/tex/edu/tai/t02.tex

2002年度体験学習 核力の不思議

青木保夫

目次

1 原子核の発見とラザフォードの実験

2 原子核は重いか？

3 弾性散乱により原子核の大きさを調べる

4 原子核は硬いか軟らかいか？

5 原子核を歪ませ、回転させる

6 偏極現象

7 重陽子の形

8 ベータ崩壊と偏極現象

9 ３体力

[1] 原子核の発見とラザフォードの実験

ラジウムがα 粒子を放出する事は キューリー により確認された。このα 粒子が透過するような薄い金属箔 (例えば０．４ミクロンの厚さの金箔) に依る平均散乱角は約０．８５度程度であった。ところが、約２０，０００個に１個のα 粒子は９０度以上の角度に散乱された。このような現象は、多数回の散乱では絶対に説明がつかないので、一回の衝突であり、原子の中心に非常に重く、電荷を有する芯があると考えられ、これを原子の核と呼んだ。

この散乱強度を定量的に議論し、原子核の持つ電荷はメンデレーエフが考えた原子番号に比例する事が分かった。==> 原子模型と原子核の存在

一回の衝突で０．８５度曲げられるとすると, ９０度曲げられるのに何回衝突する必要があるのだろう？ もしも $90/0.85 \sim 106$ とすると上の散乱頻度は説明できない。何故なら、右に曲げられる場合と左に曲げられる場合があると考えると、連続的に１００回右だけに曲げられる確率は $(1/2)^{100} = 10^{-30}$ だから、とても２０，０００回に１回と言うような頻度にはならない。まして、上下に曲げられる可能性も考慮すると ···。

Rutherford がこのアイデアを論文に発表したのは１９１１年であり、長岡半太郎が土星型の原子模型を発表したのは１９０４年である。Rutherford は彼の論文の中で長岡模型を引用している。長岡の説は世界の潮流とならなかったのは、実験的な裏付けが無いせいだと想像する。

原子の励起状態からの発光される光の波長と原子番号の関係を見付けた、モーズレーの仕事も原子番号と原子核の電荷を関係付けるのに重要な寄与をしている。

大きな原子番号の元素で作られた箔での実験結果は、ラザフォードの原子模型で説明出来るが、小さな原子番号の元素を用いた箔からのα 粒子の後方散乱の確率はこの模型を基にした計算値よりも小さい事がその後確認された。

我々は原子核の存在を、α 粒子が核力の影響をうけた結果として、その運動方向が変化する事で認知する。原子番号が小さいと、α 粒子が受ける電気的な斥力は小さいので原子核の近くまで (場合に依っては原子核の内部まで) 行ける。

もしも核力がこの実験の場合の電気的な力と同じく斥力ならば、核力の影響は後方散乱の確率を増やすはずであるが、実際は散乱確率が減ったという事は、核力は引力的に働いているという事である。$==>$ 核力の存在

少し力の及ぶ範囲に付いて考えてみよう。高校では万有引力と、電気や磁気に関するクーロンの法則を学んだだろう。これらの力はどれも皆、距離の 2 乗に反比例していた。核力も距離の 2 乗に反比例するならば、原子核にα 粒子が近ずいた後方散乱だけに核力の影響が現れるという事は考えにくい。核力の影響は近くにだけ及ぶというこれまでの力とはおよそ異なった性質を有する。$==>$ 核力の到達距離は短い

α 粒子がヘリウムの原子核である事は、α 粒子を沢山集め、この集団の放電時の発光スペクトルから確認された。

原子番号が Z の原子核が Ze の電荷を有すると、α 崩壊に関連して理解が困難な事があった。例えば質量数が２１０の ポロニウム $^{210}\mathrm{Po}$ は電子の -84 倍の大きさの電荷を有し、５．４ MeV のエネルギーのα 粒子を放出する。($1\ \mathrm{MeV}$ と言うのは、約 $1.6\times10^{-12}J$ のエネルギーの事であり、１００万ボルトの電位差で電子を加速した時に電子が貰う運動エネルギーである。) 原子核の大きさから推定すると、Po 原子核の中に存在するα 粒子は、外に出られないという計算が成り立つ。ポロニウム原子核は鉛原子核とα 粒子から出来ているとする。鉛原子核の半径は大きくとも $8\ \mathrm{fm}\ (8\times10^{-15}m)$ と推定される。大きさが 0 のα 粒子を無限遠方から、鉛原子核の表面にまで持って来るのに必要な電気的エネルギーは $\dfrac{82\times2\,e^2}{4\pi\epsilon_0\times8\times10^{-15}}=29.5\ \mathrm{MeV}$ と計算される。$==>$ 核力は電気的な力よりも強い

大雑把に推定すると、α 粒子は深さ１５０ $\sim$ ２００ MeV のポテンシャルの井戸の中で振動していて、1.5×10^{-23} 秒に 1 回壁に衝突し、約１３８日かけて、8×10^{29} 回衝突すると、壁から外に抜け出て来る。

古い民話に壁抜けの技を使う仙人の話があるが、α 粒子は失敗しても失敗してもめげずに壁抜けに挑戦している。$==>$ α 崩壊の不思議

ニュートンの力学では、1 度壁にぶつかりこれを越えられなければ、何度挑戦しても抜けられないと考えるのに対し、現在の物理では確率的に現象を捉えている。この時、α 粒子を ” 粒子 ” と考えるか、波と考えるかという事も議論となった。

[2] 原子核は重いか？

先のα 粒子の金箔による散乱から、金原子核はα 粒子よりも充分に重い事は推

定できる。
アストンは質量分析器を作り、原子質量を測定した。そして、原子質量はかなりの精度で陽子質量の整数倍である事を見出した。
先に述べたα 崩壊のエネルギーに関連して、原子核現象には巨大なエネルギーの出入りが伴うだろうと想像される様になった。
１９３２年にチャドウイックにより中性子が発見され、陽子と中性子がくっついて原子核を作っているとのアイデアが提案された。原子核の束縛エネルギーは非常に大きく、アインシュタインの有名な $E = m\,c^2$ という式と矛盾しない事が了解された。$==>$ 非常に大きな核力
原子核の質量と束縛エネルギーの関係は、原子爆弾、原子炉、水素爆弾、制御核融合等の概念を生み出し、人類の論争の種の一つになっている。

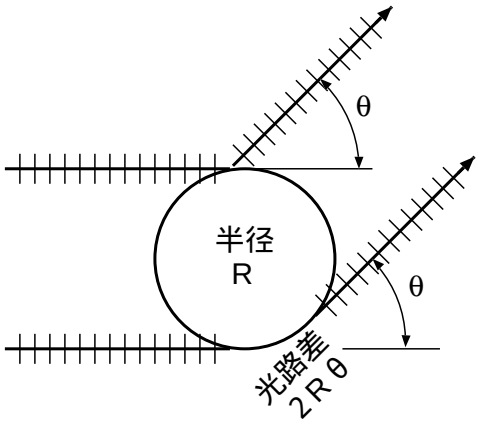
１９２２年に非放射性元素に於ける同位元素の発見と整数法則の発見によりノーベル賞を受けた アストンは、受賞講演で以下の様な言葉を残している。“もし将来の研究者たちが原子力のエネルギーを自由に利用できるような方法を見出したとしたならば、人類は科学小説の夢以上の力を保有することとなろう。しかしながら、このエネルギーを一度取り出したら、それを完全に制御することは不可能で、その激しい反応が近くのすべての物質に波及して大爆発が起こるかも知れないという可能性も、常に心にとめておく必要があろう。もしそうとしたら、地球上の水素の全部が一度に反応にまきこまれて、実験が成功したということの発表は、新しい星が誕生したという形で全宇宙に対してなされることになろう”。まるで水爆の可能性にまで言及している様である !? １９９９年から運転を始めた相対論的重イオン加速器 (RHIC) の運転開始時に同様の危惧を持ったアメリカ人が居て、この加速器の運転停止を求める裁判を実際に起こしている。現代人の感覚としては、この主張は時代錯誤であろうが、アメリカの物理学者はこの主張に真面目に反論している。

化学反応を記述する時には、質量保存の法則というのが確立していた。原子核現象を観測する様になって、質量はエネルギーの 1 形態であり、エネルギー保存の法則の方が優先さるべきであると了解された。
しかし、量子力学の建設に指導的な役割を果たした N. Bohr は、β 崩壊ではエネルギーの保存則は成立しないかも知れないと本気で考えた。一方、エネルギー保存則 (や角運動量保存則) を大切にする人達も居て、β 崩壊に最しては後に中性微子と呼ばれるようになる軽い粒子を苦し紛れにデッチあげた。その後、このデッチあげ粒子に質量があるか無いかが大きな論争となる。

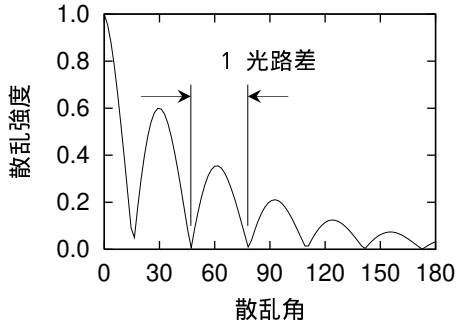
[3] 弾性散乱により原子核の大きさを調べる
α 粒子と原子核の散乱を考える。非常に単純化して、α 粒子は波の様に散乱されると仮定する。この時の、波の波長はドブロイの物質波の波長だとする。即ち、運動量が p である ” 粒子 ” の波長 λ は次式で与えられる。

$$\lambda = \frac{h}{p}$$

ここで、h はプランクの定数である。



図は、左からの入射波が進行方向から角度 θ の方向に散乱された様子を描いている。原子核の上を通った波と下を通った波とでは、光路差が $2\,R\theta$ だけあると考える。光路差が波長の整数倍になる散乱角 θ では、散乱波は強めあう。従って、下図の散乱強度の谷と谷の間隔に対応する角度から、原子核の大きさを云々する事が出来る。$==>$ 波としての散乱粒子の干渉



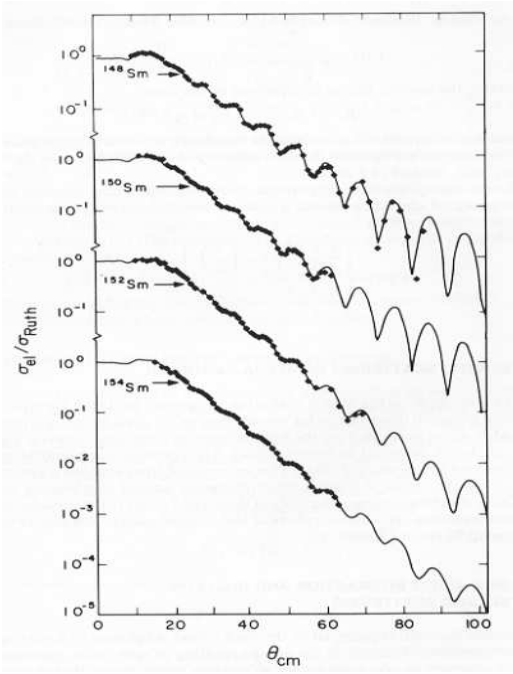
原子核の電荷分布という意味での大きさを精密に決定するのに、電子散乱やμ 中間子原子といった手法も使用される。

しかし、電気的な力だけが関係する時の原子核の大きさと、核力も作用すると考えられる時の原子核の大きさとは原理的には一致する必要は無い。

[4] 原子核は硬いか軟らかいか？

α 粒子が原子核と衝突して、跳ね返される確率を測定する。もしも原子核の表面が非常にくっきりとしていると、先に示した図の様に波の干渉がはっきりと見えるだろうから、山と谷がはっきりと観測されるはずである。

下の図は、５０ MeV の運動エネルギーを有するα 粒子が、質量数の異なるサマリウム (Sm) 原子核から散乱される確率を散乱角の関数としてグラフに示したものである。



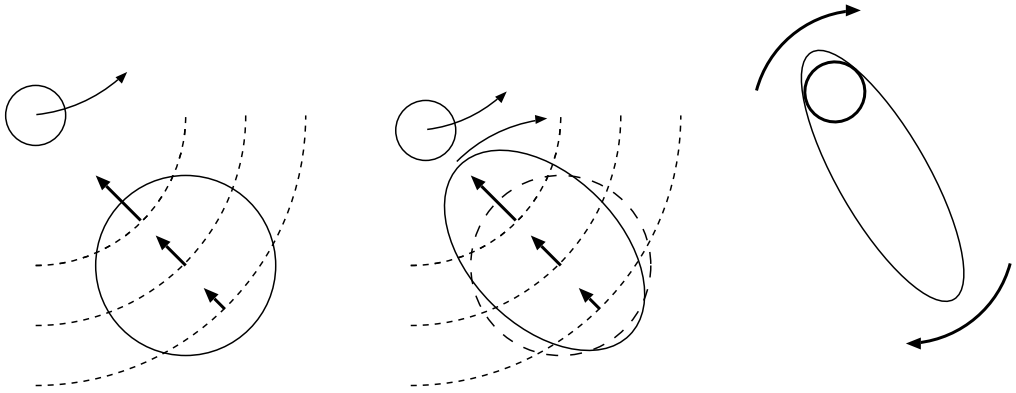
図で、横軸はα 粒子が散乱される角度であり、縦軸は散乱確率に比例する物理量を (Rutherford が予言した散乱確率で割って)、対数目盛で示している。因みに、Rutherford が予言した散乱確率は散乱角と共に単調に減少する。
散乱体は上から順番に、質量数が １４８、１５０、１５２、１５４のサマリウムである。

表面がはっきりしている (硬い) 原子核である ^{148}Sm と表面がぼやけている (軟らかい) ^{154}Sm では、グラフ上で、谷の切れ込み方が顕著に異なる事が分かる。

山と谷の位置関係はほとんど変わらないから、先の議論により、原子核の大きさはほとんど変わらない。Sm は陽子数が６２であるが、中性子の数が８６から９２個に増えている。中性子を幾らか加えるだけで (原子核の表面が) 軟らかくなったり硬くなったりする。==> 硬さの異なる原子核の存在

[5] 原子核を歪ませ、回転させる。

原子核 (の表面) が軟らかかったり硬かったりするならば、原子核同志が衝突すると、面白い現象が起こり得る。ここで、核力の到達距離は短いと仮定する。



図の左のように、小さい丸で示した粒子が左から、図の水平線に平行に入って来て、小さい円の中心に描いた曲線の様な軌道で散乱されるとしよう。(入射粒子が、標的核よりも小さくなければならないと言っている訳ではない。) 入射粒

子は、大きな円で描いた標的核に引力を作用する。引力の大きさは、小さな円の中心から遠い位置では小さくなっている。図では引力の相対的な大きさをベクトルで示した。標的核の内の、小さな円に近い所では大きく入射粒子の方に動き、遠い所ではそんなに大きくは動かないとすると、中央の図に描いた様に標的核は変形する。そして、入射粒子の運動に引かれて表面振動や回転を始めるだろう。極端な場合には、右図の様に入射粒子は標的核に取り込まれて、細長い原子核となって一緒に回転する。==> 複合核の形成

最も安定な状態 (基底状態) では原子核は球形だと仮定しよう。ところが、ここで説明した様な理由 (潮汐力や複合核形成過程) により、歪んだ原子核が存在する事が分かっている。現在のところ、超変形核と呼ばれるものでは、回転楕円体を仮定すると、長軸と短軸の長さの比が 3 対 1 程度のもの迄、発見されている。==> 超変形原子核 (励起状態) の存在

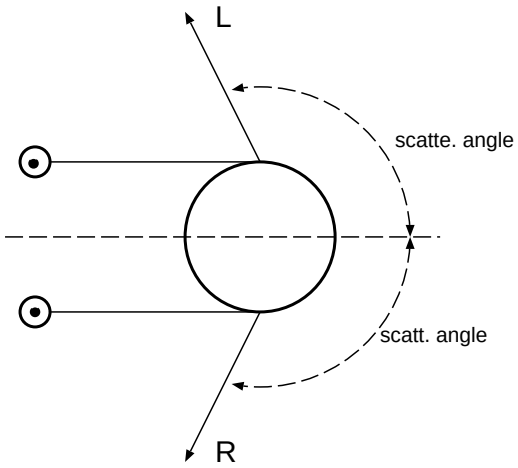
潮汐力による原子核の変形と言う現象が起こるためには、原子核が軟らかくなくてはならない。地球上でも月の潮汐力を受けると海水は有意に盛り上がるが、大地の変形はほとんど起こっていない。

原子核の形がどの様にして推定できるのだろう？回転している原子核は、γ 線を放出しながら、少しずつ回転速度を落して行く。γ 線が持ち出すエネルギーと角運動量は、原子核の持つ角運動量や原子核の質量分布 (慣性能率) に直接関係する。この質量分布の事を、原子核の形という言葉で表現している。

[6] 偏極現象

陽子や中性子はスピンと呼ばれる向きを持った存在であり、このスピンに伴い棒磁石の様な性質を持つ。従って、陽子や中性子を磁場中に置くとこの磁場に平行か反平行の向きを向く事が知られている。

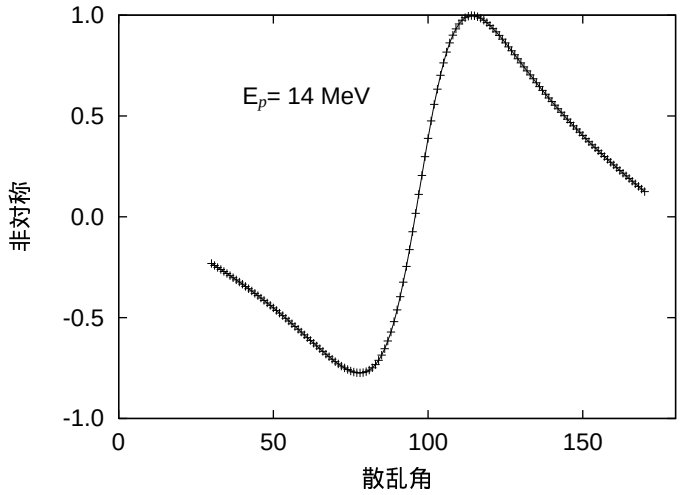
スピン (棒磁石) の向きを揃え (偏極し) た陽子を、α 粒子に衝突させ、散乱確率を測定する。



図の様に左から、偏極陽子が入って来て、α 粒子により散乱されたと考える。左右に同じ角度で散乱される粒子数を測定し、L と R だったとしよう。この時、散乱の非対称性を以下の様に定義しよう。

$$\text{非対称性} = \frac{L-R}{L+R}$$

左右に同数が散乱されるならば、非対称性は 0 であり、右へは全然来なく、左ばっかりに散乱されるならば、非対称は 1 となる。



実際に実験してみると、陽子エネルギーが １４ MeV 、散乱角が１１４度では、この非対称性は０.９９７ 以上になる事が観測されている !! 左に９９７個散乱される時に, 右側には１ ∼ ２個しか散乱されないという事である。==> 偏極現象に伴う左右非対称な散乱

α 粒子が磁場を持っていれば、あるいはこんな現象も説明がつくかも知れない。ところが、α 粒子が棒磁石である可能性は絶対にあり得ない事が理論的に導ける。(α 粒子のスピンが 0 であるから、磁気能率演算子の期待値は 0 である。)

核力は、磁石でもないのに、磁石の様な性質を持つ。核力はスピン依存力であると言われる。

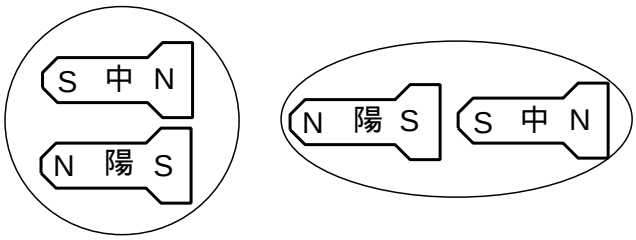
人間の身体はほぼ３０％の水溶液であると言われ、沢山の陽子を含む。この陽子 (人間ごと) を磁場中に入れる。外部から小さな高周波磁場をかけると、高周波磁場からエネルギーを吸収して、陽子 (棒磁石) の向きを変える事が出来る。この現象を利用すると、人体中の水素の存在分布を測定できる。

MRI と呼ばれ、医療現場で利用されている。

[7] 重陽子の形

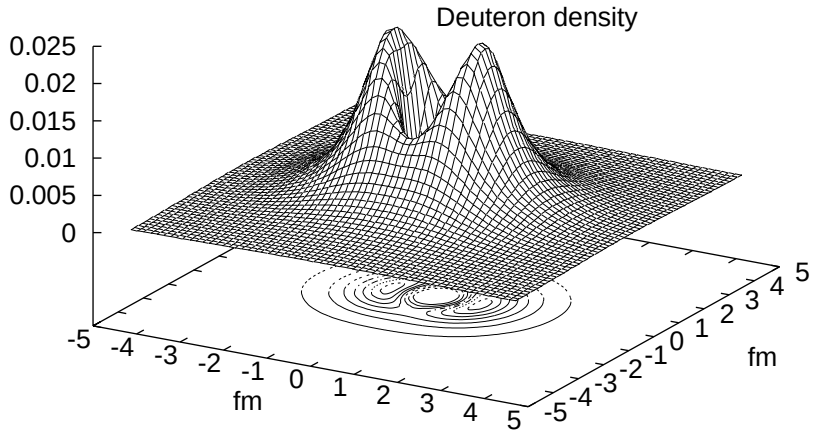
陽子と中性子とでは、(スピンの向きに対し) 棒磁石の向きが異なる事が分かっている。(陽子の磁気能率は、ある単位で測って ２.７９, 中性子は − １.９１程度である。) この陽子と中性子をくっつけると重陽子が出来る。重陽子では陽子

と中性子の向きは平行である。(陽子と中性子のスピンは 1 / 2 であり、重陽子のスピンは 1 である。) 従って、次の図の二つの可能性が考えられる。ほぼ四角な箱で陽子や中性子を表示し、(スピンの) 向きを示すために一方を少し細くした。中央に陽 (中) という文字を書いた方が陽子 (中性子) を表しているとする。



左側の図では、陽子と中性子の磁極の N と S が近くにあり、右の図では磁極の S 極 同志がくっつきあっている。磁気的な力を考えると、当然左の様な配置になっている方が安定だと考えられる。しかし、現実の重陽子では、右の様に棒磁石が並んでいると考えられている。==> 核力は磁気的な力よりも強い

右図の様な状態の重陽子を、図の中心軸を含む平面で切った時の、その面上での密度分布を下の図に示す。



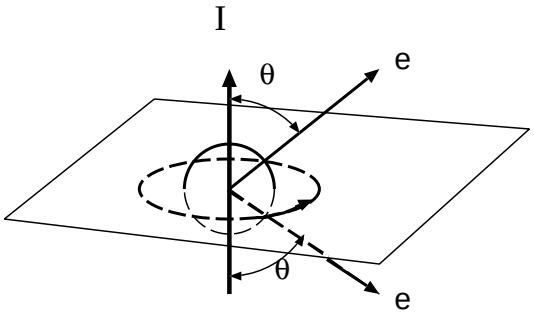
二つのピークの一方が陽子、他方が中性子の山に対応すると考えても良いが、後で述べるパリティーという事を考えると、どちらがどちらと言う事は出来ない。完全に対称である。平面図で見える中央の円の部分は、非常に密度が低くなっている。陽子と中性子は、近付き過ぎると非常に大きな反発力が働く事が知られている。

近付き過ぎると反発力、少し遠いと引力が働いて、全体としては束縛状態となっている。この図は重陽子内部の電荷分布を示していると考えて良い。==> 核力は引力的にも斥力的にも働く

[8] ベータ崩壊と偏極現象

最後の話題はパリティ非保存と呼ばれる。物理学者は、現実の世界で起こっている現象は、鏡に写った世界でも同じ確率で起こると信じていた。この仮定をパリティー保存の要請と呼ぶ。

この要請を確認する目的で、向きを揃えた (偏極した) コバルト６０原子核から放出される電子の放出方向を調べる実験がなされた。(β 崩壊)



図で、中央の上向き矢印で示したのがコバルト６０原子核の (スピンの) 向きだとする。この軸から右上方向に角度 θ で電子 e が放出されるとする。図に四角で示した平面を鏡だとして、鏡に写した現象を考える。コバルト６０原子核 (の棒磁石) の向きは、鏡に写しても変わらない！この理由は、棒磁石の磁場の向きは、図に楕円で示した仮想的な電流 (コイル) が作っていると考えると理解できるだろう。電流は鏡の面内にあるから、鏡に写しても電流の向きに変化は無く、従って磁場の向きも変化しないのである。

一方、電子の放出方向は、右下の方向に変化する。

パリティーが保存すると言う要請は、この両方向に放出される電子の割合は等しいと予言するが、実際には有意に異なっていた。実際の実験では下向きが多かった。

核力 (の内の弱い相互作用と呼ばれる部分) は、パリティーを保存しないという結論が得られた。==> パリティーの非保存

パリティーの概念は理解しにくいかも知れない。簡単な例として以下の積分を考えよう。

$$f(x) = x^3(\sin x^2 \times \cos(x^2 + \sqrt{2\pi} \times x^4 + \log(2 + x^4)))$$

こんな被積分関数の不定積分が書き下せるとは思わないだろうが、積分区間が $[-a, a]$ と原点に関して対称に与えられていると、被積分関数が x の奇関数だから

$$\int_{-a}^{a} f(x)\, dx = 0$$

と簡単に書き下せる。

物理法則にも関数の偶奇性の様なものが潜んでおり、物理学者は物理法則は偶関数的であると考えていた。しかしこの実験で、偶関数的な部分と奇関数的な部分が混じっている事が明らかになった。

物理学者が、偶関数的だと信じ込んでいた例として、このパリティー非保存を予言した物理学者の一人は、自分の予言とは逆の保存すると言う方に賭けたそうである。

この実験の実験装置は、Washington DC にある博物館で展示されている。もしも Washington DC へ行き、時間がとれるならば是非訪れてみよう。

この実験が成功した後では、色々な対称性を疑う事がなされた。例えば、時間の向きや電荷の符号を変えても同じ物理法則が成立するかどうか？という事が物理の大切な問題となった。

[9] 3 体力

先ず二体力の復習の意味で、万有引力を思い出そう。物体 A と B の間に働く万有引力 F は、A、B の質量を $m_A,\ m_B$、両者の距離を R とすると、

$$F = \frac{G\, m_A\, m_B}{R^2}$$

と与えられる。ここで、物体 B を 3 個の等しい質量の部分、$B_1,\ B_2,\ B_3$ に分割してみよう。この時、A−B 間の引力は、

$$F_{A-B_1} + F_{A-B_2} + F_{A-B_3} = \frac{G\, m_A}{R^2} \times (m_B/3) \times 3$$

となり、分割前と同じ結果となる。即ち、A には $B_1,\ B_2,\ B_3$ という 3 個の部分からの引力が働いていると考えても良いし、1 個の B という物体から引力が働いていると考えても良い。このように二つの物体に働く力を細かく分けた部分からの力の総和と考えても良い。この様に二つの部分間に働く力の総和として全体に働く力が計算可能な力を (重ね合わせが可能な) 二体力と呼ぶ。ここでは、万有引力を例示したが、クーロンの法則にも同じ議論が適用できる。

ここでは、物体 B は一つにくっついていると仮定したが、説明の中でくっついていると言う事は明示的には使用していない。実は B は互いに離れている複数個の物体でも良い。

別の議論が 3 重陽子の束縛エネルギーに関連して持ち上がった。3 重陽子は、一つの陽子に二つの中性子がくっついていると考える。ここで、3 重陽子から中性子を一つ取り出すと、重陽子が残る。この時中性子を取り出すのに 約６．３ MeV のエネルギーが必要である。更に残った重陽子から中性子を取り出すのに ２．２ MeV のエネルギーが必要である．都合，約８．５ MeV のエネルギーがないと 3 重陽子をバラバラに出来ない。この数値は、実験的に確かめられているから問題はないとする。他方、先に重陽子の密度分布のグラフを示したが、その計算に使用された様な核力 (2 体力である) を持って来て、このエネルギーを計算してみると、どう頑張っても約７．５ MeV という数値しかでて来なくて，約１ MeV だけ束縛エネルギーが不足する計算しか出来なかった。そこで、3 体力を導入する事が行われた。

現在では、３体力を導入して上に示した束縛エネルギーと矛盾しない３体力が得られている。

束縛エネルギーだけでは３体力の証拠不足だと考える人も居て、もっと詳しい研究は進行中である。

このようなわけで、核力には３体力が必要であると考える人達がいる。３体力に特に反対している人達の存在は知らないが、原子核研究者全員が３体力に納得しているという段階では無いと思う。