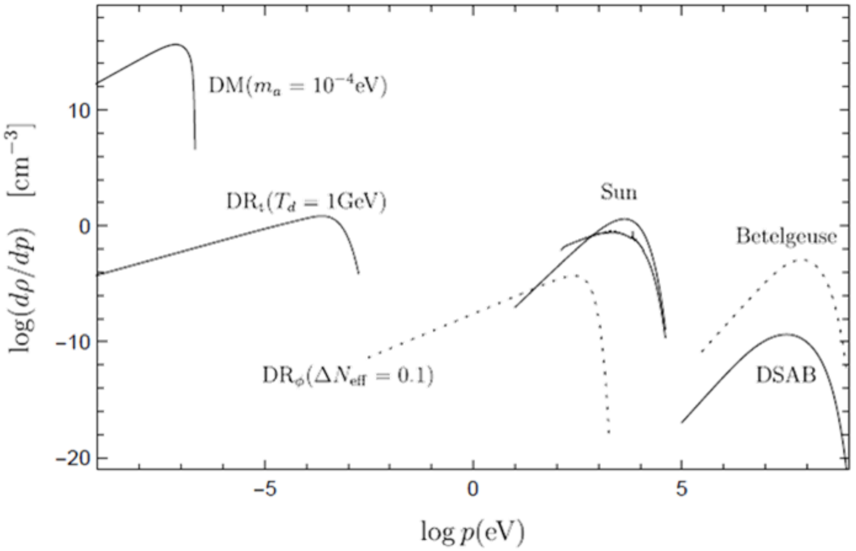
AXION実験
CARRACK

小川　泉

ALPを探す

- 何を？
  - 天然系
    - Solar axion
    - Halo axion
    - (Supernova axion…)
  - 作ってまえ
    - 実験室で作って検出

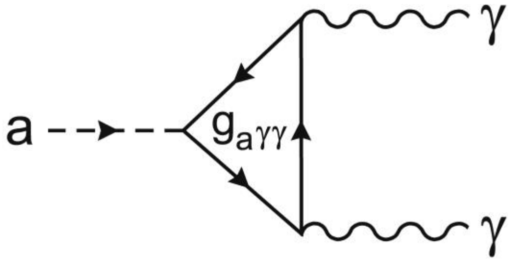


arXiv: 1801.08127

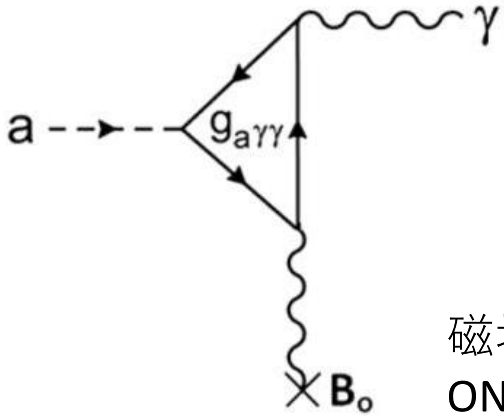
- どうやって？
  - 通常の物質との結合
    - 光子 $g_{a\gamma\gamma} = \frac{\alpha/2\pi}{f_{PQ}/N}\left(E_{PQ}/N - 1.95\right)$
    - 電子 $g_{aee} = \left(\frac{X_e}{N} + \frac{3\alpha^2}{4\pi}\left(\frac{E_{PQ}}{N}\ln\left(\frac{f_{PQ}}{m_a}\right) - 1.95\ln\left(\frac{\Lambda_{\mathrm{QCD}}}{\mathrm{m_e}}\right)\right)\right)\left(\frac{m_e}{f_{PQ}/N}\right)$
    - 陽子 $g_{app} = \cdots$
    - 中性子$g_{ann} = \cdots$

四天王の中で最強：$g_{a\gamma\gamma}$

※最強：使い勝手がいい



- 実験では…（逆）プリマコフ効果
  - Helioscope, Haloscope,…

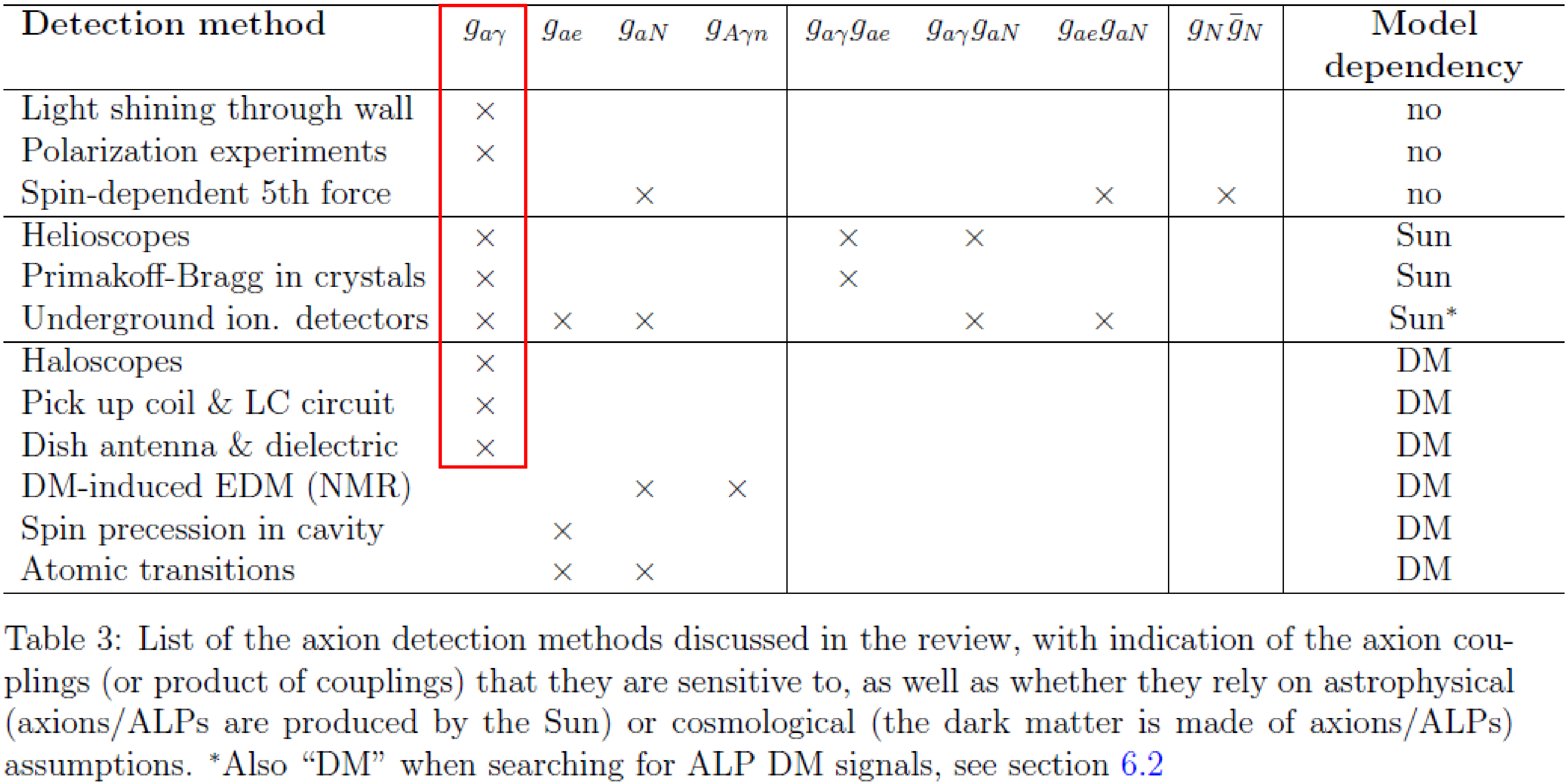


磁場が大事！
ON/OFF

+resonance, boost….

現状

arXiv: 1801.08127

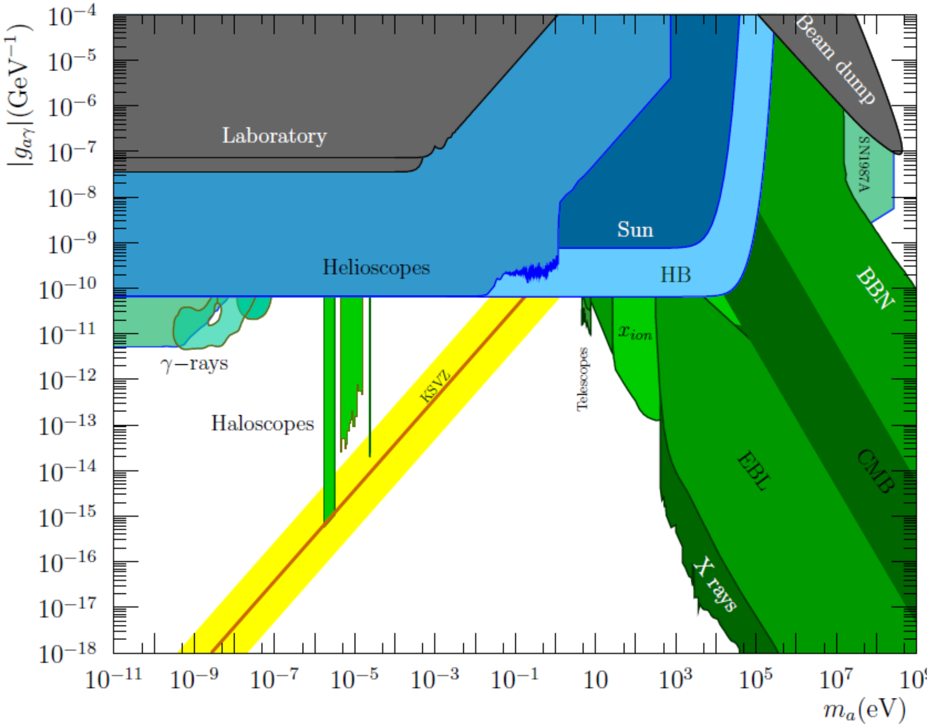


Detection method	$g_{a\gamma}$	g_{ae}	g_{aN}	$g_{A\gamma n}$	$g_{a\gamma}g_{ae}$	$g_{a\gamma}g_{aN}$	$g_{ae}g_{aN}$	$g_N\bar{g}_N$	Model dependency
Light shining through wall	×								no
Polarization experiments	×								no
Spin-dependent 5th force			×				×	×	no
Helioscopes	×				×	×			Sun
Primakoff-Bragg in crystals	×				×				Sun
Underground ion. detectors	×	×	×			×	×		Sun*
Haloscopes	×								DM
Pick up coil & LC circuit	×								DM
Dish antenna & dielectric	×								DM
DM-induced EDM (NMR)			×	×					DM
Spin precession in cavity		×							DM
Atomic transitions		×	×						DM

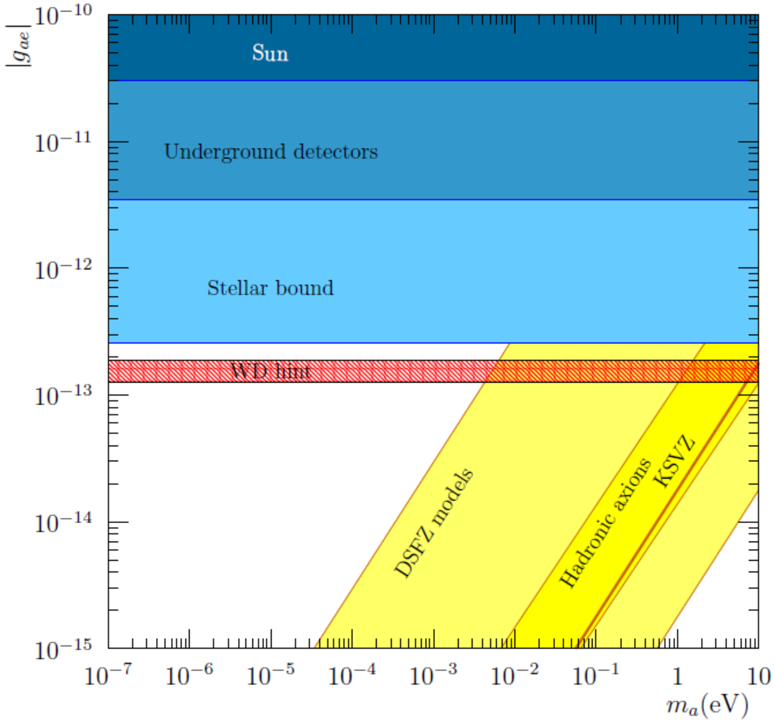
Table 3: List of the axion detection methods discussed in the review, with indication of the axion couplings (or product of couplings) that they are sensitive to, as well as whether they rely on astrophysical (axions/ALPs are produced by the Sun) or cosmological (the dark matter is made of axions/ALPs) assumptions. *Also "DM" when searching for ALP DM signals, see section 6.2

現状

axion-photon coupling



axion-electron coupling

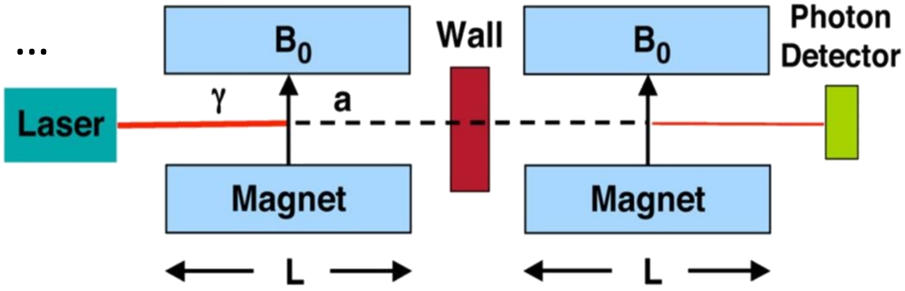


arXiv: 1801.08127

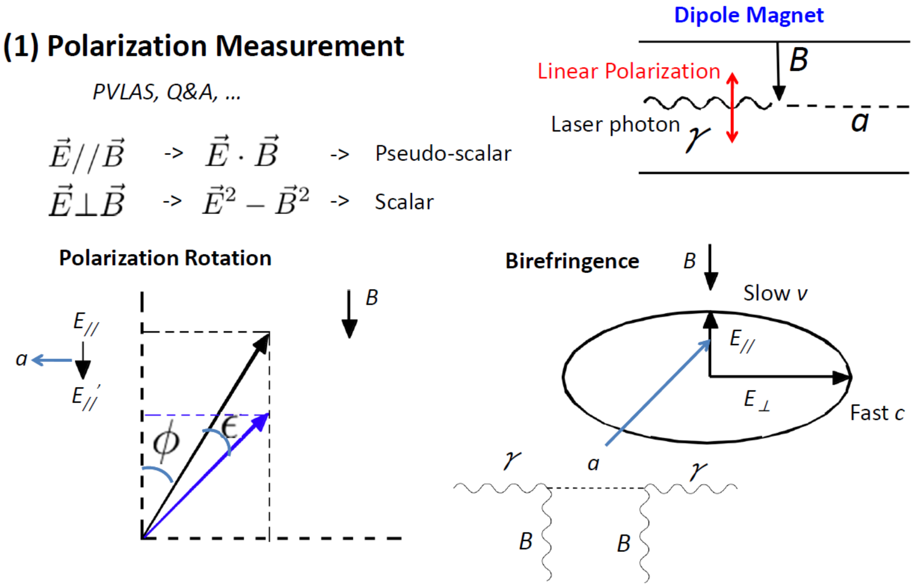
- 黒系：実験室
- 青系：天体物理（太陽、恒星他）
- 緑系：宇宙物理（DM halo, その他）
- 黄系：理論モデル（axion）

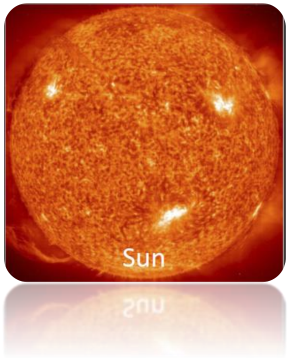
実験室での探索

- 利点：モデル（天体／宇宙物理）に依存しない
- 欠点：（現時点では）感度が低い
- 実験手法
    - Light-shining-through wall (LSW)実験
        - ALPS, CROWS, OSQAR, STAX, …
        - Laser, マイクロ波, X線



    - Polarization実験
        - PVLAS, …





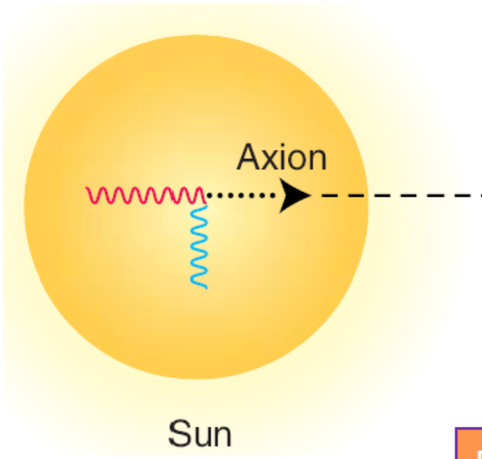
太陽axionの探索

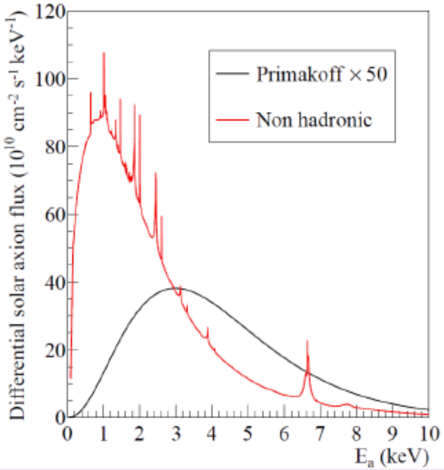
$$\mathcal{P}(a\to\gamma) = 2.6\times10^{-17}\left(\frac{g_{a\gamma}}{10^{-10}\mathrm{GeV}^{-1}}\right)^2 \boxed{\left(\frac{B_e}{10\ \mathrm{T}}\right)^2\left(\frac{L}{10\ \mathrm{m}}\right)^2}\mathcal{F}(qL)$$

- First axion helioscope proposed by P. Sikivie

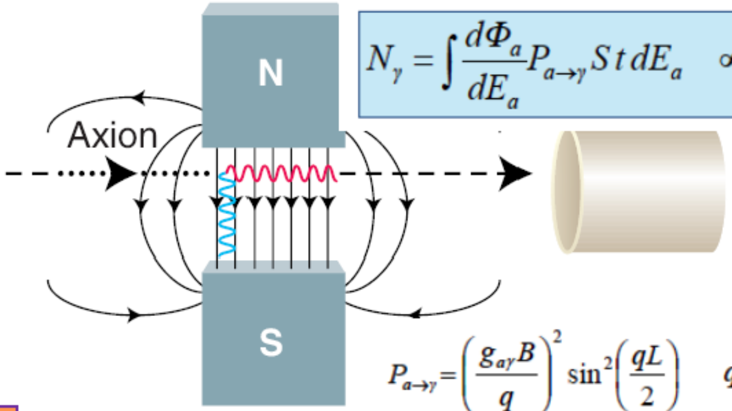
Sikivie *PRL* 51:1415 (1983)

  - Blackbody photons (keV) in solar core can be converted into axions in the presence of strong electromagentic fields in the plasma
  - Reconversions of axions into x-ray photons possible in strong laboratory magnetic field





Redondo JCAP 1312 008 (2013)



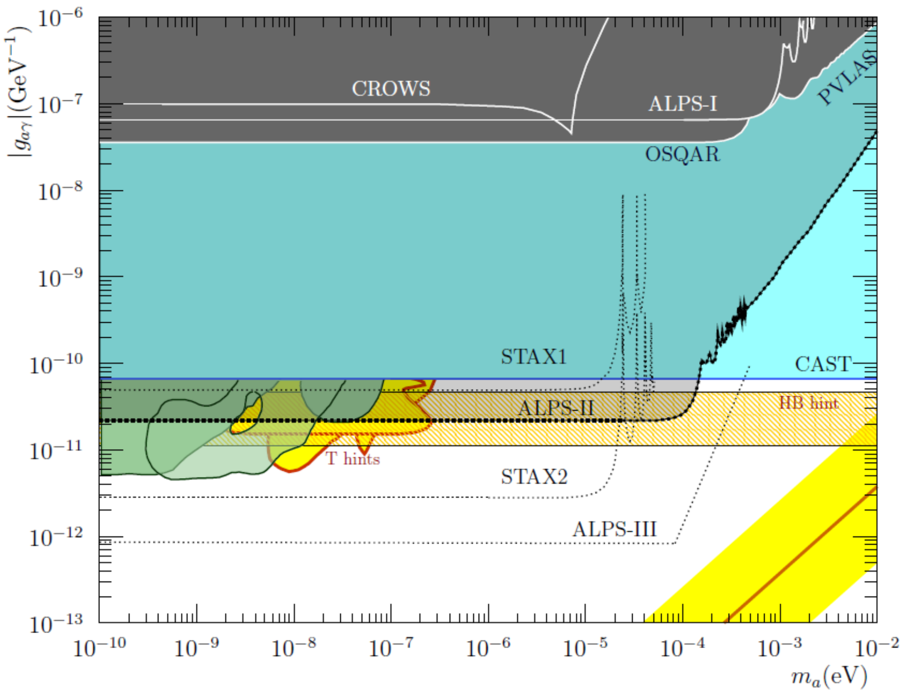
$$N_\gamma = \int \frac{d\Phi_a}{dE_a} P_{a\to\gamma} S\, t\, dE_a \quad \propto \quad g_{a\gamma}^4$$

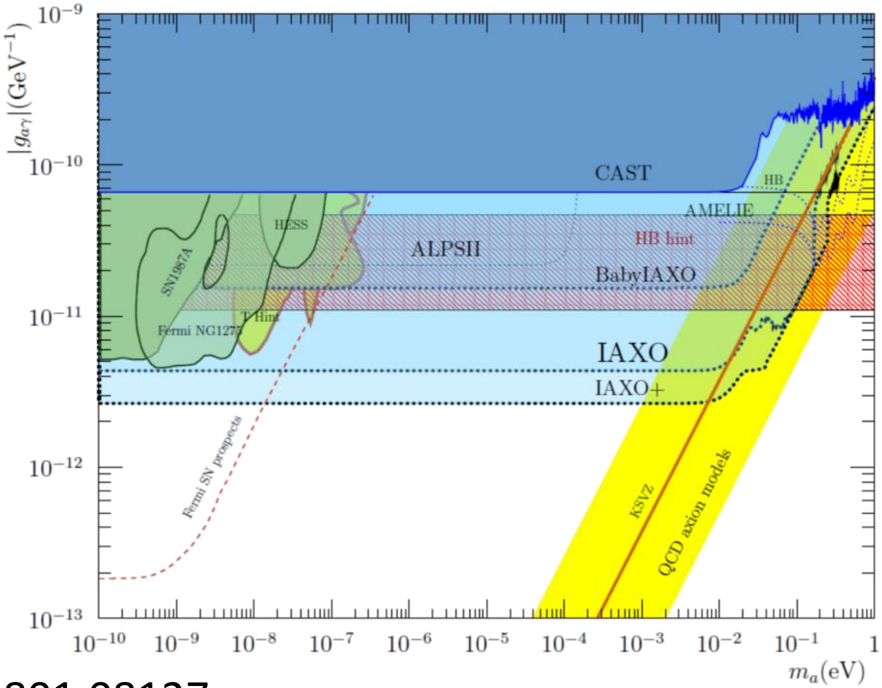
$$P_{a\to\gamma} = \left(\frac{g_{a\gamma}B}{q}\right)^2 \sin^2\left(\frac{qL}{2}\right) \qquad q = \frac{m_a^2}{2E}$$

J. Vogel, talk at Patras 2019

DH axion以外の計画まとめ

	Experiment	status	B(T)	L(m)	Power(W)	A(cm^2)
Laboratory	ALPS-I	Done	5	4.3	4	
	CROWS	Done	3	0.15	50	
	OSQAR	Ongoing	9	14.3	18.5	
	ALPS-II	In preparation	5	100	30	
	STAX	Concept	15	0.5	10^5	
Solar	Brookhaven	done	2.2	1.8		130
	SUMICO	done	4	2.5		18
	CAST	Ongoing	9	9.3		30
	BabyIAXO	In design	~2.5	10		2.8x10^3
	IAXO	In design	~2.5	22		2.8x10^4





arXiv: 1801.08127

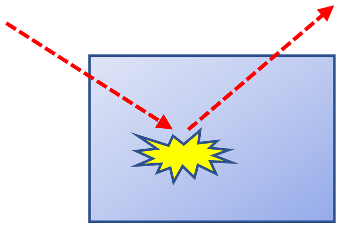
ダークハロー アクシオン

- 太陽近傍

ρ_{DM} = 0.2 - 0.56 (0.45) GeV/cm^3 $\beta \sim 10^{-3}$

m_{DM}

暗黒**粒子**
WIMPs

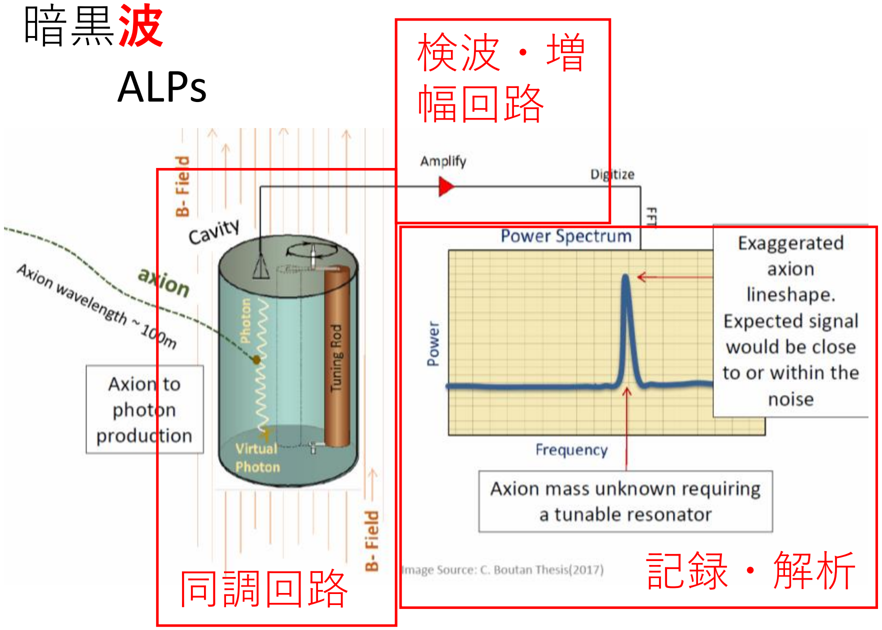


反跳信号

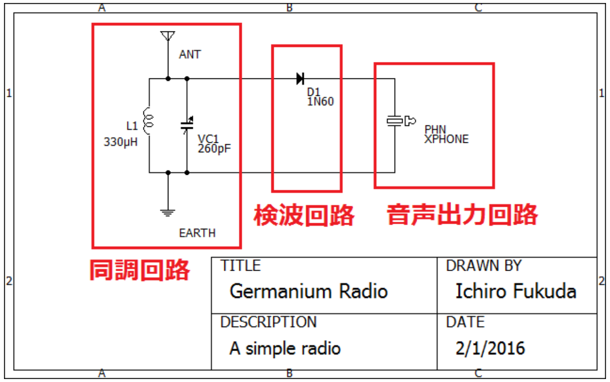
1 eV

ド・ブロイ波長
～1mm

暗黒**波**
ALPs



N.Woolet, talk at Rencontres de Moriond (2018)



TITLE: Germanium Radio
DRAWN BY: Ichiro Fukuda
DESCRIPTION: A simple radio
DATE: 2/1/2016

ゲルマニウムラジオ
http://ele-tech.net/germanium-radio2/

Now playing…
Radio $g_a ga(mma)$!

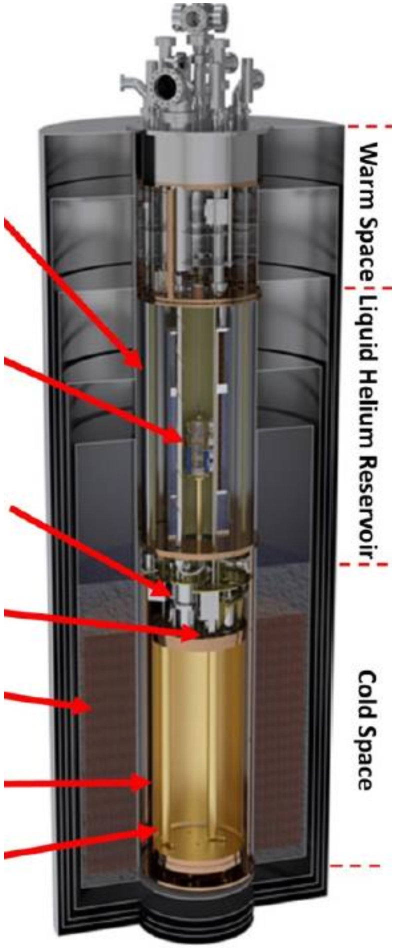
Conventional Haloscopes

- 信号
  - 共振空洞の利用: Q

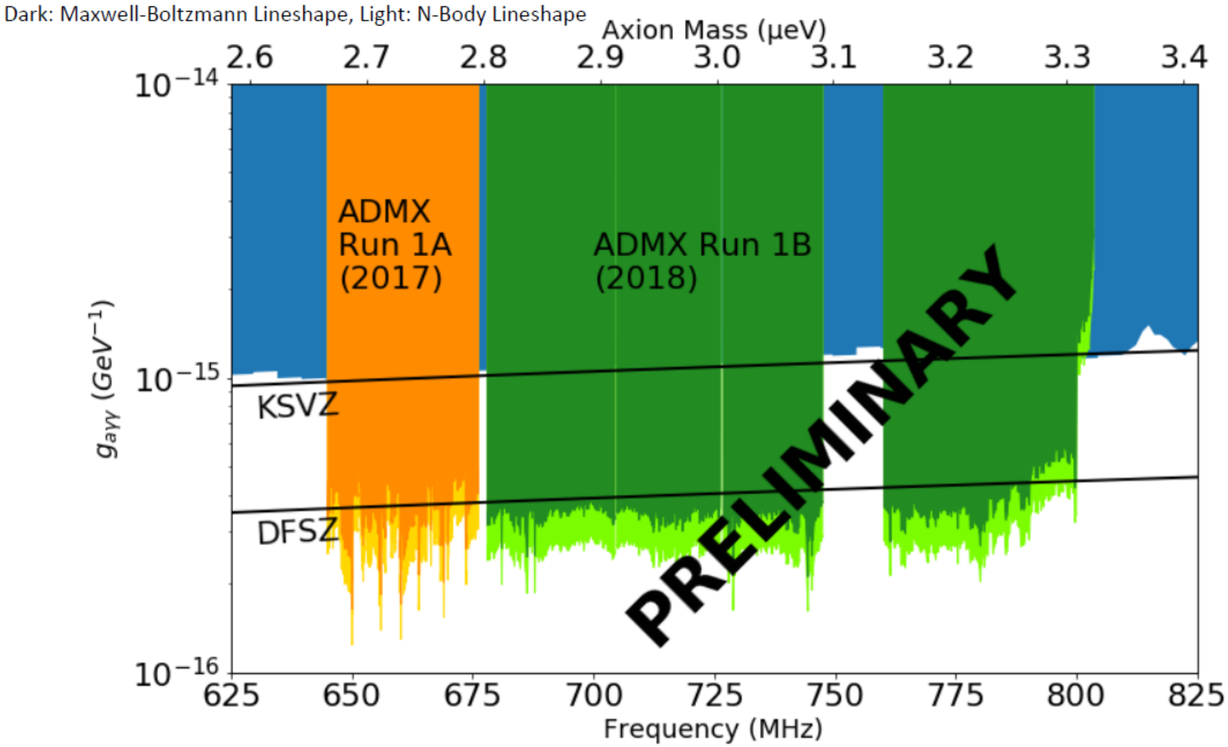
$$P_s = 7.2\times10^{-23}\ \mathrm{W}\left(\frac{\mu\mathrm{eV}}{m_a}\right)\left(\frac{g_{a\gamma}}{2\times10^{-16}\mathrm{GeV}^{-1}}\right)^2\left(\frac{B_e}{8\mathrm{T}}\right)^2\left(\frac{\kappa}{0.5}\right)\left(\frac{Q}{10^5}\right)\left(\frac{G_m}{0.69}\right)\left(\frac{V}{200\ l}\right)$$

- 実験装置の最適化
  - 大きな形状因子（G_m）のためにはTM_{010}モードが良い
    - 探索質量∝(共振空洞半径)$^{-1}$ ➡ $V \propto m_a^{-2}$
  - 超伝導磁石
    - 強い磁場
    - 大きな内径
  - 共振空洞
    - 大きな体積
    - 高いQ値（ただし上限($Q_a \approx 10^6$)あり）

ADMX



$$V = 136\ l, B = 6.8\ \mathrm{T}, G_m = 0.4, Q = 50000$$



We estimate sensitivity to DFSZ dark matter axions between 2.8 and 3.3 ueV

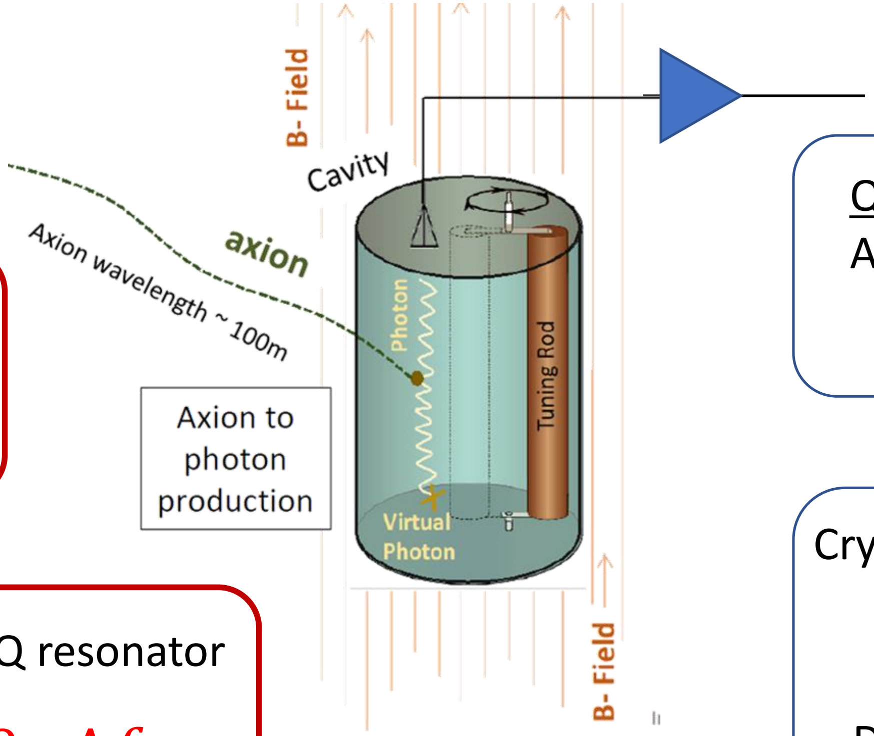
G. Rybka, talk at PATRAS2019

Scan rate

- 有限時間内になるべく広い質量領域を探索したい

$$\frac{df}{dt} \sim B^4 V^2 G_m^2 Q_L T_{sys}^{-2}$$

$$T_{sys} = T_{phys} + T_{amp}$$



Strong Magnet

B, V

Tunable High-Q resonator

$V, G_m, Q_L, \Delta f$

Quantum-limited Amplifier

T_{amp}

Cryogenics

T_{phys}

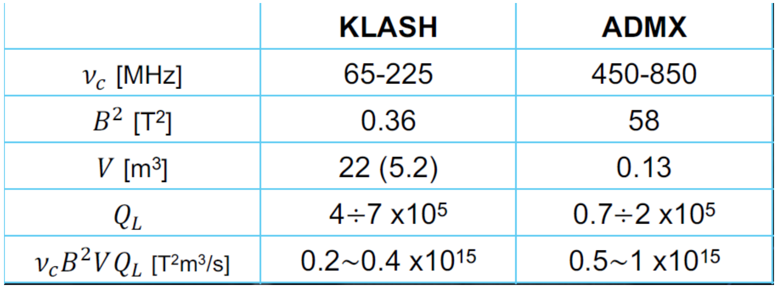
Dilution refrigerator

戦略

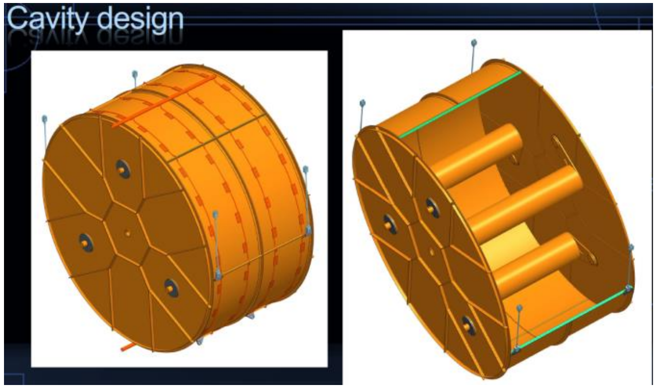
- ADMX… 一番おいしいところ(a few~10 μeV)
  - 空洞サイズ, 磁場, etc.
- 未踏の地は…
  - さらに感度を上げる
  - 軽い方に行くか、重い方に行くか。
  - 軽い方
    - 共振空洞：でかい空洞とボーア径大で強いマグネット
    - 他のアイディア：LC回路, Laser干渉計, etc.
  - 重い方
    - 共振空洞
      - 空洞ちっこいので、強いマグネットは作りやすい？
      - でも体積が…複数空洞？
      - 高次のモードを使う…すると形状因子が…
    - 他のアイディア：Dish antenna, Dielectric Haloscope, etc.

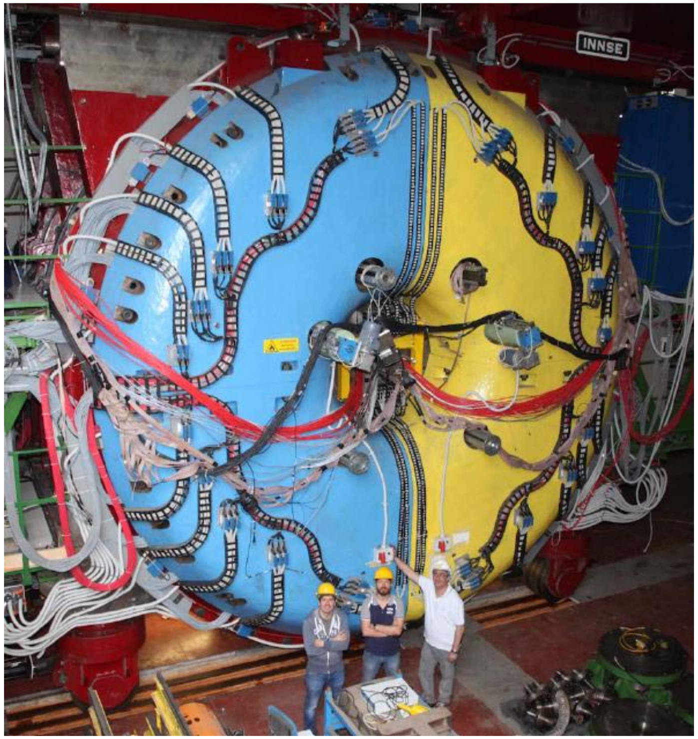
未探査領域～軽い方～

- でかい共振空洞とでかくて強い磁石！
  - WISPDMX: DESY HERAの空洞を利用
    - $f_c = 208\ \mathrm{MHz}, V \sim 500\ l, Q = 46000$
    - 当面磁場を使わず、hidden photon探索を目指す
  - KLASH: KLOE超伝導磁石の利用
    - $V \sim 22\ \mathrm{m}^3, B = 0.6\ \mathrm{T}$



	KLASH	ADMX
ν_c [MHz]	65-225	450-850
B^2 [T^2]	0.36	58
V [m^3]	22 (5.2)	0.13
Q_L	4÷7 x10^5	0.7÷2 x10^5
$\nu_c B^2 V Q_L$ [T^{2}m^3/s]	0.2~0.4 x10^{15}	0.5~1 x10^{15}





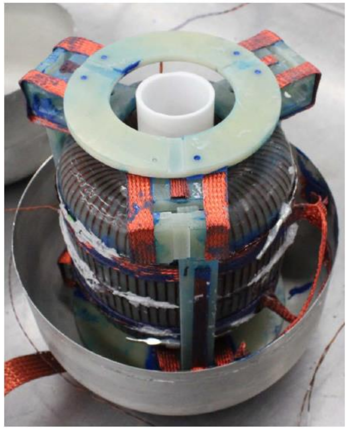
C. Ligi, talk at PATRAS2019

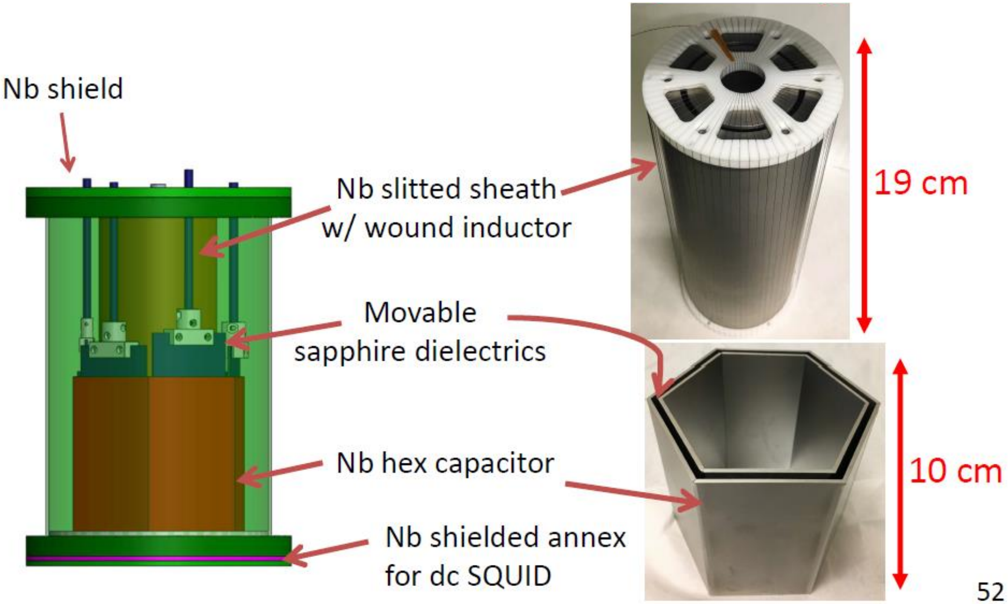
未探査領域～さらに軽く～

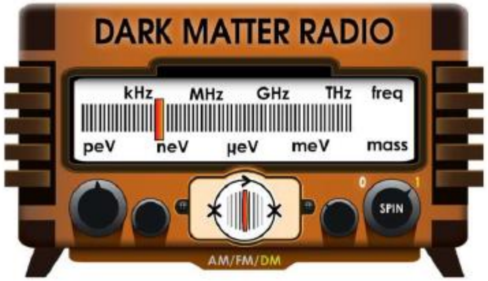
- トロイダル磁石とLC回路
  - ABRACADABRA
    - 最初のステージとしてABRACADABRA-10cm
    - まずは、共振(LC)ではなくブロードバンド測定

      質量領域 3.1×10^{-10}–8.3×10^{-9} eV
  - DM Radio
    - 670 mL Pathfinder
    - 質量領域：500 peV – 50 neV
    - 磁石なしで、hidden photonに焦点

PRL**122**(2019)121802

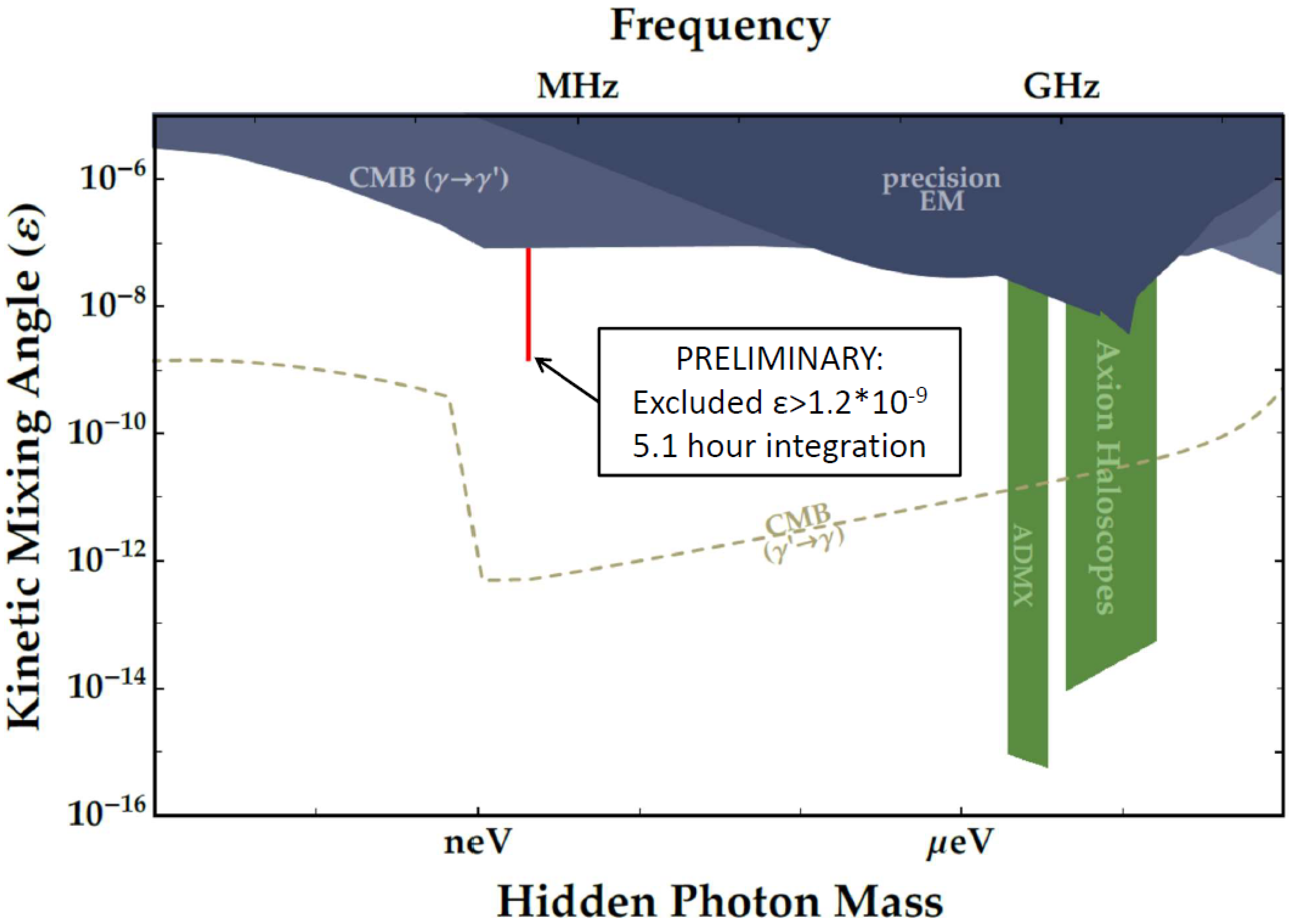






S. Chaudhuri, talk at Caltech HEP Seminar 2019

DM Radio Pathfinder-preliminary limit!



PRELIMINARY:
Excluded ε>1.2*10^{-9}
5.1 hour integration

S. Chaudhuri, talk at Caltech HEP Seminar 2019

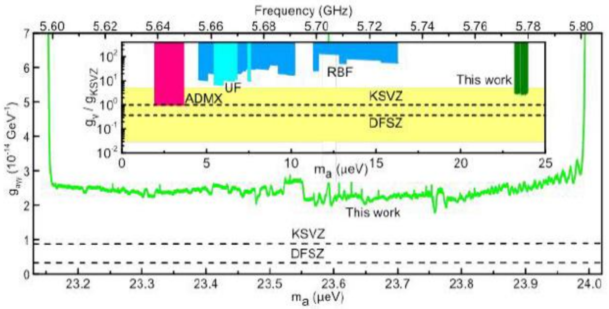
未探査領域～重い方(1)～

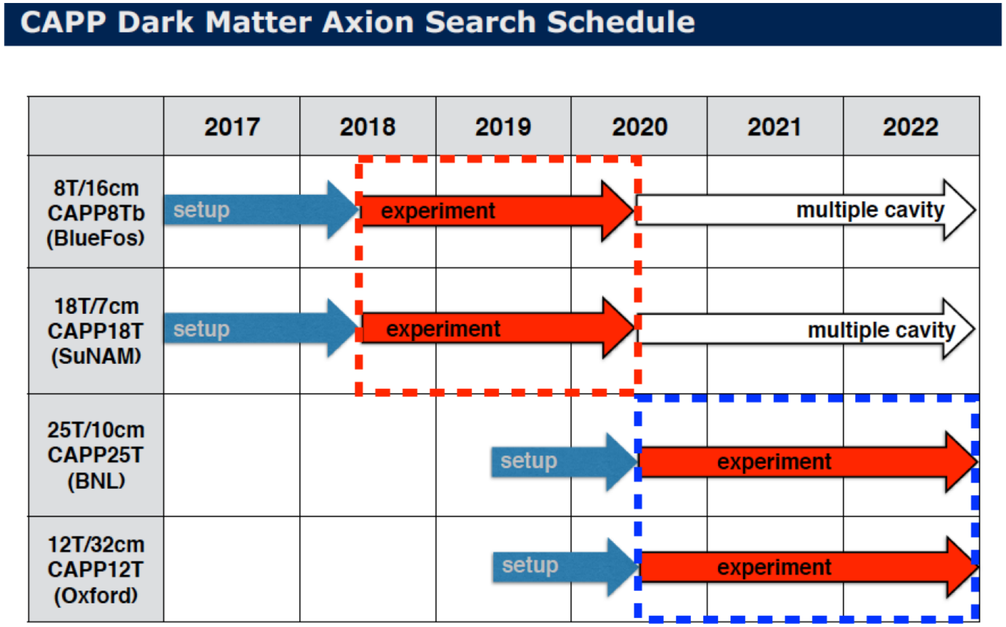
- 強磁場マグネットの利用
  - HAYSTAC

    $f_c = 5.6 - 5.8\ \mathrm{GHz}, V = 1.5\ l,\ B = 9\ \mathrm{T}$
  - ORGAN

    $B = 14\ \mathrm{T} \rightarrow 28\ \mathrm{T} \rightarrow \cdots$
  - CAPP

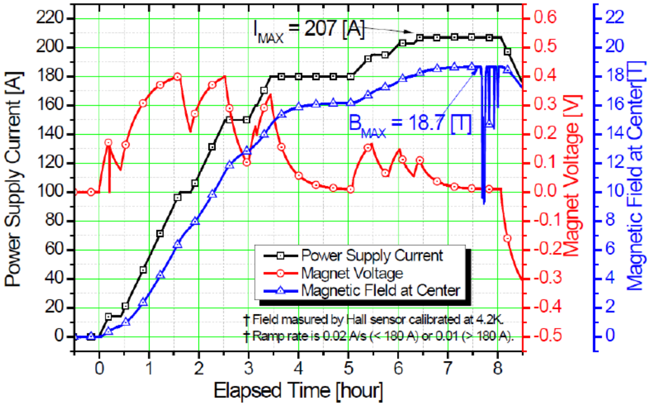
    $B = 8\ \mathrm{T} \rightarrow 18\ \mathrm{T} \rightarrow 25\ \mathrm{T} \rightarrow \cdots$

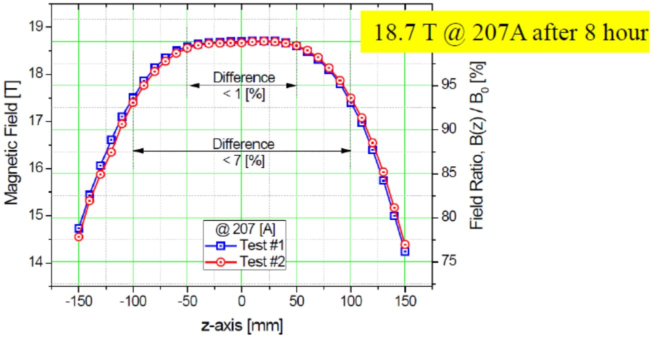




CAPP Dark Matter Axion Search Schedule

	2017	2018	2019	2020	2021	2022
8T/16cm CAPP8Tb (BlueFos)	setup	experiment		multiple cavity		
18T/7cm CAPP18T (SuNAM)	setup	experiment		multiple cavity		
25T/10cm CAPP25T (BNL)			setup	experiment		
12T/32cm CAPP12T (Oxford)			setup	experiment		

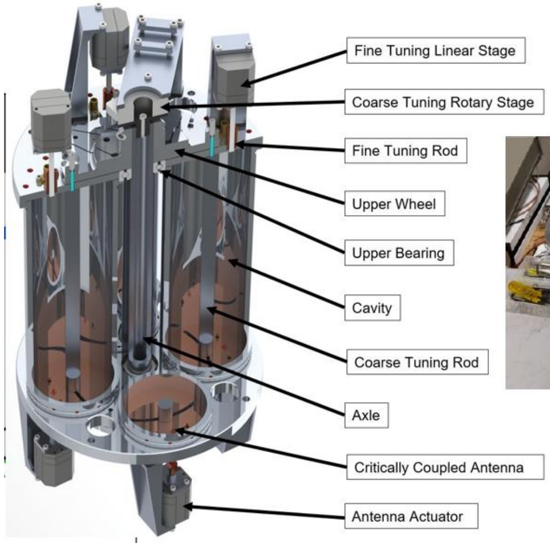




YK. Semertzidis, talk at "Axion physics and dark matter cosmology“, Okayama, 2017

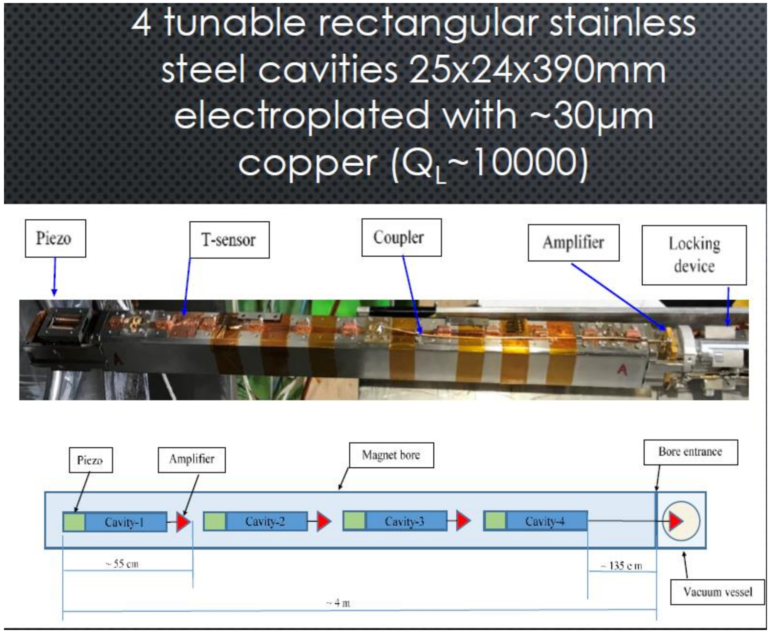
未探査領域～重い方(2)～

- 既存のマグネット内に複数の共振空洞
  - 空洞間のPhase matchingが必要
  - ADMXのマグネット
    - ADMX-G2で４つの小型空洞
  - CASTのマグネット
    - 長さ(10m)方向に並べる



G. Rybka, talk at PATRAS2019

CAST-CAPP　M. Maroudas, talk at PATRAS2019



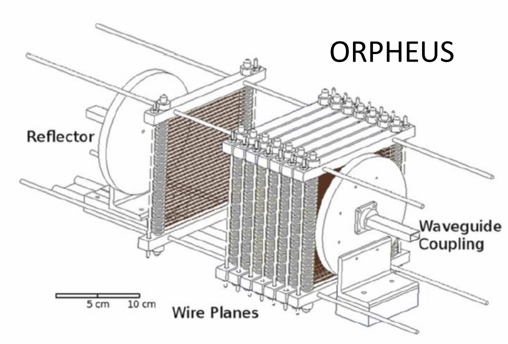
4 tunable rectangular stainless steel cavities 25x24x390mm electroplated with ~30μm copper (Q_L~10000)

CAST-RADES　JMG. Barceló, talk at PATRAS2019

- We have designed and built a concrete implementation of a **30 sub-cavities structure**, that enjoys an optimized resonant mode at ~8.4 GHz.

未探査領域～重い方(3)～

- 共振空洞の高次のモードを使用
  - 形状因子の値が悪くならないように
    - 通常は**cancel**してしまう（左）
    - **High-n dielectrics**の利用（中）
    - 外部磁場を空間的に変化させる（右）



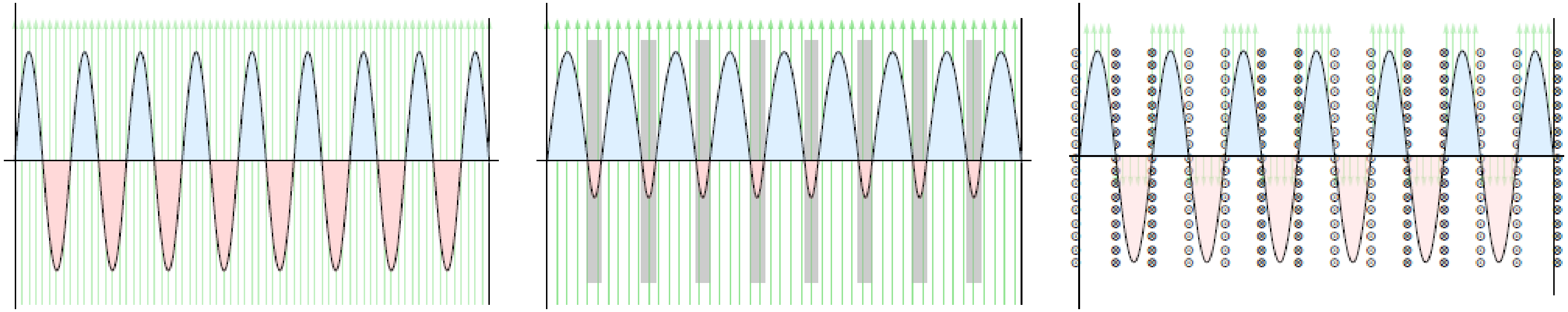


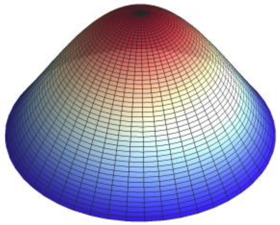
Figure 19: The geometric factor of an ideal 1D cavity in a homogeneous B-field (green arrows) cancels between crests and valleys of a high mode (left). The cancellation can be avoided by placing high-n dielectrics –grey regions– in the valleys (centre) or by alternating the polarity of the external B_e field to track the mode variations (right). This case can be done by introducing wire planes with suitable currents [563].

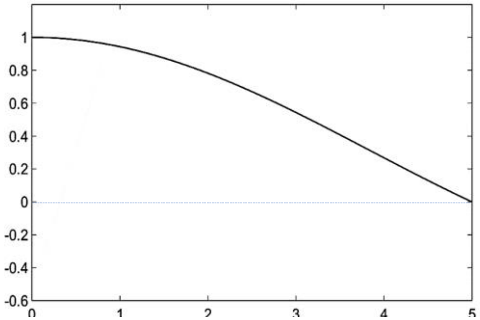
arXiv: 1801.08127

高次モードの利用（CAPP）

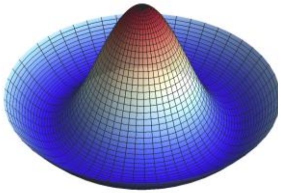
SW Youn, talk at PATRAS2019

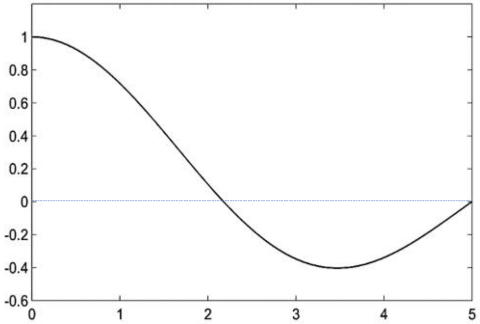
TM_{010}



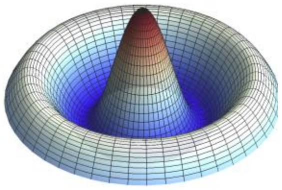


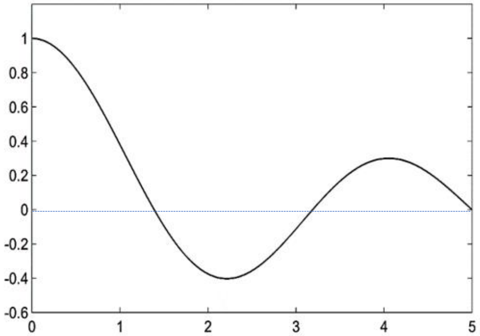
TM_{020}





TM_{030}

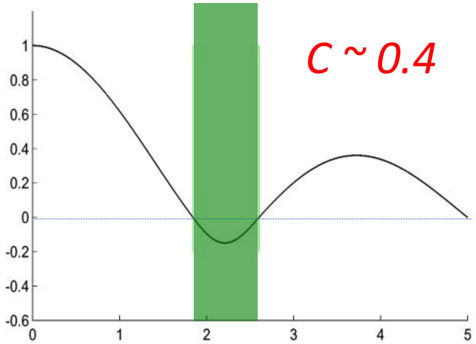


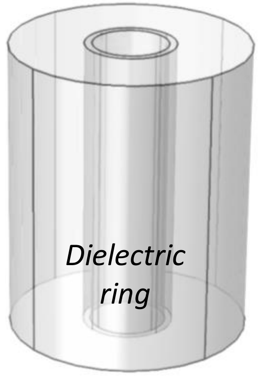


$$P_{a\to\gamma\gamma} = g_{a\gamma\gamma}^2 \frac{\rho_a}{m_a} B^2 V C_{mnp} \min(Q_L, Q_a)$$

Mode	f_{rel}	Q_{rel}	V_{rel}	C_{abs}
TM_{010}	1	1	1	0.69
TM_{020}	2.3	1.5	1	0.13
TM_{030}	3.6	1.9	1	0.05

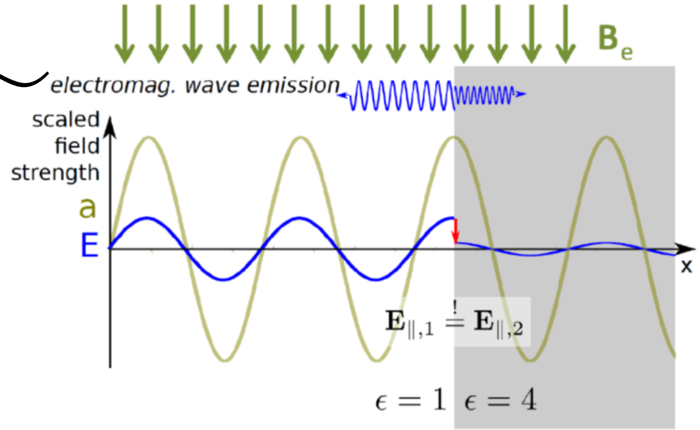
$$C_{mnp} = \frac{\left|\int \vec{E}_c \cdot \vec{B}_0 \, dV\right|^2}{\int \varepsilon \left|\vec{E}_c\right|^2 dV \int \left|\vec{B}_0\right|^2 dV}$$



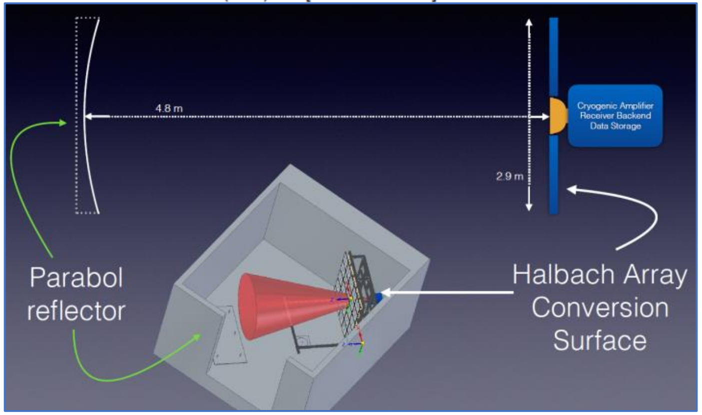


未探査領域～重い方(4)～

- 共振空洞はあきらめて…
  - 外部磁場中の境界面($\epsilon_1 \neq \epsilon_2$)
    - 光子の放出
  - Dish Antenna
    - Broadband search
    - BRASS-6実験（建設中）
  - Dielectric Haloscope
    - MADMAX実験（proof of principle）



Based on the original idea of:
D. Horns, J. Jaeckel, A. Lindner, A. Lobanov, J. Redondo and A. Ringwald
JCAP 1304 (2013) 016 [arXiv:1212.2970].



Le H. Nguyen, talk at PATRAS2019

- Boost the power by coherent interference of photons generated on N discs plus resonance between discs

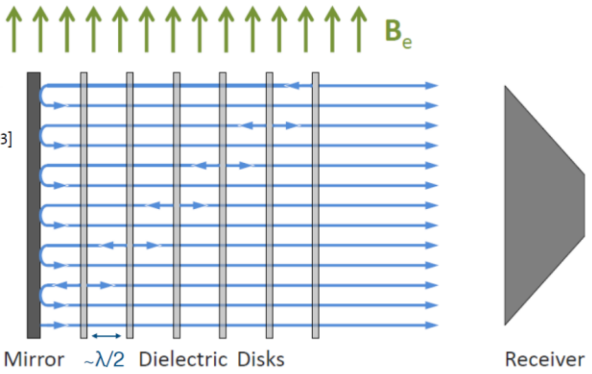
Jaeckel and J. Redondo, Phys. Rev. D 88, 115002, (2013) [arXiv:1308.1103]

Photon power :

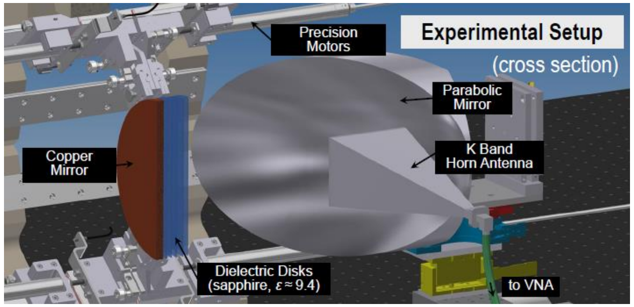
$$\frac{P}{A} = 2 \cdot 10^{-27} \frac{\mathrm{W}}{\boxed{\mathrm{m}^2}} C_{a\gamma\gamma}^2 \left(\frac{B}{\boxed{10\mathrm{T}}}\right)^2 |\beta|^2$$

$\boxed{\text{FoM} = \text{B}^2\ \text{m}^2 = 100\ \text{T}^2\ \text{m}^2}$

$$\beta^2 = \frac{P_{\text{Diel.Halosc.}}}{P_{\text{Mirror}}}$$

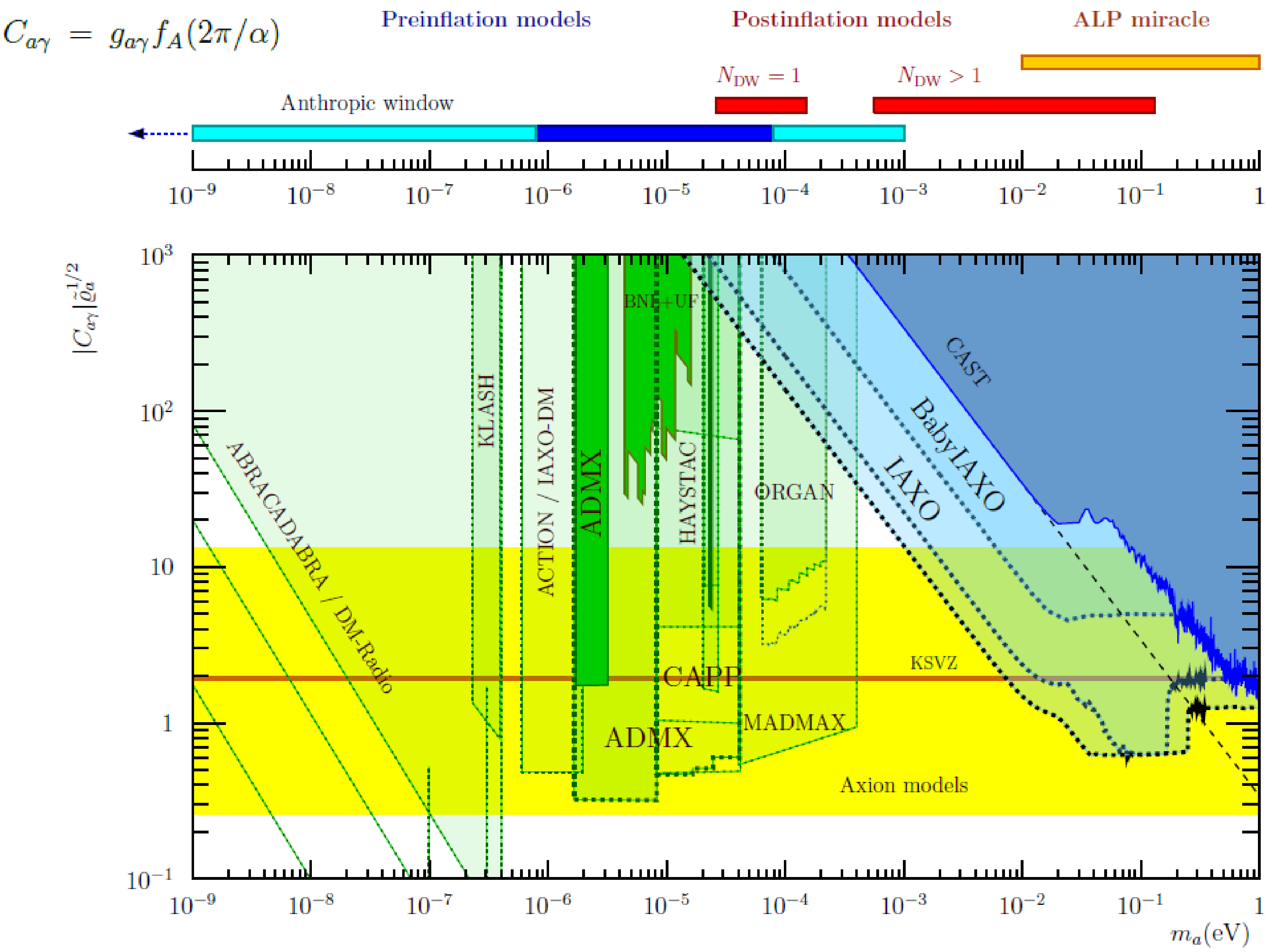


E. Garutti, talk at PATRAS2019



S. Knirck, talk at PATRAS2019

DH axion探索実験($g_{a\gamma\gamma}$)まとめ



Scan rate

- 有限時間内になるべく広い質量領域を探索したい

$$\frac{df}{dt} \sim B^4 V^2 G_m^2 Q_L T_{sys}^{-2}$$

$$T_{sys} = T_{phys} + T_{amp}$$

Cryogenics

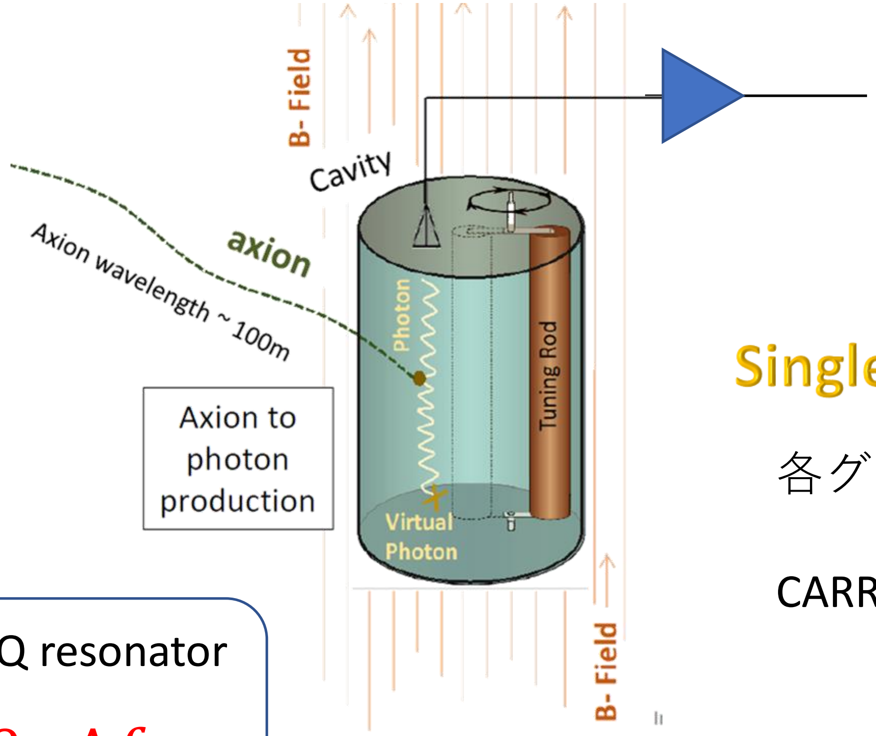
T_{phys}

Strong Magnet

B, V

Tunable High-Q resonator

$V, G_m, Q_L, \Delta f$



Axion to photon production

<u>Quantum-limited</u> Amplifier

T_{amp}

Single Photon Counting

各グループで開発が進行中

CARRACK: Rydberg atom

CARRACK（華洛）

- Rydberg原子によるマイクロ波光子検出
  - SQLなし！
  - Rydberg原子
    - （主としてアルカリ原子で）最外殻電子が主量子数nの大きい（～100）状態に励起した原子
    - Large radius $\propto n^2$ ($R = 0.13\mu m$ for n=50)
    - Long lifetime $\tau \propto n^3$ ~ msec for n~100
    - Energy level $E_n \propto n^{-2}$
    - Energy separation $E_{np} - E_{ns} \propto n^{-3}$

axion as CDM ⟺

$^{39}\mathrm{K}$: $110s_{1/2} \to 110p_{1/2}$ 10.06 μeV
$^{85}\mathrm{Rb}$: $112s_{1/2} \to 112p_{1/2}$ 9.98 μeV

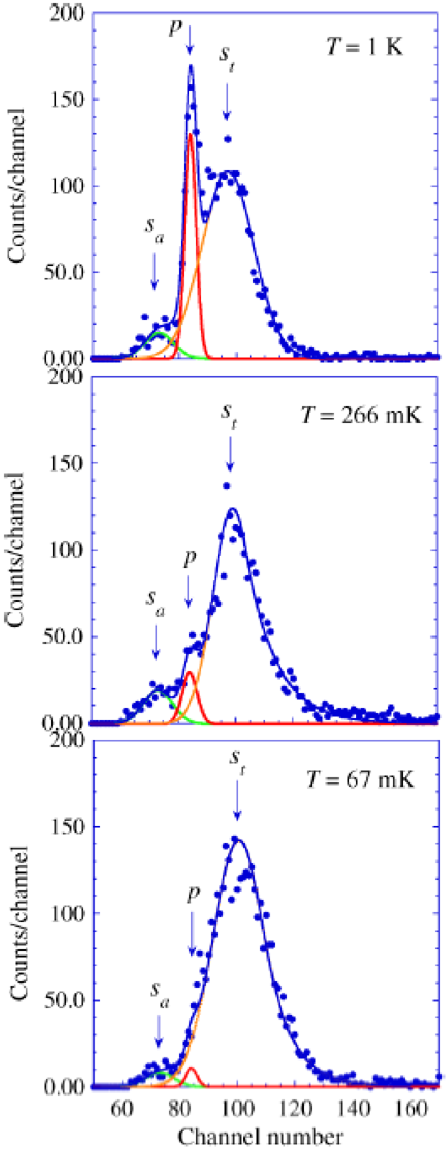
- Large E1 transition probability

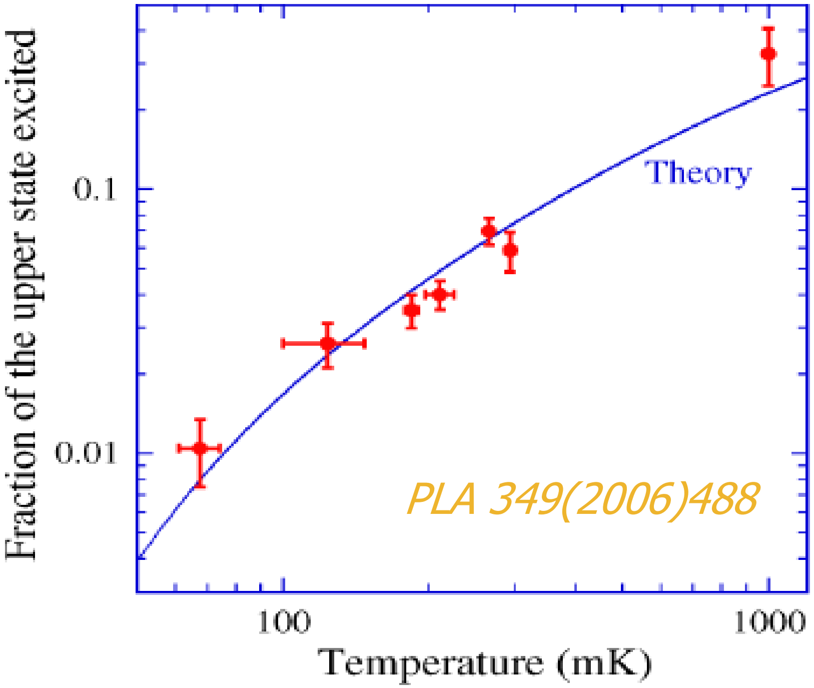
$$\langle np | e\mathbf{r} | ns \rangle \propto n^2$$

- Low ionization threshold $F_{\text{ionize}} \propto n^{-4}$

classical ionization threshold : 2.2 V/cm for n=110

Rydberg原子による黒体輻射光子の検出





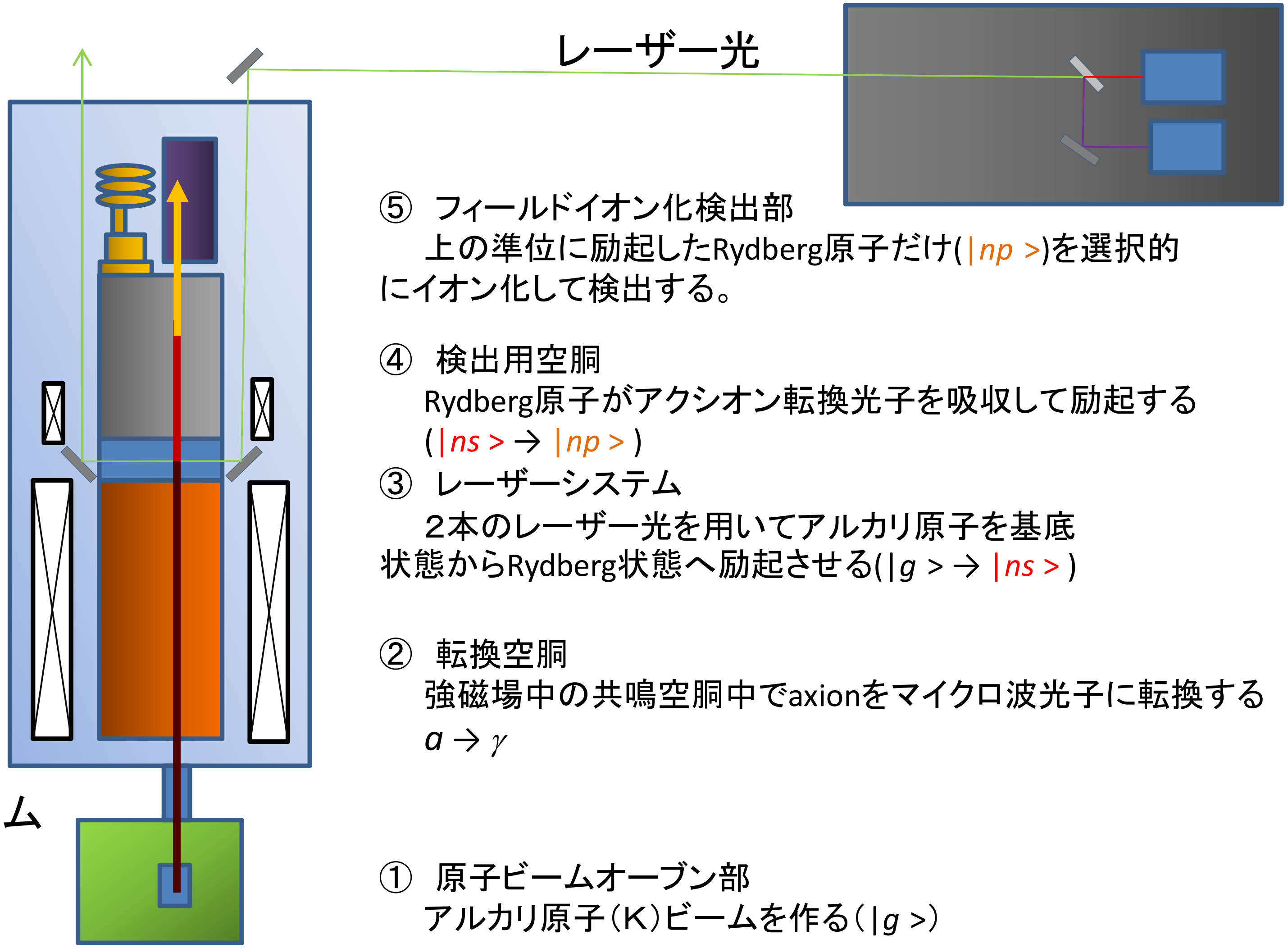
PLA 349(2006)488

Fig. 4. Temperature dependence of the fraction of the 111 $p_{3/2}$ states excited by the blackbody-photon absorption in the cavity. The dependence was measured with the present Rydberg-atom single photon detector. Solid line is a theoretical prediction (see text in detail) in the over-damped regime.

$111s_{1/2} \Rightarrow 111p_{3/2}$

2527 MHz SQL: 121 mK

CARRACK装置の原理



⑥ 希釈冷凍機
熱雑音低減のため、システムを極低温に冷却する

⑤ 超伝導磁石
②用マグネットと④用の補償用マグネットからなる

⑤ フィールドイオン化検出部
上の準位に励起したRydberg原子だけ($|np>$)を選択的にイオン化して検出する。

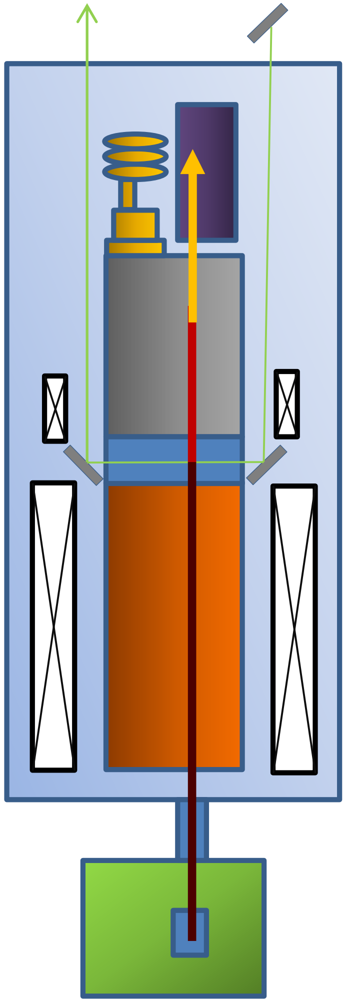
④ 検出用空胴
Rydberg原子がアクシオン転換光子を吸収して励起する
($|ns> \rightarrow |np>$)

③ レーザーシステム
２本のレーザー光を用いてアルカリ原子を基底状態からRydberg状態へ励起させる($|g> \rightarrow |ns>$)

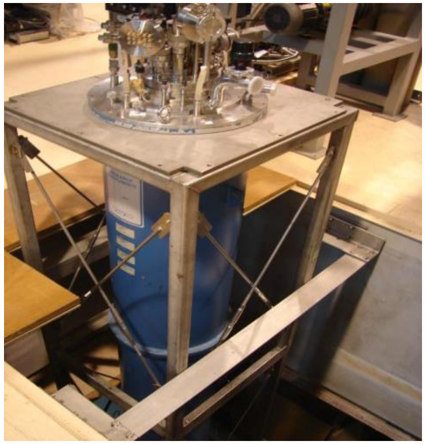
② 転換空胴
強磁場中の共鳴空胴中でaxionをマイクロ波光子に転換する
$a \rightarrow \gamma$

① 原子ビームオーブン部
アルカリ原子（K）ビームを作る（$|g>$）

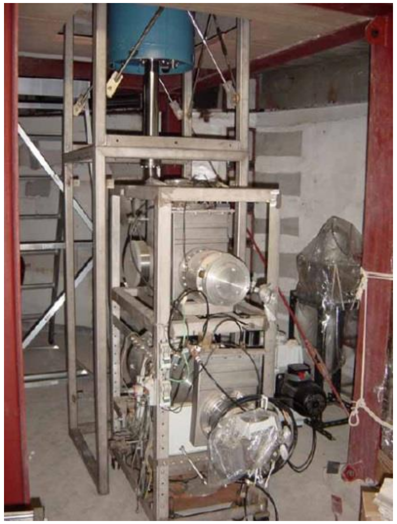
CARRACK装置



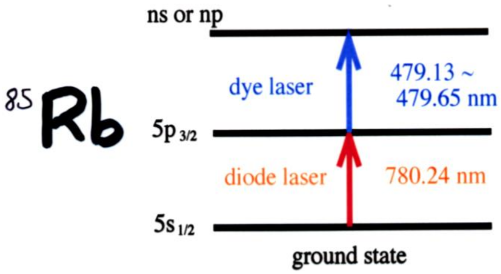
クライオスタット上部



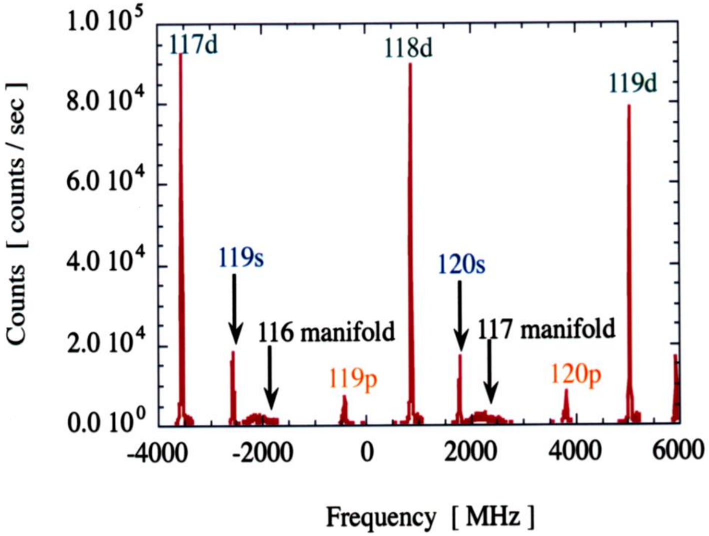
原子ビーム発生装置



Excitation Diagram



Excitation Spectrum

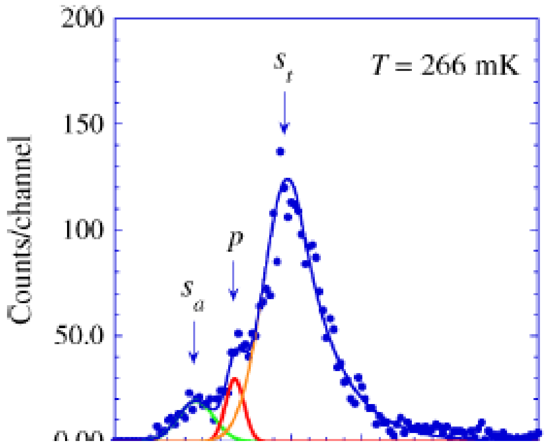


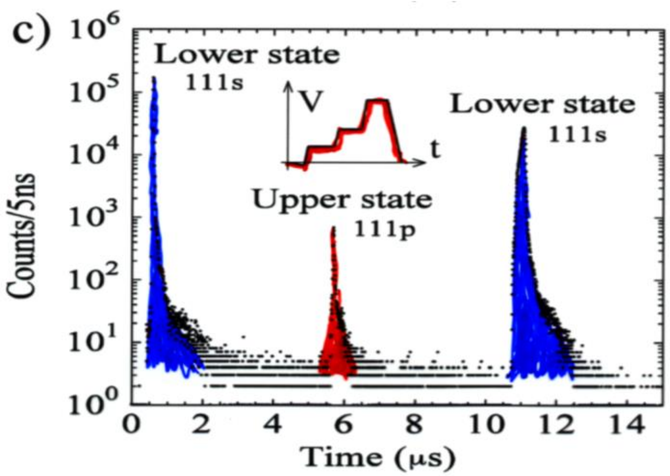
Background

- Cavity中のStray fieldによる準位の混合
  - 極低温時、電極表面に不純物が付着して、空間的に非一様な浮遊電場が生じる。O(10 mV/cm)

↓

  - 浮遊電場が吸収線幅を広げてしまう。

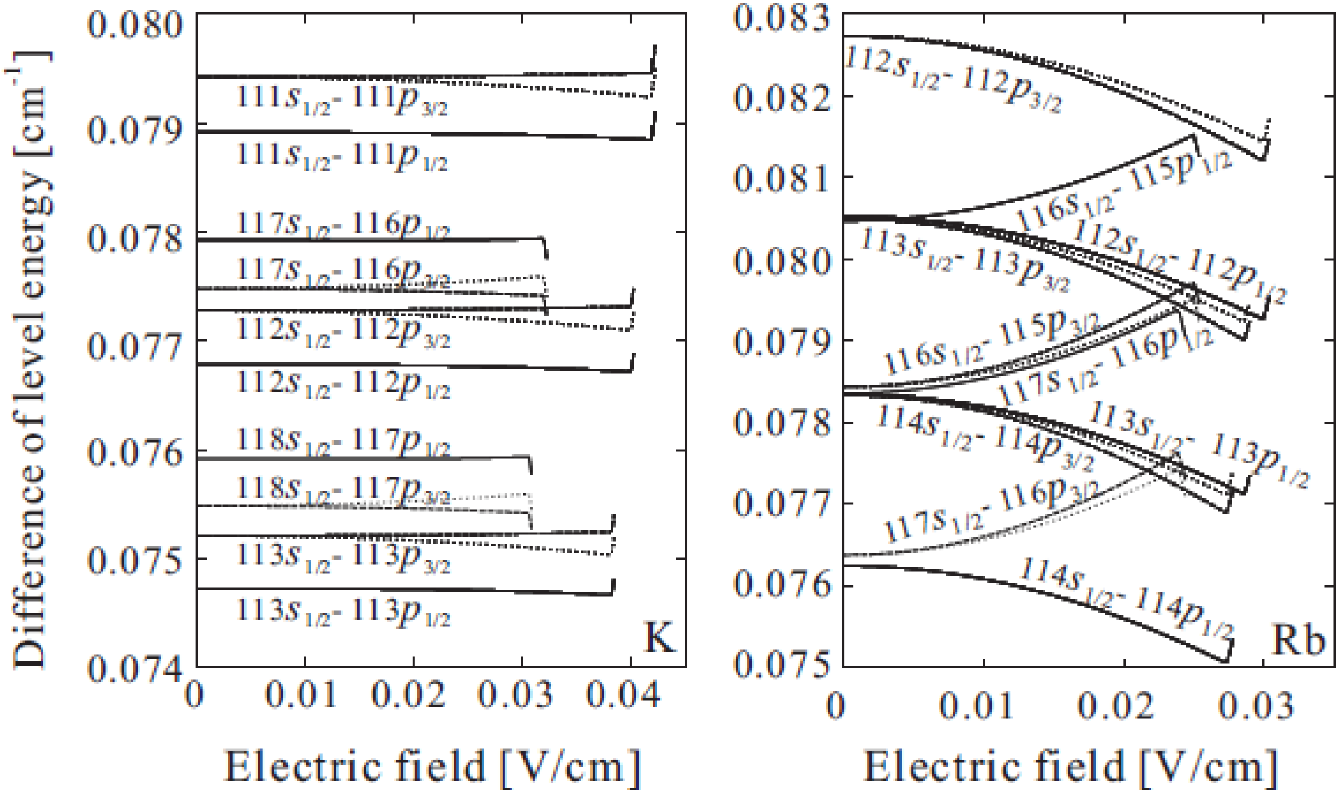




Ideal situation

newCARRACK

- 原子ビームとして、^{85}Rbの代わりに^{39}Kを使用
  - 外部電場に対して非常に鈍感であると予想されている



原子ビームのバンチ化

- *CARRACKの改良点*
  - 原子をRbから外部電場に鈍感な^{39}Kに変更
  - 探索質量域の変更（2.4 GHz→24 GHz）
    - これにともなう**検出効率向上の必要性**
- *バンチ化による検出効率の向上*
  - フィールドイオン化パルス電場にタイミングを合わせたバンチを供給→duty cycleを上げる。
  - 転換光子を100%吸収できる原子数が必要。

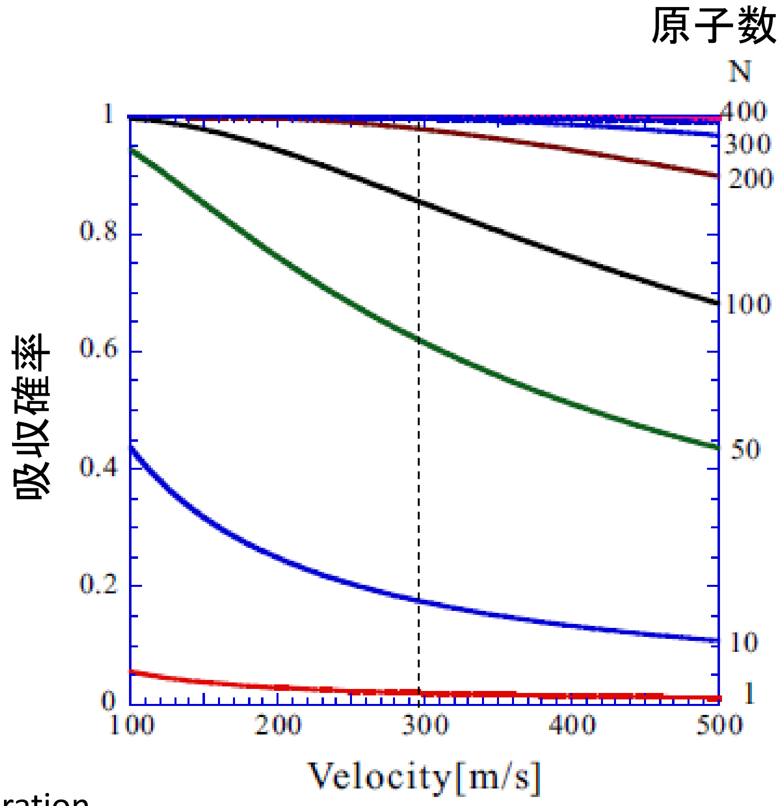
原子ビームを高輝度化した上で、バンチ化する

アクシオン検出に必要な原子ビーム

- 100 %の吸収確率
  - 1バンチ内の原子数：>200 atoms/bunch

- Rydberg状態の維持（寿命：～1 ms）
  - ビーム速度：300 m/s

- 幾何学的問題（～3 mの飛行）
  - 速度広がり：1 m/s（縦横ともに）



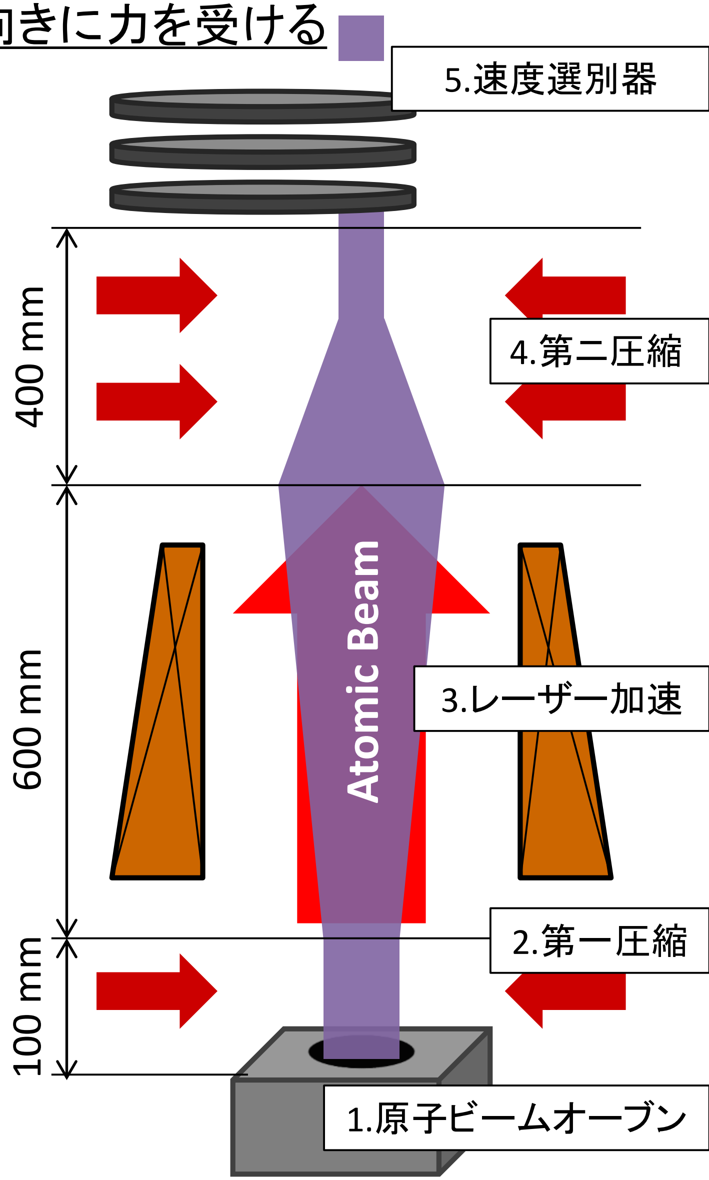
[2] M.Saeed , S.Matsuki , I.Ogawa, *et.al.*, in preperation

バンチ化原子ビーム生成方法

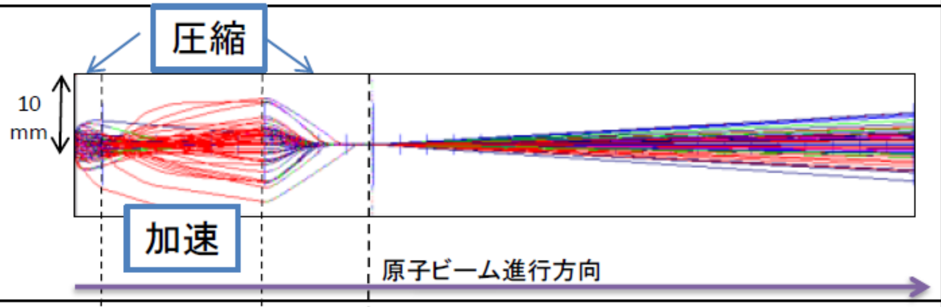
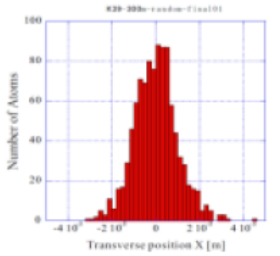
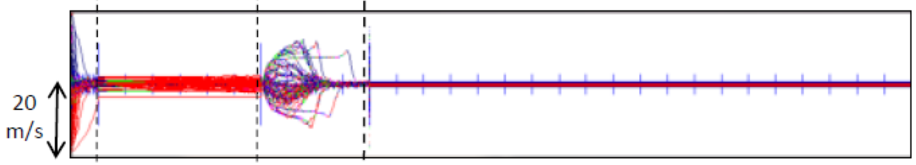
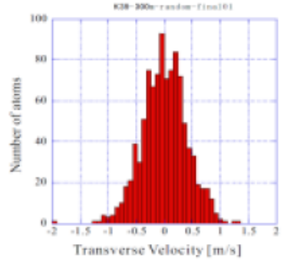
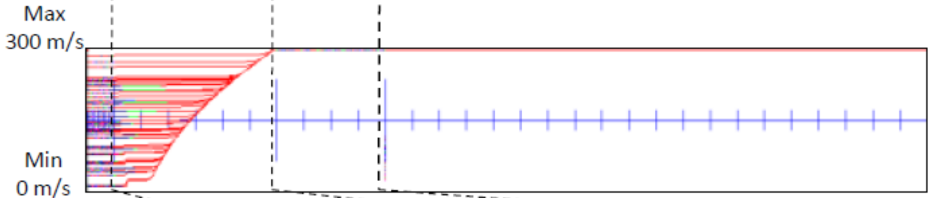
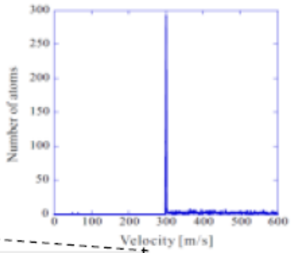
原子ビームはレーザー（赤矢印）の向きに力を受ける

バンチ化原子ビーム生成プロセス

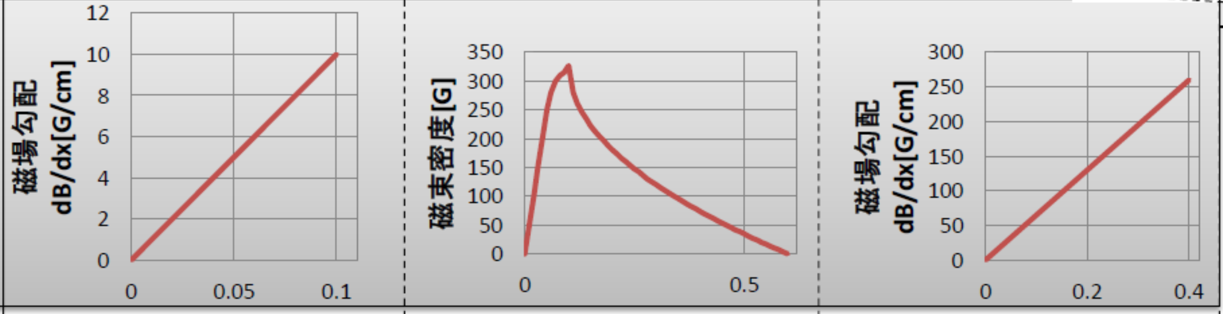
1. 原子ビームオーブン
   → 原子ビーム発生
2. レーザー冷却（第一圧縮）
   → レーザー加速の間の広がりを抑えるために、横方向の運動量を圧縮。
3. レーザー加速
   → 速度の遅い原子を加速して300 m/sにする。
4. レーザー冷却（第二圧縮）
   → 原子ビーム高輝度化。
5. 速度選別器（ディスクスロット型）
   → 速度300m/sの原子のみを選別し、バンチ化



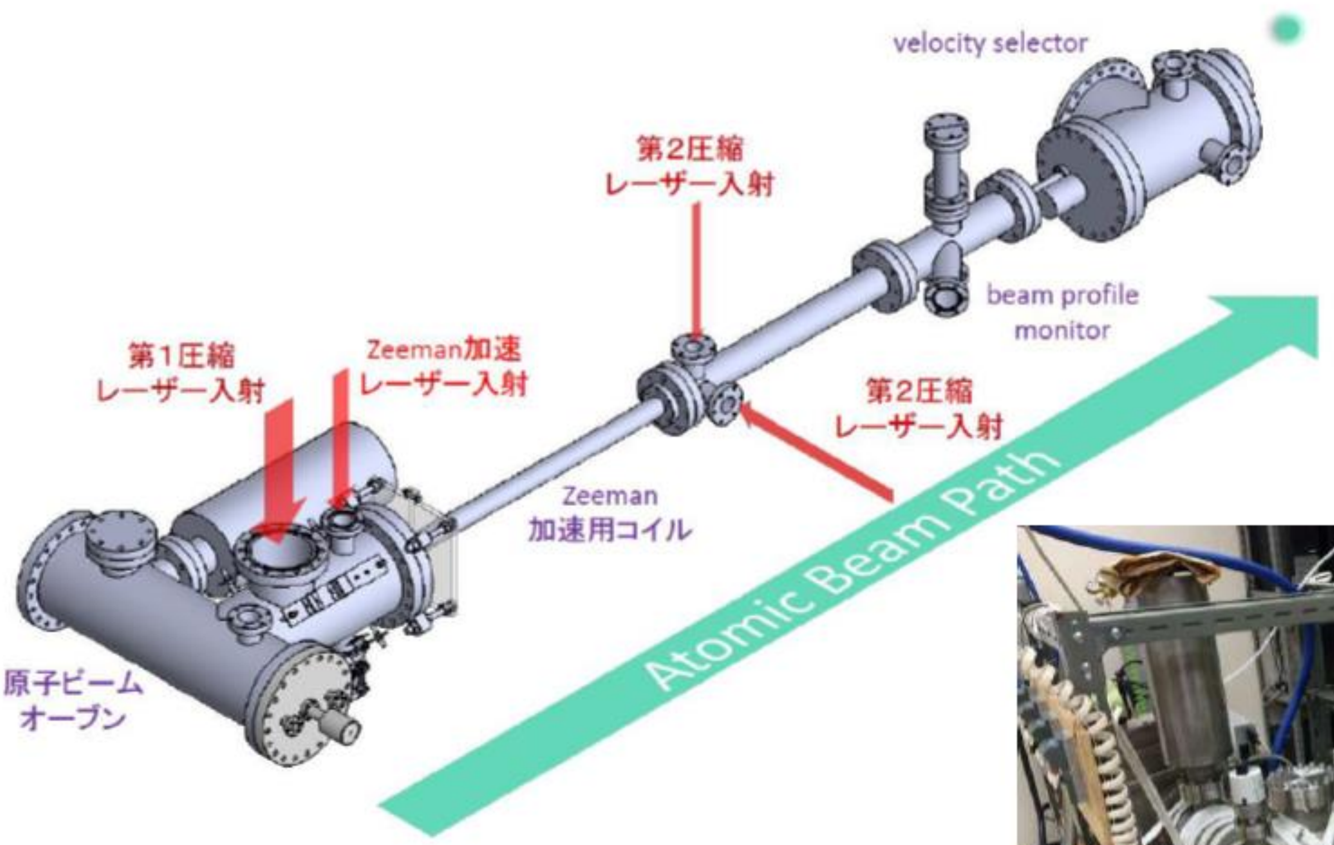
原子ビームシミュレーション

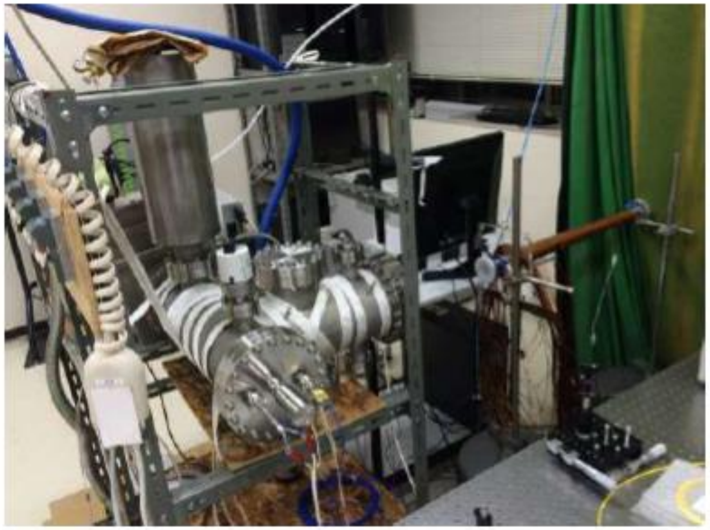
	原子ビームシミュレーション	分布図	計算 [mm]	要請 [mm]
横位置広がり			5	4
横速度広がり			0.8	1
縦速度広がり			1	1

磁場分布



Rydberg原子ビームのバンチ化

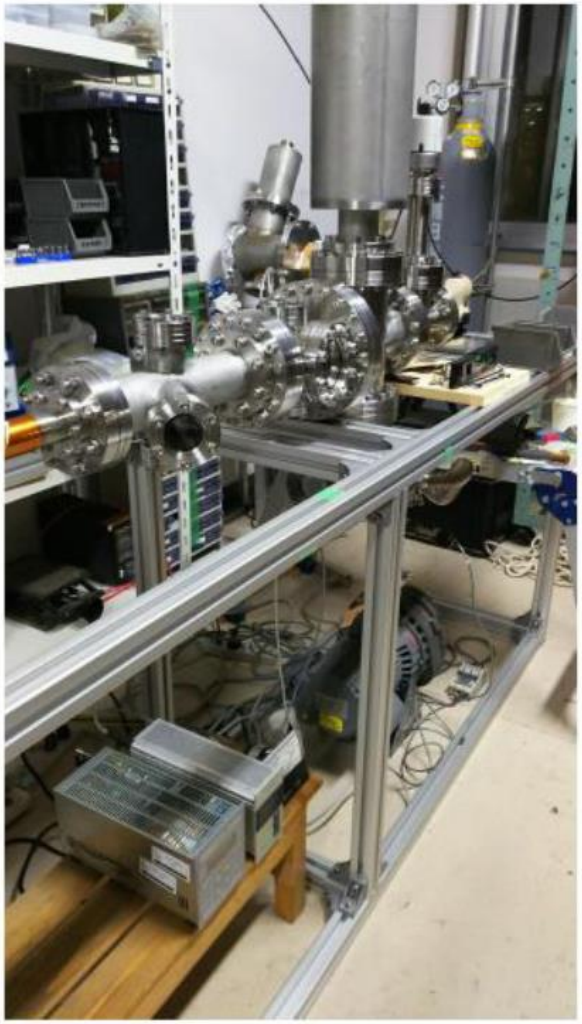




- 機器の一部は製作済み。
- テストはまだ。

バンチ化ビーム装置

- 京都大学にて建設中
- レーザー系と合わせてテストを行う
  - ビームプロファイルモニタで性能確認予定



まとめ

- アンプ系の雑音を下げる
  - 単光子検出が有効
    - 世界中で開発・テスト中
  - Rydberg原子は単光子検出が可能
  - 検出効率を向上すべくK原子のバンチ化ビーム発生装置を京大にて構築中