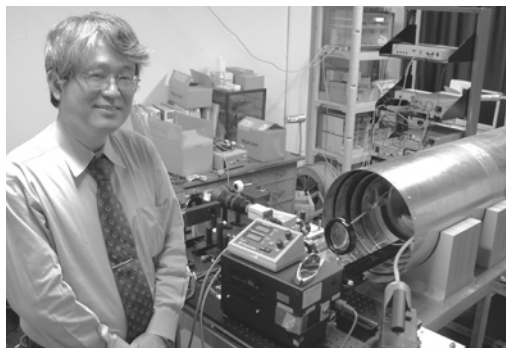




## 原子核物理の新領域に挑む

### 旭 耕一郎 研究室～基礎物理学専攻



旭 耕一郎 教授

重力が支配する宇宙、電磁力が主として働く原子、分子の世界。ところが自然界にはこれ以外の力で結びついた世界がある。そのひとつが原子核であり、これの性質や構造を解明しようとするのが原子核物理である。

現在原子核物理は安定な原子核を中心とした研究から、エネルギー的に不安定な原子核へとその研究の領域を広げている。

今回紹介する旭研究室も最新の加速器や独自の実験装置を用いて、原子核の構造を調べる研究や原子核を使った基礎物理の研究を行っている。



## 人知を出し抜いた原子核

宇宙は約 140 億年前のビックバンから始まったと考えられている。宇宙の歴史をビックバンの瞬間から追っていったとき、はじめて宇宙の歴史に登場した原子は水素原子である。この水素の原子核が幾重にも結合することによって、様々な元素が宇宙に誕生した。このことから、元素の合成過程を辿ることができれば、宇宙がどのように成長していったのかを知る手がかりになるだろう。こういった宇宙物理探求の興味から、また原子核物理本来の探求から、近年ある原子核群にスポットライトが当てられることになった。それは自然界に存在する安定な原子核に比べて陽子数と中性子数の間のバランスが目立ってくずれている、不安定核とよばれる原子核たちである。

宇宙物理の研究が進むにつれて元素の合成過程では安定な原子核に過剰に陽子または中性子が結びつき不安定核が生成されることがわかってきた。この事実を受けて不安定核に関する研究は盛んになったが、研究は困難を極めた。不安定核は存在したとしてもすぐに崩壊を起こし、また不安定核を十分な収量で作る方法が最近まではなかったのである。

1980 年代に多くの実験物理学者の貢献によって不安定核を高収率で作る方法が確立した。この方法は入射核破砕法とよばれ、不安定核を作る最もポピュラーなものとなっている(図 1)。この入射核破砕法は安定な原子核から陽子、中性子のどちらかを特定の数だけ抜き取り不安定核を作るというシンプルな原理に基づいた方法である。抜き取るという工程を、この方法では加速器を用いて原子核を光速の数十パーセントにまで加速し、ターゲットとなる原子核に衝突させることによって実現している(図 1 a)。衝突後の原子核は陽子数または中性子数がまちまちな不安定核になっている(図 1 b)。このままでは色々な種類の不安定核が混じり、特定の陽子数と中性子数で構成された不安定核は得られないという問題が生じる。このことは二段構えのふるいを用いることによって解決できる。ふるいは不安定核に磁場を作用させて、それに働くローレンツ力のために質量と電荷の比に応じて進行方向に差異が生じること、及び物質中を通過するときに電荷に応じて異なった減速を利用している(図 1 c,d,e)。最終的に図 1 f で特定の陽子数と中性子数で構成され

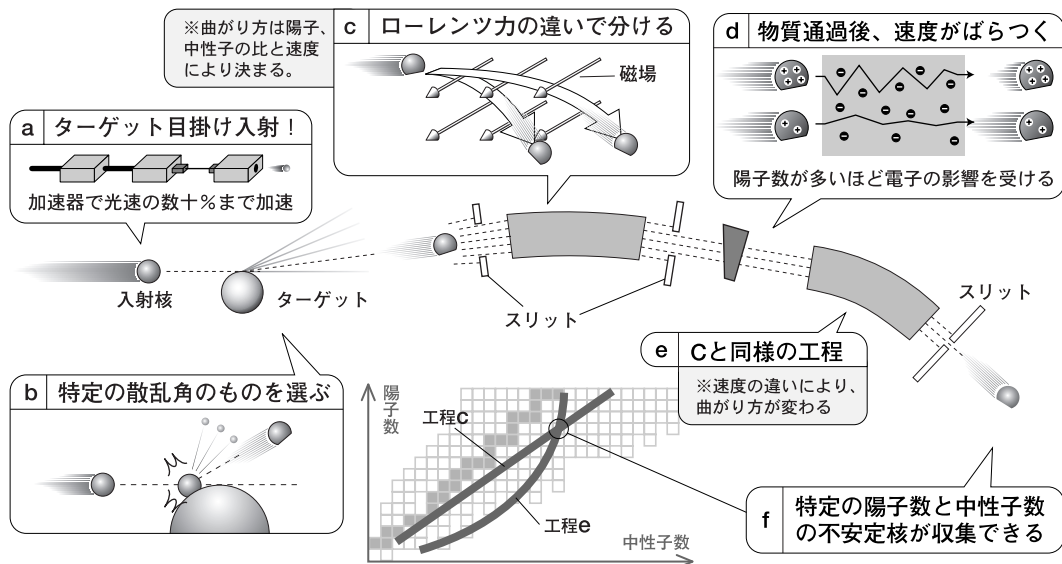


図1 入射核破砕法による不安定核の製造

た不安定核を収集することができる。以上が入射核破砕法の概要である。

不安定核を実験的に高収率で収集できるようになってから、安定な原子核ではみることのできない興味深い現象がいくつか発見された。そのひとつにハロー構造がある。安定な原子核では陽子と中性子が密度比を一定として分布している。これに対してハロー構造は、卵のように白身の中にぶかっと黄身が浮いている状態と同じで陽子（または中性子）が真ん中において中性子（または陽子）

がそれを包み込むように外に広がった構造のことをいい、比較的原子番号が小さいところでこの構造はみられる（図2）。

不安定核の研究は原子核物理の最先端の研究分野であり、今回紹介する旭研究室も不安定核についての研究を行っている。また旭研究室は不安定核の研究以外にも、素粒子物理学における標準理論の限界の証拠となる物理現象を探索する実験も行っている。今回は旭先生のグループが行っているこれらの二つの研究を紹介したい。

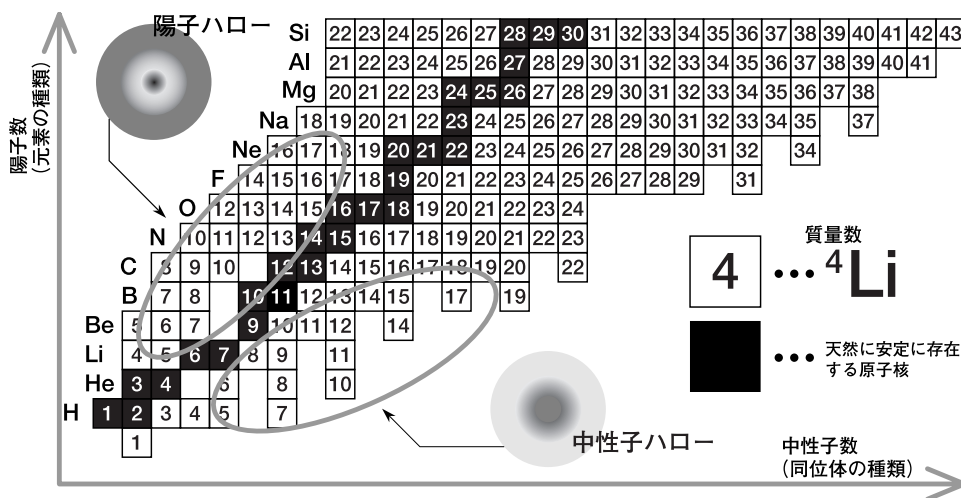


図2 核図表でみるハロー構造



## 言うは易く、行うは難し

不安定核の構造や性質の研究には、理論的にも、実験的にも、困難とそれを乗り越える面白さが待ち受けている。その理論的な面では原子核が多体系であることからきている。不安定核実験の難しさはその生成、測定の問題とともに、不安定核の構造を理解するために鍵となる測定量は何かを模索することが挙げられる。旭先生は「スピン」を実験のキーワードにすることによって不安定核の構造を得るための実験手法を検討し、その結果、不安定核の磁気モーメントを測定することによってその構造を知ることになった。

この実験手法を紹介する前に「スピン」と「磁気モーメント」とはどういったものなのかを知らなくてはならない。例えば地球の自転と公転を考えるとスピンの雰囲気をつかむことができる。スピンは地球自身の回転、すなわち自転に対応している。古典力学に登場する軌道角運動量とよばれるものが地球の公転にあたる。また軌道角運動量と同じくスピンも回転の大きさと回転の向きの二つで特徴付けられる。次に磁気モーメントの例として、電荷をもった惑星が自転と公転をしている場合を考えてみよう。電荷を帯びた惑星は公転によって円形の電流が発生して磁石の性質をもつ。また惑星の自転、つまりスピンの起因してそれ自体が磁石ともなる。公転と自転からの効果を合わ

せた全体としての磁石の強さを表す量を磁気モーメントという。

スピンと軌道角運動量を合わせた原子核全体のもつ角運動量を核スピンとよぶ。核スピンと同様に磁気モーメントも強さと方向をもった量であり方向は核スピンの方向と同じ向きである。陽子や中性子を惑星に対応させると、原子核の磁気モーメントを考えることができる。磁気モーメントが分かれば、公転と自転の様子に一定の制限が与えられる。つまり原子核の構成粒子である陽子や中性子の織り成す構造についての理論的予言を磁気モーメントでテストすることができる。問題はいかにして磁気モーメントを測定するかということになる。

旭先生は入射核破砕法によって生成した不安定核の集まりが、ほとんど同じ向きのスピン（この状態をスピン偏極しているという）になっていることを発見した。このスピン偏極しているという事実が、不安定核の磁気モーメントの測定を可能にする鍵であった。

ここで中性子が過剰に結びついている不安定核の場合を例にとって、磁気モーメントがどのように測定されるかをみてみよう。はじめに磁気モーメントの向き、つまり核スピンの向きを調べる。不安定核はその名の通り不安定であり、原子核内

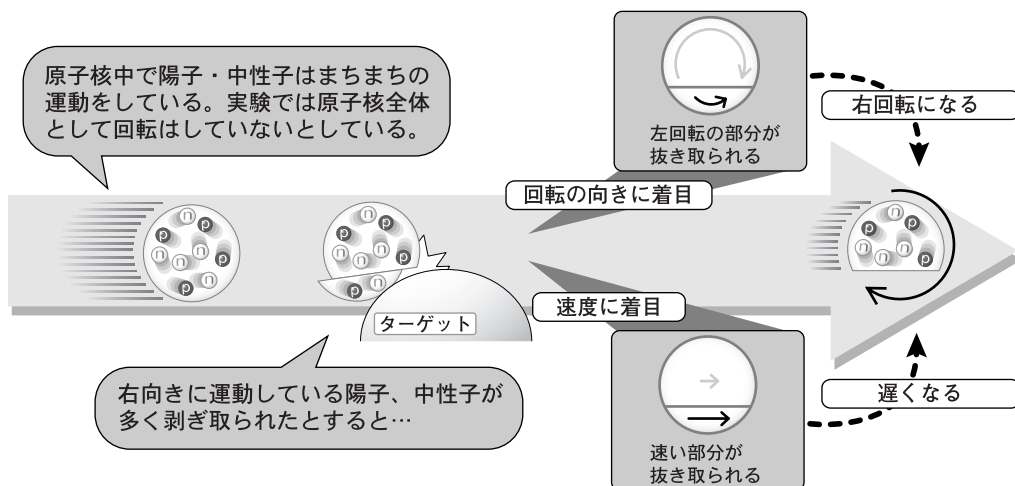


図3 スピン偏極のメカニズム

の中性子は、電子と反ニュートリノを放出して陽子になるという $\beta$ 崩壊を起こす。今、 $\beta$ 崩壊前後で核スピンの向きが小さくなる場合を例にとると、放出される電子のスピンは、角運動量の保存則から崩壊前の核スピンと同じ向きになっている。ところで、 $\beta$ 崩壊で出される電子は核スピンの方向と反対に進行するという性質をもつことが知られている。このことから、不安定核から放出される電子は核スピンの向きとは反対の向きにでることがわかる。さらに不安定核の集団はスピン偏極しているためどちらか一方に偏って電子が放出される。このことから放出される電子の偏りを観測することで核スピンの向きを知ることができる。

次に磁気モーメントを測定するために、外部から静磁場をかける。磁場をかけると不安定核はスピン方向によって異なるエネルギーをもつ。このときのエネルギーは磁場の強さと不安定核の磁気モーメントの二つの量によって決まる。そこで磁場の強さを保ったまま、静磁場とは別に電磁波を照射し、その振動数を少しずつ変化させると、ある振動数で不安定核のスピンの反転が起きる。このことは偏って放出される電子の出射方向が変化することで知ることができる。電磁波の振動数は核スピンの反転するときのエネルギー差と関係しているので、こうして不安定核の磁気モーメントは磁場の強さと振動数の値から知ることができる。

不安定核の磁気モーメントを求めるためには、核スピンの反転を知ることが必要であり、スピン偏極しているという事実が実験の鍵となる。ここで不安定核のスピン偏極メカニズムをみてみよう。簡単のために加速器から入射する原子核は最初角運動量をもたず、図3のようにターゲットとの衝突によって原子核の進行方向右側の部分から全体の速度（原子核を構成している粒子集団の平均速度）よりも速い粒子がなくなった場合を考える。全体の速度よりも速く動いていた粒子は、原子核の重心の周りに左回転していることに対応している。この粒子が抜き取られると、衝突後の原子核の速度は衝突前の速度より遅くなる。なぜなら、平均速度よりも速く動いていた粒子が抜き取られたからである。さらに、核スピンの向きが0を保っていた状態から左回りの粒子がなくなったので、衝突後の原子核は全体として右回りのスピンをもつことになる。このことは入射核破砕法において、

生成される不安定核の速度を選ぶと、それに対応したスピン方向を選択できることを意味している。このことが不安定核がスピン偏極するメカニズムであり、発見された事実だった。また、スピン偏極することは原子核の種類に依らず、どの原子核にもいえる普遍性をもっている。

このスピン偏極メカニズムを利用して、旭研究室の研究グループは中性子数20程度の過剰核の構造について研究を行っている。これまでに知られていた原子核物理の知識によれば、原子核内の中性子はエネルギーの低い軌道から順番に入っていくと考えられている。ところが1970年代に、 $^{30}\text{Na}$ 、 $^{31}\text{Mg}$ の不安定核では本来詰まるはずの軌道ではなくそれよりずっとエネルギーの高い軌道に入り、軌道配位の逆転現象が起きることが報告された（図4）。逆転現象は長い間謎であったが、つい最近になって日本の原子核理論グループが逆転現象に対する理論を提案した。これにより研究の興味は一気に、逆転現象はどこまで続くのか？という点に発展し、不安定核 $^{32}\text{Al}$ では逆転が起きるのが問題となった。旭研究室の研究グループは上記のスピン偏極メカニズムを利用して、不安定核 $^{32}\text{Al}$ に到ると逆転は全く起こらなくなる、つまり逆転は $^{31}\text{Mg}$ と $^{32}\text{Al}$ の間で突然終わることを明らかにした。

不安定核の構造について調べられた領域はまだ限定されていて、その構造などに関する実験データは少ない。旭研究室ではスピン偏極を強力な手法として、不安定核の構造や既知の原子核の新たな性質を究明するために研究を続けている。

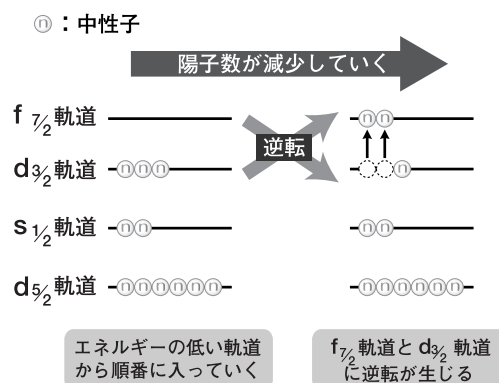


図4 逆転の現象





## 自然界に超対称性は存在するのか

物理学は自然現象の全てを研究の対象としている。それは宇宙や宇宙線、流体、超低温の世界、原子や原子核など数え上げるときりがない。そのなかで物質を構成する最も基本的な粒子とその成り立ちを解明しようとする分野が素粒子物理学である。原子の世界の物理現象を説明するのに量子力学が登場したように、標準理論というものが素粒子の世界に対して重要な役目をなしている。標準理論は現在知られている素粒子の諸現象を非常にうまく説明することができる。しかし素粒子物理学者はこの理論には満足していない。なぜなら標準理論は実験結果とよく合うように経験的に構成された部分が多く、新たな素粒子の物理現象に対する説明や予言をすることができるとは期待されていないからである。そのために素粒子物理の新たな理論として、標準理論が導き出す結果と同一のものを与え、さらに標準理論を超える理論を究明することが素粒子物理学者に課せられた大きな課題である。

1970年代に多くの素粒子物理学者の貢献によって超対称性モデルという素粒子物理の理論がつけられた。実際に自然界が超対称性をもっているという直接的な実験の裏付けは今のところなく疑問が残るところではあるが、超対称性モデルは数学的に非常に美しい構造をもっている。近年、超対称性モデルが予言する物理現象と、標準理論が予言する物理現象では異なる結果を与えるものがあることがわかった。それは永久電気双極子モーメント (EDM) の大きさである。

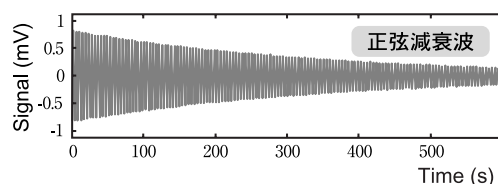
EDM とは全体としては中性の粒子でありながら、外場をかけることなく正電荷と負電荷に分かれ存在している状態のことをいう。キセノン原子 (Xe) の場合、標準理論の予言値は  $10^{-34}\text{e}\cdot\text{cm}$  程度であるのに対して、超対称性モデルの大方の予言値は  $10^{-28}\text{e}\cdot\text{cm}$  程度であり、6桁以上も大きい値を予言している。もし、測定された EDM の値が超対称性モデルの予言値と近ければ、今まで素粒子の物理現象をうまく説明していた標準理論に綻びが見つかったことになり、また超対称性モデルが標準理論を超える理論であることの一つの大きな実験的根拠になることを意味している。

標準理論、超対称性モデルどちらにしても期待される EDM の値は非常に小さく、測定することは難しい。そこで旭研究室では中性の粒子の中で、希ガスとしての電子配置をもつ元素である Xe を対象として選択し、Xe のスピン歳差運動 (軸が傾きながら回転するこまの運動) を観測することによって EDM を測定する実験を選択した。この実験は Xe のガスに一方向から円偏光した光を当てて、出てきた光 (シグナル) を測定することによって EDM を測定しようとするものである。

検出するシグナルは、Xe の歳差運動を表している (図5)。このシグナルを長時間観測し続けることで周期にずれが生じ、それが EDM の値と関連付けられる。測定するためには Xe が長時間歳差運動をしている必要があるが、実際には Xe の壁との衝突や磁場の不均一性の影響により、歳差運動が減衰してしまう。この減衰の様子を表しているのが図5上である。Xe の歳差運動の減衰を抑えることがこの実験の最重要課題である。

減衰を抑える手法として、従来はコイルの磁場によって自動的に歳差運動を維持し続ける自動型スピンメーザーとよばれる手法が使われていた。メーザーとは、マイクロ波またはそれより波長

### スピンメーザー使用前



### スピンメーザー使用后

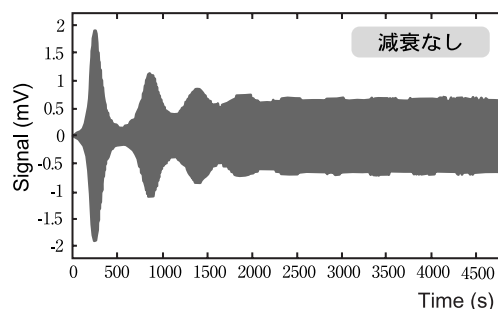


図5 スピンメーザー使用前後の比較

の長い電磁波を発生させる特殊な発振現象のことである。しかし自動型スピナーは比較的強い磁場を必要とするために磁場の影響を受けやすく、実験的に扱いが難しいという難点があった。

自動型スピナーに対して、旭研究室が開発した手法が能動型スピナーである。このメーザーは自動型では扱えなかった低い磁場での発振が可能である。能動型スピナーの基本原理は非常にシンプルである。図6のようにXeのspin軸がy方向に傾いているときは磁場を-x方向にかけて、反対向きに傾いているときは磁場をx方向にかける。これによって歳差運動の振幅を大きくするというものである。

スピナーの原理はシンプルだが、実験的に実現するには工夫が必要である。旭研究室は見事にこのメーザーの開発に成功した。能動型スピナーによってXeの歳差運動を持続させ、EDMの測定に必要なだけの歳差運動を観測することができる(図5下)。

旭研究室では5年間のプロジェクトを組んでこの実験を行っており、能動型スピナーの稼動に見事成功し、現在はメーザーの温度や磁場の安定度をより高める工程に入っている。来年度から本格的にXeの電気双極子モーメントの測定実験を始める予定である。現在の素粒子物理の実験は、大型の加速器を用いても調べるのが困難と

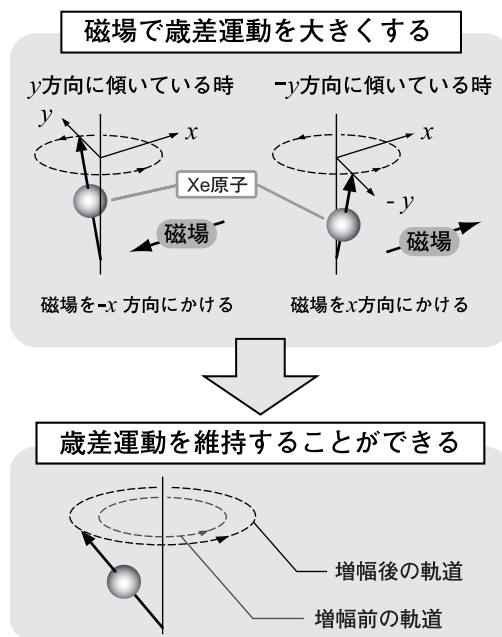


図6 能動型スピナーの原理

いう実験的な危機的な状況を迎えている。そのような中で、旭研究室では創意工夫によって実験的に基礎物理の研究を行っている。標準理論を超える理論を解明するために始まった研究によって、今、素粒子物理が大きく動こうとしている。

『もしもいま何かの大異変が起こって、科学的知識が全部なくなってしまう、たった一つの文章だけしか次の時代の生物に伝えられないということになったとしたら、最小の語数で最大の情報を与えるのはどんなことだろうか。私の考えでは、それは原子仮説だろうと思う。』ノーベル物理学賞を受賞した物理学者リチャード・P・ファインマンはこう言い残しています。

原子、原子核の研究は物理学の中でも非常にポピュラーで重要なテーマであり、今回の取材を通して原子核物理の研究の面白さやその重要性を再認識することができました。また、2007年に稼動予定である理化学研究所の最新加速器の話は非常に興味深く、原子核実験の醍醐味を感じました。

「スピン」をキーワードに原子核の研究も行っている旭先生は、この他にも不安定核をプローブ

とした物質構造の解明についての研究も行っています。これはダイヤモンドに外から放射性の原子核を埋め込み、それがどのような相互作用を受けるかを調べる研究で、原子核のスピンを量子ビットに使うことによって量子コンピュータのレジスタとしての応用が可能だと旭先生は考えていらっしゃいます。紙幅の都合で紹介できずに、非常に残念です。

最後になりましたが、多忙なスケジュールの中、度重なる取材に快く応じていただき、また原稿を完成させていく上で幾度となく助言をしていただいた旭先生に厚く御礼申し上げます。旭先生及び研究室の方々のより一層の御活躍を心よりお祈り申し上げます。

(工藤 啓朗)