



原子核では何が起きている？

岡真研究室～基礎物理学専攻



岡真 教授

物質を細かく分解していくとどうなるのだろうか。分子、原子、原子核・電子と小さくなり、やがて物体を構成している最小の粒子、素粒子に行き着く。我々には到底、知覚できないある種の究極的な世界だが、それ故に魅せられている研究者は多い。岡先生もその一人で、ここ岡研究室で量子色力学やハイパー核を精力的に研究なさっている。おそらく大部分の人にとって聞き慣れない分野だろう。では、それは一体どういうものなのか。岡研究室で研究されているミクロの世界を覗いてみよう。



素粒子に色？ QCDの世界

まず、皆さんは素粒子の一種であるクォークというものについてどれくらい知っているだろうか。クォークにはダウン(d)、アップ(u)を始めとする6種類とその反粒子の、計12種類ある(図1-a)。そして、陽子はu2つとd1つ、中性子はu1つとd2つというように、原子核を構成している核子や中間子は2,3種類のクォークからできているのだ。しかし、クォークは陽子や中性子の中に確かに存在するが、単体では取り出せないという性質

がある。そこで考え出されたのが、量子色力学 (quantum chromodynamics; QCD)である。

QCDではクォークはカラーを持つという概念を用いる。カラーにはレッド、ブルー、グリーン、という光の3原色とその3色の補色の6種類がある。もちろんカラーといっても実際にクォークに色がついているのではなく、クォークの性質をイメージ化したものである。このカラーが、単体ではクォークが取り出せないという性質に大きく関係している。

a. クォークの種類

Quarks	第一世代	第二世代	第三世代
$+\frac{2}{3}e$	① アップクォーク	② チャームクォーク	③ トップクォーク
$-\frac{1}{3}e$	④ ダウンクォーク	⑤ ストレンジクォーク	⑥ ボトムクォーク

さらに、各クォークには反粒子が存在する

b. カラーの閉じ込め

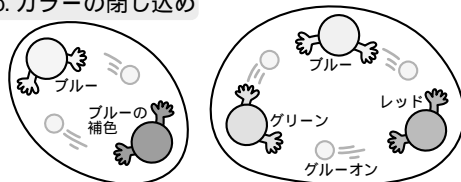


図 1

クォークは中間子や核子の中に常に2,3個の組で観測される。このことをカラーを用いて説明しよう。クォークが持つカラーを重ね合わせてホワイトとなる組の時、クォーク間に「強い相互作用」が働き、閉じ込められたかのように粒子が取り出せなくなる。つまり、クォークが2個の時には、あるカラーとその補色を持ち、3個の時は光の3原色を各クォークが持つとすれば、どちらの場合も重ね合わせてみるとホワイトになり、閉じ込められる。このようにクォークは常に2,3個で観測されると説明がつく(図1-b)。このことをカラーの閉じ込めという。

以上がQCDに使われるカラーの基本概念である。岡先生はQCD、中でも特に低エネルギーQCDの研究をなさっている。低エネルギー状態ではQCDにどのような特徴が見られるのだろうか。

その特徴とはクォークの相互作用に深く関係する。全ての相互作用はそれを媒介する粒子を放出、吸収することで起こり、その相互作用がどのくらいの頻度で起こるのかを表すには結合定数を用いる。クォークを結びつけている「強い相互作用」の媒介をしている粒子がグルーオンである。グルーオンの結合定数は、実は定数といっても図2のようにグルーオンの運動量の2乗の関数で表され、運動量が小さい程結合定数が大きくなる性質がある。つまり、低エネルギーQCDではグルーオンの運動量が小さくなるので、高エネルギーQCDに比べてクォーク間の結合が強い。だから、低エネルギーQCDを研究するには、高エネルギーQCDを研究するより計算が非常に複雑になる。実際には実験で起こるクォーク同士の反

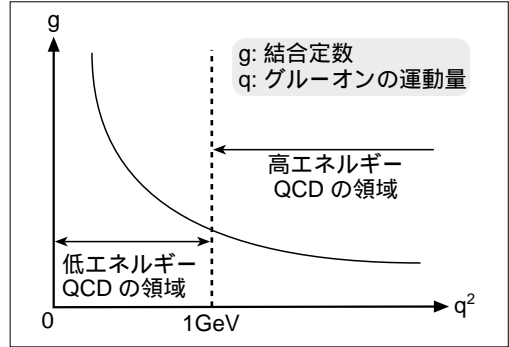


図2 グルーオンの運動量と結合定数のグラフ

応はこの低エネルギーQCDの領域で起こる。さらに核子同士が及ぼしあう影響、例えば核子同士が非常に接近すると、強い斥力が働くなどの現象はクォークに原因がある。つまり、実際に起こるクォークの反応や原子核や核子をQCDに基づいて調べるには、低エネルギーQCDの研究は不可欠なのである。



カラーの閉じ込めを破る～真空の相転移～

QCDによると、クォークはカラーの閉じ込めのために、単体では取り出せない。しかし、このカラーの閉じ込めを破る可能性はある。その鍵を握

るのは、カラーの閉じ込めの原因であると考えられている空間の基底状態、つまり真空である。我々の常識では、真空といえば何も無い状態を指

Column

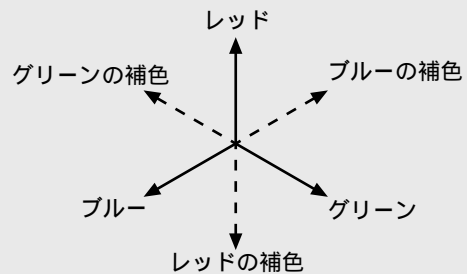
カラーとは何か？

クォークの持っているカラーについて本文では「カラーといっても実際の色ではなくクォークの性質をイメージ化したものである」と述べた。ではこのカラーとはどういうものなのか。

カラーを重ね合わせるとホワイトとなる組み合わせの時「強い相互作用」が働くのだから、電磁気学でいうところの電荷や磁荷のようなものであるとは想像つくであろう。しかしそれらとの違いは、相互作用をするとカラーが変わることだ。グルーオンにもカラーがあり、グルーオンを放出、吸収しクォークは自らのカラーを変えるのだ。

実は、カラーの正体はクォークの内部構造の方向の違いなのである(図a)。クォークはある方向を持つグルーオンを放出しある法則で自らの方向を変え、吸収したクォークもまた方向を変える。

内部構造の方向を具体的にするとこうなる



図a

つまりグルーオンを介してお互いの内部構造の方向を変え合いながら相互作用をしているのだ。また、上の図のベクトルを足し合わせて中心にくるとき(カラーがホワイトになるとき)方向の変化が均衡して、閉じ込めが起こるのだ。

すだろう。しかし量子力学の世界では、ある数のクォークと反クォークのペアが一緒に満ちている状態が一番安定であり、その状態を真空と呼ぶ。この真空のペアが原因となって、「強い相互作用」がクォークの組を閉じ込めている。よって、このペアが無くなればカラーの閉じ込めが破れるはずである。そのためには真空中にエネルギーを与え、相転移させる必要がある。ここで真空の相転移といわれても、何を意味するのかわからない人がいるだろう。真空が相転移するとは、水が氷や蒸気に状態変化するように、真空がペアで満ちている状態から我々が真空と聞いて想像するような

何も無い状態に変化することである(図3)。こうすることでカラーの閉じ込めが破れ、クォークが単体で観測できるクォーク・グルーオン・プラズマ(QGP)という状態が生まれるといわれている。岡先生はこの他にもカラーの閉じ込めの原因があると考えていらっしゃるが、詳しい原因は今のところわかっていない。岡先生はその原因を見つけるために後で説明するQGPの発生の実験に注目している。

ここまで読んでみて「今まで単独では取り出せないはずのクォークが、エネルギーを与えるだけで取り出せるのか」と思った人もいるかもしれない

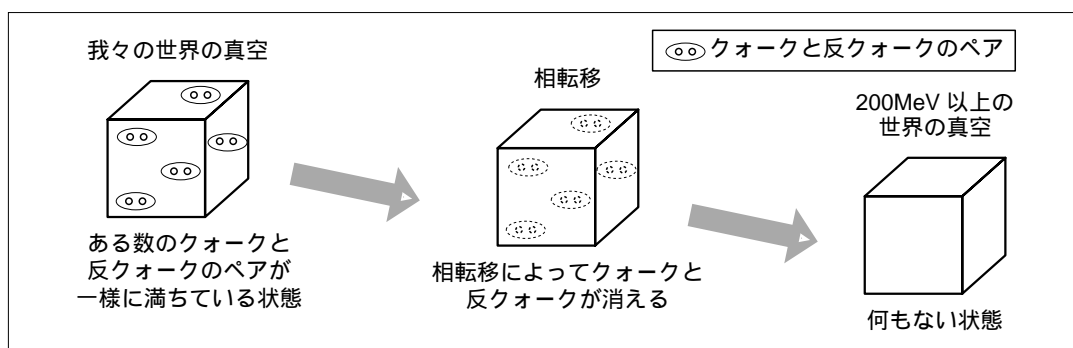


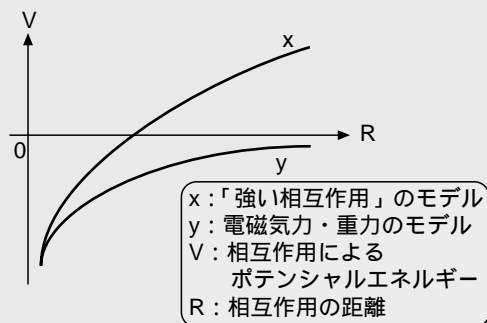
図3 真空の相転移

Column

カラーの閉じ込めは何故起こる？

グルーオンを媒介としている「強い相互作用」がクォークを閉じ込めている。しかし「クォークが相互作用で縛られているなら、イオン化のようにクォーク同士の距離が無敵大以上になる程のエネルギーを与えれば、真空を相転移させずにカラーの閉じ込めが破れるのでは」と思った人もいるだろう。では何故「強い相互作用」はそうならないのか。図bを見て欲しい。これは「強い相互作用」と電磁気力・重力の違いを比較できるように、同じスケールで表した時のエネルギーと距離のグラフである。我々が今まで物理の授業等で扱ってきた重力や電磁気力は、一定以上のエネルギーを与えることで無限遠方に離れる。何故なら、相互作用を媒介する粒子が一緒に広がるために、離れれば離れる程相互作用が弱まっていくからである。しかし「強い相互作用」の場合は距離が離

れても相互作用がほぼ一定に働き、図bのようになる。だからクォーク同士にエネルギーを与え続けても、無限に離れることはない。それどころか、クォーク間に溜まったエネルギーで新しいクォークの組が生まれ、新たな閉じ込めが生まれる。こうしてクォークは閉じ込められるのである。



図b 強い相互作用と他の力との違い

いが、そう簡単にはいかない。何故ならこの真空の相転移とは、宇宙が誕生してから現在の状態になるまでに少なくとも3回は起こったと考えられている相転移のうちの1つで、エネルギーにして約200MeV、温度にして約100億K、密度にして原子核の約2～10倍というとてもない状態を作らないと起こらないのだ。そのため、今まではそ

れ程の状態を地上で再現することは不可能だと考えられていた。しかし、最新の加速器で重イオン同士を光速近くまで加速して衝突させることでこの状態が再現できるのだ。

もし、この実験でQGPが観測されれば、宇宙を作った相転移の1つを実験室で再現できたという意味でも歴史に残る実験となるだろう。

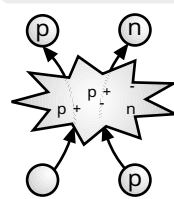


不安定な原子核を調べる！

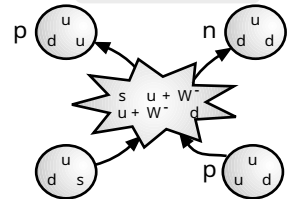
岡先生の研究の中でもう1つ面白い話題を取り上げよう。今まで取り上げてきた陽子や中性子などはuとdで構成されているのだが、それらより不安定なストレンジクォーク(s)を含むストレンジネス粒子が存在する。この粒子を持つ原子核をハイパー核といい、それは普通の原子核とは少し違う性質を持つ。その中でもuとdとsとでできている(ラムダ)という核子と陽子、中性子との崩壊について岡先生は研究なさっている。

例えば と陽子と一緒に崩壊して陽子と中性子になる崩壊。今までは が Λ という中間子を放出して陽子になり、その中間子を陽子が吸収して中性子になると考えられていた(図4-a)。しかしこの考えから出された崩壊の頻度の理論値は、計測された実験値とあまりにもかけ離れているという致命的な欠点があるため、この反応が実際に起こるとは考えにくい。そこで岡先生が考え出した崩壊が、 と陽子のクォークが相互作用するくらいに近寄り、 W^- という粒子をsが放出し、uが吸

a. 今までの考え方



b. 岡先生の考え方



p : 陽子 n : 中性子

図4 と陽子の崩壊

収するものである(図4-b)。この崩壊では理論値と実験値がほとんど変わらないので、実際に起こるのはこの崩壊だというのが有力である。

このような原子核にはsより不安定なクォークであるチャーム(c)やボトム(b)を含む原子核も存在するが、寿命が非常に短く生成が困難なため、あまり研究されていない。またトップ(t)を含む原子核はt自体が非常に不安定なため、存在しないだろうと考えられている。



そして完成へ

今まで紹介してきたものはどれも理論上の話であり、実際に実験し、それが検証されて初めて価値あるものになる。ではどのように検証されていくのだろうか。

大抵は、まず理論を立ててそれに基づき実験する。実験から出てきたデータを理論に照らし合わせて、理論式の中にあるパラメータを変えてデータに合わせていき、理論を完成させる。そのような作業を数年、長ければ十年以上も続けるわけである。これを具体的に説明するとどうなるか、現在実験されているQGPの発生を例に見ていこう。

QGPの理論を組み立て、大型加速器でQGPを

作り出し、測定されたデータを分析する。しかし、そうはいつでもQGP自体は $10^{-23} \sim 10^{-24}$ 秒のオーダーでしか存在しないとされているので、直接観測するのではなく、反応の結果出てくる粒子のエネルギーや運動量を測定してQGPの存在を探らなくては行けない。例えば μ^+ と μ^- という粒子を測定しQGPの存在を探ることができる。 μ^+ と μ^- は加速器で生成される様々な粒子や、cとその反粒子からなる粒子J/ψの崩壊から生じる。QGPが発生すると、cとその反粒子の周りに他のクォークが寄って来て、それと結びついてしまうのでJ/ψの数が減ってしまうといわれている。そ

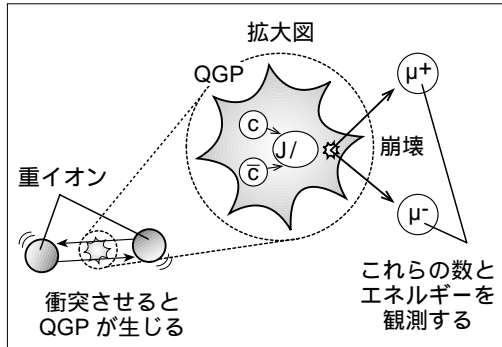


図5 QGPの発生

の数が減ったというのは J/ψ が QGP 内で崩壊してできる μ^+ と μ^- という粒子を観測することでわかるのだ (図 5)。しかし、加速器から観測される μ^+ と μ^- は J/ψ の崩壊によるものだけではない。そこで、観測された μ^+ と μ^- のエネルギーの和とこれに対応する μ^+ と μ^- の数をグラフにする (図 6-a)。この図の例だとグラフのピークに対応する数が J/ψ が崩壊してできた μ^+ と μ^- の数であ

る。このピークだけを見ても J/ψ の数が減ったというのはわからないので、次の手順で判断する。

イオンの種類を変えて衝突させる。図 6-a の点線部をバックグラウンドといい、イオンの質量数と、ピークとバックグラウンドの比をグラフ (図 6-b) にする。するとグラフは単調に減少する形になる。しかしよく調べると、ある質量数以上で急に比が小さくなる。それが QGP が発生した証拠となる。現在行われている実験では、150 以上の質量数でこの変化が見られたので、QGP が発生したのではないかと注目されている。

以上が QGP を検証していく一通りの手順である。実際に実験が行われるときはこれらの検証が正しく行われるように綿密に計画を立てて行われるのだ。そして出てきたデータを理論と照らし合わせながら QGP の存在を探り、見つけることで初めて QGP の理論は完成されたものとなる。

一見途方もない作業に思えるが、この作業が自分たちが立てた理論の答を出してくれるから原子核理論は面白いと岡先生はおっしゃる。

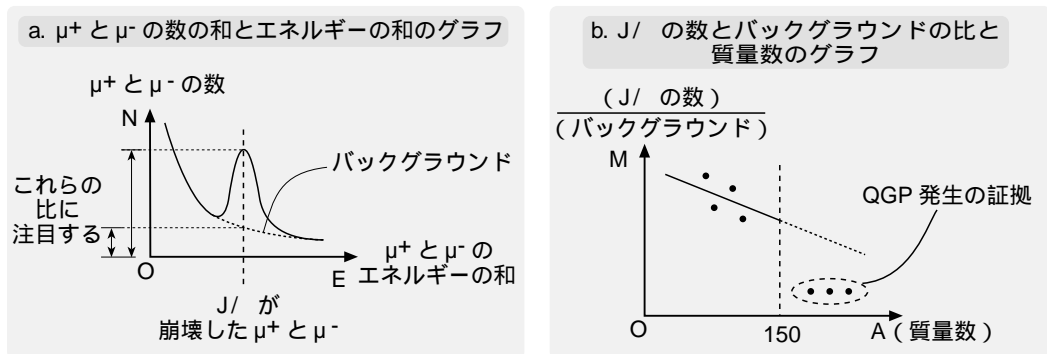


図6

物理学は理論を組み立てていく学問である。こう聞くと思わず退いてしまう人が大部分だろう。確かに物理学は一見複雑で、今回取り上げた内容に至ってはとても一般的な内容とはいえない。しかし理工系に携わる皆さんにこそ是非物理学を学んで欲しいと岡先生はおっしゃる。何故なら、理論を組み立てていくという物理学の考え方は全て

の理工系科目につながるからである。私はこの言葉に研究者としてだけでなく教育者としての岡先生の姿勢を感じた。

最後に量子力学の基本から丁寧に教えて下さった岡先生に心から感謝します。ありがとうございました。

(高野 毅)