

原子核内化学反応に関する最近の研究

北 川 徹 三

- [A] 中性子の発見
- [B] 陽電子の発見
- [C] 原子核内化学反応
 - I α 粒子による核反応
 - II 純人工的方法
 - III 新放射性元素の発見

吾人は常に化学者の立場として原子に於ける核の外側の電子或は單にその中の原子價を司る電子の動きのみに就て考へて來てゐるのであるが、今少し立ち入つて原子核と原子核との間の反應に就て、即ちある一の原子核が他の原子核内に、貫入した時にそこに如何なる化学反應を起し、又如何なる新しい原子核が生成されるかと云ふ問題に就て考へて見たいと思ふ。

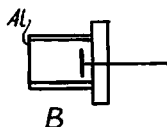
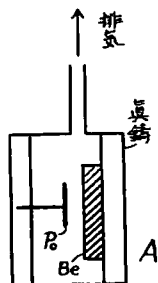
最近二ヶ年程の間にこの原子核反應の研究は異常な發展を遂げつゝあるもので、Bohr の量子論的原子構造論が核外電子の配列に向つては、全く完成の域に達してゐる今日に於て、原子物理学の興味の焦點は原子核構造並びに核内反應に向けられつゝある様である。而して續々と新事實が露はにされ興味津々として盡きないものがある。

即ち近年最も世人の耳目を衝動せしめた興味ある発見の内に、中性子と陽電子との発見とが數へられ、又最近、核の化学反應の結果新しく生成した原子核に放射能が誘導せられる事が明かにせられた。次に先づ中性子と陽電子の発見に就て述べた後、一般の核内化学反應の問題に入らうと思ふ。

[A] 中性子の発見

Rutherford¹⁾ は既に古くより (1920) 電子とプロトンとが緊密に結合して生じた中性の粒子が存在するのではないかと云ふ考へを抱き、之を水素放電管中で搜索したが見當らなかつた。次いで 1930 年 Bothe 及び Becker²⁾ 及びその他の人々は Po なる放射能元素* から放射する α 粒子を、種々の金屬に當てる時は金屬から γ 線が輻射される事を見出し、特に Be 金屬を用ふる時は今迄に嘗て見ない程透徹力の強い γ 線が出る事を明かにした。Curie 及び Joliot³⁾ はこの Be の γ 線をパラフィンの如き H を多量に含有する化合物に當てゝみるとパラフィンより著しく水素原子核即ちプロトンが飛び出る事を認めた。この Be より放射される放射線の本性は遂に 1932 年、J. Chadwick⁴⁾ によつて明かにせられた。即ち第一圖 A 内に直徑 1cm の Ag 板上に Po を沈着せしめ、Be 板と接近し

第一圖



て對置し、内を排氣する。電離箱 B の電極は増幅器とオツシログラフとにつなぎ、臭素紙の上にふれを自記せしめる様になつてゐる。窓は Al 板で貼る。

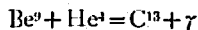
Po から放射された α 粒子は Be を衝撃し、Be より或る放射線が四方に放射してゐると考へる。今 A と B との間に數 mm の厚さのパラフィンを挿入するとオツシログラフのふれは急に増加して、

*Po は 84 番元素で RaE と呼ばれウラン・ラヂウム系の放射能元素である。半減期は 136 日で α 粒子を放射して Pb (RaG) になる。

パラフィンからプロトンが盛に放射される事を示す。即ち Be から出る非常に透過力の強い或る放射線が、A の前面の真鍮板を貫き、パラフィンに衝突してプロトンをはじき出したものと見る事が出来る。このプロトンのエネルギーを測定してみると最大の初速度は 3.3×10^9 cm/sec を有してゐる事が分る。

今 Curie 及び Joliot の考へに従つて、Be 放射線を γ 線であると考へると、之がパラフィンに當つて、プロトンを放出せしめる作用は、丁度 X 線が電子に當つて散亂して、電子に速度を與へる Compton 効果と同一現象であると見做す事が出来る。この假定の下に γ 線のエネルギーを計算してみると 55×10^6 ev となる。^{*} 又この γ 線は N の如き重い原子核にも衝突によつて速度を與へる事が出来るが、之より計算すれば γ 線は 90×10^6 ev のエネルギーを有して居らねばならないことになる。

今 Be に α 線 (即ち He 原子核) が衝突して核反応の結果 γ 線を出す變化を



と假定すると、この式の質量の變化^{*} より γ 線のエネルギーを求むれば 14×10^6 ev 以下でなければならぬ。即ちこの反応の結果上記の如き大なるエネルギーの光量子を生成する事は矛盾する事となる。

此の矛盾を避ける爲に Chadwick は Be の放射線は γ 線の如き電磁波的幅射ではなくて、ある質量を有する物質粒子であると假定し、その質量はプロトンの質量にほぼ近いものであると考へた。

この假定によると今迄不可解にされてゐた Klein-Nishina の γ 線散亂式にもよく合はないことが説明され、又上記の矛盾を盡く除く事が出来たのである。彼は又此の假説的粒子は非常に強い透徹力を有するが故に、全く電氣的に中性なものであらうと考へ、之を Rutherford の云ふ電子とプロトンとの緊密な結合によつて生じた中性子 (Neutron) であると考へた之は非常な卓見と云はねばならない。

中性子の質量 次にこの實驗結果より中性子の質量がプロトンの質量にほぼ等しい事を概算によつて示してみよう。Feather⁵⁾ は中性子が N 核に衝突する時之に、 4.7×10^8 cm/sec の速度を與へる事を見出した。今中性子の質量及び速度を夫々 m_0 、及び V とし、中性子がプロトン及び N 核に衝突して之等に與へる速度を夫々 U_p 、 U_N とすれば完全彈性球の衝突の場合を考へて^{*}

$$U_p = \frac{2m_0}{m_0 + 1} V, \quad U_N = \frac{2m_0}{m_0 + 14} V$$

となる。今 $U_p = 3.3 \times 10^9$ cm/sec, $U_N = 4.7 \times 10^8$ cm/sec を代入すれば

$$\frac{m_0 + 14}{m_0 + 1} = \frac{U_p}{U_N} = \frac{3.3 \times 10^9}{4.7 \times 10^8}; \quad \therefore m_0 = 1.15$$

を得る。この時約 10% の誤差があるから、中性子の質量はほぼプロトンのそれに近いと云ふ事が出来る。

^{*} ev は electron volt の略

^{*} 核反応に伴つて質量の變化する事は後章にて述べる。

^{*} 中性子の質量 = m_0 、プロトンの質量 = 1、中性子の衝突前の速度 = V 、衝突後の速度 = v 、プロトンの衝突前の速度 = 0、衝突後の速度 = U_p とすれば、

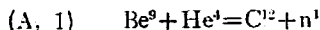
運動量保存則により、 $m_0 (V - v) = U_p$ (1)

エネルギー保存則により、 $m_0 (V^2 - v^2) = U_p^2$ (2)

(2) を (1) で除すれば、 $V + v = U_p$ (3)

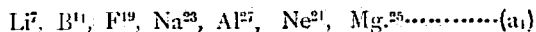
(1) と (3) とより v を消去して $U_p = \frac{2m_0}{m_0 + 1} V$ (4)

夫れ故に Be と He との核反応方程式は次式で與へられる事となる。



その結果 C^{12} 核と中性子とを生成する。而して中性子はプロトンとほぼ等しい質量を有するからその初速度は、プロトンの最大速度と同一の 3.3×10^9 cm/sec であり、そのエネルギーは 5.7×10^6 ev に當る。

Be 以外にも Po の α 粒子の衝撃によつて中性子を放出する事が知られてゐる元素がある。⁽⁴⁾ それは

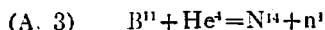
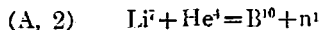


であつて、何れも $4n+3$ 又は $4n+1$ なる原子量を有してゐる。又 α 粒子衝撃によつて中性子を生成しないものは



で $4n$ 又は $4n+2$ の原子量を有するものである。

その反應は例へば Li, B に就ては



の如く變化する。B は Be に次いで中性子を放出する事が著しく Chadwick は (A, 3) 式を用ひて、原子核の質量の變化より、更に正確な n^1 の質量を求めた。その値は 1.0067 となり(種々議論があるが) 現在最も多く用ひられてゐる値である。

中性子が今假りに電子とプロトンの緊密結合から成つたものとすれば、電子とプロトンとの質量の和(即ち水素原子の質量)は 1.0078 であるから、中性子はその構成要素が結合する時に 0.0011 だけ質量を減少した事になる。斯かる現象は總ての原子核に一般に存在するもので、若し原子核がプロトンと電子とのみより構成されてゐるものと考へると、それらの質量の總和よりも實際の原子核の質量は必ず小さくなつてゐる。之を質量缺損と云ひ、減少した質量に相當するだけのエネルギーが核構成の際に何等かの形のエネルギーとなつて放出され核の安定を保つてゐると見なければならぬ。相對性原理によれば m 互の質量は $E=mc^2$ エルグ ($c=3 \times 10^{10}$ cm/sec) のエネルギーに相當するが故に、中性子の質量缺損 0.0011 質量單位に相當する結合エネルギーは約 1×10^6 ev となる。

原子核構成要素としての中性子 總ての原子核は之迄電子とプロトンとの二構成要素より成るものと考へられて來た。然るに中性子の發見によつて、中性子を核構成要素の一と考へるときは、核内に電子の存在を假定する必要が無い事になる。

第一表 同位元素表

原子番號	同位元素	核構造	核スピン, 統計力學	原子番號	同位元素	核構造	核スピン, 統計力學
1	H ¹	p	1/2 Fermi-Dirac	2	He ⁴	$\alpha (=2p+2n)$	0 Bose-Einstein
	D ²	p+n	1 B.-E.				
	T ³	p+2n					
3	Li ⁶	$\alpha + p + n$	0	4	Be ⁸	2 α	
	Li ⁷	$\alpha + p + 2n$	2/3 F.-D.		Be ⁹	2 $\alpha + n$	
5	B ¹⁰	2 $\alpha + p + n$		6	C ¹²	3 α	0 B.-E.
	B ¹¹	2 $\alpha + p + 2n$			C ¹³	3 $\alpha + n$	

7	N ¹⁴	3 α +p+n	1 B.-E.	8	O ¹⁶	4 α	0 B.-E.
	N ¹⁵	3 α +p+2n			O ¹⁷ O ¹⁸	4 α +n 4 α +2n	
9	F ¹⁹	4 α +p+2n	1/2 F.-D.	10	Ne ²⁰	5 α	0
					Ne ²¹ Ne ²²	5 α +n 5 α +2n	
11	Na ²³	5 α +p+2n	3/2 F.-D.	12	Mg ²⁴	6 α	0
					Mg ²⁵ Mg ²⁶	6 α +n 6 α +2n	
13	Al ²⁷	6 α +p+2n	1/2	14	Si ²⁸	7 α	
					Si ²⁹ Si ³⁰	7 α +n 7 α +2n	
15	P ³¹	7 α +p+2n	1/2	16	S ³²	8 α	0 B.-E.
					S ³³ S ³⁴	8 α +n 8 α +2n	

若し核内に自由の電子の存在を考へるときは原子核スピンの問題より種々説明出来難い事實に遭遇するのである。例へば N¹⁴ 核は14個のプロトンと7個の電子とから成つてゐるから、核スピンは個々の粒子のスピンの $1/2 \frac{h}{2\pi}$ の合成値として $1/2$ の奇数倍の値を有しなければならないのに實測の結果は N¹⁴ のスピンは第一表の如く1であり Bose-Einstein の統計力学に従ふのである。随つて原子核内に於て自由の電子の存在を考へる事は避くべからざる矛盾に陷るのであつて、電子は核内に於てはその本來の個性を失つてゐるとても考へねばならない。

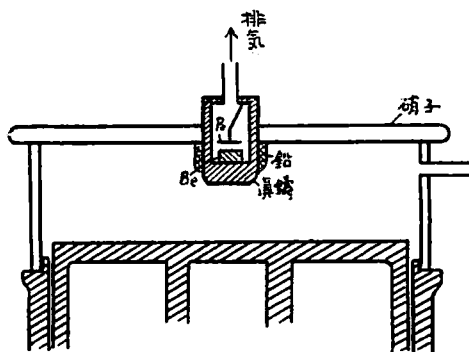
Heisenberg⁷⁾ は中性子発見後直ちに原子核構成要素としてプロトンと中性子との二を考へ、この假説の下に原子核構造理論を發表したが、之に依つて今迄の核スピンの問題に於ける難點は容易に解決されたのであるが、未だ放射能元素の自然崩壊に於ける β 線の連続的放射の機構を説明する事は困難である。若し原子核中に於てもエネルギー保存則が成立するものとするならば、 β 放射と同時に同数の Neutrino 即ち荷電が零で中性子より遙かに小なる質量を有する中性粒子が放出せられると想像するより仕方がない。今後原子核構造の問題は仲々興味ある問題と思はれる。

今原子核はすべてプロトンと中性子とより成り、更に第二次構成要素として α 粒子(二個のプロトン+二個の中性子)の三種から成ると考ふるときは、原子核構造を比較的簡單な規則正しい關係の下にまとめる事が出来る。今輕元素に就てその一部を示せば第一表の如くなる。此の表によつて種々の核反應を説明する事が出来ることは後に述べる。又現在測定されてゐる核のスピンの及びその屬する統計力学とを書き添へておいた。

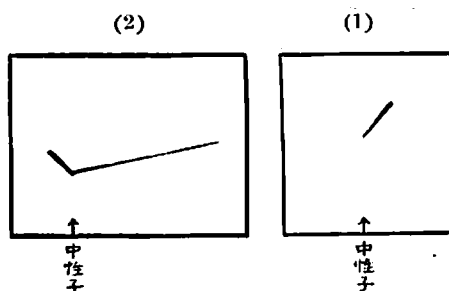
中性子による原子核破壊現象 Feather⁸⁾ は Be より放射される高速度の中性子が、他の原子核に衝突した時、之を突き飛ばして反衝原子 (recoil atom) を生ずる時の通路の寫眞を撮影した。その装置は所謂 Wilson 霧函を使用するので、第二圖の如く硝子張りの函の内部の空氣を水蒸氣を以て飽和せしめ、底部のピストンを急に下げると函内の空氣は膨張して溫度が下る。この場合もし空氣中を荷電粒子が通過したとすれば、その通路に沿ふて多くの氣體イオンを生成して行くから、イオンを中心として霧を生じ、之を素早く水銀燈で照らして通跡を立體寫眞に撮影する事が出来る。函の内徑は17cm 深さは約6cm である

函の天井より垂下した眞鍮の筒の内部には Po と Be との板を對置せしめる。筒の内部の金屬より同時に發生する X 線等はすべて器壁の眞鍮又は鉛に吸収され、只中性子のみ之を貫通して函内に出づ。

第二圖

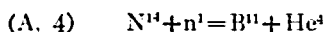


第三圖



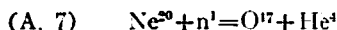
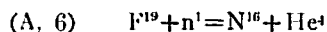
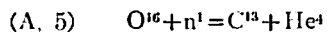
第三圖 (1) は中性子が空氣中の N 原子に衝突した時、之を電離し反衝せしめた通跡の寫眞で、その長さより之に衝突した中性子の K. E. (運動エネルギー) が計算される。これよりその速度は約 3.5×10^9 cm/sec となり、Chadwick の得た 3.3×10^9 cm/sec とよく一致する。この寫眞に於て衝突した中性子の通跡が現はれてゐないのは中性子が電氣的に中性である事を明かに示してゐる。

然るに興味ある事は (1) の如き反衝通跡の多く現はれる中にその約 1/4 ほどは (2) の如く一點にて出發する鉤形の通跡を見出したことである。之は明かに中性子が衝突原子核内に深く突入して、核を破壊し、二個の重い核と軽い核とを生じたと解釋すべき現象である。而して通跡の種々なる角を測定し、運動量の保存則を適用すれば、この反應は



である事が分る即ち圖に於て右の方に長く走るのは He^4 核の通跡、左の短いのは B^{11} 核の通跡である。(A, 4) は丁度 (A, 3) 式の逆であつて、この反應は可逆反應であり、(A, 4) の方がエネルギーを吸収する反應である。

尙中性子により原子核の破壊される反應は N^{14} の他に、



が研究せられて居り、⁹⁾ ⁸⁾何れも反應の結果 α 粒子を生成する。

中性子は斯くの如く荷電を有しない爲に、その周囲の力場は非常に小さく、物質中を通過する間に物質原子核と衝突する確率即ち衝突の有効面積は甚だ小さいものと考へられる。更に中性子と電子との衝突¹⁰⁾に至つては極端に小さい事が實驗せられてゐる。即ち中性子が空氣中 3 米通過する間に僅かに 1 對のイオンを生ずるに過ぎない。

其の他種々の核反應に於て中性子が關與する事のあるのは原子核構成要素の一として中性子を含む事より明かであるが、之に就ては後章で述べる事とし、次に陽電子の發見に就て述べる。

[B] 陽電子の發見

1930 年、P.A.M. Dirac¹¹⁾ は電子に関する量子力學的理論を公にしたが、理論的に運動エネルギーが

負の値を有する電子が存在しなければならない結論に導かれた。當時この負のエネルギーを有する電子の解釋には非常に困却し、この世界ではすべての負のエネルギー状態は既に電子を以て充滿せられてゐるので、Pauli の原理に依つて二個の電子は同一状態を取り得ないから、事実上かかる負エネルギー状態に電子は落ち込む事は出来ないものと考へた。

然らばこの負エネルギー状態の物理的意味は如何と云ふ問題が起る。我々は斯くの如く既に一杯に充された負エネルギー状態は之を觀測する事は出来ないが若し、その中から一個の電子が抜け出した「穴」があるならば、それは今迄に知られてゐない一個の新しい粒子として認め得る事が出来る。之は吾人には正エネルギーと陽電荷とを有する一個の粒子として認められることになる。

斯くの如き陽電荷を有する微粒子は現實にはプロトンより他に見當らない、然し之をプロトンと考ふる時はその質量が餘りに大で、此の新しい陽粒子は電子と同一の質量を有するものでなければならぬ。故に Dirac は斯くの如き陽電荷を有し而も電子と同一の質量を有する粒子を“Anti-Electron”と名付けた。

Anti-Electron は速かに普通の陰電子と再結合して消滅して了ふので自然界に見出す事は豫期されてゐなかつたが、遂に米國の C.D. Anderson によつてこの Anti-Electron 即ち Positive Electron が實驗的に發見せられたのである。

第四圖

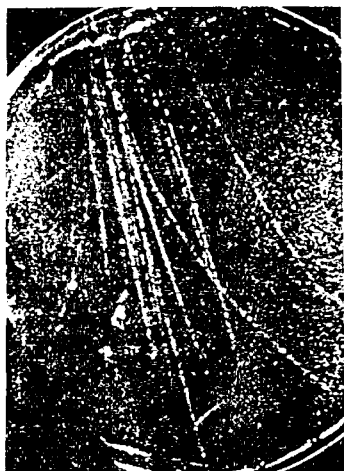


1932年、8月2日 Anderson¹²⁾ は Wilson 函を縦にして用ひ宇宙線の通跡の研究に従事してゐた時偶然に第四圖の如き寫眞を得た。圖の中央に横はるのは厚さ 6mm の Pb 板で粒子は之を貫通して走つてゐる有様が見える。この時紙面に直角に前方より後方に向つて 15,000 Gauss の磁場がかけてあるので粒子は磁場によつて通路をまげられ、その進行の方向は最初彎曲度の小なる方より出でて下方に向ひ、Pb 板を貫通した後、エネルギーを失つて彎曲度が増加してゐる事が分る。今磁場の方向と粒子の進行の方向とより考へ合すれば、この寫眞は陽電荷を有する粒子が通過した通跡を現はす事になる。この粒子を假りにプロトンと考へて磁場の強さと曲率

半径とから、そのエネルギーを計算してみると 300KV に當り、之だけのエネルギーではプロトンは僅かに 5mm の到程しか通過し得ない。然るに圖に於ては明かに粒子の到程は 6cm を超えてゐる。夫れ故にこの粒子の質量はプロトンより遙かに小さいものでなければならぬ。Anderson は之を電子と等しい質量を有し、而も陽電荷を有する新しい粒子であると考へ陽電子 (Positron 又は Positive Electron) と名付けた。之は丁度 Dirac の理論に豫言された Anti-Electron に相當するものである。

次いで英の Blackett 及び Occhialini¹³⁾ は Wilson 函の裝置を改良して、宇宙線が同時に二個の電離函を通過すると共に自働的に膨張と照明とを行ふ仕掛にして、多くの宇宙線通跡の寫眞を撮つた。その中に第五圖の如く同一の源より出發して多數の通跡が恰も灌水狀に現はれてゐるものがあるのを認めた。磁場をかけると圖の如く、あるものは左にふれ、ある者は右にふれ殆どすべてがほぼ同數づつの陽電子と陰電子とから成つてゐる事が分つた。斯様に灌水狀電子群の出現によつて電子

第五圖



ので 2.6×10^6 ev を有してゐる。

Anderson 及び Neddelmeyer¹⁴⁾ は陽電子発見の翌年1933年遂に ThC'' の γ 線を用ひて陽電子の人工的生成に成功した。即ち Wilson 函寫眞に於て γ 線を當てた Al 板の一點より一對の陰陽兩電子が第六圖の如く互に別れて生ずるのを屢々認めた。即ち實驗的に γ 線による Materialisation を確かめる事が出来たのである。而して、斯くの如き幾組かの對に就て兩電子のエネルギーの和を測定してみると平均 1.6×10^6 ev を得た。又或る時は一對の電子の代りに陽電子の通跡のみが現はれてゐる事がある。之は γ 線によつて同時に陰陽兩電子が生成したのであるが、その運動エネルギーは全部陽電子に移つたものと考へる事が出来る。測定の結果そのエネルギーは 1.6×10^6 ev を超えて居ない。

今 γ 線のエネルギーを $h\nu$ とし、之によつて生成した一對の電子の K.E. を E とすれば

$$E = h\nu - 2mc^2$$

で與へられる。ThC'' の γ 線は $h\nu = 2.6 \times 10^6$ ev, 又 $2mc^2 = 1 \times 10^6$ ev であるから、理論上電子對の有すべき K.E. は 1.6×10^6 ev となる。即ち上の實驗事實はこの理論を證明するに十分である。Po より出る γ 線は 0.8×10^6 ev しか有しないから、Po のみに依る時は理論の示す通り、實際電子對の生成は見られない。又 (Po+Be) の中性子源を用ひても電子對を生ぜしめ得るが、之は中性子の作用によるので無く、それに伴つて發生する γ 線によるものである事が明かになつた。¹⁵⁾

之と殆ど同時に英の Chadwick, Blackett 及び Occhialini,¹⁶⁾ 佛の Curie 及び Joliot¹⁶⁾ 及び獨の Meitner 及び Philipp¹⁷⁾ も同じく γ 線による陽電子の生成に成功してゐる。極く最近 Chadwick, Blackett 及び Occhialini¹⁸⁾ は陽電子の ThC'' の γ 線による詳細な研究を行ひ、陽電子の質量を求めてゐるが今陽電子及び陰電子の質量を夫々 m_+^e , m_-^e とすれば

$$m_+^e = (1.02 \pm 0.10) m_e$$

の進行の方向が明かになつたので、陽電子の存在は疑ふべからざるものとなつた。

γ 線による陽電子の生成 斯くの如く宇宙線の研究に伴つて陽電子が発見されたが、それでは如何にして宇宙線が物質を通過すれば陽電子が現はれるかと云ふ問題が起る。Dirac は夙に Materialisation と云ふ事を理論的に提唱してゐる。それによれば非常に高いエネルギーを有する γ 線はある條件の下に物質粒子と化して一對の陽電子と陰電子とを創造する事が出来ると云ふのである。電子一個の固有エネルギーは相対性理論により mc^2 で與へられるから電子の質量, $m = 9 \times 10^{-28}$ gr に相等するエネルギーは約 510kv である。即ち僅かに 1×10^6 ev 程度のエネルギーを有する γ 線は一對の陰陽電子の創造が可能である。現在地球上で得られる最も硬い(即ち波長の短い) γ 線は ThC'' の崩壊に伴つて輻射されるも

第六圖



之は今迄に得られた最も正確な陽電子の質量である。

斯くの如き實驗結果から、宇宙線は非常に大きな量子エネルギーを有する γ 線ではなからうか或は少くともその一部は γ 線より成つてゐるものではないかと考へられる。然し如何にして前述の如く多數の電子群が同一の源より濯水狀に生成するかの機構は明かになつてゐない。

物質の絶滅 之迄陽電子は何故に吾人の眼を逃れて發見されるに至らなかつたか。Diracの理論によると陽電子が陰電子と衝突すれば、電子は直ちに彼の「穴」を充す事となり、陰陽兩電子が同時に消滅する現象、即ち電子對の絶滅 (Annihilation) が起る。夫れ故に陽電子は非常に短かい生命しか有しないことになる。若し陽電子が物質中を通過する間に無數に存在する陰電子と衝突し絶滅を行つたならば、そのエネルギーは 1×10^6 ev 又は 2個の 0.5×10^6 ev のエネルギーを有する光量子と化して輻射されるであらう。

Joliot⁽¹⁹⁾ 及び Thibaud⁽²⁰⁾ は斯くの如き電子の絶滅即ち Dematerialisation の現象を實驗的に研究し、(Al+Po) の陽電子源を原子量の重い金屬に當てたとき、 0.5×10^6 ev の γ 線が發生する事を確かめた。又この γ 光量子の數は丁度陽電子の數の二倍に當つてゐるのを觀察した。即ち上の理論を確かに證明する事が出来る。Gray 及び Tarran⁽²¹⁾ は ThC'' の γ 線を Pb に當てる時は異常な散亂を起し、 0.9×10^6 ev 及び 0.5×10^6 ev の二種のエネルギースペクトルを有する二次的 γ 線が輻射されるのを認めた。之は明かに γ 線による陽電子の生成と、その絶滅に依る一個乃至二個の光量子の生成とを暗示してゐるものである。

斯くの如く陰陽兩電子は對を爲して高いエネルギーを有する光量子によつて創成されることが明かになつたが、最近人工的に石墨に重水素原子核を衝擊せしめて核反應を行つた結果、新しい放射能元素が生成され陽電子を放出して崩壊する事が見出されたが、之に就ては最後の章に於て詳述することにする。

[C] 原子核内化学反應

以上で最近の發見にかゝる中性子及び陽電子は如何なるものであるかに就て概略述べ終つたので、次に一般の原子核内化学反應に入らうと思ふ。

原子核と原子核との反應の結果生成するものは全く新しい原子核であるから原子核内化学反應とは要するに所謂元素變遷の意味であり、一般の化学反應と異る「超化学反應」とも名付くべきものである。此の超化学反應に就ては我々は未だ第一歩を踏み出した程度で甚だ僅少の智識しか有して居らないが之を一般の化学反應と同様自由に驅使し得る様になる時が將來あるとすれば、その時こそ所謂「Alchemistの夢」が成就した時で、彼等と同様な空想を抱き乍ら、我々もそのHの來るのを待たねばならない。

次に述べるのは主として人工を以て元素變遷を試みた研究に就て最近迄の業績を述べる事とし、天然の放射能元素の崩壊による自然變遷に關しては今は觸れない。自然的元素崩壊は概して原子量の高い元素に限つて起る現象であるが、人工的元素變遷は主として原子番號の若い元素間に起り易い様に思はれる。人工的に原子核の破壊を行はうとする場合には、常にある大きなエネルギーを有する原子核を他の破壊せんとする原子核に衝突せしめ、その運動エネルギーの爲に、原子核の周圍を圍繞する高いポテンシャル障壁を貫通して、原子核の内部に迄潜入せしめる。然る時は核を組立てる構成要素は、その爲に安定な配列を亂されて、再びより安定な核を構成する爲に再組織を行ひ、原子核は分裂して二個の新しい核として飛散するのである。この時衝擊粒子に或る一定の値以上の運動エネルギーを與へないと、超化学反應は起らない事は、丁度一般の化学反應に於て、反應を生

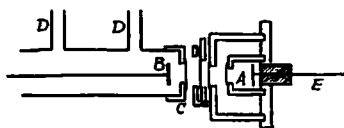
せしめる爲には活性化熱を必要とするのと同様である。然し乍ら超化学反応特有の現象として反応に伴つて必ず質量の減少を來すので、この點は一般化学反応と大いに異なる所である。即ち反応の前後に於ける原子核質量の總和は一定不變ではなく、一見質量不減の原則に矛盾するかの様であるが、反応後に減少した質量は相對性理論による $E=mc^2$ に相當するエネルギーとなつて、或は生成原子の飛行のエネルギーとして、或は γ 線輻射のエネルギーとして放出される。即ち超化学反応に於ける反応エネルギーの放出は、直ちに質量の變化となつて現はれる程莫大なるものであることが分る。

次に大體衝擊せしめる粒子の種類によつて超化学反応を分類してゆきたいと思ふ。

I α 粒子による核反應

衝擊粒子として放射能元素より放出される莫大なエネルギーを有する α 粒子(即ち He 核)を用ゐる事は原子核破壊反應の歴史として最も古く、1919年、Rutherford 卿²⁹⁾ は RaC より出る α 粒子を用ひて N 原子に衝てその反衝現象を研究中、偶然に N 原子核が α 線の衝擊の爲に破壊を起してゐる現象を發見した。之が元素變遷の人工的方法を以てする最初である。其後 α 粒子による原子核の破壊反應の研究は多くの人々によつてなされてゐるが主として崩壊産物として高速度のプロトンを放射するものである。

第七圖



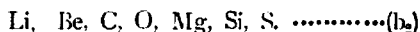
第七圖の實驗裝置は Chadwick, Constable 及び Pollard³⁰⁾ の用ひたもので生じたプロトンを電離法に依りて檢出するのである。即ち B は Pt 板上に Po を沈着せしめたもので、之に相對する窓 C は金箔上に 衝擊せんとする物質を粉末狀にして附着せしめる。(化合物の儘でも單體でも效果

に變りはない)。衝擊の結果放出されたプロトンは、窓を通り抜け電離箱 A に入り増幅器とオツシログラフの助けに依りて臭素紙上にプロトンの數を自記せしめる。D は破壊され易い空氣中の窒素を他の氣體で置き換へる爲の側管である。

研究の結果次の元素は α 粒子を當てる時核反應を行ひプロトンを放出する事が分つた。

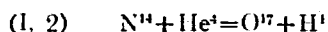
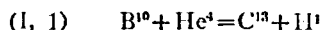


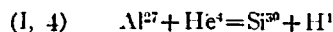
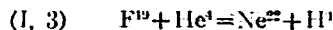
之等は皆 $4n+2$ 或は $4n+3$ の原子量を有するものである。又次の元素はこの時プロトンの放出を認めないものである。



之等はすべて $4n$, $4n+1$ 或は $4n+2$ の原子量を有してゐる。然し茲に著しい事實は (a_2) 群の元素はすべて奇數番目元素、 (b_2) 群は Li を除いてすべて偶數番目元素である事で、この間に何等か核構造上の根本的な相違があるらしく思はれる。之は原子量の四の型による分類では之を説明する事は不十分であるが、第一表の核の構造表を見る時は、この間の關係を明かに説明する事が出来る。即ち奇數番目元素はすべて自身の核中に遊離のプロトンを一個有し之が α 粒子衝擊に依つて α と置き變るものと見る事が出来、而して原子番號の一つ高い元素に變遷する。然るに (b_2) 群の Li を除いた偶數番元素は核中に遊離プロトンを含まず、プロトンはすべて安定な α 粒子となつて收つてゐるが故に、 α 粒子衝擊によつてプロトンを放出せしめ得ないことが推察出来る。唯 Li のみは最も原子番號が小さく別の理由があるのか分らない。

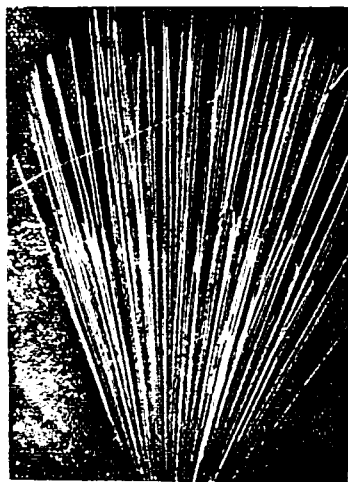
之等の核反應式の例を舉ぐれば





(I, 1) は B^{10} の場合であり、同位元素 B^{11} の場合には (A, 3) の如くに中性子を放出する。又

第 八 圖



N と F とに就ては^{24) 25)} Wilson 函に於て氣體狀態に於ける崩壊の寫眞が撮れてゐる。第八圖は N に於ける (I, 2) の反應の通跡の寫眞で²¹⁾ 多數の α 粒子の通跡を横切つて左方に長く走るのは H^1 核、右に短いのは O^{17} 核の通跡である。

斯くの如き反應の結果放出されたプロトンの運動エネルギーは實測の結果一定のエネルギーを有する幾つかのプロトン群に分けられるのが常であつて、之を以て原子核内に於けるエネルギー水準の存在に就て或る暗示を與へられるものである。又 Chadwick 及び Constable²⁶⁾ は α 粒子が Al 或は F 核内に貫入するには、核内のエネルギー水準と α 粒子の有するエネルギーとの間の量子力學的共鳴に依つて、必ずしも核の周圍のポテンシャル障壁を超えるに十分なエネルギーを有しない α 粒子でも核内に貫入し得る事を論じ、Al に於ては四個の共鳴水準を見出してゐる。

以上はすべて α 粒子の衝擊によつて、プロトンを放出する反應に就て述べたが、種々の元素はプロトンの代りに α 粒子衝擊によつて中性子を放出するものがある。その最も著しいのは Be^9 と B^{11} とであり、既に之に就ては A 章に於て述べた通りである。而してこの場合も中性子を放出する元素 (a₁) としない元素 (b₁) との存在する事は、第一表の核構造表より判り易く説明する事が出来る。即ち (a₁) の元素はすべて核中に二個乃至一個の中性子を含み、 α 粒子の衝擊によつて之と置換する事が出来るものであるが (b₁) の元素はすべて數個の安定な α の他には自由な中性子を含んで居らない。只例外は N のみで N^{15} は極微量しか存在しないが N^{14} に就ては尙 [C] III 節を参照されたい。又 F^{19} Na^{23} Al^{27} の三者は單一な同位元素であるに拘らず中性子又はプロトンを放出する反應を同時に⁶⁾ 行ふもので、之に就ても [C] III 節にて再び述べる。

中性子による核反應 衝擊粒子として α 粒子の代りに中性子を用ひても種々の元素の核を破壊し得る事に就ては既に中性子の發見の項で述べたからここでは述べない事にする。唯中性子を衝擊粒子として用ふる時、 α 粒子の場合と非常に異なる點は、 α 粒子による場合は彈性衝突と非彈性衝突即ち破壊を起さない衝突數と破壊を起す衝突數との比は 1000:1 であるに對し、中性子衝擊に依る時は Feather の研究によれば約 4:1 の比になつてゐる之は中性子と α 粒子との周圍の力場の相異に依るものであらうと思はれる。

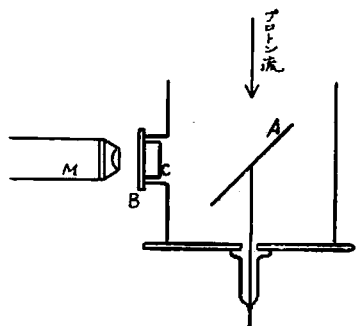
II 純人工的方法

以上の如く α 粒子又は、中性子の衝擊によつて原子核反應を行はんとする時は、常にその背後に α 變遷を行ふ放射能元素を使用する事が必要であつて、「人工的元素變遷」と稱しても天然の放射能元素から出るエネルギーを利用してゐるものであるから、「半人工的方法」と云ふべきものである。然るに放射能元素の崩壊によつて生ずるエネルギーは莫大なもので、例へば Po から出る α 粒子の速度は 10^9 cm/sec の程度に達し、人工的にこのエネルギーを α 粒子に與へようと思つたならば、數百萬 V 程度の加速電壓を必要とする。斯くの如き高電壓の發生裝置には實驗上非常な困難が

伴ふので、「純人工的方法」を以て元素變遷を試みんとする企ては非常な難事であらうとされてゐた。

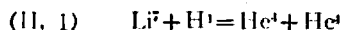
然るに1932年、英國に於て Cockcroft 及び Walton²⁷⁾ は自ら考案したケネトロンと蓄電器とを組合せた高電壓發生裝置に依つて、數十萬V迄のプロトン流を作り得る裝置を作り、之によつて種々の元素に衝撃を試みた結果、僅かに 200,000ev 以下の電場にて速度を得たプロトンを以て、容易に種々の原子核を破壊し α 粒子を生ずる事を見出した。之を導火線として各國に於てプロトン又は、ダイブロンを衝撃粒子とする原子破壊の實驗が、次々と現はれ大いにこの方面の研究を促す結果となつたのである。

第九圖



プロトンに依る核反應 先づ Cockcroft 及び Walton の裝置を述べると、第九圖に於て A は目的物たる種々の元素をのせる臺で、之に直徑 5cm の Li の圓板をおき眞上より水素放電管中で作られたプロトン流を 900KV 迄加速せしめて之に衝突する。プロトンによつて破壊せられた Li の破片は、B なる ZnS の障子に當つて燦爛を生じ、之を M なる顯微鏡にてよむ。電壓を 125KV 迄上げると始めて燦爛を認める事が出来た。この時 ZnS 膜に當つて燦爛を生ぜしめる粒子は電離函及び Wilson 函の研究に依つて、高速度の α 粒子である事が明かとなつた。即ち Li 核とプロトン(即ち H 核)と

の相互作用によつて α 粒子を生ぜしめる反應方程式は



であると考へる事が出来る。

第九圖に於て C は散亂されたプロトン流が ZnS 膜に達するのを防ぐ爲の雲母板であるが、この所に種々の厚さの雲母を挿入して發生した α 粒子の到程を測定してみると、 α 粒子はすべて一定の到程を有し空氣中に於て 8.4cm に相當する。而してプロトンの電壓を 270-450KV に變へても到程に變化を及ぼさない。然し電壓の増加と共に發生する α 粒子の數は、指數函數的に増加して来る。例へば α 粒子一個を生ずるのに 250KV に於ては 10^9 個、500KV に於ては 10^8 個のプロトンを要する。

今 (II, 1) 式に於て發生する反應エネルギーをその質量の減少値より計算して見よう。Aston の創案した質量スペクトルの方法により酸素原子の質量 $\text{O}^{16} = 16.0000$ を標準として種々の原子核の質量を正確に測定する事が出来る。今 $\text{Li}^7 = 7.0130$, $\text{H}^1 = 1.0072$, $\text{He}^4 = 4.0011$ として、II' の K.E. を之等と比して無視すれば

$$7.0130 + 1.0072 - 8.0022 = 0.0180$$

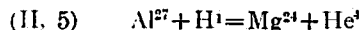
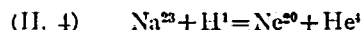
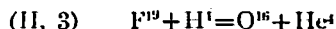
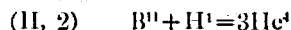
即ち反應後には 0.0180 の質量が減少してゐる事が分る。之に相等するエネルギーは約 16.8×10^6 ev である(質量單位にて 0.001 は約 930,000 ev に相當する)から、此のエネルギーは二個の He 原子の運動のエネルギーに變つたと考へなければならぬ。即ち一個の He の有する K.E. は 8.4×10^6 ev となる。然るに先きの到程の測定値より 8.4cm の到程に相等する α 粒子の K.E. は 8.6×10^6 ev となり、計算値と實測値とはよく一致し上の假説を證明するに十分である。

又この反應の結果生成した二個の He は必ず運動量の保存則によつて、互に反對方向に一直線上に飛散しなければならないと云ふ假想の下に、目的物 A の兩側に於て ZnS による燦爛を觀測したが約 25% はその時刻が一致してゐる結果を得た。

Li 以外に 300KV 以下のプロトンを以て原子核反應を起す元素は

Be, B, C, F, Na, Al; K, Ca, Fe, Co, Ni, Cu, Ag, Pb, U.

等が知られて居り何れも α 粒子を放出する。前に I 節で述べたのは α 粒子の衝突によつてプロトンを放出する反應であつたが、是等は全くその逆の過程である。この内 Li, B, F の三者は α 粒子を放出する事が最も著しく、Na, Al に於て少しく認められる。後に Oliphant 及び Rutherford²⁸⁾ の精細な研究によればこれ以外の元素殊に原子量の高いものに於てはその結果は疑はしい様である。之等の反應方程式は



是等の元素は何れも $4n+3$ なる型の原子量を有してゐるから、1個のプロトンを捕へて安定な α 粒子として放出し、残りは $4n$ なる原子核を生ずる。又この反應は第一表の核構造表からも直ちに説明する事が出来る。即ち是等の元素は何れも數個の α の他に一個のプロトンと二個の中性子とを有する共通な核構造を有するから、之にプロトン一個が加はれば二個のプロトンと二個の中性子とより α 一個を放出すると考へられる。

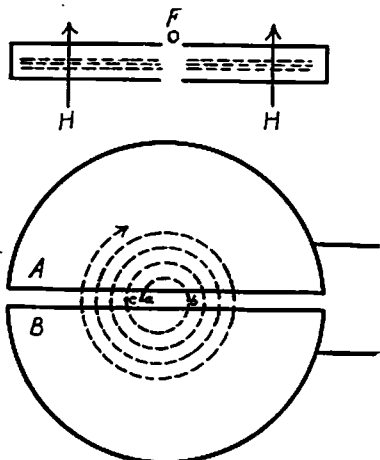
兎に角僅かに 100KV 程度のプロトンを以て原子核は容易に破壊を受けるものである事を實證した Cockcroft 及び Walton の功績は少くないと云はねばならない。次に Oliphant 及び Rutherford²⁸⁾ はこの装置に改良を加へて、水素放電管によつて發生する水素イオンの流れに直角に強い磁場をかけて通路を圓形に曲げ、混つてゐる水素分子のイオン (H_2^+) をプロトン (H^+) より分離して、純粹のプロトンのみを以て正確な實驗を行つた。

その結果は Li は既に最低電壓 30KV より破壊を起し、B は 70KV, F は約 100KV より α 粒子を放出するのを見た。斯くの如く原子量の増加と共に著しく破壊の最低電壓が増加するのは、原子核の周圍のポテンシャル障壁が、原子量と共に急に高くなつてゐる事を示してゐる。夫れ故に Au, Pb, U の如き重い原子量の元素は更に高い電壓のプロトンを以てしなければ、破壊を起す事は困難でなからうかと思はれる。

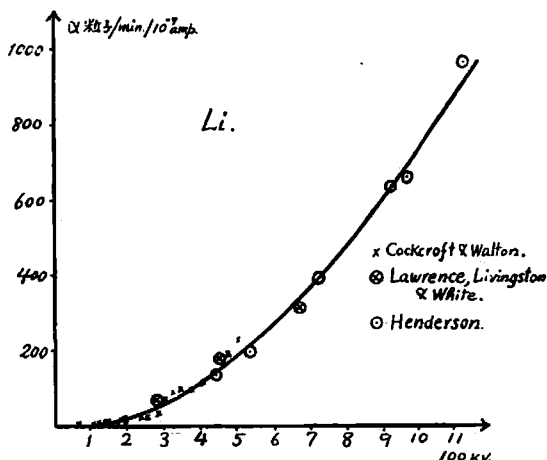
この装置に於てイオン流に加へる磁場の強さを變へる事に依つて、任意に H^+ 又は H_2^+ を目的物に衝突する事が出来る。純粹の H_2^+ を以て衝突した時は、その效果は全く H^+ と同一で、只エネルギーが半分にて倍量のプロトンを衝突したと等しい結果となる。又重い水素を用ひて純粹の D^+ のみを以て實驗を行ふ事も出来る。

之と殆ど同時に米國に於て Lawrence 及び Livingston²⁹⁾ 等は非常に巧妙な装置によつて、最高 1,200,000ev のプロトン流を用ひて原子核破壊の實驗を進めて居た。彼等の用ひたプロトンの加速装置は第十圖の如く、比較的低い電壓を以て繰返し加速を行ふのである。その原理を述べると A, B は二個の半圓形の中空の電極で之を高周波電源につなぎ、電極に直角に一樣な強い磁場をかける。F なる纖維を熱して水素中に於て熱電子によりてプロトンを作る。今 a 點にプロトンが在るとすれば A が負電位の時はプロトンは A の内部に追ひやられ、磁場の爲に通路を曲げられ半圓を畫いて b 點に達する。この時丁度電極の電位が逆になる様に、振動電路の周期を定めておけば、b に於けるプロトンは再び加速せられて、前より高速度を以て B 内に追ひやられ、大きい半圓を畫いて c に達する。斯くしてプロトンは速度を増すにつれて渦狀を畫いて半徑を増大してゆくが、如何なる半徑に於ても半圓を畫くに要する時間は同一である。斯くしてプロトンは一回轉毎に二回

第十圖



第十一圖



の加速を受ける事となる。電圧を 4000V とすると150回轉すれば300回の加速を受け、プロトンは 1200,000の高速度を得る之を圓周に沿ふて裝置した目的物に衝突する事が出来る。プロトンの畫く最大半徑は 11.5 cm である。最近の報告に依れば之と同一原理によつて 5,000,000 乃至 10,000,000ev のイオン流を得る裝置が計畫せられてゐる由である。³⁰⁾

斯くして Cockcroft 及び Walton が Li に就て行つた實驗を Lawrence, Livingston 及び White³¹⁾ は更に 710KV 迄, 又 Henderson³²⁾ は 1.125KV 迄延長して, 衝撃プロトンのエネルギーと Li 核の破壊の能率との關係を明かにした. その結果は第十一圖に示す通りで横軸に電壓を縦軸に生成した α 粒子の數をとる. Gamow³³⁾ は1929年始めて原子核の自然崩壊並びに人工崩壊現象に關する量子力學的理論を立てたが, それによると質量 m , エネルギー E , 荷電 Ze なる粒子が $Z'e$ なる荷電を有する核内に貫入し得る確率は次式で與へられる.

$$W = e \frac{4\pi\sqrt{2m}}{h} \frac{ZZ'e^2}{\sqrt{E}} J_K$$

J_K は Z と E とによりて變る函数であるこの式に適當な數値を代入するとよく實驗結果と一致し、第十一圖の曲線はこの式より求めたものである。

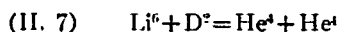
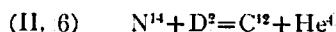
Lawrence 及び White³⁴⁾ は B に就て、又 Lawrence 及び Livingston³⁵⁾ は Al に就て上と同一の實驗を行ひ、同様の結果を得てゐる。

デイフロンに依る反應 プロトンを以て斯くの如く研究が進められてゐる一方、最近 Urey, Murphy 及び Brickwedde に依つて發見せられた重い水素の原子核、(即ちデイブロンに就ては本誌前號²⁾に於て外山學士³⁾の楽しい紹介があるから詳細はその方に就て御参照を願ひ度い。)を衝突粒子として原子破壊を試みる研究が起つて來た。

プロトンは単一な粒子であるからその反応も至極簡単であるがデイブロンになると少くとも之はある構成要素から組み立てられた原子核である（現在デイブロンは一個宛のプロトンと中性子とより成ると考へられてゐる。第一表参照）と考へられるから、その核破壊作用も自ら異なり、複雑ではあるが興味深い結果が見られる。

衝突粒子としてデューロンを用いた最初の研究は、1933年 G. N. Lewis, Livingston 及び Lawrence³⁸⁾ が50%の重水素を用いて、繰り返し加速する方法に依つて D^2 に 1.330KV のエネルギーを與へ、

種々なる目的物に衝突し、試みた結果、 N^{14} と Li^7 とが最も著しく α 粒子を放出するのを見た。即ち共に $4n+2$ なる型の原子量を有して居り



の如き反応を行ひ、その結果何れも $4n$ なる原子核と高速度の α 粒子とを生ずるのである。

英國の Oliphant, Kinsey 及び Rutherford³⁹⁾ は同年 G. N. Lewis より 93% の重水の提供を受け、之より電解的に重水素を製して放電管によつて生じたデイブロンを、前に述べた磁場による彎曲法によつて完全にプロトンと分離し、純粹なるデイブロンのみによる衝撃作用を研究した。目的物として Li 核に就て行つた結果を一括して表せば

プロトンによる時： 到程 8.4cm, 1.15cm, 6.5mm α 粒子

デイブロンによる時： 到程 13.2cm, 1~7.8cm α 粒子

到程 30cm プロトン

即ちプロトン衝撃による時は Cockcroft 及び Walton の得た 8.4cm の α 粒子の他に更に 1.15cm 及び 6.5mm の小さい到程の群が見られる。又デイブロンを用ふるときは非常に長い 13.2cm 到程のよく揃つた α 粒子群と、最大 7.8cm 迄の連続的な到程を有する α 粒子群とに分れるのである。之等の種々異つた到程を有する α 粒子群は如何なる核反応の結果現はれて来るものであらうか？

(1) 8.4cm 到程の α 粒子群は既に Cockcroft 等によりて



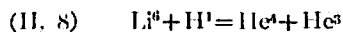
なる反応によつて生成される事が明かにされ、 He^4 の K.E. と理論的に得た値とはよく一致してゐることを述べた。

(2) デイブロン衝撃によりて現はれる 13.2cm 到程の α 粒子は 11.5×10^6 ev のエネルギーを有してゐるから



なる反応によつて生成される事は確かである。なんと なれば、この式の 質量の減少値より計算した He 一個當りの K.E. は 11×10^6 ev となりエネルギーの一致は十分である。

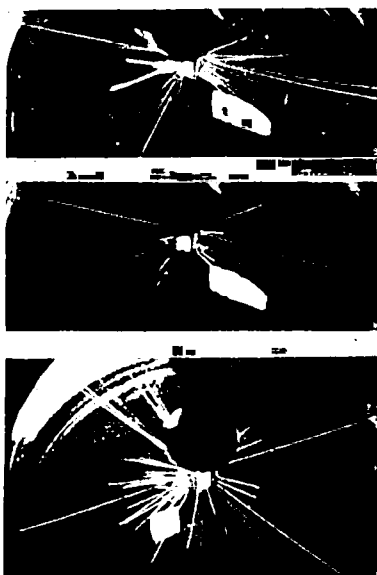
(3) 次に 11.5mm と 6.5mm の二の到程は共に二價に荷電した He 様の粒子から成る。之は恐らく



であらうと考へられる。⁴⁰⁾ He^3 は未だ自然界に發見されない He の同位元素であるが今 He^4 と He^3 とが分離の際に運動量の保存則により 3:4 の比に速度を得たとすれば、同一荷電の粒子の到程は粒子の質量と、速度の三乗との積に比例するから、この二粒子の到程は 1:1.8 の比とならなければならない。然るに 6.5mm : 11.5mm は丁度この比に等しく、上の假説を確かめてゐる。此の式に依れば、計算上 He^3 の質量は 3.0152 となる。

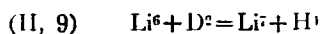
上の三の反応は何れも分解生成物として高速度の He 原子を二個生ずる場合で、運動量保存則があてはまれば之等の二粒子は互に反対の方向に一直線にはじき出されねばならない筈である。Kirchner⁴¹⁾ 及び Dee 及び Walton⁴²⁾ は Li 核の破壊によつて生成した He イオンの通跡を眼に見える様に Wilson 函によつて撮影した。その一例を示せば第十二圖の如くである。圖は Li をプロトンを以て衝撃した際の寫眞で、豫想に違はず互に反対方向に二本の He 通跡が一直線に走つてゐるのが見える。而してその到程を通跡の寫眞によつて測定してみると、平均 8.3cm となり丁度前實驗の 8.4cm と一致し、この反應機構は疑ふ餘地がない迄に明かにせられたのである。又デイブロ

第十二圖



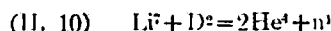
ンによる場合も同様に非常に長い通跡が、互に反対方向に硝子壁を貫いて走つてゐるのが認めらる。到程を測定すると 13.4cm となり之も 13.2cm とよく一致する。雲母の窓を非常に薄くすると 11mm と 6mm との到程の通跡が現はれ He^4 と He^3 の生成も明かにせられた。

(4) Lawrence²⁸⁾ 等及び最近に至つて Cockcroft 及び Walton²⁹⁾ はデイブロンを以て Li を衝撃するとき、非常に長い到程即ち 30cm のプロトンが放出されるのを観察した。之は



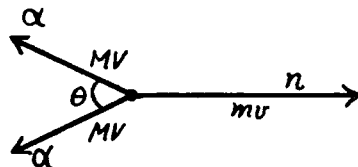
なる反応によつて生成するものでエネルギーの関係はよくこの式を確かめてゐる。

(5) 最後に最大到程 7.8cm の連続した α 粒子群は



なる反応を假定して解釋される。³⁰⁾ これは丁度(11, 2)の如く B^{11} がプロトンによつて衝撃されると三個の He を生じた如くに三個の粒子即ち二個の He と一個の中性子を放出する反応である。この分解型式は第十三圖の如く考へる事が出来る即ち二個の α は常に

第十三圖



同じ速度を有すると假定すると運動量及びエネルギーの保存法則により、 $\theta=0^\circ$ と 180° との間に於て、 α のエネルギーは連続的に變り理論上 $0.9 \sim 8.1 \times 10^6$ ev の値をとる事になる。即ち、7.8cm に相當する値 8.3×10^6 ev とよく一致するのを見る。

然しこの反応の結果、果して中性子が生成するや否やは今決定されない。次の問題は Li の同位元素 Li^6 と Li^7 とを分離して別々に研究して見る必要がある。

最近 Oliphant, Shire 及び Crowther³¹⁾ は Li のイオンを電場と磁場とを通す事によつて同位元素を $1\mu\text{g}$ の程度に分離する事に成功し、 Li^6 と Li^7 とを別々にプロトン及びデイブロンを衝てゝ研究した。その結果は第二表の通りで以上の推論を確かめるものである。而してデイブロンによる場合、 Li^6 よりは 30cm プロトンを、 Li^7 よりは中性子を得て、(11, 10) (11, 11) 式の正しい事を示してゐる。

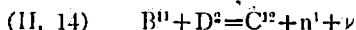
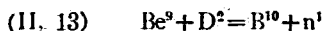
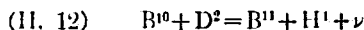
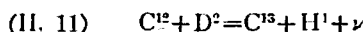
第二表

衝 撃 粒 子	Li^6	Li^7
プ ロ ト ン	11.5mm α	8.4cm α
デ イ ブ ロ ン	1.32cm α 30cm プロトン	~8cm α 中性子

Oliphant, Kinsey 及び Rutherford³²⁾ の實驗に於て H_2^+ を Li に衝てる時は、時に 10cm 以上の長い到程の α 粒子が飛び出して来る事を認めた。之は後の研究によつて、普通の水素中に一萬分

一程度に含まれてゐたデイブロン (D^+) が磁場を通過して H^+ と同一の途をたどり、 Li 核を崩壊した爲に上表の 13.2cm の α を生じたものである事が分り、この方法によつて水素中のデイブロンを検出する事は非常に鋭敏な方法であると云はれてゐる。

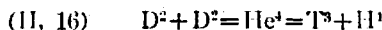
デイブロンを衝撃粒子とする核反応は Li^6 , Li^7 の他に最近 Cockcroft 及び Walton,⁴²⁾ Crane 及び Lauritsen⁴³⁾ などによつて



が研究せられてゐる。この内 (II, 9), (II, 12), (II, 11) は(第一表参照)何れも Li^6 , B^{10} , C^{12} がデイブロンを構成する中性子を一個核内に取り入れて一つ重い同位元素に移り、残りのプロトンを放出する反応であり、又 (II, 10), (II, 14), (II, 13) は Li^7 , B^{11} , Be^9 が何れも D^2 中のプロトンを核内にとり入れて、一つ次の原子番号の元素に移り、残りの中性子を放出する反応である。又反応 (II, 7), (II, 15), (II, 6) は第一表により明かな如く、 Li^6 , B^{10} , N^{14} は何れも原子核内に一個の遊離のプロトンと一個の中性子とを含んでゐるから、一個宛のプロトンと中性子とより成るデイブロンを捕へて安定な α を構成し、之を放出する反応に他ならない。斯様にデイブロンを以て種々の元素を衝撃する場合には中性子を放出するか、プロトンを放出するか、或は α 粒子を放出するかの三様の反応形式があり、その何れが起るかは破壊される原子核の構造に依つて定まる様である。

デイブロンとデイブロンとの反応 之迄デイブロンを種々の原子核に作用せしめる反応を詳述したが、若しデイブロンを以てデイブロンを衝撃したならば如何なる反応が起るであらうか。この時も恐らく前述の三様の反応があるかと考へられるが生成した原子核には興味深いものが現れる。

Oliphant, Harteck 及び Rutherford⁴⁴⁾ は Harteck によりて精製された重水素を使用して、デイブロンとデイブロンとの反応を研究した。その方法は NH_4 鹽及び P_2O_5 を重い水に溶解せしめ、その中の H が D でおきかへられた ND_4Cl , $(ND_4)_2SO_4$, 及び D_3PO_4 を目的物として用ひ、之にプロトン又は α 粒子⁴⁵⁾ を衝てる時は大した著しい影響は現はれないのに、デイブロンを衝てる時は多量のプロトンが放出せられ、1.6cm と 14.3cm の二種の到程を有する群に分けられるのを見た。この反応の結果を次の如く假定する事が出来る。



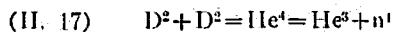
即ち D^2 と D^2 との結合によつて一時的に He^4 が生ずると考へると、今若し D^2 の質量として Bainbridge によつて測定せられた 2.0136 なる値を採用すれば He^4 原子の質量は 4.0272 となる。之を正常の He 原子の質量 4.0022 と比べると非常に多くの過剰のエネルギーを有する事になり、この He 核は非常に不安定なものと考へられる。即ち直ちに分解してプロトンと T^3 とを生ずる。ここに T^3 は第三の質量3なる水素の同位元素即ち Triplon の核を表はしてゐる。

今 T^3 と H^1 とが分離する際に運動量を保存して 1:3 の比に速度を得たとすれば、前述の理由により、その到程の比は 1:9 とならなければならない。然るに 1.6cm : 14.3cm は丁度 1:9 の比となつてゐるからこの二種の到程は 夫々 H^1 , T^3 の到程である事が分る。又その K.E. の値より、不安定な He^4 が H^1 と T^3 とに分解する際に減少する質量が分り、 T^3 の質量として計算上

3.0151 を得る。この結果から T^3 は相等安定な原子核を作つてゐる事が分る。Dee は最近この反應の Wilson 函による寫眞を撮り、 H^1 及び T^3 に屬する長短一對の通跡が一直線に互に反對の方向に走つてゐるのを認め T^3 の生成は確實となつたわけである。

最近 Lozier, Smith 及び Bleakney の行つた質量スペクトルの研究⁴³⁾ に依れば、水の電解によつて製造した純ダイブロン中に T は $5:10^6$ の割合に含まれてゐる事が確定せられた。即ち普通の水素中には $1:10^9$ 又はそれ以下の極めて微量しか含まれてゐない事になる。夫れ故に T は寧ろ電解で集めるより、ダイブロンとダイブロンとの核反應によつて比較的低い電圧で人工的に之を生成する方が得易いかも分らない。Hamwell, Smyth, Van Voorhis 及び Kuper⁴⁴⁾ は純粋な D^2 中にて 50-80KV の真空放電を行ひ、カナル線を重水素中に導いて約一時間の後、之を質量スペクトルにて檢したのに T の含量は $2:10^4$ であつた。即ち處理前の含量 $5:10^6$ に比べてかなり増加してゐる事が分る。随つてこの方法に依つて將來 T 又は T_2 の分光學的研究も可能でないかと思はれる。

Oliphant, Hateck 及び Rutherford⁴⁵⁾ はダイブロン間の反應に於て、プロトンと殆ど同數の中性子が放出されるのを見た。この反應は勿論



であると考へられる。即ち不安定な過剰エネルギーを有する He^4 は或はプロトンを、或は中性子を放出して夫々 T^3 或は He^3 に遷り變るものである。 He^3 はこの反應で檢出できなかつたが、その質量は計算によると 3.0166 となる。又この時放出される中性子群は約 $2 \times 10^{10} \text{ev}$ の一定のエネルギーを有するので中性子を研究する上に都合のよいものとされてゐる。

中性子の人工的生成 中性子は未だその本性並びに諸性質がはつきりされてゐないので、將來興味ある研究題目の一であるが、それには研究に便利な而も非常に強力な中性子源を容易に得る事が必要である。Chadwick 以來、放射能元素の崩壊に依つて生ずる α 線を Be に當てゝ中性子を得てゐたが、之にかはる人工的方法を以て強い中性子流を得る事は出来ないかと考へ、Crane, Lauritsen 及び Soltan⁴⁶⁾ は放電管によりて製した α 粒子即ち He イオンを 600-100KV に加速せしめて、之を Be に衝突せしめ、始めて人工的に中性子を得る事が出来た。然し乍ら天然の α 粒子に比べるとエネルギーが小さいので、強い中性子流を得る爲には、非常に多量の He イオン流を必要としなければならぬ。

又前節で述べたダイブロンとダイブロンとの衝突 (II, 16) によつて得られる中性子をこの目的に用ふる事も出来る。Crane, Lauritsen 及び Soltan⁴⁵⁾ は 90KV に加速したダイブロンを Li 及び Be に衝突する時は (II, 14) 及び (II, 10) によりて非常に多量の中性子を得る事が出来た。之は前回の α 粒子によるよりも 100 倍も強いものである。Li は又プロトンを以て衝突しても中性子が作り得られる。⁴⁷⁾ それは次の反應が相次いで起るものである。



(A, 2) の反應は吸エネルギー反應であるが (II, 1) で生成した He^4 は之を補ふに十分のエネルギーを有してゐる。

然し最近行はれた Dunning⁴⁸⁾ 及び Bonner⁴⁹⁾ の中性子に関する詳細な研究は夫々 (Rn+Be), (Po+Be) の中性子源を用ひてゐて、人工的方法是未だ實用されてゐない。

ダイブロンの安定性 ダイブロンはプロトンと中性子と夫々一個づゝより構成された原子核であると考へられてゐる。故にこの構成に際して失はれた質量缺損を E とすれば、ダイブロンの質量は

$$D^2 = H^1 + n^1 - E$$

で與へられるもし E の値が大であれば D^2 は安定、 E が負になれば D^2 は不安定なものとなる。 D^2 及び H^1 の質量は正確に測定されてゐるから、ディブロン⁵⁴⁾の安定性は只中性子の質量如何にある。然るに中性子の質量は現在随分懸隔のある値が主張せられてゐる。

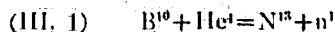
先づ中性子の質量は Chadwick によつて最初に 1.0067 と計算せられたが、この値を用ふる時はディブロンは相當安定な原子核を構成する事となる。Lea⁵⁵⁾は中性子がプロトンと衝突する時 γ 線が放出される事を見出し、之を中性子とプロトンが互に結合してディブロンを構成する際に過剰エネルギーを輻射するものであると考へてゐる。

然るに Curie 及び Joliot⁵⁶⁾ は中性子の質量として 1.010 を唱へ、又 Lawrence, Livingston, Lewis 及び Henderson⁵⁶⁾ 等は 1.0006 なる極端に小さい値を之に與へてゐる。中性子の質量を 1.0006 とする時は、ディブロンは非常に不安定な核となり、約 5×10^{10} ev の過剰エネルギーを有する事になる。Lawrence⁵⁶⁾ 等は人工的に破壊されると思はれない Au, Pt の如き金属に、ディブロンを衝突した時多くのプロトンを生ずるのを見て、ディブロンはそれ自身非常に不安定な元素で重い原子核の近くでは自ら崩壊してプロトンと中性子とを生ずるものであると考へた。Jadensburg⁵⁷⁾ は斯くの如く不安定な核ならば必ず自然に崩壊して放射能を有するであらうと思ひ、鋭敏な電氣計でディブロン⁵⁸⁾の放射能の有無を検したが、否定的な結果に終つてゐる。

之迄種々な方法によつて計算せられた中性子の質量は、多くは 1.0067 に近い値を得てゐるのであり、中性子の質量が斯くの如く小さい事は不思議に考へられる。今後一層種々な方面からの考究が望ましい。

III. 新放射性元素の發見

I. Curie 及び F. Joliot⁵⁹⁾ (1934) は種々の輕元素、例へば Mg, Al, B などに Po の崩壊によつて生ずる α 粒子を衝突した場合、輕元素に新しい放射能が誘導せられる事を發見した。即ち例へば B に Po の α 線を暫く衝突して、Po を除いた後數十分間は B よりある放射線が放射せられる事が認められる。Wilson 函寫眞その他の研究より放射される粒子は陽電子である事が明かとなつた。而して時間と共に減衰する有様は、丁度天然の放射能元素の減衰曲線と同様な指數函数的な變化を行ひ、 t 時間後の放射性原子數 N_t は、元の原子數 N_0 と $N_t = N_0 \cdot e^{-\lambda t}$ なる一分子分解反應と同様の關係式で表はされ、一定の減衰係數 λ を有してゐる。放射性を有する B の半減期を測定の結果約 14 分を得た。即ち B が α 衝突によつて活性化される反應は次の如く考へられる。

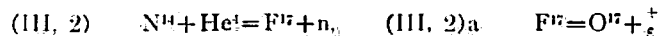


即ち中性子を放出して N^{13} を生ずる。 N^{13} 核は今迄に發見されない窒素の同位元素で、之は次の如く陽電子 (ϵ^+) を放出して

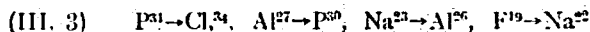


自然崩壊を行ふ全く新しい放射能元素であることが明かになつた。之を Radio-Nitrogen と呼んでゐる。

又 B^{10} と同一の核構造を有する(第一表参照) N^{14} も亦之と同様な反應を行ひ Radio-Fluorine を生ずる。⁶⁰⁾ 即ち



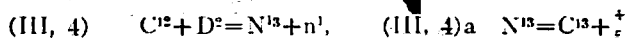
其他種々の元素が之と同様な反應の結果、放射性を生ずることが知られてゐる。例へば P^{31} , Al^{27} , Na^{23} , F^{19} は何れも同じ核構造を有するから同様な反應を行ひ⁶¹⁾



の如く中性子を放出して、新放射性元素 Cl^{34} , P^{30} , Al^{26} を生ずる。是等は何れも陽電子を放出して崩壊し、その半減期は夫々 40分, 3分, 7秒である。F¹⁹ に就ては未だ研究が爲されてゐないが、恐らく半減期が更に短かいので困難であらうと思はれる。この時 Cl^{34} が生ずる事は α 粒子を衝てた P を直ちに燃焼せしめて水に溶解し、 $AgNO_3$ を以て沈澱せしめた沈澱 $AgCl$ 中に放射能が移り、而も同一の半減期を有する事によつて確かめられてゐる。

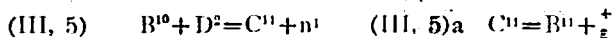
又 Mg のみは偶数番元素であるが同様に α 粒子によつて中性子を放出して $Mg^{24} \rightarrow Si^{27}$ の如く未知の放射性元素 Si^{27} を生ずる。⁵⁹⁾

Cockcroft, Gilbert 及び Walton :⁶¹⁾ Henderson, Livingston 及び Lawrence;⁶²⁾ Lauritsen 及び Crane⁶³⁾ は殆ど同時に石炭をデイブロンを以て衝撃し、丁度 B を α 粒子で崩壊して得られると同一の放射性窒素 N^{13} を得た。即ちその反応は



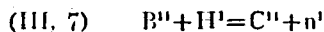
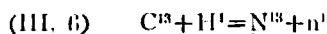
である。Anderson 及び Neddelmeyer⁶⁴⁾ は放射性窒素より放出された陽電子のエネルギー測定を行ひ、自然界に於ける放射能元素の β 崩壊と同様に、そのエネルギーは連続的である事を確かめた。即ち陽電子放出の際にも、之に伴つて Neutrino の放出を假定しなければならない。又この時同時に γ 線の伴ふのを見出したが、之は放出された陽電子が陰電子と共に絶滅を行ふ際に光量子と化して輻射されるものである事が分つた。

B_2O_3 にデイブロンを衝てる時は



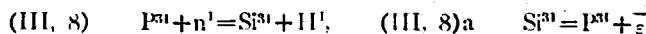
によつて放射性炭素 C^{11} が生ずる。 B_2O_3 を熱する時は放射能は發生する瓦斯體の方に移り、液體空氣を以て集める事が出来るから茲に生じた C^{11} は (CO_2) の形と⁶⁵⁾ なつてゐる事が明かである。

Crane 及び Lauritsen⁶⁵⁾ はプロトンをも、同様に放射性 N^{13} , C^{11} を生ぜしめる事が出来た。その反応は



であらうと思はれる。

最近 E. Fermi⁶⁶⁾ は種々の元素に中性子を衝撃することきは不安定な放射性元素を生じ、之は β 崩壊を行ふ事を明かにした。即ち P, Fe, Si, A, Cl, Ag, I, Ba, F, Cr 其他に於てこの現象が認められ殊にこの中 P 及び Fe に於てその効果が著しく、半減期は夫々 2 及び 3 時間である。化学分析の結果生成した放射性元素は夫々 Si 及び Mn の同位元素である事が分つた。即ち



の如く原子核中に中性子を捕へてその代りにプロトンを放出し、 β 變遷を行つて、又元の元素に歸るものであるらしい。

この稿を終るに當つて、臺北帝大荒勝教授の「原子は人工によりて變轉す」の一文は著者を裨益する所多かつた事を茲に謹んで感謝する次第である。

昭和九年七月九日

文 献

- [A]
- 1) Rutherford, *Proc. Roy. Soc., A* **97**, 374 (1920).
 - 2) Bothe and Becker, *Z. Physik*, **66**, 289 (1930).
Curie, I., *Compt. rend.*, **193**, 1412 (1931).
Webster, *Proc. Roy. Soc.*, **136**, 428 (1932).
 - 3) Curie, I. et Joliot, *Compt. rend.*, **194**, 273 (1932).
 - 4) Chadwick, J., *Proc. Roy. Soc., A* **136**, 692 (1932).
 - 5) Feather, N., *Proc. Roy. Soc., A* **136**, 709 (1932).
 - 6) Chadwick, J., Bakerian Lecture, *Proc. Roy. Soc., A* **142**, 1 (1933).
 - 7) Heisenberg, *Z. Physik*, **77**, 1 (1932).
 - 8) Feather, N., *Proc. Roy. Soc., A* **142**, 689 (1933).
 - 9) Harkins, Gans and Newson, *Phys. Rev.*, **44**, 945 (1933).
 - 10) Dee, P. I., *Proc. Roy. Soc., A* **136**, 727 (1932).
- [B]
- 11) Dirac, P. A. M., *Proc. Roy. Soc., A* **126**, 360 (1930); **A** **133**, 60 (1931).
 - 12) Anderson, C. D., *Phys. Rev.*, **43**, 491 (1933).
 - 13) Blackett, P. M. S. and Occhialini, G. P. S., *Proc. Roy. Soc., A* **139**, 699 (1933).
 - 14) Anderson, C. D. and Neddelmeyer, S. H., *Phys. Rev.*, **43**, 1034 (1932).
 - 15) Chadwick, Blackett and Occhialini, *Nature*, **131**, 473 (1933).
 - 16) Curie et Joliot, *Compt. rend.*, **196**, 1105 (1933).
 - 17) Meitner und Philipp, *Naturwiss.*, **21**, 286, 468 (1933).
 - 18) Chadwick, Blackett and Occhialini, *Proc. Roy. Soc., A* **144**, 235 (1934).
 - 19) Joliot, *Compt. rend.*, **197**, 1622 (1933); **198**, 81 (1934).
 - 20) Thibaud, *Compt. Rend.*, **197**, 1629 (1933).
 - 21) Gray and Tarrant, *Proc. Roy. Soc., A* **136**, 662 (1932).
- [C]
- 22) Rutherford, *Phil. Mag.*, **37**, 581 (1919).
 - 23) Chadwick, J., Constable, J. E. R. and Pollard, E. C., *Proc. Roy. Soc., A* **130**, 463 (1930).
 - 24) Blackett, P. M. S. and Lees, D. S., *Proc. Roy. Soc., A* **136**, 325 (1932).
 - 25) Feather, N., *Proc. Roy. Soc., A* **141**, 194 (1933).
 - 26) Chadwick, J. and Constable, J. E. R., *Proc. Roy. Soc., A* **135**, 48 (1932).
 - 27) Cockcroft, J. D. and Walton, E. T. S., *Proc. Roy. Soc., A* **137**, 229 (1932).
 - 28) Oliphant, M. L. E. and Lord Rutherford, *Proc. Roy. Soc., A* **141**, 259 (1933).
 - 29) Lawrence, E. O. and Livingston, M. S., *Phys. Rev.*, **40**, 19 (1932).
 - 30) Lawrence, E. O. and Livingston, M. S., *Phys. Rev.*, **45**, 608 (1934).
 - 31) Lawrence, E. O. and Livingston, M. S. and White, M. G., *Phys. Rev.*, **42**, 150 (1932).
 - 32) Henderson, M. C., *Phys. Rev.*, **43**, 98 (1933).
 - 33) Gamow, *Z. Physik*, **51**, 204 (1928); **52**, 510 (1929).
 - 34) Lawrence, E. O. and White, M. G., *Phys. Rev.*, **43**, 304 (1933).
 - 35) Lawrence, E. O. and Livingston, M. S., *Phys. Rev.*, **43**, 369 (1933).
 - 36) Urey, Brickwedde and Murphy, *Phys. Rev.*, **40**, 1 (1932).
 - 37) 外山, 物理化学の進歩, 第八卷, (紹) 1 (昭和九年).
 - 38) Lawrence, E. O., Livingston, M. S. and Lewis, G. N., *Phys. Rev.*, **44**, 56 (1933).
 - 39) Oliphant, M. L. E., Kinsey, B. B. and Lord Rutherford, *Proc. Roy. Soc., A* **141**, 722 (1933).
 - 40) Kirchner, Sitz. Ber. bayer. Akad. Wiss., **129**, (1933).
 - 41) Dee, P. I. and Walton, E. T. S., *Proc. Roy. Soc., A* **141**, 733 (1933).
 - 42) Cockcroft, J. D. and Walton, E. T. S., *Proc. Roy. Soc., A* **144**, 704 (1934).
 - 43) Oliphant, Shire and Crowther, *Nature*, **133**, 377 (1934).
 - 44) Wu and Uhlenbeck, *Phys. Rev.*, **45**, 553 (1934).
 - 45) Crane, H. R., Lauritsen, C. C. and Soltan, A., *Phys. Rev.*, **44**, 692 (1933).

- 46) Oliphant, M. L. E., Harteck, P. and Lord Rutherford, *Proc. Roy. Soc., A* **144**, 692 (1934).
- 47) Lord Rutherford and Kempton, A. E., *Proc. Roy. Soc., A* **143**, 724 (1934).
- 48) Lozier, W. W., Smith, P. T. and Bleakney, W., *Phys. Rev.*, **45**, 655 (1934).
Tuve, Hafstad and Dahl, *Bull. Am. Phys. Soc.*, **9**, 13 (1934).
- 49) Harnwell, G. P., Smyth, H. D., Van Voorhis, S. N. and Kuper, J. B. H., *Phys. Rev.*, **45**, 656 (1934).
- 50) Crane, H. R., Lauritsen, C. C. and Soltan, A., *Phys. Rev.*, **44**, 514 (1933); **45**, 507 (1934).
- 51) Crane, H. R. and Lauritsen, C. C., *Phys. Rev.*, **44**, 784 (1933).
- 52) Dunning, J. R., *Phys. Rev.*, **45**, 586 (1934).
- 53) Bonner, T. W., *Phys. Rev.*, **45**, 601 (1934).
- 54) Lea, *Nature.*, **133**, 24 (1934).
- 55) Curie and Joliot, *Nature.*, **133**, 721 (1934).
- Curie et Joliot, *Compt. rend.*, **196**, 1885; **197**, 237, (1933).
- 56) Lawrence, E. O., Livingston, M. S. and Lewis, G. N., *Phys. Rev.*, **44**, 56, 782 (1933).
- 57) Ladenburg, R., *Phys. Rev.*, **45**, 224 (1934).
- 58) Curie, I. et Joliot, F., *Compt. rend.*, **198**, 254 (1934).
Curie and Joliot, *Nature.*, **133**, 201 (1934).
- 59) Wartenstein, L., *Nature.*, **133**, 564 (1934).
- 60) Frisch, O. R., *Nature.*, **133**, 721 (1934).
- 61) Cockcroft, Gilbert and Walton, *Nature.*, **133**, 328 (1934).
- 62) Henderson, Livingston and Lawrence, *Phys. Rev.*, **45**, 428 (1934).
- 63) Lauritsen and Crane, *Phys. Rev.*, **45**, 430 (1934).
- 64) Neddelmeyer and Anderson, *Phys. Rev.*, **45**, 499 (1934).
- 65) Lauritsen and Crane, *Phys. Rev.*, **45**, 497 (1934).
- 66) Fermi, E., *Nature*, **133**, 757 (1934).