

# ■ 金環食型原子核を経由した多重破碎反応

ハドロン輸送研究グループ ■丸 山 智 幸■

## Multifragmentation through Nuclei with the Annular Eclipse Shape

Tomoyuki MARUYAMA

Research Group for Hadron Transport

We simulate the fragmentation processes in the  $\alpha + \text{Au}$  collisions at a bombarding energy of 5 GeV/u using the QMD approach. We show that the angular distribution of the intermediate mass fragments has a sideward peak when the intermediate nucleus formed by the dynamical process has an annular eclipse shape. It is found that the present simulation explains the experimental results very well.

高速に加速した重い原子核を別の原子核に衝突させると、短時間ではあるが、通常の安定に存在する原子核の状態からかなり離れた高温高密度状態を実現することができる。このような実験を通じて、高温高密度核物質の性質、特にその状態方程式 (EOS) を知ることは最近の原子核物理の主たるテーマの一つである。これは非線形性の強い媒質内核力の性質を知ると言う以外に、超新星爆発や中性子星の性質といった天体物理への応用という側面からも極めて重要な意味を持つからである。

その一つに多重破碎反応実験がある。重い原子核と軽い原子核を衝突させると、重い原子核は一部が破壊されるが、残った残留核は密度は低いが高い温度を持った状態になる。この高温の重い原子核がいくつかのより軽い原子核 (破碎片) に分解する反応を破碎反応という。この破碎反応を分類すると、核子や  $\alpha$  粒子といった軽い粒子を放出する蒸発反応、2つの比較的大きな原子核に分かれる核分裂、それに3個以上の中間的質量の破碎片 (中間質量破碎片, IMF と略記) が一時に形成される多重破碎反応がある。近年、この多重破碎反応が非常に注目されている。この反応が起

るためには一度全体が気化、膨張、分解して再液化するような、液相気相相転移が起きていると考えられているためである。ところが従来の重イオン実験では複数の IMF への分解が、多重破碎反応により一気に形成されるものなのか、それとも核分裂や蒸発反応が何度か複数回起こる事により形成されるものなのか区別できないでいた。

最近、高エネルギー物理学研究所 (KEK) の田中万博氏、京都大学の村上哲也氏らのグループが 12 GeV に加速した陽子や一核子当たり 5 GeV (5 GeV/u) の  $\alpha$  を金原子核 (Au) 等の重い原子核標的に衝突させる方法で多重破碎反応実験を行なっている<sup>1)</sup>。世界の主流である重い原子核を加速させる方法と比べ、この方法では、破碎片の数分布を正確に知ることはできないが、形成される IMF の角分布とエネルギースペクトルを観測することができる。その測定の結果、IMF の種類に依らずその角分布が全て実験室系で  $70^\circ$  の方向にピークを持つ事、IMF が残留核から分離するときのクーロン障壁が非常に小さくなるという二つの事実を発見した。この事は IMF の源となっている反応の中間状態で生成される熱せられた原子核が、中心衝

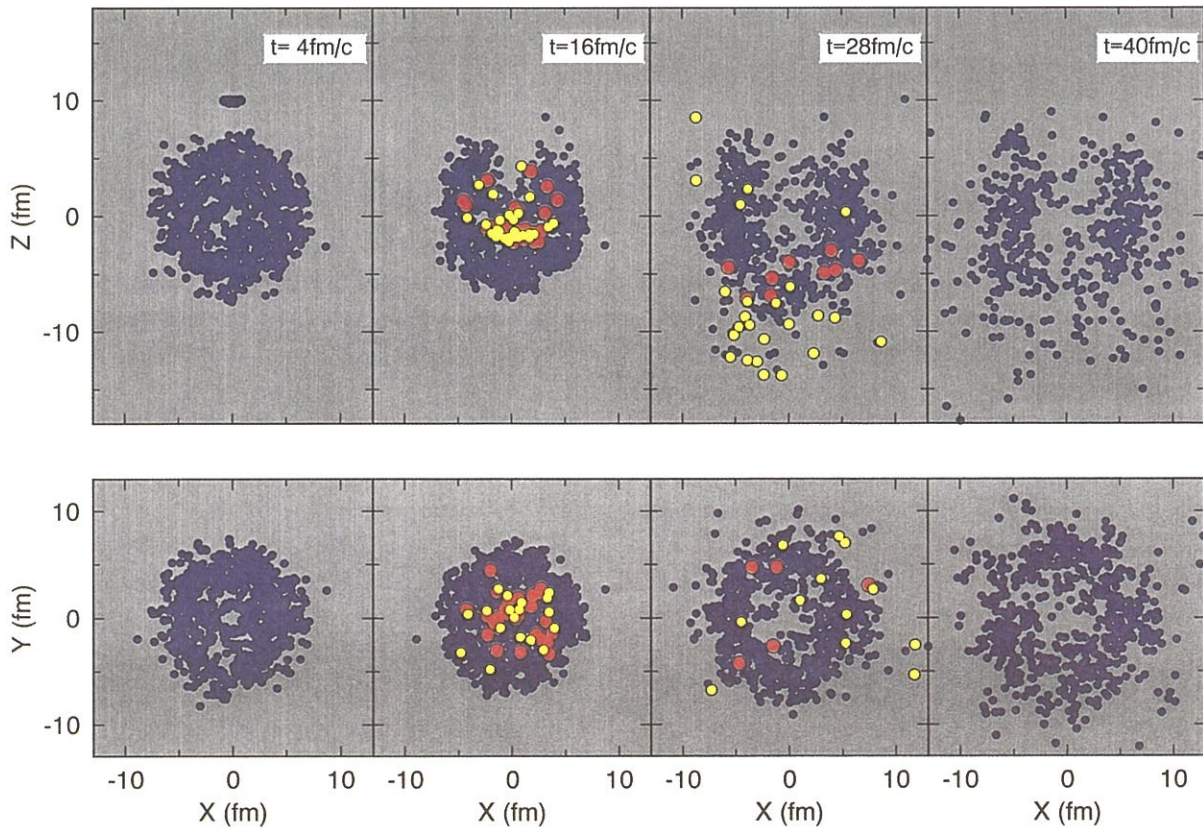


図1  $\alpha$ を5 GeV/uでAu標的に衝突させたときの時刻 $t=4, 16, 28, 40$  fm/cにおける、QMDでの粒子分布の時間発展。青丸は核子、赤丸は核子の共鳴状態、黄丸は $\pi$ 中間子を表す。

突事象では、通常考えられるような球状ではなく何かエキゾチックな形状をしていると予想される。何故ならば、この熱せられた核は反応後ゆっくりではあるが前方へ移動しているはずであり、もしそれが球形で等方的に崩壊するならば、IMFの核分裂は前方ピークでなければならないからである。

そこで我々は量子的分子動力学法 (Quantum Molecular Dynamics, 略してQMD)<sup>2)</sup>を用いてこの反応を数値的にシミュレートすることとした。ここで用いたQMDについて簡単に紹介しよう。原子核反応で用いられる分子動力学法は物性で用いられているものと同様、核子の運動を古典的に解くわけであるが、量子的という枕言葉がついている理由は、第一に核子を点粒子ではなくガウス波束で記述する点にある。原子核を束縛している核力は密度依存性が強く、真空中のものを原子核内で用いることはできない。そこで波束を用いることでスムーズな密度分布を与え、密度依存平均場を記述している。量子的な第二の点は、上記の平均場では記述できない短距離的な相互作用を二体衝突としてカスケード計算の手法で取り入れていることである。さらに、この衝突としては弾性衝突のみで

はなく $\Delta$ 、 $N^*$ 等の核子の共鳴状態への励起や、それら共鳴状態からの崩壊による $\pi$ 等の中間子の生成、その逆過程としての吸収といった非弾性衝突も含んでいる。第三の点は、ガウス波束を用いて位相空間の占有率を計算し、この二体衝突によって運動量に変化した核子についてパウリ・ブロッッキングを判定し、核子のフェルミ統計性を取り入れていることである。

次に、シミュレーションの結果を示そう。今回は、素過程が比較的簡単な5 GeV/uで入射した $\alpha$ がAu標的に衝突する反応のみを取り扱うことにした。図1に、衝突係数 $b=0$  fmの中心衝突でのバリオン(核子、 $\Delta$ 等)および中間子の時間発展を示す。シミュレーションを20回行なったときの各時刻での粒子の位置を点でプロットし、黒が核子を、赤が $\Delta$ 、 $N^*$ 等の核子の共鳴状態を、黄色が $\pi$ 中間子を表している。長さの単位はfm ( $1\text{ fm}=10^{-13}\text{ cm}$ )、 $z$ 軸はビームの方向を示しており、 $xz$ 平面は反応平面を表している。図の上部は $|y| \leq 1$  fmの範囲に入る粒子を反応平面に射影した図であり、下部は $|z| \leq 1$  fmの範囲に入る粒子を $xy$ 平面に射影してビーム方向から眺めたものである。図の上端に書いてある“ $t$ ”は時刻を表し

ており、左から右へ時間が発展している。

図上段を見ると、ビームの $\alpha$ がAu標的に衝突し、核子を励起させパイオンを生成させながら標的核にメリ込んでいっているのが分かる。そして、図下段では、衝突により標的核の中心部に穴があき、残留核はそのまま横方向へ膨張していく。我々はこの中間状態で形成された原子核をその形状から金環食型原子核と名付けた(本誌表紙も参照)。この過程を通じて、残留核の核子はビームと垂直方向に運動量を大きく受け取り、残留核全体としてはゆっくり前方へ移動しながら横方向へ膨張する。そして、この破碎反応は明らかに多重破碎反応と言えるであろう。

次に、IMFの角分布を調べて見よう。IMFの定義は人によって異なるがここでは原子番号 $Z$ が $3 \leq Z \leq 20$ の範囲にあるものとしてとることとする。一種類の破碎片だけについて十分な統計を得るのは非常に大変であるため、ここでは全てのIMFの和を計算した。また、中心衝突付近の事象のみに関心があるので、衝突係数は $b \leq 3$  fmの範囲に制限した。図2に終状態で現れる陽子とIMFの角分布を示した。陽子は前方にピークを持つが、IMFは横方向にピークを持ち

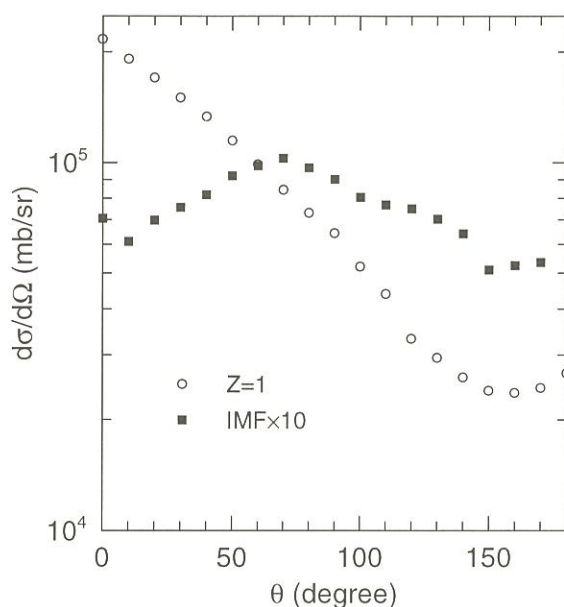


図2 衝突係数を、 $b < 3$  fmに限定したときの終状態における陽子とIMFの角分布。白丸は陽子の結果を、黒四角はIMFの結果を10倍したものを示す。

実験と一致している。

現段階で断言することはできないが、ここで研究した反応では中間状態で金環食型の原子核が形成されている可能性が非常に高い。クーロン障壁が低くなっているという実験結果もこのことの間接的証拠となっている。

現象をより理解しやすくするため、空中に浮いている大きな水玉に鉄砲玉を打ち込む状況を想像しよう。鉄砲玉の通過によって水玉の一部は小さい水滴となり前方へ飛ばされるであろうが、通り道はすぐに周りの水でうまってしまうだろう。残った水滴は表面が大きく振動するだろうが、全体として丸いまま残るはずである。ところが、もし鉄砲玉が通過することによって水玉が全体あるいは通り道の周辺が気化してしまったら、鉄砲玉の通り道は水で埋まること無く、水玉全体は横に広がってしまうであろう。

我々が研究対象とした現象も同様である。もし、核内の平均場が、衝突によってもたらされた横方向への力よりも強く、残留核全体が液化したままならば、穴が開いても回りの核子がすぐに埋めてしまう。横方向への膨張は、標的核の気化に対応すると思われる。

もちろん、IMFの角分布とクーロン障壁の低下だけの実験情報で、液相気相相転移まで結論することは危険である。現在KEKグループは、我々の提示した結果をもとに、IMFの源となる中間状態での原子核形状を確かめるため、広い角度で複数の破碎片を同時に計測する新しい実験を進めている。この実験によって直接的証拠が得られれば、多重破碎反応が世界で始めて認知された事になる。

理論家サイドとして、現在のQMD模型では、実験情報を直接核物質の状態方程式に定量的に反映させることができない。我々は無限核物質を記述できるようにQMDを改良し、反応の結果と核物質の性質とが直接的に対応できるよう模型の拡張を試みている。

## 参考文献

- 1) K. H. Tanaka et al., Nucl. Phys. A 583, 581 (1995); H. Ochiishi et al., KEK Preprint 95-37.
- 2) J. Aichelin, Phys. Rep. 202 (1991) 233; K. Niita et al., Phys. Rev. C 52 (1995) 2620.