



原子核の虹に副虹の存在を発見

研究成果のポイント

- ・これまで原理的に存在しないと考えられていた原子核の虹における副虹の存在を発見。
- ・原子核の間に働く力に関する長年の謎を副虹の発見により解決。

研究成果の概要

地上の虹と似た虹が極微の原子核の世界でも見えます。これは日本初のノーベル賞受賞者湯川秀樹博士が解明した強い核力で入射粒子が大きく曲げられる屈折のみ（反射回数がゼロ）で生じ、地上虹では起こりえない種類の虹（ニュートンのゼロ次の虹）です。反射が生じないので気象虹のような 2 番目の虹（副虹）は原理的に生じないと考えられていました。私たちは屈折のみでも 2 番目の虹（副虹）が生ずることを理論的に示し、実験データでいままで理解できずに謎とされてきた、酸素の原子核を炭素の原子核に高速の 300 メガ電子ボルト前後のエネルギーで衝突させたときに見える原子核の虹（核虹）の暗い所にかすかに見える縞模様の明るい部分が 2 番目の虹（副虹）であることを示しました。紀元前のアリストテレス以来 2,000 年以上ある虹の研究の歴史において屈折のみで 2 番目の虹が生ずるとするのは虹の原理においても初めての発見です。

論文発表の概要

研究論文名 : Evidence for a secondary bow in Newton's zero-order nuclear rainbow
(ニュートンのゼロ次の虹である核虹に副虹の存在を発見)
著者 : 氏名(所属) 大久保茂男(大阪大学, 高知女子大学(高知県立大学)), 平林義治(北海道大学)
公表雑誌 : Physical Review C
公表日 : 米国東部時間 2014 年 5 月 8 日(木)

研究成果の概要

(背景)

空に見える美しい虹は紀元前 4 世紀にアリストテレス(ギリシア)によって初めて研究され、17 世紀にフランスのデカルトによりその仕組みが、イギリス人ニュートンにより美しい色の仕組みが解明され、屈折と内部反射による原理が明らかになりました。20 世紀になり虹は物理学の電磁波の理論で詳しく理解されました。水滴内で反射が起こらず屈折のみ(反射回数がゼロ回)で起こる虹は現代の電磁波理論でも原理的に存在しませんが、ニュートンはその存在を信じていてニュートンのゼロ次の虹と呼ばれています。20 世紀後半、屈折のみで起こる虹が、日本人初のノーベル賞受賞者である湯川秀樹博士が解明した強い核力という原子核と原子核の間に働く力によって、原子核という極微の量子的世界で発見されました(核虹)。原子核は雨粒の 1 兆分の 1 と小さく水滴のような内部反射が起きないため 2 番目の虹(副虹)は存在しないと考えられていました。

陽子と中性子が集まってできている酸素や炭素などの原子核の間に働く力も陽子や中性子などの間に働く力のまとまりとして理解できることが分かってきました。ヘリウムの原子核であるアルファ粒子や酸素の原子核を用いた散乱・衝突実験で原子核に虹が見つかり、湯川の核力にもとづく原子核間の力を構成することでよく理解されました。原子核の虹に色はありませんが、入射した原子核がある特定の角度に特別に強い強度で集中的に集まり、空の虹と同じく明るくなり、暗い部分とはっきり区別されます。この虹の見える角度（虹角）を正確に記述するかどうかで原子核の間に働く力をあいまいなく一意的に決定できることが知られ、核虹の研究は原子核間に働く力をあいまいなく一意的に決定できることが知られ、核虹の研究は原子核間にはたらく力を決定する力を決定するのに、さらにはそれを用いて原子核の内部構造を探ることができるので、核反応研究、核構造研究において大変重要であることがわかってきました。アルファ粒子や酸素原子核は球形で固いので原子核の散乱実験で核虹がきれいに見られ理論的にも湯川の核力に基づいて見事に説明されました。1990年代末頃から行われた酸素原子核を炭素原子核に衝突させる系統的实验により核虹が発見され、同様な理論的方法で理解することができます。ところが300メガ電子ボルト前後の高いエネルギーでの実験で見つかった核虹は、それまで威力を発揮した理論的方法での計算（図1の青線）では40度付近の従来から知られている小さい角度に生ずる核虹はよく説明できるものの、60度より大きい角度では実験データ（図1緑点）と理論計算（図1青線）の間に著しくずれが生じ説明するのが困難なことが判りました。

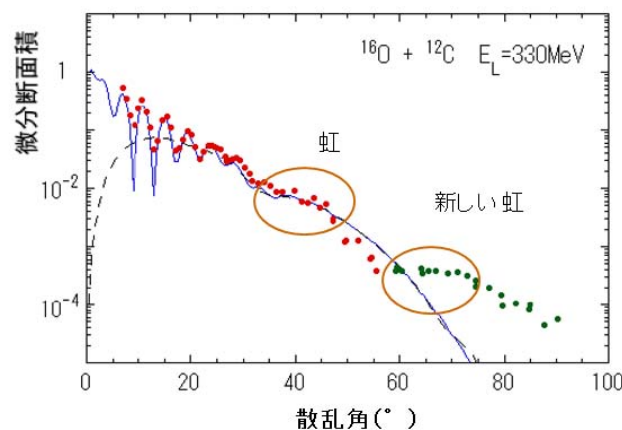


図 1 酸素と炭素の散乱実験と従来の計算結果

これまで成功してきた湯川核力から構成された核間に働く力は、多くの原子核構造研究、核反応研究、虹散乱研究で成功してきたのに、なぜ酸素原子核と炭素原子核の300メガ電子ボルト付近での衝突のみ説明が困難かは長いあいだ謎のまま残されてきました。私たちは発想を大きく変えた次に述べる新しい精緻な方法で取り組み、40度付近の核虹（主虹）に比べ強度が一桁以上弱い虹の暗い部分に見られるわずかに強度が強く（図1の70°付近）ほのかに明るい部分が第2番目の虹（副虹）に他ならないとの結論に達しました。

（研究手法）

多くの理論的方法は原子核が丸いとして原子核間に働く力を湯川の核力から構成します。そしてこの方法は多くの場合に成功を収め、酸素と炭素原子核で見られる虹の説明でも比較的低いエネルギーでの核虹の説明に成功してきました。しかし、炭素原子核は球形ではなくオムスビ（おにぎり）のように扁平の正三角系をしていることが知られています。球形でない原子核はわずかの力でも回転運動を起こします。さらに丸い酸素原子核も炭素原子核もぶよぶよアメーバのように揺らぐ振動運動も起こします。私たちは炭素原子核の扁平正三角形の変形とそれによる回転運動、振動運動、さらに丸く

て固い酸素原子核の振動運動をも精確に取り入れ、かつ酸素原子核と炭素原子核中の陽子と中性子の分布を正確に計算した密度分布を用いました。さらに湯川の核力として密度ごとに変化する密度依存性を取り入れたもっとも精確な核力を用いた精密計算を行いました。

(研究成果)

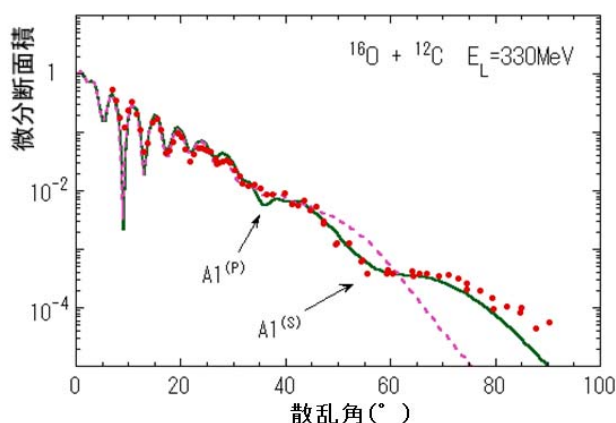


図 2 精密計算による結果

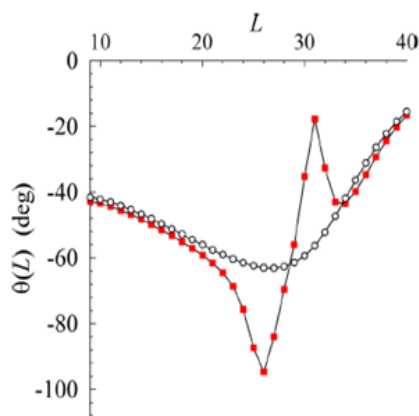


図 3 偏向関数

計算結果は、40度付近の核虹(図2のA1(P)の右の山)とともに70度付近に見える微かな明るい部分も再現することに成功しました(図2緑線)。図3に示されている偏向関数とよばれる入射粒子がどのような角度に曲げられるかというを示すグラフの分析から虹が2つ生じていることが判明し、70度付近の微かな明るい部分が第2番目の核虹であることがわかりました。図3での曲線でおおまかには谷が何個あるかが虹の個数に対応します。従来の理論や教科書では黒丸で結ばれた線のように1個の谷にしか出ませんが、赤い四角で結ばれた線で示されているように私たちの精密計算では炭素原子核の回転が主な原因となって2個出ます。炭素の回転状態が絡んで2番目の虹が生じていることは、図3でこの効果を切り離すとピンクの点線で示すように40度付近の主虹は表せるが、70度付近の振る舞いがまったく表せないことからわかります。

本研究における大きな成果は、気象虹に存在する内部反射のメカニズムがないためその存在がまったく想像さえされなかった原子核において2番目の虹である副虹が存在することを発見したことです。そのメカニズムは従来の反射ではなく強い核力による屈折のみによって引き起こされていることが明らかにされました。この副虹の発見は人々が考えもしなかった虹の新しい仕組みの発見でもあります。この研究を通じて、酸素と炭素の原子核の間に働く力の謎もとけ、新しい研究の道が開けました。原子核の虹の角度を正確に決めることで原子核の間に働く力があいまいさなく決まります。この力を使って核反応や核構造を研究する道が大きく開けようになりました。

(今後への期待)

以上より、我々の手法による核の虹現象のより深い理解と核反応、核構造への広い応用が期待されます。

お問い合わせ先

所属・職・氏名：北海道大学情報基盤センター 准教授 平林 義治(ひらばやし よしはる)

TEL：011-706-3545 E-mail：hirabay@iic.hokudai.ac.jp

所属・職・氏名：大阪大学核物理研究センター 研究員 大久保茂男(おおくぼ しげお)

E-mail：ohkubo@yukawa.kyoto-u.ac.jp

