Kyoto University Research Reactor Institute neutron optics

スピン干渉を用いたSANS ~MIEZE-SANSを中心に~







Contents

~中性子小角散乱(SANS)の高度化~
 ●SANSに非(準)弾性散乱分光を!
 MIEZE型スピンエコー分光法の原理と装置開発

◆SANSの汎用化~ ●小型中性子源におけるSANSを考察。 スピン干渉を用いたSANSの一提案

どちらもスピン干渉 (スピンエコー)の 原理を用いる



KURRI neutron optics

A research by using NSE



Figure from P. Schleger et al., PRL 81 (1998) 124-127

KURRI neutron optics



Neutron Spin Echo method

x

Polarized

(wide-band)

 P_x

neutron

Energy resolution and beam monochromatization independent from each other!

$$P_{\text{NSE}} \propto \int S(Q, \omega) \cos \omega \tau \, d\omega$$

= $I(Q, \tau)$
Fourier
Time: $\tau = \frac{\hbar \omega_L L_0}{mv^3}$
 $I(Q, \tau) \propto \exp[-\gamma t]$
 $\gamma \propto DQ^2$
Simple case
D:diffusion constant

Neutron velocity changes $\rightarrow P_{NSE}$ reduces

Larmor precession

 $B_0(-z)$

L0

B

F.Mezei, Z.Phys.255 146(1972).

URRI neutron optics

2010年1月18-19日 京大炉事務棟会議室 第1回中性子小角散乱解析法研究会

 $A B_0(+z)$

LO

<u>中性子共鳴スピンエコー(NRSE)</u>



温度制御、圧力制御など

KURRI neutron optics

MIEZE(Modulated IntEnsity by Zero Effort)法の概念図



$$|\psi\rangle_{det} = |\uparrow_1\rangle + e^{i\phi}|\uparrow_2\rangle = e^{i(\Delta\phi - (\omega_1 - \omega_2)t)}|\uparrow\rangle$$

上流フリッパー間でついた位相差を 位相差を取り返した「位置」で波動関数 検出器までの距離で取り返す が強め合う重ね合わせが観測される

<u>サンプルー検出器間には何も無し!</u>

〇検出器を並べることで中性子強度のゲインが大きい(Q分解能もあげられる)

ONRやSANSに適用可能。サンプル位置で強磁場すらかけられる。 O偏極解析が可能(スピンフリップ散乱もvisibility 1で測定。Hの非干渉性散乱の分離) Oパルス中性子源の場合、エコー条件の緩和、1パルスごとにエコー測定が(原理的)に可 能△高分解能(高周波駆動)の場合、サンプルによる位相分散の問題有

KURRI neutron optics2010年1月18-19日京大炉事務棟会議室第1回中性子小角散乱解析法研究会









Diffusion of magnetite particles

τ ~10 ns if diameter ~10nm@RT
S.H.Kilcoyne et al.,
J.Mag.Mag.Mat.140-144(1995) 1466.
V. T. Lebedev et al.,ibid 122(1993) 83.

Superparamagnetism(SPM)

τ =ps∼ns if diameter ~10nm@RT



K :magnetic anisotropy energy *V* :particle volume

KURRI neutron optics



Magnetite particles (Fe₃O₄)

SPM:L. Néel, Ann. Geophys. 5, 99 (1949).W. F. Brown, Jr., Phys. Rev. 130, 1677

(1963). 2010年1月18-19日 京大炉事務棟会議室 第1回中性子小角散乱解析法研究会

MIEZE technique(2nd analyzer) for magnetic scattering

By inserting 2nd analyzer after sample, we can measure nuclear and magnetic scattering separately!

$$\boldsymbol{P'} = \frac{-\boldsymbol{Q}(\boldsymbol{P} \cdot \boldsymbol{Q})}{|\boldsymbol{Q}|^2}$$

$$\boldsymbol{P}=(0,0,-z), \quad \boldsymbol{P}\perp\boldsymbol{Q},$$

$$P' = 0 = \begin{pmatrix} 0,0,+\frac{z}{2} \\ 0,0,+\frac{z}{2} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0,0,-\frac{z}{2} \\ 0,0,-\frac{z}{2} \\ 0,0,-\frac{z}{2} \end{pmatrix}$$



Spin flip = magnetic/2 non-spin flip = nuclear + magnetic/2 Nuclear = Non spin flip — Spin flip flip

KURRI neutron optics



New MIEZE technique(2nd analyzer)

In MIEZE, it is easy to insert magnetic device around sample!

(transmission geometry type)



KURRI neutron optics

2010年1月18-19日 京大炉事務棟会議室 第1回中性子小角散乱解析法研究会

Guide field(\downarrow)

MIEZEの新しい測定法:磁性ナノ構造のスピンダイナミクス

磁性流体微粒子の拡散

超常磁性緩和

核散乱からの寄与。粒径10nmなら>nsec.磁気(スピンフリップ)散乱からの寄与。粒径10nm 現在のMIEZEレンジ(0.3~1.6ns)外 室温であれば、nsec以下。現在MIEZEレンジ内





偏極解析により、非干渉性散乱を1/3にし、かつその動き[S (q,t) inc]も同定可能

Structure of Resonance Spin Flipper(RSF)



Let's consider a pulsed neutron beam



By changing amplitude of oscillation field as a function of 1/*t*, RSF works all wavelength!





KURRI neutron optics

New Bz coil(iron yoke) system works@MIEZE at JRR-3



Required electric(DC) power $\rightarrow 1/20(1KW \rightarrow 50W@600kHz RSF)$



+ No cooling system 2010年1月18-19日 京大炉事務棟会議室 第1回中性子小角散乱解析法研究会



J-PARC MLF NOBORUビームライン平面・上面図面及び周辺写真







J-PARC BL10(NOBORU) ポートにおけるMIEZE実験





J-PARC MLF BL10(NOBORU)

> Slit Polarizer: (5Qc Fe/SiGe3(Si)) RSF1 RSF2 Analyzer: (5Qc Fe/SiGe3(Si)) Detector : ¹/₂ inch He-3

KURRI neutron optics





Cross fiber 2D-PSD (JAEA type) for MIEZE



KURRI neutron optics2010年1月18-19日京大炉事務棟会議室第1回中性子小角散乱解析法研究会



MIEZE(Modulated IntEnsity by Zero Effort)法



NOBORUの実験では、上流フリッパー間(RSF1-2)の位相差は ほぼ0。下流(RSF2-検出器)では、>2π×100@9Åの位相差が ついている。エコー条件は全く成り立っていない!しかし時間 ビートシグナル(MIEZE)シグナルは見えている。何故?

KURRI neutron optics



最もシンプルなTOF-MIEZEセットアップとそのエネルギーダイアグラム

$$t_d = \frac{L_0}{v_1} + \frac{L_1}{v_1} + \frac{L_2}{v_1} + \frac{L_3}{v_2}$$

 $\phi = \omega_2 t_d - \omega_1 L_1 / v_1 + \omega_2 L_2 / v_1 + \omega_2 L_3 / v_2$

基準振動項 RSFのエネルギー差による位相差

KURRI neutron optics

分散項(配置による位相差)





MIEZEの観測はいつでもt_dの関数:実験配置によって基準振動の<u>周</u> 期が変わるがエコー条件の制約は大きく緩和される。

JRRI neutron optics



Our Realistic Design Target



NRSE (RSF distance:2.5m, max.RF :2MHz,1< λ <2(nm 0.1<Q<10(1/nm) 1(ps)< τ <50(ns)



MIEZE

max RF:600kHz, $0.25 < \lambda < 1.1(nm)$ 0.1 < Q < 35 (1/nm) $0.1(ps) < \tau < 11 (ns)$ % high angle (sample-detector:1.0m) 7 < Q < 35(1/nm) $0.1(ps) < \tau < 0.4(ns)$ % small angle (sample-detector:4.8m) 0.1 < Q < 8(1/nm) $0.1(ps) < \tau < 11(ns)$

KURRI neutron optics



VIN ROSE arrangement plan for J-PARC





K.Mishima, et. al., Nucl.Inst.Meth. A600(2009)342.

KURRI neutron optics



MIEZE option install to JRR-3 SANS-J II



SANS-JI MIEZE でまず実施するスペック 通常使用する入射波長0.6nm 最も単純なMIEZE体系(2つの $\pi/2$ コイルのみ)で行う $\Delta \omega$ =70kHzとすると、 τ =1ns(0.66 μ eV) $\Delta \omega$ =0.3MHz程度が可能なので、 τ =4.1ns(0.16 μ eV) 波長を1.2nmを用いると、 τ =33ns(0.02 μ eV) ※低周波は $\Delta \omega$ ~0.1kHzでも可能。



- J-PARC BL10(NOBORU)でMIEZEテストを行い、 100kHzMIEZEシグナルを測定。
- TOF-MIEZE分光法の定式化を行い、実証。
- 電磁石の新型RSFを用いてMIEZE及びNRSEシグナルを 測定、コンパクトなRSFを用いてSANS-JⅡにも設置

今後の予定と展開

- J-PARC BL05にて、高分解能MIEZE測定→試料測定
- JRR-3 SANS-JIにMIEZEを設置して試料測定
- VIN ROSE(Village of Neutron ResOnance Spin Echo spectrometers)のための専用のビームライン取得

Kyoto University Research Reactor Institute neutron optics

ご静聴ありがとうございます ご協力いただいている方々 北口雅暁、川端祐司 京大炉: 京大工: 田崎誠司 **Delft Univ.** Markus Bleuel 原子力機構:林田洋寿、片桐政樹、阿知波紀郎、 海老沢徹、丸山龍治、山崎大、曽山和彦 前川藤夫、及川健一 清水裕彦 KEK: **NOP** collaboration

