

ラウエ型チャンネルカット結晶を用いた 弱結合未知粒子の探索

山道智博, 山崎高幸^A, 難波俊雄^B, 玉作賢治^C, 浅井祥仁
東大理, KEK^A, 東大素セ^B, 理研/SPring-8^C

日本物理学会2017年秋季大会@宇都宮大学 2017/09/15(Fri)
15aS36-2

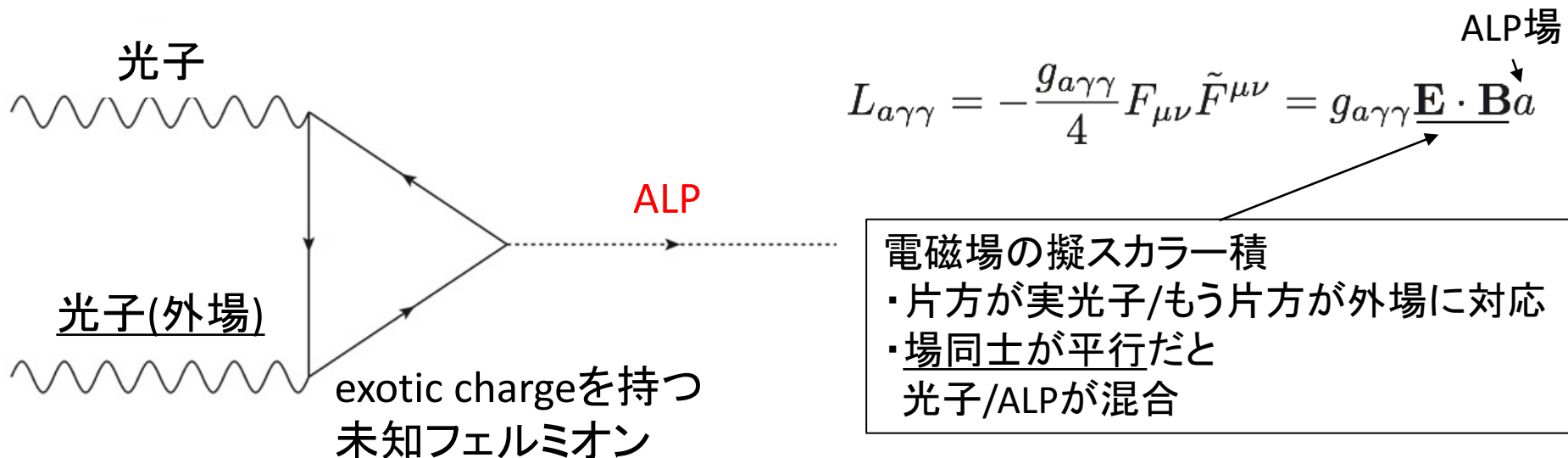
Axion Like Particle

◆ Axion Like Particle (ALP)

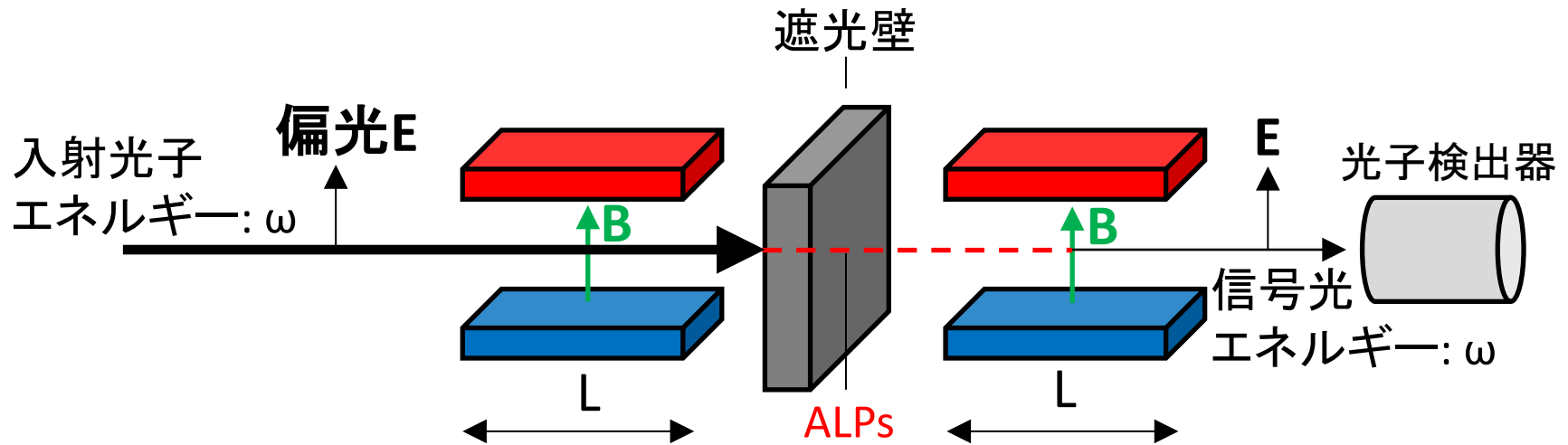
- ・標準理論を超える物理で予言される擬スカラー粒子(アクシオンに類似)
- ・天文学/宇宙物理の未解決問題の解になる可能性
ex) 太陽コロナ加熱($\sim \text{keV ALP}$)/銀河団からの3.5 keV輝線

◆ 主な性質

- ・未知のフェルミオンを介して二光子と結合(Primakoff効果)
- ・ALP質量 m_a と結合定数 $g_{a\gamma\gamma}$ は一般的に無相関



これまでの地上探索実験



・Primakoff効果を利用したALPの地上探索実験がこれまでに行われてきた

◆ Light-Shining-through-a-Wall (LSW)

・遮光壁を挟んで磁場中でALP変換/逆変換

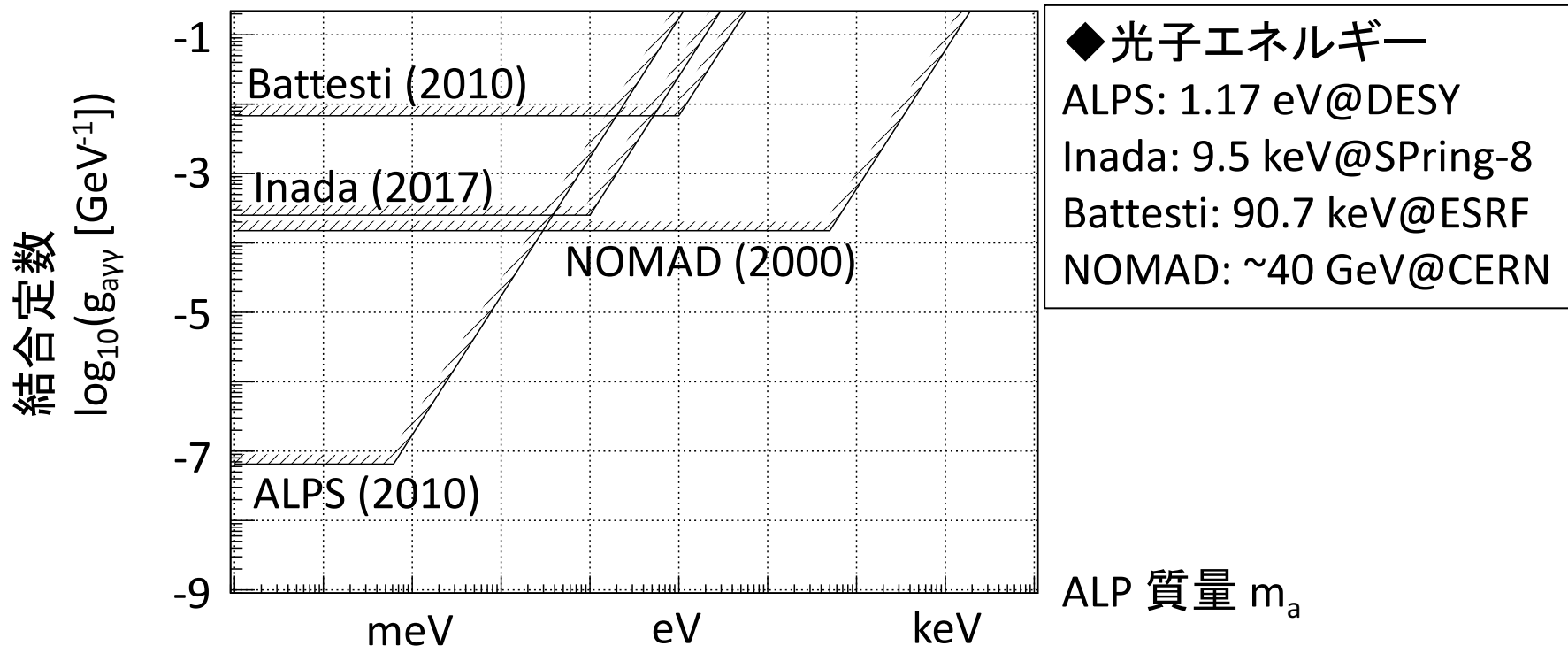
・結合定数 $g_{a\gamma\gamma}$ の探索感度は磁場強度×長さ に比例

・探索可能なALPの質量: $m_a \propto \omega^{0.5}$

変換/再変換効率(1回)
$$P_{a \leftrightarrow \gamma} = \left(\frac{g_{a\gamma\gamma} B L \sin\theta}{2} \frac{1}{\theta} \right)^2 \quad \theta = \frac{m_a^2 L}{4\omega}$$

共鳴条件
 $\theta < 1$

これまでの探索領域

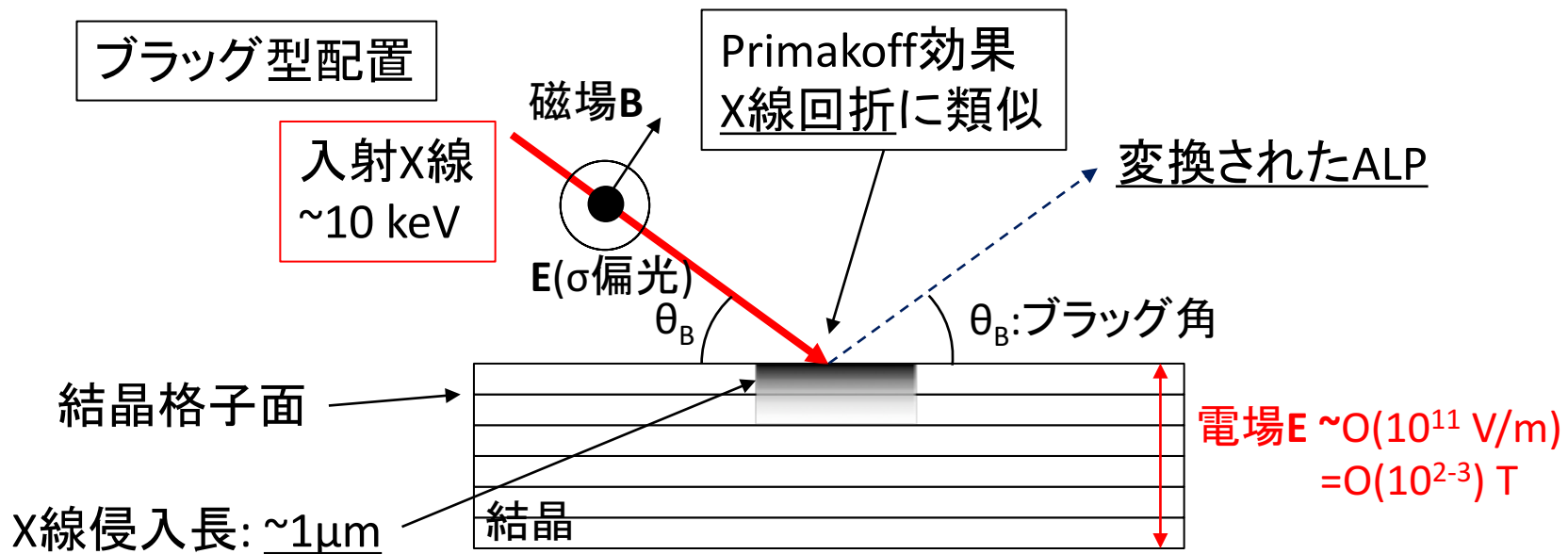


◆先行実験の棄却領域

- ・ALP質量 m_a -結合定数 $g_{ay\gamma}$ の2パラメータ空間が探索の対象
- ・光源: 可視~赤外光 (~1eV), X線 (~10 keV), ニュートリノビームライン (~40 GeV)
- m_a に対する感度: $< \underline{O(100 \text{ eV}) @ \omega=40 \text{ GeV}}$

原子内電場を用いたALP変換

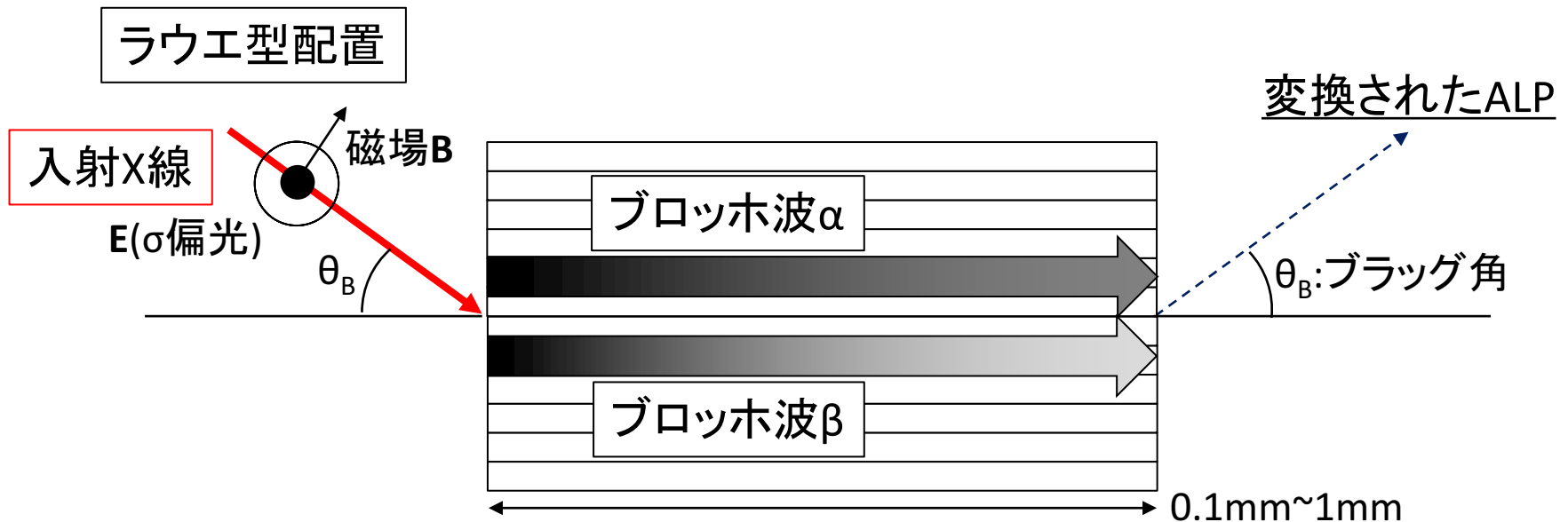
- ・原子内の強電場も光子-ALPを混合する外場として利用可能
- ・ブラッグ型配置の結晶での変換が考えられてきた(Buchmuller 1990)



- ・keV域での太陽アクシオン探索実験にて利用(COSME, SOLAX, DAMA)
- ・しかし, ブラッグ型配置ではX線侵入長が短くALP生成効率が落ちるので, LSW実験は行われてこなかった

ラウエ型X線-ALP変換

- ◆ラウエ型(透過型)のX線-ALP変換
- ・X線回折の効果により侵入長が増大



- ・ブラッグ条件下では, X線が結晶中で定在波(ブロッホ波 α/β)になる
- ・ブロッホ波の吸収長: $L_{\text{att},\alpha/\beta} = \frac{L_{\text{att}}}{1 \mp \kappa}$ ← 通常のX線吸収長
← κ : 1に近い係数
- ・変換長がブラッグ型に比べ 10^{2-3} 倍長い(特に α) → LSW実験に適している

変換効率/共鳴条件

- 動的X線回折理論を用いてラウエ型変換効率を初計算(arXiv: ????.????)

◆共鳴下の変換効率:

$$P_{\gamma \leftrightarrow a} = \left(\frac{g_{a\gamma\gamma} E_T L_{\text{eff}} \cos \theta_B}{2} \right)^2$$

$$L_{\text{eff}} \equiv 2L_{\text{att}} \left[1 - \exp \left(-\frac{L}{2L_{\text{att}}} \right) \right]$$

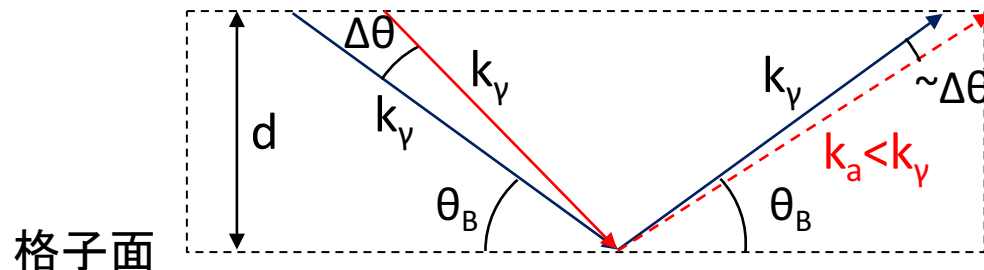
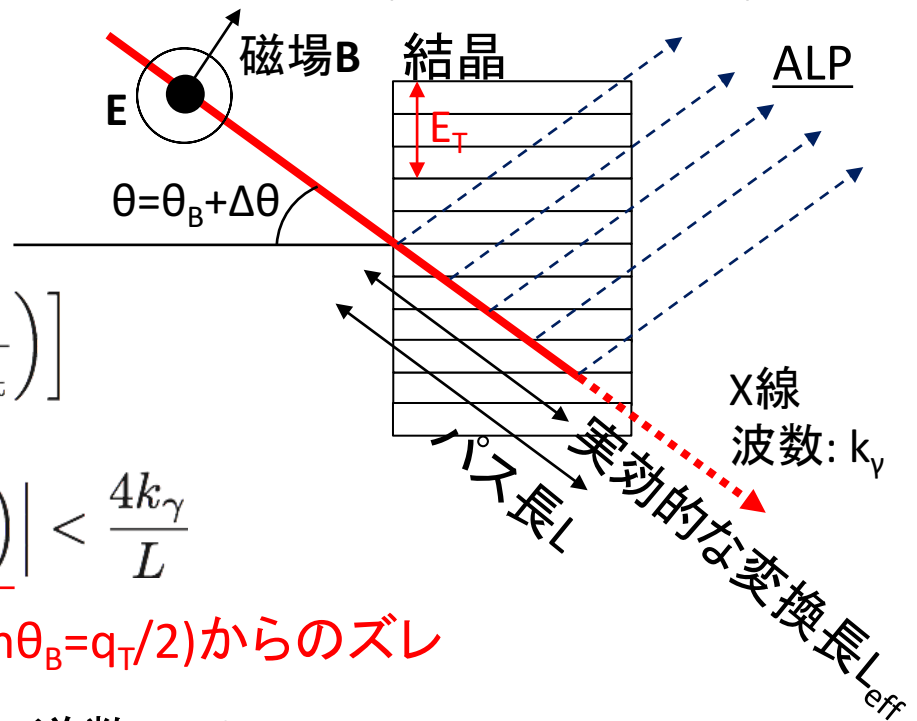
◆ALP質量の共鳴条件:

$$\left| m_a^2 - m_\gamma^2 - 2q_T \left(k_\gamma \sin \theta - \frac{q_T}{2} \right) \right| < \frac{4k_\gamma}{L}$$

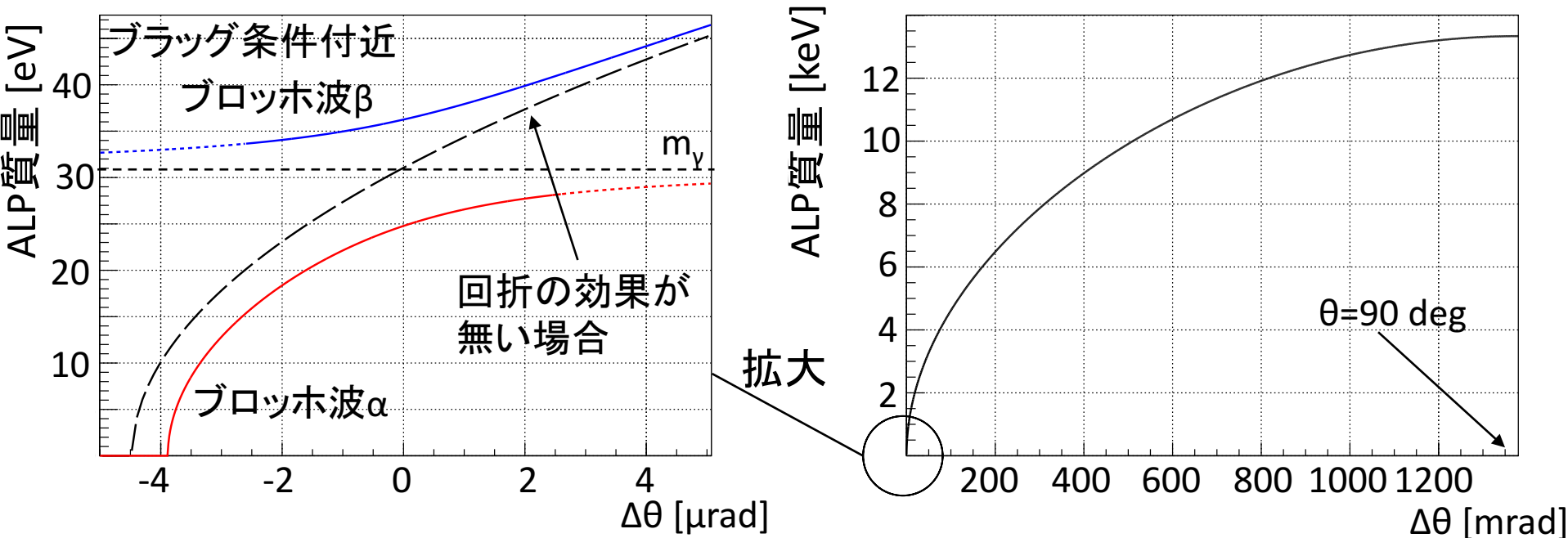
ブラッグ条件($k_\gamma \sin \theta_B = q_T/2$)からのズレ

- m_γ : プラズマ振動数, q_T : 格子定数 d の逆数($2\pi/d$)

- 入射角 $\theta > \theta_B$ でALP質量が増大
- ALPの波長が質量分長くなる為、実効的なブラッグ角が大きくなる



探索可能なALP質量



- Si(220)結晶, 17 keV X線($\theta_B=10.9 \text{ deg}$)を用いた場合の探索質量($\Delta\theta=\theta-\theta_B$ の関数)
- **~10keV**までの探索が可能, ブラッグ条件近傍ではブロッホ波の寄与が分かれる

◆ラウエ型変換を用いたLSW実験の利点

- X線光源を使って, 最大**10keV**付近までのALPをLSW実験で探索可能
この領域は従来のLSW実験では低感度
- $\Delta\theta$ を調整することで**探索質量の連続掃引**が可能

変換に使用する結晶

- ・結晶の候補: X線光学で使用されるダイヤモンド型結晶(C/Si/Ge)

◆ダイヤモンド型結晶の物性(@17 keV)

結晶	q_T [keV]	θ_B [deg]	E_T [V/m]	L_{att}	$E \times L$ (Ge: 1)
C(220)	9.85	16.8	6.8×10^{10}	7.7mm	266
Si(220)	6.46	10.9	4.4×10^{10}	650 μ m	14.5
Ge(220)	6.20	10.5	7.3×10^{10}	27 μ m	1

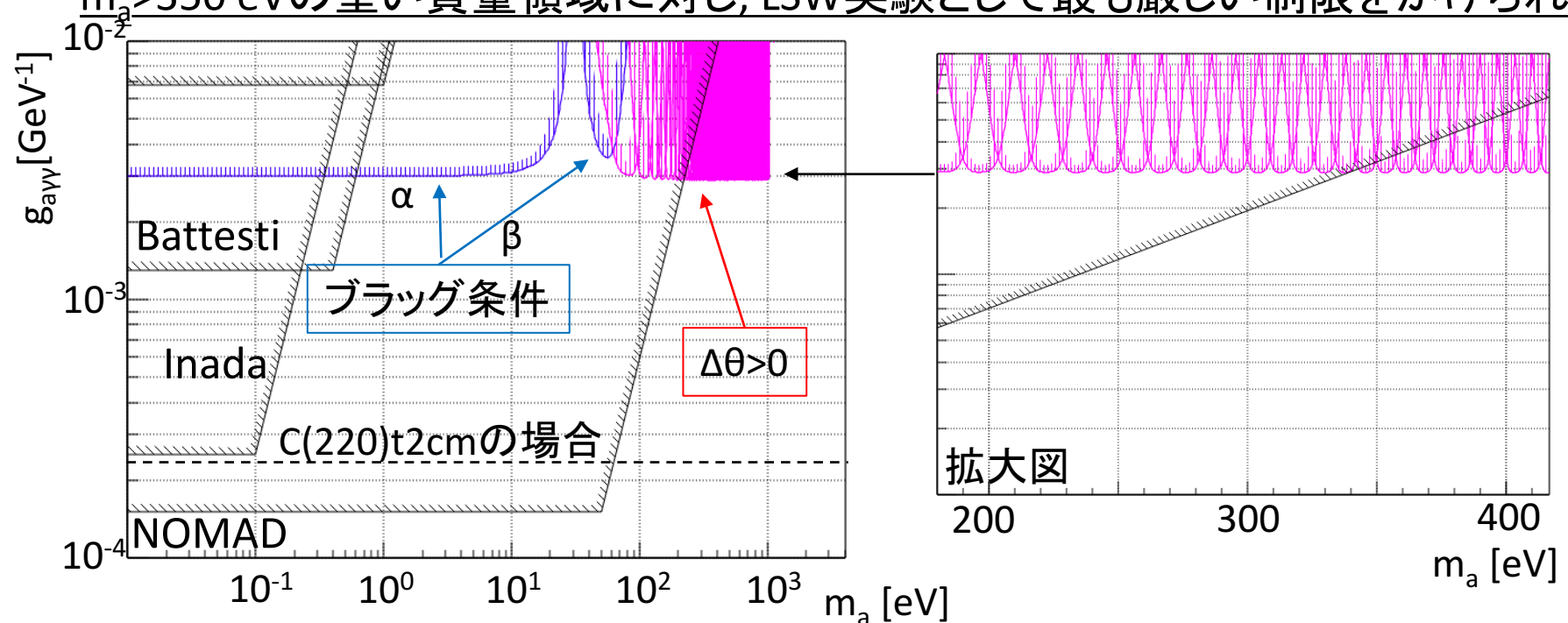
- ・ダイヤモンド型では E_T は(220)格子面で最大値を取る
- ・感度($\propto E_T \times L_{att}$)はZの小さいC/Siで高い
(先行研究では E_T の大きいGe/Wをfavor)
- ・特にC(220)は q_T , E_T , L_{att} が大きく最適の性質を持っているが、完全結晶の厚さが制限(<10mm)
- ・Si(220)は~100mm大の結晶が容易に手に入る利点がある
→概念実証実験を行う上で便利

期待される感度

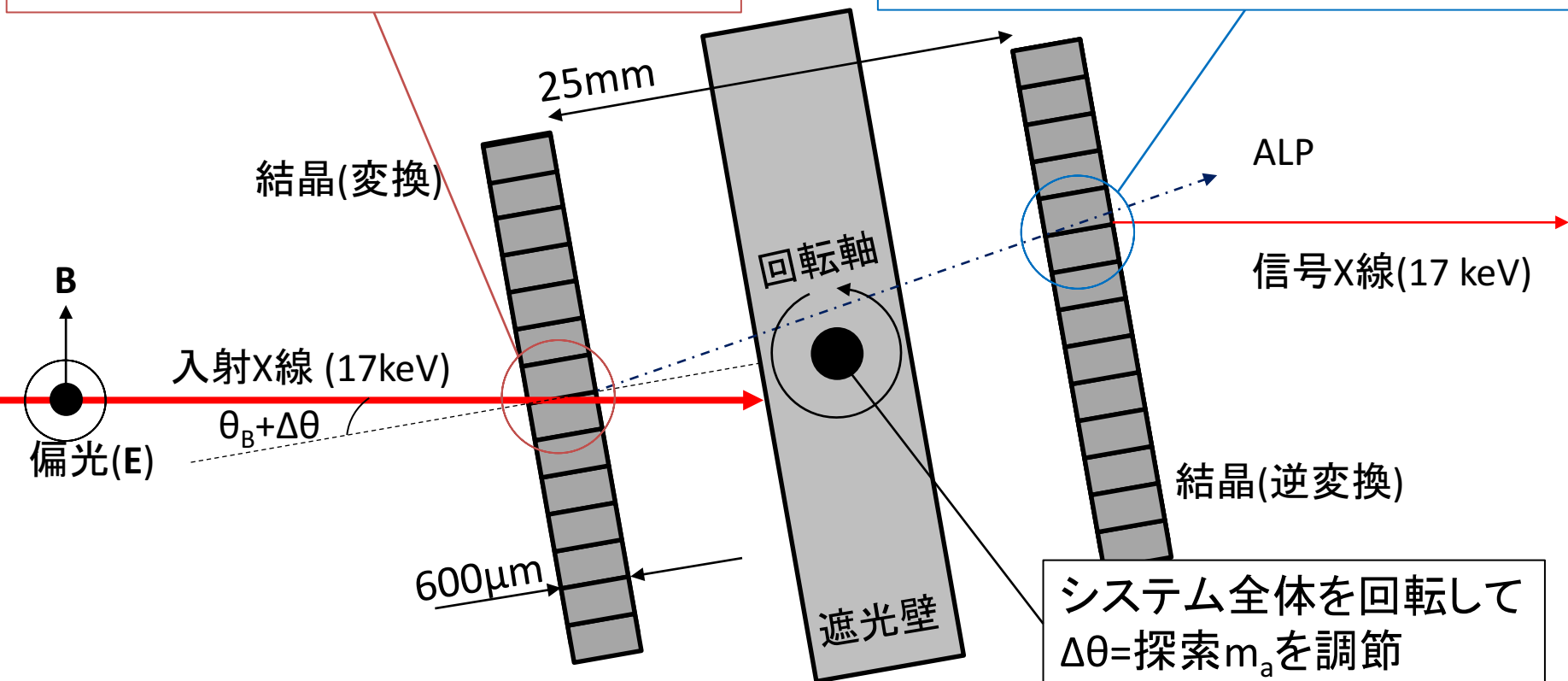
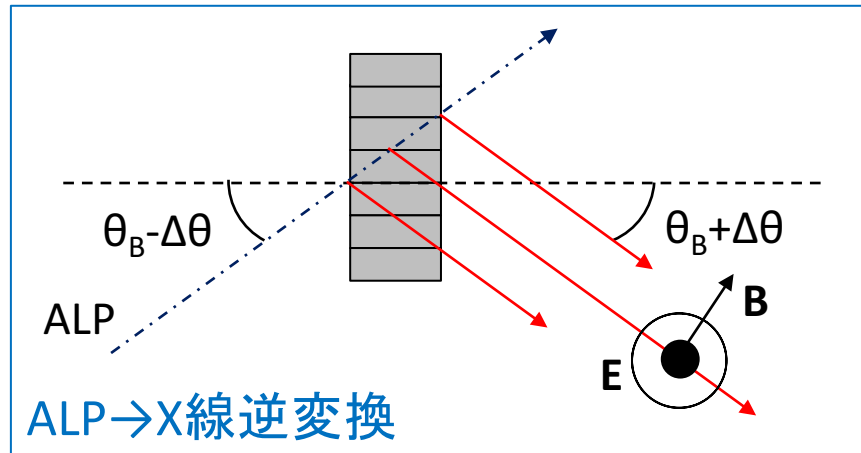
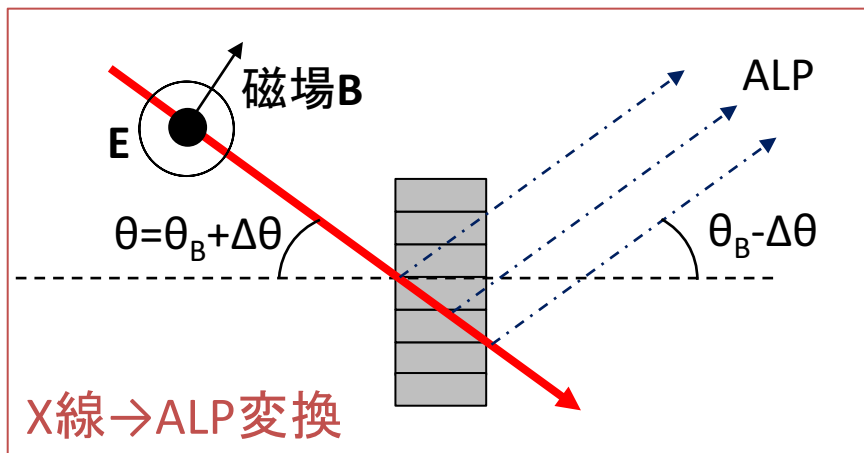
◆パラメータの設定

- t600 μ m Si(220)結晶で17keV X線(10^{13} photon/Hz, 発散角25 μ rad)を変換/逆変換
- $\Delta\theta$ の掃引範囲: 0(ブラッグ角)~+4.62 mrad($m_a = 1$ keV)
- 掃引間隔: 25 μ rad/step (186 step)
- DAQ時間: 1500sec/step $\times$ 186step=78 hour

- 0 BGを仮定すると, $g_{a\gamma\gamma}$ に対する感度: $3 \times 10^{-3} \text{ GeV}^{-1} @ m_a < 1 \text{ keV}$ (90% C. L.)
- $m_a > 350$ eVの重い質量領域に対し, LSW実験として最も厳しい制限をかけられる



結晶を用いたLSW実験

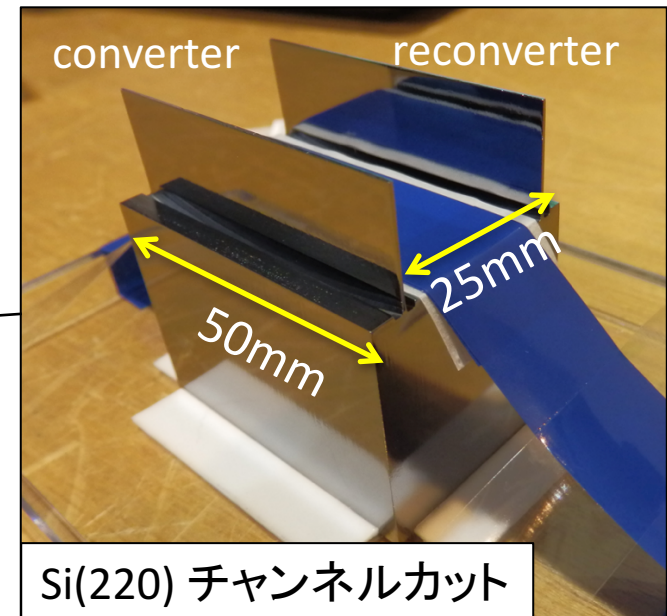
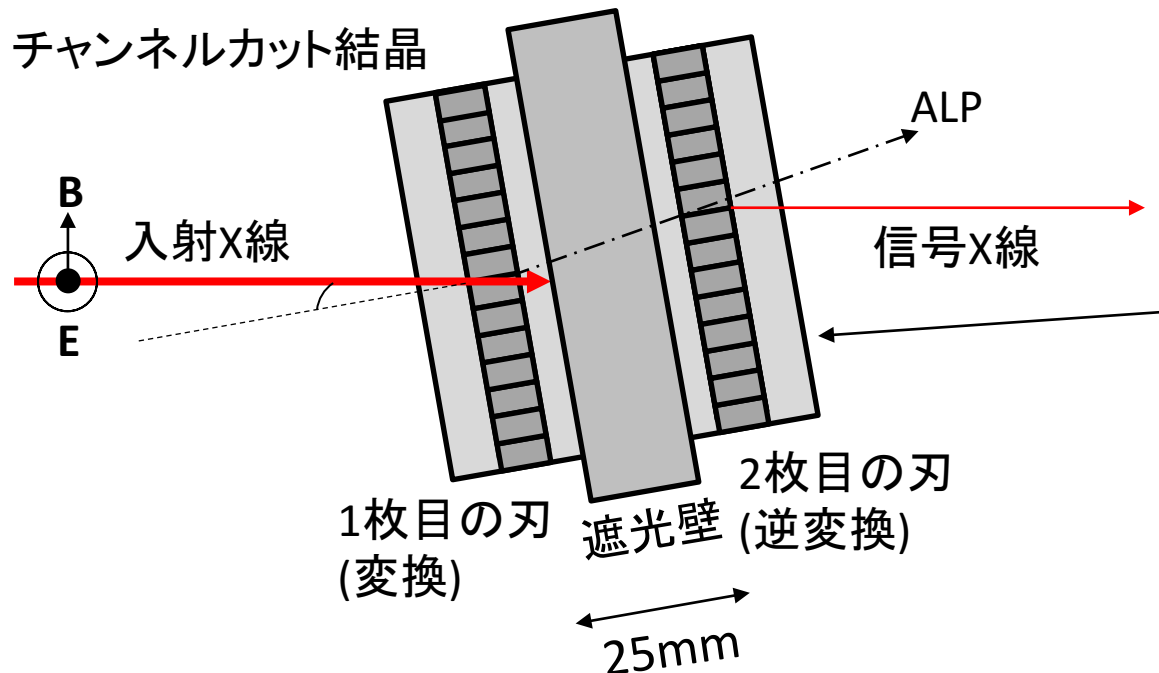


平行度の保証

- ・変換/逆変換に用いる結晶は、変換する $m_a = \Delta\theta$ が同じ必要
- ・Si(220) t600 μm の場合、結晶格子面同士の必要平行度<200 nrad
→チャンネルカット結晶を使用することで保証

◆Si(220) ラウエ型チャンネルカット結晶

- ・単体のシリコンインゴットから削りだした薄刃2枚(t600 μm)を持つ
- ・元々単一の結晶なので、格子面は厳密に平行
→1枚目で変換されたALPは、2枚目での変換条件を必ず満たす



X線光源: SPring-8 BL19LXU

- LSW実験には高強度X線光源が必要→SPring-8 BL19LXUビームライン

◆SPring-8 BL19LXU

- SPring-8: 世界最大の第三世代放射光施設
 - BL19LXU: SPring-8で**最高強度**のビームライン
 - 時間強度: $\sim 2 \times 10^{13}$ photon/Hz @ 17keV
 - 線幅: 2.1 eV (全幅), 角度発散: 3.8 μ rad (1σ)
-
- 2017/10/01~10/05 (96h)にビームタイムを取得: 結果に請うご期待!!

理化学研究所 播磨研究所



SPring-8

まとめ

- ALP: アクシオンに類似した標準理論を超えた物理の未知粒子
- 外部磁場中でのPrimakoff効果を利用した,
地上探索実験(LSW)が行われてきた
- 結晶中に存在する強電場を利用することで, 従来のLSW実験より重い $\sim 10\text{keV}$ までのALPを探索することが可能
- 期待感度: $g_{a\gamma\gamma} > 3 \times 10^{-3} \text{ GeV}^{-1} @ m_a < 1\text{keV} (90\% \text{ C. L.})$
 $m_a > 350\text{eV}$ の領域で, 地上探索実験として最も厳しい制限
- チャンネルカット結晶を用いたLSW実験により
 m_a の連続掃引を行うことが可能
- SPring-8 BL19LXUビームラインにて, 概念実証実験を行う
2017/10/01-05に実際にSPring-8で測定！