的半變期寫在各圓圈的下面，放射出的質點，或為 α ，或為 β ，也指示出來。要準確討論這蛻變系成立的方法，需要時間太多，但是有一點值得我們注意的，就是連貫整個蛻變系中各個關係的一個簡單性。

我們知道，一個元素的化學性質是被牠的原子序數所決定的，原子序數乃表示原子核中電荷的自然單位，因為電也是有原子性的，所以原子核的電荷總是用整數表示，這個數目從最輕元素氫的 1 直到最重元素鈾的 92。每個原子的原子序數，以及牠的原子質量(以氧等於 16 為標準)均寫在圈中。



第一圖 鈾系元素。各圓圈內上方的數字代表原子質量，下方數字表示原子序數及核電荷。粗箭頭的長度表示 α 質點所能通過的相對距離。

α 或 β 質點都是從原子核本身放出。假若放出的是帶兩個單位正電荷，質量是四的 α 質點，那麼剩餘的原子核的原子序數便減小兩個單位，同時質量減小四個單位。反之，若放射出的是 β 質點，因為 β 質點帶一個單位負電荷，所以核電荷結果增加一個單位。又因為 β 質點的質量極輕，所以新原子的質量大致可以說跟原來一樣。根據這幾種輻射性質，我們得到幾條簡單的結論。並且可以用牠圓滿解釋這長蛻變系中所有元素的原子序數和質量。現在質量與能量之間的相當關係已經成立。設若已知鈾的原子質量，那麼祇要知道 α 質點（氦核）的精確質量，以及放射出的 α 質點或 β 質點的動能極大值，便可以準確的算出蛻變系中所有原子的原子質量。這蛻變系的最後產物已不再有放射性，牠的原子序數與鉛完全相同，不過原子質量是 203 與普通鉛的 207.2 不同。

我們現在知道得很清楚，大多數的元素都是一些同位素的混合物。同位素就是具有相同的核電荷，而質量不同的原子。愛斯通 (Aston) 告訴我們，普通鉛至少含有三種同位素，牠們的原子質量是 203, 207, 208，其中以 206 的存量最多。鈾系的最後產物，我們普通稱為鈾鉛，就是普通鉛的同位素之一(203)。從一個年代久的鈾礦中分出的鉛，主要是鉛同位素 206。我們還要注意的，鈾系中還有兩個鉛的放射性同位素，原子序數都是 82，那就是質量為 214 的鐳 B 和質量為 210 的鐳 D。

這裏還應該提到的，就是元素釷和錒也有一個類似的長蛻變系，釷系的最後產物，也是一種鉛的同位素，質量是 208，而不是 206 的鈾鉛。從一個純釷礦所分出的鉛，主要是同位素 208。錒系的最後產物，也是一種鉛的同位素，不過質量是

207. 很明顯的，三個蛻變系的最後產物都是鉛的同位素，不過牠們的原子質量不同而已。

這些連續產生的放射性元素，牠們的化學性質和物理性質的特殊變化，我們可以用鐳的蛻變為例去說明。鐳在純粹狀態時是金屬，牠的化學性質與鋇相似。牠以 1600 年為半變期分裂放射出 α 質點，結果自己變成一種極重的放射性氣體，鐳射氣，我們現在叫牠氡。這種氣體的性質不活潑，根據這一點我們應該把牠歸到著名的惰氣族裏面去，氦、氖、氬等都是惰氣，不過這個射氣的原子比起鐳原子來還要不安定。在 3.8 天內便有一半分解。這種強放射性我們可以用一個簡單的實驗去說明。用十分之一立方毫米的鐳射氣，在普通壓力下使牠進到一個抽空的玻璃器中，玻壁上塗有磷光性硫化鋅，器中立刻發生明亮火花，因為大量的 α 質點在鐳射氣分解時放射出來，劇烈的轟擊到硫化鋅上所產生。

我們還應牢記的，就是原子轉變時所放出的能量，主要是變成 α 及 β 質點的動能，這種動能比最利害的炸藥中每個原子所放出的能量還要大。假若我們取一克純粹的鐳鹽，把牠裝在一個玻管中，那麼從鐳和鐳的產物放射出的 α 質點就被鐳鹽本身或者被玻壁吸收，結果牠們的運動能量自然而然的完全變成熱能。有一部份高速 β 質點以及大部份 γ 質點都穿過玻壁。由於放熱的結果，我們發覺裝有鐳的玻管，牠的溫度常常比牠週圍要高幾度。放熱的程度將隨時間而減弱，直到減小到一半的時候，需要一千六百年。 α 質點在穿過物質的時候，失去牠的速度，最後又失去牠的電荷，變成普通氦原子。我們祇要將鐳鹽加熱或者溶解，氦就可以放出來。放射性物體的龐大放熱量，最好用一個變化更快的生成物去說明，例如鐳射

氣，牠的半變期是 3.8 天。從第一圖可以看到，當射氣放射出一個 α 質點以後，便產生四個變化極快的產物，鐳 A，鐳 B，鐳 C，和鐳 C'，其中有兩個放射 α 質點，兩個放射 β 質點。當鐳射氣通到一個封閉的玻管中幾小時以後，鐳射氣與牠的四個生命極短的產物之間便達到一種平衡狀態，於是產物的放射強度便隨着射氣的蛻變而變化。經過一兩個月以後，差不多所有的射氣都完全成了鐳 D，鐳 D 的半變期比牠的蛻變產物鐳 E 和鐳 F 都長（二十五年），以至於這些產物的蛻變又要受鐳 D 的半變期的影響了。

設若我們假想能獲得一公斤鐳射氣，將他通到一個抗熱的封閉器中去，過了兩小時以後，放出的熱約相當於兩萬仟瓦。除非將盛器極端充分的冷卻，否則牠一定會熔化。這種放熱效應也隨射氣的蛻變而漸漸減弱，過了 3.8 天便減弱到一半。兩個月以後大部份的鐳射氣都消失了，封閉器內所剩的全是從 α 質點衍生出來的氦氣，牠的容積為原來鐳射氣的三倍，同時在盛器的四壁還覆有一層鐳 D，共重 946 克，鐳 D 是一個蛻變較慢的鉛的放射性同位素，原子量是 210。假設我們將實驗繼續作兩百年，那麼鐳 D 將大部份消失，而變成一種不活潑的鉛同位素，原子量為 206 的鐳鉛。由於鐳 F 也放射 α 質點，氦的體積結果增加成原來的 $4/3$ 倍。

最值得我們注意的，就是這一系列的最後產物，鐳 F，或是普通所稱的釷，乃是一八九七年居里夫人從鈾礦中分離出來的第一個放射性元素。

根據前面所列出的，我們當然可以相當有把握的指出這樣一個實驗中的一切結果，可是實際上卻是不可能的，因為供給一公斤的射氣，大約須要兩百噸鐳，而現在全世界所分離出

來的鐳大概總量還不到一公斤。我們不能做這個大規模的實驗也是幸事，否則那種龐大的能量放射，放射出相當於一千仟瓦的透射性 γ 射線，對於附近人士的健康，必有極大的影響。

不過我希望這種假想的實驗可以給讀者一個印象，知道放射變化中放射能量的龐大，以及鐳射氣變成氦和鐳鉛這個過程的激烈。所有這些放射性蛻變都是瞬時的，不可控制的，極熱和極冷都不能對這種自然程序發生絲毫影響，我們僅僅祇能夠注視着或者去研究這種奇妙的變化，但是我們絲毫無法去改動牠們。

這種放射變化的程序在兩個最重的元素，鈾同釷中表現得最明顯，在另外幾個元素中也微微有這種放射現象，不過大多數的元素通常均不表現絲毫放射性。所以我們有理由下一個結論說，這些元素的原子在我們地球上的普通情況下，永遠是安定的。最近幾年來，我們發現了種種方法，不但可以用人工方法將一個元素轉變成另外一個元素，並且可以製成許多新的放射性元素。這些放射性元素也是根據天然放射性元素的變化定律而變化。這方面的知識可以說是多年來熱烈研究所得的結果，也可以說是研究物理學中這種最基本問題的有力量，新的研究方法發展的結果。

基本質點

由於放射性物體的蛻變，我們知道重原子核的成份大概是高速度 α 質點和 β 質點。後來對於普通元素的轉變知識加以研究後，纔確定還有幾種基本質點存在。這些質點都是原子核爆裂的時候放出來的，最重要的是質子，中子，重質子及正電子。質子就是電荷為一，核質量為 1.0076 的氫原子核的

一個別名。中子是一個不帶電荷的質點；質量比質子稍大，即 1.0090，我們知道，這兩種質點，質子與中子，是互相有密切關係的，而且我們相信，由於原子核中存在着一種龐大的能量，我們可以將中子去掉一個負電子變成一個質子。反之，將質子加上一個電子，便變成一個中子。不過這種互相變化我們還沒有確實的證明，由一些普通的現象中，我們相信這兩種質點間是有相當連繫的。假設中子是質子與電子的密切結合體，乃是非常自然的事情，不過要解釋這兩種質點的質量差，還是相當困難。（此問題近來已由我國鄔保良教授之靜核構造理論圓滿解釋——譯者註。）

α 質點是帶兩個電荷的氦核，牠的核質量是 4.0029。尤賴 (Urey) 不久以前發現普通氫中總有少量質量為二的氫同位素存在，這一個發現對於物理學與化學都有極大的重要性。若將普通水不斷的電解，便可以得到純粹重水，其中質量為一的氫被質量為二的氫同位素所取代。這種水約比普通水重百分之十一，而且牠的冰點，沸點也都與普通的不同。重氫的化學符號是 D。在重氫中放電，於是便有些重氫原子失去一個負電子，變成一個帶正電荷的游子，這些游子就名「重質子」。我們知道，普通氫的游子，名叫「質子」。因為這兩種游子常常被用作高速質點去轟炸物質，所以需要有不同的名字去區別一下。我們將要看到，高速質子和高速重質子，也如同 α 質量和中子一樣，拿去轉變許多元素都非常有效。由直接實驗所得的現象，也告訴我們，重質子是質子和中子的密切結合體。

質量極小，與負電子相反的正電子，也有時在一些轉變作用中出現。這個不可揣摸的質點，乃是安德生 (Anderson) 幾年前作宇宙線實驗的時候最先發現的。我們現在可以在實驗

室中通高能量 γ 射線於物質，以產生少量正電子。當某些種輕元素被 α 射線轟炸時也可以放出正電子。正子一名，常常用以代替正電子，我們都認為牠的質量也是同負電子一樣輕，不過電荷相等而相反。

另外兩個相當輕的元素，或者也可以說是氫同氦的新同位素，那就是 ^3H 及 ^3He ，他們也在某些轉變作用中出現。這兩種同位素都非常安定，不過在普通物質中還沒有發現過。最初有人認為 ^3H 在製備重水的時候存在，但是後來的研究也並沒有證明這一點。

高速質點的檢查

我們知道，從放射性物體內放出的輻射，都有一種特殊性質，牠們可以使帶電體放電。因為高速 α 或 β 質點在通過一種氣體的時候，能夠產生許多帶正電和帶負電的質點，也就是我們通常所稱的游子。這種電離作用實際上乃是由於高速質點的衝擊，將原子或分子的外層電子移去的結果。於是這些游子在氣體中依電場方向運動，正游子向負電極移動，負游子則反之。這兩種游子反方向的運動情形與通過氣體的電流有關。

在發現放射現象的初期，大家都是利用這種電的方法去研究或比較放射性物的效應，他們用驗電器或靜電計為量度的工具。這種電的方法，用去檢查少量放射性物質非常方便，現在要測量比較容易量的效應的時候，仍舊用這個方法。

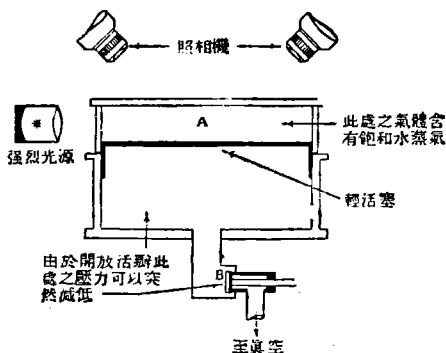
近年來，元素轉變的知識所以有劇速的進步，大部份是由於發現了檢查及計數高速單個原子的有效方法的緣故。這些

方法主要還是根據質點通過氣體時的電離作用。

膨脹法

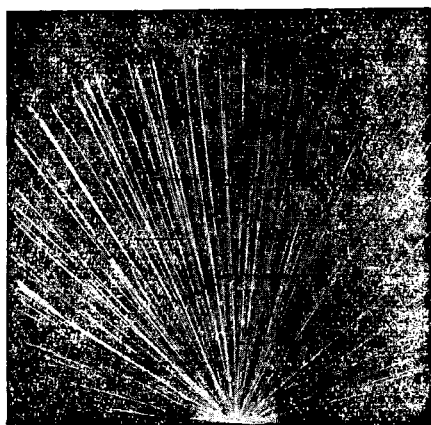
這些方法中最奇異的要算是威爾生教授(Prof. C. T. R. Wilson)所發明的方法了,他的方法的原理是由於高速質點所產生的游子,在某種情形下可以當作水蒸氣的凝結核。於是每個游子便變成一滴水的中心。因為每一個高速 α 質點可以在氣體中產生十萬對以上的正游子和負游子,所以這些飛躍而過的質點在氣體中的徑跡(track)就變成一條可以看得見的水線了。膨脹以後再用實體照相法將這徑跡照下來,可以清楚的看出牠在空間中的位置。

這個方法所用的儀器名叫「霧室」(cloud chamber)或者「膨脹室」,如第二圖所示,圖旁並附有註釋。霧室乃是一



第二圖 威爾生膨脹室由於下方壓力之減低,輕活塞突向下降落。活塞上部之氣體(A),先膨脹,後冷却,使成過飽和水蒸氣。此種水蒸氣即在帶電質點(游子)上凝結為小水滴,室內情形經玻璃壁可用光線照明,室內之水滴所散射之光可用上方之照相機攝影之。

個圓柱體， Δ 處充滿飽和水蒸氣。例如，設若在膨脹的時候，有一個 α 質點通過這氣體，又當膨脹調節到了適當的時候，在 α 質點通過的路線上，每一個游子就變成凝結中心，於是質點的徑跡便清楚可見了。 α 質點所產生的徑跡就如照片一所示。此處的 α 質點乃是從曝露到鈾射氣中去過的一小塊金屬所產生，這塊金屬是放在膨脹室的裏面。這金屬表面上留有極薄一層鈾 C 和鈾 C'。鈾 C' 所放射的 α 質點速度極大，牠在空氣中的射距是 8.6 厘米。鈾 C 射出的 α 質點的射距較短 (4.8 厘米)，在照片上可以看出牠與那些高速 α 質點的徑跡混在一起。



照片一 (蔡德維教授攝)

從鈾 (C+C') 放射出的 α 質點的徑跡，兩組在空氣中的射距各為 8.6 與 4.8 厘米。

大多數 α 質點在氣體中都是走直線，徑跡的終點表示 α 質點的速度已降低到一個極小值，小到不足以再產生游子。 β 質點通過氣體時的徑跡，與較重的 α 質點的徑跡又有些顯著

的不同。第一， β 質點的路線不是那樣稠密，因為 β 質點在單位路程上的電離能力較小的緣故，這一點很容易從照片二中 β 質點所產生的徑跡看出來。高速 β 質點的直線徑跡，就在那些連續的點滴上表示出，這些點滴互相分離得相當遠，甚至一一可數。再者，輕 β 質點比同速度的 α 質點容易變得偏斜，因為 β 質點在牠的路程上會與原子相撞。這一點可以從照片上那些較短的歪曲的徑跡看出，這些徑跡的終點處特別寬，因為 β 質點的速率減低，而同時電離作用加強的緣故。

照片三上的 β 射線的徑跡比較有趣，牠表示 β 質點在通過氣體的時候所發生的一些非常事變。從左邊開始的一條長路程，很尖銳的轉了一個直角。這時因為 β 質點撞到了一個重原子核的結果。從主路線分歧出來的短路線，乃是 β 質點撞擊到某些原子所產生的副電子(secondary electron)的路線。

這些飛躍而過的 β 質點的能量和速度，可以直接在一個均勻的磁場中量度牠的徑跡的曲率而定，假若場與牠的運動方向垂直，那麼 β 質點走圓周，假若場的強度大，而 β 質點不頂快，那麼 β 質點在氣體中所產生的徑跡可以連續畫幾個圓周。磁場對於質點方向的偏斜還要看質點的電荷是正或負而



照片二(威爾生教授攝)

射距約為一厘米的光電子的徑跡，牠們是由銀的 K 輻射所產生。(能量約為21,000伏特)直徑跡是含更高能量的電子生成，或者是宇宙輻射所致。

定。假若質點運動時的方向是已知，我們立刻便可以用這種方法分別出這路線究竟是一個正電子或一個負電子所產生的。



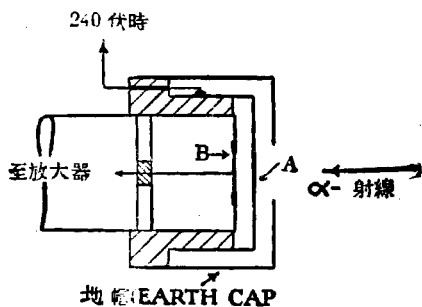
照片三（威爾生教授攝）

一個光電子的徑跡，這個光電子是由能量為 40,000 伏特左右的 X 射線的吸收所產生。徑跡最初很直的一部份，因為遇到一個原子核，所以發生一個大偏轉。在徑跡的末端，當其速度趨向終末的時候，我們可以清楚的看到牠電離密度的增加，以及因衝擊而發生的曲率。

電的方法

在許多實驗中，計數在一定時間內進入到檢查室中的質

點的數目，也是非常重要的一件事。最簡單是用電的方法去計數。做的方法在圖三有說明。例如，設若我們計數 α 質點。讓這些質點在通過檢查室時通過金屬箔片 A，然後又被一個平行的絕緣片 B 所阻。



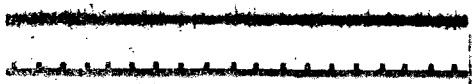
第三圖 計數器

再加上充分的電壓使兩板片間的游子很快的移動到兩個電極

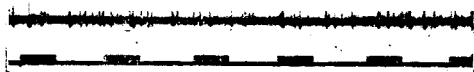
上去。這兩個平行板片普通均相隔三到五毫米。結果每進入一個單獨 α 質點， B 的電壓就有微微的增加。這個增加可以自動的用一個特殊裝置的串連放大器放大一萬萬倍。在輸出方面，電壓的增加已大至（一百伏特）足夠使一個振動週期極短的（小於千分之一秒）示波器發生一個極大的偏轉。由於 α 質點的連續進入，而使示波器發生偏轉的照相紀錄即如照片四所示。每一根垂直線就表示一個單獨 α 質點的放大電效應，



α 質點



質 子



用中子衝擊的質點

照 片 四

游離質點的示波器紀錄，上端二相係在同一情況下攝得，偏轉之大小不同，乃因 α 質點與質子的游離力量不同之故。下端照片中的紀錄，係用能量為二百萬伏特的中子去衝擊氦原子所發生的偏轉，時距均為秒。

那連續的水平帶則表示當沒有 α 質點進入時示波器的自然運動。設若用較快的速度照相，那麼雖是每分鐘進入一千個質點，也可以將每個質點紀錄下來。相同地，高速質子和高速重質子也可以用這方法去計數。但是因為這種核是有一個單位的電荷，而每個 α 質點卻有兩個單位，所以進入一個 α 質點所產生的電離大約要比同樣速度的質子或重質子要大四倍。檢查室中進入一個質子所發生的偏轉僅及一個同樣速度的 α 質點的四分之一。用這方法所得的質子紀錄也列在照片四中。這種突出線的大小差異非常有用，我們可以用牠去決定那進入的質點是帶單電荷還是雙電荷，而且質子和 α 質點的紀錄在某種情況下也非常容易分別出來。

這種電計數法，不能用於高速 β 質點，因為牠的電離能力太弱，所發生的偏轉不能量度。但是蓋格 (Geiger) 發明了一個簡單而靈敏的方法去計數 β 質點，而且現在已被普遍採用。這個計數器十分簡單。牠僅有一個外圍金屬圓柱體，兩端各用一個絕緣的軟木塞塞閉，於圓塞的中心穿過一根桿或一根線連到一個簡單的放大系統。將管中的空氣或者其他氣體的壓力調整到一個適當值，加充份的電壓到外圍管，使氣體放電。假若有一個 β 質點在這種情形下通過這氣體，氣體中所發生的電離就可用衝擊電離的程序 (process of ionization by collision) 放大，同時在線與外圍圓柱體之間有一個瞬時放電 (momentary discharge) 通過。 β 質點也就如同 α 質點一樣，可以由電話聽筒的啞嗒聲或示波器計數。這種蓋格米勒管 (Geiger-Müller tube) 是一種對於高速正電子或高速負電子通入圓筒而計數的一個極好方法。

又因為 γ 射線通過計數器的四壁以及其中氣體的時候可

以發生 β 射線，所以這種計數管也可以拿去精密的檢查 γ 射線。

設若需要計數很多高速質點的時候，不管是 α 質點， β 質點，或是質子，我們常常可以用一個自動系統去計數，將質點數目用機械計數器紀錄下來。溫威廉博士 (Dr. Wynn-Williams) 關於這種計數器發明了一些極精巧的方法，而且在許多實驗室中都廣被採用。

因為中子不帶電荷，所以牠可以自由穿過原子的外圍組織，而不產生任何游子。但是有時候，中子在牠的路程上與一個原子核相撞，可以使牠很快的運動。這種反衝原子核在氣體中沒有靜止以前，還可以產生一些游子。這種反衝粒子也可以用計數 α 或 β 質點的方法去檢查。檢查箱中通常均用氫，氦或者空氣。一般講來，五千個中子進入計數器，尚難有一個能使示波器發生一根突出線。在照片四中，有一張中子在氦中反衝的紀錄。

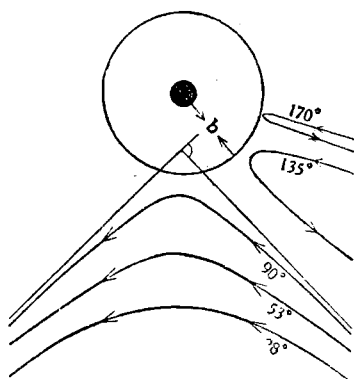
以後可以知道，因為中子可以轉變某種元素，如鋰及硼等，所以我們就利用這一點去計數極慢的中子。

α 質點所產生的元素轉變

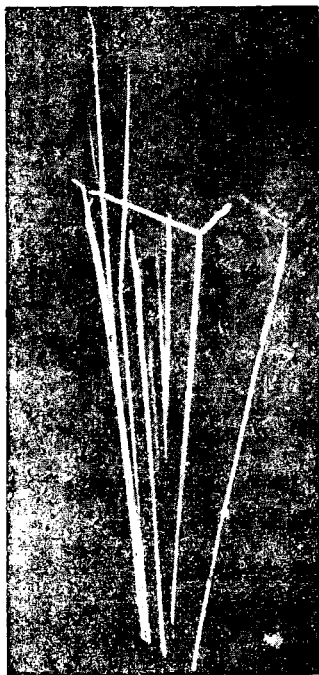
當鈾及釷的自然蛻變系的問題一經解決以後，我們自然而然便會希望有一天能夠發現一種方法，去擊破那些普通元素的安定原子。要使這問題有成功的希望，我們必須對於元素的原子構造有相當的概念纔行。我們現在相信所有元素的原子都有一個相類似的構造，並且相互有極密切的關係。在每一個原子的中央，是一個帶有正電荷的極小核，並且原子的大部

份質量也集中在牠上面。每由一個到次一個元素，核電荷就變化一個單位，我們看過，氫是一，鈾的值是 92。在核的週圍相當距離，分佈了一些輕的負電子，負電子的數目與核中電荷數目相等。一個元素的核電荷支配了牠外圍電子的數目以及這些電子的分佈，所以一個原子的性質，就如摩斯黎 (Mosley) 所說，是被一個整數所決定。差不多從 1 到 92 之間，每個數字都有一個已知的元素作代表。

有些原子的外圍行星電子很容易用放電方法或其他方法移去，但是過了一個短時間，其他電子又取代了這些空位置。使牠的構造又恢復到從前一樣。所以假若我們要想令原子發生一個永久的改變，我們就必須改變他的核電荷或核質量，或者二者同時改變。原子的核是由極強大的力量所結合的，所以我們首先必須用聚集的能源去使牠發生騷動。二十年前，科學上已知的最有力量的質點是鐳及其他放射性物質瞬時射出的高速 α 質點。這個質點的速率與能量都很大，牠可以深深穿入到原子內部去。由於他的偏轉及散射使我們知道原子內部的偏轉場的性質及強度。事實上，我們現在所有的一些關於原子核構造的概念，完全是由研究 α 質點通過物質時所作的大角度的散射得來的。例如，我們設想一個 α 質點在靠近一個重原子核時的路線，因為 α 質點帶有兩個單位正電荷，所以碰到了帶很多正電荷的原子核的時候便發生一種推斥力，而且離核愈近時，推斥力便愈大。 α 質點在核的週圍畫着曲線路程，假若這種作用力是服從庫倫定律的話，那曲線便應該是一根拋物線，牠的漸近線與 α 質點的進入及退出的方向相合。 α 質點與核撞擊一次，也許可以發生一個大的偏轉。第四圖表示離核中心不同距離時發射 α 質點以及當牠被推斥後所走的路線。

第四圖 α 質點靠近一個重核時的軌道

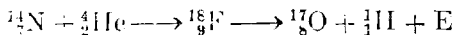
重原子核就用一個大黑圓點作記號。從中心直接推斥出來的，便取垂直方向射出。外圍圓圈表示質點能與核接近的最小距離。射擊得愈斜， α 質點的散射角便愈小。根據這些概念，有人作了許多實驗，看 α 質點通過物質時所作的各種不同角度的散射，並且還有計算方面的記錄。散射的 α 質點在已知角度時的數目，是與核電荷的平方成比例，而且隨牠的速度的減小而增大。我們還應該記得一點，就是原子核的靶子面積極小，所以 α 質點要靠近核而發生一個大的偏轉，也要看機會。照片五表示一個大偏轉的例子， α 質點所通過的是氧。 α 質點偏向左，反衝原子核偏向右。這裏的討論，我們都要假定這些偏轉都是「彈性的」，而且服從力學上的定律。事實上，在這種情形中，原子核也就如同極小的完全彈性彈子球一樣。上面還沒有提到元素轉變的問題。很明顯的，當一個高速 α 質點與一個帶電荷少的輕原子核碰頭相撞以後，牠們所發生的推斥力比較小，這樣便可以讓 α 質點達到核的附近，或者甚至穿透核。



照片五（布賴克特教授攝）

α 質點在氣中的徑跡，有一個分叉是表示與一個氧原子相衝擊。分叉上的短枝乃是反衝的氧原子核所產生，長枝係 α 質點所產生。量度兩分枝間的偏轉角，可知衝擊時能量是不滅的。

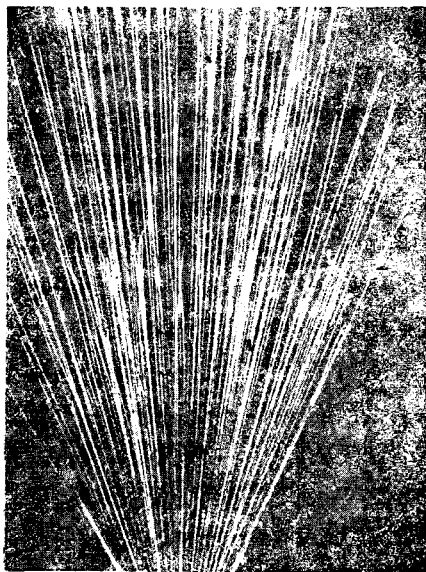
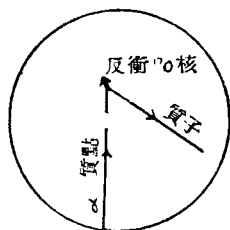
我們可以看到，核電荷是不滅的，而且假若我們假定質與能是相當的話，那麼質量也是不滅的。方程式右端的符號 E 就表示質子和氧原子核的動能減去 α 質點最初的能量。



於是原子核的構造將起一個劇烈的變動，可能使原子轉變。由於這種概念的趨使，後來便有人用 α 質點去轟擊幾種輕元素的原子。在這些情形中，作者於一九一九年發現一個現象，就是有些氮原子核可以放出一些高速氫原子核（現在所稱的質子），而本身轉變了。由於以後觀察了許多事實的結果，這種轉變的實際情形，纔得以充分明瞭。實際上 α 質點是進入到氮的原子核中去，暫時形成一個新的與氟相似的核，牠的質量是 18，電荷是 9。不過這種核在自然界是不存在的，牠極端不安定，立刻破裂射出質子，剩下安定的質量為 17 的氧原子核。這個

轉變程序的步驟，可以用下面一種化學方程式表示出來。左邊是參與反應的元素，右邊表示轉變後的產物。每個符號前面的兩個數目表示各該元素的質量同核電荷。

真正被轉變的核，實在是為量極少，因為在五萬個 α 質點中纔僅僅有一個能達到核的附近，被核捕獲。布賴克特在一個充滿氮的膨脹室中將千千萬萬的 α 質點的路線照相下來，結果他清楚的觀察到氮原子核的轉變情形。照片六就是這些照



照片六（布賴克特教授攝）

氮被 α 質點轉變 在通過氮的無數 α 質點中，有一個 α 質點將氮核轉變成 ^{17}O ，放出一個高能量的質子。

片中的一張，上面還附有一個說明圖解。質子的長距離回返徑跡以及被撞擊的原子核都清晰可見。

有許多輕元素被 α 質點轟擊以後，都可以發生這一類的轉變，而且都放出高速質子。最近幾年來，關於這種轉變的實際情形研究得非常密切，而且得到了極重要的結論。我們發現，那放出的質子是由兩個或更多的羣體所組成，每個都有他確定的速度。這些質子羣的能量所以相差，乃是因為轟擊核放出 γ 射線，以致損失了一部份能量。再者因為核中有能量水平〔或稱「共鳴」水平 (energy or "resonance" level)〕的緣故，所以在捕獲定速 α 質點的時候還有選擇性。

中子的發現

我們知道，質子乃是用 α 質點轟擊許多輕原子核的時候所得的產物。由於密切研究這些轉變，又發現另外一種極重要的質點。當質量為 9 的輕元素鈹被 α 質點轟擊以後，並不發生質子，波德 (Bothe) 發現這種輻射比從鐳得來的穿透力最強的 γ 射線的穿透還要強。居里夫人和她的令媛曾觀察過這種輻射的吸收的一些特別現象。最後蔡德維在一九三二年聲稱，這種輻射根本不是 γ 射線，而是由一流高速不帶電的質點所構成，牠的質量差不多與氫原子核的相等。他就名這些質點為中子，中子有許多新奇的性質，因為牠不帶電，所以牠可以自由穿過原子，而在牠的路線上並不發生電離。這種產生中子的轉變，牠的實際情形或係如下。當 α 質點被質量為 9 的鈹核捕獲後，暫時生成一個含有高能量的 ^{13}C 核。這核立刻分裂成一個安定的 ^{12}C 核和一個中子，反應所生的過量能量就變成這兩種最後產物的動能。在一個封閉管中，混合大約一百毫克的

純鐳鹽和粉狀鈹，可以作成一個很便利的中子來源。由於 α 質點的轟擊，每秒鐘大約可以產生五十萬個中子，牠們大部份可以穿透玻管。若希望得到一個更豐富的中子來源，便需要用鐳射氣代替鐳鹽了。不過在這情形中，中子的生產量隨射氣的衰變而逐漸減小。

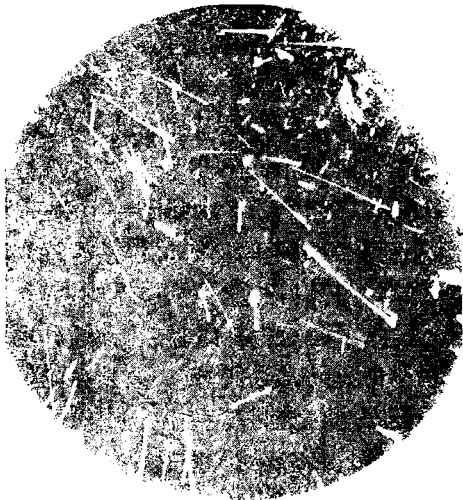
在沒有真正發現中子以前，就有人認為中子可能是構成原子核的一個單位。這裏可以引用一九二零年作者自己在皇家學會 Bakerian 演講中關於這事所講的一段話：

「假若我們假定得正確的話，或許很可能的，一個電子與兩個氫原子核或者與一個氫原子核相結合。在第一種情形中，便可能有一個質量為二而帶一個單電荷的原子存在，這就是我們所認為的氫同位素。在後一種情形中，便使我們有一種概念，認為有一個質量為一而核電荷為零的原子存在。這一種原子構造似乎並不是不可能的。照現在的觀念，中性氫原子就是一個單位電荷的核，在相當距離處附着一個電子，氫的光譜便可以歸因於這種遠距離電子的運動。但是有時候這個電子可能與氫原子核結合得更緊，生成一個中性的一對，這種原子的性質一定極新奇。除了極靠近核的地方，牠的外場實際上已是零，結果牠可以自由運動，穿透物質。要用分光鏡去檢查牠的存在，或許是極困難，要把牠裝在一個封閉管中，也是不可能。在另一方面，牠可以很容易進到原子構造中去，或是與核結合，或是被核內的強場所蛻變。結果可以放出帶一個電荷的氫原子，或者一個電子，或者二者同時放出。」

最初有人認為用氫放電可以生成中子。但是這個實驗得不到結果。我們現在知道，用普通電壓去這樣產生中子是不可能的。

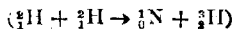
蔡德維與作者許多年前曾試驗過看用高速 α 質點去轟擊鋁的時候是否有中子發生，也是得不到結果。那時候還沒有一個人能夠知道，究竟在怎麼樣的情況下纔會發現這個稀奇的質點。

我們知道，當中子在牠的路程上與原子核發生彈性碰撞的時候，可以檢查得出來。設若一個中子通過氫的時候，湊巧與氫原子核碰頭相撞，中子的能量當時便交給核，結果被撞的核的速度便變得跟原來中子的速度一樣。假若碰撞得過於側斜，那麼中子的能量便僅僅祇能交出一部份來。照片七是狄與



照片七（狄與計伯脫攝）

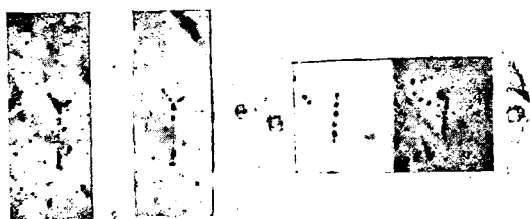
在甲烷中用能量為二百四十萬伏特的中子撞擊所發生的反衝質子的徑跡。中子來源在 S 處，此處有一重氫靶子，用人工加速重質子轟炸產生中子。



計伯脫二氏所攝的一張中子在甲烷中的反衝情形。若將一流高速中子通過氫或者含氫的物質，如水或石蠟煙時，許多中子便因為碰撞而頓時變慢，直到牠們的能量與週圍的分子的熱能差不多相等的時候為止。這種慢中子在許多實驗中，證明是非常有用的，牠們可以通過極厚的鉛或鐵，很少被吸收，但是有些元素，例如硼，鎳，釷，則可以強烈的將牠們吸收。釷的吸收力量特別強，甚至於薄到幾分之一毫米厚的一層釷也可以將慢中子完全吸收。在某種元素中，這種強烈的吸收，無疑的是被該元素的核捕獲了的緣故，結果發生元素轉變。有時候，一個核吸收了中子以後，會變得極不穩定，立刻分裂成幾部份。中子可以將一個元素的同位素由一種變成另外一種，質量上增加一個單位，或者在另一方面，牠也可以生成一個不安定的放射性同位素，這種同位素分裂的時候放出一個正電子或負電子。

就是同費特 (Feather) 哈金士 (Harkins) 費米 (Fermi) 以及他們的同事們告訴我們的，中子，尤其是慢中子，是極有力量的原子轉變劑。因為牠們沒有電荷，所以可以自由的穿透一個重原子核，一個帶電荷的質點要想接近一個重核卻必須要有極大的能量去抵抗核電場的推斥力。爲了說明中子轉變原子的力量，作者可以用輕元素硼或鋰爲例。研究中子轉變元素的照相方法，最近已經由泰勒及哥哈伯 (Taylor and Goldhaber) 發現。將一個特殊照相底版浸入鋰或硼化合物溶液中，然後放在慢中子曝露數天。將照相底版顯影，於是高速質點的徑跡就可以在高倍顯微鏡下很清楚的看出來。在鋰的情形中，質量爲 6 的同位素獲得一個中子，分裂成一個 α 質點 (^4He) 同一個質量爲 3 的氫同位素 (^3H)。用一個高倍顯微鏡便可以

清楚的看到這兩種質點向相反方向射出來的徑跡。硼可以有兩種情形轉變。一種情形是質量十的硼同位素得到一個中子後，分裂為質量七的鋰原子核及一個 α 質點 (${}^4\text{He}$)；另一種情形是分裂成兩個 α 質點同一個 ${}^3\text{H}$ 核。這樣獲得的徑跡照片，就如照片八所示。從一點輻射出三條路線清晰可見，最長的一條乃是帶單電荷的 ${}^3\text{H}$ 所致，慢中子在鋰及硼中所產生的這種明顯轉變已證實是一種檢查及計數慢中子的極好方法。有的時候，檢查室中裝滿了氣體氟化硼；有時候，室壁用鋰或硼的化合物襯裏。



放大 9000 倍

放大 1250 倍



照片八 (泰勒與哥哈白攝)

在照相片中所留的徑跡，用曾浸入硼之照相底版，曝露於慢中子中。硼即根據上列方程式發生轉變，所產生之徑跡，於底版顯影後即可見。

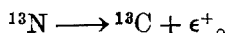
放射體的產生

我們現在要來談談一九三三年居里夫人和她的令媛所作的一個極有意義的發現。她們發現用 α 質點去轟擊許多輕元素，可以產生放射性元素，而且這些放射性元素完全是根據天然放射定律而放射，不過在放射的程序中，所放射的不是 α 或

β 質點，而是正電子。我們可以舉一個例來說明。先用 α 質點將硼轟擊相當時間，然後將牠移開，拿去試驗，可以發現牠是有放射性的，放射出一流正子。牠的放射強度與時間成幾何級數而衰退，在十一分鐘內便降低到半值。這個轉變分幾部進行如下：

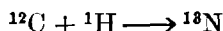


由於過量的能， ^{14}N 核極不安定，當時便分裂成較為安定的 ^{13}N 。 ^{13}N 又慢慢分裂成安定的 ^{13}C ，同時放出一個正子 ϵ^+



這種放射性氮的生成，可以用一個事實去證明。將這種放射性氣體收集起來，牠的化學性質同普通氮一樣。

還有一點很有趣而值得我們注意的，就是這個放射性氣體也可以用另一個完全不同的方法產生，假設用高速質子去轟擊碳，便有下列反應發生：



這樣產生的放射性氮 ^{13}N ，牠的放射性以及化學性質都與用 α 質點轟擊硼時所產生的氣體相同。

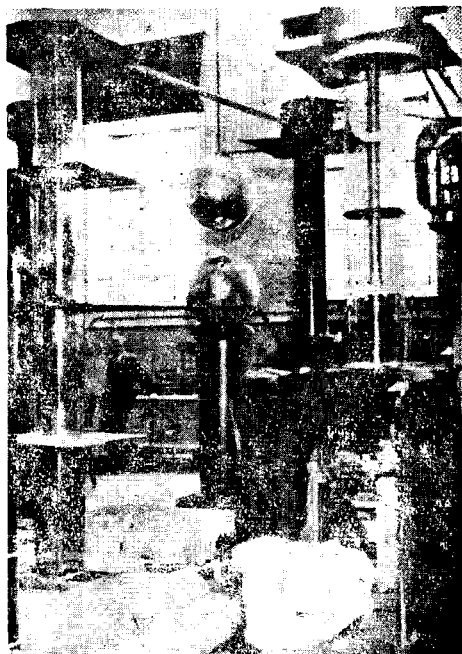
相類似的，用 α 質點轟擊鋁，可以產生質量為 30 的放射性磷，半變期是 3.2 分，放射性磷放出正子後，便變成安定的矽 30 的核。

最近幾年來，不僅可以用 α 質點轟擊元素去產生許多放射體，而且也可用高速質子及高速重質子去轟擊元素而產生。費米和他的同事也曾告訴我們，用慢中子去產生放射體，極其有效，甚至於用最重的核去產生也可以。現在已知道五十種以上的這樣的放射體，在大多數情形中，牠們都是放射負電子（ β 質點）。甚至最重的元素，鈾同釷，也可以被慢中子轉變，而

且每一種又可以產生幾種新的放射體，不過這種轉變的確切解釋還是懸而未決。

人工方法轉變

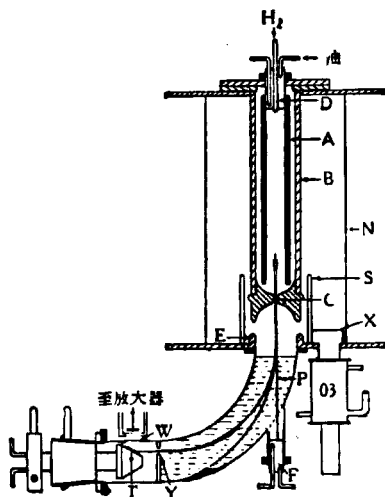
到現在為止，我們還祇討論到由放射體蛻變時所產生的 α 質點所發生的轉變，以及用 α 質點轉變鈹而產生的中子所發生的轉變。我們的實驗室中鐳究竟是有限的，所以用 α 質點所產生的轉變，一般而論，效力很小，其所以能用於研究方面者，乃是因為我們已發明了極靈敏的方法去計數在運動中的物質原子的數目。十年前，我們就認為，若是要擴張元素轉變的知識，我們必須要有更有力量的質點流去轟擊。我們很早就已經知道，在一個低壓氣體中放電，可以產生很多帶電的原子和分子。例如通過氫放電，就可以有無數帶電的氫原子（質子）和帶電分子產生。最近發現的質量為二的重氫，已賜給我們另外一種射體，重質子，這對於元素轉變的知識的進步具有極大的重要性。質子和重質子的供應，很容易從氫和重氫的放電得到，但是若要給他們一個很大的速度，那麼就必須在一個強電場中使牠們發生加速度不可。有時候這種儀器與機械上的問題有關，電壓也有時高到百萬伏特，並且還要用高速率的抽空器以獲得一個很好的真空，以便防止在加速系統中放電。在劍橋，現在已經可以用一串蓄電器和整流器去重覆變壓器的電壓，獲得一個很高的直流電壓。照片九就是柯克羅夫特（Cockcroft）和華爾頓（Walton）二氏在劍橋作實驗所用的儀器。圖五說明如何獲得高速質子流以及高速重質子流，以及分析牠們的方法，這些儀器是奧利芬博士設計的。他用這儀器去研



照片九

哥克羅夫特與華爾頓在劍橋作人工轉變研究所用的高電壓裝置。

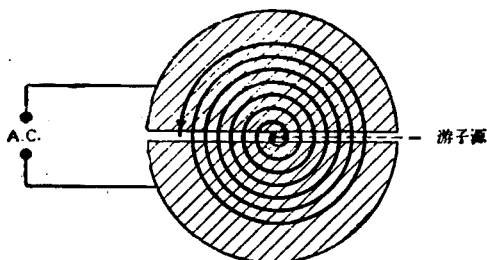
究輕元素的轉變。劍橋新成立的 High Tension 實驗室中，將有電壓為兩百萬伏特的直流電，牠的火花可以達到二十英尺長。在美國，Van der Graaf 氏設計了一個很新奇的靜電發電機，可以發生極高的電壓。Tuve, Hatsted 及 Dahl 三氏在華盛頓用這種儀器作轉變的實驗，可以得到一百萬伏特的電壓。加利福尼亞大學的勞蘭斯 (E. Lawrence) 教授也造了一架巧妙的儀器，名叫「電磁加速器」(Cyclotron)。帶電質點在那裏面自動的多次加速。這裏面需要一個龐大的電磁



第五圖 於低壓下在氫氣中放電產生一流氫游子，此流游子即在C處之小孔放出，此孔位於用油冷却之正極A與銅製負極B之間。在C,E二極之間，加三十萬伏特之電勢使游子加速，銅製屏S用於保護儀器玻璃壁N全係用唧筒0.3抽空，唧筒上配有屏X，游子流通過磁場，所需之質點即經Y曲向靶子T。薄雲母窗W可讓任何高速質點進入計數器內。法拉第筒F用於收集游子流P。

和一些強的電發振器(electric oscillators)。這個系統就如第六圖所示。垂直於紙平面的是一個均勻磁場 加速質子或加速重質子就一圈增大一圈的畫着螺旋路綫。這種重覆加速方法的成功，還要靠一點，那就是質點繞一整圈所需的時間與牠的速率無關，而是與圓週的半徑有關，不過這裏要假定質點的質量差不多是一個常數值。勞蘭斯發現質子或重質子可以轉一千次而不被剩餘氣體散射。他這樣獲得的質子流或重質子

流，能量可以強到六百萬伏特。這個能量比我們在實驗室中用直接高電壓所能希望得到的大得多了。我們還希望，在不久的將來可以用更大的電磁和更強的場去獲得能量更大的質點。

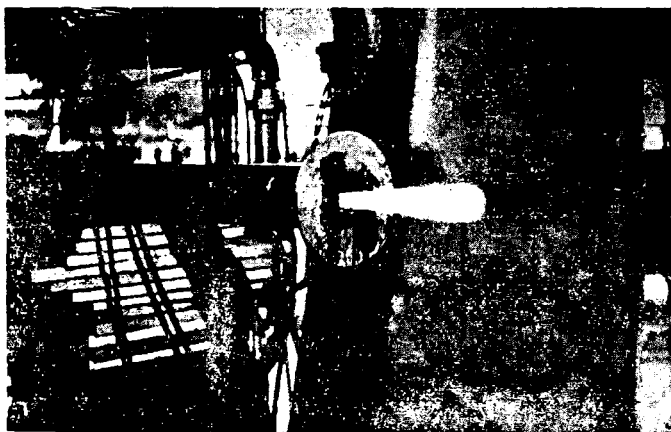


第六圖 電磁加速器。使游子在二D形電極間發生加速，在此二電極上加有高頻率之交流電勢。垂直於D面之磁場使游子依圓週運動。

去年（指一九三六年）又發現用特別的裝置可以讓這種高速質點流通過到電磁加速器的外面去。這對於許多種實驗都有很大的益處。勞蘭斯曾經攝得一張重質子流的照片，牠的亮度相當於百萬分之六安培，能量為六百萬伏特，如照片十所示。這質子流可以平行的透出離加速器六英尺遠的管端的箔窗。透出的質點流每秒鐘有 3.8×10^{13} 個重質子，與每秒鐘從一千克純鐳所射出的 α 質點數相同。

這些獲得高速質點的方法，各有各的優點，不過要看所研究的問題而定。

最初都認為，要穿透一個相當輕的核，那轟擊質點就必須要具有 α 質點那般大的能，就是七百萬伏特，但是加莫 (Gamow) 根據波動力學計算的結果，他說轟擊質點的能量雖比 α



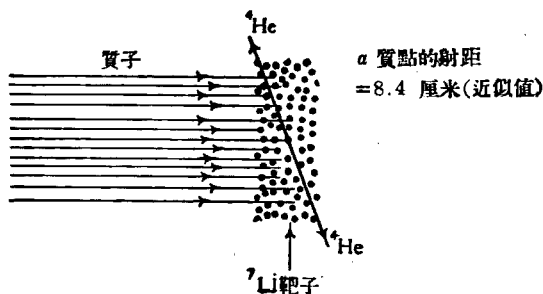
照片十 (勞蘭斯教授攝)

由電磁加速器所射出之六百萬伏特之重質子流。

質點的低很多，牠仍舊有一個小小的或然率可以穿透到核裏去。這種概念後來完全用實驗證明了。柯克羅夫特及華爾頓也是這方面的先進研究者，他們作過實驗，用僅具有*十萬伏特能量的質子去轟擊鋰和硼，使牠們發生人工轉變。這些元素用質子和重質子去轉變的方式，業已完全明白，而且同時還帶來不少有趣的事情。先談鋰的情形，我們知道牠是由質量為6和7的兩種同位素所組成的。我們現在已經可以將這兩種同位素分離，所以我們可以用 ${}^6\text{Li}$ 或 ${}^7\text{Li}$ 作的靶子去作實驗。用質子去射擊，遇巧一個質子進入一個 ${}^7\text{Li}$ 核中，而被捕獲，結果生成的 ${}^8\text{Be}$ 核是不安定的，頓時破裂為兩個高速 α 質點，向幾乎相反的方向推斥開，這種形式的轟擊，就如圖七所說明。

* 這種方法極便於說明高速質點的動能。例如，一個電子通過真空中電位差是一百萬伏特的兩點，那麼牠就必須有一百萬電子伏特的能量(1 million electron volts)，或簡稱一百萬伏特。

${}^6\text{Li}$ 捕獲一個質子後，便變成 ${}^7\text{Be}$ ， ${}^7\text{Be}$ 又蛻變成一個 α 質點，同一個質量為三的氦同位素 (${}^3\text{He}$)。假若我們用重質子去代替質子轟擊，仍可生成 ${}^8\text{Be}$ 核，但是能量大得多。而且牠所分裂的兩個 α 質點，要比 ${}^7\text{Li}$ 捕獲質子後放出的兩個 α 質點的速率要大得多。事實上，除了一個情形以外，這是我們在所有轉變中所能觀察得到最快質點，牠們在空氣中可以通過十三厘米， ${}^7\text{Li}$ 捕獲重質子生成 ${}^9\text{Be}$ ，頓時蛻變為三種物體，兩個 α 質點，同一個中子。



第七圖 用質子轟炸質量為 7 的鋰同位素所發生的轉變，在二十萬伏特時，用一萬萬個質子大概可使一個鋰核變成兩個氦核。

這裏僅僅談到鋰的同位素所發生的轉變中較重要的幾種。後面一個表說明各種不同的射擊體所發生的各種轉變。

鋰的轉變，最好是在膨脹室中將轉變質點的徑跡攝影下來，這樣看起來最清楚。狄及華爾頓曾攝過一張用重質子使鋰轉變所發生的 α 質點的照片，如照片十一。用這種方法可以在照片上清清楚楚的看出一對對方向相反的質點的像。

用質子轟擊 ${}^{11}\text{B}$ 後所發生的轉變我們也研究得很多，牠

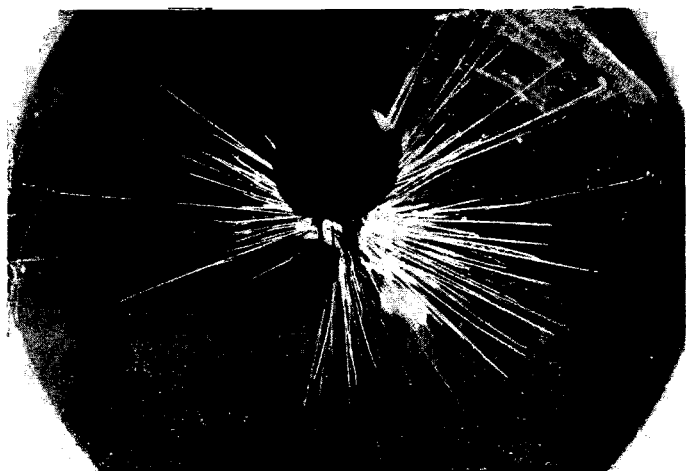
用質子(${}^1_1\text{H}$),中子(${}^1_0\text{n}$),重質子(${}^3_2\text{H}$),與 α 質點(${}^4_2\text{He}$)轟擊鋰所發生的轉變。

${}^6\text{Li}$ 同位素:	放出的能量 (單位:百萬電子伏特)	附 註
${}^6_3\text{Li} + {}^1_1\text{H} \rightarrow {}^4_2\text{He} + {}^3_2\text{He}$	3.6	
${}^6_3\text{Li} + {}^1_0\text{n} \rightarrow {}^4_2\text{He} + {}^3_1\text{H}$	4.7	
${}^6_3\text{Li} + {}^3_2\text{H} \rightarrow \begin{cases} {}^7_3\text{Li} + {}^1_1\text{H} \\ {}^4_2\text{He} + {}^4_2\text{He} \end{cases}$	5.0 22	
${}^7\text{Li}$ 同位素:		
${}^7_3\text{Li} + {}^1_1\text{H} \rightarrow \begin{cases} {}^4_2\text{He} + {}^4_2\text{He} \\ {}^4_2\text{Be} + h\nu \end{cases}$	17	均一 γ 射線
或 ${}^7_3\text{Li} + {}^1_1\text{H} \rightarrow {}^4_2\text{He} + {}^4_2\text{He} + h\nu$	$h\nu = 17$	
${}^7_3\text{Li} + {}^3_2\text{H} \rightarrow \begin{cases} {}^8_4\text{He} + {}^2_2\text{He} + {}^1_0\text{n} \\ {}^4_2\text{Be} + {}^1_0\text{n} \end{cases}$	14.6 14?	連續散佈中子 均一羣
${}^7_3\text{Li} + {}^3_2\text{H} \rightarrow \textcircled{{}^8_3\text{Li}} + {}^1_1\text{H}$?	惟質子羣 尚未觀察得
${}^7_3\text{Li} + {}^4_2\text{He} \rightarrow {}^1_2\text{B} + {}^1_0\text{n}$	-3	慢中子

在這些反應中,可以產生質子,中子, ${}^3_1\text{H}$, ${}^3_2\text{He}$, ${}^4_2\text{He}$, $\textcircled{{}^8_3\text{Li}}$, ${}^4_2\text{Be}$, ${}^1_2\text{B}$, 及 γ 射線。

用圓圈作記號的鋰同位素 $\textcircled{{}^8_3\text{Li}}$ 是有放射性的,牠的半變期是 0.8 秒。牠分裂時放出高速 β 質點,還有一點值得注意的,就是用質子去轟擊 ${}^7\text{Li}$ 也可以放出能量大到一千七百萬伏特的強的 γ 射線,這是所有的轉變中所沒有過的。

生成一個 ${}^{12}\text{C}$ 的核,然後分裂成三個 α 質點。狄同計伯脫證實了其中主要的轉變是分三部份進行。最初是放出一個 α 質點,剩餘一個能量過剩的 ${}^8\text{Be}$ 核,經過一個極短的時間, ${}^8\text{Be}$ 又分裂成兩個 α 質點。因為技術上的困難,所以在一個單獨的轉變

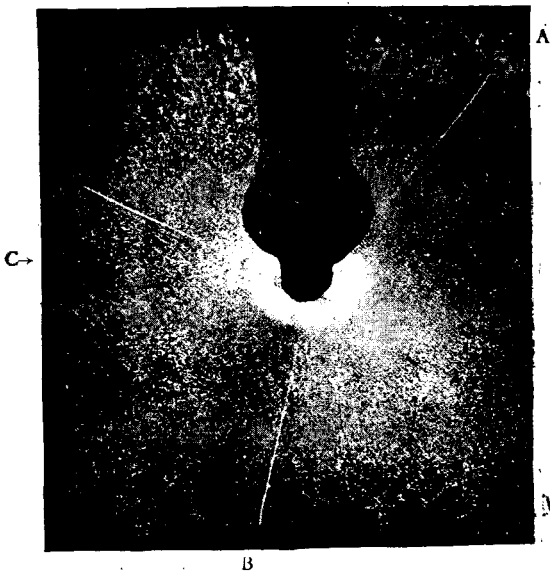


照片十一（狄奧華爾頓攝）

用人工加速重質子轟炸鋰所產生的 α 質點的徑跡。 ${}^6_3\text{Li} + {}^1_1\text{H} \rightarrow {}^4_2\text{He} + {}^3_2\text{He}$ 。 α 質點的射距等於 13.4 厘米。 ${}^7_3\text{Li} + {}^2_1\text{H} \rightarrow {}^4_2\text{He} + {}^4_2\text{He} + {}^1_0\text{n}$ 中所產生的 α 質點的射距可以大到 8 厘米。

作用中很不容易同時在照片上看到三個 α 質點。照片十二是一張極寶貴的照片，在那上面我們可以看到三個 α 質點的徑跡。這三個質點應該在一個平面上。而且牠們動能的總和就等於反應中所放出的能量。 ${}^{10}\text{B}$ 同 ${}^{11}\text{B}$ 用重質子轟擊後所發生的轉變情形，極其複雜，各種速度不同的質子羣以及 α 質點都會放射出來。

雖然想簡單敘述各種不同的高速質點轟擊元素所得的結果，恐怕也要費很長的時間。作者僅願提出一些特別有趣的轉變作用來談談。最簡單而可能的情形，就是用重質子去轟擊重氫 (${}^2\text{D}$) 的結果。這兩種質點結合應該是產生一個 ${}^4\text{He}$ 核，不過牠所含的能量極大。所以頓時依兩種不同的方式分裂，第

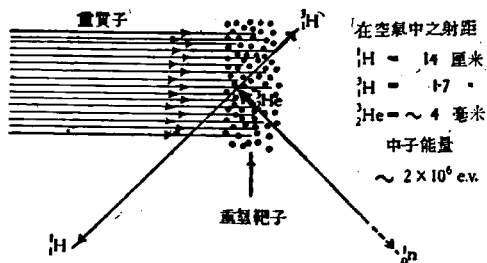


照片十二 (狄與計伯脫攝)

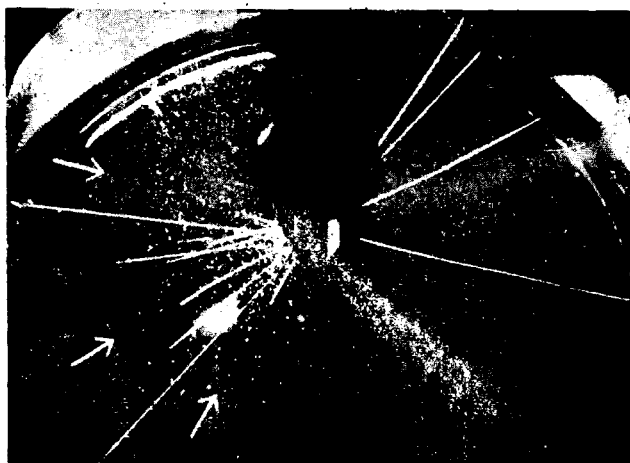
用質子轟炸硼所產生的三個 α 質點 (${}^1_1\text{B} + {}^1_1\text{H} \rightarrow 3{}^4_2\text{He}$)，
 照片中中部之細線即硼靶子。 α 質點 A, B 放出時之方向相反，
 第三 α 質點, C, 因接受能量小, 故僅能超脫散射之質子。

八圖中說明這種情形。一種情形是核分裂為一個高速質子和一個質量為三的氫同位素 (${}^3\text{H}$)。另一種情形就是分裂成一個高速中子和一個質量為三的氦核，假若用來轟擊的重質子的能量比反應中所放出的能量小，那麼這兩種射出的質點應該互相向相反的方向推斥開。照片十三中表現得很清楚。頂長的路線是屬於質子的，較短的屬於 ${}^3\text{H}$ 核。

僅僅用兩萬伏特的電壓去加速重質子，就可以將這種轉變檢查出來。如果用去射擊的重質子的能量大，那麼轉變的



第八圖 用重質子轟炸重氫所發生之蛻變。在十萬伏特時用二百萬左右的重質子去轟炸純重氫靶子纔可以發生這二作用中的一個。



照片十三 (狄攝)

用人工加速重質子轟炸重氫，產生兩個質點， ${}^3_1\text{H}$ 與 ${}^4_2\text{He}$ ，向相反方向射出。 $({}^3_1\text{H} + {}^3_1\text{H} \rightarrow {}^4_2\text{He} + {}^3_1\text{H})$ 。 ${}^3_1\text{H}$ 徑跡的射距為 1.6 厘米(靶子左方)。相反方向的質子的射距為 15 厘米。

元素的量也當然很快的隨着增多。這種形式的轉變是低級轟炸能力中已知最有效的，並且在實驗方面，牠可以供給我們能

量大到二百四十萬伏特的中子流，以及能量為三百萬伏特的質子流。

這種有趣的轉變是屬於最簡單而可能的一類，最初為奧利芬及哈戴克 (Harteck) 所研究，結果便發現質量為三的氫同位素，以及一種氦的新同位素，質量也是三。

這兩種同位素的質量，可以利用轉變反應中放出的能量，很精確的計算出來。我們且來談談 ${}^3\text{H}$ 的質量是如何計算的，也是極有趣的事。假若是服從能量不減定律的話，那麼也必有下面一個核質量的關係：

$${}^2\text{H} + {}^2\text{H} = {}^1\text{H} + {}^3\text{H} + E,$$

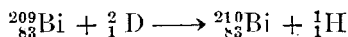
$$2.0147 \quad 2.0147 \quad 1.0081 \quad 3\text{H} + 0.0042,$$

這裏的 E 是轉變反應中所放出與質量相當的能量。 E 的數值是從質子在空氣中的射距推演出來的 (14.70 厘米)，牠的能量是二百九十八萬伏特。因為牠也服從動定律，所以放出來的總能量的四分之三是屬於質子的動能。放出來的總能 E 求得是三百九十七萬伏特。根據愛因斯坦的理論，質和能是相當的，一個系中減少了質量 dm ，就相當於放出能量 c^2dm ， c 是光速。這種關係已由許多情形證明是完全正確。證明的方法同上，已知轉變反應中所有原子的質量，放出三百九十七萬伏特的能量，就相當於 0.0042 的原子質量。若在上列方程式的兩邊用原子質量代替核質量，方程式仍舊可以成立。阿斯通 (Aston) 用質譜法找到的氫和重氫的原子質量，記在符號下端，爲了使方程式兩邊平衡，那麼 ${}^3\text{H}$ 的質量就應該是 3.0171。

相類似的，藉了測定第二種方程式的轉變中放出的高速中子的能量，可以知道 ${}^3\text{He}$ 的質量等於 3.0171，與 ${}^3\text{H}$ 的質

量相同，我們有理由相信用這種方法得出來的原子質量是正確的。例如，用質子轟擊 ${}^6\text{Li}$ ，便得到 ${}^3\text{He}$ ，（見前表）。從這個反應中去計算 ${}^3\text{He}$ 的質量，牠的結果也與上面所得的相符合。

最後，我還要稍稍提到勞蘭斯教授和他的同事們所作的一些重要發現。他們用的是從電磁加速器獲得的能量高到六百萬伏特的高速重質子。假若用高速重質子去轟擊鉍，就產生鉍的放射性同位素，這個同位素與放射性產物鐳 E 各方面都相似。這從鉍生成的放射體不僅放射 β 質點，而且牠的衰變期也完全與鐳 E 相同，但牠也可以產生 α 射線，這便與鈾（鐳 F）相似。轉變的內容如下：



如前面第一圖所示，鐳 E 就是質量為 210 的鉍的同位素。這樣用人工方法去證實一個天然放射體的產物，實在具有極大的興趣與重要性。

這裏還要提到另一個轉變，而且也是具有極大技術上的價值的。當質量為 23 的鈉（或普通食鹽）用高速重質子去射擊，便生成一種質量為 24 的鈉的放射性同位素——放射性鈉，而且放出質子。放射性鈉分裂放出 β 質點，生成安定的鎂 24 核。放射性鈉的半變期是十五小時，每一個放射性鈉除了放射一個 β 質點外，還放出一種高能量 γ 射線。這種 γ 射線的穿透力與鐳及鐳的產物平衡時所生的 γ 射線一樣強。勞蘭斯教授業已用這種方法製得放射性鈉，而且牠的 γ 放射強度相當於一克鐳所放射的那樣強，因此這種人工製備的 γ 射線來源可能會在治療上取代了鐳的地位。

γ 射線的轉變

到現在為止，我們已認為用高速質點轟擊物質是研究元素轉變的一種最有效的方法，對於重元素，我們知道，慢中子也是極端有效的轉變劑。但是有時候，我們也希望用高能量 γ 輻射去產生轉變。蔡德維同哥哈伯 (Goldhaber) 最近已經能夠用 γ 射線將重質子擊破為一個質子同一個中子。這時候 γ 射線的能量當然需要比中子和質子的結合力強纔行。牠的能量約為二百三十萬伏特。相類似的，齊拉德 (Szilard) 還發現，用能量稍大於一百萬伏特的 γ 射線將 ^9Be 轉變為 ^8Be 和一個中子。這種轉變的新方法，也許在別種情形中也有效。祇要我們有充分強的高能量 γ 輻射的來源就行。

結 論

最近幾年來，元素轉變的知識進步得非常快，祇要有適當的轉變劑，差不多所有的元素都可以轉變。下列事實也很有趣，用高速中子轟擊鉑可以得到一種金的同位素，不過我們還不知道所用的鉑同位素是那一種。我們現在已經有五十種以上的新放射性物質。牠們都代表一些元素的不安定同位素，牠們也許在太陽上存在，但是在地球上一冷卻便沒有了。錘和鈦是許多放射性元素中僅有的遺族，也許因為牠們的半變期太長的緣故，這個時間差不多比地球的年紀還要大。我們還有更多的工作，那就是去決定許多轉變作用的準確性質。現有的知識已充份指出，高速射體可以產生許多轉變作用。同位素多的元素，其可能發生的轉變也多。普遍的講，所有轉變發生的時候，質量雖然發生了變化，不過電荷與能量總是不滅的。各種形式轉變的情形，可以大不相同。在大多數轉變中，不安定的

核常常破例放出兩個質點，有時放射 γ 射線，但是輕元素卻不同，牠們破裂放出三個質點。由於這方面的研究，結果發現不少新的安定同位素。例如 ^3H ， ^3He ， ^8Be ， ^{10}Be ，都是我們至今還沒有在自然界裏碰到過的。再者，我們也發現了不少新的基本質點，包括中子，質子， α 質點及正子。

轉變作用的產物，通常均為量極微，產生的物質，很少可以看得到或者可以稱量的。不過我們對於轉變作用所產生的飛躍質點的檢查方法，卻是極端靈敏，甚至於一個微量的轉變，也可以在我們的量度儀器上發生一個很大的效應。這種檢查和分析的方法，比轉變出大量的物質來，再去用普通化學方法分析還要準確得多。

普遍講來，當我們把元素作成一厚層去用轟炸的方法產生轉變時，假若轟擊質點的能量增加，那麼所得的產量也會大大的增加。有時候，質點的能量不達一個相當高的值，轉變的痕跡便根本看不出。假若質點的能量超過這個界限值，轉變的量便大為增加。用去轟擊輕的元素，如重氫及鋰的質點的能量要高到二萬伏特左右，轉變纔能開始觀察到。但是一般講來，要使轉變可以觀察出來，那麼轟擊質點的能量還需要高些，若是被射擊元素的原子序數愈大。那麼轟擊質點的能量也要愈大。

我們看到，這種種情形對於中子都不適合，因為在大部份情形中，當中子的能量低的時候（低到不足一個伏特，簡直與分子的熱能差不多大小）轉變的量反而最大。我們相信，每個慢中子穿透一個元素，例如硼的時候，差不多完全是在使硼的核去轉變（見前）或許中子在空氣中的獨立生命極短促，因為牠會很快的被氮及氧的原子核捕獲，發生元素轉變。因此要想

在空氣中花任何長的時間去收集任何少量的中子，都是不可能的。

我們早已討論過，天然放射體的原子自動轉變的時候能夠放出大量的能。有時候，用質子或重質子去發生人工轉變，每個蛻變原子所放出的能量甚至還比天然放射體的更大。例如，用重質子去轉變鋰 6 原子，可以放出能量二千二百五十萬伏特，差不多比任何放射性原子蛻變時放出的能量要大兩倍。因為兩萬伏特的重質子便可以發生轉變，所以很明顯的，每單個程序都獲得了大量的能。另一方面，一萬萬個重質子中纔僅有一個是有效的，所以整個講起來，轉變作用中供子的能是比放出的能大得多。甚至於就是讓轉變程序的總效應隨射擊的能量而增加，但是我們在這種程序中想要從原子獲得有用的能，也不可能。有時候，驟看中子轉變某種元素時能夠放出大量的能，在這一方面似乎極有希望，但是我們應記住，中子本身也要靠極費能量的轉變程序去產生，所以要想在人工轉變程序中從原子去獲得有用的能量，並無多大希望。（此語現已不確，因爵士著此書時尚未發現 nuclear fission。未料二次大戰已促使我人對原子能之利用加以研究而製成原子彈矣——譯者註。）

原子核自成一天下，其中有許多質點，如質子及中子，被我們尙未知的一種強大力量束禁在一個極小的體積裏面。現在大家都用這種概念去解釋原子核的構造。而且在幾個簡單的例子中，已有了相當的成功。實際上，我們離開了解這複雜原子核構造的度還極遠。我們絲毫講不出理由，為什麼原子核在某種情形下便破裂。波力學(wave mechanics)可以很順利的解釋原子外圍的電子構造，因為各個電子都是分開的。但

是這種理論卻不能應用到複雜的原子核上去。因為在牠這樣小的空間裏，而有那樣濃集的大質量。爲了要克服這些困難，波耳曾建議一個更普遍的形式，他把核當作是一些不可分割的質點集團，牠整個可以振動，而且有極明顯的能量水平。這種新觀點，預料在將來必定有希望。現在所得的一些關於元素轉變的數據 (data)，已確能幫助我們解決這個最困難而又最基本的問題。

我們從轉變所得到的知識，也能幫助我們在另一方有所建樹。在一個高溫星球，譬如我們的太陽，牠的內部溫度極高，因此其中質子，中子以及其他質點必須要有充分大的速度，纔能去轉變太陽中的物質。在這種不斷的轟擊之下，必定有許多原子生成，和許多其他種原子蛻變。隨時可以達到暫時的平衡。從元素在地球上存量的知識，我們便能有一個概念，想像三十萬萬年以前，當地球剛從太陽分離出來時的大概構造。假若轉變的知識再進步，我們便可以了解各種元素在地球上的存量，以及爲什麼原子序數爲偶數的元素常常比原子序數爲單數的要多。因此我們可以看到，新煉金術的進步，不僅增加了我們對於元素的知識，而且告訴了我們，這些元素在宇宙間的存量。

