

三体核力

—実験からのアプローチ

関口仁子

せきぐち きみこ
東京工業大学理学院物理学系

物質のもととなる原子の中心には原子核が存在し、原子核を構成する陽子と中性子の間には核力と呼ばれる力が働きます。核力を理解し、核力によって束縛される原子核を理解する、これは原子核物理学の長年に渡る大きな課題の1つとなっています。21世紀に入ってから20年、この課題への挑戦が大きな展開をみせています。なかでも「三体核力」という核力が原子核の形成には不可欠であるという新たな視点が生まれたことは注目すべきでしょう。本稿では、三体核力に関わる研究の歴史的な背景、そして三体核力の実証がどのような形で進められたのかについて述べます。

原子核とは？

原子核は、1911年にイギリスのラザフォードによって発見されました。その描像は「電子と共に原子を構成する物質」であり「原子の中心に存在している」というものです。原子核の端的な特徴は、(1)原子のサイズの10万分の1程度の大きさで約 10^{-12} cm程度であること、(2)原子の質量の99%以上を原子核が担っていること、(3)正の電荷をもつ陽子と電荷をもたない中性子で構成されていること、が挙げられます。このように、原子核の中では数多くの陽子と中性子が非常に狭い空間に閉じ込められていることから、我々はこの特徴をもって、原子核を「真空下にある超高密度な物質」と呼んでいます。なお、この「超高密度」を実現している系は、原子核と中性子星の中心部付近であると考えられています。そのような事情で、宇宙で起きている現象と原子核は研究対象として相補的な関係にあります。

原子核を形作る力:核力

20世紀初頭の多くの物理学者の興味は、原子核を形作る核力がどのように記述されるか、にありました。なぜなら、当時わかっていた力である重力と電気力(クーロン力)では、陽子と中性子を結合させることができなかったからです。重力や電気力では、まず2つの粒子の間で働く力、即ち二体力を考えます。核力に関しても、陽子と中性子の間に働く二体力がどのように記述されるのが最初の課題となるのですが、重力や電気力は無限遠の距離まで力が到達するのに対し、核力の到達距離は 10^{-13} cm程度と極端に短いであろうという予測、さらに中性子は電荷をもたない粒子であるという発見などがあり、陽子と中性子の結びつきを説明するための新しい理論が要請されたわけです。

核力の金字塔となる理論は、1935年に湯川秀樹によって打ち立てられました。湯川は、陽子と中性子の間で「中間子」と呼ばれる仮想的な粒子を交換することで非常に強い力が生まれ、陽子と中性子を狭い空間に閉じ込めている、と説明しました。この湯川の中間子交換理論は、核力の本性が自然界の4つの力*1の1つである「強い力」にあることを初めて示すものでした。後に陽子、中性子、そして中間子は、素粒子であるクォークで構成されることが明らかになりますが、クォーク間に働く「強い力」から第一原理的に核力を記述することについては、今なお大きな研究課題とな

*1—素粒子の間に働く4つの基本的な相互作用をこのように呼ぶ。強い力の他に、重力、電磁気力、弱い力がある。

っています。

さて、湯川の記述した核力は、陽子と中性子(以後、総称して核子と呼びます)という原子核を構成する2つの粒子の間に働く二体力(二体核力)として理解されます。そしてその後も、核力は、湯川が提唱した中間子交換理論を基礎とする二体核力として研究・展開されてゆくことになります。

● 三体核力は存在するのか？

「はたして原子核は2つの核子間に働く二体核力だけで理解できるのか？ 三体核力も存在するのではないか？」という議論は、実は湯川が中間子交換理論を唱えた1930年代から始まっています。三体核力とは、3つの核子が存在することで初めて働く核力のことで、二体核力の和で表すことはできません。1957年には藤田純一と宮沢弘成による三体核力の理論が発表され¹、その後も様々な理論モデルが提案されてきましたが、実験的な検証は難しい状況が長く続きました。

三体核力の効果を直接、定量的に議論するためには、いくつかの条件が整わなくてはなりません。1つ目は二体核力が確立していること。2つ目は、二体核力を用いて3つの核子で構成される3核子系を厳密に記述する理論とそれにもとづく計算があること。3つ目は、二体核力と三体核力の効果を区別できるような高精度な実験データがあることです。

21世紀が始まる頃、これらの条件が整い始めます。まず、湯川の中間子交換理論を基礎として理論構築されてきた二体核力は、約4000点におよぶ2核子系(陽子と陽子との散乱、陽子と中性子との散乱など)の実験データを極めて高い精度で記述する段階に至ります。二体核力の確立です。さらに計算機の高速化を背景に、この二体核力を用いて3核子系を厳密に記述する理論計算が実現され始めます。その結果、二体核力のみでは説明できない事実が見え始めてきたのです。

● 重陽子と核子との散乱による 三体核力の実証

1990年代以前、三体核力の存在を唯一示唆していたのはトリチウム(陽子1個、中性子2個からなる3核子系の原子核)の質量で、理論計算の精度が低いながらも、二体核力を用いた理論計算と実験値とでは約10%の差があることが知られていました。三体核力は二体核力に比べて圧倒的によりどころとなる実験情報が少ないことから、当時の理論モデルは藤田・宮沢型の三体核力を基礎とし、トリチウムの質量に合わせるパラメータを有する形で構築されていました。このため、三体核力については、他の3核子系、とりわけ三体核力の精緻な理解に不可欠な重陽子と核子との散乱による検証が必要である、と専門家間で強く認識されていました。

重陽子(陽子1個、中性子1個からなる原子核)と核子との散乱は、3つの核子で構成される系です。例えば図1に示すように、運動エネルギーをもった重陽子を標的である陽子に照射し、特定の角度に重陽子が跳ね返される様子を調べることになります。この系を厳密に記述する理論は、1961年にロシア(当時はソビエト連邦)の数学者であり物理学者でもあるL. D. ファデーエフによって提唱されていました²。ファデーエフ理論の核子系への適用が本格的に開始されたのは1970年代で、日本を含め、各国の理論研究者が工夫を凝らした計算手法の開発を進めました。そして計算機の高速化が目に見える形で現れる1990年代、数値計算としての精度が圧倒的に向上します。1998年、W. グ

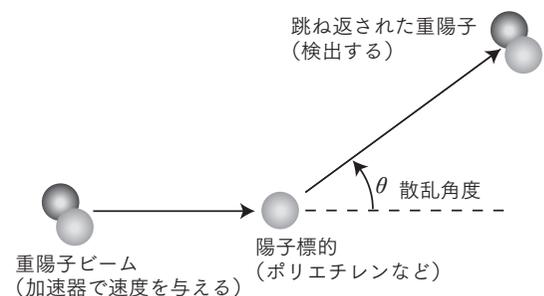


図1—重陽子と陽子(核子)との散乱の概念図

リュックル, H. ヴィタワを中心とする理論グループは, 運動エネルギーが 100 MeV 付近の核子と重陽子との散乱のファデーエフ理論にもとづく精度の高い数値計算を実行することに成功し, 微分断面積 (入射粒子が標的粒子に散乱される確率を表す量で面積の次元をもつ観測量) に三体核力の効果が現れるという理論予測を発表しました³。

グリュックルらの理論予測が発表された当時, 三体核力効果に実験からアプローチできそうな実験施設は, 日本では理化学研究所(理研)の加速器施設(RARE, 現在のRIビームファクトリー), 大阪大学の核物理研究センター, アメリカではインディアナ大学サイクロトロン施設とロスアラモス国立研究所, ヨーロッパではオランダにある原子核物理研究所(KVI)でした。いずれの施設も加速器を用いて粒子を加速して, 運動エネルギー 100 MeV 付近の陽子, 中性子, あるいは重陽子が得られる状況にありました。各施設でビームの種類や測定方法に特徴があり, その後広く三体核力の実験研究を展開していくことになるのですが, 当時, 三体核力効果の片鱗を掴んでいたのは理研グループでした。

我々理研グループは, 1990 年ごろからスピン偏極^{*2}した重陽子ビームの開発を進めていました。その一環として, 重陽子と陽子との散乱を一部の散乱角度で測定していたのですが, 二体核力だけでは微分断面積の実験値を説明できない, ということを発見し, 論文として発表していました⁴。理論予測がでる 2 年前のことです。

さて, 上記理論予測を受け我々は, 三体核力の存在を明らかにし, その詳細を系統的に調べるため, 重陽子と陽子による散乱実験を本格的に開始することになります。最初の実験は 270 MeV (核子あたりのエネルギーは 135 MeV) の重陽子ビームを用いて行われました。サイクロトロンで加速した陽子ビームを水素標的(ポリエチレン)に照射し, 特定の角度に散乱された粒子(重陽子または反跳を受けた陽

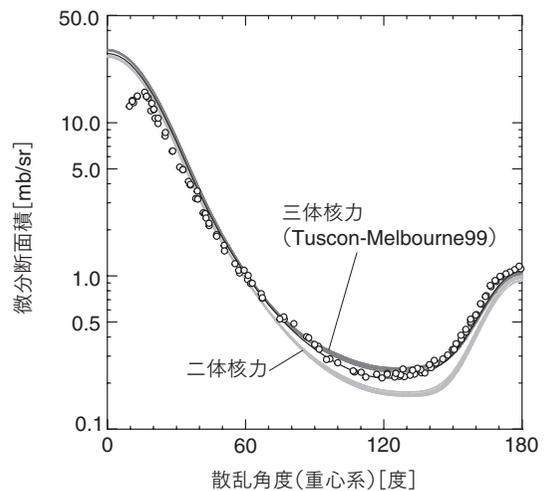


図2—核子あたりの入射エネルギー 135 MeV における重陽子と陽子との散乱の微分断面積(実験値および理論計算は文献 5~7 から引用)

子)の運動量分析を磁気分析器装置を用いて行い, 同粒子を検出しました。この実験では, 三体核力の効果が見える散乱角度を特定し, その大きさを評価するため, 広い角度範囲で測定しました。そして, 測定による不定性なるべく小さくなるように工夫して, 厳密理論計算との比較に耐えうる精度の高い実験結果を得ることに成功しました^{5~7}。

我々が測定した微分断面積の実験結果とファデーエフ理論にもとづく数値計算との比較を図2に示しました。白丸が実験結果です。薄い色の線束は二体核力のみを考慮した理論計算で, 濃い色の線束と黒の実線は藤田・宮沢型を主要成分とする三体核力を考慮した理論計算です。微分断面積が最小値となる散乱角度 120 度付近では実験値と二体核力の計算値との間に最大 30% の差がありますが, この差は三体核力を導入することによって見事に説明されています^{5~7}。なお, 40 度より小さい散乱角度に見られる実験値と理論計算との違いは, 理論計算にクーロン力が考慮されていないことに起因します。この実験と理論の比較から得られた結果は, 重陽子と陽子との散乱において三体核力の明らかな寄与を初めて示すものでした。

重陽子と陽子との散乱による三体核力効果が見

*2—スピンとは量子力学に従う粒子がもつ固有の角運動量のこと, 方向をもつ。スピン偏極とは, スピンの向きが一定の方向に偏っている, あるいは偏らせること。

つけられてから、三体核力を「理論で予測される力」から「実験と理論との両輪によって現実的かつ定量的に理解すべき力」として扱う研究の流れが加速していきます。実験研究では3核子系散乱の測定が国内外の加速器施設で展開され、三体核力のスピン依存性や距離依存性は既存の三体核力モデルでは十分に説明できないこともわかってきました。並行して、カイラル対称性にもとづく核力理論など三体核力をも含めた核力の構築も精力的に行われています。3核子系以上の原子核を取り扱う第一原理計算の開発も進み、元素合成過程の理解に関わる原子核の存在や、近年観測された重い中性子星の理解にも三体核力が重要な役割を果たすことが示されつつあります。このように現在、三体核力を含む核力から原子核を理解することは、原子核物理学の共通認識となっています。

● これからの課題

21世紀が始まった頃、原子核物理学では、3つの核子間に働く三体核力は不可欠である、という新しい視点が導かれました。核力の研究は湯川の間粒子交換理論が発表された1930年代に始まりますが、古くて新しく、かつ今エキサイティングな時を迎えているといえるでしょう。これからの課題は、素粒子であるクォークから核力の成り立ちを理解すること、核力から原子核が関わる諸現象を定量的に精緻に理解することです。これらは、ビッグバン以後に生成された元素の合成過程の解明や中性子星の状態方程式の記述など、天文・宇宙、素粒子物理学分野に関わる現象とも深く関わりをもつほか、核融合反応の記述などエネルギー工学方面にも関連すると考えられます。予測能力を高めるためには、二体核力が確立した21世紀初頭を超える精度で三体核力をも含めた核力を完成させることが必要です。そのための研究を、筆者らは3核子系、および4核子系散乱を軸として推進しつつあります。

今回深く触れませんでしたでしたが、クォークからの核力形成の成り立ちをひもとく鍵として、理研のスーパーコンピューター富岳で展開されている格

子QCD計算が大きく注目されています。三体核力の描像をも含めて、今後示される結果が大変楽しみです。また、中性子星とそれに関わる三体核力を含む核力の理解に関しても多岐方面で活発に研究が行われています。この話題については本誌の飯田氏、鷹野氏、田島氏の記事をご覧ください。

「2」で留まらず「3」に進むことによって見える描像が大きく変化していく。このことが原子核物理学において実証され始めています。

文献

- 1—J. Fujita & H. Miyazawa: Prog. Theor. Phys., **17**, 360(1957)
- 2—L. D. Faddeev: Sov. Phys. JETP, **12**, 1014(1961)
- 3—H. Witała et al.: Phys. Rev. Lett., **81**, 1183(1998)
- 4—N. Sakamoto et al.: Phys. Lett. B, **367**, 60(1996)
- 5—H. Sakai et al.: Phys. Rev. Lett., **84**, 5288(2000)
- 6—K. Sekiguchi et al.: Phys. Rev. C, **65**, 034003(2002)
- 7—K. Sekiguchi et al.: Phys. Rev. Lett., **95**, 162301(2005)