

SPring-8/SACLA における パルス強磁場を用いた 弱結合未知粒子の探索 I

稲田聡明, 山崎高幸^A, 難波俊雄^A, 浅井祥仁, 小林富雄^A,
玉作賢治^B, 田中義人^B, 犬伏雄一^B, 澤田桂^B, 矢橋牧名^B, 石川哲也^B,
松尾晶^C, 川口孝志^C, 金道浩一^C
東大理, 東大素セ^A, 理研/SPring-8/SACLA^B, 東大物性研^C

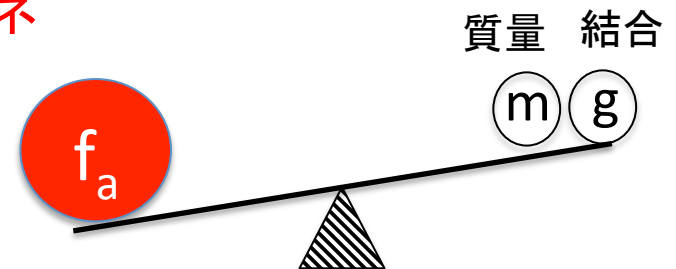
日本物理学会2014年年次大会@東海大学 2014/03/28

QCD における「強い CP 問題」

- 破れているはずの CP が, 中性子の電気双極子モーメントの測定により実験的に高い精度で保存 (CP 非保存項の係数 $\bar{\theta} < 10^{-9}$)
- 新たな U(1) 対称性の導入, 擬NG粒子がアクシオン
- 高いエネルギースケール f_a で対称性が破れて, 質量を獲得

質量と結合の大きさは f_a^{-1} で抑制される

- 軽くて結合の小さい粒子の探索が**高エネルギー物理**に直結
- コールド**ダークマター**の候補



放射光と結合するアクシオンを探したい

JPS 2014 Spring
Tokai University
Mar. 28th, 2014

Axion-like Particle (ALP) の性質

二つの光子と結合: 光子→アクシオン変換(逆過程も同様)

放射光X線   アクシオン

新たな U(1) 電荷を持つ
フェルミオンのループ

外部磁場
(磁石)

擬スカラー

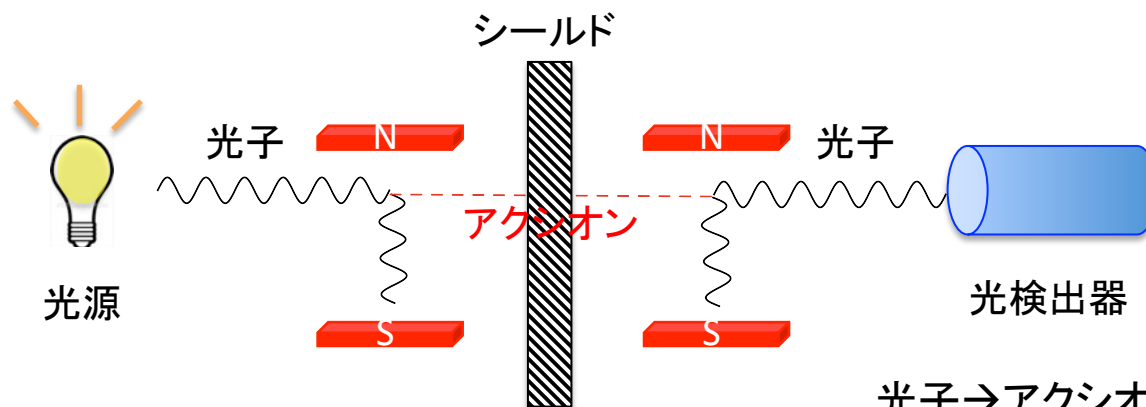
$$L_{\alpha\gamma\gamma} = -\frac{g_{\alpha\gamma\gamma}}{4} F_{\mu\nu} \tilde{F}^{\mu\nu} a = g_{\alpha\gamma\gamma} \vec{E} \cdot \vec{B} a$$

電磁場テンソル

電場と平行な磁場成分
が結合に寄与

Light Shining through a Wall (LSW) 実験

- アクシオンは物質との相互作用が小さい
- アクシオンを介して遮光壁を通過してくる光子を検出
- 透過光子は元の光子と同一エネルギー



壁の前後に強力な磁石を設置
探索の感度は磁場の強さ×長さに比例

光子→アクシオンの変換確率

$$P = \left(\frac{g_{\alpha\gamma} BL \sin \theta}{2} \right)^2, \theta = \frac{m_\alpha^2 L}{4\omega}$$

- 可視光源を用いた実験は過去 20 年間繰り返し探索されてきた
- X線光源を用いれば可視光よりも 2 桁重い ALP を探索可能

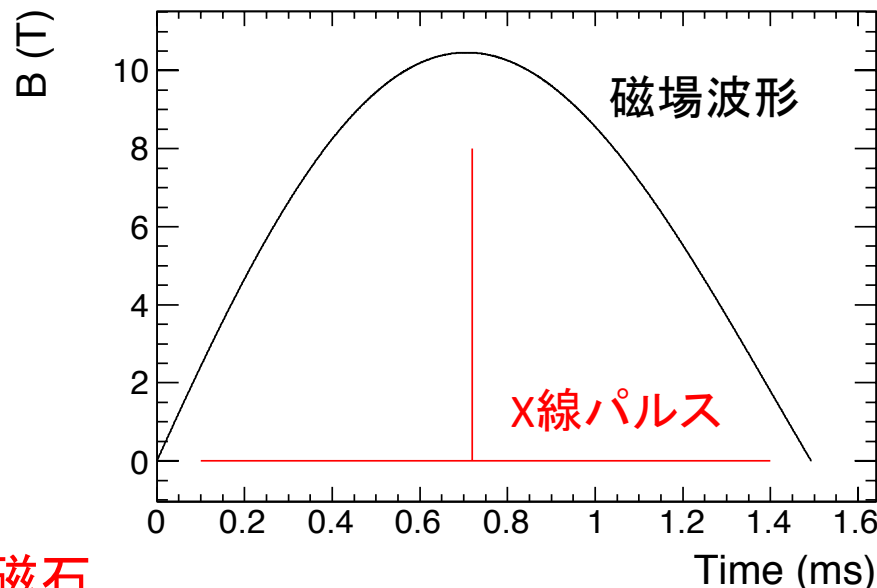
実験のアイデアと現状

JPS 2014 Spring
Tokai University
Mar. 28th, 2014

- 磁場: 光源に同期したパルス磁石.
 - 瞬間的に強磁場を発生
- 光源: SACLA (世界最高強度のX線パルスを出力)
- パルスに同期したトリガで環境 BG をカットし S/N が向上

そのために,

- ビーム軸方向に長さのあるパルス磁石
 - コンデンサ放電型バンク
- を開発中(バンクの話などは次の講演へ).

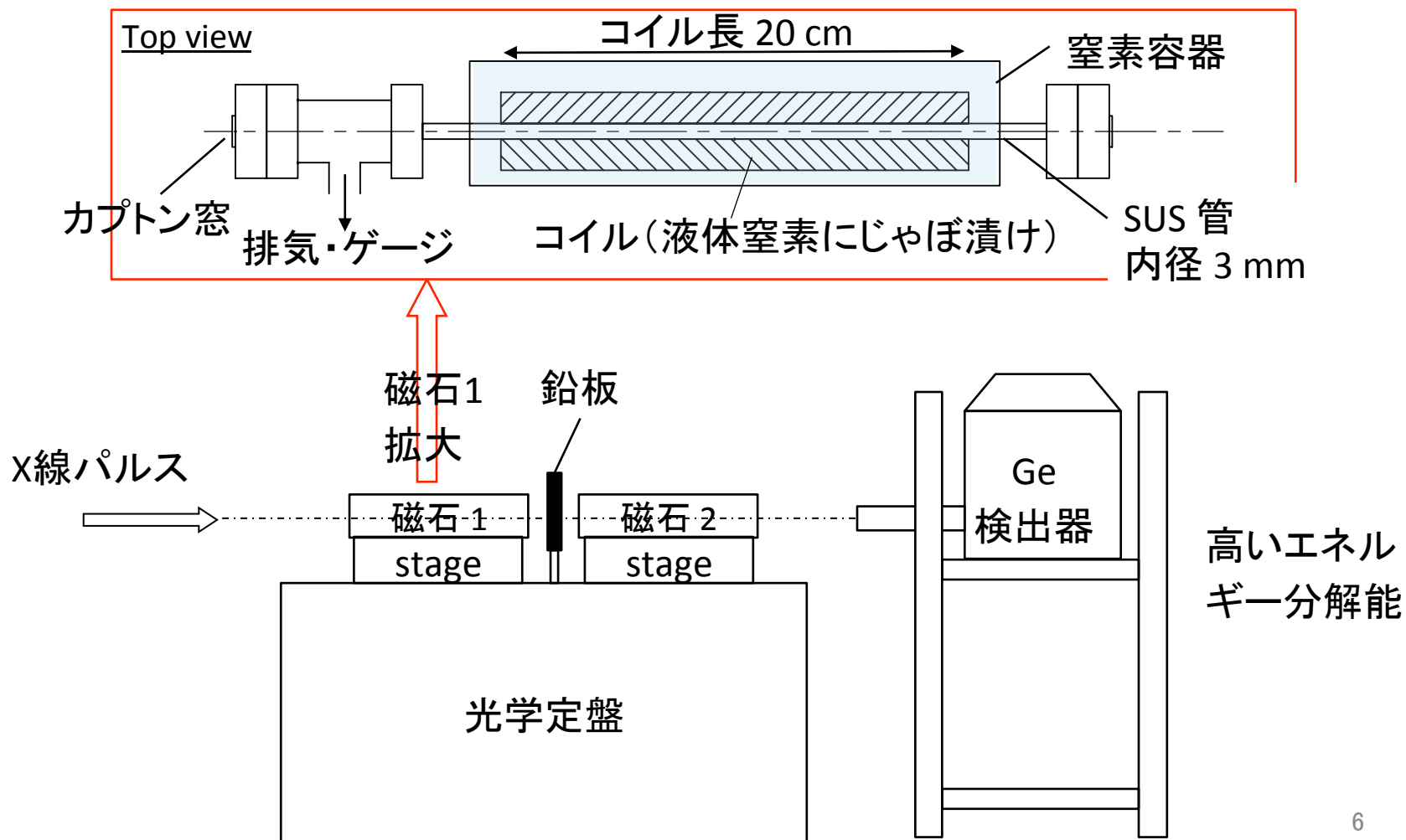


- 現在は試作機を何パターンか製作し, 性能をテストして最適な磁石のデザインを fix しようとしている段階

実験のセットアップ

JPS 2014 Spring
Tokai University
Mar. 28th, 2014

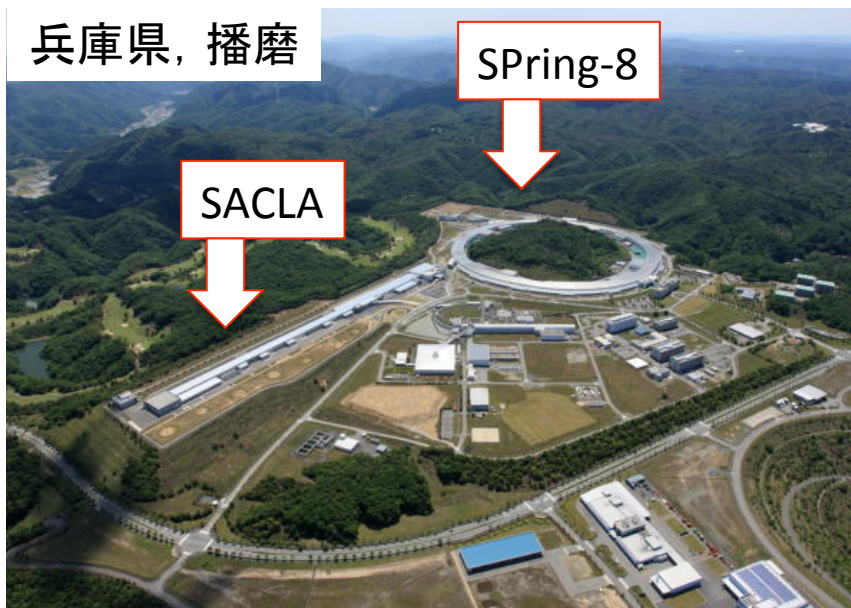
磁石2つを並べる場合



X線光源 - SACLA -

JPS 2014 Spring
Tokai University
Mar. 28th, 2014

SPring-8 Angstrom Compact Free-Electron Laser



- 世界最高輝度のX線パルスを出力する FEL
- 入射光子の母数を増やして, 検出感度を上げる

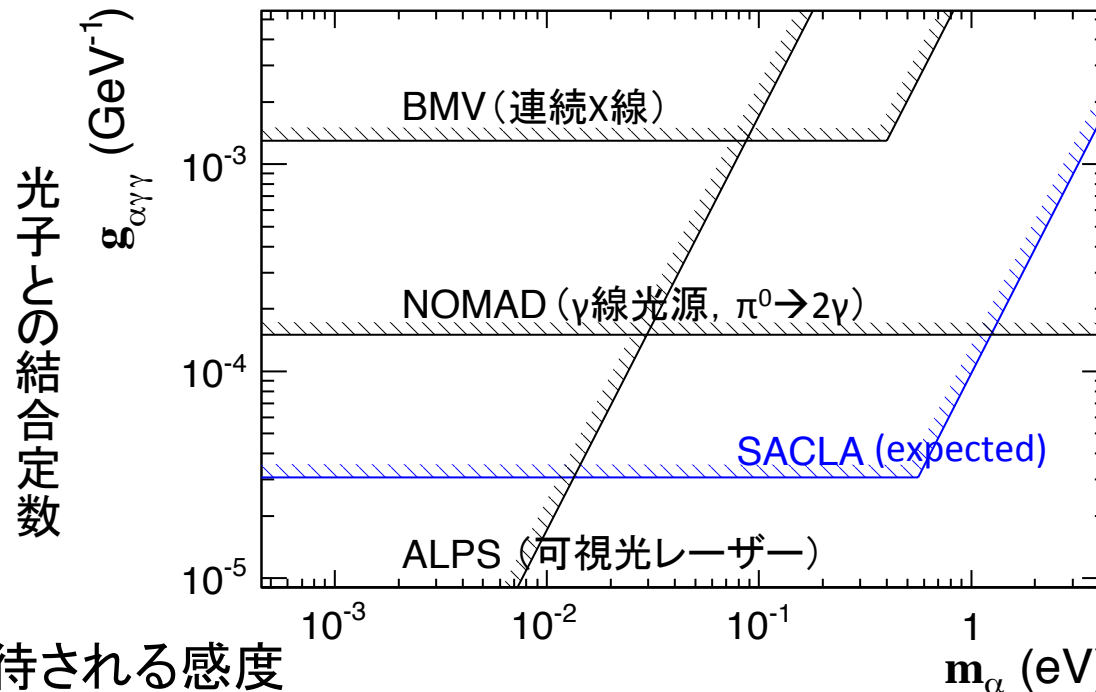
- 2012 年にユーザー利用を開始

光源性能	値
出力エネルギー	10–20 keV (エネルギー可変)
ビーム強度	10^{11} – 10^{10} photon/pulse
ビームサイズ	$\sim 100 \mu\text{m}$
パルス幅	$< 10 \text{ fs}$
繰り返し	30 Hz

光子との結合定数に対する期待感度

JPS 2014 Spring
Tokai University
Mar. 28th, 2014

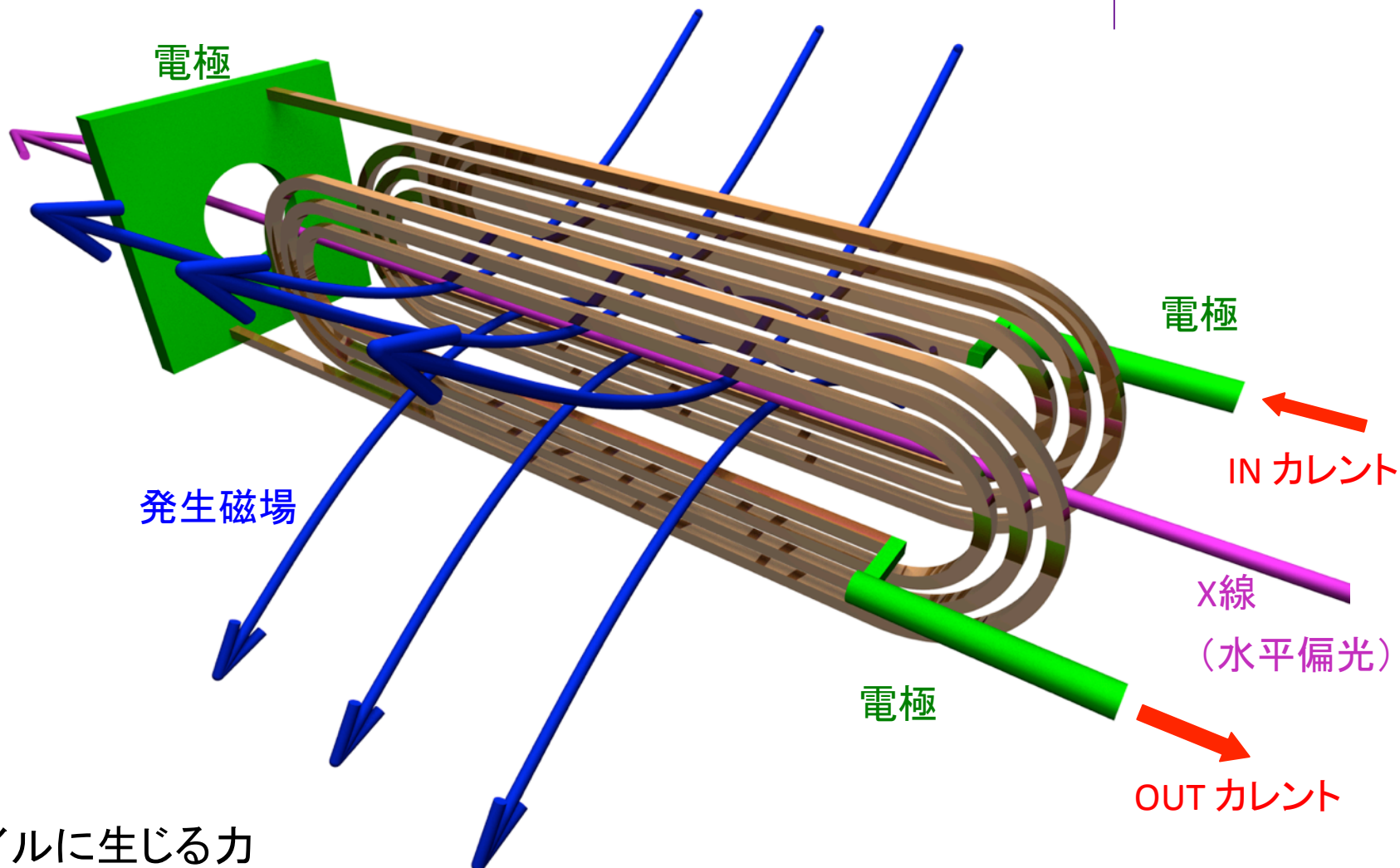
- 黒: 先行実験
- 青: SACLA (30Hz, $\omega=10$ keV), 磁石 (10 T $\times$ 0.2 m $\times$ 4個) で 1 日測定線の上側の領域を棄却 (95% C.L.)



- 可視光実験による制限よりも 2 桁重い質量領域において初探索
- No signal の場合には地上実験における制限を約 4 倍更新

Long Dipole Magnet の構造 1/2

JPS 2014 Spring
Tokai University
Mar. 28th, 2014

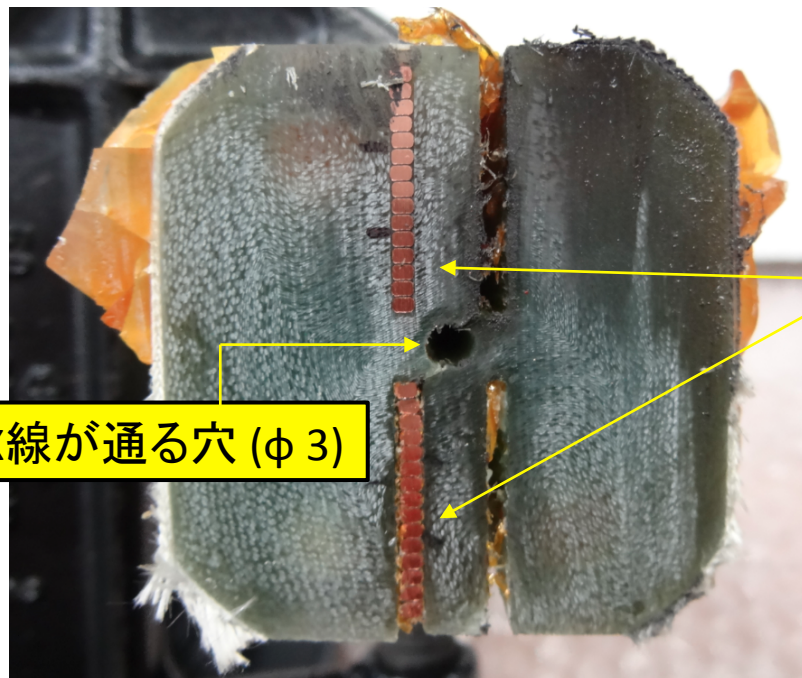


コイルに生じる力

- 反対向きに流れる電流 → 反発力で膨らむ
- 同じ向きに流れる電流 → 引力でつぶれる

Long Dipole Magnet の構造 2/2

JPS 2014 Spring
Tokai University
Mar. 28th, 2014

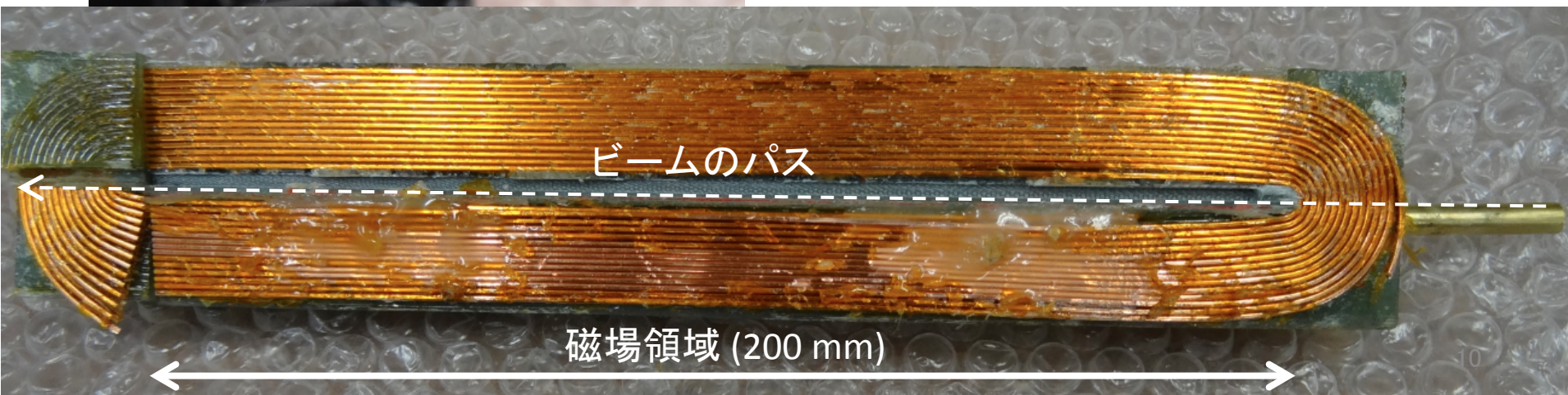


X線が通る穴 ($\phi 3$)

ダイポールの片側の極
(15.5 turn/pole)

← ビーム軸に垂直な断面

ビーム軸に平行な断面 (鉛直)



ビームのパス

磁場領域 (200 mm)

磁石製作 1/2

JPS 2014 Spring
Tokai University
Mar. 28th, 2014

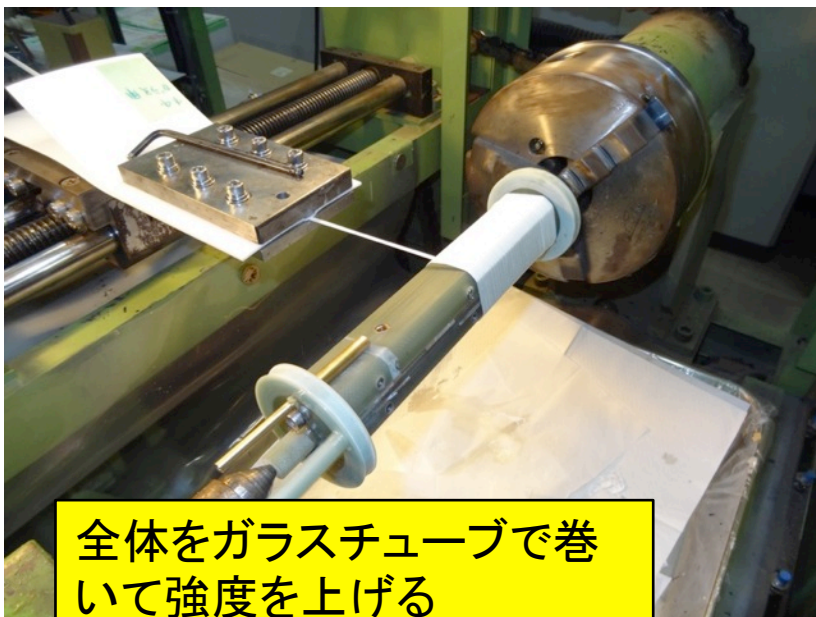
ダイポール磁石の製作

- 各極を高強度線 (Cu-Ag, $1 \times 1.5 \text{ mm}^2$) で 15.5 layer/pole 巻く



磁石製作 2/2

JPS 2014 Spring
Tokai University
Mar. 28th, 2014



全体をガラスチューブで巻いて強度を上げる



絶縁補強用のエポキシを含浸させた後、電気炉 (120 °C) に入れ加熱



カプトンで電極周りの絶縁を補強して完成

性能	条件	設計値	実測値
B/I (磁場発生効率)	コイル中心	1.17 T/kA	1.12 T/kA
L (コイルインダクタンス)		111 μ H	111 μ H
R (コイル抵抗)	77 K	72 m Ω	71 m Ω
	300 K	229 m Ω	226 m Ω

期待通りの仕様

- SACLA の高輝度X線パルス光源に用い、光子と弱く結合する Axion-like Particle を探索する LSW 実験を行う
- 光子 $\leftrightarrow$ アクシオン変換に使用する強力なパルス磁石とその充放電バンクを開発している
- 可視光レーザー実験より 2桁まで重い質量領域において、地上実験としては最高感度(光子との結合定数に対して約4倍の更新)が見込まれる。
- 今回製作した試作機における磁場出しの結果については次の講演に続く