



宇宙誕生初期の高エネルギー状態では粒子・反粒 子(粒子と質量や寿命は同じだが電荷等は反対の性 質をもつ)が対生成・対消滅を繰り返していたと考 えられている。ここで対生成は高エネルギーの光子 から粒子・反粒子の対が生まれる現象、対消滅は粒 子・反粒子の対が光子に転換する現象のことである。 これらの反応では粒子・反粒子は常に対で生成して は消滅するため、宇宙における粒子と反粒子の数は 常に同じであると期待される。しかし、宇宙観測の 結果から現在の宇宙にある物質は粒子で形成され. 反粒子の量は極端に少ないことが分かっている。こ こでもし、粒子と反粒子が対生成・対消滅する過程 において何らかの不均衡があった場合、粒子だけが 残り、物質で満たされた現在の宇宙を説明できる可 能性がある。この不均衡は"CP対称性の破れ"と 呼ばれている。現在最も精密に素粒子反応を説明す る素粒子標準模型によると、CP 対称性が僅かに破 れることが分かっている。しかしながら、素粒子標 準模型に含まれる CP 対称性の破れだけでは現在の 物質過多である宇宙を十分に説明できないことも分 かっている。このことは、素粒子標準模型では説明 できない未知の CP 対称性の破れが存在しているこ とを強く示唆している。この問題は現代物理学にお ける主要なテーマの1つであり、未知の CP 対称性 の破れに対して理論及び実験の両面から精力的な研

究がなされている。

山本

ー般に素粒子物理学では高いエネルギーで粒子を 衝突させ、未知の物理現象を探索することがよく行 われている。一方で低エネルギーの物理現象にも高 エネルギー領域におけるダイナミクスが伝搬してき ている場合があり、それを精密に測定することで現 在の技術では直接到達できないほど高いエネルギー 領域の物理まで間接的に探索可能な場合がある。

知樹*1

Yamamoto Tomoki

奧平

琢曲*2

Okudaira Takuya

本稿では低エネルギー原子核反応において対称性 の破れが増幅するという特異な現象を利用して,未 知の CP 対称性の破れを探索する実験の実現に向け た取組みを紹介する。

2 複合核での対称性の破れの増幅

2.1 空間反転対称性の破れの増幅

陽子標的にスピンを揃えた陽子ビームを入射させ ると、入射陽子のスピン方向に応じて散乱断面積が 10⁵%程度変化することが確認されている(図1)。 これは基本相互作用のひとつである弱い相互作用で は空間反転(空間座標の符号を反転させる操作、こ こでは入射陽子のスピン方向の反転に対応する)に 対する対称性が破れているためであると理解されて いる。一方で原子核が中性子を吸収する反応では、 入射中性子のスピン方向に応じて吸収断面積が最大 で10%も変化することが観測されており、この現 象は様々な原子核において確認されている¹⁾。これ



図1 陽子陽子散乱における空間反転対称性の破れは10-5% 程度であるが、中性子と原子核による複合核共鳴反応では 10%にまで及ぶ場合がある

は陽子陽子散乱における空間反転対称性の破れと比 較するとおおよそ10⁶倍と極めて大きな値である。 原子核の中性子吸収に伴う大きな空間反転対称性の 破れは複合核共鳴と呼ばれる準安定な状態において 観測されている。複合核共鳴の典型的な寿命は約 10⁻¹⁶s程度であり,陽子陽子散乱等の典型的な寿命 である10⁻²²sと比較して10⁶倍も長い。したがって, 陽子陽子散乱では小さかった空間反転対称性の破れ が,長寿命である複合核共鳴を介することで増幅さ れたと考えることができる。陽子陽子散乱では核子 間の1回散乱過程であり,複合核過程では10⁶回に 及ぶ多重散乱過程として考えることで,散乱のたび に空間反転対称性の破れが足し合わさっていくと考 えると直感的に理解できる。

2.2 時間反転対称性の破れの増幅

前項では複合核共鳴における空間反転対称性の破 れの増幅について紹介したが、この増幅現象のモデ ルを拡張すると時間反転対称性の破れも同様にして 増幅されうることが指摘されている²⁾(CPT 定理に よると CP 対称性が破れているならば時間反転対称 性も破れる)。この増幅現象が時間反転対称性の破 れにも適用できる場合、微小な時間反転対称性の破 れを原子核反応を介して増幅させることで高感度に 探索することが可能となる。そこで、名古屋大学を 中心とする時間反転対称性の破れ探索実験のための 国際コラボレーション NOPTREX が組織され,近年 発展が著しい大強度中性子源によって高精度な測定 が実現しようとしている。時間反転対称性の破れの 探索では,偏極(スピンが揃った)中性子を偏極原 子核標的に照射し,中性子偏極方向に応じた中性子 透過率の変化を測定する。この系において中性子の 偏極方向の反転は時間反転に対応するため,時間反 転対称性が破れている場合,中性子の透過率が変化 することになる。

さて、この探索実験を実現させるためには中性子 及び標的原子核の偏極等の技術開発が成功の鍵を 握っていると共に,前述の原子核内における対称性 の破れ増幅のモデルの妥当性を担保することが肝要 である。このモデルでは、複合核反応は入射中性子 のエネルギーが原子核全体に満遍なく散逸すること が前提となっている。この考えをもとにすると、複 合核反応における角相関が理論的に導き出され る³⁾。したがって、角相関の理論的予測と実験結果 を比較することで、複合核模型の妥当性を検証する ことができる。本研究では、特に大きな空間反転対 称性の破れが観測されている¹³⁹La 原子核に注目し、 運動エネルギー0.74 eVの中性子を吸収した際に形 成される共鳴状態において角相関(即発γ線放出方 向の中性子スピン偏極方向依存性)を持つという理 論予測を検証するための実験を行った。

3 中性子偏極デバイスの開発

中性子ビームのスピンを揃えるには特殊なデバイ スが必要になる。大強度陽子加速器施設(J-PARC), 名古屋大学ではガラスセルの中に³He ガスを封入し た,³He スピンフィルタと呼ばれる中性子偏極デバ イスの開発を行なっている⁴⁾。³He 原子核は自身と 反平行スピンの中性子のみ吸収するという性質をも ち,核偏極した³He ガスに無偏極中性子を透過させ ることで偏極中性子を得ることができる(図2)。 meV-eV 程度の広いエネルギー範囲の中性子を偏極 でき,装置全体を比較的コンパクトにできることが 本デバイスの魅力である。ガラスセルには³He と共 に Rb, K が封入されており,円偏光近赤外レーザー の照射により,まずアルカリ金属が偏極する。アル カリ金属原子と³He 原子核の超微細相互作用により



図 2 ³He スピンフィルタの原理

偏極した³He ガスをガラスセル内に封入し、無偏極中性子ビームを透過 させることで片方スピンの中性子を取り出すことができる



図3 今回の実験で使用した³He スピンフィルタ

スピンが移行し、³He 原子核を偏極させることがで きる。非常に均一な磁場を印加しておけば、偏極し た³He は 100 時間オーダーの長い時定数で偏極が壊 れていくため、レーザー照射を止めても³He スピン フィルタを磁場印加用コイルと共にビームライン上 に持ち込むことで、中性子ビームの偏極デバイスと して使用することができる。この時ガラスセルの中 に不純物が存在すると不純物との相互作用により偏 極が壊れてしまうため、非常に清純な環境下で純化 した³He ガス, Rb, K をガラスセルに封入する必要 がある。したがって、1. 不純物の少ない³He スピン フィルタ、2. 高い³He 偏極を達成するためのレー ザーシステム、3. ビームラインにおける一様磁場環 境、NMR を用いたスピン反転システム、等が³He スピンフィルタ開発における主なポイントとなる。

J-PARCでは³Heスピンフィルタの作製のための 非常に清純な真空システムが構築されており,今回 の実験では³He 圧力が 3 気圧 厚さ 7 cm のガラスセ ルと 3 気圧 9 cm 厚のものを使用した(図 3)。また, ³He 偏極には J-PARCで構築されている 30 W,110 W レーザーシステムを用いた。110 W レーザーを使用 した場合,1 日程度で³He 偏極率は約 80%に達する。 その後レーザー照射をやめ,磁場を印加したままコ イルごとビームラインに設置する。

4 即発γ線の角分布測定

本実験は J-PARC の物質・生命科学研究施設 MLF にある中性子核反応測定装置 BL04 ANNRI にて測 定が行われた。ANNRI では図4 に示すように標的 試料を取り囲むようにゲルマニウムγ線検出器が計 22 個配置されている。標的原子核が中性子吸収に 伴って発生する即発γ線を大立体角かつ高エネル ギー分解能で検出する。そして、入射中性子のエネ ルギーは中性子の発生時間を起点として飛行時間法 を適用することで決定できる。即発γ線のエネル ギーと入射中性子のエネルギーを同時に測定するこ とで、特定の共鳴から特定の終状態に遷移する事象 を同定することが可能になる。角相関の理論的予測 には複合核の共鳴エネルギー及び、終状態の情報が 必要であるため、この装置群は大変に好都合である と言える。

前章で紹介した³He スピンフィルタによって入射 中性子を偏極させ、標的原子核に偏極中性子を照射 する。中性子の運動方向と垂直方向に中性子スピン を向ける必要があるため、図4のような偏極保持用 のコイルを開発し、試料上流部に導入した。ビーム に対して横方向に 1.5 mT 程度の磁場を印加するこ とで、³He スピンを横向きにする。ソレノイドの両 端に補償コイルを設置し、コイル中心部の磁場を一 様にすることで、磁場不均一性によって³Heの偏極 が壊れることを抑制する。加えて、ビーム経路にガ イド磁石を設置することで、中性子スピンが試料に 到達するまでに壊れることを防いでいる。実験中は コイル内部に設置した NMR 用コイルで振動磁場を 印加し、定期的に³Heスピンを反転することで、中 性子スピンの向きを反転させる。スピン up. down に対する測定データの差を取ることにより、様々な



図4 ³He スピンフィルタを導入した BL04 ANNRI の模式図 偏極された中性子が標的に照射され,放出 γ線を周囲を取り囲む 22 個 のゲルマニウム γ線検出器で捉える



図 5 スピン方向が異なる中性子を照射した時の下側の Ge 検出器で測定した即発 γ線計数

黒丸と白丸は中性子スピン方向の違いを表す。1,800 µs の共鳴領域にて スピン方向に応じて計数が異なる

系統的不確かさをキャンセルすることができ,精度 の良い測定が可能となる。

中性子のスピン方向を変えたデータに対して,角 相関が予測される 0.74 eV の共鳴(1,800 μ s 付近の ピークに対応)から¹⁴⁰La の基底状態に遷移する γ 線(5,161 keV)を解析によって抽出したものが図5 である。図5に示すようにスピン方向に応じて共鳴 領域でのみ明瞭な γ 線計数の違いがあることを世界 で初めて観測することに成功した⁵⁾。現在,実験結 果と理論的予測の比較を通じた複合核模型の妥当性 に関する議論が進行中である。

5 まとめと展望

複合核における対称性の破れ増幅効果を用いた新 物理探索にむけて,装置開発並びに背景理論の検証 が行われている。本稿では³He スピンフィルタの開 発と原子核の偏極中性子吸収による γ 線角相関測定 を通した,複合核模型の妥当性の検証について紹介 した。今後様々な相関項が順次測定されていくこと が期待される。特にγ線の偏光度測定が可能になる と原理的にすべての角相関が測定可能となるため, 磁気コンプトン散乱を利用したγ線偏光度測定装置 の開発が進行中である。更に,様々な核種について も同様の角相関測定がなされ,核種に依らない統一 的な複合核描像の妥当性が検証されていくだろう。

また,今回の³He スピンフィルタ実験を皮切りに, 現在では J-PARC MLF で様々な目的で³He スピン フィルタが使用できるようになっている。今回のよ うな中性子ビーム偏極だけでなく³He スピンフィル タを中性子スピン解析子として使用することによ り,試料中でスピン反転した中性子のみを取り出す ことができる。これにより磁性試料の構造解析や, 水素を多く含む試料の構造解析,偏極中性子ビーム を用いた磁気イメージング等が可能となる。その応 用範囲は物性,工学,基礎物理等非常に幅広い。も し読者に偏極中性子ビームの利用を考えておられる 方がいらっしゃれば,ぜひお声がけいただきたい。

謝辞

本研究は名古屋大,九州大,大阪大,東工大, J-PARCからなる研究グループによる共同研究です。 本研究は KEK S 型課題(2018S12),科学研究費補 助金(19K21047, JP17H02889)の補助を受けて行わ れました。

参考文献

- 1) G. E. Mitchell, *Phys. Rep.*, **354** (2001)
- 2) V. V. Flambaum, et al., Nucl. Phys. A., 435, 352 (1985)
- 3) V. P. Gudkov, Phys. Rep., 212, 77 (1992)
- 4) T. Okudaira, et. al., NIM, A977 (2020) 164301
- 5) T. Yamamoto, et al., Phys. Rev., C101, 064624 (2020)

(*1名古屋大学理学研究科(現所属:東芝エネルギー システムズ(株)), *2名古屋大学理学研究科,日本 原子力研究開発機構 J-PARC センター)