

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

超冷中性子(UCN：Ultra-Cold Neutron)とは運動エネルギーが 300neV 以下という極低エネルギーの中性子で物質表面において全反射する。この特徴により UCN は容器の中に溜め込むことが出来る。UCN グループは UCN を用いて中性子電気双極子モーメント(nEDM)の探索実験を行っている。

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て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 1K に冷却された超流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。

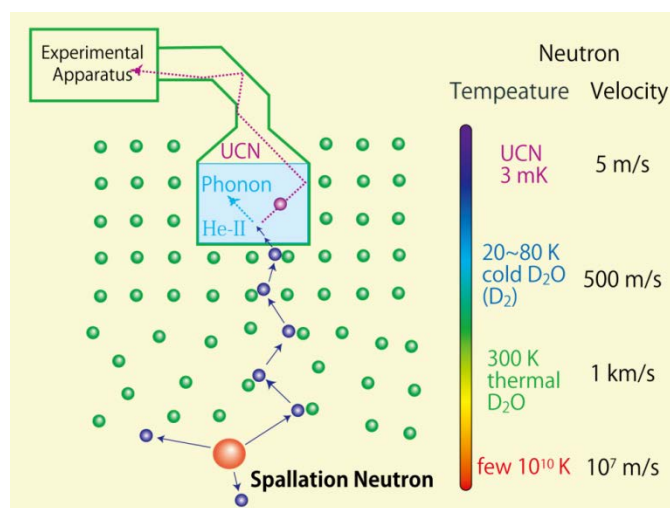


図 1 超冷中性子源

UCN グループはこの UCN 源を用いて高密度 UCN を発生し、それを利用することで nEDM の測定を目指している。nEDM の測定は電磁場中に置かれた容器の中に UCN を閉じ込め、その歳差運動をラムゼー共鳴法によって観測することで行われる。現在の nEDM の探索感度は統計によって制限されている。高強度の UCN 源を開発し、現在の測定感度を 1 桁以上上回る感度での探索を目指す。

2014 年までに大阪大学核物理研究センター(RCNP)にて UCN 源を開発してきたが、2015 年より UCN 源はカナダの TRIUMF 研究所メソンホールに移設された。TRIUMF 研究所では大阪大学核物理研究センターに比べ 50 倍の強度の陽子ビーム($500\text{MeV} \times 40 \mu\text{A} = 20 \text{kW}$)が利用可能である。図 2 に陽子ビームライン及び UCN 源の様子を表す。既存の BL1A 上からキッカーマグネットにより、ビームを取り出し専用のビームライン(BL1U)に導く。BL1A に流れる $120 \mu\text{A}$ の陽子ビームの $1/3$ にあたる $40 \mu\text{A}$ の陽子ビームをキッカーマグネットにより取り出すことにより、サイクロトロン稼動中は常時ビームを利用可能となる。

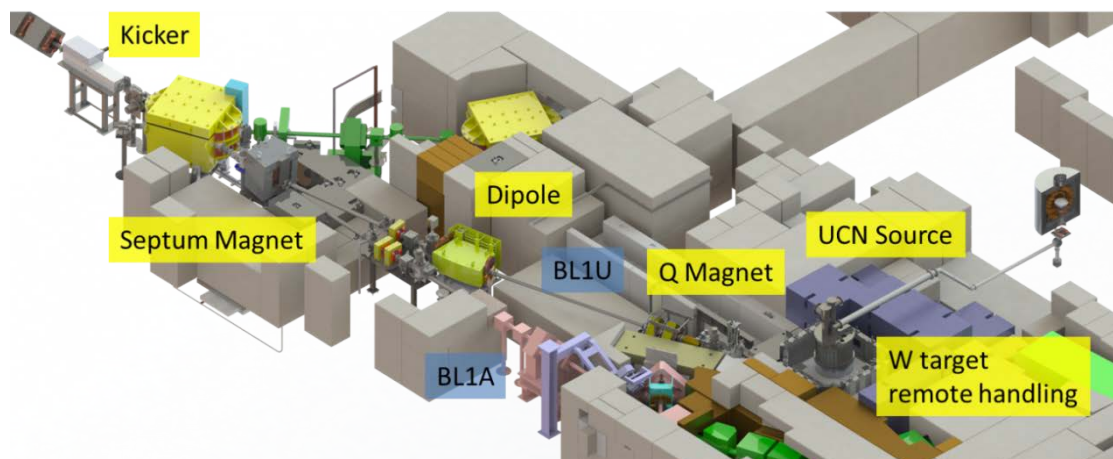


図 2 専用ビームライン及び超冷中性子源

陽子ビームラインの建設は順調に進み、2016 年までに完了した。2016 年 4 月には重水モデレータがタングステンターゲット上にインストールされ、2016 年 11 月に陽子ビームラインのコミッショニング、及び重水モデレータを用いた冷中性子生成コミッショニングを行った。

2017 年 1 月からの TRIUMF のシャットダウン期間に超流動ヘリウム冷凍器を含む UCN 源のすべてのコンポーネントがビームライン上にインストールされた。4 月には UCN 源用のヘリウム冷凍器の冷却試験を行った。UCN 生成に必要な超流動ヘリウム温度を 1 K 以下に保つことに成功した。これによって、UCN 生成への準備が整った。

2017 年 11 月 13 日、TRIUMF に於いて初めてとなる UCN 生成に成功した。図 3 は生成した UCN を UCN 検出器で検出した時の UCN カウントレートである。物質バルブを用いて UCN 生成領域を封じ切り 1 分間陽子ビームを照射し UCN を生成・蓄積する。その後バルブを開き、取り出された UCN を検出器に物質ガイドを導き、観測された UCN を時間の関数としてプロットした。この図では $500 \text{ MeV} \times 50 \text{ nA} = 25 \text{ W}$ の陽子ビームを用い、4 分周期で 5 サイクル UCN 生成を行った時のヒストグラムである。

その後、陽子ビームカレントを 5kW まで増加させ、UCN の生成がほぼ線形で増加することを確認した。これは RCNP で UCN 生成を行っ

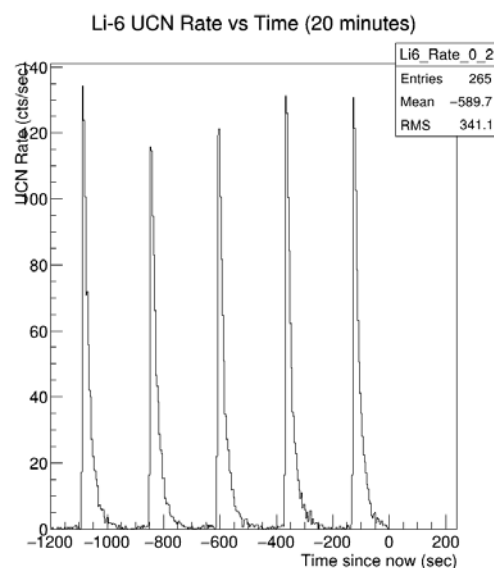


図 3 UCN カウント数

4 分周期に 1 分間陽子ビームを照射し UCN 生成をおこなった時の UCN カウントレート。陽子ビーム強度は $480 \text{ MeV} \times 50 \text{ nA}$ 。

た時に比べ7倍の陽子ビーム強度である。このビーム強度でも UCN 源が問題なく動作することを確認することが出来た。

RCNP ではビームタイムの制限により 1 週間程度しか UCN 源を連続運転してこなかったが、TRIUMF では UCN 源用専用陽子ビームラインが整備されており、連続運転が可能である。今回、UCN 源はこれまでの最長となる 18 日間の連続運転を行い、安定的に UCN を生成した。

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 4)。現在の UCN 源では TRIUMF での最大ビームパワーである 20 kW 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 5W 以上の冷却能力を持つヘリウム冷凍器を開発しなければならない。また、UCN 生成領域への冷中性子のフラックスを 5-9 倍へ増加させる液体重水素モデレータの開発を行っている。

これらを組み合わせることにより、既存の nEDM の探索感度である 3.0×10^{-26} ecm を 1 桁以上上回る 10^{-27} ecm の統計精度での観測が可能となる。

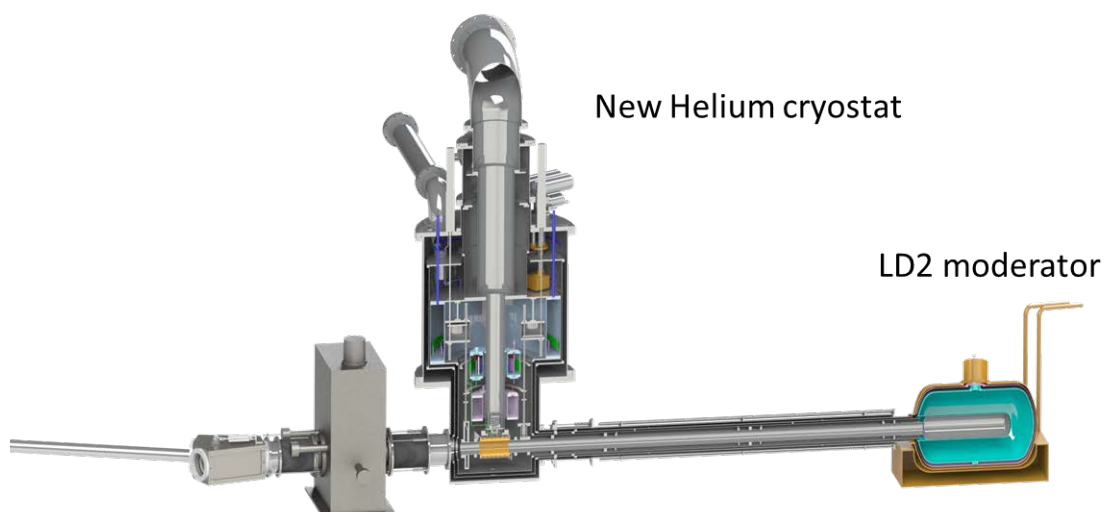


図 4 UCN 源アップグレード