

入射核破砕過程で生成された破砕片の運動量分布

百田 佐多生* 金澤 光隆** 北川 敦志*** 佐藤 真二***

(受領日：2012年4月23日)

*高知工科大学 環境理工学群
〒782-8502 高知県香美市土佐山田町宮ノ口185

**九州国際重粒子線がん治療センター
〒841-0033 佐賀県鳥栖市本通町1-802-3

***放射線医学総合研究所
〒263-8555 千葉県千葉市稲毛区穴川4-9-1

E-mail: *momota.sadao@kochi-tech.ac.jp

要約：入射核破砕過程は、不安定核ビームを効率よく生成する核反応プロセスである。このプロセスで生成された破砕片の運動量分布は、反応メカニズムを解明する上での重要な指標となっている。1 GeV/u以上の高エネルギー領域で測定された運動量分布は等方的なガウス分布となり、その広がりには核内核子のフェルミ運動量でよく説明することができた。100～300 MeV/uの中間エネルギーでは、破砕片の軌道の偏向や多段階反応の寄与が示唆されていたが、信頼度の高い運動量分布の測定が少ないため詳細な議論が困難な状態であった。近年、95 MeV/核子のArビームを使って実施した実験で、破砕片の横運動量分布の広がりや縦運動量との間に顕著な相関が観測された。これに対して、290 MeV/uのAr, Krビームを使って実施した実験では、この運動量分布の相関性が弱まり、横運動量の広がりには縦運動量によらずほぼ一定となった。またKrビームとC標的で生成された破砕片では、横運動量分布が狭まる現象が観測された。これは興味深い現象で、今までに提唱された反応モデルでは説明が困難である。

1. はじめに

重イオンビームの一種である不安定核ビームは、それ自身が興味深い研究対象であると共に、材料の微視的構造や電気・磁氣的性質を解明するプローブなどとしても利用価値が高い。核子あたり100 MeV (100 MeV/u) 以上のエネルギー領域で起こる入射核破砕過程は、不安定核ビームの生成に適した核反応プロセスである。この破砕過程の生成物である破砕片の生成断面積や運動量分布は、高品質な不安定核ビームを生成するために必要な基礎データであると同時に、反応メカニズムを解明する重要な手がかりにもなる物理量である。また、宇宙放射線に含まれる重イオン成分のエネルギー分布は、200～300 MeV/u近辺でピークを持つ。粒子束では軽イオンに劣るものの、重イオンは原子番号Zが大きく物質中で高い反応性を持つため、宇宙放射線が物質に入射した際に及ぼす影響を評価する上で無視することはできない。従って、このエネルギー領域における重イオン反応の研究は、宇宙放射線が宇宙船の構成

材料や宇宙飛行士におよぼす影響を評価する上でも重要である。

筆者らは、理化学研究所(理研)や放射線医学総合研究所(放医研)の破砕片分離器を利用して、100～300 MeV/uにおける破砕片の生成断面積や運動量分布の系統的な測定を実行してきた。本報では、特に破砕片の横運動量(角度)分布に関する研究成果を報告する。

2. 破砕片の運動量分布に関する過去の研究と問題点

2.1 相対論的エネルギー領域における運動量分布

1 GeV/u以上の相対論的エネルギー領域では、破砕片の運動量分布は非常に狭く、その分布の中心は入射ビームのエネルギーにほぼ一致する。この結果は、入射核が標的核との衝突を起こすParticipantと衝突に影響されないSpectatorに分けることができ、衝突前の速度を維持しているSpectatorが破砕片を形成することを意味する。運動量分布は等方的

なガウス分布となり、その広がり、核内核子のフェルミ運動量に基づいて記述されるGoldhaber模型⁽¹⁾で理解することができた。

2.2 中間エネルギー領域における運動量分布

中間エネルギー領域 (~ 100 MeV/u) では、単純なParticipant-spectatorの描像が適用できなくなり、破砕片の運動量は非等方的な分布となる。縦方向の運動量 (P_L) 分布では、低運動量側の広がりが大きくなることで測定によって示された。この原因として標的核からの核子捕獲⁽²⁾などが考えられているが、詳細な議論はなされていない。また、横方向の運動量 (P_T) 分布は P_L 分布よりも広がっており、標的核による入射核の軌道の偏向がその原因として考えられてきた。この P_T 分布の広がりはVan Bibberらによって経験的公式にまとめられ⁽³⁾、多くの論文で測定結果の解析に用いられてきた。しかし、この公式の妥当性の根拠となる P_T 分布の測定には、同位体が分離されないなど不確定さを多分に含むものが多かった。また、 P_L 分布の結果で示された他の反応プロセスの寄与は、 P_T 分布が P_L とともに変化する可能性を示している。 P_T 分布と P_L との相関は、破砕片生成プロセスのより深い理解につながることを期待させる。以上のことから、破砕片の P_T 分布に関して、信頼度が高く、かつ系統的な測定結果が待たれていた。

3. 破砕片の横運動量分布

3.1 理研と放医研における P_T 分布の測定

理研と放医研の破砕片分離器 (ISOL) を用いて、破砕過程から生成される破砕片の P_T 分布を測定した。理研では95 MeV/uのArビーム⁽⁴⁾、放医研では290 MeV/uのArおよびKrビームを一次ビームとし

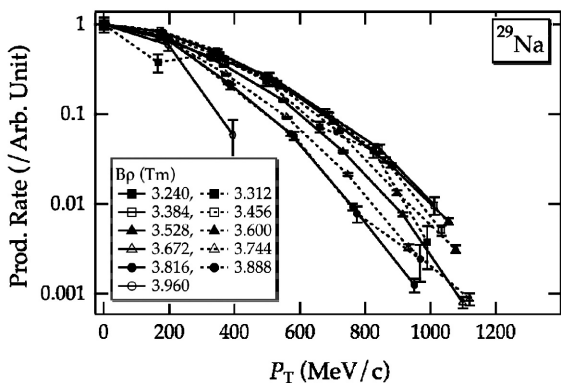


図1: 95 MeV/uのArビームとBe標的から生成された ^{29}Na の P_T 分布⁽⁴⁾。磁気剛性率 ($B\rho$) の値が大きいほど P_L が大きい。

て利用した。標的核との衝突によって生成された破砕片は、ISOL中に設置された放射線検出器を用いて反応ごとに粒子同定と速度が決定された。標的中の標的核の数 (標的厚さ) と一次ビーム強度を用いて各破砕片の生成数を規格化し、生成率を求めた。標的へ一次ビームを照射する角度を変えて角度分布を測定し、この結果から P_T 分布を導出した。測定された P_T 分布は、 P_L と同様なガウス分布に近いもの (図1) となった。

3.2 Arビームから生成された破砕片の P_T 分布

測定された P_T 分布をガウス関数で解析し、分布の広がり (σ_T) を導出した。図1から分かるように、 σ_T は P_L の増加とともに減少し、両者の間には図2(a) のような明確な相関が見られた。この結果は、 ~ 100 MeV/uで低運動量側に混入する他の反応プロセスの成分が、通常の破砕過程の生成物より広い P_T 分布を持つことを示している。

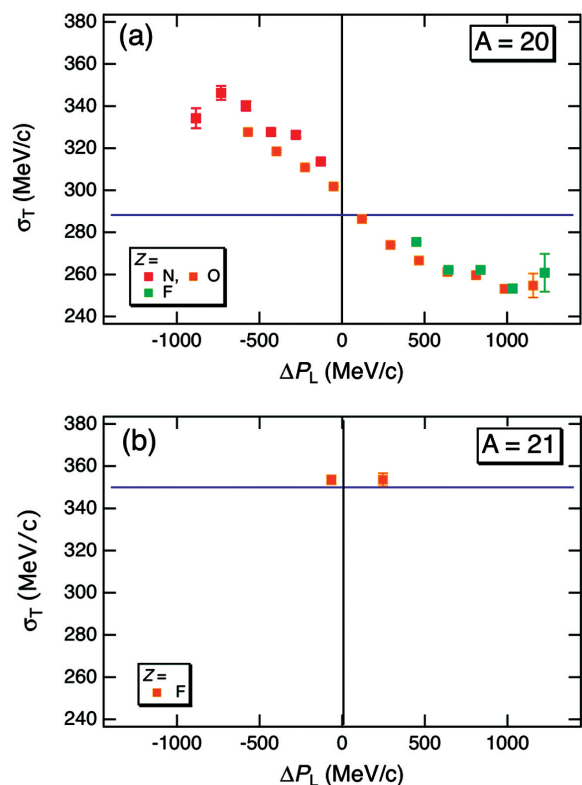


図2: 破砕片の σ_T と P_T の関係。(a) ^{40}Ar (95 MeV/u)+Beから生成された質量数 $A=20$ の破砕片。(b) ^{40}Ar (290 MeV/u)+Alから生成された $A=21$ の破砕片。実線はGoldhaber模型⁽¹⁾による計算結果である。

これに対して290 MeV/uでの測定では、図2(b)のように σ_T が P_L によらず一定となった。このエネ

ルギーで測定した P_L 分布⁶⁾は、他の反応プロセスの寄与が小さいことを示しており、この結果を矛盾なく説明することができる。

さらに解析を進め、図2で示した σ_T と P_L の関係から、ビーム速度 ($\Delta P = 0$) における P_T 分布の広がり求めた。図3は、95 MeV/uでの解析結果をまとめたものである。

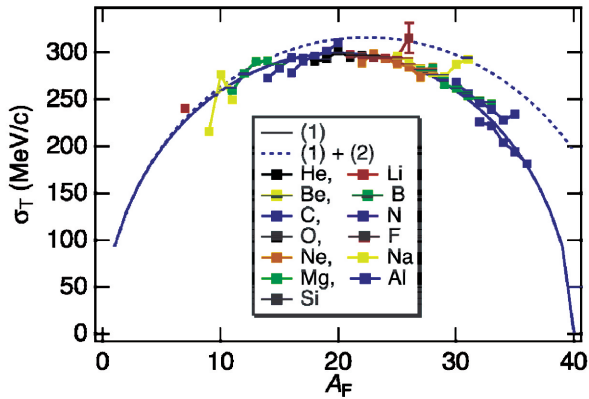


図3: $^{40}\text{Ar}(95 \text{ MeV/u})+\text{Be}$ から生成された破砕片の σ_T と破砕片の質量数の関係。Goldhaber模型⁽¹⁾の計算結果である実線は、解析結果と良く一致している。

図3から、ビーム速度 ($\Delta P = 0$) での σ_T はGoldhaber模型の計算結果と一致することが分かる。つまり、 $\Delta P = 0$ では入射核の軌道の偏向の効果は小さく、 P_T 分布の場合と同様に核内核子のフェルミ運動量のみで説明できることになる。従って、過去に100 MeV/u近辺で観測された P_T 分布の広がり、低運動量側に含まれる他の反応プロセスに起因していることになる。この反応プロセスに関する知見を得るため、 σ_T の P_L に対する変化率 (図2(a)における傾き) k_1 を求めた結果を図4に示す。

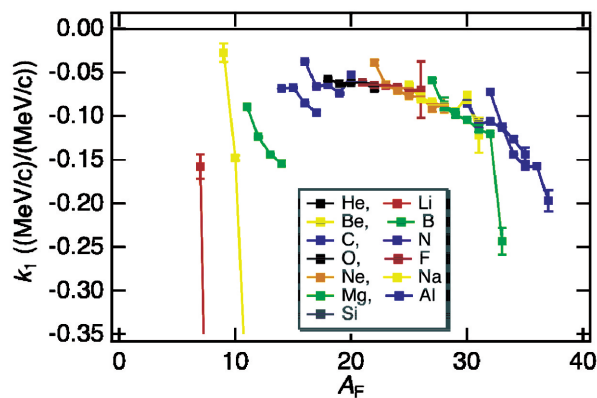


図4: $^{40}\text{Ar}(95 \text{ MeV/u})+\text{Be}$ から生成された破砕片の σ_T の P_L に対する変化率

図4で k_1 が負の値となることから、 P_T 分布の広がり原因となる反応プロセスの混入率が P_L の増加と共に減少することが分かる。また、この混入率の P_L 依存性が、破砕片のA、つまり標的核との反応によって取り去られる核子の数で決まっていることが分かる。 σ_T に関するこの系統性は、今回の測定で初めて観測された現象である。

290 MeV/uでは σ_T が P_L によらず一定 (図2) なので、測定した σ_T の平均値を $\Delta P = 0$ における σ_T とした。すると90 MeV/uの時と同様に、 σ_T はGoldhaber模型の計算結果と一致した。

3.3 Krビームから生成された破砕片の P_T 分布

290 MeV/uのKrビームをC標的に照射して P_T 分布の測定を行った。290 MeV/uのArビームの場合と同様に、破砕片の σ_T は P_L によらずほぼ一定となり、他の反応プロセスの寄与が小さいことを示す結果となった。 $\Delta P = 0$ における σ_T は、図5のようになった。測定された σ_T は、Goldhaber模型の計算結果より小さいだけでなく、異なる系統性を示している。従来のGoldhaber模型は、入射核から取り去られる核子のフェルミ運動量が核子の軌道によらず一定で、等方的であることを前提として破砕片の運動量の広がり説明している。従って、 P_T 分布が P_L 分布よりも狭くなることは、従来のGoldhaber模型で説明することはできない。しかし、実際の原子核では、核内での軌道は核子によって異なり、取り去られる核子の軌道によってはその空間分布や運動量分布に偏りや異方性が生じる。この偏りや非等方性が P_T 分布を狭めている可能性が有る。標的核による軌道の偏向は P_T 分布を広げる方向にはたらくため、今回測定された現象の原因となる可能性は低い。

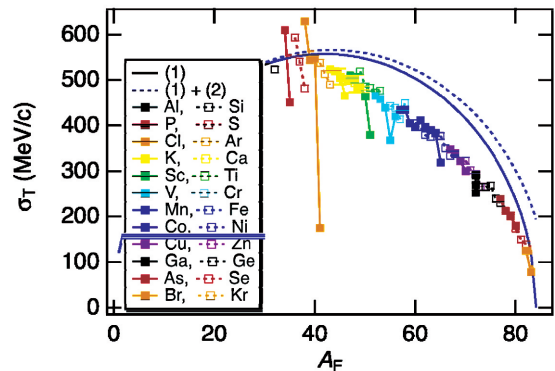


図5: $^{84}\text{Kr}(290 \text{ MeV/u})+\text{C}$ から生成された破砕片の σ_T と破砕片の質量数の関係。破線はGoldhaber模型⁽¹⁾と入射核の軌道偏向の効果⁽²⁾を考慮に入れ

た計算結果である。

3. おわりに

理研と放医研で、100~300 MeV/uで生成される破砕片の P_T 分布を系統的に測定した。測定結果が限られていたこのエネルギー領域において、信頼度の高いデータが蓄積され、破砕片生成の反応プロセスに関して新しい知見を得た。95 MeV/uでは、Arビームから生成された破砕片の P_T 分布の広がり P_L の間で見いだされた関係が、入射核から取り去られる核子の数によって決まることが分かった。290 MeV/uでは、Krビームから生成された破砕片で P_T 分布が P_L 分布より狭くなることが観測された。これらの結果は今回の研究で初めて観測され、破砕片の生成プロセスをより深く理解するために有用な情報であることを示した。今後は測定結果のより詳細な解析や、理論的計算との比較を実施する予定である。

文献

(1) A.S. Goldhaber, “Statistical models of

fragmentation processes”, Phys. Lett. B vol. 53, pp. 306-308, 1974.

- (2) M. Notani et al., “Projectile fragmentation reactions and production of nuclei near the neutron drip line”, Phys. Rev. C vol. 76, 044605, 2007.
- (3) K. Van Bibber et al., “Evidence for orbital dispersion in the fragmentation of ^{16}O at 90 and 120 MeV/nucleon”, Phys. Rev. Lett. vol. 43, pp. 840-844, 1979.
- (4) S. Momota et al., “Momentum distributions and production cross sections of projectile-like fragments”, Nucl. Phys. A vol. 746, pp. 407-410, 2004.
- (5) S. Momota et al., “Systematic Investigation on Momentum Distributions of Projectile-like Fragments at $E/A = 290$ MeV”, J. Kor. Phys. Soc. vol. 59, pp. 1868-1871, 2011.

Momentum Distribution of Reaction Products Produced through Fragmentation Process

Sadao Momota*, Mitsutaka Kanazawa**, Atsushi Kitagawa***, Shinji Sato***

(Received: April 23th, 2012)

*School of Environmental Science and Engineering, Kochi University of Technology
185 Miyanokuchi, Tosayamada, Kami city, Kochi 782-8502, Japan

**SAGA Heavy Ion Medical Accelerator in Tosu
802-3 Hon-dorimachi, Tosu, Saga 841-0033, Japan

***National Institute of Radiological Sciences
4-9-1 Anagawa, Inage-ku, Chiba, Chiba 263-8555, Japan

E-mail: *momota.sadao@kochi-tech.ac.jp

Abstract: Projectile fragmentation process is one of useful processes to prepare unstable nuclear beams. Momentum distribution of reaction products is one of the important probes to investigate the reaction mechanism. Momentum distribution, observed at $E > 1$ GeV/u, has been well understood by means of Fermi momentum of nucleons. At $E = 100 \sim 300$ MeV/u, experimental results has suggested the contribution of a deflection of orbit or multistep process. However, few reliable experimental results have prevented further discussions. Recently, a remarkable correlation between distributions of transverse momentum and longitudinal momentum has been observed by using Ar beam with 95 MeV/u. And the correlation is found to be suppressed in experiment with Ar and Kr beams at 290 MeV/u. The narrowing phenomenon has observed in a reaction with Kr beam and C target. Any previous models cannot give consistent explanation for this interesting phenomenon.