フッ素とネオンの中性子ドリップライン決定に成功



稻辺 尚人 Inabe Naohito

1 背景

ある原子核にはいくつまで中性子を付け加えるこ とができるのか?原子核は陽子と中性子の集合体か らなる多体系である。陽子数の決まったある元素に は、中性子数の違う同位体が存在するが、中性子の 数を増やしていくと、やがて、中性子が結合しなく なり原子核として存在できなくなる。この限界を元 素ごとにつないだ線を中性子ドリップラインとい う。冒頭の問いは、言い換えれば、原子核の中性子 ドリップラインはどこにあるのか、ということであ る。これは、原子核の存在範囲を問う基本的な問い で、原子核にとって非常に重要な問題である。

図1は原子核の地図とも言える核図表である。縦 軸に陽子数(元素),横軸に中性子数の違う同位体 が示されており,右側に行くほど中性子の多い同位 体となっている。中性子ドリップラインは,濃い太 線で示されているが,図の一番右端に存在する。元 素番号6のCを例にとると,²²Cが中性子ドリップ ラインで,存在比が最も多い安定原子核²²Cに比べ, 中性子が10個も多い。このように,中性子ドリッ プラインは,自然界に通常存在する安定核から非常 に遠く離れたところに存在している。

このような安定核から遠く離れた原子核では,中 性子が安定核に比べ,非常に緩やかに束縛されてお り,中性子が外側まで薄く存在するハロー¹⁾という ような,安定核とは違った構造が確認されている。





このような構造を理解するためには,原子核を結び つける核力のより詳細な解明が必要となる。中性子 ドリップラインはその極限状況にある原子核である が,いくつかのモデルによりその位置が予想されて いる。実験的にその位置を決めることは,モデルの 試金石になるばかりではなく,極限状況での核力の 作用や核構造を知る手がかりとなる。

中性子ドリップラインの確定は、その外側に原子 核が存在しないことを証明することで、なされるも のである。これらは自然界に存在しない原子核であ るため、人工的に生成しなければならない。生成に はいくつかの方法があるが、入射核破砕反応による 生成法が一般的である。この反応は高速のビームを Be等の生成標的に当て、入射核の一部を剥ぎ取るも のであり、剥ぎ取られてできた原子核が人工的に生 成される同位体となる。この反応でできる生成物の 生成断面積は他の反応に比べ大きく、また、生成物



図 2 ^{32,33}F 及び ^{35,36}Ne 探査実験のセットアップ

は前方に集中する特徴を持つため、収集しやすい利 点がある。これを利用して、1999年に原子番号8の Oについて中性子ドリップラインが理化学研究所で 決定された²⁾。しかしながら、それ以上のFやNeに ついては、中性子ドリップラインが更に安定核から 遠いところに存在し、それらの生成断面積が極めて 低くなることから生成が難しくなるため、20年間も 進展がなかった。

理化学研究所では 2006 年暮れより RIBF³⁾ が始動 した。この施設では,得られる加速器からのビーム の強度は非常に高く,また,エネルギーも増強され たため生成標的を厚くでき,これまでより格段に高 い生成数で同位体を生成できるようになった。また, 同時に,大口径の超伝導 RI ビーム分離生成装置 BigRIPS⁴⁾ も建設され,高効率でこれらの同位体を 収集することが可能となった。このように,これま でにない高い生成条件が実現したことで,Fと Ne の中性子ドリップライン決定の実験を行った。

これらの決定は、既知の³¹Fと³⁴Neの外側の原子 核の存在の有無を調べることで行われる。図1にも 見えるように、中性子ドリップライン近傍では、2つ の中性子が強く結合するという対相関の効果を反映 し、中性子が偶数個の原子核がとびとびに存在する。 このため、1 つ隣の³²Fと³⁵Neの有無だけでなく、2つ 隣の³³Fと³⁶Neの有無も同時に調べた。

以下,本稿では,FとNeの中性子ドリップラインの決定について,その実験,解析,及び,決定の方法を紹介し,最後に展望を述べる。

2 探査実験と解析

探査実験は, RIBFの加速器から得られる核子当 たり 345 MeV の⁴⁸Ca ビームを, 厚さ 20 mm の Be 標的に照射し,入射核破砕反応で生成された原子核 を,BigRIPS で収集して行われた⁵⁾。ビーム強度は 平均して毎秒およそ3×10¹² 個であった。図2に実 験のセットアップを示す。収集された同位体は, BigRIPS の第1ステージの電磁石とエネルギー減衰 板を用いて,必要な領域近傍の原子核だけが分離し て取り出された。本実験は、³³F,³⁶Ne を中心とした 2つの設定で行われ,それぞれの周辺の原子核が分 離して取り込まれた。

これらは第2ステージに送られ、1つ1つの原子 核に対して粒子識別。がなされた。粒子識別とは、 原子核の陽子数と質量数を同定し、どういう原子核 が取り込まれたのかを識別することである。実験で は、図2に示すSi検出器と2つのプラスチックシ ンチレータを用いて同定がされた。陽子数はSi検 出器を通過する際のエネルギーの減衰を測定するこ とで決められた。質量数は、プラスチックシンチレー タ間の飛行時間の測定から得られる速度と、前段の プラスチックシンチレータの通過位置の測定から得 られる磁気剛性から、原子核の持つ質量数と陽子数 の比を求めることで決定された。

解析では、粒子識別を行うと共に、バックグラウ ンドの除去も徹底的に行った。バックグラウンドは 飛来した原子核が検出器内で反応する等して、正し い信号を出さないことから生じる。このようなバッ クグラウンドは、本来生じないところにイベントを 作り、本実験のように希少なイベントを探す実験で は、間違った結果を導く原因ともなる。本解析では、 検出器間の信号の相関を調べ、バックグラウンドを 極力減らすことに努めた。

本実験で得られた粒子識別の結果を図3に示す。 上が,³³Fを中心とした設定,下が³⁶Neを中心とした 設定である。それぞれ,縦軸が陽子数,横軸が質量



図3 粒子識別図

上が³⁵F中心下が^{*}Ne 中心の設定。周辺の同位体は観測されたが, ^{32.35}F及び^{35.56}Ne は観測されなかった

数と陽子数の比となっている。図から分かるように, ³¹F, ³⁴Ne や ³⁷Na は 多 数 観 測 さ れ た が, ³²F, ³³F と ³⁵Ne, ³⁶Ne に関しては 1 イベントも観測されなかった。

これらが観測されなかった原因として,BigRIPS の設定が正しくなかったのではないかという可能性 がある。BigRIPS では中性子数の同じ同調体の軌道 がほぼ同一であることが知られている。解析では, ³³Fと³⁶Ne の同調体である³⁴Neと³⁷Na の軌道が調べ られ,それぞれが BigRIPS 内を十分に余裕をもっ て通過していることが確認された。また,これらの 磁気剛性値も調べられ,正しい値が設定されている ことも確認された。

このように,正しい設定がなされているにもかか わらず,³²F,³³Fと³⁵Ne,³⁶Neが0イベントであっ たということから,本実験では,そもそも,これら が生成されていなかったため観測されなかったとい うことが結論付けられたのである。

3 中性子ドリップラインの決定

本実験で得られた無観測の事実から,³²F,³³Fと ³⁵Ne,³⁶Neの存在の有無を統計的手法を用いて決定 した。まず,³²F,³³Fと³⁵Ne,³⁶Neが存在すると仮 定した場合の,本実験での無観測の事実が起こる確 率(P)を求める。残りの確率(1-P)は,そもそも, これらが存在しないため観測されない,ということ であり,これから,これらの原子核が存在しない確 率を求めたのである。

統計的手法としては、Poisson の帰無仮説を用いた。 この手法は、ある事象での期待値をもとに、この事 象が全く起きない確率を、Poisson 分布を用いて求め るものである。³²F, ³³Fと³⁵Ne, ³⁶Neの観測の期待値 は次の2つの方法で得られた生成断面積を利用して 求められた。1つは、よく知られた入射核破砕反応 の生成断面積を理論的に予想する EPAX2.15⁷⁾の予測 値が用いられた。もう1つは、Ogシステマティク ス⁸⁾と言われるものが用いられた。これは、ある元 素に対して、入射核と生成核の質量差を変数とし、 各同位体の生成断面積について指数関数を用いて系 統的に表すものである。本実験では、FとNeの生 成断面積の質量数依存性も系統的に測定し、これら の値を Qg システマティクスに沿った方法で fitting することで, 生成断面積の関数形を求めた。得られ た関数形に³²F, ³³Fと³⁵Ne, ³⁶Neの原子核の結合エ ネルギーが0の時の質量を代入し、これらの生成断 面積が求められた。

図4に生成断面積の質量数依存性の測定結果と, EPAX2.15 及びQgシステマティクスで得られた生 成断面積を示す。測定からは質量数が増加すると急 激に生成断面積が減ることが確認された。測定と2つ の予測値はよくあっていること,特にQgシステマ ティクスでは,中性子ドリップラインに近い質量数 の大きなところでよくあっていることが確認され た。得られた³³Fの断面積はEPAX2.15 で4.39 fb, Qgで21.6 fb,³⁶Neでは前者で2.58 fb,後者で0.839 fb であった。

観測期待値は得られた生成断面積を用い,シミュ レーションコード LISE++⁹⁾で BigRIPS での収集効 率を計算して求められた。得られた期待値は³³Fで EPAX2.15 の場合 21.5 個,Qg の場合 106 個,また, ³⁶Ne で前者の場合 15.5 個,後者で 5.03 個であった。



図4 生成断面積の質量数依存性

これらの期待値を用い、本実験で 3F や 36Ne が観 測されない確率 Pを求め、これからこれらが存在 しない確率(1-P)を決定した。³³Fや³⁶Neが存在し ない確率については、2つのモデルで得られた確率 のうち、より存在が否定されないという結果となる、 小さい値を採用した。³³Fでは確率 P は EPAX2.15 から得られたもので $P = 3 \times 10^{-10}$ であり. ³³F が存 在しない確率は1-3×10⁻¹⁰と求められた。また, ³⁶Neに関しては、Qgシステマティクスの結果から P = 0.7%と得られ, ³⁶Neが存在しない確率は 99.3%と求められた。なお、³²Fと³⁵Neについても 同様なことを行ったが、これらの生成断面積は³³F や ³⁶Neに比べて大きく、その期待値も大きいこと から、これらが観測されない確率が低くなり、これ らが存在しない確率は³³Fや³⁶Neに比べて十分高 かった。

このように、本実験の測定結果から、³³F、³³Fと ³⁵Ne, ³⁶Neの存在は100%に極めて近い確度で否定 された。この結果から、³¹Fと³⁴Neの外側には原子 核が存在しないことが証明され、F同位体の存在限 界は³¹F, Ne 同位体については³⁴Ne であることが決 定され、Fと Ne の中性子ドリップラインが確定し たのである。

4 おわりに

今まで述べたように、本実験によりFとNeの中

性子ドリップラインが決定した。最初に示した図1 に示すように、決定されたドリップラインの位置は Oに比べ、非常に遠くに存在している。たった1つ 陽子が増えただけで中性子が劇的に増加できるのは なぜなのか?これは、中性子ドリップライン近傍に ある原子核に対する興味ある問いである。近年、 ²⁶Oの質量が測られ¹⁰、どれくらい束縛原子核にな るためにエネルギーが足りないかが分かってきてお り、この謎の解明が進み始めている。このような研 究から、極限的な原子核での核力の作用や、それに 伴う核構造の解明が期待される。

最後になるが、今回の中性子ドリップラインの決 定は 20 年ぶりの進展であった。この成果は、RIBF の加速器からの大強度ビームと収集効率の高い BigRIPS による、同位体の生成能力の高さによると ころが大きい。今回のような生成断面積が極めて小 さな中性子ドリップライン領域でも、わずか1日程 度の測定で、多くのイベント数を期待できたからで ある。2020 年代半ばまでに、欧米でも同位体の生 成能力の高い施設が誕生予定である。また、理化学 研究所でも RIBF の増強を目指している。これら施 設で、中性子ドリップラインの探索を行い、Ne 以 上の Na、Mg、Al 等の中性子ドリップラインが確 定することが期待される。

参考文献

- 1) I. Tanihata, J.Phys G, 22, 157 (1996)
- 2) H. Sakurai, et al., Phys. Lett. B, 448, 180 (1999)
- 3) Y. Yano, Nucl. Instrum. Methods B., 261, 1009 (2007)
- 4) T. Kubo, Nucl. Instrum. Methods B., 204, 97 (2003)
- 5) D. S. Ahn, et al., Phys. Rev. Lett., **123**, 212501 (2019)
- N. Fukuda, et al., Nucl. Instrum. Methods B., 317, 717 (2013)
- 7) K. Summerer, et al., Phys. Rev. C., 61, 034607 (2000)
- 8) O. B. Tarasov, et al., Phys. Rev. C., 75, 064613 (2007)
- O. B. Tarasov, et al., Nucl. Instrum. Methods B., 266, 4657 (2008)
- 10) Y. Kondo, et al., Phys. Rev. Lett., 116, 102503 (2016)

((国研)理化学研究所仁科加速器科学研究センター)