

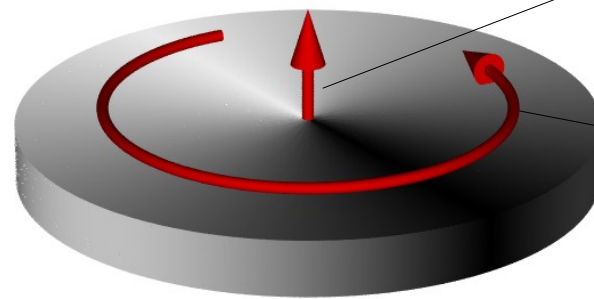
# 時間分解XMCD-PEEMによる磁気渦構造のダイナミクス測定

新井邦明<sup>1</sup>, 松下智弘<sup>2</sup>, 大沢仁<sup>2</sup>, 中村哲也<sup>2</sup>, 室隆桂之<sup>2</sup>, 木下豊彦<sup>2</sup>,  
木村崇<sup>1</sup>, 大谷義近<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ISSP, 東大, <sup>2</sup>JASRI/SPring-8

- LLG方程式⇒Thiele方程式+境界条件
- 測定手法
- 磁気渦コアの振動モード
- 磁場印加中の磁気渦構造のダイナミクス

磁気渦構造



面直磁化のコア

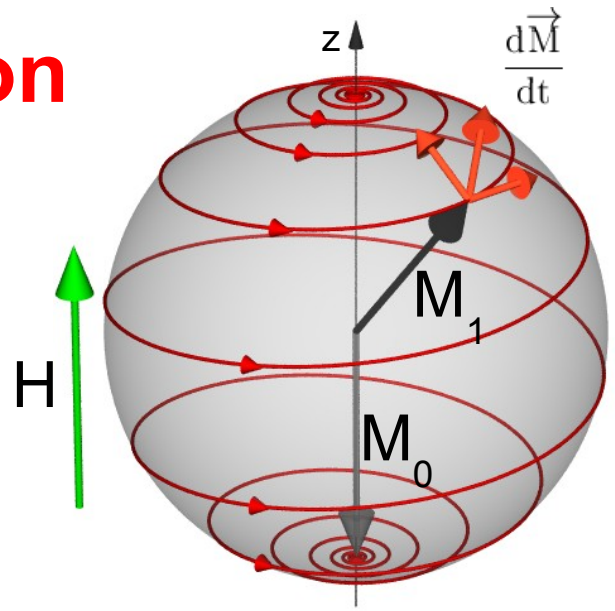
面内磁化の渦構造

磁場

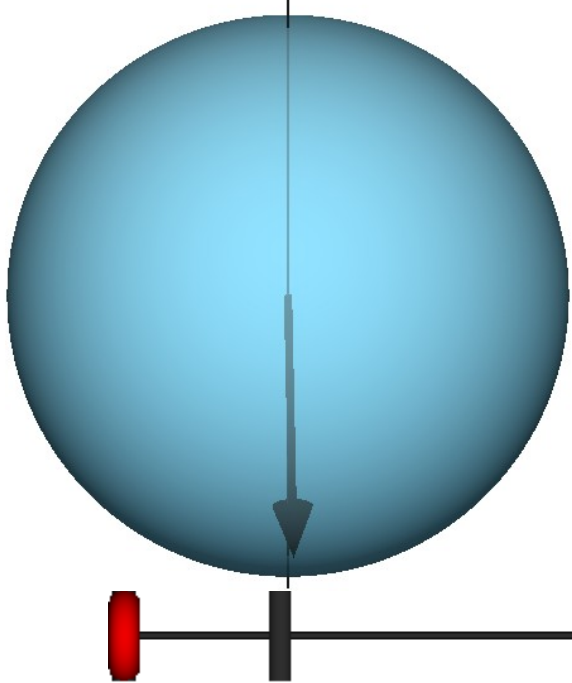
# Landau-Lifshitz-Gilbert equation

$$\frac{d\vec{M}}{dt} = -\gamma \vec{M} \times \vec{H} + \frac{\alpha}{M_s} \vec{M} \times \frac{d\vec{M}}{dt}$$

H: 磁場  
 M: 磁化  
 Ms: 飽和磁化  
 $\gamma$ : ジャイロ定数 =  $\frac{ge}{2m_e c}$   
 $\alpha$ : ダンピング定数

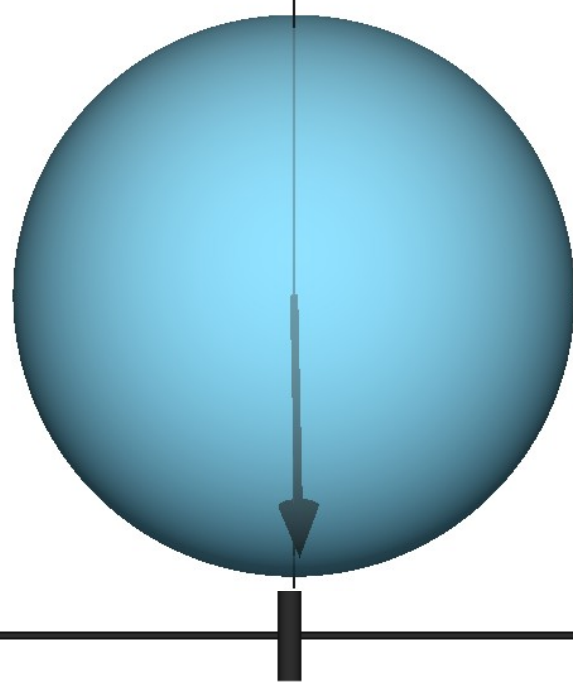


H=0.4T,  $\alpha=0.5$



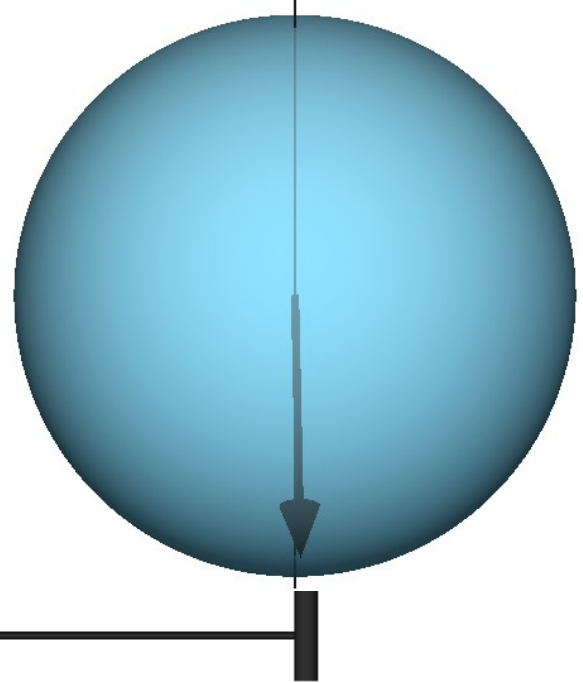
0 ps    240 ps

H=0.4T,  $\alpha=0.1$



1200 ps

H=0.2T,  $\alpha=0.1$



2400 ps

# Landau-Lifshitz-Gilbert equation

$$\frac{d\vec{M}}{dt} = -\gamma\vec{M} \times \vec{H} + \frac{\alpha}{M_s} \vec{M} \times \frac{d\vec{M}}{dt}$$

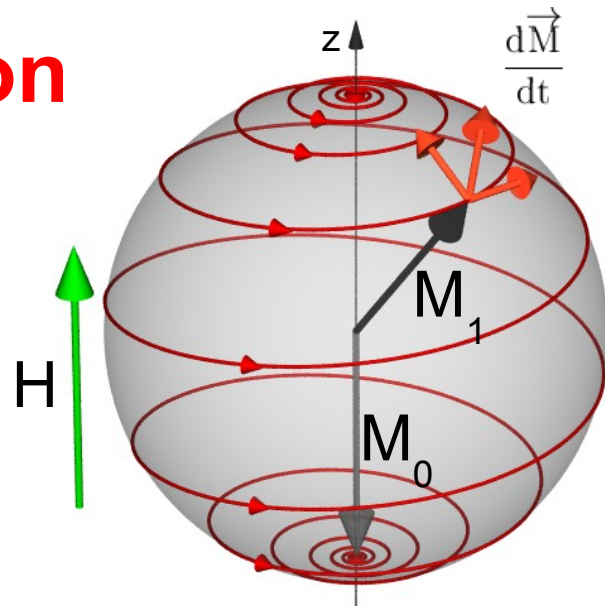
H: 磁場

M: 磁化

$M_s$ : 飽和磁化

$\gamma$ : ジャイロ定数 =  $\frac{ge}{2m_e c}$

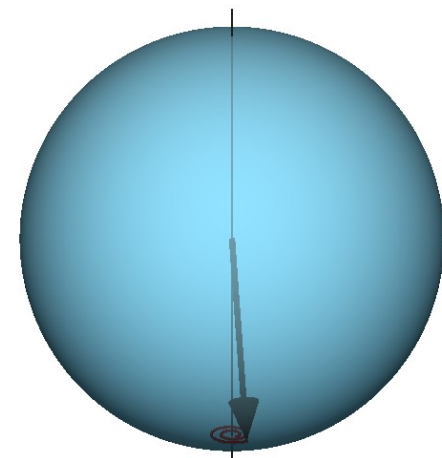
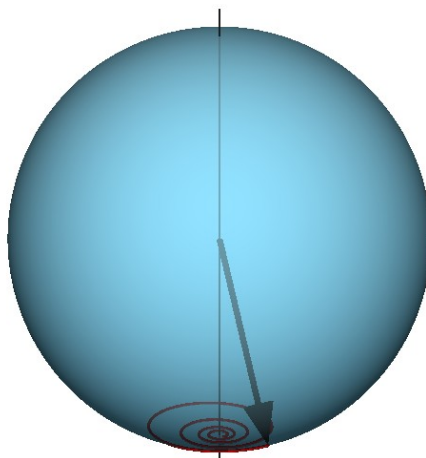
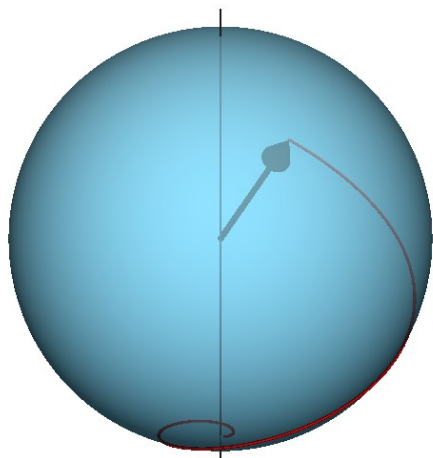
$\alpha$ : ダンピング定数



$H=0.4\text{T}, \alpha=0.5$

$H=0.4\text{T}, \alpha=0.1$

$H=0.2\text{T}, \alpha=0.1$



0 ps 240 ps

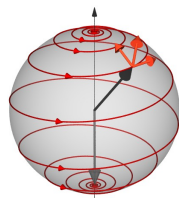
1200 ps

2400 ps

# 円盤型磁性体のスピンドYNAMICS (Thiele方程式+境界条件)

LLG方程式

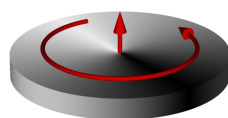
$$\frac{d\vec{M}}{dt} = -\gamma\vec{M} \times \vec{H} + \frac{\alpha}{M_s}\vec{M} \times \frac{d\vec{M}}{dt}$$



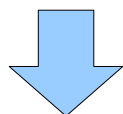
Thiele, PRL, 30, 230  
 Aharoni, JAP, 68, 2892  
 Kim, J. Mag., 12, 113  
 Guslienko et al., APL, 78, 3848  
 Guslienko et al., PRL, 96, 67205  
 Guslienko et al., JAP, 91, 8037

Thiele方程式

$$\vec{G} \times \vec{v} - \vec{\nabla}U + \vec{D} \cdot \vec{v} = 0$$



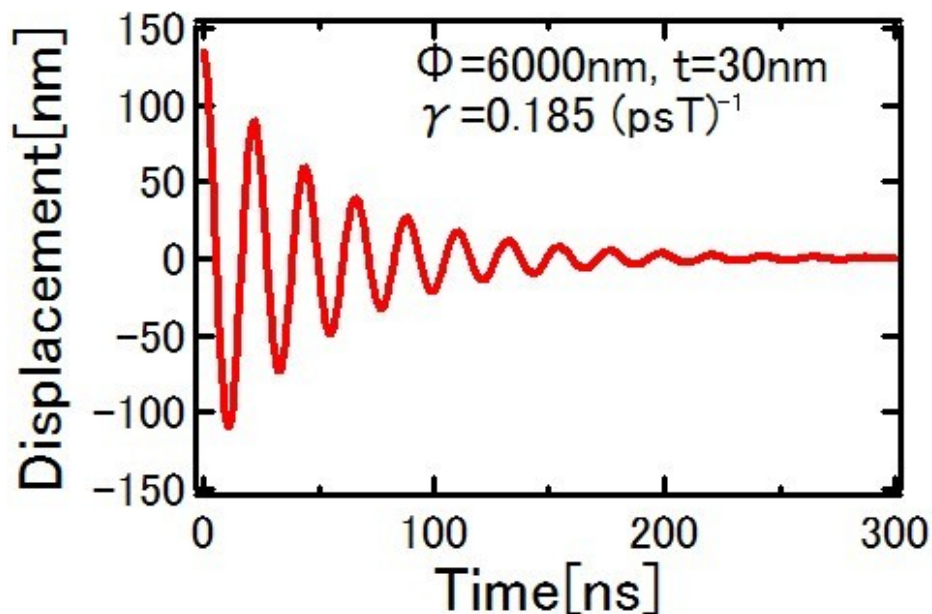
v: コア  
 の速度  
 G: ジャイロ定数  
 U: ポテンシャルエネルギー  
 D: ダンピング定数



$$\ddot{x} + 2\gamma\dot{x} + \omega_0^2x = 0$$

$\gamma$ : ジャイロ定数  
 $\omega_0$ : コアの振動周波数  
 $= 8\pi\gamma M_s F(\beta)$   $\beta$ (=厚さ/半径)

$$F(\beta) = \int_0^\infty dt \frac{1}{t} f(\beta t) I^2(t)$$



反磁界係数に比例

# 時間分解XMCD-PEEM @ SPring-8 BL25SU

磁気円二色性+光電子顕微鏡=磁区イメージング

(XMCD)

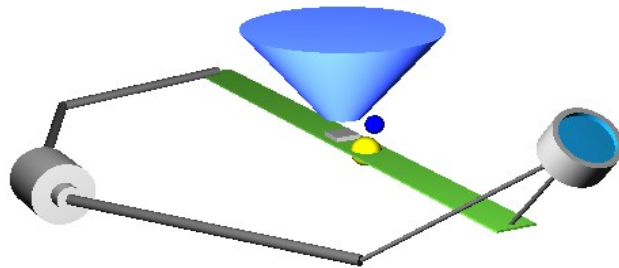
(PEEM)

+

pump-probe法 (Dynamics)

(B field)

(x-ray)



**SPring-8 BL25SU**

Twin helical undulator with kicker magnets for the helicity switching

100 ps width

Circ. pol. soft x-ray

x-ray pulse (Probe)

femtosecond laser pulse (Pump)

**Spectra Physics**

**Ti: sapphire mode-lock femtosecond laser**

70 fs width

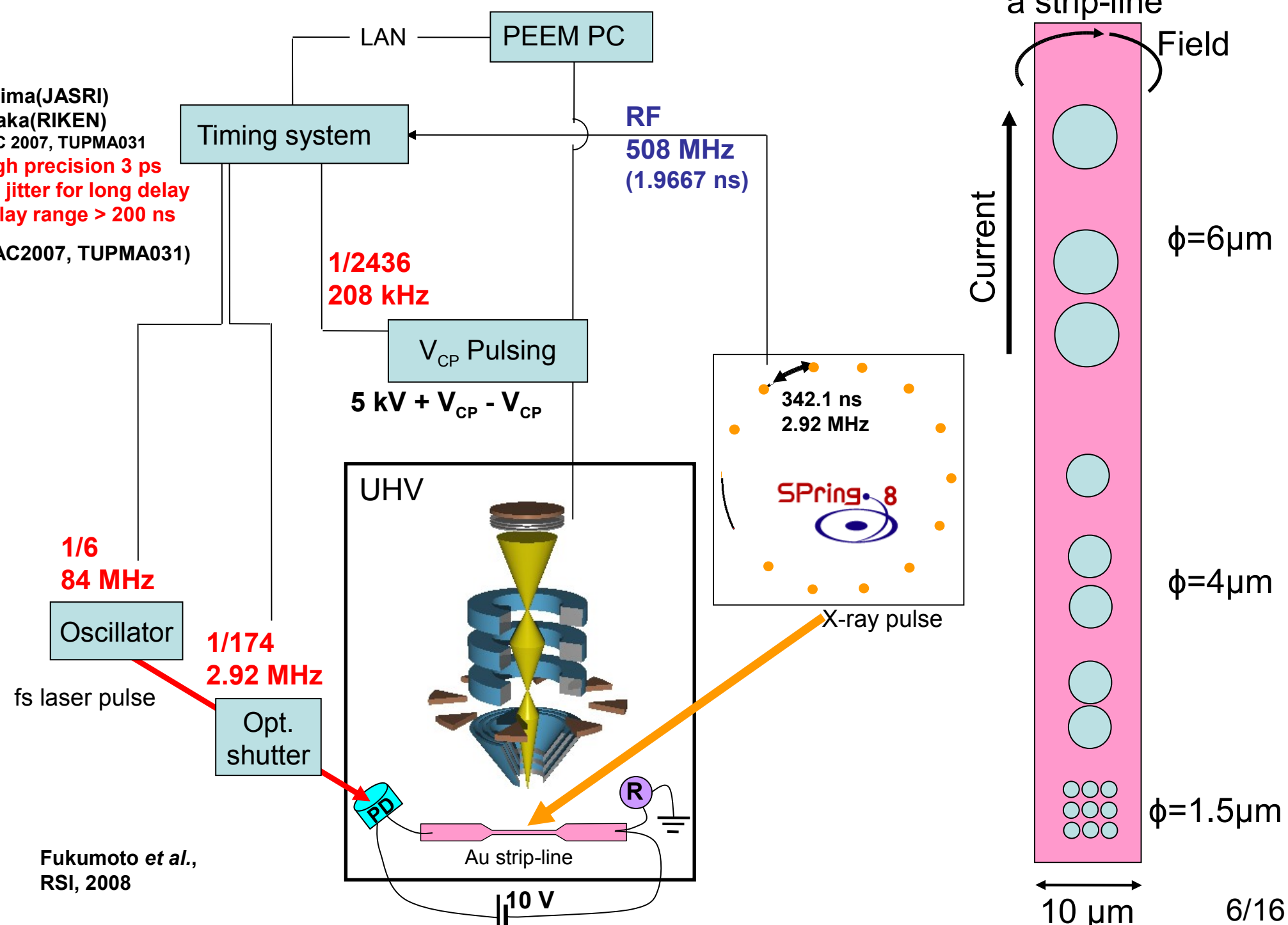
84 MHz (variable using a pulse selector)

800 nm (1.5 eV)

Peak power: 1 nJ

# 時間分解XMCD-PEEM

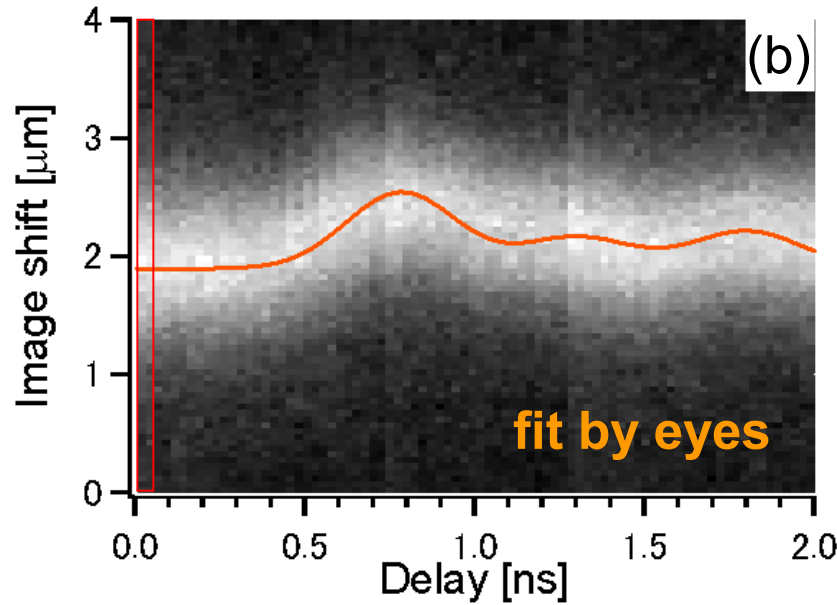
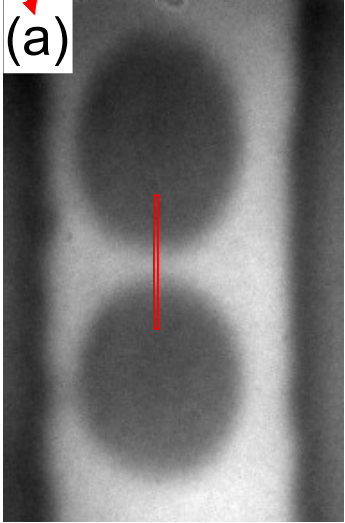
Oshima(JASRI)  
 Tanaka(RIKEN)  
 APAC 2007, TUPMA031  
 - High precision 3 ps  
 - No jitter for long delay  
 - Delay range > 200 ns  
 (APAC2007, TUPMA031)



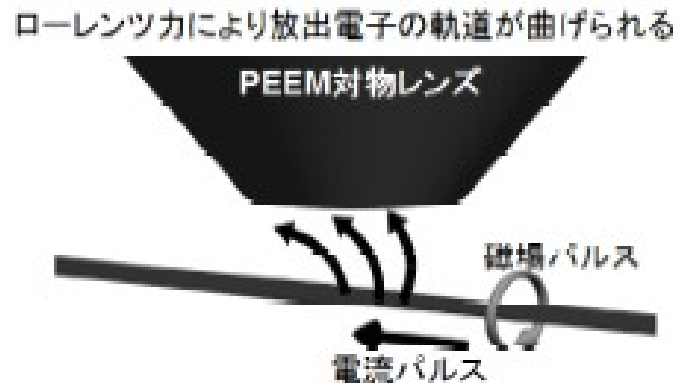
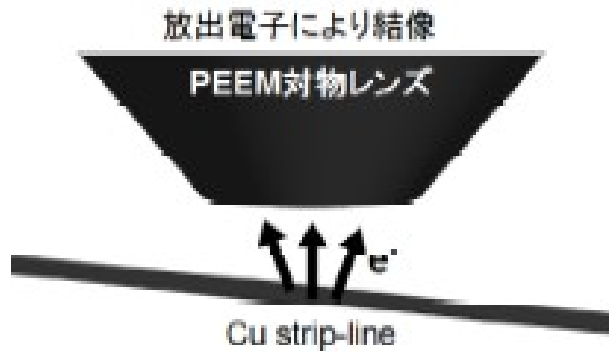
Fukumoto *et al.*,  
 RSI, 2008

# 磁場パルスの形状

x-ray  
Fe-L<sub>3</sub> pre-edge



Mainパルス (FWHM=350 ps)  
+  
複数の反射パルス  
⇒ 5 ns

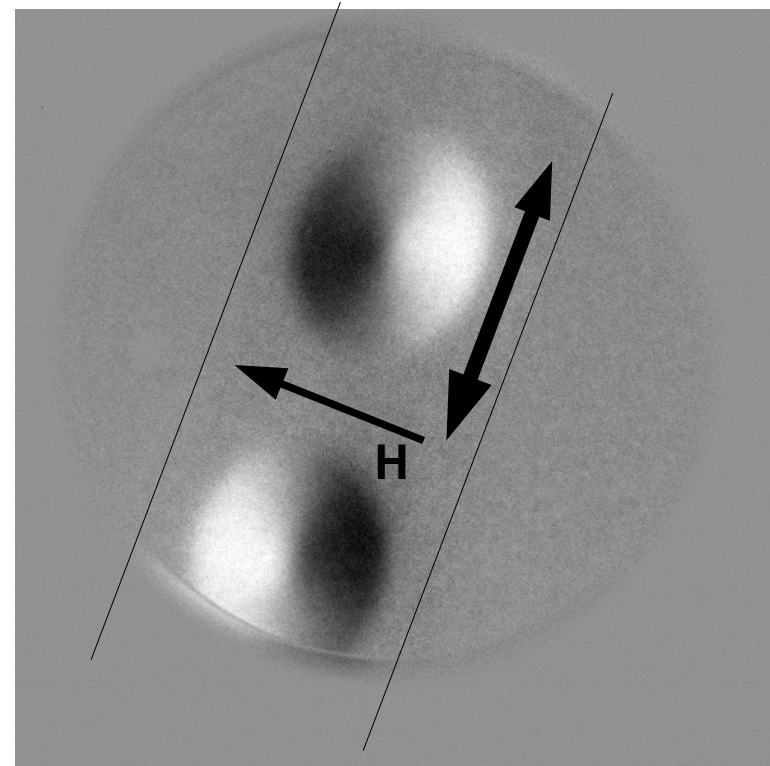
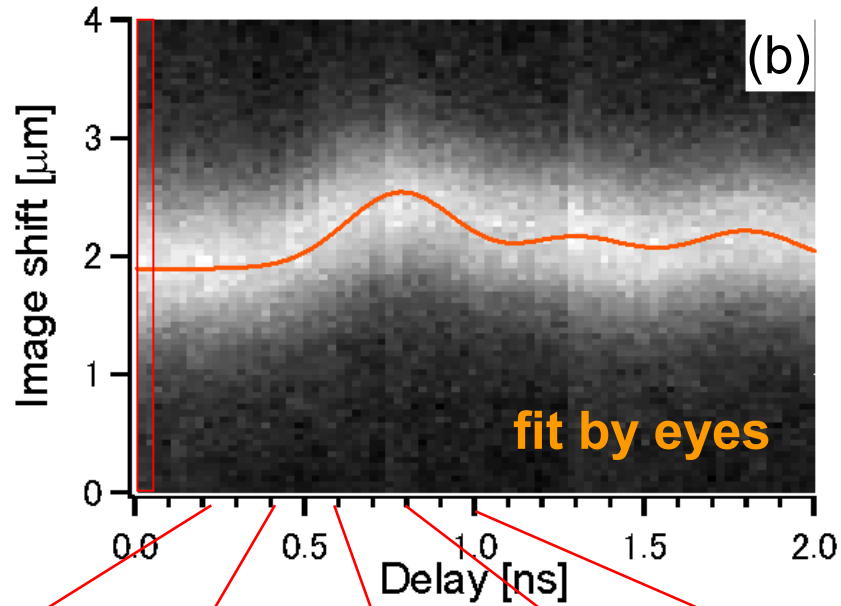
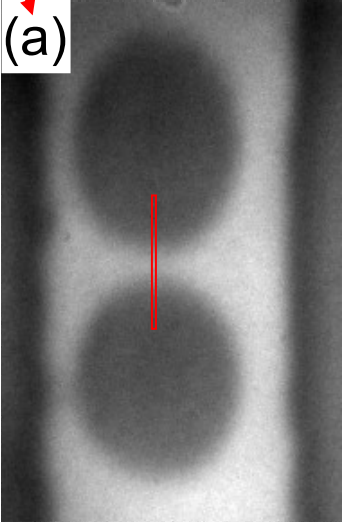




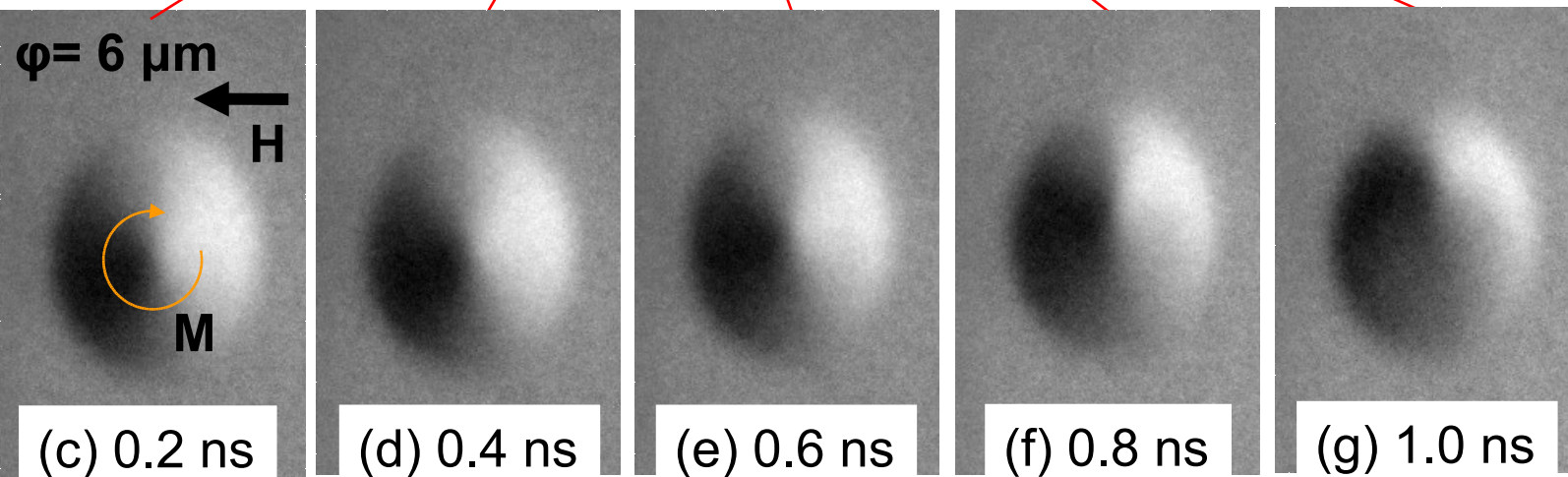
# 磁気渦スピン構造のダイナミクス

円盤直径:  $6\mu\text{m}$ , 厚さ:  $30\text{nm}$

x-ray  
Fe-L<sub>3</sub> pre-edge



x-ray  
Fe-L<sub>3</sub>

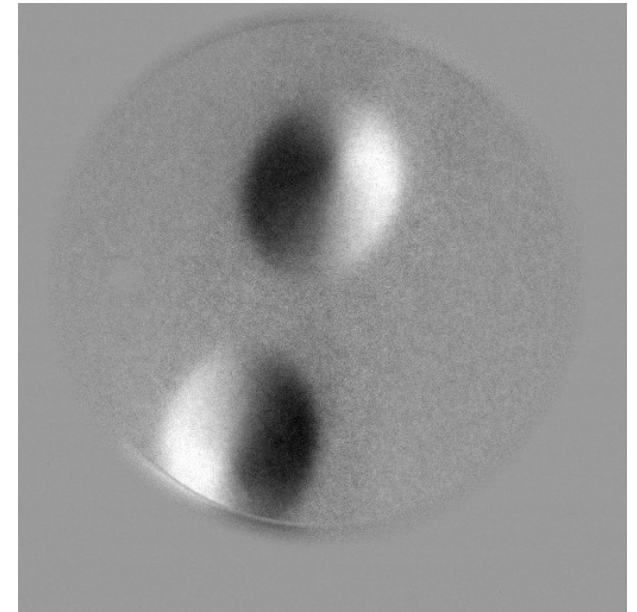
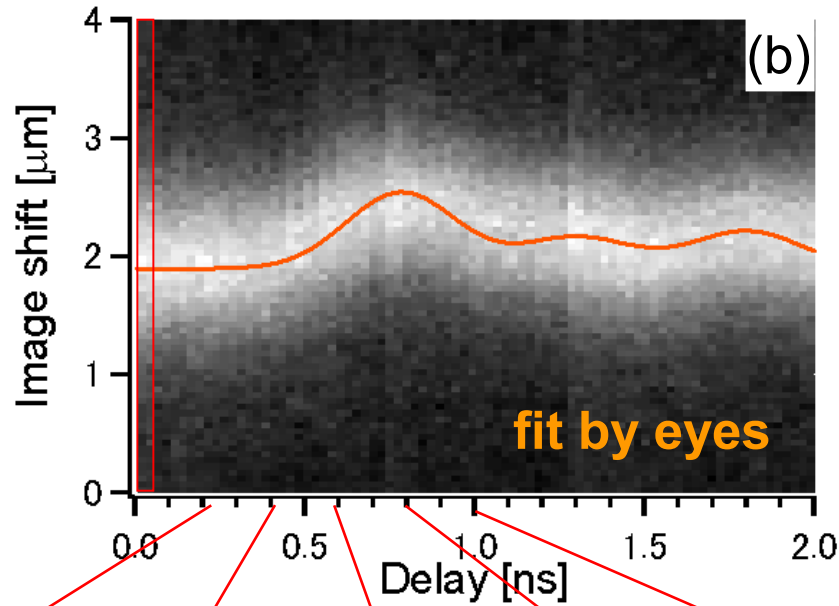
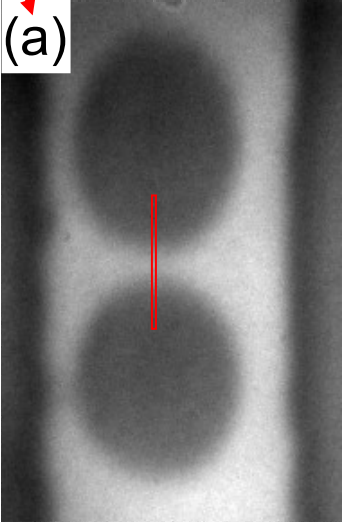




# 磁気渦スピン構造のダイナミクス (振動モード)

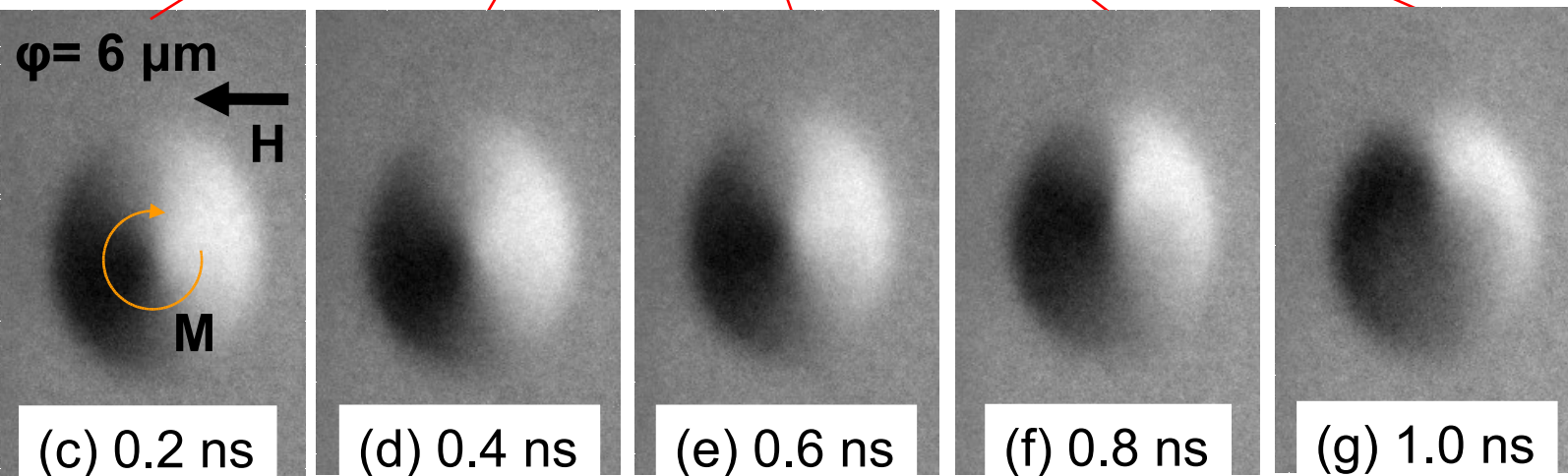
円盤直径:  $6\mu\text{m}$ , 厚さ:  $30\text{nm}$

x-ray  
Fe-L<sub>3</sub> pre-edge



0.5 ns step

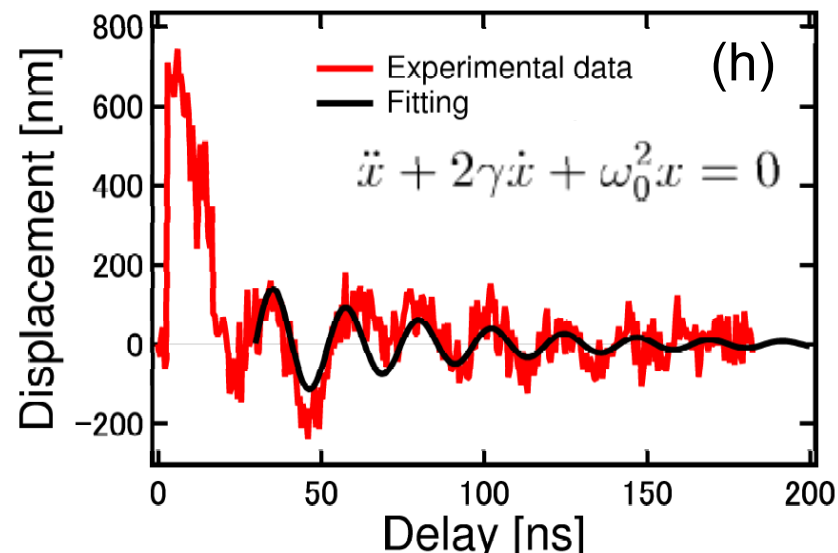
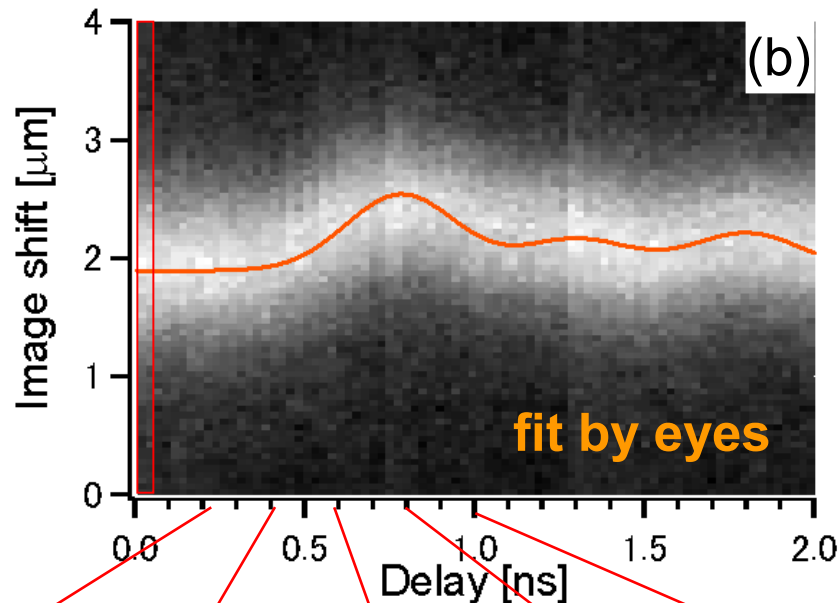
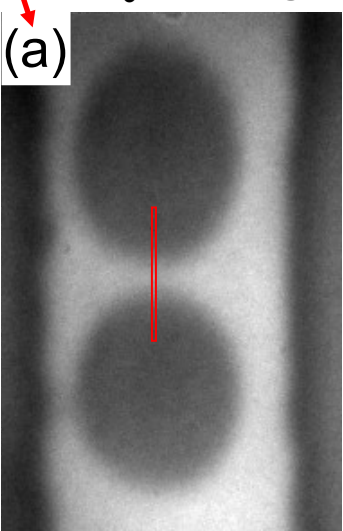
x-ray  
Fe-L<sub>3</sub>



# 磁気渦スピン構造のダイナミクス (振動モード)

円盤直径: 6 $\mu\text{m}$ , 厚さ: 30nm

x-ray  
Fe-L<sub>3</sub> pre-edge

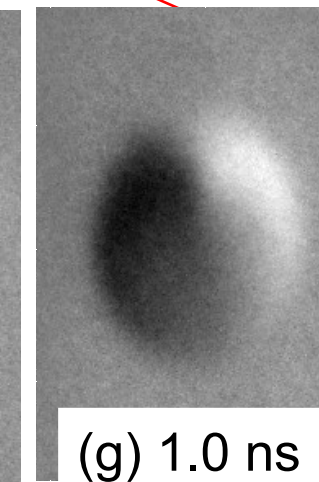
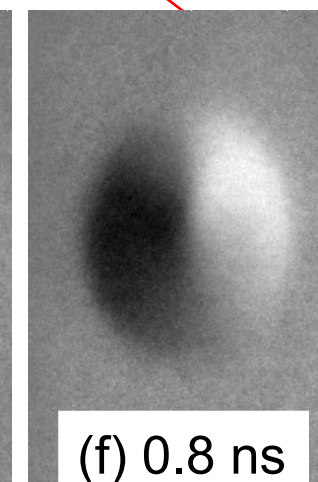
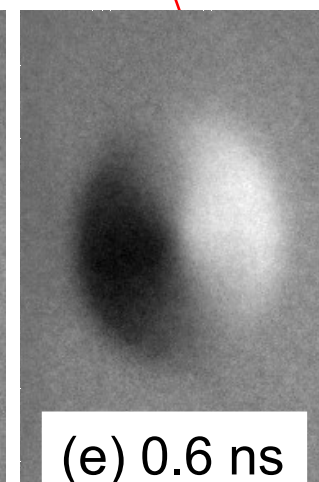
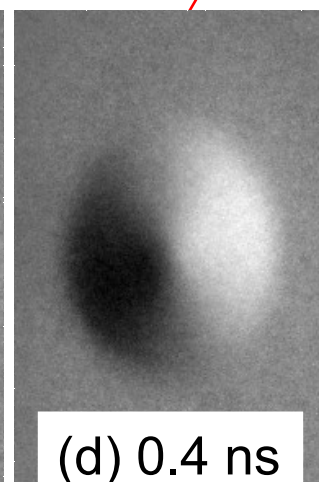
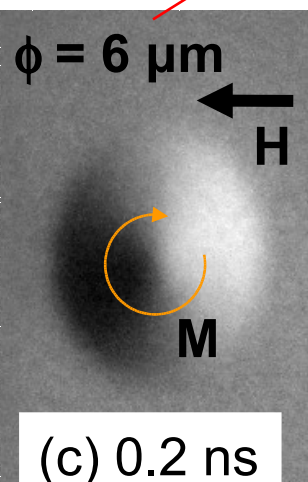


減衰速度は $\gamma$ で決まる

$\gamma = 0.185 \text{ 1/ps T}$   
 $\omega_0 = 44 \text{ MHz}$

Fitting parameters  
振幅, 位相

x-ray  
Fe-L<sub>3</sub>



# 磁気渦スピン構造のダイナミクス (磁場印加中)

円盤直径:  $6\mu\text{m}$ と $4\mu\text{m}$ , 厚さ:  $30\text{nm}$

## 外部磁場強度に対するコアの変移量

$$s = \chi(0)H$$

s: 円盤半径で規格化したコアの変移量

H: コアを円盤から追い出すために必要な磁場で規格化した磁場強度

$$\chi(0) = 4\pi F(\beta) \quad \beta(=\text{厚さ}/\text{半径})\text{に依存した磁化率}$$

$$F(\beta) = \int_0^\infty dt \frac{1}{t} f(\beta t) I^2(t) \quad \text{反磁界係数に比例}$$

$$f(x) = 1 - \frac{1 - \exp(-x)}{x}$$

$$I(t) = \int_0^1 dx x J_1(tx)$$

Thiele, PRL, 30, 230

Gusliencko et al., APL, 78, 3848

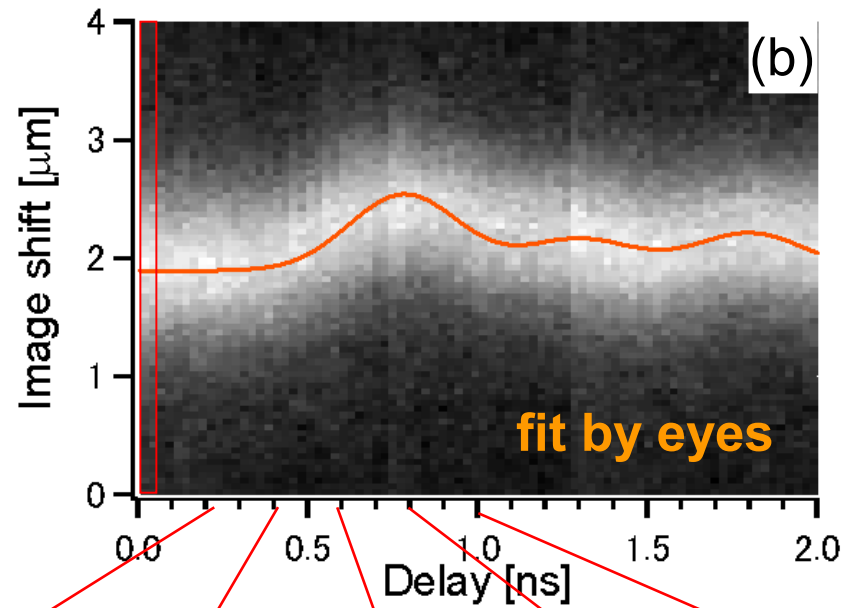
Gusliencko et al., PRB, 72, 14463

Gusliekko et al., PRB, 65, 24424

Antos et al., JPSP, 77, 31004

# 磁気渦スピン構造のダイナミクス (磁場印加中)

円盤直径:  $6\mu\text{m}$ , 厚さ:  $30\text{nm}$



x-ray  
Fe- $L_3$

$\phi = 6\mu\text{m}$

H

M

(c) 0.2 ns

(d) 0.4 ns

(e) 0.6 ns

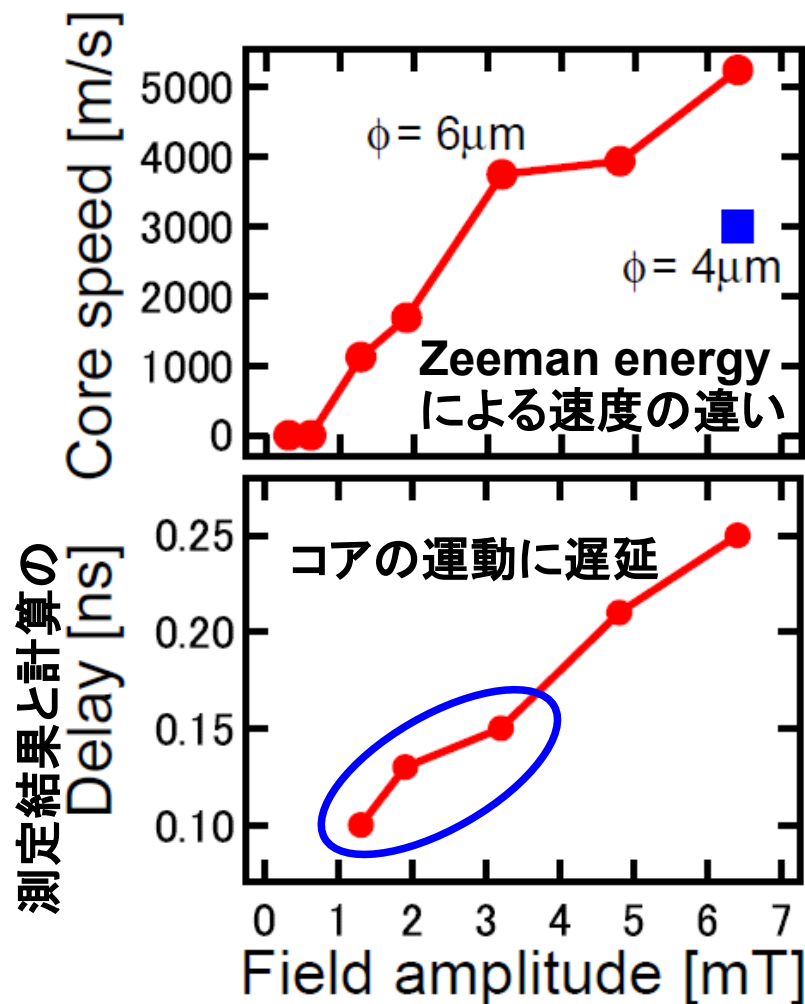
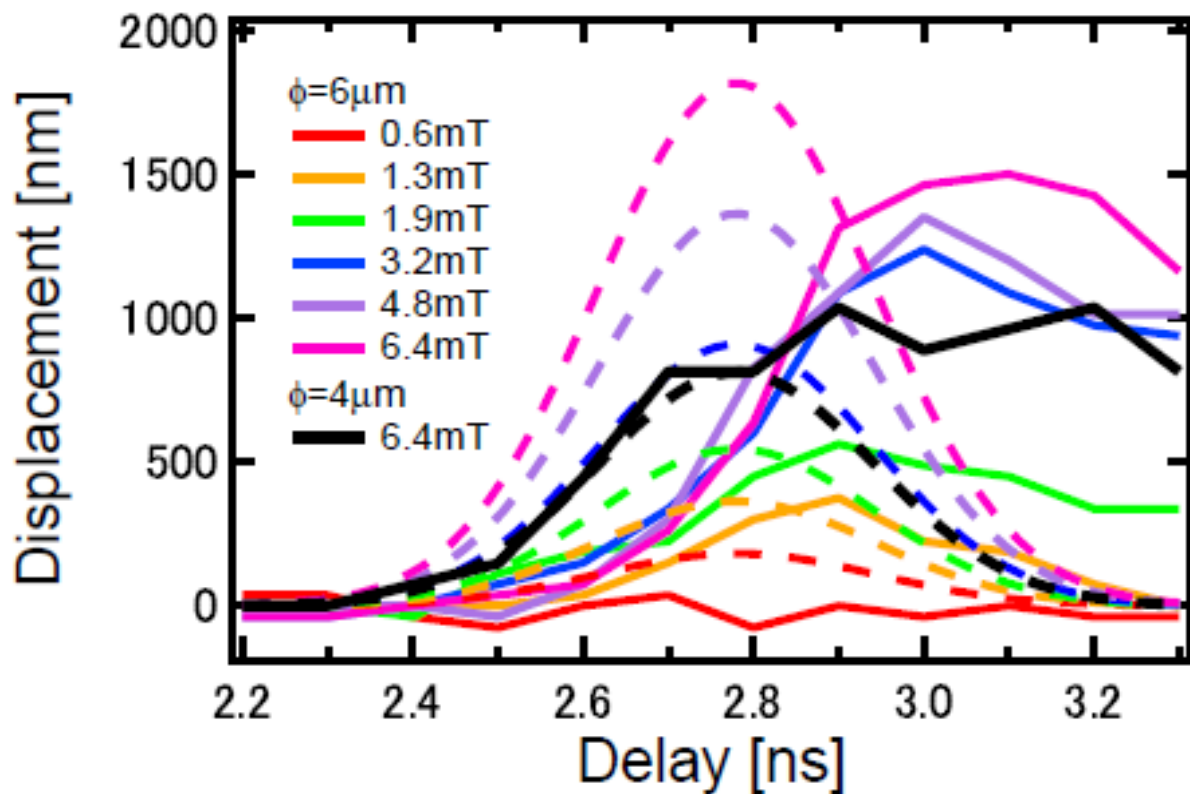
(f) 0.8 ns

(g) 1.0 ns

# 磁気渦コアのダイナミクス (磁場印加中)

円盤直径:  $6\mu\text{m}$ と $4\mu\text{m}$ , 厚さ:  $30\text{nm}$

測定結果と  $s = \chi(0)H$  の比較  
(実線) (破線)

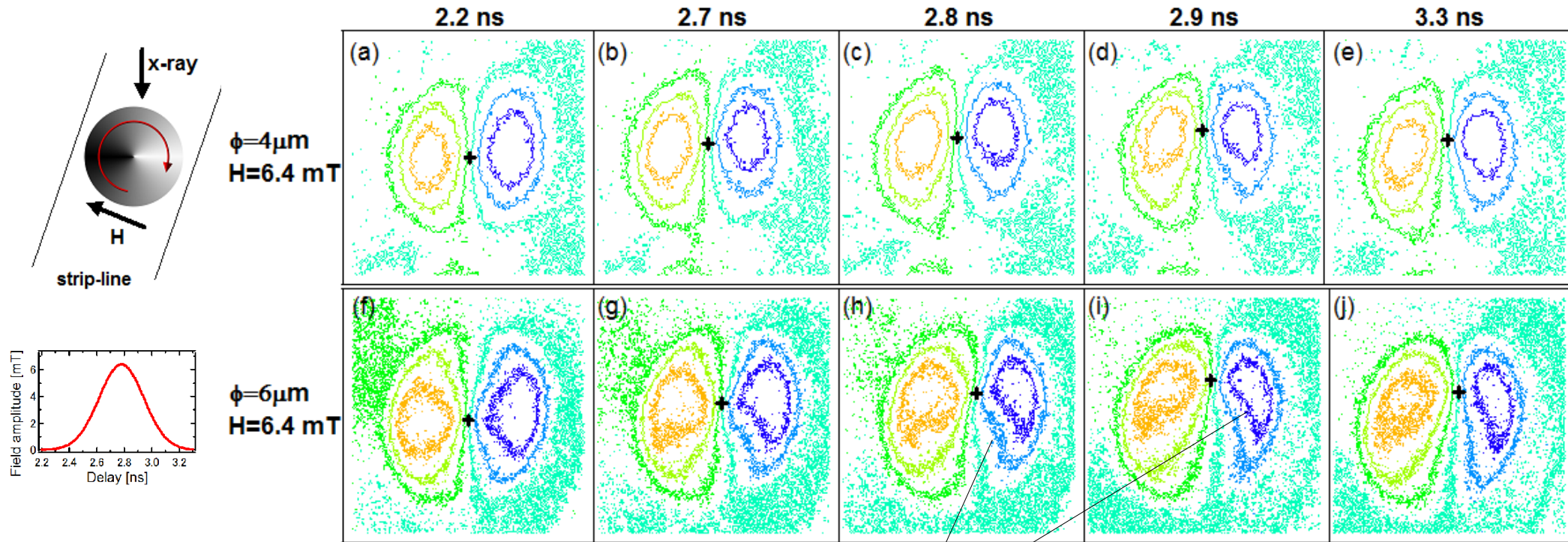


コアの変移: 磁場強度に対して非線形応答  
サブナノ秒のDelay



# 磁気渦スピン構造のダイナミクス (磁場印加中)

円盤直径:  $6\mu\text{m}$ と $4\mu\text{m}$ , 厚さ:  $30\text{nm}$



渦構造の歪み

直径 $6\mu\text{m}$ の円盤 (反磁界係数が小さい)

コアのダイナミクス      磁場に対して非線形応答, サブナノ秒のDelay  
渦のダイナミクス      スピン構造の歪み

ゼーマンエネルギーが, コアの移動だけでなく, 渦構造の歪みにも費やされた。



# Summary

- ・ Pump-probe XMCD-PEEM 測定. (時間、空間、元素分解能)

- ・ ミクロンサイズ円盤型磁性体

- ・ 振動モード

- ・ Thiele方程式により再現

- ・ 減衰定数は,  $\gamma$

- ・ 外部磁場に対する非線形応答

- ・ 磁場強度依存

- ・ 円盤サイズ依存

反磁界エネルギーの小さい円盤は磁気渦構造が歪められやすく, コアの運動に遅延が生じた.