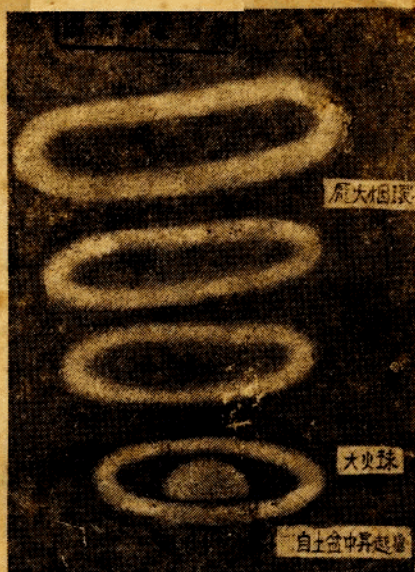


美 國

原子炸彈研究報告

兵工叢書之一

原子彈爆炸情況：



一個巨大的火球上昇，宛如

從地底湧起，並有白色大烟環噴

出。同時爆炸聲連發，聲聲如巨

砲之怒吼。

兵 工 署 印

原子炸彈研究報告目次

原著 Henry D. Smyth

翻譯 吳大猷

校閱 張其耀

第一章 緒言.....	1
第二章 問題之敘述.....	22
第三章 至一九一四年十二月之行政的歷史.....	31
第四章 一九四一年十二月以前之進展.....	39
第五章 一九四二至一九四五年行政歷史.....	55
第六章 一九四二年芝加哥之冶金計劃.....	65
第七章 一九四三年二月之鍍製造問題.....	79
第八章 1943年1月至1945年6月鍍之問題.....	94
第九章 同位素分離法概論.....	112
第十章 利用氣體擴散鈾同位素之分離.....	124
第十一章 鈾同位素之電磁分離法.....	135
第十二章 關於原子彈之工作.....	148

357

Gx18

第十三章 總論.....	160
附錄一 觀察由原子核反應所生快速微子之方法.....	163
附錄二 質量電荷與能量之單位.....	169
附錄三 鈾分裂中之延遲中子.....	171
附錄四 第一個自給鏈狀反應堆.....	174
附錄五 報告之彙錄.....	179

第一章

緒言

1.1. 自 1940 年始，國內科學與技術之進展，趨於原子能之應用於軍事。本文之目的，即敘述其進展情況，雖非通俗作品，然使科學家、工程師、與化學及物理具有良好基礎之大學畢業生，易於瞭解，是所願望。緒言所論及者，以質量與能量之相當為準則。

質量不減與能量不減

1.2. 近代科學以二原理為基礎：一為質量不減定律，起於十八世紀，為習化學者所熟稔，即物質不能創造，亦不能毀滅，祇容有形式之變換；另一則為能量不減定律，起於十九世紀，迄今仍為「永久運動機器」發明者之障礙，即能量不能創造，亦不能毀滅，祇容有形式之變換。

1.3. 此二原理已不絕導引及規劃科學之進展與應用，直至五年前左右，二者於實用時，均各自分開，而未有更改。刻下雖於大部實用方面，一仍其舊，然吾人已知此二者，實一單獨原理之兩種說法。蓋吾人已發現能量與質量可相互轉變，而此轉變，特別於鈾原子核分裂之現象內，可為人所覺察。鈾分裂時，原子核裂為碎片，且放出大量之能。是類能之應用於軍事，實為此報告中所述之研究與生產計劃之目標。

質量與能量之相當

1.4. 相對論發展之初期，業已獲得一結論，即運動物體，於其速度增加，亦即動能增加時，質量亦隨之增加。且二者增加量之間，實含有某相當關係。多數工程師與應用物理學家，認此點係數學之想像，缺乏實用之重要性；雖愛因斯坦本人亦未能預測今

日之用途。然遠在1905年，愛氏即明白陳述質量與能量之相當關係；並謂此關係之證明，可由放射體之研究得之。愛氏之結論，以為能量 E ，相當於質量 m ，而以下式表示其關係：

$$E = mC^2$$

C 為光線之速度。設以實際數字代入，則其使人驚異之特質顯然可見。吾人發現一公斤（2.2磅）之物質，若全然變為能量，則將得二百五十億瓦一時之能量，與1939年美國全部電工工業，連續發動二月所得之能量相等。更不防將此駭人之數字，與燃燒同重之煤而得之熱量8.5瓦一時兩相比較。

1.5. 此類轉變數字之龐大，引起數方面之尋味：其一足以解釋質量與能量之相當關係，緣何未能於尋常之化學燃燒中覺察？吾人今日愈信，於此類燃燒中，隨熱量之發散，質量亦因之減少，然減少之量，即最精密之天秤亦無法測定之（一克分子之物質，僅減少約十億分之一克）。其二乃使人明白何以人類所知悉之各種演變中，尚無使人注意之數釐之物質，已被轉變為能量，因吾人迄未知有如是龐大能量之於任一變化中產生。尤有進者，於各種實際辦法中，發動或控制此種轉變之可能性，亦顯屬渺茫。最後則為質量與能量相當關係式中所乘之因子大小問題，已促使哲學家、物理學家、工程師、與天文學家之沉重思慮，經歷二十五年，終未有實驗之直接證據以支持之。迄1930年，是項證據始先後紛然而出。於討論各種實驗證據，及實際方面物質如何局部轉變為能量之主題前，吾人將對原子與原子核物理之基礎作一複習。關於物質之原子性質與電子之存在，茲設吾人多已熟悉。刻所論者，不過一大綱而已，若欲求其詳，可參閱 Pollard 與 Davison 二氏合著之 *Applied Nuclear Physics*，以及 Stranathan 氏所著之 *The Particles of Nuclear Physics*。

放射性與原子構造

1.6. 最初之放射現象，係 H. Becquerel 氏於1896年所發現，嗣後復經 Pierre 與 Marie Curie, E. Rutherford, 及其他諸氏之研究，遂使成放射現象，於原子構造之一般定律之發現，及質量與能量間相當關係之證明，佔一重要地位。

放射體之電離作用

1.7. 最初發現之放射現象，為含鈾礦物之使底片感光。雖則此種作用，仍多少用於放射性之研究，然放射體之具有絕大科學價值之性質，厥為其能使氣體電離。平時空氣或其他氣體，並不導電——不然，電線與電機，將不能曝露於空中矣——但於某種情況時，空氣之分子，分裂為負有陰電荷與陽電荷之碎粒，稱為離子；此種電離狀態下之空氣，則能導電。Bequerel 氏於最初發現放射性後數月內，即發覺鈾具有使空氣電離之能力；彼將含鈾之鹽類置於驗電器近傍，後者之電荷，即經空氣疾速漏去。（將足量之放射體置於蓄電器近傍，亦有同一現象產生。）自彼時以還，驗電器之放電速率，恆用以測定放射性之強度。今日用作研究放射現象之儀器，幾乎全部直接或間接與此種電離作用有關。關於此項儀器，有 Electroscopes, Geiger-Muller Counters, ionization Chambers, 與 Wilson Cloud Chambers, 其大概說明，見附錄 I。

不同之射線或微子

1.8. 不同之放射體，其電離力之種類與強度亦各相異，是足以表示放出之「射線」並不盡同。某些射線之貫穿力遠較他者為優，故兩種放射體，雖對於無障隔驗電器之效應相等，然對於有障隔驗電器，則可全然不同。所謂有障隔者，即將柵障置於放射體與驗電器之間，而此類柵障，恆被視為可以吸收射線者。

1.9. 由吸收或其他現象觀察所得，吾人知有三類射線由放射體射出；即 α 微子，係高速度帶電之氦原子（實際係氦之原子核）； β 微子，係高速度之電子；與 γ 線，係電磁性射線，類似 X 光。三類中僅 γ 線可正式稱為射線；然因其波長甚短，故作用亦與微子相似。此種微子，或 γ 射線之量子，稱作光子。通常 γ 線之貫穿力最為銳利， α 與 β 線較差；然後二者之動能却甚大。以之與作熱運動之氣體分子相較，大達數千倍；較化學反應中原子變遷之能量，亦大達數千倍。故愛因斯坦認為放射性之探究可證明質量與能量間之相當關係。

原 子

1.10. 於考慮何種類型之原子，放射 α ， β 或 γ 線，以及關於此種放射性之若干定律前，吾人將敘述有關於原子構造之觀念。此觀念之一部分，實基於放射性之研究。

1.11. 根據吾人今日之看法，任一原子含有一小而且重之原子核，其直徑約為 10^{-12} 浬；周圍為一廣大之空曠區，直徑為 10^{-8} 浬。電子運動於此區域內，似行星之繞日。原子核負有整數之正電荷，每一電荷之大小為 1.6×10^{-19} 庫倫（參閱附錄 2，單位之討論）。每一電子，負有一負電荷，其大小亦如之。而圍繞原子核之電子數，與原子核之正電荷數相等，如是則整個原子之電荷為零。

1.12. 原子序數與電子構造 原子核內之正電荷數，稱為原子序數， Z 。原子序數決定原子核外之電子數，同時亦決定原子之化學性質。因此某一化學元素之所有原子，均具有相同原子序數；反之，所有原子之具有相同原子序數者，為同一元素之原子，不論其原子核之構造是否相同。原子核外之電子，根據確定之定律，排列成數層。外部電子有變動時，即有光譜出現；貼近原子核之電子有變動時，即有 X 光出現。一元素之化學性質，繫於最外層之電子。化合物之形成，此等電子之構造，即有若干改變。因此，當氧化、燃燒、爆炸或其他化學方法產生能量時，此種能量即由該項電子構造之改變而得。變化後之產物，其電子之排列，必含有較低之能量（最後產物之總質量，亦相應而減低；但減低極微，不易測得）。原子核始終不為化學方法所影響。

1.13. 質量數 不僅原子核內之正電荷為一整數，即原子核之質量，亦恆近似一基本質量單位之整倍數。而此基本單位，大概為一質子之質量，亦即氫原子核之質量（參閱附錄 2）。此種整倍數，稱為質量數， A 。除氫與氦之稀有同位素外，元素之質量數至少為其原子序數之二倍。因質子之質量約 1800 倍於電子，故原子核幾乎代表整個原子之質量。

1.14. 同位素與同重素 兩類原子有相同之原子序數與不同之質量數時，則稱為同位素。彼等之化學性質盡同，僅係同一元素之兩種類型。設兩類原子有相同之質量數，

而其原子序數不同時，則稱爲同重素，彼等係全然相異之化學元素。

放射性與原子核變化

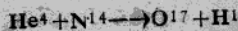
1.15. 設一原子放射一 α 微子（其原子序數爲2，質量爲4），而變爲另一元素之原子時，其原子序數減少二，質量數減少四，若一原子核放射一 β 微子，原子序數即增加一，而質量數則不變。於某種情形時，此類變化恆伴有 γ 線之放射。凡元素之能自動變化或分解如上述情形者，恆不穩定，而可謂之放射性元素。元素之具有放射 α 或 β 微子之性質者，均具有甚大之原子序數與質量數（有少數例外），如鈾、釷、鐳與錒，彼等皆已知具有最複雜原子核構造之元素。

半生命期與放射系

1.16. 某一放射物之所有原子，於某一時間內，起分解之或然率均相同。任何可以計量之該放射物，因其中即含有若干兆之原子，故恆以同一速率變化或分解。此種物質變化之速率，常以「半生命期」表示之，即謂原子總數分裂至原數之一半所需之時間。同一放射物之半生命期相同，異種放射物則相異，可自若干份之一秒，以迄百十億年，前者爲最不穩定者，後者則爲稍不穩定者。通常已放射後之原子核，仍可具放射性，如是不斷演進，以迄最後之原子核爲一穩定者爲止。放射物可如上之演變，分爲三族或三系，包括四十種不同之放射物。首爲鐳系，自鈾之一種同位素開始；次爲錒系，自鈾之另一同位素開始；再次爲釷系，自釷開始。每一系之最後產物，爲一鉛之穩定同位素。

原子核分解之首次顯示

1.17. 二十世紀初葉，破壞尋常原子核之穩定性，或變更自然放射性原子核之分解速率，二者均未有所成就。直至1919年，Rutherford氏始首次顯示，高能量之 α 微子，能使尋常之原子核發生變化。彼試以 α 微子之衝擊，使氮原子核變爲氧原子核而獲得成功。變化之過程表之於下：



此意即一具有質量數4之氦原子核(即 α 微子)，衝擊一具有質量數14之氮原子核而得一具有質量數17之氧原子核與質量數1之氫原子核。氦原子核通稱 α 微子，具有特別之重要性，因其為原子核中之含有最小質量者。 α 微子雖於自然放射之程序中並不出現，然有更直接之證明，彼能由原核子中被擊而出。

中 子

1.18. 自 Rutherford 氏工作後之十年間，頗多類似之實驗，而獲得類似之結果。由其中之一組實驗，而有中子之發現。茲將對此作較詳盡之討論，蓋中子實為本文之要旨也。

1.19. 1930年，德國之 W. Bothe 與 H. Becker 二氏發現，設將鈷元素自然放射之含能頗大之 α 微子，射擊某種輕元素，如鋁、硼、或鋇，恆能產生透射性極強之放射線。雖然其貫穿力遠較任何 γ 線為優，同時實驗結果之詳情亦殊按此解釋，然最初此射線却被視作 γ 線。後於此之重要貢獻，為1932年 Irene Curie 氏與 F. Joliot 氏於巴黎所發表者，彼等證明此種未名之射線，落於蠟或他種含氫化合物中，則放出高能量之 α 微子。此點雖與假定此射線為 γ 線之性質並不悖逆；然對於實驗結果，加以周密之定量分析時，則對此假定益增困難。最後，於1932年末，J. Chadwick 氏在英國作一組實驗，證明 γ 線之假定為無稽。渠認為此新射線實包含無電荷之微子，質量頗與質子相近。同時渠又作一組實驗，證明其說之正確。此種不帶電荷之微子，今日稱作中子。

1.20. 中子之一特徵，與他種原子內之微子迥異者，為其不載電荷。因此特徵，使其遲被發現，使其貫穿力銳利，使其不能直接被觀察，並使其成為原子核變化中之重要物。誠然一原子之於正常情況下亦不荷電，然由原子之大萬倍於中子，並具有一複雜系統(即具負電之電子，散佈於正電荷之原子核四圍之空間)。一切荷電之微子(如質子、電子、或 α 微子)，與電磁性放射線(如 γ 線)，於經過物質時，能量即消失。因彼等之電力作用，使其所經過之物質之原子電離(此種作用，一如電花與閃電之使空氣電化)。電離作用所需之能量，與荷電微子或 γ 線所消失之能量相等。此時荷電微子之速

率，即因之變慢； γ 線則被吸收。中子却不然，渠不受電力之作用，而僅為短程力影響，即當中子確然貼近原子核時，此力始奏功，克服正電荷間之相互排斥力，而使彼等團聚一處，組成一原子核者，亦即此等力。中子與原子核撞擊前，恆能通行無阻。因原子核甚小，此種撞擊不常見，故中子能經一較長之途程，始遇撞擊。在彈性撞擊情形下，則通常用於彈子之彈性撞擊上之諸動量定律，於此亦可應用。設被撞擊之原子核甚重，則該原子核得一較小之速率；若被撞擊者為一質子，因其質量與中子相仿，故得一較大之速率而被射出，該速率佔中子原來速率之甚大份數。而就中子本身言，則其速率變慢。由於此種射撞擊而被拋射出之物，吾人可加以檢驗；蓋以彼等載有電荷，且能產生電離作用。中子不載電，不僅檢驗困難，且難於控制。載電之微子，可以電場或磁場使其加速、減速、或變向；而電場磁場對於中子則毫無作用。此外，自由之中子僅可由原子核分解得之，無自然之來源；吾人所能加諸中子之唯一控制，即置原子核於其前進之途程中，如是則因撞擊能使其減低速率與變向，或被吸收。此類作用，於實際用途，實具有絕大之重要性（見下文）。

正子與重氫子

1.21. 1932年發現者不僅中子，尚有正子。正子為加州理工學院C. D. Anderson氏首先發現，其質量與電荷均與電子相同，惟其所荷之電為正而非負。正子為人工放射性原子核所放出之一種微子，吾人於此不再詳論。

1.22. 1932年尚有一重要發現，H. C. Urey, F. G. Brickwedde與G. M. Murphy諸氏發現氫之一同位素，其質量數為2。5000份之自然氫中，有其一份存在。因其特殊之重要性，此種重型之氫定名為重氫，而稱其原子核為重氫子。重氫子非一基本微子，然於某數種產生原子核分解之方法中，佔一重要地位，如 α 微子然。

原子核構造

1.23. 關於所有元素，均由少數基本微子構成，此說由來已久，今且已加確立。吾

人咸信此種基本微子有三——中子、質子、與電子、一完備之討論，尚須包括提及之正子與尚未討論之 Mesotron 與 Neutrino。前所論及之重氫子與 α 微子，均為重要之複雜離子。

1.24. 按照吾人晚近之看法，所有元素之原子核，均由中子與質子組成。質子之數與原子序數 Z 相等，中子之數等於質量數 A 與原子序數之差，亦即 $A-Z$ 。茲有二組力，作用於此微子間，即諸正電荷間相斥之庫倫力，與諸微子間相互吸引之短射程力。吾人對後者，僅有部分之瞭解，今不擬討論之。然吾人可謂此類相引與相斥力所組成之影響，僅有某些中子與質子之組合為穩定者。設中子與質子之數不多時，則當二者之數相等而趨穩定。對較大原子核言，於維持穩定狀態時，中子所佔之份數須較大。位於週期表末之元素，當質子數超過90，而中子數超過一百五十時，則無一具有完全穩定之原子核（有數種重原子核，由其甚長之半生命期觀之，則幾屬穩定）。設以人工方法，加入一額外質子或中子，造成一不穩定原子核，則最後必有一趨於穩定之變化出現。頗足奇異者，即此種變化並非放出一質子或中子，而係放出一電子或正子。顯然於原子核中，一質子已轉變為一中子與正子（或一中子已轉變為一質子與電子）。而載電之較輕微子，乃被放出。易言之，質量數仍保持不變，惟原子序數則更易。穩定條件對於某一質量數，並非異常精密，即予以一質子與中子之總數，二者可有數種不同之安排（至多三或五），以成數種不同之同重素。對於某一原子序數言，即對於所予質子之數言，其穩定條件尤為廣泛。數種重元素，可有十或十二種多之穩定同位素。現已確定，約有二百五十種不同之穩定原子核，其質量數自一以至二百三十八，原子序數則自一以至九十二。

1.25. 所有吾人已陳述者，均基於實驗之證明。雖原子核力之學說，仍未臻於善境；然已由量子力學，加以充分發展，非惟足以解釋上述之各種觀測結果，且對於人工放射性方面，以及具有奇數與偶數質量數之原子核二者間之差異方面，更精細之實驗記錄，均可解釋。

人工放射性

1.26. 以上各節，已論及因原子核穩定之需求，而放出正子與電子。關於電子之放射(β 線)，吾人於研究自然放射體時，早已熟稔。然於此種放射情形中，並未有正子放射。實則上所論述者，一部分係根據此報告所不能陳述之報導。然吾人仍將對人工放射性之發現，與目前對此所知悉者，作一概述。

1.27. 1934年時，Curie與Joliot夫婦報告稱某種輕元素(硼、鎂、鋁)，經 α 微子所撞擊，造成放射狀態之硼、鎂、與鋁。二氏且曾實際測量其半生命期為14分、2.5分、與3.25分。

1.28. 此結果引起全世界進行類似性質之實驗。E. Fermi氏認為中子以其不載電荷故，對於貫穿原子核之作用，應最著成效，尤以所欲貫穿之原子核具有較高之原子序數時為然，蓋因後者排斥質子與 α 微子甚烈也。渠旋即證實其預言，發現被撞擊原子之原子核，執獲中子後，而形成之不穩定原子核，恆能放出電子而獲得穩定。是以最後之穩定原子核，其質量必較最初用作撞擊目標之原子核，多一單位，其原子序數亦然。

1.29. 自1934年以還，無數實驗結果，幾乎可產生週期表中每一元素之放射性同位素。其中數種以放射正子而恢復穩定，亦有放射電子而恢復者，亦有因執獲K電子而穩定者。此法吾人將不討論之。此外尚有一小部分(可能為三種)，以放射 α 微子而趨於穩定。總計已被觀測之不穩定原子核，約有五百種，其原子序數與質量數大都被確定。

1.30. 此類人工放射性元素，不僅於吾人所注意之計劃中，確佔一重要地位。即於藥物方面，「tracer」化學方面，及其他多種研究領域內，其未來價值，不可限量也。

能量之攷慮

原子核之束縛能量

1.31. 於敘述放射性與原子構造時，吾人曲意避免數目字，且未曾提及作為本文主

題之質量與能量相當關係之任何應用。茲已屆陳述數量詳情之時，不僅普遍原理而已也。

1.32. 吾人已道及穩定與不穩定之原子核，由一羣質子與中子組成，因原子核之力而團聚。按物理學普遍原理，於破壞一穩定組織時，必需作相當之功。是以一羣質子與中子，於穩定狀態時，若欲將其分離，必需供給能量。設能量與質量確係相當，則穩定原子核之總質量，必較分開後之所有組成該原子核之質子與中子之總質量為少。此質量之差別，必相當於完全分解一原子核所需之能量。此能量稱為束縛能。吾人當憶會稱整個原子核之質量，係近似一整數。現具有重要意義者，即此與整數之細微差別。

1.33. 茲以 α 微子為例，彼之質量數為4，原子序數為2，含有兩質子與兩中子，性頗穩定。質子之質量為1.00758，中子為1.00893（參閱附錄2），是以氦原子核分解後，組合物之總質量為： $2 \times 1.00758 + 2 \times 1.00893 = 4.03302$

而氦原子核自身之質量為4.00280，略去最後兩位小數，吾人得4.033與4.003，其差別為0.030質量單位。此即表示質子與中子，在原子核中之束縛能量。實際0.030質量單位等於每一原子核有 4.5×10^{-6} 厄格；或每一克分子之氦，有 2.7×10^{19} 厄格。如以工程師或化學家所較熟悉之單位計算，則分裂一克氦之所有原子之原子核將需 1.6×10^{11} 克卡或190,000 瓦一時之能量。反之，若能將自由質子與中子合併成氦之原子核，則將產生此能量。

1.34. 合併中子與質子，或將一種原子核變形為另一原子核，以產生能量之可能性，顯屬最值得探討之事。吾人茲開始對目前關於各原子核之束縛能量之知識，一加深習。

質量譜與束縛能量

1.35. 化學上原子量之測定，係某一元素之大量原子之平均重量。除某元素祇具一同位素外，化學之原子量與個別原子之質量，不成比例。F. W. Aston 與其他人氏，改進 J. J. Thomsen 氏之較早之儀器，製成質量譜儀，可用以測量各同位素之質量。此種測量法，恰確定同位素之存在，並證明在原子量尺度上所有原子之質量，確均係近似

整數。此類實驗發現之整數，為吾人早已說明之質量數。同時該質量數表示質子與中子數之總和。渠等之發現，對於吾人目前以為所有原子核均係中子與質子組合而成之見解，實具有莫大貢獻。

1.36. 質量譜儀之最近結果，加以某少數情況下原子核反應之結果，已給予吾人以所有各種原子之束縛能量之精確數字。此種束縛能量 B ，等於原子核之實在質量 M ，與所有原子核中質子與中子質量之總和之差，即

$$B = (ZM_P + NM_N) - M$$

M_P 與 M_N 為質子與中子之質量， Z 為質子之數， $N = A - Z$ 為中子之數，而 M 為原子核之實在質量，吾人研究每一微子之束縛能量 $\frac{B}{A}$ ，較 B 本身更有意義。此類研究表示除輕原子核有若干之不規則外，每一微子之束縛能量，其一般趨勢為迅速增加，至 $A = 60$ (鎳) 而達最大值，此後再逐漸降落。故位於週期表中部之原子核——質量數自 40—100——其每微子之束縛能量為最大。任何原子反應，變化後原子核內微子之束縛能，若較變化前為大時，則放出能量。以熱化學之術語言之，此種變化為放熱反應。是以通常合併輕原子核，使成較重者；或分解甚重之原子核為二小碎粒時，恆能獲得能量。此外，位於週期表起首之十或十二位元素，具有特殊情形之放熱原子核分解現象。蓋因彼等每微子之束縛能量，由一元素至另一元素，常呈現不規則之變遷之故。

1.37. 截至此止，吾人似僅討論許多假定。吾人始而假定質量與能量為相當者；茲又假定原子核可被重新安排，其結果使總質量減少而放出能量，且此能量可資應用者。目前吾人將顯示若干實驗，促使物理學家深信所論各點之真實。

質量與能量相當關係之證明

1.38. 吾人曾述及，繼 Rutherford 氏 1919 年用人工方法，分解原子核之工作，有不少類似之實驗。因由於高電壓技術之漸次改進，使人工造成之高速度氦或氖離子，能代替自然之 α 微子。J. D. Cockcroft 與 E. T. S. Walton 二氏在 Rutherford 氏之實驗室中，首先以上項方法，產生原子核變化而獲得成功。1932 年，渠等以七十萬伏特

能量之質子，撞擊鋰原子。而發現此項撞擊，使 α 微子自此目標物射出。其發生之原子核變化，可以符號表之如下：



此處下角之符號，表示原子核之正電荷（原子序數）；上角之符號，則表示原子核所含之質量微子數（質量數）。一如化學反應中之情形，左端之數量相加應得右端之數量，是以每一端下角符號總數均為四而上角符號均為八。

1.39. 在此式中，質量與能量均未列入。通常投射之質子與放出之 α 微子，均具有動能。且二 α 微子之質量，並不能精確與質子及鋰原子質量之和相同。按理論，能量與質量之總和，於反應前後應相等。質量可由質量譜獲得，左端($\text{Li}^7 + \text{H}^1$)總計為8.0241，右端(2He^4)為8.0056，是以0.0185單位之質量，已於反應中消失。由實驗所測定， α 微子之動能每個約百萬電子伏特。投射質子之動能，遠小於此數，故可略而不計。是以0.0185單位質量消失，而17百萬電子伏特之動能因以出現。0.0185單位之質量為 3.07×10^{-26} 克，而17百萬電子伏特為 27.2×10^{-6} 厄格；C為光之速度，等於 3×10^{10} 裡秒（參閱附錄2）。將此數字代入愛因斯坦氏之公式 $E = mc^2$ ，則左端為 27.2×10^{-6} 厄格，是以吾人發現此式可以適用而相差甚微。易言之，此類實驗結果，證明質量與能量之關係，已為愛因斯坦言中而無誤。

原子核反應

原子核撞擊之方法

1.40. Cockcroft 氏與Walton 氏使氫氣電離，並以高電壓器增加離子之速度，因而獲得高能量之質子。同種方法亦可用於自重氫中產生重氫子，或自氦中產生高能量之 α 微子。更高之能量可以旋轉加速器或 Vande Graaff 機加速離子而得。但欲得高能量 γ 射線，或——最重要者——高能量中子時，則必須應用原子核反應自身作為來源。充分高能量之射線，乃自某數種自然放射物，或自某數種撞擊而得。普通獲得中子之

法，係以自然 α 微子撞擊某數種元素（如鈹或硼），亦有以質子或重氫子撞擊適當之原子而得者。最普通之中子來源係鐳與鈹之混合物。自鐳發出之 α 微子，射入 Be^9 之原子核，後者乃放出中子而變為穩定之 C^{12} 原子核（普通碳）。常用之中子射線，來源係由加速之重氫子，撞擊重水之冰而得。此處高速率之重氫子，撞擊重氫子而產生中子與 He^3 之原子核。其他數種反應亦可採用，其中包括重氫、鋰、鈹或硼諸元素作為撞擊之目標物。凡此反應中，總質量數與總電荷數始終不變，至可注意。

1.41. 綜言之，用作原子核反應之物為——約按重要性程序——中子、重氫子、質子、 α 微子、 γ 線、與偶或一用之較重原子核。

原子核撞擊之結果

1.42. 多數原子核，至少能為一種原子的投射物（或 γ 線）所射入。每一如斯之射入，皆可促使原子核內之重行排列，并射出一基本微子或 γ 線，或二者同時放射。所剩之原子核，可為一穩定物；或更可能為一不同種屬之原子，具有放射性，而復變為另一不同種屬之原子核。如是繼續演變，以迄原子核盡起變化而達穩定狀態時為止。此類人工放射體之異於天然放射體者，有二：前者類多放出正子（自然放射性未有此項性質），而極少數射出 α 微子者；在每一曾經精確測定之反應，其質量與能量之相當關係，皆確立無疑，其總和恆維持不變（有時需假定 Neutrino 以保持質量能量之不變）。

符 號

1.43. 一原子核反應之全部敘述，須包括射入物、投射目標物、撞擊後放射之微子（或 γ 線）、以及其最後剩餘物個別之性類，質量與能量。然全部特質皆能知曉之情形甚少，而於多數情況，亦非必要。一種原子核變化，常以一符號表示之。此符號首以化學符號及已知之量數表示目標物，於是再及投射物，放射微子，最後再及剩餘物。中子以 n ，質子以 p ，重氫子以 d ， α 微子以 α ， γ 線以 γ ，表示之。是以鐳與鈹之中子反應

，可書作 $\text{Be}^9 (\alpha n) \text{C}^{12}$ ，而重氫子與重氫子之反應書作 $\text{H}^2 (d n) \text{He}^3$ 。

反應之類型

1.44. 吾人設將五種不同微子 (n, p, α, γ) 作為投射物與放射物，則有二十五種可能之情形。實際重氫子殊少以放射物出現，而光子亦僅可引起二種反應，如加以他種之少數反應，如 ($n2n$)、(dH^3) 及分裂 (Fission)，則已知之類型，約有二十五種。(n γ) 反應或為吾人所應特別注意者；蓋彼於某種反應中，極為重要。此種反應通稱「放射的執獲」，因中子被捕留於原子核中，而僅放出 γ 線。

或然率與橫切面

1.45. 截至此，關於原子核反應之或然率尚未提及。實則此或然率大小至不等。吾人無法保證一直射原子核之中子或質子，將貫入其中；此有繫於原子核與投射微子。於原子核物理中，以「橫切面」表示某一事件之或然率，頗為便利。按照統計方法，一薄箔上之各原子之中心，可被當作平均散佈於平面之點；射擊此平面之投射物之中心，由幾何學而言，有一固定之或然率，平落在諸點中點一任點之一定距離內。若有 n 個原子，分佈於面積為 A 之平面，此或然率為 $\frac{n\pi r^2}{A}$ ，是即圍繞諸點以 r 為半徑所作圓之總共面積，與整個平面面積之比。設吾人想像諸原子為不能貫穿之鋼碟，而用以射擊之微子為直徑可略而不計之彈子，則上述之比率，即為彈子擊中鋼碟之或然率；亦即表示原子投射物將薄箔所阻之或然率。若所測量者係投射原子羣通過薄箔之百分數，則其結果仍可以與此相當之橫切面表示之。此觀念實可推廣至投射微子與目標物原子間之任何作用。舉例言之， α 微子擊中目標物因而產生中子之或然率，可以敏於此類型之反應中之相當橫切面表出之。

1.46. 研究原子核物理，恆將投射微子之直徑略而不計，是以任何原子核反應之橫切面，其專門之定義如下式：

$$\frac{\text{產生反應之數}}{\text{投射微子之數}} = (\text{每平方厘米內目標物原子核之數}) \times$$