

大型空洞を使った 暗黒物質アクシオン探索

2019年7月6日

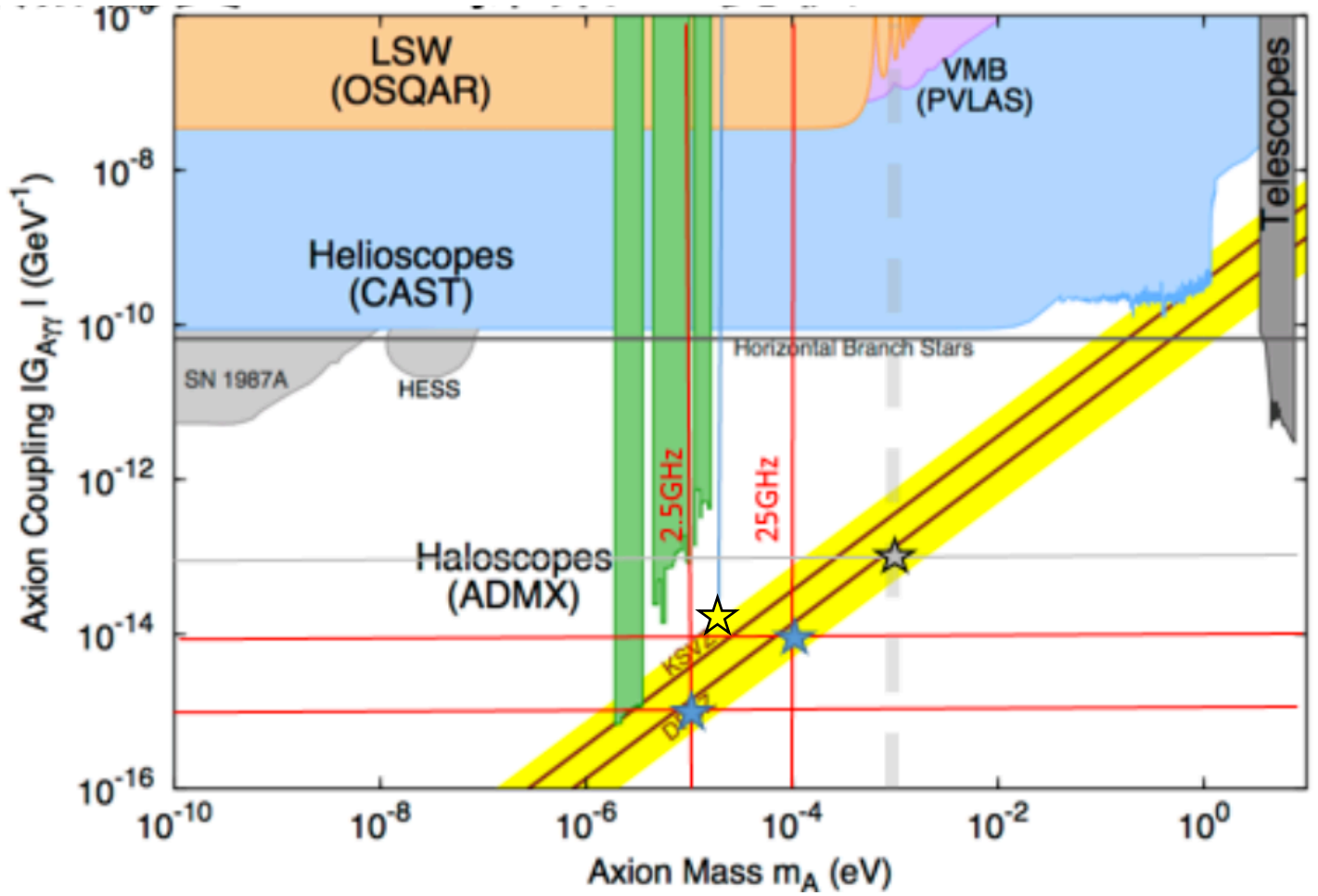
東北大 ニュートリノ科学研究センター

岸本 康宏

暗黒物質アクシオン

- ・ QCDにおけるCP保存の問題
 - ・ 暗黒物質の問題
- を“一度”に解決

探索の現状



- かつては, $0(10^{-5})\text{eV}$ 以下とされてきたが, **最近は $0(10^{-3})\text{eV}$ 付近まで上限が拡大**

- 質量が小さい時(周波数が低い)時:

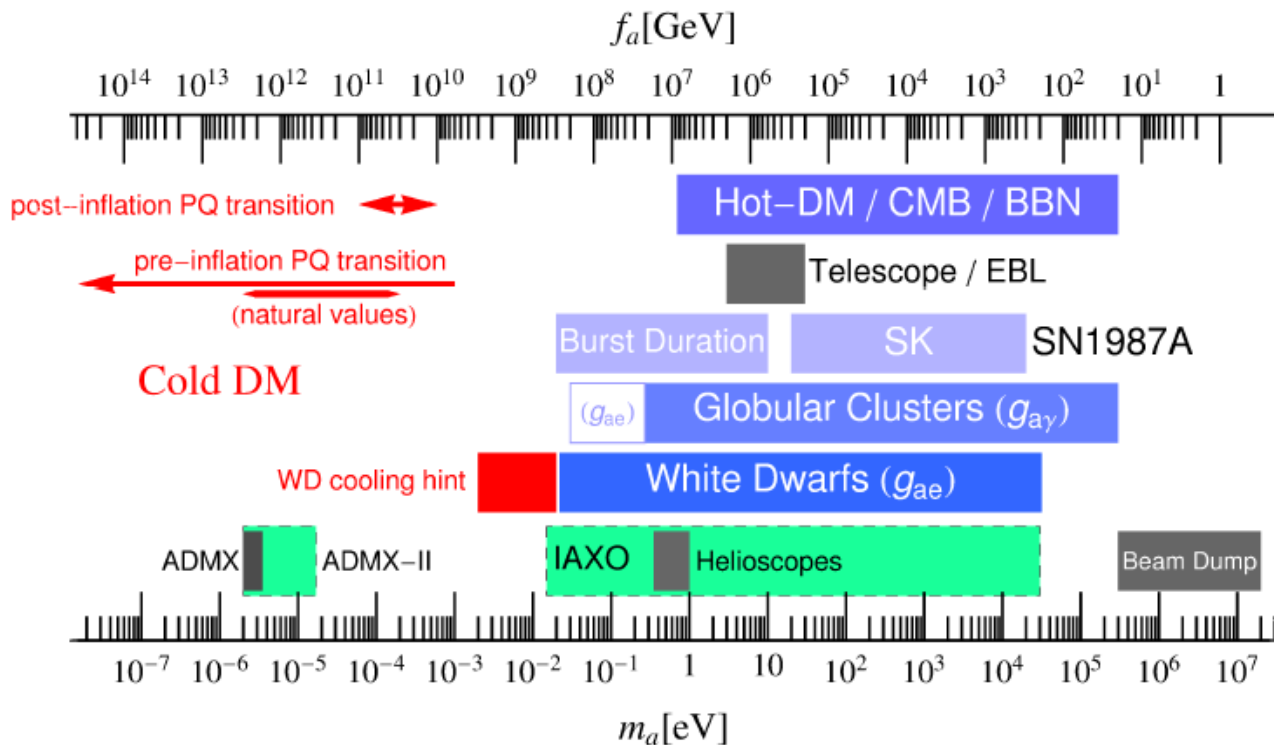
- Misalignment による生成で宇宙が Over Close

- とはいえ, インフレーションの前にアクシオンが作られたなら, これを回避できる

- 質量が大きい時(周波数が高い)時:

- Misalignment による生成だけでは, 暗黒物質の数が足りない

- String や Domain wall からのアクシオンがこれを補填する



Axion halo scopeの原理

VOLUME 51, NUMBER 16

PHYSICAL REVIEW LETTERS

17 OCTOBER 1983

Experimental Tests of the "Invisible" Axion

P. Sikivie

Physics Department, University of Florida, Gainesville, Florida 32611

(Received 13 July 1983)

Experiments are proposed which address the question of the existence of the "invisible" axion for the whole allowed range of the axion decay constant. These experiments exploit the coupling of the axion to the electromagnetic field, axion emission by the sun, and/or the cosmological abundance and presumed clustering of axions in the halo of our galaxy.

PACS numbers: 14.80.Gt, 11.30.Er, 95.30.Cq

$$\mathcal{L} = -\frac{1}{4}F_{\mu\nu}F^{\mu\nu} + \frac{e^2 N}{12\pi^2} \frac{a}{v} F_{\mu\nu}\tilde{F}^{\mu\nu} + \frac{1}{2}\partial_\mu a\partial^\mu a - \frac{1}{2}m_a^2 a^2 [1 + O(a^2/v^2)],$$

where $\tilde{F}^{\mu\nu} = \frac{1}{2}\epsilon^{\mu\nu\alpha\beta}F_{\alpha\beta}$, $F_{\alpha\beta} = \partial_\alpha A_\beta - \partial_\beta A_\alpha$, and where we have assumed grand unification strong and electroweak interactions with the unrenormalized $\sin^2\theta_w^0 = \frac{3}{8}$. The action den

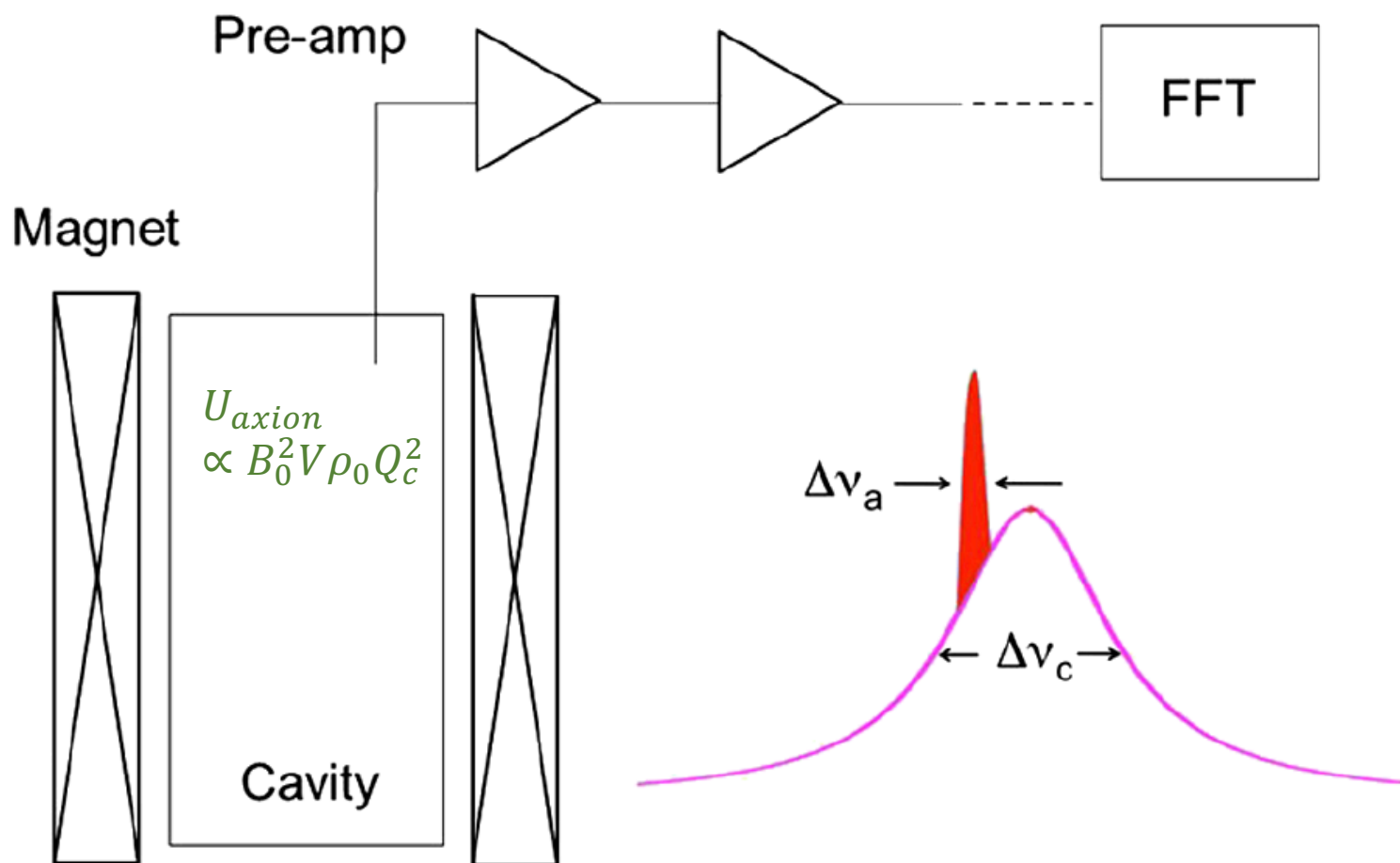
$$\nabla \cdot \vec{E} = \frac{e^2 N}{3\pi^2 v} \vec{B} \cdot \nabla a, \quad \nabla \times \vec{B} - \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} = \frac{e^2 N}{3\pi^2 v} \left[\vec{E} \times \nabla a - \vec{B} \frac{\partial a}{\partial t} \right], \quad \square a = \frac{e^2 N}{3\pi^2 v} \vec{E} \cdot \vec{B} - m_a^2 a.$$

- 解いていくと,

$$\left(\Delta - \frac{\partial^2}{\partial t^2}\right) \mathbf{E}(\mathbf{x}, t) = \kappa \mathbf{B}_0 \frac{\partial^2}{\partial t^2} a(\mathbf{x}, t) = \kappa \mathbf{B}_0 \frac{\partial^2}{\partial t^2} a(t)$$

$$= \kappa \mathbf{B}_0 \omega_a^2 a \cos \omega_a t$$

強制振動の式



• ところで, このアクシオン場 $a(x, t)$ なんですが...

• エネルギー密度: $\langle \rho_{\text{halo}} \rangle \sim m^2 \langle a^2 \rangle$

• Krauss et alの PRL 55, 17, 1985, p1797

• しれっと書いてますが, $\langle \quad \rangle$ の「対象」と「範囲」は, どういう設定が宇宙の描像として正しいのでしょうか?

• 以下では,

• アクシオンは位相が揃った1つの古典的波動として記述できる.

• アクシオンは沢山あるにも関わらず, $a \cos \omega_a t$, $a \sim \sqrt{2\rho/m_a}$

• アクシオンは運動しているが, 充分長い間相互作用して, 強制振動が励起し終わる

• 方程式 $\left(\Delta - \frac{\partial^2}{\partial t^2}\right) E(x, t) = \kappa B_0 \omega_a^2 a \cos \omega_a t$ の過渡期ではない.

Halo scape 実験

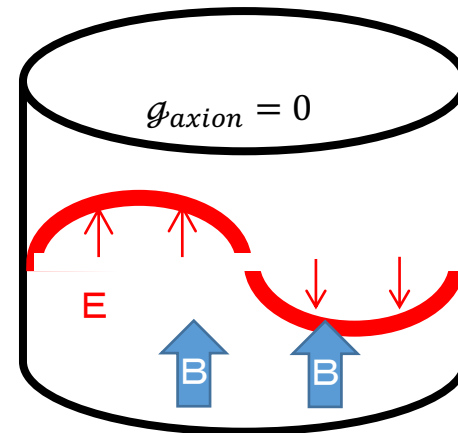
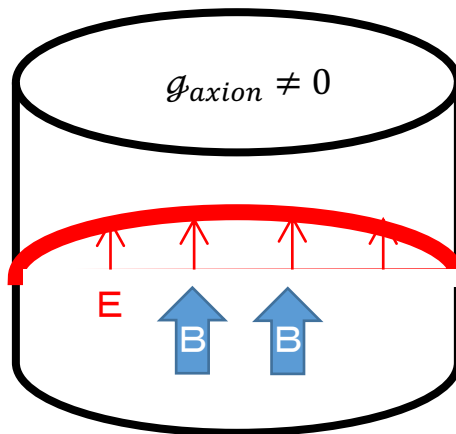
$$P = \kappa g^2 V B_0^2 \rho_c G_{lmn} \frac{1}{m_a} Q_c,$$

$$G_{lmn} = \frac{(\int dV E_c \cdot B_0)^2}{B_0^2 V \int dV E_c \cdot E_c}, g \propto m_a$$

- 強制振動で励起されたAxion由来の電波を検波する
 - 恐ろしく微弱な電波: $P = 1.1 \times 10^{-26}$ W
at $g=10^{-15}$ GeV, $B_0=5$ T, $G=0.66$, $V=5$ ℓ, $Q=10^3$, $m_a=2.1 \times 10^{-5}$ eV=5 GHz
 - (一様な)強磁場
 - 共振空洞空洞
- 雑音は, アンプの雑音と共振器の熱雑音
- 通常, アンプ雑音が支配的で, この場合はV, Q値と無関係
 - 熱雑音は, 位相がバラバラなので, $U_{\text{photon}} \propto Q_c$ (cf: $U_{\text{axion}} \propto Q_c^2$)
- 大きな空洞を用意すれば, Conventionalな手法で, 高感度化が可能

- 形状因子 G

$$G_{\text{axion}} = \frac{(\int dV \mathbf{E}_{\text{cav}} \cdot \mathbf{B}_0)^2}{|\mathbf{B}_0|^2 V \int dV |\mathbf{E}_{\text{cav}}|^2}$$



高次(n)のモードを使った高周波では, g が著しく小 (n^{-2}) (偶数では0)
 節の無い基本モード(TM₀₁₀)が一番良い
 しかし, **大きな空洞で基本モードを使うには, 何らかの工夫が必要**

感度見積もり

(攻めているのは体積)

- 500L の 5 GHz, Q=5,000 空洞に 8T磁場を印可する場合

$$\bullet \frac{S}{N} = \frac{P}{kT_N} \sqrt{\frac{\tau}{\Delta\nu}} = (2.78 \times 10^{-2}) \times \left(\frac{g_{a\gamma\gamma}}{10^{-15} \text{ GeV}^{-1}} \right)^2 \times \sqrt{\tau \text{ (min.)}}$$

- $kT_N = k(T_{\text{Cavity}} + T_{\text{amp}}) = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K} \times 4 \text{ K} = 5.6 \times 10^{-23} \text{ J}$

- $\Delta\nu = m_a \times \beta_a^2 = 5 \text{ GHz} \times 10^{-6} = 5 \times 10^3 \text{ Hz}$

- KSVZ の場合, $g_{a\gamma\gamma} = 7.80 \times 10^{-15} \text{ GeV}^{-1}$ で

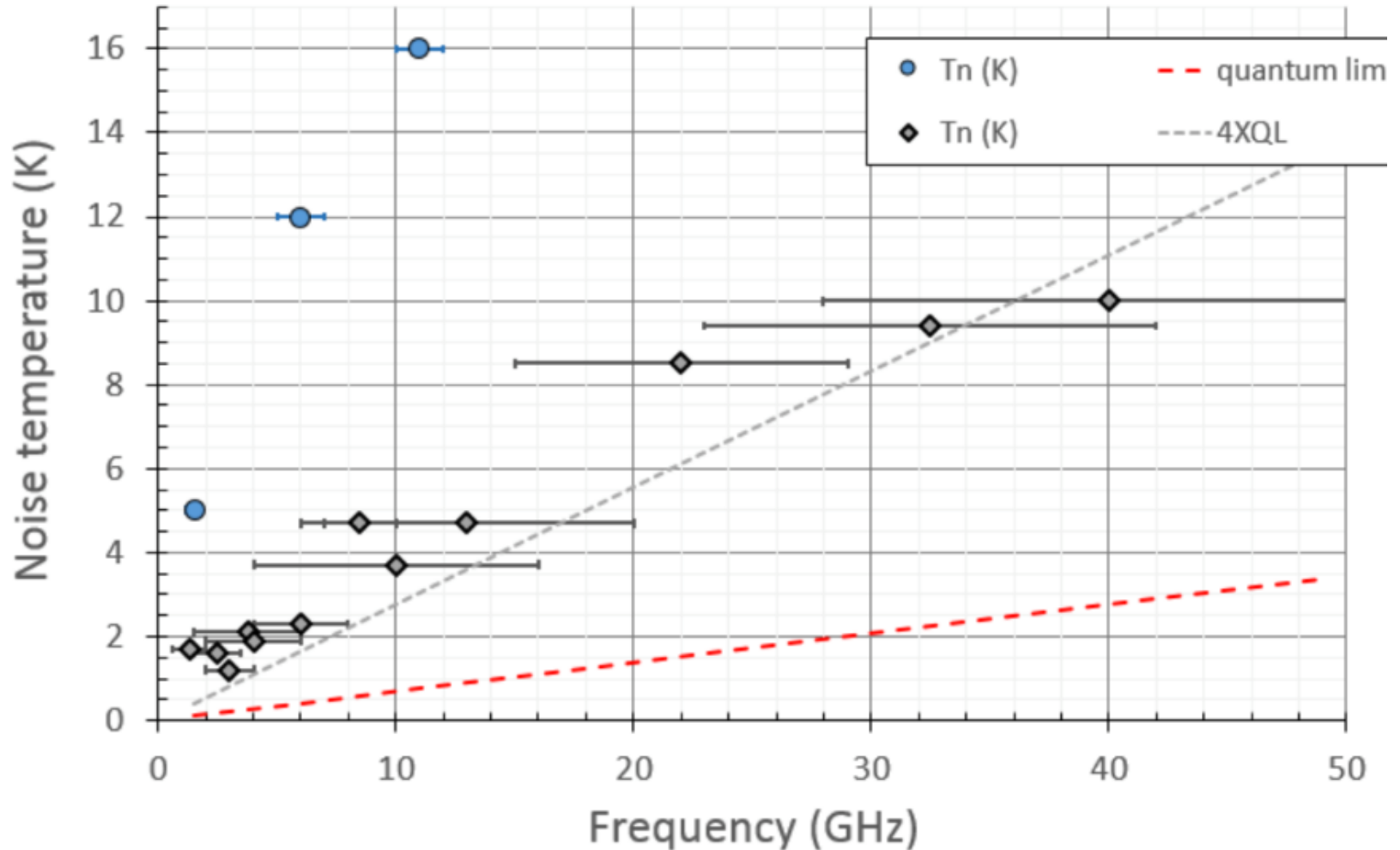
- $\frac{S}{N} = 1.7 \times \sqrt{\tau \text{ (min.)}}$

- DFSZの場合: $g_{a\gamma\gamma} = 2.94 \times 10^{-15} \text{ GeV}^{-1}$

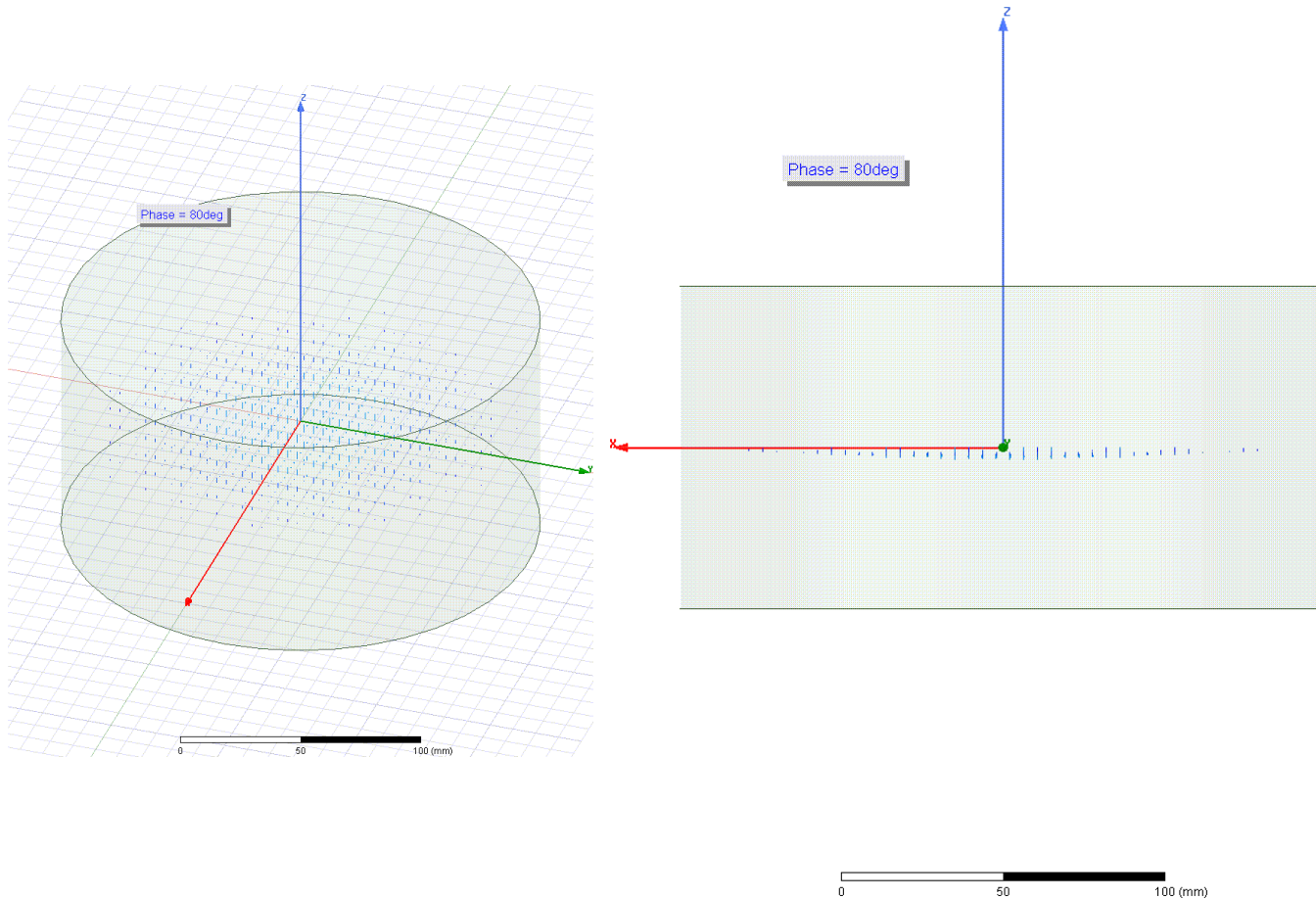
- $\frac{S}{N} = 0.24 \times \sqrt{\tau \text{ (min.)}}$

- 空洞は開発要素
 - 大型化(500L, 直径80cm 長さ100cm)
 - $Q=5,000$ を仮定しており, 高純度銅製空洞で到達可能(
 - 周波数の掃引を行う必要あり
- マグネット, 冷却系, アンプは現存する技術の集積で何とかなる
 - $B_0 = 8 \text{ T}, T_{\text{cavity}} = 1.2 \text{ K}, T_{\text{amp}} = (2 + \alpha) \text{ K}$

Linear amplifier



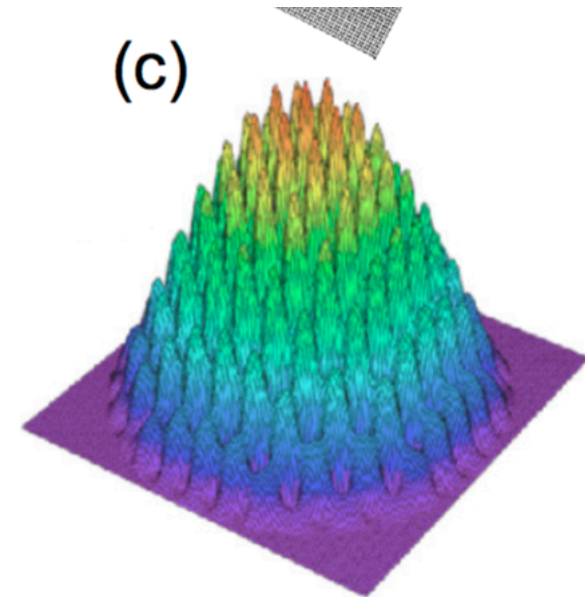
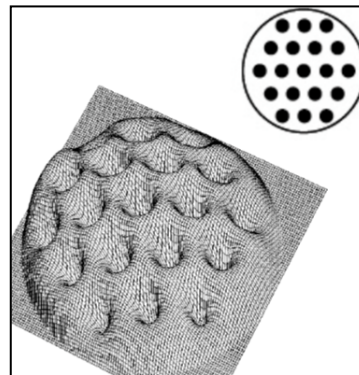
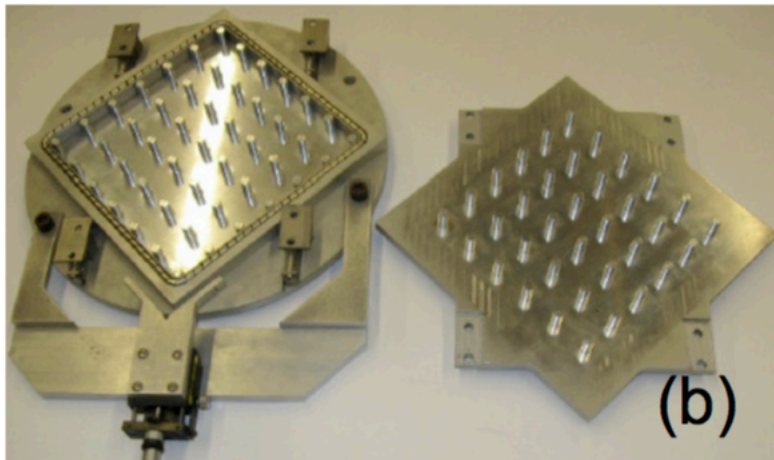
大型化は可能なの？



普通に作ると. 基本モードは $V \sim \lambda^3$ であり, 高い周波数では, V を大きくできない

Photonic crystal Cavity

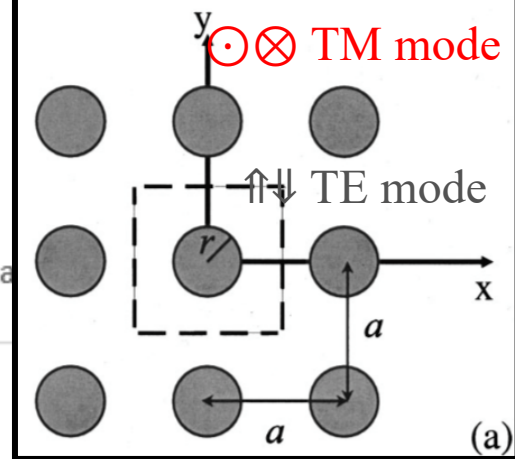
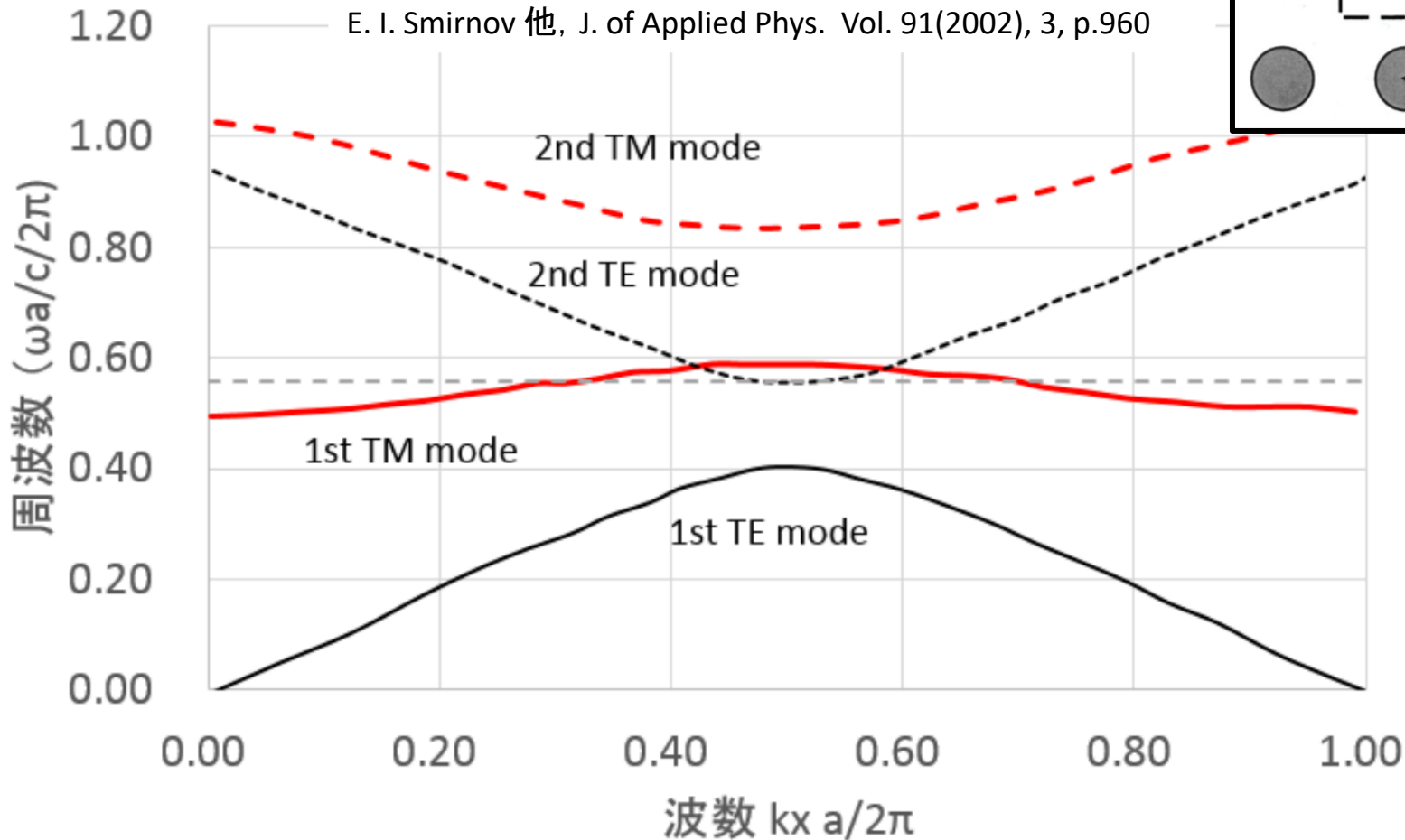
- 基本モードのような電場分布で，巨大な空洞があれば，周波数の高い領域のアクシオン探索が出来る。



2次元無限の場合の計算

正方格子の $k_x=k_y=0$ での分散関係(k_x) 格子間隔 a , 金属柱半径 $r=0.2a$

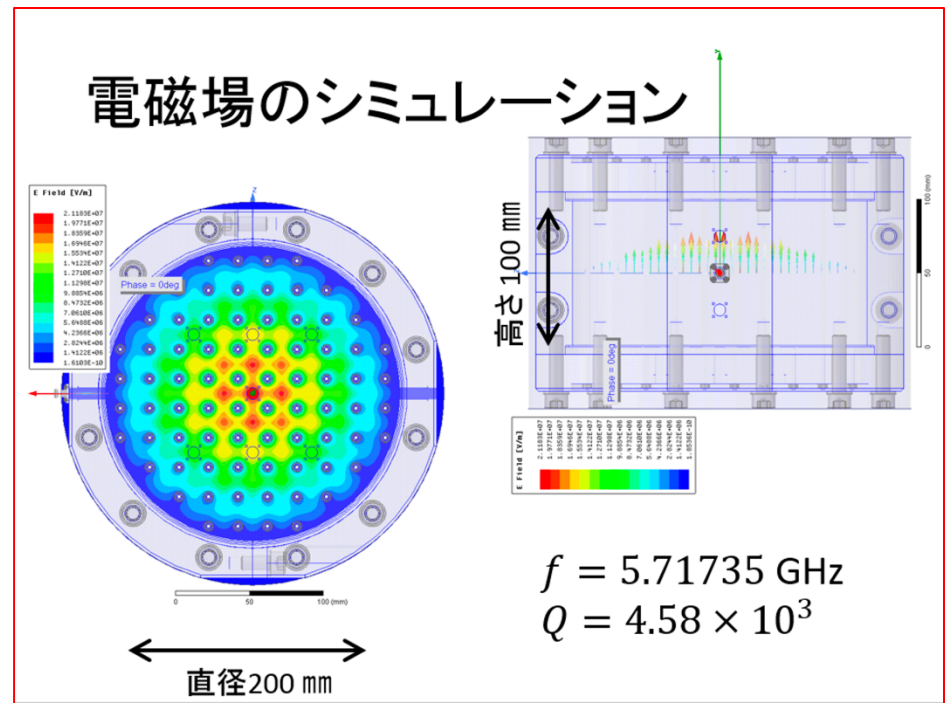
E. I. Smirnov 他, J. of Applied Phys. Vol. 91(2002), 3, p.960



金属, 又は高誘電率の柱を周期的に配置することで, 目的の基本モードが得られる.
波長は, 柱の周期で決まる.

開発の状況

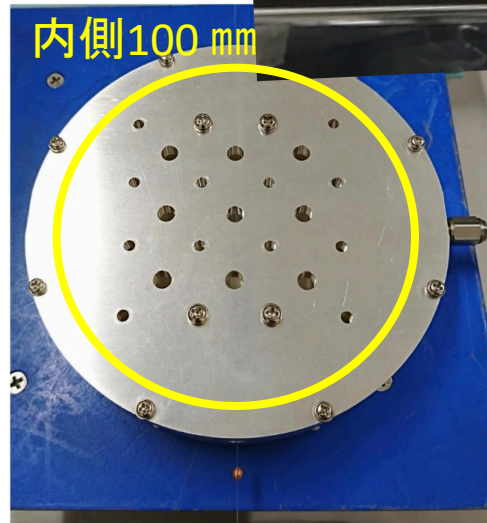
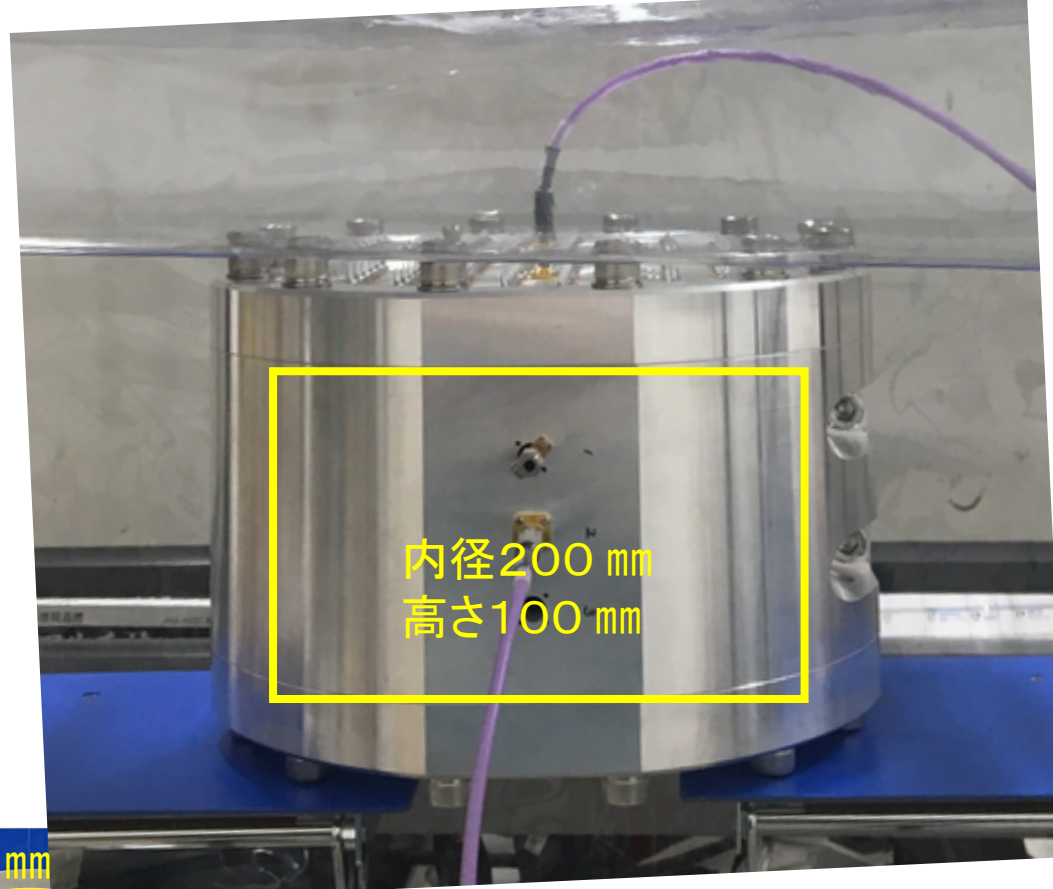
- 有限要素法によるSimulation (HFSS)
- テスト空洞を用いた測定 (2018年9月)
 - 計算上は, 直径200 mm, 長さ100 mmの空洞が動作
 - $V=3.14 \ell$
 - 実際には, 全くダメ



• 小さいものからコツコツと

- 100 mm × 100 mm × 10 mm ... OK (2019/11/4)
 - $V=0.1 \ell$
- $\Phi 100$ mm × 10 mm ... OK (2019年11~12月)
- 140 mm × 140 mm × 10 mm ... OK (2019/4/22)
 - $V=0.2 \ell$
- 200 mm × 200 mm × 10 mm ... OK (2019/4/26)
 - $V=0.4 \ell$
- 200 mm × 200 mm × 20 mm ... OK (2019/5/29)
 - $V=0.8 \ell$
- 200 mm × 200 mm × 40 mm ... Bad(2019/5/29)
 - $V=1.6 \ell$
- 200 mm × 200 mm × 20 mm を2段 ... OK(2019/6/21)
 - $V=1.6 \ell$
- 200 mm × 200 mm × 30 mm ... 7月3日納入で試験これから
 - $V=1.2 \ell$

空洞たち



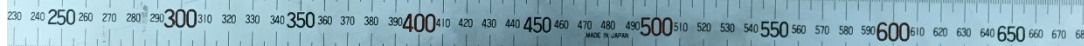
内側200 × 200 mm

高さ 20 mm

高さ 10 mm

高さ 40 mm

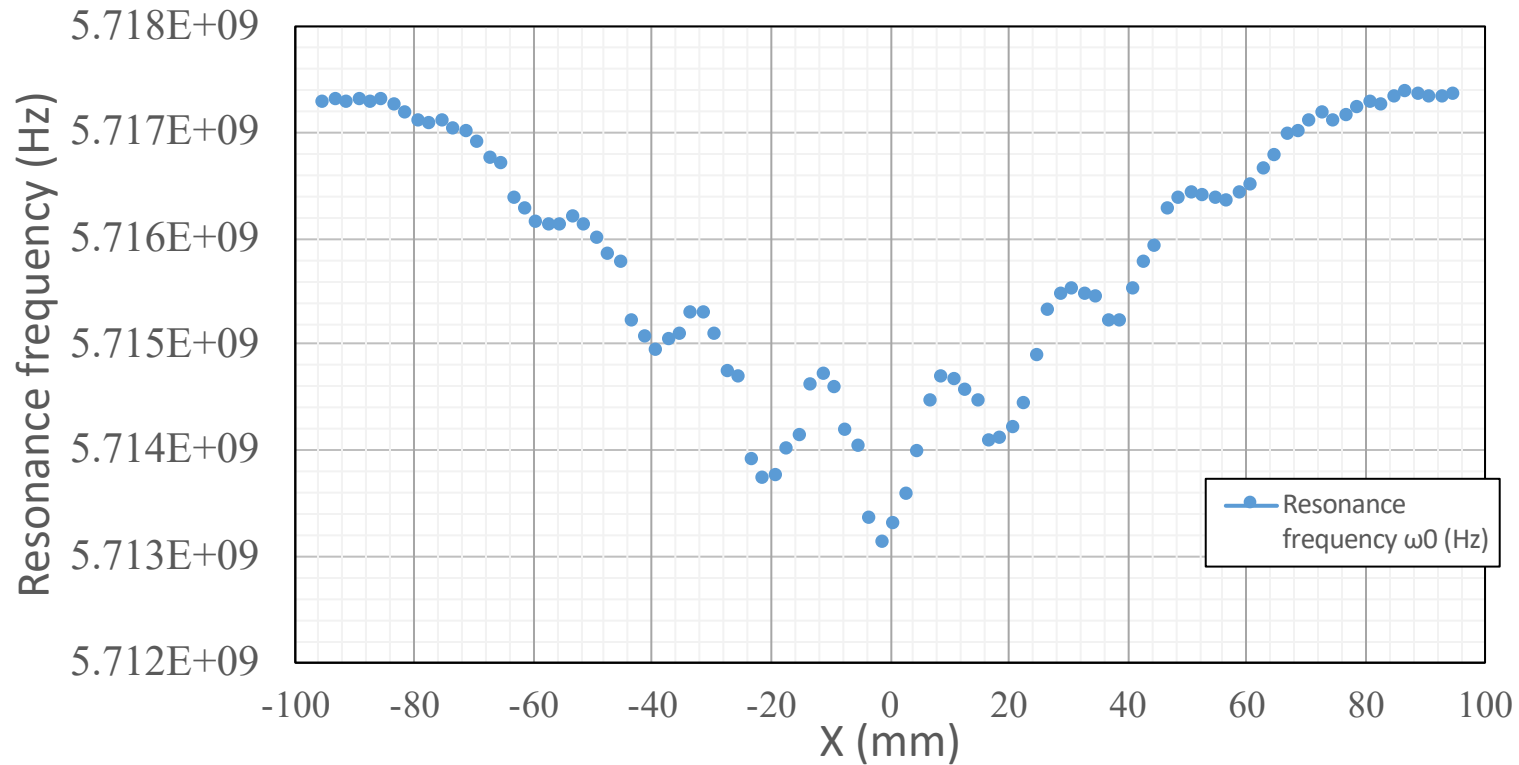
内側140 × 140 mm
高さ 100 mm



200 mm × 200 mm × 20 mm 2段 の場合の 電場の様子

(ビーズプル法による測定)

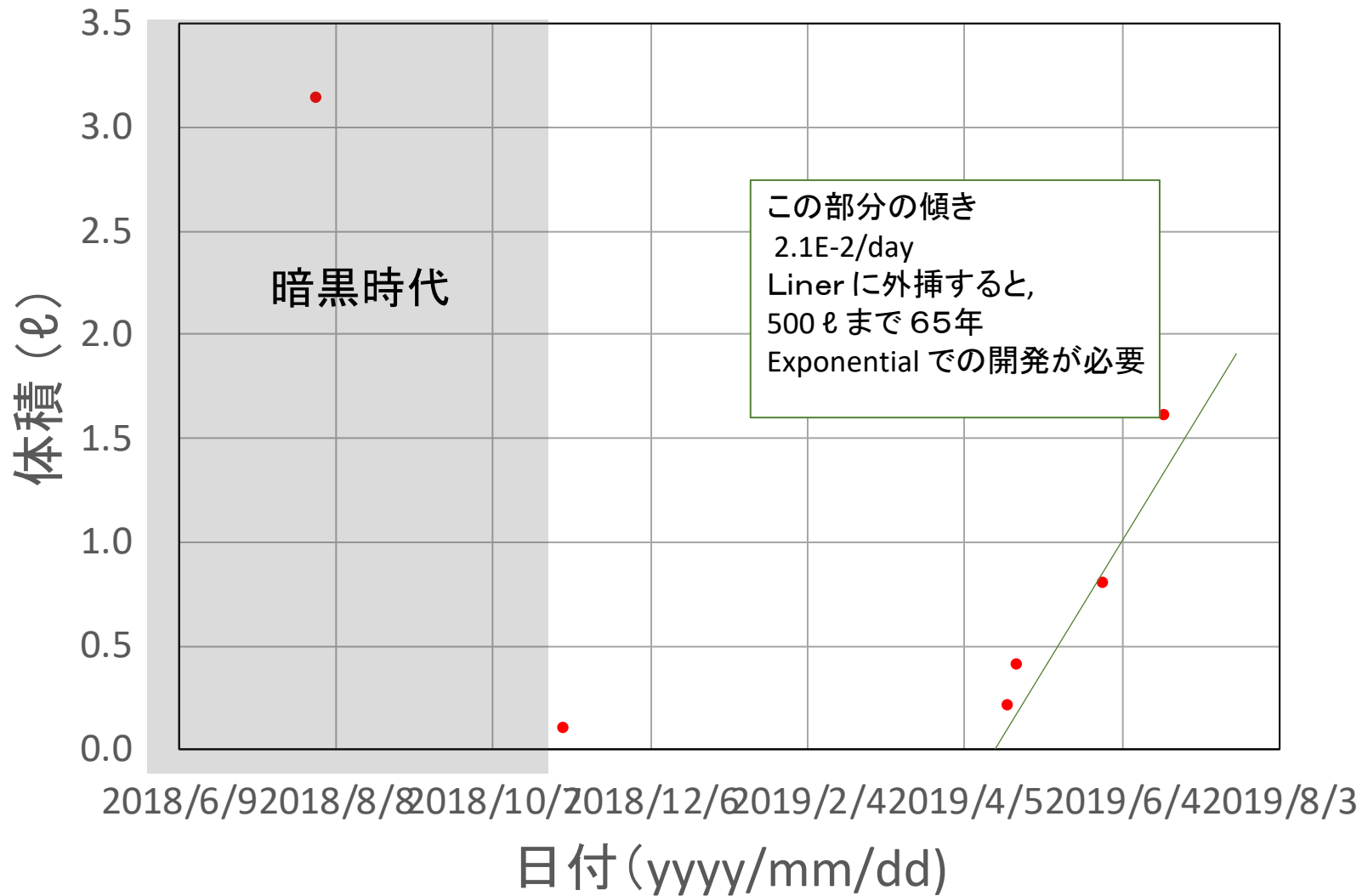
200 × 200 × 20 mm × 2段 空洞



縦軸は、摂動として与えた金属ビーズによる共振周波数のズレ(Δf)。

これは 電場強度の2乗に比例

つまり、 $\Delta f \propto E^2$ であり、**節のないモードが観測されている**ことが分かる



• 今後の大型化への予定

- 200 mm × 200 mm × 20 mm × 4段 (7月)
 - $V = 3.2 \ell$
- 100 mm × 100 mm × 20 mm × 8段 (7月)
 - $V = 1.6 \ell$
- 100 mm × 100 mm × 20 mm × 16段 (8～9月)

- ビーズプル法は摂動による手法のため、体積が大きくなると、周波数のズレが測定出来なくなる.
- 手法を考え中

新学術「地下宇宙」

- 領域代表は東北大 井上さん
 - 令和最初の科研費事業
- DO2班「極低温技術による宇宙素粒子研究の高度化」
(計画研究代表 大阪大 吉田先生)
 - この計画研究で、冷凍機とマグネットが入ります(R02年3月)
 - 共振空洞のHigh Q化を推進
 - 冷却超高純度銅製RF空洞での「実証」(Q~10,000以上)
 - 磁場中の超伝導RF空洞の「開発」(Q= 50,000~500,000)
 - **B=9T のマグネット**
 - コールドボア 直径 110 mm, 長さ200mm (最大V=7.6 ℓ)
 - 到達温度 4 K

この資産を使って、 近未来に何ができるか？

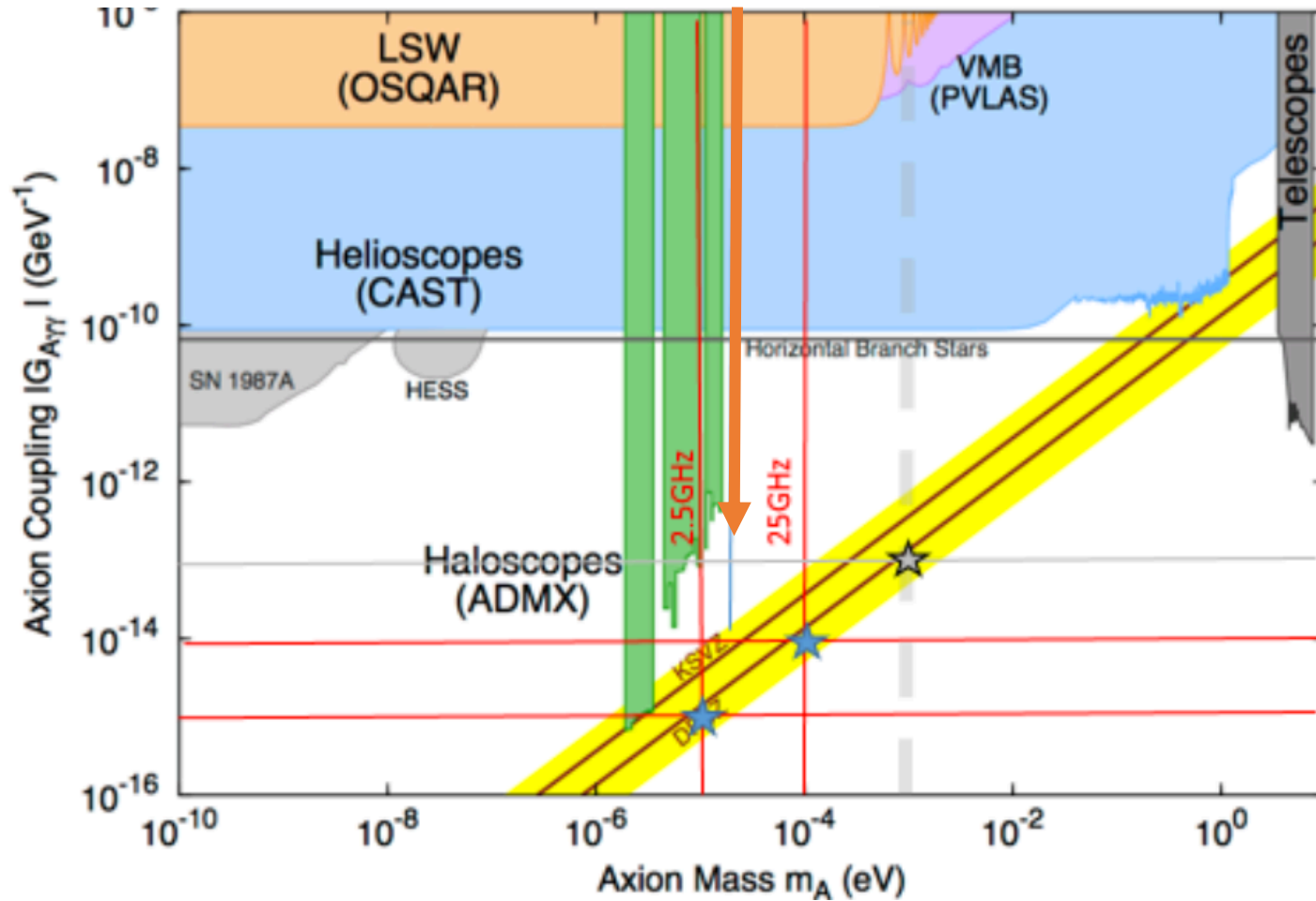
• 仮定:

- 周波数は, $f=6.5\sim 7.0$ GHz あたりへちょっと上げる
 - 先人が手を出していないところ
 - 今はたまたま, 格子間隔を 20mmとしており, $f\sim 5.7$ GHz など
 - ほんの少し縮めるだけ
- 空洞サイズ: 直径100mm × 20mm × 6段 ($V=0.9$ l)
- $Q=10,000$
- $T_N=T_c+T_{\text{amp}}+\alpha = 4.2$ K + 12K + $\alpha = 25$ K
- $B_0=9.0$ T

$$\bullet \frac{S}{N} = \frac{P}{kT_N} \sqrt{\frac{\tau}{\Delta\nu}} = (1.56 \times 10^{-1}) \times \left(\frac{g_{a\gamma\gamma}}{10^{-13} \text{ GeV}^{-1}} \right)^2 \times \sqrt{\tau \text{ (min.)}}$$

- 実は探索には, 共振空洞の周波数掃引機能が重要です.
これも大事な要素ですが, 秋の学会で話します.

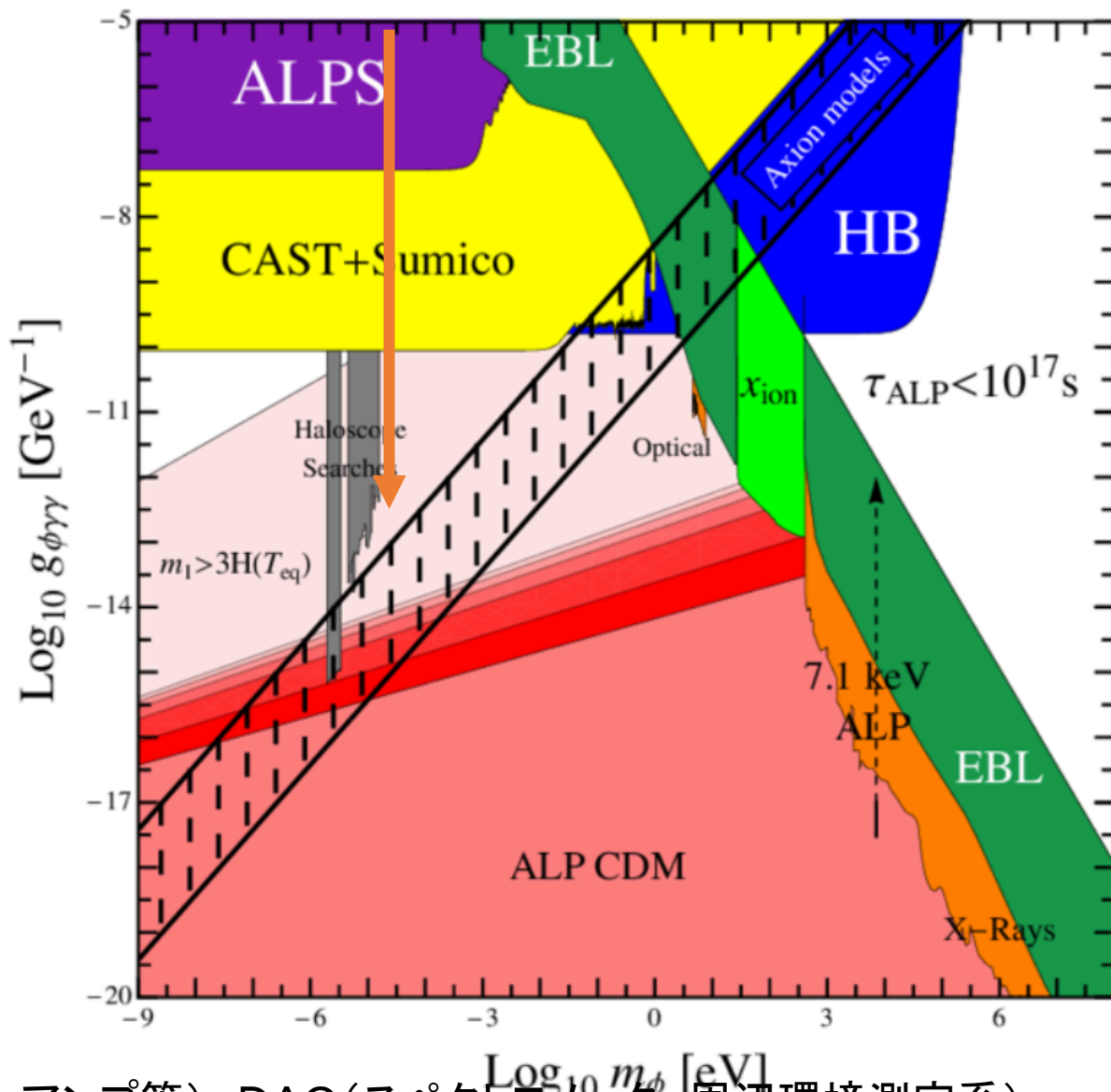
このあたりまで行けそう



必要なもの:

- 機器関係
 - 回路系(スイッチ, アンプ等), DAQ(スペクトロメータ, 周辺環境測定系)
- 皆様のご協力
- コラボレータ! (今, 3人なんです.)

ALP DM探索は可能



必要なもの:

- 機器関係
 - 回路系(スイッチ, アンプ等), DAQ(スペクトロメータ, 周辺環境測定系)
- 皆様のご協力
- コラボレータ! (今, 3人なんです.)

その先は？

感度見積もり (High Q化が成功した場合)

- 500L の 5 GHz, Q=100,000 空洞に 8T磁場を印可する場合

$$\bullet \frac{S}{N} = \frac{P}{kT_N} \sqrt{\frac{\tau}{\Delta\nu}} = (5.56 \times 10^{-2}) \times \left(\frac{g_{a\gamma\gamma}}{10^{-15} \text{ GeV}^{-1}} \right)^2 \times \sqrt{\tau \text{ (min.)}}$$

- $kT_N = k(T_{\text{Cavity}} + T_{\text{amp}}) = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K} \times 4 \text{ K} = 5.6 \times 10^{-23} \text{ J}$

- $\Delta\nu = m_a \times \beta_a^2 = 5 \text{ GHz} \times 10^{-6} = 5 \times 10^3 \text{ Hz}$

- KSVZ の場合, $g_{a\gamma\gamma} = 7.80 \times 10^{-15} \text{ GeV}^{-1}$ で

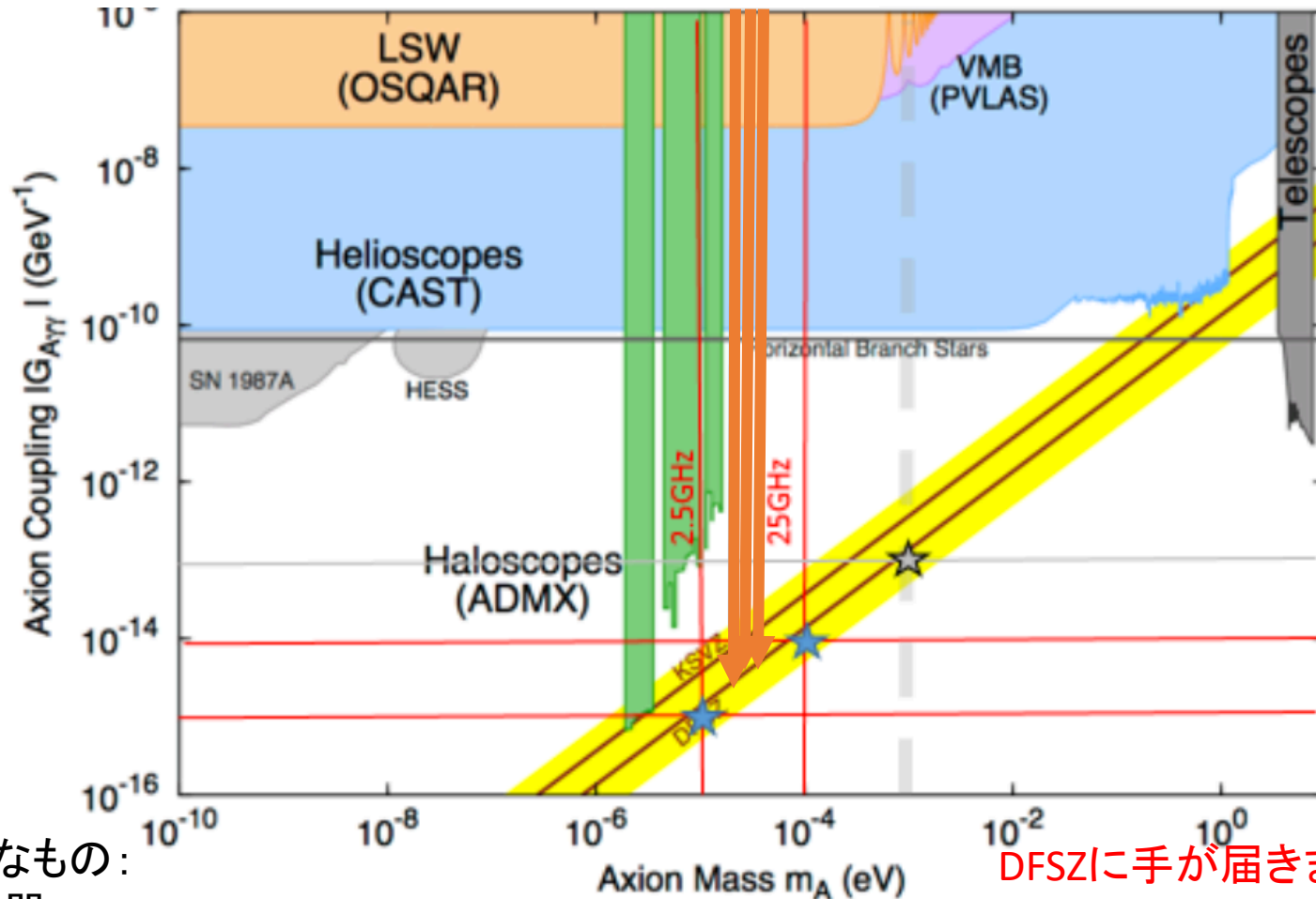
- $\frac{S}{N} = 3.4 \times 10^1 \times \sqrt{\tau \text{ (min.)}}$

- DFSZの場合: $g_{a\gamma\gamma} = 2.94 \times 10^{-15} \text{ GeV}^{-1}$

- $\frac{S}{N} = 4.8 \times \sqrt{\tau \text{ (min.)}}$

このあたりまで行けそう

周波数域では 5~15 GHz 位



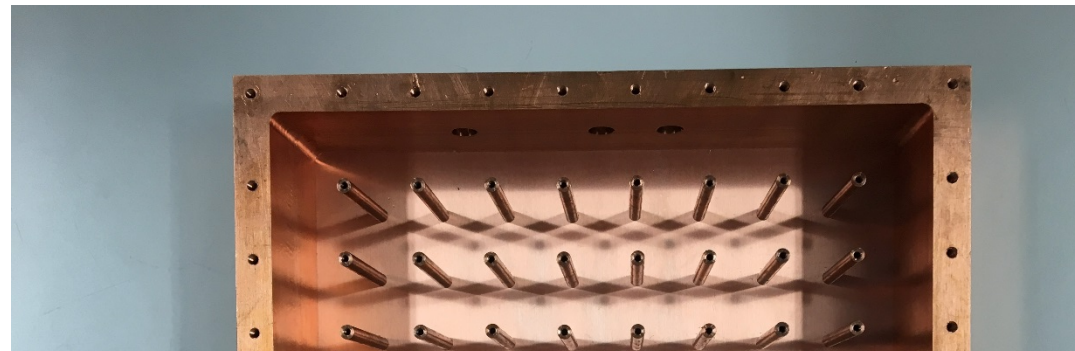
必要なもの:

- 機器
 - 巨大マグネット, 冷凍機 (Heポンピング)
 - 極低ノイズ回路系 (スイッチ, アンプ等) (それでも市販品)
 - DAQ (スペクトロメータ, 周辺環境測定系) (これは, 近未来と共通)
- 皆様のご協力
- コラボレータ!

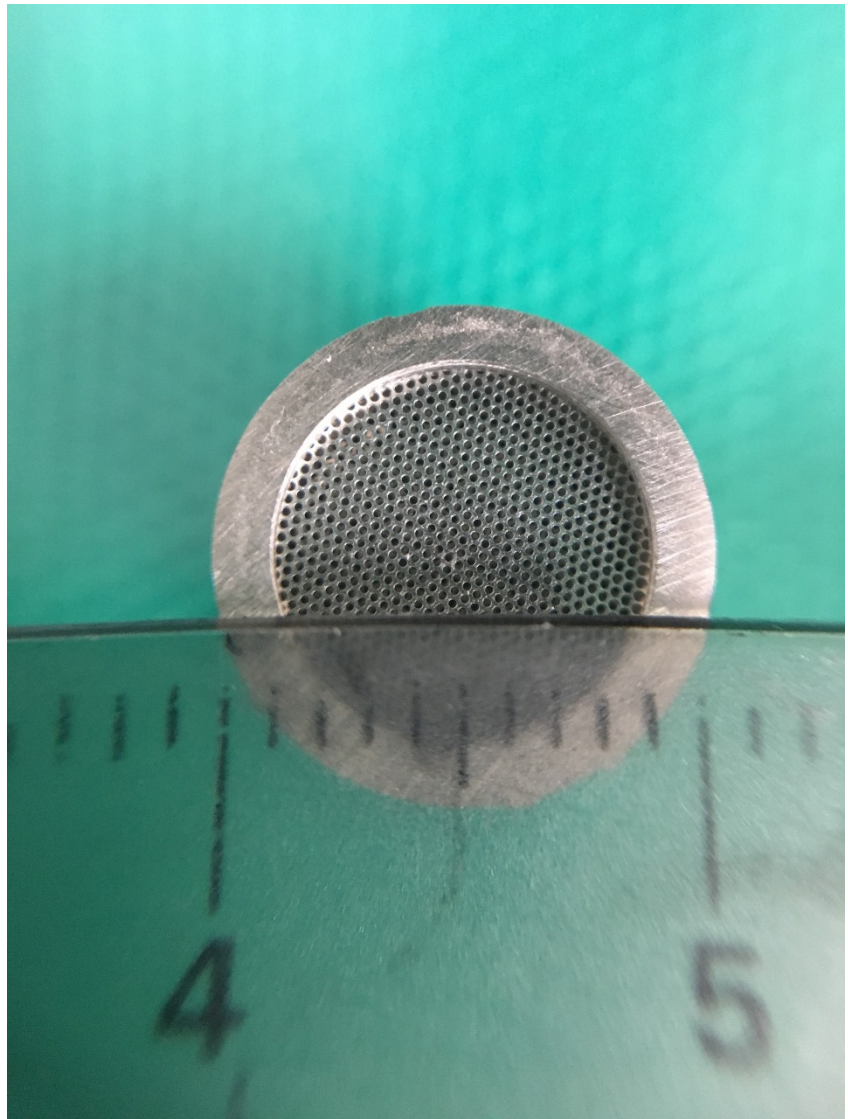
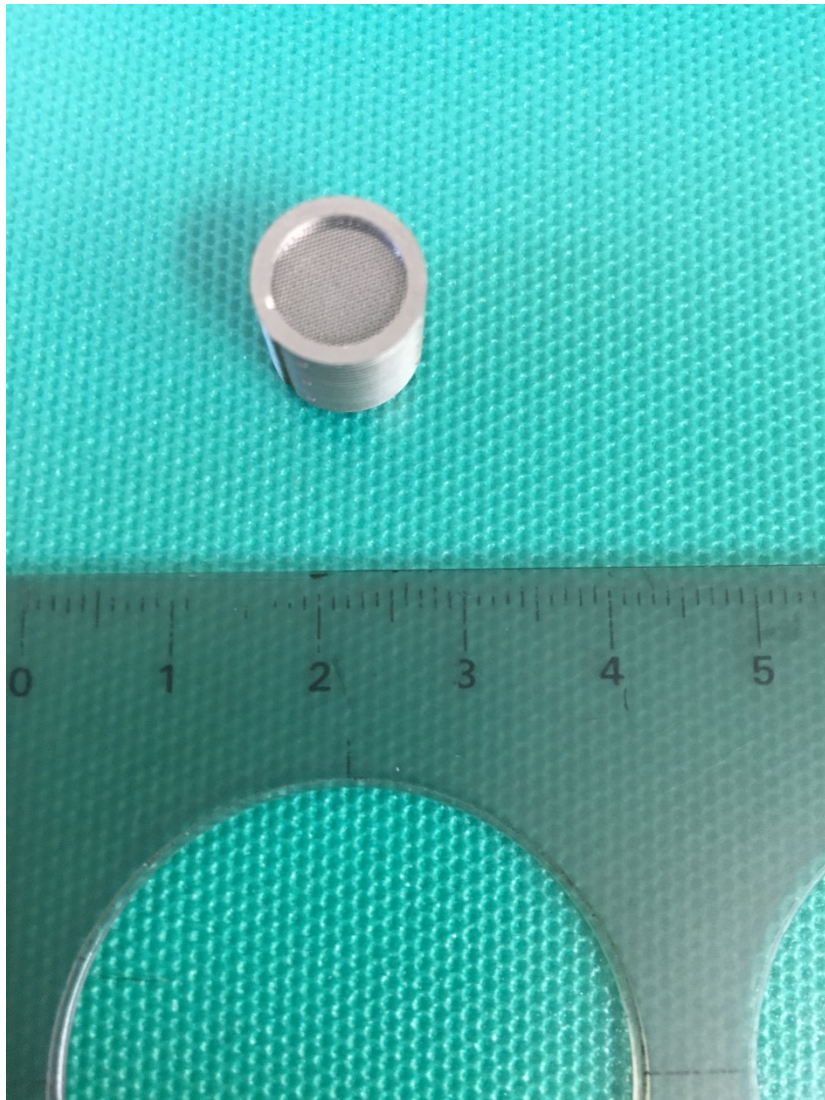
DFSZに手が届きます!

更に高周波側？（10年20年というので...）

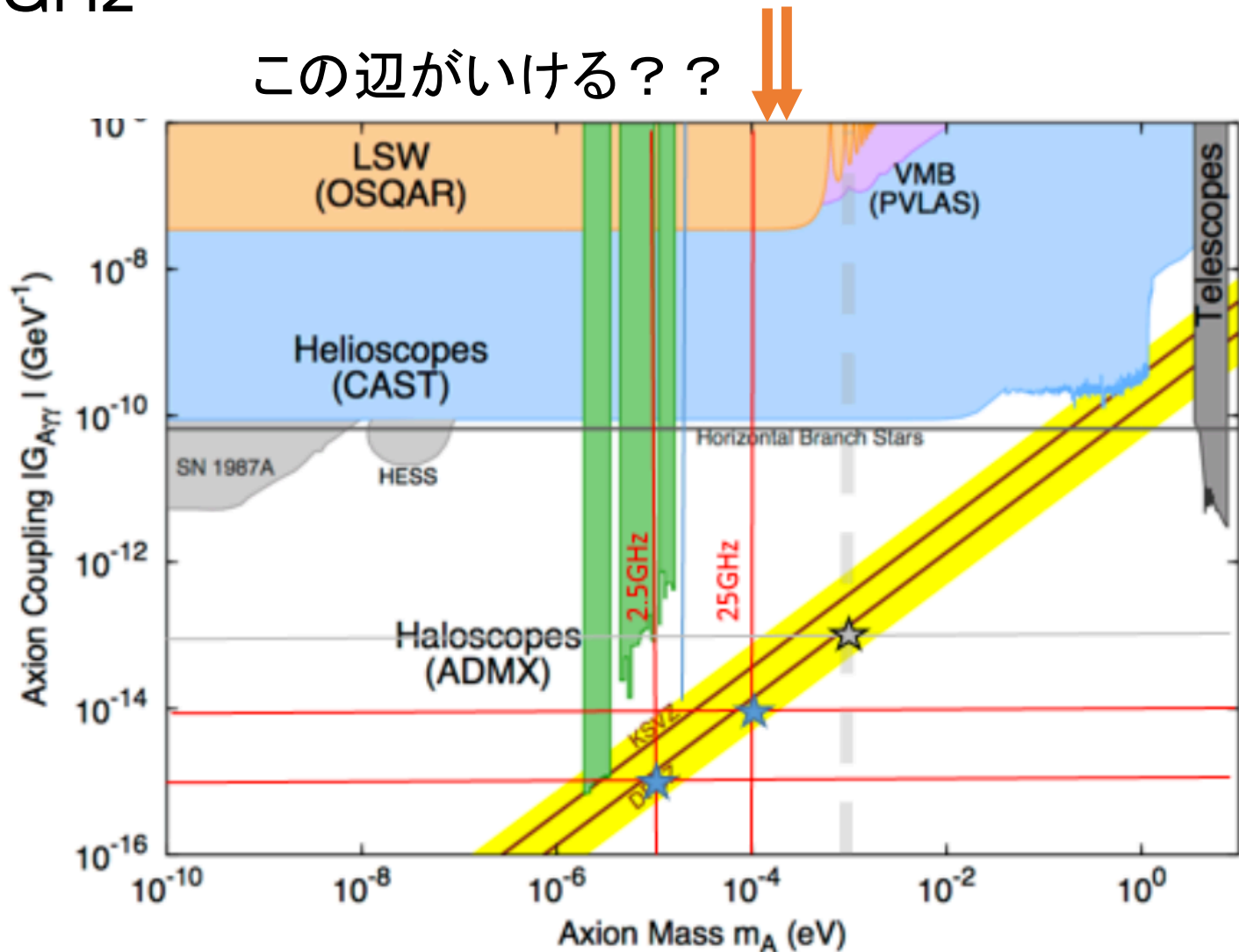
- 更に高周波側では周期構造が細かいものになる
- 機械加工を想定すると、今の延長線上では、15 GHz 位までと予想
 - 今の様子：
 - 格子の銅の直径 4mm, 格子間隔 20 mm で, 5.7 GHz
 - 15 GHz では,
 - 格子の銅の直径 1 mm, 格子間隔 7 mm 程度
- この場合、周波数の変調機能をメカニカルに作りこむことが難しい



- 目いっぱい小さい構造を見てみよう
- エッチング+ホットプレスで3次元微細構造



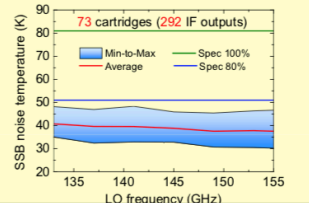
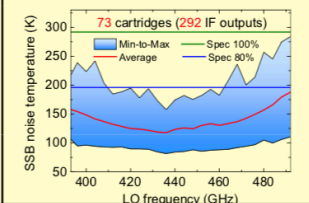
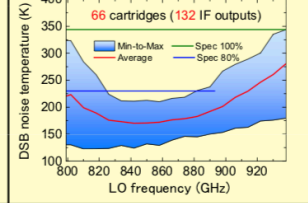
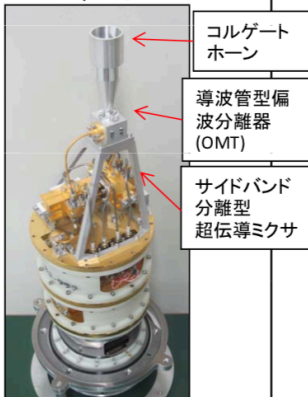
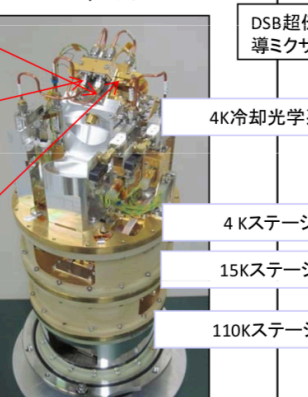
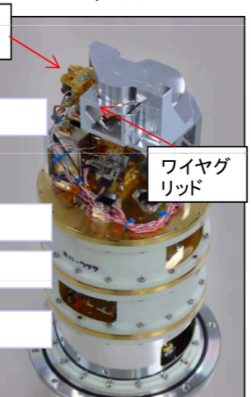
- 200 μm の格子間隔ならば, 周波数は今の100倍で, 570 GHz



ポイント:

- 周波数の増加に伴い, Thermal photon 数は激減する
 - 雑音はアンプ由来
- アンプに関しては, 天文学が既に頑張ってくれている領域
- 共振空洞が課題
 - Q値
 - 共振周波数の変調

「共振器で頑張る」
 というのは悪くない

	バンド4受信機	バンド8受信機	バンド10受信機
観測(RF) 周波数・波長	125-163GHz 2.0mm	385-500GHz 0.7mm	787-950GHz 0.35mm
受信方式	ヘテロダイン SSB		ヘテロダイン DSB
雑音温度仕様 ・帯域の80% ・帯域の100%	SSB雑音温度 51K (量子雑音の3倍) 以下 82K (量子雑音の5倍) 以下 	SSB雑音温度 196K (4倍)以下 292K(6倍) 以下 	DSB雑音温度 230K (5倍) 以下 344K(7.5倍) 以下 
カートリッジの直径	Φ140	Φ170	Φ170
外観			

まとめ

- 暗黒物質アクシオン
- Halo scope
- 大型空洞を用いたhalo scope
 - 大型空洞の開発について
 - 皮算用
 - 更なる高周波化

付録

電場プロファイルの測定 — ビーズプル法 —

- 空洞の中に、小さなビーズ(金属や誘電体)を導入し、その摂動によって、共振周波数が変化する、ことを利用

金属Beas 周辺の電場の様子
 $\sigma = \text{finite}$

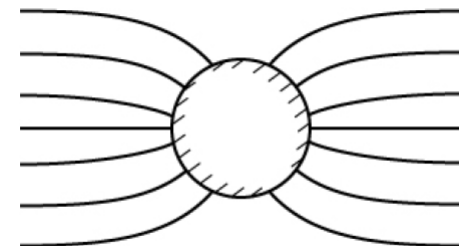
- $$\frac{\Delta\omega}{\omega} = \frac{\Delta U_E - \Delta U_H}{U},$$

- 半径aの小球の場合,

- 金属小球の場合,
$$\frac{\Delta\omega}{\omega} = \pi a^3 \left(\frac{1}{2} \mu H_0^2 - \epsilon E_0^2 \right) / U$$

- 特に TM_{010} の様に $H=0$ の場合には, $\frac{\Delta\omega}{\omega} \propto -E_0^2$

- 誘電体小球の場合,
$$\frac{\Delta\omega}{\omega} = -\pi a^3 \left(\frac{\mu_r - 1}{\mu_r + 2} \mu_0 H_0^2 + \frac{\epsilon_r - 1}{\epsilon_r + 1} \epsilon_0 E_0^2 \right) / U$$

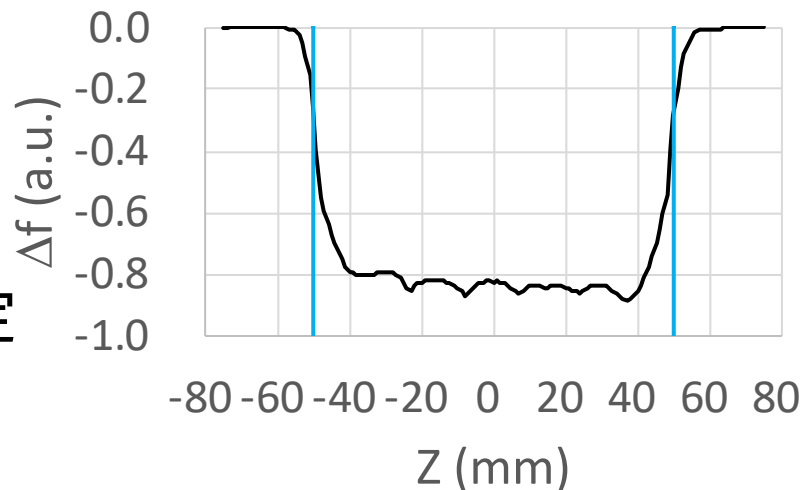


field lines are normal to a perfectly conducting surface at the wall

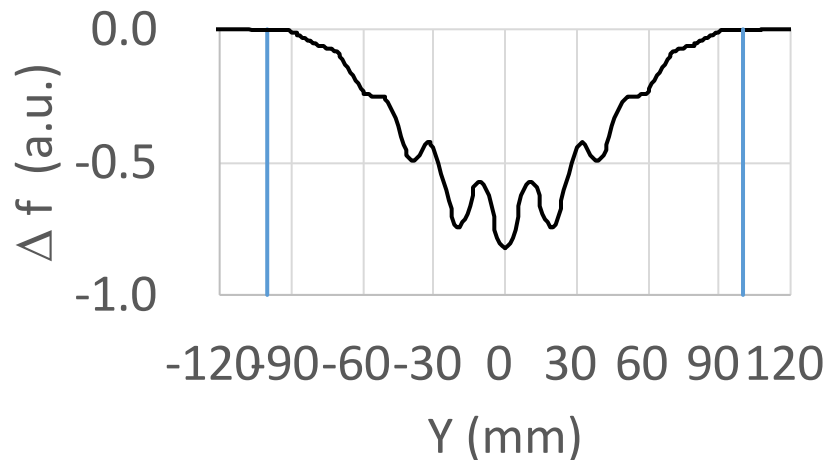
測定

- 手順は,
 1. 目的の共振を見つけ,
 2. Z方向, X方向でBeas Pull法で測定
 - Z方向が薄い場合は測定できない

ビーズによる周波数変化(数値計算による予測)
(磁場の項を無視)



ビーズによる周波数変化(数値計算による予測)
(磁場の項を無視)



1. 直径4mm銅球を釣り糸(2号)を取り付ける.
 - (テフロン球も用意, 写真はテフロン球)
2. 銅球を空洞内を移動
 - 定規で移動を記録
3. 各点で共振周波数を測定

