

素粒子クォークを原子核の中に見る

大阪大学大学院理学研究科教授 南園忠則

1. 基本原理はわかるものだ、覚えては いけない

原子核は重い

原子の中心にある原子核は非常に小さい。皆さんが知っている原子も小さくて直径が1億分の10cm (= 10 Å = 10 × 10⁻⁸cm) 以下だ。その原子のまた10万分の1が原子核の直径である。ところが、おもしろいことに、原子全体の重さの99.9%はこの原子核に集中している。だから密度は大変高い。どのくらい高いかという、スプーン1杯(だいたい1cm³)の原子核を集めることができるとしたら、この重さが、実は地球上に住む人間約5億人の重さ(約2億5千万t)にもなる。また、この極微小な領域に原子番号に相当する全電荷が押し込められている。想像を絶する強電磁場がはたらいっている。ではこの中心の構造と性質はどうなっているのだろう。これを私達は見るのであろうか。何が決め手になるか、例を見ながら、探ってみよう。

力は目には見えない

感覚では見えないけれども、確信しているものはたくさんある。極身近には、例えば遠心力がある。糸をしっかり持って、先につけたおもりを水平面内でぐるぐると回すと、おもりは見えない力、遠心力 $F = mv^2/r$ (m はおもりの質量、 v はおもりの速さ、 r は糸の支点を通る垂線へ回転しているおもりから下ろした垂直線の長さ; 力はおもりにこの垂直線の外側に向けてはたらく) でもって水平面近くまで引き上げられる。この遠心力は、実感できる。

話を大きさにしよう。万有引力の $1/r^2$ 法則を頭ごなしに覚えさせられた人が多いのではないだろうか? 既に、ガリレオやティコ・ブラーエ等が惑星について驚くべき緻密な観測結果をもっていた。

ケプラーがその結果を精査して惑星運動についての3法則を引き出した。その第3法則は、惑星の公転周期の2乗は楕円軌道の長半径の3乗に比例し、その比例定数は全ての惑星に対して共通の値をもつという。惑星の軌道は驚くほど円軌道に近いので、円運動と仮定できる。ニュートンは、この遠心力を第3法則を使って変形して、万有引力 $F = GmM/r^2$ (m は惑星の質量、 M は太陽の質量、 r は惑星と太陽間の距離、 G は万有引力定数) を演繹した。この結果を使うと、リングの運動も、宇宙ロケットも、海王星や冥王星の発見も当たり前であった。逆にまた、諸現象は万有引力と運動方程式を保証した。

原子のミクロの世界はどうか? 原子から出てくる光、あるいは強制的に出させた光の分光学から、原子の電子構造、原子同士の相互作用を知ることができた。加えて、結晶まで調べて、新しい量子力学を誕生させ1920年頃には量子の世界観が確立した。

表1 本文中に出てくる核子と素粒子

粒子	質量	スピン(\hbar)	パリティ	荷電(e)	磁気モーメント(単位)
核子					
陽子(p)	938.3 MeV	1/2	+	+1	+2.8 $e\hbar/2M_p$
中性子(n)	939.6 MeV	1/2	+	0	-1.9 $e\hbar/2M_p$
メソン					
$\rho^+(\pi^+)$	139.6 MeV	0	-	+1	0
$\rho^0(\pi^0)$	135.0 MeV	0	-	0	0
$\rho^-(\pi^-)$	139.6 MeV	0	-	-1	0
レプトン					
電子(e^+)	0.51 MeV	1/2		+1	+1.0 $e\hbar/2M_e$
電子(e^-)	0.51 MeV	1/2		-1	-1.0 $e\hbar/2M_e$
ミュー(μ^+)	105.7 MeV	1/2		+1	+1.0 $e\hbar/2M_\mu$
ミュー(μ^-)	105.7 MeV	1/2		-1	-1.0 $e\hbar/2M_\mu$
ニュートリノ(ν_μ)	< 10 keV	1/2		0	0
ニュートリノ(ν_e)	< 10 eV	1/2		0	0
クォーク					
up(u)	~ 5 MeV	1/2	+	+2/3	+2/3 $e\hbar/2M_q$
down(d)	~ 10 MeV	1/2	+	-1/3	-1/3 $e\hbar/2M_q$

() 内は粒子表記法、 e ; $+1.60 \times 10^{-19}$ C で定義する。 M_p , M_e , M_μ , $M_q = M_u = M_d$ の極限は、それぞれ陽子、電子、ミューオン、コンス ティテューメントクォークの質量である。

同じく、原子核の集中的研究が始まった1930年頃から70年がたち、たくさんの研究がなされ、今や核力、核構造がよくわかっただけでなく、核や、核子をつくり、関与する多くの素粒子も発見され、それぞれの相互作用もよくわかってきた。中でも、核子（陽子と中性子のことを併せてこう呼ぶ）間の相互作用がわかり、核子が集まって核も原子のように殻構造をもつということがよくわかってきた。核の中だけで使える新たな保存則も発見されてきた。詳しくは別機会に述べるが、核力、核子数保存則、核半径、空間反転性保存則、レプトン数保存則、荷電空間対称性保存則などである。

核半径と π メソン

次の例は核の大きさである。初め、「核半径 10^{-12} cmの中への閉じ込めの理由？」という疑問が、昭和10年（1935年）当時の一大研究テーマだった。この問いに湯川秀樹（当時大阪大理学部の講師をしていた）が答えたことは、ノーベル賞の対象になったので、有名なことである。核子同士を結び合わせて核内に閉じ込めているのは、中間子（ π メソン）が核子間にキャッチボールされているからだということである。この概念の導入がその後の素粒子物理学の出発点になったといっても過言ではない。

核の大きさを類推するには物質の波動性に基づく不確定性原理 $\Delta E \times \Delta t = (\pi$ メソンが飛び出したときの核子のエネルギー変化) \times (核子はその状態である時間) $\geq \hbar$ が決定的なはたらきをする。核半径 5×10^{-13} cmを光が伝わる時間が Δt であるから、この原理からメソンがあるとしたら $\Delta E \geq 140$ MeVが求まる。これが、電子の重さ(0.51MeV)の270倍ほどの π メソンだ。

ところで、当然のことだが、核内を飛んでいる π メソンは原子核の性質にも影響を及ぼすはずだ。それはどんなどころに見られるのだろうか？びっくりするだろうが70年たった今でも、原子核の中の π メソンはほとんどわかっていない。それは π メソン効果が小さく、10%ほどしかないためだ。それに、核子のみがポテンシャルの中を運動するという描像だけでも現実再現の信頼度がなく、効果10%の抽出が困難だったからだ。しかし、最近、今回紹介するようにメソン効果が $\sim 50\%$ もある現象を定量できるようになり、殻構造から分離が議論できる

ようになったので、核を素粒子研究の探索子にする分野が開けた。

核子は内部構造をもつ；クォークからできている

次に、少しだけ準備をしよう。円電流を流したら電流とコイルの半径とで定義できる磁石になる。これを磁気モーメントという。このときは多数の電子が輪状に流れていたのだ。一方、電荷をもち、スピンをもつ素粒子は、磁気モーメント(永久磁石)をもつ。スピン角運動量 $\hbar/2$ をもつ電子の電磁場での力学を記述するシュレーディンガー方程式は、電子(ディラック粒子:内部構造をもたない)にディラック磁気モーメント $+1.0e\hbar/2M_0$ をもつことを要求する。

核子が内部構造をもっていることは1933年頃には既にわかっていた。おもしろい話がある。あの有名なパウリが陽子(ディラック粒子だと思っていた)の磁気モーメントの測定は「今さら意味のない研究だ」として小馬鹿にしたにもかかわらず、ステルン達の見込み通り、陽子モーメントは陽子を素(質量 M_p)としたときの核磁子($e\hbar/2M_p$)の $+2.5$ 倍もあった(精密測定では $+2.8e\hbar/2M_p$)。同じく、1940年にはアルバレ達が中性子の磁気モーメントが -1.9 倍であることを発見した。中性子に構造がなければ、0のはずであった。湯川の中間子論(1935年)が出るころには、核子内に既に素粒子(クォーク?)を要求していたのである。

その後の研究の結果、核子は素粒子アップ(u)、とダウン(d)クォークからできており、陽子は(uud)の組み合わせで、中性子は(udd)の組み合わせであることがわかってきた。それぞれの性質は、表1に挙げてある。特異にも、u、dは $+2e/3$ 、または $-e/3$ と半端な荷電をもつ。それに、自由クォークの質量は高エネルギー研究から10MeV以下とわかっている。そして、核子の重さ940MeVは、クォーク同士の相互作用のために、着物を厚く着て重くなった構成クォークで理解できる。クォーク同士を結合させる糊(グルーオン)等のせいである。そうすると、クォーク質量 $M_q = M_u = M_d$ の極限の取扱いが許され、構成クォーク核磁子 $e\hbar/2M_q$ が定義できる。結局、陽子の磁気モーメント $+2.8e\hbar/2M_p$ は $+e\hbar/2M_q$ と等しくなり、中性子の磁気モーメント $-1.9e\hbar/2M_p$ は $-(2/3)e\hbar/2M_q$ と等しくなり理論は $\mu_n/\mu_p = -0.67$ を与え実験値を再現している。

また、いずれも構成クォークの質量 $M_q = 340\text{MeV}$ を与える。しかし、核内で太った構成クォークは自由クォークと異なることを示して、グルーオンも含めて量子色力学で説明するという宿題が残った。

2. 核内のクォークとメソン?

核子の中のクォークを見る1つの方法は、高エネルギーの荷電粒子や γ 線を核子内にたたき込んで、構成クォークに触れさせて出てくるのを待つことである。これは高エネルギーのクォークとの衝突(大運動量移行現象)を見ることになる。クォークの相互作用は、移行運動量に依存するので、ここでは、もう一方の極端状態、核子の中で静かにしている(運動量移行0)クォークを見たい。一般には難しい問題である。しかし、原子核の β 崩壊に注目すると、電子は核内の核子 p, n の β 崩壊で出るのがわかる。もっとよく見ると、例えば陽子 $p \rightarrow n + e^+ + \nu$ はクォーク描像では $(uud) \rightarrow (udd) + e^+ + \nu$ である。まさに、クォークの β 崩壊 $u \rightarrow d + e^+ + \nu$ である。結局、核子内クォークについては β 崩壊で出た電子、中性微子が語ることができる。では、具体的に ^{12}B と ^{12}N の崩壊を例として示そう¹⁾。 $^{12}\text{B} \rightarrow ^{12}\text{C} + e^- + \bar{\nu}$, $^{12}\text{N} \rightarrow ^{12}\text{C} + e^+ + \nu$ 崩壊は、それぞれ核子内の d, u クォークの崩壊に対応する。

陽子と中性子の β 崩壊は同じか?

β 崩壊は弱核子流 J_λ とレプトン流 L_λ の内積でハミルトニアン密度が与えられる¹⁾。これは荷電粒子の電磁場中力学に全く類似している。その流れ $J_\lambda = V_\lambda + A_\lambda$ は、少し専門的になるが、相対論的要求、ローレンツ普遍性からベクトル流 V_λ と擬ベクトル流 A_λ で次式で与えられる。

$$V_\lambda = \Psi_p (f_V \gamma_\lambda + f_W \sigma_{\lambda\rho} k_\rho + i f_S k_\lambda) \Psi_n$$

$$A_\lambda = \Psi_p \gamma_5 (f_A \gamma_\lambda + f_T \sigma_{\lambda\rho} k_\rho + i f_P k_\lambda) \Psi_n \quad \dots (1)$$

ここで、 Ψ_p, Ψ_n は陽子、中性子の波動関数、 γ_λ はガンママトリックス、 k_ρ は反跳運動量である。

f_V はベクトル主要項、誘導項 f_W と f_S はそれぞれ弱磁気項とスカラー項の結合定数である。また、 f_A は擬ベクトル流の主要項で、 f_T と f_P は誘導テンソル項と誘導擬スカラー項である。中性子の研究から $f_A/f_V = -1.25$ と決められたが、擬ベクトルには核内 π メソンが絡むために f_A はいまだにメソン効果研究の対象である。ベクトル流保存則から核子異常磁

気モーメントを使って、 $f_W/f_V = -(\mu_p - \mu_n)/2M_p \sim 10^{-3}$ であるがこれも核内 π メソンの影響を大きく受ける。同じく $f_S = 0$ が決められている。擬ベクトル流は相対論的效果なので、自然現象が身近に近く直観に訴えないから、実験で決めるしか手がない。まずミューオン研究から $m_\mu f_P/f_A \sim 7$ が決まっている。一方、誘導テンソル項 f_T は主要項と G -パリティ (アイソスピン空間の y 軸回りの回転 π と荷電共役変換 C の積: $G = C \exp(i\pi I_2)$) が逆符号をもつので、その存在は、対称性を要求するゲージ理論や Current Algebra と相容れない。直接の確認が大変重要である。

p と n は同じ核子であり、違いは荷電と極微量な質量のみだから両 β 崩壊は同じハミルトニアンで記述できると期待する (G -パリティが保存; $f_T = 0$)。しかし、自由 p は直接 β 崩壊しないので、原子核中 p の崩壊を見る。すなわち、 ^{12}N の β 崩壊と鏡映核 ^{12}B の β 崩壊とを比べる。

核スピンの純粋整列 ($P=0, A=$ 大きい) した ^{12}B ($I^\pi = 1^+, T_{1/2} = 21\text{ms}$) と ^{12}N ($I^\pi = 1^+, T_{1/2} = 11\text{ms}$) から ^{12}C ($I^\pi = 0^+$) への β 線角度分布は、

$$W(\theta) \propto p E (E - E_0)^2 \{ B_0(E) + A B_2(E) P_2(\cos \theta) \} \quad \dots (2)$$

と与えられる。ここで、 p と E は放出される電子の運動量と運動エネルギー、 E_0 は最高エネルギーである。 P と A はスピン偏極と整列で、磁気準位占有率で $P = a_{+1} - a_{-1}$ and $A = 1 - 3a_0, a_{+1} + a_0 + a_{-1} = 1$ と定義される。 θ は整列軸の方向と β 線方向のなす角度である。整列相関項の計数 $B_2(E)$ と $B_0(E)$ との比はベクトル流の弱磁気項を含むマトリックスと擬ベクトル流のガモフテラーマトリックスの比、誘導テンソル項、および擬ベクトル主要項の時間成分 $y = -2iM_p \int \gamma_5 r / \sigma$ で与えられる。

$$\frac{B_2(E)}{B_0(E)E} = \frac{1}{3} \left(\pm \frac{f_V \int \alpha \times r}{f_A \int \sigma} \pm 2 \frac{f_T}{f_A} - \frac{y}{M_p} \right)$$

右辺第一項 $\frac{f_V \int \alpha \times r}{f_A \int \sigma} = -2a$ は弱磁気、ここで、

記号 \pm は $+$ が ^{12}N , $-$ が ^{12}B 崩壊である。 ^{12}B と ^{12}N とアイソスピン T 三重項をなす ^{12}C の 15.11MeV 準位 ($I^\pi = 1^+, T = 1$) の研究から、 $a_{\text{exp}} = +4.02 \pm 0.03$ と求まっている。さて、ここでは主要項 f_A のメソン

効果の不確定さにもかかわらず、微小な f_T や時間成分を議論するのに全遷移強度ではなくて、この β 線エネルギー依存性のみを議論する賢い方法を取った。

クォーク質量差

実験研究では、短寿命である ^{12}B (^{12}N) に正と負スピン整列の差36% (75%) をつくり、 β エネルギーの関数で $B_2(E)/B_0(E)$ を測定した。高い精度で得た相関係数実験値を図1に示す。

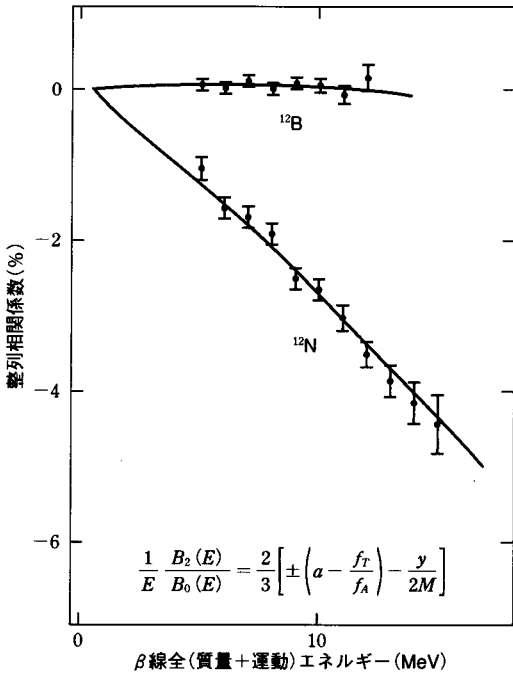


図1 ^{12}B と ^{12}N の β 線角度分布整列相関項
 実線は実験値に最もよく合う理論曲線である。このデータから、誘導テンソル項が0でないこと、核内核子質量が12%も軽くなっていることを決めることができた。

大変なことに、 ^{12}B と ^{12}N の β 崩壊角度分布は微小だが、明瞭に異なる。この差を理解するために上式の差をとると、実験値のみを使って、誘導テンソル

$$2M_p(f_T/f_A)_{\text{exp}} = a_{\text{exp}} - \frac{3}{4} \left\{ \left(\frac{B_2}{B_0 E} \right)_- - \left(\frac{B_2}{B_0 E} \right)_+ \right\} \dots (3)$$

$$= +0.22 \pm 0.05(\text{stat}) \pm 0.15(\text{syst}) \pm 0.05(\text{theor}) \dots (4)$$

を得た。 $f_T/f_A = 1$ なら上式は4000になるところだから、 $2M_p(f_T/f_A)_{\text{exp}}$ は小さい。しかし有意に0ではなく、陽子と中性子の β 崩壊に微小な差が発見され

た。QCD Sum Rulesの理論はu, dの質量差で、 $2M_p f_T/f_A \sim (m_u - m_d)/M_p$ を与えるが、これと整合する。質量差は4MeVだから、 $2M_p(f_T/f_A)_{\text{theor}} = +0.015$ となり実験値の下限にある。核内にクォークをあらわに検出する方法を初めてつくった。

擬ベクトル流時間成分の巨大メソン効果

相関係数の明瞭な差をこれでは説明できない。相関係数の和は、 $\left(\frac{B_2}{B_0 E} \right)_- - \left(\frac{B_2}{B_0 E} \right)_+ = -\left(\frac{2}{3} M_p \right) y$ となり時間成分を純粋に抽出する。一般の実験研究では空間成分の4千分の1しかない極小さなこの時間成分を純粋分離することはできないことを指摘しておく。 $y_{\text{exp}} = 4.66 \pm 0.06(\text{stat}) \pm 0.13(\text{syst})$ が得られ、核構造の理論値2.85と比べると、63%も大きい。これぞ巨大な π メソン効果か！ しかし理論メソン効果 $y_{\text{exch}} = 1.27$ は45%までしか説明せず、理論値は $y_{\text{theor}} = 4.12$ となり、いまだ0.54も小さい。このままでは、残り18%もが説明できない。

この理論には核内核子の媒質効果を取り入れていなかったもので、これを入れると、この差は陽子質量が核物質中で、 $(12 \pm 4)\%$ も軽くなっていることを強く示唆している(90%コンフィデンスレベル)。核物質中で、陽子を閉じ込めているタガが緩んで膨れているかもしれない。

3. まとめ

原子核で素粒子を見る分野が発展している。クォーク質量差についてはさらなる実験と理論研究が進められ、核子質量媒質効果の核子密度依存性を見るためには、重い原子核の中の核子について研究が望まれる。これを可能にするのが、最近の理化学研究所のリングサイクロトロンや放射線医学総合研究所の重イオンシンクロトロン、TRIUMFのISACである。それに、精密研究のためには十分なビーム時間を必要とする。

参考文献

1) T. Minamisono et al., *Phy. Rev. Lett.* 80 (1998) 4132-4135; *Ibid.*, *Phys. Rev. Letters* 82 (1999) 1644-1647; T. Minamisono, *Radiological Sciences* 41 (1998) 203-210.