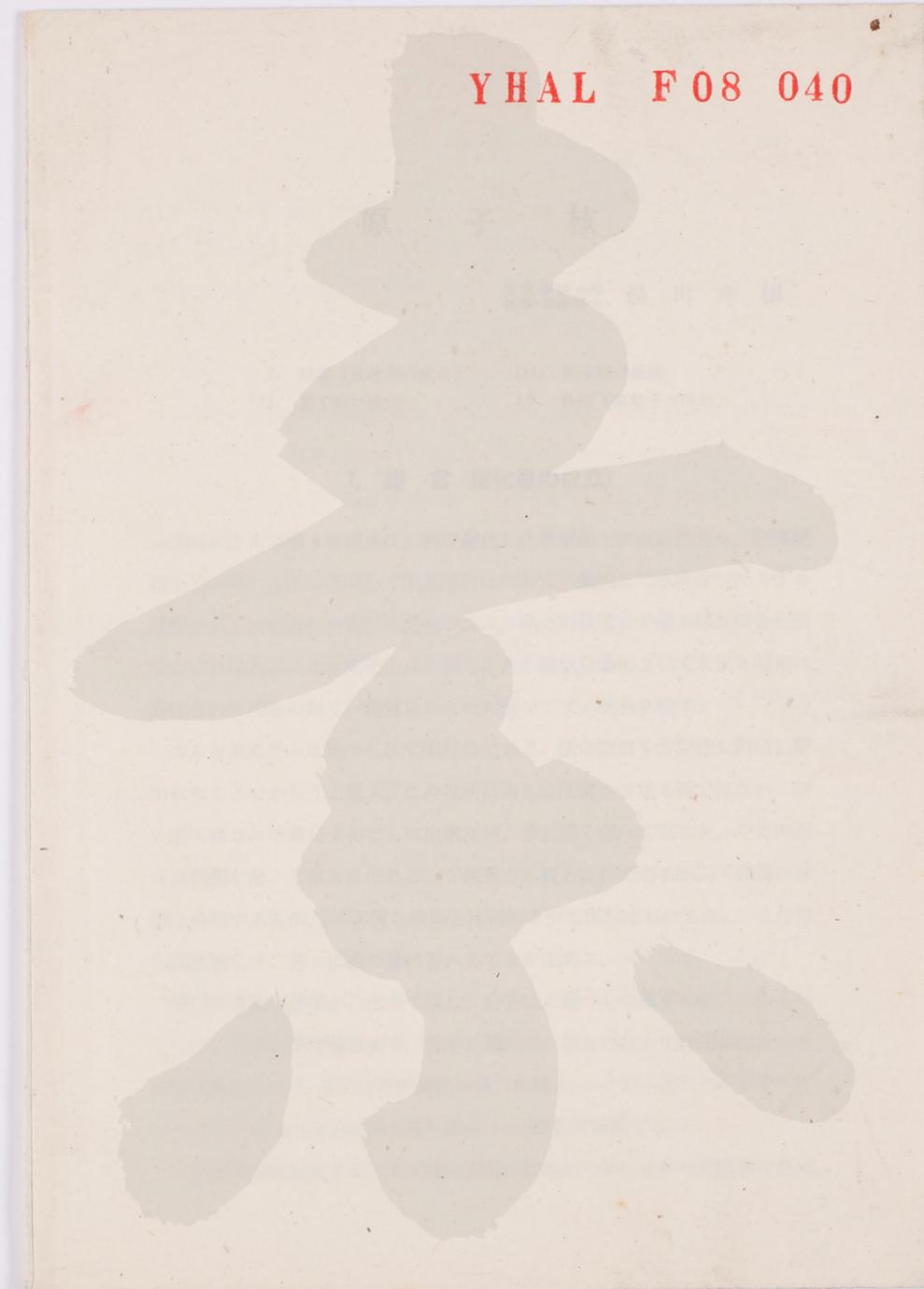


YHAL F08 040



YHAL FOR 010

原 子 核

京都帝國大學 湯川 秀 樹
教授・理學博士

- | | |
|----------------|-----------------|
| I. 緒言 (核化學の成立) | III. 原子核の變遷 |
| II. 原子核の構造 | IV. 結語 (素粒子の問題) |

I. 緒 言 (核化學の成立)

自然界に起る様々な現象は、物理變化と化學變化とに大別出来る。物理變化とは、例へば水が蒸發して水蒸氣になつたり、凝固して氷になつたりする現象の如く、物質の本質には變化がなく、唯その状態が變る様な場合を指す。これに對して化學變化とは、例へば水が電氣分解によつて水素と酸素に分けられる現象の如く、物質そのものが變つて了る場合を指す。

こんな風に吾々は教へられて來たのであり、讀者諸君も亦斯様な説明を聞かれたことであらうと思ふ。この説明は決して間違つて居る譯ではない。併し吾々はこれで満足することは出来ない。少し深く考へて見ると、そこに色々な疑問が湧いて來るのである。「物質の本質とは何であるか。」「物質の状態とは何であるか。」「本質と状態とは何によつて區別せられるか。」これ等の間に對して、吾々は次の様に答へることが出来る。

物質は多數の分子から出來て居る。分子は又幾つかの原子の結合したものである。分子自體は變化せず、分子の運動や、集合の仕方などが變る様な場合が物理變化であり、分子自身に變化が起つた場合、——例へば一つの分子の中のある原子が他の分子に移る様な場合、——が化學變化である。

これだけの答に到達することが既に容易ではなかつた。それは物理學や化學

の長い歴史、多くの學者達の絶えざる努力を俟つて初めて得られたものである。吾々は併しこれでも満足出来ない。何故かといへば、物質の本質は分子ではなく、寧ろ原子によつて決定せられる。元素の相違は原子の相違に歸着せられる。しかるに原子を本質的なものと考へれば、物理變化と化學變化の間に明確な區別をすることは最早不可能である。それ等はいづれも原子の運動及び集合状態の變化に歸着して了るのである。物理學と化學の境目もそれに伴つて消失せざるを得なかつたのである。

所が讀者諸君もよく御承知の如く、今日では吾々は原子が最後のなもの、不可分なものときへも考へて居ない。それは更に幾つかの電子と一個の原子核とに分けられる。物理的化學的現象とは結局、多數の電子及び原子核の運動及び集合状態の變化として記述されることになつた。その様な記述をするのに、吾々は量子力學といふ面倒な表現法を採用せねばならぬ。そのために物理學——化學をも含めて——が大變難しい學問になつて了つたのである。併しこゝで量子力學に就いて話して居る餘裕はないから、必要に應じてその時々説明することにして、こゝでは兎に角、量子力學の助けを借りることによつて、殆どあらゆる物理的化學的現象が、電子及び原子核の状態變化として完全に説明し得る様になつたことを承認して頂くことにする。

こゝで全てのといはずに殆どあらゆるといつたのには譯がある。物質を電子と原子核とに分けて了つた場合、その各々は最早不可分なものとして考へてよいであらうか、殆ど全ての場合にさう考へてよい。併しこれにも矢張り例外がある。電子の方は不可分と見てよいが、原子核の方は未だもつと分けられると考へなければ困る場合がある。それは放射能といふ現象である。放射能に就いては、千谷氏の「同位元素」の中にも、相當詳しい説明があるから、こゝでは繰返さない。要するに放射能とは例へばラヂウム等の如き放射性元

素を構成する原子核が、 α 線、 β 線、 γ 線の如き放射線を出して自然に崩壊して行く現象に他ならぬ。吾々は元素の相違は原子の相違にあると考へた。原子を更に電子と原子核とに分けた場合、——電子は全ての物質に共通な要素であつて、——元素の相違は原子核の相違によると考へる他はない。しかるに原子核の崩壊は自然的な**元素の轉換**を意味するものである。實際ラヂウムは崩壊して順次他種の元素に變じ、結局鉛となる。化學の出発點は**元素の不變性**にあつた。元素と化合物とは明確に區別せられた。そこでは原子が最後のものであつた。化學反應とは原子の離合集散に他ならぬ。それはいはば**原子反應**である。併し元素の轉換なる過程は、最早かゝる意味の化學反應の概念の中には含まれ得ないのである。それは原子核自身に關係する變化、所謂**原子核反應**と稱せられるものである。かくして化學はその本來の領域を離れて、**核化學**へと入つて行くことになつたのであるが、これは化學の當然進むべき方向であつたのである。そこでは最早、**核物理學**と**核化學**の本質的な區別は見出されぬのである。しからは原子核とは一體何であるか。これに就いて以下順次説明して行きたいと思ふ。

II. 原 子 核 の 構 造

1. 原 子 核 の 質 量

化學元素とは要するに各種の化學反應に際して完全な均一性を示すものに他ならぬ。元素の分析といふことは、——若しも分析といふ言葉を狹義の化學分析の意味に解するならば、——一種の自己撞着である。併し分析といふ言葉にもつと廣い意味を與へたならばどうであらうか。即ち現代の物理學及び化學で知られて居るあらゆる方法を動員したならばどうなるか。さうすると吾々は先づ、化學的に單一な元素を幾種類かの**同位元素**に分離出来る。こ



の場合には、質量分析器の如き装置によつて元素の分析が行はれるのである。(詳しい説明は「同位元素」の項に譲る。) 質量分析器とは種々のイオン——それはつまり原子又は分子から幾つかの電子が取られたものか、或は幾つか附加つたもの——を電場及び磁場の中で走らせ、その軌道の屈曲の大小によつてイオンを分離する装置である。屈曲の大小は比荷電——即ちイオンの荷電を質量で割つたもの——の大小に原因する。故にイオンの荷電が判つて居るならば、質量——従つてイオンを構成する原子核の質量——の相違が検出される譯である。これに對して通常の化學分析とは原子核の荷電の相違によつて化合物を元素に分ける手續きに他ならぬ、原子核の荷電は常に正で且つ電気素量 e の整数倍になつてゐる。この整数が原子番號 Z である。

所が原子核の質量の方は、元素の化學的性質に著しい影響を及ぼさぬから、荷電が同じで質量の少しく異なる原子核を分別するには、質量分析の如き特殊な方法を必要としたのである。そして原子核の荷電が同じで、質量が異なる場合、それ等は同位元素として、自然物中に混合して存在して居るのである。質量分析器を使へば原子核の質量による分類でなく、各原子核の質量自身の正確な値をも決定し得るのであるが、それは荷電の場合の様にある單位質量の丁度整数倍とはなつて居ない。通常吾々は質量の單位として、中性の酸素原子の質量——即ち酸素核の質量とその周囲にある8個の電子の質量の總和——の $\frac{1}{16}$ を取る。但しもつと正確にいふと、酸素には三種の同位元素があるが、その中で一番軽く一番多い同位元素を標準に取るのである。さうすると全ての原子——従つて周囲の電子を取除いた裸の原子核自身——の質量は常に整数に近い値を持つて居る。この整数 A を質量數と稱する。すると同位元素——乃至は原子核自身も一應——原子番號 Z と質量數 A とによつて分類される。例へば天然の酸素の中には ^{16}O 、 ^{17}O 、 ^{18}O なる三種の同位

第 1 表

元 素	Z	A	頻 度 (%)	原 子 質 量	結 合 エ ネ ル ギ ー (MeV)
$^1_1\text{H}^*$	1	1	—	1.00897	—
^1_1H	1	1	99.98	1.00812	—
^2_1H	1	2	0.02	2.01472	2.19
$^3_1\text{H}^*$	1	3	—	3.01705	8.34
^3_2He	2	3	—	3.01688	7.71
^4_2He	2	4	100	4.00389	28.05
^5_2He	2	5	—	5.0137	27.27
$^6_2\text{He}^*$	2	6	—	6.0208	29.00
^6_3Li	3	6	7.9	6.01686	31.86
^7_3Li	3	7	92.1	7.01818	38.95
$^8_3\text{Li}^*$	3	8	—	8.02499	40.95
$^7_4\text{Be}^*$	4	7	—	—	—
^8_4Be	4	8	—	8.00792	55.97
^9_4Be	4	9	100	9.01504	57.68
$^{10}_4\text{Be}^*$	4	10	—	10.01671	64.44
$^{10}_5\text{B}$	5	10	20.6	10.01631	64.02
$^{11}_5\text{B}$	5	11	79.4	11.01292	75.47
$^{12}_5\text{B}^*$	5	12	—	—	—
$^{11}_6\text{C}^*$	6	11	—	11.01526	72.52
$^{12}_6\text{C}$	6	12	99.7	12.00398	91.27
$^{13}_6\text{C}$	6	13	0.3	13.00761	96.21
$^{14}_6\text{C}^*$	6	14	—	14.00767	104.46
$^{13}_7\text{N}^*$	7	13	—	13.01004	93.17
$^{14}_7\text{N}$	7	14	99.7	14.00750	103.83
$^{15}_7\text{N}$	7	15	0.3	15.00489	114.56
$^{16}_7\text{N}^*$	7	16	—	—	—
$^{16}_8\text{O}^*$	8	15	—	15.00780	111.07
$^{16}_8\text{O}$	8	16	99.76	16.00000	126.60
$^{17}_8\text{O}$	8	17	0.04	17.00450	130.74
$^{18}_8\text{O}$	8	18	0.20	18.00369	139.80
$^{17}_9\text{F}$	9	17	—	17.0076	127.08
$^{18}_9\text{F}^*$	9	18	—	18.0056	137.24
$^{19}_9\text{F}$	9	19	100	19.00452	146.55
$^{20}_{10}\text{Ne}$	10	20	90.00	19.99881	160.01
$^{21}_{10}\text{Ne}$	10	21	0.27	20.99968	175.16
$^{22}_{10}\text{Ne}$	10	22	9.73	21.99864	184.43
$^{23}_{11}\text{Na}^*$	11	22	—	22.0002	182.20
$^{23}_{11}\text{Na}$	11	23	100	22.9961	194.30
$^{24}_{11}\text{Na}^*$	11	24	—	23.9974	201.41

元素が混合して居るのである。併しその殆ど全部が ^{16}O である。(第1表参照) 但し ^{16}O の如き記號に於て、左上の數字は A, 左下の數字は Z を示す。この他に、 $^{15}\text{O}^*$ の如き放射性的酸素核を創ることも出来る。第1表には水素からナトリウムまでの同位元素で、現在知られて居るものが列擧してある。その中で * の印をつけたのは、不安定な核を表はす。又最初の n は後に述べる中性子を意味する。第1表の原子質量の欄に示した様に、中性原子乃至は原子核自身の質量の正確な値は整数 A から少しずれて居る。このずれを質量偏差と呼んで居る。

2. 原子核のスピンと磁氣能率

上述の如く、原子核の質量の違いを利用すれば、同位元素の分離が出来るのであるが、原子核は荷電と質量以外にも色々な固有の性質を持つて居る。先づ第一はスピンである。原子核が何かある大きさを持つたもの——例へば剛體の球の様なもの——と考へるならば、核全體としての運動の他に、自分自身のまはりの廻轉——丁度地球の公轉に對する自轉——が可能な筈である。そして地球が一定の角速度——従つて一定の角運動量で地軸のまはりを廻る様に、原子核も又一定の角運動量で自轉して居ると考へられる。所が今日の量子力學では自轉といふものを非常に抽象的に取扱ふのである。例へば電子の様にこれ以上分けることの出来ないもの——即ち素粒子——であつても、矢張り自轉をして居り、しかもそれは電子が大きさを持つかどうかには無關係だと考へるのである。この意味で自轉といはずに、スピンといふ言葉を使ふ。スピンとは粒子のある内部運動の自由度を表はすものと考へられる。通常の軌道運動による角運動量は量子化されて居る。即ち Planck の常數 h の $\frac{1}{2\pi}$ 倍——これを \hbar と書くことにする——を單位に取ると必ずその整数倍になつて居る。それと同じ様にスピンの伴ふ角運動量も \hbar の半分を單位と

して測れば、常に整数となるのである。例へば電子のスピンによる角運動量の大きさは $\frac{1}{2}\hbar$ である。これを簡単に、電子のスピンは $\frac{1}{2}$ であるといふ。この場合スピンの方向も任意ではないのである。例へば電子の場合にはある方向を軸として $\frac{1}{2}\hbar$ の角運動量で廻ると、それと正反對の方向を軸として $\frac{1}{2}\hbar$ の角運動量で——従つて元の方向を軸として $-\frac{1}{2}\hbar$ の角運動量で——廻ると、この二つの場合の下にはないのである。(第1圖 a)

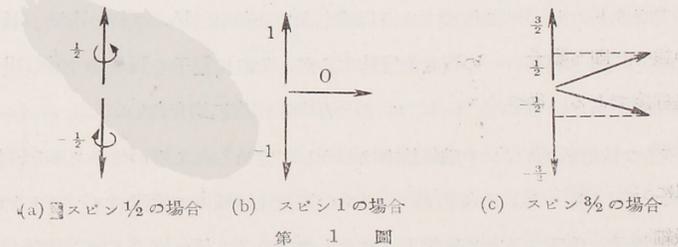
色々な原子核はそれぞれ一定のスピンを持つて居る。その大きさは一般に正の整数又は半整数で表はされる。即ちスピンによる角運動量の大きさを $s\hbar$ とした場合、原子核のスピンは s であるといふ。但し n を 0 又は正の整数とすると、

$$s = \frac{n}{2}$$

なる形に書ける。この場合スピンの軸の取り得る方向は $n+1=2s+1$ だけある。それ等は長さ s なるスピンのベクトルの、ある一定方向の直線上への投影が丁度

$$-s, -s+1, \dots, s-1, s+1, \dots \quad (1)$$

のいづれかになる方向に相當する。例へば第1圖に示す如く、 $s=1$ の場合には三つの方向、 $s=\frac{3}{2}$ の場合には四つの方向が可能である。



(a) スピン $\frac{1}{2}$ の場合 (b) スピン 1 の場合 (c) スピン $\frac{3}{2}$ の場合
第 1 圖

所で電気を持つた粒子の廻轉運動と、磁氣との間に密接な關係があることはよく知られて居る通りである。即ち核のまはりの軌道を走る電子は、外部に對して小さな磁石の様に作用する。これと同じ様に、電子は自轉、即ちスピンのよつて、——軌道運動に關係なくいつでも——磁石の性質を帯びて居るのである。軌道運動に原因する電流を磁石に直せば、その強さは

$$\mu_0 = \frac{e\hbar}{2mc} \dots \dots \dots (2)$$

なる大いさ——所謂 **Bohr の磁子**——を單位にして測つた場合に、いつもその整数倍になつて居る。但し m は電子の質量を表はす。スピンの原因する磁石の強さも丁度 (2) で與へられる。これを吾々は電子はスピンの原因する固有の**磁氣能率**を持ち、その大いさは Bohr の磁子に等しいといふのである。所で磁石の軸の方向はスピンの方向と正反對になつて居る。これは電子が負の電氣を帯びて居るためである。これを吾々は電子の磁氣能率は負であると稱する。

電子の場合と同じ様に、原子核のスピンの磁氣能率を伴ふと考へられる。併しその絶対値は非常に小さなものであつて、 μ_0 ではなく、**核磁子**即ち

$$\mu_N = \frac{e\hbar}{2M_p c} \dots \dots \dots (3)$$

を單位として測られる位の大きさに過ぎない。但し M_p は軽い水素 (^1H) の核——即ち**陽子**——の質量を意味するが、それは電子の質量 m の約 1840 倍程度である。従つて μ_N は μ_0 の 1/1840 程度に過ぎない。

それでは核のスピンの磁氣能率はどのように定められるものであるかを、簡単に述べて見よう。元來電子のスピンの概念は、種々の元素のスペクトルの微細構造を説明するために導入されたものである。例へばよく知られたナト

リウムの D 線はナトリウム原子中の價電子が p 状態から基準状態——即ち s 状態——に落ちる際に發せられる。(詳細は渡瀬氏の「原子のスペクトル」の項参照。) 所が D 線をよく調べて見ると、約 $6\text{Å} - 1\text{Å}$ は 10^{-8} 糎に當る——波長の異なる D_1, D_2 なる二本のスペクトル線から出來て居る。電子の軌道運動を考へたのでは二本に分れることが説明出來ない。どうしても電子の自轉即ち**スピンの自由度**を考へる必要があつたのである。所が種々の元素のスペクトルを更に詳しく分析して行くと、電子のスピンの未だ説明出來ない様な細かい構造を持つて居る場合がある。これを**超微構造**と稱する。これはその元素が色々の同位元素から出來て居るためである場合がある。併しこの様な**同位元素効果**を考慮しても未だ超微構造の全部を説明することは出來ない。個々の同位元素の發するスペクトル線が既に超微構造を有する場合があるのである。例へば上記のナトリウム D_1 線、 D_2 線の各が更に、非常に接近した二本の線に分れて居るのである。これはナトリウム原子の基準状態 $^3S_{1/2}$ が原子核のスピンの影響で、勢力の少しだけ異なる二つの状態に分れたものと考へられる。そして ^{23}Na の原子核が $3/2$ なるスピンの、それに附隨する $2\mu_N$ なる大いさの磁氣能率を持つと假定すると、實驗とよく一致する。この様にして種々の原子核のスピンの磁氣能率とを推定し得る。

所が超微構造に於けるスペクトル線の分れ方は、原子番号が小さくなる程小さくなる。従つて水素の様に軽い元素では、最早超微構造を直接觀測することは出來ない。そこで Rabi 等は水素原子を不均一な磁場の中で走らせ、その曲り方から水素核 ^1H 、即ち**陽子** (プロトン) の磁石としての性質を推定した。その結果は第 2 表に示す通りである。この方法によると、中性子 (ニュートロン) 1n の磁氣能率までも決定出來る。この他に水素分子の不均一磁場による屈曲を利用する方法もある。この様な原子線や分子線の方法は

他の多くの原子核にも適用出来る。これによる結果と、前の超微構造の分析から得た結果とを総合すると、第2表の如くなる。但しこの表中にはナトリウム以後の元素は省略してある。この結果の意義に就いては後に述べることにして、ここでは磁気能率の符號がいつれの場合にも正であることを注意するに止める。これは原子核が電子と反對に陽電氣を帯びて居ることから當然豫想される結果である。但し中性子の場合は例外で負になる。第2表に於て磁気能率は核磁子 μ_N を單位として記されて居る。

第 2 表
 (1) 質量数が奇数の場合

元 素	ス ピ ン	磁 気 能 率	統 計
${}^1_1\text{H}$	$\frac{1}{2}$	-1.93	(F)
${}^3_3\text{Li}$	$\frac{3}{2}$	2.78	F
${}^{11}_5\text{B}$	$(\frac{3}{2})$	3.25	F
${}^{15}_7\text{N}$	$\frac{1}{2}$	2.68	F
${}^{19}_9\text{F}$	$\frac{1}{2}$	—	F
${}^{23}_{11}\text{Na}$	$\frac{3}{2}$	2.63	F

(2) 質量数が偶数の場合

元 素	ス ピ ン	磁 気 能 率	統 計
${}^2_1\text{H}$	1	0.85	B
${}^4_2\text{He}$	0	0	B
${}^6_3\text{Li}$	1	0.82	B
${}^{10}_5\text{B}$	(1)	0.597	B
${}^{12}_6\text{C}$	0	0	B
${}^{14}_7\text{N}$	1	0.40	B
${}^{16}_8\text{O}$	0	0	B

3. 原子核の統計的性質

以上の諸性質は一個の原子核自身に具有されて居ると考へられるが、これに對して同種の原子核が二個以上共存して居る場合に初めて現はれる性質——所謂統計的性質——がある。今最も簡單で且つ最も重要な例として一つの水素分子を考へて見る。これは二つの水素原子が結合したものであるから、その中には二個の電子と二個の陽子とが存在する。所が電子に對してはよく知られた Pauli の排他律が成立する。それによると、二つの電子が同じ状態を取ることは許されない。もつと詳しくいへば、二つの電子が同じ軌道を、同じ向きのスピンを持つて走ることは出来ないのである。(「原子スペクトル」の項参照) このために、水素分子の取り得る状態が制限され、これが水素分子から發する光のスペクトル——所謂帶スペクトル——にも影響を及ぼす。多數の電子が存在する場合にこの規則を適用すると、同じ状態に二つまたはそれ以上の電子が共存することは許されないことになる。實際金屬の中にある多數の自由電子はこの規則に従ふことが知られて居る。かゝる場合、電子は Fermi-Dirac の統計に従ふと稱する。量子力学によれば、これは二個以上の電子を含む體系の状態を表はす波動函数は、すべての電子に關して反對稱であることに相當する。詳しくいへば、どれか二つの電子の座標とスピンを交換すると波動函数の符號が變はる。

この様なことが二個の陽子に對しても成立するのである。何故かといへば水素分子の帶スペクトルの特異な構造を説明するには、陽子もまた電子と同じくスピンの $\frac{1}{2}$ で、Fermi-Dirac の統計に従ふと假定する必要がある。これに對して例へば通常の窒素の分子には二個の窒素核 ${}^{14}_7\text{N}$ が含まれて居るが、その統計的性質はまた違つて居る。この場合には窒素核のスピンが1で Bose-Einstein の統計に従ふと假定しなければ、窒素分子の帶スペクトル

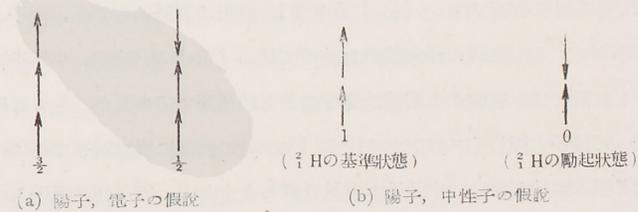
を説明することが出来ない。Bose-Einstein の統計といふことは、量子力学によれば、二個以上の同種の粒子を含む體系に対する波動関数が**対称**であることを意味する。詳しくいへば、どの二つの粒子の座標やスピンを交換しても、波動関数は全然変化しないのである。前節第2表には、ナトリウムまでの軽い原子核の統計的性質を、分子スペクトルその他の方法で決定した結果を掲げて置いた。但し F は Fermi-Dirac の統計、B は Bose-Einstein の統計を意味する。

4. 原子核の成分

この様にして原子核の基本的性質が大分わかつて来た。これ等の材料を使ふと、「原子核は何から出来て居るのであろうか。」といふ極めて重要な問いに對して、明確な答へを與へることが出来るのである。それには先づ「何がこれ以上わけることの出来ないものであるか。」を決定する必要がある。この様な最後のな粒子——即ち**素粒子**——としては、先づ**電子**が考へられる。次に**光子**も素粒子の仲間に入れてよいであらう。量子論によると、光——もつと一般に**電磁波**——は多數の粒子の集りとも考へられる。この粒子が光子と呼ばれるものである。それから色々な種類の原子核の中で一番軽い**陽子**(${}^1\text{H}$)もまたさうであらうと思はれる。何故かといへば他のすべての原子核の質量は1.で述べた様に、陽子の質量の整数倍に近い(第1表参照)。従つて陽子が各種の原子核に共通な成分ではないかと考へられる。そこで陽子の他に、電子が成分として含まれて居るとすると、各種の原子核の質量と荷電の方は問題なく説明出来る。例へば重い水素の核 ${}^2\text{H}$ ——所謂**重陽子**(**デユトロン**)——は、陽子と同じ荷電と約二倍の質量を持つ故、二個の陽子と一個の電子の結合體と考へられる。また窒素核 ${}^{14}\text{N}$ の中には十四個の陽子と七個の電子が存在すると考へられる。一般に陽子の数は質量數に等しく、陽子の數と

電子の數の差が原子番號に等しくなる。

所が核の**スピン**や**磁氣能率**や統計をも考慮すると、この假説は具合が悪くなる。第一に電子があれば、その固有磁氣能率のために、核自身も Bohr の磁子程度の大きな**負**の磁氣能率を持つ場合がある筈である。所が2.で述べた様に、どの核も核磁子の程度の**小**な**正**の磁氣能率しか持たない。第二は**スピン**である。2.の第2表を見てすぐに氣がつくのは、核の**質量數**が**奇數**の場合には**スピン**が $\frac{1}{2}, \frac{3}{2}$ 等の**半整数**であり、**偶數**の場合には $0, 1$ 等の**整数**になつて居ることである。この規則は今まで知られて居るすべての場合に對して例外なく成立する。所で陽子と電子とが幾つか集つて出来た核全體としての**スピン**はどうなるかを考へて見る。スピンは通常**角運動量**と同じ様に、**ベクトル**として表はされる。(2. 第2圖参照) 二つ以上の粒子から成る體系の**スピン**は、各粒子の**スピンのベクトル和**になる。例へば**重陽子**の場合には、先づ二個の陽子の**スピンの各々**が $\frac{1}{2}$ で、その和は 0 又は 1 となる。(第2圖参照) これに**電子のスピン** $\frac{1}{2}$ を加へると、全體として $\frac{1}{2}$ となるか $\frac{3}{2}$ となるより他はない。——更に核内での粒子の軌道運動による**角運動量**があつたとしても、**半整数**になるといふことには變りがない。——所が實際は**重陽子のスピン**は 1 である。この矛盾は ${}^{14}\text{N}$ の場合にも現はれる。一般に上の假説によると陽子と電子の總數、従つて核の**原子番號**が**奇數**か偶



第 2 圖

数かによつて、スピンは半整数か整数になる筈であるが、實際は質量数が決定的な因子となつて居るのである。

第三は統計である。今二個の重陽子から成る體系の波動函数を考へて見ると、その中に含まれて居る陽子及び電子の各々に関して反對稱の筈である。従つて兩方の陽子を一つ宛入れかへれば波動函数の符號が變はり、次に今一つ宛入れかへると再び元の通りになる。そこで更に兩方の電子を入れかへると符號が變はる。結局この體系の波動函数は二つの重陽子全體としての入れかへによつて符號を變じる。故に重陽子は Fermi の統計に従ふ粒子でなければならぬ。しかるに實際は Bose の統計に従ふのである。原子核が陽子と電子とから出来るとすると、その各々が Fermi 統計に従ふ故、それ等の總數、従つて原子番号が奇數か偶數かによつて、統計は Fermi か Bose になる筈である。所が 2. 第 2 表から直ちにわかる様に、實際は質量数が奇數か偶數かによつて Fermi 統計か Bose 統計かになつて居るのである。

この様にして陽子及び電子を原子核の成分と見ると、色々な點で實驗と矛盾することが明かとなつた。所が今から丁度十年前に中性子が發見された。即ち III. 3. で述べる様に α 線によつてベリリウム、硼素等の軽い原子核を破壊した場合に出て來ることが初めてわかつたのである。それはその名の示す如く、電氣を持たない中性の粒子で、質量は陽子と殆ど同じであるが、正確にいふと少しだけ大きい (第 1 表参照)。最近の實驗によると、陽子よりやゝ小さく、そして負の磁氣能率を持つて居る (第 2 表参照)。中性子のスピンと統計とは、實驗から直接決定することは困難ではあるが、色々な點から考へて陽子と同じスピンが $\frac{1}{2}$ で、Fermi の統計に従ふ粒子であることは殆ど疑ふ餘地がない。中性子が發見されるとやがて、原子核は陽子と中性子とから成るとの假説が有力となつた。實際この説を採用すると、上に述べ

た實驗との矛盾は全く解消するのである。第一に電子がなければ、原子核の磁氣能率は常に核磁子の程度であり得る。第二のスピンの問題も直ちに解決する。例へば重陽子是一個の陽子と一個の中性子とが結合したものと考へられる。それ等が各々 $\frac{1}{2}$ のスピンを持つて居るから、軌道運動量を 0 とし、兩者のスピンが同じ方向を向いて居るとすると、重陽子のスピンは 1 となり、(第 2 圖参照)、實際と一致する。もつと一般に原子番号 Z 、質量数 A なる原子核は Z 個の陽子と $A-Z$ 個の中性子とから成ると考へられる。従つてそれ等のスピンの總和は、陽子と中性子の總數、即ち質量数 A が奇數か偶數かによつて、半整数か整数になる筈であるが、これは實驗結果と完全に一致する。核内に於けるこれ等粒子相互の軌道運動を考慮しても、この結論に變りはない。第三の統計も同じことである。例へば二個の重陽子からなる體系の波動函数は、陽子と中性子の兩方を入れかへると元の通りになる故、重陽子は Bose 統計に従ふことになるが、實際もその通りになつて居る。一般に核内の陽子と中性子の總數即ち質量数が奇數か偶數かによつて Fermi 統計か Bose 統計になる筈であるが、これが前に述べた實驗的法則に他ならぬ。

5. 原子核の結合力

原子核の成分が陽子と中性子——最近ではこれ等を總稱して核子又は核粒子と呼ぶことがある——とであることを承認したとすると、次に問題となるのは、「それ等の粒子がどんな力によつて結ばれて、一つの原子核を構成して居るか」である。原子核といふものは大變小さなものである。これを球と見ると、半径は 10^{-13} 糎から 10^{-12} 糎の程度であると考へられて居る。一番重い原子核は ${}^{238}\text{U}$ で、この中には 92 個の陽子と 146 個の中性子が入つて居るのである。それが全部 10^{-12} 糎といふ小さな半径の球の中に納つて居るのである。所がこれ等多數の陽子の間には距離の二乗に逆比例する電氣的な



斥力が働いて居る。これに打勝つて陽子が一個所に集中するには、陽子や中性子の間には——少くとも近距離に於ては——強い引力が働いて居ることが必要である。所が中性子は荷電を持たぬから、この引力は電氣的な力ではないと考へられる。そして中性子は物質を貫通する力が強いことなどから考へて、餘程近距離にならねば、他の粒子との間に強い力は働かないと推定される。この様にして、核内の粒子間に働いて、これを結びつけて居る力——所謂核力——は、粒子間の距離が 10^{-13} 極程度に接近した場合にはじめて強くなる様なものであると考へられる。

そこでこの力がどの位強いものであり、どのような特性を持つて居るものであるかをもう少し詳しく調べて見よう。結合力の強さは、結合して居る粒子を離れ離れにするのに要する仕事、即ちエネルギーから推測される。もつとよく知られた場合として、先づ化學結合に就いて考へて見よう。水素分子を二つの離れ離れの原子にする要するエネルギー——所謂解離エネルギー——は約 4.45 eV である。eV はヴォルトといふエネルギーの單位——詳しくいへば電子ヴォルト——を表はす。それは電子が一ヴォルトの電位差の所を走る際に得るエネルギーを意味し、 1.6×10^{19} エルグに相當する。逆に見れば二個の水素原子が結合して水素分子を作る際に、4.45 eV 丈のエネルギーを失つて居る譯である。原子核に就いても同じことがいはれる。例へば陽子と中性子とが結合して重陽子を作る際には、若干の結合エネルギーが失はれて居る譯である。これがどこへ現はれて居るかといふと、質量に現はれて居るのである。相對性理論によると、質量とエネルギーの間には常に比例關係がある。m といふ質量は、 mc^2 なるエネルギーに對應して居る。今質量の單位として、酸素原子の質量の $\frac{1}{16}$ を取り、エネルギーの單位として百萬ヴォルト (10^6 eV)——これを MeV と書くことにする——を取ると、單位の質量は

エネルギーにすれば 0.926×10^9 MeV となる。逆にいへば、エネルギーの増減は必ずそれに相當する質量の増減として現はれて來る筈である。そこで重陽子 ${}^2\text{H}$ の質量——詳しくいへばこれに一個の電子の質量を加へたもの——を調べて見ると 2.01472 であつて、(I. 第 1 表参照) これは陽子の質量 (1.00812)——これも電子の質量を加へたもの——及び中性子の質量 (1.00897) を加へたものより 0.00237 だけ小さくなつて居る。これをエネルギーに直すと、2.19 MeV となる。これが即ち陽子と中性子とが重陽子を構成する際の結合エネルギーに他ならぬ。ナトリウムに至る他の多くの原子核に就いて、同様な方法で結合エネルギーを計算すると、第 1 表の最後の行の通りになる。これで見ると、核内粒子の結合エネルギーは百萬ヴォルト乃至數千萬ヴォルトに達するものである。通常の化學結合のエネルギーがヴォルトの程度であるのと較べると、非常に大きなものであることがわかる。従つて逆に、原子核を破壊して、その中から粒子を取出すには外部から莫大なエネルギーを加へなければならぬことになる。これに就いては III. で述べることにする。

この様にして、核力は近距離でしか働かないかよりはりに、近づけば化學結合力よりもずつと強くなつて居る。併し核力も亦、化學結合力と似た飽和の性質を持つて居る。それは第 1 表を見てもわかる様に、結合エネルギーの増し方が粒子の總數即ち質量數 A に大體比例して居ることから推定される。但し詳しい推論をして居ると長くなるから省略する。この様な色々な性質を持つた核力の本質は何であるかといふ問題は、原子核の研究に於ける最も根本的な問題の一つであつて、多くの假説が提出されたが、今日では次の如き考へ方が最も有力である。

電氣を帯びた粒子の間に働く力は、電磁場として記述出来る。それと同じ



様に核子の間働く力も亦、新しい力の場として記述出来るかと考へられる。所が量子力学によると、電磁場は又は多数の光子(フォトン)の集りとも見做し得る。光子は電氣を持たず、質量は0、スピンは1で、Bose統計に従ふ粒子である。これに對して核力の場に伴ふ新しい粒子は、正又は負の電氣を帯び、質量は電子の質量の約二百倍、スピンは1又は0で、Bose統計に従ふと考へられて居る。現在ではこの粒子は、今から五年前宇宙線中に發見された中間子(メソトロン)と同一物であると推定されて居るが、そこには色々な疑問が残されて居て、今後の研究に俟つ所が多いのである。

III. 原子核の壊變

1. 原子核の自然崩壊

今日知られて居る原子核の種類は五百以上ある。その中、約半数は安定であるが、残りは不安定で何等かの方法で作り出されたとしても、早晚他の種類の原子核に變つて了ふ。出來た不安定な原子核の数が $N(0)$ であつたとすると、時間が t 秒たつた後の数は

$$N(t) = N(0)e^{-\lambda t} \dots \dots \dots (4)$$

に減つて居る。 λ は原子核の種類によつて定まる常數である。勿論同時に出來た多数の原子核の中には早く變化して了ふものもあり、遅くまで残るものもあるが、平均としては

$$\tau = \frac{1}{\lambda} \dots \dots \dots (5)$$

なる時間まで生きのびる故、これを平均壽命と稱し、不安定な核の夫々に固有な常數である。或はこの代りに半減期——數が始めの半分になるまでの時間——

$$T = \tau \log 2 = \frac{0.693}{\lambda} \dots \dots \dots (6)$$

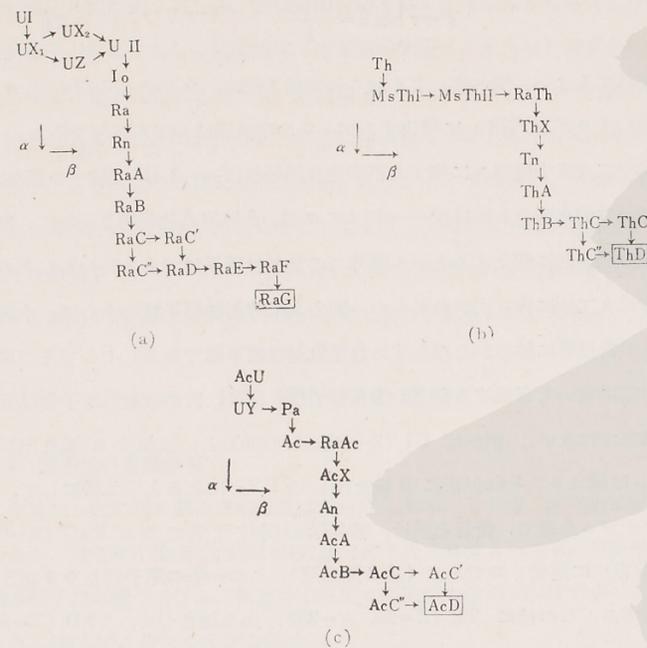
を用ひてもよい。例へば、よく知られて居る様に、ラヂウム ${}^{226}\text{Ra}$ は α 線を出してラドン ${}^{222}\text{Rn}$ に變化するが、その半減期は約千六百年である。

所で二百五十種以上に達する不安定な原子核は——2.ii) で述べる様な、數種の例外的な場合を除けば——すべて α 線、 β 線等の放射線を出して、他の種類の原子核に變化するといふ意味での放射性原子核である。しかしその大部分は人工的に作り出されたもの、即ち人工放射性原子核であつて、小部分だけが自然界に始めから存在する自然放射性原子核である。そこで先づ自然放射能に就いて考察する。よく知られて居る様に、自然放射性原子核は互ひに獨立ではない。例へば UI ($Z=92, A=238$) といふ核は α 線を出して UX_1 に變はり、それが更に β 線を出して UX_2 になるといふ様にして、途中ラヂウムを経て、變脱を續け、結局鉛の同位元素である RaG ($Z=82, A=206$) に着くのである(第3圖参照)。この一聯の原子核をウラン系列と稱する。この他に Th ($Z=90, A=232$) から始まつて、ThD ($Z=82, A=208$) に終るトリウム系列及び、AcU ($Z=92, A=235$) から始まつて AcD ($Z=82, A=207$) に終るアクチニウム系列がある。

これ等の放射性元素が今日自然界に存在して居るのは、各系列の最初の原子核が非常に長い壽命を持つて居たためである。即ちそれ等の半減期を示すと夫々

$$\text{UI} : 4.5 \times 10^9 \text{年}, \quad \text{Th} : 1.65 \times 10^{10} \text{年}$$

である。但し AcU の壽命ははつきり分つて居ない。遠い過去に於いて、いつかこれ等の放射性原子核が作り出されたに違ひない。他の種類の不安定な原子核——その中には今日知られて居る人工放射性原子核も含まれて居たで



第 3 圖

あらう——も一緒に作り出されたに相違ないが、それ等は壽命が短かつたために今日までに消滅し盡し、結局上の三系列に屬する原子核丈が残つたものと考へられる。この事から逆に地球が何時出來たかをも推定し得るのである。

自然放射性元素の殆ど全部は、この三系列に入つて了ふのであるが、この他に二三例外的なものがある。例へばカリウム及びルビヂウムの中には放射性の同位元素が含まれて居り、共に β 線を放出する。それ等は夫々 ${}_{19}\text{K}$, ${}_{87}\text{Rb}$ なる微量の同位元素によることが知られて居り、半減期は夫々 10^{10} 年, 10^{11} 年

といふ程度のものであると推定されて居る。又サマリウムは α 線を放出して崩壊する。その半減期は 10^{12} 年といふ長いものらしい。

いづれにしても自然放射性元素には α 線——或は α 粒子——を出すものと、 β 線を出すものとあるが、先づ α 線を出すもの、即ち α 放射能を呈するものに就いて考察する。 α 線が非常に高速度で走つて居るヘリウム核 ${}^4\text{He}$ に他ならぬことはよく知られて居る通りである。従つて原子番号 Z , 質量数 A なる原子核が α 線を出して崩壊したとすると、出來た原子番号は $Z-2$ で、質量数は $A-4$ になつて居る。例へばラヂウムは



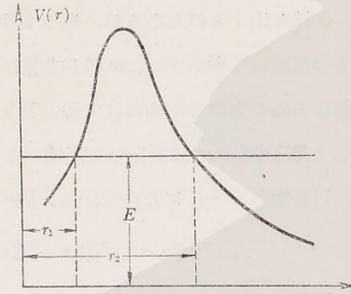
なる過程によつてラドンに變はる。その際出て來る α 線は 4.6 MeV 及び 4.8 MeV のエネルギーを持つた二群から成つて居る。所で α 粒子と $Z-2$ なる原子番号の核の間には距離 r の二乗に比例する強い電氣的な斥力が働いて居る。この力のポテンシャル、即ち位置のエネルギーは

$$V(r) = \frac{(Z-2)e^2}{r} \quad \dots \dots \dots (8)$$

である。例へば α 粒子と ${}_{86}^{\text{Rn}}$ とが 10^{-12} 厘の距離にある場合には、斥力のポテンシャルは約 12 MeV である。兩者がもつと接近すれば、斥力のポテンシャルは幾らでも増大して行く筈であるが、實際はさうではない。現に兩者は始めには合一して、一つの核 ${}_{88}^{\text{Ra}}$ を形成して居たのである。従つて非常に近づけば却つて引力が働く筈で、ポテンシャル $V(r)$ と距離 r との関係は大體第 4 圖の如くなつて居ると考へられる。但し r が 0 に近い所の形はよくわからぬ。 r の大きな所では勿論 (8) で與へられる双曲線になつて居る。これに對して α 粒子の持つて居る運動のエネルギー E は、ポテンシャル $V(r)$ の山の高さより低くなつて居る。従つて古典力學によれば、 α 粒子は

は距離 r が第4圖の r_2 より大きな部分, 又は r_1 より小さな部分で運動することが出来るが, その中間の山の中へは入れない筈である. そこで最初 $r < r_1$ で ${}^{226}\text{Ra}$ を構成して居たと

すると, α 粒子はいつまでも ${}^{226}\text{Ra}$ の中を往復して居る丈で, 外へ飛び出す機会を永久に來ない筈である. この困難は Gamow, Condon 及び Gurney の量子力學的考察によつて見事に除かれたのである. そしてそれは原子核の問題に量子力學が適用せられた最初の例でもあつたのである.



第4圖

これに就いて簡単に説明すると, 量子力學では α 粒子の運動は一つの波動函数で表はされる. 所が E なるエネルギーの状態に相當する波動函数は, $r < r_1$ なる部分, 又は $r > r_2$ なる部分で 0 にならない様なものではない. 波動函数が $r < r_1$ で 0 でないとすると, 當然 $r_1 < r < r_2$ の部分でも 0 でなく, 更に $r > r_2$ なる部分にまで續いて居るのである. これは核の中にあつた α 粒子がいつかは山を突き抜けて, 外へ出て了ふ可能性があることを意味する. この様な所謂隧道効果によつて, α 崩壊が起ると考へられる. これから逆に考へて, ポテンシャルの山の高さ, 従つて又放射性原子核——球と見た場合——の半径を推算出来るのである. その値は原子核によつて異なるが, 自然放射性原子核の様に Z の大きなものでは, 半径 r_0 は 10^{12} 糎の程度になる.

尙自然放射性原子核の中には β 線を出して壊れるものもあるが, これに

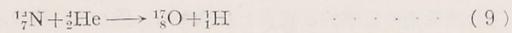
就いては 5. で改めて考察する.

2. 原子核の人工壊變

i) α 線による壊變 この様に自然界で原子核の崩壊が不斷に行はれて居る. それは元素の自然的な轉換を意味する. 併しこれ等の不安定な原子核の外すべての原子核は如何なる力によつても壊すことは出来ないと思はれて居た. 放射能を除くあらゆる物理的化學的變化を通じて, 元素はその個性を保持して來たのである. 何故に原子核は容易に破壊することが出来ないのであらうか. 有り餘る元素を貴重な元素に變へようとする中世紀以來の錬金術がすべて夢に終つたのは何故であらうか.

II. 5. で述べた様に, 原子核は陽子と中性子が幾つか結合したものであるとすると, その結合エネルギーは數百萬ヴォルトから數千萬ヴォルトにも達する. 従つて原子核の中から陽子・中性子乃至はそれ等の集合體たる α 粒子を取り出すには少くとも數百萬ヴォルト程度のエネルギーを外部から供給する必要があるであらうと想像される. これに較べると, 化學變化に伴ふ一つ一つの原子の離合集散に必要なエネルギーは數ヴォルトといふ小さなものに過ぎない. これを逆にいへば, 通常の化學的變化によつて得られるエネルギー——一つ一つの原子の持つて居るエネルギー——では, 到底原子核を破壊することは出来ないのである. 所が放射性原子核から出て來る α 粒子は, 確かに數百萬ヴォルトのエネルギーを持つて居る. これを利用したらどうであらうか. 今から二十三年前, Rutherford は實際この方法によつて, 元素の轉換に初めて成功したのであつた. 彼は RaC から出て來る α 線を窒素ガス中を通過せしめ, これをシンチレーションの方法で觀測して居た. すると α 線はすべて止められて了つた筈であるのに, まだ何か放射線が來ることを發見した. 窒素ガスの代りに酸素ガスや炭酸ガスを入れると, この様な現象

は起らない。そこで彼は窒素核が α 粒子によつて破壊せられ、その際放出される高速度の陽子がシンチレーションを起すのであると推定した。この結果はその後の多くの実験によつて確證された。そして

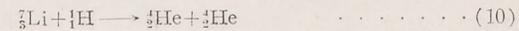


なる反応によつて窒素が酸素に變へられたことがわかつたのである。

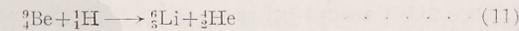
かくして、放射性元素から出て来る α 線こそは、中世紀以來探し求められて居た「賢者の石」であつたのである。 α 線は第4圖で示した様なポテンシャルの山、所謂 **Gamow の山** を越えて放射性原子核の中から飛び出して來た。そして窒素の核に向つて進んで行つたのである。こゝにも矢張り電氣的な斥力の障害物が待ち受けて居た。併し窒素の荷電が自然放射性原子核の場合よりもすつと小さいために、Gamow の山の高さはすつと低かつた。——それは前節(8)から明かな様に大體原子番號に比例して居た。—— α 線は比較的容易にこの山を越えて窒素核の中に飛びこんだ。そして壊變が起つたのである。勿論大部分の α 粒子は山を越え得ず、跳ねかへされて他の方向へ進む。この様な α 線の弾性的散亂の現象の研究から今日の原子模型——所謂 **Rutherford の原子模型** が生れたことは周知の通りである。

これに引續いて、硼素、弗素を始めとし、カリウムに到るまでの多くの元素が同様な方法によつて——原子番號の一つ大きな——隣りの元素に轉換された。

ii) 陽子及び重陽子による壊變 併しながら α 線による元素の轉換は、—— α 線自身が自然界に始めから存在して居るといふ意味に於いて——未だ完全に人工的であるとはいへない。丁度今から十年前に、**Cockcroft と Walton** とは數十萬ヴォルトの高電壓によつて加速した水素イオン即ち陽子をリシウム核に衝突せしめ



なる反応によつて二個のヘリウム核に分解することに成功した。これこそ文字通り人工的な元素轉換の最初の例であつた。しかもこの變化は豫想に反して、陽子のエネルギーが十萬ヴォルトにも達しない間から既に起ることがわかつたのである。この他の軽い元素ベリリウム(${}^9_4\text{Be}$)、硼素(${}^{11}_5\text{B}$)、炭素(${}^{12}_6\text{C}$)、酸素(${}^{16}_8\text{O}$)、弗素(${}^{19}_9\text{F}$)等も陽子によつて破壊せられる。例へばベリリウムの場合には



なる反応によつてリシウム核が出來ると共に α 粒子が放出される場合の他に、



なる反応によつて硼素核が出來、その際 γ 線が発生する場合、及び

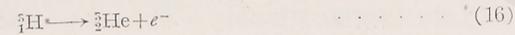


なる反応によつて重陽子が放出される場合も起り得るのである。

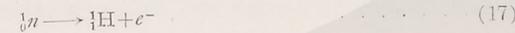
所でこの重陽子は重い水素の核に他ならぬ、通常の水素の殆ど全部が軽い水素(${}^1_1\text{H}$)であつて、僅かに $\frac{1}{5000}$ が重い水素(${}^2_1\text{H}$)である。併し他の同位元素と違つて、水素の場合には軽いのと重いのとで質量が倍も異なるので、物理的化學的性質の相違も相當著しい。従つて種々の方法によつて重い水素の相當量を分離出來るのである(詳細は「同位元素」の項参照)。そこで、出來た重い水素のイオン、即ち重陽子を通常の陽子の代りに使つて、高電壓で加速し、種々の原子核に衝突させて見ると、その効果は陽子よりも更に著しいことがわかつたのである。例へば重陽子を重い水素自身に衝突させると



なる反応のいづれか起る。初めの反応で出来る ${}^3_1\text{H}$ は所謂**三重水素**であるが、これは不安定で

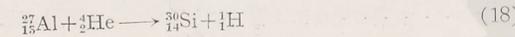


なる過程によつて崩壊して、ヘリウムの同位元素 (${}^3_2\text{He}$) に變化し、その際 β 線、即ち高速度の電子 (e^-) を放出する。その半減期は百五十日位と推定されて居る。この様にして人工的に放射性原子核を作ることが出来る。これを**人工放射能**と稱する。前にも述べた様に人工放射性原子核の種類は、現在までに知られて居る丈で約 250 種にも達するが、 ${}^3_1\text{H}$ はその中でも最も軽い。但し理論的には中性子自身が

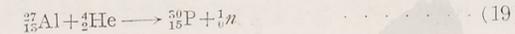


なる過程によつて陽子と電子とに自然崩壊することが豫期されるが、その半減期が数日乃至数十日といふ長いもので、實驗的な檢證は未だ得られて居ない。ナトリウムまでの軽い原子核で放射能を有するもの——乃至は一般に不安定なもの——は、II, 1, 第1表に於いて * をもつて示してある。

人工放射能は Joliot^{ジョリオ} 及び Curie^{キュリー} によつて、初めて見出された。即ちアルミニウムに α 線を當てると

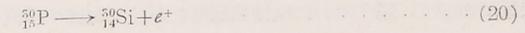


なる反応によつて、陽子が發生することが知れて居た。所がこれと並行して中性子の出来る様な反応がある。これは



なる過程によるものと考へられる。 ${}^{30}_{15}\text{P}$ なる磷の同位元素は自然界には存在しない。そればかりでなく、この反応が終つた後にも放射線が出て居る。これを調べて見ると、通常の電子と同じ質量で、正の電氣を帯びた粒子、即ち**陽電子**であることがわかつた。陽電子はそれより二年程前に宇宙線中で發見

されたものであるが、この様にして、人工放射性元素からも出て來ることがわかつた。従つて ${}^{30}_{15}\text{P}$ は



なる反応によつて陽電子 e^+ を放出して、安定な珪素核 ${}^{30}_{14}\text{Si}$ に變化するものと推定される。そして實際化學分析によつて磷が放射能を持つことが確證されたのである。この場合の半減期は3分15秒と測定された。この發見以來、種々の方法によつて無数の放射性元素が發見されたが、その殆ど全部が ${}^3_1\text{H}$ の如く**陰電子**——即ち通常の電子——を出すものか、しからざれば ${}^{30}_{15}\text{P}$ の如く陽電子を出すものである。この他に放射線を外へ出さず、核が周圍にある軌道電子を捕獲して、原子番号の一つ小さな核に變はる場合がある。例へば II, 1, 第1表にあげた ${}^7_4\text{Be}^*$ は



なる反応によつて發生し、不安定であるにも拘らず陰電子も陽電子も出さず



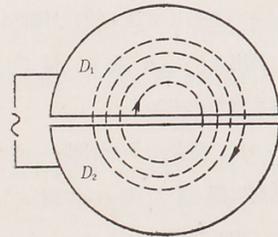
なる反応によつてリチウム核に變化すると考へられて居る。この他に ${}^{55}_{25}\text{V}$, ${}^{90}_{41}\text{Sc}$, ${}^{67}_{31}\text{Ga}$ 等も軌道電子を捕へて自然崩壊する。これ等の場合に捕獲されるのは主として、軌道が最も核に近い K 電子である故**通常 K 電子捕獲**と稱する。すると崩壊後の原子は K 殻の電子が一つ不足して居る故、外部にある電子がこの状態に落ち、その際 K-X 線が放出される譯である。従つてこの K-X 線を觀測すれば、逆に K 電子捕獲を實證出来る。

人工放射能と自然放射能との異なる點の一つは、前者は β 放射能——即ち陰陽電子を放出する場合——及び K 電子捕獲に限られて居るのに對して、後者は α 放射能の方がむしろ多い事である。但し最近サイクロトロンから出る 32 MeV の α 線を蒼鉛 (Bi) に當てると、 α 放射能を持つ様になるこ



とが報告されて居る。

サイクロトロンはよく知られて居る様に、Lawrence ^{ローレンス} によつて考案せられた装置であつて、陽イオンに直接高電圧をかけて加速する代りに、高周波の電場とこれに垂直な静磁場とを同時に作用せしめることによつて、高速度のイオンを得るのである。その原理を示すと第5圖の如く、 D_1 、 D_2 なる二つの D 型の電極の間に電気振動を起さしめると同時に、紙面に垂直に強い磁場をかける。すると中心附近で発生したイオンは電場によつて加速されると共に、磁場によつて軌道を曲げられる。従つて最初例へば D_1 の中へ入つて居つたとすると、そこで軌道が圓形に曲げられて、再び D_1 と D_2 の中間へ戻つて来る。もしもその時に丁度電気振動の位相が初めと逆になつて居るとすると、更に加速されて D_2 の中へ入つて行く。所がイオンの速度 v が早くなるに伴つて、軌道の半径もそれに比例して増す故、半圓を描く時間はいつも同じである。従つてイオンは毎回加速されて行き、周邊へ近づくころには非常な高エネルギーになつて居るのである。現在この方法で得られる最大のエネルギーは、上記の如く α 粒子を加速した場合に 32 MeV であり、陽子及び重陽子の場合には 16 MeV である。これ等は Lawrence の研究室及び理化学研究所にある二百噸のサイクロトロンによつて得られる値である。所で原子



第 5 圖

核を構成する核子間の力の根源は中間子にあると考へられる(II. 5. 参照)。その質量 μ は電子の約二百倍である。電子質量 m はエネルギーに直せば $mc^2=0.5 \text{ MeV}$ である。従つて中間子を作り出すには
$$\mu c^2=200 mc^2=10^2 \text{ MeV}$$

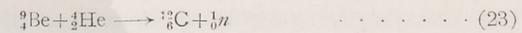
即ち約一億ヴォルトのエネルギーが必要

であると推定される。現在存在するサイクロトロンでは、未だそんな大きなエネルギーは出ない。併し Lawrence は一億ヴォルトを目指して、四千噸のサイクロトロンを建設中であるから、これが完成すれば中間子も人工的に作り出され、原子核の研究に新生面が開かれるであらう。

いづれにしても原子核の壊變には、少くとも現在の所では、サイクロトロンが一番有力な武器である。Cockcroft と Walton が最初に核の人工壊變に成功したのは、蓄電器と整流管との組合せによつて交流の電源から直流の高電圧を得る装置によつてであつた。併しこの方法で得られるエネルギーは百萬ヴォルト程度以下である。この他に Van de Graaff の考案した静電高壓装置がある。それは絶縁された大きな導體にベルトで電気を運んで段々電圧を高めて行く方法である。これによつて數百萬ヴォルトのエネルギーのイオンが作り得る。

3. 中性子と原子核

前節で述べた様に、 α 線で原子核を破壊すると (9) の如き型の反應によつて陽子が發生することが早くから知られて居た。所がリチウム、ベリリウム等の場合には陽子が出ないで、非常に貫通力の強い中性の粒子が出て居ることが後になつてわかつて來た。これは最初 γ 線 (4. 参照) であらうと推定されて居たがよく調べて見ると性質が γ 線と餘程違ふ。結局 Chadwick ^{チャドウィック} によつてそれが今日の中性子 (II. 4. 参照) であることが明かにせられた。すると例へばベリリウムは

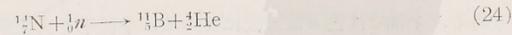


なる反應によつて炭素に變はる際に中性子を發生すると考へなければならぬのである。今日では色々な方法によつて、中性子を人工的に作り出すことが出来るのであるが、低い電圧でこれを得ようと思ふ場合には通常 2. (15)

の反応が利用されて居る。出来た中性子は多くの場合数百万ヴォルトといふ大きなエネルギーを持って高速度で走つて居る。

所が電気を帯びた粒子——例へば α 粒子、陽子、陰陽電子等——が高速度で物質中を通過する際には、途中で多数の原子と衝突してその中の電子を外へ抛り出す。それによつて粒子の通つた道筋に多くのイオンが出来る。このイオンによつて逆に帯電粒子の存在が検出されるのである。併し原子をイオン化するにはあるエネルギーが入用であるから、帯電粒子自身は物質を通過する間に段々エネルギーを失つて減速され、やがて止つて了ふ。このために、一定のエネルギーの α 粒子、陽子、電子等は、一定の物質中で夫々一定の距離を進むと止つて了ふ。即ち夫々一定の飛程を持つて居るのである。例へば RaA から出る α 粒子のエネルギーは 6 MeV であるが、空気中で 4.7 釐の飛程を持つて居る。電子はこれと同大のエネルギーの α 粒子や陽子に比して、イオン化する能力が遙かに小さいので、飛程の方は逆にずっと大きくなつて居る。

これに對して中性子は γ 線と同じく電気を帯びて居ないので、電子との間に電氣的な力が働かず、従つてその通路にイオンの列を作ることがない。そのためエネルギーの損失が少なく、物質を貫通する力が強い。併し中性子と原子核とが接近すれば力が働くのみならず、その接近を妨げる電氣的な斥力——いひかへれば Gamow の山——が存在しない。従つて中性子は原子核の中へどんどん入つて行ける。特に α 粒子や陽子などと違つて、どんなに原子番号の大きな原子核でも破壊出来る。例へば軽い方では窒素核に衝突すると



なる反応によつて硼素とヘリウムとが出来る。軽い方の極端は水素であるが

中性子が水素を含んだ物質、例へば水とかパラフィンの中を通過すると段々その速度を減少する。これは中性子が水素の核、即ち陽子と衝突するとどちらも同じ位の質量であるから、陽子の方も大きなエネルギーで跳ね飛ばされる。それに伴つて中性子もエネルギーの相當部分を失ふ。平均としてエネルギーは半分が減る。従つて中性子が水素化合物中で陽子と 20 回乃至 30 回の衝突を繰返せばエネルギーは一ヴォルト以下になり、結局その温度での氣體分子の運動エネルギー——常温で平均 $\frac{2}{100}$ ヴォルト位——を持つた中性子、所謂熱中性子になつて了ふ。この様にして中性子の源を水やパラフィンで囲んで置くと、最初源から出て來た速い中性子は遅い中性子に變へられて了ふのである。それが尙も水やパラフィンの中をうろついて居れば結局



なる反応によつて、陽子に捕へられて重陽子となり、その際 γ 線を發生する。この γ 線は重陽子の結合エネルギーに相當する 2.2 MeV のエネルギーを持つて居る。併し水やパラフィンの層がそんなに厚くなければ出来た遅い中性子の大部分は外へ出て來る。これが色々な原子核に当たると、それに捕へられて了ふ場合が多いのである。それで遅い中性子は原子核を破壊するのに特に有力な武器となるのである。例へば臭素が遅い中性子に捕獲されると、放射性的臭素が出来るが、その中には半減期が夫々 18 分、4.2 時間、36 時間の三種の類が混つて居る。所が元來臭素には ^{80}Br 、 ^{81}Br の二種しか安定な同位元素はない。従つてこれから出来た三種の放射性的臭素の中の二つは、質量数が同一な筈である。原子番号と質量数が同じで性質の異なる原子核を異性體と稱する。その後 γ 線による原子核の壊變 (4 参照) の研究が進んだ結果、中性子捕獲の際



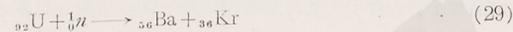
なる反応によつて出来る ${}_{35}^{79}\text{Br}$ が二種の異性体を有し、その各々が



なる過程によつて、電子を放出してクリプトンに変化することがわかつた。その半減期が夫々 18 分及び 4.2 時間になつて居るのである。残りの半減期 36 時間の分は ${}_{35}^{79}\text{Br}$ から出来た ${}_{35}^{79}\text{Br}$ である。異性体の存在は人工放射能の発見以前から知られて居た。それは自然放射性元素のウラン系列の中の



なる分岐點に現はれる。(1 第 3 圖参照) 即ち UX_2 と UZ とは共に、 UX_1 の β 崩壊によつて發生し、いづれも β 放射能を有する。それ等は共に $A=234, Z=91$ であるが、半減期は夫々 6.7 時間及び 1.14 分となつて居る故、異性体であると考へられる。人工放射性元素中では、この他に ${}^{106}\text{Ag}$, ${}^{106}\text{Rh}$, ${}^{106}\text{In}$ 等が夫々二種の放射性異性体を含むことが知られて居る。異性体に関しては尙次の節でも述べる。中性子は原子番号の最も大きなウランの原子核をも破壊することが出来る。Hahn と Strassmann とは一昨年(昭和十四年) 壊變の結果として出来る放射性元素の化學分析を行ひ、その一つが原子番号 56 のバリウムの同位元素であるといふ意外な事實を發見した。するとウランが壊れる際の相手方は原子番号 36 のクリプトンの同位元素でなければならぬことになる。即ちこの場合の反応は



であると推定される。すると中性子の捕獲によつて生じたウランの同位元素は、バリウムとクリプトンといふ様な餘り大きさの違はぬ二つの部分に分れることになる。これは今まで知られて居た諸種の核反應と全く性質の異なる反應であつて、原子核の分裂と呼ばれて居る。但し分裂の仕方は色々あつて、

Ba, Kr 以外の多くの放射性元素が出来ることが知られて居る。更に又トリウム ($Z=90$) 及びプロトアクチニウム ($Z=91$) も中性子の衝撃によつて分裂することが知られて居る。併し $Z=89$ 以下の元素は分裂しない様である。分裂は中性子ばかりでなく、 γ 線や重陽子の衝撃によつても惹起し得るのである。分裂の現象の今一つの特徴は、放出される Ba, Kr 等の重いイオンは夫々一億ヴォルト程度の大きなエネルギーを持つて居ることである。この事實と他の色々な根據とからウラン——特に ${}^{235}\text{U}$ ——を遅い中性子で分裂せしめることによつて、莫大なエネルギーが得られるのではないかと期待されて居る。

4. γ 線と原子核

放射性元素からは、今まで述べて來た α 線、 β 線の他に γ 線が出て來る場合もある。或は又人工的に原子核を壊變する反應に際しても屢々 γ 線の發生を伴ふ。(例へば前節 (25), (26) 参照) γ 線はよく知られて居る様に、 α 線 β 線よりも物質を透過する力が強く、且つ磁場によつて曲げられない。それが X 線よりも更に波長の短い電磁波であることは、今更申すまでもないことであらう。所で量子論によると、光は一面に於いて粒子の性質を持つて居る。即ち光は電磁波であるが、又多數の粒子、所謂光量子、或は光子の集りとも考へられる。そして光子の一つ一つがそれに伴ふ電磁波の波長に逆比例——從つて振動數に比例——するエネルギーを持つて居るといふのが量子論の根本假定である。從つてそのエネルギーを E とするとよく知られた

$$E = h\nu \quad \dots \dots \dots (30)$$

なる關係が成立する。但し h は Planck の常數で、 6.55×10^{-27} エルグ・秒といふ小さな量である。この關係はどんな波長の電磁波に對しても適用出来る。例へば可視光線に伴ふ光子のエネルギーは二乃至三ヴォルト程度であり、

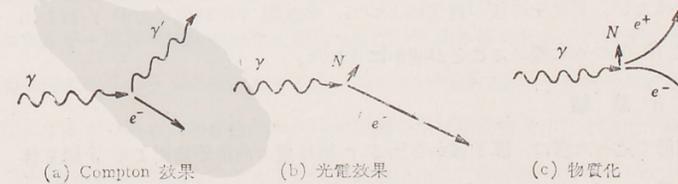
波長が 10^{-8} 程度の X 線になるとエネルギーは 10^4 ヴォルト程度になる。 γ 線となると波長が更に短かく、従つてエネルギーもそれ丈大きくなる。例へば ThC'' から出る γ 線中、最も透過力の大きなものの波長は 4.7×10^{-11} 程度で、エネルギーは 2.62 MeV になつて居る。

電子や陽子などと同じ様に、光子も色々な固有の性質を持つて居る。即ちその荷電や質量は 0 で、Bose 統計に従ひ、スピンの 1 である。スピンの 1 であるといふのは、電磁場が Maxwell の基礎方程式によつて記述されることと同等である。

皆で放射性原子核から γ 線が飛び出せば、核はそれ丈エネルギーを失ふ譯である。併し核の原子番号や質量数は變化しない。従つて核はたゞある**勵起状態**——エネルギーを餘分に持つた状態——から**基準状態**——餘分のエネルギーを持たない状態——或は途中の勵起状態に落ちる丈であると考へられる。それは丁度原子から光や X 線が出る様なものである。例へば一つの原子の中で一番原子核に近い電子の軌道——所謂 K 殻にする状態——が空いて居たとすると、もつと外の軌道にあつて、餘分のエネルギーを持つて居た電子が空いた軌道へ落ちて來たとすると、餘分のエネルギーが K-X 線となつて放出されるであらう。これと同じ様に原子核自身の中で何か状態變化が起れば γ 線が出る譯である。その際核の荷電や質量数は變化しないが、他の諸性質例へばスピンの如きものが變はると考へられる。勵起状態に置かれた核は非常に短い時間の間に基準状態又は他の勵起状態に移つて了ふのが普通である。即ち放射性元素が α 崩壊や β 崩壊をやつた後に出來た核が勵起状態にあれば、殆ど瞬間に γ 線を出して了ふのである。所が若しも何かの理由で、この勵起状態から基準状態等に移る確率、所謂**轉移確率**が非常に小さかつたとすると原子核は相當期間勵起状態に止まり得ることになる。すると

原子番号と質量数の同一な二種の核が存在する如く見えることになる。これが前節で述べた**異性體**に他ならぬと考へられる。但し異性體の問題がこの様な考へ方だけで解決されるかどうかは疑問である。

以上の様な機構で原子核を出て來た γ 線の多くはまはりにある電子の間を抜けて、原子の外へ飛び出す。併し残りの部分は外へ出ない間に核の周囲の電子自身によつて捕へられ、電子はそれ丈のエネルギーを持つて高速度で外へ飛び出す。飛び出したものは β 線として觀測される譯である。この様な過程を γ 線の**内部變換**と稱する。そして吾々は直接 γ 線を觀測する代りに、内部變換によつて出て來た β 線を利用して、間接に γ 線のエネルギーを決定するのである。それは兎も角として、無事に原子から抜け出した γ 線の方は、中性子と同じく物質を通過する途中イオン化の作用を呈しないので、比較的貫通力が大きい。そして電子と衝突して散亂される **Compton 効果**や、原子の中の電子に捕獲されて無くなる**光電効果**等が γ 線の吸収の主な原因となる。所が γ 線のエネルギーが百萬ヴォルト以上であると、次の様な現象によつて消滅する場合がある。即ち γ 線が原子核の側で吸収され、その際陰電子と陽電子の一対が発生することがある。所で電子の質量 m をエネルギーに直せば $mc^2 = 0.5 \text{ MeV}$ であるから、電子對を作るにはどうしても百萬ヴォルトのエネルギーが必要な譯である。これを γ 線の**物質化**と稱する。これ等の過程



第 6 圖

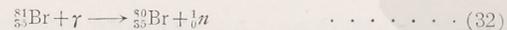
を圖式的に書けば第6圖の如くなる。但し、 γ は入射 γ 線、 γ' は散亂された γ 線、 e^- , e^+ は陰陽電子、 N は反動を受けた原子核を示す。

γ 線の物質化の逆の變化が陽電子の消滅の現象に他らぬ。即ち人工的に作り出された陽電子は早晚物質中の陰電子と一緒に消滅し、その際一個又は二個の γ 線量子が発生するのである。

γ 線は又原子核自身に捕獲せられ、その結果として核の崩壊が起る場合がある。これは光子が核外の電子によつて吸収せられる光電効果の現象とよく似て居るので、原子核の光電破壊と稱する。例へば ThC'' から出る硬い γ 線のエネルギーは 2.62 MeV であるが、これが重陽子に当たると——結合エネルギー 2.19 MeV より大きいので——



なる反應によつて、重陽子は陽子と中性子とに分解して去ふ。これは(25)の過程の逆過程である。次に前節でも觸れた臭素の場合を採上げると、 γ 線の捕獲に際して中性子が放出され、その結果半減期が夫々 18 分、3.5 時間、4.2 時間なる三種の放射性臭素が出来ることが知られて居る。これを前節の中性子によつて出来たものと比較して見ると、18 分と 4.2 時間とは両方に共通であるから、それ等は

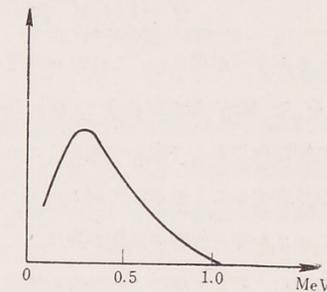


なる反應によつて出来た ${}^{80}_{35}\text{Br}$ の二種の異性體に原因するものであると考へる他はない。更にその後の研究によつて、半減期 4.2 時間の方が γ 線を出して 18 分の方に變はることが明かにされた。

5. β 崩壊

前節で述べた様に、原子核から出る γ 線は屢々内部變換による β 線を伴つて居る。併し γ 線自身が一定のはつきりしたエネルギーを持つて居るか

ら、これに伴ふ β 線も又はつきりしたエネルギーを持つて居る。即ち β 線のエネルギースペクトルは線スペクトルになつて居る。所が放射性元素から出る β 線の主な部分は連続スペクトルになつて居るのである。即ち核から直接出て來ると覺しい β 線の方は、エネルギーが連続的に異なる色々な値を持つて居るのである。そして β 線のエネルギーを横軸に、出て來る數を縦軸に取ると、分布曲線はいつも第7圖の如き形になる。但し圖は特に RaE から出る β 線のスペクトルを示す。所が α 線や γ 線の方のエネルギーはすべて線スペクトルになつて居る。この事は β 崩壊の前後の原子核はいづれも一定のエネルギーの状態にあることを指示するものと考へられる。



第 7 圖

若しさうだとすると、 β 線の場合にのみ連続スペクトルになつて居るのは甚だ不可解である。何故かといへば崩壊前の原子核の全エネルギー——即ちその質量 M に c^2 を乗じたもの——から崩壊後の原子核の全エネルギーを引いたものが β 線の全エネルギー——即ち mc^2 に運動のエネルギーを加へたもの——になつて居る筈である。従つてあるエネルギーの β 線に對してこの關係が成立して居るとすると、他のエネルギーの β 線が放出される際にはエネルギー保存の法則が最早成立たなくなつて居る筈である。この様に β 崩壊の現象をそのままに受け入れると、エネルギー不滅の法則を否定せねばならなくなるのである。所が他のあらゆる種類の核反應に於て、この法則は極めて正確に成立つて居るのである。一例を挙げると、Cockcroft, Walton が最初に發見した



の反応の際に出て来る二個の α 粒子は殆ど同大の運動のエネルギーを持ちその和は $Q=17.2 \text{ MeV}$ と推定された。所が一方當時知られて居た質量の値

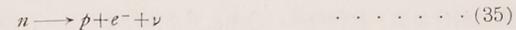
$${}^7_3\text{Li}=7.0146 \quad {}^1_1\text{H}=1.0078 \quad {}^4_2\text{He}=4.0022$$

を使ふと質量単位にして

$$Q' = {}^7_3\text{Li} + {}^1_1\text{H} - 2{}^4_2\text{He} = 0.0180 \quad \dots \dots \dots (34)$$

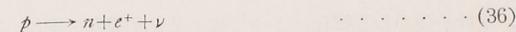
のエネルギーが得られ、これが α 粒子の運動エネルギーに變る筈である。實際 Q' を MeV 単位に直すと $Q' = 16.7 \text{ MeV}$ となり、 Q と Q' とは實驗誤差の範囲内でよく一致して居る。これはこの反応の際にエネルギー保存の法則が成立することを示して居る。その後、段々實驗が精密になつて行くに従つてエネルギー保存の法則が疑はしくなる様な場合が皆無であることが明らかになつた。そして逆にこの法則を假定して未知の原子質量を決定して何等の不都合を來さなかつたのであつた。しかるに β 崩壊の場合にのみ、この法則が破棄されて居るとはどうも考へ難い。

そこで β 崩壊の際には電子の他に何か未知の粒子が放出され、エネルギーの一部を運び去るのであるが、物質を透過する力が強いので、吾々の觀測にかゝつて來ないのであらうと推定される。この考へは Pauli によつて提唱されたが、Fermi は更にそれを發展させて、今日一般に認められて居る理論を建設した。それによると、上記の未知の粒子は中性で、且つ質量が電子よりも更に小さい——恐らく 0 であらうと推定される——と考へられ、**中性微子** (ニュートリノ) といふ名で呼ばれて居る。これが光子と異なるのは、スピンの $\frac{1}{2}$ で、Fermi の統計に従ふ筈である。そして β 崩壊とは原子核内の一個の中性子 (n) が陽子 (p) に變化し、それと同時に

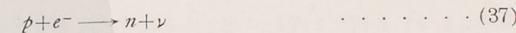


なる反応によつて一個の陰電子 (e^-) と中性微子 (ν) とが発生する現象であると解釋される。かく考へればエネルギー保存の法則を放棄せずすむばかりでなく、 β 線の連続スペクトルの大體の形を理論的に演繹し得るのである。

同様にして、人工放射性原子核が陽電子を放出して崩壊する現象も



によつて、核内の陽子の一つが中性子に變はると共に、陽電子 (e^+) と中性微子とが発生する過程と解釋される。又 K 電子捕獲の際にも



なる反応が起つて居り、矢張り中性微子が放出されて居るものと解釋される。いづれにしても中性微子は非常に透過力が大なるため、今日未だ直接觀測することが出來ないのであるが、種々の理由からしてその存在は殆ど疑ふ餘地が無いのである。

IV. 結語 (素粒子の問題)

以上述べ來つた所によつて、原子核とは如何なるものであるかは一通りお分りになつたことと思ふ。そこで再び始めて立戻つて考へて見ると、通常の化學に於ては、原子が常住不變の基本粒子であり、それが集つて種々の分子を形成し、又離れて行くといふ不斷の變化が研究の對象であり、それが化學變化の名で呼ばれて居たのである。併し近代に於ける原子物理学の進歩に伴つて、原子自身は最早や基本粒子でなく、原子核と電子の各々の離合集散が考察の對象となつた。そしてそれと同時に、電磁場の如き作用を傳へる場自身が多數の光子の集合であり、個々の光子が一々の過程に關與する基本粒子であると考へなければならなくなつた。

最近に於ける原子核物理学の急激な進歩の結果として、原子核自身も亦不可分なものではなく、幾つかの陽子と中性子との集りと見做される様になつた。そして不可分な最後の単位たる**素粒子**としては、陽子、中性子、陰陽電子、光子の他に中性微子とか中間子といふ様なものまでも考慮されることゝなつた。かくして一切の物理的・化学的変化は素粒子間の相互作用に原因する反応、素粒子間の相互轉化によつて起る基本的過程の集積と考へられる至つたのである。そこでは核物理学と核化学の間に何等の本質的な區別が認められない。吾々の問題は結局どんな種類の素粒子が存在するか、それ等の間の相互作用によつて如何なる現象が起るかを徹底的に研究することに歸着する。それには原子核ばかりでなく、**宇宙線**特にその中の**中間子**に關する研究が重要な意味を持つて來るのである。併しこゝでは宇宙線の問題に立入ることを止め、一先づ筆を擱くことにする。

