

SPring-8/SACLAにおける 光子光子散乱の探索



山道智博、稲田聡明^A、山崎高幸^A、難波俊雄^A、浅井祥仁、小林富雄^B

玉作賢治^C、田中義人^D、犬伏雄一^E、澤田桂^C、矢橋牧名^C、石川哲也^C

高橋忠幸^F、渡辺伸^F、佐藤悟朗^G

東大理、東大素セ^A、KEK^B、理研/SPring-8^C、兵庫大院物質理^D

JASRI^E、ISAS/JAXA^F、早大理工^G

日本物理学会 2016年秋季大会@宮崎大学 2016/09/22

目次

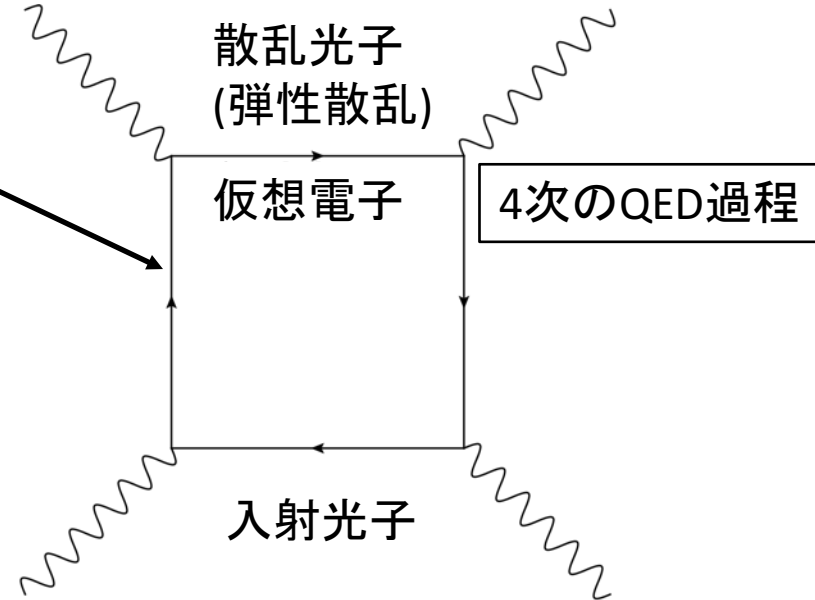
- ・イントロダクション
- ・これまでの実験/実験結果
- ・QED断面積に到達する方策について

光子光子散乱

◆光子光子散乱(photon-photon scattering)

- 量子電磁力学(QED)の予言(1936年)
- 真空の非線形効果(仮想電子ループ)
- 実光子同士の散乱は未観測
- QEDの重要な検証

- 未知粒子の寄与が有る場合、
断面積がエンハンス → new physics
ex) Axion etc...



◆QEDの予言する断面積

- 重心系光子エネルギー $\omega_{cm} < 700\text{keV}$ (直線同方向偏極)に対し

$$\left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_{\text{linear, same}} = \frac{\alpha^4 \omega_{cm}^6}{(180\pi)^2 m_e^8} (260\cos^4\theta + 328\cos^2\theta + 580)$$

$$\sigma_{\text{linear, same}} = 3.5 \times 10^{-70} (\omega_{cm}[\text{eV}])^6 [\text{m}^2]$$

- 断面積は ω_{cm} の6乗に比例、X線域では可視光域(先行実験)の24桁上
- X線を利用した新しい光子光子散乱実験を行ってきた

X線自由電子レーザー(XFEL)施設 SACLA

-世界最高強度のX線自由電子レーザー(XFEL)

◆スペック

-高瞬間強度($\sim 6 \times 10^{11}$ photon/pulse)・短パルス(<10fs) → 散乱実験に適した光源

-ビーム幅: 縦横200 μ m (FWHM)

1 μ mコヒーレント集光を利用可能 → 小ビーム断面積 = 高ルミノシティ

-繰り返し60Hz(@2016)

-入射光子エネルギー: 10.985keVを使用

線幅(FWHM): ~ 50 eV



交差方法:X線ビームコライダー

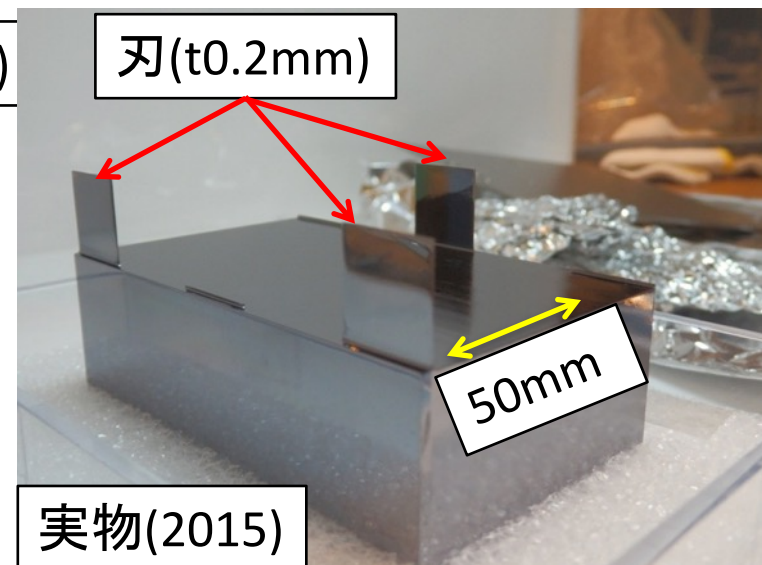
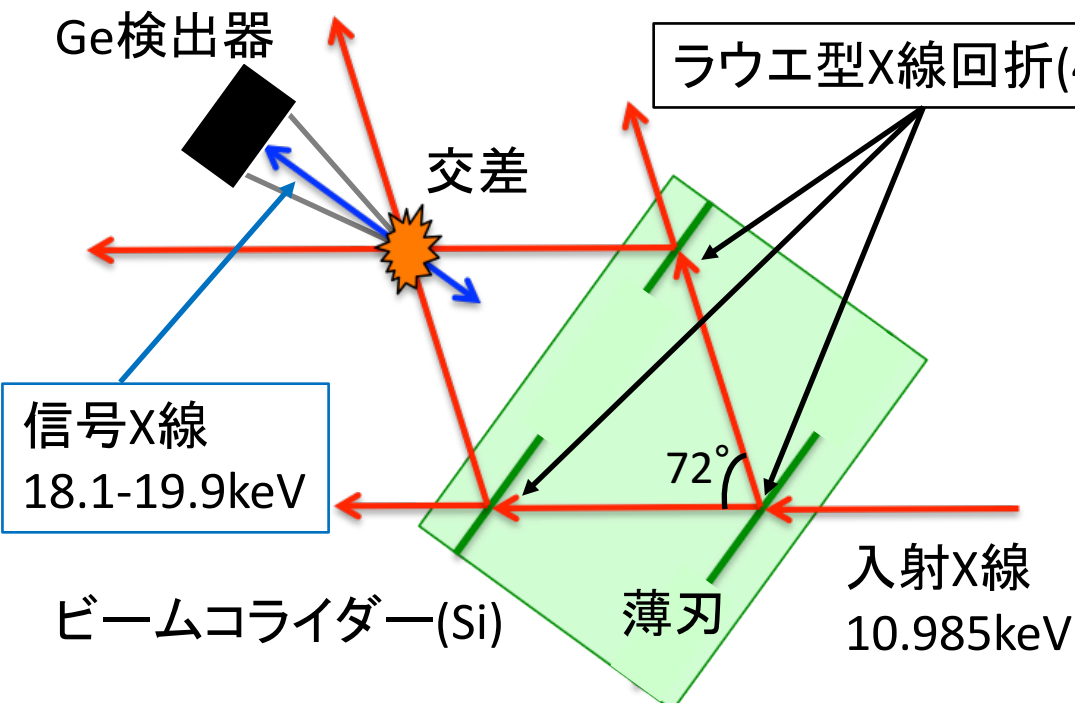
-SACLAの集光X線ビーム(幅 $1\mu\text{m}/10\text{fs}$)の交差は難しい
→X線回折により一本のビームを分けてぶつける(X線光学分野の確立技術)

◆ラウエ型X線ビームコライダー

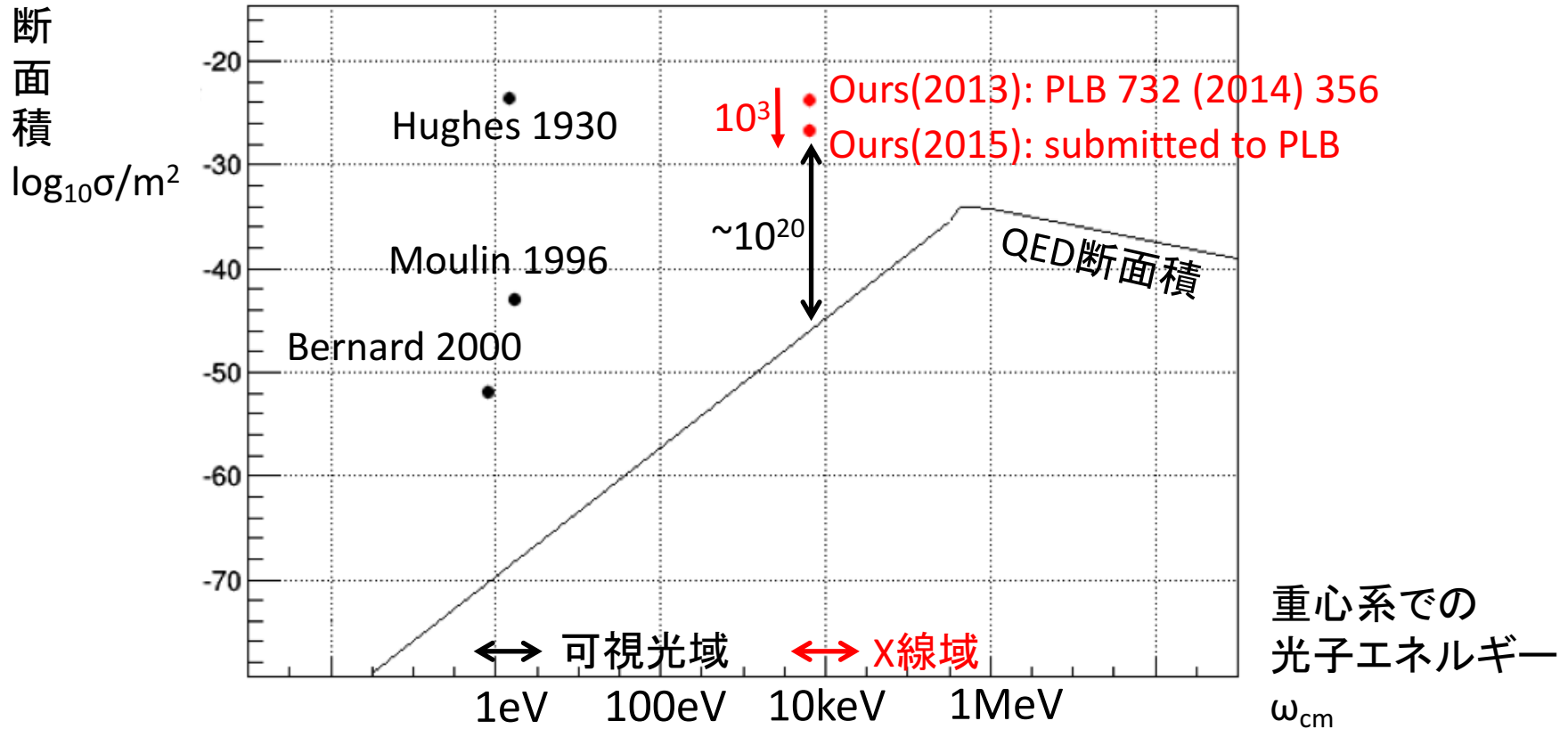
-Si単結晶から切り出した薄刃でのラウエ型X線回折でビーム分割・交差

- 1)回折可能線幅: $\sim 100\text{meV}$ → 入射X線はモノクロで 60meV に単色化
- 2)回折効率: 二回で $\sim 2\%$, 刃が薄いほど高い

-最新の実験(2015)では, 加工限界($t0.2\text{mm}$)の薄刃を持つ最高性能のものを使用



これまでの実験結果



- 2013年/2015年にSACLAのビームタイムを取得し実験
- 概念実証実験(2013)の知見からコライダーを最適化したセットアップ
+SACLA性能向上により, 2015年の実験感度は3桁向上している
- 断面積リミット(95%C.L.): $1.9 \times 10^{-27}[\text{m}^2]$ @6.5keV(2015)
QED断面積 $2.5 \times 10^{-47}[\text{m}^2]$ @6.5keV と比べると**20桁弱上**
- QEDに迫るためには大幅な感度向上が必要(本講演の主題, ①~⑤)

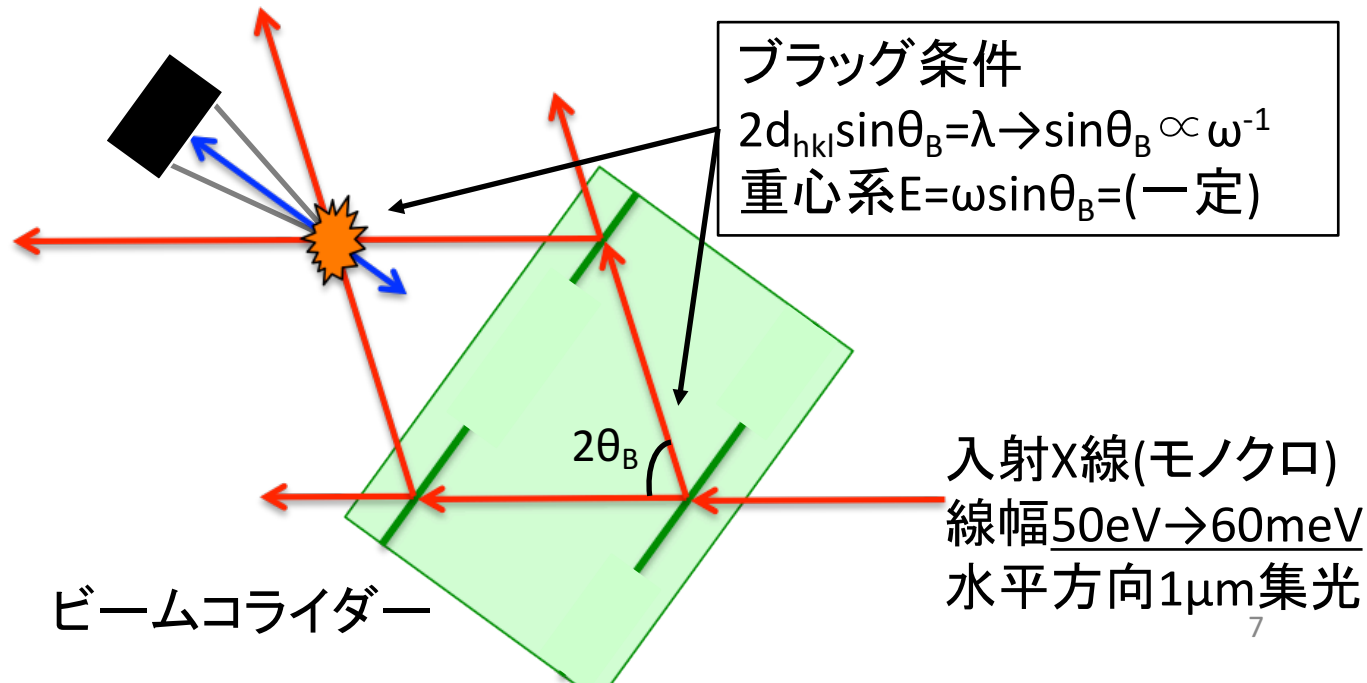
現行セットアップの問題点

- 1) X線回折可能線幅がSACLAの線幅より3桁小さい→単色化により6桁感度減少
- 2) ラウエ型X線回折が~2%(二回)と低効率→4桁感度で損
- 3) 回折が起こらなくなるため, 回折面(鉛直)方向の集光が出来ない→2桁損
→合計12桁損
- 4) ブラッグ条件で回折角が決まり重心系エネルギーが変えられない

-ラウエ型コライダーでどこまでいけるか?(→次頁)

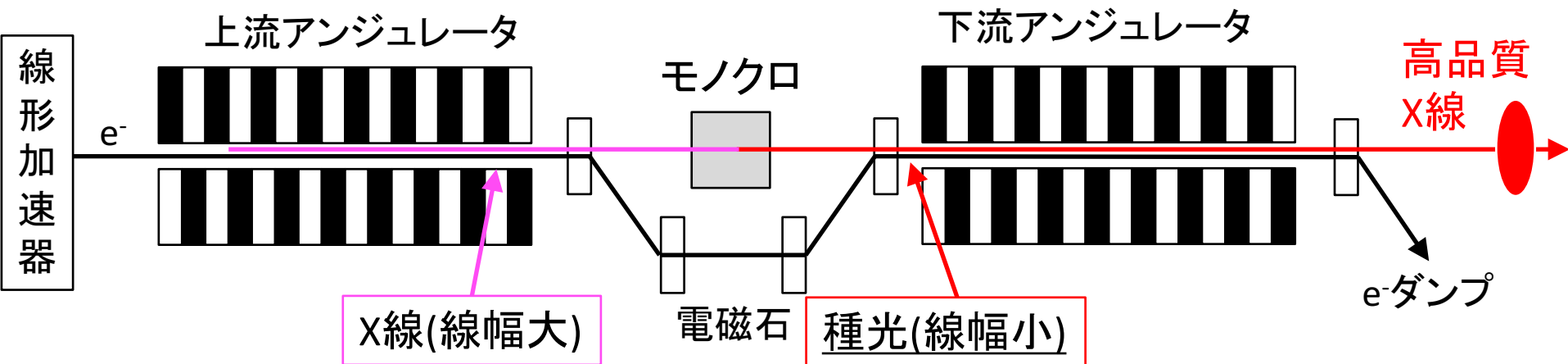
回折効率(二回): 2.48%

回折効率(二回)
: 1.55%



① SACLA シード化

- ラウエ型コライダーは加工限界まで刃を薄くしており, 回折性能を上げられない
- 単色化による損失分は光源の線幅依存であり, SACLAの性能が上がれば感度向上が可能→SACLA シード化



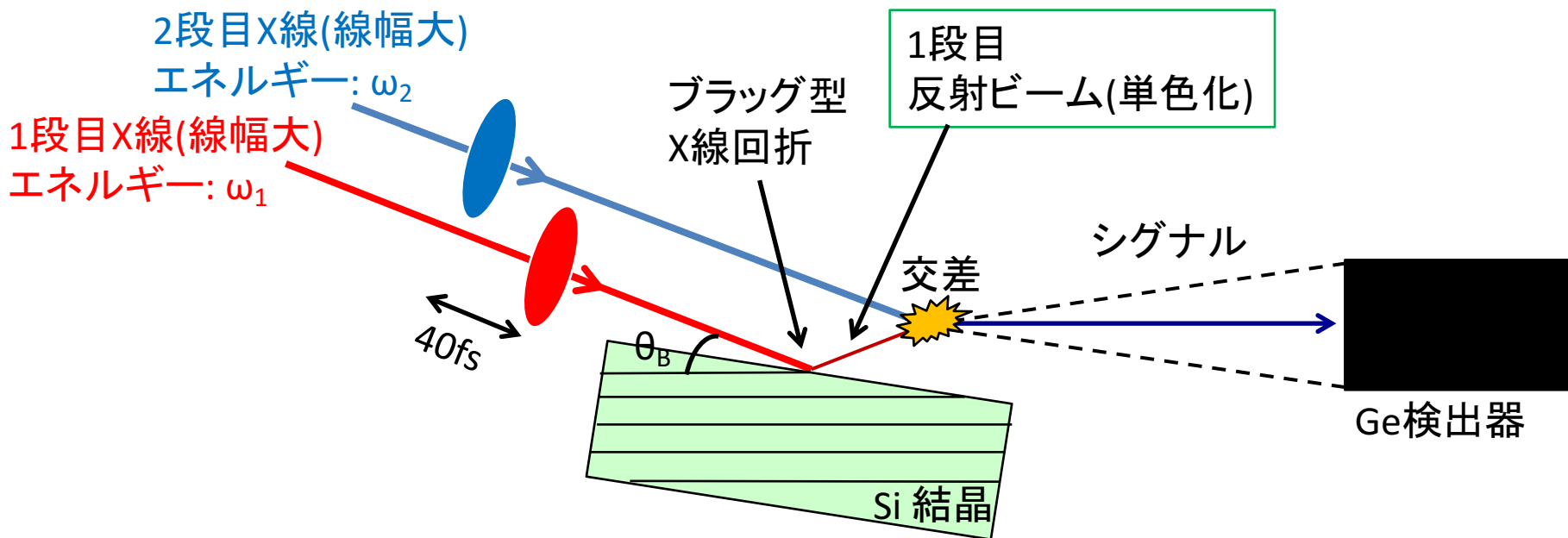
◆ SACLAのシード化(self-seeding)

- 前段アンジュレータでの発振X線を単色化して, 下段のX線発振の種にする(導入中)
- 線幅が $\sim 1\text{eV}$ に改善
- 単色化の効率が2桁上がり, ルミノシティが4桁向上

-これ以上感度を上げるには交差の方式自体を変える必要

②SACLA 二色発振

- 二色発振: 波長・時間のずれたX線ビーム二本の同時発振
- SACLA自体が同軸上に並んだ2個の光源になる
- 片方を曲げるだけで衝突が可能, 効率が上がる(下図)



- 2段階目は単色化ロス無し → $\sim 10^3$ ゲイン
- ラウエ型($\sim 2\% \times 2\%$)よりブラッグ型($\sim 90\%$)は高回折効率 → $\sim 10^3$ ゲイン
- ルミノシティで**6桁強**の向上が可能
- 2段階目のエネルギー調整で重心系エネルギーが可変
- 片方が単色化される/正面衝突できない(強く集光できない)事がネック

③SACLA+SPring-8 直接衝突

-結晶でX線の進行方向を変えるセットアップには限界がある
→SACLAのX線に加え別のX線光源を使って直接衝突

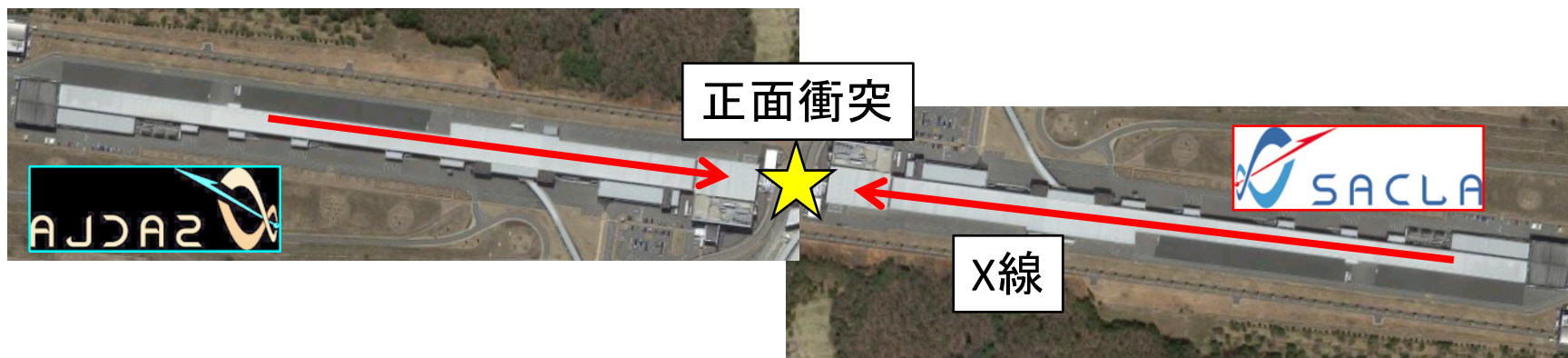
◆SACLA 相互利用施設(EH5)

- SPring-8 BL32/SACLAを同時利用可能
- BL32: 強度 $\sim 10^3$ photon/pulse@11keV (Hモード), 40MHz, パルス長40ps
- 正面衝突なので縦横50nm集光(確立された技術)が利用可
→60Hz 2 day DAQで**11桁**の感度向上が可能(QEDの9桁上)
- SPring-8が連続光源に近く瞬間強度が低い(~9桁)点で損をしている



④ SACLA+SACLA

- 仮にSACLAの対面にもう一個SACLAがあるとして、X線を正面衝突させた場合観測は可能か？
- それぞれの強度 10^{12} photons/pulse @11keV
- 縦横50nm集光を仮定
- 60Hz 2 day DAQで~1回光子光子散乱が起こる
- 重心系エネルギーは可変
- SACLA×2で実験すれば十分光子光子散乱を観測可能→最終的なゴール(X線)
- SACLAの2本目は現在無いので、X線域からは離れるが現在ある光源で観測する方法も考えてみる(次頁⑤)



⑤SACLA共用の可視光レーザーシステム

THALES PWレーザー(導入中)



-SACLAにはX線ポンププローブ用の、
TW/PW可視光レーザーシステムが複数存在

-既に2.5TWレーザーが共用設備として
利用可能

-更に500TW×2のPWレーザーが導入中
→光子数 $\sim 10^{20}$ /pulseの非常に強い光源
光子光子散乱に有用

-可視光+XFEL: 22pSF-9~11

可視光+可視光: 以降のスライド

レーザースペック	Hidra-100 2.5TW	THALES 500TW×2(導入中)
波長	800nm	
パルス強度	100 mJ = 4×10^{17} photon/pulse	12.5 J = 5×10^{19} photon/pulse
パルス幅	40fs	10fs
繰り返し	10Hz	1Hz

四光波混合を用いた光子光子散乱

-可視光域では断面積が24桁減るので工夫が要る

◆四光波混合(非線形光学現象)

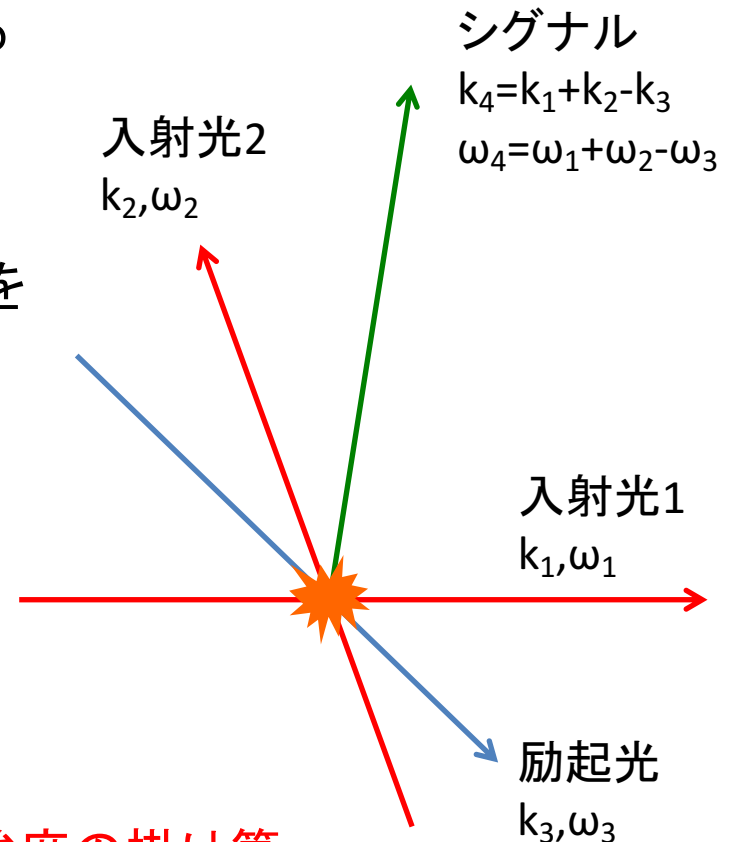
-交差させる二つの入射光に加え
散乱光と同じエネルギー/波数ベクトルの励起光を
交差点に入れると, もう片方の散乱光が励起

-ビーム二本に比べ劇的に信号数が増える
ビーム強度の掛け算に比例して感度が向上
→可視光域で有利な方法

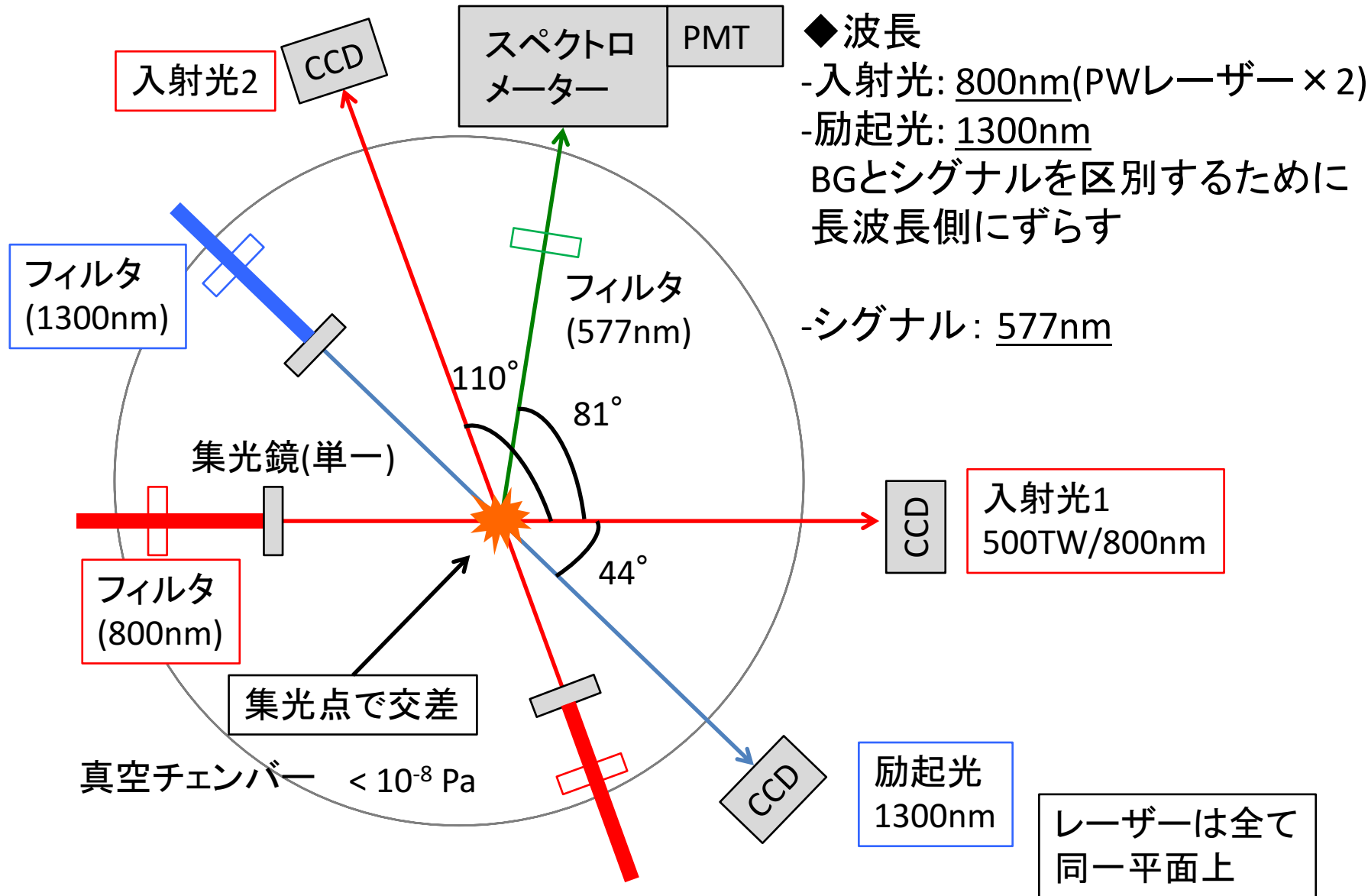
四光波混合信号数

$$N_{4,QED} = \epsilon_{PM} \epsilon_{Spec} \epsilon_{Osc} \frac{16}{2025} \left(\frac{2}{\pi\sqrt{3}} \right)^3 \frac{\omega_4 E_1 E_2 E_3}{m_e^4} \frac{r_e^4}{\omega^2 \tau^2} K^2$$

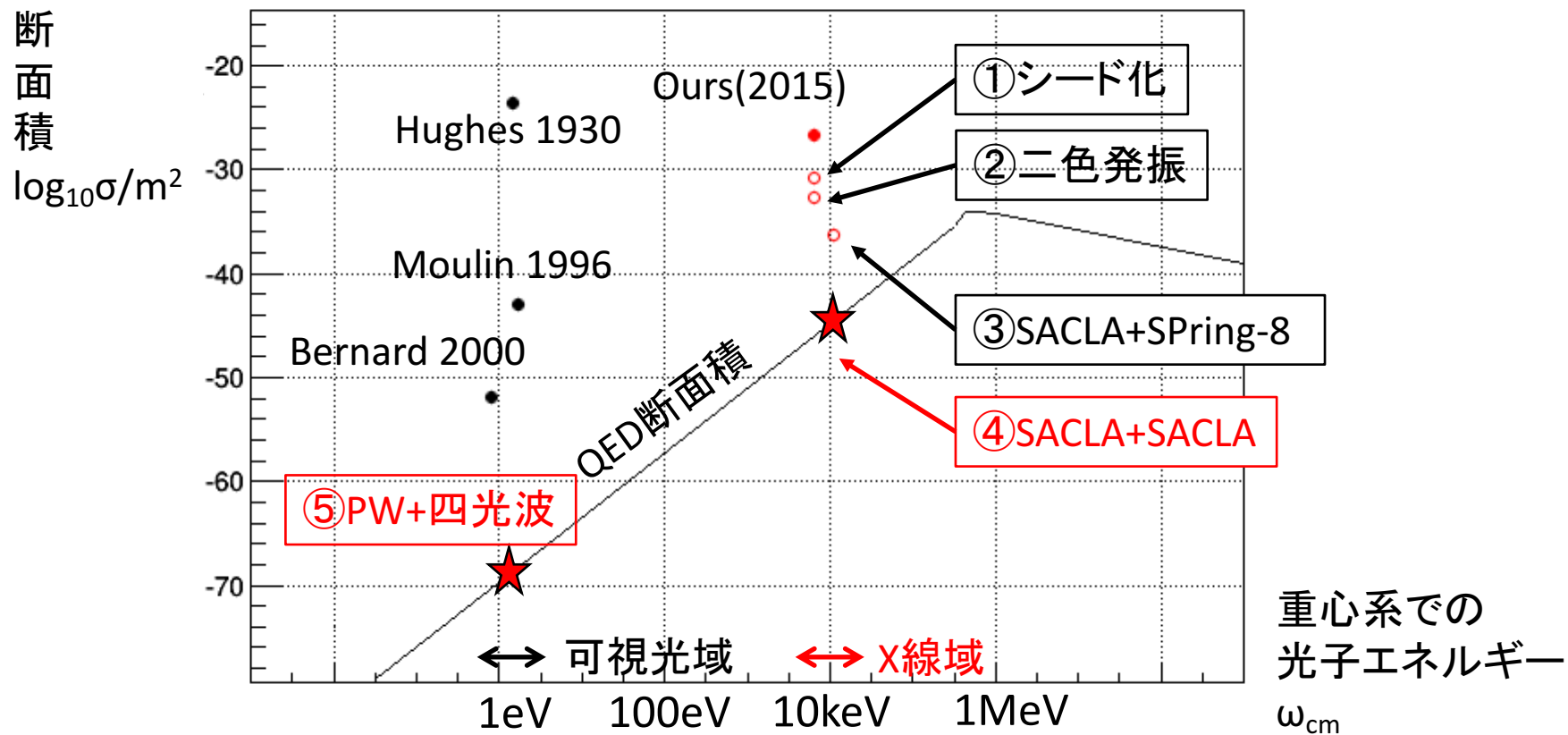
ビーム強度の掛け算



ビーム衝突系 (概略)



予想される感度(まとめ)



-1300nmの出力: 100mJ(2.5TW)を仮定

-4 μ m集光で損失無く交差できた場合, 信号のレート: $N=6 \times 10^{-4}$ /pulse

→1Hz 24h DAQで~50 photon

-OBGなら, 現在ある光源でQEDに迫る感度での散乱実験が可能

→最終的なゴール(可視光)

まとめ

-実光子の光子光子散乱は未観測:QEDの重要な検証

-断面積が24桁大きく, 先行実験で探索されていない

X線領域での散乱実験を行っている

-ラウエ型X線ビームコライダーを使用したセットアップでは,
シード化で4桁感度を上げるのが限界

-二色発振+Bragg型回折: 6桁感度向上可能

-SACLA+SPring-8の正面衝突: 11桁の感度向上

-SACLA+SACLAの正面衝突が出来ればQED事象の観測が可能

→最終的なゴール(X線)

-SACLAにはX線に同期した複数の可視光レーザーシステムが存在

-1PWレーザーを用いた四光波混合実験により,

QED断面積に迫る感度での探索実験が可能

→最終的なゴール(可視光)