原子核破壞用電源

理化學研究所研究員 理學博士 仁科芳雄

（動力 第37號 拔刷）

原子核破壞用電源

理化學研究所研究員　理學博士　仁　科　芳　雄

元　素　の　變　換

一つの元素を變へて他の元素とするといふ試みは古くから行はれた事であつた。所謂錬金術（alchemy）は即ちこれで、銅や鐵を金にしようと苦心したものであるが、それには一として成功したものはなかつた。

輓近の研究によつて凡ての物質を構成する原子の構造が明となつて、始めてどうすれば錬金術の目的が達せられるかといふ事が明になつて來た。凡ての原子は大體に於て1 cm の約1,000 萬分の1の程度の直徑を有つものであつて、其中心に原子核があり、其周圍を電子が取り卷いて居る。そして其電子の數は物質によつて色々異つて居る。最も少いのは水素の1個で、最も多いのは ウランの92個である。そして此間に介在する元素は2個の未發見のものを除いては凡て知られて居る。

電子は一定の陰電氣を帶びて居る。それを $-e$ とすると原子核の周圍に Z 個の電子を有つ原子では、核外に $-Ze$ の陰電氣がある事になる。そこでこれと同じ大さで符號の反對な Ze なる陽電氣を原子核が有つて居づて、原子全體としては電氣的に中性となつて居る。此 Z なる整數を其元素の原子番號と呼んで居る。

電子の質量は原子核の質量に比べると極めて小さなものであるから、原子の質量の殆ど全部は中心の原子核にあると見られる。即ち物の重さといふのは原子核の性質と見て好い。此重さといふ事を除いて他の普通の物性は何によつて定まるかといふと、其大部分は核の周圍にある電場並に電子の數 Z によつて一義的に決まるものである。所がこれは又何によつて與へられるかと云ふと、それは結局原子核の有つ電荷 Ze によつて決るものである。從つて間接に云へば物質の性質は凡て原子核によつて支配せられるものと云つて好い。

核外にある電子の數はこれを變へる事も困難ではない。例へば化學變化であるとか、放電現象であるとか云ふのは皆此核外電子の數又は其狀態の變化によるものである。これに要するエネルギーは普通1乃至10電子ヴォルトの程度に過ぎない。但し電子ヴォル

トといふ單位の大さは、1ヴォルトの電位差によつて加速された電子の有つエネルギーである。前述の通り原子の性質は直接には核外電子の數竝に其狀態によつて定まるものであるから、斯樣に電子の數や狀態を變化すると其原子の性質は變つて來る。例へば同じ酸素にしても化合して居るものと、單原子狀態のものとは全く異る性質を有つて居る。然し性質は變つてもこれは何處迄も酸素であつて、初めの狀態に置けば同じ元の酸素に戻つて了ふ。即ち核外電子に變化を起す事は容易であるが、それは一時的であつて、それによつて一つの元素を他のものに變へるといふ事は出來ない。

それではこれを行ふにはどうすれば好いかと云ふと、物性の根源をなす原子核に變化を與へ、有つて居る Ze なる電荷を變へなくてはならぬ。さうすると其變化は永久的であつて、核外電子の數もそれに伴つて變り、元素は別のものになつて了ふ譯である。

これでどうすれば錬金術時代の夢を實現し得るかといふ事は判つたのであるが、其實行問題となると非常な困難を伴ふ。といふのは原子核の變化を起させるに要するエネルギー密度は非常に大きなものである。原子核の大さは1cm の約1兆分の1程度の直徑に過ぎない小さなものであつて、これを破壞變換させるには10萬乃至100萬電子ヴォルト程度のエネルギーを要するものであるから、其エネルギー密度は莫大なものである。到底普通の物理や化學に使用して居る手段では成功しない。これが從來錬金術の失敗した理由であつて、又今日其夢が實現せられて元素の變換が實驗せられるに至つたのも、其手段が案出せられたからである。そしてそれは今日の電氣技術の進歩に負ふ所洵に多大である。此意味に於て「**動力**」に其電源に關する大要を書くのは意義のない事ではなからうと思ふ。孰れの大發見、大發明も皆時代の產物であるのは古來變りない事である。

上述の大きなエネルギー密度は如何にして得られるかといふと、それはやはり原子核と同じ位の大さを有つ粒子に、10萬乃至100萬電子ヴォルト程度のエネルギーを與へれば好い。そしてこれを用ひて變換しやうとする元素の原子核を砲擊破壞するのである。

よく知られて居る通りラヂウム又はトリウム及び其一族の元素の放出する α-線は、ヘリウム原子の核であつて、それは數百萬電子ヴォルトのエネルギーを有つて居る。それで1919年に英國の Rutherford はこれを使つて諸種の元素の原子核を砲擊し、始めて元素の變換に成功した。例へば窒素を變換して水素と酸素とにしたり、アルミニユームを變へて水素と硅素にしたりなど從來不可能と思はれた事を行つた。此方法で變換させたものは輕い元素約13種許りであつた。

斯樣にラヂウムは元素の變換に有能な武器ではあるが、普通利用し得る量は極めて少く、又原子核破壞用砲彈として極めて有利な水素原子核即ち陽子、竝に重い水素（原子量2）の原子核即ちデゥテロンなどはラヂウムからは出て來ない。そこでこれ等の粒子に莫大なエネルギーを人工的に與へる方法が色々と工夫せられた。上述の樣に α-粒子は數百萬電子ヴォルトのエネルギーを有つて居る所から、目的を達する爲にはどうして

もこれだけのエネルギーを有つ粒子を作る必要があると考へられ、實驗物理學者は此數字を目指して技術を進めて行つた。

所が1932年に Rutherford の實驗室で Cockcroft、Walton の2人は僅か12.5萬ヴォルトで速加した陽子（從つて其エネルギーは12.5萬電子ヴォルト）を用ひてリチウム原子核の破壞に成功した。これによつて見ると原子核の破壞にはエネルギーだけが問題となるのではなくて、破壞用砲彈が何であるかといふ事が重要な問題であるといふ事が判る。今此場合に行はれた原子核の變換反應を式で示すと

$$ {}_3Li^7 + {}_1H^1 \rightarrow {}_2He^4 + {}_2He^4 $$

となる。玆に化學記號の左下に附けた數字は前述の原子番號Zを表はし、右肩の數字は質量番號即ち原子量に近い整數を示す。其各の數字の和は左邊と右邊と常に等しい。これは電荷竝に質量の不滅法則から來る結果である。此式で示す樣にリチウム原子核1個を陽子で破壞すると2個のヘリウム原子が出來る。今日では斯樣にして高電壓によつて加速した粒子を用ひて元素の變換を行ふ實驗は、各國競つてこれを實施し、新しい結果を得る事に努めて居る。其結果として變換せられた元素は輕い方から次第に重い方に進んで行き、今日では既に銅が破壞せられて居る。今後益々重いものが壞されて行く事であらう。のみならず此際に出來た元素にはラヂウム同樣に放射性能を有つ全く新しいものゝある事が知られ、又原子核破壞の際に出來る中性子（電氣を帶びず、陽子と同じ位の質量を有つ粒子）を用ひると、殆ど凡ての原子核が破壞せられたり又は放射性能を有つ物質が作られる事が判つた。

然し玆に述べて置くべき事は、此元素變換は實用となるかといふ事である。例へば上述の方法でリチウムから多量のヘリウム瓦斯を作り得るかと云ふと、それは今日迄の方法では非常に長い時間と多くの費用とを必要とし到底問題にはならない。從つて此點では錬金術時代の夢は今尙夢として殘されて居る譯である。只上述の人工的にラヂウム同樣の放射性物質を作る方は、出來た物質が極めて微量でも役に立つから、これは實用に供せらるゝのも遠くない事と思はれる。殊に食鹽を重水素核で變換した場合の樣に、ラヂウムの到底及ばない深い所をも透過し得る放射線を出し得るから、此方は醫學上竝に工學上重要視せられて居る。

原子核破壞用砲彈

上述の通り今日迄主として用ひられた原子核破壞用の粒子は、水素原子核即ち陽子、重水素核即ちデゥテロン、中性子、ヘリウム原子核即ち α-粒子、リチウム原子核であつて、其質量は電子に比べて數千倍も重い粒子である。これ等は中性子を除いては皆帶電して居るから、電壓を加へて加速し所要のエネルギーを得せしめる事が出來る。其加

速の方法にも數十萬乃至數百萬ヴォルトの電壓を直接一度に加へるのと、1萬とか2萬ヴォルトかの高周波電壓により反覆加速するのと二通りある。中性子は加速する事は出來ないから原子核破壞の際出來たものを用ひる。但し其エネルギーを失はせてこれを遲くする事は出來る。此遲い速度の中性子が放射性物質を作るに非常に有能である事が最近明かとなつた。

又ラヂウムの出す電磁波卽ち γ-線も重水素、ベリリウムなどの原子核を破壞するものである事が發見せられ、從つて高電壓を使つて γ-線と同じ位の波長の X-線を發生させ、これをベリリウム原子核破壞に用ひて中性子を作る事も行はれた。

電子を加速し、これにより直接原子核の變換を行ふといふ事は、可能であるかどうか未だ不明である。これは今後研究すべき問題と思はれる。

以上の原子核破壞用の砲彈を製造する電源は色々ある。以下其大要を述べやう。

高　電　壓　電　源

上述の通り此電源は電壓が非常に高く、これにより一度に粒子を加速するのに用ひられる。今重い粒子卽ち陽電氣を帶びたものを加速する場合を考へると、**第1圖**に示すやうに、V_1 なる 30〜50kV の電源で作つた陽イオンを、V_2 なる數 100 kV 乃至數 1,000 kV で加速し、これを變換させようとする原子核に衝突させる。電子を加速して X-線を生ぜしめるには、陰陽の極を逆にすれば好い。

第 1 圖

これで明かな通り此方法では高電壓に耐へ得る粒子加速用の眞空管を必要とする。今日では電源の方は 1,000 萬ヴォルト迄のものが得られて居るが、これに耐へ得る眞空管が出來ないので、其方で、電壓が制限せられて居る。以下今日使用せられて居る方法を順次に說明しやう。

(1) Cockcroft-Walton の方法[1]

これは前述の通り人工的に加速した粒子により元素の變換を行つた最初の電源として知られて居る。そして此方法によると比較的簡單に 1,000kV 迄の高電壓直流が得られるのでよく用ひられる。

此接續は**第2圖**に示す通りであつて、T なる變壓器、C_1、C_2、C_3、……C_n, D_1、D_2、D_3、……D_n なる蓄電器、竝に K_1、K_1'、K_2、K_2'、K_3、K_3'、……K_n、K_n' なるケノトロン整流管により、變壓器 T の有する波高電壓の 2n 倍の直流電壓を得る。其原理を述べると、變壓器 T の左端子が＋、右端子が－なる位相の時、先づ D_1 は K_1 を通して波高電壓 V_m に充電せられる。次に變壓器の位相が逆となると D_1 の上端は $2V_m$ とな

第 2 圖

り、これにより C_1 は K_1' を通して充電せられる。次に又變壓器電壓の位相が最初の通りに戻ると、C_1 は K_2 を通して D_2 を充電し、且つ D_1 は K_1 を通して失つた電荷を補給せられる。次の逆位相では C_2 が D_2 により充電せられると同時に、C_1 は失つた電荷を D_1 から補給せられる。これを繰り返す事により C_1、C_2、C_3、……C_n は孰れも $2V_m$ に充電せられる。これが直列にせられて居るから、最大電壓は $2nV_m$ となり脈動のない直流が得られる。

以上は負荷のない場合であつて、負荷があると脈動を生ずる。今 $C_1=C_2=\cdots=C_n=C$ とし、第3圖のやうにRなる負荷を各蓄電器間に與へたとすると、其脈動率は

$$\frac{\delta V}{V}=\frac{n+1}{2}\cdot\frac{\tau}{CR}$$

第 3 圖

但しτは交流電源の週期である。

此裝置に於ては D_1 は V_m に對する絶縁耐力を必要とするが、他の凡ての蓄電器並に各ケノトロン整流管は $2V_m$ に對する絶縁耐力を必要とする。

Cockcroft、Walton は此方法により約 800 kV 迄の直流電壓を得た。そしていくらでも高い電壓が得られるであらうと云つて居る。然し電壓が高まるに從つて下の方の蓄電器 D_1、C_1 等の容量を次第に大きくする必要があり、絶縁も尨大となり、それに眞空管の耐力も問題となるから自ら制限があるであらう。目下の技術では 1,500 kV 乃至 2,000 kV が止りではないかと思はれる。

(2) 高電壓變壓器

これは試驗用變壓器を用ひるものである。變壓器は1個で 1,000kV を出すものも作られて居るが、多くは第4圖又はそれ

第 4 圖

に類似した直列接續により2個、3個又は多くの變壓器を用ひて居る。

現在此方法によつて元素の變換を行つて居るのは、米國 Pasadena の California Institute of Technology にある Kellogg Radiation Laboratory の Lauritsen 一派の人々だけの樣である。[2] 此所では 1,000kV の變壓器を用ひて居る。500 kV 以上の交流を整流する事は色々の困難を伴ふから、整流しないで交流の儘これを使つて居る。從つて役に立つのは半周波だけである。此方法は 1,000～1,500kV 位が止りであらうと考へられる。

(3) 衝擊電壓發生器

前述の通り今日では使用電壓は寧ろ眞空管の耐電壓能力によつて制限せられて居る。所が衝擊電壓の樣に極めて短時間の高電壓に耐へ得る眞空管は比較的容易に作製し得るので、短時間で目的を達し得る實驗には此方法が用ひられる。

其電氣的接續は周知の通り Marx[3] の回路と稱せられるもので、其原理は高抵抗を通して蓄電器を並列に充電し、火花間隙を通してこれを直列に放電して、各蓄電器の電壓が加へられるやうにするものである。

今其接續の2例を示せば**第5圖**の通りである。此兩者の差は充電抵抗の配置にある。

伯林大學の Brasch、Lange[4] は A.E.G. の約 2,400 kV の衝擊電壓により、陽子を加速して原子核の破壞を行つたと報告したが、其後此目的には餘り用ひられて居ない樣である。寧ろ電子を加速して γ-線と同じ程度の波長の X-線を發生させるに適して居る。そしてこれによつて上述の通り Be 原子核を破壞して、中性子を發生せしめる事に成功した。

これは又高速度の陰極線卽ち β- 線を作るにも非常に都合が好い。これ等の結果から見て、此方法は醫學上竝に工學上の應用に將來があるやうである。

第 5 圖

現在此方法によつては 5,000 kV の電壓は得られて居り、又裝置全體を油の中に入れて 10,000kV の電壓を出さうとする試みが、伯林の A.E.G. あたりで行はれて居るが、未だ成切はして居ない。

(4) Van de Graaff の靜電發電機[5]

これは Wimshurst の感應起電機と同樣の原理によるものであつて、最も判り易い形は第 6 圖に示すものである。2 個の金屬製中空の球の中にプレイを置き、これに絹ベルトを掛けて圖のやうに回轉させ、これに變壓器とケノトロンとによつて得られた約 10 kV の直流により電荷を與へてやると、それは球の中に運ばれる。さうすると電荷は球の電壓の如何に拘らずそれに與へて行かれる。此方法

第 6 圖

第 7 圖

第 8 圖

で一方の球を陽に、他を陰に荷電させると非常に高い電位差を得る。

此作用を更に有効にするには、**第7圖**の通り球内に尖端を備へて置く。さうすると持ち上げられたと同量で逆符號の電氣が運び去られるから能率がよくなる。更に**第8圖**のやうにして置くと、摩擦などにより僅かに生じた電荷が、感應により蓄積的の効果を示して球は荷電される。從づて外部から 10 kV を加へてやる必要はなく自働的に電壓を生ずる。

此原理により Massachusettes Institute of Technology の Vande Graaff、Compton、Van Atta は Colonel Green の提供した Round Hill の飛行船格納庫内に**第9圖**に示すやうに、15尺の直徑の球を用ひた高さ43尺の尨大な靜電發電機を設置し、10,000 kV を發生させた。これを原子核の破壞に用ひるには、加速用の眞空管を兩球の間に渡し、一方からイオンを出し、他方でこれを受けて核を破壞せしめる計畫である。そして實驗者は

第 9 圖

各球の内部に入つて操作を行ひ、其連絡は無線通信によるといふ事である。此發電機で電壓は豫定通り發生させ得たやうであるが、これを用ひて原子核の變換を行つたといふ報告は未だ見ないやうである。

此發電機を實際原子核の變換に用ひて居るのは米國 Washington にある Carnegie Institution の Tuve[6] 其他の人々で、球の直徑2米のもので 1,000～1,500 kV を發生させて實驗を行つて居る。

此方法によると高電壓の直流を得る事は最も簡單であるが、空中の濕氣が多くなると電壓が出難い。これを防ぐために裝置全體を眞空中に入れる考案が進められて居る。これによつて全體の容積が著しく減少される。

上述のやうに 10,000 kV を發生しても、これに堪へ得る加速眞空管の製作は多大の困難を伴ふ事であらう。

高　周　波　電　源

(1) 反　覆　加　速　法

(a) 直　線　型　加　速

これは California 大學の Lawrence と Sloan[7] との考案になるものであつて、元素變換に用ひられたといふ事を聞かないが、次の方法と關聯してして居るから述べて置く。其原理は數萬 V の高周波電源を用ひ、イオンを 30 回以上も加速するものである。從つて其結果粒子は 100～200 萬V によつて加速せられたと同等のエネルギーを有し、而かも眞空管の絶緣は數萬 V に對するもので足りるから甚だ都合が好い。

今其大要を示すと第10圖の通りである。イオン發生管より出たイオンは直線的に澤山

第　10　圖

列べられた中空の金屬製圓筒に入る。これ等の圓筒は一つ置きに高周波電源の各極に圖の通り連絡せられてある。

今イオンは陽電氣を帶びて居るとし、これが1なる圓筒の直前に來た時、圓筒が負電壓になつて居るとするとイオンは加速せられる。それが圓筒内を走る間は加速せられな

い。そして圓筒を出て來た時に恰度1が正電壓、2が負電壓となる樣に、圓筒の長さと高周波電源の周期とが調整せられて居るとすると、イオンは1と2との間で再び加速せられる。そして2の圓筒を通過して出た時に又恰度2が正電壓、3が負電壓となる樣に2の圓筒の長さを定めて置くと、2と3との間で又加速せられる。これが爲には圓筒の長さは速度に比例して順次に增して行く必要がある。かやうに加速を繰り返せば、最後に圓筒を出たイオンは、高周波電壓に圓筒間の間隙の數を掛けただけの電壓で加速されたと同等のエネルギーを有つ事となる。

Sloan と Coates[8] とは 20 kW の眞空管を用ひ、波長 29.8 米、電壓 79 kV の高周波を起して水銀イオンを 36 回加速し、2.85×10^6 電子ヴォルトのエネルギーを與へた。然しこれを原子核變換に用ひたといふ報告はない樣である。此の方法の缺點は加速圓筒の全長が非常に長くなる事である。殊に原子核破壞に有力な水素又は重水素の核は輕いから、一層長いものを必要とする。上述の重い水銀イオンの場合でも 185cm の長さとなつて居る。此爲めに原子核變換には用ひられて居ない。

(b) 同轉型加速

これは Lawrence[9] の考案になるもので、上の方法の缺點をマグネツトの助けにより取除いたものである。

第 11 圖

第11圖に示す樣に半圓形中空の金屬製の函2個を向き合はせ、これを圖のやうに約 20 kV の高周波電源に接續する。此函を大きな電磁石の極の間に入れ、均一磁場Hが函の面を垂直に貫くやうにして置く。

此函の中には水素又は重水素等の瓦斯を低壓にして入れ、中心のFなるフィラメントより出る電子によりこれを電離してイオンを作る。兩方の函の間の間隙にあるイオンは高周波電壓の爲に加速せられて函の中に入る。函の中を通る間は加速せられないが、磁場Hの爲に曲げられて圓形の路を描いて走る事となる。そして次の間隙に來た時恰度高

周波高壓の位相が移つて逆となるやうに半圓の半径と周波數とを調整して置くと、イオンは此處で再び同じ方向に加速せられる。そして前よりは大きい半徑の圓を描いて函の中を走る。次の間隙に出て來ると、磁場が均一である限り今度は當然高周波の位相がこれを同じ方向に加速するやうになつて居る。其理由はイオンが加速せられて其速度を增すと、それに比例して函の中の圓の半徑が大きくなるから、函の中を通過して間隙に出て來る時間は常に同一である。從つて一度イオンが同期調整せられると、終り迄それが間隙に出て來る度毎に同じ方向に加速せられて行く。かやうに加述を繰り返して行くと、高周波電壓にイオンの回轉の回數の2倍をかけただけの電壓により加速せられたに相當するエネルギーを得る事となる。而かも絶縁は只高周波電壓に耐へれば好い。

Lawrence は Federal Telegraph Co. から 1,000 kW の Poulsen 電孤發振器に用ひてあつた、直徑45吋の極面積を有つ65噸の大磁石を讓り受け、これを用ひて400萬電子ヴォルト迄の陽子を得、又最近は300萬電子ヴォルトの重水素核を得て居る。これ等の高速粒子を用ひて盛に種々の原子核の破壞變換を行ひ、最近では銅を變換して放射性物質に變へる事を行つて居る。**第12圖**は此裝置を示すものである。

第 12 圖

此方法は用ひ得るイオン電流が少いといふ缺點があつたものであるが、今日はこれも改良せられて 10^{-5} アンペア程度を得て居る。そして絶縁の點では少しも困難がないから、エネルギーの大きな粒子による原子核變換には、恐らく此方法が最も有利で其將來が期待せらるべきものであらう。Lawrence は 1,000 萬電子ヴォルトのエネルギーを目指して技術を進めて居る。實用の目的を以て人工的に放射性物質を作るにしても、目下の所此方法を措いて他にないと思はれる。前述の高電壓を用ひる方法でこれだけのエネルギーを得る事は絶縁の問題で實行困難であらう。只大きな電磁石を必要とする事は缺點である。

2) 共 振 變 壓 器

これは Sloan[10] の考案になるもので、一次と二次とが一つの共振回路として作用するやうな高周波變壓器によつて、二次捲線の端に共振高電壓を生ぜしめるものである。こ

第　13　圖

第　14　圖

れには色々の回路があるが、其一例を示せば**第13圖**の通りである。これは push-pull 型の發振裝置を用ひ、これから出る振動を二次捲線が¼波長の長さを有つ共振變壓器に加へる。さうすると二次端子には高い電壓が現はれる。共振變壓器は**第14圖**のやうに全部密閉して眞空にした金屬の函の中に入れられるから、何等絶縁の心配はなく極めて便利である。

Sloan は 100～300 kW の發振眞空管を用ひ、15 kV、60サイクル の交流を陽極電壓として 800 kV の共振電壓を得、これによつて X-線を發生せしめた。

此裝置は陽イオンを加速するに其儘用ひられるが、又これに反覆加速の方法をも併用して、共振電壓の2倍の電壓によつて加速せられたと同等のエネルギーを與へる事も出來る。其裝置は**第15圖**の通りであつて、イオン源より出たイオンは加速筒(金屬)に入る前に共振電壓により一度加速せられる。そして筒の長さを適當に撰べば、イオンが他端に達した時に恰度半週期を經て居るやうに出來るから、再び同じ方向に加速せ

第　15　圖

られる事となる。これを原子核の變換に用ひる考へであるが、其結果については未だ報告がない。

此方法によると非常に大きな電流（10^{-3} A の程度）が得られる。只陽イオンを加速する場合にも電子が自ら逆方向に加速せられるから、X-線を澤山出す缺點がある。又大きな發振用の眞空管を必要とする事も一つの難點である。

結　　語

以上で今日迄に用ひられた各種の原子核變換用電源を列記した。各々得失があり、從つて場合と目的とによつて撰擇すべきである。

只玆に特筆すべき事は、其孰れを見ても從來の物理竝に化學の實驗室に於ける裝置とは比較にならぬ大仕掛のものであつて、寧ろ大電機工場の試驗室若しくはそれ以上の設備を必要とするといふ事が判る。これが今日の原子核物理學の實驗室の特長である。從つて此方面の業績は直ちに一國財力の反響であるとも見られ、從來の學術進歩が主として智力に依賴して來た事に對照して、餘程趣を異にして來たと云ふ事は、特に識者の一考を煩はしたい事である。（完）

文　　獻

（1） J. D. Cockcroft and E. T. S. Walton : Proc. Roy. Soc. A. 136, 619 (1932)

（2） H. R. Crane, C. C. Lauritsen and A. Soltan : Phys. Rev. 44, 514 (1933)

（3） E. Marx. : E. T. Z. 45, 652 (1924) ; D. F. Miner : El. J. 23, 596 (1926)

（4） A. Brasch und F. Lange : Zs. f. Phys. 70, 10 (1931) ; A. Brasch : Naturwiss. 21, 82 (1933)

（5） R. J. Van de Graaff, K. T, Compton and L. C. Van Atta : Phys. Rev 43, 149 (1933)

（6） M. A. Tuve, L. R. Hafstad and O. Dahl : Phys. Rev. 43, 1055 (1933) ; Phys. Rev. 45, 768 (1934)

（7） E. O. Lawrence and D. H. Sloan : Phys. Rev. 38, 2021 (1931)

（8） D. H. Sloan and W. M. Coates : Phys. Rev. 46, 539 (1934)

（9） E. O. Lawrence and M. S. Livingston : Phys. Rev. 40, 19 (1932) ; Phys. Rev. 45, 608 (1934)

(10) D. H. Sloan: Phys. Rev. 47, 62 (1935)