ニールス・ボーア博士講演
仁科芳雄博士譯述

原子

「科學知識」第十七卷第七號掲載

原子

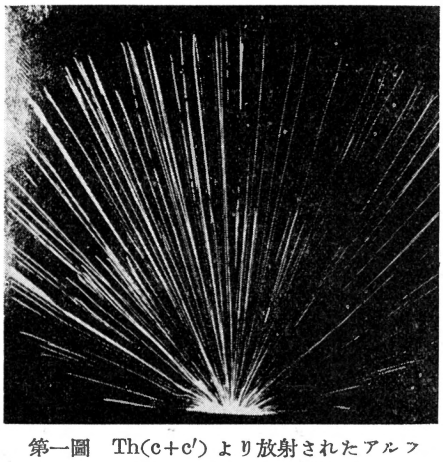
コペンハーゲン大學教授　ニールス・ボーア博士講演
理化學研究所研究員　仁科芳雄博士譯述

緒言

皆さんの御歡迎に對し心からお禮を申上げます。それから長岡教授の御親切なお言葉、誠に有り難う御座います。茲に「日本學術振興會」と「科學知識及會」とのためにお話すると云ふ事は、自分の非常に欣快とし、且つ光榮とする所であります。

科學の目的は自然の力の働きを究め、さうしてこれを人類の爲めに、マスターすると云ふ事であります。でありますから、最も普遍的で、最も國際的であるのは何かと言ひますと、それは科學の追求であります。この科學の領域に於て、個人々々の爲し得る仕事は洵に僅かなものであります。それは前人の業績の上に唯數歩を進めるに過ぎません。そうしてこの數歩に致しましても、個人の功績よりは寧ろ科學者の協力に俟つものであります。顧ればかやうな協力に與かり得たのは天命であり且つ幸運でありました。自分は英國で行はれた果敢なる試みと、獨逸の方からの貢献とを結び合せたに過ぎません。

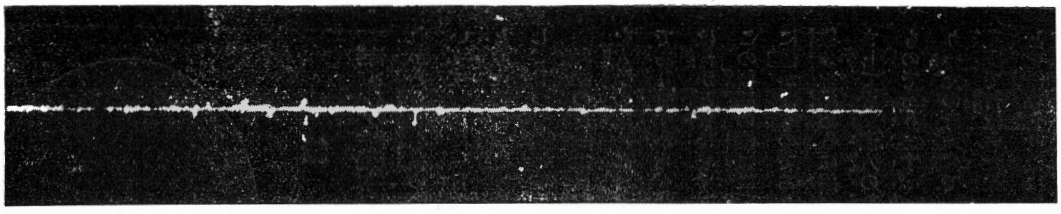
長岡教授の仕事で分ります樣に、英國の試みと云ふのは、原子それ自身の構成の研究でありました。これがトムソン、ラザフォードを原子の構成粒子の發見に導いたのであります。一方ドイツの貢献と云ふのはどう云ふことかと言ひますと、一般的の論據からして原子に對しては普通の力學の考がもつと擴張せらるべきであると云ふ事を明にした事であります。それは茲に箱があるとし、此が熱運動のために熱輻射を行ひ、



第一圖　Th(c+c′)より放射されたアルファ粒子の飛跡をウヰルソン霧函にて示したもの。二種の飛程從つて二種の放射性物質の存在が見られる

其輻射が箱の中で反射されたり吸收されたりして、遂に平衡狀態に達して居るとします。キルヒホフの考へたところによりますと、その時のエネルギーの分布は、平衡狀態にある以上は、その箱を作つて居る物質に無關係であるといふことが解ります。從つてこれに依つて物質に行はれる一般的概念の試驗をする手段を得た譯であります。次いでプランクによつて、從來諸現象を說明したニュートンの力學、マクスウエルの電磁力學が此の熱平衡の現象を說明するには足りないで、力學にアトミステイー即ち細分し得ない窮極の要素を導入する必要のある事が發見せられました。此不可分割の作用量子が所謂プランクの常數hであります。從來の場合には取扱ふ作用の大さがhに比べて大きいから、これが問題にならなかつた譯でありますが、熱平衡の場合や原子の問題ではその取扱ふ作用が小さいから、これが重要な要素となつて來るのであります。

これ等英、獨先人の業績に更に一歩を進めると云ふ事業に就て多くの協力が集つて來、各國の物理學者と協同研究を行ふ事になりました。例へばこの國に來た



第二圖　水素内に於けるアルフア粒子の飛跡。磁場のデルタ線に對する影響を示す。

ハイゼンベルグやデラック、又日本の學者達も參加しました。これ等日本の學者達は、人類文化の他の方面を持つてコペンハーゲンにやつて來、日本に歸つてからも種々の仕事に成果を擧げて居ります。そう云ふ人々と協力する樣になつて來たのでした。

原子物理學の幻燈說明

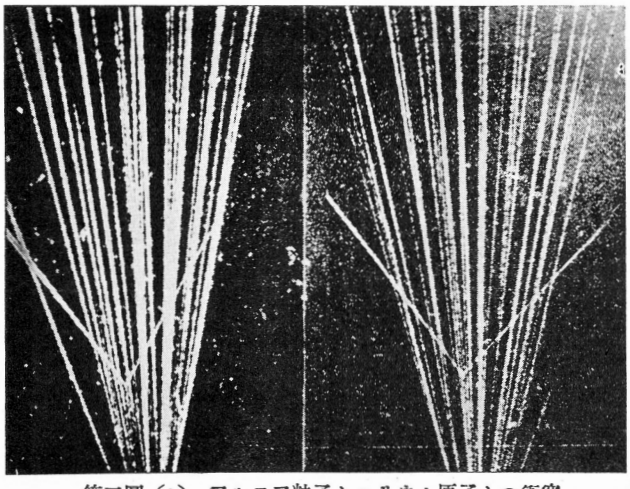
この原子物理學は非常に廣汎な問題でありまして、これを殘らず述べると云ふ事は先般當地帝大の講演でも解る樣に非常に時間のかゝる事でありますから幻燈によりまして唯其發展の跡を辿り且つ最近の進展を示さうと思ひます。

第一圖　圖は此原子物理學の領域に於ける實驗であつて、ウィルスン霧函の方法により個々の原子の通過した路を示すものであります。即ちラヂウム、トリウムなどゝ云ふ放射性物質から放射されるアルフア粒子の通つた跡を目に見えるやうにした寫眞であります。勿論これ等の粒子は極めて小さいもので、到底見える樣なものではありませんが、それを水蒸氣で過飽和の狀態にある氣體の中を通過させると、そのアルフア線が氣體分子を電離し、電離された分子が核となつて水滴が出來るのであります。圖の白く見えて居るのは此水滴の列でありまして、これがアルフア線の通つた道を示すものであります。

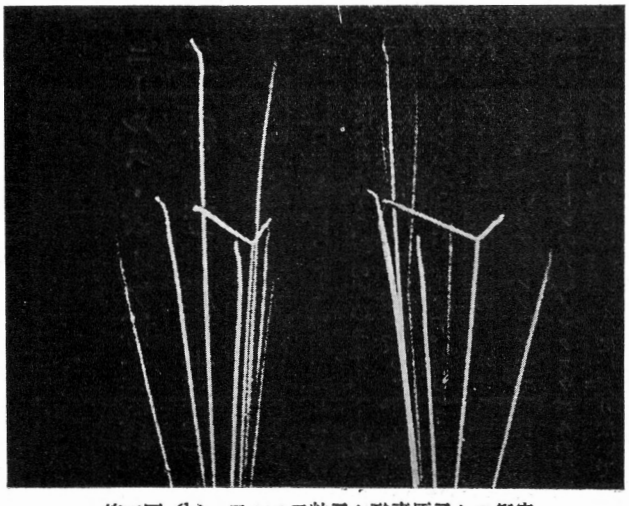
此圖で見ますと線の長さに二通りありまして、早く止るものと遠く迄達くものとが區別せられます。これはアルフア線を出す物質に二種類あつて、飛程の異るアルフア線を放射して居る事を示して居ります。

兎も角も此實驗で非常に重要な點は、アルフア線の通路が眞直であつて、數十萬乃至數百萬の原子を通つてこれを電離した後、始めてこれが停止すると云ふ事が現はされて居る事であります。

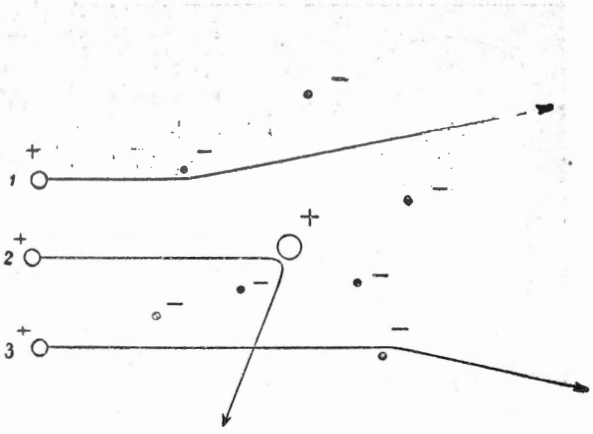
第二圖　矢張り前と同じ樣にアルフア線の通路を示すものでありますが、眞直な線から岐れて上下にボツボツ白いものが見えます。これはアルフア粒子が氣體の中を通る時に、氣體分子から電子を飛出させたもの



第三圖 (a)　アルフア粒子とヘリウム原子との衝突



第三圖 (b)　アルフア粒子と酸素原子との衝突



第四圖　アルファ粒子と原子との衝突の圖解

で、それを眼に見える樣にしたものであります。其通路の曲がつて居るのは、これを磁場の中に入れてあるからで、この彎曲から電子がどう云ふ速度で出て來るかと云ふ事が分るのであります。

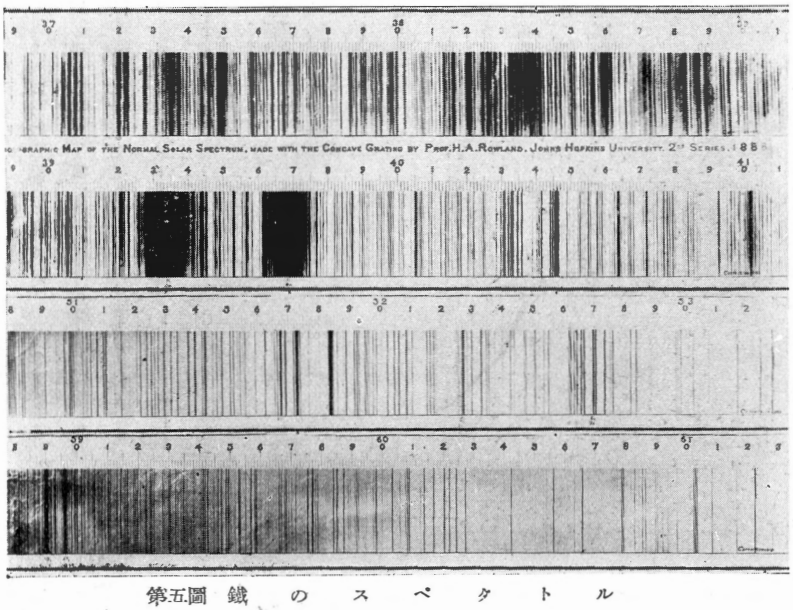
第三圖(a)　此圖におきてましては、アルファ粒子が眞直ぐに進まないで途中で屈折し、白い線が二つに岐れて居ります。

これは同時に二つのカメラで撮つた双眼寫眞であつて、それに依てこの二つの岐れた線の間の空間に於ける角をはつきり測る事が出來ます。すると丁度それが九十度になつて居ります。それは玉突の玉が二つ打突つた時に、兩方が同じ質量を持つて居る場合に、玉の通路のなす角と同じであります。それ故圖に示されたものは、アルファ線が同じ質量のものに衝突した事を示して居ます。事實これはヘリウム瓦斯の中にアルファ線を通過させた場合で、アルファ線はヘリウムの原子の核でありますから、打突かる方も打突けられる方も同じ質量を持つて居りますから、丁度角が九十度になつて好い譯であります。

第三圖(b)　酸素の中にアルファ線を通した場合でありまして、この圖では粒子が衝突して二つに岐れる角が九十度より多くなつて居ります。これはアルファ粒子がそれより重いものに打突つた事を示して居ります。此角を測つて見ますと、打突けられたものはアルファ粒子の四倍の質量をもつて居る事が解ります。酸素の原子量は一六でありまして、丁度ヘリウムの四倍でありますから、實驗とよく一致して居ります。

これに依つて見ましても、原子に關する實驗的證據が極めて直接であると云ふことが解ります。昔の人は直接に個々の原子の實證を得ると云ふ事は、到底不可能であると考へて居つたのでありますが、實際吾々の技術が進んで來ますと、斯ら云ふ風に原子そのものゝ直接の證據を握り得る譯であります。

第四圖　これはアルファ粒子が原子に衝突する際、其通路がどんなに影響されるかと云ふ事を①、②、③の場合について圖解的に示したものであります。原子は其中心に核があつて、陽電氣を帶び、これが原子の質量の殆んど全部を有つて居ります。其周圍に電子があり陰電氣を帶びて居りますが、其質量は僅であります。此原子に向つてアルファ線が飛んで來て、①又は③の樣に原子核から離れた處を通り、電子に衝突してもこれは殆んど其通路を曲げられません。と云ふのは、アルファ粒子は原子核と同等の



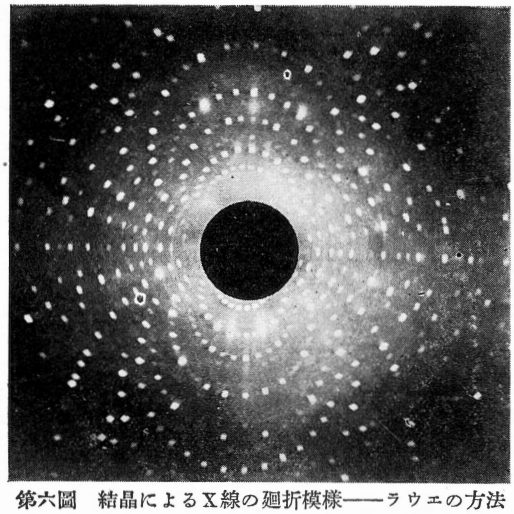
第五圖　鐵のスペクトル

質量を有ち、電子はこれに比べて非常に輕いからであります。圖の曲りは誇張して示したもので、實際は其彎曲は目に見えぬ程度であります。唯②の場合の樣に眞中の核に打突つた時に、反射されて著しく其通路を曲げられるものであります。こう云ふ風に反射される事からして、ラザフォードは始めて核原子の存在、即ち原子は中心に核があつて周圍に輕い電子のあると云ふ事を發見したのであります。

こゝでもう一つ大切な事は、この原子模型の特徴として、その構造が極めて疎であると云ふ事であります。云ひかへれば原子全體の大さに較べて、その構成粒子の大きさが非常に小さいと云ふ事であります。これは太陽系等の場合よりも、もつと疎な構造でありまして、太陽系の星そのものゝ大さとその軌道の大さとの比に較べて、原子の構成粒子の大さと原子全體の大さとの比の方が、ずつと小さくなつて居ります。これは事態を簡單にするもので、この樣な模型はラザフォードが直接の實證を與へたよりも十年も前に、長岡教授に依つて考へられたものであります。

そこで起つて來るのは斯う云ふ原子構造と、物質の性質との關係がどうかと云ふ問題でありますが、これは普通の力學では說明出來ないものであります。普通の力學では、斯樣な模型は原子の示す樣な安定度を有たない譯であります。太陽系は相當に安定なものでありますが、それでもこれに何かの攪亂を與へますと、その攪亂はそのまゝ殘るものであります。例へば或る彗星の樣なものが來て地球に打突つたとしますと、軌道が變化し年の長さも變つて來る譯であります。處が原子の場合にはそれと全く異り、種々の攪亂を與へても直ぐ元に戻つて來ます。さうして原子の示す種々な規則正しい性質は、普通の力學で豫期出來ない樣なものがあります。

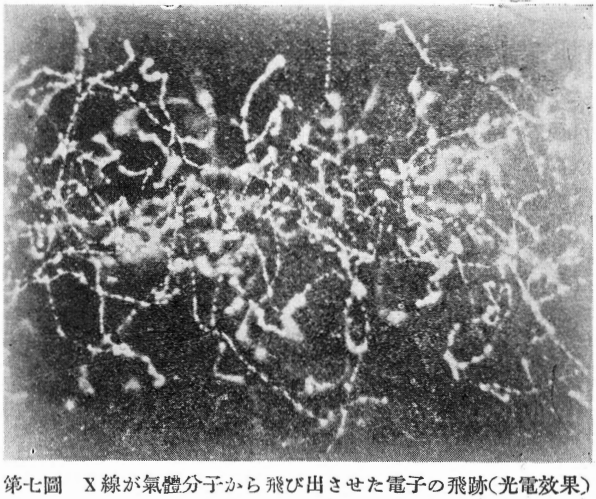
第五圖　原子構造に關する知識を吾人に供給するものゝ一つは、原子の出す輻射、即ちスペクトルであります。此圖はそれを示したもので、これに色々の規則正しい事柄が現はれて居るものであります。そして、これが實驗室で得られたにしても、星から來たものにしても、又太陽から來たものにしても、皆同じ規則性を示して居ります。



第六圖　結晶によるX線の廻折模樣——ラウエの方法

第六圖　その次に、普通の力學で說明出來ない樣な性質、即ち作用量子のあらはれをこれから說明します。普通光の分光學に於てはプリズム等を使ひましてスペクトルを採りますが、X線には從來そんな器械がありませんでした。處が、ドイツのラウエは自然に存在する結晶を光學的の道具として使ひまして、此處に示す樣な模樣をとる事を發見したのであります。

これに依りますと、X線も普通の光と同樣に結晶の面で反射されると云ふ事が解つたのでありまして、これによりX線その物の研究が行はれる樣になつたのみならず、これを結晶構造の研究に使ふ樣になりました。

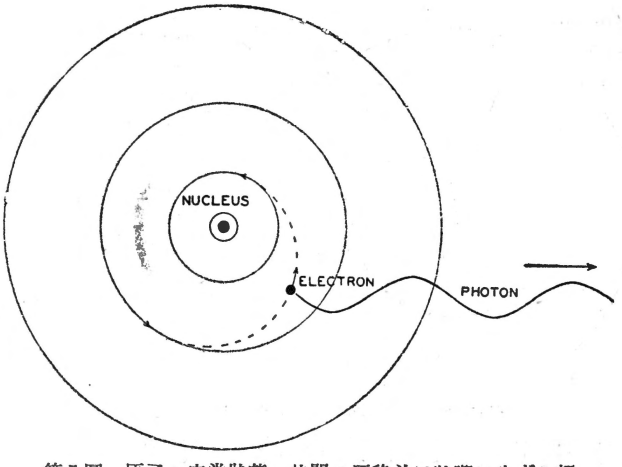


第七圖　X線が氣體分子から飛び出させた電子の飛跡(光電效果)

現に仙臺の本多教授も色々の金屬の研究にこれを利用して成果を擧げて居られます。

第七圖　所が茲にそれと全然違つた局面を示す實驗があります。

此圖は空氣中でX線を左から右に通じた時の狀態を、ウイルスン霧函の方法で寫眞に撮つたもので、X線が氣體の分子から電子を飛び出させる狀を示すものであります。即ち白い線は其電子の走つた跡を表して居ります。これは從來の輻射の概念と全く異つたものでありまして、X線はエネルギーの全量子を、一度に電子若くは原子に與へると云ふ事を示して居ります。これは古典論では說明出來ない事實であります。



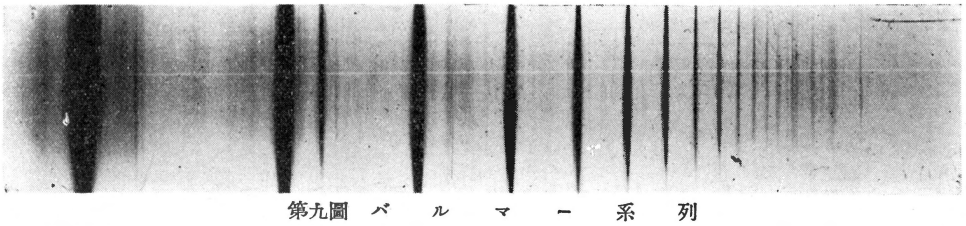
第八圖　原子の定常狀態、其間の遷移並に其際に生ずる輻射を記號的に示す

第八圖　光がどう云ふ風にして原子から出るか、それが又どう云ふ風に個性を持つて居るかと云ふ事を表すものであります。原子は圖の樣に中心に核を有ち、その周りに電子がある譯ですが、電子は任意の狀態にあるものではなく、圖で示した樣に決つた一組の不連續的な狀態に於てのみ核に結合されるものであります。

それで原子が一つの狀態から他の狀態に變るのには、電子はこれ等の不連續的な所謂定常狀態の間をのみ移轉するものであります。そして一つの狀態から他の狀態に移る時に、光子、即ち光を出します。圖の矢で示した點線は此遷移を、又波形は光子を記號的に示したものであります。

第九圖　これはさう云ふ場合に、水素原子が出すスペクトルであります。水素原子は最も簡單な原子で、眞中の核と一つの電子とより成つて居り、從つて其スペクトルにも極めて簡單であります。茲に示すものは所謂バルマー系列と呼ばれるもので、これのもつといゝ寫眞を長岡教授から戴いて居りますが、今日持つて來られなかつたのは殘念であります。

第十圖　これは水素のスペクトルが、何う云ふ風にして出るかと云ふことを示すものであります。水素原子の電子はnなる整數の量子數で決定せられる色々の狀態の一つに結ばれて居ります。そしてその間に移動する時スペクトルを出すもので、色々の狀態から$n=2$なる狀態に移つて來る時に、今述べましたバルマー系列を出すのであります。



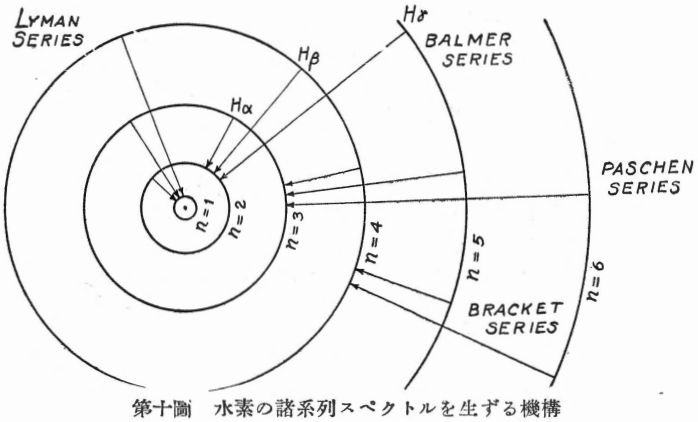
第九圖　バルマー系列

尤も、斯う云ふ風な圖に示す模型を文字通りに考へてはいけないのでありまして、實際にはこれを量子力學で取扱ふべきであり、さうすると事柄はこんなに簡單ではありません。然し吾々が圖で表し得る最も事實に近いものと云へば、この圖となるものであります。

第十一圖　以上述べました樣な簡單な概念が實際使へると云ふ事は、一寸考へ難いかも知れませぬが、事實此處に出した寫眞が、その使ひ得る有力な例を示して居ります。圖のβ、γ、δ、ε等は今申した水素のスペクトルと同じでありますが、その間に、丁度、眞中に一本宛の線が加はつて居ります。

これは、或星から出る光のスペクトルでありまして、一見非常に水素スペクトルに似て居ります。隨て從來はこれを水素から出る光だらうと云ふ風に考

へて居つた譯であります。と云ふのは二つの異る元素が、こんなに類似のスペクトルを出すとは考へられないからであります。然し前述の模型から考へて見ますと、水素原子とヘリウム原子の電子を一つなくしたものとは、よく似て居ります。唯、ヘリウムの方は核の電氣量が二倍であります。從つてスペクトル線の間の距離は近くなるべきで、これは全く實驗と一致します。即ちこれは水素のスペクトルでなく、電子を一つ失つたヘリウム原子のスペクトルであつたのであります。



第十圖　水素の諸系列スペクトルを生ずる機構

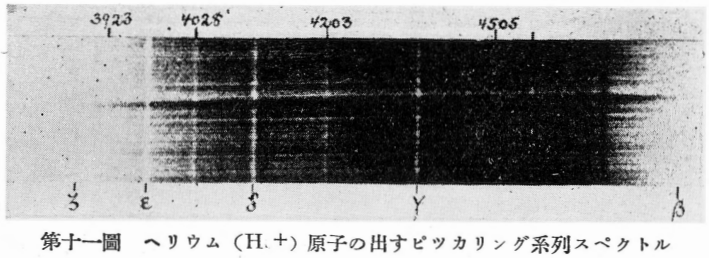
これは核原子の簡單な考へに基き、違つた原子の種々の性質を、互に關係づけると云ふ事を教へた一つの好例であります。これに力を得て、種々の原子の性質を、原子の模型から說明して行かうと云ふ事が試みられたのであります。

そこで實際原子の斯う云ふ種々な物理、化學的の性質は何から來るかと云ひますと、それは原子核の外側にある原子に原因を持つものであります。これ等の電子は核から離れて、其核の電場内を運動して居ります。此狀態の考察により簡單な物理、化學的性質と原子模型とが關係付けられるのであります。

第十二圖　種々の元素の原子模型を圖表的に示したものでありまして、これは電子がそれぞれの原子核に、次々に結合される狀況を研究することによつて闡明せられたのであります。

茲に非常に重要な事は、一つの原子内に於ける各々の電子は、他の電子に殆ど無關係に核に支配せられて結合せられると云ふ事であります。これは今日の量子力學の方でも、矢張り同じ樣に取扱はれるものでありまして、隨てさう云ふ電子は、水素原子の電子と非常によく似た狀態にある譯であります。

此原子模型の研究には、此國にも來た事のあるゾンマーフェルトが重要な貢獻をしまして、圖に示すやうに電子の種々な軌道を定めたのでありました。軌道には圓形のものと楕圓形のものとがあり、其大さは量子數nによつて決定せられます。そして圓の直徑と楕圓の長軸との等しいものは、殆んど同じエネルギーを有つものであります。



第十一圖　ヘリウム（H.＋）原子の出すピツカリング系列スペクトル

第十三圖　さういふ種々な軌道の狀態に、電子が幾個づつ結合されて行くかといふ事を、色々の實驗事實を基礎として、各々の原子に就て調べた結果が此の表に揭げたものであります。

各々の原子の持つてゐる電子の數が、所謂原子番號でありまして、それは元素を週期律の表に並べた時、水素から始めて數へた番號であります。

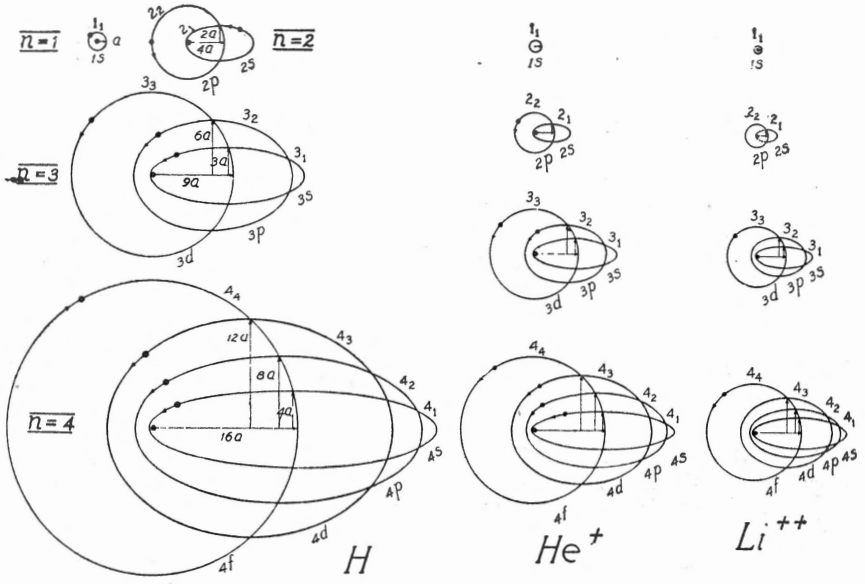
この表で見ますやうに、電子は、量子數で定められる種々の群をなして原子に結合されるものであります。そして一つの群が充滿されると次に入つて行つて、次々に群が完成せられます。これはチューリッヒのバウリ教授の基本原理に從つて行はれるのであります。

表に示すやうに内側から段々外側に群が發達して行きますが、場合によつてはさうでなく、外側の群が先に出來、後に内側のものが埋められて來るといふ事があります。これは各群の電子の結合エネルギーの大小

によつて決定せられるもので、かやうな異常の元素の群は新しい性質を帶びます。例へば鑛類、稀土金屬類等はこれであります。

第十四圖　これは所謂元素の週期律の表でありまして、メンデレーフの始めて提唱したものであります。但しこの表の形は特に吾々に便利なやうに配列したものです。これで知れるやうに、元素は其の性質を週期的に繰り返すものでありますが、處々に不規則なものがありまして、表に枠で圍つた元素は即ちこれであります。然しこれも不規則といふべきではなく、原子の構造が知れて居つたら、その性質は寧ろ豫知し得た筈であります。かやうに原子模型の考へに從つて、種々の物理的並に化學的性質が諒解出來る譯であります。

若しこれらの事を、矛盾なく、正確に記述しようとすると、それには量子力學が必要であります。只今申しましたのは、さういふ細かいところには立入らないで、只これら理論の發展についての簡單な印象を與へるだけに止めて置きます。



第十二圖　種々の原子に於ける電子の軌道

補足性

これから原子核の問題に關する最近の發展について述べようと思ひましたが、時間がなくなりましたから、これに立入らぬ事にします。只この問題で元素の變換といふ事は、今日の非常に重要な問題でありまして、日本でも東京で研究せられ、又大阪の菊池教授の所でも盛にやつて居られるといふ事を述べるに止めて置きます。

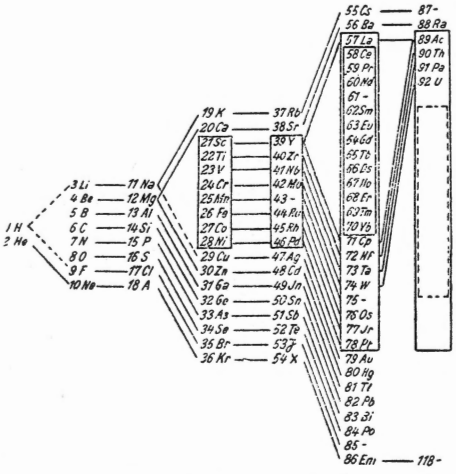
又宇宙線も非常に面白い問題であります。それは地球の外界からやつて來るものでありまして、この國では仁科博士等によつて研究せられて居ります。これも申し述べる暇がありませんから、唯一般的の話を少し許り致す事にします。

量子論の領域では、色々の實驗的事實を簡單に一義的に關係づけるといふ事が出來るものであります。例へば前に述べました、一見矛盾のやうなX線に關する實驗事實（第六圖、第七圖）も互ひに關聯せしめることが出來ます。これは最近の量子力學の發展によりまして、數學的の方法で、さういふ事實を論理的に矛盾なく諒解する事が出來るやうになつたからであります。それは色々の現象が種々の違つた狀況で觀測され

第十三圖　各原子内の電子分布

るに從つて、どういふ風に變つて表はれて來るかといふ事を調べる事によつて、論理的に矛盾なくそれが諒解出來るのであります。そして從來のやうに時間空間的に種々な事を記述する、さういふ手段を通して、量子力學の新しい事態が存在する事が解るのであります。

例へて見ますと、前に申しました、原子が或る一つの狀態から他の狀態へ移る時に、その電子が何處に居



第十四圖　元素の週期率

るかといふ事を實際に突止めようと致します。勿論さういふ事は今日の進んだ實驗裝置では出來ないとは考へられない事であります。然しその場合に測定器と測定される對象との間の相互作用を考慮に入れなければならない譯でありまして、その時問題になつてゐる作用の大さが、プランクの作用量子hと同じ位の大さになつて來ると、測定器と測定される對象との間の相互作用が非常に重要な問題になつて來まして、個々の粒子の動作を見ようとすると、全く新しい事態が表はれて來るものであります。即ちスペクトルとかエネルギー、運動量などが判きり表はれて來るのは、個々の粒子の時間空間的の記述を行はない時にのみ限られるものであります。斯ういふ事態をよく分析して見ますと、色々な事柄が論理的に、矛盾なく諒解出來る樣になるものであります。これはハイセンベルグの大切な研究によつて明にせられました。

普通は、測定器とこれにより測定される對象とは、互に獨立して存在すると考へるものでありまして、測定が測定されるものに對して影響するといふ事はないとするのであります。所が量子論ではさうは行きませんで、現象といふものが、謂はゞ觀測によつて創り出されます。從つて普通の因果律といふものは成立しなくなる譯であります。尤も斯ういふ風に僅かな言葉で簡單には云へないのでありますが、兎も角も今まで申しました事に依つて、普通の吾々の考へ方が使へなくなるといふ事が解つて參ります。

それで、かやうに量子論の事態を論理的の矛盾なく考へるためには補足性（Complementarity）といふ概念の導入を必要とします。（譯者註＝補足と申しますのは、場合に應じ古典的觀念の一面だけが排他的に現はれて來るもので、其兩面を同時に合せ得る極限が古典論となるといふ意味です。）即ち量子論に於ける事態は決して矛盾ではなく、違つた種類の實驗に應じて異つた種類の規則性が現はれるといふ事なのであります。かやうな教訓は人類の知識に新しい事ではなく、古の思想家も同樣な事態を體感して居りました。

例へば、吾々の「存在」といふ問題に於てこれが現はれて來ます。吾々は芝居の役者であると同時に見物人なのでありまして、古人は實際さうであるといふ事を見てゐた譯であります。この國でも生の異る局面が體驗せられました。例へば戰場にある武士と僧侶とは互に補足的な生の局面を示して居ります。

同樣な難題は內容と形式とを和合させる不斷の戰であります。勿論內容なくて形式はあり得ないものでありますが、同時に內容を細く分析すれば形式は失はれて了ふものであります。形式に盛れない內容といふものはないが同時に形式の適用を制限しなければ必ず此は行き詰つて來ます。この內容の增大による不調和は、更に廣い見地により調和せられるものであります。

此國で色々なインスピレーションのある經驗を得た事を有り難く思つて居ります。若し日本語が話せたならば、この偉大なそして美しい傳統をもつと體得し得たであらうと思ひます。

日本では、科學の研究が、非常な熱意と成功とを以て行はれて居ります。この科學研究を從來の綺麗な傳統と結びつけること、それが日本人に獨特な使命であると思ひます。最後に「日本學術振興會」及び「科學知識普及會」が、その目的たる知識の普及といふ事に成功せられる事を心から祈つて居ります。