



# 北大中性子源HUNSを用いた 磁場イメージング手法の開発

北海道大学大学院工学院 ○根岸智哉 和田直大 鬼柳善明  
原子力開発研究機構 J-PARC センター 篠原武尚

中性子イメージング専門研究会@KUR

2013 Jan



# 研究の背景

## ◆ 従来の磁気イメージング

媒体	手法例	空間分解能	検出深さ	空間磁場	一括撮影	その他
磁気センサー	走査ホール素子顕微鏡	$> 1 \mu\text{m}$	表面	○		
	SQUID顕微鏡	$> 100 \mu\text{m}$	表面	○		
円偏光	カー効果顕微鏡	$> 100\text{nm}$	表面			
	透過X線顕微鏡	$> 10\text{nm}$	$> 100\text{nm}$		○	元素選択性
電子線	スピン偏極走査電子顕微鏡	$> 10\text{nm}$	$> 1\text{nm}$			高真空環境
	ローレンツ顕微鏡	$> 1\text{nm}$	$> 1 \mu\text{m}$	○	○	高真空環境
中性子		$> 100 \mu\text{m}$	cmオーダー	○	○	

## ◆ 偏極中性子を用いた磁気イメージング

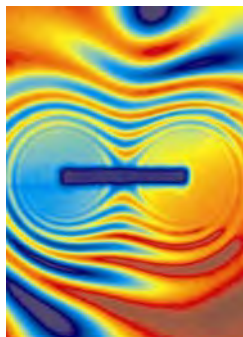
中性子の持つ高い透過能力・磁気モーメントによって、これまで測定が困難であった磁場の測定が可能になる!!

物質の内部や閉鎖空間の磁場観察  
1mm以下の分解能で、広範囲の磁場を一括撮影できる。



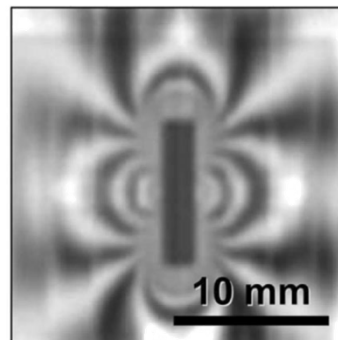
## 研究の目的

### ◆ 世界で行われている中性子磁気イメージング



永久磁石の周りの磁場を  
イメージングのした様子

Nature Physics, vol.4, pp399-403, 2008  
Strobl, Kardjilov, ...@HZB



F. M. Piegsa, et al., Phys. Rev. Lett. 102  
(2009) 145501.PSI

### ◆ パルス中性子を用いた磁気イメージング

日本ではJ-PARCで、パルス中性子の飛行時間法と偏極度解析を組み合わせた研究開発が行われている。

...磁場のベクトル情報を定量的に求めることが原理的に可能

この手法はまだ、開発段階にある。

→ 小型加速器中性子源において、パルス中性子を用いた  
磁気イメージングの手法を確立する。

北大中性子源のフレキシブルな態勢を生かして大型中性子源の難点の補完

→ 手法の開発・小型加速器中性子源で可能な低分解能での測定を目指す。



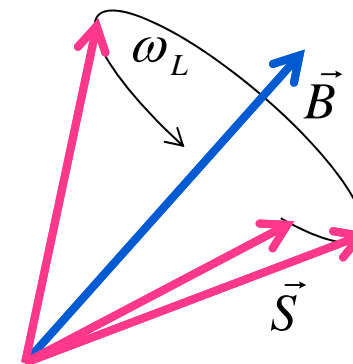
# 偏極中性子磁気イメージングの原理

## ◆ 中性子と磁場の相互作用

磁場中において中性子はラモア歳差運動を行う。

$$\frac{d}{dt} \vec{S} = \gamma [\vec{S} \times \vec{B}]$$

$\vec{S}$ : Spin vector	$\omega_L$ : Larmor frequency
$\vec{B}$ : Magnetic field	$v$ : Neutron velocity
$\gamma$ : Gyromagnetic ratio	$\lambda$ : Wavelength



歳差角

$$\rightarrow \varphi = \omega_L t = \frac{\gamma}{v} \int_{path} B ds = \frac{\gamma m_n \lambda}{h} \int_{path} B ds$$

単色中性子の利用が不可欠  
→原子炉の利用が主である。

スピン歳差角は中性子の速度(波長)と磁場の経路積分によって示される。

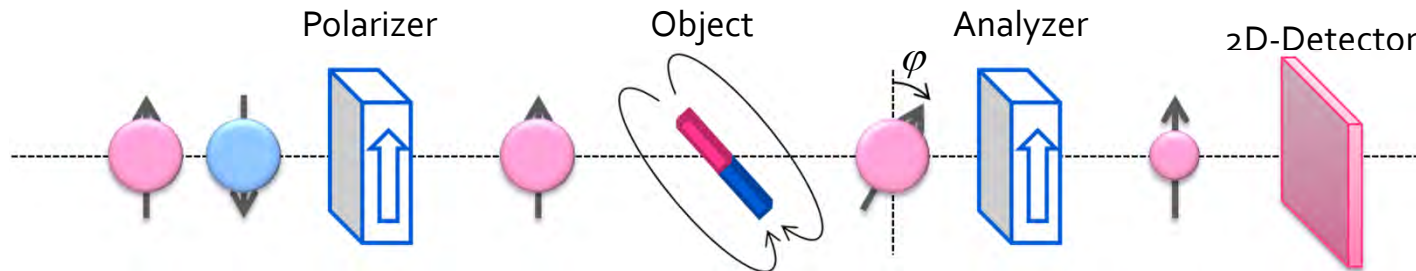
→ スピンの歳差角を調べることによって、磁場の強さが決定される。



# 偏極度の観察・パルス中性子の利用

## ◆ 偏極度

$$P = \frac{n_+ - n_-}{n_+ + n_-} \quad \left( \begin{array}{l} n_+ : \text{Number of spin-up neutrons} \\ n_- : \text{Number of spin-down neutrons} \end{array} \right)$$



磁場と中性子の相互作用に伴う歳差角は、偏極度の変化として取得可能  
→2次元検出器でイメージングを行う

スピンの回転によって検出される偏強度は $\pi$ の周期性を持つ

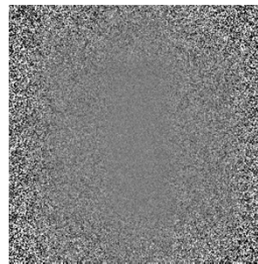
→磁場強度を一意に決定できない。

## ◆ パルス中性子の利用

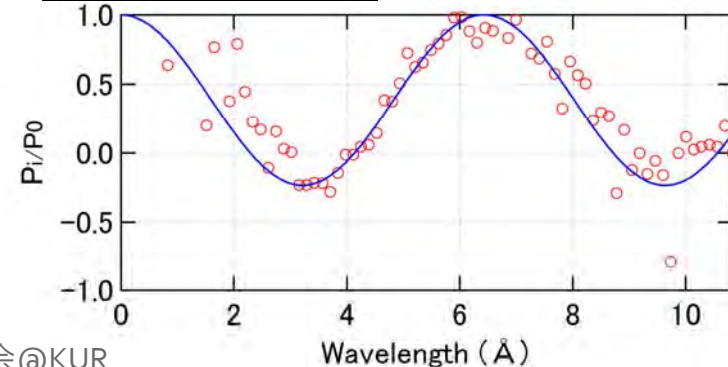
広範囲の波長の中性子を一度の測定で利用できる。

→偏極度の波長依存性を効率的に取得することができる。

偏極度の空間分布



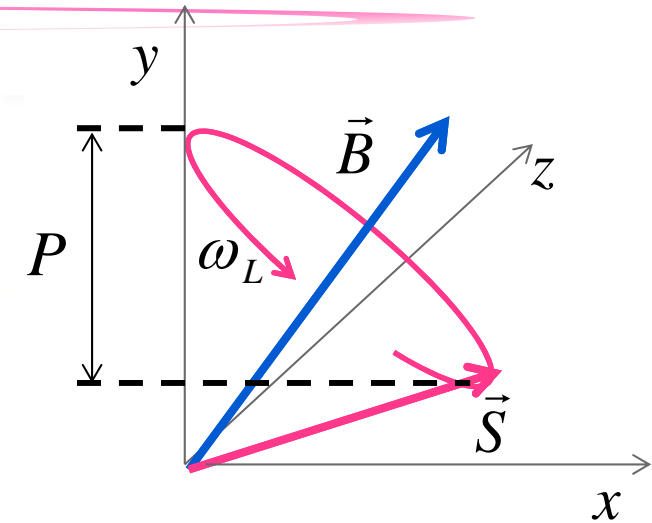
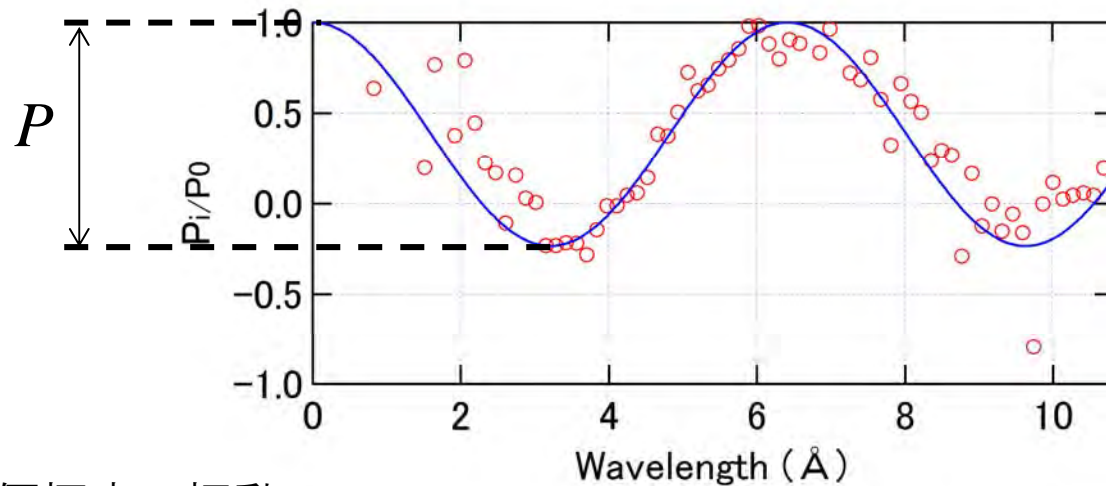
偏極度の波長依存性





# 磁場情報の定量化

## ◆ 偏極度の波長依存性



### 偏極度の振動

$$P_i/P_0 = 1 - (1 - n_y^2)(1 - \cos \varphi)$$

$$\varphi = \omega_p \lambda \quad (\omega_p : \text{Polarization frequency})$$

$\omega_p$  → 磁場の強さ

$n_y$  → 磁場の方向

### スピン回転角

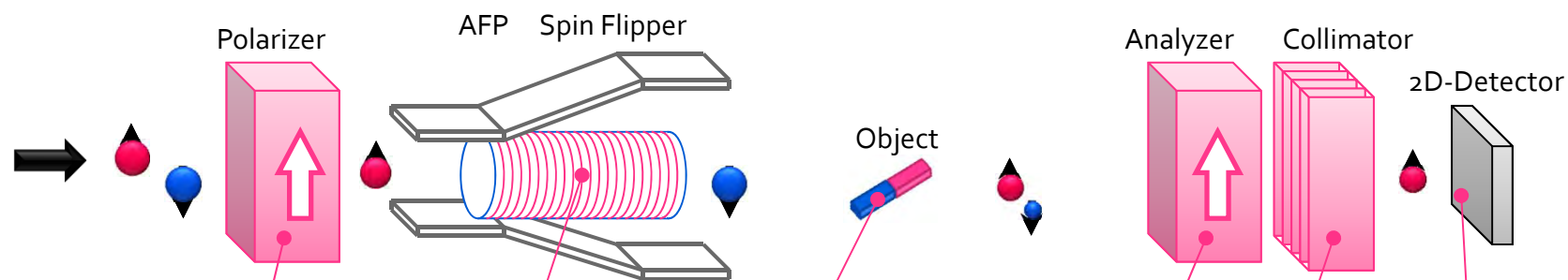
$$\varphi = \omega_L t = \gamma B t$$

$$B = \omega_p \frac{3956}{\gamma L}$$

→ パルス中性子を利用することによって、磁場の強さと磁場の方向を定量的に求めることが可能になる!!



# 実験条件



- 中性子源 : 北大LINAC Right
- 減速材 : 個体メタン
- ビームサイズ : 20mmH×10mmW
- 偏極子 : 積層湾曲型磁気ミラー
- 測定時間 : 4.5時間 (810,000pulse)

- 飛行距離 : 7.47m
- 検出器 : 5-inch RPMT
- シンチレーター : ZnS(Ag)/<sup>6</sup>LiF
- ピクセルサイズ :  $\Delta x = \Delta y = 1\text{mm}$

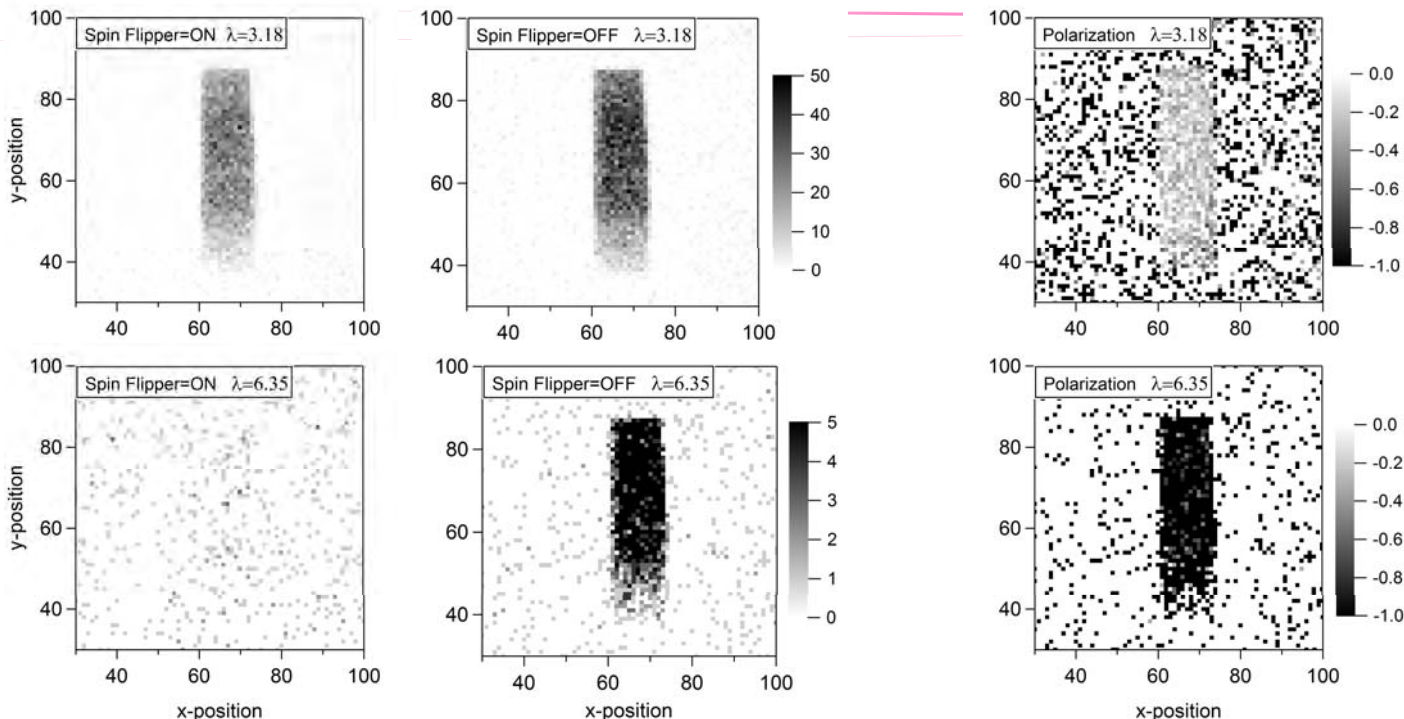




# 北大中性子源における偏極性能

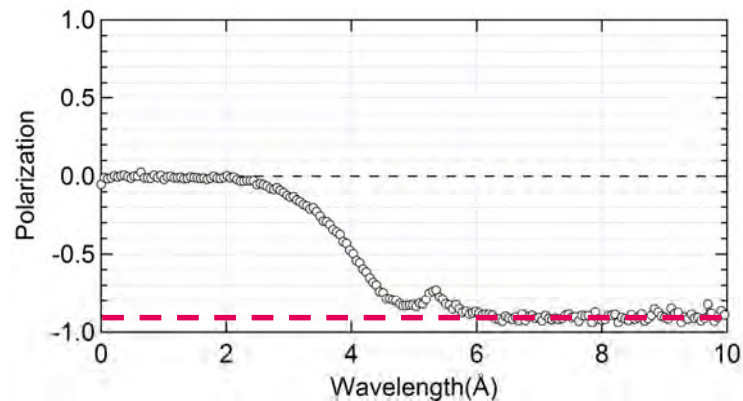
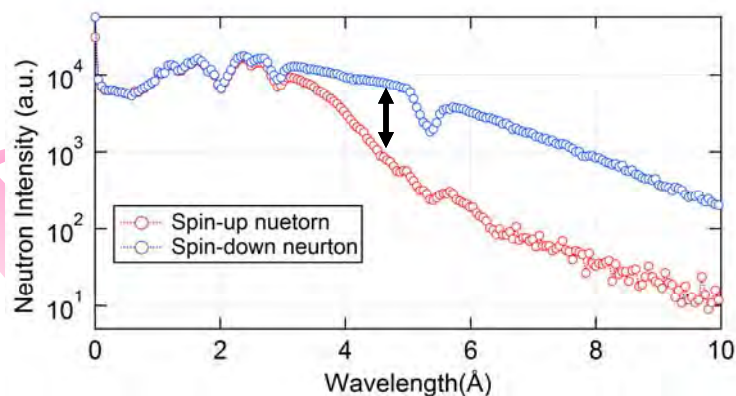
$$P = \frac{I_+ - I_-}{I_+ + I_-} \quad \left( \begin{array}{l} I_+ : \text{Spin Flipper = OFF} \\ I_- : \text{Spin Flipper = ON} \end{array} \right)$$

空間分布



波長依存性

3 Åを超えたあたりから偏極しはじめ、6 Å以上で、90%の偏極度が得られた。

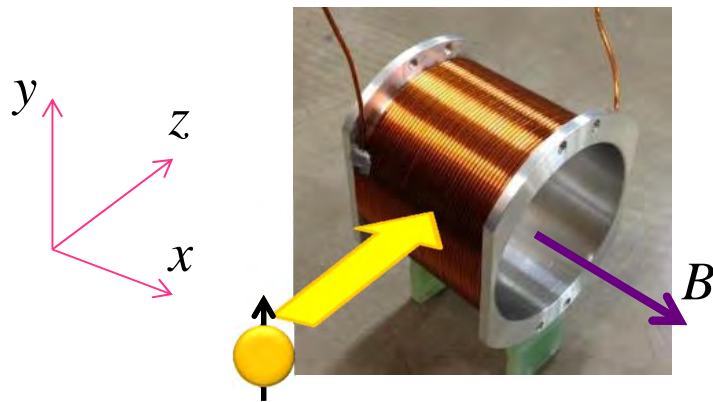




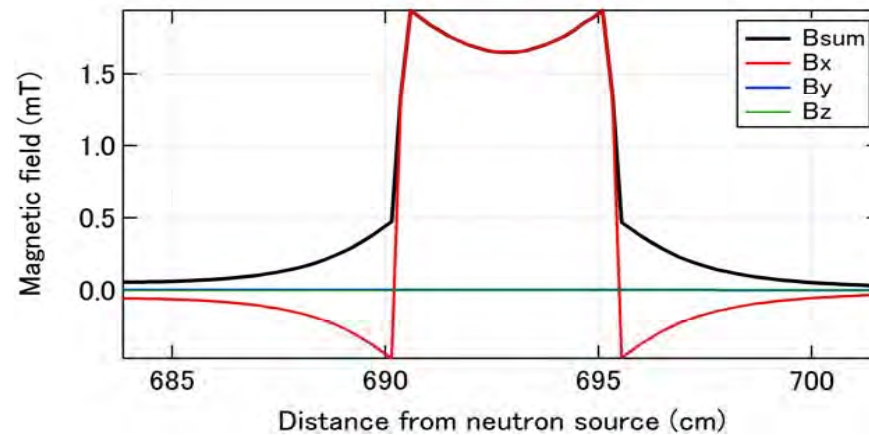


# 磁場のシミュレーション計算

観測対象となる磁場を発生させたコイル

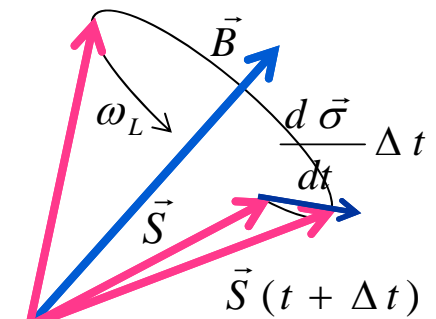


有限要素法による中性子経路の磁場分布



- ソレノイドコイル  
直径 : 50mmφ  
印加電流 : 2.0A
- 中性子の偏極方向 : y軸方向
- 磁場方向 : x軸方向

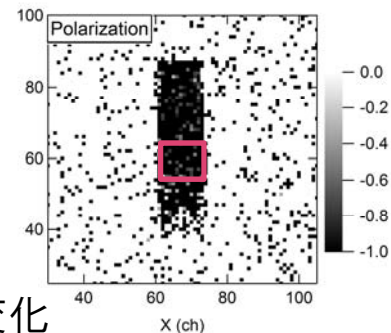
$$\frac{d\vec{\sigma}}{dt} = \gamma [\vec{\sigma} \times \vec{B}], \quad \vec{\sigma} = \frac{\vec{S}}{|\vec{S}|}$$
$$\vec{\sigma}(t + \Delta t) = \vec{\sigma}(t) + \frac{d\vec{\sigma}(t)}{dt} \Delta t$$
$$P(t) = \frac{[\vec{\sigma}(t)]_y}{\sqrt{[\vec{\sigma}(t)]_x^2 + [\vec{\sigma}(t)]_y^2 + [\vec{\sigma}(t)]_z^2}}$$



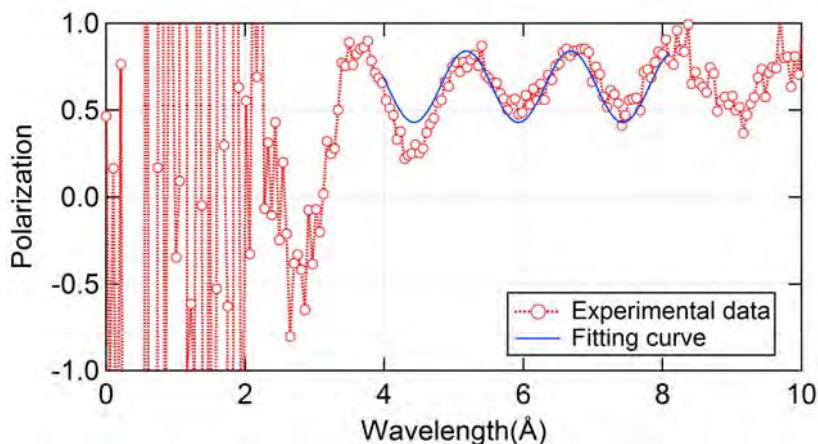


# 偏極度変化

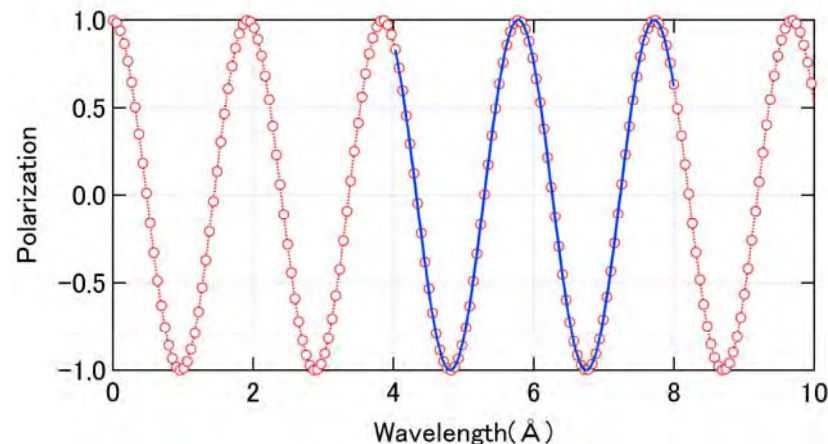
X=62~72, y=55~65chのデータについて計算



実験で得られた偏極度変化



シミュレーションによる偏極度変化



Sin関数でフィッティングすることによって磁場の強さを求める。

$$P = y_0 + A \sin(\omega_p \lambda + \theta)$$

$$BL = \omega_p \frac{3956}{\gamma}$$

	$\omega_p$	BL	L(m)	B(mT)
シミュレーション	3.24	0.0701	5.00E-02	1.40
実験値	4.18	0.0904	5.00E-02	1.81

コイル中心付近での実測値...1.47mT

偏極度の振動から磁場の強さを定量的に求めることができた。  
シミュレーションと実測値との差異がまだある、磁場の方向については定量化できない。

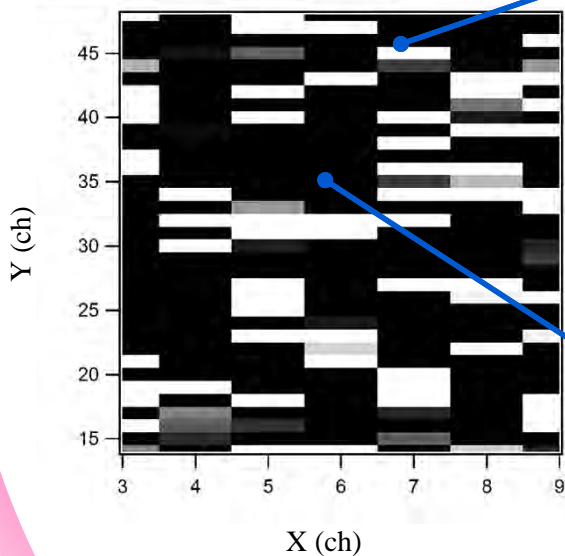


# 磁場強度のイメージング

各ピクセルについて偏極度の振動から磁場の強度を定量化する。

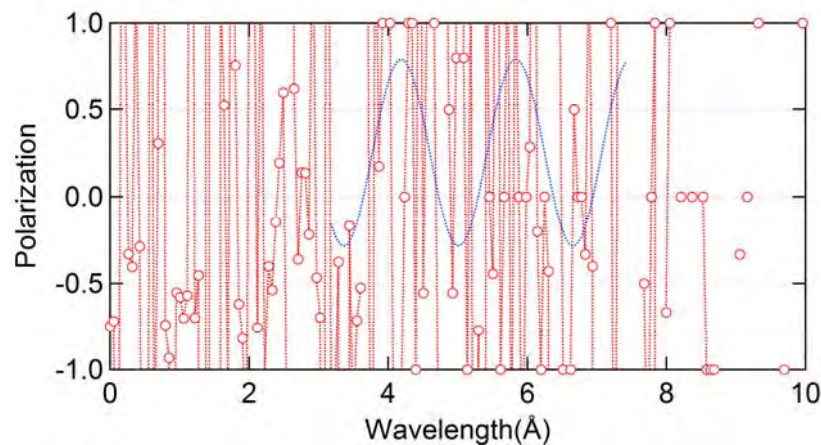
(7,46)

偏極度変化の空間分布

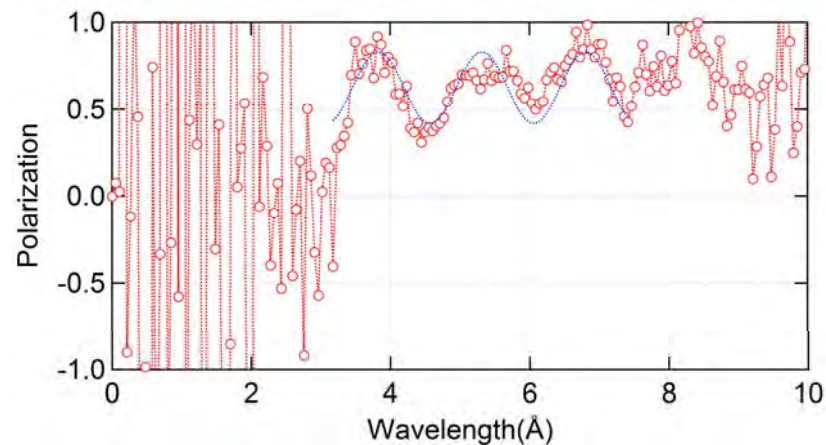


(6,35)

角ピクセルについて、Sin関数  
 $P=y_0+A(\omega_p\lambda+\theta)$ によってフィッティング



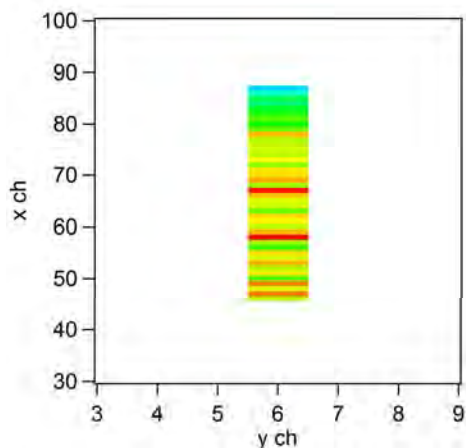
偏極度の振動が確認できる



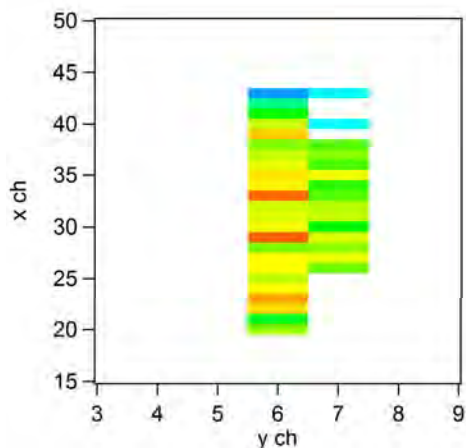


# 偏極度振動周波数の空間分布

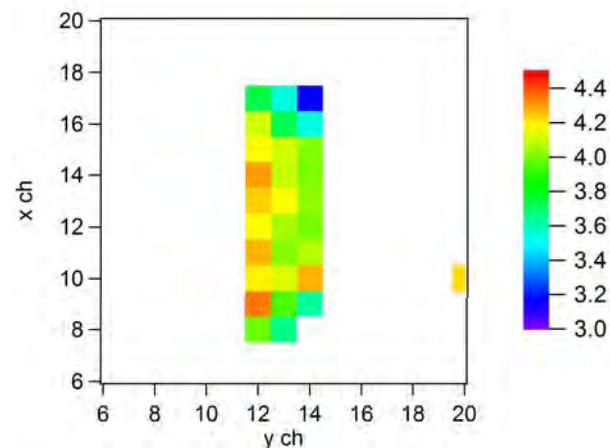
$\Delta x=10\text{mm}$ ,  $\Delta y=1\text{mm}$



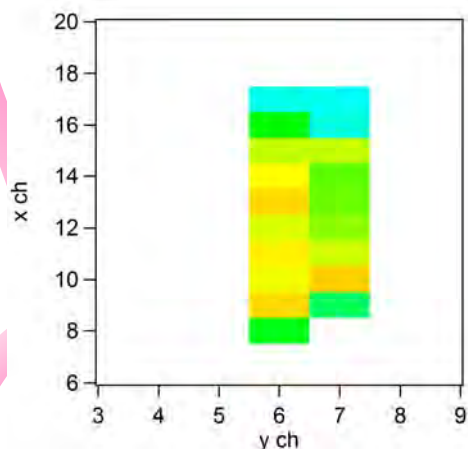
$\Delta x=10\text{mm}$ ,  $\Delta y=2\text{mm}$



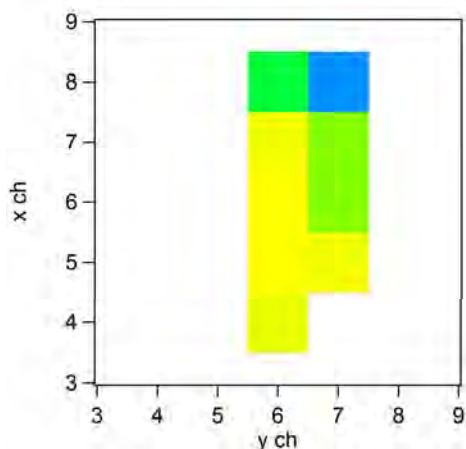
$\Delta x=5\text{mm}$ ,  $\Delta y=5\text{mm}$



$\Delta x=10\text{mm}$ ,  $\Delta y=5\text{mm}$



$\Delta x=10\text{mm}$ ,  $\Delta y=10\text{mm}$



それぞれの位置分解能における振動周波数のプロファイルが一致している部分がみられる。

空間依存で振動周波数が得られる。誤差範囲の検討、ビームダイバージェンスの検討が必要。

# まとめ

- 北大中性子源で、6 Å以上の波長において約90%の偏極度が得られた。この偏極度によってソレノイドコイルの作る磁場を偏極度変化として観測することができた。
- 偏極度解析によって磁場の強さを定量的に求めることができた。しかしながらシミュレーションによる値との差異や、磁場の方向について検討が必要である。
- スピン反転器ON,OFFそれぞれ4.5時間の測定で、約10mm×1mm程度の位置分解能で、磁場強度のイメージングが可能であることが分かった。

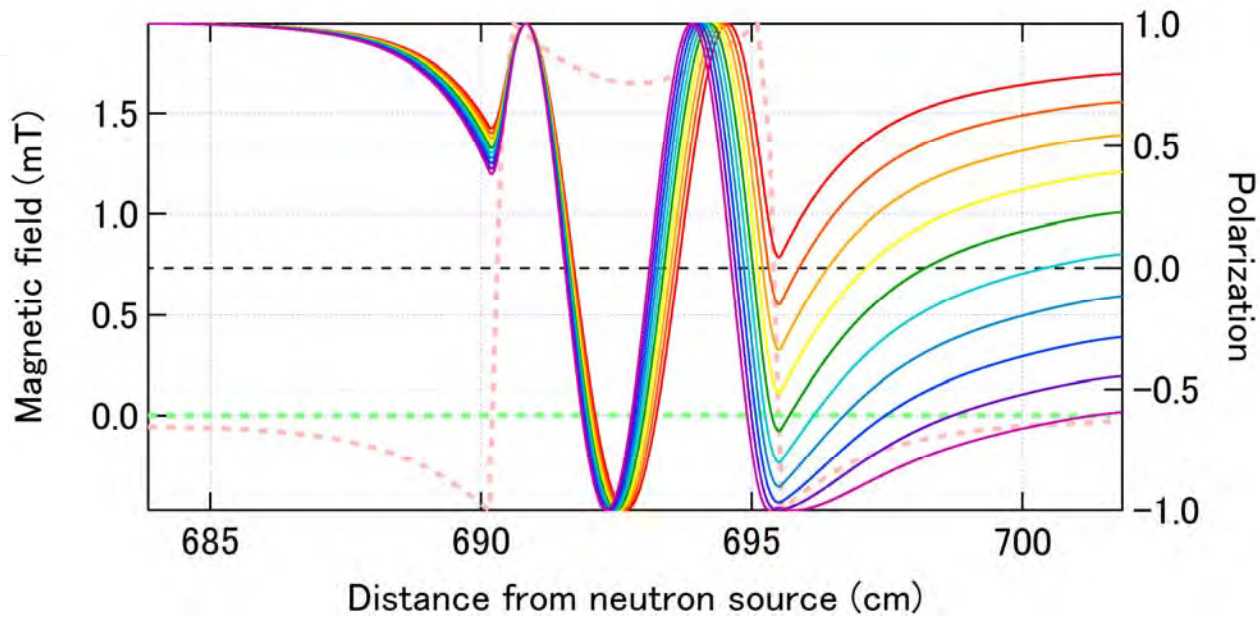




ご静聴ありがとうございました。







$$\frac{d \vec{\sigma}}{dt} = \gamma [ \vec{\sigma} \times \vec{B} ], \quad \vec{\sigma} = \frac{\vec{S}}{|\vec{S}|}$$

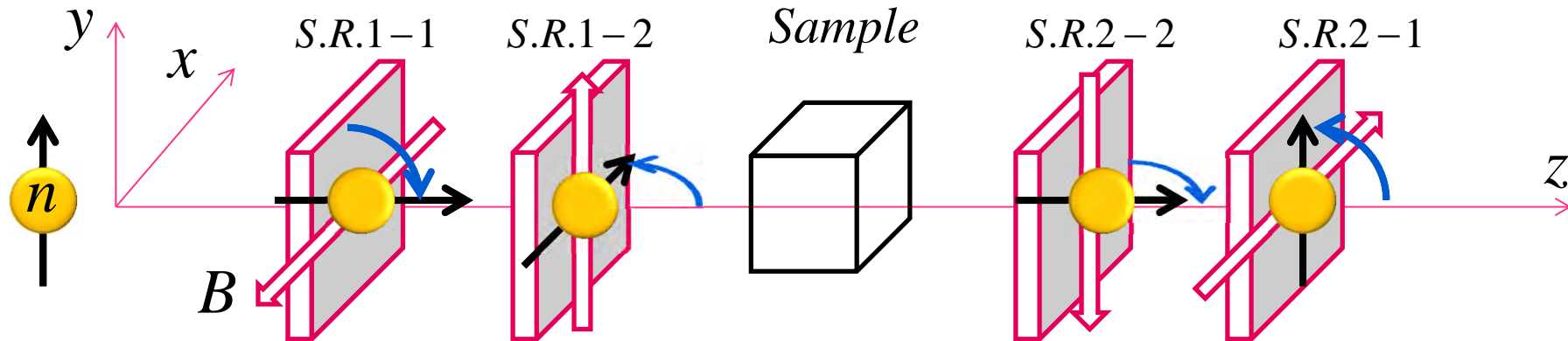
$$\vec{\sigma}(t + \Delta t) = \vec{\sigma}(t) + \frac{d \vec{\sigma}(t)}{dt} \Delta t$$

$$P(t) = \frac{[\vec{\sigma}(t)]_y}{\sqrt{[\vec{\sigma}(t)]_x^2 + [\vec{\sigma}(t)]_y^2 + [\vec{\sigma}(t)]_z^2}}$$



# 3-Dimensional polarization system

Neutron spin control system



Each spin rotator turns the neutron spin by  $\pi/2$ .

Spin Rotator



Controlling incident and analyzing neutron spin direction, further information of magnetic field can be obtained.

By observing spin direction  $x, y, z$ , the tilt angle from each quantization axis  $x, y, z$  will be obtained.

$$P = 1 - (1 - n_i^2)(1 - \cos(\omega\lambda)) \quad (i = x, y, z)$$



$$\vec{P}(t) = D\vec{P}(0)$$

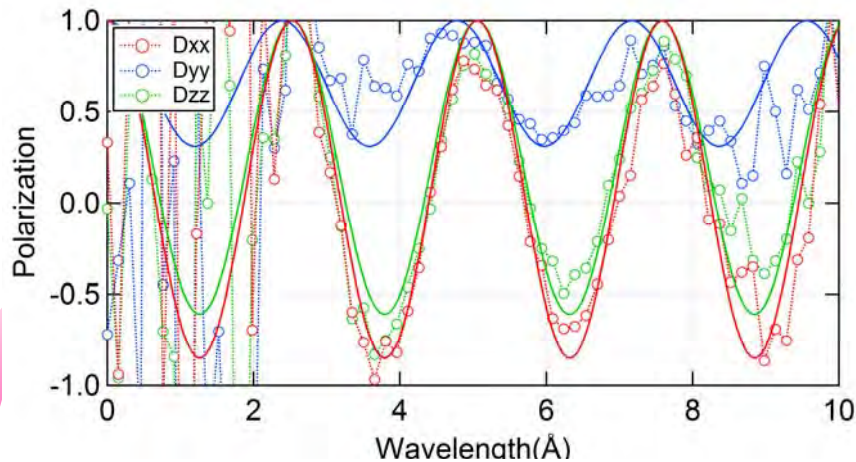
M. Th. Rekveldt, Z. Phys. 259,  
391 (1973)

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D_{xx} & D_{yx} & D_{zx} \\ D_{xy} & D_{yy} & D_{zy} \\ D_{xz} & D_{yz} & D_{zz} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{bmatrix}$$

対角項

$$D_{ii} = 1 - (1 - \cos \omega_p \lambda) \cdot (1 - n_i^2)$$

$$\varphi = \gamma B t = \omega_p t \quad \rightarrow \quad B = \omega_p \frac{3956}{\gamma L}$$



非対角項

$$D_{ij} = (1 - \cos \omega_p \lambda) n_i n_j - n_k \sin \omega t$$

$$D_{ji} = (1 - \cos \omega_p \lambda) n_i n_j + n_k \sin \omega t$$

$$D_{ij} - D_{ji} \rightarrow n_k \quad D_{ij} + D_{ji} \rightarrow n_i n_j$$

