

中性子電気双極子モーメント探索による
時間反転対称性の検証
Search for the neutron electric dipole moment and
the time reversal violation

課題番号：18H05230

畑中 吉治 (HATANAKA, KICHIJI)

大阪大学・核物理研究センター・特任教授



研究の概要

現在の物質優勢宇宙の創生機構を探るために、物質・反物質間の対称性（CP）の破れの機構の解明を目指して、中性子の電気双極子モーメント（nEDM）の測定精度を一桁以上向上する。TRIUMFで数百UCN/cm³の密度での測定を可能とする超冷中性子（UCN）源を開発し、10⁻²⁷ ecm領域のnEDM探索を行うことで標準理論を超える新しい物理の理論を検証する。

研究分野：素粒子・原子核・宇宙物理

キーワード：原子核（実験）・素粒子（実験）・超冷中性子・電気双極子モーメント

1. 研究開始当初の背景

宇宙は量子揺らぎにより無から生まれ、インフレーションによる急速な膨張を経て現在の姿となった。初期宇宙は粒子と反粒子が生成・消滅を繰り返す熱平衡状態にある。宇宙は熱膨張と共に冷え、ほとんどの粒子と反粒子は対消滅をして消え、わずかに物質粒子が残った。現在の物質優勢宇宙となるためにはCP対称性の破れが不可欠である。素粒子標準理論では小林・益川理論によりクォークのCP対称性の破れが説明されている。さらにT2K実験等によりニュートリノでのCP対称性の破れの兆候も観測されている。しかし、これらだけでは現在の物質・反物質非対称性を説明するには不十分である。素粒子標準理論を越えた新しい物理が存在する。

2. 研究の目的

EDMの存在は時間反転対称性（T対称性）を破る。ローレンツ対称性から導かれるCPT保存を仮定すればT対称性の破れはすなわちCP対称性の破れを意味する。新しい物理が何なのかをEDMの探索をプローブとして明らかにする。

3. 研究の方法

運動エネルギーが非常に低い（< 300 neV）UCNを物質容器に溜め込み、電磁場中でのスピン歳差運動周期を精密に測定しnEDMを探索する。現在の測定感度は統計精度によって制限されている。日本とカナダの国際協力によってTRIUMF研究所に超冷中性子源（図1）を建設する。これまでに開発してきた超流動ヘリウムを用いたUCN発生法を発

展させることにより10⁻²⁷ ecmの感度が可能となる。

UCNは陽子ビームによる重金属の核破砕反応により生じる高速中性子を冷却することによって生成する。運動エネルギーがmeVまでの冷却は300 Kの液体重水及び20 Kの液体重水素による中性子弾性散乱を用いて行い、さらにスーパーサーマル法を用いてUCNに変換する。

nEDMは静電磁場中にUCNを保持する容器を設置し、その中でのUCNのスピン歳差運動周期を精密に観測することで行う。スピン歳差運動周期はラムゼー共鳴法を用いて測定する。実験における最大の系統誤差は磁場の非一様性及び、時間安定性である。外部磁場を補償する補償コイル、4重の磁気シールドルームを配置し、磁場の非一様性を1 nT/m以下、測定期間中（典型的に100秒）の時間安定性を1 pT以下に抑える。

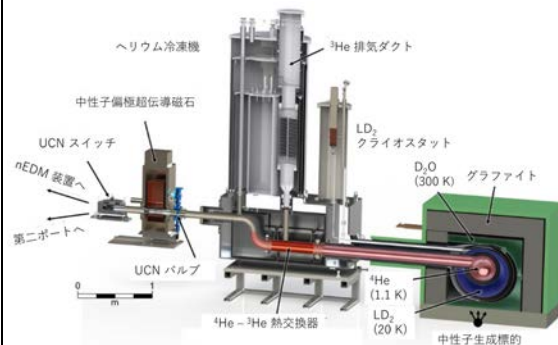


図1: TRIUMFに設置される超冷中性子源

4. これまでの成果

UCN 源各部 (UCN 生成部、液体重水素モデレータ、室温重水モデレータ、超流動ヘリウム容器、 ^3He 熱交換器) の配置と形状をモンテカルロシミュレーションにより最適化した。(図 1)。

TRIUMF のビームパワーである $500\text{ MeV} \times 40\ \mu\text{A}$ の陽子ビームに対する超流動ヘリウムへの入熱は数値計算から 10 W である。UCN を効率的に生成するためには陽子ビーム照射中も超流動ヘリウム温度を 1 K 程度に保たなければならない。超流動中のフォノン密度はその温度とともに上昇し、UCN がフォノンからエネルギーを得る逆反応によって失われてしまうからである。そのため、 ^3He を減圧することで低温を達成するヘリウム冷凍機を設計・製作した。冷凍機の内部構造を図 2 に示す。

冷却に用いる ^3He ガスは真空ポンプで排気後、循環して再利用される。室温から導入された ^3He は大気圧の液体ヘリウム 4 槽で 4.2 K に冷却され、次いで 750 Pa に減圧され 1.6 K に保たれた液体ヘリウムの満たされた 1 K pot 内で冷却される。 1.6 K に冷却されて、 ^3He はジュールトムソンプルブを通じて断熱膨張することで 1 K 以下に冷却される。本設計では対向流型熱交換器を複数採用することで (HEX-4、-5、-7) 蒸発ヘリウム 4 の顕熱を十分に利用して ^3He を予冷する。使用する熱交換器は数値計算より形状を最適化し、テスト器を製作し熱交換率測定を行った。テストでは、 ^4He ガスを用い室温からの冷却を行い、冷却能力 10 W に対応する ^3He ガス流量 1.15 g/s 相当する流量に対し、十分な熱交換効率が得られることを確認した。この結果を用いてヘリウム 3 冷凍機を完成させた。

TRIUMF でプロトタイプ UCN 源を運転し、UCN 生成システムの検証と nEDM 測定装置の要素開発を行った。 500 MeV 、 $1\ \mu\text{A}$ の陽子ビームを 60 秒間照射し $70,000$ の UCN 取り出し、UCN 源内での寿命 38 秒を観測した。ステンレス管、NiP メッキ、NiMo メッキ等の表面材質の違いによる UCN 鏡面反射率、UCN パルプ等の挿入要素での UCN 透過率の測定を行った。NiP メッキを施した研磨ステンレス管にたいして 0.97 /m の透過率が確認された。 ^6Li をドーブしたガラスシンチレータ UCN 検出器の性能テスト、超伝導磁石および磁化薄膜による偏極 UCN 生成、偏極測定システムの開発を進めている。

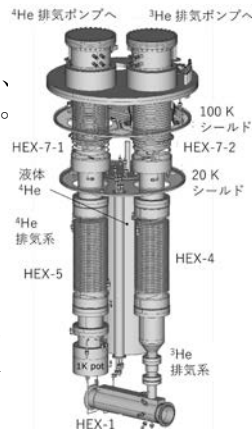


図 2: 冷凍機の内部構造

nEDM 測定領域内の背景磁場の三次元分布の予備測定を行った。約一ヶ月の長期間にわたる背景磁場の変動、および周辺機器による比較的短時間 (数秒間) での擾乱磁場の予備データが取得した。得られた結果をもとに、詳細な背景磁場測定方法およびアクティブ磁場補償システム、磁気シールドルームの設計を開始した。セルに掛ける一様磁場生成には自己遮蔽型コイルを採用し、有限要素法でコイル形状の最適化を進めるとともに、 ^{199}Hg 共存磁力計の開発を進めている。

nEDM 測定セルには $10\text{-}20\text{ kV/cm}$ の電場を掛ける。クォーツ、重水素化ポリエチレン、重水素化ポリスチレンを材質とするセルを試作し真空、高電圧のテストを行っている。

5. 今後の計画

プロトタイプの結果を踏まえて、液体 ^3He と超流動ヘリウム間の熱交換器 (HEX-1) の実機を製作する。HEX-1 の性能を確認した後、冷凍機を含む装置一式を TRIUMF に移送する。TRIUMF で製作される液体重水素 (LD_2) モデレータと UCN 生成部を接続し、UCN 源を完成する。超流動ヘリウムを UCN 生成部に貯蔵し、超流動ヘリウム中の温度測定を行い、超流動中の熱伝導を測定する。 1 K の温度でかつ大容量の超流動ヘリウム中の熱伝導測定はこれまでデータがなく、理論 (Gorter-Mellink) との比較は低温物理研究の大きな貢献となる。アクティブ磁気シールド、磁気シールドルーム、一様磁場生成コイル、シムコイル、セル、共存磁力計を設置し、陽子ビームパワー 20 kW での nEDM 測定を実施する。

6. これまでの発表論文等 (受賞等も含む)

- (1) Optimizing neutron moderators for a spallation-driven ultracold-neutron source at TRIUMF, W. Schreyer, C.A. Davis, S. Kawasaki, T. Kikawa, C. Marshall, K. Mishima, T. Okamura, R. Picker, Nucl. Instr. Meth. A 959 (2020) 163525
- (2) Fast-switching magnet serving a spallation-driven ultracold neutron source, S. Ahmed, E. Altieri, K. Hatanaka, S. Kawasaki, Y.X. Watanabe et al, Phys. Rev. Accel. Beams. 22 (2019) 102401
- (3) A beamline for fundamental neutron physics at TRIUMF, S. Ahmed, T. Andalib, K. Hatanaka, S. Kawasaki, Y.X. Watanabe et al, Nucl. Instr. Meth. A 927(2019) 101-108
- (4) First ultracold neutrons at TRIUMF, S. Ahmed, E. Altieri, K. Hatanaka, S. Kawasaki, Y. Makida, K. Mishima, T. Okamura, I. Tanihata, Y.X. Watanabe et al, Phys. Rev. C 99 (2019) 025503

7. ホームページ等

<http://fnp.kek.jp>