

不安定核ビームによる核構造研究の夜明け頃

abstract

ニューマトロン計画の議論の中で煮詰められてきた不安定核ビームによる核構造や宇宙核物理学の研究は今や世界の大きな潮流となっている。ここではバークレー研究所で不安定核ビームの研究を始めた頃に考えたり議論したことを紹介する。新しい発見の連続に興奮した研究の歴史の一部として残しておきたいと思いこの機会に書いた。このころ杉本先生は、バークレーに滞在されていて、すべての議論を楽しんでおられた。

すでに、どのような経緯で不安定核ビームの実験を行うことになったのかは、この30年史の1章1.5で述べたとおりである。1983年のベバトロンのPAC¹（**タイトルと参加者**）に不安定核ビームを作り不安定核の核半径を決定するという実験計画を提出した。この計画は認められ実験が始まることになった。後にではあるが、Heckman-Greinerの最初の入射核破碎反応実験の後、即座に破片を二次ビームとして用いるという考えは同じグループから出されており、PACに実験計画も提出されていたという話を聞いた。その計画は二つの理由で採択されなかつた、まず一つ目はその頃はベバトロンでは高エネルギー重イオン中心衝突におけるショックウェーブや高密度核物質などの探査が中心課題であり周辺衝突の利用ということに対する興味を持つ人がほとんど居なかつたことであり、二つ目はこの提案ではビームとして用いるという可能性を追求することだけで、どのような物理量を取り出すかという観点が全く無かつたということであった。その提案は70年代の前半になされたものであり、その後もう一度提案されることもなかつた。

さて、不安定核の半径を決定する実験は相互作用断面積(Interaction cross section)を測定するものであった。最初は反応断面積を測定するのがよいかと考えたが反応断面積を測定するためには非常に0°に近い散乱角で入射ビームと同じ核の角度分布を測定する必要があるが、重イオン反応ではクーロン散乱の影響が大きくなる、高エネルギーでは炭素以上のZを持つ核ではその影響が大きく反応断面積の測定が不可能であるとのデータが示されていた²。代わりに入射核から一つ以上の核子が除かれる全断面積である相互作用断面積を測定することにした。これを測定するには小角での弾性散乱や非弾性散乱はこの断面積に含まれないので反応断面積にある

¹ Program Advisory Committee

² Jaros, J., A. Wagner, et al. (1978). "Nucleus-Nucleus total cross sections for light nuclei at 1.55 and 2.89/c per nucleon." Physical Review C 18: 2273-2292.

問題は全くなく、通過型のビームの減衰測定では粒子を識別して変化をしていないものだけを測定すればよいので、実に簡単で（実験的）定義のはっきりした測定ができることとなった。この相互作用断面積というのは、たぶんそれまでなかった言葉で、あるときLBLのNuclear Science のビルからPhysicsのビルへ歩いているときに³、H. Pugh氏が「それはInteraction cross sectionと呼ぶものだね」とおっしゃたのを聞いてそれ以来使うようになった言葉である。

最初の頃の実験データで⁶⁻⁸He, ¹¹Li, ¹⁴Beの断面積が飛び抜けて大きいことが見られた。⁶⁻⁸Heについては⁴Heが非常にコンパクトである（中心密度の一番高い原子核は⁴Heである）その外の中性子は広がっているというのは、佐藤紘さんが平均場計算で予言しておられたのであまり驚かなかったが¹¹Li, ¹⁴Beのデータには最初首をかしげた。とくに⁸He, ¹¹Li, ¹⁴Beは今までいうカクテルビームとして同時に出てくるものでありおなじrunで収集されたものである。このときのデータだけが大きな断面積を与えるということで、あらゆる注意点を何度もチェックした。その後、これらの核のデータを何度か取ることができ確認を得ることになった。最初の論文はHeのアイソトープで書いたがこのときは、まだ前述の相互作用断面積しか導出できておらず、相互作用半径を決定するにとどまっていた。Phys. Rev. Lett.のレフリーは証明もされていない半径とは何事かと言う理由で、採用されなかった。いつも思うのだが、本当に新しいことを始めたときには定性的に正しければ十分な意味があるので、多くのレフリーは最初から定量性のチェックを求める傾向にある。たとえその定量的詳細が物理の議論に対して衍できないようなばあいでもある。とくにPhys. Rev. Lett.はその傾向があり、レフリーの専門と思われる部分を意味もないほど詳細に定量性を求める。それであきらめて、Phys. Lett. Bに投稿したが、このときはEditorのShifferさんが、「どのような半径を測定しているかを明らかにする必要は今後有るが、このデータは新しい情報と方向を示している。」と言うことで日の目を見ることになった。面白いことに、その後グラウバー模型を使って核子密度分布と相互作用断面積の関係が理解できるようになったが、最後まで相互作用断面積から核子密度の平均自乗半径が決まるという議論に納得しなかったのはこのShifferさんである。機会あるごとに、平均自乗半径ではなく「有効平均自乗半径」と呼ぶべきだとかなり後までおっしゃっていた。その議論は私にとっていかに新しい物理を作っていくかという注意深さと指針を与えてくれたと思って感謝している。その次のLiアイソトープの論文は最初の論文が知られていたせいで難なくPhys. Rev. Lett.に掲載された。

³ この頃核研からのグループはNuclear ScienceではなくPhysicsの建物にいた、これは永宮グループがChamberlain グループにあったからであった。この二つのビルをつなぐところはテラスのようになっており、サンフランシスコとベイがきれいに見える。ここで夕日を見ながら過ごしたことが何度もある。

核子密度分布と相互作用断面積を関連づけるにはグラウバー模型が良いとはすぐ気がついたのだが、どうやって計算するかはなかなか判らなかった。このときに実験家の考え方と理論家の考え方の違いを思い知った。その頃、グラウバー模型を高エネルギー重イオン反応に応用し他のはHuffnerと藤田である⁴。まずドイツのHuffnerをたずねて、このような測定があるので..と説明したが、「そんな計算は自分でやりなさい」といわれてしまった。もちろん一般的なグラウバー模型のコードはその辺にあるはずとすることであった。しかし、私はまだ密度と断面積を結ぶ方法を論文で見つけていなかった。その後、日大へいって藤田さんにも同様の話をしたが、同様であった。お二人とももうすでに別の物理に興味があり、時間は割けないと言うことだった。もう一つはつきりしたことは、理論の方はあくまで「波動関数があれば計算できますよ」ということであった。私たちがほしいの実験データから半径を決めていこうというもので、ある波動関数でうまくいったからそれで良いというたぐいのものではなかった。「できるだけ波動関数を仮定することなく半径が決定できるのか?」が目的であった。

そういうしているうちに、Karolの論文を見つけた⁵。この論文は重イオン反応の断面積を説明するためにグラウバー模型を使うのだがそのときに原子核の密度分布の代わりに表面の密度を合わせるようなガウス分布の密度分布を持ってきて断面積を計算するもので、ガウス分布だと断面積が解析的に求められる。この論文には実験家にもわかりやすく密度分布と断面積の計算法が記述されており、この方法を用いて一般の密度分布で断面積を数値計算することに成功した。もちろんそれでも、断面積→密度分布ではなく密度分布→断面積という図式は変えられず今に至っている。その上でいろいろな模型密度分布関数を使い断面積の計算を行い、経験的に得られる平均自乗半径は軽い原子核では密度関数の形の違いに強くよらないことが判った。これで安心して核半径が決定できることになった。いっぽう相互作用半径は実験的には何の不確定性もなく決定できるのだが、何らかの半径を示していることは判るが結局は断面積の計算を行わないと、ほかの核との比較ができるものかどうかがわからないため、その後使わなくなつた。

グラウバー模型の定式化はその後新潟大学の鈴木さんが完成され、現在はそれが使われている。またこの定式化ができたおかげで標的を変化させたり入射エネルギーを変化させることにより、半径だけではなく密度分布そのものに対する情報も得られるようになった。最近ではハローの密度分布も断面積から決定できるようになっている。

⁴ Fujita, T. and J. Hüfner (1980). "Momentum distribution after fragmentation in nucleus-nucleus collisions at high energy." Nuclear Physics A 343: 493-510.

⁵ Karol, P. J. (1975). "Nucleus-nucleus reaction cross sections at high energies: Soft-spheres model." Physical Review C 11: 1203-1209.

この方向での次のステップは中性子ハローとコアの分離である。まず、鈴木さんの見つけ出された相互作用断面積と核子除去反応の関係；

$$\sigma_{2n}(^6\text{He}) = \sigma_I(^6\text{He}) - \sigma_I(^4\text{He})$$

が重要な働きをした。すなわち、もし⁶Heの構造が⁴Heの波動関数と残りの中性子の波動関数の積で表されるならば、⁶Heからの2中性子除去反応の断面積は⁶Heと⁴Heの相互作用断面積の差となる、というもので核内クラスタを正当づける方法となってる。この式はもちろん¹¹Liと⁹Liでもなりたつ。実際、実験結果はこの式が良く成り立っていることを示しており、中性子ハロー核がコアと、それからよく分離された中性子からなっていることが断面積からも示されることとなった。現在でも中性ハロー核の模型は中心にあるコアとその周りの中性子という描像が主に使われている。このことは、核内のクラスターという描像の具体的な例としてひろがり、クラスター構造研究の再燃を導く源となった。

ところがこの式は⁸Heと⁶Heでは成り立たずその代わりに、

$$\sigma_{2n}(^8\text{He}) + \sigma_{4n}(^8\text{He}) = \sigma_I(^8\text{He}) - \sigma_I(^4\text{He})$$

が成り立つことがわかった。これは、⁶Heは⁸Heのなかで分離したコアにはなっておらず、⁴Heが依然コアとして存在することを示している。いっぽう、陽子は⁴Heの中にしかないので⁸Heの電荷分布と核子分布は大きく違っていることになる。⁴Heがコアになっているという模型で計算すると⁸Heでは中性子分布の半径の方が陽子分布の半径より0.8 fmも大きいことになる。中性子スキンは電子散乱と精密な陽子弹性散乱の比較を用いた研究が長く続けられていたにもかかわらず、その存在は確認されていなかった、スキンの厚さとしては0.1-0.3 fm位の可能性が議論されていた。そこへ突然の0.8 fmである。やはり論文はPhys. Lett. Bとなつた⁶。このときも、Schifferさんは、そのような可能性はあるがやっぱり電荷分布を測定しないと結論できないといながらも、このデータの重要さを認めてくださった。

そのご、GSIでNaアイソトープの実験を、現在埼玉大の鈴木さんが中心となって進め、初めて核子分布の半径と電荷分布の半径を直接比較することができ、中性子スキンは確立した⁷。(これはPhys. Rev. Lett.) 最近では⁸Heでも電荷半径が測定され厚いスキンは確立している。

中性子と陽子の数の差だけでは中性子スキンはない（か非常に薄い）のに、不安定核になると何故中性子スキンができるのかは、結局陽子と中性子のフェルミサーフェスの違いにあると気がついて、図1に示すような説明をした。この図を見られて杉本先生は「これはいい説明だ

⁶ Tanihata, I., D. Hirata, et al. (1992). "Revelation of Thick Neutron Skin", Physics Letters B 289: 261.

⁷ Suzuki, T., H. Geissel, et al. (1995). "Neutron Skin of Na Isotopes Studied via Their Interaction Cross Sections", Phys. Rev. Letters 75: 3241.

ね、中性子スキンが見つからなかった理由も、不安定核ではスキンがどこにでもある理由もよくわかる」といってくださいました。この図は最近では安定核と不安定核の違いを示すときにはよく使われている。それまでは原子核を単粒子軌道で示すものがほとんどで、安定核と不安定核の違いがわからないような表記になっていた。

さて、話をパークレーに戻すと、 ^{11}Li や ^{11}Be では極端に大きな相互作用断面積が観測されその原因が何であるか毎日の議論の種であった。 ^{11}Li はたぶん球形の（その時は中性子が魔法数の原子核だと思っていた）原子核だから半径が急に大きくなっているのだろうと考えたが大きく変形していて見かけ上大きいだけかもしれないとも考えており、論文にそう記述した。この断面積の急激な増加と中性子の分離エネルギーの関係を見つけたのがP. G. HansenとB. Jonsonである⁸。ハローという言葉も彼らが初めて使った。（The Kuzumochiに使用可と考えていたこともあったが…）確かに私たちが観測した断面積と通常核のサイズ ($\sim A^{1/3}$)を仮定して予想される断面積の差は見事に中性子の分離エネルギーと強い相関を示していた。で次の一手は何だろうと考えていた頃。…

小林俊雄さんが首をかしげながら新しいデータを持ってきた。「谷畑さん、横に変なものが見えるんです」。当時相互作用断面積だけを測定するには大きすぎるワイヤーチャンバーを使っていたのだが、その横の方になにやら粒子が固まって見えている。二人であれこれ話しているうちに「これって、二次ビームのフラグメンテーション？」…「あっ、きっとそうだ！」ということで二次ビームをもちいた入射核破碎の実験ができるとこを発見。このとき見えていたのは ^4He だったと記憶しているがそのときの入射粒子が ^{11}Li だったか ^8He だったかそれ以外だったか忘れたが、結局相互作用断面積の実験データの中に破碎反応のデータが含まれていることがわかった。相互作用断面積の実験は入射粒子すべてに対してデータを取っているので、何が起こったかのバイアスが全くなかったというところがラッキーであった。

そうやって、破碎反応のデータを解析していた小林さんがしばらくしてまた、「…なんか変なんですよね、 ^9Li (^{11}Li が入射核の実験で) の運動量分布がすごく狭いんです。」確かに普通の破碎反応で期待される幅より何分の1もせまい。「ううーん、だいたい間違えると広くなるのは判るけど狭くはならないよねえ…」でしばらく議論の後、「これって、波動関数が広がってるから運動量が狭いんじゃない？ 不確定性論！」。はじめて不確定性理論を自分たちの

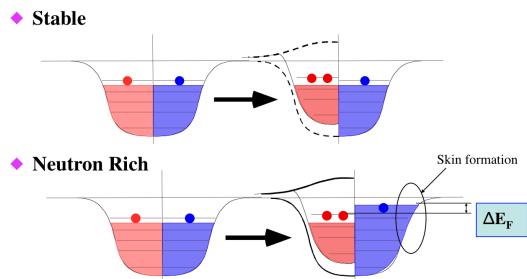


図1. 中性子スキンが不安定核で現れる理由

⁸ Hansen, P. G. and B. Jonson (1987). "The neutron halo of extremely neutron-rich nuclei." *Europhysics Letters* 4: 409.

データの中に見ました⁹。これで、ついに中性子ハローという考え方が確立しました。また、不安定核の破碎反応の運動量分布を見ることにより波動関数の情報が得られるとの新しい実験法が見つけられたことになりました⁹。今ではこれは不安定核の精密な波動関数の情報を得る方法となっています。後で次の問題を提起するハロー核の中での短粒子軌道の混合などもこの方法が使われたものです。

さてその頃は、実験が面白くなつて実験をするときには何か余分なものをはかろうという気分が強くなつっていました。マシンタイムにもそのような余裕があつたと言うべきかもしれません。元々半径を知ろうと言うことで始まつた実験なので、標的核は軽いものを使つて一番重いものでもAlでした。それは、クーロン力による破碎が混ざつてくると核子の分布による散乱であるという仮定が成り立たなくなるからです。それまでの安定核での研究でAlくらいまでならばクーロン力による反応は1パーセント以下であるとのデータがあつたためです。ある実験の時に、やっぱりクーロンのことも知りたいからもっと重い標的を使ってみようと言うことになり、CuやPbの標的をいれてみました。

で、しばらくして、また、小林さんが「...なんか変なんです...鉛の断面積が大きすぎる...んで...」。

少しさかのぼると、中性子ハローがほぼ確立したとき、池田先生がソフトなE1共鳴という考え方を出されていました。実は恥ずかしいことに広がつた表面があると陽子と中性子がずれたときに元へ戻す力が弱くなるので通常の巨大共鳴のエネルギーが下がつてくるのだと思っていました。頭の中にハローの中性子とそれ以外の中性子の分離を理解していなかつたのです。池田先生の話を聞いてさすが理論家は違うなあ、これだけ少しの情報からもうここまで言えるのか、とはおもつたのですが。どうやつてそれを観測するかは見当もついていませんでした。

データを磨けば磨くほど標的のZが増えると急激に断面積が増えているのは明らかです。
「...なんだろう...」.....

「えつ、これつてひょつとして池田先生の言つてゐる、アレ?...」...でまた新しいことを自然から勉強¹⁰。このクーロン分解の方法も今では不安定核の構造や性質を測定するスタンダードな方法となつています。ただこの問題にはまだ解決していない問題があつて（私だけがこだわつてゐるのかも知れないが）、池田先生とは別にHansenが小さな分離エネルギーの時に

⁹ Kobayashi, T., O. Yamakawa, et al. (1988). "Projectile Fragmentation of the Extremely Neutron Rich Nuclei ^{11}Li at 0.79 GeV/nucleon", "Physical Review Letters" 60: 2599.

¹⁰ Kobayashi, T., S. Shimoura, et al. (1989). "Electromagnetic Dissociation and Soft Giant Dipole Resonance of Neutron Dripline Nuclei ^{11}Li ", "Phys. Letters" B232: 51.

は非束縛の連続状態へのE1遷移が大きくなるとの予言を出しておらず、ここで観測されたものだけではどちらなのは判りません。その後、小林さんがパイオンのビームで $^{11}\text{B}(\pi, \pi^+)^{11}\text{Li}$ で実験をし¹¹、また理研では ^{11}Li 反応の不变質量の測定を行い1.2 MeVの励起エネルギーのところに状態があるとの報告が続きました¹²。また、ハーンマイトナ研究所での多核子移行反応でもその状態は観測されました。ところが、MSUでのクーロン励起による ^{11}Li の励起の実験で1.2 MeVの状態があるとしてもいいし、無いとしても良いと言うデータが発表されました。この状態はE1励起なのでクーロン散乱で強く励起されるはずなのでおかしいと言うことになり、その後いくつかほかの測定がなされました。状態が見えるというデータもあれば全く見えないというデータもあって、混沌としましたが、最近になって東工大の中村さんたちによって注意深い測定がなされ、クーロン励起では1.2 MeVの状態は見えないという結論が正しいと思われます。すると、ほかの散乱で見える状態はなんなのでしょうか？粒子散乱のすべての実験が間違っているというのも考えにくいことです。この問題はまだ解決していません、統計精度が十分高く励起エネルギー分解能の高い非弾性散乱や核子移行反応の測定が望されます。

話を元へ戻すと、この小林さんの論文以降急激に世界中の人们が中性子ハローに興味を示すようになりました。

重い標的の実験を行った頃、逆に最も軽い標的、陽子でも実験をしようと言うことになりました。水素標的を1%以上の安定性で厚さの絶対値を決めようというのは至難の業だと聞いていましたが、ちょうどそのときフランスのグループでスーパークリティカルな温度での液体水素標的ができて、厚さの絶対値や実験中の厚さの変化も1%以下の精度に押さえることができるとの情報を聞きそれを使わせてもらうことになりました。それと同時に下浦享さんがビームのエネルギーと標的を変えるとハロー核の核子密度の中心からの距離によるサンプリングをすることになるとの考えをだされて、その方法を用いて ^{11}Li の密度分布を決定することができました¹³。この方法で決めた密度分布は大分後にGSIで $^{11}\text{Li} + \text{p}$ の弾性散乱から決定された密度分布と非常に良く一致しており、これも新しい方法論の開発となりました。この方法は福田光順さん

¹¹ Kobayashi, T. (1992). "Projectile Fragmentation of Exotic Nuclear Beams." Nuclear Physics A 538: 343c-352c.

¹² Korsheninnikov, A. A., E. Y. Nikolskii, et al. (1996). "Spectroscopy of the halo nucleus ^{11}Li by an experimental study of $^{11}\text{Li} + \text{p}$ collision," Phys. Rev. C 53: R537-R540.

¹³ Tanihata, I., T. Kobayashi, et al. (1992). "Determination of the Density Distribution and the Correlation of Halo Neutrons in ^{11}Li ," Physics Letters B 287: 307.

により¹¹Beの密度分布の決定に使われた¹⁴。この実験は理研RIPSができる前に、簡単作りのビームラインで行った理研で初めての不安定核ビームのする方法が福田さんや鈴木さんのグループで使われている。

新しい方法が開発され、新しいものが見つかると、またそれが新しい方法の開発になり、それが次の発見を生むの繰り返しをこれだけ体験できたのは科学者としてこの上もない幸運であったと感じている。「科学がこんなに楽しいとは思っていなかった」とあちこちで言っている自分を知ることになった機会であった。

最後に忘れていいのは加速器と分離法の発達である。¹¹LiはPoskanzerにより核破碎反応の中に見つけ出されたが、彼の話によると、その実験では¹¹Liが検出されたときにはベルが鳴るようにセットされていて、それが一日に1回鳴る程度であったらしい。そのうち本当の¹¹Liがどれくらいだったのかは聞き漏らしがとにかく毎秒 10^{-5} 以下の生成率であった、1980年初頭である。私たちが実験を計画したときベバトロンが $10^9/\text{pulse}$ の¹⁶Oビームをを加速できれば毎秒30程度の生成量であると見積もっていた。最初の実験で得られたのは毎秒数個であったと記憶している。そのうちビーム強度が上がり、さらに¹⁸Oのビームを使うようになって¹⁵、毎秒100近くの¹¹Liが使えるようになった。そのご、理研のリングサイクロトロン施設とRIPSの組み合わせでは毎秒 10^3 代の強度が出て、たぶんRIBFでは 10^7 以上の強度が出るようになっている。

この間の¹¹Liの強度の増加は 10^{12} におよぶ。良くすごい発展の例としてコンピュータのメモリーやストレージが例に出されるが、不安定核の実験を始めた頃に発表されたMac-Plusは1MBのメモリーを積んでいた。現在のマックは10GB程度のメモリーを持っている、これはたった 10^4 の増加である。ストレージでは1MBのフロッピーディスクから現在では数TBのハードディスクでありこれですら 10^7 程度の変化である。不安定核ビームの発達がいかにすごいものかよくわかるであろう。

¹⁴ ¹¹Beの場合は強い変形の可能性があるので一つのエネルギーの相互作用断面積からはハローと変形の区別はつかなかったが、低いエネルギーでのデータと両方から密度分布を決定すると、ハローの影響が必要であることが判った。

¹⁵ 最初の頃¹⁸Oは自然存在比が少ないのでビームにするには高くて無理だうと勝手に思っていたが、実は¹⁸Oの濃縮は比較的簡単で安く手に入ることが判った。