

高輝度X線を用いた素粒子実験

稲田聡明

東京大学理学系研究科

奈良先端未来開拓コロキウム2014「Meta-X version 3.1」2014/10/22

話の内容

- 真空物理のイントロダクション
- アクシオン探索実験
 - アクシオンと, その探し方
 - 実験の準備状況
 - 前段実験: パラフォトン探索
- 光子光子散乱実験
 - Phase 1
 - Phase 2, phase 3
- まとめ

ヒッグス粒子の発見 = 真空物理の大発見

素粒子として初めて見つかったスカラー粒子(スピン0)
→「物質」でも「力」でもない,「真空」の性質

素粒子の標準理論

物質を構成する
クォーク, レプトン(スピン1/2)

力を伝える
ゲージ粒子(スピン1)

これらに質量を与える
ヒッグス粒子(スピン0)
→ 場として真空に満ちている

真空は「空っぽな空間」ではなく, いろいろな「何か」が詰まっている

標準理論における真空の三構造

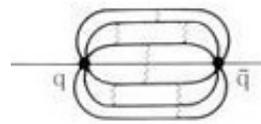
素粒子の標準理論で記述される「**もっともシンプルな真空**」ですら
大きさの異なる三つの構造がある

1. ヒッグス場: ニュートリノと同じ弱い電荷の場
→ 今回の発見
2. QCD(量子色力学) 真空: クォーク凝縮
→ 原子核実験で確認(2004年)
3. QED(量子電磁力学) 真空: 仮想電子対
→ ラムシフト, カシミール効果(1997年)で確認

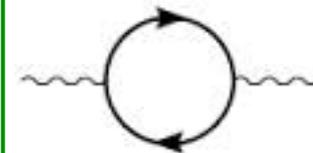
イメージ
と
大きさ

ϕ

10^{-3} fm



1 fm



10^2 fm

果たして, これで全てなのか?

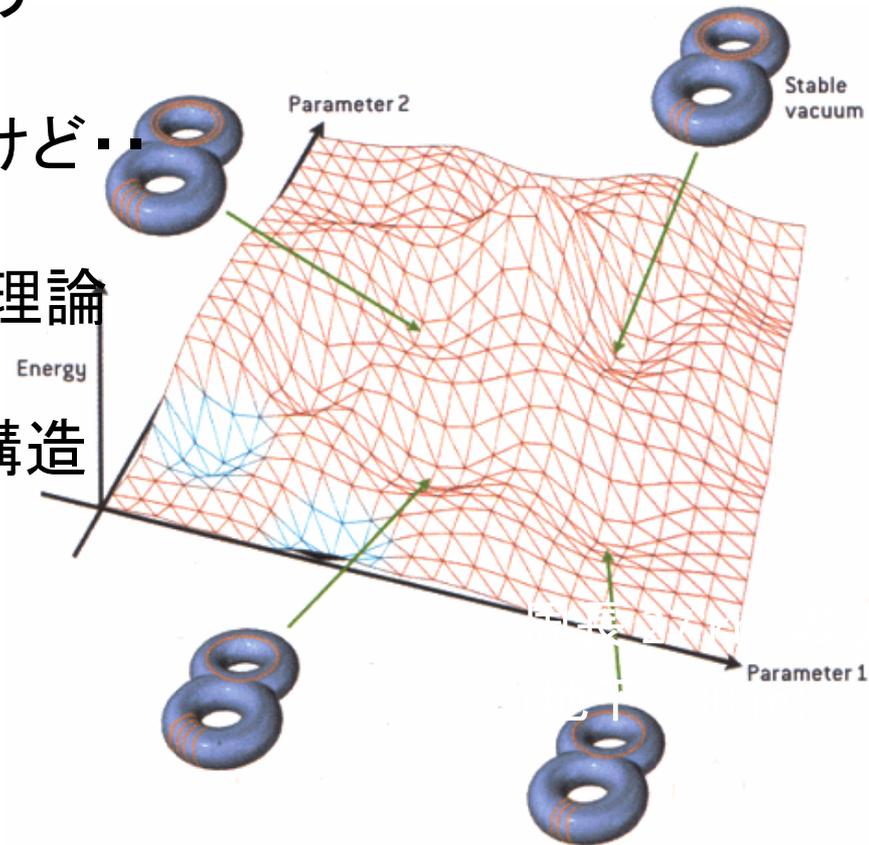
もっと複雑かもしれません

例えばひも理論では $O(10^{10} \sim 100)$ 個の「偽真空」を予言

- こんなに複雑だと困っちゃいますけど...

暗黒物質を始めとして、現実に標準理論で説明できない現象が数多く存在
→ 真空はもっとバラエティに富んだ構造になっている可能性は大きい

- 暗黒エネルギー(スカラー場?),
- PQ 対称性(Global $U(1)$),
- Additional $U(1)$ ゲージ,
- GUT....



"The Landscape" (Picture from *Scientific American*)

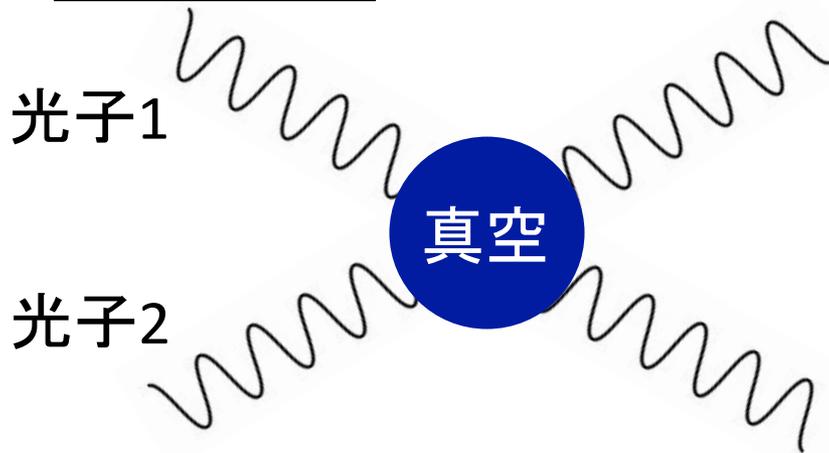
これらを実験的に探るには？

光を使って真空を探る

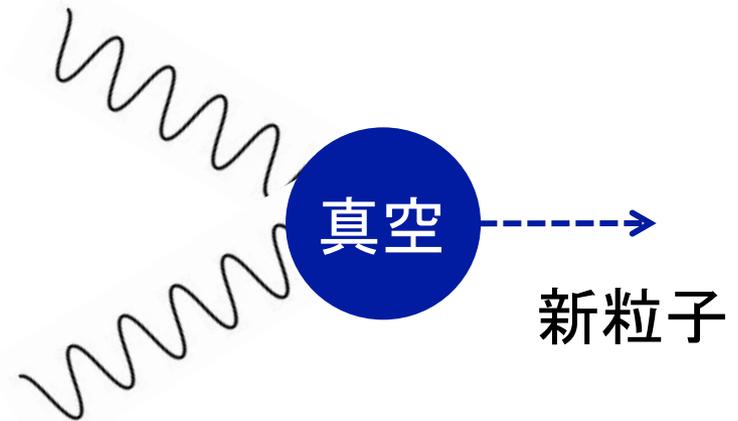
なぜ「光」？

→ 光子二つで未知の真空場(スピン0)と結合

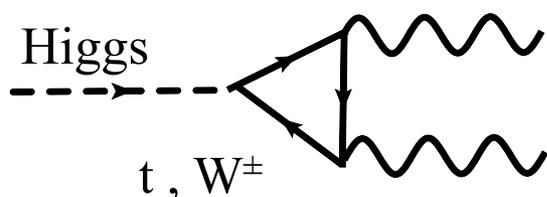
光子の散乱



新粒子の生成



実際にヒッグス粒子の場合でも
崩壊して出てくる二光子を検出することで発見



光子1

光子2

逆の過程も可能で

光子1(63 GeV) + 光子2(63 GeV)

によるヒッグス生成も

光を使って真空を探る

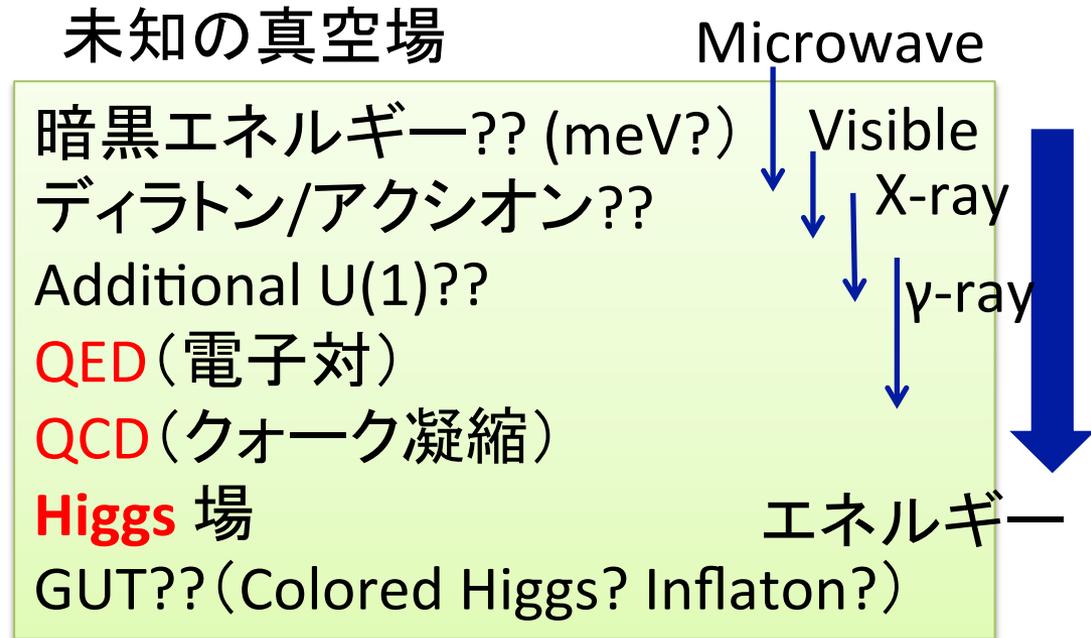
ただし、探索する物理現象に応じてエネルギースケールが大きく異なる

→ 多様なエネルギーの光源でカバー可能
(加速器では大変)

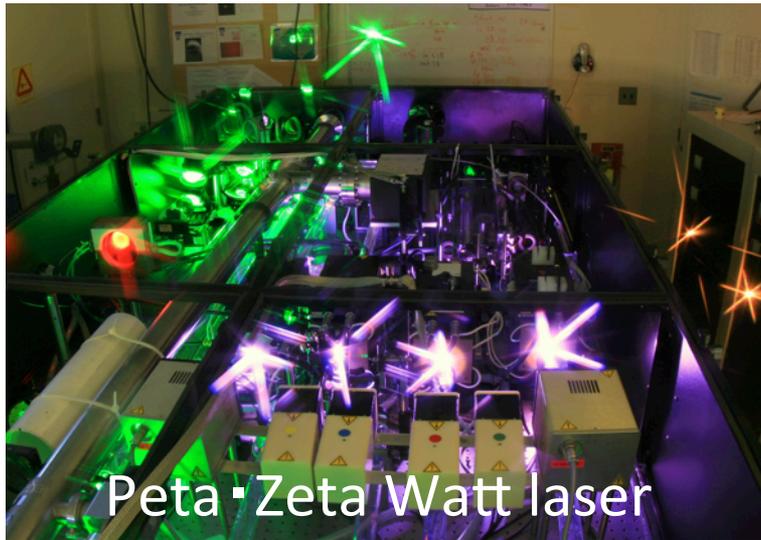
また、微弱な信号を見るために**高輝度・高密度**が必要

- ビームの時間・空間構造
- 単色性 (sチャネルの共鳴を探るときに大事)

における高いハンドリング技術が確立されている



光を使って真空を探る

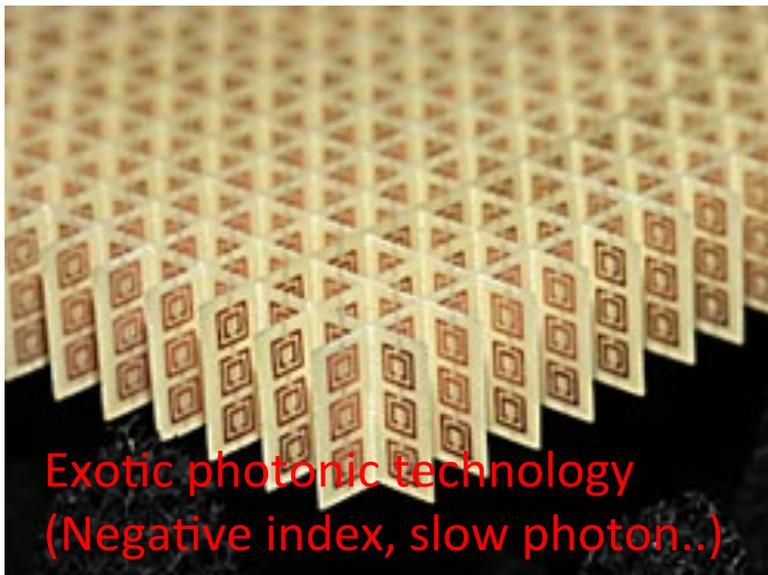


強度が強だけでなく
繊細な先端光技術が素粒子実験に
応用できる可能性もある

我々の真空探索の一例として、
Spring-8/SACLAで進行中の

- アクシオン, パラフォトン探索
- 光子光子散乱実験

についてお話しします



話の内容

- 真空物理のイントロダクション
- アクシオン探索実験
 - アクシオンと, その探し方
 - 実験の準備状況
 - 前段実験: パラフォトン探索
- 光子光子散乱実験
 - Phase 1
 - Phase 2, phase 3
- まとめ

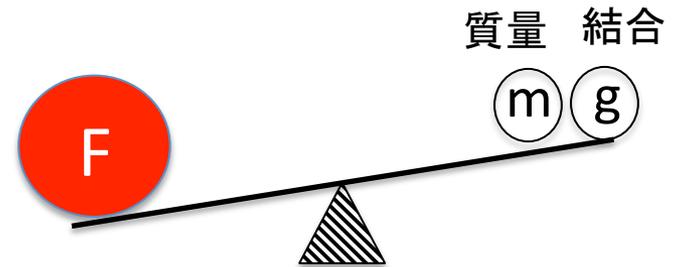
アクシオンとは

強い相互作用における「CP対称性の問題」

- 標準理論において強い相互作用(QCD)はCP対称性(粒子・反粒子の入れ替え)を破る
- ➔ しかし, 実験的には中性子の電気双極子モーメントの測定から非常に高い精度でCP対称性が成立: $\bar{\theta} < 10^{-9}$
- **新たなU(1)対称性(PQ対称性)の導入が必要**, 同時に「アクシオン」という粒子も必要になる
- ある高いエネルギースケールFでこの対称性が破れて, アクシオンが質量を獲得

質量と結合の大きさは F^{-1} で抑制

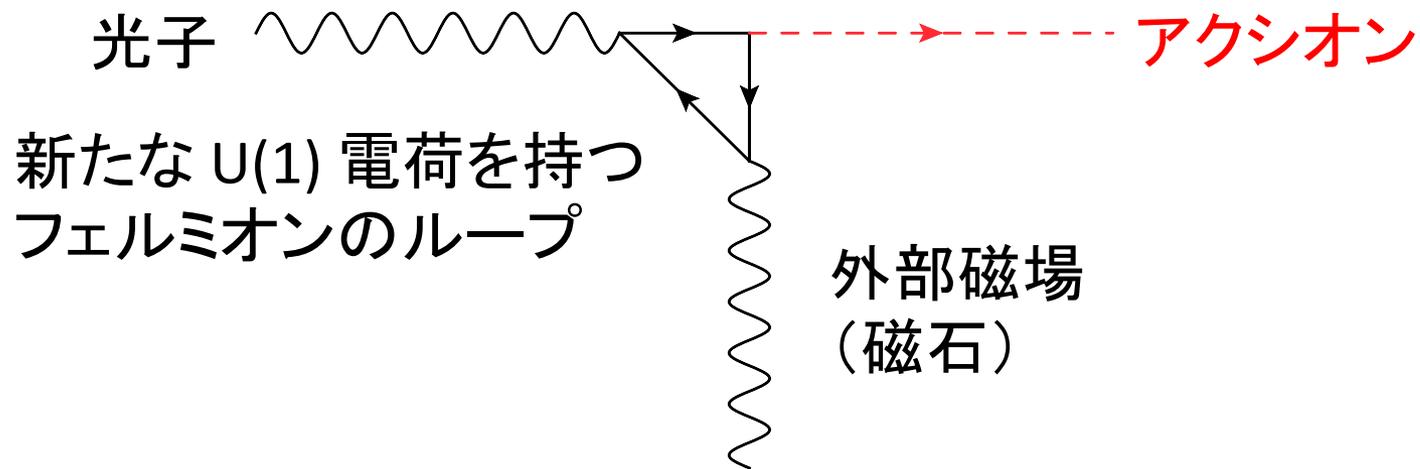
- 軽くて結合の小さい粒子の探索が **高エネルギー物理** に直結
- コールド**ダークマター**の候補



光子と結合するアクシオンを探したい

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)



擬スカラー

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

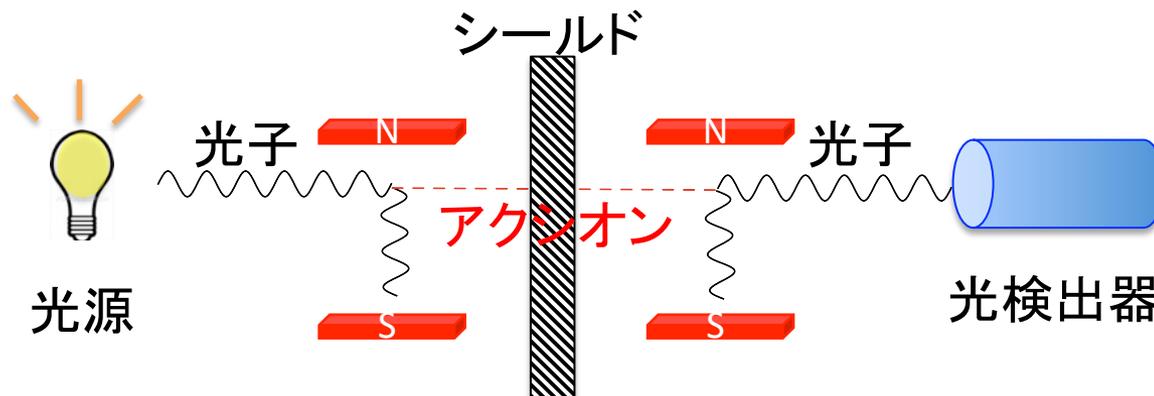
電磁場テンソル

電場と平行な磁場
成分が結合に寄与

探し方 - LSW 実験 -

Light Shining through a Wall (LSW) 実験

- 光源と検出器の間に壁を置いてビームを止める
- 壁の前後に置いた磁石で光子とアクシオンを変換
- 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
- ニュートリノ振動と類似の現象



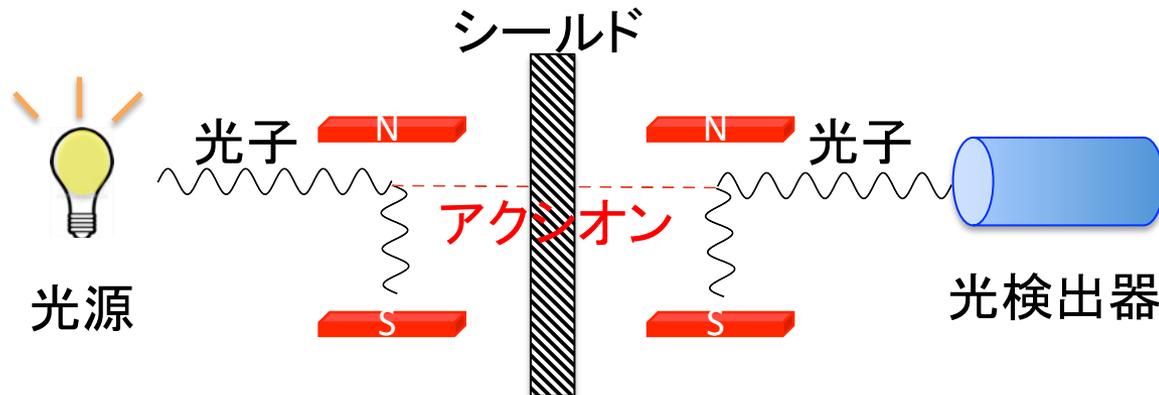
探し方 - LSW 実験 -

光子 \leftrightarrow アクシオンの変換確率

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

結合定数 $g_{\alpha\gamma}$ に対する探索の感度は磁場の**強さ** \times **長さ**に比例

- 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線はあまり探索されていない. 日本には強力なX線光源がある
- X線でやれば可視光よりも**2桁重い** ALP を探索可能



実験に対する要請

磁石

とにかく強くて、かつビーム軸方向に長さが必要

- 1 強磁場が出しやすいソレノイド: 磁場の向きを偏光の向きにあわせる必要があるので不可
- 2 加速器で使う常伝導の大型ダイポール: 磁場が小さい (<数T). 放射光のサイズが1mmなので大きなボア径は必要ない
- 3 超伝導磁石: 臨界磁場がリミット ~10 T ちょい (NbTi, Nb₃Sn)
またクエンチの際の安全性の確保も必要

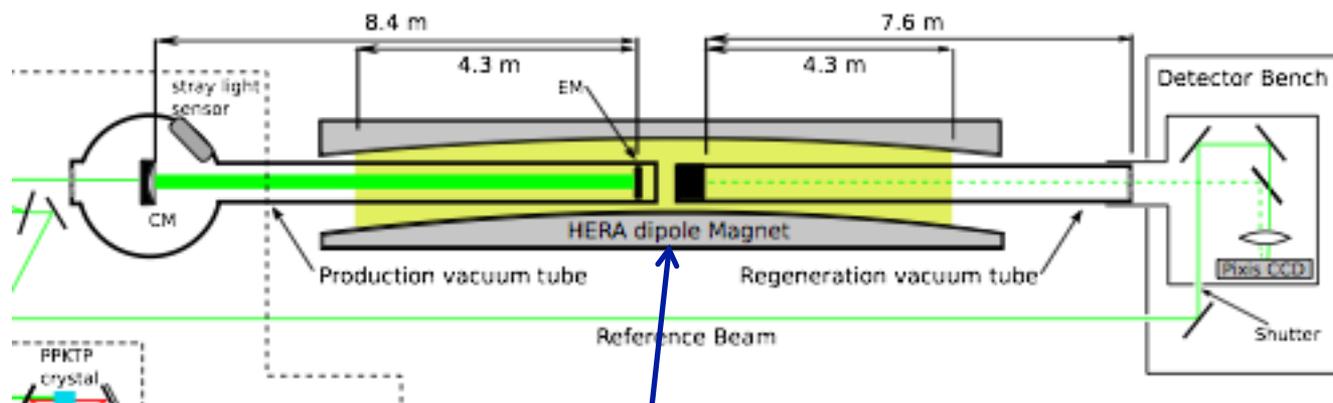
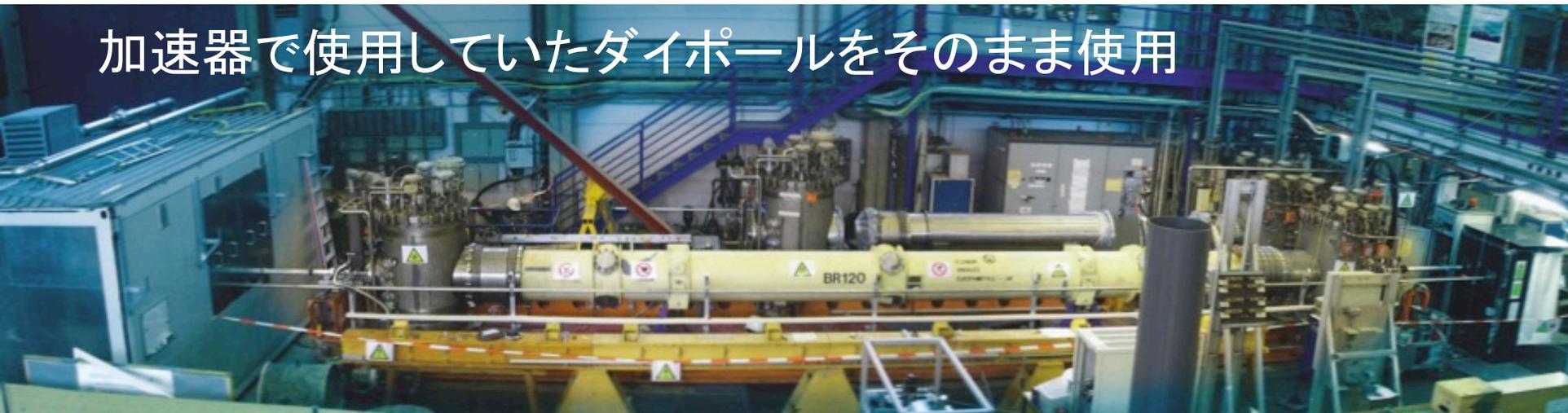
→ パルス磁石であれば瞬間的に数十 T 出せる.

ただし長手の構造は未開発 (ソレノイドのみ). なので自作する.

- 磁場領域をビームパスぎりぎりまで切り詰めて, エネルギー効率の良い磁石を作る

参考：従来の可視光探索における磁石

加速器で使用していたダイポールをそのまま使用



磁石中央に仕切り

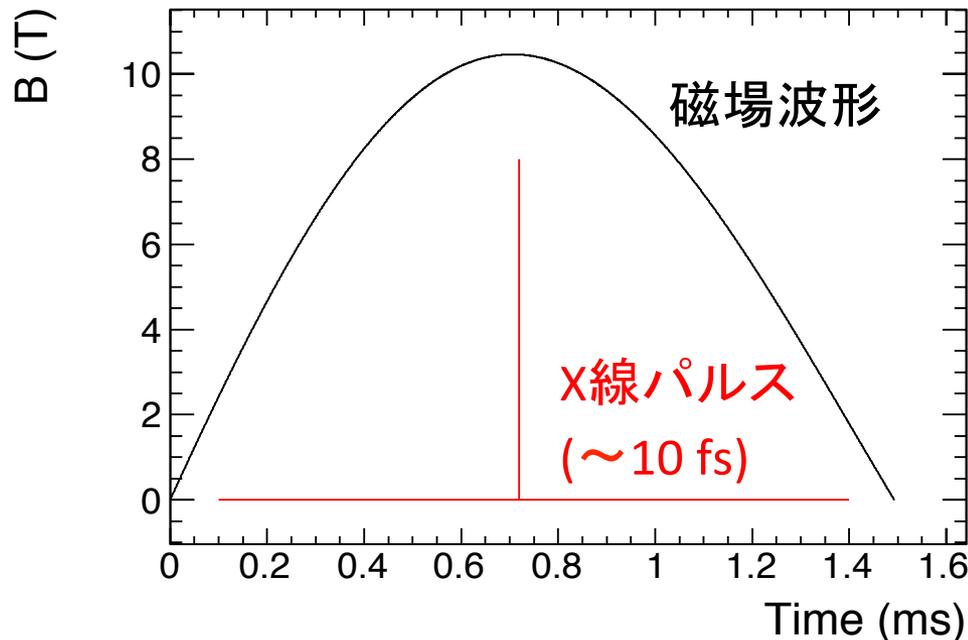
片側で 5 T×4.3 m

→ パルス磁石なら 20 T×1 m で良い

実験に対する要請

光源

- 磁石がパルスなので、光源も連続光である必要はない
→ 世界最高輝度のX線パルスを出力するSACLAで実験すればより高い感度が期待できる
- また、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
- あとは統計をためるために磁石の繰り返しを可能なまで上げる
- SACLAは30Hz



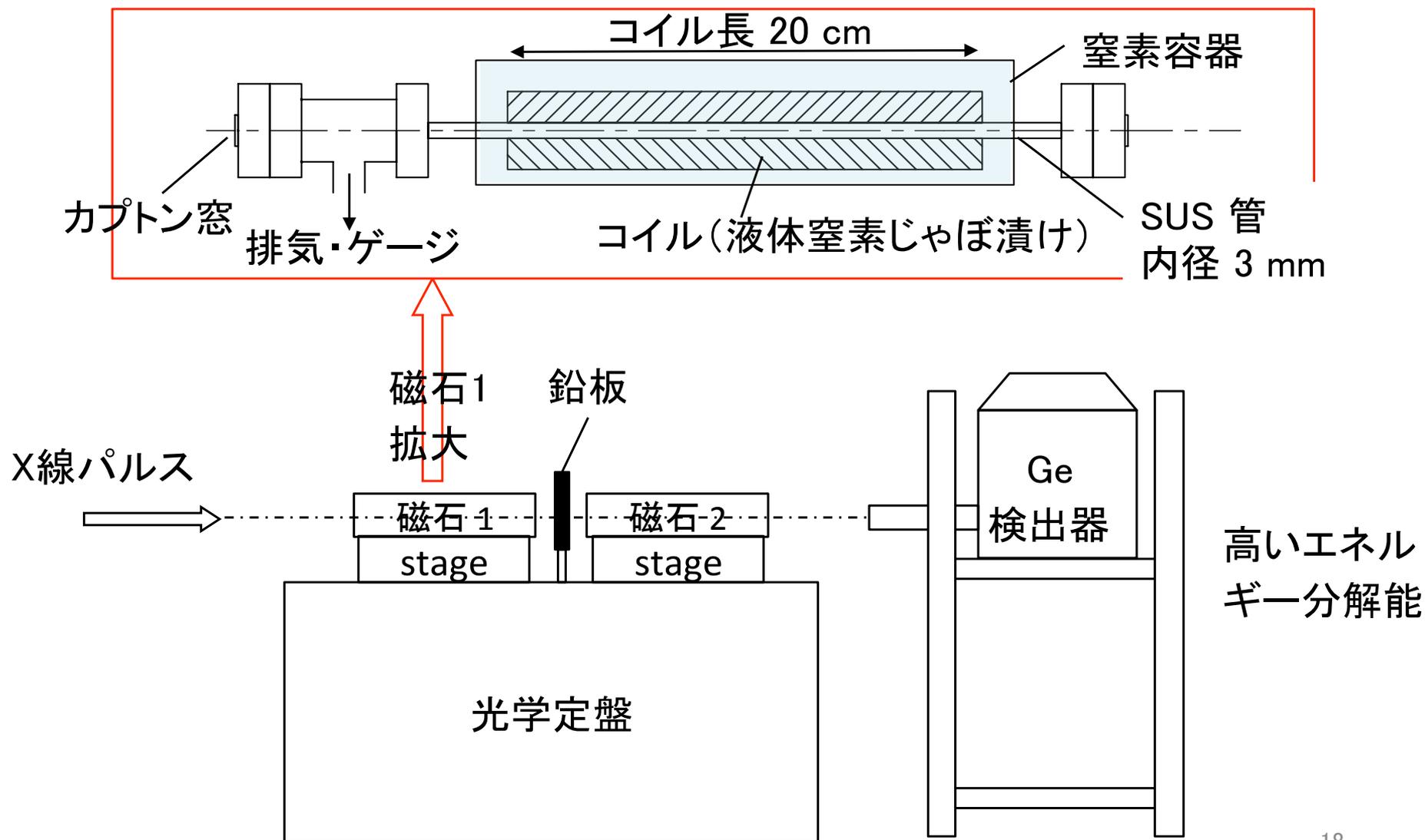
そのためにやること

- ビーム軸方向に長さのあるパルス磁石で,
 - エネルギー効率
 - 冷却効率の良いものを製作
- 磁石を10 Hz程度で運転するために必要となる, バンクの製作

現在, 1 kV程度の低電圧で繰り返し動作するバンクを製作し, 試作機となる磁石の磁場や発熱などをテストしている

実験のセットアップ

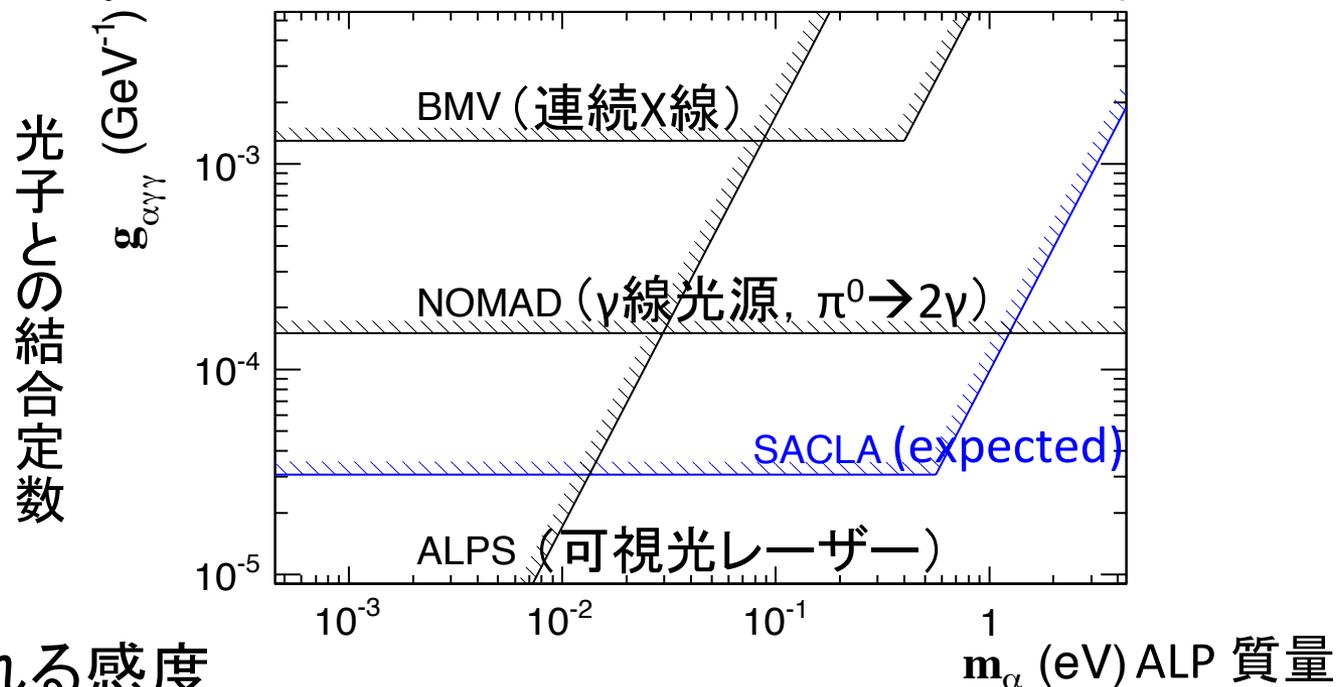
磁石2つを並べる場合



光子との結合定数に対する期待感度

- 黒: 先行実験
- 青: SACLA@10 keV, 3×10^{11} photon/pulse, 磁石@10 T×0.8 m, 6 Hz

2.5 daysで線の上側の領域を探索 (95% C.L.)



期待される感度

- 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5倍更新

短期目標

将来的には数十 T を目指すにしても、最初の目標は

- 磁場 10T, 繰り返し 6Hz
に設定

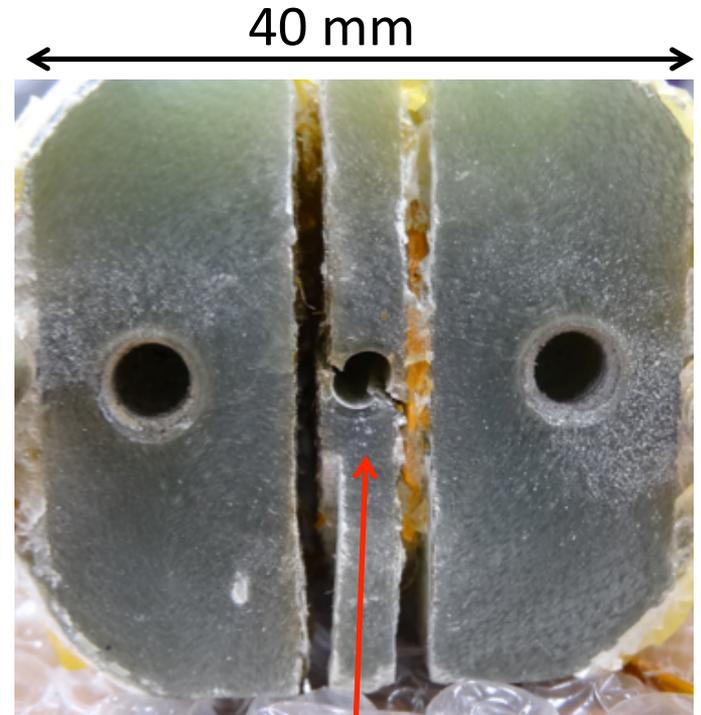
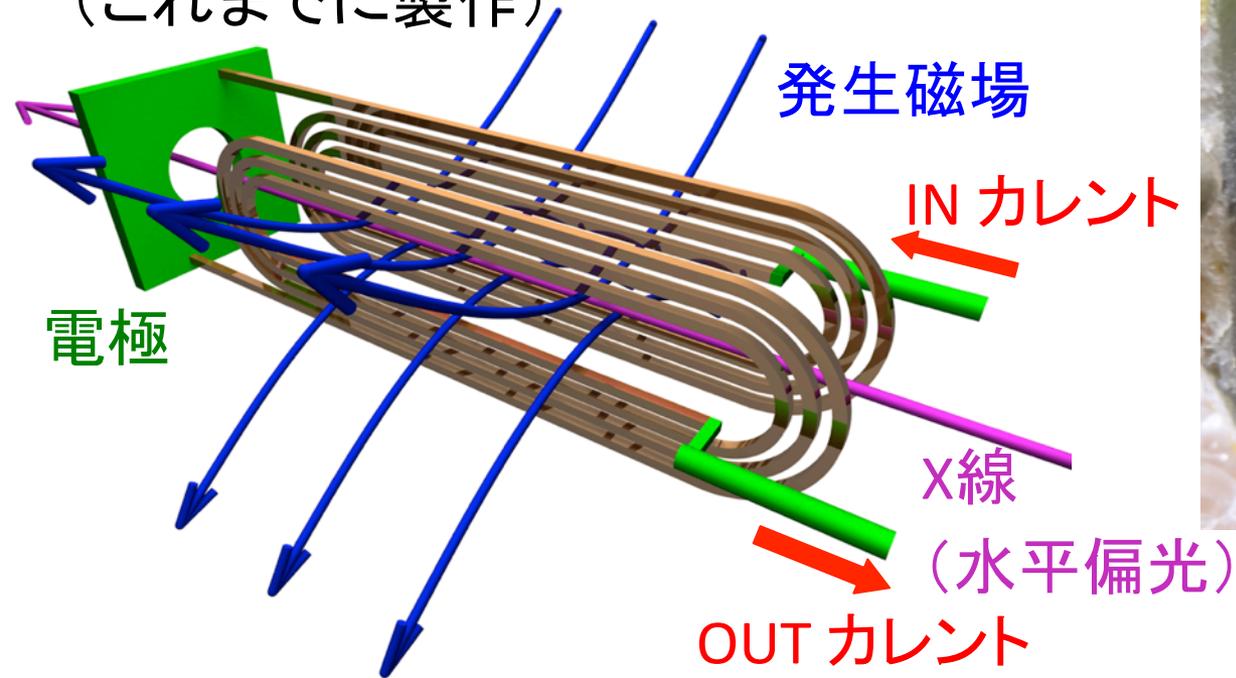
長さは

- 磁石 1 つあたり 20 cm 程度のものをたくさん作って並べる
ことで、全体での長さを稼ぐ。

磁石の構造

ビーム軸方向に長い, レーストラック型

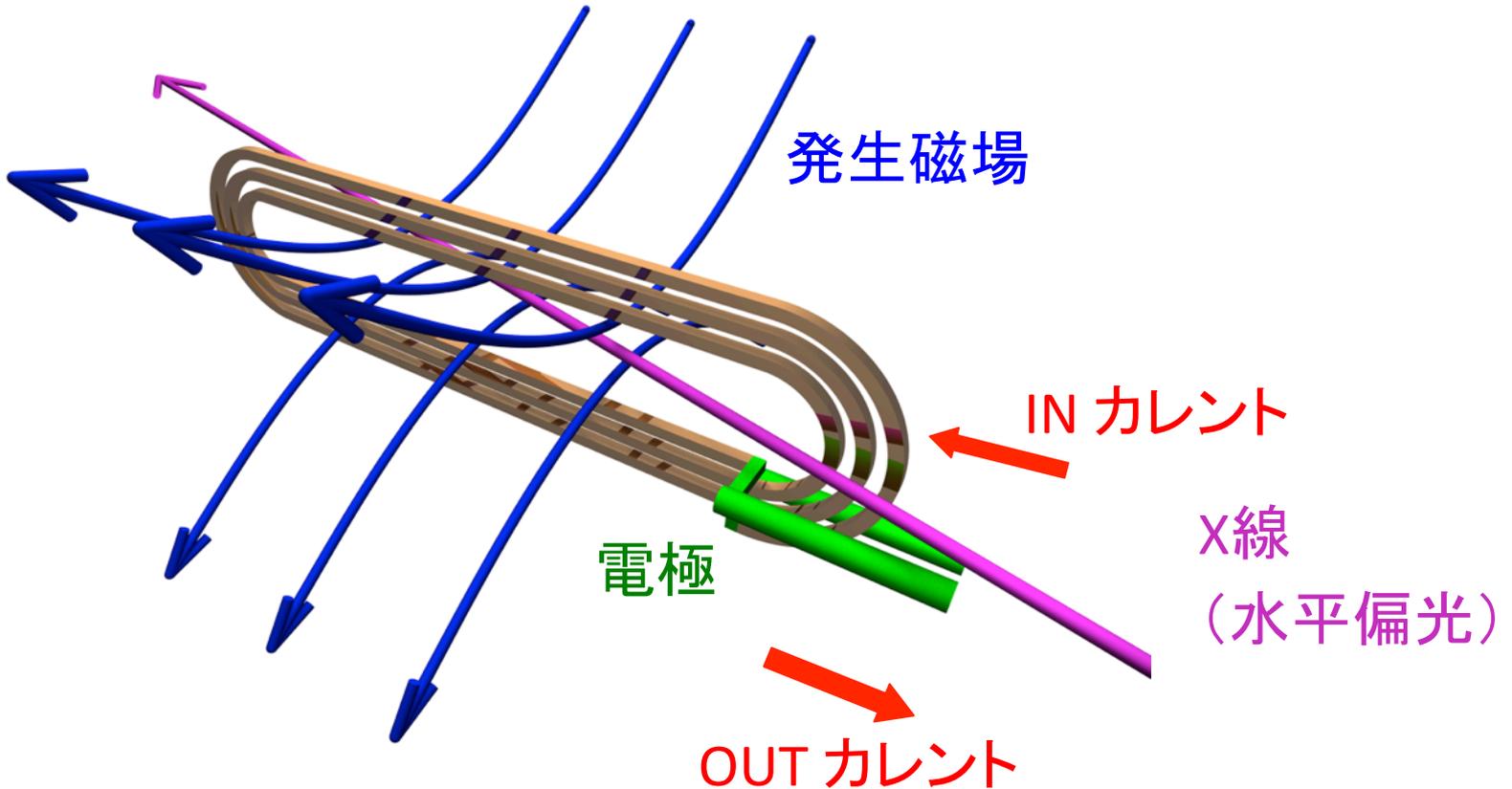
- ダイポール構造
(これまでに製作)



- まずは単純なダイポールで試作機を作り, テスト
 - 約10Tで, 電磁応力によりビームが通る穴が潰れてしまう
 - 強度的に限界なので, 構造を変える

磁石の構造

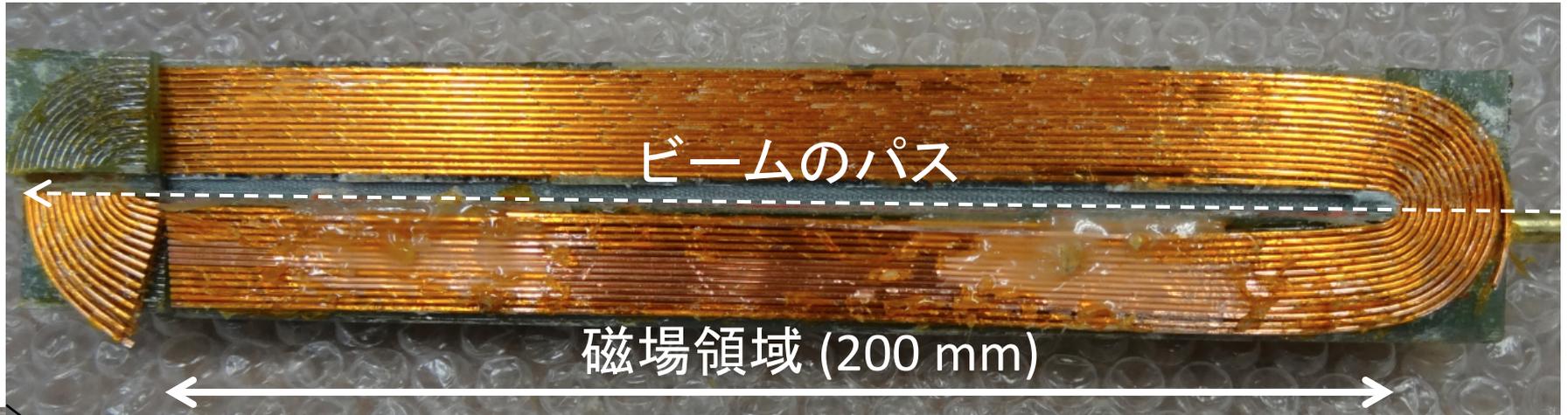
- 今回製作した磁石の構造



- ダイポールでは二つの極が引き合う力で潰れてしまう
→モノポールで作ればそのような力は生じない
- 磁石の中心を通る浅い角度でビームを通す

磁石の構造

ビーム軸に平行な断面(鉛直)



巻き始め(巻き終わりは裏)

A photograph showing the magnet assembly housed within a stainless steel (SUS) plate. The assembly is a long, narrow, oval-shaped component. A red arrow points to the start of the winding, labeled "巻き始め(巻き終わりは裏)". The housing has "L" and "R" markings on the left and right sides, and "up" markings on the top and bottom.

応力で膨らむので全周を厚さ 30mm 以上の SUS 板にはめ込む
(まずは冷却効率を度外視)

磁石の構造

上下からSUS板で挟んで上から吊るす

ピックアップコイル
($\phi 1.5$ に5ターン)

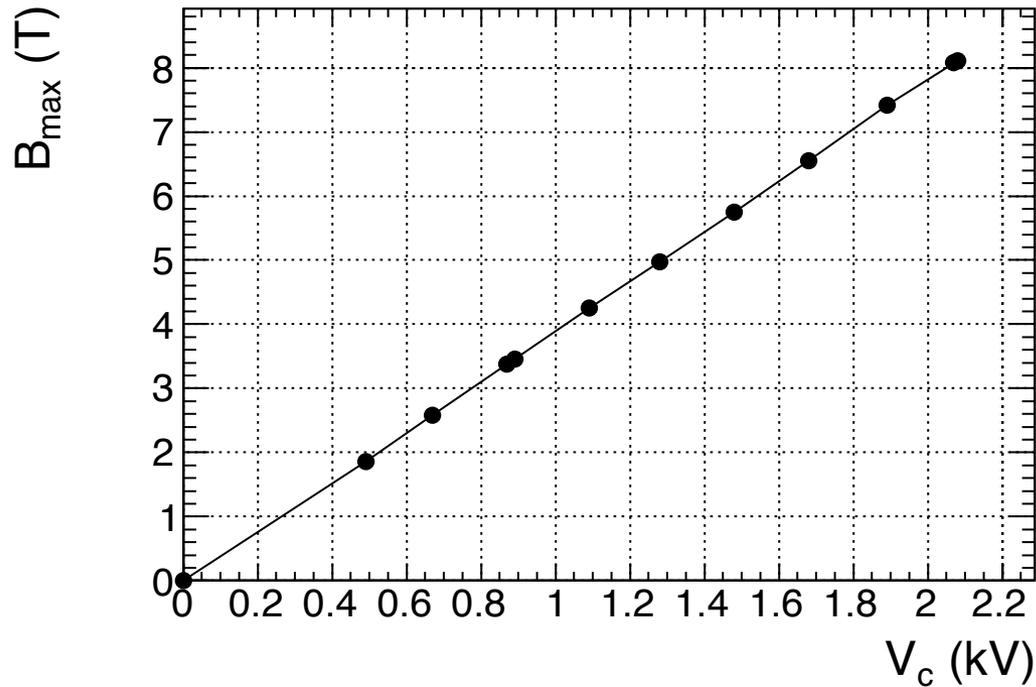
GND側(上)

HV側(下)

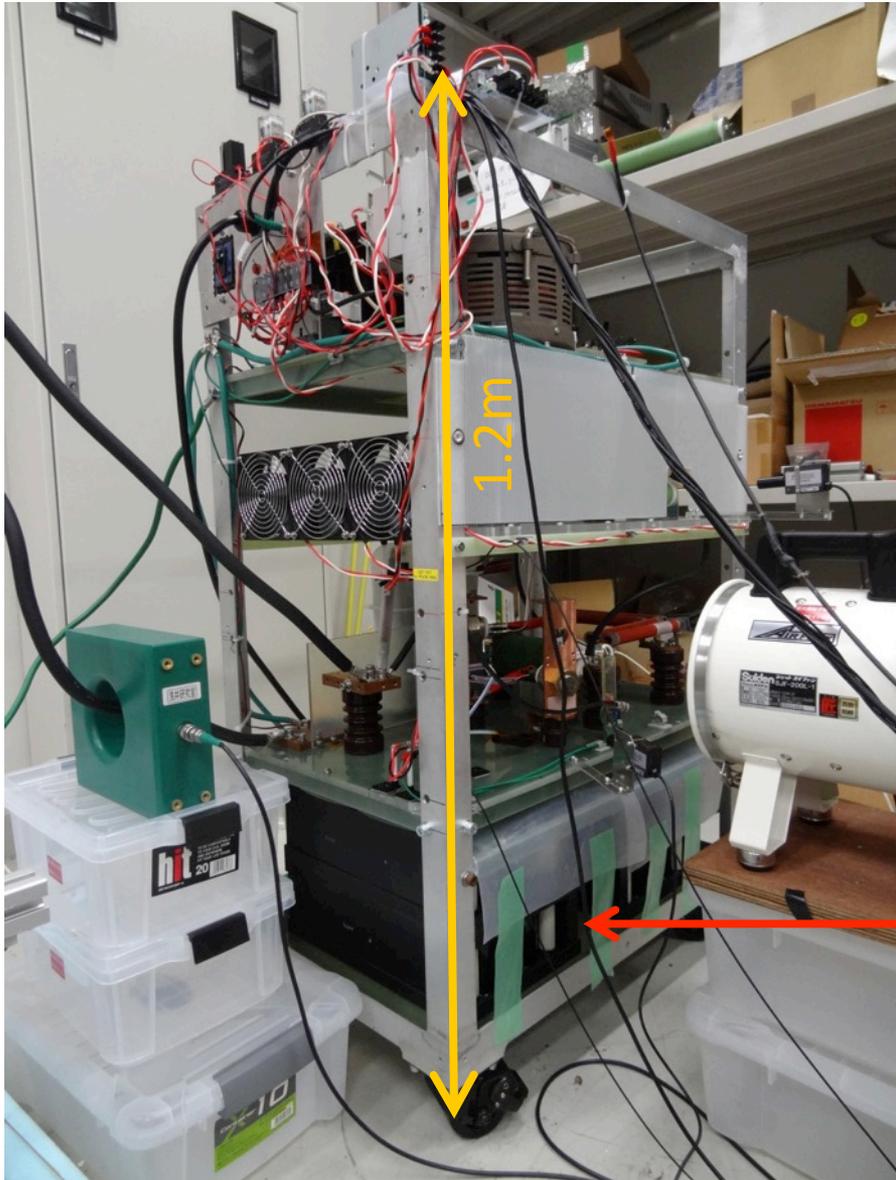
ビームが取るパイプ($\phi 3.2$)
→中へピックアップコイルを
差し込んで磁場を測定

最大磁場の測定

- 今のところ8 Tまで発生
- これ以上ではSUSの補強が変形してしまったので、今後改良する



プロトタイプ電源の製作



- 最終的には4.5 kV程度の電源を作成する予定だが、まずはプロトタイプとして1 kVの電源を製作した
- この電源で先の磁石を運転し、繰り返し1 Hz@4.3 Tを達成
- 今後冷却効率の良い設計へと改良して発生磁場と繰り返しを上げていく

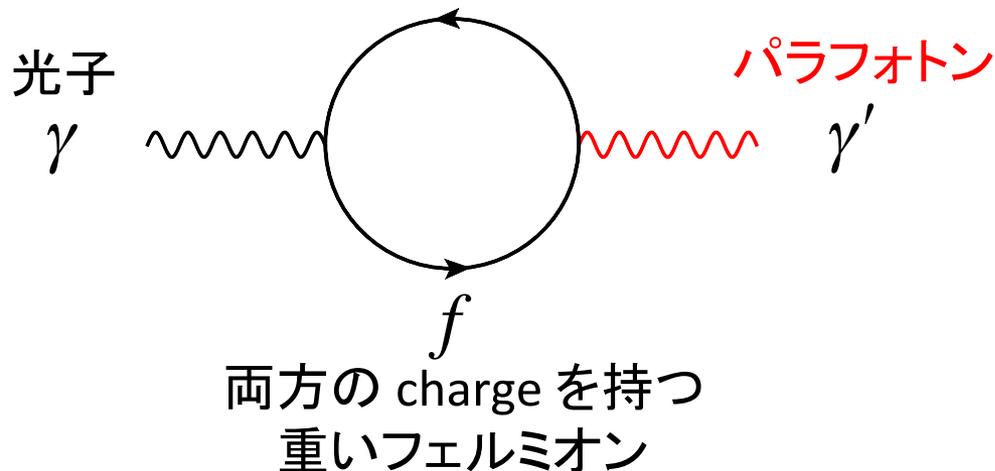
最下段にコンデンサ
1.6 mF

アクシオン探索の準備

- 我々は放射光に関して素人なので、磁石やバンクの準備だけでは実験ハッチ内での実際の段取りがわからない。
- そのためアクシオン探索の前に似たようなセットアップで前段実験を通して感覚を掴みたい。
- そこで一昨年前に、パラフォトンという(これまた)未発見粒子の探索を行った

パラフォトン(擬似光子)とは

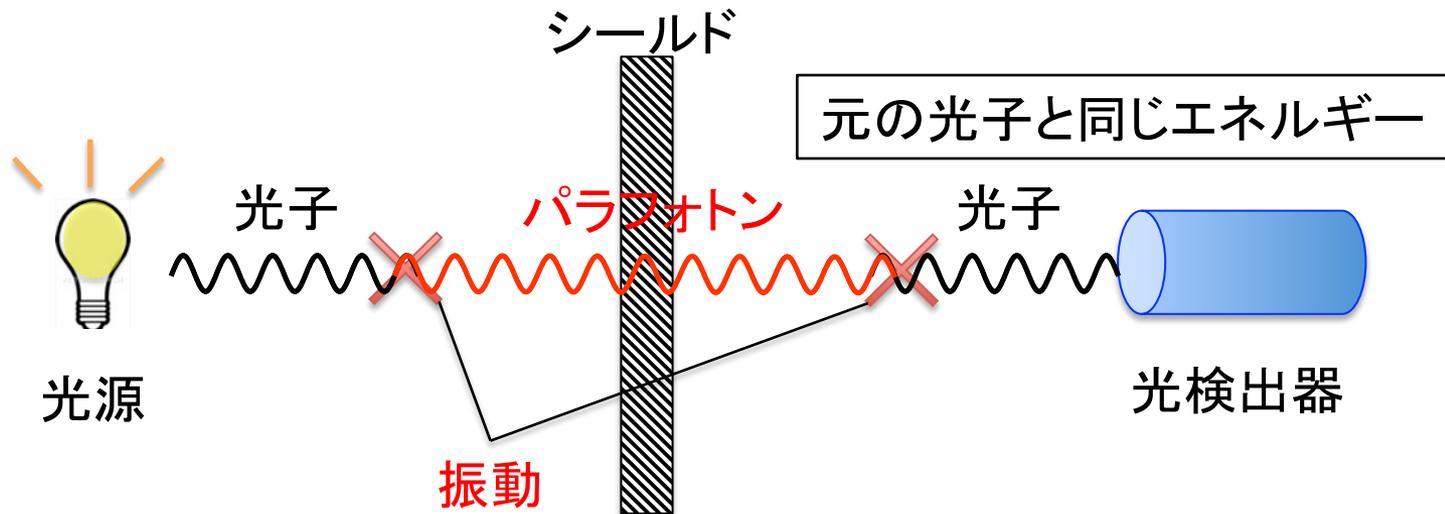
- 多くのひも理論では新たな $U(1)$ 対称性が要請される
→ その $U(1)$ ゲージ粒子がパラフォトン
- 光子と下のようなダイアグラムを介して量子力学的な混合状態にある
- 混合の大きさが非常に小さいので未だ見つかっていない



- QED の補正, 天体内部の異常熱輸送, DMなどに寄与

パラフォトンの探し方

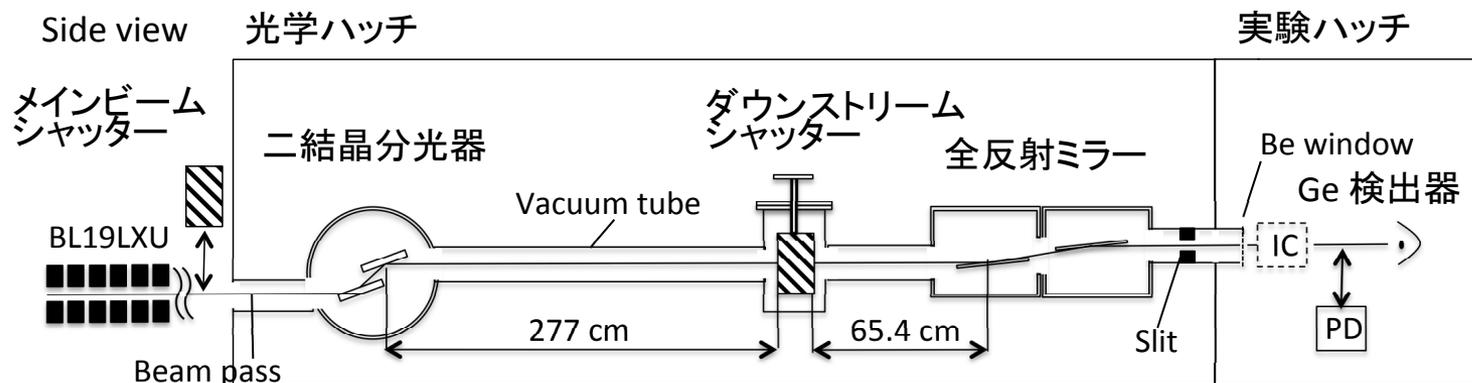
- パラフォトンの性質：物質との相互作用が極めて小さい
- 本当にニュートリノの様な粒子



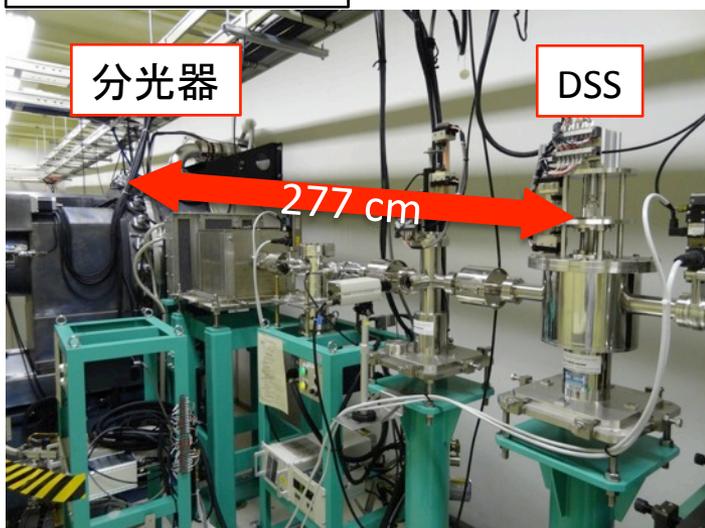
- アクシオンと異なり, 磁石なしでOK.

パラフォトン探索のセットアップ

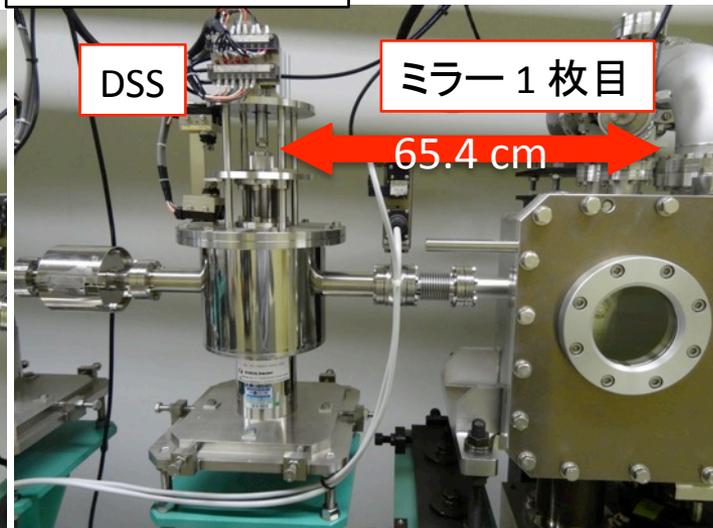
- SPring-8 BL19 のビームラインコンポーネントをほぼそのまま光子 \leftrightarrow パラフォトンの変換領域として使用



変換領域(前半)

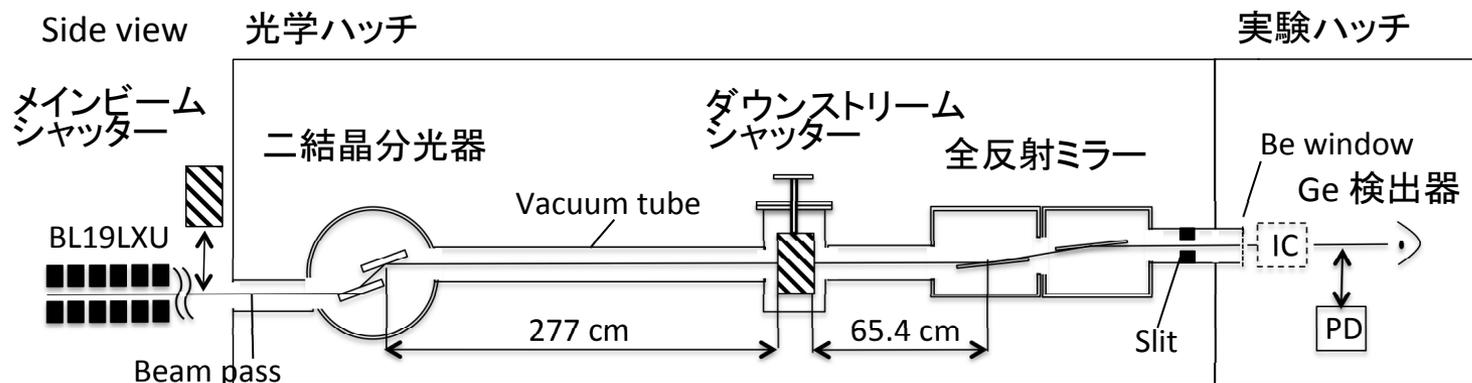


変換領域(後半)



パラフォトン探索のセットアップ

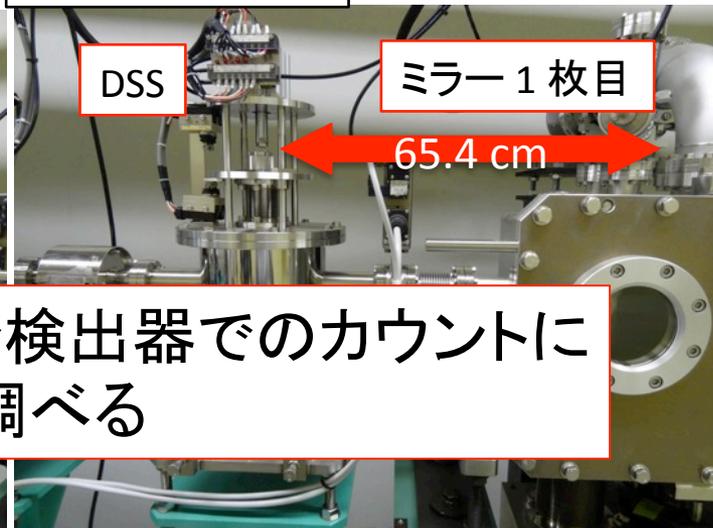
- SPring-8 BL19 のビームラインコンポーネントをほぼそのまま光子 \leftrightarrow パラフォトンの変換領域として使用



変換領域(前半)



変換領域(後半)

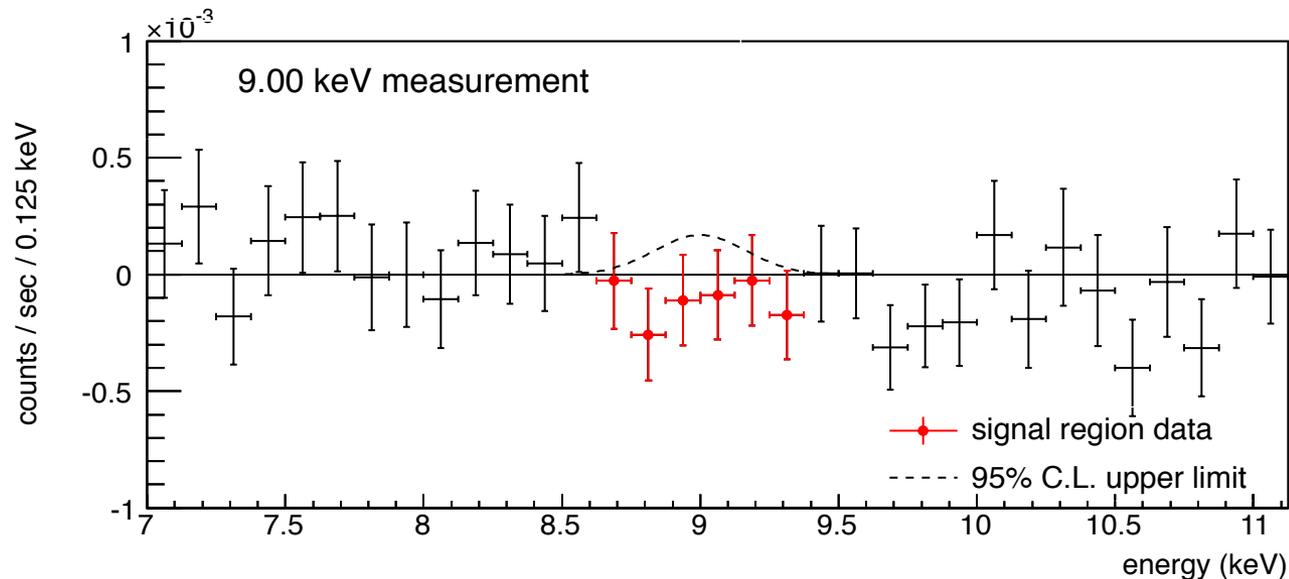


ビームのONとOFFで検出器でのカウントに有意な差がないか調べる

ON測定からOFF測定を引いた差分スペクトル

一例として, 9.00 keV の測定結果

- ・ エラーバーは統計誤差, 赤はシグナル領域の測定点
- ・ $+2\sigma$ (標準偏差) を超える有意なシグナルは観測されず・・・(他の ω でも)

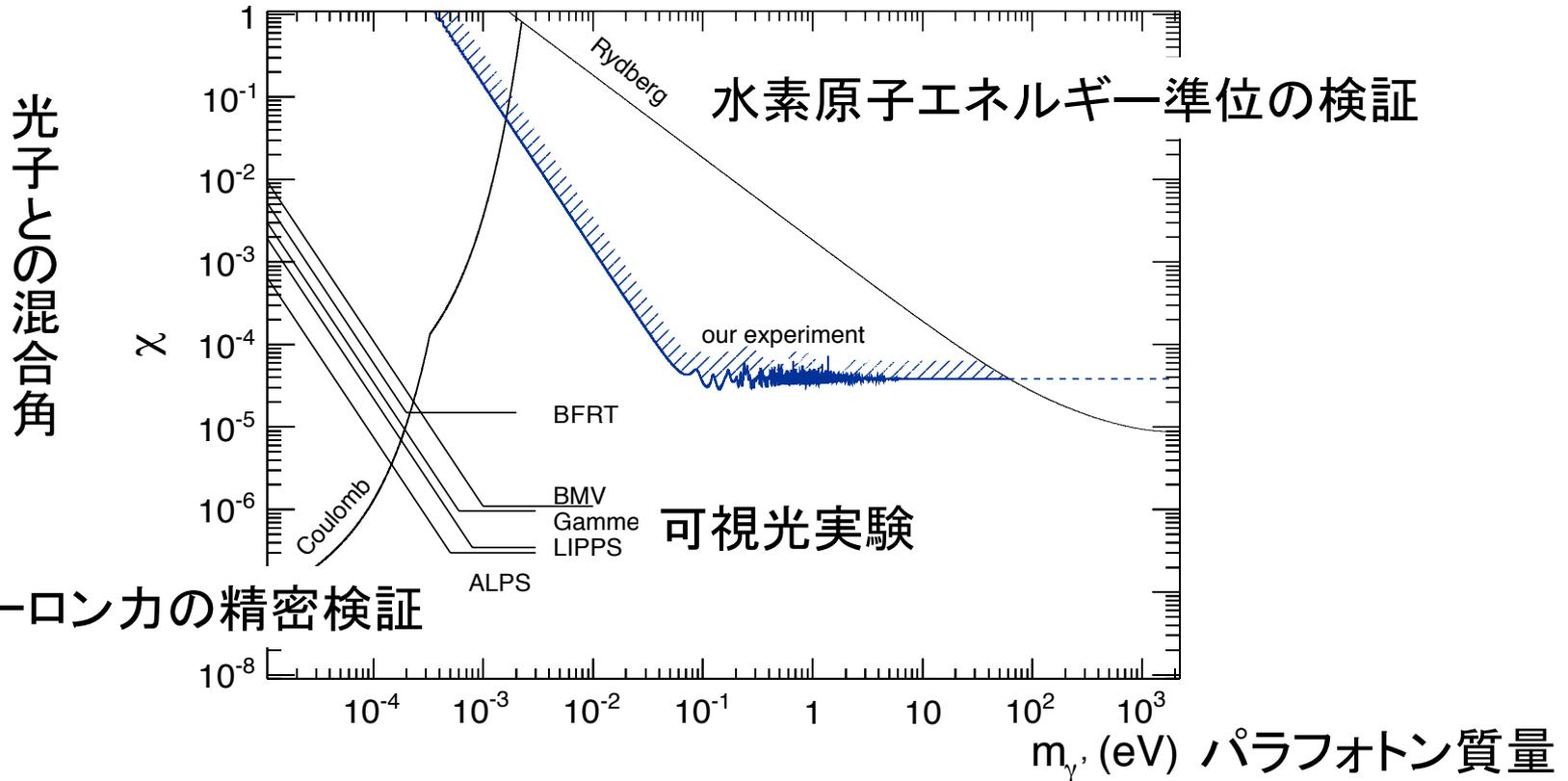


- ・ 点線はシグナルの上限値 (95% C.L.)
- ・ 測定点の形状は使っていない (フィットはしない)

得られた結果と他の実験との比較

可視光実験と比べて

- ・ 強度が劣るため感度(縦方向)は約 2 桁低い
- ・ エネルギーが高いため探索質量(横方向)は **2 桁以上重い**

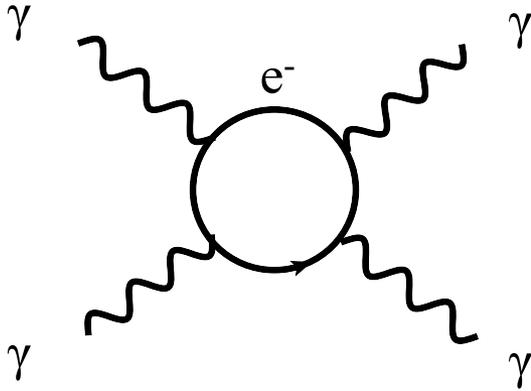


- ・ 可視光よりエネルギーの高いX線光源を用いて, **他の地上実験で探索されていない** eV 付近の質量領域に制限 (95% C.L.) を与えた
- *Phys. Lett. B* 722 (2013) 301

話の内容

- 真空物理のイントロダクション
- アクシオン探索実験
 - アクシオンと, その探し方
 - 実験の準備状況
 - 前段実験: パラフォトン探索
- 光子光子散乱実験
 - Phase 1
 - Phase 2, phase 3
- まとめ

光子光子散乱の探索



- 光子同士は電荷を持たず直接には散乱しないが、真空中の電子ループを介して弾性散乱
- 真空の非線形効果
- X線は可視光よりエネルギーが電子質量に近いので、散乱の断面積(確率)が大きい

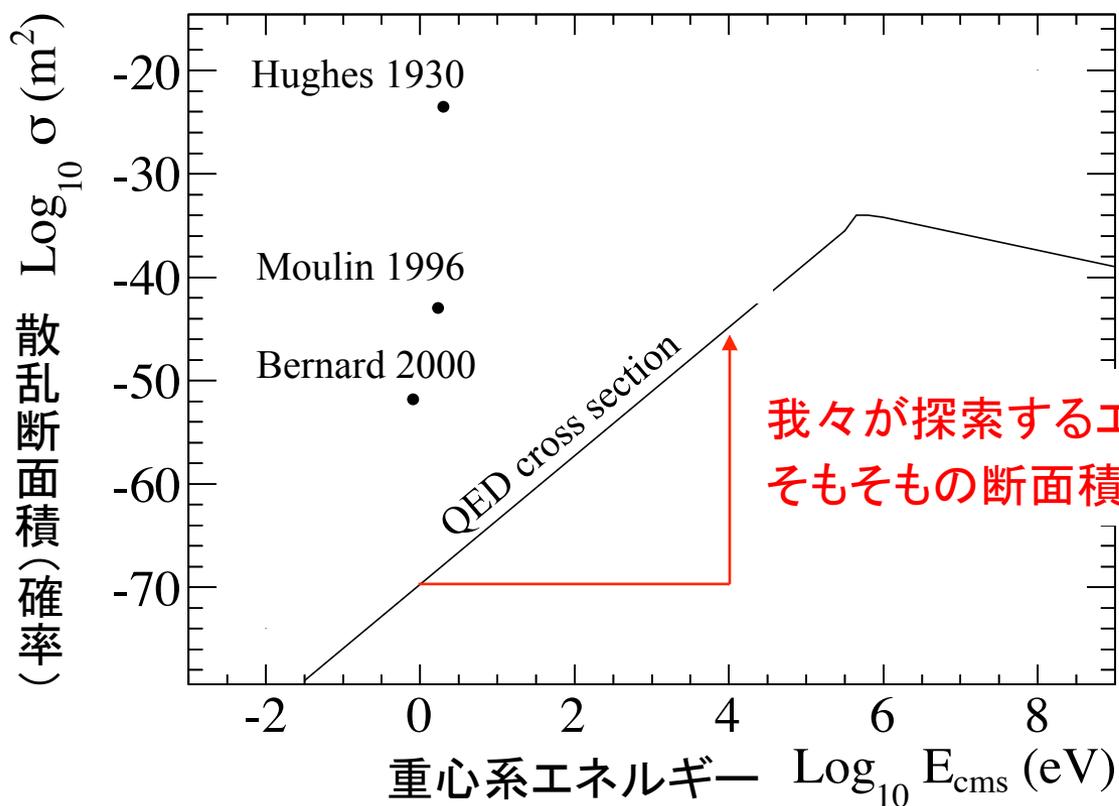
$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{139\alpha^4}{(180\pi)^2 m_e^2} \left(\frac{\omega}{m_e}\right)^6 (3 + \cos^2\theta)^2$$

可視光より 24 桁エンハンス

- このような非線形事象は未だ観測されていない
- もし未知の真空場の寄与が見えなくても、まだ確認されていないQED事象を実際に観測することは非常に大事

過去の実験による QED のリミット

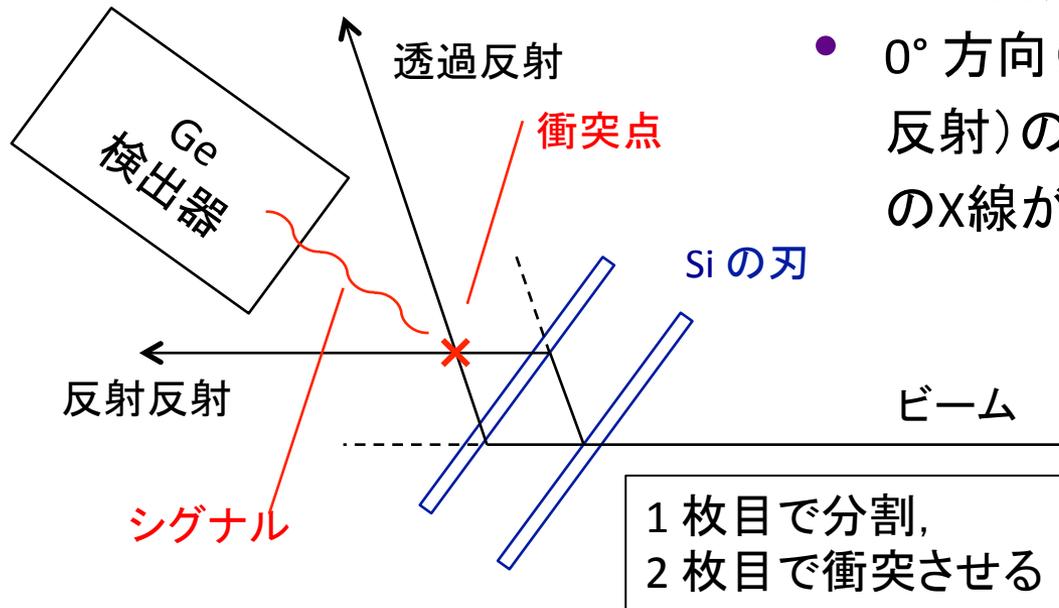
- 意外と歴史が古い
- 可視光域ばかりにリミットが3つ



- X線でやれば24桁もお得

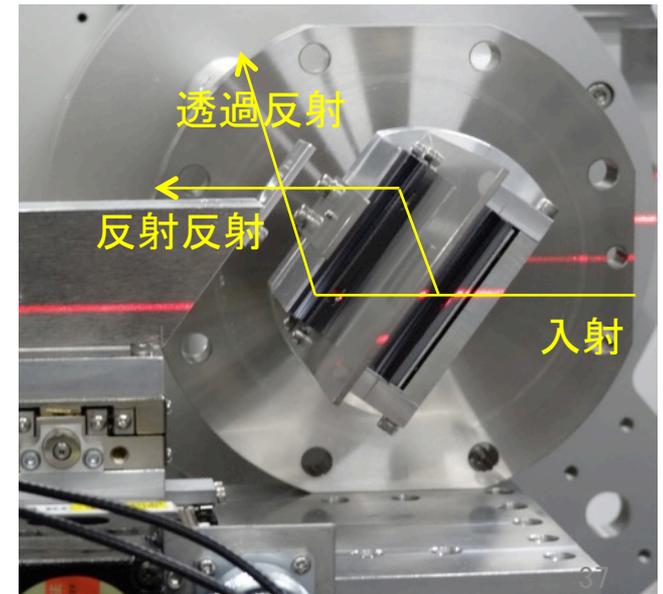
ビームの分割と衝突

横から見て

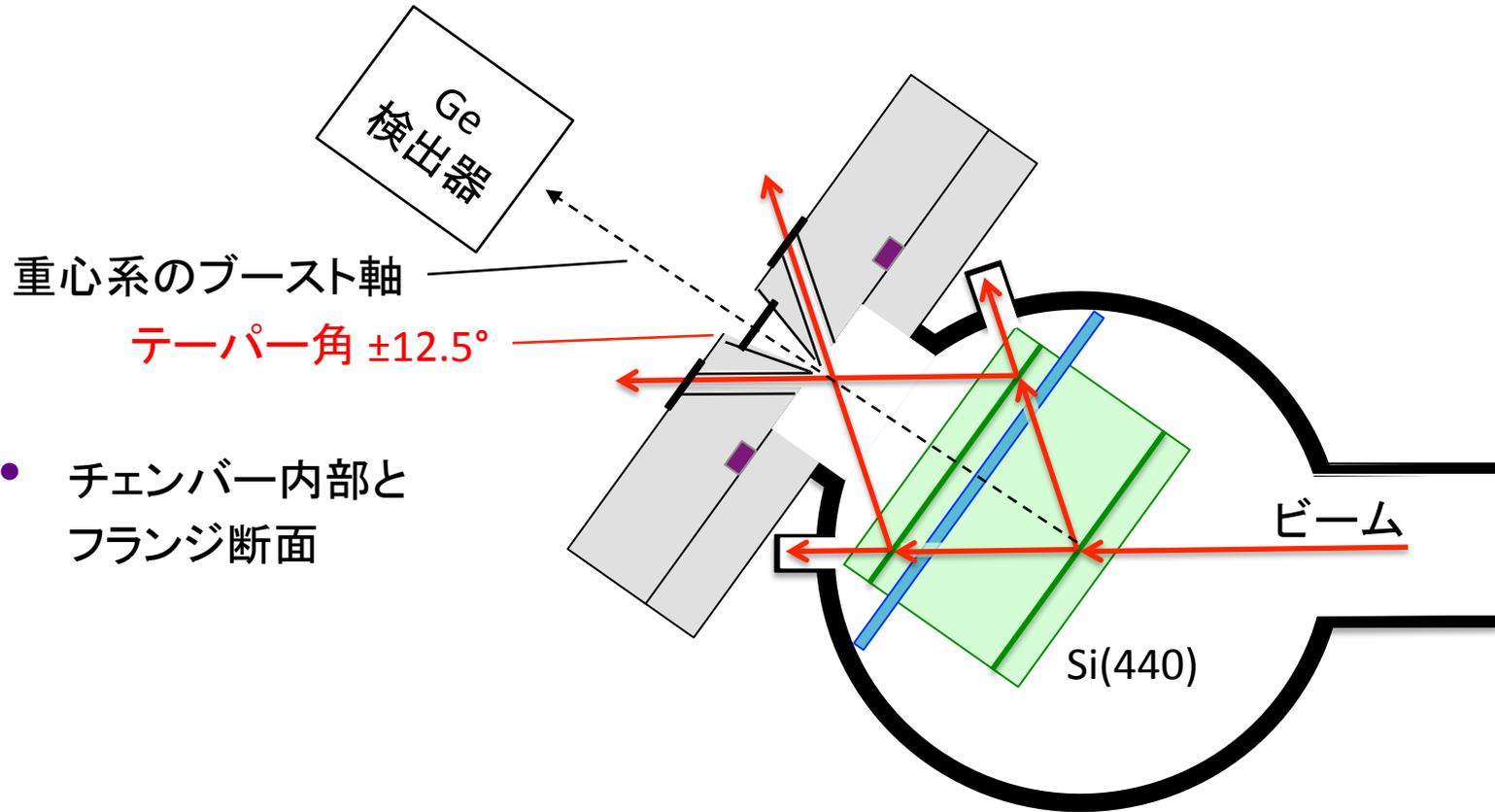


- SACLA の $10.985\text{keV}/20\text{Hz}$ を Si(440) の double Laue 結晶で分割しぶつつける
- Si の刃厚 0.6 mm, 間隔 25 mm
- 0° 方向(反射反射)と 72° 方向(透過反射)の間から, 36° 方向へシグナルのX線が出射

- シグナル:ビームと同期したX線



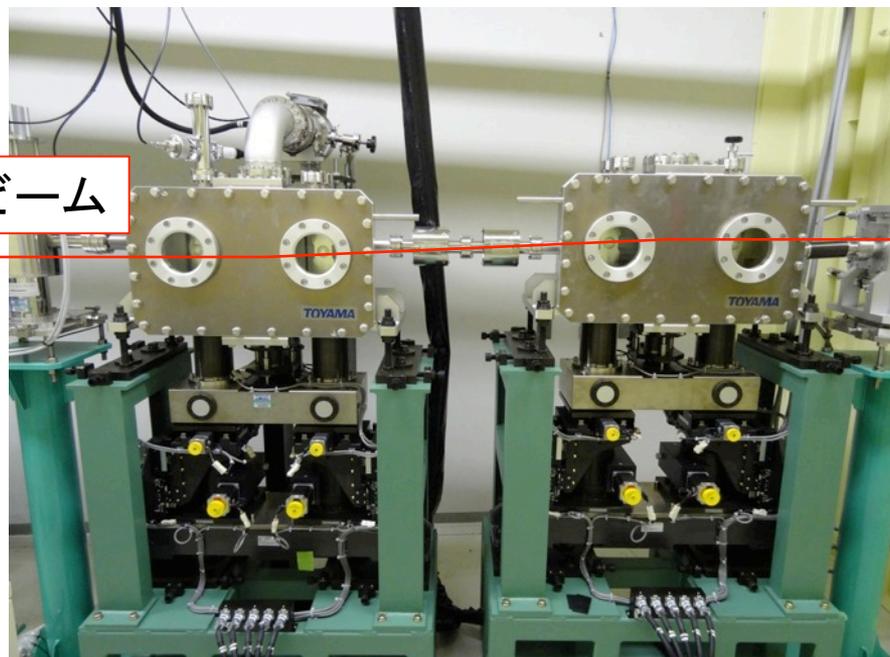
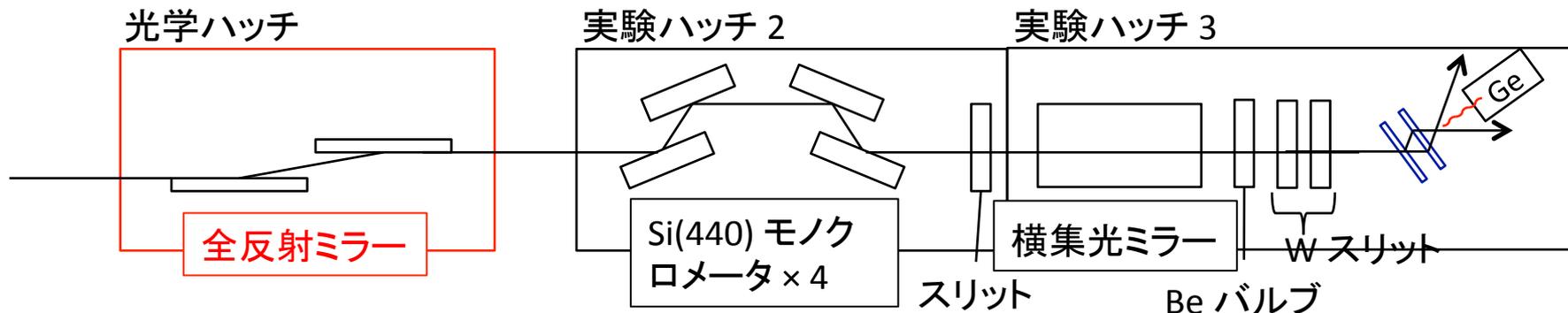
シグナルのエネルギー領域



- 中央の穴のテーパー角 12.5° がシグナルのエネルギー範囲を決める
⇒ ブースト軸上 → 19.87 keV , ブースト軸から 12.5° → 18.06 keV

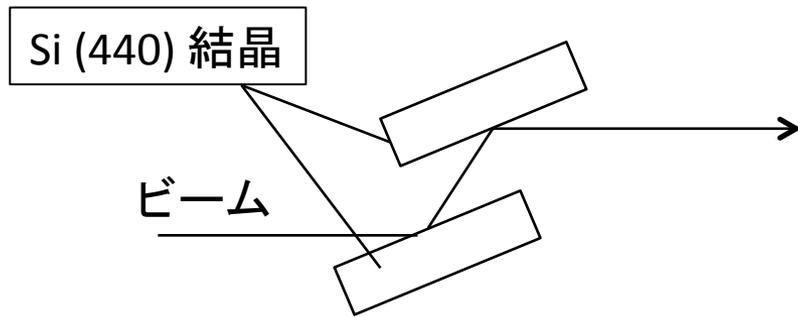
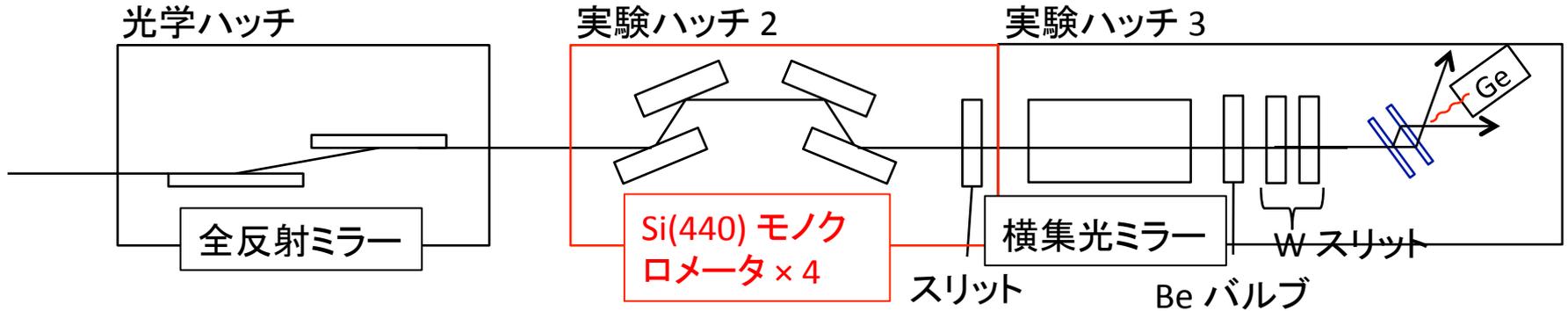
実験セットアップ 1/3

去年SACLAで行った実験のセットアップ



- ミラー表面に浅い角度でビームを入射すると、X線が全反射
⇒ 臨界面は高エネルギーほど浅い
- 1 mrad 程度のはね角にすると 11 keV 以上のX線は全反射されない
⇒ **高調波のカット**
- 平行なミラー 2 枚を組み合わせて、ビームの水平性を保つ

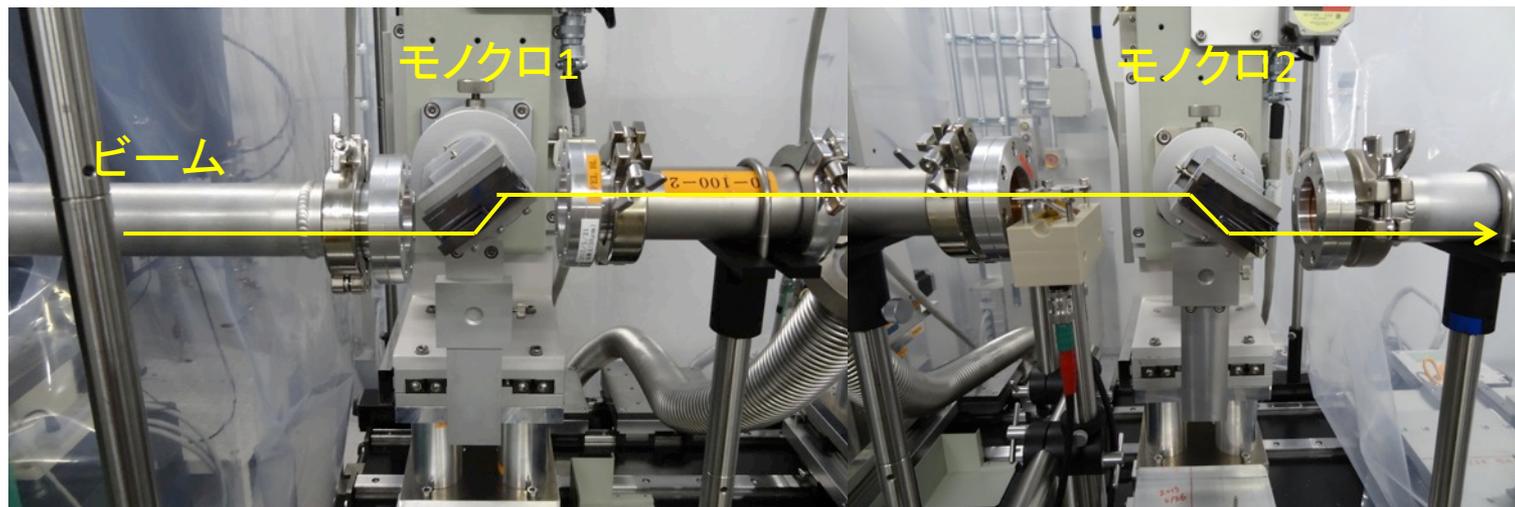
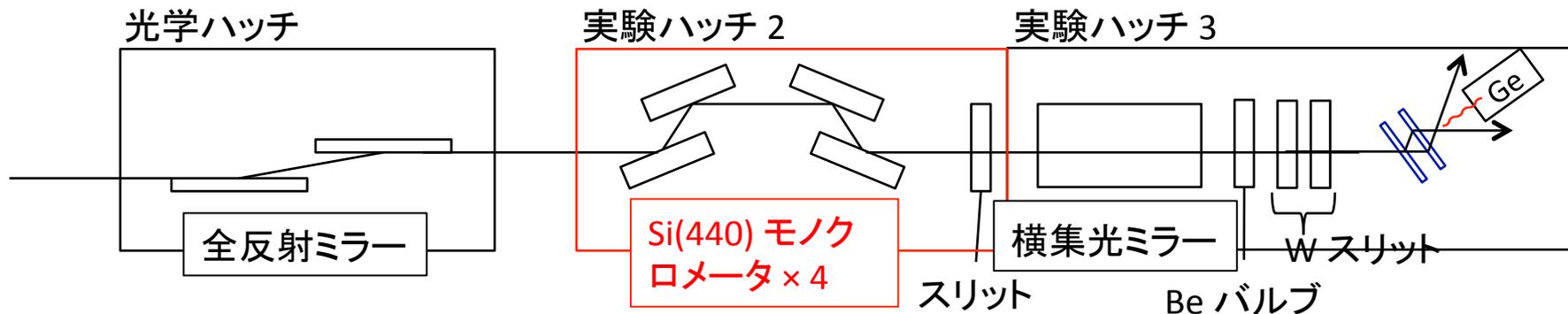
実験セットアップ 2/3



- スプリッタに対する単色性が悪いと
 - 非回折 1 次光 (ラウエしない成分)
 - チェンバーからの SUS 蛍光
- による BG が増加
- ⇒ スプリッタと同じ Si(440) 結晶を上流に配置して先に単色性を上げておく

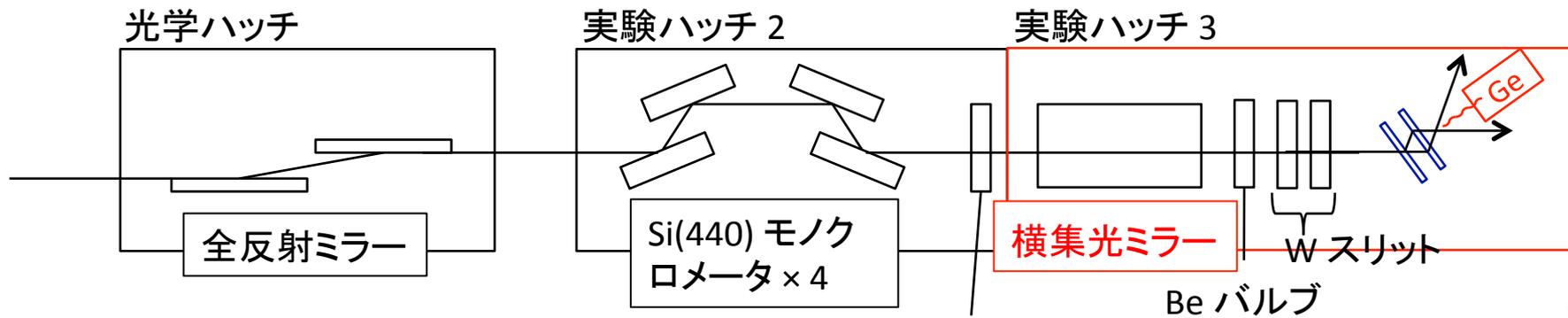
- 結晶表面でブラッグ反射, 2つの結晶でビームの軸を平行に保つ
- 2セット組み合わせてビーム軸のオフセットを戻す

実験セットアップ 2/3



- 結晶表面でブラッグ反射，2つの結晶でビームの軸を平行に保つ
- 2セット組み合わせてビーム軸のオフセットを戻す

実験セットアップ 3/3

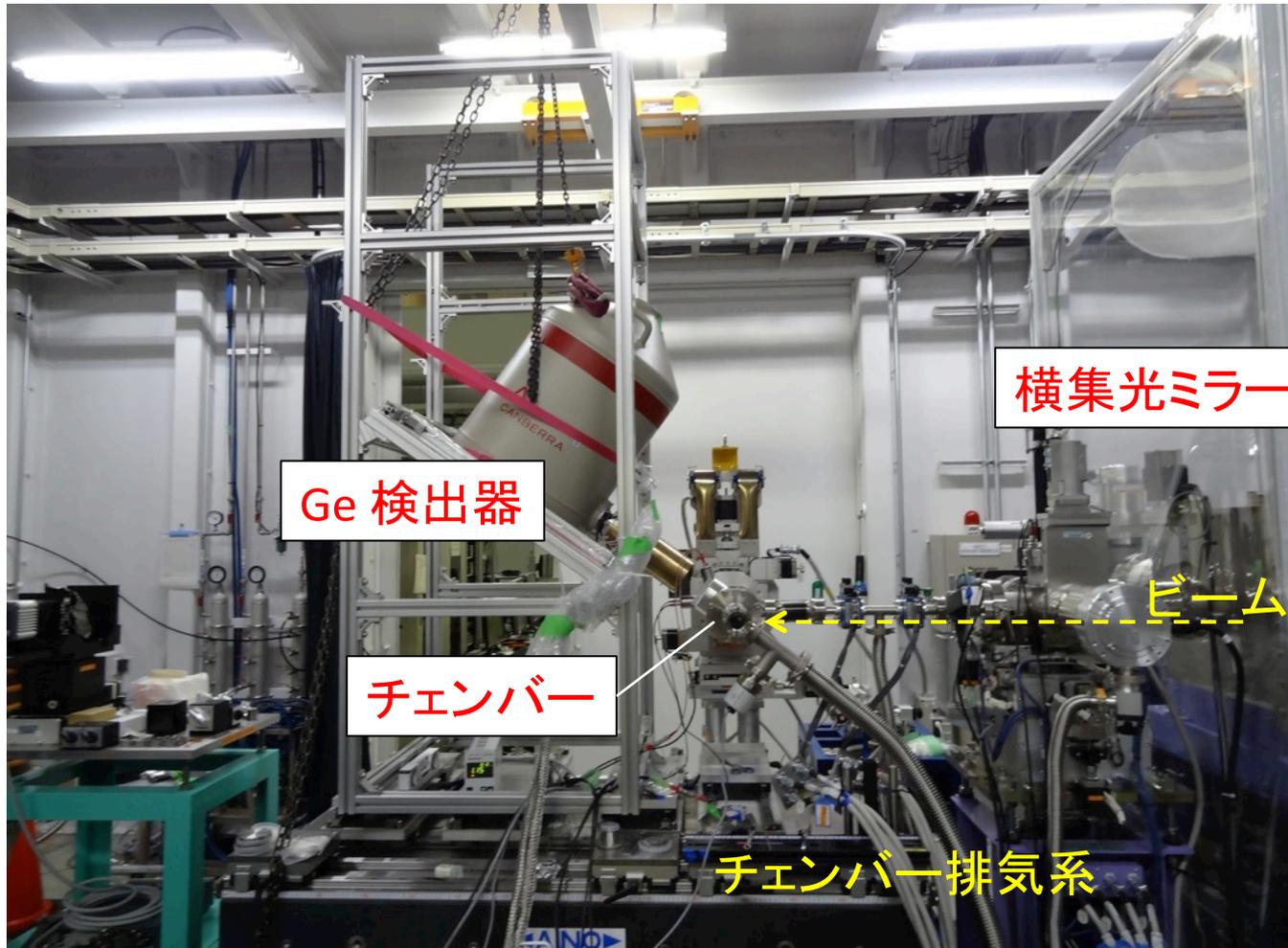


スリット

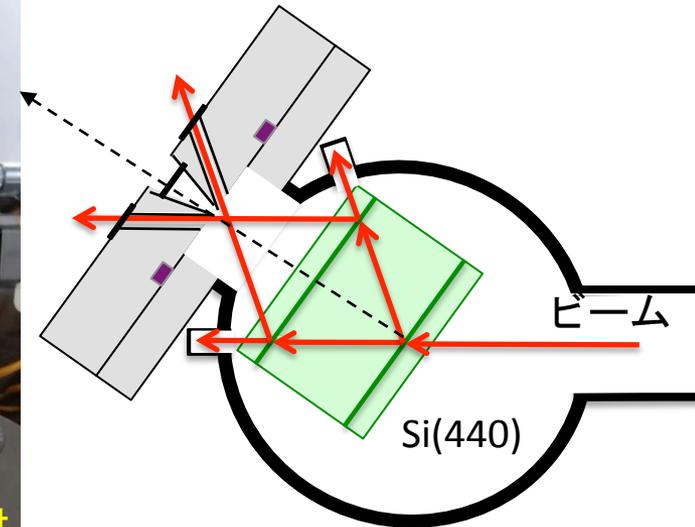
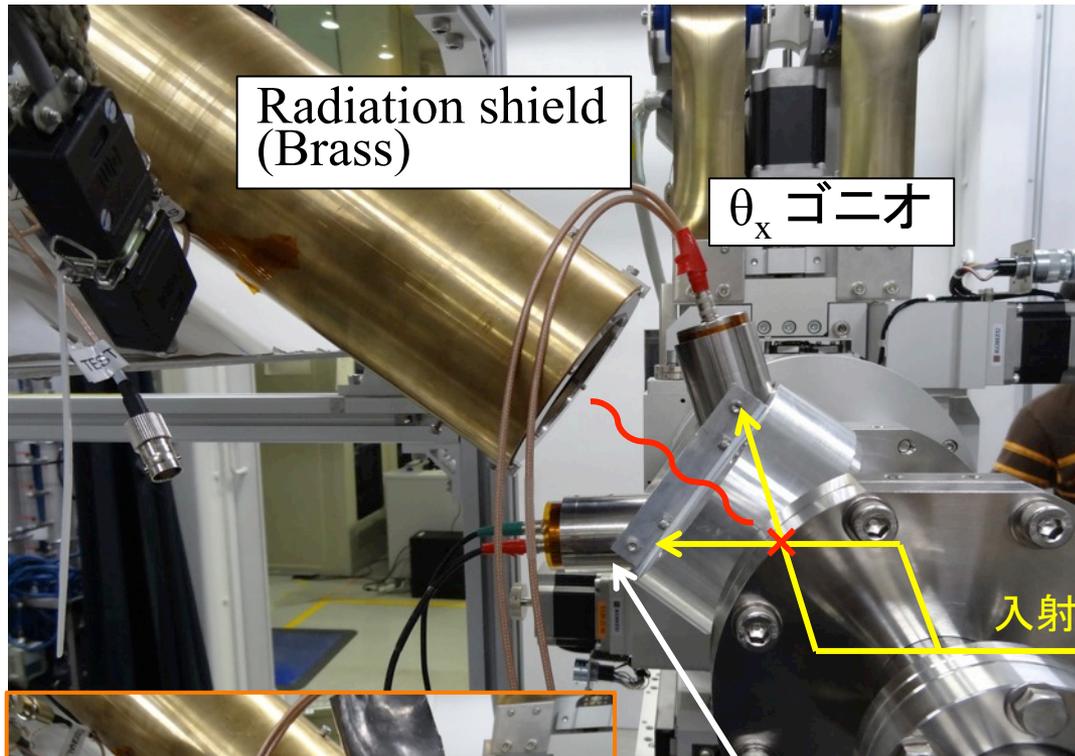
- $1 \mu\text{m}$ 集光ミラーで横方向を2桁絞る
- ⇒ ルミノシティの増加
- Ge 検出器をビーム軸から 36° 傾けてシグナルのテーパー穴と同じ軸上に Ge 結晶を配置

実験ハッチ全体の様子

ハッチ奥側からみて



チェンバー周りの拡大

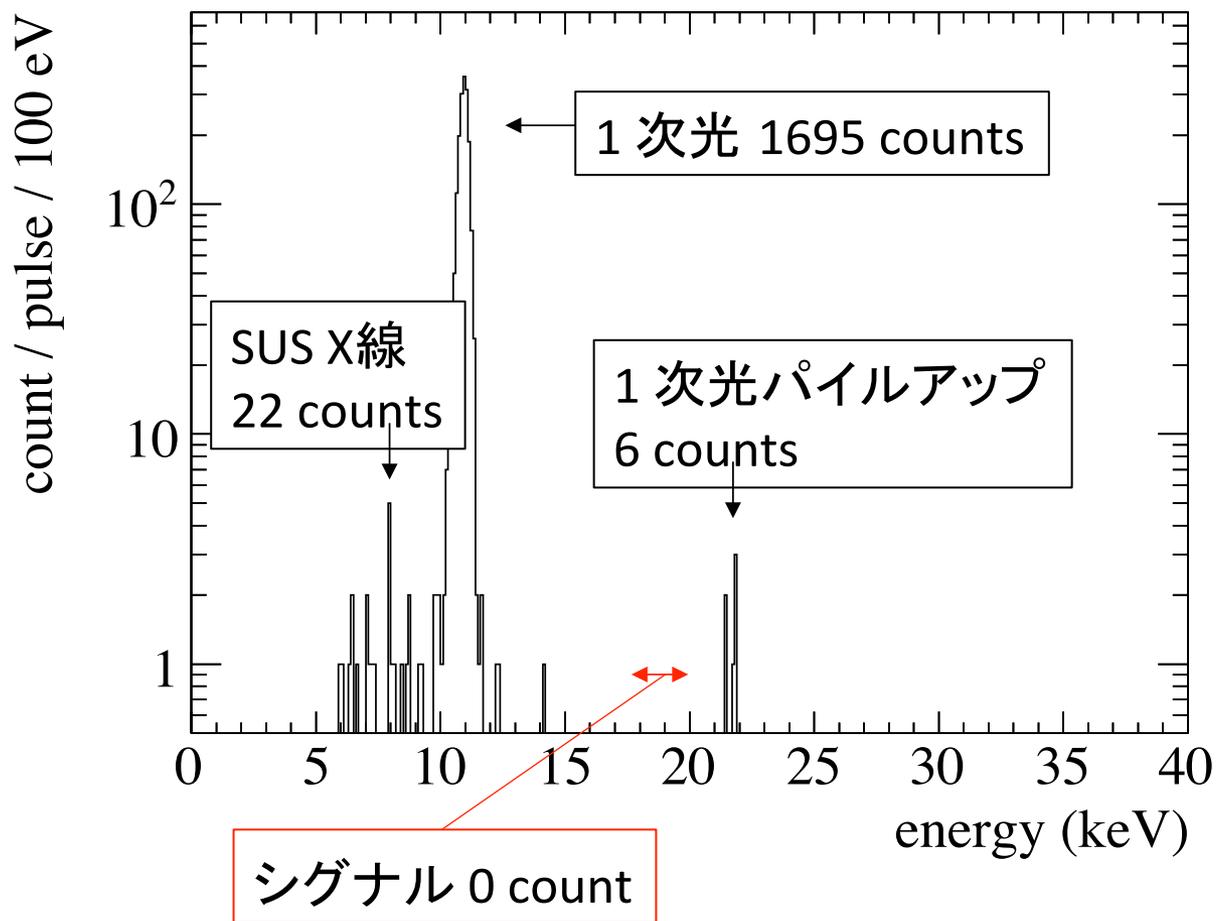


ビームダンプ兼
強度モニタ用 PD × 2
⇒ パルス毎に強度を記録

測定中は PD を鉛で巻いて漏れ光を遮断

測定結果

Ge スペクトル, timing cut 後

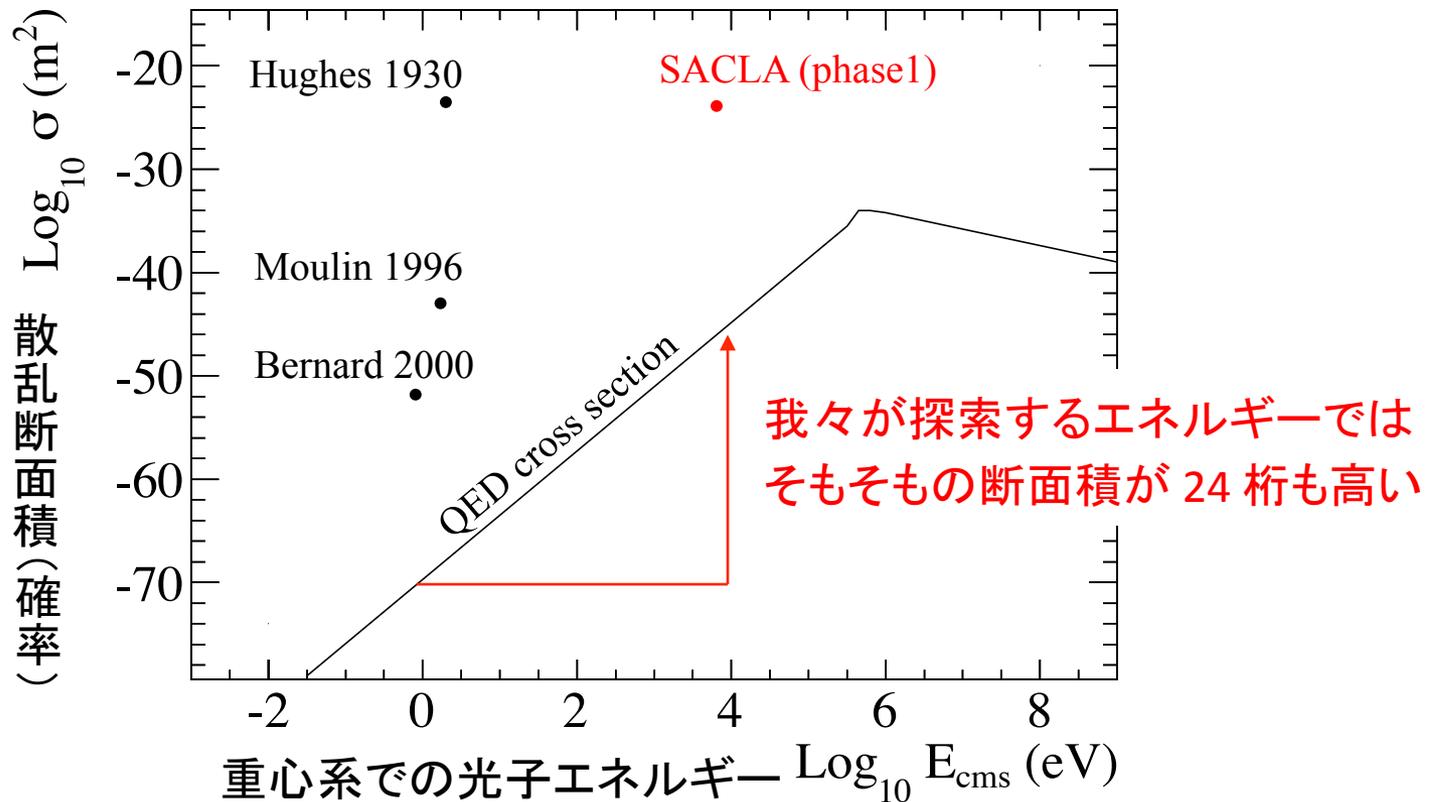


- シグナルは1発も観測されず
- 1発でも見えればnew physicsの可能性もあったのですが...

過去の実験とリミットの比較

- X線領域に(というより可視光以外で)最初のリミット

- *Phys. Lett. B* 732 (2014) 356



- 先は長いですが、まだまだ 1st phase です

Phase 2 でのゲイン

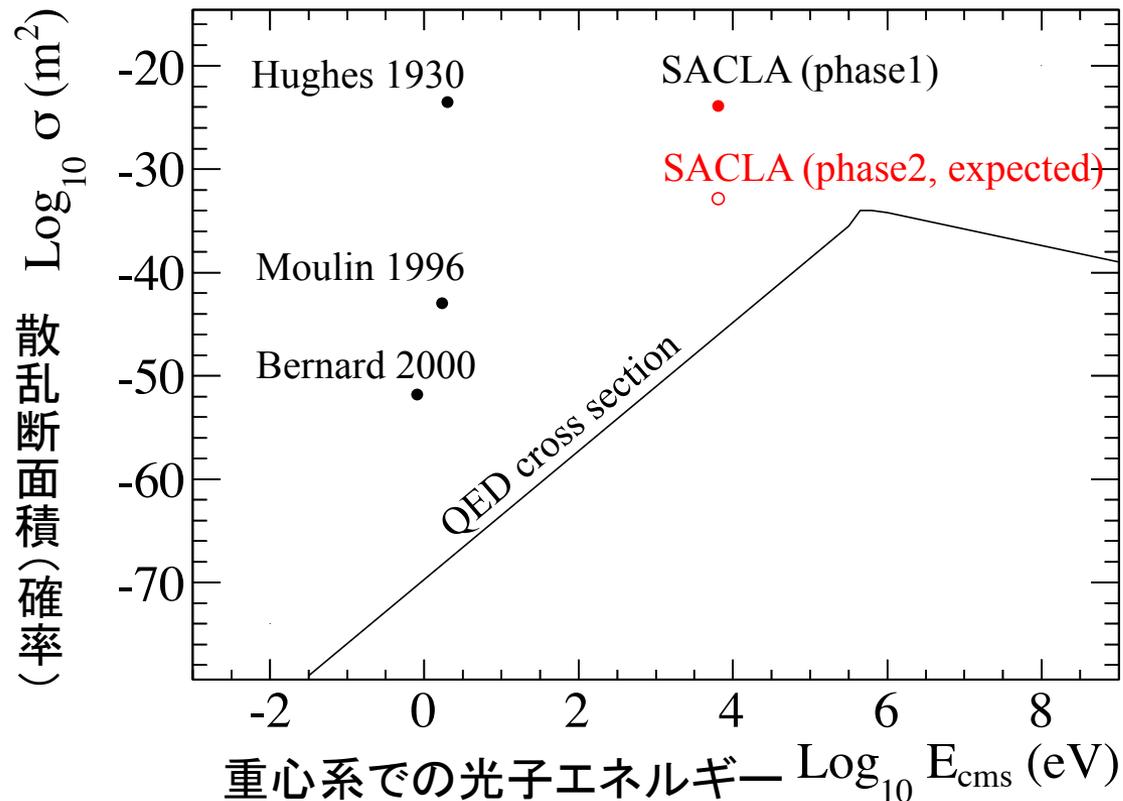
Phase1 → phase2 でのパラメータの変化と探索感度への寄与

パラメータ	変化	感度への依存性	ゲイン
ビーム強度 I	2	$\propto I^2$	4
ビーム単色性 $\Delta\omega/\omega$	1/200	$\propto (\Delta\omega/\omega)^{-2}$	4×10^4
回折効率 η	2.3	$\propto \eta^4$	30
統計 (繰り返し $f \times$ 時間 t)	1.5×2.7	$\propto (f \times t)^1$	4
検出効率 ϵ	0.4	$\propto \epsilon^1$	0.4
合計			8×10^6

SACLA 自体の単色性が design value (バンド幅 \sim eV) に達する寄与が最も大きく、全体で6-7桁のゲインが見込まれる。

Phase 2での期待感度

- 基本的なセットアップは変えずに, SACLAと検出器のアップグレードによって, 可視光実験も含め **過去最高の感度**となる



Phase2 での検出器

Phase2では集光点でのビーム強度が3桁上がる

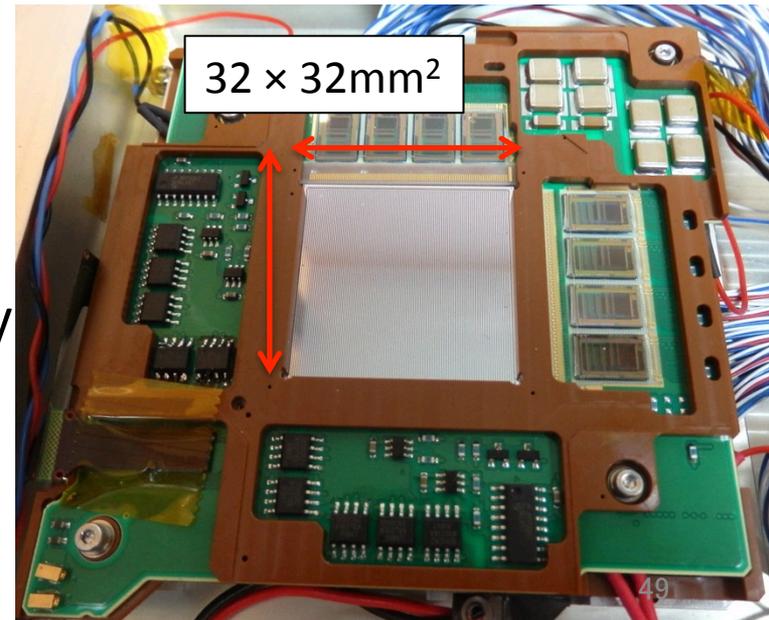
→バルクのGe結晶では大量のパイルアップで信号が埋もれてしまう
そこで

- 2次元検出器による位置情報を用いてパイルアップを除去
- また良いエネルギー分解能も必要 → Siを選択
- 30Hzがらくらく読めるようにピクセルではなく裏表両面ストリップ構造の検出器に変えることで, phase1 と同様にゼロBGが期待されている

検出器スペック

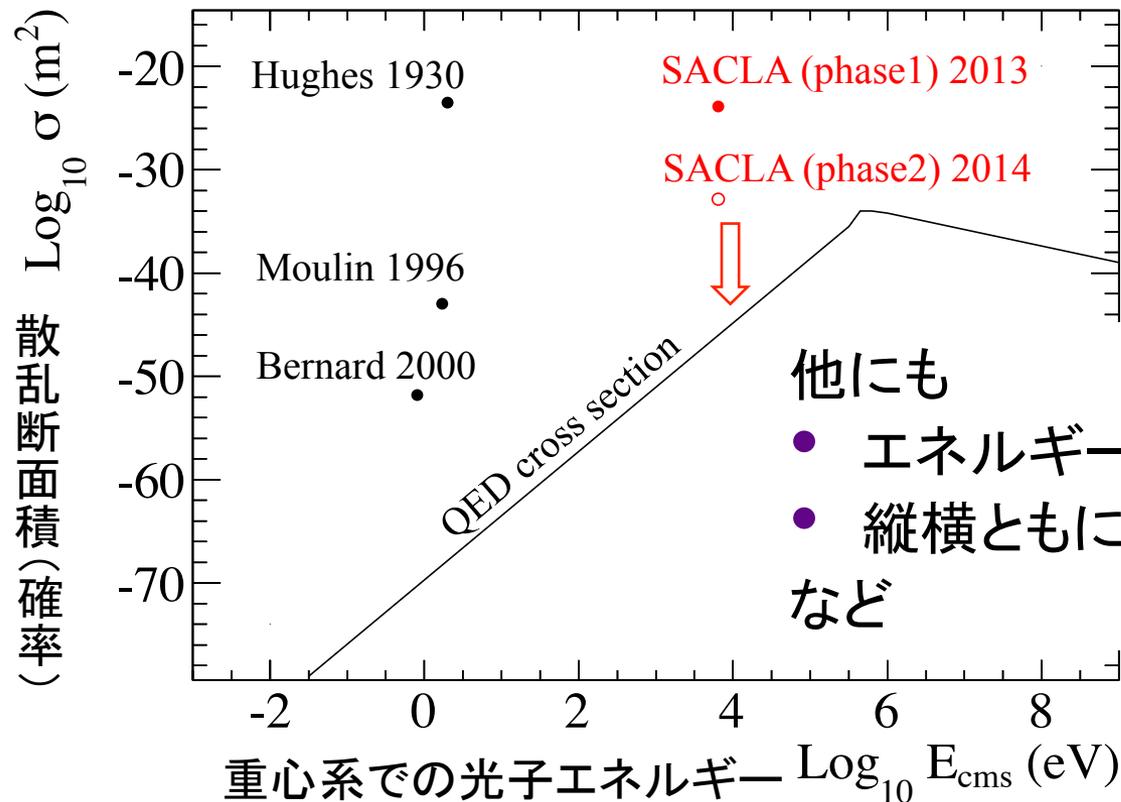
- 結晶寸法 : 32mm×32mm×t0.5mm
- ストリップ数 : 128 × 2
- ストリップ間隔 : 250μm
- エネルギー分解能(FWHM) : 1.1keV@22keV
- 検出効率 : 40% @ 20keV

(シード化前ですが,)10日後にSACLAで
実際に pre-measurement します



Phase 3 初観測へ向けて

- 残された伸びしろ
 - スプリッタでの回折効率(現状～10%)の4乗のロス
 - SACLA と SPring-8 の2ビームの直接衝突で4桁のゲイン
- 相互利用施設(ビーム同期はまだですが, すでに利用開始)



- もう一本ビームが入射できればビーム3本で induce → 4桁のゲイン

まとめ

新しい光技術を使って真空の構造を探る実験を行っている

アクション探索

- 探索の鍵となる長手のパルス磁石と、そのバンクを製作している
- 試作機で8 Tまで発生し、補強を強くすることでより高い磁場の発生が期待される
- 繰り返しは4.3T@1Hzを達成し、今後ロスの小さい磁石を製作してよりハイレートを目指す
- 既に前段実験としてパラフォトンの探索を行い、質量 eV 付近で過去最高の感度を達成した

光子光子散乱実験

- 昨年SACLAでphase1の実験を行い、X線領域での初探索を行った
- Phase2では、単色性などSACLAのアップグレードにより結果の大幅な改善が見込まれている
- 将来的にはphase3において光子光子散乱の初観測を目指している