

超冷中性子を用いた中性子電気双極子モーメントの探索実験

現在の物質優勢宇宙となるためには物質・反物質間の対称性(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おり、さらに T2K 実験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十分でなく、素粒子標準理論を超えた新しい物理が存在することを示唆している。この新しい物理を永久電気双極子モーメント(EDM)をプローブに検証していく。

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 保存が成り立つこと仮定すれば T 対称性の破れはすなわち CP 対称性の破れを意味する。中性子の EDM の値は素粒子標準理論では 10^{-32} ecm と計算される一方で、CP 非対称性を内包する SUSY などの新物理では $10^{-26} - 10^{-28}$ ecm の大きさの中性子 EDM を予想している。これまでに有限の EDM が測定された実験はなく、現在の測定値の上限値 1.8×10^{-26} ecm である。測定感度を上昇させることにより新物理の予想する範囲の中性子 EDM を探索することを目指している。

中性子 EDM の探索は超冷中性子(UCN: Ultra-Cold Neutron)という運動エネルギーが 300neV 以下の極低エネルギーの中性子を用いて行う。UCN は物質表面において全反射し、容器の中に溜め込むことが出来る特徴を持つ。容器内に溜めこんだ UCN に電磁場を印加したときにおこる歳差運動の周期を精密に観測することによって中性子 EDM を測定する。現在の測定感度は UCN の統計によって制限されているため、高強度の UCN 源が必要である。素核研 UCN グループは世界最高強度の UCN 源をカナダ TRIUMF 研究所に建設し、中性子 EDM を 10^{-27} ecm の測定感度で観測することを目的とする TUCAN 国際共同実験に参加している。

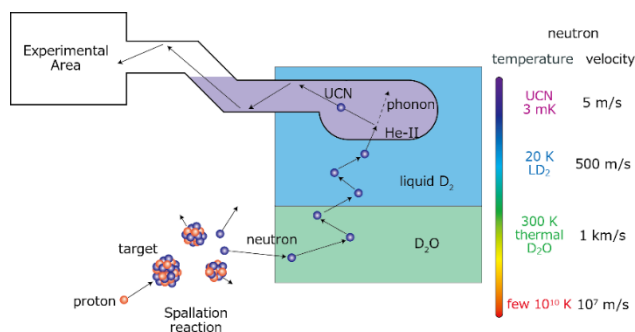


図 1 超冷中性子源模式図

図 1 に超冷中性子源の模式図を示す。UCN は陽子ビームをタングステンターゲットに当たったときに起きる核破砕反応で生じた熱中性子を冷却することで生成する。熱中性子は常温の液体重水モデレータ、20K の固体重水モデレータの順に冷却され、最後は超流

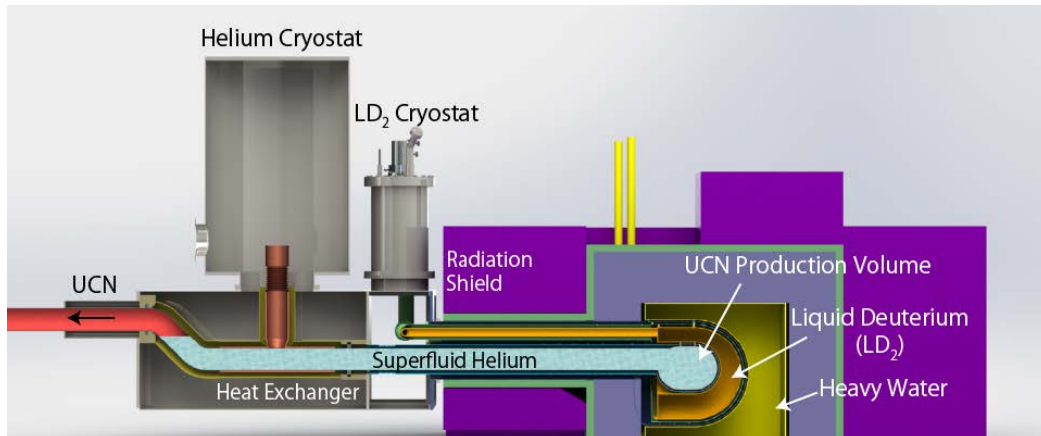


図 2 アップグレード UCN 源

動ヘリウム中のフォノン散乱によって運動エネルギーを失い UCN となる。効率的に UCN を生成するには超流動ヘリウムの温度を 1 K 程度に保たなければならない。

2017 年よりプロトタイプ UCN 源による UCN 生成を TRIUMF で行い、UCN ガイドや偏極器等の UCN 輸送システムの要素開発を行っている。2019 年秋にもデータを取得し、現在解析中である。

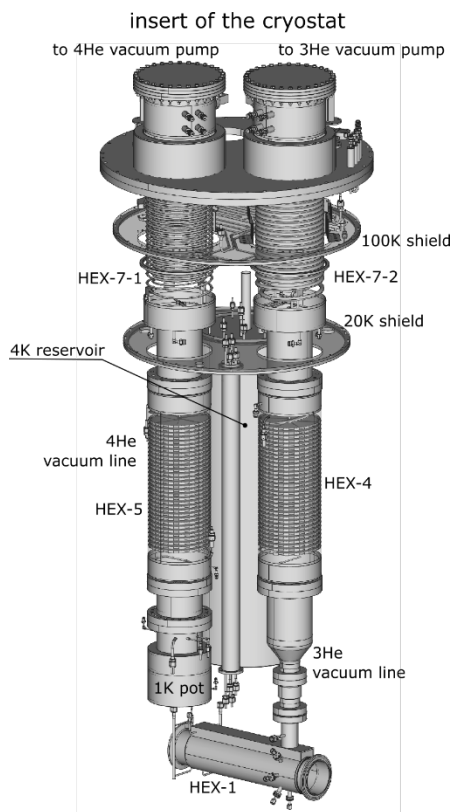


図 3 ヘリウム 3 冷凍機内部構造

UCN 生成実験と並行し、UCN 源アップグレードを行っている(図 2)。現在のプロトタイプ UCN 源では TRIUMF での最大ビームパワーである 20kW での運転時の熱負荷に対応できない。UCN 生成領域での UCN の寿命は超流動ヘリウム温度に依存するため、超流動ヘリウムを 1.0K 程度に保つ必要がある。20kW での運転を可能にするには 1.0K で 10W 以上の冷却能力を持つ冷凍機を開発しなければならない。KEK ではこのためのヘリウム 3 冷凍機を開発している。

図 3 にそのヘリウム 3 冷凍機の内部構造を示す。ヘリウム 3 冷凍機では室温から導入されたヘリウム 3 ガスを内部で冷却・液化し、さらに減圧することにより 1 K 以下の液体ヘリウム 3 を生成する。その液体ヘリウム 3 の蒸発潜熱によって冷却能力を得る。ヘリウム 3 の冷却は外部から供給される液体ヘリウム 4 によってなされるが、効率的に運転を行うためには内部に複数の熱交換器を持ち、段階的にヘリウ

ム 3 を冷却する。これまでに室温から 10K までの冷却を行う予冷器、蒸発ヘリウム 3 を用いて液体ヘリウム温度以下にヘリウム 3 を冷却する熱交換器の製作、冷却試験を行い、設計通りの性能が得られていることを確認した。2020 年 4 月からはこれらの熱交換器を組み込んだヘリウム 3 冷凍機全体の性能試験を開始する。

2020 年 2 月 7 日、8 日に TRIUMF において外部諮問委員会による実験レビューが行われた。UCN 源アップグレード計画の進捗状況や EDM 測定装置のデザインについての議論が行われた。KEK が開発を進めているヘリウム 3 冷凍機については要素試験の結果や装置製作状況などの進行について高い評価を得ることができた。