

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

山崎高幸, 稲田聡明^A, 難波俊雄, 浅井祥仁^A, 小林富雄,
田中義人^B, 玉作賢治^C, 澤田桂^C, 矢橋牧名^C, 石川哲也^C, 犬伏雄一^D,
松尾晶^E, 金道浩一^E, 野尻浩之^F

東大素セ, 東大理^A,
兵県大院物質理^B, 理研/Spring-8/SACLA^C, JASRI/XFEL^D,
東大物性研^E, 東北大金研^F

Axion & Axion-Like Particle (ALP)

- QCDにおけるCP非保存項

由来が異なる二つの量なので $\bar{\theta} \neq 0$ のはず

クォークの質量行列

$$L_{\theta} = \bar{\theta} \frac{g_s^2}{32\pi^2} G_a^{\mu\nu} \tilde{G}_{a\mu\nu} \quad \bar{\theta} = \theta + \arg \det M$$

QCD真空から決まる

- 中性子EDM測定から $\bar{\theta}$ は極めて小さいことがわかっている

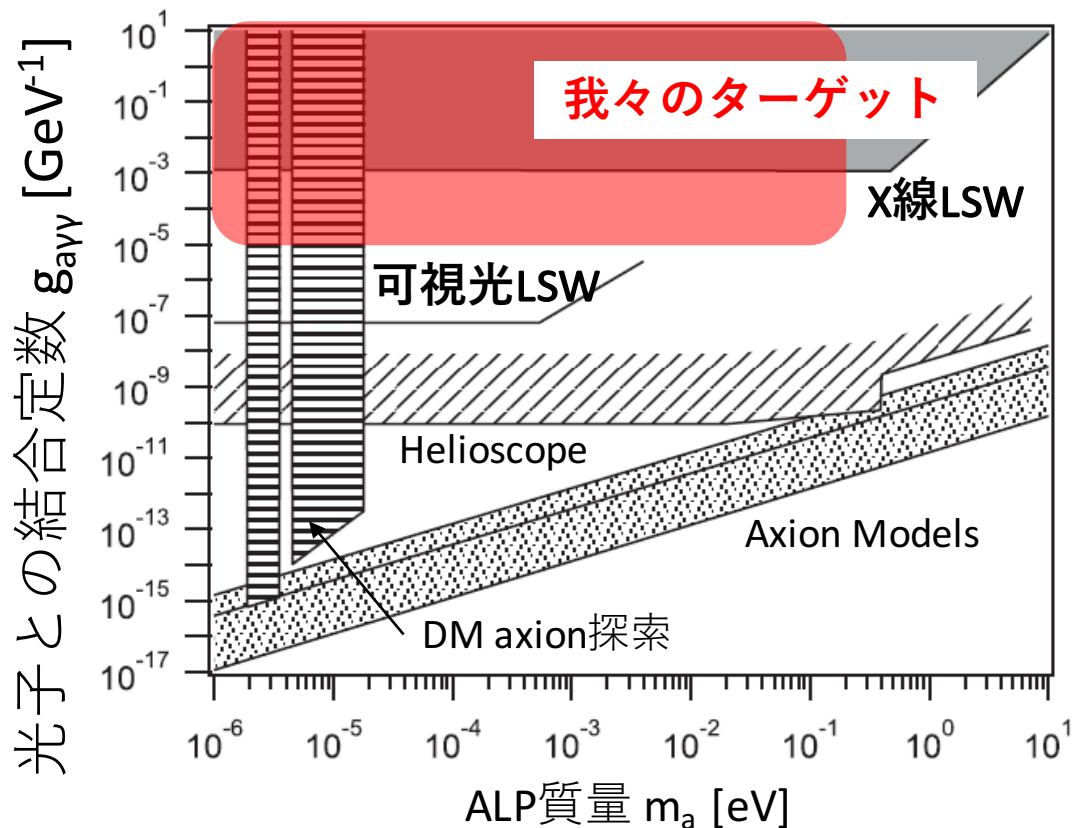
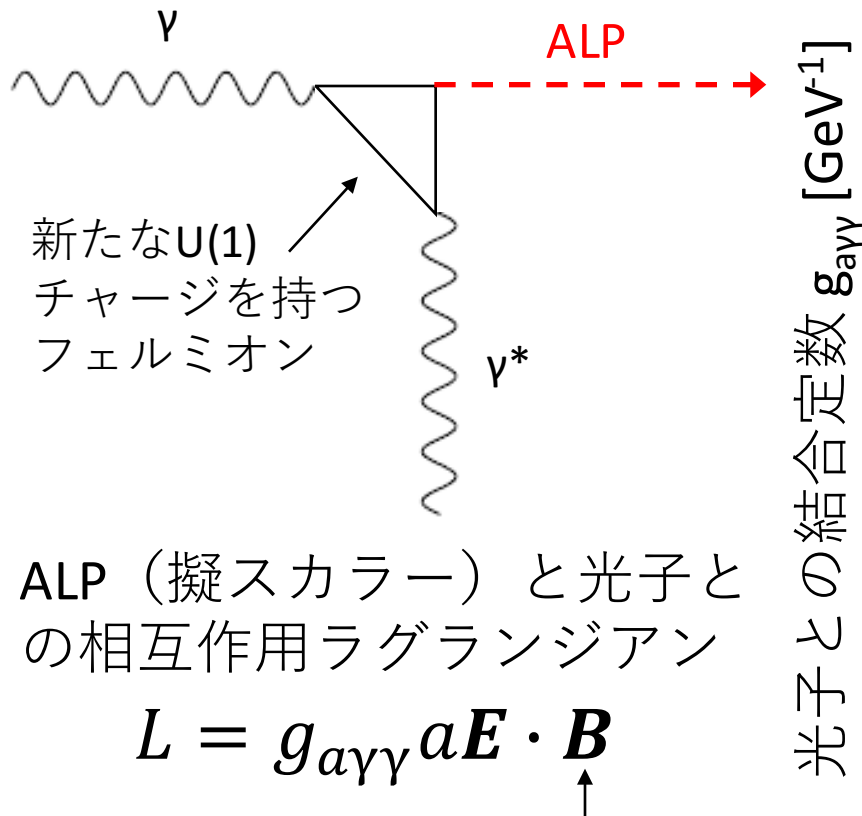
$$|d_n| \cong \frac{e\bar{\theta}m_q}{m_N^2} < 2.9 \times 10^{-26} \text{ e cm} \rightarrow \bar{\theta} < 10^{-9}$$

C. A. Baker, *et al.*, Phys. Rev. Lett. **97**, 131801 (2006)

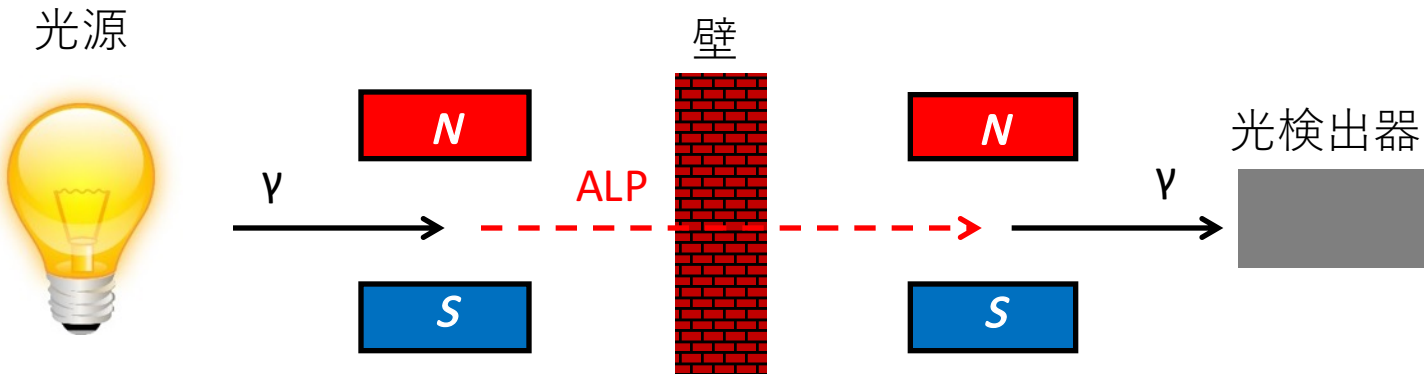
- この「強いCP問題」を解決するために大域的カイラル対称性が導入される。これが自発的に破れる際に生じる軽い擬スカラー粒子がアクシオン (axion) である
- 一方、Axion-Like Particle (ALP)とは、より一般に、標準理論を超えるモデルにおいて、大域的な対称性が自発的に破れる際に生じる軽い (擬) スカラー粒子を指す

ALP探索実験

- ALPは一般に2光子と結合。この性質を用いて探索が行われてきた
- 我々は純粋な地上実験（LSW実験）において $m_a \sim 0.1 \text{ eV}$ という比較的重い領域を世界最高感度で探索することを目的としている



Light Shining through a Wall (LSW)



ALP $\leftrightarrow$ 光子の変換確率

$$P(a \leftrightarrow \gamma) = \left(\frac{g_{a\gamma\gamma} \mathbf{BL} \sin \theta}{2} \right)^2, \theta = \frac{m_a^2 L}{4\omega}$$

- $g_{a\gamma\gamma}$ の感度は磁場の強さ B と長さ L に比例
- 探索可能なALP質量は光源の光子エネルギー ω の $\sqrt{}$ で決まる

鍵となるデバイス

- 強力なX線光源：SACLA/SPring-8（可視光より2桁重い m_a ）
- 強力で長い磁場：高速繰り返しレーストラック型パルス磁石

SACLA/SPring-8

- SACLA

- X線自由電子レーザー
- パルスあたりの光子数
 $\sim 5 \times 10^{11}$ photons/pulse
- パルス幅 < 10 fs
- 繰り返しレート 30 Hz



<http://commune.spring8.or.jp/imageterms/img/img01l.jpg>

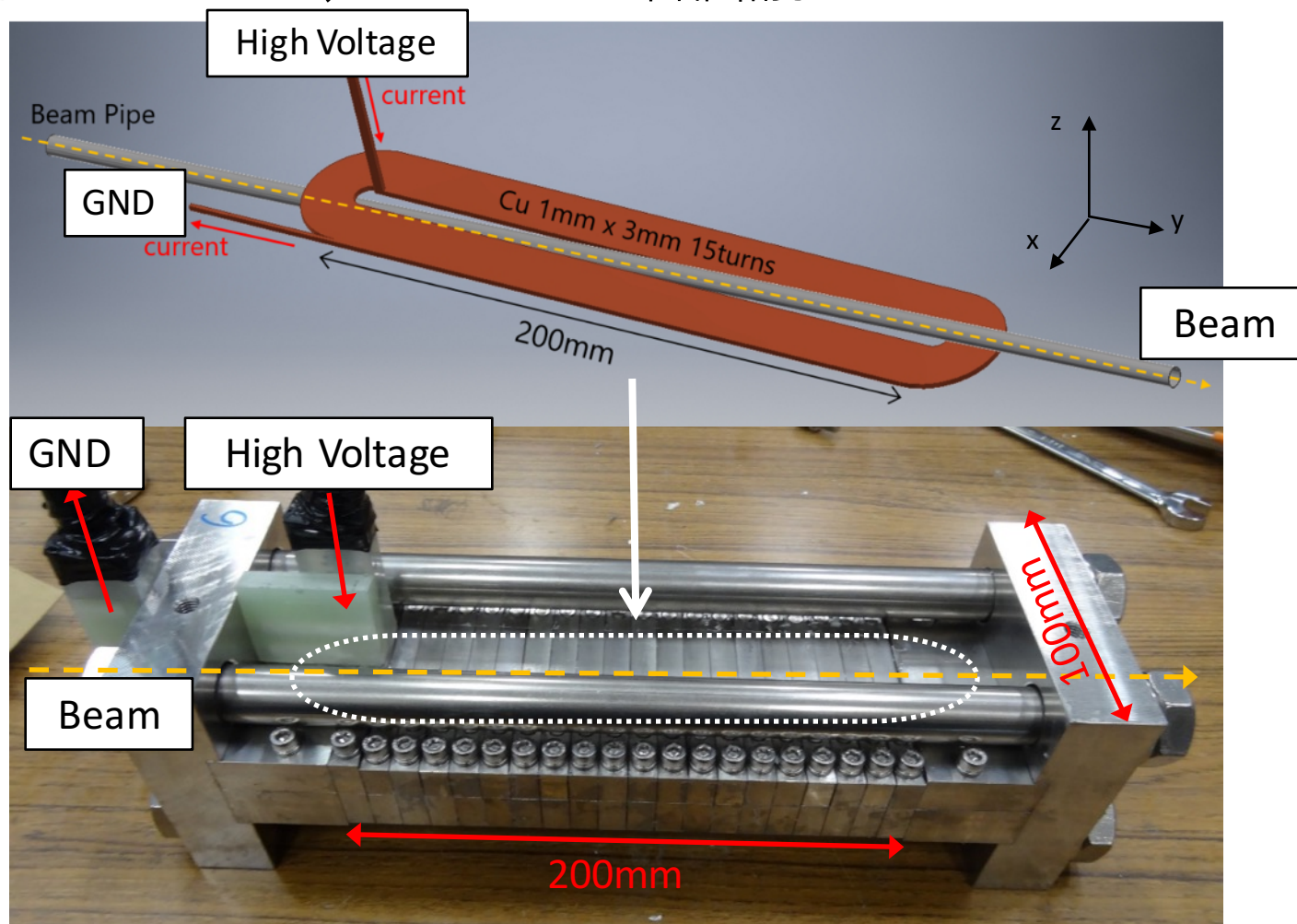
- SPring-8 BL19LXU

- 27mの長尺アンジュレータを有する高輝度ビームライン
- パルスあたりの光子数 $\sim 10^6$ photons/pulse
- パルス幅 40 ps
- 繰り返しレート 42 MHz
- 時間あたりの光子数は $\sim 5 \times 10^{13}$ photons/sec と大きい

- まずBL19LXUを用いて実験を行った（詳細は次のトーク）

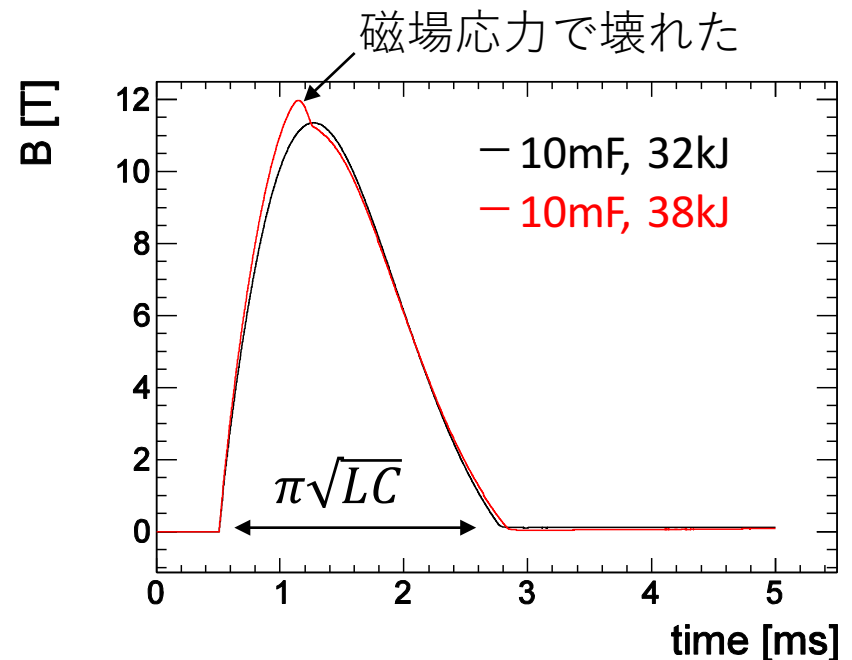
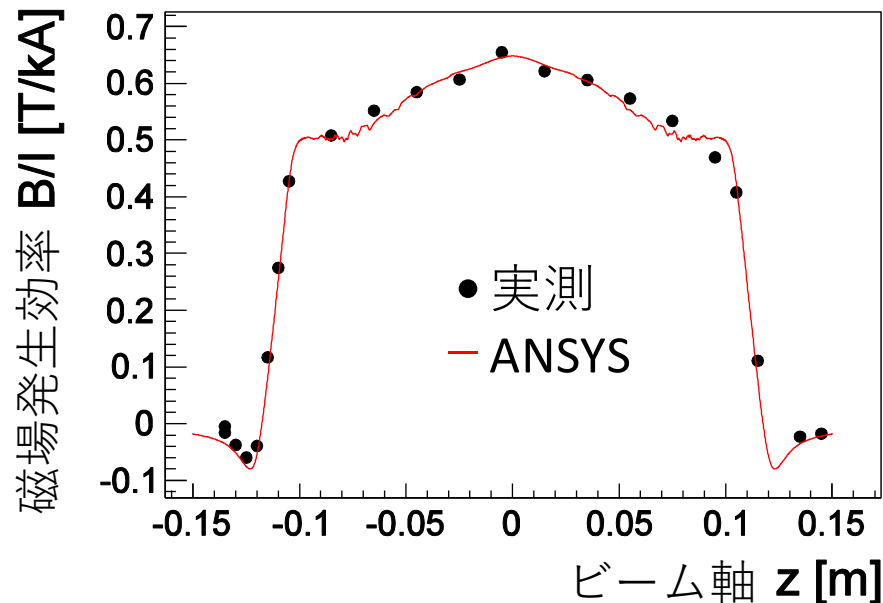
パルス磁石

- 1mmX3mmの銅の平角線を15ターン巻いたレーストラックコイルで1個あたりの長さ200mm. 10T発生時で40MPaの磁場応力が発生するため、SUS304で外部補強している



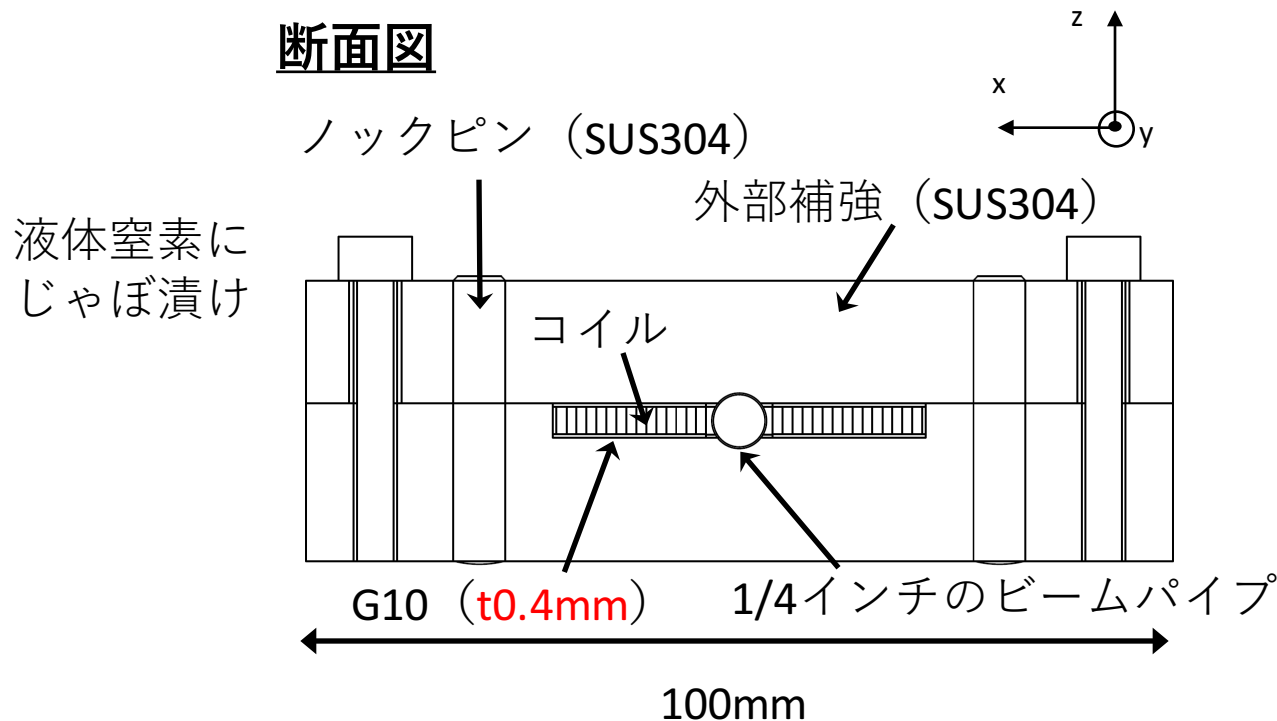
磁場マップ・最大磁場

- ビームパイプが2.75度傾いているため、ビームの偏光に水平な成分の磁場は場所によって異なる（注：本実験では積分しか効かない）
- 最大磁場は12Tで、コイルの機械強度がリミット。繰り返し運転時は安全のため10T以下で使用（磁場応力としては1.5倍小さい）



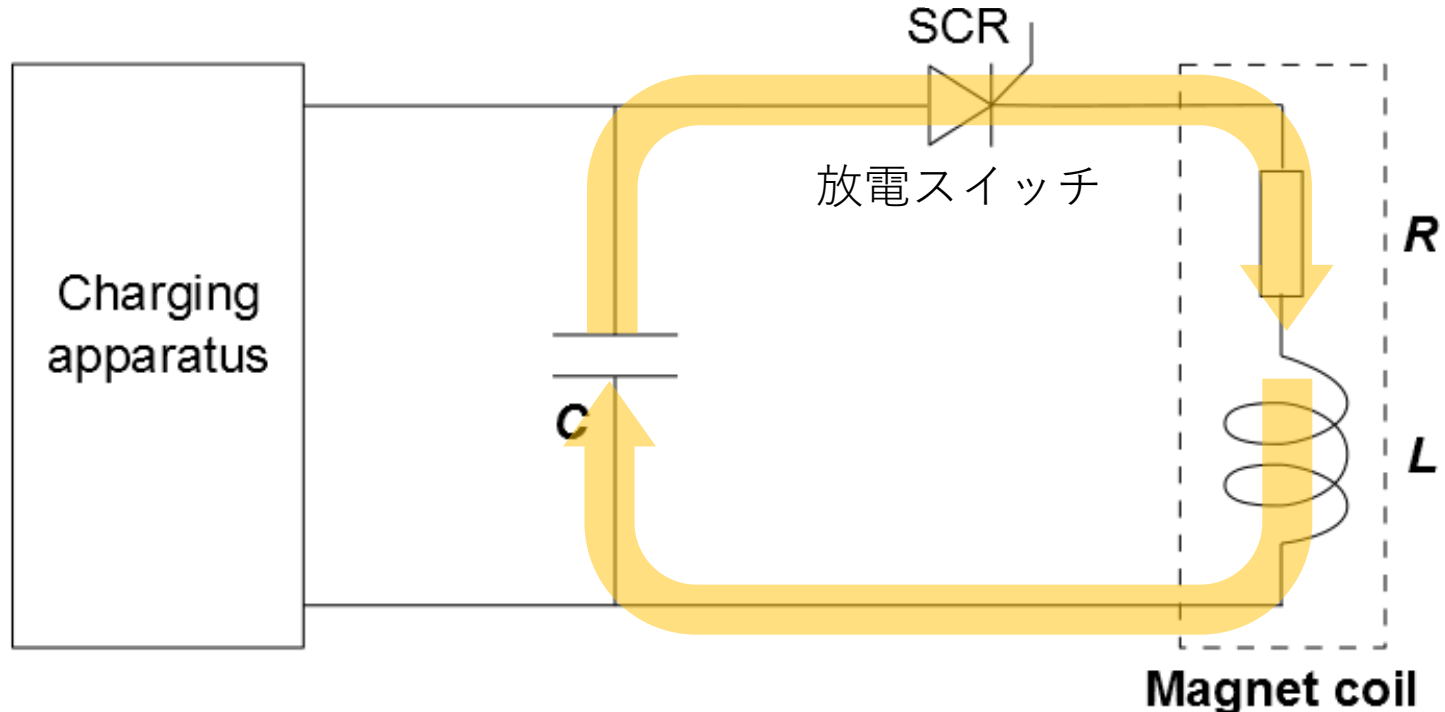
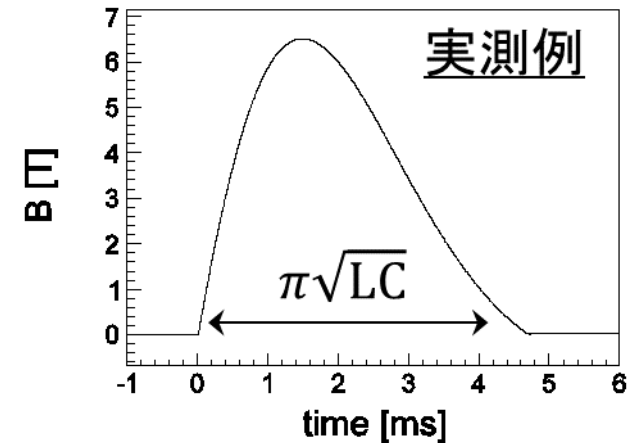
発熱と冷却効率

- 磁場を繰り返し発生できるレートは、コイルの抵抗による発熱の大きさと、コイルの冷却効率でリミットされる（従来のパルス磁石では冷却に**10分**くらいかかる）。線材に抵抗率の低いCuを選びさらに液体窒素で冷却することで常温の**1/9**に抵抗を減らした
- コイルと外部補強の間の絶縁体（ガラエポ）を**0.4mm**まで薄くすることで熱抵抗を抑え、冷却の時定数 $\tau=20\text{sec}$ （実測）を得た



コンデンサバンク

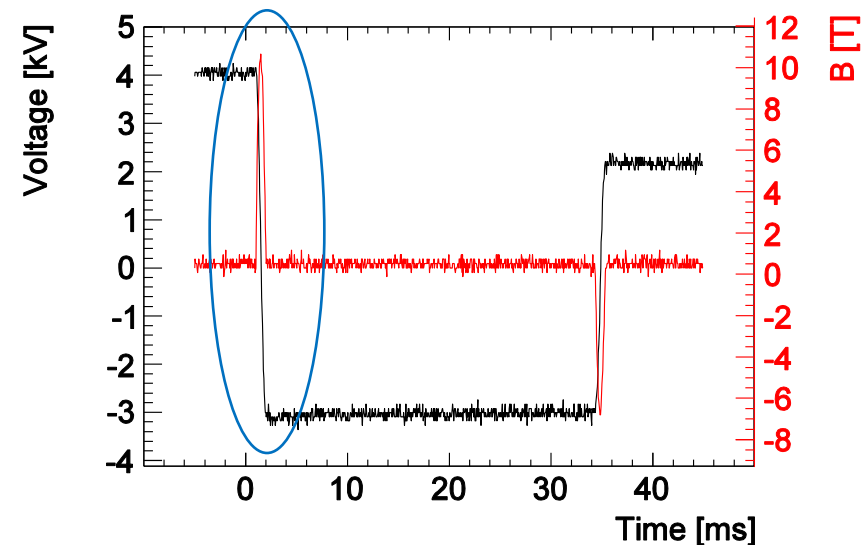
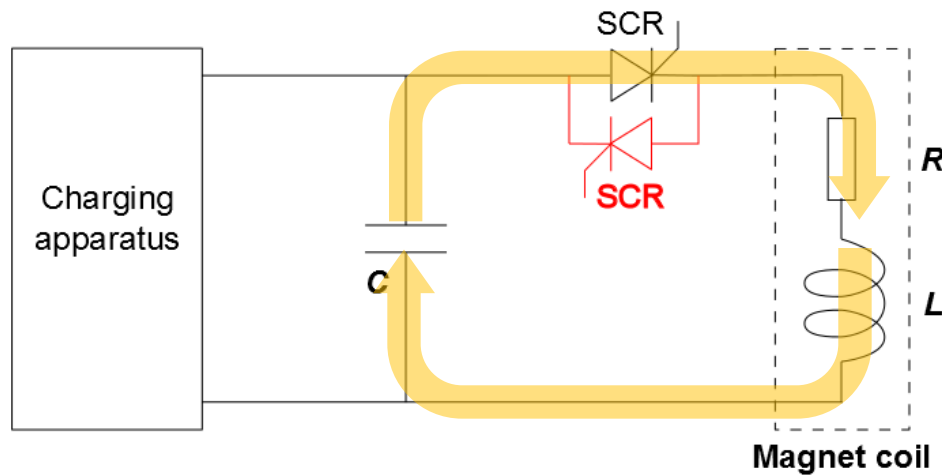
- パルス磁石の電源としてコンデンサバンクを用いる。 $C = 1 \sim 10 \text{ mF}$ のコンデンサに数kV充電し、サイリスタなどのスイッチで放電させるとパルス電流がコイルに流れる。単純なLCR回路



高速繰り返しバンク

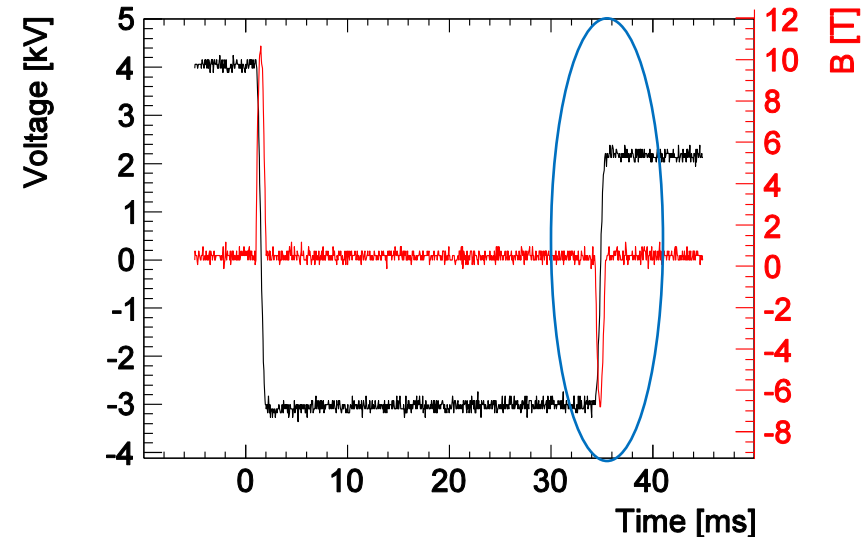
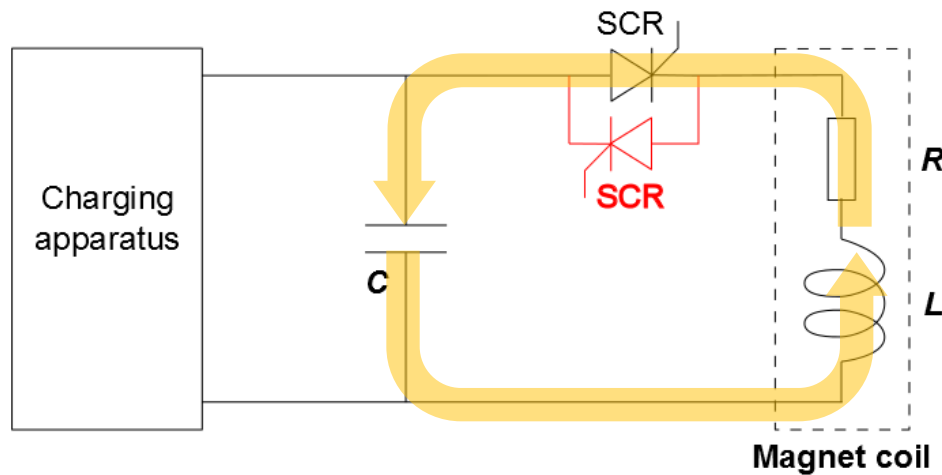
- 高速繰り返し運転のためにSCRを逆並列し、コイルで発熱としてロスしたエネルギーのみを補充電するバンクを製作

1. まず1発順方向に放電して磁場発生させる。一部のエネルギーが発熱として失われ残りはコンデンサに逆充電される



高速繰り返しバンク

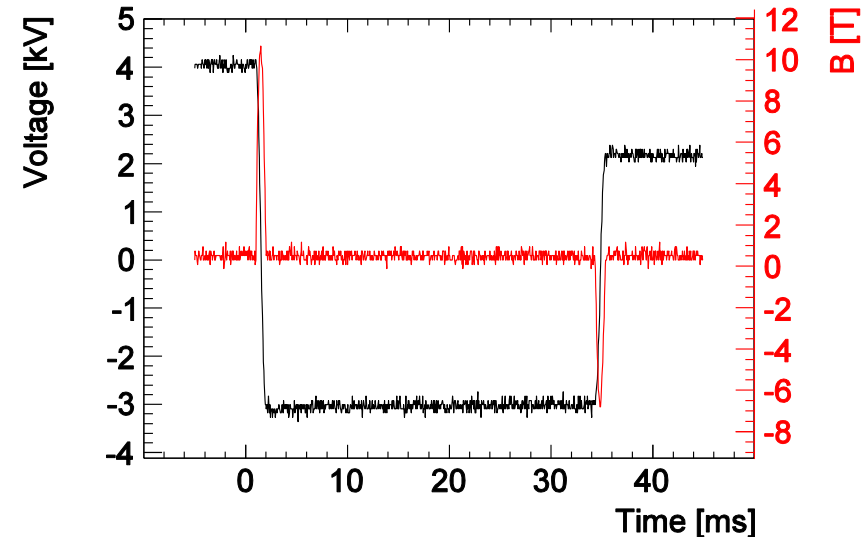
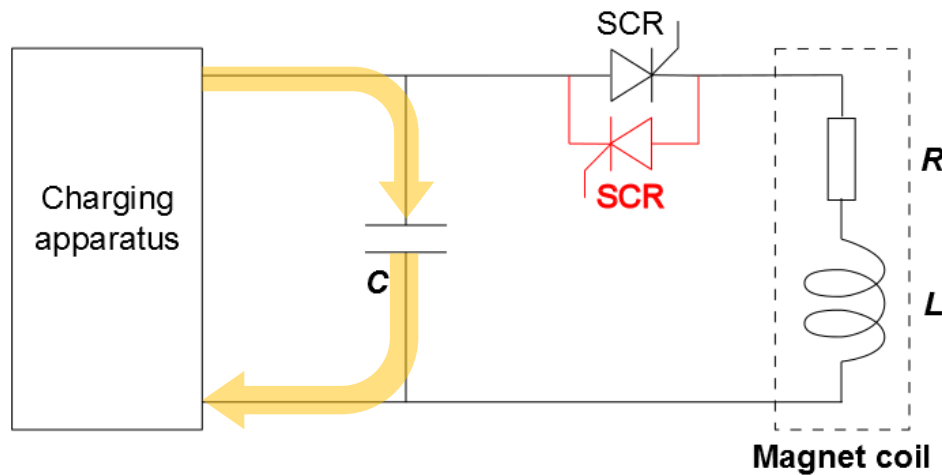
- 高速繰り返し運転のためにSCRを逆並列し、コイルで発熱としてロスしたエネルギーのみを補充電するバンクを製作
2. 次に逆方向に放電して極性が反転した磁場を発生させる。再び一部のエネルギーが発熱として失われ残りが充電される



高速繰り返しバンク

- 高速繰り返し運転のためにSCRを逆並列し、コイルで発熱としてロスしたエネルギーのみを補充電するバンクを製作

3. 2回の磁場発生時にコイルでロスした分を補充する。0Vから充電するのに比べて充電時間が短くなる



30kJ可搬コンデンサバンク

放電部

昇圧トランス、
充電抵抗、SCRなど



充電部

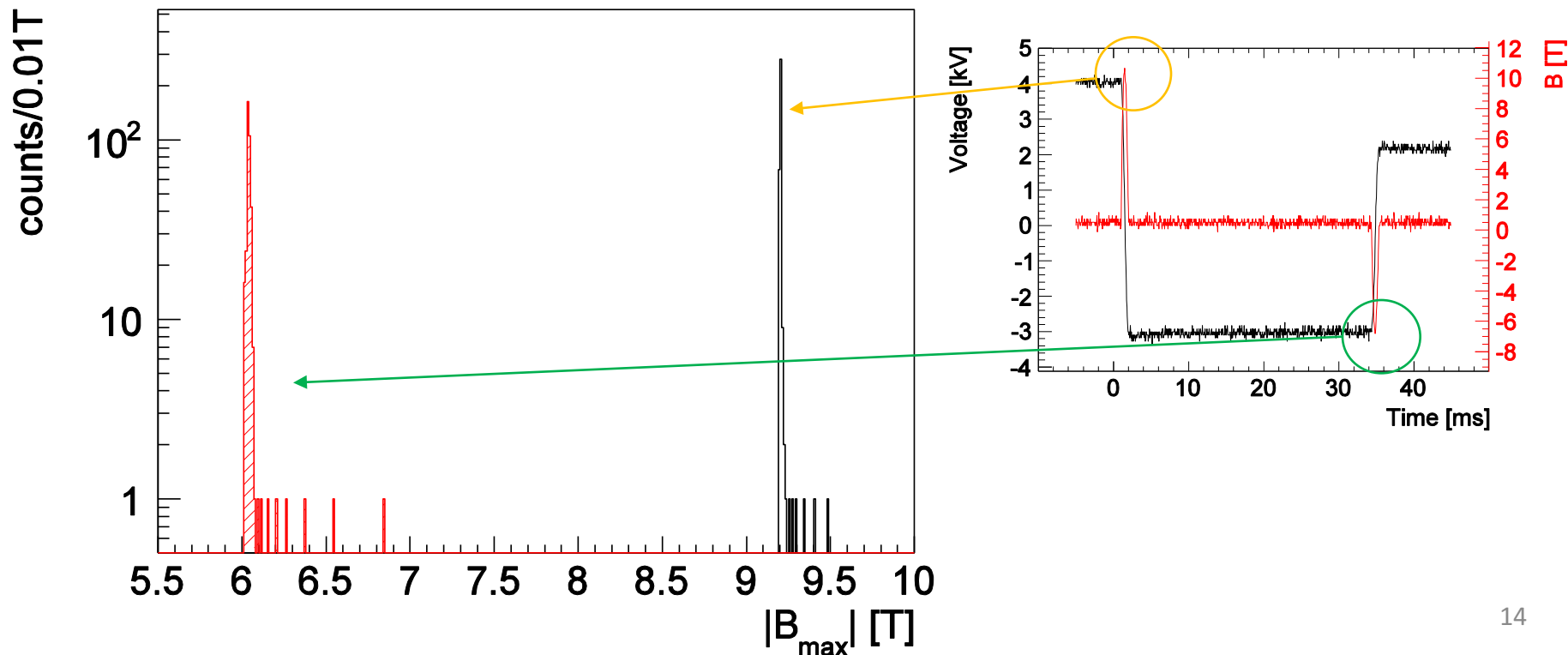
0.25mF, 160kgのコ
ンデンサが12個

基本情報

- 3mF, 4.5kVの30kJバンク
- コンデンサは0.25mF（160kg）を12個使用
- 補給充電の速度を上げるため充電回路の容量は15kVA
- 床面積で5.5m²、最も高い部分が2m。SPring-8/SACLAの実験ハッチにぎりぎり収まる
- 総重量は2.5t程度だが、500kg程度のパーツに分割して運搬可能

繰り返し運転テスト

- パルス磁石4つ（**0.2mX4**）を2直列2並列で接続し、初期充電圧4kVで1時間の繰り返し動作試験を行った
- 合計**732**発のパルス磁場（**往路9.2T、復路6.0Tで0.2Hz**）が発生でき、従来のパルス磁場（ ~ 5 pulse/hour）の100倍を超えるレートで磁場発生が可能である



まとめ

- Light Shining through a Wall (LSW) と呼ばれる手法でAxion Like Particle (ALP) を探索する実験を行っている
- 光源としてSACLA/SPring-8の高輝度X線 ($\sim 10\text{keV}$) を用いることで、可視光実験に比べ2桁重い $m_a \sim 0.1\text{eV}$ のALPを探索できる
- ALP探索の感度は磁場の強さ B と長さ L に比例し、統計は $1/4$ 乗で効くため、新たに高速繰り返し可能なレーストラック型のパルス磁石および30kJ可搬コンデンサバンクを開発した。これにより $10\text{T} \cdot 0.8\text{m}$ で 0.2Hz の繰り返しレート（従来のパルス磁石の約100倍）での磁場発生が可能である
- この磁石を用いてSPring-8 BL19LXUビームラインで行ったALP探索の結果について次の稲田のトーク（19pAM12）で紹介する