

# 整合技術：原子核構造高分解能研究に向けて



研究ノート

藤田 佳孝\*

Matching techniques : for the higher resolution study of nuclear structures

**Key Words :** high resolution, high angular-resolution, dispersion matching, angular-dispersion matching, nuclear structure, isospin

## 1. 高分解能実験に向けて

原子核アイソスピン量子数を基にした、原子核中の対称構造の研究をしている。日本語で荷電スピンの訳されるアイソスピンは、名前さえも知らない人がほとんどであり、いつも説明に苦慮する。しかし二つの原子核、例えば(陽子数, 中性子数)=(13, 14)のアルミ27と(14, 13)の珪素27は名前が違うのに、非常によく似た励起構造をしている、といったことが大局的に理解できる。(アルミや珪素は元素の名前、つまり原子の名前で、本来は原子核の名前ではないのです!)そしてもっと面白いことに、この抽象的なアイソスピン量子数を、原子核構造の中に「観る事ができる」。(詳しくは、ホームページ (<http://fermi.hep.sci.osaka-u.ac.jp/~fujita>)を参考。)小さな原子核中の量子的微細構造を高分解能で調べ、アイソスピン量子数を観るためには、顕微鏡が必要である。その役目を担うのが、高性能大型磁気分析器である。

高分解能で原子核の内部構造を研究するのに、「サイクロトロンなどの加速器からの陽子、<sup>3</sup>Heなどのビームで原子核を励起し、散乱されて出てくるこれらの粒子がどれだけエネルギーを失ったかを磁気分析器で調べる」という手法が用いられる。磁気分析器の中での荷電粒子の軌道半径は、粒子の運動量の大きさに比例する。磁気分析器の物点に置

かれたターゲット中の原子核を励起し、エネルギー(運動量)をより多く失った粒子はより小さな軌道半径を通り、小さな軌道半径に対応する焦点面の位置にやってくる。これを磁気分析器の「分散作用」と呼ぶ。散乱される粒子の数は、原子核の内部励起の強度を反映する。従って、焦点面の各位置を通る粒子の数の分布から励起エネルギースペクトルが得られる。このような反応で一般的に達成される分解能は、入射ビームのエネルギー分解能によって決まってしまう。なぜなら入射ビームのエネルギーに広がりがあれば、出てくる粒子のエネルギー分布も広がり、焦点面での位置の広がりになるからである(図1a)。当然の事ながら、エネルギー的に似通った量子状態を区別できない。顕微鏡がいくらよくても、ゆらめく光の下では、物がきれいに見えないのと似ている。

一般に加速器からのビームは、エネルギーの広がりや空間的広がりを持つ。特にエネルギーの高い加速器においては、全エネルギーに対するエネルギー

a) Achromatic B.T. b) Dispersive B.T. c) Angular-dispersive B.T.

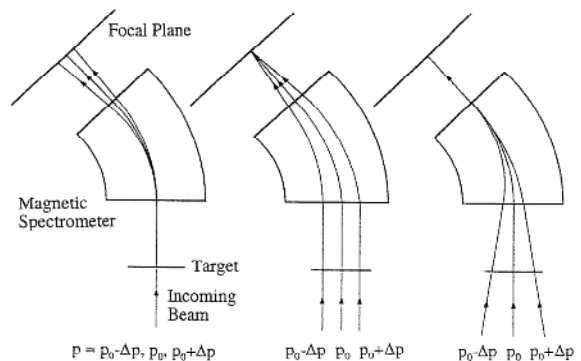


図1 標的まで異なるビーム輸送方法を使った場合の、磁気分析器内のビーム軌道。a) 色消しビーム輸送、b) 運動量分散ビーム輸送、c) 運動量・角度分散ビーム輸送。運動量のわずかに違うビームの軌道が、簡単のため0度弾性散乱の場合について示してある。



\*Yoshitaka FUJITA  
1951年3月28日生  
1975年大阪大学大学院理学研究科・修士課程・物理修了  
現在、大阪大学大学院・理学研究科・付属原子核実験施設、助教授、理学博士、原子核物理学  
TEL 06-6850-5506  
FAX 06-6850-5516  
E-Mail [fujita@hep.sci.osaka-u.ac.jp](mailto:fujita@hep.sci.osaka-u.ac.jp)

の広がりと同じでも、エネルギー広がり絶対値が大きくなる。高いエネルギーの下での高分解能測定の困難な所以である。しかしサイクロトロンなどの加速器と磁気分析器をつなぐビームラインに工夫をこらすと、そのような一般常識に反し、入射ビームのエネルギー(又は運動量)の広がりを打ち消し、磁気分析器の最高性能を引き出すことが出来る方法がある。運動量分散整合、角度分散整合と呼ばれるこれらの方法を紹介する。

## 2. 運動量分散整合

図1aのように運動量に広がりのあるビームを、物点(ターゲット上)で一点に収束させるビーム輸送の方法を、非分散的ビーム輸送、または、イオン光学の言葉で、色消しビーム輸送と呼ぶ。前述のように、得られる分解能は入射ビームのエネルギー(又は運動量)の広がりにより決まってしまう。

発想を変えた先人が30年以上も前にいた<sup>1-3)</sup>。運動量の違う入射ビームを、ターゲット上で軌道半径方向の少しづつずらせた位置に収束させようと言うのである(図1b)。運動量の違う粒子は軌道半径が異なる。ずらせる量をうまく調節する、つまり、入射ビームの運動量分散の量を整合させると、焦点面で得られる像の広がりが、入射ビームの運動量広がりにはよらないようにできる。つまり「運動量の広がりをターゲット上での空間の広がりに変え、この物点位置の空間広がりによる焦点面での像位置の広がりを、運動量ごとの軌道半径の異なりで打ち消す」という賢い方法である。

運動量分散整合の達成により、得られる原子核励起スペクトルの様子がどの様になってきたかを、<sup>58</sup>Ni核に対し荷電交換反応を行った場合について図2に示す。磁気分析器を使わず、1980年代に行われた(p, n)反応<sup>4)</sup>で得られる分解能は、入射エネルギー160MeVに対し350keVであった(図2上)。大阪大学核物理研究センターの磁気分析器 Grand Raiden<sup>5)</sup>で運動量分散整合を使った(<sup>3</sup>He, t)反応の結果、1994年には入射エネルギー450MeVに対し150keV以下が得られ(図2中)、現在70keVにまでなっている(図2下)。原子核励起微細構造の研究に新局面が拓かれつつある<sup>6-8)</sup>。

## 3. 角度分散整合

これでエネルギー高分解能が得られるめどが付い

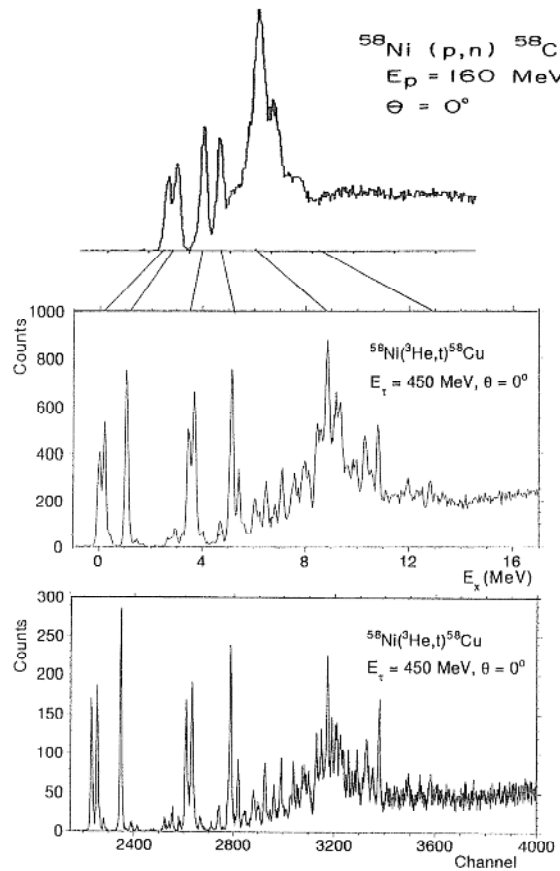


図2 <sup>58</sup>Ni核に対し荷電交換反応を行った場合のエネルギースペクトル。分解能の向上に伴い微細構造の存在が明らかにされてきた。

た。しかし図1bをよく見ると、精密測定には困ったことがある。図において違った運動量の粒子が、ターゲットをまっすぐに横切っている。これは、すべて0度散乱であることを示す。しかし焦点面を異なる角度で横切っている。つまり運動量分散整合を行った事により、角度分解能が犠牲にされている。角度分解能の悪化は、大分散の高性能磁気分析器でより顕著になり、Grand Raidenでは、測定される散乱角度が1度程なまってしまう。精密測定の為には困ったことである。

この運動量分散整合を行った事による角度分解能劣化を矯正する方法を確立しつつある<sup>9)</sup>。その方法、角度分散整合は、ターゲット上で入射ビームの運動量分散の量を整合させた上で、ビームの入射角度をその運動量毎に適切に調節することで達成される。図1cに示すように、ビーム入射角度を「内向き」気味にすると、磁気分析器を通った荷電粒子が、焦点面を同じ位置、同じ角度で横切るように出来る。

この図においても、ビームはターゲットをまっすぐに横切っているから、すべて0度散乱である。0度散乱が0度散乱に見える(はずである)。残念ながら角度分散整合の実例紹介は2000年秋までお待ちいただきたい。

#### 4. 新ビームラインプロジェクト

運動量分散整合, 角度分散整合を達成するには, 加速器からのビームをいかに適切に成形し, 磁気分析器と整合させるかが重要であるかをみてきた。最高の整合を目指し, またバックグラウンド低減のため, 新ビームライン建設が核物理研究センターで進行中である。図3には, 上記整合が達成された場合のイオン光学計算の例を概念的にビームの広がり強調して示している。図, 中央下“Source Point”に「色消し輸送」され, 小さく点収束されたサイクロトロンからのビームは, 図の上の端に近い“Target Point”まで続く新ビームラインで「分散的輸送」される。その間, 整合達成のため, 磁気分析器の二

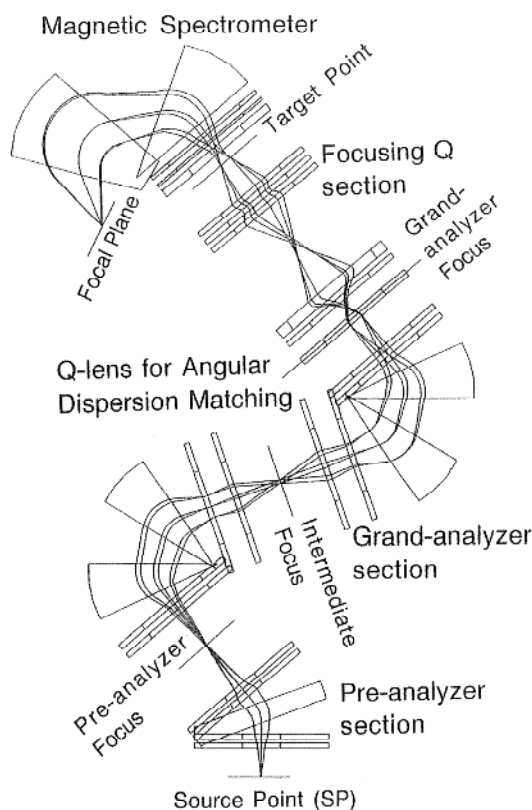


図3 運動量分散整合, 角度分散整合を達成する新ビームライン+磁気分析器の概念図。整合が達成された場合のイオン軌道の例を, ビーム広がり強調して示している。

倍の運動量分散が生み出され, 角度分散も作られる。磁気分析器Grand Raiden部分は, 図の上の端に近い“Target Point”と書かれたところから“Focal Plane”までの最後の一部分である。全系におけるビームラインのしめる割合の大きさに注目したい。もう一点注目すべきことは, この全体図において, 最初の“Source Point”と最後の“Target Point”と書かれた二カ所でビームが一番細くなっている点である。運動量分散整合といういかめしい言葉を使ってきたが, それはとりもなおさず, 古くからの光学の言葉に置き換えると, ビームライン+磁気分析器の全系が「色消し」のシステムを組むようにした, ということになる。この系全体ではちゃんと「リウビルの定理」が成り立っている。

#### 5. そしてこれからは?

高分解能測定「今まで見えなかった物が見える」魅力は, 抗しがたい力を持つ。そして分解能が一桁上がると, 「物に対する見方」が変わることがよくある。新システムでは, 計算上, 今までの二倍のエネルギー分解能が得られる。ちょうど, 1980年代に行われた, (p, n)反応から, 分解能がほぼ一桁改善されることになる。また角度測定も意味深いものとなる。自然界でもユニークな量子多体系である原子核。それを高分解能で観察し, 微細構造を解明し, 「木を見て森を見る」をモットーに, アイスピン量子数を基にした(原子の名前に惑わされず)原子核中の対称構造の研究をさらに展開したいと考えている。

#### 参考文献

- 1) B.L. Cohen, Rev. Sci. Instr. 30 (1959) 415.
- 2) B. Sjogren, Nucl. Instr. Meth. 7 (1960) 76.
- 3) D.L. Hendrie, in Nuclear Spectroscopy and Reactions part A, ed. J. Cerny, Academic Press, New York (1974) 365.
- 4) J. Rapaport et al., Nucl. Phys. A 410 (1983) 371.
- 5) M. Fujiwara et al., Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. A 422 (1999) 484.
- 6) Y. Fujita et al., Phys. Lett. B 365 (1996) 29.
- 7) Y. Fujita et al., Phys. Rev. C 55 (1997) 1137.
- 8) Y. Fujita et al., Phys. Rev. C 59 (1999) 90.
- 9) Y. Fujita et al., Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. B 126 (1997) 274.