

最近の物理学について

湯川 秀 樹

最近物理学は色々の方面で非常な進歩を遂げたが、殊に原子爆弾の完成後、新しい段階に入つたと考えられる。今日普通にいう「原子力」とは、核内エネルギーを自由に使う事を意味するのであるが、種々の核反応の際のエネルギーの中、現在利用出来るのはウラニウム、或はトリウムの核分裂位である。原子核反応を研究する事は、戦前或は戦争中、多数の物理学者の研究の中心題目であつたのだが、今日では同じく原子核反応を研究するといつても、重點に違いがある。即ち、原子核を壊すのに必要なエネルギーは、10萬ヴォルト乃至精々1000萬ヴォルトであるが、今日では——と申してもほとんどアメリカだけでの話であるが——1億乃至數億ヴォルトのエネルギーを供給することによつて新たに發生する別の種類の反応が中心問題となつてゐる。

このような大きなエネルギー領域で初めて起り得る現象の中、一番問題になるのは今まで實驗室内で出来なかつた中間子 (meson 或は mesotron) を人工的に新しく作り出す事である。中間子は宇宙線の研究では早くから問題になつて居り、最近の多くの實驗データによつても、宇宙線中の中間子の大部分のものは $\mu=200m$ (m は電子質量) の静止質量を有して居り、以前の實驗とも一致して居る。それで之の静止質量に相當するエネルギー $\mu C^2 \sim 10^8$ e.v. を供給すれば中間子が出る筈である。かような装置としては Lawrence のサイクロトロンがあり、(その磁石は、戦時中は原子爆弾製造に使われて居た)。この外に電子を加速する装置として、ベータトロンがある。

ベータトロンは戦争末期には、既に 10^8 e.v. のエネルギーを發生し得る大きな物が出来て居たのだが、戦後も之の装置で中間子を作り出すことが試みられたが、確かに出来たという證據はまだ得られていない。一方 Lawrence の大サイクロトロンで、實際中間子が出来た事が最近報ぜられている。

何故ベータトロンでは駄目であつたかの理由は追々分る事であるが、中間子の問題を根本にさかのぼつて考察して見ると、元來原子核内の陽子中性子を結合させる核力に附隨する粒子が、取りも直さず宇宙線中の $200m$ なる質量を有する中間子であると考えられていたのである。實際核力を媒介する中間子が約 $200m$ なる質量を有する事は理論的に導けるのであり、10年來、この考えを元にして實驗との比較がなされて來たのであるが、原子核の構造に關しても、又宇宙線の本質に關しても、この理論の歸結と實驗との間に幾つか矛盾を取り除くことができなかったのである。

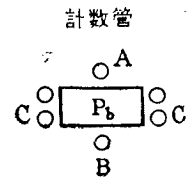
その一つとして、中間子の自然崩壊の問題がある。中間子が短時間に自然崩壊する事は理論的に豫想され、宇宙線の實驗からも平均壽命が $\tau_0 = 2 \times 10^{-6}$ 秒である事が分つていた。しかし

理論的に出した値は $\tau_0 = 2 \times 10^{-8}$ 秒位で、この2桁の相違が大きな疑問とされていた。

又従來の考えでは、宇宙線の一次線である高速度の陽子が、大氣の上層で原子核と衝突して1個又は數個の中間子を出す。これが宇宙線中の硬成分で、この中間子の一部が崩壊して陰電子、陽電子等になり、之が軟成分を作ると推定されていた。するとこのようにして出來た中間子が、同時に核力を媒介するものである筈だから、原子核内の核子との間に強い相互作用があり、自然崩壊しない中間子は核子により容易に吸収されたり、散亂されたりすることになる。その確率を理論的に算出した結果が、又、實驗値よりも遙に大きくなる。

これ等の困難を救う爲に、1942年名古屋大學の坂田、谷川、井上の諸氏により、「200mなる中間子は直接核力を媒介するのではなくて、核力に寄與する別種の中間子があり、それが崩壊して200mなる中間子になる」という新しい考え方が提唱された。かように考えると、平均壽命が $\tau_0 = 2 \times 10^{-6}$ sec である事や、ハ宇宙線硬成分が大きな貫通力を有する事も説明出來るのであるが、その當時は2種の中間子の存在は實驗上知られていなかったから、餘り問題とはならなかつた。

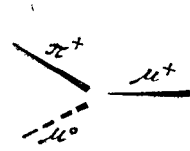
所が昨年 Conversi 等のローマ大學の人々により、次のような注目すべき實驗事實が見出された。即ち従來から、中間子が崩壊して、電子になる過程を直接調べる實驗として、左圖の如く、鐵、鉛等の吸収體の固りに計數管を置き、上の計數管Aを中間子が通つて吸収體の中で止められてから100萬分の1秒程度遅れて、固りの計數管Cに粒子が通る場合を觀測することが試みられてきた。所で従來は正負の中間子を別々に分離せずに、一諸に測定していたのである。従來の理論で考えると、正電荷を有する方は、物質中に入るとやがて止められ、うろうろする間に陽電子に轉化し、之が固りの計數管で觀測される。一方負電荷を有する方は、核のクーロン場によつて引きつけられ、中間子に對するK軌道に落ち、殆ど瞬間的に捕獲されてしまうから、後で電子を出すことはない筈である。



所で Conversi 等は上述の實驗を精密化し、磁場を使つて正負の中間子を分離して、別々に測定したのであるが、正電荷の方に對しては豫想通りになるが、負電荷の方に對しても、鉛や鐵では、電子は出ないが吸収體を炭素にすると、豫想に反して電子を出す事が判明した。かような現象は、中間子と核子との間に、強い相互作用を假定する従來の理論では全く説明出來ない。

この實驗に少し遅れて、イギリスの Bristol 大學の Lattes, Muirhead, Occhialini, Powell 等の人々が寫眞乾板を使つて、中間子の飛跡を直接に觀測するという新しい實驗に成功した。今までの實驗では、中間子、電子等ではそれが作るイオンの密度が小さいので飛跡が現われず、この方法は陽子等の重い粒子の檢證にしか使えなかつた。しかるに彼等は、性能の良い乾板を製作して、中間子でもそれが低速度になつたなら飛跡を撮影し得るようにしたのである。この乾板を使つて彼等は次の2つの重要な現象を發見したのである。即ち第一は、中間子が遅くなると、次第に飛跡が濃くなり、(勿論顯微鏡で擴大して始めて飛跡が見えるのであるが)、それ

が止ると、そこから又別の中間子が出る場合があることである。(それ等が中間子であることは飛跡から確認出来る)。その場合、後から出来た方の中間子の飛跡の長さは略一定しているから、一定のエネルギーを持つたものが出来たものと推定される。これは或る一定の質量を



持つた中間子が崩壊して、これよりやや質量の小さい別の中間子になるとしか解釋出来ない。彼等は最初にあつた中間子を π 中間子、後で出来た方を μ 中間子と名附けた。勿論この際運動量保存則も成立するためには、 μ 中間子と反対方向に中性の粒子が放出されている筈であるが、それは光子や中性微子ではなくて、相當の大きさの質量を持つている粒子と推定されたのである。それでこれを μ 中間子に近い質量を持つた中性中間子 (neutretto) と考えるが自然で、帶電した μ 中間子の質量を $\mu^+ = 200m$ 、中性の μ 中間子の質量を $\mu^0 \sim 150m$ 程度と假定すると、 π 中間子の質量は $\pi^+ = 350m \sim 400m$ 程度となる。

第2の発見として、中間子が止ると最後の所で多くの粒子が出る場合があることが判明した。それ等の粒子の多くは、陽子やアルファ粒子である。これは star と云はれて、前から知っていたが、中間子が止つて最後の所で star が出来る場合があることが彼等の實驗で明かになった。これは、中間子が止つて、その質量エネルギーが全部重い粒子の運動エネルギーとなり、原子核が爆發したものとして解釋される。そこで前の實驗と比較して、理論的に考察すると、star を起させるのは、 π 中間子と同じ質量を有し、且負電荷を有する中間子で、これが核子との強い相互作用のために原子核に捕獲され、爆發を起させるものと思われる。又爆發の際に π 中間子が出来て、それが更に μ 中間子に轉化する場合も寫眞に撮れて居る。出来た μ 中間子が如何なるかはよく分らぬが、ローマ及び Bristol の兩方の實驗を綜合すると次のようなことが推定される。

即ち中間子には π , μ の2種があり、 π 中間子が核力に寄與し、 μ 中間子は核との間に弱い相互作用しか有せず、又 π , μ 兩者の相互作用で μ 崩壊が起る。又 μ 中間子が $200m$ なる質量を有し、硬成分の大部分を形成し、之の自然崩壊の壽命が 2×10^{-6} sec である。 π 中間子から μ 中間子への轉化過程は非常に早く起り、 π 中間子の壽命は 10^{-8} sec 位と推定される。更にさかのぼると、最初宇宙線の一次線たる Proton が大氣上層で、核力に於けると同じ相互作用で π 中間子を作り、正電荷を有する方は μ 崩壊を起して μ 中間子になり、負電荷の方は star を作り、その際陽子中性子其他を作る。 μ 中間子は自然崩壊で電子等になり、かくて軟成分が出来る。このように考えると、大體矛盾はなくなり、前に述べた名古屋の人々の考えが略々正しかつた事が分る。しかし、これ等の機構は更に細かく考えると、甚だ複雑なものとなるのであるが、それを理解するには今少し立入つた理論的知識が必要になつて来る。

私どもは今まで多くの粒子、即ち陽子、中性子、陰電子、陽電子、中間子、中性微子等の存在を認めて來たが、これ等はすべて素粒子と呼ばれ、それ等に固有の性質により、次の2種に分けられる。即ち、素粒子に固有の性質としては、第一に「スピン」がある。スピントは最初原子スペクトルの微細構造を説明する爲に導入された概念で、電子が磁氣能率を持ち、且つ自

轉して居ると云ふ言葉で直觀的に表現される量である。正確にいえば、電子は一つの軸の方向又はその正反對の方向に $\frac{1}{2} \frac{h}{2\pi}$ なる固有の角運動量を持つて居るのであるが、この事を簡単に電子のスピンは $\frac{1}{2}$ であると云ふのである。スピン $\frac{1}{2}$ の粒子としては、陰、陽電子、陽子、中性子、中性微子等がある。この中で中性微子は β -崩壊の際、電子と同時に出る中性の貫徹力の大きい粒子で、今までの所では直接観測にかかつていない。第2は素粒子の統計的性質である。之は例えばガスを考えるに通常は多くの分子の集りとして理想氣體を考えたりするが、今特に「電子ガス」を考えて見る。自然界に實現されて居るものとして金屬中の自由電子を氣體と考へる事が出来るが、之は通常ガスとは非常に異り、色々な現象をうまく説明する爲には、Fermi-Dirac の統計に従うとせねばならぬ。

電子が多數なくても、ただ2つだけあつても既に統計が問題となるのである。今、古典的な原子内の電子の軌道を考えると、電子のスピンに2つの向きがあるが、1つの軌道に幾つもの電子があり得ない。1つの軌道にスピンの互いに反對の電子が1つずつ入るとその軌道はふさがつて、それには入れないと云う Pauli の排他律が成立して居るのである。かかる原理に従う粒子の統計が Fermi-Dirac の統計に外ならぬ。

その外の粒子として、例えば、光子は Bose-Einstein の統計に従う。又從來考えられていた核力の媒介をする中間子も、この統計に従う粒子であつた。其後一般的な理論が進歩してスピンと統計の關連がよく分り、

スピンが $\frac{1}{2}, \frac{3}{2}, \frac{5}{2}, \dots$ 等の半整数の粒子は Fermi-Dirac 統計

スピンが $0, 1, 2, \dots$ 等の整数の粒子は Bose-Einstein 統計

に従う事が理論的に導き出せるようになった。所で今までは、中間子として只一種、即ちスピンが0又は1の粒子を考えて來たが(尤も此の外に電子と同様な[質量だけの異なる]中間子が、正負對になつて出る中間子對理論なるものも考えられていたが)、新たに本質的に違う2種の中間子が發見されたので、これ等に如何なるスピンや統計を假定すべきかが重要な問題になつてきた。この問題の解決は實驗だけでは不充分で、理論との詳細な比較が必要であるが、現在考えられる妥當なものとしては、

π meson のスピンは 0 か 1

μ meson のスピンは 0 か $\frac{1}{2}$

が考へられる。(μ の方は $\frac{1}{2}$ の方が都合がよいように見える)。中性のものは質量が異なるから、スピンも異るとしてよいが、そうすると非常に複雑になり、決定的な事は云えなくなる。

扱て、話を元に戻すと、以上の議論で中間子を作るには1億ボルトのエネルギーでは足らなかつた理由が判明した。即ち μ 中間子の方は直接に出来ないから、先づ 350~400m なる質量の π 中間子を作らねばならぬからである。最近 Lawrence の研究室の 184 インチの大サイクロトロンで、3億8千萬ボルトのアルファ粒子を使つて中間子を作り出すことに成功したが、これは恐らく π -中間子であらうと思う。ブリストル・グループの一人である Lattes が California に行き協力して、寫眞乾板で調べて、star を作る事を發明し、又中間子の質量として 313m なる

る値を出して居る。

中間子の種類は、2種だけではなく、もつと色々ありそうである。外の實驗からは1000m位の質量のものもある事が報ぜられて居り、又100m以下の軽い中間子もある可能性がある。之等は今後の實驗の進歩に伴つて追々明かになる事であるが、現在物理学の中心問題として、もう一つあげねばならぬものがある。それは今日の理論物理学の根本缺陷と密接に關連した、自己エネルギーの問題である。

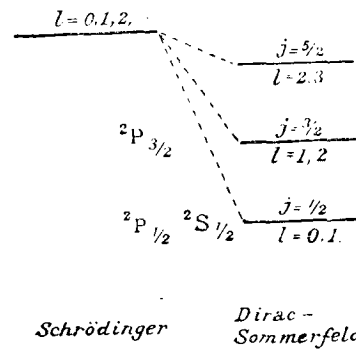
量子力学は1927~8年頃完成し、殆ど全ての實驗と見事に一致する結果を與えたが、其後、宇宙線の如き高エネルギー領域での實驗とは必ずしも一致する結果を與えない事が判明した。即ち量子力学を高エネルギー領域に擴張しようとする時、粒子の速度が光速(c)に近づく爲に當然特殊相対性理論を考慮しなければならなくなる。そこで量子力学と相対性を融合すべく色々の試みがなされた。一面から見ると相対性は量子力学とよく適合した所があり、その方向の性格をうまく利用する事により、前述のスピンと統計の間の關係を導く事が出来たのであつた。これ等は、しかし、電子光子等の一つの種類の素粒子だけに目をつけた場合であつたが、その反面において、自然界では各種の素粒子間に相互作用が有り、互に他に轉化し得るのである。それでかかる方面に理論を擴張しようすると、忽ち種々の矛盾を引起す。その中でも昔からよく知られて居るのが、上に述べた自己エネルギーの問題である。

古典的に考へて、電子に有限な大きさを假定し、電子電荷が作る靜電場に電子自身が持つエネルギーを計算し、之が mc^2 なる固有エネルギーに等しいと考えると、電子半径は $r_0 \cong \frac{e^2}{mc^2} = 2.8 \times 10^{-13} \text{ cm}$ の程度となる。

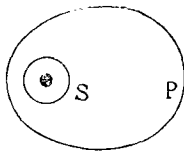
之は Lorentz が、彼の古典的な電子論から出した結果である。もしも電子が觀測者に對してある速度で走つて居ると、速度の方向に所謂 Lorentz 短縮を起し、その方向に扁平な楕圓體となる筈である。所でこの考えを量子力學的に解釋し直そうとするととうまく行かない。量子力学では點電荷を考へて、その存在の確率を問題とするのである。であるから、量子力學的に考へても——古典論に於て $r_0 \rightarrow 0$ とした極限の場合に對應して——電子に附隨する電磁場の自己エネルギーがやはり無限大になる。但し、量子力学では古典論になかつた新しい自己エネルギーが附け加わり、問題は層々複雑となるが、これ等の専門的な問題にはここでは立入らないことにしよう。唯ここでもいいたいことは、自己エネルギーの問題は從來に於ては、要するに實驗と直接の關連を持たない抽象的な、アカデミツクな問題に過ぎなかつたといふ點である。所が昨年になつて、この問題が直接實驗と結びつくことになつたのである。

即ち、量子力學的に原子スペクトルを取扱う際、相対論を考慮した Dirac 方程式を電子に適用すると、例えば、水素原子に對するエネルギー準位が正確に決定できる。それは以前に、Sommerfeld が、古典量子論の立場で相対論を考慮して出した微細構造式 (fine structure formula) と一致し、従つて、實驗と極めてよく一致する結果を與える。即ち、非相対論的な Schrödinger 近似では、状態を指定する3つの量子数 (n, l, m) の中、エネルギーは主量子数にだけで決る。そして n が3以上の準位から n=2 の準位に落ちる場合に出るスペクトル線

が Balmer 系列であることは、よく知られて居る通りである。然るにスピンを考へた Dirac の理論では、更に j なる内部量子数が必要で、同じ n に属しても、 j の値によつて準位が分れる事は左圖の通りである。所がこの Dirac-Sommerfeld の理論によつても、尚 $2P_{1/2}$, $2S_{1/2}$ なる準位は一致して居る筈であるが、以前から水素の原子スペクトルの分析から $n=2$ の場合に、之が2本に分れているらしいと云われて居た。しかしこの間隔は非常に小さくて、通常のスペクトル分



析の限界近くに有り、確定的な事は分らなかつたのである。昨年に到り Lamb と Retherford が、戦時中發達した糧米波 (microwave) を使つて、確かにこの2つの準位が分れて居る事を發見した。即ち、 $2S_{1/2}$ 準位の方が周波数にして、1000 mega-cycle (波長にして 30cm) だけ $2P_{1/2}$ の上にあることを確認した。



之に對して早速 Bethe はこの違が自己エネルギーによるものであるとの理論を立てた。直觀的に考へて、S 準位の電子の方が強く束縛されて居り、波動函數の擴りが P 準位のそれより小さく、従つて自己エネルギーが大きくなり、 $2S_{1/2}$ 準位の方が上に出る。其後 Princeton

研究所の人々及び文理大の朝永教授等により、自己エネルギーの問題を解明するため、多くの計算がなされて居るが、今までと違ひ直接實驗と比較し得ると云ふ點で大いに注目し得る。

しかし、根本問題にさかのぼると、Bethe 等の計算に於ては自己エネルギーを、束縛電子と自由電子の名について算出して後その差を取るのであるが、實際はその兩方が無限大で、その差が有限になるのであるから、嚴密に言えば、數學的に無意味な計算をして居ることになる。従つて自己エネルギーに關する根本的な困難は決して解消して居ないのである。

そこで私どもは中間子の模型に對する研究と平行して、この困難を處理して行かねばならぬ。極く簡単に云つて、電子その他の素粒子として大きさを持たぬものを取り扱つたから、その自己エネルギーが無限大と云ふ事になつたのだから、何等かの形で粒子に有限の大きさを與える必要がある。

Heisenberg は以前から、光速度 C から相對律が、Planck 常數 h から量子論が誕生した如く、將來の理論では普遍的な長さの最小單位 λ が、根本的な役割を演ずるであろうと云つて居る。というのは、C.G.S 單位で (L.T.M.) 即ち、長さ、時間、質量の3つの元を基礎とした如く、 C, h, λ の3つ常數が揃つて、初めて全ての量が「原子單位」で表出されることになる。 λ が直接 γ_0 と同一であるかどうかかわからないが、兎に角 $\lambda \sim 10^{-13} \text{cm}$ であると推定される。

所で之の λ を如何に理論に導入するかにつき多くの人々により研究された。例えば Snyder は普通の時間、空間以外に、更に一つの軸を加えた5次元の空間を考え、この中の4次元の量

子化された空間として世界を把握し、この際時間は連続的なものであるが、空間座標は量子化された離散的な値しか持たないものであると推論して居る。

この問題に關して、現在私の考えていることを簡単に述べて、この講演を終りたいと思う。今から約10年前、Born が、相反性の原理(Principle of Reciprocity)なるものを唱えた。その考えは量子力学では、空間・時間 (x, y, z, t) と、運動量・エネルギー (P_x, P_y, P_z, E) との間には非常に對稱的な關係がある。即ち普通の空間で、 P_x, P_y, P_z, E を指定した時の Schrödinger の波動函数は平面波になるが、 x, y, z, t なる點にある粒子の状態を、 P_x, P_y, P_z, E 空間での波數函数として表現すれば、矢張り平面波になる。所でエネルギー・運動量法則が自由粒子の集りに對していつでも成立するから、素粒子自身に取つては x, y, z, t よりも、 P_x, P_y, P_z, E の方がより直接な意味を持つことが考えられる。これに對してわれわれ人間は普通の時間・空間を背景とする考え方に慣れている。われわれが直觀的と呼ぶのもその意味であるが、しかしこのような直觀的な時間・空間だけに制限するのは、少し狭過ぎはしないか、それで兩者を一諸にした8次元——と云つても實際は x, P_x, E, t 等は正準共軛な量だから量子化された空間になるが、——の空間を扱つた方が、相反性がより明瞭な形で現われると共に、普遍的な長さ λ の導入も、より自然に行われるのである。これ等の問題に關しては私も現在色々研究中であるが、その詳細のお話は別の機會に譲ることにして、この邊で本日の講演を終りたいと思う。(昭和23年5月29日講演)