極冷中性子干渉計による物理の可能性

北口雅暁

名古屋大学 素粒子宇宙起源研究所 理学研究科 素粒子物性研究室(Φ研)







名古屋大学 藤家拓大(理研JRA)、北口雅暁、清水裕彦

- KEK 三島賢二、市川豪
- 理化学研究所 山形豊、細畠拓也
- 東北大学 關義親
- 京都大学 日野正裕



極冷中性子干渉計による物理の可能性 Fundamental Physics using Reactors 2022年5月31日 名古屋大学 北口雅暁





多層膜中性子干渉計、多層膜パルス中性子干渉計

極冷中性子干渉計の可能性

白色中性子干渉計の可能性



極冷中性子干渉計による物理の可能性 Fundamental Physics using Reactors 2022年5月31日 名古屋大学 北口雅暁



page

3

干涉計

原理

波動を2経路に分割・重ね合わせし

2経路間の位相差をなんらかのパラメータに対する強度比として取り出す。



光路長による位相差

座標に対する干渉縞

ガスの屈折率による位相差 (ガス密度)に対する干渉縞 空間の伸び縮みによる位相差 時刻に対する干渉縞





極冷中性子干渉計による物理の可能性 Fundamental Physics using Reactors 2022年5月31日 名古屋大学 北口雅暁



oade

中性子干涉計

大きい質量を持つ:**重力相互作用** 原子核:(低エネルギーでの)核力(**散乱長**) スピン・磁気モーメント:**スピン依存**性・**磁気**相互作用

実証と実用化

X線干渉計から着想

結晶格子による回折で 中性子波動を 2経路に分割・重ね合わせ

単結晶インゴッドから 切り出すことで、各ミラーが 自動的に整列している。





極冷中性子干渉計による物理の可能性 Fundamental Physics using Reactors 2022年5月31日 名古屋大学 北口雅暁



oage

中性子干涉計

大きい質量を持つ:**重力相互作用** 原子核:(低エネルギーでの)核力(**散乱長**) スピン・磁気モーメント:スピン依存性・磁気相互作用



H. Rauch, W. Treimer, U. Bonse, Phys. Lett. 47A, 369(1974).



極冷中性子干渉計による物理の可能性 Fundamental Physics using Reactors 2022年5月31日 名古屋大学 北口雅暁



bade

栄光の歴史

スピノルは 4π で1回転する

 $|\psi(t)\rangle = e^{-i\mu\vec{\sigma}\cdot\vec{B}\,t/\hbar}\,|\psi(0)\rangle$





Fig. 2. Observed intensity oscillations of the 0- and H-beam as a function of the difference of the magnetic field action on beam I and II ($\Delta \int B ds = \int B_z ds$ (path I) $- \int B_z ds$ (path II).

page

7

H. Rauch, et. al., Phys. Lett. 54A, 425 (1975).





栄光の歴史

物質波が地球重力によって位相シフトする



Collela, Overhauser, Werner, Phys. Rev. Lett. 34 (1975) 1472



極冷中性子干渉計による物理の可能性 Fundamental Physics using Reactors 2022年5月31日 名古屋大学 北口雅暁



8

栄光の歴史

ずれている?

物質波が地球重力によって位相シフトする



FIG. 1. Schematic diagram of the neutron interferometer and 3 He detectors used in this experiment.



FIG. 9. Experimentally observed tilt-angle interferogram normalized to C21 C3 to compensate for the dependence on tilt of the intensity of neutrons accepted by the interferometer for 1.8796-C neutrons in the symmetric interferometer.

K. C. Littrell, B. E. Allman, and S. A. Werner, Phys.Rev.A56 (1997) 1767.







S. A. Werner, et. al., Phys. Rev. Lett. 42 (1979) 1103.





栄光の歴史

n-p, n-d 散乱長の精密測定

原子核の計算モデルをセレクト





FIG. 19: Theoretical calculations of the coherent scattering length compared with the experimental value measured here. The central dark band is the 1σ confidence band and the lighter band is the 2σ confidence band. Only one of the theories fall within the 1σ band and only 2 fall within 2σ .

page 11

K. Schoen, et. al., Phys. Rev. C 67, 044005 (2003).





栄光の歴史



M. G. Huber, et. al., Phys. Rev. C 90, 064004 (2014).









極冷中性子干渉計による物理の可能性 Fundamental Physics using Reactors 2022年5月31日 名古屋大学 北口雅暁

page 13 K



栄光の歴史

量子力学基礎

Bell-like experiment $S = E(\alpha_1, \chi_1) + E(\alpha_1, \chi_2) - E(\alpha_2, \chi_1) + E(\alpha_2, \chi_2)$ $S = 2.051 \pm 0.019$ (Measured) > 2 (Classical) 11 B_0 Magnetic Prism (Guide Field) Helmholtz Coil Polarizer Incident Neutrons Phase shifter (γ) H-Detector (π-Spin Flipper) Magnet Yoke Mu-Metal Spin-Turner Neutron Interferometer Spin Rotator (a) Heusler Analyzer **O-Detector**

Y. Hasegawa, et. al., Nature 425, 46 (2002).

小澤の不等式の検証

$\epsilon(A)\eta(B) + \epsilon(A)\sigma(B) + \sigma(A)\eta(B) \geq \frac{1}{2}|\langle \psi|[A,B]|\psi\rangle|$



G. Sulyok, et. al., Phys. Rev. A 88, 022110 (2013)



極冷中性子干渉計による物理の可能性 Fundamental Physics using Reactors 2022年5月31日 名古屋大学 北口雅暁

bage 14 K



単結晶による中性子干渉計



利用波長が格子定数で決まってしまう

単色中性子しか使えない →→ 利用できる中性子**強度が極端に減る**

相互作用させる距離が育成可能な**結晶のサイズ**で決まってしまう 大型化できない →→ (将来の)高**感度**実験**に制限**がある

単結晶の動力学的回折を理解するのが難しい

経路を特定するのが難しい --- 系統的不確かさが残る





多層膜中性子ミラー

中性子に対するポテンシャルの異なる物質の多層膜 人工格子として**Bragg反射** 波長・帯域・反射率を自由に設計できる 多数回反射が少なく動力学的回折を無視できる

中性子磁気ミラー

多層膜の一方の膜に磁性体を使用する 中性子**スピンに対し選択的**に反射する 外場を制御してスイッチング機能も付けられる

中性子スーパーミラー

格子定数を徐々に変化させる **幅広い波長**の中性子を反射できる





page

16







困難

中性子は**可干渉長が短く**、鏡の高い設置精度が要求される

中性子は強度が弱い →→ 厳しい単色化・コリメートできない

→ 設置誤差で位相が混ざり込む ~**変位雑音**

$$\Gamma = \exp\left(-\frac{1}{2}(\sigma_k L)^2\right)$$

波長 1nm、波長分解能 3% → L < 15 nm



アラインメントされていた

多層膜ミラーを人工的にアラインメントできるか?





困難

中性子は**可干渉長**が短く、鏡の高い設置精度が要求される

中性子は強度が弱い →→ 厳しい単色化・コリメートできない

→ 設置誤差で位相が混ざり込む ~**変位雑音**

実証

多層膜ミラーをギャップ層を挟んで積層 →→ 設置精度要求を緩和 浅い角度で射入射



H. Funahashi, et. al, Phys. Rev. A54, 649 (1996)

page





改良

2経路の空間的分離は 1μm以下だった

高精度光学素子「**エタロン**」を用いてギャップを拡大、経路を空間的に分離

Fabry-Perot etalon



平滑、平行、平面 合成石英 roughness RMS < 0.3 nm $\lambda_{\text{He-Ne}}$ /150 matched front surfaces





極冷中性子干渉計による物理の可能性 Fundamental Physics using Reactors 2022年5月31日 名古屋大学 北口雅暁



19

ビームスプリッティングエタロンを用いた多層膜中性子干渉計

2経路の空間的分離 → 20µm



ミラーの一方を磁気ミラーにすることで高コントラストと制御のしやすさを実現

M. Kitaguchi et al., Phys. Rev. A67 033609 (2003).

Sage







M. Kitaguchi et al., Phys. Rev. A67 033609 (2003).





多層膜中性子干涉計





極冷中性子干渉計による物理の可能性 Fundamental Physics using Reactors 2022年5月31日 名古屋大学 北口雅暁 $\begin{array}{c}
\mathbf{K} \mathbf{M} \mathbf{i} \\
\mathbf{I} \mathbf{M} \mathbf{M} \mathbf{I} \\
\mathbf{K} \mathbf{M} \mathbf{I}
\end{array}$

パルス中性子と飛行時間法を用いれば、各波長の干渉を同時に測定できる

波長方向にも干渉縞が出るので、原理的に1パルスごと干渉縞を得られる

波長分解能が良いので干渉縞のコントラストも高くなる

原子炉の連続ビームでは波長の分解ができないので、縞が潰れる

位相不安定を、パルスごとにモニターできる

原子炉では:位相シフタ(phase flag)をスキャンして縞を作るので 1点よりも遅い擾乱があると位相が動いてしまう

波長帯域を広げられる

 $\Delta \phi = 2\pi \frac{mL}{h^2} \Delta E \underline{\lambda}_n \propto \underline{t_{\text{tof}}}$

多層膜スーパーミラーを用いれば 幅広い波長帯域に対応できる







BL05 NOPビームライン



04

05

06





BL05 NOPビームライン



04

05

06

Fundamental Physics using Reactors 2022年5月31日 名古屋大学 北口雅暁

25 page

KM

散乱長測定装置として実用化へ



ratory for Particle Properties

極冷中性子干渉計による物理の可能性 Fundamental Physics using Reactors 2022年5月31日 名古屋大学 北口雅暁

page 26 🛛 📕



多届時パルフ由性子干洗計



散乱長測定装置として実用化へ





極冷中性子干渉計による物理の可能性 Fundamental Physics using Reactors 2022年5月31日 名古屋大学 北口雅暁

oage 28 KM



最新の整備状況



極冷中性子干渉計による物理の可能性 Fundamental Physics using Reactors 2022年5月31日 北口雅暁 名古屋大学

К I M KM

波長帯域拡大へ

極冷中性子干渉計による物理の可能性 Fundamental Physics using Reactors 2022年5月31日 名古屋大学 北口雅暁

30 I M X KM I

位相変化決定精度

極冷中性子干渉計による物理の可能性 Fundamental Physics using Reactors 2022年5月31日 名古屋大学 北口雅暁 K M i I M X K M I

位相変化決定精度

散乱長高精度化

基礎データの再整備

NIST Center for Neutron Research				National Institute of Standards and Technology	
Home	ICP	Experiments	UserProposal	Instruments	SiteMap

Neutron scattering lengths and cross sections

COW実験(再)

単結晶で見えた(ことがある) ずれは本物か?

原子炉中性子ビームでは、、、

時間平均強度は強い

減速体によっては**長波長**をたくさん出せる、かも (UCNコンバーター周りの減速体から取り出す、とか)

定常ビームなので飛行時間法で波長方向の縞をとれない (さまざまな波長が混ざってずっと供給されている)

長波長で(こそ)可能になる実験

- ・長波長によって感度が向上する測定
- ・大きいビーム分離が必要な測定
- ・特定の波長でのみ効果が現れるような測定

地球重力による位相シフト

$$\Delta \phi = -2\pi m^2 \frac{g}{h^2} \lambda_n A \sin \theta$$

FIG. 1. Schematic diagram of the neutron interferometer and 3 He detectors used in this experiment. 波長で10倍 開き角が10倍、ミラー間距離を10倍に 面積100倍 → 感度3桁向上

ただし素直に考えると強度が2桁以上弱い ので、どこまで強度と時間が取れるかが重要

 \rightarrow VCNポート? \rightarrow 白色干渉計?

ade

地球重力による位相シフト
$$\Delta \phi = - 2\pi m^2 \frac{g}{h^2} \lambda A \sin heta$$

post-Newtonianを含むスピン1/2の粒子のハミルトニアン

$$\begin{aligned} \mathsf{H}_{\mathsf{pN}} &= \frac{\mathbf{p}^2}{2m} + \frac{m \phi}{1} - \frac{\boldsymbol{\omega} \cdot (\mathbf{L} + \mathbf{S})}{2} \\ &+ \frac{1}{c^2} \left(\frac{4 G M R^2}{5r^3} \boldsymbol{\omega} \cdot (\mathbf{L} + \mathbf{S}) - \frac{\mathbf{p}^4}{8m^3} + \frac{m}{2} \phi^2 + \frac{3}{2m} \mathbf{p} \cdot \phi \mathbf{p} + \frac{3 G M}{2mr^3} \mathbf{L} \cdot \mathbf{S} + \frac{6 G M R^2}{5r^5} \mathbf{S} \cdot [\mathbf{r} \times (\mathbf{r} \times \boldsymbol{\omega})] \right) \\ &\left[\begin{aligned} \mathsf{M}: \text{ mass of Earth } & \mathsf{w}: \text{ angular velocity of Earth } \\ \mathsf{R}: \text{ Earth radius} & \phi: \text{ Newtonian gravitational potential} \end{aligned} \right] \\ & \underset{\mathbf{S} = \hbar \sigma/2}{\overset{\mathbf{M}}{\mathbf{\sigma}}} \end{aligned}$$

Example : $\lambda = 0.88$ nm, A = 3.3 × 10⁻⁴ m², $\Delta \theta = 1.6$ deg

Sagnac

COW $\Delta \phi_1 = 3 \quad (\propto \lambda \cdot A)$

redshift correction (potential) $\Delta \phi_3 = 2 \times 10^{-10} (\propto A) \qquad \Delta \phi_4 = 2 \times 10^{-9} (\propto \lambda \cdot A)$

S. Wajima, M. Kasai, T. Futamase, PRD 55, 1964 (1997)

redshift correction (kinetic) $\Delta \phi_5 = 3 \times 10^{-5} \quad (\propto \lambda \cdot A)$

 $\Delta \phi_6 = 5 \times 10^{-24}$

Lense-Thirring

 $\Delta \phi_2 = 0.5 \quad (\propto A)$

未知短距離力の探索

- ・大きいビーム分離が必要な測定
- ・特定の波長でのみ効果が現れるような測定

 $V_{\rm eff} = 2\pi G \alpha_G m_n \rho \lambda^2 e^{-x/\lambda}$ outside the material; $V_{\rm eff} = 2\pi G \alpha_G m_n \rho \lambda^2 (2 - e^{-x/\lambda})$ inside the material. $V_G(r) = -G\frac{mM}{r}(1 + \alpha_G e^{-r/\lambda}),$

2枚の物質を「隙間」をあけて配置 界面から「重力」ポテンシャルが 染み出しているなら、中性子波動は その影響を受ける

bade

38

$$\Delta \Phi = \frac{4\pi G \alpha_G m_n \rho \lambda^3}{k_0} \left(\frac{2m_n}{\hbar^2}\right) \left(1 - e^{-L/\lambda}\right)$$

 $L \sim \lambda$ の時、位相変化が大きく現れる。

パラメトリック共鳴を用いた未知短距離力探索 中性子波長が**ギャップ幅と同じ(定数倍)**時に 異常透過が起こって位相シフトが大きくなる

→ 極冷中性子干渉計

極冷中性子十渉計による物理の可能性 Fundamental Physics using Reactors 2022年5月31日 名古屋大学 北口雅暁

パラメトリック共鳴を用いた未知短距離力探索

FIG. 6. (Color online) Schematic view of the proposed Kitaguchi-type interferometer. The interferometer comprises (a) a neutron spin polarizer and neutron beam optics to match the phase space distribution shown in the left inset, (b) a $\pi/2$ flipper, (c) an etalon set with multilayer mirrors deposited on the inner surface of the air gap, (d) a π flipper, (e) a material plate with a thin gap, and (f) a neutron spin analyzer. The left inset shows the acceptance of the interferometer to avoid the beam path overlap between two etalon sets. The middle and right insets are enlarged drawings of an etalon set and the material plate, respectively.

極冷中性子干渉計による物理の可能性 Fundamental Physics using Reactors 2022年5月31日 名古屋大学 北口雅暁

page

- 40

パラメトリック共鳴を用いた未知短距離力探索

$$V_G(r) = -G\frac{mM}{r}(1 + \alpha_G e^{-r/\lambda}),$$

中性子波長 $\lambda_n = 30nm$ ギャップ幅をスキャン $L = 0.5\lambda \sim 2.0\lambda, 0.5\lambda$ step

> V. Gudkov, et al., Phys. Rev. C83 025501 (2011).

> > oage

パラメトリック共鳴を用いた未知短距離力探索 10²⁷ 10²⁶ Nesvizhevsky et al. [17] 10²⁵ 25 Kamiya *et al.* [20] 10²⁴ (EXCLUDED REGION) 10²³ **BL05 MLF** 10²² 3 Mohideen *et al.* [10] 10²¹ 10²⁰ 20 Mostepanenko et al. [18] 10¹⁹ 10¹⁸ Decca et al. [16] 10¹⁷ 10¹⁶ **10**-9 **10**⁻¹⁰ 10⁻⁸ 10λ [m] 10 P) 2 5 3 0 $\log_{10}[\lambda(nm)]$

$$V_G(r) = -G\frac{mM}{r}(1 + \alpha_G e^{-r/\lambda}),$$

中性子波長 $\lambda_n = 30nm$ ギャップ幅をスキャン $L = 0.5\lambda \sim 2.0\lambda, 0.5\lambda$ step

> V. Gudkov, et al., Phys. Rev. C83 025501 (2011).

白色中性子干渉計の可能性

パルス中性子ビームでは飛行時間を用いて干渉縞を観測できる

$$\Delta \phi = 2\pi \frac{mL}{h^2} \Delta E \lambda_{\rm n} \propto t_{\rm tof}$$

常に(1パルスごとに)干渉縞を観測するので 長時間の擾乱をモニターできる。

ade

連続中性子ビームでも、プリズムを使って分光すれば(空間)干渉縞になる

白色中性子干渉計の可能性

連続中性子ビームでも、プリズムを使って分光すれば(空間)干渉縞になる

極冷中性子はビーム発散が大きい → 集光系と組み合わせる

まとめ

中性子干渉計は高感度な検出器

- ・核力ポテンシャル
- ・重力ポテンシャル
- ・スピン依存ポテンシャル

その感度は波長と相互作用距離に比例

長波長・大型化が可能な 多層膜ミラーを用いた中性子干渉計

パルス中性子への適用によって

・高統計化・安定化

が実現し、一気に実用化に向けて進み出した

研究炉で大強度極冷中性子ビームが得られと

・パラメトリック共鳴による未知力探索など

分光によって高統計・安定が可能に

