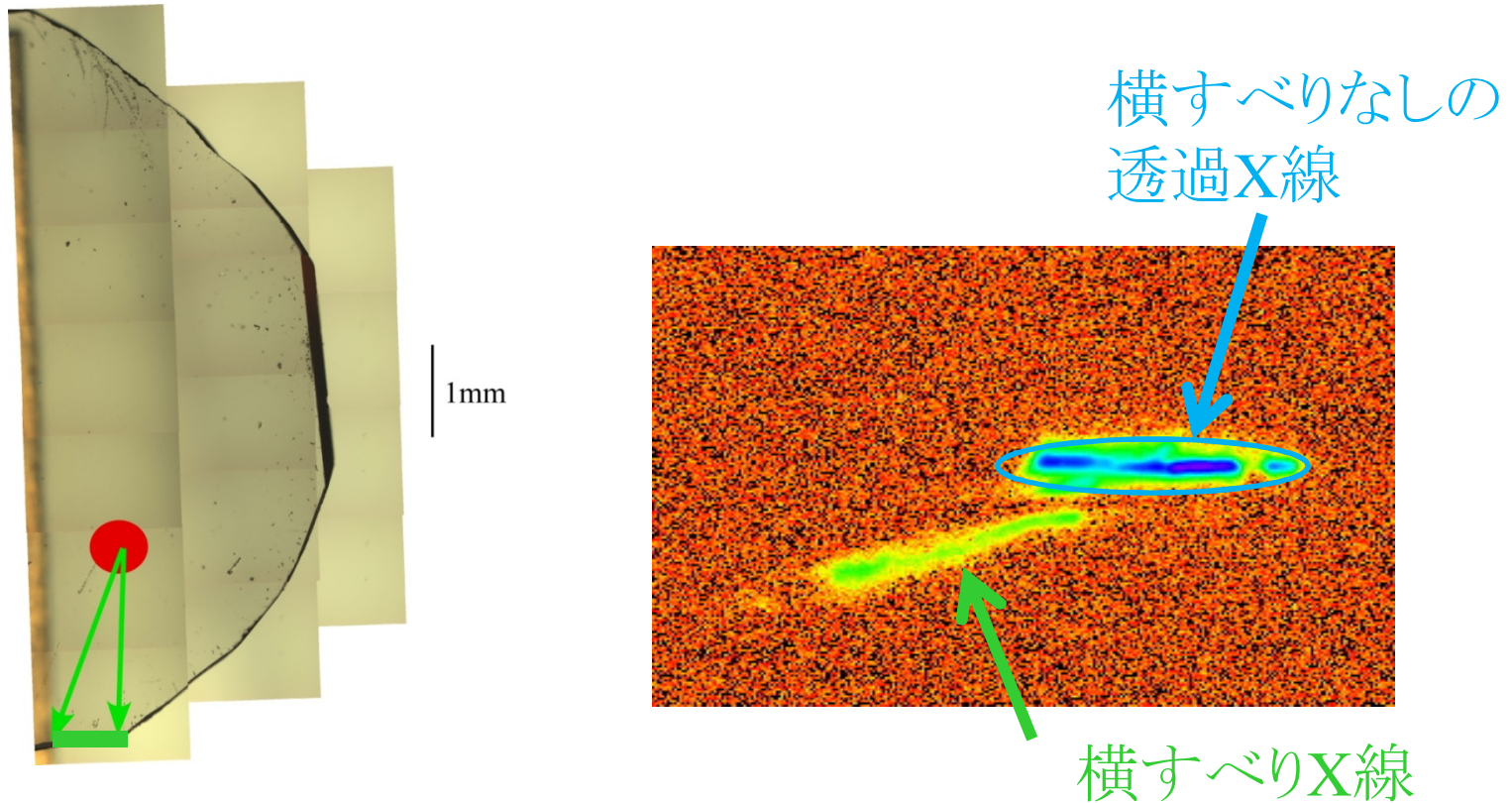


シリコン歪み結晶による X線の巨大横すべり現象

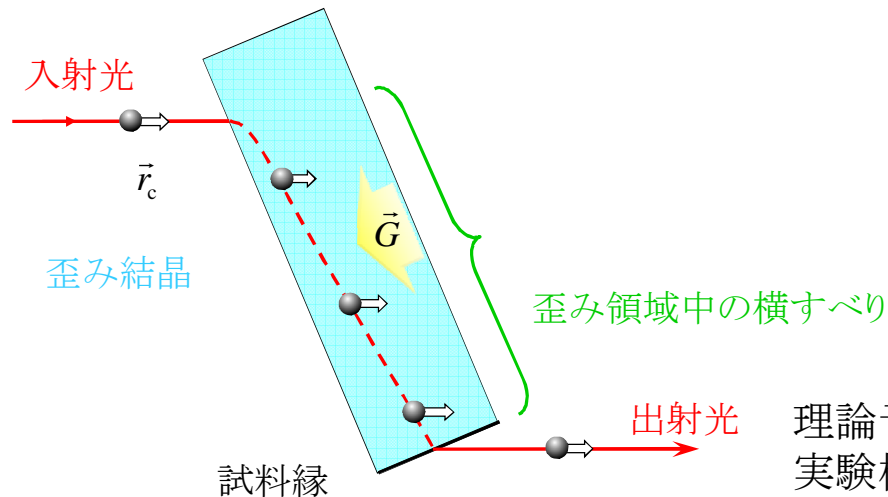


香村芳樹、 澤田桂、 田中義人、 石川哲也

RIKEN, SPring-8 Center

講演内容

1. 力学とのアナロジーから光学の新現象を探る
2. X線の巨大横すべり現象の原理
3. 実験のセットアップ
4. 実験結果
5. 研究の将来展望
6. まとめ



世界初の実証実験!

理論予言: Sawada et al., PRL, 96, 154802 (2006)

実験検証: Kohmura et al., PRL, 104, 244801 (2010)

1. 光学理論

力学とのアナロジーから、光学の新現象を探る

光学現象は、

波動方程式

$$\frac{1}{\varepsilon(\vec{r})} \nabla \times [\nabla \times \vec{E}(\vec{r})] = \frac{\omega^2}{c^2} \vec{E}(\vec{r}) \quad (\mu = 1)$$

を解くことで導けるはずだが、
直観的な理解はしにくい。

そこで、

粒子の力学との類似性から

光学の新現象へのヒントを探して見る。↔ 電磁波の波束の運動に注目

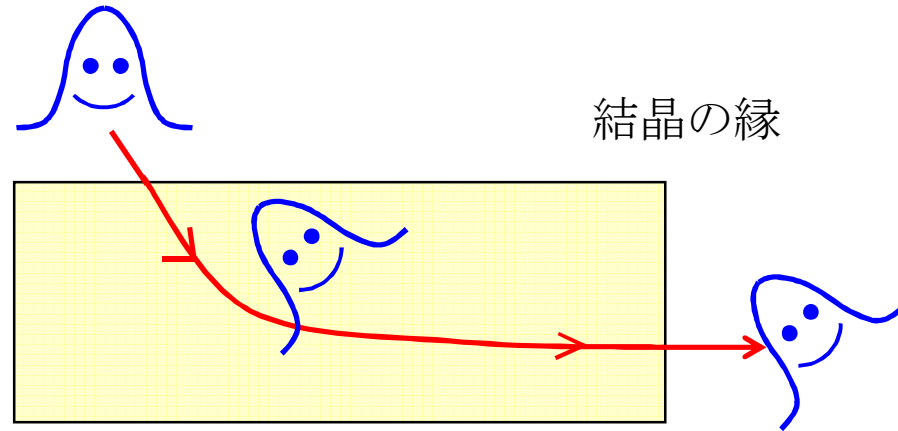
1. 光学理論 屈折と横すべりとの違い

屈折現象

波数ベクトルの向き(顔の向き)が変わる

$$\dot{\vec{k}}_c = -\frac{\partial \omega_n}{\partial \vec{r}_c} + \dot{\eta}_c \times F_{r\eta}$$

Snell's law

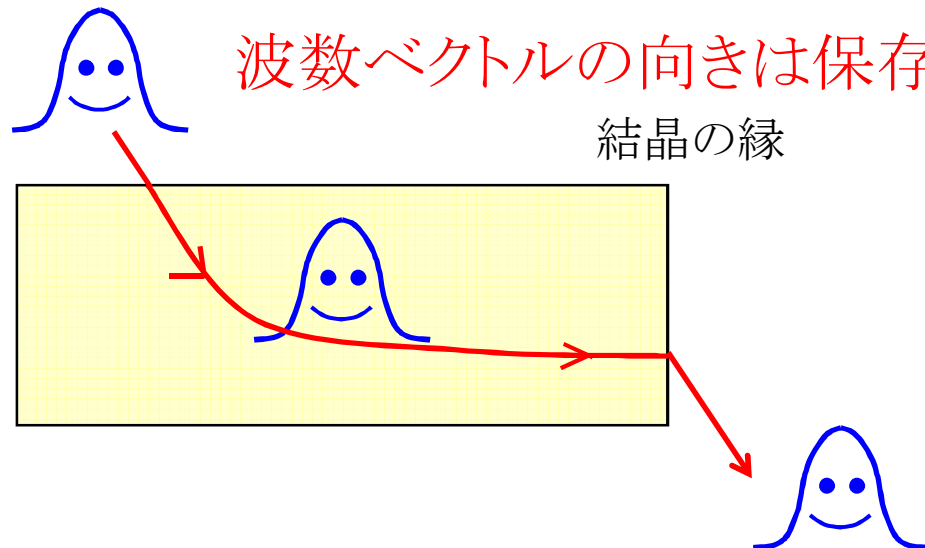


横すべり現象

ポインティング・ベクトルの向きが変わる

$$\dot{\vec{r}}_c = \frac{\partial \omega_n}{\partial \vec{k}_c} - \dot{\eta}_c \times F_{k\eta}$$

波数ベクトルの向きは保存



2. X線の巨大横すべり現象の原理 要求される条件

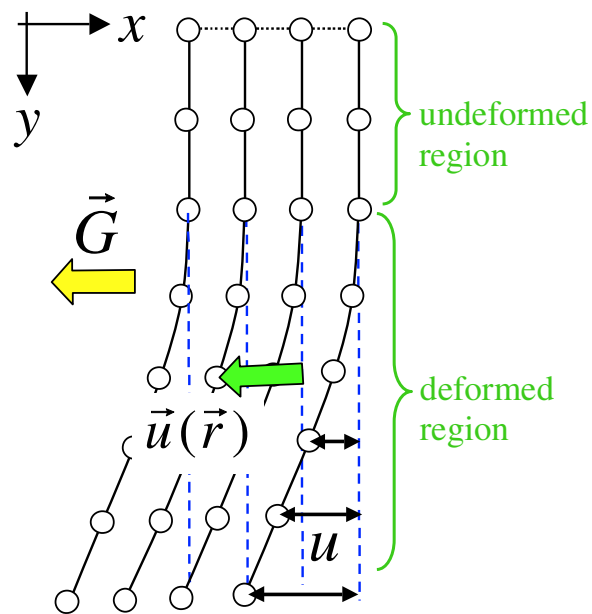
要求される二条件

結晶歪み (実空間)

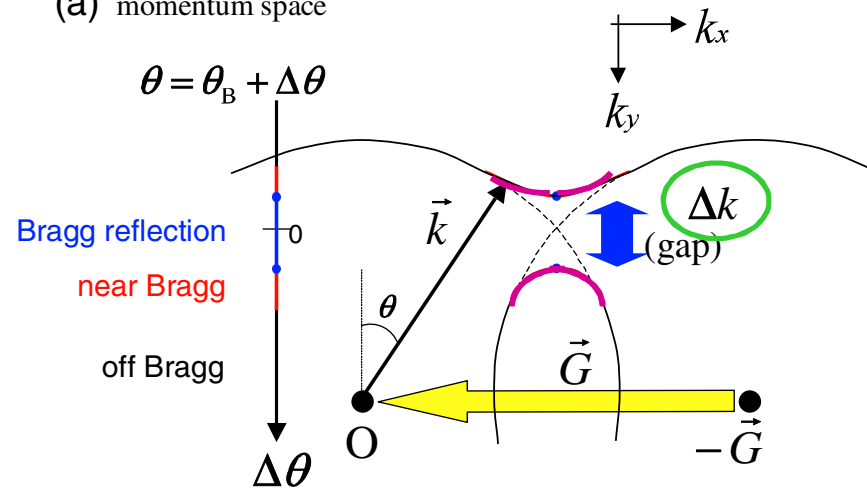
&

ブラッグ条件近傍 (逆空間)

(c) real space

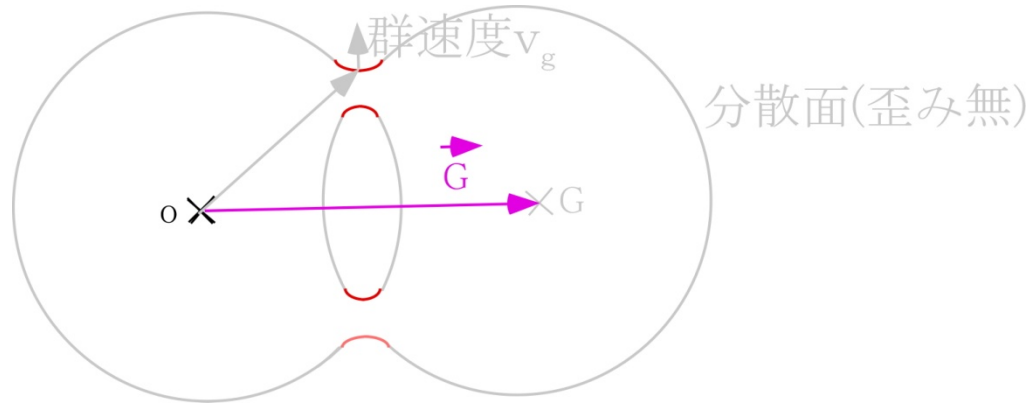


(a) momentum space



理論予言: Sawada et al., PRL, 96, 154802 (2006)

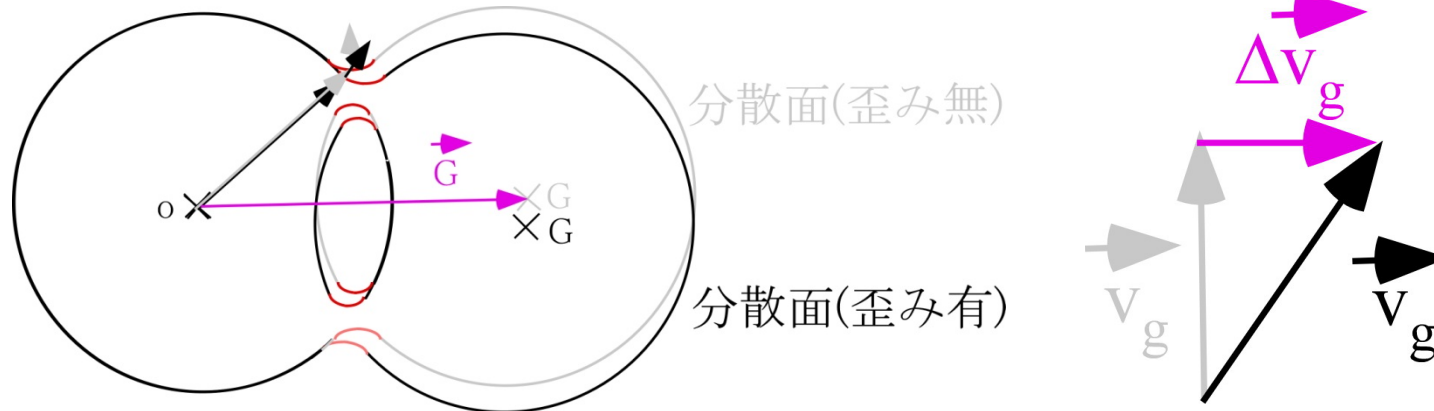
2. X線の巨大横すべり現象の原理 向きは？



$$\vec{v}_g(\omega) = \frac{d\omega}{d\vec{k}}$$

2. X線の巨大横すべり現象の原理 向きは？

歪みによる群速度の変化//逆格子ベクトル



波束の重心運動

完全結晶中の群速度で第ゼロ近似

歪みと分散関係による補正項

$$\vec{r}_c = \vec{v}_g t + \vec{G} \left[\frac{1}{2k^2} \vec{G} \cdot \vec{u}(\vec{r}_c) \right] \left(\frac{k}{\Delta k} \right)$$

X線巨大横すべり項

2. X線の巨大横すべり現象の原理 大きさは？

波束の重心運動

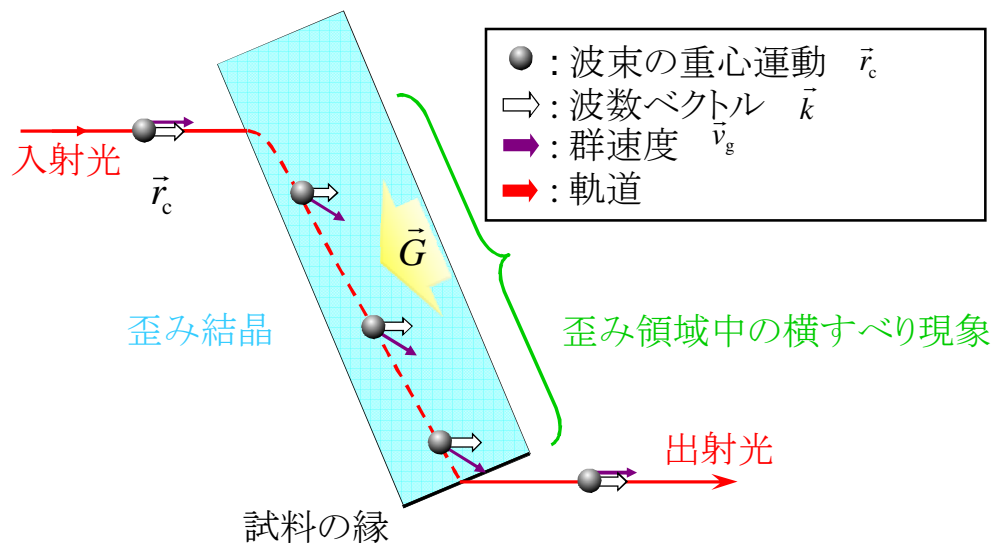
$$\vec{r}_c = \vec{v}_g t + \vec{G} \left[\frac{1}{2k^2} \vec{G} \bullet \vec{u}(\vec{r}_c) \right] \frac{k}{\Delta k}$$

T ~5 × 10⁵

X線巨大横すべり項

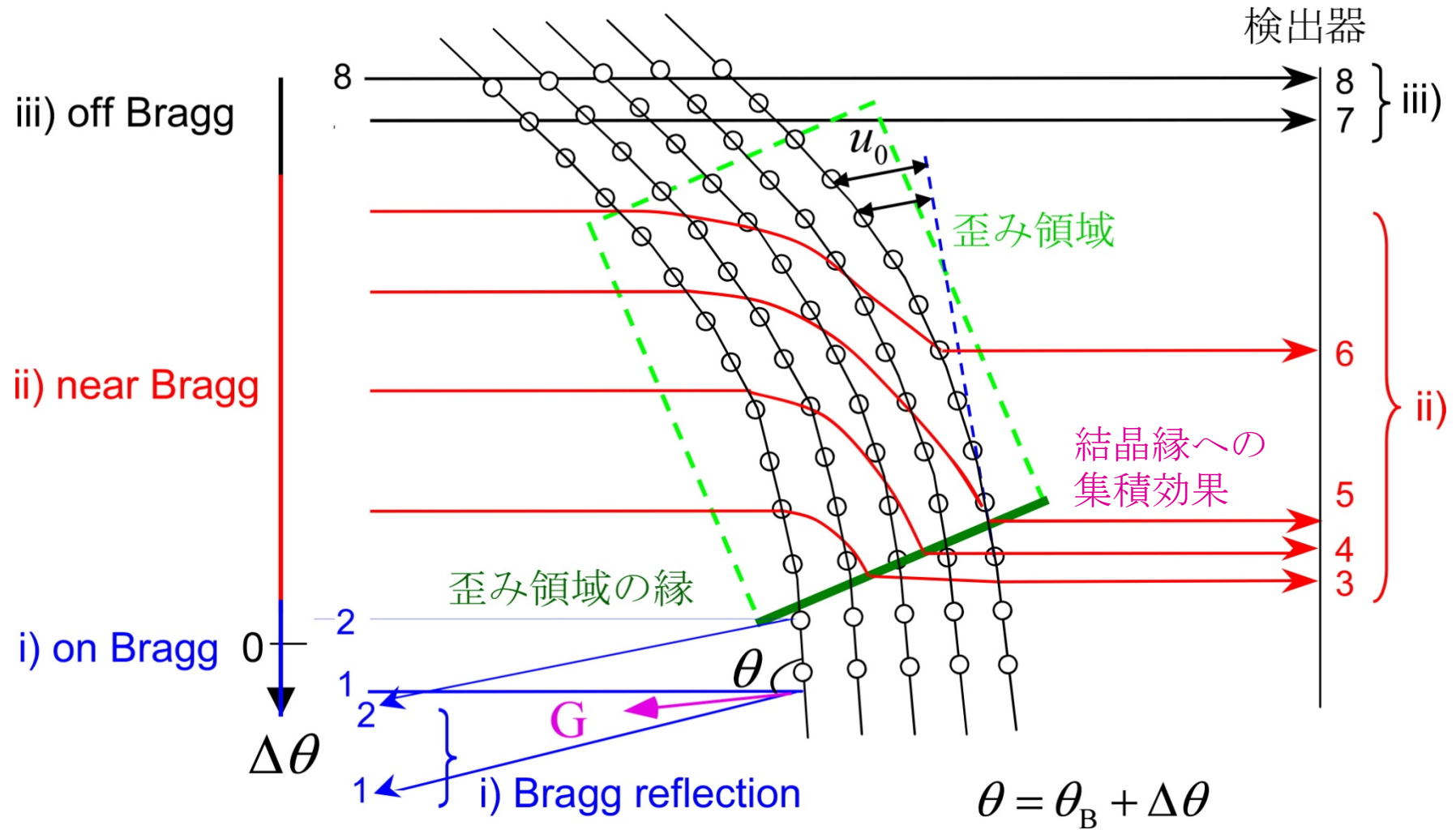
u ~ 10 nm ⇔ T ~ 1 mm (Si)
巨大な光学応答！

T ~ 10 μm ⇔ u ~ 0.1 nm (Si)
原子分解能の歪み感度！



X線導波効果

2. X線の巨大横すべり現象の原理 なぜ起こる？



様々な「ベクトルポテンシャル」と「磁場」

$$B_z = dA_x/dy - dA_y/dx$$

電磁場テンソル $F_{\mu\nu} = \partial_\mu A_\nu - \partial_\nu A_\mu$ の一般化としてまとめると...

ベクトルポテンシャル
(Berry接続)

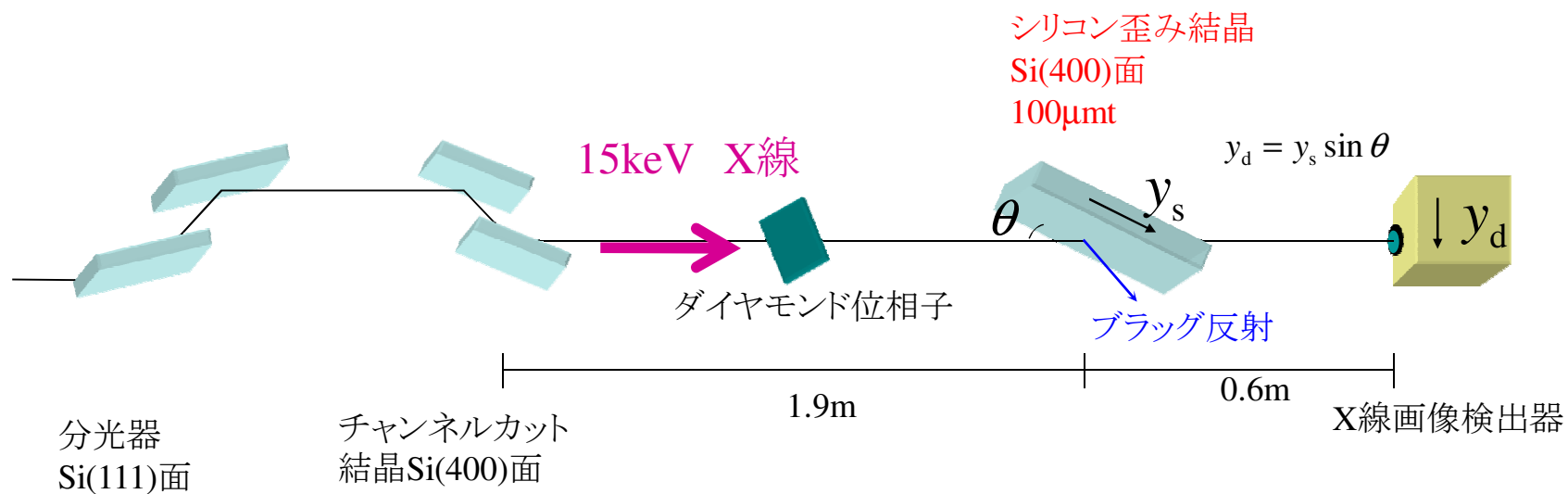
A_ν^e : 電子に働く。originは光などの電磁場

A_ν^p : 光に働く。originは物質(電子)

「磁場」(Berry曲率)	μ	ν	名称	物理現象
電子に働く「外場」 $F_{\mu\nu}^e = \partial_\mu A_\nu^e - \partial_\nu A_\mu^e$ (普通の電磁場)	x	y	磁場	Hall効果
	x	t	電場	
	k_x	k_y	逆磁場	量子Hall効果, スピンHall効果
	k_x	y		
光に働く「外場」 $F_{\mu\nu}^p = \partial_\mu A_\nu^p - \partial_\nu A_\mu^p$ (一般化して定義した場)	x	y		光の「ローレンツ力」 😊
	x	t		屈折の法則
	k_x	k_y		光のHall効果, one-way端状態
	k_x	y		歪んだ結晶中の波束シフト 😊

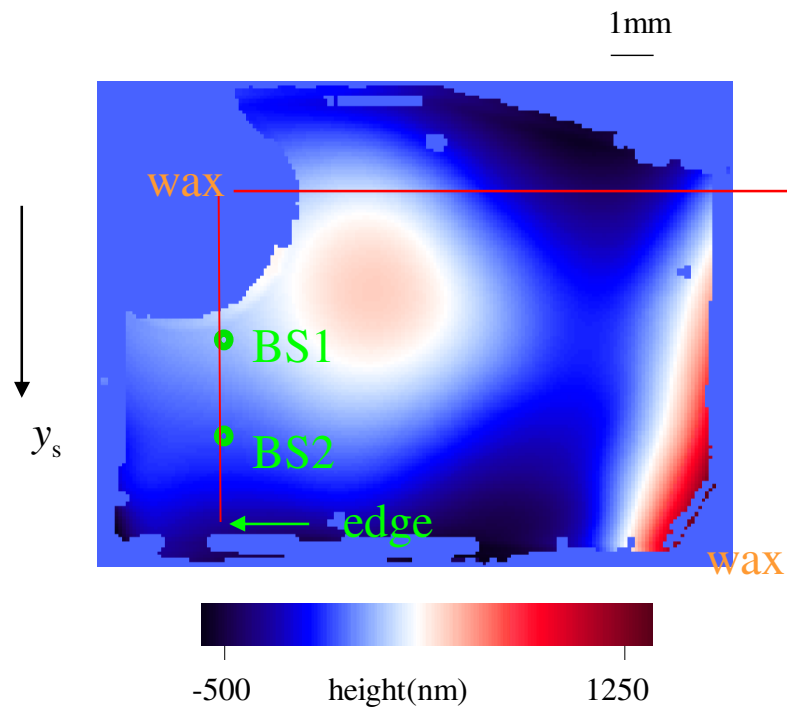
3. 実験セットアップ

SPring-8 BL19LXU(アンジュレーターBL)
Kohmura et al., PRL, 104, 244801 (2010)

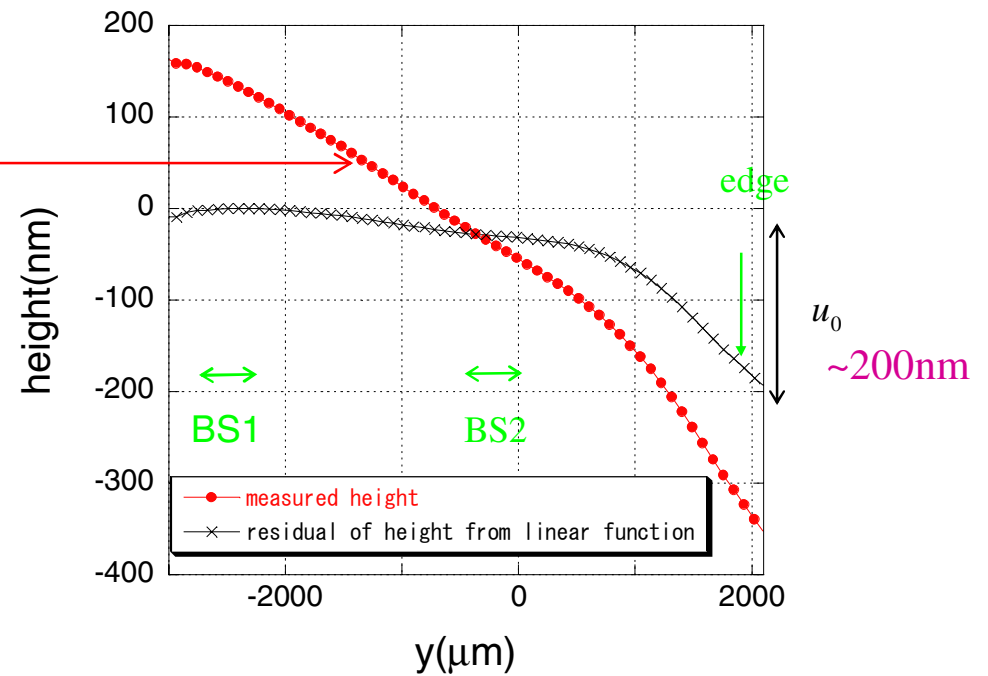


(++) 配置: エネルギー分散、角度発散を低減

3. 実験セットアップ



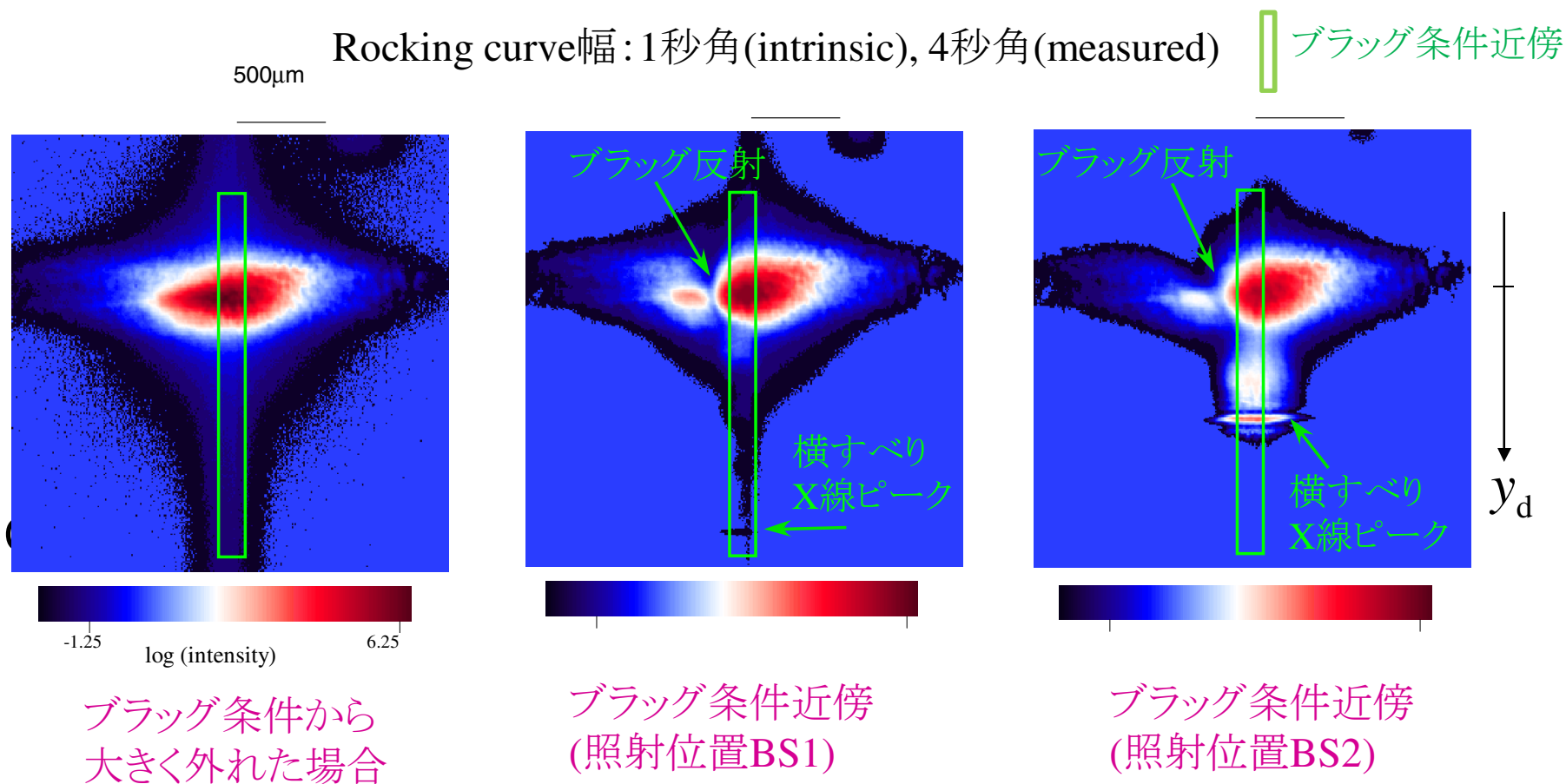
表面の高さ分布
(可視光干渉計)



表面の高さ分布(一次元、赤)と
線形関数フィッティングからのずれ(黒)

4. 実験結果

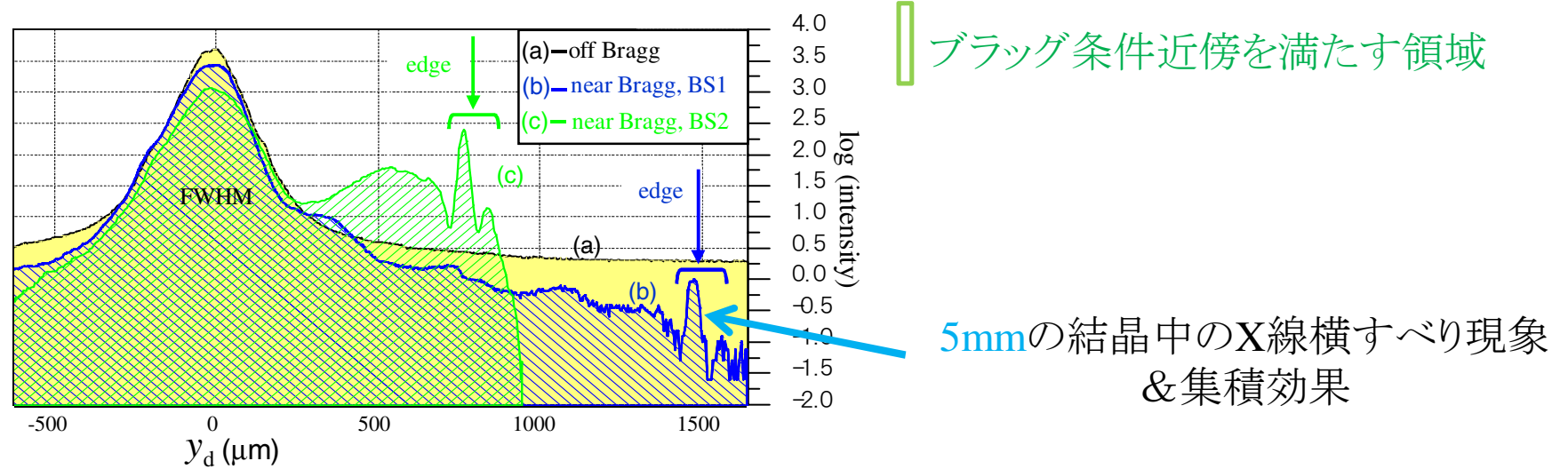
観察されたX線透過像



実験検証: Kohmura et al., PRL, 104, 244801 (2010)

4. 実験結果

X線透過像の一次元強度分布



X線横すべり量/歪み量

$$= T (\geq 5 \text{ mm}) / u (200\text{nm})$$

$$\geq 2.5 \times 10^4$$

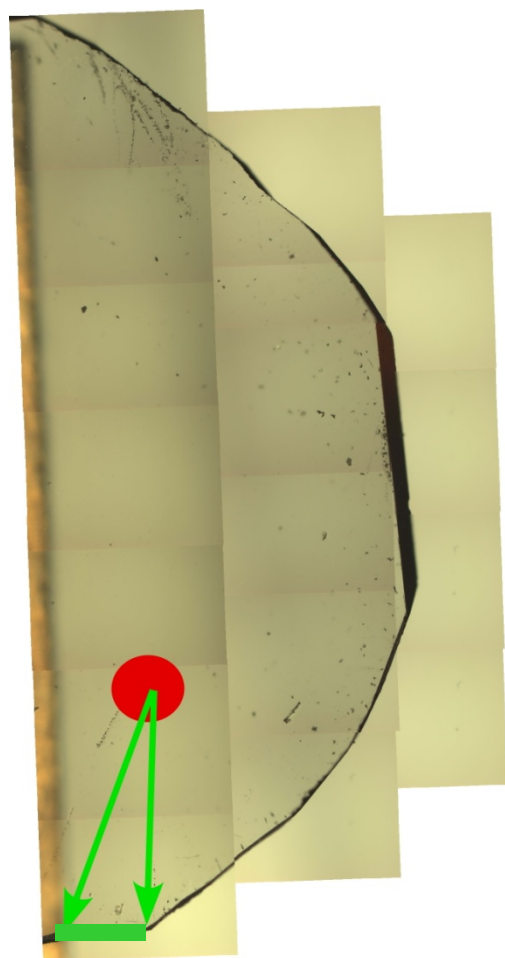
横すべり現象の理論予言

$$\sim 10^5$$

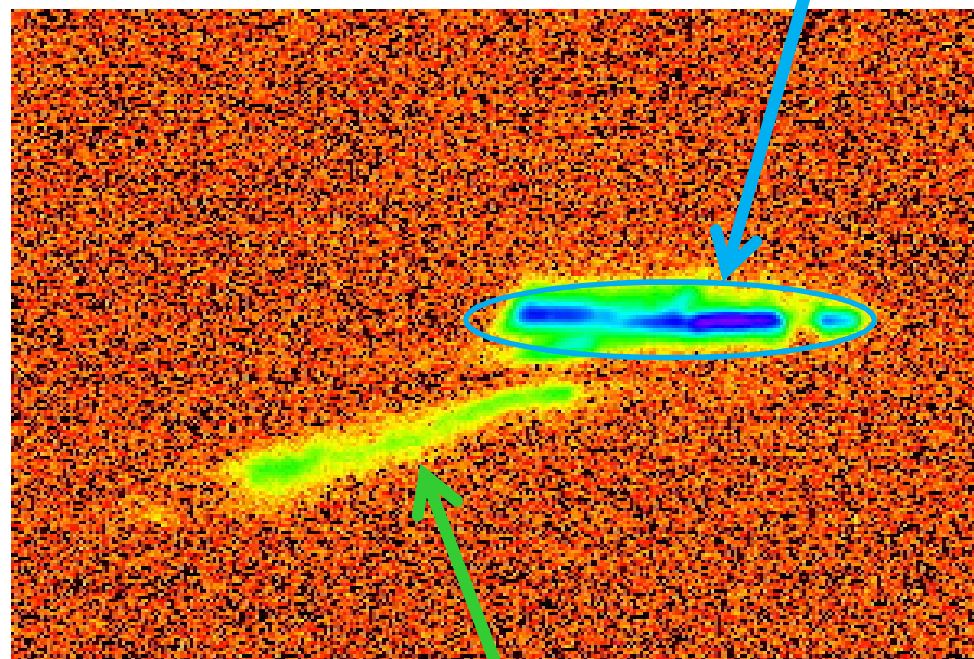
と合致



4. 実験結果 ダイヤモンド結晶の場合



1mm



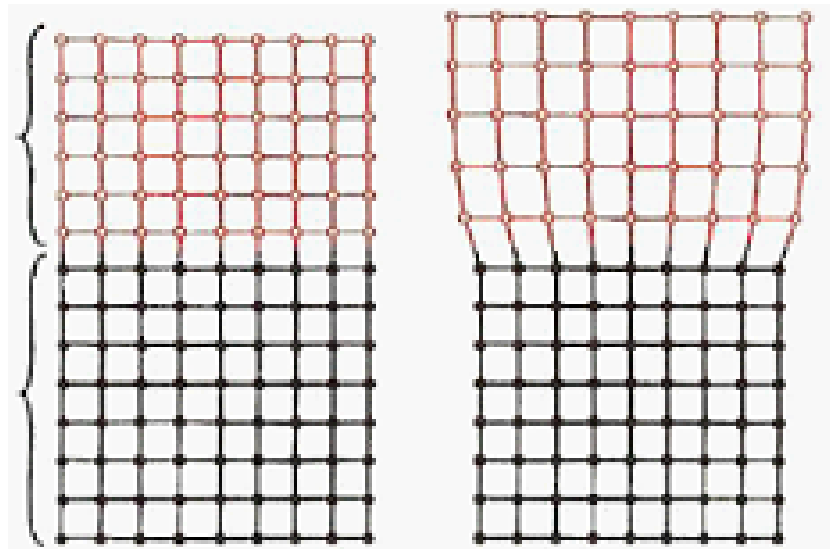
横すべりなしの
透過X線

横すべりX線

4. 実験結果

エピタキシャル結晶の場合

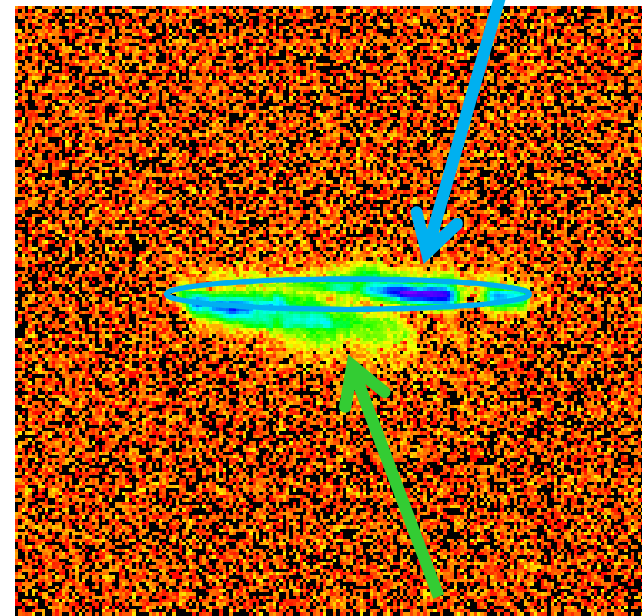
SiGe均一層1 μm t
SiGe傾斜層2 μm t
Siウエーハー



ホモ
エピタキシャル結晶

ヘテロ
エピタキシャル結晶

横すべりなしの
透過X線



横すべりX線

Bragg角+6.25''

5. 巨大横すべり現象 研究の将来展望

A. 光学素子への応用

B. フォノンの実時間観察

C. 他の波束での横すべり現象の観察

5. 研究の将来展望

A. 光学素子への応用

PRL 104, 244801 (2010)

Selected for a Viewpoint in *Physics*
PHYSICAL REVIEW LETTERS

week ending
18 JUNE 2010

Berry-Phase Translation of X Rays by a Deformed Crystal

Yoshiki Kohmura, Kei Sawada, and Tetsuya Ishikawa

RIKEN, SPring-8 Center, 1-1-1, Kouto, Sayo-cho, Sayo-gun, Hyogo 679-5148, Japan
(Received 21 December 2009; published 14 June 2010)

Viewpoint

Geometric phase kicks x-rays down a new path

Bernhard W. Adams

Argonne National Laboratory, 9700 S. Cass Avenue, Lemont, IL 60564, USA

Published June 14, 2010

A small crystal distortion can dramatically translate the path of an x-ray beam, an effect that could be useful in the development of x-ray optics.

Subject Areas: Optics

たとえばX線導波管、スイッチング素子

A Viewpoint on:

Berry-Phase Translation of X Rays by a Deformed Crystal

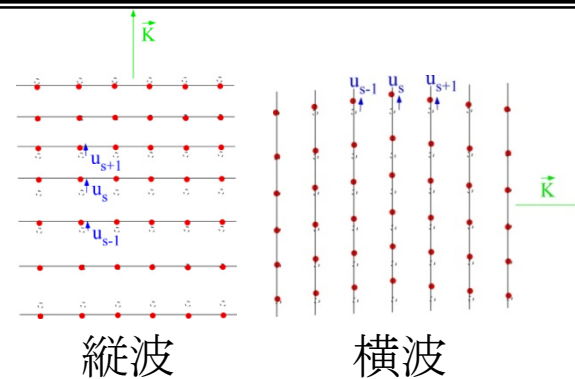
Yoshiki Kohmura, Kei Sawada and Tetsuya Ishikawa

Phys. Rev. Lett. 104, 244801 (2010) – Published June 14, 2010

5. 研究の将来展望

B. フォノンの実時間観察

原子面の平衡点からの変位 u_s (歪み):
波数ベクトルに平行 \Leftrightarrow 縦波
波数ベクトルに垂直 \Leftrightarrow 横波



格子振動のエネルギー量子:

フォノン

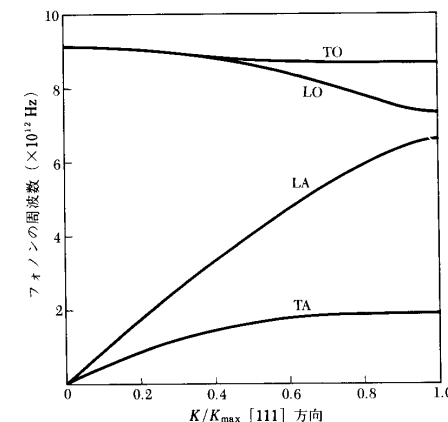
時定数 $\sim 1\text{ps}$

XFEL、ERLの短パルス性が活きる研究対象

基本格子に二個以上の原子が含まれる結晶:

音響ブランチ

光学ブランチ

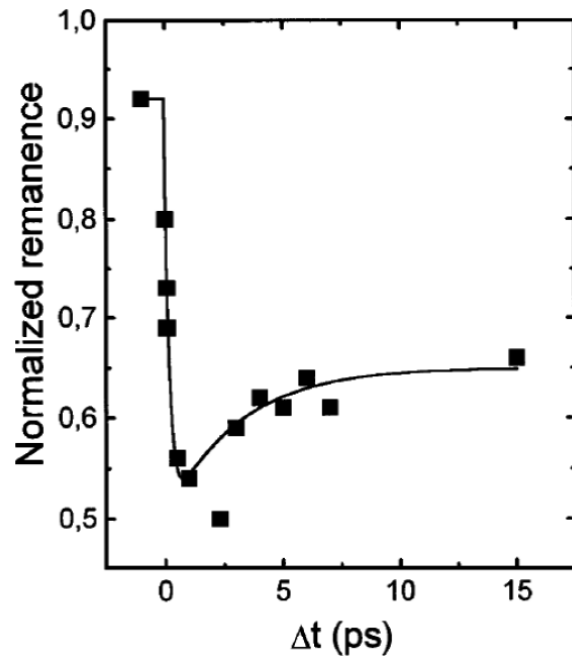


基本格子に二個の炭素原子を含むゲルマニウムの分散関係

5. 研究の将来展望

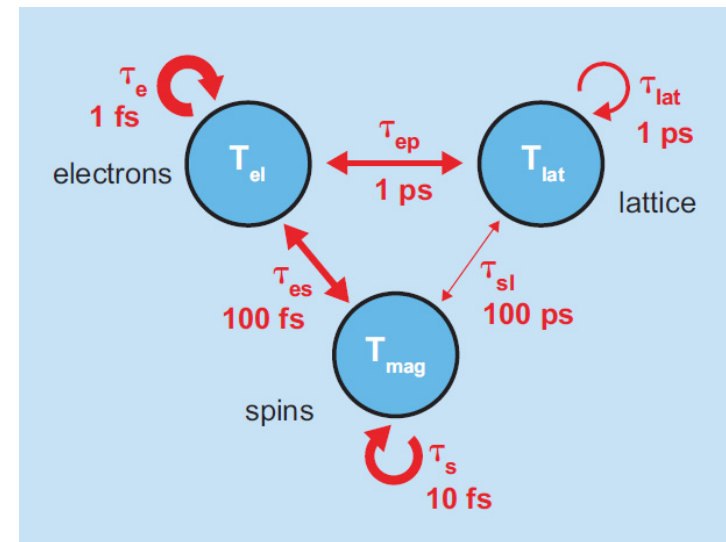
B. フォノンの実時間観察

(フォノンと電子、スピンの相互作用の研究)



Ni薄膜に、可視光レーザー照射
磁場の急激な低下($\ll 1$ ps)
と
遅い回復過程(数ps)

Beaurepaire, E., et al., PRL, 76, 4250 (1996)



XFEL、ERLの短パルス性が
活きる研究対象

Ultrafast Phenomena at the Nanoscale
Science opportunities at the SwissFEL X-ray Laser

5. 研究の将来展望

C. 他の波束での巨大横すべり現象の観察

γ 線

可視光

中性子

音波、超音波

etc.

6. まとめ

1. 歪み単結晶中のX線伝搬で5mmのオーダーの巨大横すべり現象が観察された。この現象は、2006年に澤田らが提唱した理論予言で定量的に説明可能である。
2. 歪んだ、シリコン結晶、ダイヤモンド結晶、エピタキシャル結晶で同様の現象が観察された。
3. 光学素子への応用、フォノンの実時間観察、他の波束での横すべり現象の観察が今後期待される。