宇宙線並に元素の人工變換について

理學博士　仁　科　芳　雄

火兵學會誌　第32卷第2號拔刷

昭和13年7月

宇宙線並に元素の人工變換について*

理學博士　仁　科　芳　雄

要　旨　今日問題となつてゐる宇宙線とはどんなものであるか，其測定は如何にして行はれるか，其本質は何であるか等について述べる．次に現在行はれて居る元素の變換はどんなにして出來るやうになつたか，其の方法はどうであるか，又變換によつて如何なるものが得られるか，そして出來た人工放射性元素の學術的並に實用的の價値について説明をする．

會長より御紹介ありました仁科であります．これから先づ宇宙線のお話を致し，次に元素の人工變換について述べ，それから實驗室に元素の人工變換の裝置があります――が生憎今日は cyclotron が壞れてゐてその作用を御覽に入れる事は出來ませんが，その代り機械の內部がわかります――から御覽に入れます．

I. 宇宙線

先づ宇宙線の話ですが，「宇宙線とは何か」と皆樣からよく質問を受けます．處が何かと云ふ事を一口で云へる樣な簡單なものではなくて，相當複雜なものであると云ふ事が此の頃解つて來ました．先づ宇宙線の最も特異な性質は何かと申しますと，夫れは總ての物質を突き透すと云ふ能力のある事であります．普通の光線も物質によつては相當好く透過します，例へば水のやうなものは隨分深くまで透す事が出來ます．然し之は水のやうな所謂透明なものだけでありまして，何んな物質でも透すと云ふ譯ではありません．處が宇宙線は何んな物質でも厚いものを突き透すのであります．尤も物質により好く透すものと，好く透さないものとはあります．又宇宙線の全部が全部かやうな透過力を持つと云ふ譯ではありません．大部分は地球の大氣に吸收されます．大氣の厚さを水の厚さに換算しますと，水約 10m 位の重さになります．卽ち水 10m 位で地球をとり捲いたと同等の重さであります，その大氣で宇宙線の大部分は吸收され，地上に達するのは僅かなものなのです．地球の表面より高さ 2 萬乃至 3 萬 m の所の宇宙線の强度に較べると，地上の宇宙線の强度は 1/200 乃至 1/300 に過ぎません．更に地下にずつと深く行くと又其の數百分の一乃至數千分の一となります．でありますから實際さう云ふ深い所へ行くものは非常に僅かのものでありますが，從來我々の知つて居た放射線例へば X-線とかラヂウムの γ-線などは水數 10 cm で吸收されて了ふのですからこれに比べると宇宙線はまるで桁違ひの透過力を持つてゐるわけです．之が宇宙線の特性であります．宇宙線は何であるかと云ふ事は後に申上げる事に致します．

次に，「宇宙線は何うして發見されたか」と云ふ事を申上げます．地球の地殼或は岩石には僅かながらラヂウム，トリウム等の放射性物質を含み，之が放射線を出します．又空氣中にもラドン瓦斯があつて放射線を出して居ます．その放射線が空氣を電離し空氣分子を正負の電氣を帶びたイオンにします，その爲に放射線はエネルギーを失ひ空氣に吸收されることになります．そこで若し我々が地上高く昇つて行くと放射線はどうなるかと云ひますと，放射線中で一番透過力の强いのは γ-線（α, β, γ 線の中で）でありますが，此 γ-線も地表との間に介在する空氣に吸收せられて，高さ 1km の地點では地上の放射性物質より出す放射線は殆んど到達しないことが推定されます．之を實際試驗したのが，瑞西の Gockel と墺太利の Hess とであります．それには空氣の電離を測る裝置があつて，空氣 $1cm^3$ 中に幾個のイオンがあるかを求めることが出來ます．此測定器を持ち氣球に乘つて昇つて行きました．處が始めの間は豫想通り空氣の電離は減つてまゐりましたが，3 乃至 4 km となると放射線がかへつて增して來ました．これは何を意味するかと申せば，どうしても上空から何か放射線が來てゐなくてはならない事になります．上から來てゐるとすると，その放射線の透過力は從來我々の知らない大きなものである事

---

* 昭和 13 年 4 月 23 日，理化學研究所に於ける火兵學會・精機協會・聯合講演會の講演

が解ります，と云ふのは，前述の通り空氣の大體の重さが水 10m に相當してゐるので，放射線が地球外から來て上空 4km の點に達するには，水にして 5〜6 m の空氣を透さねばならぬ事になります．さう云ふ厚さのものを透すものは從來ありませんでしたから，未知の透過力の強い放射線が地球外から來て居る事になります．これが宇宙線の發見で歐洲大戰前 1910〜1912 年頃の事でありました．この發見で Hess は二三年前 Nobel 賞をもらつてゐます．歐洲大戰でこの研究は一寸途絶へましたが，戰後段々と研究が盛になり，今日では世界中到る所で多くの物理學者がこれを研究し，研究すれば研究するにつれて益々豫想外の結果に導いたのであります．

宇宙線は實用になるかどうか，と云ふ問題を提出される人がありますが，所謂實用になる迄には至つてゐません．尤も實用といふことの定義が難しい事でありますが今日では學術的な興味以外にはない樣であります．それだからと云つて價値のないものと云ふわけにまゐりません．價値は人々の立場により場合場合により變る事であります．實際理論の方面に新しい道を拓いて行く事には非常に役立つてゐます．其一例は宇宙線の研究の副產物として，電子で陽電氣を有つたものが發見され——從來の電子は負電氣を有つてゐました．その他今日我々の持つ理論の進む方向を示す實驗材料を澤山與へてゐるのでありまして，そう云ふ意味から學術上重要視されてゐるのであります．宇宙線が人工で出來るものかどうかをよく訊かれますが，「宇宙線が何うじて，何處で出來たか」といふ事は今日全くわかつて居りません．ですからそれが人工で出來るかどうかといふ事は簡單に云つてのける事は出來ません．然し少くとも今日我々の知つてゐる知識手段では，人工で作る事は到底出來ません．それの持つエネルギーだけから考へても人工でこれを發生させることは不可能であります．

次に宇宙線を如何にして測るかを幻燈で說明しようと思ひます，

圖1は宇宙線を測る一つの方法で，宇宙線は中性の空氣の分子を正，負のイオンに致します．そこで圖中 C なる電極に例へば負電氣を帶びさせておきます．さうすると宇宙線によつて出來た正電氣をもつイオンが來てこれを中和して次第に負電氣が減ります，從て金箔檢電器の箔の開きが減りますから，その動きの速さで宇宙線の强さを知ることが出來ます．之はほんの原理を示すだけで，その裝置の一實例は圖2にあります．

之は獨逸の Regener が用ひた裝置であります．感度を增す

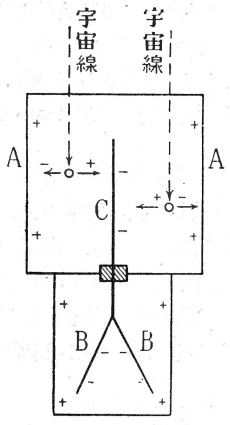

圖 1

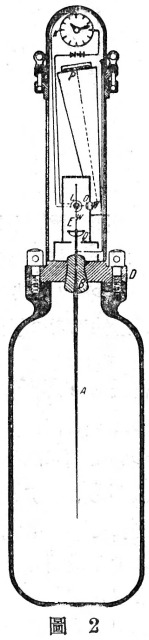

圖 2　Regener の宇宙線測定器

爲に高壓ガスを A の容器中に入れ，宇宙線が之を電離します．電極 A に電氣を與へておくと其電氣が宇宙線の爲に失はれますから，その速さを自働的に寫眞に撮るやうにしてあります．

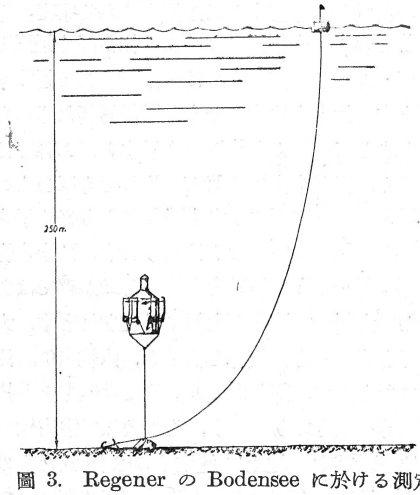

圖 3.　Regener の Bodensee に於ける測定

この裝置を湖の底まで下ろして湖底に於ける宇宙線の强度を測りました．圖3は其狀況であつて獨逸と瑞西との間にある Bodensee で行つた實驗であります．これで自働的に宇宙線强度を記錄するのであります．之を深さ 200〜250m の地點まで沈め，宇

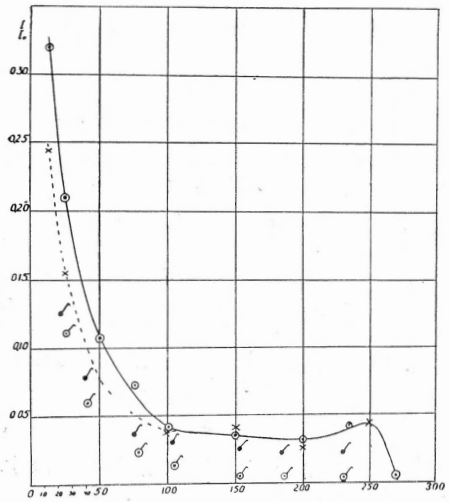

圖 4

水の深さと宇宙線强度との關係.（×）は紅海（緯度 18°）に於ける測定値,（⊙）は Aden 灣（緯度 10°）に於けるもので 270 m 迄强度は減少する. ✓ は Regener の測定値, ✓ は Regener が零の讀みを引き去つた値.

宙線がこんな深さ迄やつて來て居るかどうかを知るわけです.

圖 4 はその結果を示すものです. 縱軸は宇宙線强度, 横軸は水の深さであります. 人により右の方に行つて曲線が急に下がると云ふ人がありますが,（圖の如く）これは判きりしません. 兎も角 250m では未だ曲線が下つて居ますから宇宙線は確かに此邊迄來てゐます.

我々のやつた所によりますと, もつと深い所まで來てゐる樣です. 圖 5 は我々の使用した宇宙線計で米國の Millikan 教授の所の Neher 博士の作つたものです.

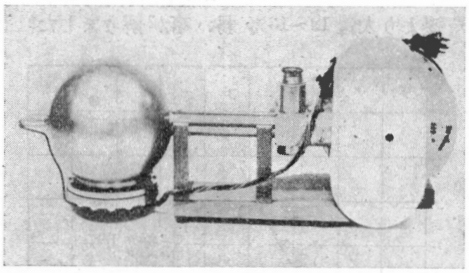

圖 5. Neher 宇宙線計

左方の電離槽即ち丸い中空の鋼の球にはアルゴン瓦斯を約 14 氣壓に入れてあります. 宇宙線が此瓦斯を電離して出來るイオンが此球の中にある檢電器に相當する針を動かせ, その動きの速度で宇宙線の强度を測るので, 之をフィルムに書かせます. 我々は清水トンネルに入つて宇宙線の强度を測りました.

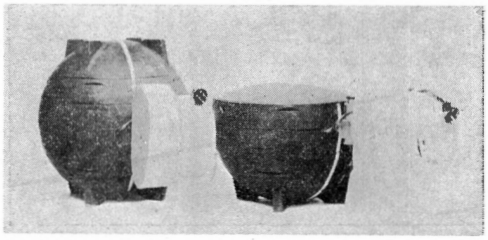

圖 6. 清水トンネルで用ゐた Neher 宇宙線計

圖 6 は其時使つた裝置で. 圖 5 に示す器械を鉛の厚さ 11 cm のもので全部蔽つたものであります. 之は地殼の岩石にあるラヂウム, トリウムから出す放射線を吸收して宇宙線だけの强さを測る爲です.

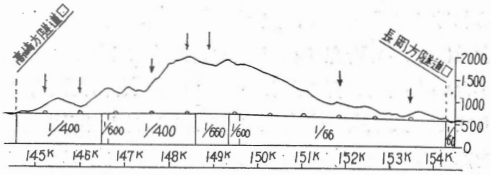

圖 7

圖 7 は清水トンネルの斷面でありまして, 約 800 m 毎にあるマンホールの中に宇宙線計を置き, 一晝夜毎に其位置をとり變へて實驗を行ひ, 地殼の深さと宇宙線の强さとの變化をみたものであります.

この方法で我々が測定した處によると, 宇宙線は隨分深い所まで來て居る事が解りました. 我々の實驗によると, 水にして 1000 m 近くも透ると云ふ事は確實です. 之は宇宙線に特有な所謂爆發現象がこんな深い地點で認められたからであります. これは宇宙線が電離槽の中に非常に澤山のイオンを一時に作る現象でありまして, 吾々の場合では, 直徑約 15 cm, 壓力 14 氣壓の電離槽の中へ一度に約 1 千萬對のイオンが出來たのであります. 此現象の起る理由はほゞ今日想像がつくのでありますが, そう云ふ現象が清水トンネル中で土壤約 300 m——水にして 800～900 m——の底で起つたのであります.

圖 8 は其記錄でこれを擴大したものであります. 縱軸は針の偏れ横軸は時間を示し, 時間と共に電極の電位が減るのが示されて居ます. その線の傾斜で宇宙線の强さがわかるのであります, 圖中曲線が不連續に飛んでゐる所があります. これが只今申しました一度に 1 千萬個のイオンが出來たことを示して

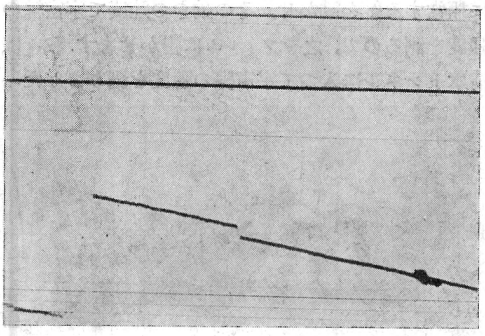

圖 8

居ります．これは宇宙線に固有の現象でどんな他の放射線でもこんな事は起しません．ですからこれによつて宇宙線がそう云ふ深い所まで來てゐる事が解ります，我々の體内でも時々かやうな事を起してゐるわけでありまして，之が動物學的に如何なる影響を及ぼすかも研究されて居りますが，或人は宇宙線がないと生物の育ちが悪いと云ふ結果を得た人もあります．又或人は宇宙線は動植物の變種，突然變異を起す原因をなすと云ふ人もあります．之は實際にそうかどうかは，更に多くの人々の研究の結果が一致するかどうかを見ないとわかりません．それは今後の研究によつて決められる事であります．

次にそう云ふ宇宙線は何であるかと云ふ問題に立ち歸りませう．始め宇宙線は γ-線と同樣に光と同じ本質を持つもの即ち電磁波と考へられて居りました．唯其の波長が非常に短い——電磁波の中で一番短い γ-線よりもつと短い——ものとせられてゐました．處がそうではないらしいといふ事が，實驗の結果わかつて來ました．即ち物質構成の窮極單位である電子又は水素原子核即ち陽子であつて，之が非常なエネルギーで地球に向つて飛んで來るものであらうと考へられるやうになりました．實際そうであるとすると，宇宙線は電氣を持つてゐる粒子であつて，地球は大きな磁石でありますから，粒子の進路は曲げられなければならぬと考へられます．御存知の通り北極，南極におけるオーロラは，太陽から飛び出した電氣を帶びた粒子が地球の磁場で曲げられるため，緯度の低い所には行けないで，只兩極の方にだけ行き，そこの上空の大氣に衝突して光を出すものなのであります．圖9はこれを示すものであります．これと同じ樣な事が宇宙線についても考へられる筈です．從つて宇宙線は兩極に近づくにつれ强

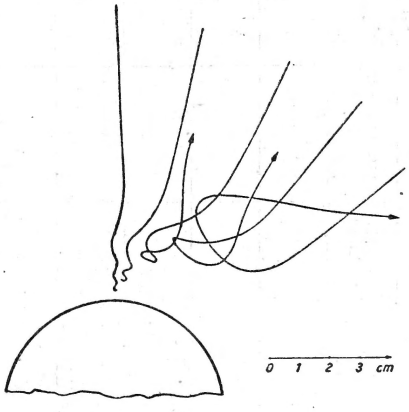

圖 9

く，赤道附近では弱いと云ふ事が推定せられます．そこで實際さうであるかどうかを實驗した人が多數ありました．

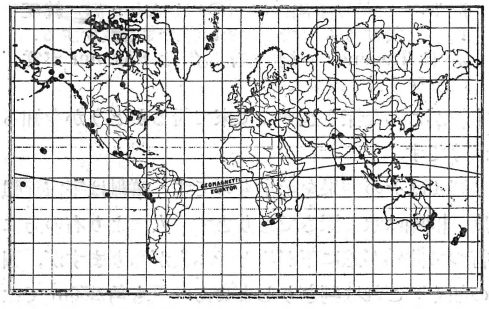

圖 10. Compton の宇宙線測定地點

圖 10 は米國の Compton が觀測隊を作り，地球上到る處で宇宙線强度を觀測したその地點を示すもので，圖 11 はその結果であります．これにより緯度と共に宇宙線の强さが異る事が解りました．即ち宇宙線强度は地球の赤道附近に於ては南北緯度 50° 邊より大體 12～13% 弱い事が解りました．そ

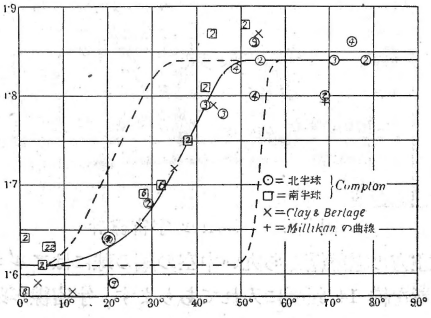

圖 11

して 50° より先は殆んど變化はありません．ある人々は此變化のない範圍で測定した爲，宇宙線强度は緯度に無關係であると云ふ結論をした人もありました．然し事實は圖のやうに緯度によつて變化するものであります．此結果により地上に來る宇宙線の中少くとも 12～13% は電氣を帶びた粒子である事が解りました．然し全部がそうであるかどうかは，これだけでは解りません．

圖 12 は地球の表面に於ける宇宙線强度の分布を示したものであつて，線は宇宙線の强さの同じ點をつらねたものであります．これで解ることは同じ緯度でも，經度によつて宇宙線の强度に相違があります．例へば地球上で南洋邊が一番弱くなつて居ります．之は地球の回轉の軸が地磁氣の極と一致しないために同じ緯度でも經度によつて地磁氣に變化があることによつて起るのであります．

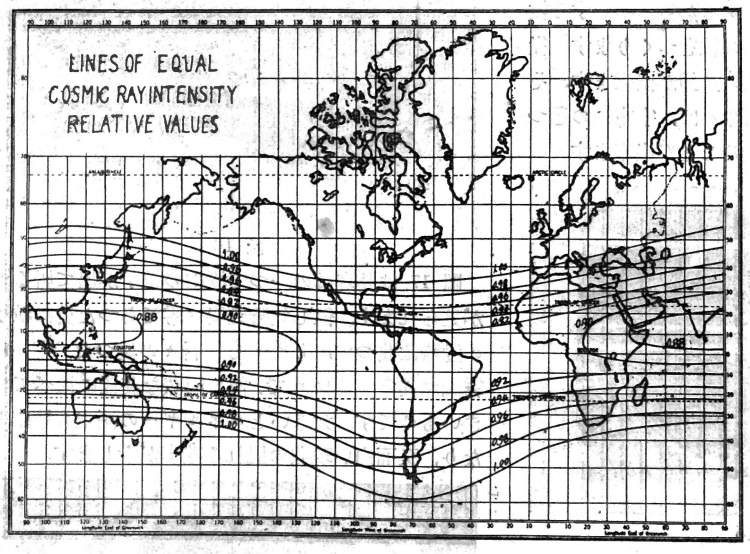

圖 12

我々は之を調べるため日本郵船會社に依頼して，濠洲航路の北海丸に Neher 宇宙線計を載せてもらつて，横濱濠洲間の航路に沿ひ宇宙線强度を1年間4往復の航海に亙り自動的に記錄しましたが，他の人達の觀測と略々一致した結果を得ました．

宇宙線は只今述べましたやうに電氣を帶びた粒子であります．所で此宇宙線粒子の來るのを一つ一つ數へようといふ方法があります．（こゝで博士は演壇の左のダイアルの澤山ついた器械を示された）これ

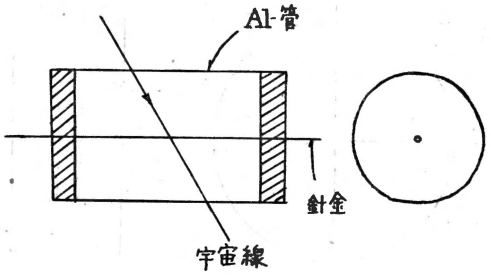

圖 13

は Geiger Müller の計數管と呼ばれるものでありまして，金屬管の中に絶縁した針金が張つてあり（圖 13），この中にアルゴンのガスを低い壓力で入れてあります．外の管と中の針金との間には 600 乃至 700 volt をかけて置きます．今宇宙線が此管を貫くと中にイオンを作ります．此イオンは加へた電場により加速せられてエネルギーを得，それが他のガス分子に衝突して又イオンを作ります．これを繰り返すためにイオン數は非常に増加して微少な放電々流が流れます．それを增幅しますと，擴聲器にポツポツと音を立て又は計數器を働かしますから，宇宙線粒子が來る毎にこれを一つづつ數へることが出來．從つて1分間に幾つ來たかを計る事が出來るのであります．今この樣なものを二つ使つて，その軸を並行にして置き，增幅器の適當な接續により，二つの管が同時に作働した時だけ計數器が働くやうにして置くと，此二つの軸を含む平面内に來る宇宙線だけを數へることが出來ます．即ちある程度迄宇宙線の方向性を知ることも出來るのであります．それでは宇宙線粒子はどの位來て居るかと云ひますと，1平方糎の水平面積にいろいろの方向から來る粒子を合せて1分間に約1箇の割合で來て居る事が判ります．今こゝで數へて居るのは，それより多いですが，之はラヂウムやその他の放射性物質から出す放射線をも數へて居るからであります．

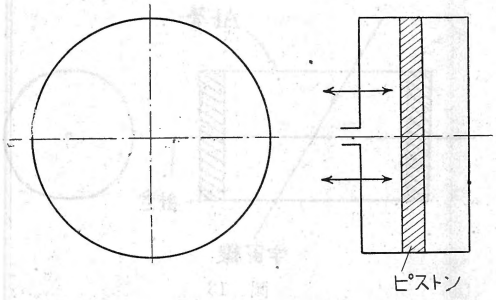

圖 14

次に宇宙線の研究方法として大切なものは，宇宙線を目に見える樣にする Wilson-霧函，これは圖14に示す樣に密閉した圓筒の中にピストンがあつて左右に動きます．これが急に動くと密閉された方の空氣が膨脹して，溫度が下り，中に入れてある水又はアルコールの蒸氣は，過飽和の狀態になります．そこに宇宙線が來ますと此中にイオンを作ります．處がこのイオンは過飽和狀態にある蒸氣の凝結する核となつて，イオンが一つ宛霧の粒をつくります．從つて宇宙線の通つた跡に霧粒の連鎖が出來ます．そこで此霧を横から强く照してやれば，宇宙線の通つた跡が目に見え又は寫眞に撮ることが出來ます．

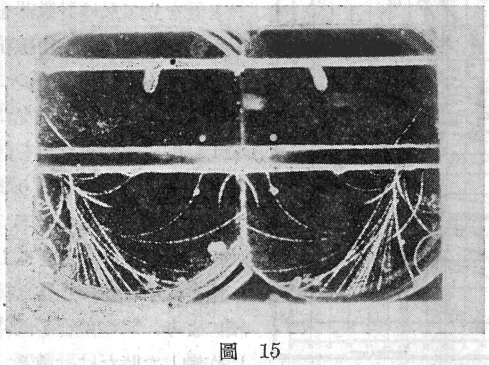

圖 15

圖 15 はこの裝置で撮つた一つの寫眞でありまして，同じものを二つの方向からカメラで撮つたものであります．丸いのが Wilson-霧函の外枠で，横に通つて居るのは中に置いた鉛の板であります．

圖に示したのは宇宙線が此鉛の板に衝突して，それから非常に澤山の電子を飛び出させるのを寫眞に撮つたもので，これは宇宙線に特有な現象であります．粒子の通路の彎曲して居るのは此裝置が强い磁場に入れてあつて，その爲に帶電粒子の路が曲げられるからであります．其曲りの方向と磁場の方向とから，粒子の帶電符號が判ります．前に述べた清水トンネルに於ける記錄に於て線が不連續的に飛んで居る（圖 8）のは此大規模なものが起つたのであらうと考へられます．

我々も同樣な實驗をやりました．圖 16 は其裝置で服部報公會の援助により，芝浦製作所で作つたマグネットであります．これは重さが 15 瓲で，コイルの中を水を通して冷すやうになつて居ります．此マグネットの極の間に Wilson-霧函を入れまして，宇宙線が來ると寫眞が撮れる樣にしてあります．此マグネットは宇宙線の帶電粒子に作用して其進路を曲げます．よつて其彎曲度を測り粒子の質量を假定して其エネルギーを算出することが出來ます．

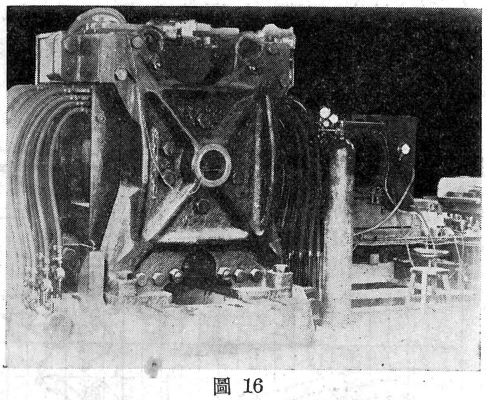

圖 16

圖 17 は其寫眞の一つで澤山の粒子が出て居るのが見られます．但し此時磁場は零であつた爲に粒子の通路は曲つて居りません．吾々の使つた Wilson 霧函は其直徑 40 cm で，他の同樣な裝置に比べて大きいものです．大きいとエネルギーの測定も精確となり，又面白い現象の撮れる確率が增します．

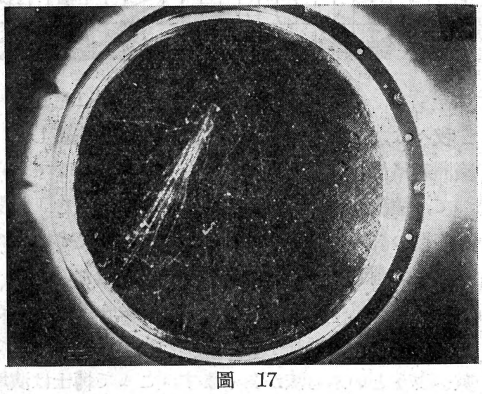

圖 17

圖 18 も此の裝置で撮つたもので，此粒子は鉛の

板を通るときエネルギーを著しく失つて居ることが其彎曲の變化から判ります．彎曲の大きい程エネルギーは小さいのです．このエネルギー損失から此粒子は電子であるといふことが理論上判明します．かやうに Wilson 霧函は宇宙線粒子の本質が何であるかといふ事を定めるのに有力の武器であります．

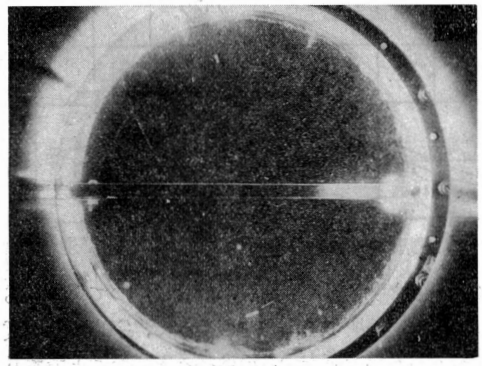

圖 18

圖 19 に示す粒子は磁場があつても殆ど曲つてゐません，之は非常に大きなエネルギーを持つて居るからです．そして鉛の板を通るときエネルギーの大きな損失はありません．之は理論に照して見て電子ではないといふことが判ります．即ち宇宙線は電子とさうでないものとある事が判ります．それでは之は何でありませうか．

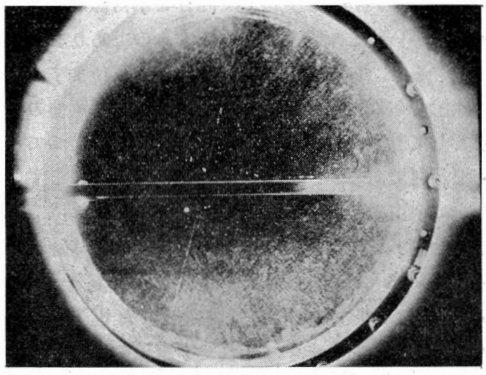

圖 19

圖 20 に示す粒子は電子のやうにエネルギーを失つてゐない．それでは電子以外の物質構成單位である水素原子核即ち陽子であるかといふと，さうでもありません．陽子とすると此彎曲度を示すものは中央にある 5 cm の鉛の板を通る事は出來ない事が理論的に判つて居ります．ですから電子でもなく陽子でもないものが宇宙線の中にある事が分ります．鉛板の中のエネルギー損失から質量を推定すると電子の約 200 倍といふ事になります．之は未だ知られなかつた新しい粒子であつて，電子と陽子との中間の質量を持つて居るものであります．これは大阪帝大の湯川氏が三年前に，宇宙線の中に其存在を豫言した粒子であつて，それが今日發見せられたのであります．

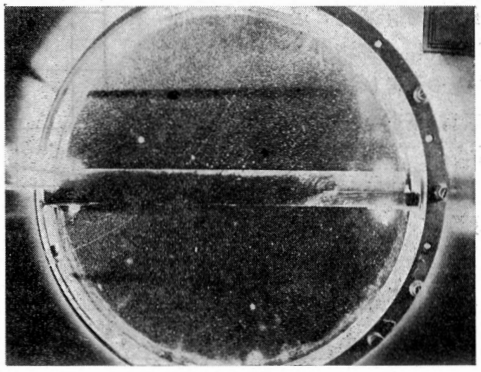

圖 20

以上は地表及び地下の話でありますが，地面から高い所の宇宙線はどうであるかといふのが次の問題であります．宇宙線の大部分は空氣に吸收されるので，其眞の貌を見るためには高い所に於て，空氣に吸收されない宇宙線を見る必要があります．それが爲に色々の研究者が高い山に登つたり，氣球に乘つて昇つたり，又氣球に自働的に宇宙線强度を記錄する裝置だけをのせて測定を行つたりしました．人の乘る氣球は，昇る高さに限度があります．今日迄に最も高く昇つたのは米國の Stevens, Anderson で，約 22,000 m の高さ迄飛びました．恐らく之より高く人が昇るのは困難でありませう．それで氣球に自働的に宇宙線强度を記錄する裝置だけをのせ，一定

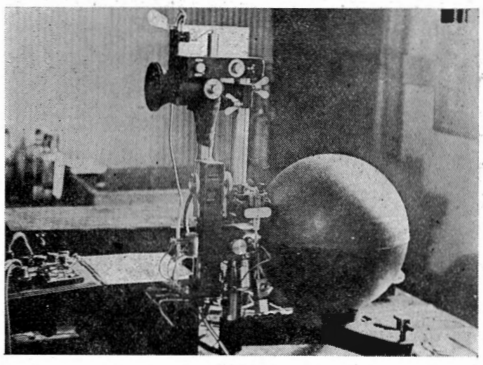

圖 21

の高さになると，氣球が破れて落ちる．そしてこれを拾つた人が送り返して呉れた記錄から上空に於ける宇宙線强度を知るのであります．

圖 21 は我々が富士山に持つて行つた機械であつて，圖 22 は其結果であります，此圖の横軸は各觀測點の氣壓を水銀柱で表はしたもので，縱軸は宇宙線の强度であります．各觀測點は⊙又は △ で示されて居つて，右から東京，箱根，太郎坊，五合目，富士山頂上となつて居ります．富士山の頂上の强度は，東京の約 2.7 倍となつて居ります．

圖 23 は只今述べました自働的の記錄器で，これを氣球に吊して飛ばせるのであります．これは獨逸の Regener の使つたものです．

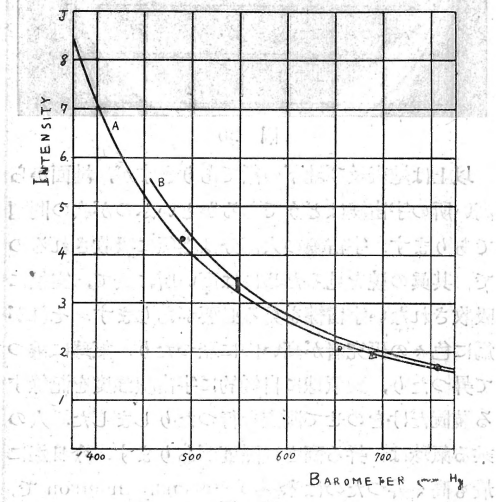

圖 22

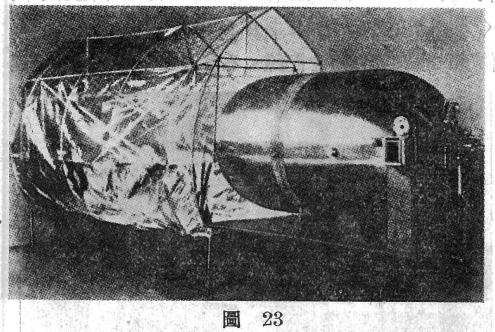

圖 23

圖 24 は其結果を示すもので高くなるにつれ，氣壓がへつて宇宙線の强さが增します．20,000 m 乃至 30,000 m に近くなると宇宙線の强度が一定になります．人によつてはこの邊から高くなると宇宙線强度が急に減ることを認めて居ります．それは地球の緯度によつても差があります．高い所の宇宙線を研究して，宇宙線の本質が何であるかを研究するのは益々重要なことであります．

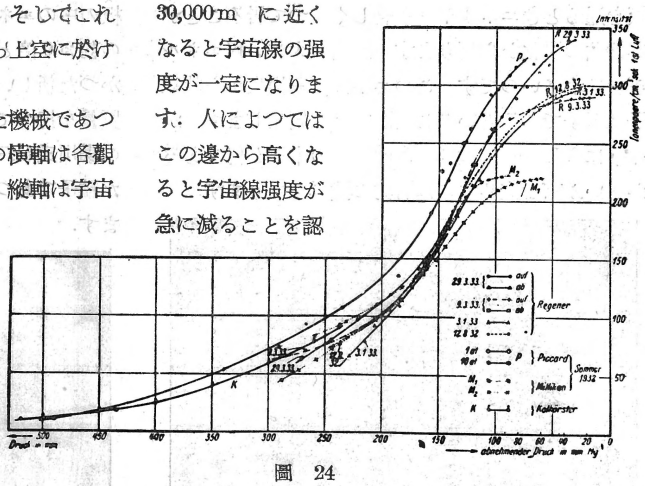

圖 24

日本の樣に細長い所では，自働記錄器を風船で上げても，返つてくる事は困難で，20,000 乃至 30,000 m も昇ると，必ず海の中に落ちて失はれます．從つて何か別の方法を考へなければなりません．それには高さと宇宙線の强度とを，同時に電波によつて自働的に放送する裝置を作り，これを風船で上空に飛ばせ，地上に於て其放送を受信して高さと宇宙線の强度とを居ながらにして求めるやうにするのであります．さうすると，1 回毎に器械は失はれて了ひますが目的は達せられます．これは目下日本學術振興會の仕事として計畫が進められて居ます．これによつて宇宙線が何であるかがはつきりすることと思ひます．

次に宇宙線の持つてゐるエネルギーはどの位であるかを述べませう．これを表はすには電子ヴォルト (electron-volt) といふ單位を使ひます．1 電子ヴォルトとは 1 ヴォルトの電位差で加速された電子のもつエネルギーであります．それで宇宙線のエネルギーは 10^8～10^{12} 電子ヴォルトもあります．即1億乃至 1 兆ヴォルトで加速された電子の持つエネルギーと同じでありまして，誠に驚くべきものであります．

それではこんなエネルギーを持つ宇宙線はどうして出來たかといふ問題でありますが，これはある人は新星 (Nova) から出たのだと云ひます．新星とは太陽の數千萬倍の光を一時に出して間もなく消去るものであります．それは星の大爆發であります．此

爆發に於て宇宙線が出來るのであらうといふのでありますが，之は想像に過ぎないので何の確證もありません．然し宇宙線は恐らく宇宙の變化，即ち星が生れて年を取つて行くその過程と何か深い關係があるであらうとは考へられて居ますが，まだ何の手懸りもありません．これは恐らく今後の研究に俟つて明にせられることでありませう．

II. 元素の人工變換

次に元素の人工變換の話に移ります．

これは一つの元素を他の元素に變へる研究で宇宙線とは直接には何の關係もないのであります．元來一つから他のものに變へることが出來ないといふのが元素の從來の定義でありましたが，今日の技術の進歩はこれを可能にしたのであります．それを始めてやりましたのはイギリスの Rutherford でありまして，ラヂウムから出る α-線即 He の原子核を色々な元素にぶつつけてこれを他の元素に變へたのであります．其時行ひました反應の數例を化學記號を用ひて書きますと

$$B_5^{10}+He_2^4 = C_6^{18}+H_1^1$$
$$N_7^{14}+He_2^4 = O_8^{17}+N_1^1$$
$$Al_{13}^{27}+He_2^4 = Si_{14}^{30}+H_1^1$$
$$Mg_{12}^{24}+He_2^4 = Al_{13}^{27}+H_1^1$$

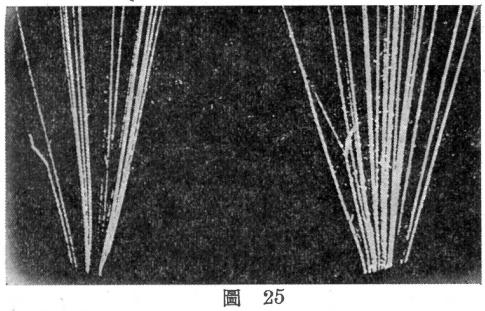

圖　25

此化學記號の上下にある數字が何を意味するかは茲に省略します．圖 25 は此第2番目の反應を目に見えるやうにし，これを寫眞にとつたものであります，即ち前述のウイルソン霧函で α-線の通つた跡並に原子核變換の狀を寫したのであります．左右の寫眞は同じものを異つた角から二つのカメラで撮つたもので，右側の圖で二つにわかれてゐるのは窒素原子に α-線がぶつつかりそれが分れて酸素と水素とになることを示して居るのであります．即ち圖の細い方が水素で太い方が酸素であります．かやうに一つの元素を他に變へるにはどうすれば好いかと云ふと，其元素の原子核を變へて他の元素の原子核とすれば好いのであります．例へば上述の場合には α-線を窒素原子の核に衝突させてこれを酸素の原子核と水素の原子核にするのであります．これには打突ける粒子は大きなエネルギを持つて居る必要がありまして，從來の化學的作用や物理的作用に比べますと百萬倍とか千萬倍の大きなエネルギーでなければ行はれません．昔から所謂錬金術として鐵や銅を金や銀にする試みはあつたのですが，それが凡て不成功に終つたのはそういふ大きなエネルギーをもつた粒子を作ることが不可能であつたからであります．處が今日ではそれが可能になつたのであります．

前述の Rutherford の實驗では，原子核を衝擊する粒子として放射性元素から出る α-線を用ひたのであるが，かやうな放射性物質の量には制限があります．そこで何か他の粒子によつて變換を行ふといふことが考へられました．それには先づ水素の原子核即ち陽子に大きなエネルギーを與へて，之を色々の元素に打突けることが工夫せられました．そしてこれを始めて行つたのが Rutherford の實驗室の Cockcroft と Walton とであります．最初に成功した變化は次の通りであります．

$$Li_3^7+H_1^1 \rightarrow He_2^4+He_2^4$$

即ちリチウムを約 12.5 萬ヴォルトで加速した陽子で衝擊してこれをヘリウムに變へたのであります．此時 Li と H との質量の和は 2He の質量より少し大であります．相對性原理によりますと質量とエネルギーとは同等でありますから，此剩餘の質量はヘリウムの運動エネルギーとなつて飛び出すのであります．此數量的關係は

$$M_{Li}+M_H-2\,M_{He} = \Delta M$$
$$\Delta M c^2 = (K.\,E.)_{He}$$

によつて表はされます，即ち $\Delta M c^2$ のエネルギーが二つのヘリウムに等分されるのであります，茲に c は光の速度であります．

圖 26 は此變換を目に見えるやうにし，それを寫眞にうつしたものであります．即ち圖の白い線は出來たヘリウムが大きなエネルギーで飛び出した跡を示して居ります．

其他色々の元素が陽子によつて變換せられることが解りました．其例を示しますと

$$B_5^{11}+H_1^1 \rightarrow 3\,He_2^4$$
$$F_9^{19}+H_1^1 \rightarrow O_8^{16}+He_2^4$$

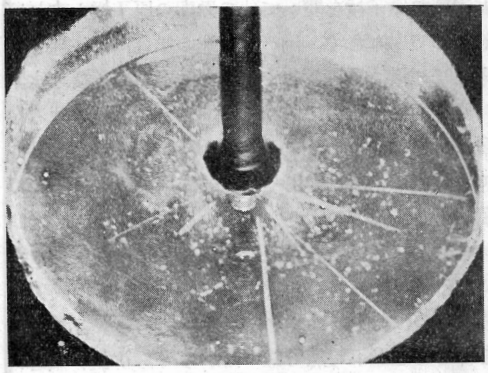

圖 26

其後かやうな變換は世界中の多くの學者によつて研究せられ，其種類は無數にあります．殊に陽子の外，重水素の原子核も元素變換用の武器として最も重要なものの一つであつて，これによつて多種多様の變換が行はれました．今其最も簡單なものを擧げますと

$$H_1^2+H_1^2 \begin{cases} \nearrow H_1^1+H_1^3 \\ \searrow He_2^3+n_0^1 \end{cases}$$

即ち重水素の核を加速してこれを重水素核に打突けますと二様の反應が起ります．一つは普通の水素と原子量3の水素とになり，他の一つは原子量3のヘリウムと中性子とになるものであります．但し中性子がどんなものであるかは後に述べます．

圖 27 は此時の變換を目に見えるやうにしたもので，放射狀に多くの白い線が見えるのは，出來た普通の水素核即ち陽子を示すものであります．他のものは此寫眞には表はれて居りません．

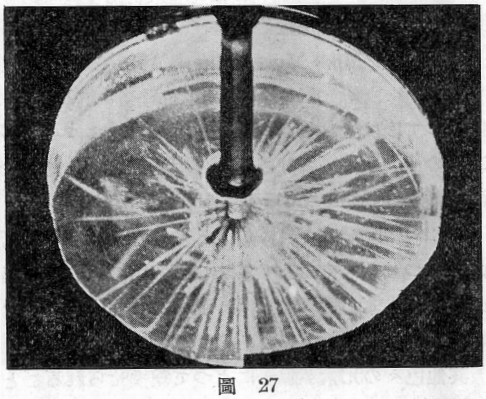

圖 27

以上の様な變換を起させるには，水素原子核や重水素原子核に非常に大きなエネルギーを附與する必要があります．それにはこれ等の粒子が帶電して居ることを利用し，高い電壓を作用させてこれを加速するのであります．これ等の變換を起させるに，どれだけのエネルギーが必要かと申しますと，場合によつては 10 萬ヴォルトで加速したもので行はれることもありますが，普通は約 100 萬ヴォルトで加速したものを必要とします．從つて左様な高い電壓の電源と，これによつて粒子を加速する裝置とが必要なのであります．

これが爲には Cockcroft と Walton とは蓄電器と整流器とを適當に組合せ 10 萬ヴォルトの變壓器を用ひて約 80 萬ヴォルトの直流を得る方法を考案致しました．又 Van de Graaff はその Wimshurst の起電機と同じ原理によりまして，靜電的に高電壓を得る裝置を考案しました．圖 28 は其原理を示すもので，P なる金屬球には陽電氣，N の球には陰電氣を溜め此間に數百萬ヴォルトの電壓を生ずるのであります，最近は此裝置を高壓のタンクの中に入れ，それで氣體の絶緣をよくして高電壓を得ることに成功して居ります．米國の Westinghouse 電氣會社ではこれにより，千萬ヴォルト位の高壓を得て元素の變換を行ふ計畫を進めて居ります．圖 29 は Washington の Carnegie 研究所にある Tuve の考案になる Ven de Graaff 發電機であります．もう一つの重要な方法はサイクロトロンであります．

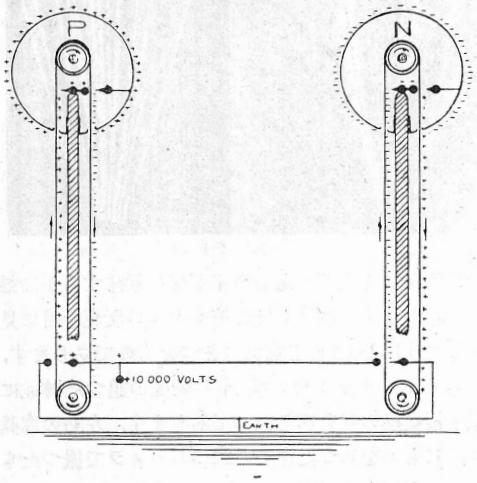

圖 28

これは米國の Lawrence の考案したものであります．前述の通り水素原子核など元素變換用の粒子にエネルギーを與へるには，これを高電壓によつて加速するのであるが，高電壓も絶緣の困難の爲に制限

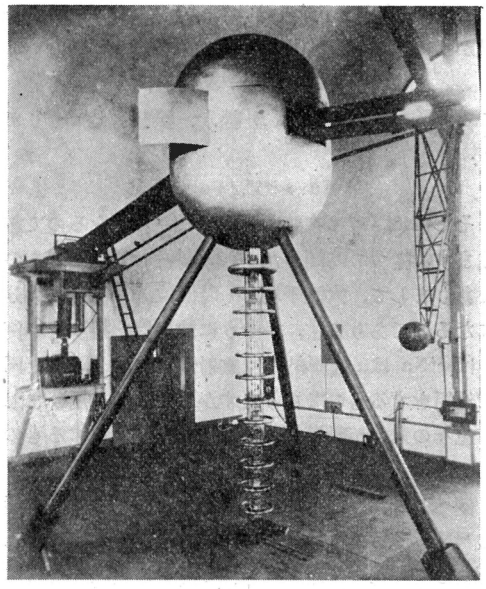

圖 29

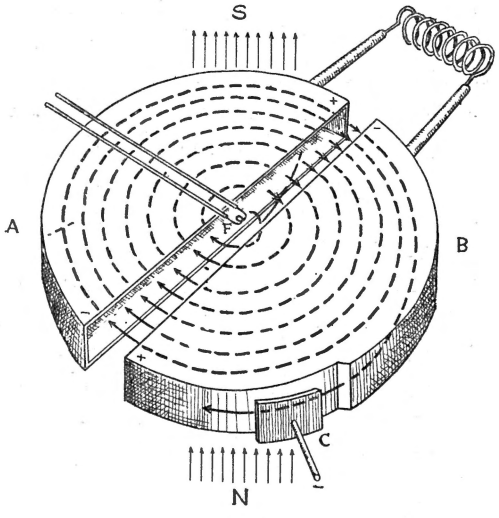

圖 30

を生じてくる．そこでそんなに高くない電壓例へば10萬ヴォルト位のものを粒子の走る道に沿つて，幾回も幾回も同じ方向に加へてやれば，その結果としては非常に高い電壓を1度に加へたと同じエネルギーを得ることになる．これがサイクロトロンの原理であります．

此裝置の主要部は圖30に示す通りで，恰度豆太鼓形の短い圓筒を二つに切つたやうな中空の金屬函A，Bから出來て居ます．此全體を氣密の外函に入れて眞空にし，これに加速しようとする氣體例へば水素を微量入れて置く，其壓力は$\frac{1}{10,000}$～$\frac{1}{1,000}$mmHgであります．此半圓形のA，Bは互に絶縁せられ，これに約10萬ヴォルトの高周波電壓を加へて置きます．其周波數は1秒間に1000萬回以上も陰陽の極を變へるものであります．そして此裝置全體が矢で示したやうに磁場の中に入れてあります．

A，Bの電極の中間にタングステン纖條Fがあり，これに電流を通じて白熱すれば電子を出します，此電子により水素は電離せられて水素イオン即ち水素原子核が出來るのであります．此イオンは陽電氣を帶びて居るから，例へばAの極が陰，Bの極が陽である瞬間には，これはAB間の約10萬ヴォルトの電壓に加速せられてAの函の中に入る．これは金屬函であるから，此中ではイオンに作用する電壓はない．從つてこれは直線の路を進むべきであるが，矢で示した方向の磁場がある爲に，イオンは點線で示したやうに，圓形の路を描いて次のA，Bの間隙に來る．處が高周波電壓の周波數と磁場の强さとが調整せられ，イオンがA，Bの間隙に出て來た時には恰度兩電極は符號を變へ，Aが陽Bが陰となるやうにしてあります．さうするとイオンは又此處で10萬ヴォルトの加速を受けてBに入る．そして前と同じことを繰り返すのであります．從つてイオンは1回轉毎に20萬ヴォルト宛加速される事となります．そして一度加速せられる毎に其通路の半徑は增して來ます，これを10回とか20回とか繰り返せば200萬ヴォルトとか400萬ヴォルトとかの高電壓で一擧に加速せられたと同等の速度を得ることになる．そして最後にCなる電極に數萬ヴォルトの陰電壓を加へて此イオンを引き出し，それに色々の元素を當てて其變換を行ふものであります．從つて10萬ヴォルトに對する絶縁で數百萬ヴォルトの加速が得られることになります．

今日はこれで800萬ヴォルトで加速されたのと同じ速度の粒子を得て居ります．そしてこれで多くの元素の變換を行つて居ます．圖31は理研にあるサイクロトロンを分解した所で，此マグネットは元日本無線株式會社で無線電信に使つたのを寄贈して貰ひ芝浦製作所で改造したもので，重さ23噸であります．圖33はローレンスのマグネットで85噸あります．

以上述べました元素の變換で二つの重要なことがあります．その一つはその變換の際中性子が出るこ

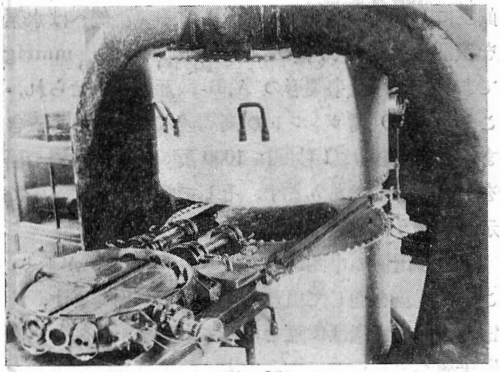

圖 31

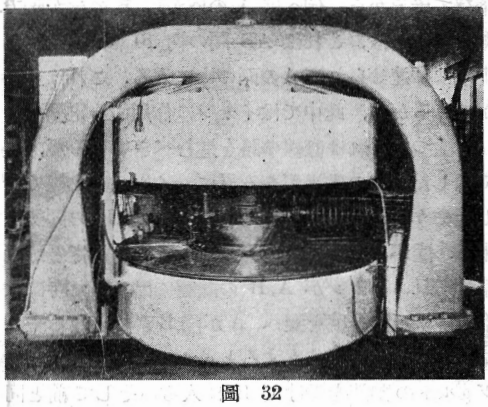

圖 32

とであります．中性子とは全然電氣をもたなくて水素の原子核と大體同じ重さを持つものであります．これは從來知られてゐない新しい粒子で，之れを用ひても種々の元素の變換が出來ることになつたのであります．之は又生物に對して色々の作用をするもので，この作用についての研究も目下行はれて居ります．之れが醫療上どういふ位置を占めるかといふことにつきまして，米國の Lawrence 兄弟は研究を致しました．例へば中性子を用ひて癌の治療が從來の放射線よりよく行はれると言つて居ります．つまり中性子は健全な細胞に對してより癌の細胞によりよく作用すると言ふのであります．しかしこれについては一段の研究を要することでありませう．

重要なことのもう一つは，かういふ元素の變換によりまして地上に存在しない元素が出來るといふことであります．それは放射元素即ラヂウムやトリウムの樣な放射性をもつものが作られるのであります．例へば普通の Na は原子量23でありますが，之に例へば重い水素，即ち原子量2の水素核をぶつけますと，次式に示すやうに原子量24の Na と原子量が1の水素とが出來ます．

$$^{23}Na + ^{2}H \rightarrow ^{24}Na + ^{1}H$$

この原子量24の Na は β-線，γ-線を出してをります．

$$^{24}Na \rightarrow ^{24}Mg + e^{-} + \gamma$$

そして ^{24}Na は次第に壞れて ^{24}Mg となるのであります．從つて時間がたつと放射性は減つて行くのでありまして，大體平均 15 時間位經つと元の半分になるのであります．かやうに放射性を持つもの例へば ^{24}Na は，化學的には放射性のない ^{23}Na と同じ作用をするものでありますから，これを用ひまして色々の元素が動植物の體內を如何に循環するものであるかといふことが判るのであります．

例へば ^{24}Na を鼠に喰べさせますと，それは普通の ^{23}Na 同樣に體內を循環するのでありますが，これがある時間たつてからどの位の分量が體內のどこに行つてゐるかを調べるには，鼠を殺して各藏器を取り出してこれを燒いて其放射性を研究すれば好いわけであります．それによつて動植物の生活機能が從來よりはもつとよくわかるのであります．

次にかやうな放射性物質そのものが動植物にいかなる作用をするかは，今日の處ではあまり影響ないとされてゐます．それは作りうる量が僅かであるからであります．今後もつと澤山その樣な放射性物質が作られると影響を與へるものと考へられます．現に米國の Lawrence の所では其研究が行はれ，好結果が得られたといふことであります．かやうな物質を多量に作れるかどうかは裝置の如何によるのであります．日本學術振興會では今回大きなサイクロトロンを作る企てがありまして，210トンのマグネットを建設中であります．これがうまくいくと2千萬ヴォルトで加速されたと同樣のエネルギーを有するイオンが出來ることになりまして，それによれば變換し得ない元素はないだらうと思はれます．そしてこれで相當多量の放射性物質も作られるでありませう．即ちこれによつて原子核の研究と元素の人工的變換並に其應用におきまして新方面が開拓されるのであります．

以上私達の今日やつてゐる方面のことを御話したのであります．つまらぬことを長々と申上げ御淸聽を煩はしたことを感謝します．　　（以上）