

新世代超冷中性子源による時間反転不変性の検証

Time reversal symmetry violation test
with new generation ultracold neutrons

増田 康博 (MASUDA YASUHIRO)

高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・准教授



研究の概要

中性子電気双極子能率 (EDM) を測定のため、世界最強の新世代超冷中性子 (UCN) 源を建設し、統計精度を向上させる。系統誤差は、これまで、幾何学的位相効果 (GPE) で決まっていたが、新しい EDM 測定法により、GPE を減少させる。高精度 EDM 測定により、標準理論を超える様々な理論を検証する。

研究分野：原子核素粒子物理

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：超冷中性子、時間反転対称性

1. 研究開始当初の背景

我々が存在する宇宙では、物質のみが存在し、反物質は見つかっていない。これは、サハロフによると CP 非保存が一因している。素粒子の標準理論は、K そして B 中間子崩壊における CP 非保存を説明できるが、この宇宙における物質の存在を説明できない。また、素粒子の階層性の問題を解決できず、重力を理論の中に取り込めない。これらの問題を解決するため、標準理論を超える様々な理論が提唱されている。EDM を使えば、これらの新物理を検証できる。

2. 研究の目的

標準理論を超える新物理による EDM の予言値は、 10^{-25} – 10^{-28} e cm である。これまで、最も精度よく行われた実験は、ILL (仏) の UCN 実験である。UCN 密度 0.7 UCN/cm³ で、EDM 上限値 3×10^{-26} e cm が得られている。今回、新しい UCN 源と新しい EDM 測定法により、 10^{-27} e cm の EDM 測定を行い、標準理論を超える様々な理論を検証する。

3. 研究の方法

UCN を実験容器内に閉じ込め、そこに電場と球面コイルによる軸対称磁場をかけ、中性子スピント差運動を Ramsey 共鳴で測定する。電場依存項から EDM を求める。磁場のふらつきによる系統誤差を抑えるため、¹²⁹Xe 核スピを用いて磁場をモニターする。UCN 密度を上げて、統計誤差を小さくする。

4. これまでの成果

EDM 測定のみならず UCN 物理の発展には、UCN 密度増強が決め手となる。本研究の特徴は、高い冷中性子束が得られるスパレーション中性子源内に、超流動ヘリウム (He-II) を設置し、He-II のフォノンを用いて、Liouville の定理からくる UCN 密度の限界を打ち破り、冷中性子から高密度の UCN 発生させることにある。原子炉や大強度陽子加速器を持つ世界の主要研究機関でも、最優先で新しい UCN 源を開発している。ILL や Oakridge (米) は、冷中性子ビームと He-II、Los Alamos (米) や PSI (スイス) は、スパレーション中性子源と固体重水素 (SD2) を用いて新しい UCN 源の建設を行っている。そして、昨年、相次いで UCN の発生に成功した。我々は、現有の UCN 源をベースにし、第 2 世代 UCN 源を完成させようとしている。主要部であるスパレーション中性子源と UCN を発生する水平配置型 He-II 容器、そして He-II を冷却する冷凍器を完成させた。現在、これを組み上げ、UCN を発生させようとしている。UCN 密度は、He-II 内の冷中性子束、容器内の UCN 寿命、そして He-II からの UCN 取出し効率に比例する。冷中性子束は陽子ビーム電流に比例し、UCN 寿命はビーム照射に伴う He-II の温度上昇に逆比例する。 $1 \mu\text{A}$ の陽子ビームを現有の垂直型 UCN 源に照射し、温度上昇を測定するとともに UCN 寿命と UCN 密度を測定した。UCN 寿命は 81 s で、UCN 密度は、UCN エネルギーの最大値は $E_c = 90$ neV で、世界最高値 26 UCN/cm³ を得た。次

に、He-II容器に熱負荷をかけて温度上昇を測定した。その結果、陽子ビーム電流を $5\mu\text{A}$ にできると判明した。Phys. Rev. Lett. に出版した。水平型UCN源の新冷凍器を使えば $10\mu\text{A}$ にできる。水平配置でモンテカルロ計算をすると、冷中性子束と移送効率の積は垂直配置の5倍に増大した。増倍率を掛け合わせるとUCN密度は目標値の 10^3 UCN/cm^3 に到達する。

各種の UCN 制御バルブ、UCN 偏極装置、そして NMR による偏極制御技術を開発した。まず、これまで測定されることがなかった He-II UCN 源からの UCN のエネルギー分布を現有の UCN 源を用いて測定した。次に、様々な素材に対する偏極緩和時間を測定した。つまり、EDM 容器内に幾つかの平板を挿入し、そこに偏極 UCN を導入し、減偏極の様子を UCN スピン反転器と UCN 偏極と解析用の純鉄磁化フィルムを用いて観測した。シリカガラス、銅、そして DLC がよいとわかった。この結果に基づき素材を選定して EDM 容器を製作した。そこに偏極 UCN を導き、静磁場下で才差運動をさせ、才差角を検出した。つまり、Ramsey 共鳴を測定した。測定感度は ILL を超え、電場をかければ、EDM 測定ができる状態に到達した。これらの成果は、国際会議招待講演、一般講演で発表した。また、学術誌での出版を準備している。

EDM測定では、磁場モニターがUCN密度と共に重要である。より正確にEDM測定を行うには、EDM容器内でUCNが感じる磁場をモニターする必要がある。これに最適な方法は、原子の核スピン才差運動を用いることである。しかし、磁場をモニターする原子が、容器内の磁場勾配と電場の中を運動すると、幾何学的位相効果 (GPE) が生じ、スピン才差運動の周波数が電場に比例してシフトしてしまう。このGPEが、これまでのILLのEDM測定での主な系統誤差である。次世代のEDM測定では、これを解決する必要があるが、いまだ成功例はない。今回、 ^{129}Xe ガスをを用いれば、バッファガス効果によりGPEが減少することを見出した。EDM測定時、高電圧をかけるが、 ^{129}Xe ガス中で放電が起こると致命的である。Xeガスに高電圧をかけて、ガス圧を変えながら放電を調べた。使用圧力領域で放電はなかった。GPEは磁場勾配に比例するが、軸対称磁場の場合、UCNと ^{129}Xe 磁気共鳴周波数比を用いれば、磁場勾配を減少させることができる。その結果、GPEは 10^{-28} e cm 以下となり、革新的なEDM測定が可能となる。PLAに出版した。

5. 今後の計画

前年度までに完成したスパレーション標的、熱中性子、冷中性子モデレータ、中性子反射体、そして水平型 He-II 容器を用いて、新 UCN 源を組み立てる。GM 冷凍器で重水固化と冷却を行い、陽子ビームによるスパレーション中性子を冷中性子に変換し、冷中性子のエネルギースペクトルを中性子飛行時間法で測定する。冷中性子スペクトルの測定値から、He-II 内での UCN 生成率の計算を行い、UCN 生成実験に備える。

He-II冷凍器をHe-II容器に接続し、 ^4He 循環、その次に ^3He 循環で、He-II生成と冷却試験を行い、UCN源として完成させる。超伝導コイル型UCN偏極装置を立ち上げ、He-II冷凍器内のUCNガイドに接続して、水平型UCN源からUCNを取出す。

^{129}Xe 磁束計をEDM測定装置に組み込み、まず、ラムゼー共鳴法により、 ^{129}Xe のg因子の精密測定と疑似磁場の測定を行う。これに平行して、陽子ビーム増強計画を大阪大学核物理研究センターと共に進め、 10^{-26} e cm をきるEDM測定を行う。

6. これまでの発表論文等 (受賞等も含む) 論文、著書、産業財産権等

“Spallation Ultracold Neutron Source of Superfluid Helium below 1 K”, Y. Masuda, K. Hatanaka, S.C. Jeong, S. Kawasaki, R. Matsumiya, K. Matsuta, M. Mihara, and Y. Watanabe, Phys. Rev. Lett. 108, 134801 (2012).

“Neutron electric dipole moment measurement with a buffer gas comagnetometer”, Y. Masuda, K. Asahi, K. Hatanaka, S.C. Jeong, S. Kawasaki, R. Matsumiya, K. Matsuta, M. Mihara, Y. Watanabe, Phys. Lett. A376, 1347-1351 (2012).

「電気双極子能率」、増田康博、素粒子物理ハンドブック、朝倉書店、430-435 (2010)

“Vessel for rare gas filling, and method for polarization of rare gas atomic nuclei using said vessel”, Yasuhiro Masuda, U.S. Patent No. 7,737,689, June 15, 2010.

国際会議招待講演: 17件

国際会議開催: International Workshop on “UCN and Fundamental Neutron Physics” UCN2010, RCNP, Japan, April 8_9, 2010, <http://fnp.kek.jp/Japanese/workshop/20100408/index.html>

ホームページ: 「超冷中性子を用いた時間反転不変性の検証」 <http://fnp.kek.jp/>