量子エレクトロニクス研究会　2015年師走

# 光を使って真空・時空を探る

浅井祥仁（東京大学理学系研究科）

私が一番出来の悪いコラボレーターで
これらの実験は、いろいろな人との共同で展開しています

**ちょっとブラックな素粒子屋**: 東京大学理学系研究科＋素粒子物理国際研究センター

難波俊雄、山崎高幸、稲田聡明、山道智博、
樊星、周健治、清野結大、上岡修星、村吉諄之、
石田明、浅井祥仁 (Ps BECグループも含む)

**レーザーのプロ** 東京大学理学系研究科＋工学系研究科

APSA
Advanced Photon Science Alliance

吉岡孝高、大間知潤子、五神真

**X線のプロ** SACLA, Spring8

玉作賢治、田中義人、澤田桂、犬伏雄一、
矢橋牧名、石川哲也

**磁石のプロ** 東京大学物性研究所＋東北大学金属材料研究所

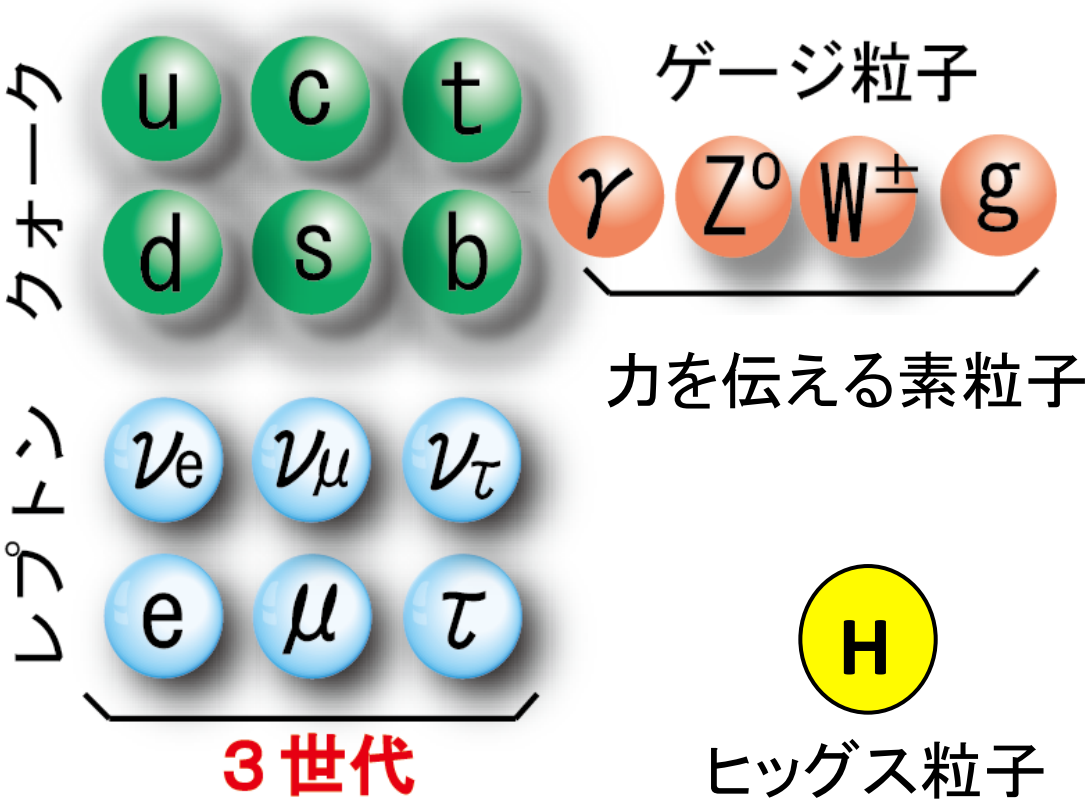
Neutron Science Laboratory The University of Tokyo

Research

松尾晶、金道浩一、野尻浩之

# 素粒子物理学の理解＝標準理論

## 標準理論




物質を形成する素粒子

電磁量子力学(QED)
電弱統一理論(EW)
量子色力学(QCD)

3つの理論の合体

1. 物質
   クォーク、レプトン
   フェルミオン (spin ½)
   3世代ある。

2. 力を伝搬するのは
   ベクトルボソン　(spin 1)
   電磁気力：$\gamma$
   弱い力：$W^{\pm}, Z^0$
   強い力：g (8つグルオン)

   **ゲージ原理**

3. ヒッグス粒子　質量の起源

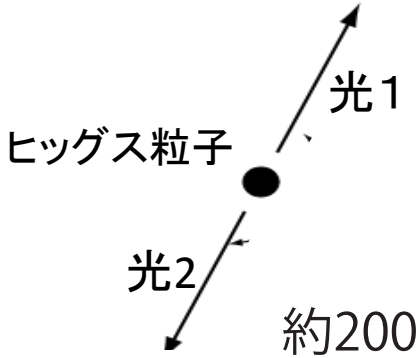
ずいぶん長い前置きでしたが、、、

# お品書き

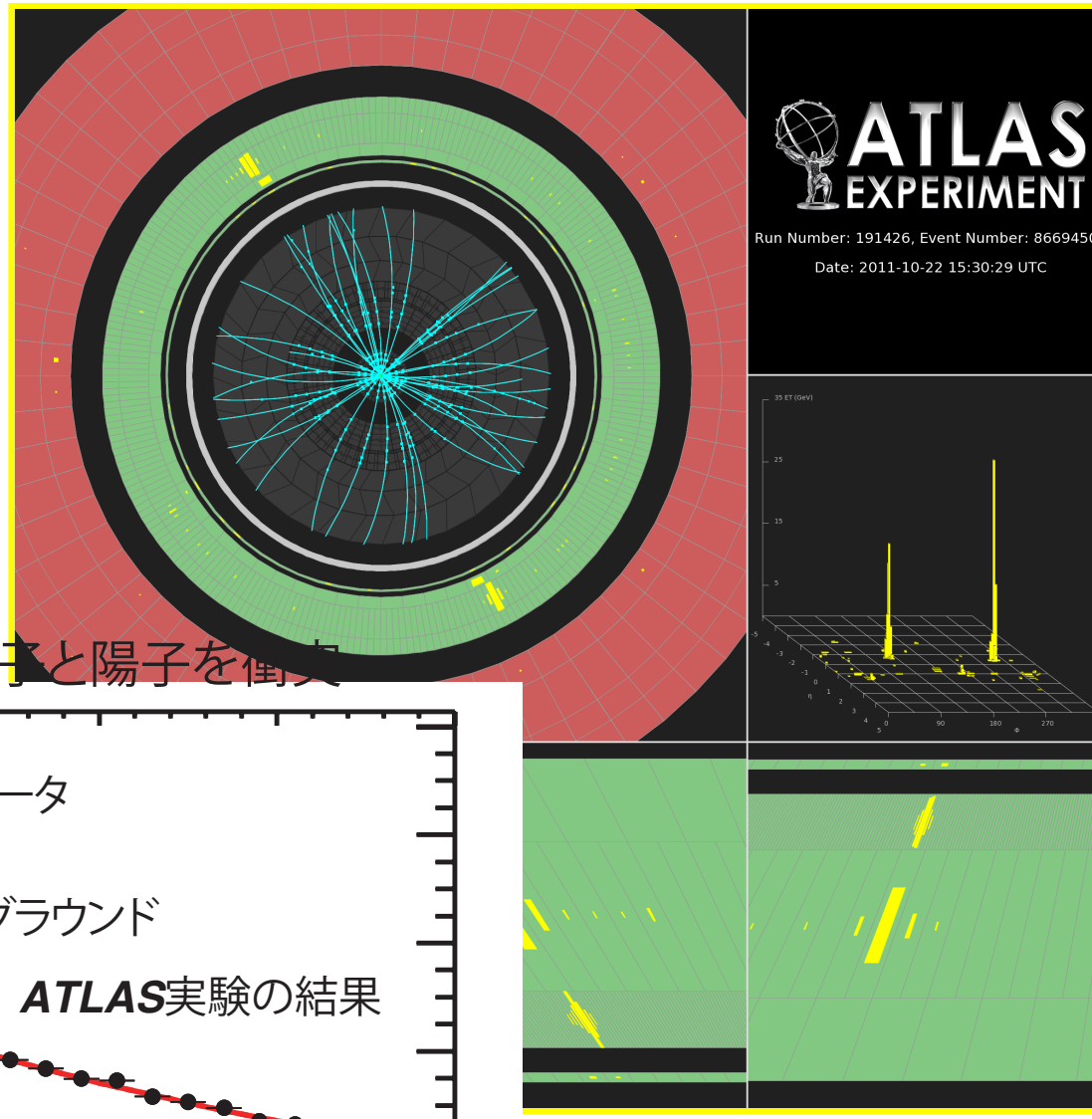
1. 新しい素粒子物理の時代
2. 真空を探る
   3つの実験
3. 未知の素粒子を直接探す
   1つの実験
4. 時空を探る
   Proposal思案中
5. まとめ

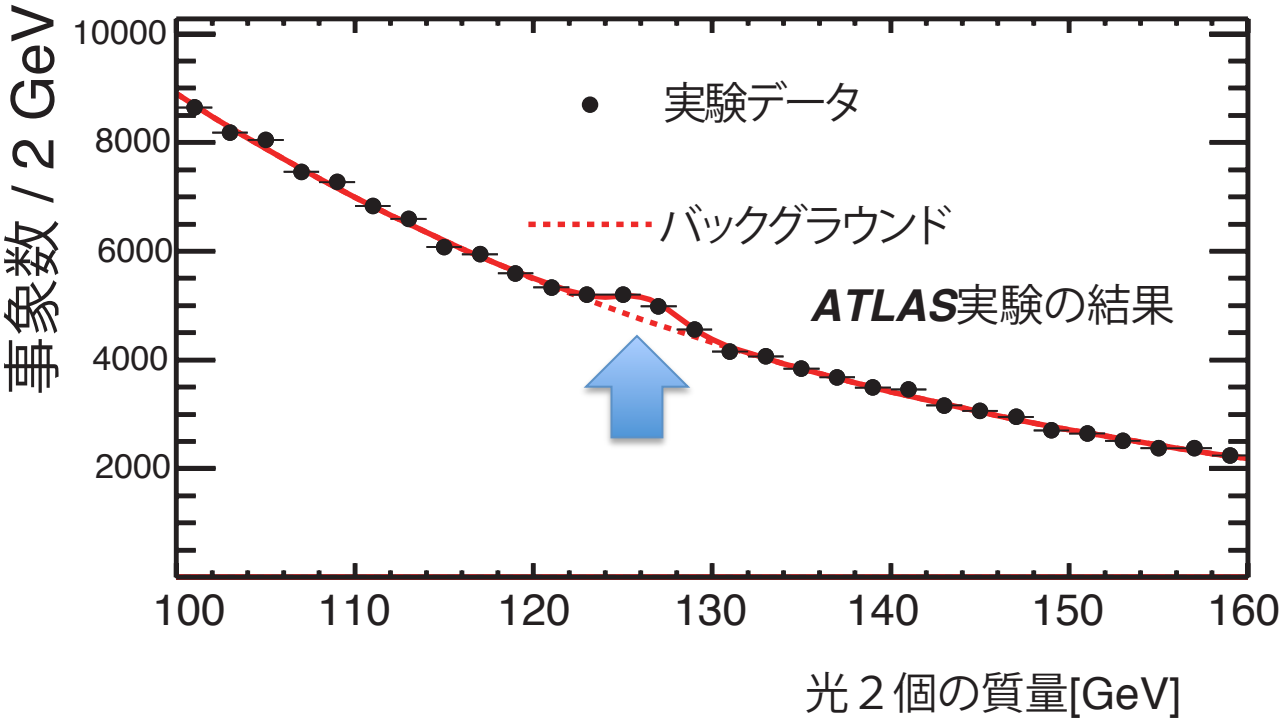
# ヒッグス粒子見つかった（H→γγ）

二つのγ線が含まれる反応を探す。




約2000兆回　陽子と陽子を衝突



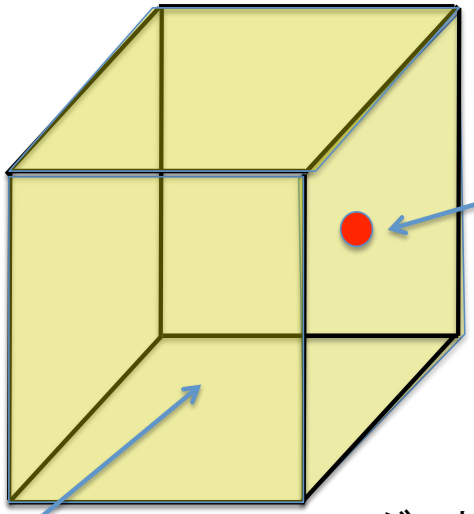
何故 「真空」なのか？

# ヒッグスの発見＝新しい時代の幕開け

時空

・超対称性
・マクロな重力と
ミクロな素粒子の融合
・余剰次元

・宇宙の誕生
と進化
・暗黒エネル
ギー



素粒子

真空

・ヒッグス粒子（質量の起源）
・自発的に対称性の破れ
→多様な宇宙

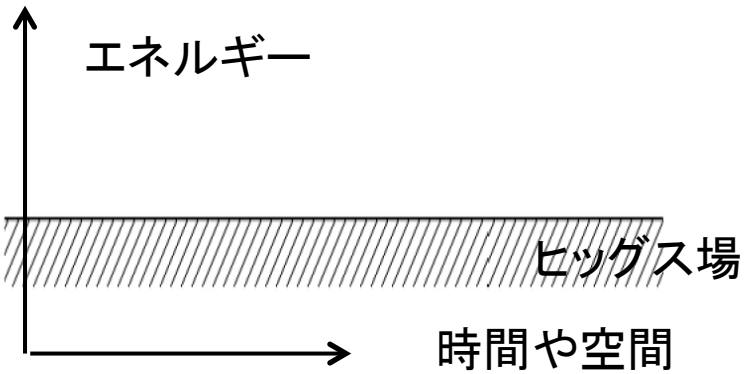
**ヒッグスの発見**
（LHCの１つめの目的）

**超対称性の発見（まだ。。）**
（LHCのもう一つの目的）
フェルミオンとボソンの対称性

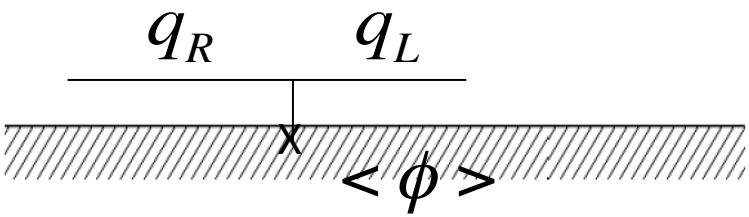
*Particle* Physics
従来“素粒子”研究

時空、真空、素粒子
一体化した研究

# 真空の場って？

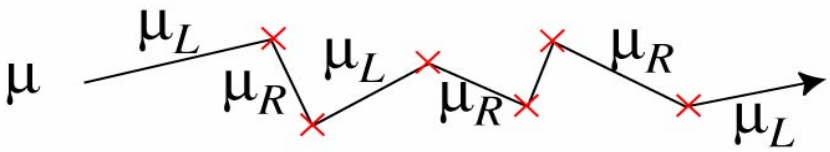



ニュートリのような「弱い力の電荷」を持った場がたまっている。



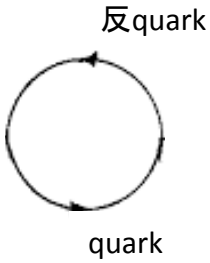

ヒッグス場に満たされた真空

素粒子（フェルミ粒子）の質量　mixing parameter




こういった実際に存在している場ばかりでなく、

仮想電子や仮想光子
QEDの真空




仮想クォークや仮想グルオン
QCDの真空

いろいろな場が真空に潜んでいる。

# いろいろな場がある:エネルギーのスケールで

エネルギー

対応する波長

$10^{34}$ K　$10^{30}$ eV　$10^{-37}$ m

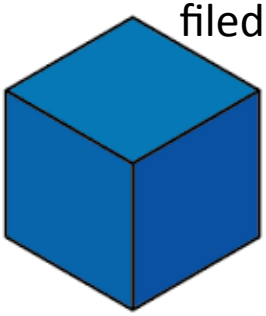
**Planck Scale ?**

**GUT field**

$10^{24}$ K　$10^{20}$ eV　$10^{-27}$ m

*Discovered*

Higgs quantum filed



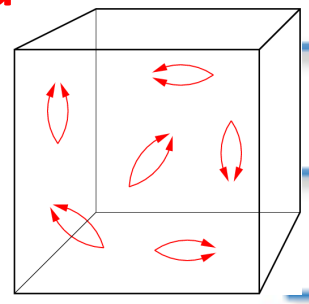
electron virtual filed

**Higgs Field**

$10^{14}$ K　$10^{10}$ eV　$10^{-17}$ m

**QCD Field**

**QED Field**



gamma-ray

X-ray

$10^{4}$ K　$10^{0}$ eV　$10^{-7}$ m

Visible light

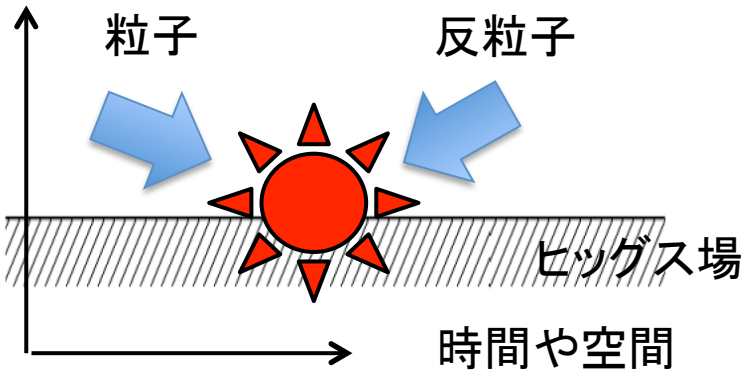
**Dark Eenergy ?**

**Axion Dilaton ?**

Microwave

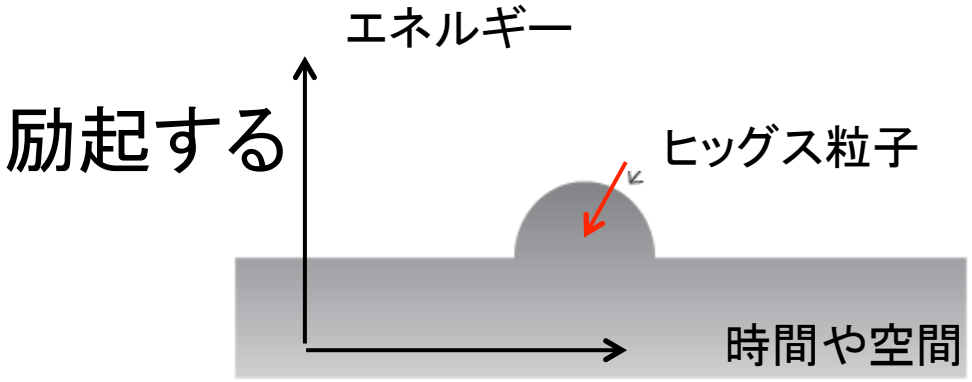
$10^{-6}$ K　$10^{-10}$ eV　$10^{3}$ m

# 何故　光で探るのか？




粒子と反粒子衝突　消えてなくなる。
エネルギーだけが残り場へ。
場が励起され
**$E=mc^2$　エネルギーが粒子になる。**

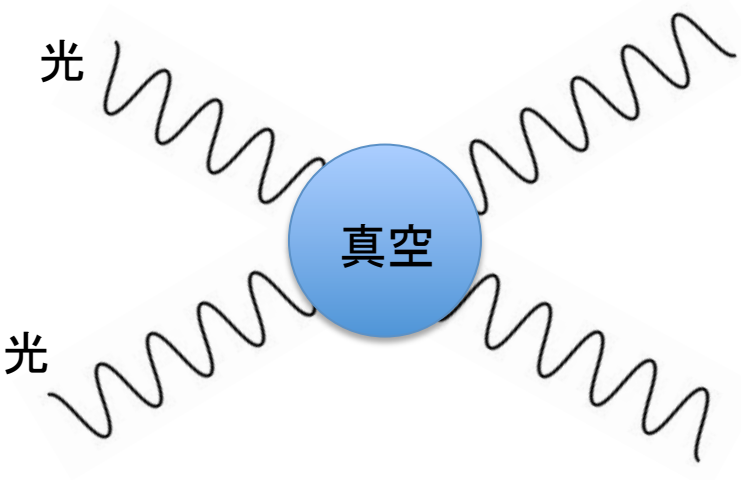
LHCでは、陽子の中のグルオンと
グルオン（光と同じゲージ粒子）を衝突させている。




1）　光やグルオンの
　　反粒子は、自分自身
　　光子・光子衝突は
　　コライダー
2）　真空の性質
　　方向がない。スピン0
　　スピン0を選択的に
　　スピン　0か2（重力？）
　　スピン1は行かない
3）　コヒーレンシー

# 2. 真空を探る:　基本は　光子・光子　散乱

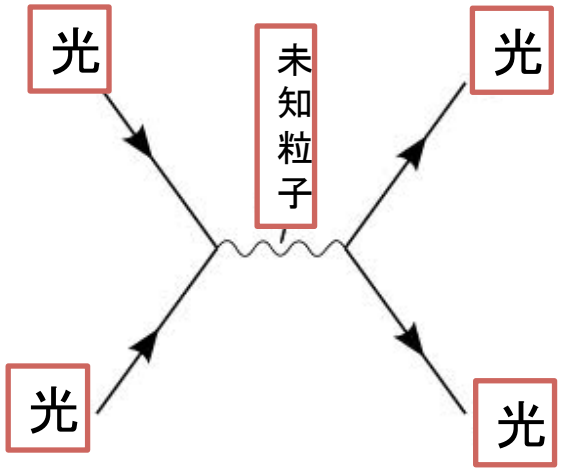
光同士は反応しないはず。真空の量子効果や未知の場




DE（ダークエネルギー？meV）
Dilaton/Axion?? (未知粒子）
QED（電子が仮想的に　KeV）
????? (MeV領域は未知）
QCD（クォークが仮想的に MeV）
電弱（ヒッグス場満ちている 100GeV）

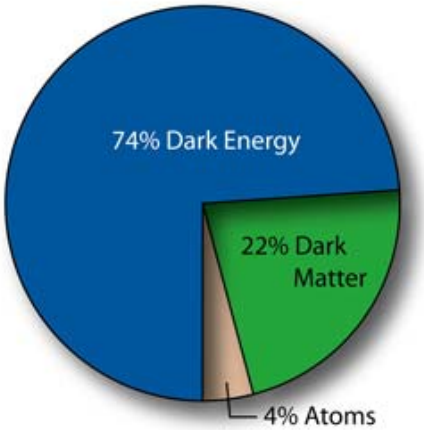
ミリ波
可視光
X線
γ線

真空の量子効果（QED,QCD)自体が
なかなか起きないくらい小さい。
→　これ自体がターゲット
→　未知の場を探すバックグラウンド　小さい




黒色の反応では;

スピンが0や2の未知粒子
が存在する場合は、
直接反応する。



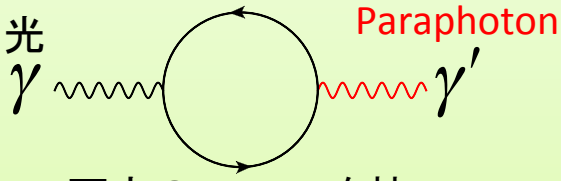

宇宙の大部分は未知の素粒子・真空エネルギー

重い超対称性粒子の探索（LHC）
SUSYでない場合　軽い暗黒物質が有力

**3つ大きな可能性がある。**

## Paraphoton (Hidden photon)

- Extra U(1) Gauge Bosonは理論的に不可欠
- スピン1
- MeVだと**暗黒物質の候補**
- 光子と paraphoton の混合




両方の charge を持つ
重いフェルミオン

## Axion

- QCDのCPを回復させる PQ 対称性
- **暗黒物質のよい候補**
- スピン　0　パリティー負

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

Bの向きと光の偏極面が一致すると　光→axion

## Dilaton

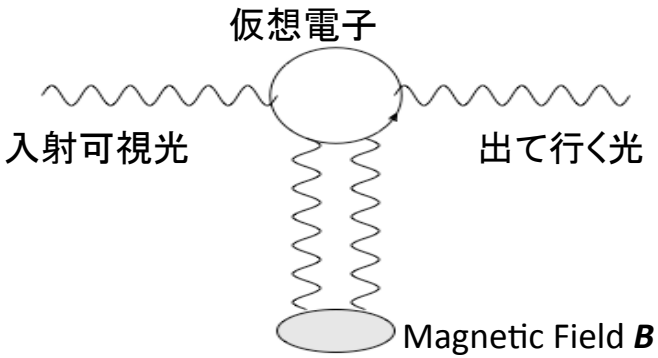
- 重力理論で不可欠
- **インフレーションのタネ**？
- スピン　0　パリティー正 スカラー粒子

$$F_{\mu\nu}F^{\mu\nu}d$$

$$= g_{d\gamma\gamma}(B^2 - E^2)d$$

Bの向きと光の偏極面が直交すると　光→dilaton

# 実験1）強力な磁場を使って




磁場に垂直成分と水平成分で
複屈折現象が起こる。
偏光面が変化する

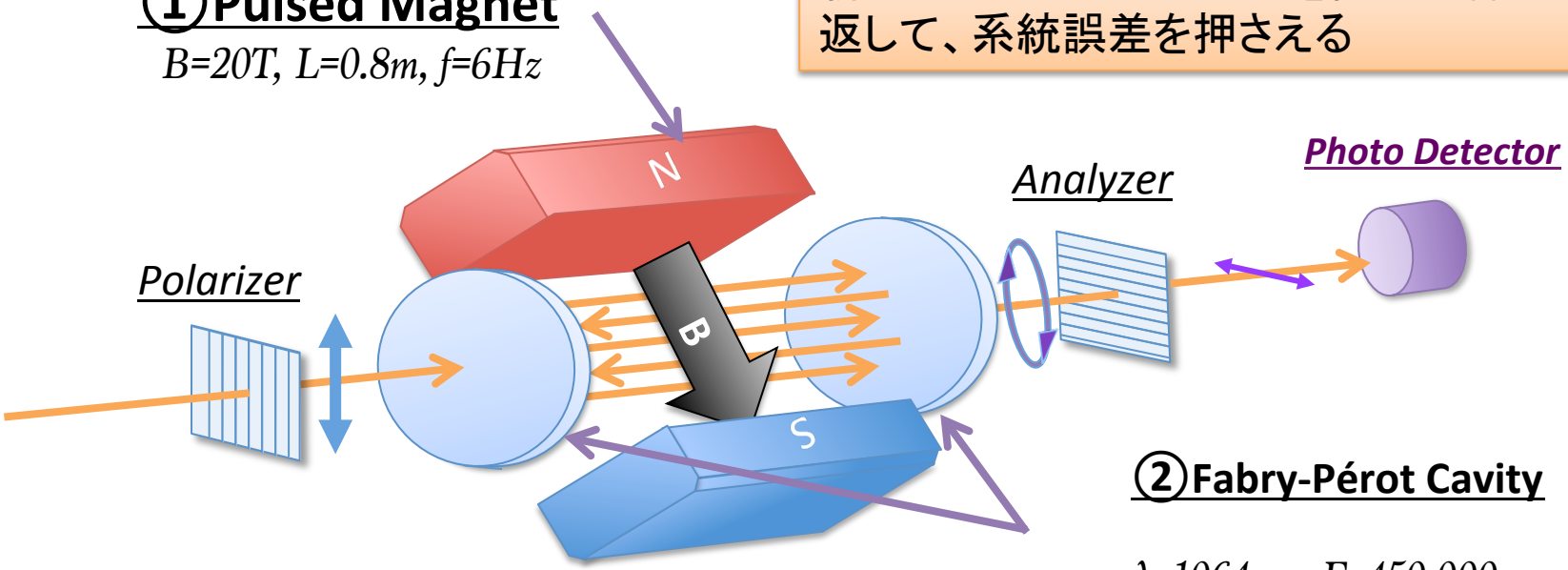
$\Delta n = n_{||} - n_{\perp} = k_{CM} \times B^2$ **(QED 予言 $k_{CM}=4.0\times10^{-24}[T^{-2}]$)**

樊　Posterセッション参照

新しいアイデア：ON　OFFを高速で繰り返して、系統誤差を押さえる

**①Pulsed Magnet**

*B=20T, L=0.8m, f=6Hz*




**②Fabry-Pérot Cavity**

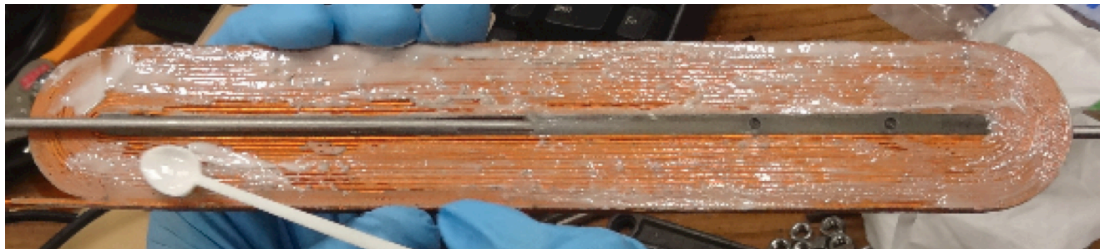
*λ=1064nm, F=450,000*

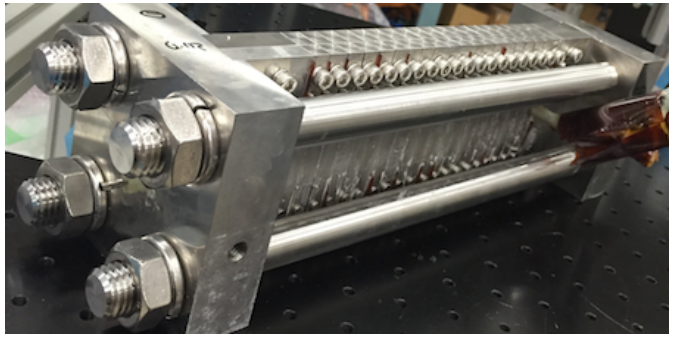
20Tいれても$10^{-22}$

# 鍵となる技術　1　　強力な磁石

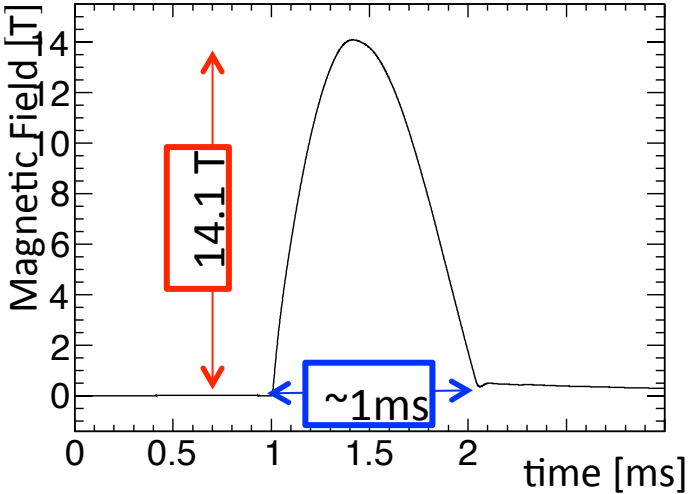
1-2m ぐらいの一応ポータブル

14T* 20cm OK　→　線材を強化して20T





ステンレスケース
で補強して
液体窒素で
冷却




やくざな装置
ビデオ鑑賞

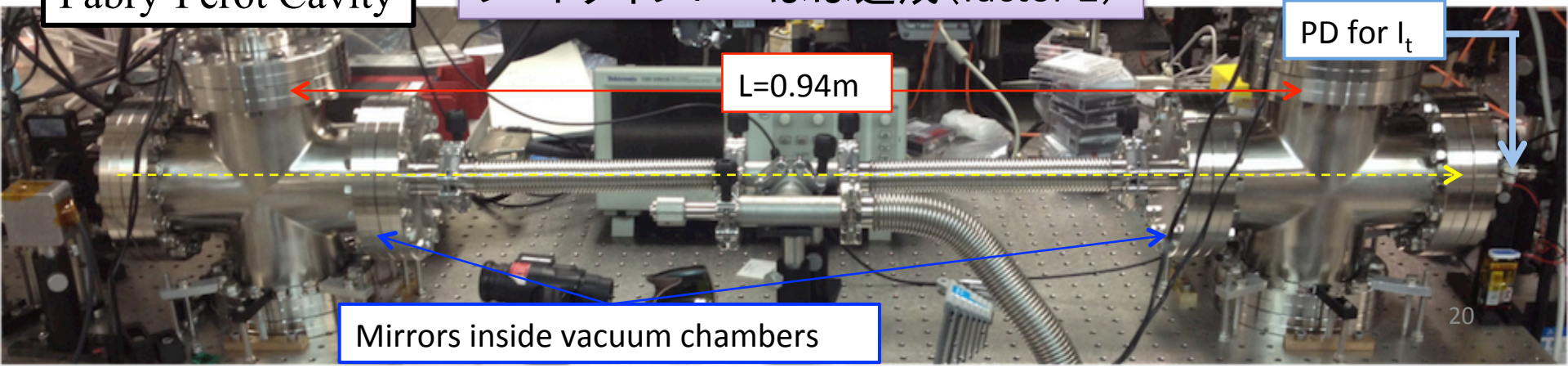
**C=3.0mF, V=4.5kV, 15kVA**

# 鍵となる技術　2

## F～450,000 共振器

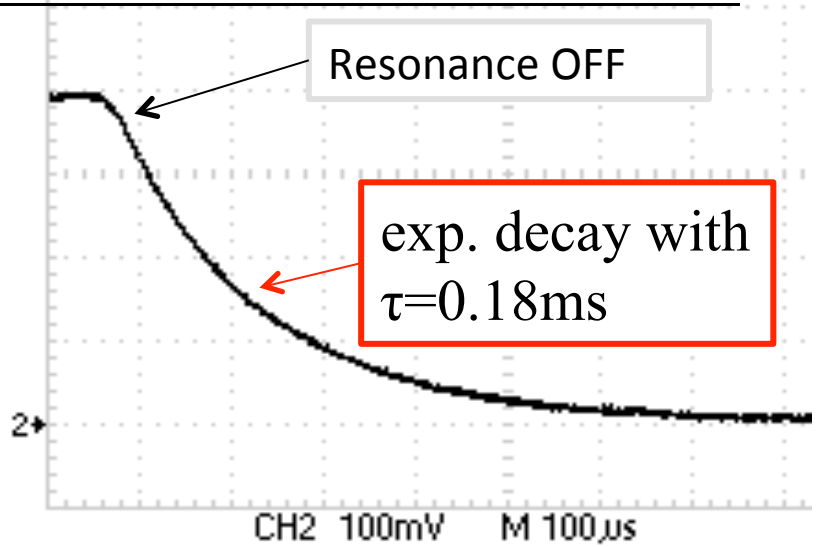
Fabry-Pérot Cavity

プロトタイプ：　ほぼ達成（factor 2）




ミラーの反射率　99.999%

Finesse measurement from $\tau = FL/\pi c$



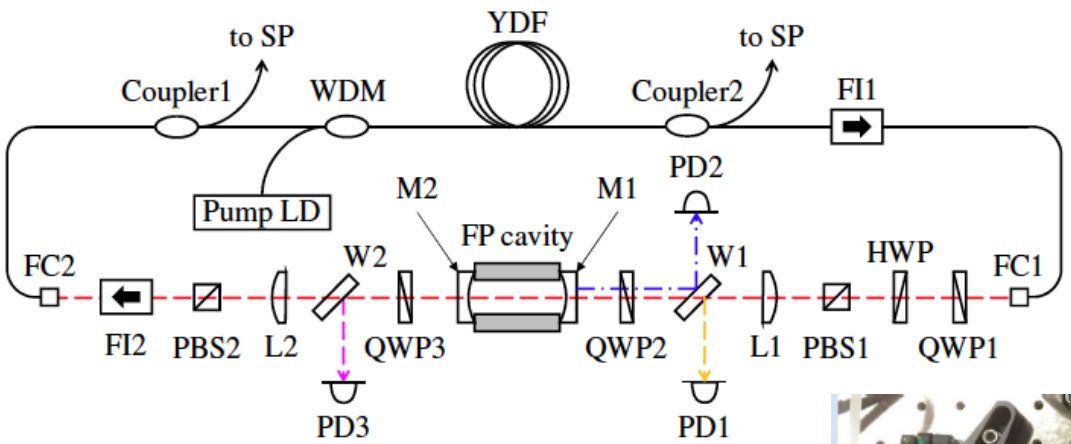

１０分以上　ロック出来る
フィードバックシステムも
完成

# 鍵となる技術　2’

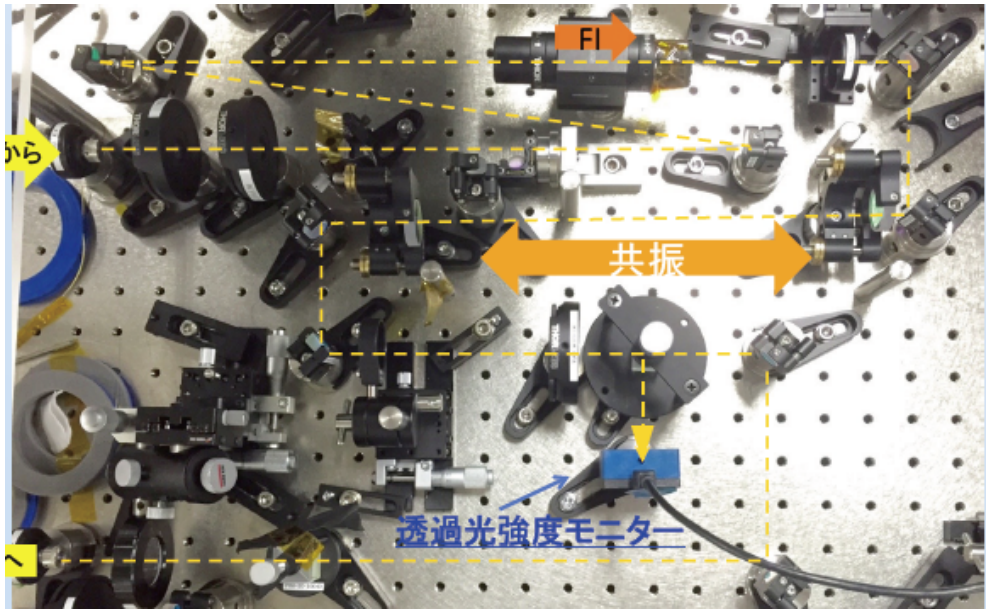
問題は、あの磁石の振動で共鳴がずれないか？　（「絶対無理だよ」by 先駆者）

「ずれたら、その光を拾って増幅して　FBにいれる」　自己共鳴型で、

T.Takahashi et.al
arXiv1509.05840



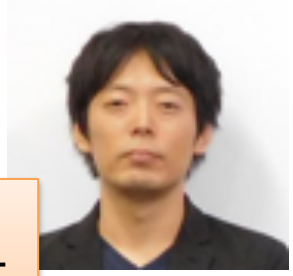

F=30,000 プロトタイプ




他にアイデア？

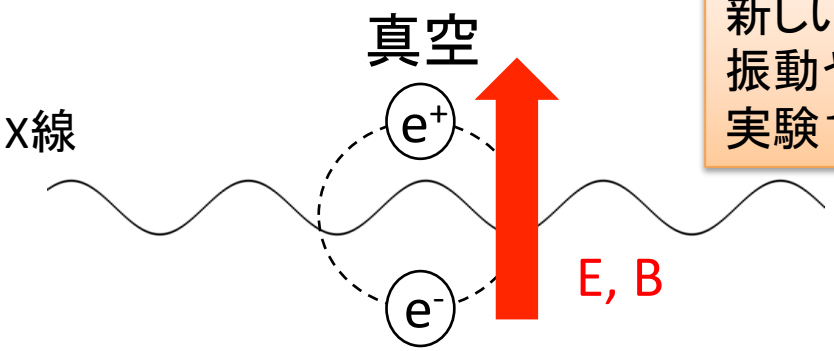
2016年前半　Heの複屈折測定
2016年後半　真空複屈折の
　　発見へ　（1週間ぐらい）

# 実験2）強力なレーザを使って

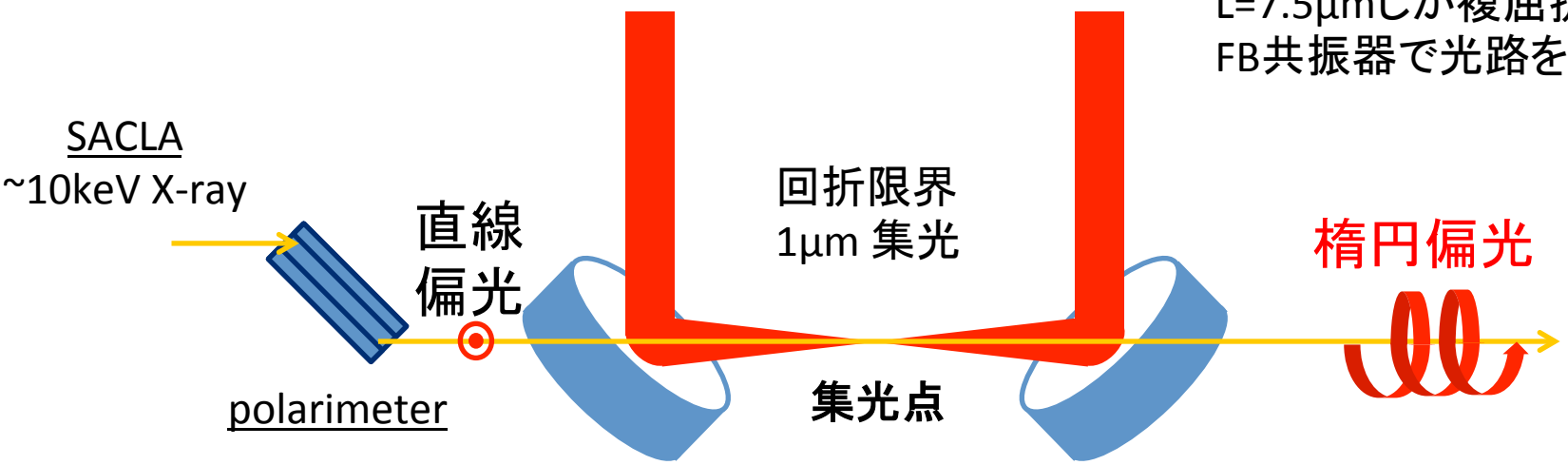


山崎

新しいアイデア：
振動や系統誤差を生む磁石を使わずに
実験1と違うkinematicsを見る




25fsの超短
レーザー(800nm 25J)
L=7.5μmしか複屈折領域
FB共振器で光路を稼げない




$\psi=2\pi(L/\lambda)\Delta n$

波長が短いX線を使って
楕円偏光をかせぐ　4桁

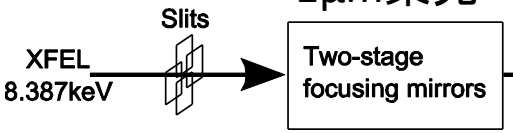
$I=10^{22}W/cm^2$による　真空複屈折
（$B=10^6T$）　$\Delta n= 10^{-11}$ (10桁ぐらい
実験1より大きい)

# 実験計画：SACLAを使って （2016後半から）

鍵となる技術：
high power レーザーの集光と同期・アライメント → 新しい挑戦

EH3, 4

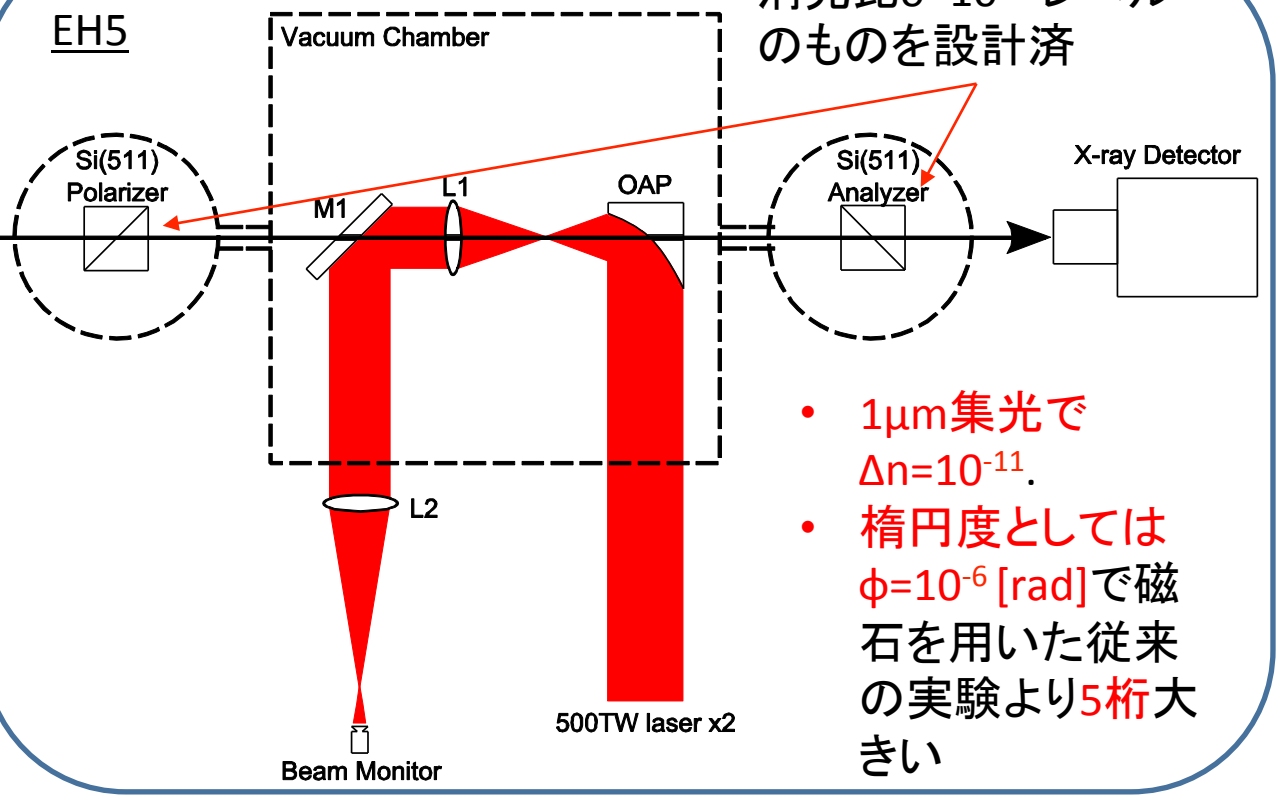
角度発散を抑えて1μm集光




- シード化により1eVに単色化
- レーザーと同期した1Hzの振り分けでよい（その分ビームタイムを長くしたい）

EH5

消光比$\delta=10^{-10}$レベルのものを設計済




- 1μm集光で$\Delta n=10^{-11}$.
- 楕円度としては$\phi=10^{-6}$ [rad]で磁石を用いた従来の実験より5桁大きい

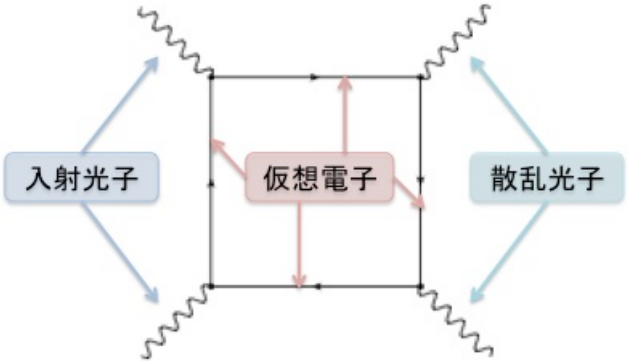
消光比の良い偏光素子（$\delta=10^{-10}$。可視光だと$\delta=10^{-6}$）を用いることができるため、S/Nの良いクリーンな測定が可能

# 実験3) 光を直接あてる

山道

QED:
電子を介する例

素粒子屋の悪い癖で本当にぶつけないと
気持ちが悪い



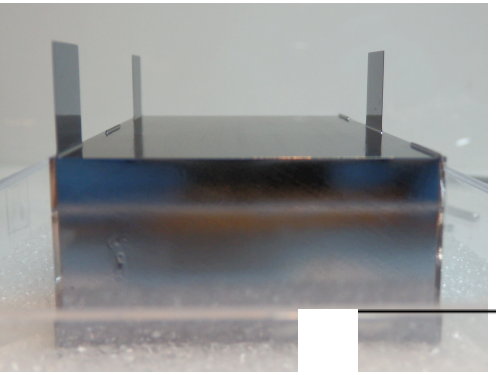

$$\frac{\sigma}{\Omega} = \frac{139\alpha^4}{(180\pi)^2 m^2}\left(\frac{\omega}{m}\right)^6 (3+\cos^2\theta)^2$$

結合 $\alpha^4$
ループ $(\omega/m)^6$

可視光: 予言値は$1.8\times10^{-27}$ fb
(現在の実験精度18桁不足:4光波混合をつかって、10桁ぐらい)

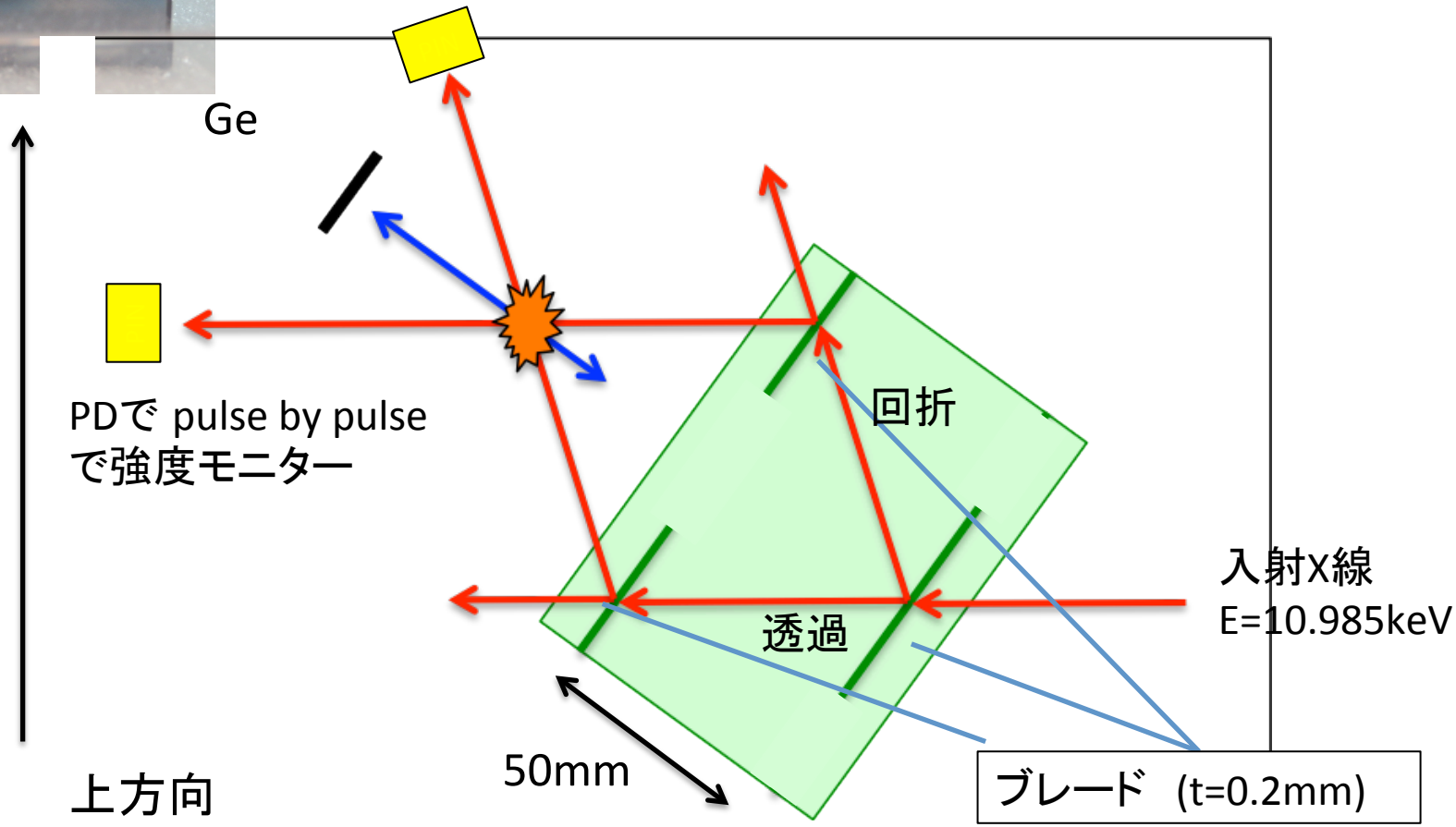
新しいアイデア:
(1) ω=**10KeV** **$(\omega/m)^6$** **24桁**QEDの予言は大きくなる
(2) 可視光と違う質量領域の未知粒子を探索できる。
(3) 角度をつけてぶつける。信号とBGがエネルギーと角度で区別できる。

# どうやってぶつける？　保証する？



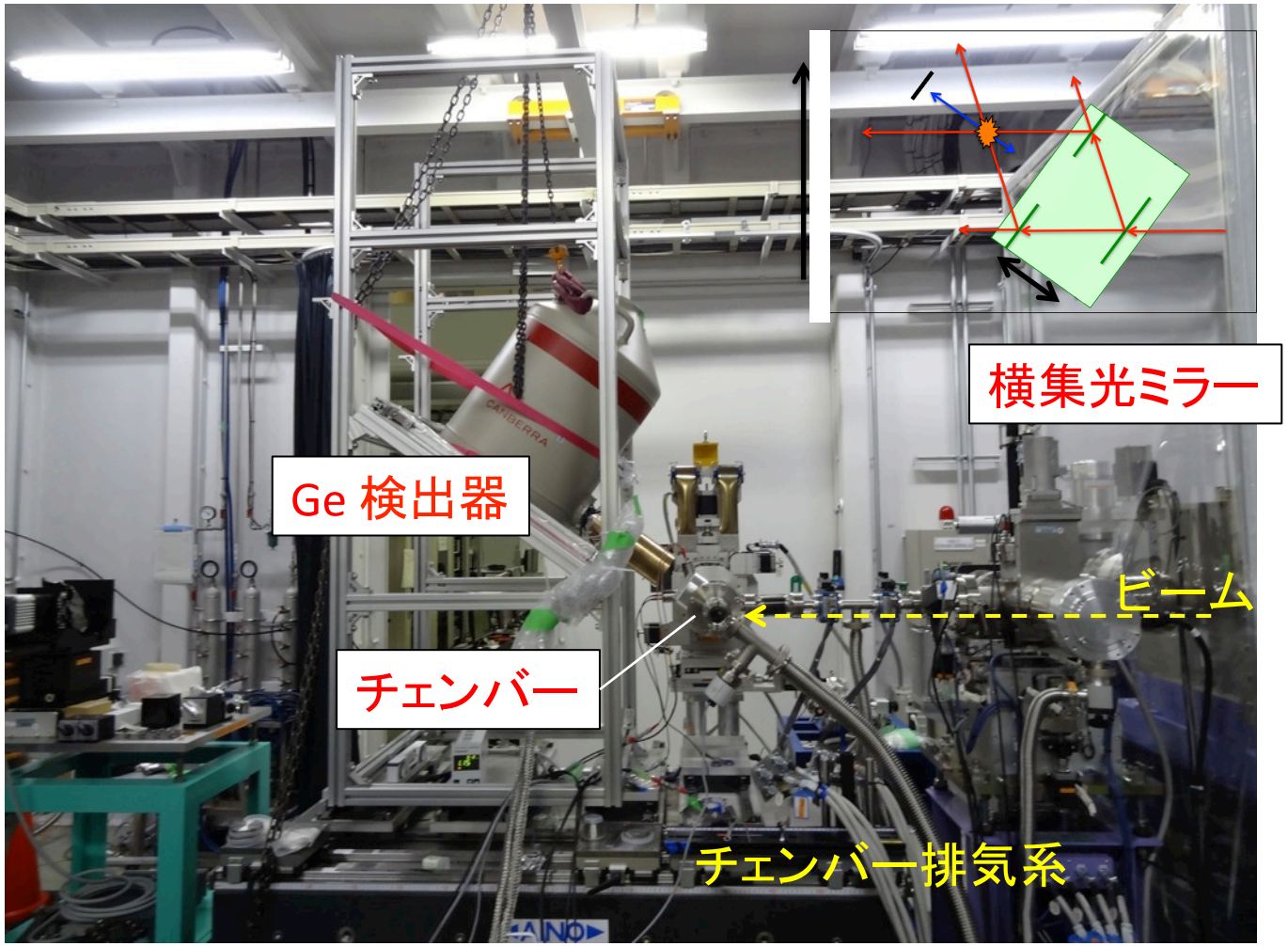
シリコン単結晶から、格子面(440)の厚さ200ミクロンのブレードを

72度で衝突　重心系がブースト　信号 18.1-19.9KeV
主なバックグラウンド　E=11KeV　Ge検出器でenergy で分離

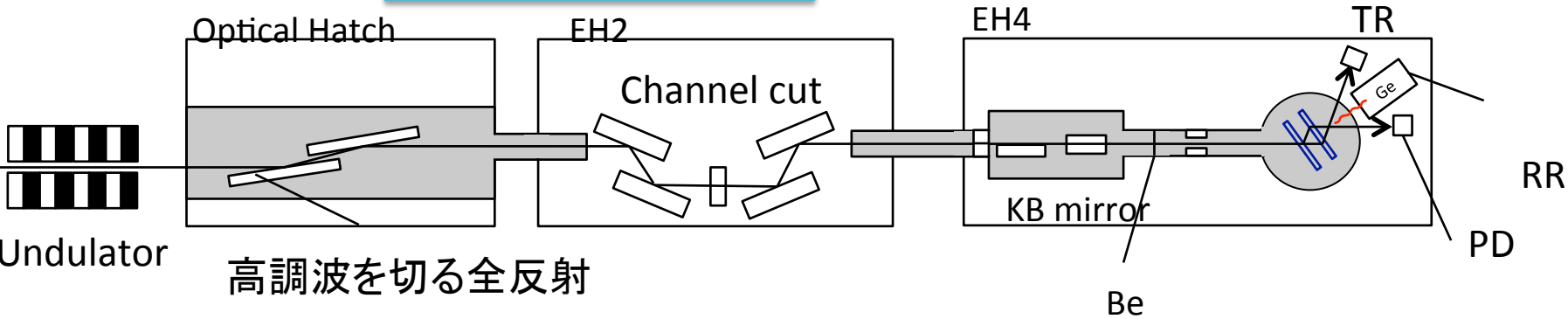


# SACLAでやってみた

実験のためなら
Geを釣ることだってします



# 実験の光学系




- ✧ **1.2×10$^{11}$photons/pulse**@11keV, **30Hz**.
- ✧ Beam **200μm × 200μm** (FWHM), pulse length **10fs(=3μm)**
- ✧ モノクロメーター (bandwidth 80eV ->63meV) E=10.985keV　I=9*10$^{7}$photon/pulse
- ✧ KB ミラー, **1 μm**　(横)　集光　　縦は、回折させるので集光せず

4.1 * 10$^{6}$ pulse (実験時間39時間)

$I_{RR}$=1.3 * 10$^{6}$ photon/pulse　$I_{TR}$=2.1*10$^{6}$ photon/pulse ( 回折効率$^{2}$ ~ %)

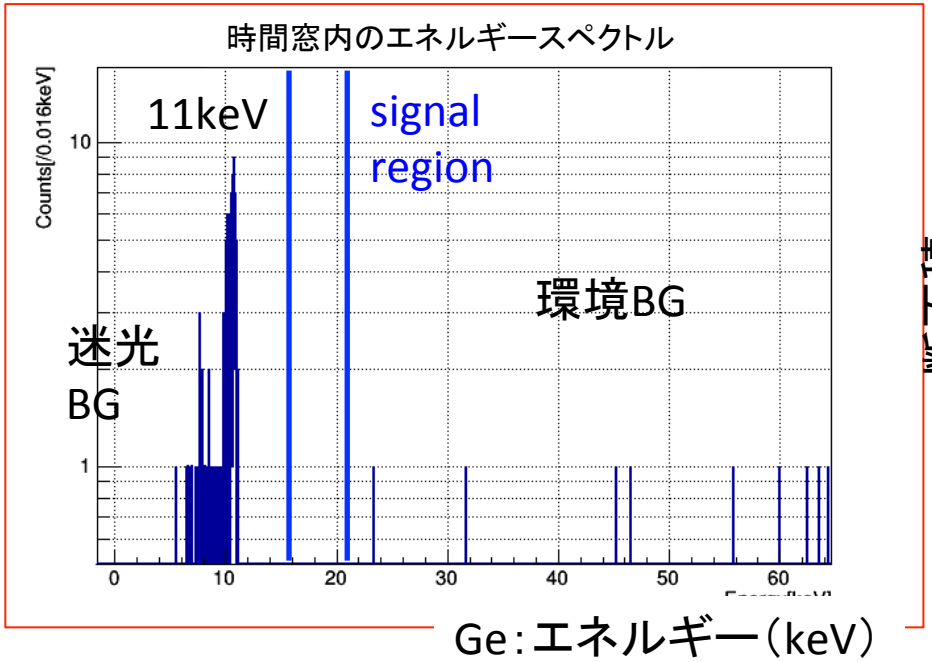
斜め交差の因子

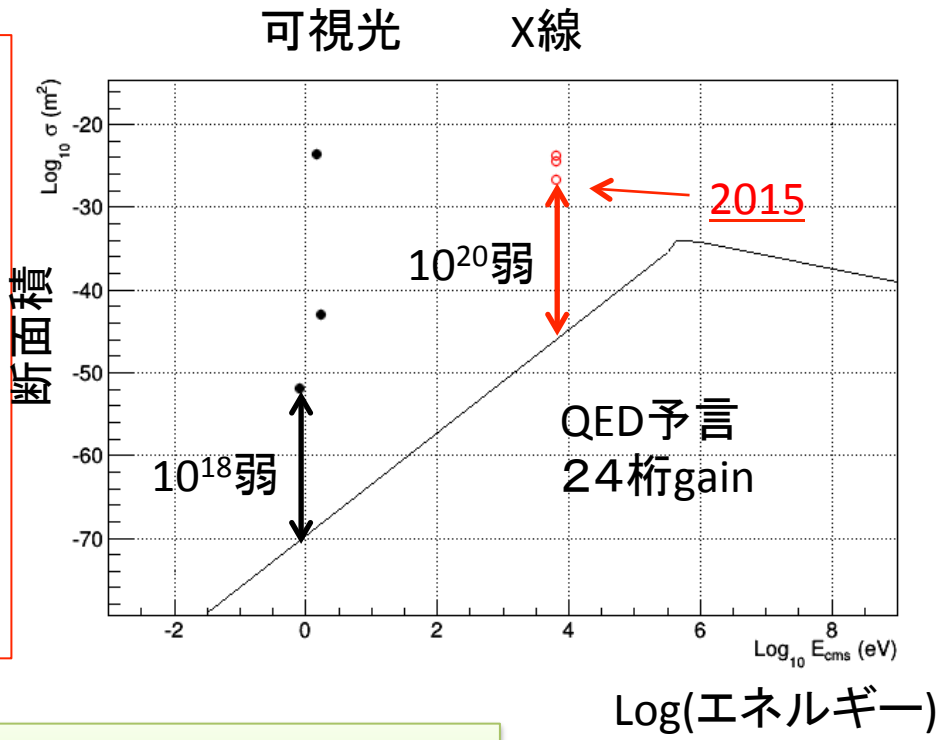
$$L_{\mathrm{pulse}} = \frac{I_{\mathrm{RR}} I_{\mathrm{TR}}}{4\pi l_v l_h \sqrt{1 + \left(\frac{l_t}{l_v}\right)^2 \tan^2 \frac{\theta_c}{2}}} \simeq \frac{I_{\mathrm{RR}} I_{\mathrm{TR}}}{4\pi l_v l_h}$$

$$L_{\mathrm{int}} = \sum_{\mathrm{pulse}} L_{\mathrm{pulse}} \simeq \frac{\sum_{\mathrm{pulse}} I_{\mathrm{RR}} I_{\mathrm{TR}}}{4\pi l_v l_h}$$

beam sizeは実測
横　0.98 ミクロン
縦　134ミクロン

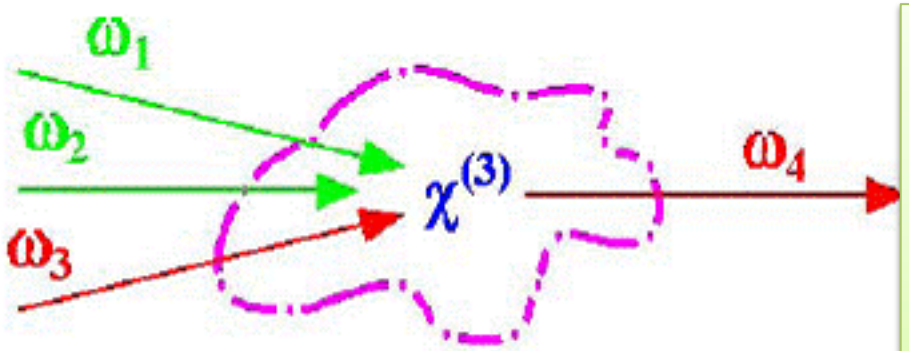
# 結果




XFELはレーザーではなかった。。。　幅が80eVと広い
干渉計にいれるために単色化　3桁　合計で　10 桁もロス

4光波混合かな？

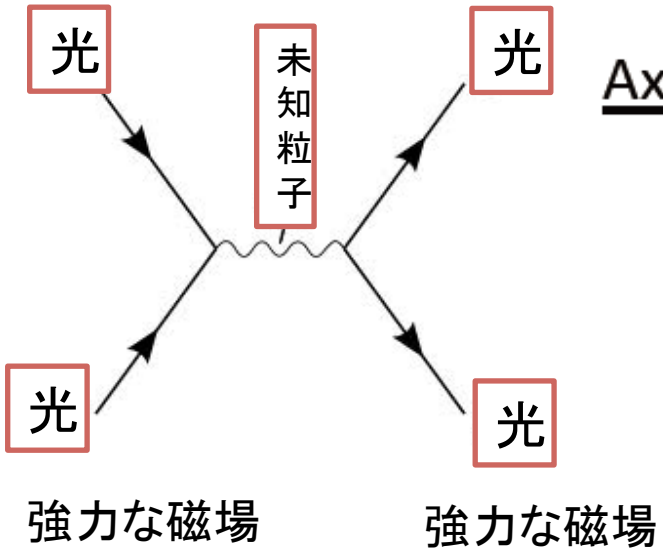



1. Splitter for broad spectrum
2. Super-mirror with large refraction angle
3. How to examine path with an accuracy of < 50nm

key technologies for the next generation.

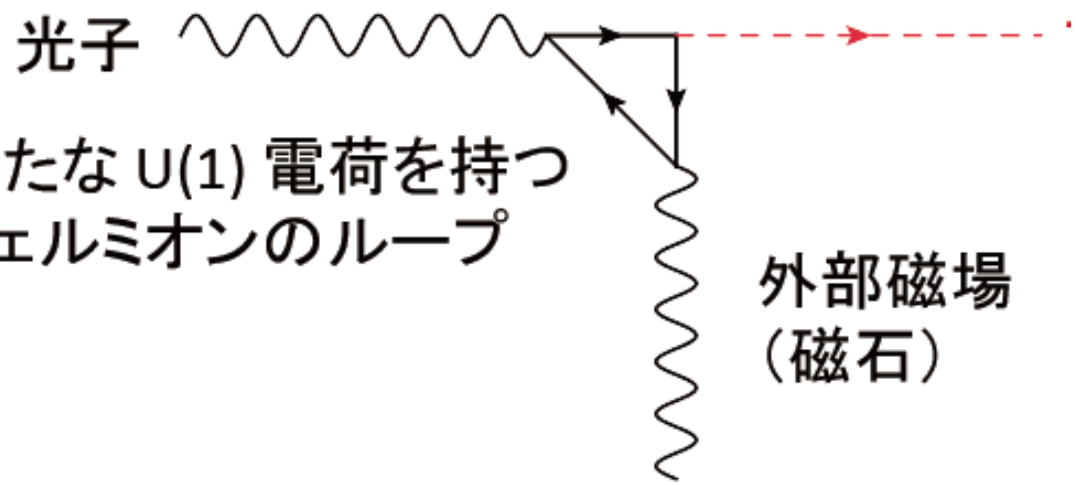
QED vs meV?

# 3. 未知の素粒子を直接を探る




## Axion-like Particle (ALP) の性質

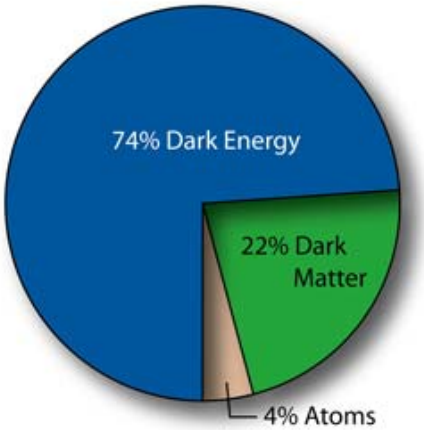
二つの光子と結合：光子→アクシオン変換




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



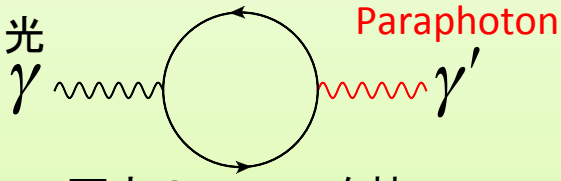

宇宙の大部分は未知の素粒子・真空エネルギー

重い超対称性粒子の探索（LHC）
SUSYでない場合　軽い暗黒物質が有力

**3つ大きな可能性がある。**

## Paraphoton (Hidden photon)

- Extra U(1) Gauge Bosonは理論的に不可欠
- スピン1
- MeVだと**暗黒物質の候補**
- 光子と paraphoton の混合




両方の charge を持つ
重いフェルミオン

## Axion

- QCDのCPを回復させる PQ 対称性
- **暗黒物質のよい候補**
- スピン　0　パリティー負

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

Bの向きと光の偏極面が一致すると　光→axion

## Dilaton

- 重力理論で不可欠
- **インフレーションのタネ**？
- スピン　0　パリティー正 スカラー粒子

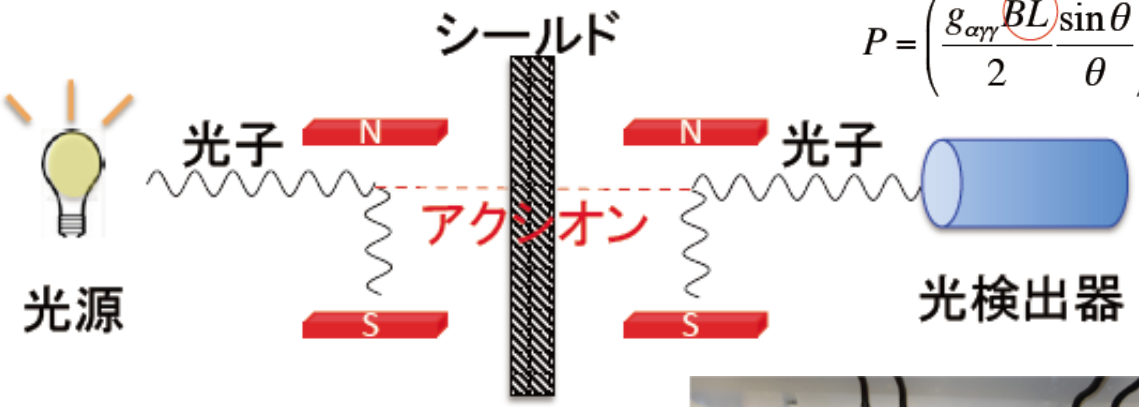
$$F_{\mu\nu}F^{\mu\nu}d$$

$$= g_{d\gamma\gamma}(B^2 - E^2)d$$

Bの向きと光の偏極面が直交すると　光→dilaton

# 探索方法

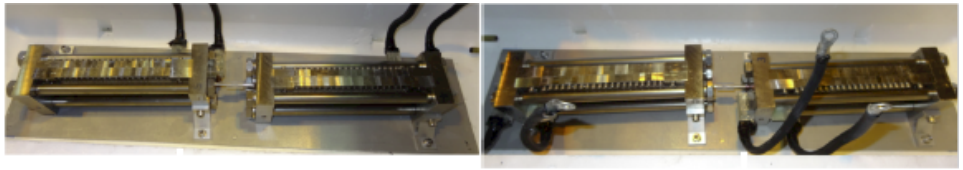
$$P = \left( \frac{g_{\alpha\gamma} BL}{2} \frac{\sin\theta}{\theta} \right)^2, \theta = \frac{m_\alpha^2 l}{4\omega}$$

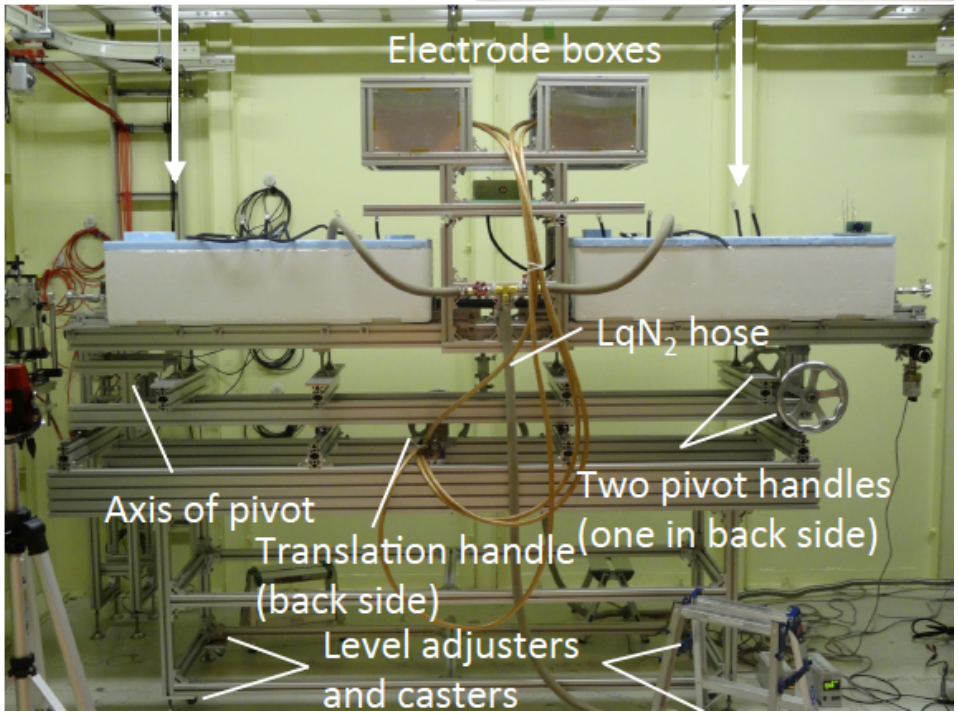


稲田

X線
強力なレーザー
ジャイロトン（THz）

強い磁石





Spring8

ma=eVで最高感度
THz 波も新しい

30-40L/時

# 4.「時空」を探る

超対称性以外にどうやってミクロな「時空」をさぐるか？　→　絶対必要

1）　ローレンツ不変の破れ

$E^2=P^2+m^2+E^2\Sigma\eta(E/m_{planck})^2$

ηは、ヘリシティー

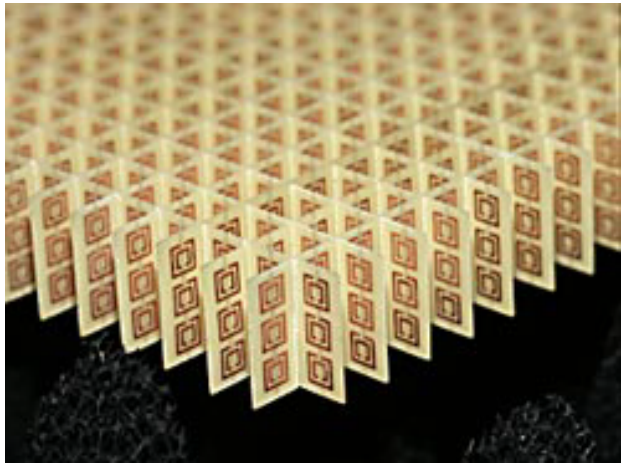
高エネルギーでないとつらい：　可視光だと 56桁 suppression

★ 2）　mg=ma (等価原理)の検証　**反物質でも？　Ps　BEC**

★ 3）　光と重力　量子場(光)の重力への効果

★ 4）　ウンルー効果：　重力場の量子効果

☆ 5）　BH　　エントロピーの測定　低速光子の応用



ミクロな時空をさぐる必要　⇔　真空に詰まっている

アイシュダイン方程式

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} R\, g_{\mu\nu} + \Lambda\, g_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

人間原理？

$\Lambda_{\text{observed}} = (10^{-3}\ \text{eV})^4$

$\Lambda_{\text{Higgs}} = (10^{12}\ \text{eV})^4$

$10^{60}$

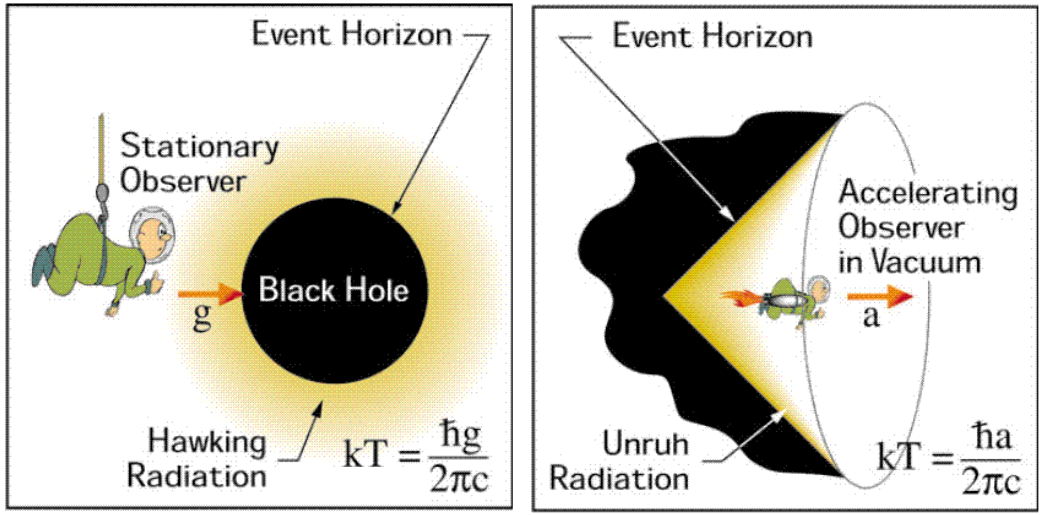
$\Lambda_{\text{GUT}} = (10^{25}\ \text{eV})^4$

$10^{112}$

ミクロな真空や場　と　マクロな時空　のインターフェース？
一般相対性理論と量子力学の融合：　局所的な“超対称”

# ウンルー効果

**等価原理:　重力場は加速場と同じ**




加速している人からみると
Horizon存在し、
そこでの量子効果:
　　片方だけが観測
　　一方は　見えない

同じことがおきる

g と a を置き換えるだけ

$$T = \frac{\hbar a}{2\pi c k} = 4\times 10^{-21} * a[m/s^2](K)$$

加速している人は、温度Tの光にみちた世界にみえる。

何がちがうか？
慣性系でも　ホーキング輻射はみえるけど、ウンルーは動いている人だけ。
慣性系からは、光子１個（見えない方）と　動いているモノが励起した状態になる。

# 加速電子がみるウンルー効果

どのくらい？　光子の電場の加速度

電場 $\mathcal{E} = \sqrt{\mu_0 c \frac{P}{\pi\sigma^2}} = 1.1 \cdot 10^{17} \frac{\mathrm{V}}{\mathrm{m}} \left(\frac{P}{1\ \mathrm{TW}}\right)^{1/2} \left(\frac{0.1\ \mathrm{nm}}{\sigma}\right)$

加速度 $a = \frac{e\mathcal{E}}{m_e} = 1.9 \cdot 10^{28} \frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}^2} \left(\frac{P}{1\ \mathrm{TW}}\right)^{1/2} \left(\frac{0.1\ \mathrm{nm}}{\sigma}\right)$, 電子

Single Photo counting

実験2）に電子　P=1PW, σ=1μm　　E= $10^{14}$ V/m　　a=$10^{25}$ m/s$^2$

T=40000K
可視光

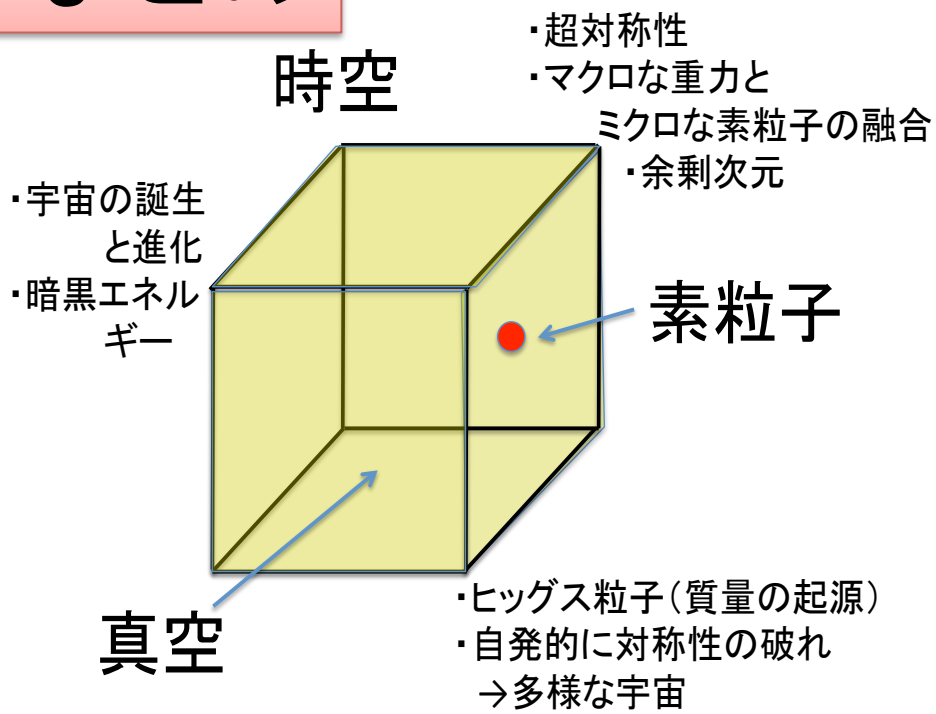
将来：　10fs → 1as　　σ=1μm (回折限界)
$10^{27}$ W/cm$^2$　　E= $10^{17}$ V/m
電子　a=$10^{28}$ m/s$^2$　　T=$10^7$ K (1KeV)

2つのKeV X-rayの相関(entangleしている）でとらえる

夢：　> $10^{32}$ W/cm$^2$ 級　　陽子の加速度 a = $10^{31}$ m/s$^2$　　T=$10^{10}$ K (1MeV)
p + (e-: 真空）→ n + ν　　陽子崩壊が観測される

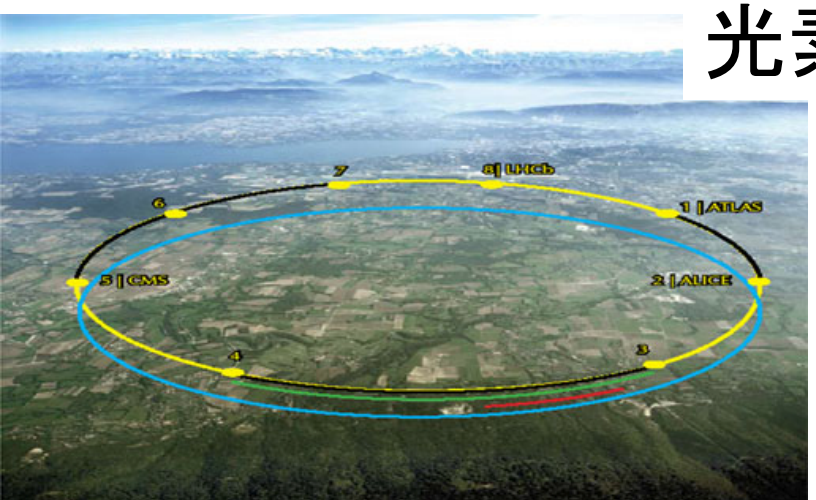
時間的・空間的にしぼられた光源が有利

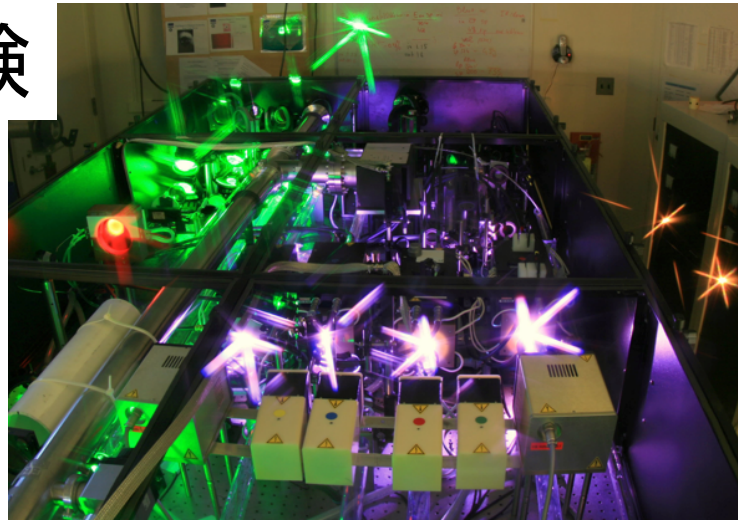
# 戯れ言のまとめ




Intensity Frontier
Precise Frontier

Energy Frontier LHC




光素粒子実験