

ラムダ粒子は、陽子と中性子を区別できるか？

——ラムダハイパー核における荷電対称性の破れ

中村 哲 〈東京大学大学院理学系研究科/東北大学大学院理学研究科 nue@nex.phys.s.u-tokyo.ac.jp〉

永尾 翔 〈東北大学大学院理学研究科 nagao@lambda.phys.tohoku.ac.jp〉

田村 裕和 〈東北大学大学院理学研究科 tamura@lambda.phys.tohoku.ac.jp〉

山本 剛史 〈日本原子力研究開発機構先端基礎研究センター tyamamoto@post.j-parc.jp〉

陽子と中性子は電荷の有無という大きな違いがあるがほぼ同じ質量をもち、さらに核力に対する振る舞いもほぼ同じである。例えば陽子1個と中性子2個から構成される三重水素 (^3H) と陽子2個と中性子1個からなるヘリウム3 (^3He) は鏡映核の関係にあり、ほぼ同じ質量 (約 $2,800 \text{ MeV}/c^2$) をもつが、この両者の質量差から、陽子と中性子の質量差およびクーロン相互作用の効果を除外して、核力による ^3H と ^3He の束縛エネルギー (それぞれ約 8 MeV) の差を求めると、わずか 0.07 MeV 程度しかない。これは陽子・陽子間と中性子・中性子間の核力の強さがほとんど等しいことを示している。このような陽子と中性子の入れ替えに対する核力 (そして原子核) の対称性を荷電対称性 (Charge Symmetry) という。

核子だけで構成される通常の原子核に、最も軽いハイペロンであるラムダ粒子を束縛させたものをラムダハイパー核と呼ぶ。半世紀ほど前に実施された実験結果に基づいて、通常の原子核では良く成り立っている荷電対称性が $^4_\Lambda\text{H}$ (三重水素にラムダ粒子が束縛した系) と $^4_\Lambda\text{He}$ (ヘリウム3にラムダ粒子が束縛した系) の間で大きく破れているのではないかと、言われてきたが、その証拠とされる実験結果の一部は統計量、分解能のどちらも不十分であり、ラムダハイパー核における大きな荷電対称性の破れの有無は確定していなかった。

この状況を打破すべく、我々は最新の実験技術を駆使した2つの実験をドイツMAMI電子加速器施設と茨城県東海村にある大強度陽子加速器施設J-PARCで行った。

MAMIにおいては薄い ^9Be フォイルに 1.508 GeV の電子ビームを照射した。生成

されたハイパー核の破碎反応から生じた $^4_\Lambda\text{H}$ ハイパー核は、その多くが標的中に静止して弱い相互作用により $^4\text{He} + \pi^-$ に2体崩壊する。このとき放出される π^- の運動量を精密に測定することにより、親核である $^4_\Lambda\text{H}$ の基底状態の質量を過去の実験より10倍良い分解能で測定することに成功し、電子ビームを用いて生成したラムダハイパー核の崩壊 π 中間子分光法という新しい実験手法が確立した。この測定により $^4_\Lambda\text{H}$, $^4_\Lambda\text{He}$ の基底状態 (スピン0) のラムダ束縛エネルギーに対して、その存在が示唆されていた大きな荷電対称性の破れが確かに存在することを明らかにした。

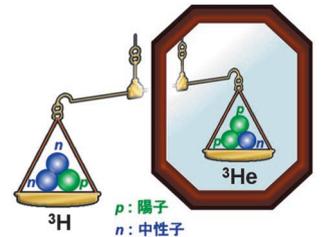
一方、J-PARCハドロン施設においては、従来の $^4_\Lambda\text{He}$ の励起エネルギー測定で使用されていたNaI (TI) 検出器の25倍の分解能をもつゲルマニウム検出器群Hyperball-Jを用いて $^4_\Lambda\text{He}$ のスピン1の励起状態からスピン0の基底状態への脱励起に伴う γ 線を精密分光することに成功した。この結果から $^4_\Lambda\text{He}$ の励起状態 (スピン1) と基底状態 (スピン0) のエネルギー間隔は従来信じられていた値と大きく異なり、 $^4_\Lambda\text{H}$ と $^4_\Lambda\text{He}$ の励起エネルギーに大きな荷電対称性の破れがあることを示した。さらに、励起状態 (スピン1) のラムダ束縛エネルギーでは荷電対称性の破れは小さいことも分かった。

これら2つの新測定により、質量数4ラムダハイパー核において確かに荷電対称性が大きく破れていることと、その破れ方がスピンに依存するという新たな知見が得られた。この現象はまだ理論的に説明できず、核力 (バリオン間力) の我々の理解が不十分であることをさらけ出した。謎の解明に向けた研究が進められている。

用語解説

鏡映核：

原子核を構成する陽子の数と中性子の数を入れ替えた関係にある原子核のこと。核力の荷電対称性によって、鏡映核の束縛エネルギーや準位構造はほぼ同じになる。



鏡映核の関係にある ^3H と ^3He の荷電対称性を表すイメージ図。

ハイペロン：

核子は3個のアップクォーク (u) とダウンクォーク (d) の組み合わせで構成されているが、これらの次に軽いストレンジ (s) クォークを含むクォーク3個の束縛系はハイペロンと呼ばれる。

質量数4ラムダハイパー核：

鏡映ハイパー核である $^4_\Lambda\text{H}$ と $^4_\Lambda\text{He}$ 。我々の実験により、これらの基底状態 (スピン0) は荷電対称性が大きく破れ、励起状態 (スピン1) は荷電対称性が大きくは破れていないことが分かった (下図参照)。

