

H26/12/26, 27

中性子イメージング専門研究会

パルス中性子の3次元偏極度解析による磁場 強度と方向の定量評価とそのイメージング

北海道大学大学院工学院 〇和田直大 日本原子力研究開発機構 J-PARCセンター 篠原武尚 名古屋大学大学院工学研究科 鬼柳善明

・磁場イメージング法の検出深さ

従来のイメージング ____〉 漏洩磁場や表面近傍



閉鎖空間の磁場分布や材料内部の磁場分布を 画像化することが可能

永久磁石の周りの磁場を可視化



Strobl, Kardjilov,et al., Nature Physics, vol.4,pp399-403,2008

・パルス中性子の飛行時間法の利用 磁場の強度と方向を定量的に取得することが原理的に可能

・J-PARC/MLFとHUNSに実験体系を構築





磁場強度と方向の定量的取得~歳差運動~

中性子と磁場との相互作用

$$\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{\sigma}_{n}}{\mathrm{d}t} = \gamma \left[\boldsymbol{\sigma}_{n} \times \boldsymbol{B}\right]$$

$$\varphi = \omega_{\rm L} t = \frac{\gamma m_{\rm n} \lambda}{h} \int_{\rm path}^{B \rm ds}$$

*σ*_n:中性子スピンに平行な単位ベクトル

- t:磁場滞在時間
- γ :磁気回転比
- **B**:磁場ベクトル(B=|**B**|)
- φ :歳差角
- *ω*_L:ラーモア周波数
- h: プランク定数
- λ:中性子波長

歳差角φは磁場滞在時間t(中性子の波長λ)と磁場の経路積分に比例

歳差角 φ を偏極度 Pとして取得

$$P = \frac{n_{+} - n_{-}}{n_{+} + n_{-}}$$

 n_+ : The number of spin-up neutrons n_- : The number of spin-down neutrons

3次元偏極度解析

$$\boldsymbol{P}(\boldsymbol{\varphi}) = \mathbf{D}\boldsymbol{P}(0)$$

M. Th. Rekveldt, Z. Phys. 259, 391 (1973).

$$\begin{pmatrix} P_{xx}(\varphi) & P_{yx}(\varphi) & P_{zx}(\varphi) \\ P_{xy}(\varphi) & P_{yy}(\varphi) & P_{zy}(\varphi) \\ P_{xz}(\varphi) & P_{yz}(\varphi) & P_{zz}(\varphi) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} D_{xx} & D_{yx} & D_{zx} \\ D_{xy} & D_{yy} & D_{zy} \\ D_{xz} & D_{yz} & D_{zz} \end{pmatrix} \boldsymbol{P}(0)$$

ー様磁場におけるDの表現

 $D_{xx} = 1 - (1 - \cos(\varphi))(1 - n_x^2)$ $D_{vv} = 1 - (1 - \cos(\varphi))(1 - n_v^2)$ $D_{zz} = 1 - (1 - \cos(\varphi))(1 - n_z^2)$ $D_{xy} = (1 - \cos(\varphi))n_x n_y - n_z \sin(\varphi)$ $D_{\rm vx} = (1 - \cos(\varphi))n_{\rm x}n_{\rm v} + n_{\rm z}\sin(\varphi)$ $D_{\rm vz} = (1 - \cos(\varphi))n_{\rm v}n_{\rm z} - n_{\rm x}\sin(\varphi)$ $D_{zv} = (1 - \cos(\varphi))n_v n_z + n_x \sin(\varphi)$ $D_{zx} = (1 - \cos(\varphi))n_z n_x - n_y \sin(\varphi)$ $D_{xz} = (1 - \cos(\varphi))n_z n_x + n_y \sin(\varphi)$ n:磁場ベクトルの方向余弦

振動周期	\rightarrow	磁場強度
振動振幅	\rightarrow	磁場方向

歳差角φは2πの周期性

パルス中性子の飛行時間法により、偏極度 の波長依存性の測定が高精度かつ高効率

偏極度の波長依存性を場所ごとに解析 →磁場強度と方向のイメージング





- 1/6: Polarizer/Analyzer: Stacked bent magnetic super-mirrors
- (2): Spin Flipper: AFP-type spin π -flipper
- (4): Spin Rotator: Mezei-type spin $\pi/2$ -flipper
- (7): Collimator: Solar collimator
- 5: Magnetic Shield

Material: Permalloy C and B

③: Coupling Coil: Gradient coil ⑧: 2D neutron detector

$$P = \frac{I_{\text{on}} - I_{\text{off}}}{I_{\text{on}} + I_{\text{off}}}$$

 I_{on} : Neutron intensities (Spin flipper on) I_{off} : Neutron intensities (Spin flipper off)

偏極イメージング実験@BL10(NOBORU)



Beam line: BL10(NOBORU)@J-PARC/MLF Detector : 5inch-RPMT -Scintillator : ZnS(Ag)/⁶LiF Pixel size: $0.25 \times 0.25 \text{ mm}^2$ Flight path length: 14.5 m Beam Size : 25 mm (W) × 25 mm (H) Measurement time Sample/Without sample :20 min at each incident and analyzed neutron spin status



Solenoid coil Windings: 30 Diameter: 5 mm Length: 15 mm Wire diameter: 0.5 mm Applied current: 1.5 A Direction cosine 0.501: -0.553: -0.667

偏極性能(サンプル無し)①



Polarization<93%

偏極性能(サンプル無し)②



サンプルの測定_偏極度の空間分布





入射スピンと解析スピン の向きによって、空間分 布の見え方が異なる

1.0

0.5

0.0

0.5

-1.0

Polarization

場所ごとにフィッティング ↓ 磁場強度分布 + 磁場方向分布

フィッティング

〇<u>コイルの磁場分布をモデル化してフィッティング</u>を実施

コイルの内外の磁場強度と方向をそれぞれ 異なる一様磁場と仮定し、フィッテング関数を構築



例)

〇スピン回転行列の複数の成分を同時にフィッティング

Magnetic Shield Box for Sample

h

コイルの磁場分布をモデル化(対角成分)





コイルの磁場分布をモデル化(対角成分)

	_{Dxx} の解析			
	Experimental result	Calculated result		
Magnetic field strength [mT]	3.52	3.51	・強度は、計算値に対し て2.7%の誤差	
n_{x}	0.45	0.501	・方向は、計算値に対し	
ny	-0.68	-0.553	て最大18.5%の誤差	
n _z	-0.58	-0.667		
	_{ዖyy} の解析			
	Experimental result	Calculated result		
Magnetic field strength [mT]	3.33	3.51	・強度は、計算値に対し て5.2%の誤差	
n _x	$n_{\rm x}$ 0.55		・方向は、計算値に対し	
ny	-0.48	-0.553	て最大12.5%の誤差	
n _z	-0.68	-0.667		
	_{Dzz} の解析			
	Experimental result	Calculated result		
Magnetic field strength [mT]	3.88	3.51	・強度は、計算値に対し て9.6%の誤差	
n _x	0.76	0.501	・方向け 計質値に対し	
ny	-0.58	-0.553	て最大55.8%の誤差	
n_{z}	-0.29	-0.667		

コイルの磁場分布をモデル化+同時フィッティング



	Experimental result	Calculated result	
Magnetic field strength[mT]	3.41 ± 0.88	3.51	
n _x	0.48 ± 0.17	0.501	
n_{y}	-0.57 ± 0.15	-0.553	
$n_{\rm z}$	-0.66 ± 0.07	-0.667	

•	誤	差	範	井	内	で	一致
---	---	---	---	---	---	---	----

- ・強度は、計算値に対し て2.8%の誤差
- ・方向は、計算値に対して最大4.2%の誤差

イメージング(対角成分)



・コイルの中心軸から離れるにつれて磁場強度の減衰が見られた
・方向については、コイルの内部と外部とでコントラストが見られた

絶対値の評価(BL)



絶対値の評価(方向余弦)



まとめ

パルス中性子の偏極度解析を用いた磁場強度と方向の定量評価を 目的として、コイルの磁場を測定した。

ロ平均磁場強度と方向の定量評価(0次元解析)

<u>コイル内部の磁場強度と方向の定量評価</u>

①コイルの磁場分布をモデル化し、フィッティング関数を構築 ②スピン回転行列Dの複数の成分を同時に解析(連立方程式)

-実験解析値は数値解析値と誤差範囲内で一致

<u>コイル内部の平均磁場強度と方向の定量化は可能</u>

ロ磁場強度と方向のイメージングの定量性の評価(2次元解析)

-磁場の経路積分BLの分布はソレノイドコイルの形状を反映した -コイル内部の方向の定量イメージングは可能、コイルの外部の方向のイメージングに課題

<u>フィッティング関数の改良およびフィッティング方法を再検討</u>