

## 量子の世界のビリヤード実験

～偏極陽子と原子核衝突反応で驚きの左右非対称性を発見～

中川 格  
Nakagawa Itaru

### 1. はじめに

ビリヤードで突き玉に反時計周りの回転を与えて標的玉に正面衝突させ、突き玉が右側に散乱されて標的玉は左側に弾かれる、そんな場面を思い浮かべてみてください(図1)。さて、この標的玉をビリヤード玉ではなくボーリング玉にした場合、突き玉はどう散乱するのでしょうか？ボーリング玉の方が遥かに重いから、大きな反跳を受けて右側にもっと大きな散乱角で散乱するだろう、と予想できます(図2)。

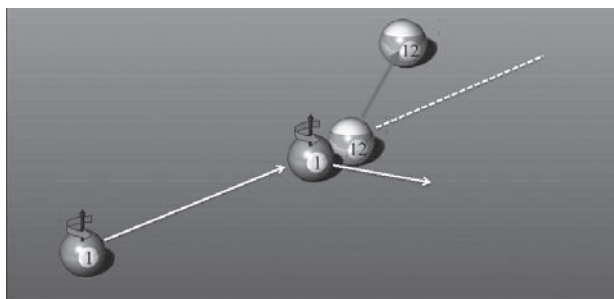


図1 突き玉に垂直方向上から見て反時計回りに回転を与えて標的玉に正面衝突させると、この回転力によって突き玉は右側に弾かれる

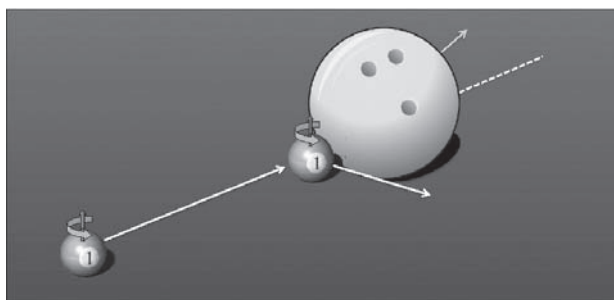


図2 突き玉の回転はそのままに、標的玉をビリヤード玉の代わりにボーリング玉にして同様の正面衝突をさせる。散乱方向の左右を決めるのは突き玉の回転なはずなので、やはり突き玉は右側に弾かれると予想される

こんな現象を高エネルギー偏極陽子と原子核衝突反応で実験してみたら、この一見外しようのない盤石な予測はなんと見事に覆され、著者らは非常に驚きました。予想に反して、逆方向の左側に散乱されたのです。突き玉の回転は同じで、標的玉が重くなっただけのはずなのに、何故突き玉の散乱が左右逆転するのでしょうか？

### 2. 高エネルギー偏極実験と前方中性子生成非対称性

この奇妙な現象は、米国ブルックヘブン国立研究所(BNL)のRHIC衝突型加速器(図3)に設置されたPHENIX実験で発見されました。2015年に行われた衝突エネルギー200 GeVの高エネルギー偏極陽子と原子核の衝突実験は、世界初の試みです。偏極とは陽子の向きを定義するスピンの向きを揃えた状態で、ビリヤードの例では、突き玉が常に同じ回転軸と回転方向の自転を保っていることに相当します。

この実験では、偏極陽子の進行方向に衝突点から



図3 米国ニューヨーク州、ブルックヘブン国立研究所の「RHIC」衝突型加速器

世界初の重イオン衝突型加速器で、世界唯一の偏極陽子衝突型加速器。写真提供：BNL

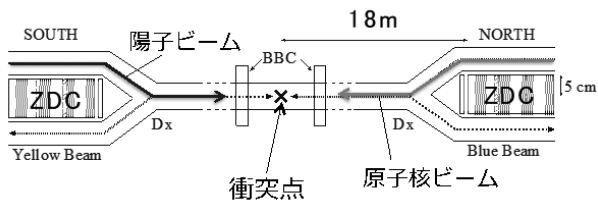


図4 PHENIX 検出器群の実験装置レイアウトと衝突点

18 m 下流に設置されたゼロ度カロリメータ (ZDC) で中性子を観測しました (図4)。散乱前後で陽子から中性子に変わりますが質量がほぼ変わらないので、ここでは散乱後の突き玉に相当するのが中性子と考えてください。この中性子が左右どちらに多く観測されるか、左右非対称度を測定しました。古典力学では同じ衝突条件なら常に同じ散乱になりますが、量子の世界では確率に支配されますから、非対称度はどちら側に何%多く観測されるかで定義されます。ビリヤード玉同士の衝突に相当する上向き偏極陽子と無偏極陽子衝突実験では、元々の偏極陽子が持っていたエネルギーの多くを引き継ぐ中性子を選ぶと、図5(a)のように5%程度中性子が右側に多く観測されることが先行実験から知られています<sup>2,3)</sup>。このような反応は陽子同士がガチンコ正面衝突した時ではなく、むしろすれ違う際にギリギリ「かするような」衝突をした際に起こります。この時典型的に+1荷の間子 $\pi^+$ を交換し、偏極陽子は中性子になります。ただし有限の非対称度を持つためには、生成される中性子のスピンの向きが上向きと下向きのそれぞれの振幅の干渉項が有限の位相を持たなければなりません。強い相互作用を記述する Regge 理論<sup>\*1</sup>によると、前述の $\pi^+$ と $a_1$  Reggeon との干渉で5%の非対称度はほぼ説明できました<sup>4)</sup>。この理論の枠組みでは、偏極陽子が衝突する相手が陽子であろうと原子核であろうと、図5(b)の点線で示されるように中性子の左右非対称性はあまり変わらないと予測していました。ビリヤードの標的玉がビリヤード玉からボーリング玉になっても、「左右非対称性を引き起こす原因である突き玉の自転が変わらないのだから、突き玉はやはり右側に弾かれるはず」と同じような理屈です。

\*1 摂動論的量子色力学 (pQCD) が適用できない非摂動領域で、高エネルギー散乱過程を現象論的に記述する理論。

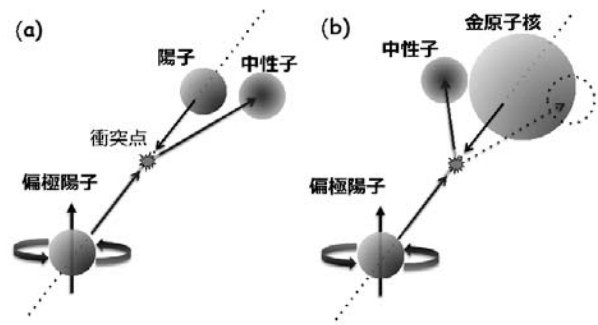


図5 (a)上向きスピン偏極陽子と非偏極陽子衝突の前方中性子生成反応 (b)上向きスピン偏極陽子と金原子核衝突の前方中性子生成反応

(a) 右側に5%多く中性子が生成されます<sup>2,3)</sup>。(b) Regge 理論では(a)のケースと同様点線のように右側に多く偏ると予測していましたが、予想に反し中性子が左側に多く生成されるのが観測されました<sup>1)</sup>

### 3. 偏極陽子と原子核衝突の予想外の結果

そこで偏極陽子とアルミニウム (質量数 27)、及び金原子核 (質量数 197) との衝突で、偏極陽子のほぼ進行方向の中性子生成量の左右非対称性を測定しました。その結果を図6に示します。中性子以外は何も測定しないこのような測定を包括的測定と呼びます。横軸は偏極陽子との衝突相手の質量数、縦軸は中性子生成左右非対称性で、上向きスピンの陽子に対して中性子が左側により多く生成される場合を正、右側により多く生成される場合を負にとりました。質量数 $A=1$ の点は偏極陽子と無偏極陽子衝突の非対称性で、5%程右側に多く中性子が多く生成されることを示しています。 $A=27$ の点はアルミニウム原子核が衝突相手の際の非対称性で、右側に1%程度多く生成されることを示しています。Regge 理論では中性子が原子核のポテンシャルから脱出する際に、終状態相互作用をして非対称性はいささか失うだろうと予測している<sup>5)</sup>ので、定性的にはギリギリ想定範囲内です。さて問題は $A=197$ の金原子核の場合です。中性子生成非対称性はなんと符合を変え、非対称性は正符合に巨大な15%を示しています。まさに予想外の観測結果で、著者らは俄かには信じられませんでした。陽子同士の衝突の時には右側に5%程中性子が多く生成されますが、陽子と金原子核の衝突では左側に15%中性子が多く生成されるというのです。一体何が起きているのでしょうか？

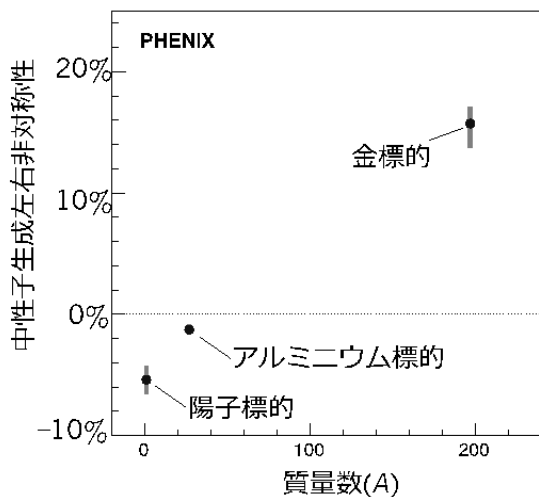


図6 観測された生成中性子の左右非対称性<sup>1)</sup>

横軸は横偏極陽子が衝突する原子核の質量数A。縦軸は生成中性子の左右非対称性の大きさで、上向きの陽子スピンの対し、左側に中性子が飛び出す場合が正、右側に飛び出す場合が負。A=1, A=27, A=197の赤点はそれぞれ偏極していない陽子、アルミニウム原子核、金原子核を標的としたときのデータ

この謎を紐解くヒントを得るために、測定データを更に詳しく観ていきます。図7に示すように、衝突点から140 cmの距離に円筒型のBeam-Beamカウンター（BBC）と呼ばれる荷電粒子検出器があります。筒の内側は衝突点への入射ビームを通すために空洞になっており、衝突点からほぼ0°に生成されて出てくる中性子もこの穴を通してZDCに検出されます。偏極陽子の進行方向に対して、ZDCに検出される中性子の角度が0.13°以下であるのに対し、BBCの角度はやや大きく2.3~5°開いています。中性子がZDCで検出された際に、同時にこのBBC検出器に荷電粒子が検出（同時計数）されたかどうかで分類してみると、図8のようになりました。BBCと同時に計数された事象は、非対称性は質量数が大きくなるごとにほぼ線形に小さくなり、驚くことに金原子核との衝突では符合の逆転はおろか非対称性もほぼ失われてしまいました。一方でBBC検出器には何も検出されない（非同時計数）という逆条件を課した場合は、原子核衝突の非対称性は正に大きく振れ、正負の逆転は陽子とアルミニウム原子核の間で起こり、金原子核の場合ではなんと25%程に達します。BBCに荷電粒子が同時計数されるか否かでこの劇的な非対称性の違いが生まれることは、このミステリアスな謎を紐解いていく上で大きな手がかりとなりそうです。

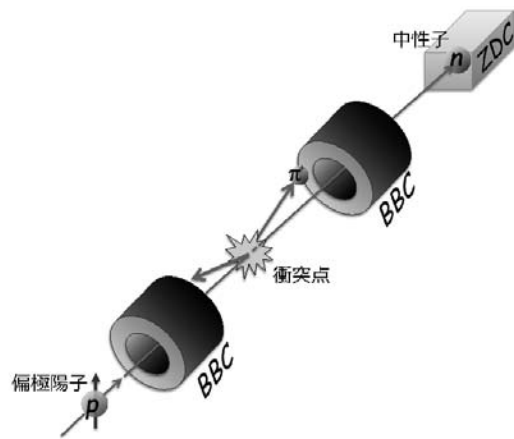


図7 衝突点、BBCとZDC検出器のレイアウト

中性子がZDCに検出された時、同時に荷電粒子が衝突点上流、下流の両方に検出された場合を同時係数事象と呼ぶ

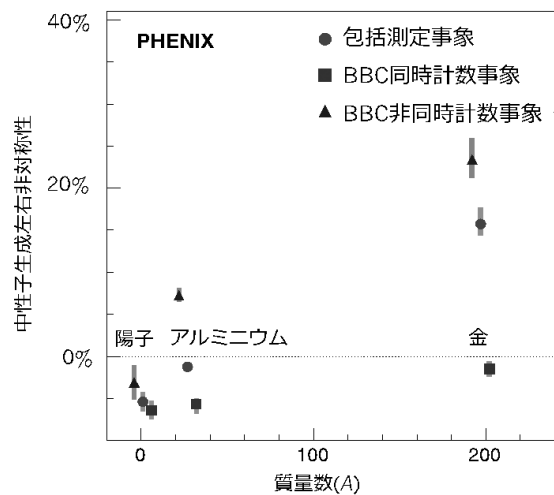


図8 包括測定（図6と同じ）及び、BBCとの同時係数、非同時係数事象の分類結果

## 4. 考察

さて現時点でRegge理論では逆立ちしても符合を変えるメカニズムは思い浮かばないので、この理論では想定してない効果を考えてみます。例えば原子核の特殊な表面構造や、原子核には中性子が含まれているのでアイソスピン非対称な効果、又は陽子に比べて原子核は電荷が大きいため電磁相互作用の効果等。その内、ここでは電磁相互作用について考えてみます。元来原子核は陽子の電荷に起因した電磁場に覆われており、この電磁場は高エネルギーでは豊穡な仮想光子源となり、衝突の際にこの仮想光子を交換する電磁相互作用が起こり得ます。Regge理論が計算している強い相互作用は短距離力であるの

に対し、電磁相互作用は長距離力です。ここでは前述の通り「かするような」散乱過程が支配的なので、電磁相互作用の作用範囲に適合します。更に金原子核の原子番号 79 は、強い相互作用に比べて 2 桁小さい電磁相互作用の結合定数をおおよそ相殺できる電磁場の強さが期待できそうです。ビリヤードの標的玉がボーリングボールだと思っていましたが、実は電荷を帯びた鉄球だった。これに弾かれる突き玉の運動を予測するためには、電磁力の作用も同時に考慮しなければならぬ、ということです。

原子核が電荷を帯びているのは常識で、なぜこの効果を見落としたのか不思議に思うかもしれません。実は強い相互作用では偏極陽子が  $\pi^+$  を放出することで中性子になりますが、電磁相互作用を媒介する光子は電荷を運びません。したがって陽子はこの過程では中性子にはなれないので、電磁相互作用の効果を想定していなかったのです。そこが盲点でした。しかし核子当たり 100 GeV の運動エネルギーに加速された原子核の電磁場からわずかに  $\pi$  中間子の質量程度の仮想光子を偏極陽子が受け取れば、 $\pi^+$  を生成して中性子になることができます\*<sup>2</sup> (閾値  $\pi^+$  生成反応)。更に 300 MeV 程度の仮想光子を受け取れば  $\Delta$  励起され、その崩壊モードの 1 つとして  $\pi^+$  と中性子が生成されます。前者と後者は偏極陽子と中性子の間に、それぞれスピンの非反転、反転を伴うので干渉します。したがって有限の非対称性が期待できます。

実際に電磁相互作用モデル\*<sup>3</sup> を使い、モンテカルロを駆使して実験をシミュレーションしてみると、電磁相互作用を介した反応で生成される  $\pi^+$  中間子は偏極陽子進行方向へのローレンツブーストが激しく、そのほとんど (94%) が中性子と同じく BBC の穴を通過して BBC に検出されないことがわかりました。つまり電磁相互作用に起因する非対称性は BBC に同時係数されないデータに強く現れ、BBC に同時係数される事象にはほとんど現れないと予測されます。更にこのモデル計算では前述の閾値通り

\*<sup>2</sup> 仮想光子はエネルギーが上がると共に指数関数的に減少します。 $\pi$  中間子質量  $\sim 300$  MeV 程度の低いエネルギーの仮想光子フラックスは非常に多く、 $\Delta$  励起の断面積が非常に大きいので、 $\Delta$  よりも高励起状態の影響は少ないと考えられます。

\*<sup>3</sup> 原子核の電磁場のモデリングには STARLIGHT モデル、光核  $\pi$  生成反応には Mainz Unitary Isobar (MAID2007) モデルを採用しました。

の  $\pi^+$  生成及び  $\Delta$  励起のスピン非反転と反転の干渉効果により正に 36% の非対称性を持つと予測します。Regge 理論が予測する強い相互作用に起因する非対称性が負の  $-5\sim 0\%$  程度であるのに対し、電磁相互作用に起因する非対称性は正でかつ圧倒的に大きいです。そこで陽子、アルミニウム原子核、金原子核それぞれについて、電磁相互作用の強さに原子番号  $Z$  の重みをつけて強い相互作用と競合させると、包括的測定の実験値はほぼ再現できました<sup>6)</sup>。陽子は  $Z$  が小さいので電磁相互作用がほとんど寄与しませんが、原子番号が増加するにつれて電磁相互作用が強くなり、非対称度が正にだんだん大きくなると考えられます。

## 5. おわりに

人類史上初の高エネルギー偏極陽子と原子核衝突実験で、このように超前方に生成される中性子に全くの予想外な左右非対称性が観測され非常に驚かされました。この予想外な振る舞いは、偏極陽子と陽子衝突の実験結果をうまく説明する強い相互作用に加えて、電磁相互作用による効果を考慮することによって、実験値を再現することができました。しかし原子核はとても複雑で、ボーリングボールではなく鉄球を考えただけで本当に説明がつくのか、そもそも計算で再現したのは陽子、アルミニウムと金原子核の 3 点だけで、単なる偶然ではないのか、との反論は免れ得ません。電磁相互作用による効果が強く効いているのであれば、左右非対称性の大きさは原子番号と比例関係にあるはずなので、今後標的原子核の種類を増やすことで、この仮説の検証を重ねていきたいと思います。

## 参考文献

- 1) C. Aidala, *et al.*, (PHENIX Collaboration), *Phys. Rev. Lett.*, **120**, 022001 (2018)
- 2) Y. Fukao, *et al.*, *Phys. Lett.*, **B650**, 325 (2007)
- 3) A. Adare, *et al.*, (PHENIX Collaboration), *Phys. Rev.*, **D88**, 032006 (2013)
- 4) B. Z. Kopeliovich, *et al.*, *Phys. Rev.* **D84**, 114012 (2011)
- 5) B. Z. Kopeliovich, *et al.*, [hep-ph] arXiv:1702.07708
- 6) G. Mitsuka, *Phys. Rev.*, **C95**, 044908 (2017)

((国研)理化学研究所仁科加速器科学研究センター  
延興放射線研究室)