原子炉超冷中性子源の検討



Contents

- ・超冷中性子
 - ・特徴
 - ・超冷中性子を使った基礎物理実験
- ・超冷中性子源
 - ・超冷中性子の生成方法
 - ・ドップラーシフター
 - super-thermal法
 - ・超冷中性子源事例
 - TUCAN
 - SuperSUN
 - WWR-M PNPI
 - ・新研究炉における超冷中性子源の検討

超冷中性子 <u>Ultra Cold Neutron</u> (UCN)



物質、重力、磁場ポテンシャルによるに閉じ込め

長時間(~百秒)の観測が可能

超冷中性子 エネルギー 速度 波長	 ~ 100 neV ~ 5 m/s ~ 50 nm 		
中性子の受ける力 強い相互作用 フェルミポテンシャル 335 neV (⁵⁸Ni) 原子間距離に比べUCNの波長が長いため、個々 の原子核のポテンシャルの平均を感じる 			
 弱い相互作 	用		
β-	decay $n \rightarrow p + e + v_e$		
• 重力場	100 neV/m		
• 磁場	60 neV/T		

→さまざまな基礎物理実験に用いられる nEDM、重力、寿命、…

Physics using UCN

- ・中性子寿命測定
- ・重**力実験** 長縄さん
- ・ nEDM 探索 樋口さん
- ・中性子-反中性子振動 嶋さん
- and so on,

高強度UCN源の必要性

中性子寿命実験





S. Arzumanov et al., Phys. Lett B 483, 15 (2000)A.P. Serebrov et al., Phys. Lett. B 605, 72 (2005)A. Pichlmaier et al., Phys. Lett. B,693:221-226 (2010)



setup of UCNt experiment (LANL) magneto-gravity trap (重力+磁気ポテンシャル) 容器にUCNが触れない



UCN**の生成方法**

- ・ドップラーシフター (旧方式)
 - ・遠ざかる壁との弾性散乱
 - ・リュービルの定理 (Liouville's theorem)による制限 位相空間密度一定

→運動量密度を下げる(減速する)と空間密度が減る



- ・スーパーサーマル法(新方式)
 - ・超流動ヘリウムや固体重水素中のフォノン励起することによる減速
 - ・リュービルの定理の制限を受けない
 - ・超流動ヘリウムや固体重水素中のフォノンに運動量を受け渡す

UCN**源** at ILL 原子炉+ドップラーシフター

Institute Laue-Langevin, Grenoble, France Reactor 57MW

UCN Production			
Liq. D ₂ 25K vertical guide Turbine	∼1 meV ~100 µeV ~100 neV	\rightarrow \rightarrow	VCN UCN

UCN turbine

- slow down by reflection on the moving mirror
- Restriction by Liouville's theorem

UCN density

- ~ 50 UCN/cm³ @ turbine
- ~ 1 UCN/cm³ @ experiment



スーパーサーマル法

- 超流動ヘリウム(He-II)や固体重水素(sD₂)をUCNコンバーターとする方法
- UCNコンバーター中のフォノンを励起することによって中性子は減速
- ・ コンバーターの位相空間を利用することにより、UCN密度はリュービルの定理の制限を受けない

中性子の分散曲線



Super thermal UCN source by TUCAN



	加速器中性子源 (核破砕反応) 高い冷中性子束
	標的とHe-IIの距離を近くできる
	高い熱負何 陽子ビームを止めればUCN生成&熱負荷も
-	止まる フーパーサーフル注
_	へ ハ ゥ マルム UCNコンバータ: 超流動ヘリウム
	長い蓄積時間
	中性子寿命:フォノンによるup-scattering (τ _s ∝ T ⁻⁷)
	$\tau_s = 36 \text{ s} \text{ at } T_{He-II} = 1.2 \text{ K}$ $\tau_s = 600 \text{ s at } T_{He-II} = 0.8 \text{ K}$ (Cf. SD ₂ : T _s = 24ms)
	高い熱負荷の下で超流動ヘリウムを
	低温に保ち続けることが重要



海外事例1: TUCAN

- ・ 加速器中性子源+超流動ヘリウムコンバーター
 - ・ カナダTRIUMF 陽子サイクロトロン
 - ・核破砕標的直上に
 - ・ モデレーター
 - ・ 超流動ヘリウムUCNコンバーター
- Prototype UCN source
 - ・ RCNPで実証実験後TRIUMFにインストール
 - ・ UCN密度 9 UCN/cm³ @ production volume
- New UCN source
 - ・ 超流動ヘリウムへの熱負荷
 - 9.6 W
 - ・ 超流動ヘリウム 87 L
 - ・ UCN生成領域 27 L
 - ・ UCNガイド Φ150 mm
 - ・ 冷中性子flux:
 - 5 × 10¹³ n/cm²/s/eV
 - ・ 超流動ヘリウム温度 < 1.2 K
 - ・ UCN生成量
 - Production rate 1.4×10^7 UCN/s
 - UCN density

6,000 UCN/cm³ @ production volume 250 UCN/cm³ @ EDM experiment



New UCN source (2023 -)

Tungsten Target

upgrade

海外事例2 SuperSUN's at ILL

- ・冷中性子ビームを超流動ヘリウムに導入
 - Converter volume 12 litter
 - He-II temperature 0.65 K
 - UCN production rate 10⁵ UCN/s



https://indico.ph.tum.de/event/3780/contributions/2605/attachments/2350/2572/2017_11_02_Raitenhaslach_DFG_SuperSUN.pdf

海外事例3 WWR-M reactor, PNPI 原子炉内に超流動ヘリウムを挿入

A. Serebrov, EPJ Web of Conferences 219, 10002 (2019)

Reactor power 16 MW ٠ Thermal neutron flux $10^{12} \text{ n/cm}^2 \text{ s}$ 35 litter Φ30 cm He-II volume ٠ ρ_{UCN}=10⁴ cm⁻³ (τ=10s) Φ=4.5-1012 1/(cm2s) Φ(λ=9Å)=3·1010 1/(cm2sÅ) Q_{11e}=19 W Q_1=18 W 0. ...=37 W Q₀₂=83 W Hell. Q_1=204 W T=1,2 K Q_____=287 W C, T=300K C, T=300K O=700 W Q=15 kW LD. T=20K Pb, T=300K **O=16 MW** H,O WWR-M reactor

Figure 1. Location of the UCN source in the thermal column of the WWR-M reactor.

Calculations of neutron fluxes and thermal loads have been made using MCNP programs [7]. Figure 1 indicates the heat in the various components generated by the reactor at 16 MW power, notably, 15 kW in the lead shielding, 700 W in the liquid deuterium premoderator, 18 W in the aluminium shell of the central He chamber, and 19 W in the He-II. The thermal load on the source at 1.2 K temperature will thus be <u>37 W.</u>



Figure 2. UCN density as a function of the He-II temperature \bullet – in the closed source chamber, \blacktriangle – in a 35-l external trap, \blacksquare – in a 350-l external trap.

UCN source at WWW-R

UCN guide of UCN source



Figure 3. Schematic implementation of experimental equipment in the main hall of the WWR-M reactor hall. Beams of ultracold neutrons are named UCNx, cold and very cold neutron beams are named CNx. 1 - EDM spectrometer, 2 - UCN magnetic trap, 3 - n-n' experiment, 4 - UCN gravitational trap, 5 - Diffractometer, 6 - Reflectometer, 7 - Polarimeter, 8 - Powder diffractometer, 9 - Spin-echo spectrometer, 10 - Cryogenic equipment for UCN source, 11 - Technological platform for experimental equipment, <math>12 - Cooling system for the lead screen of the UCN source, 13 - Transport entrance to the main hall of the reactor.

A. Fomin, nEDM2017

https://meetings.triumf.ca/event/10/contributions/154/attachments/83/87/Fomin.pdf



CN and VCN guide of UCN source



UCN source @ 新研究炉

- ・ 冷中性子ビーム型(低熱負荷)と原子炉挿入型(高冷中性子flux)の両者の利点を用いる
- ・ UCNは遅いのでDC出力で構わない
- ・ 冷中性子源の極近傍に集光ミラーを設置
 - ・ UCN生成に必要なE=1meVの中性子のみを選択的に集光
 - ・ ガンマ線や低速中性子による発熱を抑制
- ・ UCN 生成の有効体積を大きく
 - TUCAN
 小さい、遠い → EDM容器へのUCN輸送効率
 4%
 - ・ 新研究炉
 大きい、近い →
 ~50 %
 - ・ 1 meV 冷中性子の超流動ヘリウム中のmean free path: 17 m
- ・ 複数のUCNポートを建設することにより、装置R&Dの効率化、種々の物理実験で利用可



14

UCN発生率の見積もり

- ・UCN生成断面積
 - ・1.5 µb (1.0±0.1 meVの平均)
- ・冷中性子fluxはJRR-3と同程度
 - 5 × 10¹³ [n/cm²/s/sr/eV]
 - ・1.0±0.1 meVの範囲では 1.0×10¹⁰ [n/cm2/s/sr]
 - ・立体角0.08 sr (m=5,2回反射)
 - 8 × 10⁸ [n/cm²/s]
- Production rate: 26 UCN/cm³
- UCN density inside He-II ($\rho = P^*\tau$)
 - 2,600 UCN/cm³ ($\tau = 100 \text{ s}, T_{wall} = 150 \text{ s}, T_{he-II} = 0.8 \text{ K}$)
- •総UCN生成量 9.1×10⁸ UCN
 - ・ 超流動ヘリウム体積 Φ300 mm × 5,000 mm → 350L



Fig. 1. Cross sections for production of ultracold neutrons with energies up to 233.5 neV in superfluid ⁴He, calculated from [27] (solid line) and [28] (dashed line).

UCN源と実験に必要なスペース

- Cold moderator近くに集光ミラー
 - ・ 立体角≒ 0.08 sr (全立体角の0.6%)
- ・ ガンマ線遮蔽をミラーとコンバーターの間に置く
 - Biフィルター
- サービス機器エリア
 - ・ 違うフロアレベルでOK
 - ヘリウム3冷凍機
 - 冷却能力 10 W @ 0.8 K
 - flow rate: 1.0 g/s
 - 大型真空ポンプ: 10,000 m³/hour
 - ヘリウム3循環システム
 - ヘリウム4液化器
 - 200 L/hour
- 実験スペース
 - 20 m × 15 m
 - 人が立ち入れるエリアで出来るだけ近く



2022/5/30,31 RCNP研究会「研究用原子炉を用いた原子核素粒子物理学」 20 m

Ε

S

まとめ

- ・超冷中性子(UCN)
 - ・物質容器に閉じ込め可能というユニークな特徴
 - ・さまざまな基礎物理実験に用いられる
- ・UCN生成
 - ・超流動ヘリウムUCNコンバーター+スーパーサーマル法
 - 高密度のUCNを得る
- ・海外事例
 - ・原子炉+超流動ヘリウムの組み合わせ
- ・UCN源@新研究炉
 - ・ cold moderator 直近に集光ミラー設置
 - ・設計段階の今が好機
 - ・UCN密度@実験容器で世界最大を目指す
 - ・ @production volumeは世界最大にはならなさそう
 - ・コンパクトな研究炉の特性を生かす