

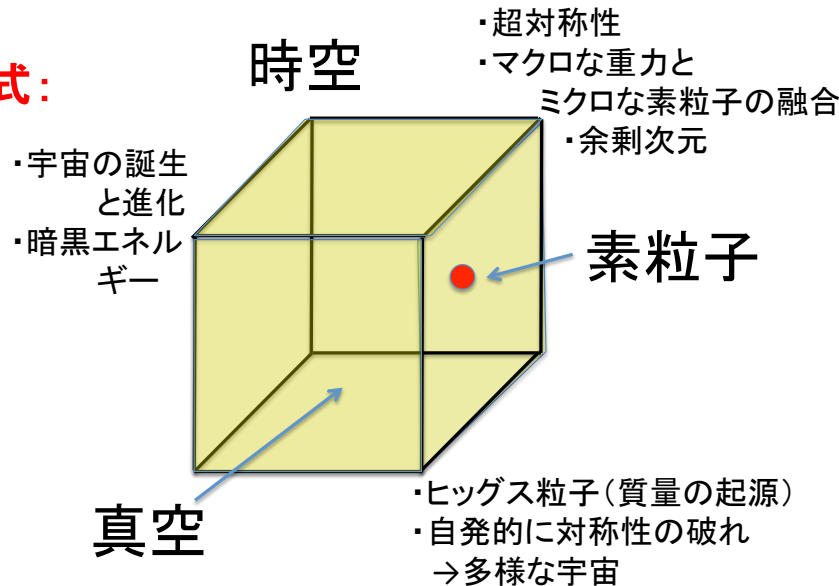
時空や真空の研究

マイクロな重力や反粒子の重力
等価原理
(ポジトロニウムBEC)
(中性子)

新光学素材メタマテリアルを用いて、疑似ブラックホール
ベッケンシュタイン方程式の
検証

FCC/LHCや
ウンルー効果を用いて、
疑似ブラックホール
(加速電子+高感度光
検出器)

アイシュタイン方程式:
場ってほんとに
重力つくれる?



スカラー場?

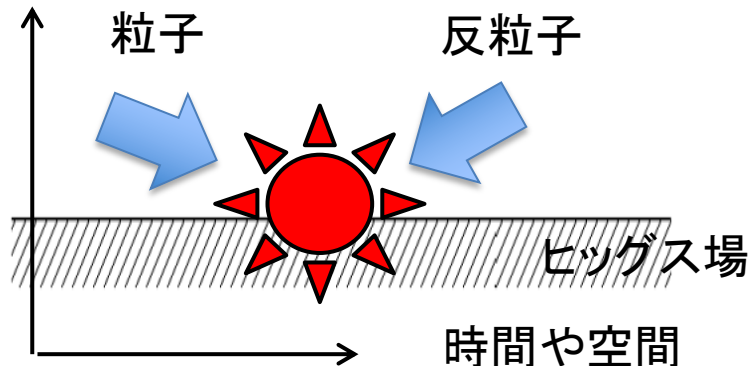
高強度光源を使った
真空に潜む新粒子探索(Axion)や
光子・光子散乱(強力光源や強磁場)
3章

真空から粒子
Dynamical Casimir効果

- 1.何故光か？
- 2.Axionのような軽い粒子とヒッグスの関係
- 3.仮想場
- 4.Hidden sector
- 5.どこらへんが面白い
- 6.光子光子散乱 VMB
- 7.光子光子散乱 難波先生
- 8.ポジットロニウム 石田先生

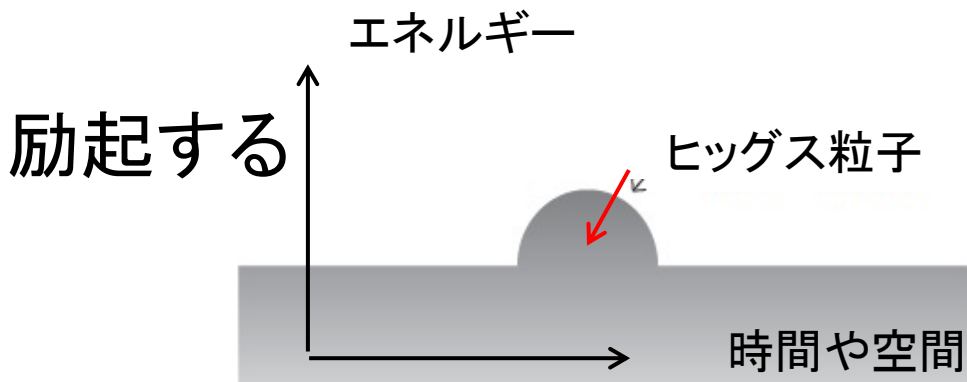
何故 光で探るのか？

Higgsはグルオン-グルオン
W-Wを衝突させた



粒子と反粒子衝突 消えてなくなる。
エネルギーだけが残る。
そのエネルギーで真空の場が励起され
 $E=mc^2$ "粒子"になる。

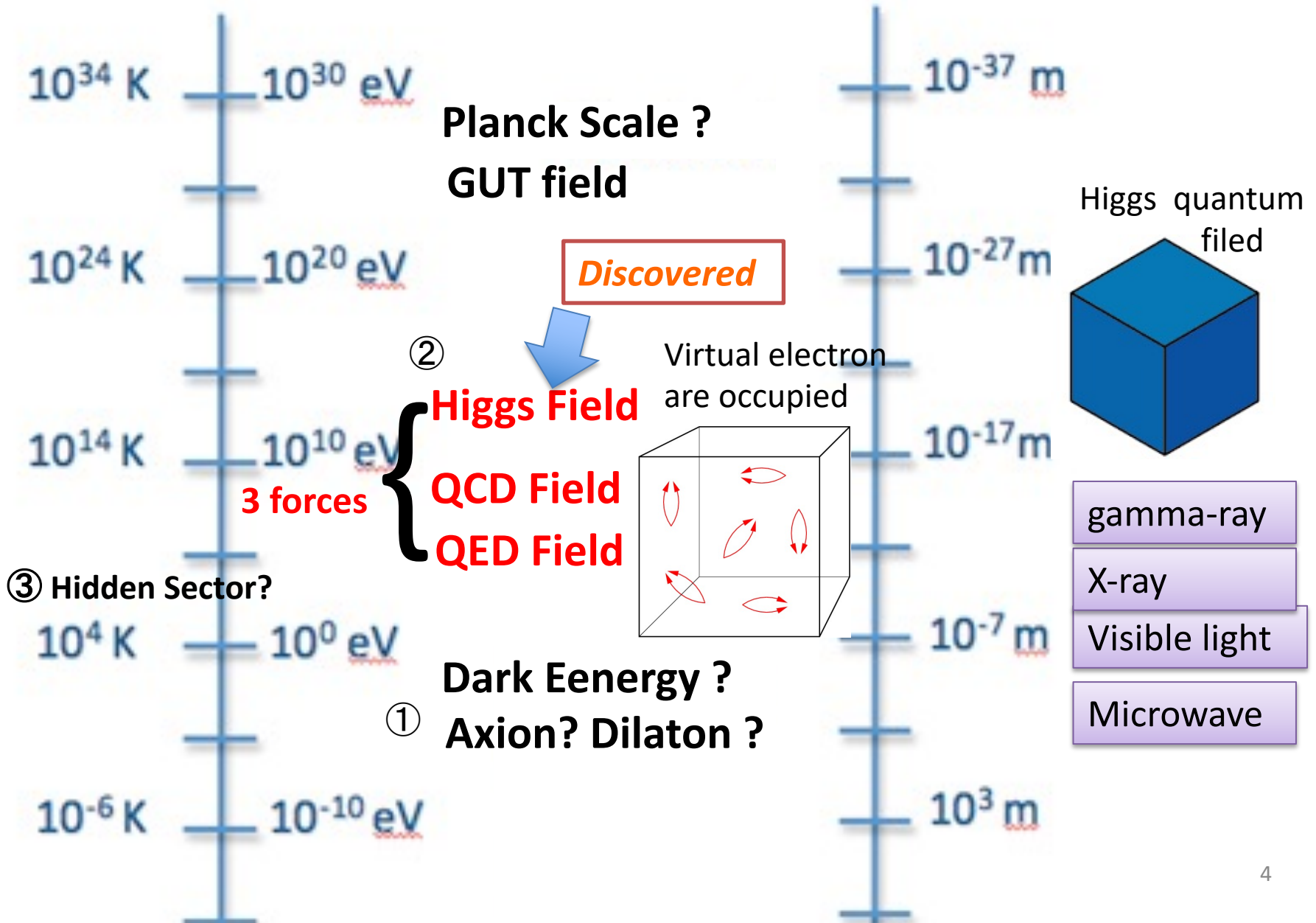
Gluon-gluon 衝突やWW衝突でヒッグス粒子
62.5 GeVの光子を衝突させたら、ヒッグス粒子が
生成される。



光子・光子散乱

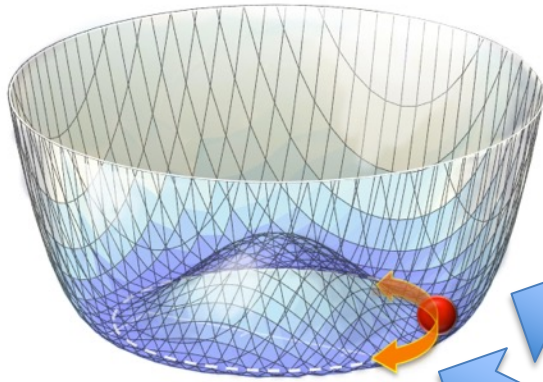
- 1) 光やグルオンの
反粒子は、自分自身
光子・光子衝突は 粒子・反粒子
コライダー
- 2) 真空の性質
方向がない。スピン0
スピン0を選択的に
スピン 0か2(重力)
スピン1は行かない
- 3) コヒーレンシー

Various fields/sectors are hidden in our vacuum



① Axionの様な軽い粒子が出る訳とヒッグスとの関係

新しい場が対称性をもっていたとする。



この方向の変化は、エネルギーの勾配がない
南部ゴールドボソン(NGB)

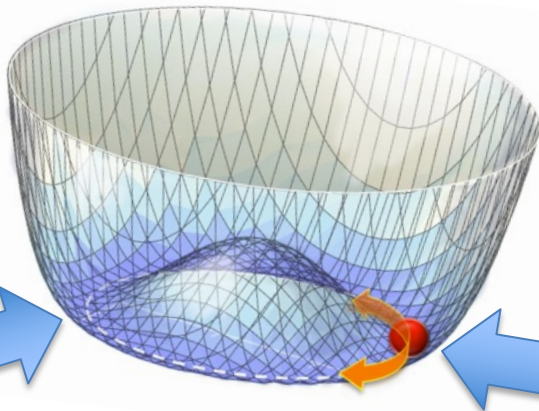
ヒッグス場: W/Zの縦波成分 \rightarrow W/Z質量
ヒッグス粒子は、傾きがあるほうの振動

$$\lambda^4 \langle \phi \rangle$$

Same order

$$\langle \phi \rangle = 246 \text{ GeV}$$

何か同様の場があって自発的に



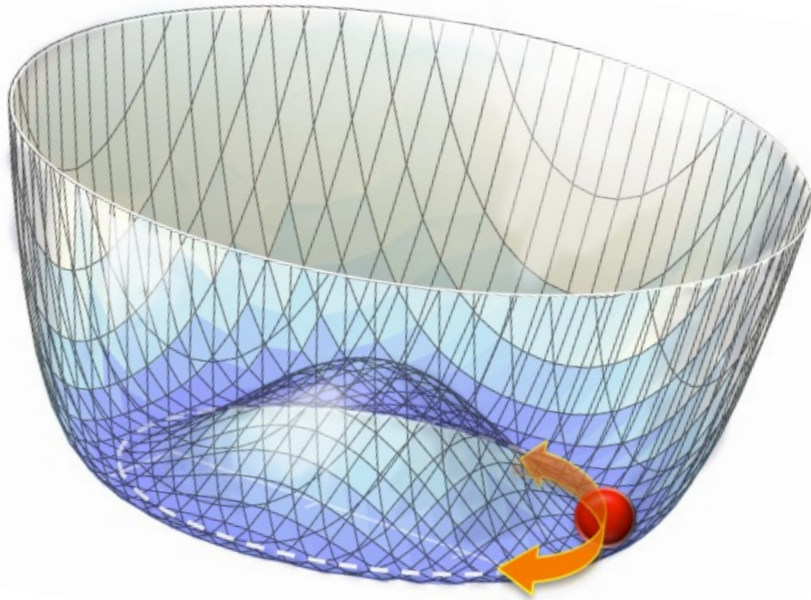
量子補正で実は、こういうポテンシャルは
ゆらいで、傾いている。

この方向 \rightarrow NGBで massless だけど
傾いているので

$$m = \Lambda^2 / \langle \phi \rangle$$

例えば $\langle \phi \rangle = 10^{11} \text{ GeV}$ (超高エネルギー)

“軽く”て“弱い”がポイント



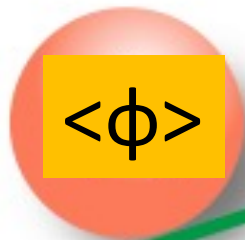
完全な対称性 質量ゼロ NG
量子的な効果で対称性がやぶれると
擬南部ゴールドストーンボソン

$$g(\text{結合}) = \Lambda / \langle \Phi \rangle$$
$$\text{mass} = \Lambda^2 / \langle \Phi \rangle$$

高いエネルギー
スケール

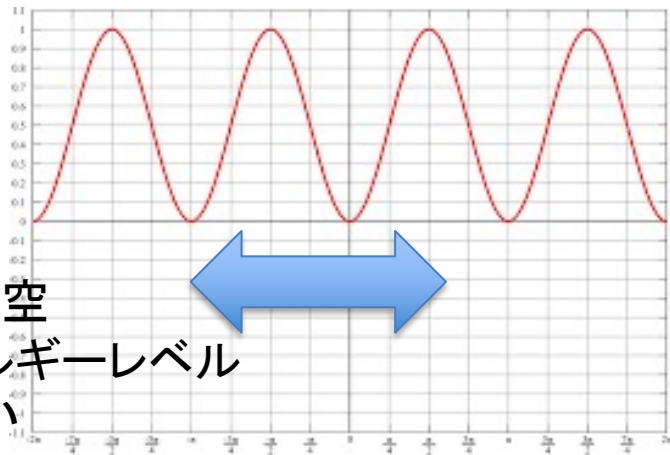
$\langle \phi \rangle^{-1}$ で軽く
弱い結合

シーソーのような構造になる



弱い結合の軽い粒子を高感度で探る
= $\langle \phi \rangle$ 超高エネルギーの物理を探る

何故？ こんな場が期待される理由



QCDの真空
同じエネルギーレベル
がいっぱい

トンネル効果で
いろいろな状態が混ざっているはず
→ 変な位相が残る(CPの破れ)
でも、そんな位相は実験的にない
新しい場(singlet)を入れて、SSBで
真空をえらばせる。

GUT、インフレーションなどで
何か新しい場がいっぱい
あるはず。
(電荷、弱い電荷、カラー
以外の場)
→ そいつらを探る手段

Axion (擬スカラー) 的な奴や
Dilaton (スカラー)

Axion

- ・ QCD vacuum should v
PQ 対称性
- ・ **暗黒物質のよい候補**
- ・ スピン 0 パリティー負

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

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

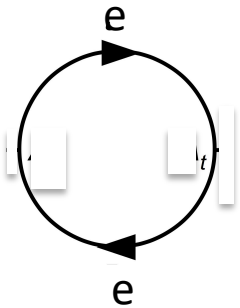
$$F_{\mu\nu} F^{\mu\nu} d$$

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

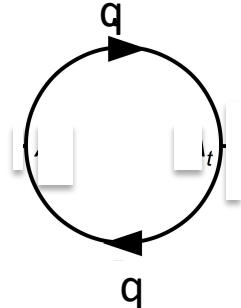
Bの向きと光の偏極面が
直交すると 光→dilaton

② 仮想場 (これは必ずある。知っている電荷)

$e-e+$ $\bar{q}q$



電荷 (QEDの真空)



カラー荷 (QCDの真空)

ϕ_H

仮想でなくて
実体が隠れている

弱い電荷 (ヒッグス場)

直接検証された ヒッグス場
ATLAS $\gamma\gamma$?
間接的に: 精密測定の結果

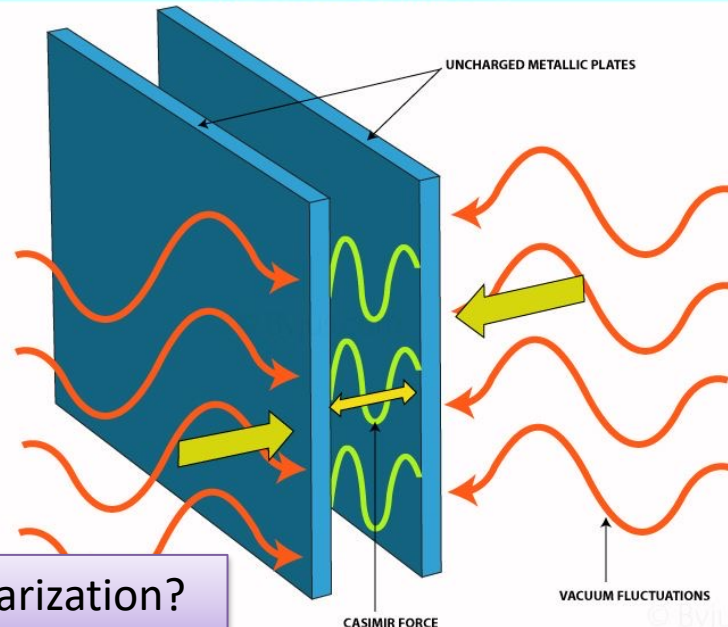
カシミール効果: 間接的な例

静的なカシミール: 観測
動的なカシミール: 未観測

テーマ6

マイクロeV ~ meV single Photo counting Polarization?

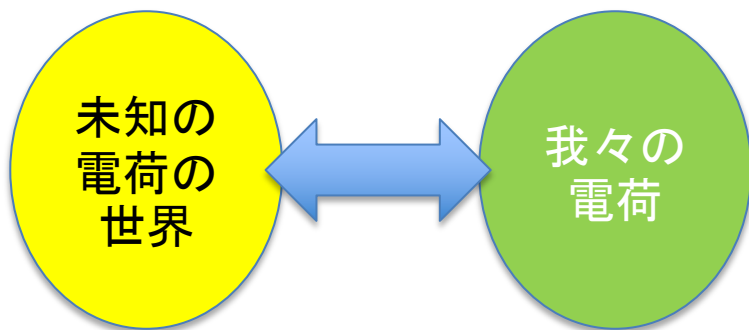
CASIMIR EFFECT



③ hidden sec1 新しいゲージ場 (知らない電荷)

真空とは違うけど、パラレルワールドの様に、別の力が支配する世界

SU(3)XSU(2)XU(1) 3つの電荷
GUT E8XE8、SO(32)、.....
もっともっと 知らない電荷があつて
それに対応するゲージ場

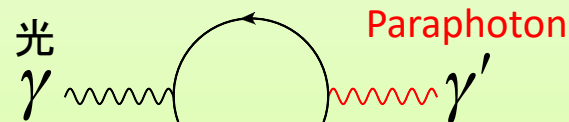


$\epsilon F'$ (未知のゲージ場) F (光)

弱い結合の光が存在している
電荷がミリチャージの素粒子
のように見える

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

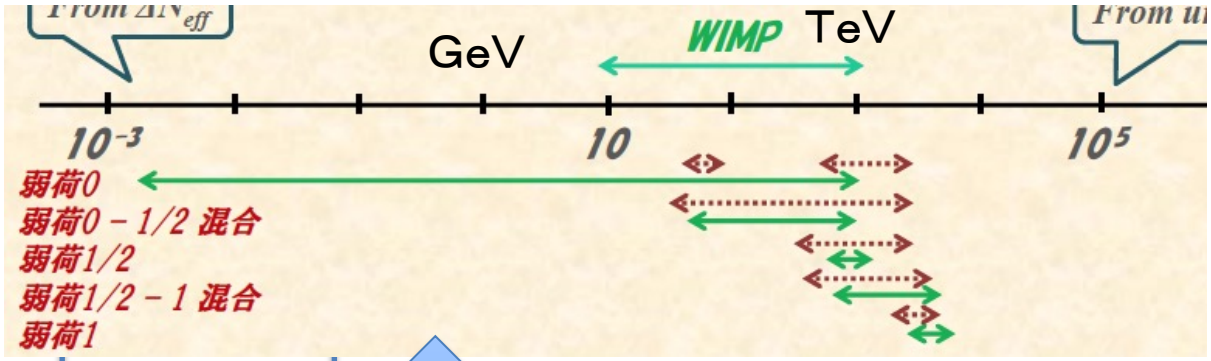
③ hidden sec2 新しいヒッグス場 (singlet)

$$L_S \in m_S^2 SS + \mu SH^\dagger H + \lambda S^2 H^\dagger H$$

普通のHiggs 弱い力の電荷をもっている

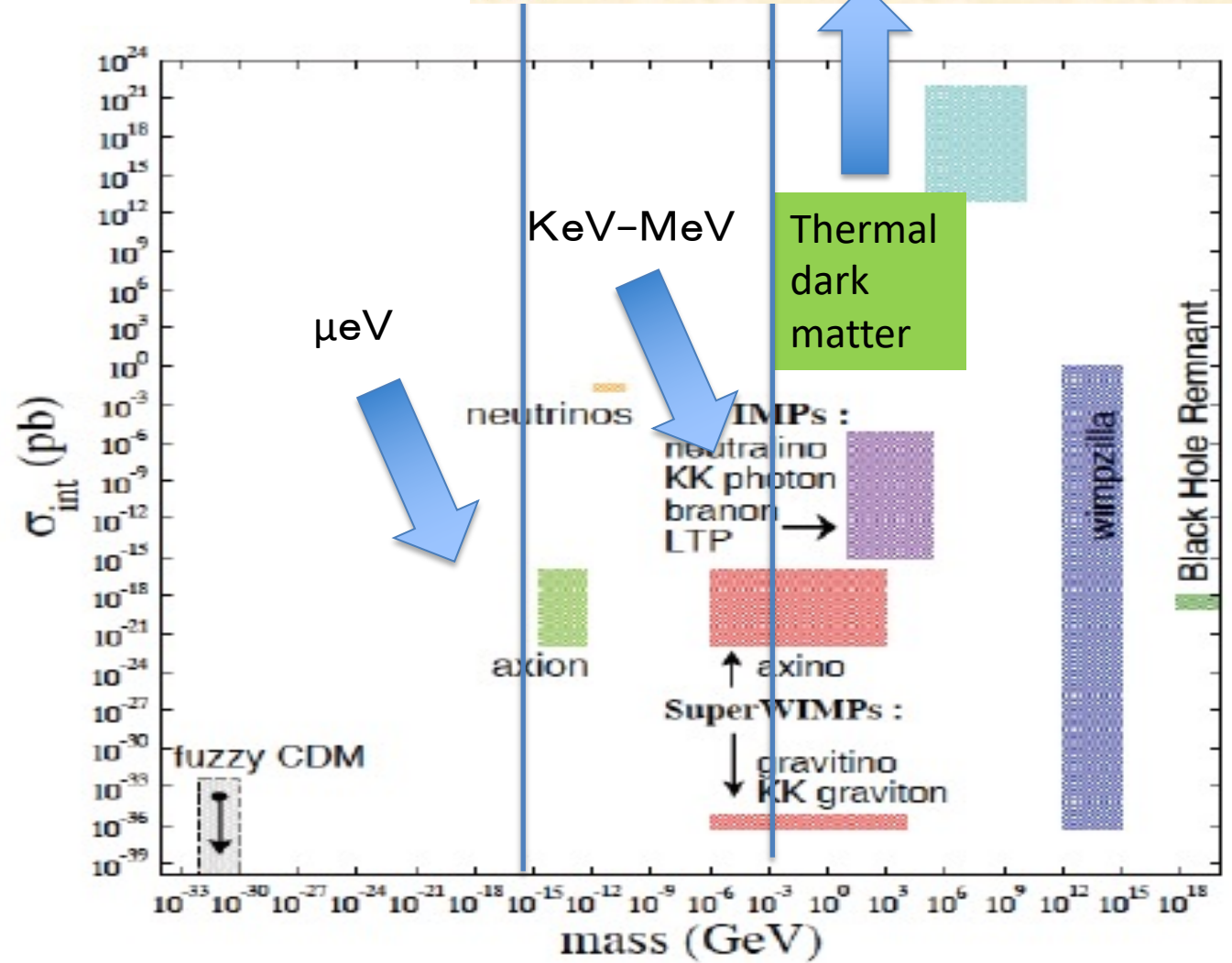
→ 電荷・弱い・カラーの電荷を持っていない S

この軽い粒子が
暗黒物質だったら



弱い電荷
の有るは
WIMP
100GeV -
10TeV
(4章で)

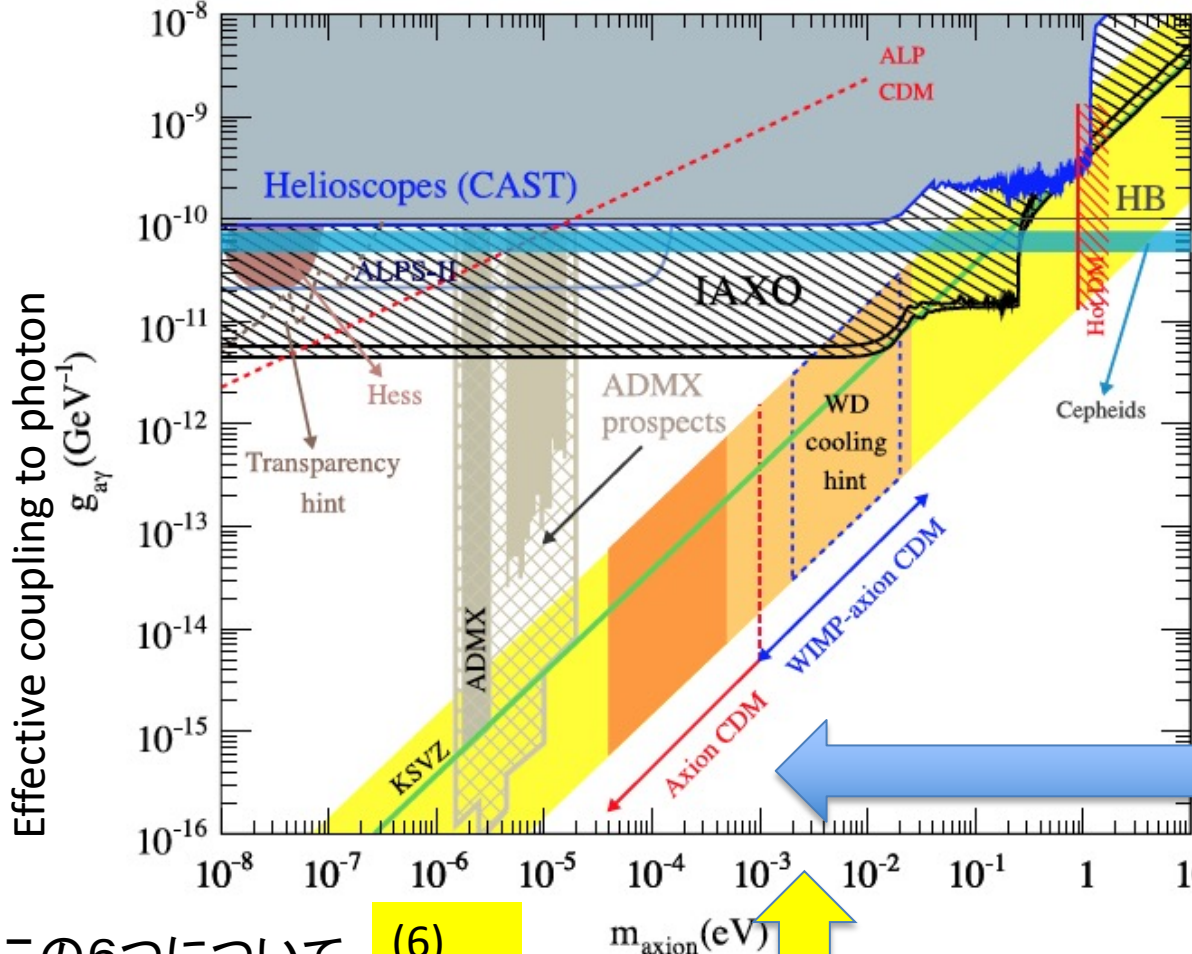
熱的な平衡で
できるのでは
ないので
なかなか
数的な予言が
難しい



どこら辺が面白い質量？

$m(a) = \mu\text{eV} - 100 \text{ MeV}$ (10^{14} wide range)

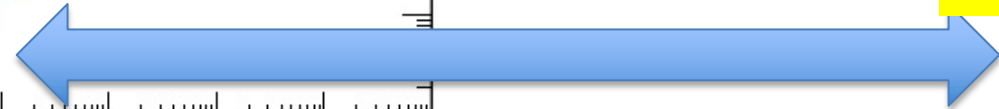
arXiv:1303.4758



No rigid model exists except for axion for such a light region :

WIMPと違って
モデルがあいまい
→ 数打たねばならない
ゲリラ戦

(5)
Beam
dump



- (3) ↑
- (2) ↑
- (4)¹² ↑

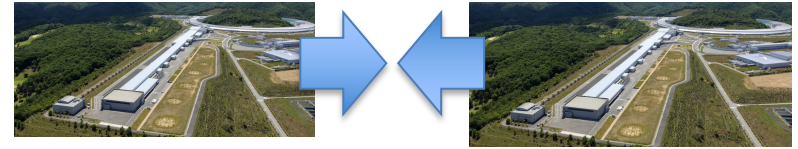
この6つについて
話します

(6)
Axion

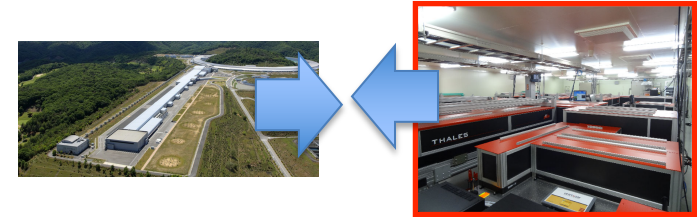
(1) ↑

Particle Physicist View: Collider at various ECMs

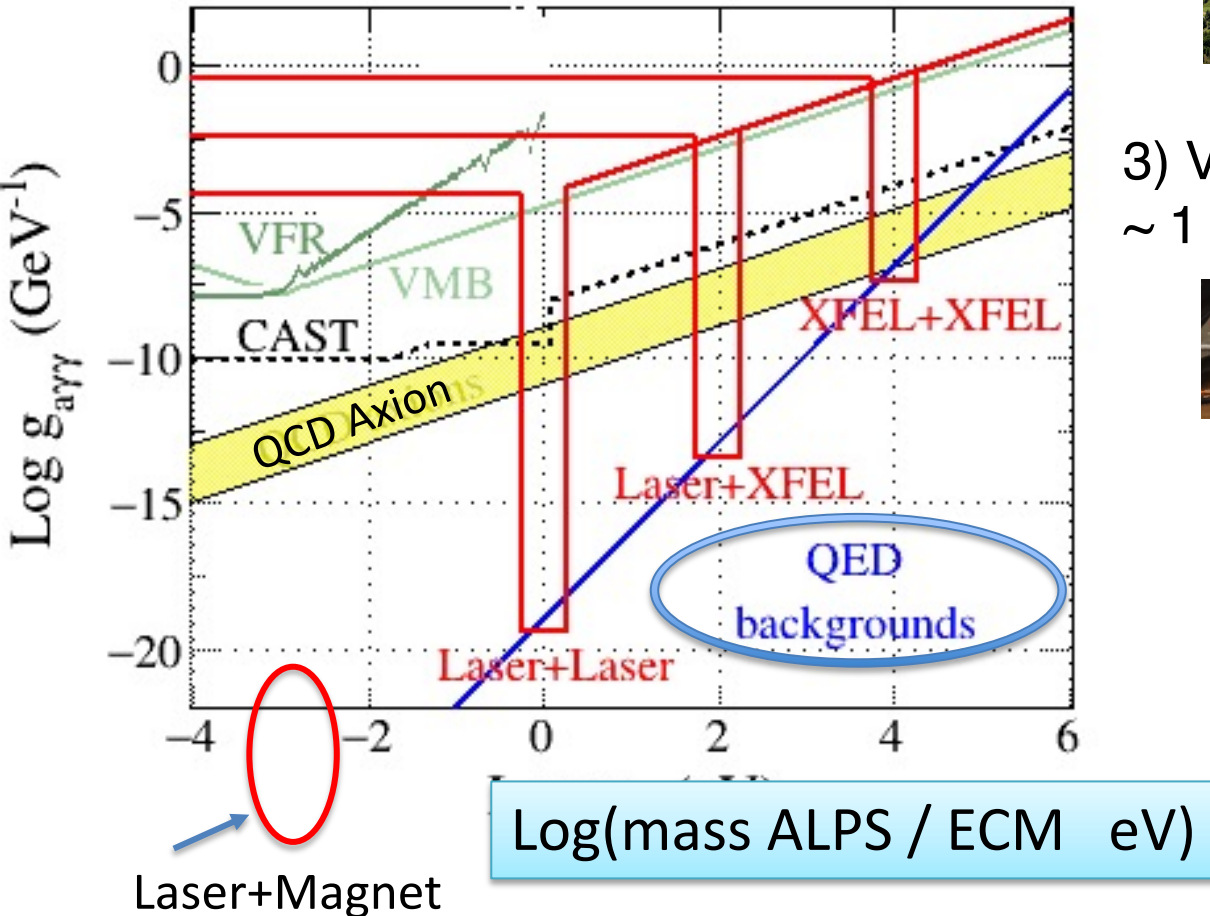
1) X-ray + X-ray ECM ~ 10keV



2) Visible Laser + X-ray ECM ~ 100 eV



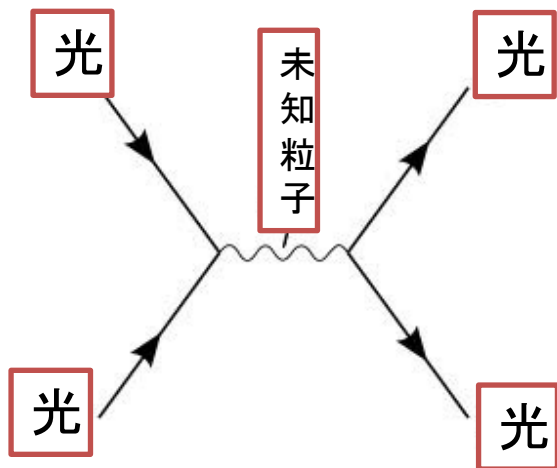
3) Visible Laser + Strong Magnet ~ 1 meV



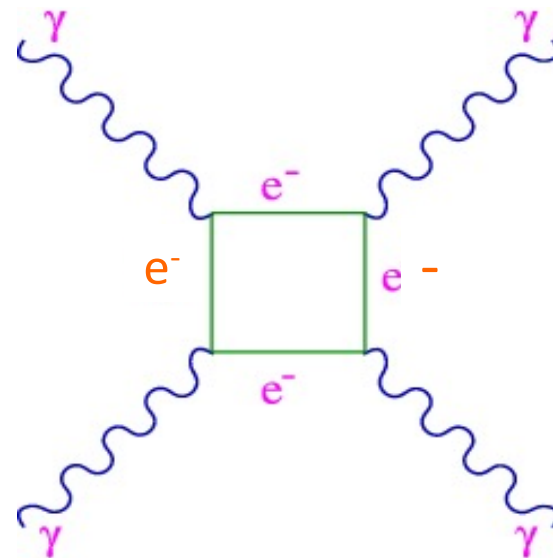
Non-linear effect of the vacuum

②の仮想場の効果

バックグラウンド? だけど
誰も見たことない



光は光と相互作用しない(→ マックスウェル)
真空中に電子/陽電子が満ちている(QED)
光と光が散乱する



未知の場
小さな電荷をもった場

s- t- ともに

QED predicts

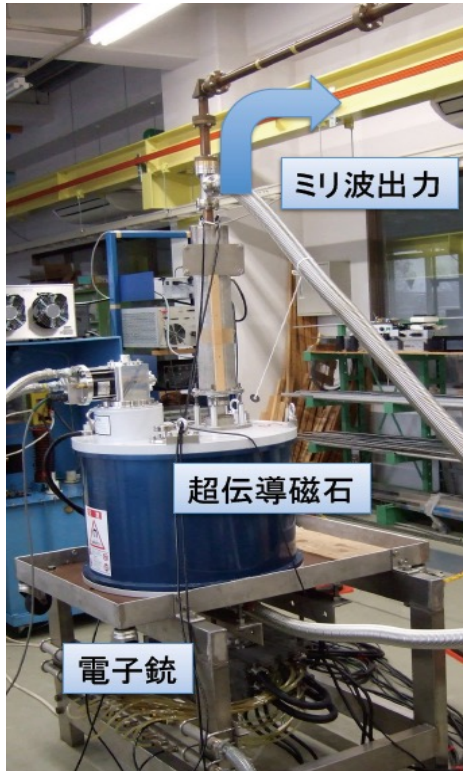
$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{139\alpha^4}{(180\pi)^2 m^2} \left(\frac{\omega}{m}\right)^6 (3 + \cos^2 \theta)^2$$

This process is seriously suppressed by α^4 and **highly suppressed by electron mass m.**

The expected cross section $\sigma = 1.8 \times 10^{-70} [\text{m}^2]$ for $\omega = \text{eV}$ Too small!!
 10^{-27}fb

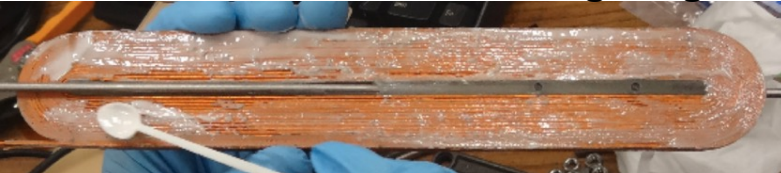
Wide range of Light Sources are developed/used

meV (THz)



Gyrotron + FP resonator
 $E > 100 \text{ kW}$ 10^{26} Photon

10-20 T strong Magnet



eV (Laser)



F=450,000 FP resonator
500 TW Laser



KeV (X Ray)



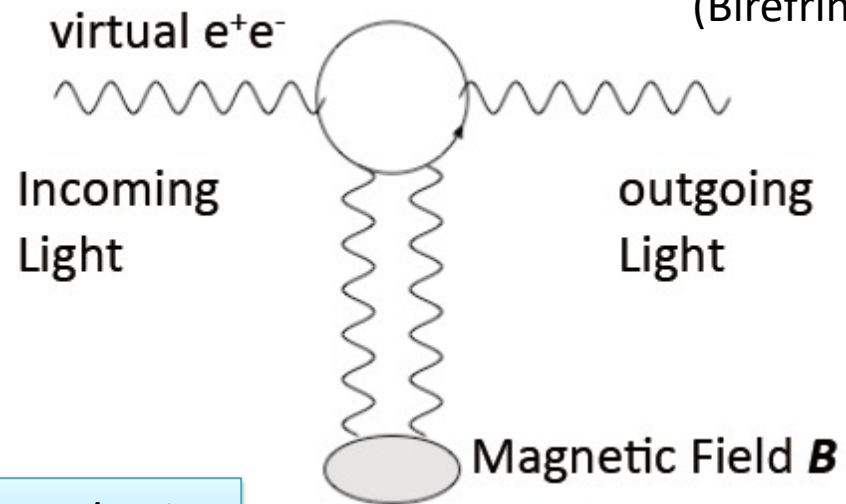
SACLAT • Spring8



Various combinations
of these light sources
cover various ECM for survey

[1] Vacuum Magnetic Birefringence with Pulsed B $\nu \sim 1\text{meV}$

QED vacuum View



Refraction index n changes on the direction of the magnetic field B (Birefringence) \rightarrow Polarization is affected.

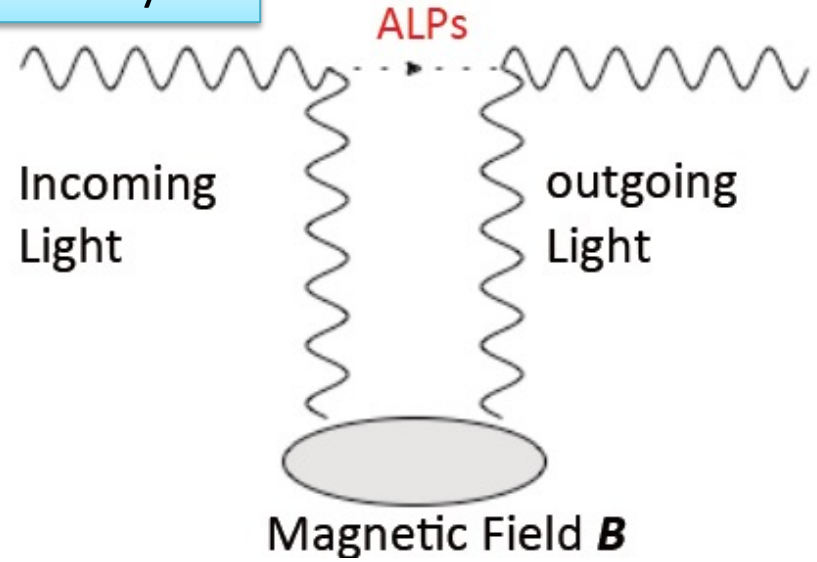
$$\Delta n = n_{\parallel} - n_{\perp} = k_{\text{CM}} \times B^2$$

$$k_{\text{CM}} = 4.0 \times 10^{-24} [\text{T}^2]$$

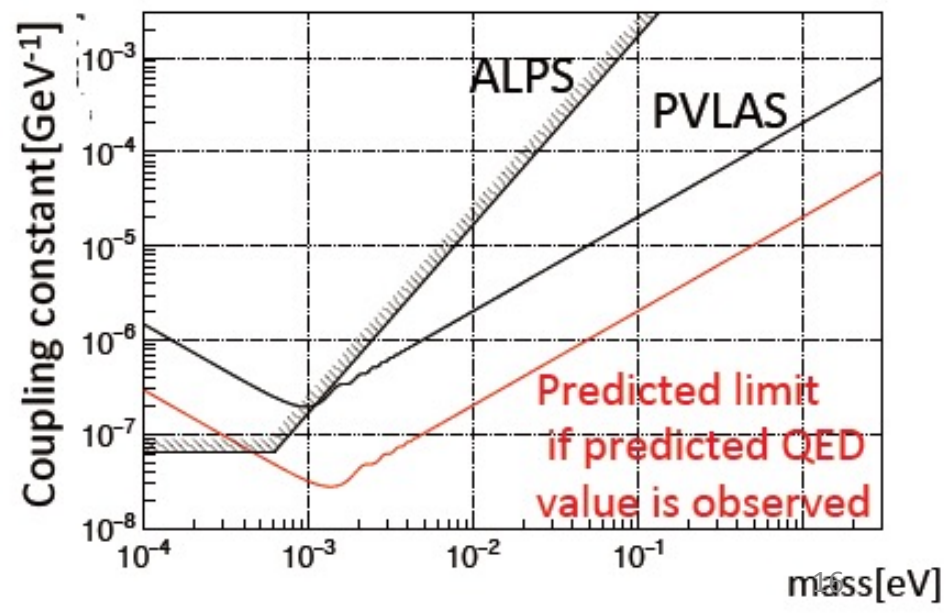
\rightarrow Evidence of QED vacuum

PLVAS try to discover VMB Signal? Noise? is observed

New Physics

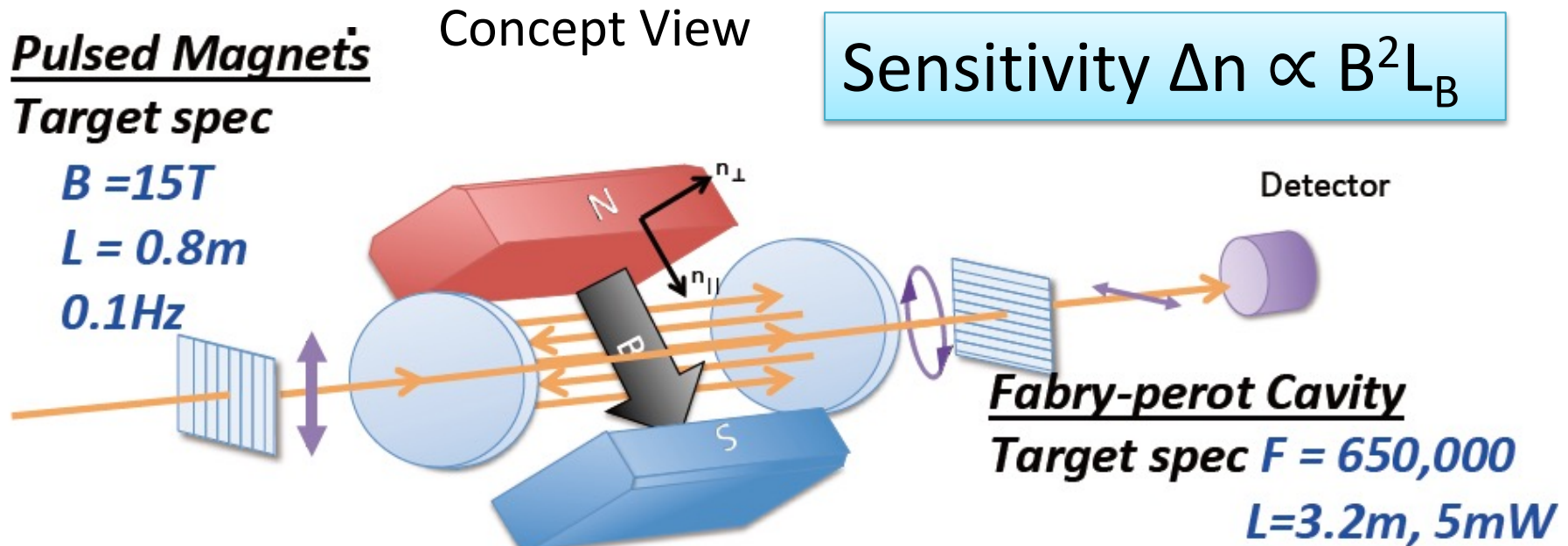


Sensitivity to Axion Like Particles



OVAL experiment at U. Tokyo

L: Light path length



Polarimeter is used to pickup signal

Strong Magnet (15T) is used
High repetition pulsed magnet is used.
It is different from PVLAS.

High Finesse Fabry-Perot Cavity
Effective L in B = 520 Km

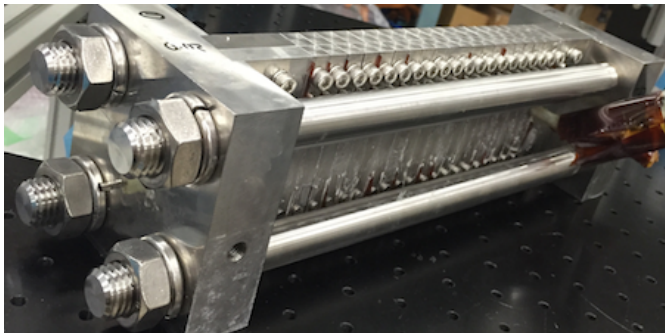
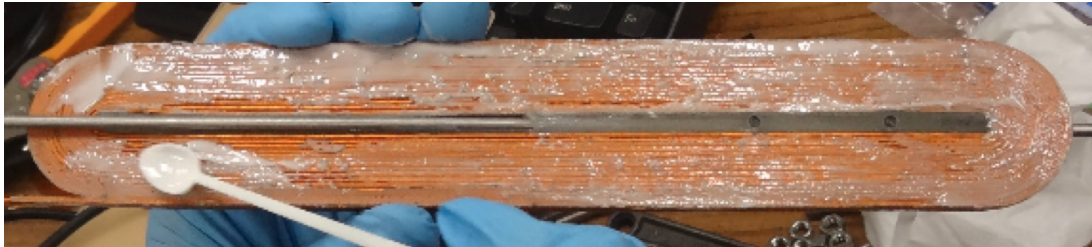
Noise control (similar to GW detector) is also crucial

Pulsed Magnet

Racetrack magnet
with Cu

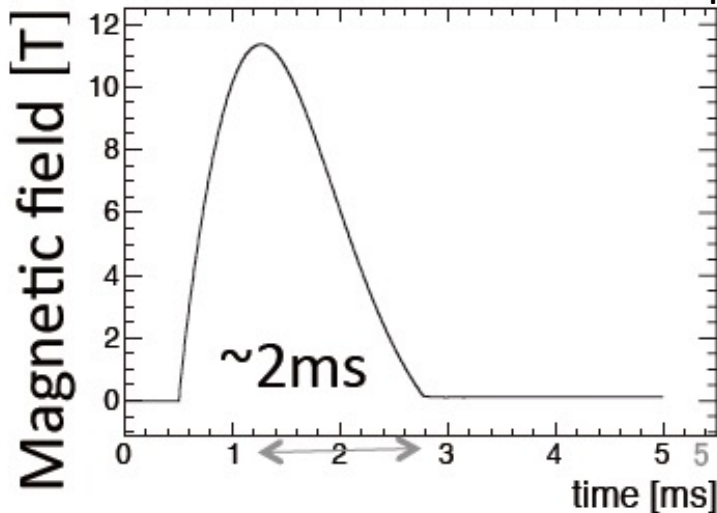
$\phi 5.3\text{mm}$: pipe: Light path

11 T 20cm OK \rightarrow **15T is ready Now \rightarrow 20T future**



Magnet is reinforced
with Stainless case
(Force 40 Mpa is
generated at magnet ON)

Prototype has
been
tested well



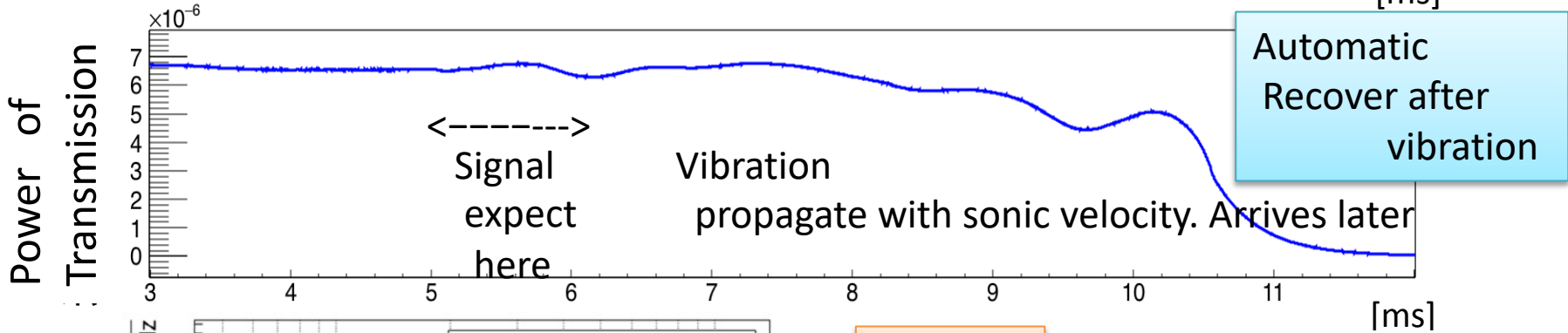
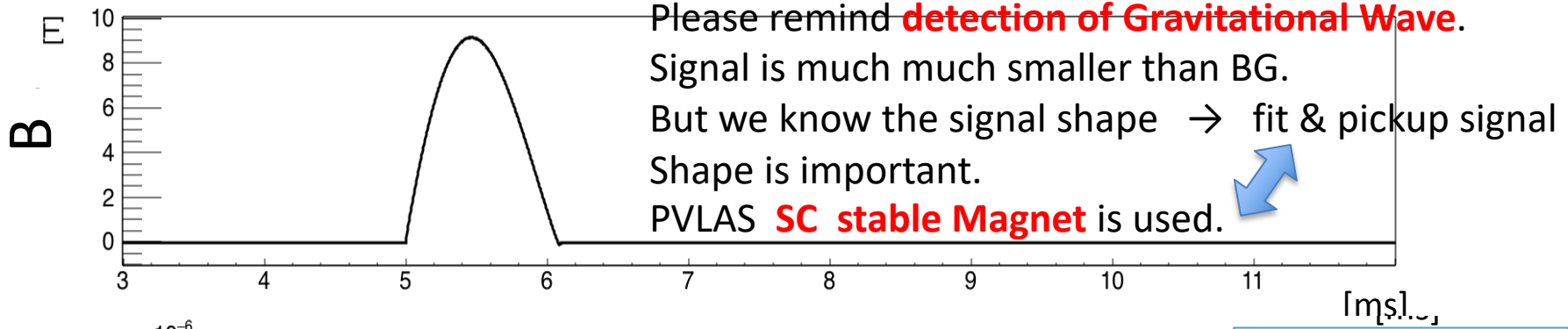
Quick Recharge system
High repetition $O(1)\text{Hz}$



$C=3.0\text{mF}$, $V=4.5\text{kV}$, 15kVA 18

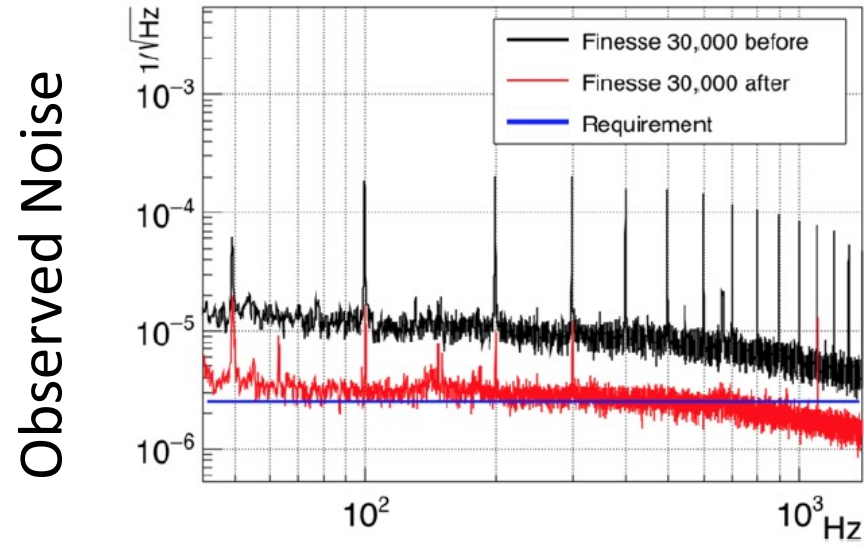
Why do we choose the pulsed magnet?

Benefit 1



Benefit 2

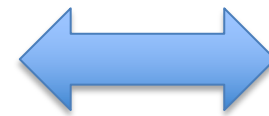
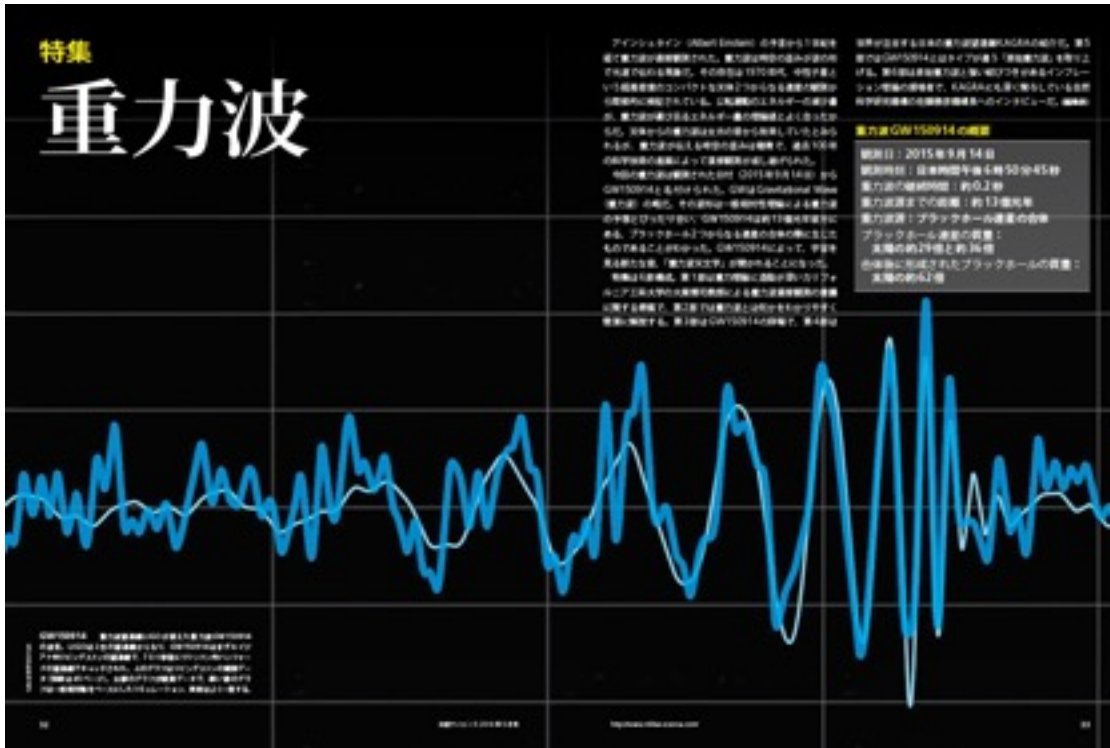
Fast pulse -> High Frequency



High Noise background @ low Frequency

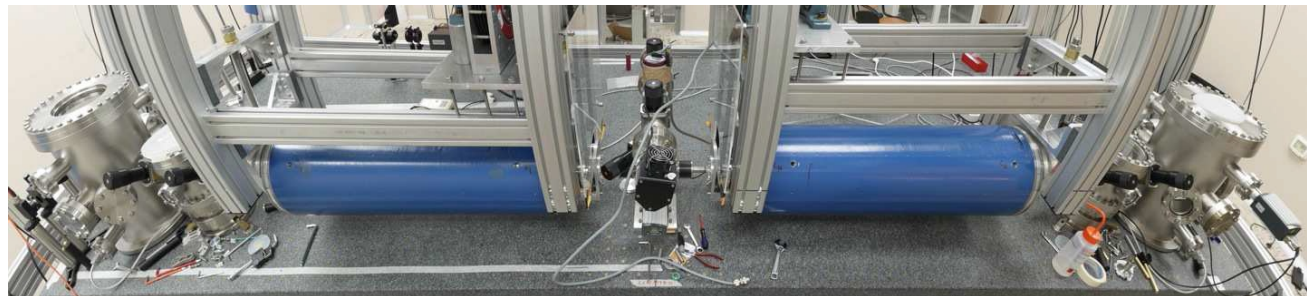
F=30,000 Cavity Noise OK
 Next Study with F=300,000

振動のパターンが分かっている！！！！ ノイズに勝てる



超伝導磁石
stable

PVLAS

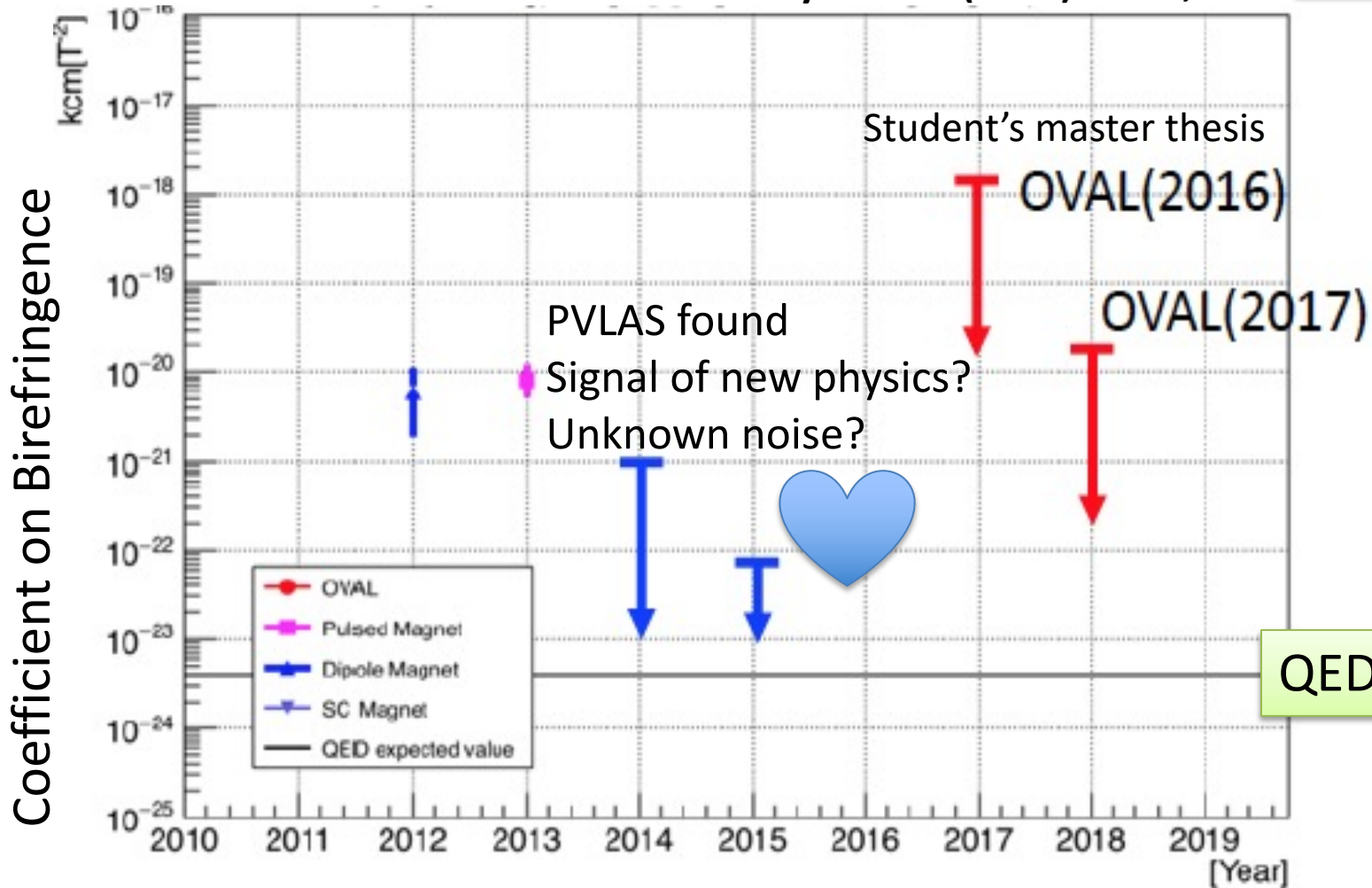


Current Status

The first test result with just 100 pulses is published

Eur.Phys.J. D71 (2017) no.11, 308

No signal was observed



Factor 300 less sensitive to PVLAS

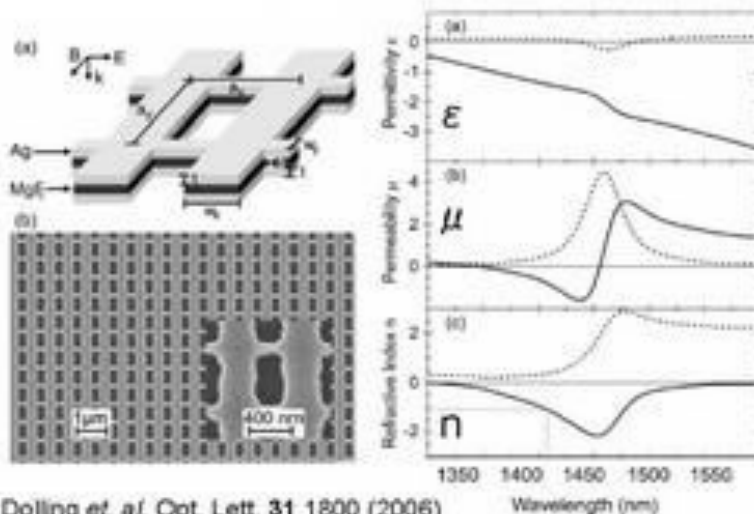
QED prediction

メタマテリアル

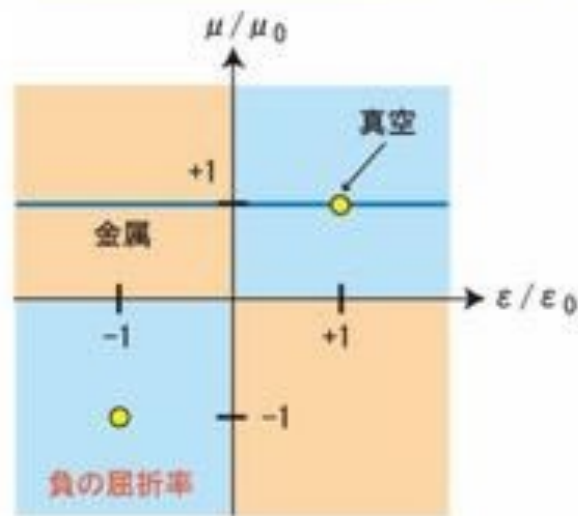
負の屈折率を実現する構造



R. A. Shelby et al. Science 292 77 (2001)



G. Dolling et al. Opt. Lett. 31 1800 (2006)



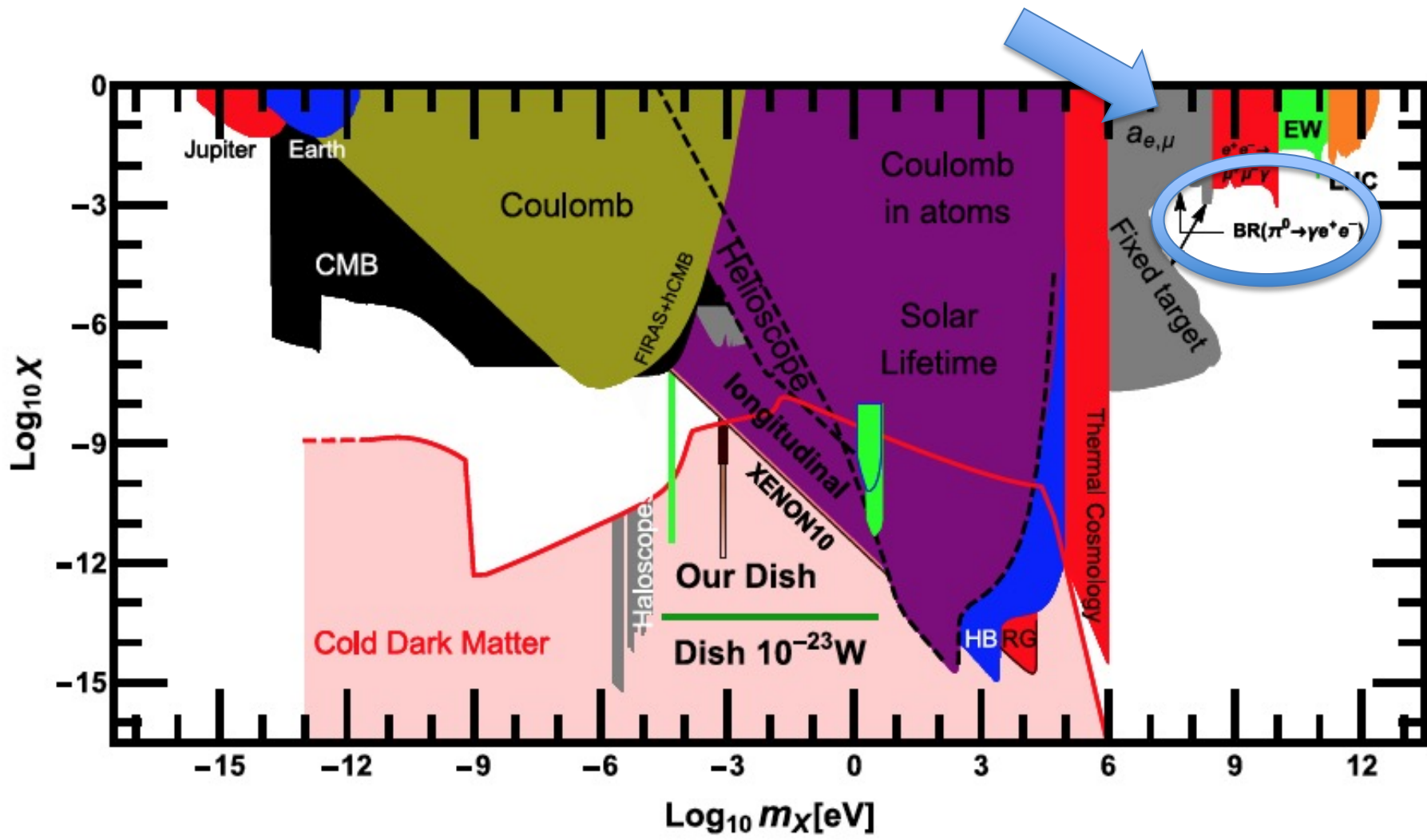
V.G. Veselago, Sov.Phys. Usp.10,509 (1968)

D.R. Smith and N. Kroll, Phys. Rev. Lett. 85, 2933 (2000)

図1

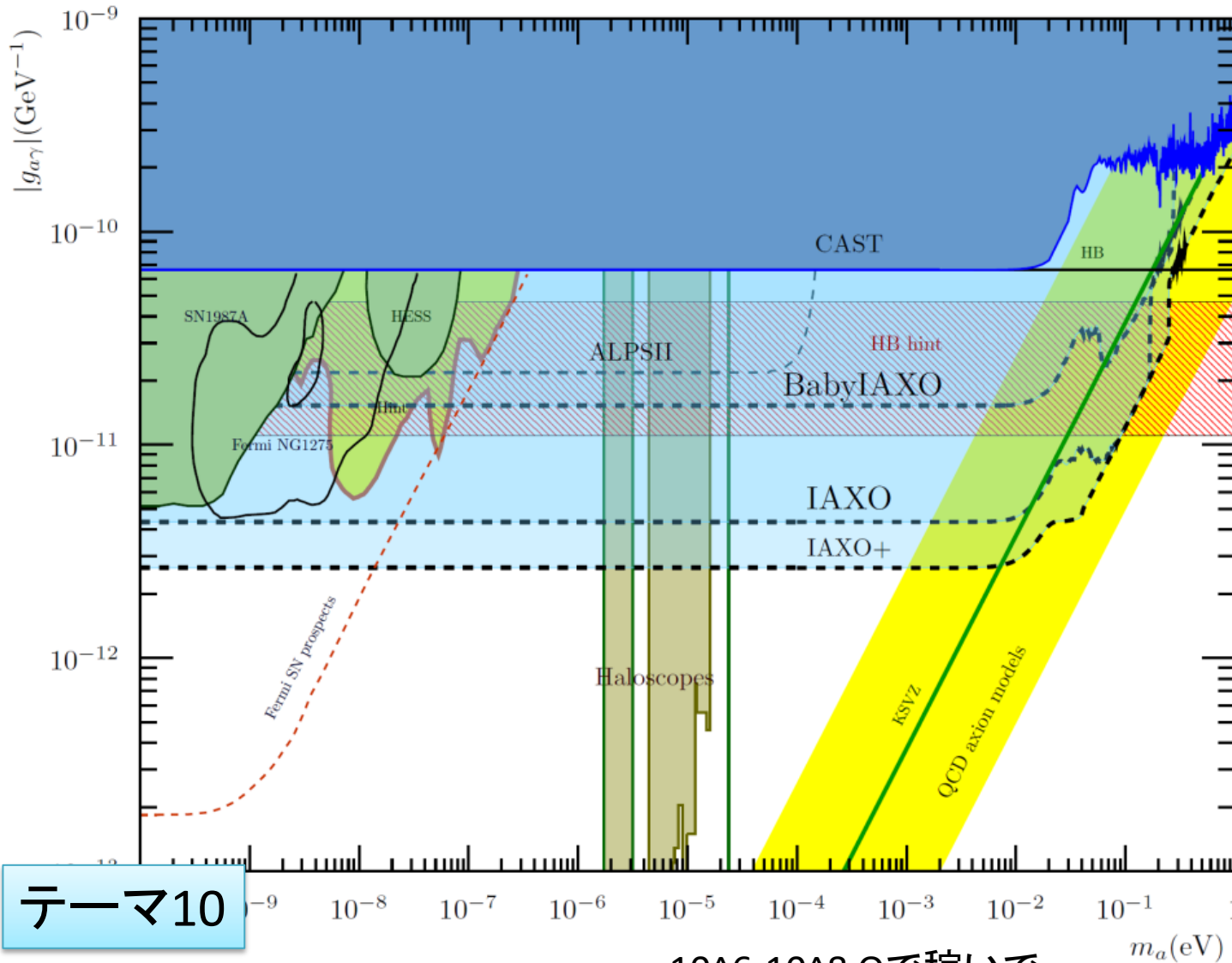
物理は、5限で(偽BHを作る)

メタX研究会ってのを作って --



[6] Axion領域

2つのアプローチ



太陽から
降ってくる
Axion

Axion 望遠鏡鏡

テーマ10

Single Photo Counting

Cavity

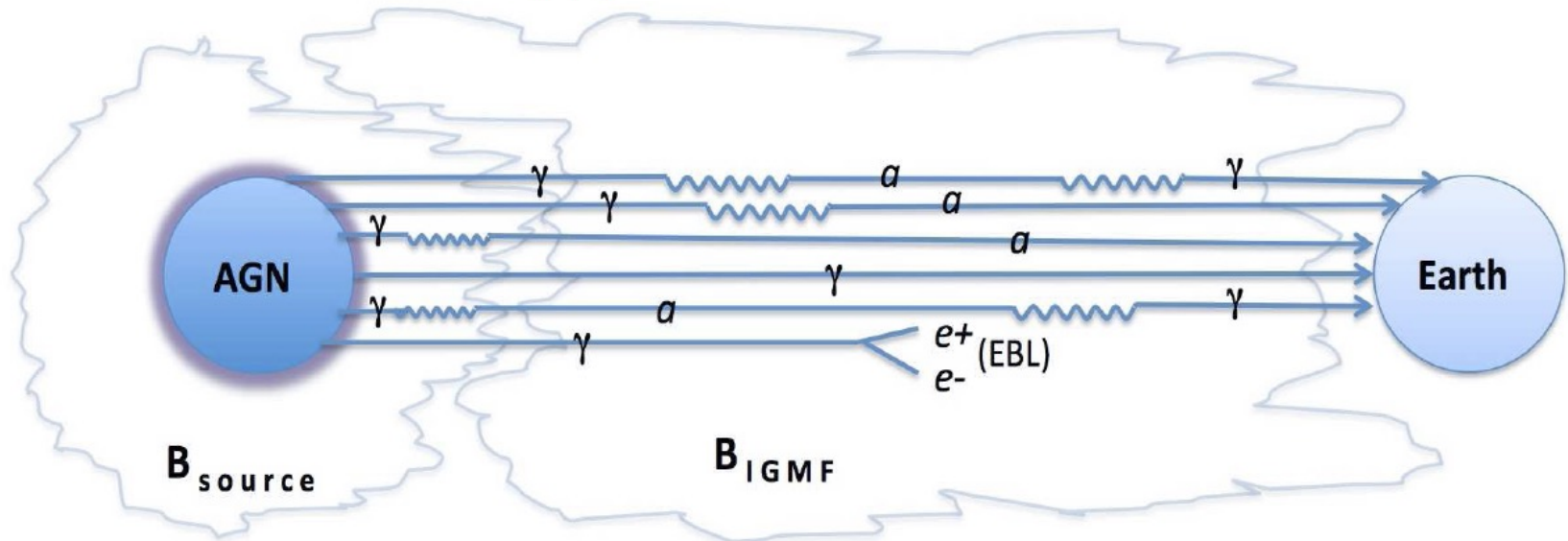
10⁶-10⁸ Qで稼いで
Gain 針のような感度

Astrophysical hints for axions

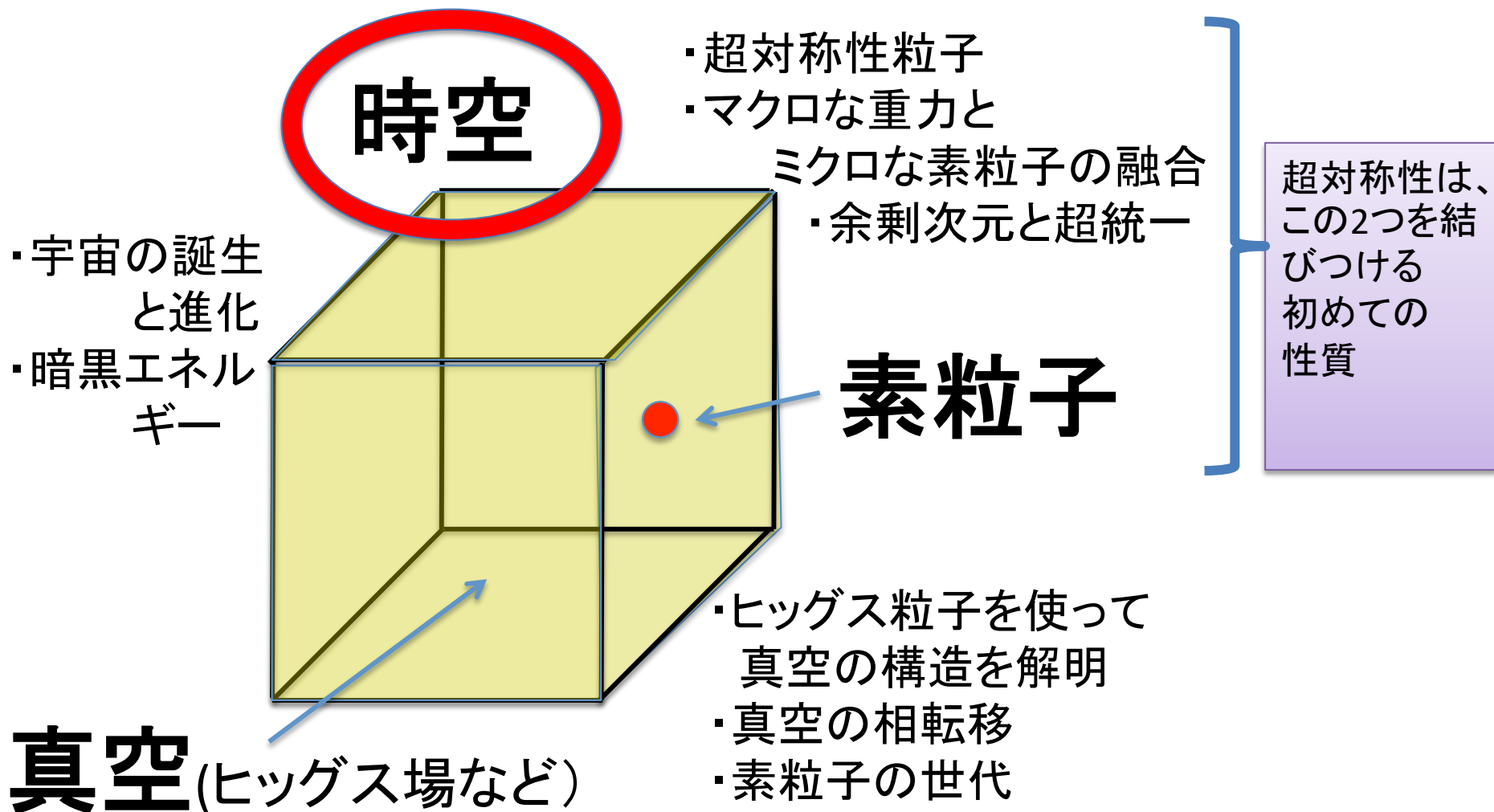
- Gamma ray telescopes like MAGIC or HESS observe HE photons from very distant sources...



ALP: $g_{a\gamma} \sim 10^{-12} - 10^{-10} \text{ GeV}^{-1}$
 $m_a \lesssim 10^{-(10-7)} \text{ eV}$



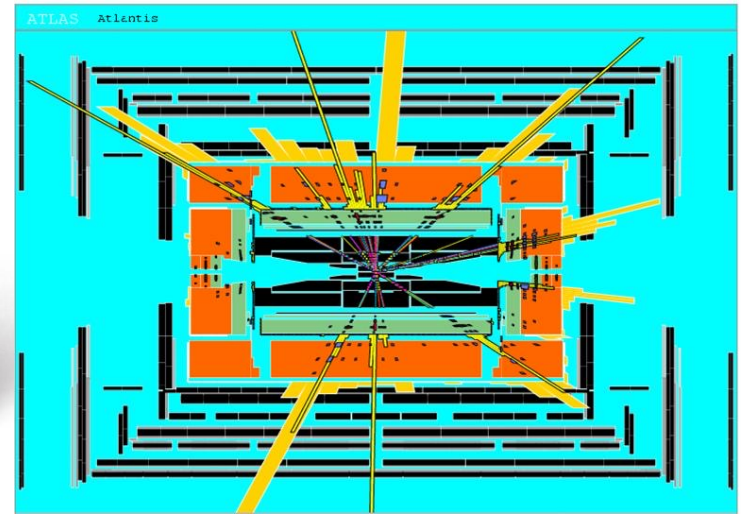
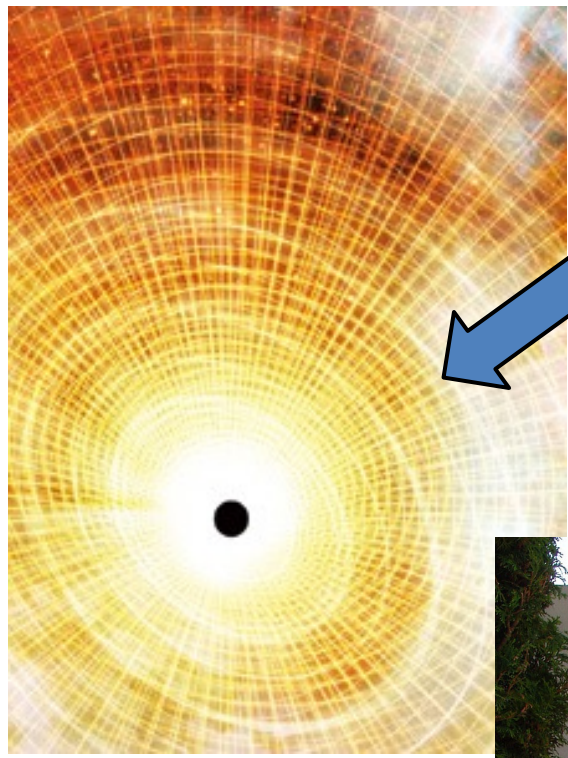
5限 時空：ミクロな時空



広辞苑をBHに捨てました
言葉の情報は？



BHの中で情報はどうなっている？



情報はエネルギー $1\text{bit} \sim k_B$ (忘れるのもエネルギー)

情報と物理学

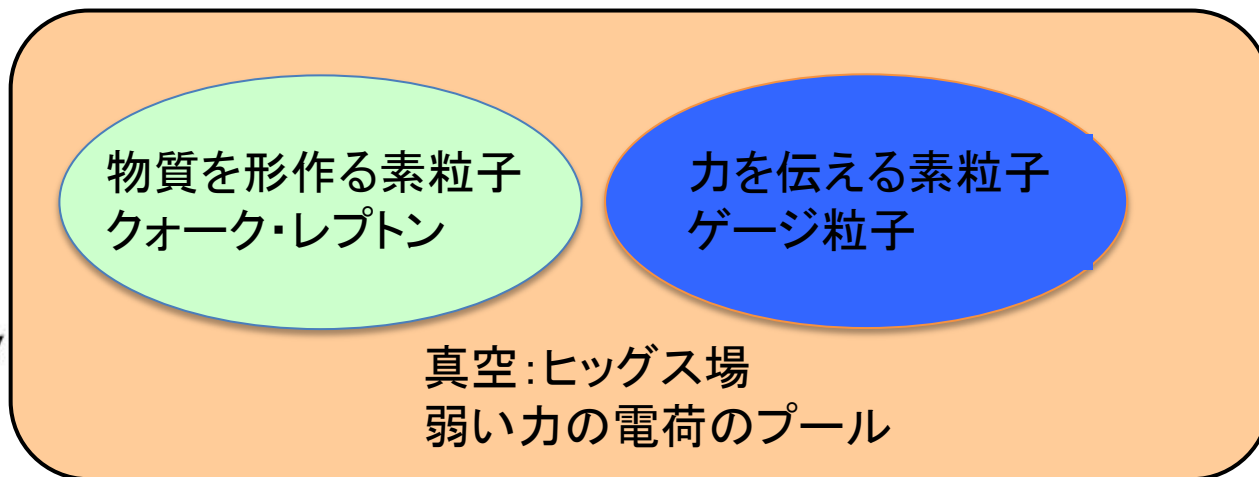
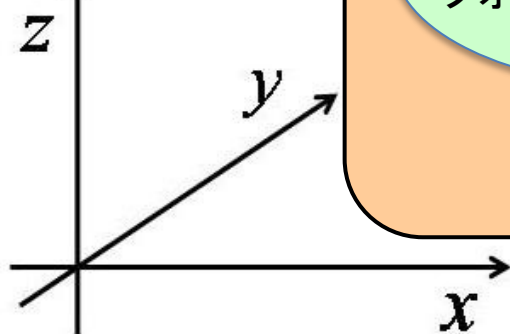


出てくる粒子を
調べると
BHの中が分かる??

こういう検証?
エントロピー
面積に比例

素粒子がみる世界は
4次元ではない

4次元時空
+SPIN空間



アインシュタイン方程式

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

曲率R

R: スピンで同じか? 等価原理の破れ

R: 1つしかないか? (double metric) 等価原理の破れ

R: 連続か? ローレンツ不変の破れ (Planck scale level?)

1A) $mg=ma$ (等価原理) の検証

反物質でも？スピンの違い？
ポジトロニウムBEC

1A-2) PsのBECでどうやって
spin 1 vs $\frac{1}{2}$ の等価原理の比較できるか？
反物質の等価原理？

重力

テーマ13

マテリアルの違いでやっていたのを
スピンや粒子・反粒子の違いでやれないか？

1B) ローレンツ不変の破れ (超高エネルギー-宇宙線)

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

η は、ヘリシティ

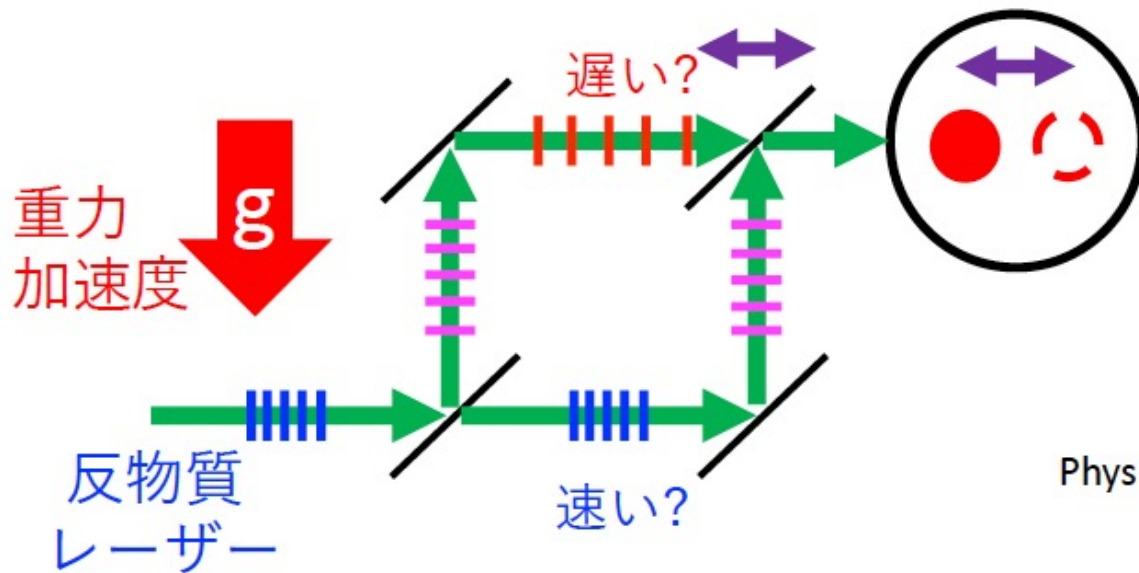
ローレンツ不変破れできないか？

これを
みんな
やっている

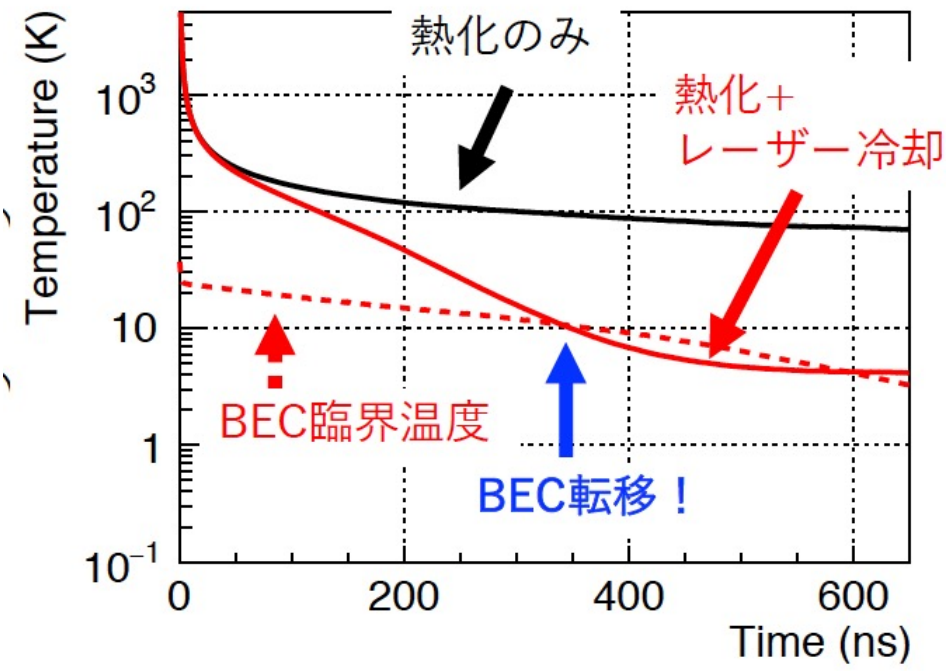
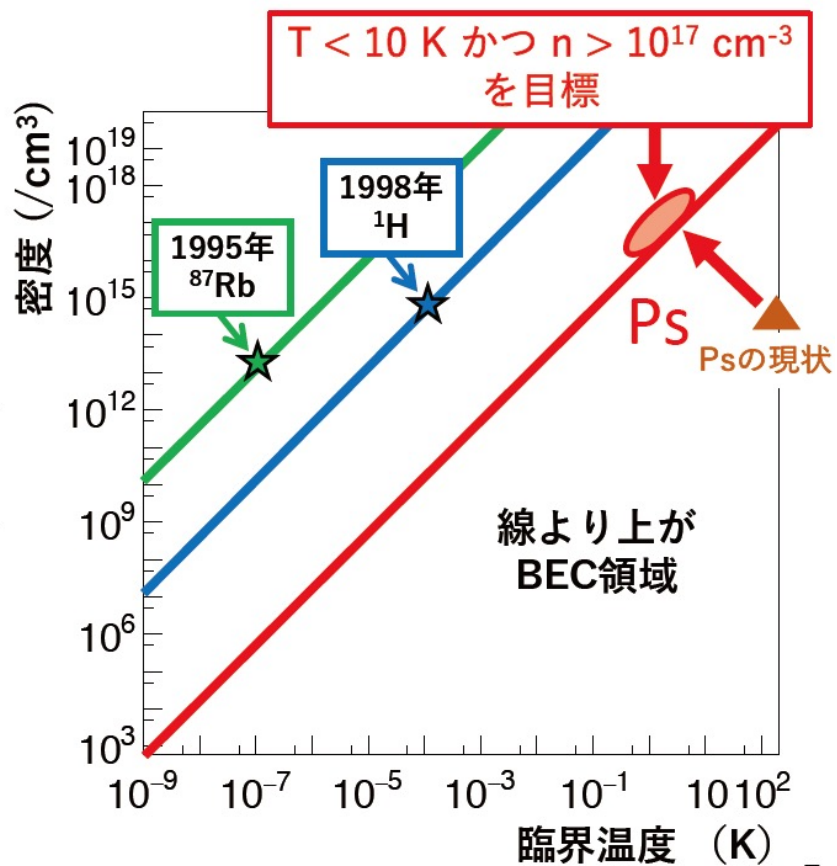
ポジトロニウムのBEC

反物質にはたらく重力は
実験的によく分かっていない

パスの長さを変更することで明滅

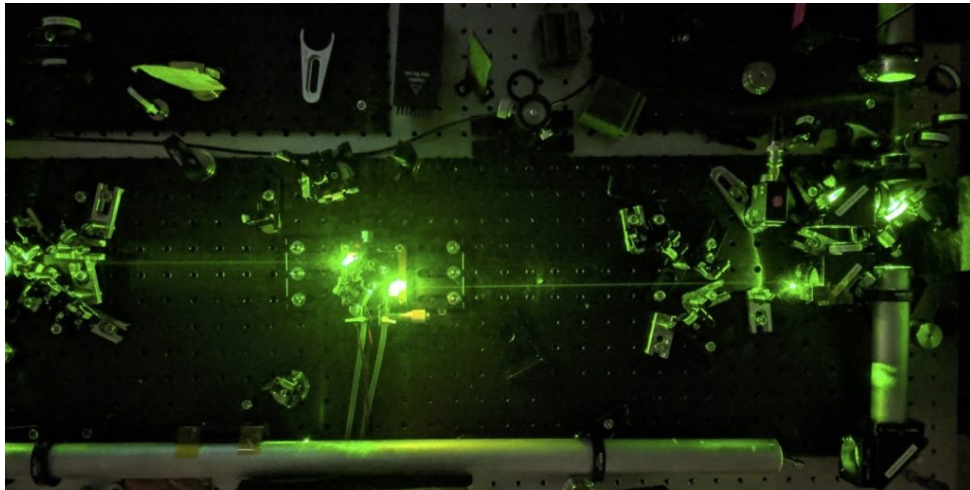


Phys. stat. sol. 4, 3419 (2007)



シミュレーションによるPs冷却の評価

レーザー開発
(面白いレーザー
開発の必要)



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

(右辺)エネルギー・ 運動量テンソル T

ミクロには 何がTを作るのか？
グラビトンの生成プロセス

スカラー

$$\circ T_{\mu\nu} = \underbrace{\frac{\partial\phi}{\partial x^\mu} \frac{\partial\phi}{\partial x^\nu}}_{p^2 \text{ 運動量}} - \delta_{\mu\nu} \left(\frac{1}{2} g^{\alpha\beta} \frac{\partial\phi}{\partial x^\alpha} \frac{\partial\phi}{\partial x^\beta} + V(\phi) \right)$$

↳ ??

ベクトル 光

$$\circ \text{photon } T_{\mu\nu} ? \quad \left(F_{\mu\nu} F^{\mu\nu} \right) \rightarrow \text{足残し}$$

完全流体 3Heつかって

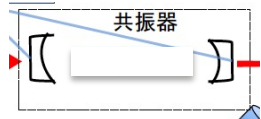
$$\circ T_{\mu\nu} = (\rho c^2 + P) \delta_{00} + \delta_{\mu\nu} P$$

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:

小さい変量をみないといけない → 量子センサーの開発

2) 光の場は重力を生むか？

1MJのCavity r=1cm



ハイパワー+位相がそろったレーザー



マクロな重力方程式
重力ポテンシャル

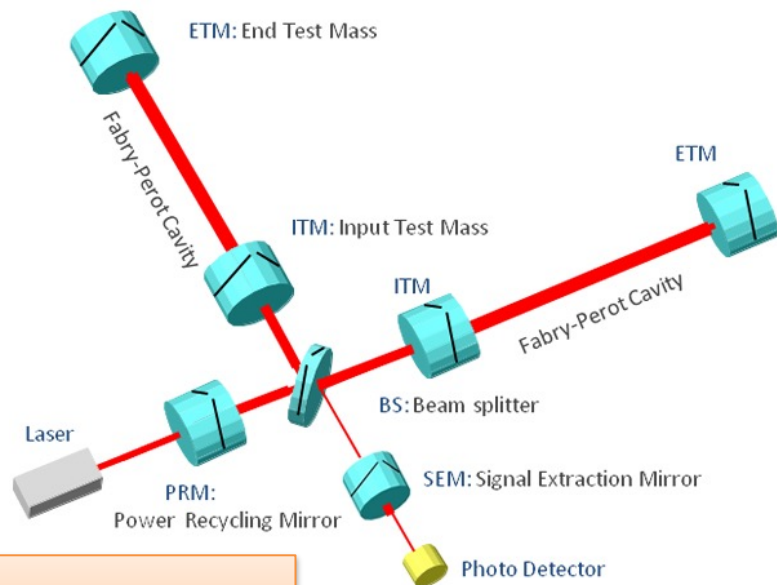
$$(E/r) / (M(\text{地球})/R) = 10^{-24}$$

香取先生の精度 10^{-18} の時計を使って

Mach-Zehnder
干渉計(重力波)

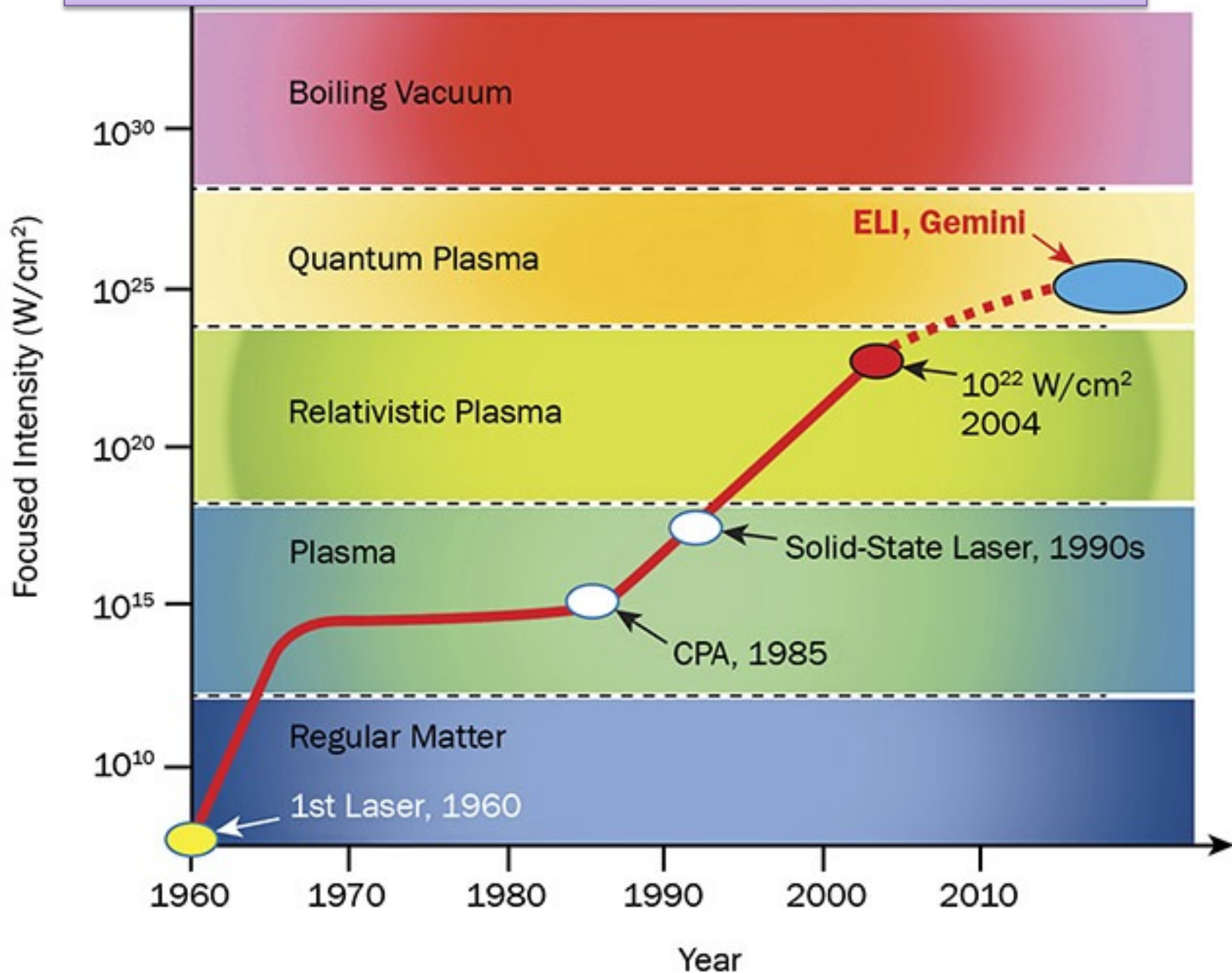
10^{-24} ?

UltraCold
中性子干渉計 ?



光の High Power と High Precision の両方の側面
が必要 アイデア

10^{25}W/cm^2 (アット秒) → 検出器がついていけない



Implementation	Qubit(s)	Measured quantity(ies)	Typical frequency	Initialization	Readout	Type ^a
Neutral atoms						
Atomic vapor	Atomic spin	Magnetic field, Rotation, Time/Frequency	DC–10 GHz	Optical	Optical	II–III
Cold clouds	Atomic spin	Magnetic field, Acceleration, Time/Frequency	DC–10 GHz	Optical	Optical	II–III
Trapped ion(s)						
	Long-lived electronic state	Time/Frequency Rotation	THz	Optical	Optical	II–III
	Vibrational mode	Electric field, Force	MHz	Optical	Optical	II
Rydberg atoms						
	Rydberg states	Electric field	DC, GHz	Optical	Optical	II–III
Solid state spins (ensembles)						
NMR sensors	Nuclear spins	Magnetic field	DC	Thermal	Pick-up coil	II
NV ^b center ensembles	Electron spins	Magnetic field, Electric field, Temperature, Pressure, Rotation	DC–GHz	Optical	Optical	II
Solid state spins (single spins)						
P donor in Si	Electron spin	Magnetic field	DC–GHz	Thermal	Electrical	II
Semiconductor quantum dots	Electron spin	Magnetic field, Electric field	DC–GHz	Electrical, Optical	Electrical, Optical	I–II
Single NV ^b center	Electron spin	Magnetic field, Electric field, Temperature, Pressure, Rotation	DC–GHz	Optical	Optical	II
Superconducting circuits						
SQUID ^c	Supercurrent	Magnetic field	DC–10 GHz	Thermal	Electrical	I–II
Flux qubit	Circulating currents	Magnetic field	DC–10 GHz	Thermal	Electrical	II
Charge qubit	Charge eigenstates	Electric field	DC–10 GHz	Thermal	Electrical	II
Elementary particles						
Muon	Muonic spin	Magnetic field	DC	Radioactive decay	Radioactive decay	II
Neutron	Nuclear spin	Magnetic field, Phonon density, Gravity	DC	Bragg scattering	Bragg scattering	II
Other sensors						
SET ^d	Charge eigenstates	Electric field	DC–100 MHz	Thermal	Electrical	I
Optomechanics	Phonons	Force, Acceleration, Mass, Magnetic field, Voltage	kHz–GHz	Thermal	Optical	I
Interferometer	Photons, (Atoms, Molecules)	Displacement, Refractive Index	–			II–III

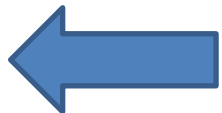
テーマ13

香取
時計



μeV-meV
Single
Photo counting
Polarization

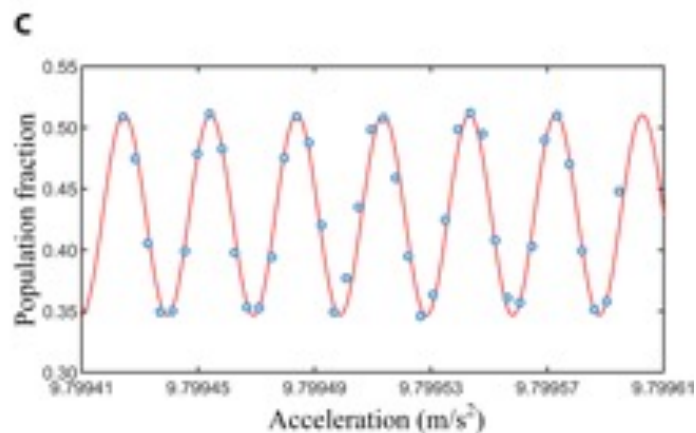
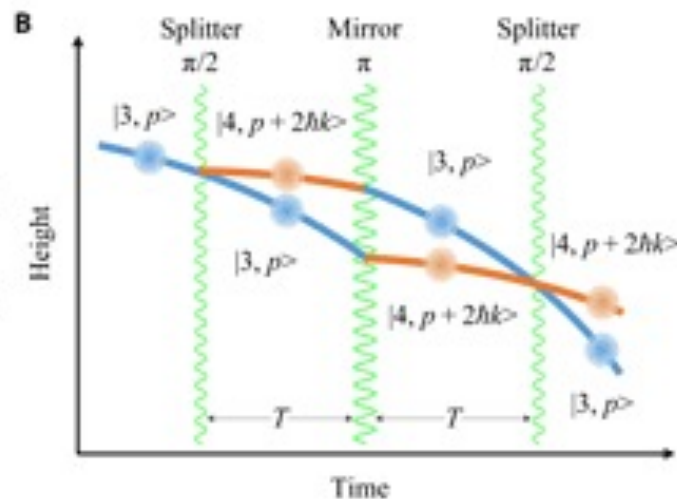
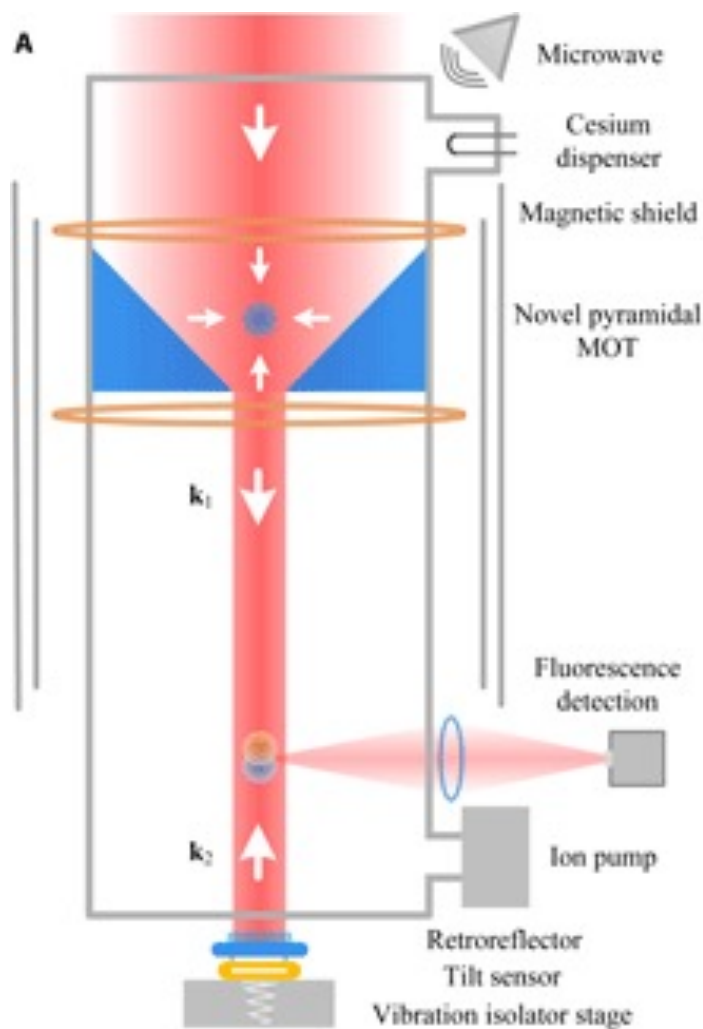
中性子干渉計
+時間位置計測



Cold Atom
干渉計



Cold Atomを使って重力を検出できるようになってきた



-> スカラー場が与える重力が分かれば。。

宇宙項 Λ

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

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

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

10^{60}

10^{112}

宇宙項の場は、マクロに効く、
他のすべての場は効かないのか？

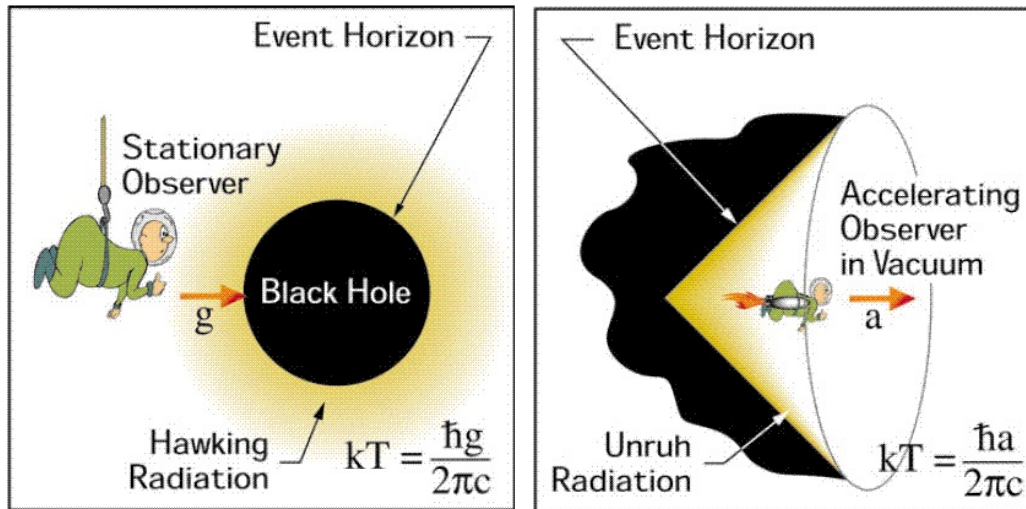
Higgs場がある
 10^{28} kg/cc
この場が何故効かない？

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

ウンルー効果

テーマ14

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見える。

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。(偏極依存の励起で、エンタングル?) 38

偽物BHで
研究できないか？
ベッケンシュタイ
など

加速電子がみるウnlルー効果

どのくらい? 光子の電場の加速度

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

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

Single Photo counting

電子 $P=1\text{PW}, \sigma=1\mu\text{m}$ $E= 10^{14} \text{ V/m}$ $a=10^{25} \text{ m/s}^2$

$T=40000\text{K}$
可視光

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

2つのKeV X-rayの相関(entangleしている)でとらえる

meVから μeV single Photo counting
偏光

SACLAの
Beam dump
電子のエミッタンス
測定