

実験室でのアクシオン・ パラフォトン探索

東京大学 ICEPP 難波俊雄



3つのALP探索実験のご紹介

今日の話に関係する人たち



東大理、
ICEPP

浅井祥仁、山崎高幸、稲田聡明、
山道智博、樊星、上岡修星



東大理、
東大工 (APSA)

吉岡孝高、大間知潤子、五神真
レーザーの専門家



理研、JASRI
(SPring-8、
SACLA)

玉作賢治、田中義人(兵庫県立大)、
澤田桂、犬伏雄一、矢橋牧名、
石川哲也 **X線の専門家**



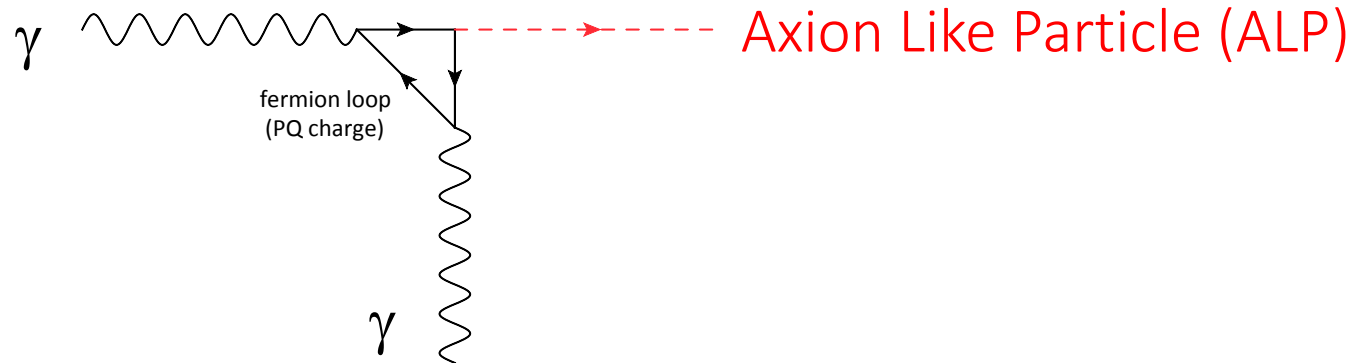
東大物性研、
東北大金研

松尾晶、金道浩一、野尻浩之
磁石の専門家

われわれの実験の位置づけ

- 未発見素粒子探し
- できるだけ仮定を置かないで不定性の無い探索をしたい (例えば、暗黒物質の全てが未発見素粒子でできているとか...)
- 実験室において、自分たちで作って探す

アクシオン(的なもの)

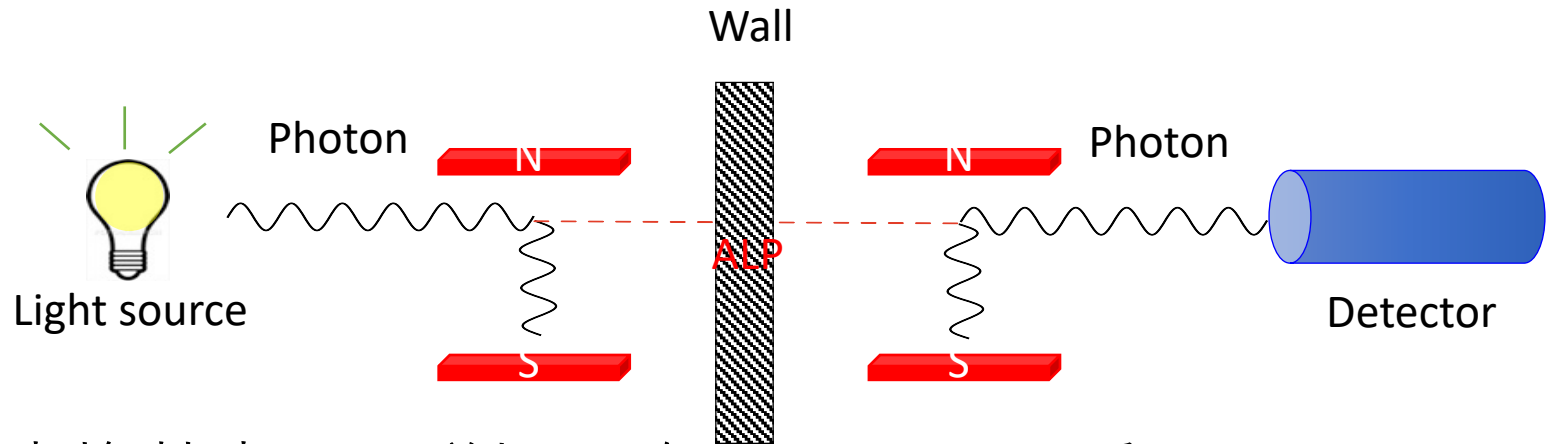


- もともとは、「強いCP問題」解決のために導入
 - θ 真空の作るCPの破れがPQ 対称性の自発的破れにより自動的にキャンセル→ New NG boson, axion
- より一般的に, Axion Like Particles (ALP)は弦理論やSUSY/SUGRAから出てくる (QCD axionと異なり、質量と結合定数の関係が不定)
- ALP は二つの光子と結合 (プリマコフ過程)
$$\mathcal{L}_{a\gamma\gamma} = -\frac{g_{agg}}{4} F_{\mu\nu} \tilde{F}^{\mu\nu} a = g_{a\gamma\gamma} \vec{E} \cdot \vec{B} a$$
(電磁場のもとでALPは光子に変換)
- パラメータ領域によっては、CDMの良い候補

探し方 I:

Light Shining through a Wall (LSW)

- 強力光源からの光を2度変換して壁越しに見る



- 変換効率は電磁場の強さと長さの2乗

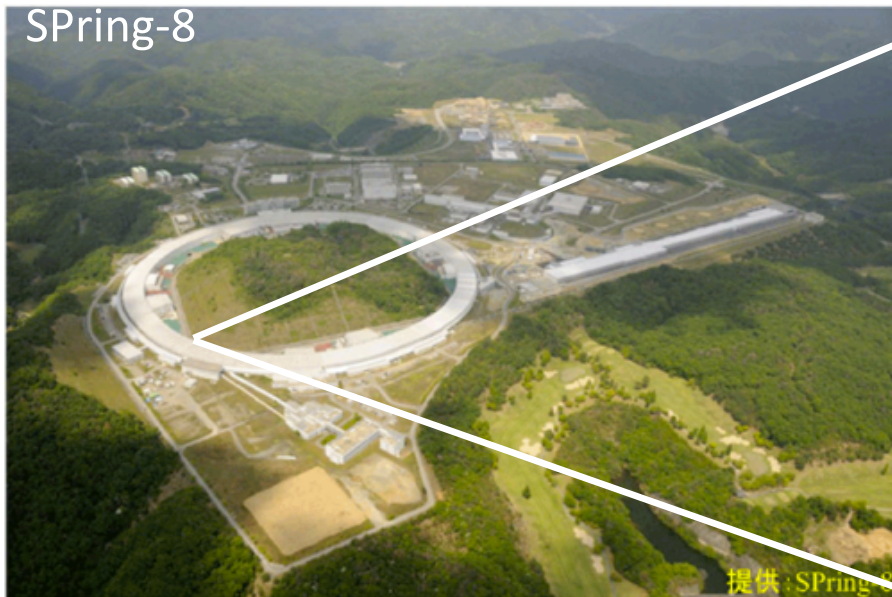
$$P = \left(\frac{g_{\alpha\gamma} BL \sin \theta}{2} \right)^2, \theta = \frac{m_\alpha^2 l}{4\omega}$$

- 今、世界で一番でかいやつ: ALPS 実験 (DESY)
 - HERA dipole (5T、8.8m)、~1W レーザー × 共振器~1000倍
 - 将来的にALPSIIへ

光源と変換用の場の選択が重要

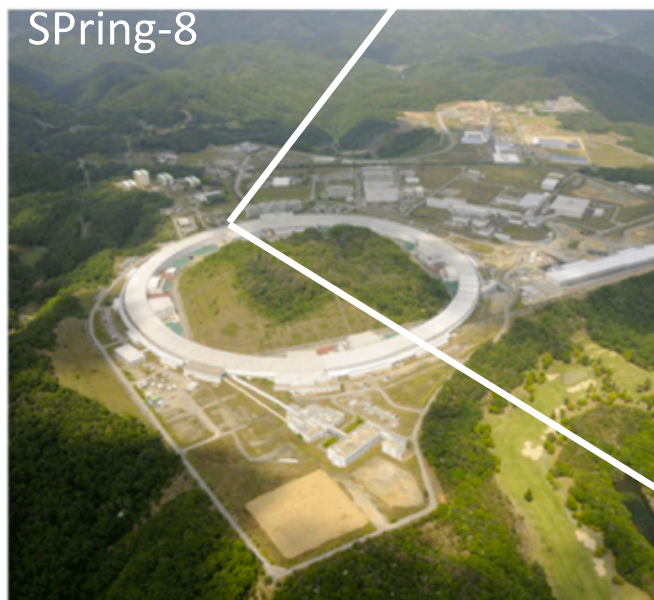
われわれの使う光源

- エネルギーの高いX線を利用=比較的重いALPが探せる
- 放射光施設 SPring-8 BL19LXU ビームライン
 - 27m長のアンジュレーター
 - ~10keV 付近のX線で世界最強強度 $\sim 10^{14}$ photons/s



われわれの使う光源

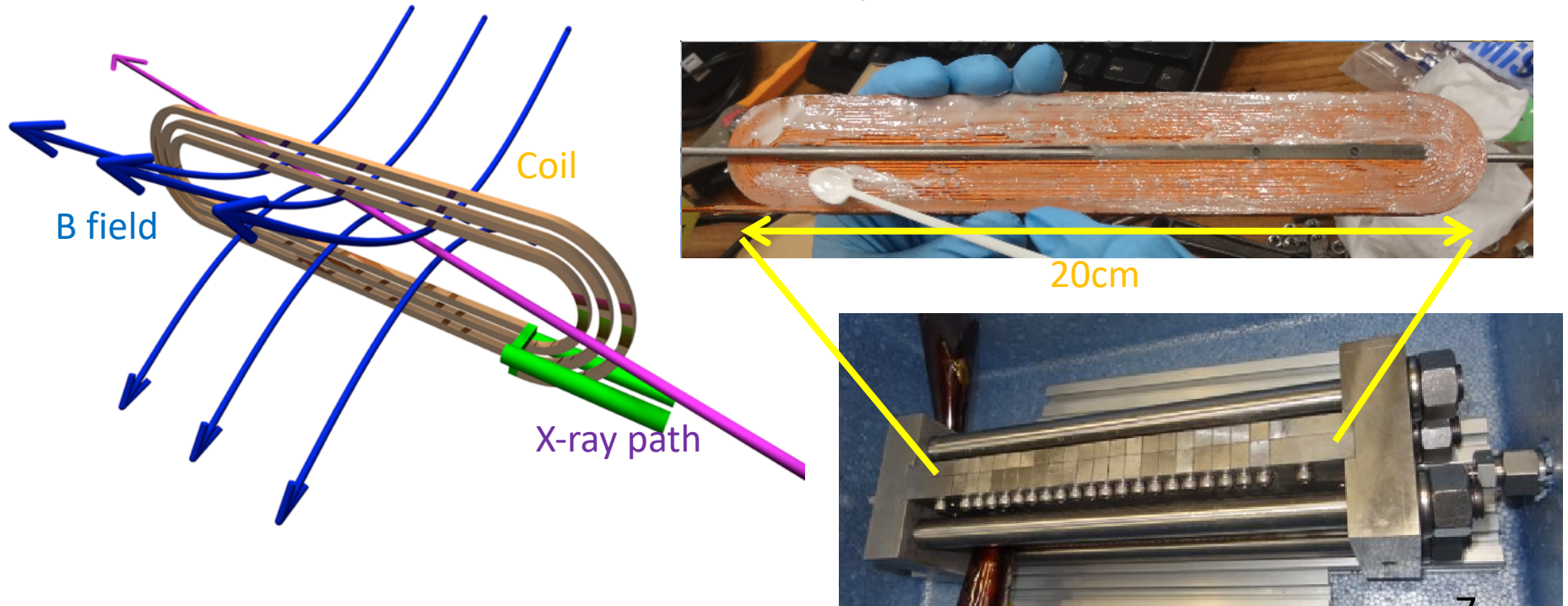
- エネルギーの高いX線を利用=比較的重いALPが探せる
- 放射光施設 SPring-8
 - 27m長のアンシ
 - ~10keV 付近のX



提供: SPring-8

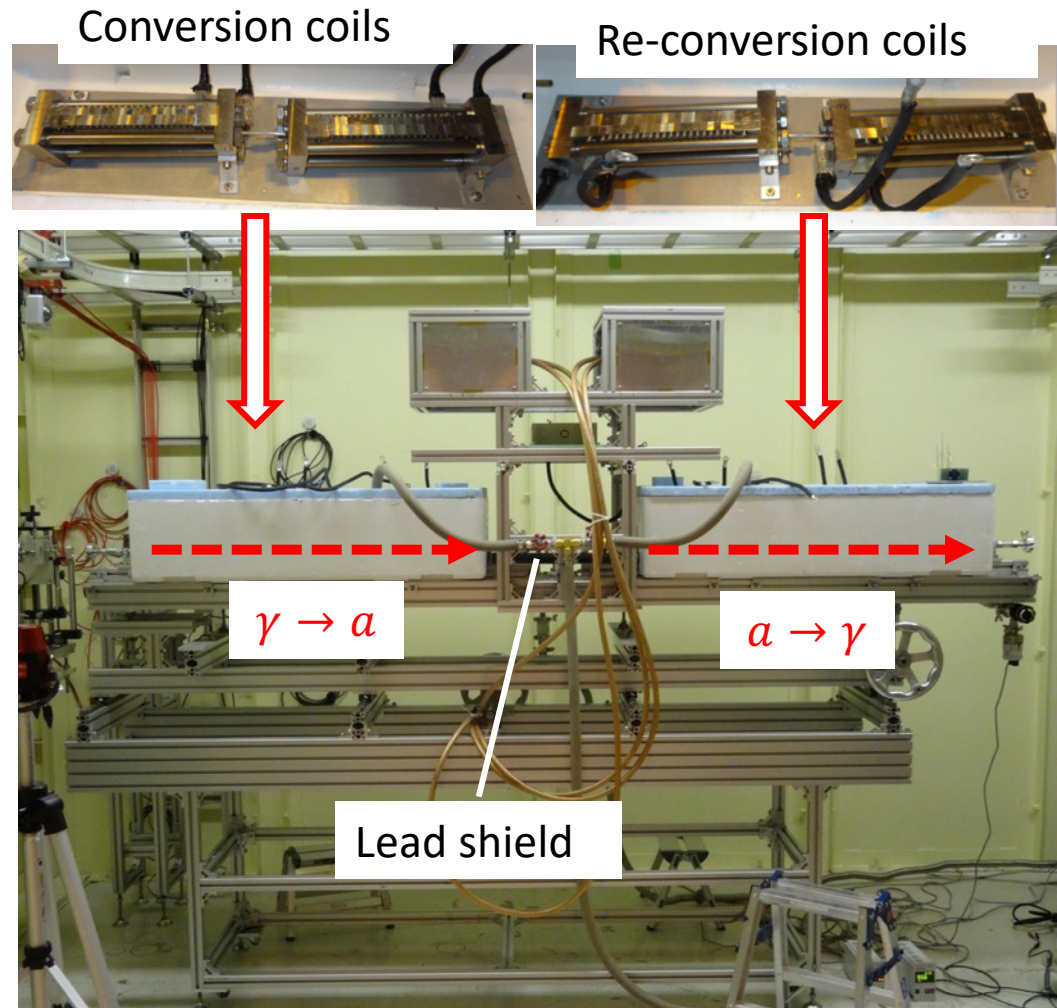
光子 \leftrightarrow ALP変換に使う電磁場 I

- 自作パルス磁石を並べる
 - 磁場長20cm、 $\sim 10\text{m}\Omega$ 、 $40\mu\text{H}$ の銅線コイルを液体窒素冷却
 - 3mFのコンデンサに最大4.5kVまで充電し、パルス励磁時は $\sim 1\text{ms}$ にわたって最大14Tの磁場

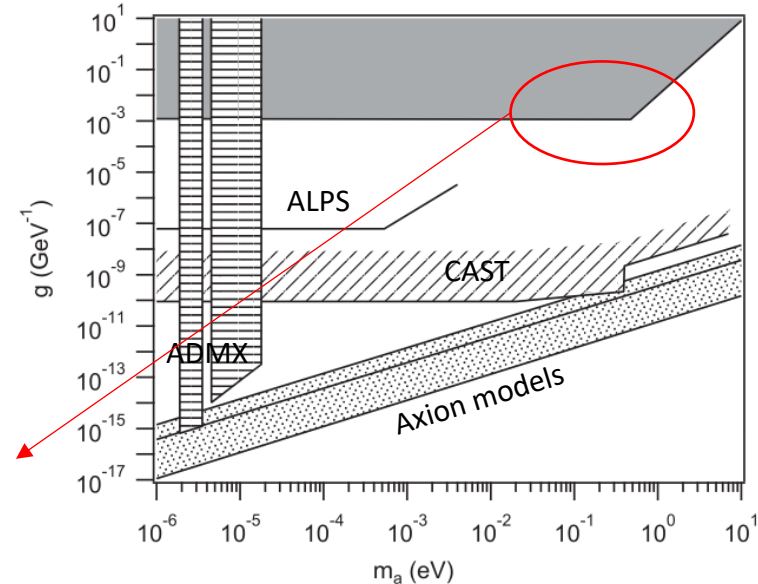
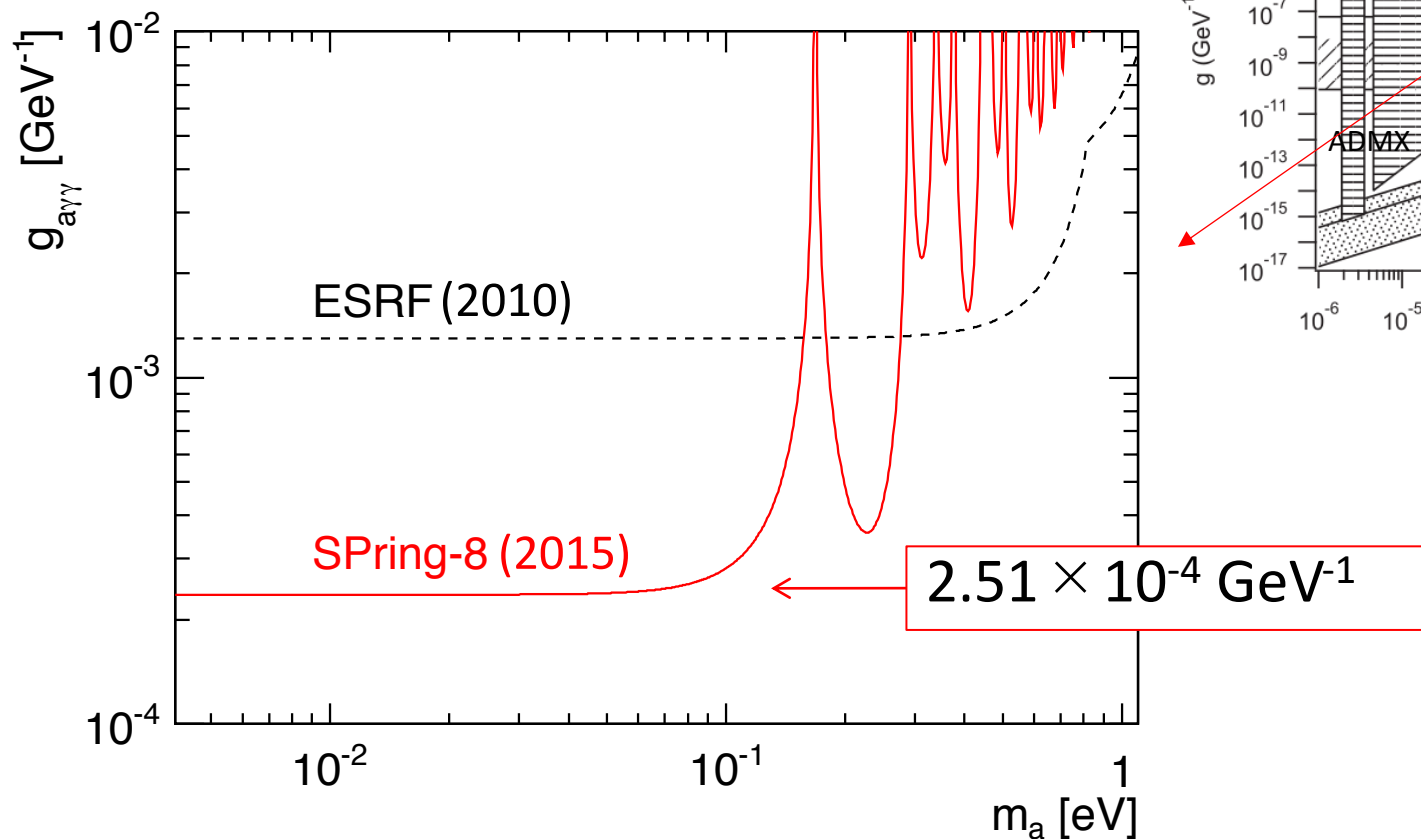


パルス磁石でのALP探し@BL19LXU

- 2015年11月
- 4つのコイルを直列に並べて使用
 - 2個: X-ray \rightarrow ALP変換
 - 2個: ALP \rightarrow X-ray再変換
- 9.5 keV のX線を使用
- Net 2 days operation
(total 28,000 excitations)
- 磁場8.5T/-6T



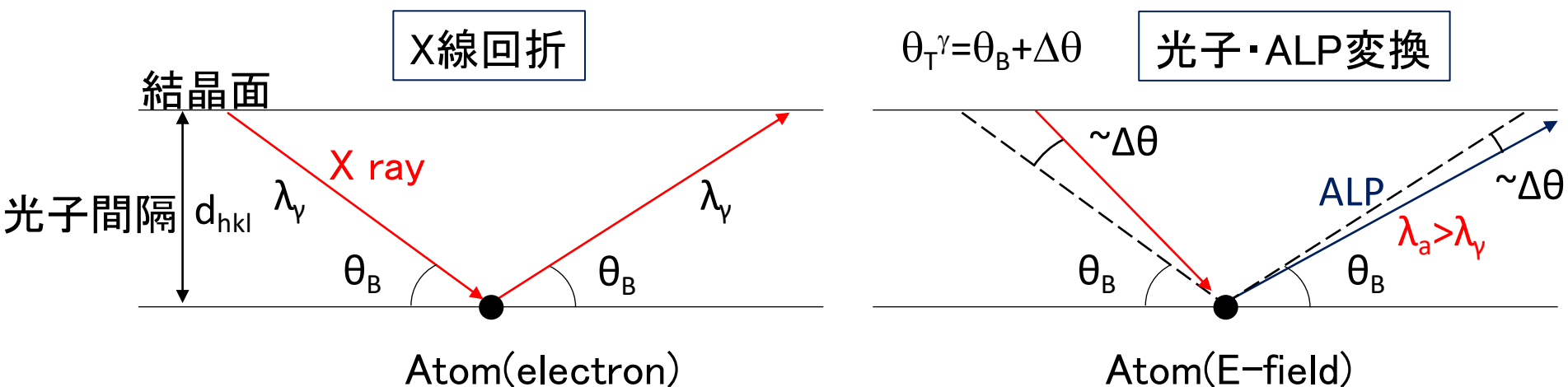
探索結果



- ALPシグナルは見つからなかったが、
 $g_{a\gamma\gamma} < 2.51 \times 10^{-4} \text{ GeV}^{-1}$ (95%C.L.) の制限
(for $m_a < \sim 0.1 \text{ eV}$)
- PRL 118(2017)071803

光子 \leftrightarrow ALP変換に使う電磁場 II

- 結晶中の周期電場 ($10^{10}\text{V/m}\sim 10^{11}\text{V/m}$) を利用 ($10^2\sim 10^3$ Tに相当).
- 入射角をうまく調整することで、重いALPを探索することが可能

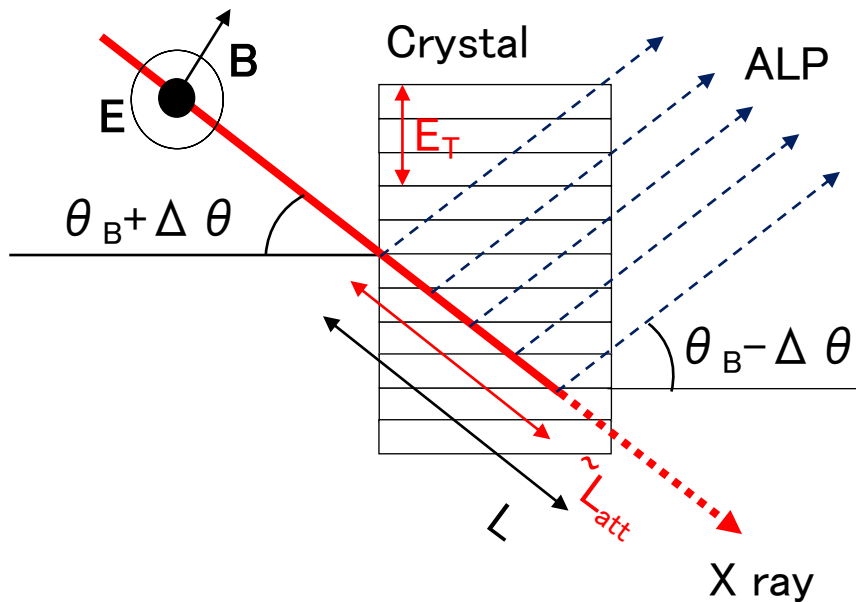


$$\left| m_a^2 - m_\gamma^2 - 2q_T \left(k_\gamma \sin\theta_T^\gamma - \frac{q_T}{2} \right) \right| \lesssim \frac{4k_\gamma}{L} \quad q_T = 2\pi/d_{hkl}: \text{逆格子間隔}$$

入射角依存項

ラウエ回折を利用した手法について 計算

- T. Yamaji et al., Phys. Rev. D 96(2017)115001



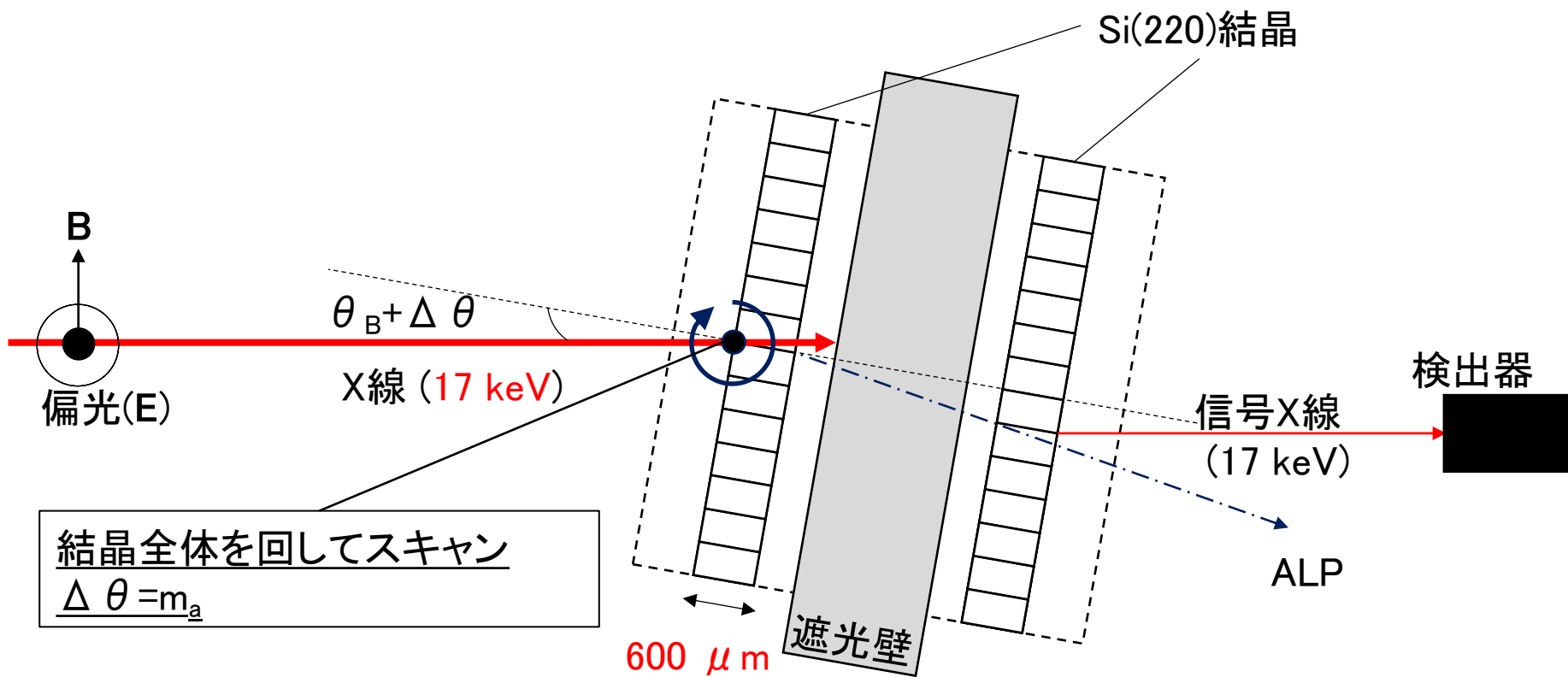
$$P_{a \rightarrow \gamma} = \left(\frac{1}{2} g_{a\gamma\gamma} E_T L_{\text{eff}} \cos \theta_B \right)^2,$$
$$L_{\text{eff}} = 2L_{\text{att}} \left(1 - \exp \left(-\frac{L}{2L_{\text{att}}} \right) \right)$$

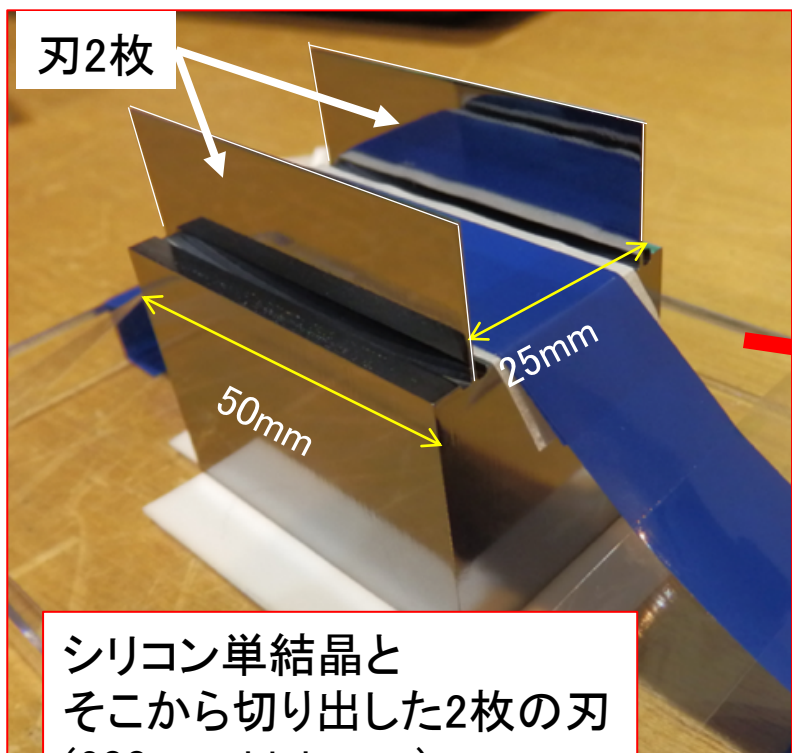
シリコン結晶 600 μm 厚, 17keV X線だと

- $E_T = 4.1 \times 10^{10} \text{V/m}$
- $L_{\text{eff}} = 488 \mu\text{m}$
- $m_a \sim 10 \text{keV}$ 程度までは変換可能

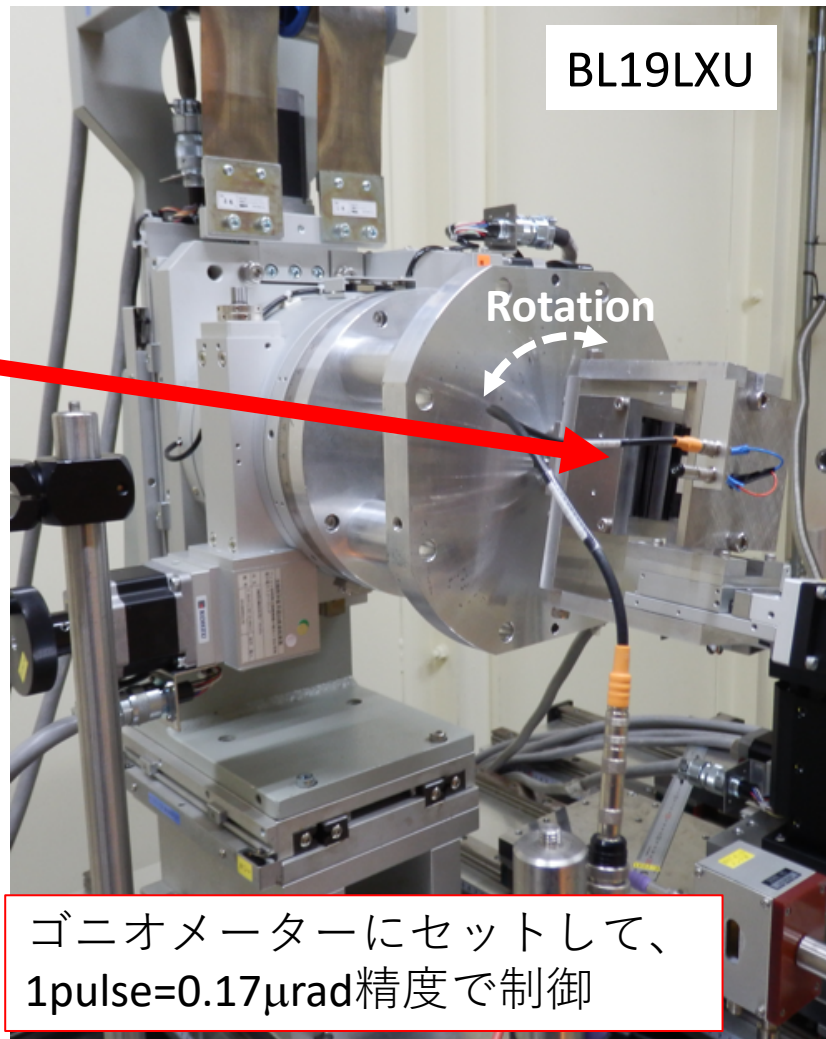
具体的には、

- シリコン単結晶(2,2,0)から切り出した2枚の刃を利用
- $\Delta\theta$ で全体を回して、共鳴するALPをスキャン



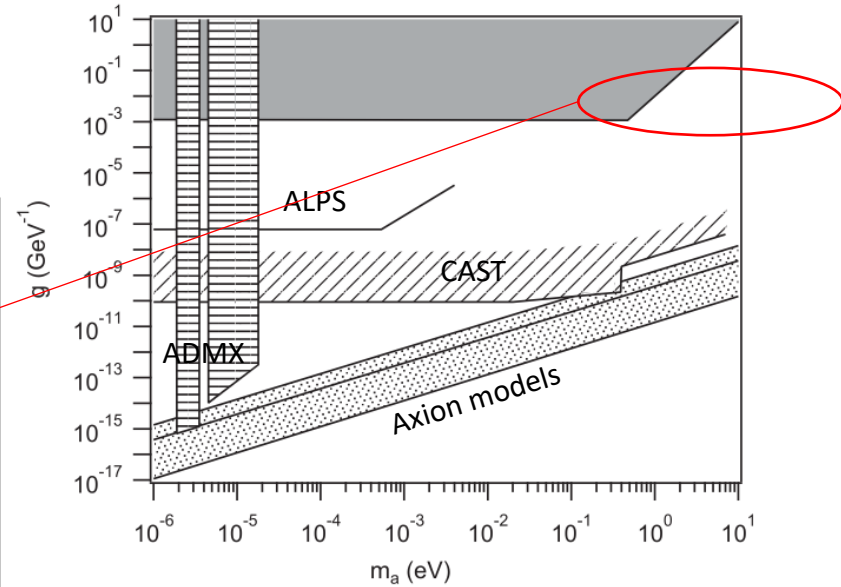
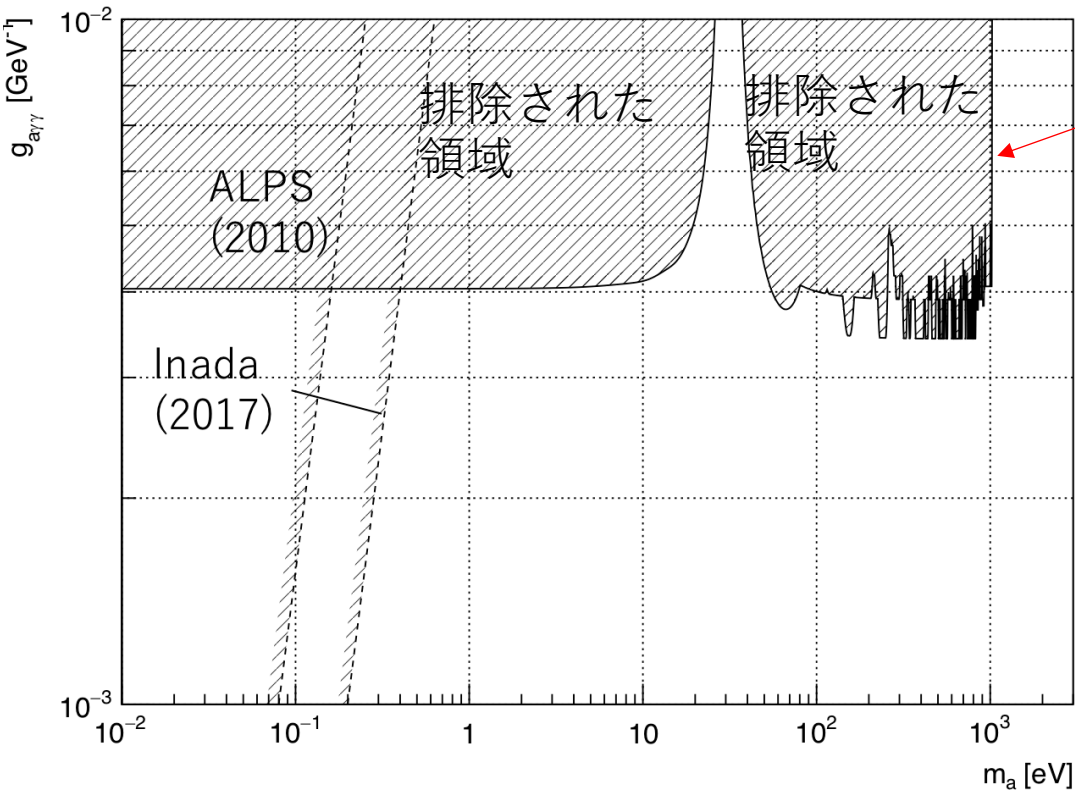


シリコン単結晶と
そこから切り出した2枚の刃
(600 μ m thickness)



- 2017年10月に2日間測定
- $\Delta\theta=4.6\text{mrad}$ までスキャン ($0 < m_a < 1\text{keV}$ の範囲)
- 有意な共鳴シグナルは見られなかった

得られた制限



- かなり重いALPまで制限
- Phys. Lett. B 782(2018)523.

$$g_{a\gamma\gamma} < 4.2 \times 10^{-3} \text{ GeV}^{-1} \text{ (for } m_a < 10 \text{ eV),}$$

$$g_{a\gamma\gamma} < 5.0 \times 10^{-3} \text{ GeV}^{-1} \text{ (for } 46 \text{ eV} < m_a < 1020 \text{ eV).}$$

探し方II:

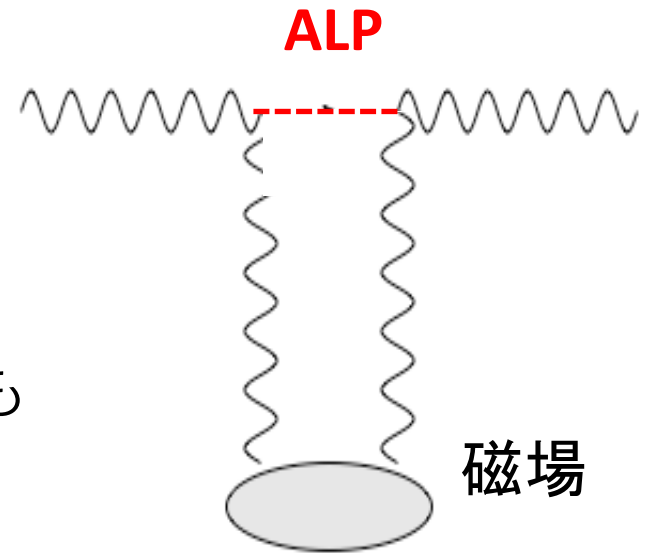
強場下での光の偏光変化を見る

- 光に強磁場を印加すると、仮想ALPの媒介により偏光が変化

$$\Delta n = \frac{g^2 B^2}{m^2} \left(1 - \frac{\sin 2x}{2x} \right); \quad x = \frac{Lm^2}{4\omega}$$

- シグナル量 $\propto g^2 B^2 L$ なので、さっきのLSW ($\propto g^4 B^2 L^2$) よりも感度を上げやすい

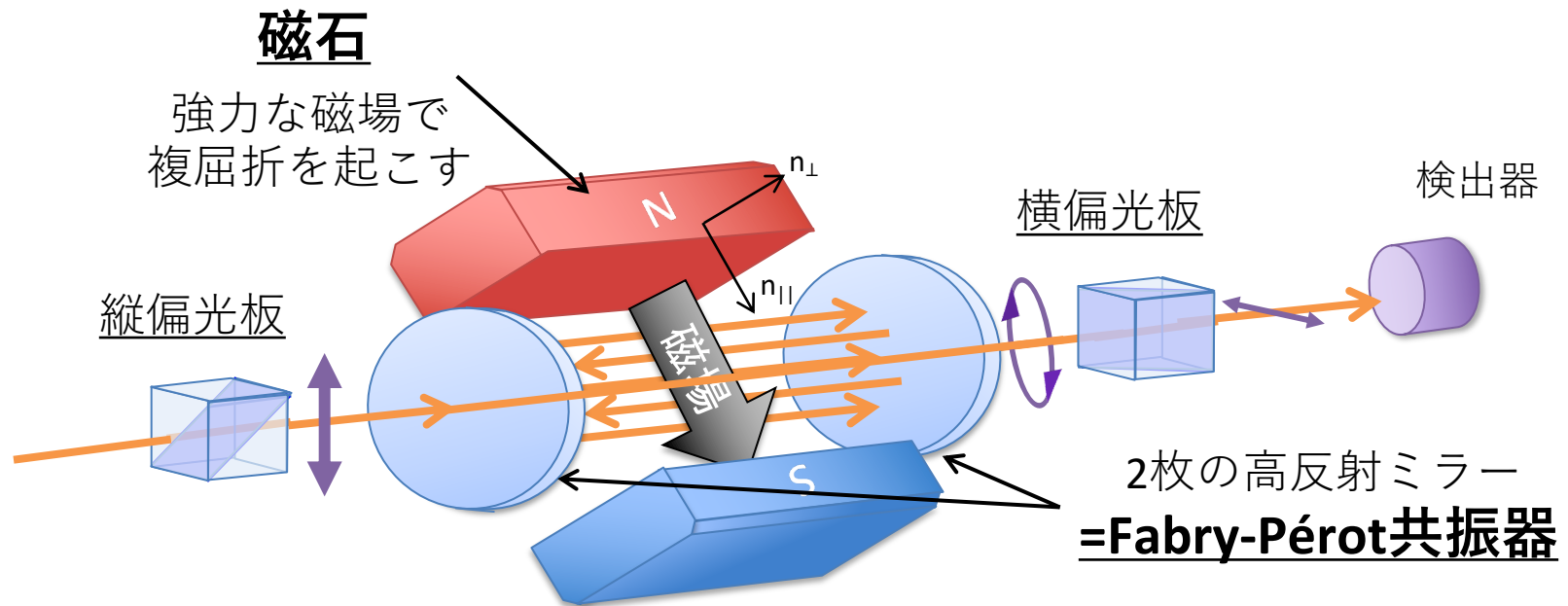
- ただし、微小な偏光変化を低ノイズで見る必要がある
- 世界的には、イタリアのPVLASグループが先行



OVAL実験

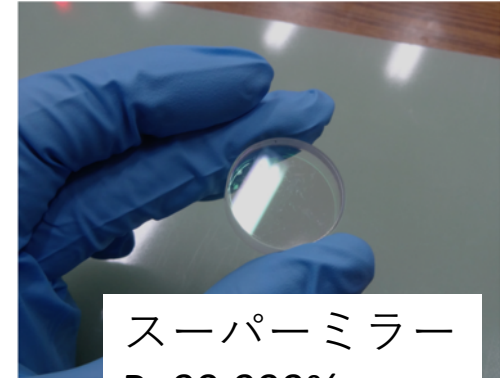
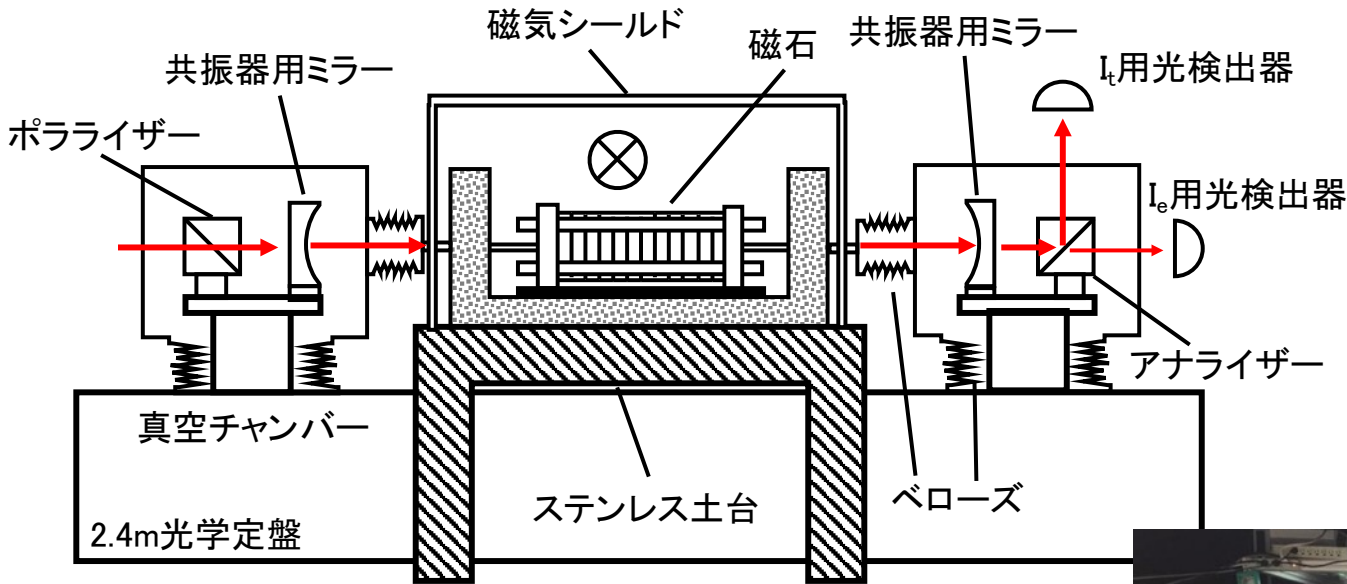
(Observing VAcuum with Laser)

- 磁石と高フィネス共振器の組み合わせ



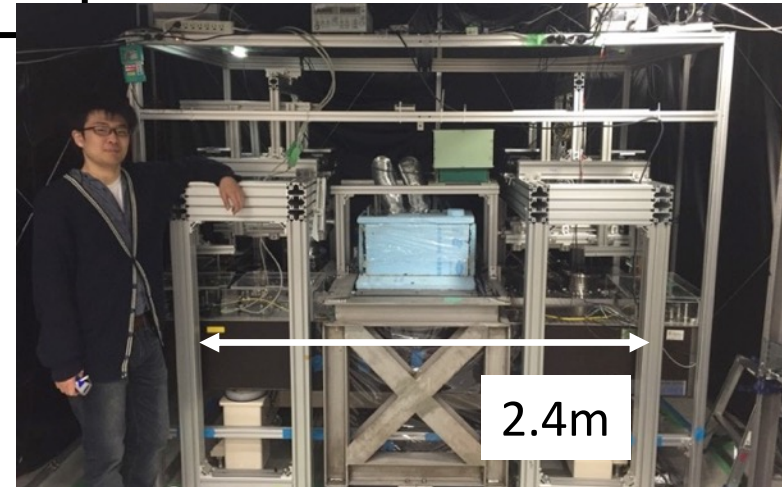
特徴: 9Tのパルス磁石(~ms)を0.05Hzの高繰り返しで励磁し、
磁場に依存した成分を取り出す

東大・本郷キャンパスにて



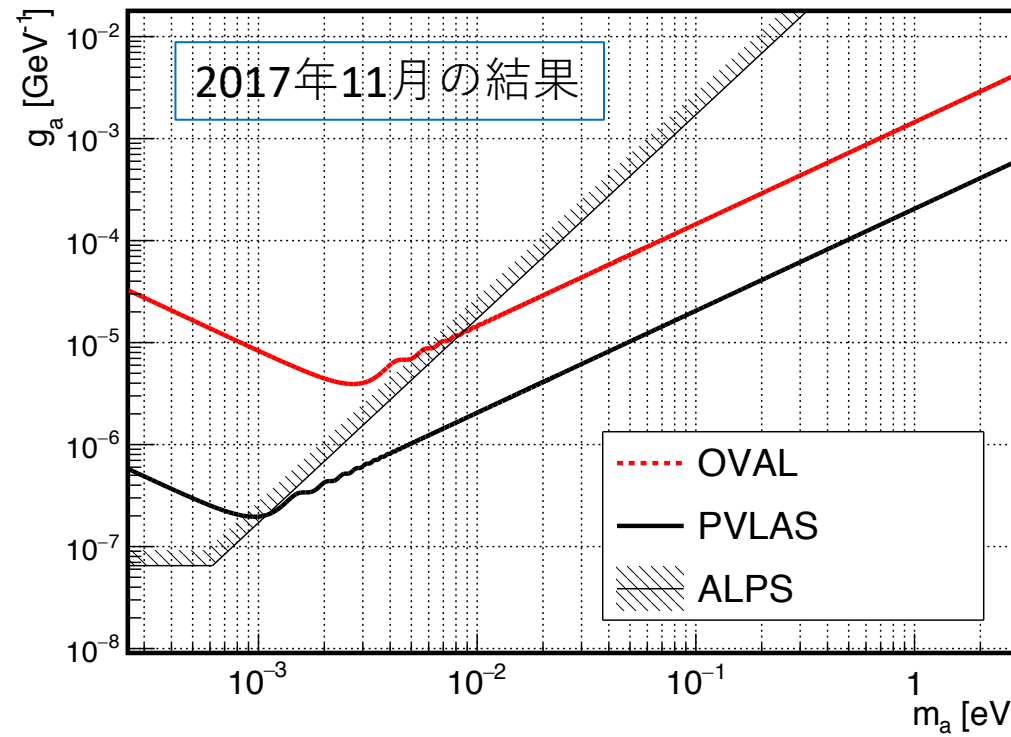
スーパーミラー
 $R > 99.999\%$

- Nd:YAG レーザー (1064nm)
- 2.4mの光学定盤で実験1.4m, フィネス30万以上の共振器
- 共振のFWHM 3pm: レーザー周波数をfeedback制御



現在、感度向上中

- 2017年の測定: PVLASより1桁(シグナルにして2桁)悪い感度
- その後、主にレーザーのノイズ削減(ほぼ1桁)
- 今後、磁石強化により、~1年でPVLASを超える予定



まとめとか

- 実験室でALPを作って、それを検出する実験
 - 放射光で生成→磁石で変換
 - 放射光で生成→結晶の電場で変換
 - レーザーに磁場をかけて仮想ALPを生成
- いずれもまだALPは見つけられていない
- 光源と変換用の電磁場の組み合わせが重要
 - 今までの実験で探せていないパラメータ領域を探る
- 現在検討中
 - 光源: ミリ波ジャイロトロンを利用した実験
 - 電磁場: 集光したPWレーザーの強場