

## 原子核をくすぐる



研究ノート

民井 淳\*

Tickling nuclei

Key Words : nuclear excited states, giant dipole resonance, pigmy dipole resonance, nucleosynthesis in supernovae

「どんな研究をされているのですか?」「原子核をくすぐっています。」

国際線の飛行機の中などで隣席になった方とお互いの仕事の話を始めることがある。相手の興味深い話を伺うことが好きではあるが、こちらの仕事について聞かれた時には、最近この様に答えることにしている。??と興味を抱いてもらえればしめたもの。「原子核にはいろんな種類がありますが、それぞれ全然違った顔を持っていましてね、くすぐりたいポイントもそれぞれ違う様なんですよ。ポイントを外すと全く無視するのに、うまくくすぐると少し反応したり、ぴったり合うと大きく身体をゆすって反応したり様々です。…」原子核の世界のイメージを多少ともうまく広げてもらうことができるだろう。

実際原子核の世界をイメージすることはたやすくはない。中学・高校での理科の学習から、この世の物質は原子から成り立っており、原子の中心には原子核が座っていてその周りを電子が回っているらしい、ということを知っている。ではその原子核とはどんな世界だろうか?そこはあらゆるものが複雑に絡み合った不思議ワールドである。まずはその大きさである。近年のナノテクノロジー技術の発達で、原子の大きさである0.1ナノメートルの世界で原子配置を操作したり、写真のように見たりすることができるようになってきた。しかし、原子核の大きさ

は原子よりもずっと小さく、10万から1万分の1程度しかない。そんな世界を調べられるということ自体が、学生の頃の私にはとても不思議だった。

そしてそこは量子力学が支配する世界。強い相互作用による強相関の世界である。原子核は陽子と中性子(まとめて核子と称する)から出来ているが、粒の様な核子が自由に飛び交っていると想像することもできれば、核子が全て溶けあって全体として空間に浮いた水滴のようになっていると想像することもできる。はたまた、陽子2個と中性子2個がまとまって粒(アルファ粒子)を作り、それらが原子核内を飛び交ってお互いに力を及ぼしあっていると想像することもできる。そのどれもが正しい。なのにどれも100%は正しくない。そんな多くの状態が重なりあって共存しているのが原子核である。様々な状態が重なりあっていることを示す Configuration Mixing という言葉は原子核を語る上で外すことのできないキーワードである。重なりあっているのは構造だけではない。原子核の世界では、この世を構成する4つの基本的な力(相互作用)のうち重力を除く3つ、即ち強い相互作用、電磁相互作用、弱い相互作用が競合して働いている。こんな複雑な世界は他にはない。なんと混沌としていることか。

ところがである。原子核の中が混乱しているかと思うとそれは全くの誤りで、原子核は高度に秩序化された状態なのである。主に強い相互作用に支配されているため原子核の励起エネルギーは通常高い。100万電子ボルト(1 MeV=1メガ電子ボルト)のオーダーで、電気エネルギー換算で100万ボルトの電場による加速、熱エネルギー換算で100億度の温度に対応する。通常環境ではそれほど大きなエネルギーはないので原子核は基底状態にしかあり得ない。全てが基底状態にいる、つまり絶対零度、エントロピー0の状態である。同じ種類の原子核はお互いに



\* Atsushi TAMII

1968年11月生  
京都大学大学院理学研究科博士後期課程  
修了(1998年)  
現在、大阪大学 核物理研究センター  
准教授 博士(理学) 実験核物理  
TEL : 06-6879-8921  
FAX : 06-6879-8899  
E-mail : tamii@rcnp.osaka-u.ac.jp

区別ができない。したがって同じ種類の原子核に対して実験を行う、くすぐる、と必ず同じ反応が返ってくる、つまりくすぐりたいポイントは同じなのである。いろんな状態が極めて複雑に重なりあった高度に秩序化された状態。それが原子核である。

では、原子核の励起状態(くすぐりたいポイント)はどうやって調べればよいのだろうか。いくつか方法はあるが、十分なエネルギーを注ぎ込む必要があるという点ではほぼ共通している。我々が使っている方法は陽子を加速して原子核に当て、出てくる陽子を観測するという方法である。その為には陽子を加速する装置=加速器と、出てくる陽子を分析して検出する装置=スペクトロメータが必要である。大阪大学核物理研究センターには世界最高分解能を誇るリングサイクロトロン加速器(図1)と「グランドライデン」スペクトロメータ(図2)がある。近年の開発により性能向上が進んできた結果、原子核の励起状態の細かいところまで調べられるようになってきた。要するに漠然とこの辺りというのではなく、ピンポイントでかゆいところに手が届くようになってきたのである。加えてこの施設の得意とするところは、原子核をたたいて調べるといった従来のイメージとは異なり、原子核にそっとソフトに触れるだけのごくごく繊細なタッチ=くすぐることにある。

原子核にそっと触れただけの陽子は方向を変えずに

ビームと同じ方向に出てくる。これを観測する。かゆいところに手が届く繊細で微妙なタッチ。正に日本人の得意とするところではないだろうか。実際諸外国の施設でも同種の実験が試みられているが、核物理研究センターのデータの質は完全に群を抜いている。[1]

図3に実験データを示す。対象は鉛208と呼ばれる原子核で、陽子82個、中性子126個から成り立っている。横軸は原子核の励起エネルギーで、くすぐりたいポイントに対応する。縦軸は励起エネルギーあたりの散乱強度で、どの程度くすぐりたいか(くすぐりたい度)を把握するには、ピークの面積を見



図1：大阪大学核物理研究センターのリングサイクロトロン加速器。高分解能実験を実現するビームを加速する。



図2：大阪大学核物理研究センターの高分解能スペクトロメータ「グランドライデン」(左側)と大口径スペクトロメータ(右側)。

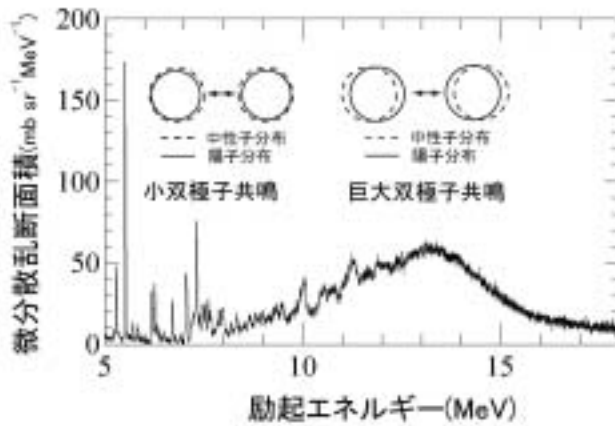


図3：鉛208を標的とする陽子散乱のスペクトル。陽子のビームエネルギー300 MeV。散乱角 $0 \sim 2.5$ 度。励起エネルギー9～16 MeV付近に巨大双極子共鳴、7～8 MeV付近に小双極子共鳴の強度が見える。

ればよい。図を見ると、励起エネルギーの低いところではくすぐったい度が小さい、細かなポイントが多数あることが分かる。くすぐったい度が0であればくすぐっても無反応である。一方で励起エネルギーの高い9～16 MeVの領域には大きくて幅の広いピークがある。ここはくすぐったい度が集中している場所で、少々ポイントがずれても大きく笑わせることができるだろう。この測定では、専門用語で表すと主に電気双極子(E1)励起を行っており、大きなピークは巨大双極子共鳴(GDR=Giant Dipole Resonance)に対応する。それぞれの励起強度がどのような状態に対応するかを理解するには原子核理論の助けが必要だ。巨大双極子共鳴は、陽子のまとまりと中性子のまとまりとがお互いに逆方向に振動している状態として理論では理解されている。まさに原子核が身体をゆすっているというイメージとぴったりではないだろうか。原子核には和則と呼ばれる実に面白い関係式があって、原子核のくすぐったい度の総量がどのくらいであるかは理論的に決まっている。巨大共鳴はこのくすぐったい度の総量の大部分を持っているから巨大といわれる。一方で、励起強度7～8 MeV付近にもくすぐったい度がある程度集中している部分があるが、総量に占める割合は小さいので小双極子共鳴(PDR=Pigmy Dipole Resonance)と呼ばれている。小双極子共鳴は陽子と中性子の両方から成る中心部(卵の中身に対応する)と中性子のみからなる殻(卵の殻に対応する)がお互いに振動している状態であるという理論的解釈が

ある。主に身体表面だけでくすぐったがっているようなイメージに対応するだろう。

くすぐったい度が大きいと冷めるのは早いようで、ピークの幅が大きいほどすぐに冷める。つまり巨大共鳴の状態は長くは続かない。一方で小双極子共鳴付近やそれより低い励起エネルギーにあるピークの幅は狭いので冷めるまでに時間がかかる。微妙にくすぐったい方がじわじわと長く続くということになるだろう。最近の高分解能実験の進展で、巨大共鳴部分にも細かい構造がある、つまり幅の狭いくすぐったいポイントの集まりとして理解される部分があることも実験的に分かってきた。このあたりが原子核の原子核たるゆえんで、どの状態も100%純粋ではなく様々な状態が重なっているということから来ていると考えられている。つまり、陽子のまとまりと中性子のまとまりとがお互いに逆方向に振動しているというイメージは巨大共鳴状態の大きな部分を表してはいるが、それ以外の状態も混じっているということだ。また、巨大共鳴にも小共鳴にも属さないピークは、原子核中のごく少数の核子の運動だけが変化している状態であると理論的には理解されている。なお、高い励起状態の幅が広い(すぐに冷めてしまう)のは強い相互作用で冷めるため、低い励起状態の幅が狭い(長く持続する)のは電磁相互作用(強い相互作用よりかなり弱い)で冷めるためである。

図3のようなE1励起強度分布(くすぐったい度分布)の全体像はこれまで把握することが難しかった。特に小双極子共鳴付近の分布はほとんど分かっていなかったが、どうやら多くの原子核に存在するらしいことが近年分かってきた。我々の実験手法を用いて様々な原子核での共通性・非共通性を把握していくことが当面の研究目標である。またここで紹介した電気双極子(E1)励起状態のほかにも、磁気双極子(M1)、ガモフテラー(GT)励起状態をはじめ数多くの励起状態があり、並行して研究を進めている。様々な状態が重なりあった原子核の複雑な状態を、ビーム、測定粒子、エネルギー、測定量などの量を変えながら、また新しい理論的解釈を加えて切り口を変えながら見ていくのが我々の研究である。原子核は複雑なるがゆえに非常に奥深い。そのたびごとに原子核は我々に新しい顔を見せてくれるだろう。

最後に、今回紹介した研究は我々の生活を理解する上で何か関係しているのでしょうか？実は大ありなのである。我々の付近に存在し、我々が生きていく上で不可欠な元素の多くの種類は、星の中での原子核反応で作られたと考えられている。特に鉄以上の重い元素は、超新星爆発中での原子核反応で作られたというのが現在の主流の考え方である。超新星爆発中では、星内の原子核が周りじゅうのガンマ線、中性子、ニュートリノなどからくすぐられ、他の種類の原子核に転換していったと考えられる。超新星爆発の温度は高いがそれでも10億度の領域であり、ガンマ線やニュートリノが軽いことから繊細なタッチの、たたくのではなくくすぐる、という反応が主流と考えられる。小双極子共鳴付近の強度(くす

ぐったい度)分布は、超新星爆発中の反応と元素合成を理解していく上で重要なキーとなっているのである。

文献：

- [1] A. Tamii, Y. Fujita, H. Matsubara, T. Adachi, J. Carter, M. Dozono, H. Fujita, K. Fujita, H. Hashimoto, K. Hatanaka, T. Itahashi, M. Itoh, T. Kawabata, K. Nakanishi, S. Ninomiya, A.B. Perez-Cerdan, L. Popescu, B. Rubio, T. Saito, H. Sakaguchi, Y. Sakemi, Y. Sasamoto, Y. Shimbara, Y. Shimizu, F.D. Smit, Y. Tameshige, M. Yosoi and J. Zenhiro, *Nuclear Instruments and Methods in Physical Research Section A* **605**, 326 (2009).

