

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 6月 5日現在

機関番号：13901

研究種目：学術創成研究費

研究期間：2007 ～ 2011

課題番号：19GS0210

研究課題名（和文）

中性子光学による基礎物理学

研究課題名（英文） Fundamental Physics using Neutron Optics

研究代表者

清水 裕彦（SHIMIZU HIROHIKO）

名古屋大学・理学研究科・教授

研究者番号：50249900

研究成果の概要（和文）：

J-PARC スパレーション中性子源に、基礎物理学のための冷中性子ビームライン BL05 を建設・整備した。光学デバイスにより精密に制御された中性子ビームを用い、中性子寿命の高精度測定をはじめとする物理実験が行われている。超冷中性子の高密度輸送法などの開発は従来の限界を超える測定を可能にする。物質研究においても磁気集光光学系を用いた極冷中性子小角散乱や共鳴スピンエコーなど新たな測定法を開発した。

研究成果の概要（英文）：

Cold neutron beam line BL05 was constructed at J-PARC. Various experiments including precision measurement of neutron lifetime was started with the high quality beam, which is provided by using our neutron optical devices. Developments of the devices, for example, space-time focusing of ultra-cold neutrons, enables us to perform extremely high precision measurement for physics beyond the standard model. For material science, we also developed some new neutron spectrometers including focusing VCN-SANS and resonance NSE.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	88,300,000	0	88,300,000
2008年度	95,000,000	0	95,000,000
2009年度	89,300,000	0	89,300,000
2010年度	89,000,000	0	89,000,000
2011年度	58,400,000	0	58,400,000
総計	420,000,000	0	420,000,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学・素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：実験核物理・素粒子物理・物性実験・中性子科学・中性子光学

1. 研究開始当初の背景

中性子を用いた基礎物理学において、測定精度のあと1桁から2桁の向上が重要な知見をもたらすと期待されていた。折りしも中性子ビームの強度の飛躍的な向上がJ-PARCによって実現するタイミングであった。さらに

最近の中性子光学の飛躍的な発展は、磁気光学による精密なスピン制御による時間・空間反転対称性の破れの研究の精密化、多層膜干渉計を用いた重力などの研究の道を開いていた。これらを組み合わせることによって新たな知見に到達できる。

2. 研究の目的

この研究の目的は、中性子光学を利用して、中性子崩壊・散乱・干渉等の基礎物理学的な研究課題に取り組むことにある。高エネルギー領域の素粒子物理学現象が不確定性関係を通じて低エネルギー現象に僅かに現れる影響を精密に測定する。研究テーマには以下のものがある。(中性子崩壊) 中性子は電子、陽子、ニュートリノに崩壊する。その寿命は初期宇宙の元素合成や、強い相互作用のクォーク混合行列のユニタリティーに関わる基本量である。磁気光学系を用いて正確なビーム制御を行い、同時にバックグラウンドに対する感度を抑制あるいは弁別できる検出器を利用する。寿命の目標精度 1 秒未満を目指す。また崩壊粒子の方向は相関を持っており、その非対称度を測定することで反物質と物質の対称性(時間反転対称性)の破れを検証できる。(熱外中性子光学) 熱外領域の中性子が原子核に吸収された複合核共鳴状態では空間反転対称性の破れが最大百万倍程度増幅されることが知られている。この増幅効果が時間反転対称性の破れに対しても有効に働くと考えられ、中性子スピン偏極移行量の差で確かめることができる。この測定には標的核のスピン偏極が必須である。(中性子干渉) 多層膜スーパーミラーを組み合わせた中性子干渉計による Aharonov-Casher 効果や素粒子レベルでの地球重力の影響の精密測定などを目指す。エネルギー感度 10-15eV 程度を目標とする。(中性子散乱) 中性原子等からの微分散断面積の精密測定によって、核ポテンシャル以外の未知の中距離相互作用を探索する。余次元の効果を含んだ重力相互作用に対して従来の測定下限を 4 桁程度上回る高精度測定を目指す。(応用研究) 上述の基礎物理研究の過程で生み出される中性子光学デバイスを利用して物質研究の解析能力を向上させる。

3. 研究の方法

大強度陽子加速器研究施設 (J-PARC) に付帯するスパレーション中性子源にビームラインを建設する。上流光学系(ビームベンダー)によって高偏極、非偏極、低発散の3本のビームに分岐する。高偏極ブランチは磁気光学系によって高いスピン偏極度を持ったビームを出力し、中性子崩壊用の実験装置を設置する。非偏極ブランチは散乱断面積測定などに利用する。低発散ブランチは中性子干渉計実験に用いる。正確なビーム制御デバイスと低バックグラウンド検出器を開発する。これらデバイス・検出器の試験、調整の後、物理測定を開始する。高偏極ブランチでの中性子寿命測定から開始し、順次他の測定

に続ける。

4. 研究成果

J-PARCスパレーション中性子源に、冷中性子ビームラインBL05を整備した。スーパーミラーベンダーによって3本のブランチに分岐する。それぞれのブランチのビーム特性は表1のとおりである。現在これらのブランチから安定して中性子ビームを出力しており、実験に利用できるようになった。



図1: 建設したビームラインBL05

表1: 各ブランチの特性

偏極ブランチ	Flux: $4.0 \times 10^8 \text{cm}^{-1} \text{s}^{-1} \text{MW}^{-1}$ 偏極度: 99.8%
非偏極ブランチ	Flux: $1.2 \times 10^9 \text{cm}^{-1} \text{s}^{-1} \text{MW}^{-1}$
低発散ブランチ	密度: $1.8 \times 10^6 \text{cm}^{-1} \mu \text{sr}^{-1} \text{s}^{-1} \text{MW}^{-1}$

偏極ビームブランチでは中性子寿命測定実験が開始され、現在物理測定が行われている。この測定では検出器体積内のみ中性子パルスが存在する状況を作り出し、バックグラウンドを弁別した測定を行う。そのために以下のデバイスを開発した。(1) 高周波スピンプリッパー及び磁気スーパーミラーを組み合わせたスピンプリッパー(図2)。これは中性子パルスを高速かつ自在な形に整形する。J-PARCから供給される中性子パルスを検出器体積にあわせた5つの小さなバンチに刻み、入射させることができる。S/N比は400:1以上を達成した。(2) 崩壊中性子数及び入射中性子数を計数するためのTime Projection Chamber(図3)。中性子崩壊に伴う電子を検出するガス検出器で、少量の ^3He を加えることで入射中性子量を同時に測定することができる。動作試験・調整を行い、中性子崩壊事象とHeによる核反応事象を捉えることができている。これらの比から寿命を算出

する。この他、バックグラウンド抑制のための追加遮蔽体を配備し、実際に中性子寿命測定を行っている。

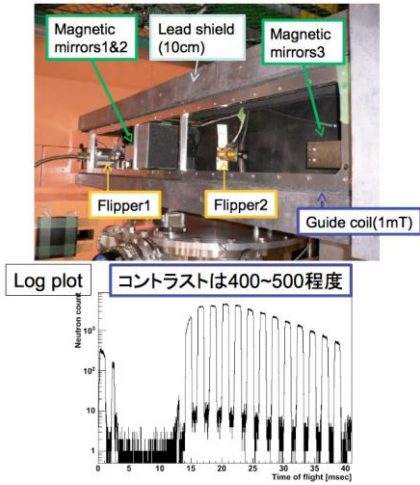


図2: スピンドリフチョッパー

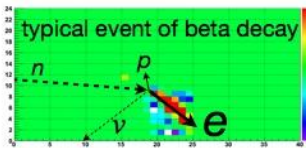


図3: タイムプロジェクションチェンバーと典型的な中性子崩壊事象

またパルス超冷中性子ビームの密度低下を抑制した超冷中性子の輸送を実現するために、超冷中性子の加減速器を開発し、すでに国外の定常中性子源において実験を行い、中性子の時間空間収束作用を実証した(図4)。J-PARCのパルス特性を利用したより明確な測定のために、BL05非偏極ブランチに超冷中性子発生装置ドップラーシフターを設置した。後退する中性子ミラーによる反射によって中性子を減速させる。このために超高Qcミラーを開発し130m/sの中性子を超冷中性子に変換することに成功した(図5)。入射光学系により10倍の利得を確保している。超冷中性子を用いた実験が国内で行える体制が構築できた。また超冷中性子は物質との相互作用を利用して輸送あるいは蓄積するが、表面での反射特性を中性子反射率によって詳しく調べた。これらによって超冷中性子を用いた実験研究の基盤を構築することができた。

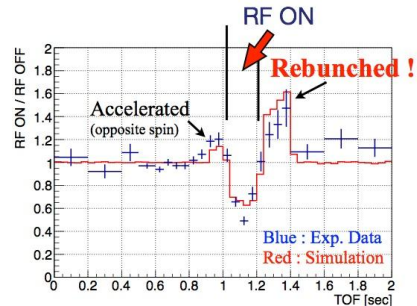
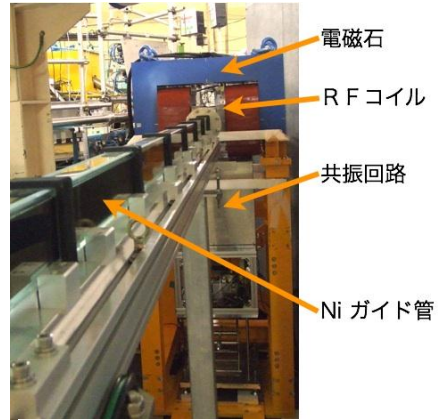


図4: フランスILLに設置した中性子加減速器と中性子の時間収束の実証

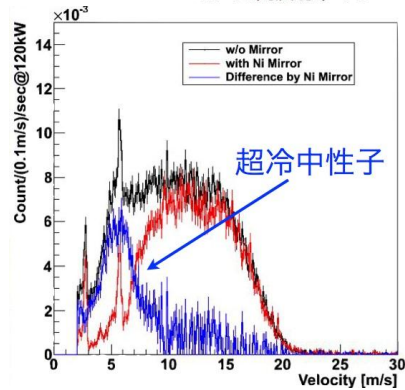
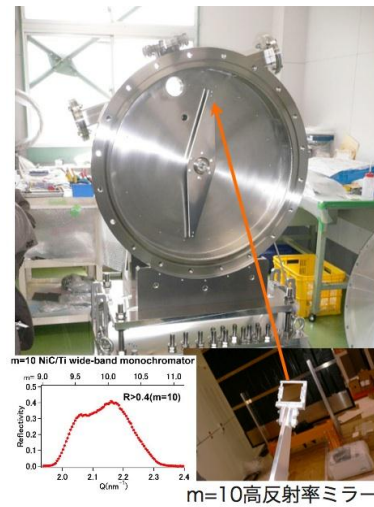


図5: 超冷中性子発生装置ドップラーシフターと発生した超冷中性子スペクトル

低発散ブランチでは、冷中性子干渉の基礎実験を行った。パルス中性子ビームに対して時間分解測定を行うことで、各波長ごとの干渉縞を得ることができる。また、中性子散乱による未知中距離力の測定実験のための基礎実験を行っている。散乱の角分布を精密に測定する際にバックグラウンドになるターゲット容器による散乱を精密に理解するため、ターゲット窓材であるシリコンの散乱の精密測定を行い、本実験への準備を進めている。

熱外中性子の複合核共鳴吸収における空間対称性の破れの増幅効果を、時間反転対称性の破れの高感度測定に応用するために、複合核共鳴吸収の部分波の混合比率の測定を開始した。この測定はBL04を用いて行っている。

物質研究への応用では、海外の定常中性子源において極冷中性子の磁気集光光学系を用いて、試料集光型小角散乱装置の利用研究を進めた。またBBL05低発散ブランチでは、新しい中性子準弾性散乱分光装置である共鳴スピネコーの開発を行った。試料のダイナミクスによる中性子の運動エネルギーの変化をスピン歳差回転の変化から捉える。位相制御された高周波スピフリッパーのパルス中性子への対応など、装置の基本特性を実証した。この成果によって共鳴スピネコー装置はJ-PARCの分光装置として設置が決定し、現在BL06に建設が進められている。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 16 件)

①Y. Arimoto, H. M. Shimizu, 他 7 人、**Demonstration of focusing by a neutron accelerator**, *Phys. Rev. A*, 86 (2012) 023843.、査読有り

②Y. Seki, H. M. Shimizu, 他 7 人、**Demonstration of optical thickness measurement using multilayer cold neutron interferometer**, *J. Phys.: Conf. Ser.* 340 (2012) 01203.、査読有り

③I. Ino, H. M. Shimizu, 他 30 人、**Measurement of the neutron beam polarization of BL05/NOP beamline at J-PARC**, *Physica B: Condensed Matter*, 406 (2011), 2424-2428.、査読有り

④M. Yamada, H. M. Shimizu, 他 15 人、**A compact TOF-SANS using focusing lens and very cold neutrons**, *Physica B: Condensed Matter*, 406 (2011), 2453-2457. 査読有り

⑤K. Taketani, H. M. Shimizu, 他 14 人、**A high S/N ratio spin flip chopper system**

for a pulsed neutron source, *Nucl. Instr. and Meth. A* 634, (2011) S134-S137.、査読有り

⑥K. Mishima, H. M. Shimizu, 他 19 人、**Design of neutron beamline for fundamental physics at J-PARC BL05**, *Nucl. Instr. and Meth. A* 600 (2009) 342-345.、査読有り

[学会発表] (計 87 件)

①M. Kitaguchi, H. M. Shimizu, 他 7 人、Accelerator/Decelerator of Slow Neutrons, LINAC12, イスラエル、テルアビブ、2012 年 9 月、招待講演

②北口雅暁、清水裕彦、他 7 人、中性子電気双極子能率測定実験のための超冷中性子加減速器の実証、日本中性子科学会第 12 回年会、京都大学 (京都市) 2012 年 12 月

③三島賢二、清水裕彦、他 22 人、J-PARC における中性子寿命測定実験: 現在までのデータ取得と今後の計画、日本物理学会 2012 年秋季大会、京都産業大学 (京都市) 2012 年 9 月

④松本悟、清水裕彦、他 5 人、低エネルギー中性子小角散乱を用いた重力法則の検証、日本物理学会 2012 年秋季大会、京都産業大学 (京都市) 2012 年 9 月

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

清水裕彦 (SHIMIZU HIROHIKO)

名古屋大学・理学研究科・教授

研究者番号: 50249900

(2) 研究分担者

猪野隆 (INO TAKASHI)

高エネルギー加速器研究機構・物質構造科学研究所・講師

研究者番号: 10301722

武藤豪 (MUTO SUGURU)

高エネルギー加速器研究機構・物質構造科学研究所・研究機関講師

(3) 連携研究者

(なし)

研究者番号: