

暗黒物質アクシオン探索のための、 高磁場環境下でのHigh-Q マイクロ 波空洞の開発・研究

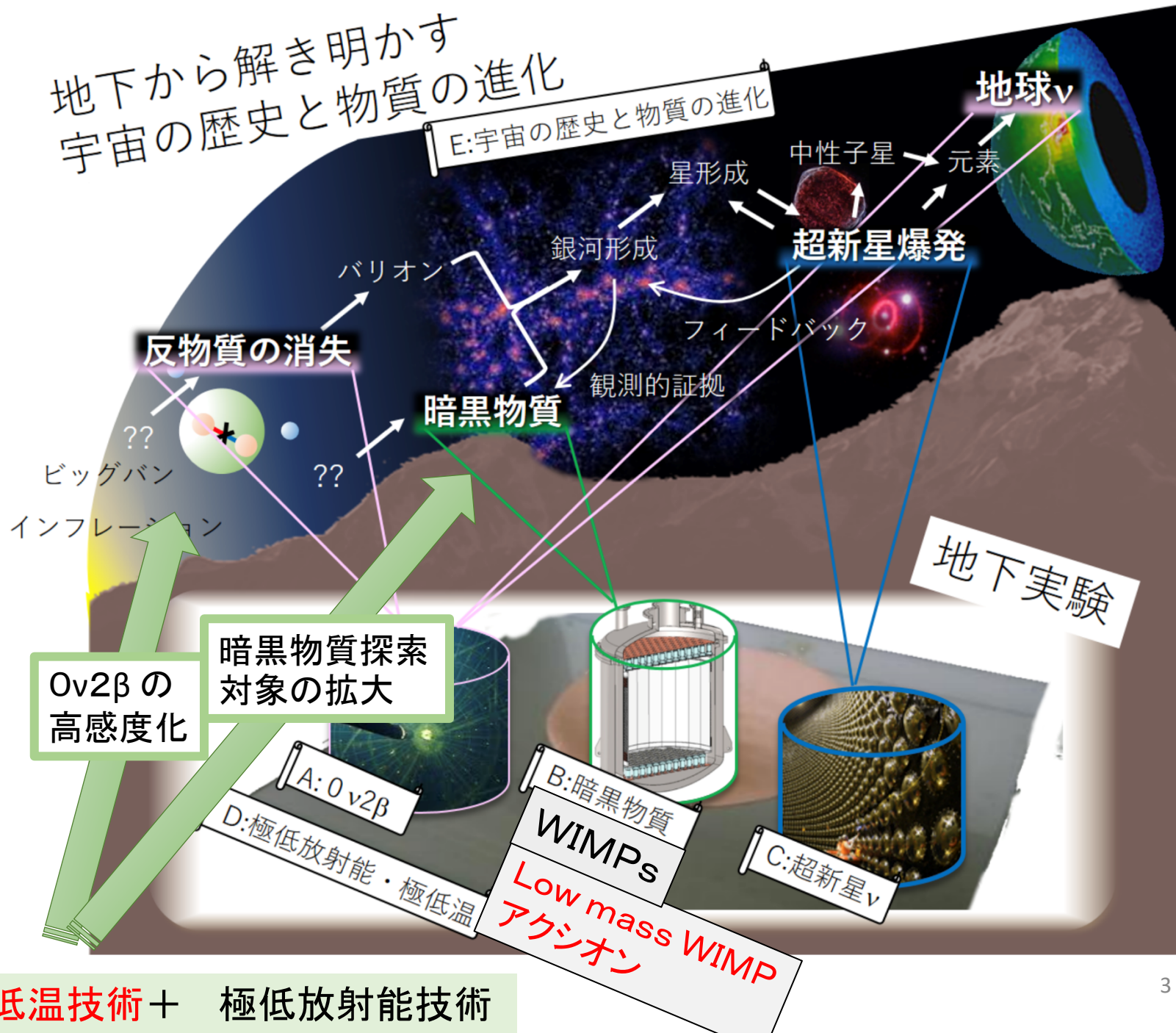
2019／08／24

岸本康宏

東北大 ニュートリノ科学研究センター

東京大 カブリIPMU

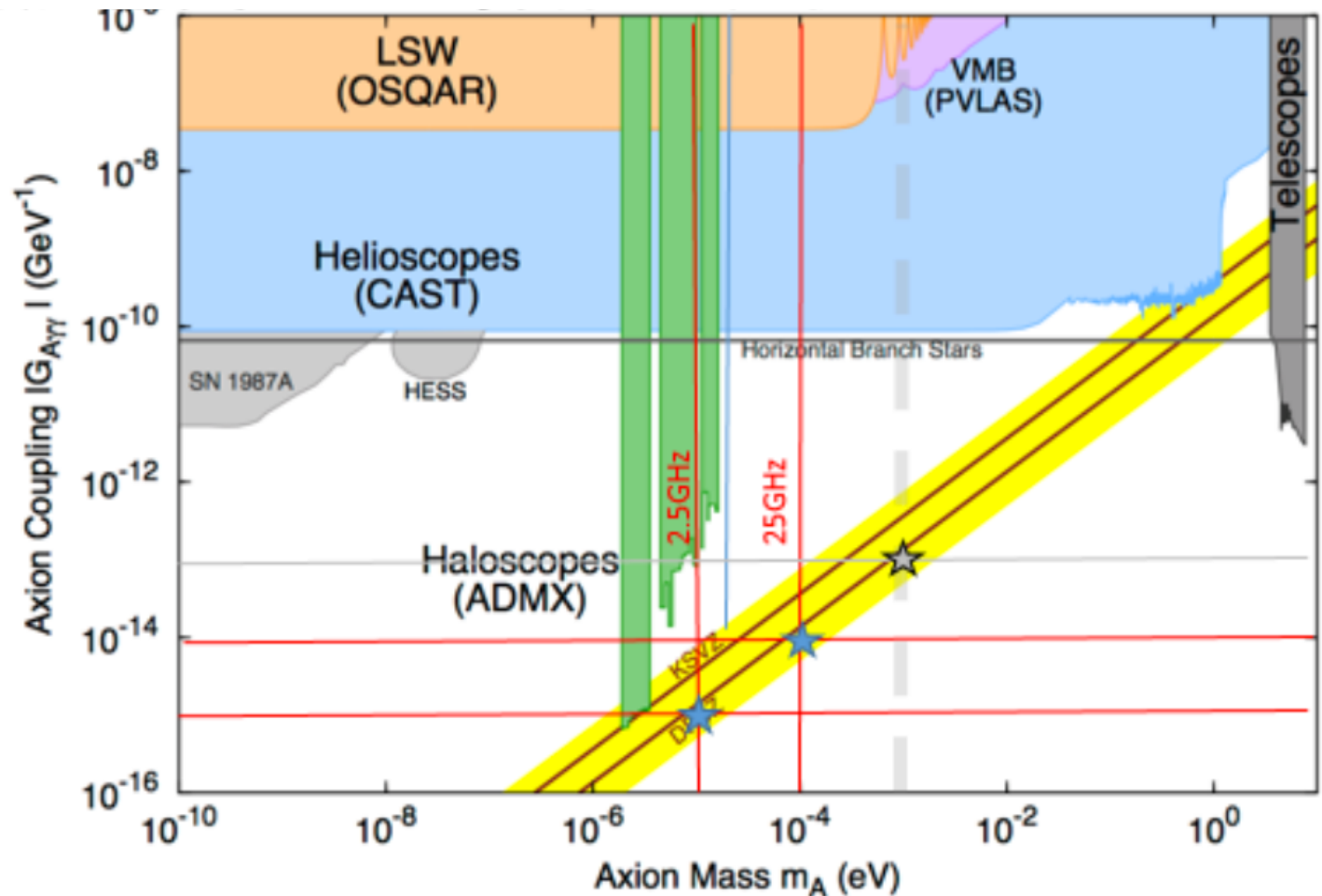
地下から解き明かす 宇宙の歴史と物質の進化



暗黒物質アクシオン

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

探索の現状

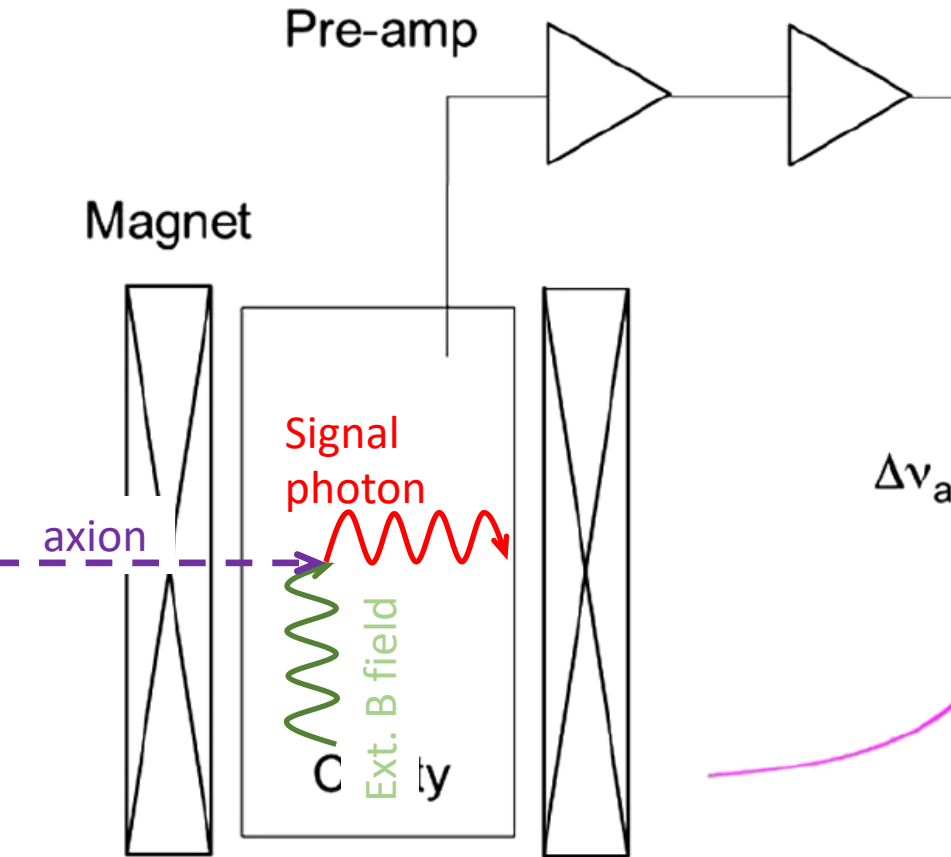


アクシオン検出法 (Axion halo scope)

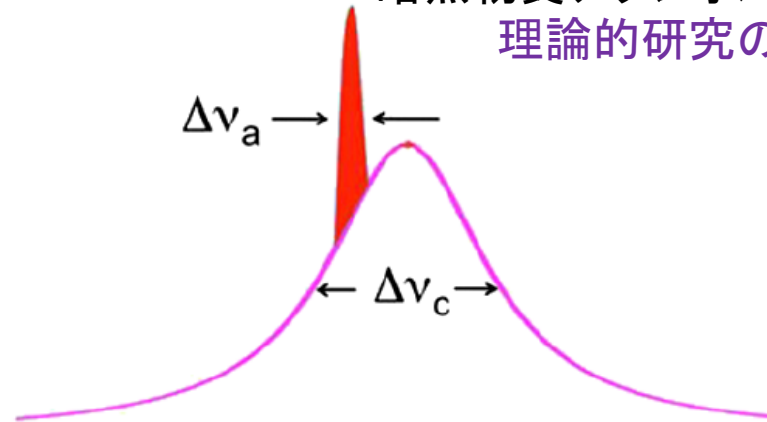
仮定

- Axion場 1つの古典的波動
- $\beta=10^{-3}$ のMaxwellian
- 検出器サイズ

- $\frac{\lambda}{2\pi} = \frac{\frac{h}{mv}}{2\pi} = 0.2 \text{ m} \left(\frac{1 \text{ meV}}{m_a} \right)$
- 検出器サイズ $\ll \lambda$



宇宙像が異なると,
暗黒物質アクシオンがあっても機能しない.
理論的研究の進捗もお願いします.



$$\mathcal{L}_{\text{int}} = aE \cdot B_{\text{ext}}$$

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: $U_{\text{axion}} \propto Q_c^2$)
- 強磁場のもと, 巨大なHigh-Q空洞を用意することで, 信号のみが強化される.

先行研究など

$$P = \kappa g^2 \textcircled{V} B_0^2 \rho_0 G_{lmn} \frac{1}{m_a} Q_c,$$

- ADMXが世界をリード
 - 現状では、超高感度センサーを用いて探索
 - Squid センサーによって、量子限界レベル
- 韓国 CAP
 - (おそらく) 超高磁場環境による感度向上を目指している様に見える
- 日本では、CARRAC実験など
- 個人的には、共振空洞にこだわって開発・研究
 - 大型化による感度向上 (基盤B FY 2017～2019)

感度見積もり

- 500L の 5 GHz, Q=5,000 空洞に 8T 磁場の場合

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

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

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

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

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

本研究

- 磁場を準備
- High-Q化によって感度を更に向上

$$P = \kappa g^2 V B_0^2 \rho_0 G_{lmn} \frac{1}{m_a} Q_c$$

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

感度見積もり (Qで頑張った場合)

- 500Lの5 GHz, $Q=5,000 \times 10 \sim 100$ 空洞に 8T磁場の場合

$$\bullet \frac{S}{N} = \frac{P \times 10 \sim 100}{kT_N} \sqrt{\frac{\tau}{\Delta\nu}} = 10 \sim 100 \times (2.78 \times 10^{-2}) \times \left(\frac{g_{a\gamma\gamma}}{10^{-15} \text{ GeV}^{-1}} \right)^2 \times \sqrt{\tau \text{ (min.)}}$$

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

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

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

$$\bullet \frac{S}{N} = 1.7 \times \sqrt{\tau \text{ (min.)}} \times 10 \sim 100$$

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

$$\bullet \frac{S}{N} = 0.24 \times \sqrt{\tau \text{ (min.)}} \times 10 \sim 100$$

DFSZが視野に入る

あるいは, 小型でも高感度化が可能

極低温技術とアクシオン探索

- 本研究

- 強磁場の準備

- 超伝導マグネット

- High-Q Cavity の開発研究

- 低温下での超高純度銅空洞の開発・実証
 - 超伝導空洞への挑戦

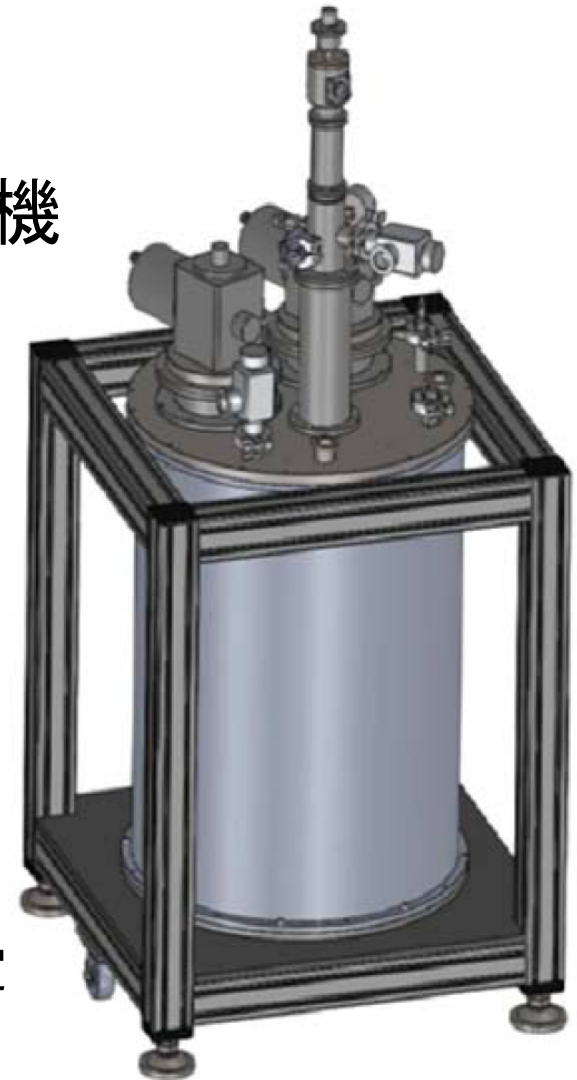
これらによって、将来のアクシオン探索を切り拓く

- D02内で開発される超伝導素子開発とのシナジー効果や外部との連携によって、超伝導素子による超高感度マイクロ波検出器へもつなげたい。
- 強磁場環境は、準備を行うのみで、新たな研究・開発までカバーできていません。より強力な磁場環境の開発・研究も大歓迎です。

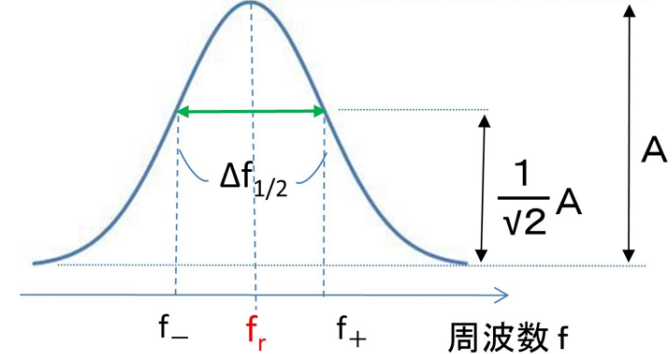
- このような興味をお持ちの方、是非協力しましょう。

超伝導マグネット

- 導入予定の超伝導マグネットと冷凍機
 - 磁場性能
 - 最大磁場: $B=9\text{T}$
 - 一様性: $10\%/\Phi 100 \times L200\text{ mm}$
 - 冷却性能
 - キャビティ空間: $\Phi 110\text{ mm}$ 以上 $L200\text{ mm}$
 - キャビティ空間温度: 4.2 K 以下
 - 冷凍機能力: 1.0 W 以上 @ 4.2 K
 - 冷却方式: 熱交換ガス(Heガス)
 - 導入時期と場所
 - 2020年3月, まずRCNSに導入される予定



High-Q 共振空洞



- Q値って何？

- 共振周波数幅 Δf と 共振周波数 f の比: $Q = f_r / \Delta f_{1/2}$

- 共振の鋭さの指標

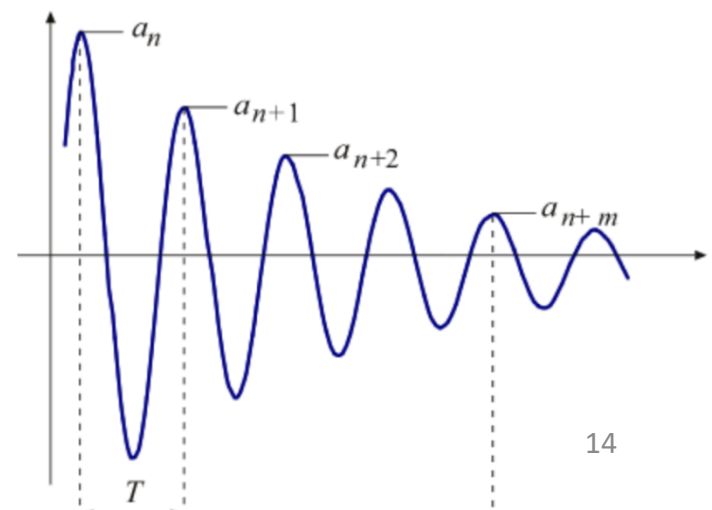
- ご利益: 信号領域を限定することで, 熱雑音が減少

- 蓄積エネルギー と 1周期当たりのエネルギー損失の比: $Q = \omega \times \left(U / \frac{dU}{dt} \right)$

- エネルギーの出入りに関わる指標

- 空洞のエネルギー収支の特性時間は $\sim Q/\nu$ となる

- ご利益: アクション信号を長時間保持



High-Q 共振空洞

- 共振空洞に対する要求
 - 周波数領域: 5～8GHz (本領域)
 - 手持ちのVNAが制限
 - Axion探索領域としては更にその上もある.
 - 周波数可変
 - 1つの空洞で20%位をカバーしたい
 - High-Q: $Q \sim 5 \times 10^4 - 10^6$
 - $Q = 10^6$ を超えると, Axion 信号の幅 ($\Delta\nu_a = \nu_a/Q_a$) より細くなるのであまり意味がない, とされている.)
 - 強磁場下で稼働すること!
- 全てを満足することが必要

High-Q 空洞開発

- 先ずはじめに:

- クリーンな環境

- 空洞内に不純物が混入すると、それがエネルギー損失の原因となり、Q値が低下する.
 - 具体的には、クリーンルーム、高純度薬品、保管庫など

- 超高純度の物質

- 空洞を構成する要素に不純物があると、それもエネルギー損失の源
 - ⇒「地下素核」で培われた低バックグラウンド技術＋ 「地下宇宙」DO1班との協力
 - 更には、加速器空洞開発など**近接分野のノウハウ**を導入し、強化



超高純度銅製空洞

- 周波数：5～8 GHz
 - より高周波に対応したVector Spectram Analyzer があるともう少し上ま
で研究できると思いますが....
- $Q \sim 5 \times 10^4$ が目標
 - 低い表面抵抗
- 超高純度銅の特性
 - 低温下で表面抵抗が減少
 - 高周波でも、それほど影響を受けない
 - $Q \propto R_{\text{surface}}^{-1} = \sqrt{\frac{2\sigma}{\omega\mu}}$

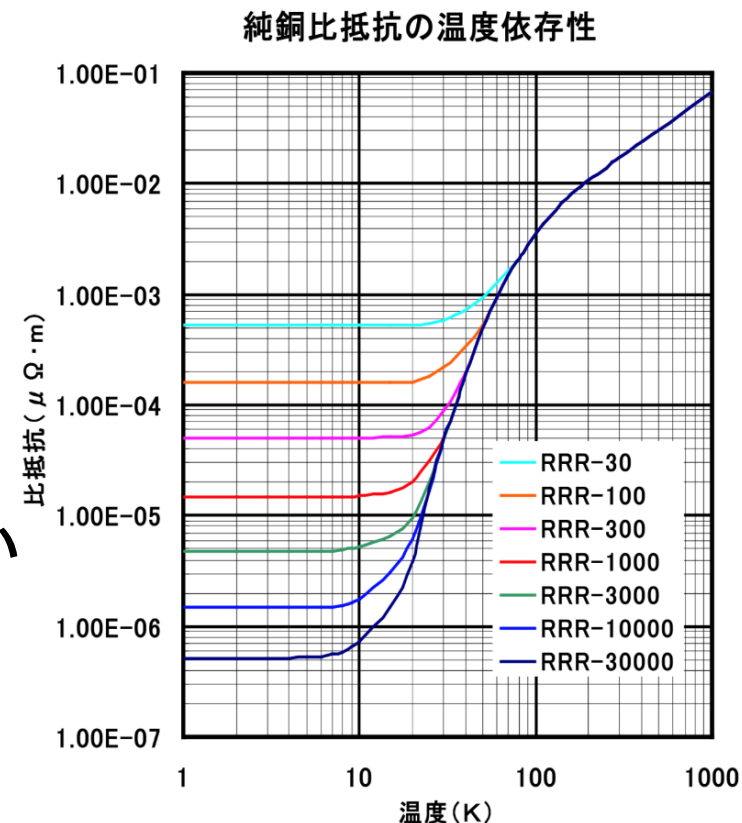


図 1： 純銅比抵抗の温度依存性（直流抵抗）．
RRR-30：常温抵抗と低温残留抵抗の比率.⁷

超伝導空洞

- 「抵抗値＝0」の恩恵にあずかれそうだが...

- $R_{SC}/R_{Normal} \sim 10^5$

- 磁場, マイクロ波との相性は最悪

- 磁場によって超伝導転移点が上昇

- Large B $\Leftrightarrow$ Higher T_c

- 磁場抵抗 (トラップされた磁束による抵抗)

- $R_{mag} = \frac{B_{ext}\pi\xi^2}{\phi} R_{normal} = \frac{B_{ext}}{2B_{c2}} R_{normal}$

- $R_{normal} \propto \omega^{\frac{1}{2}}$

- マイクロ波による抵抗

- $R_{BCS} = A \frac{\omega^2}{T} \exp\left(-\frac{\Delta(0)}{k_B T_c} \cdot \frac{T_c}{T}\right)$

- 特に $T < T_c/2$ の Nb では $R_{BCS} = 2 \times 10^{-4} \frac{1}{T \text{ (K)}} \left(\frac{f \text{ (GHz)}}{1.5 \text{ GHz}}\right)^2 \exp\left(-\frac{17.67 \text{ (K)}}{T \text{ (K)}}\right)$

- $Q \propto \omega^{-2}, Q \propto B^{-1}$

- 本研究で開拓し, $Q \sim 10^6$ への可能性に挑戦

Table 3.1 超伝導体の特性

	T_c (K)	$\Delta/k_B T_c$	H_c (Oe)
Pb	7.2	2.2	800
Nb	9.2	1.9	2000
Nb ₃ Sn	18	2.2	5400
MgB ₂	39		
銅酸化物系	160	~2	>10000

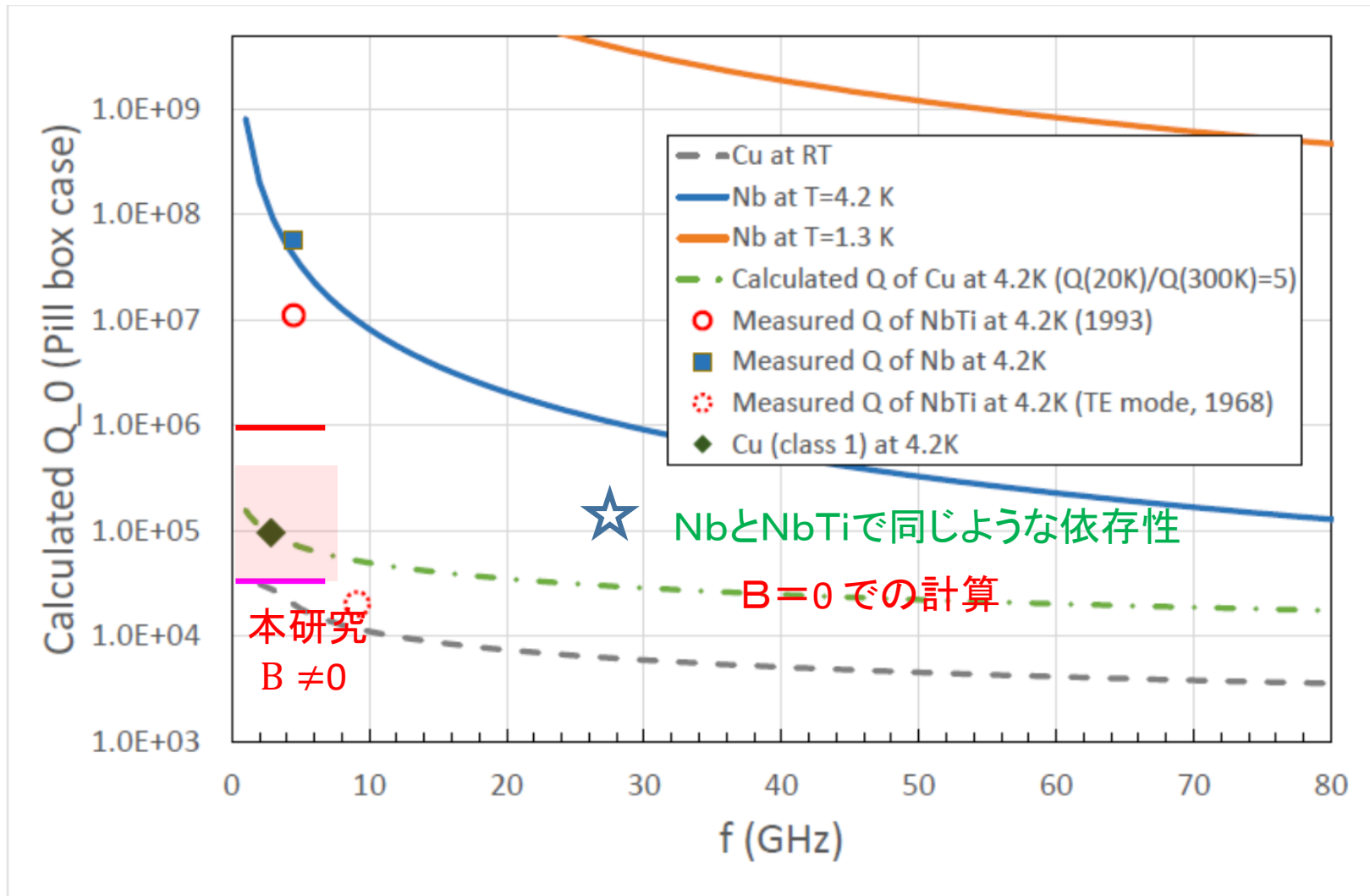
波及効果

- High Q 空洞作成では, クリーン度が重要
 - 不純物が Loss として働く
- この性質を逆に利用すれば,
 - High-Q空洞の Q と f で純度が測れる, かも
- 皆さんのアイデアをお願いします.

まとめ

- アクシオン探索
- 低温環境とアクシオン探索
 - 高磁場環境の準備
 - High-Q 空洞の開発・研究
 - クリーン環境整備
 - 超高純度銅製空洞の開発・研究
 - $Q \sim 5 \times 10^4$ ($\leftarrow O(10)$ の向上)
 - 超伝導空洞への挑戦
 - $Q \sim 10^6$ への挑戦 ($\leftarrow O(100)$ の向上)

Q値の周波数依存性(零磁場下の計算値)



$$R_{BCS} = A \frac{\omega^2}{T} \exp\left(-\frac{\Delta(0)}{k_B T_C} \cdot \frac{T_C}{T}\right) \quad Q_0 = \frac{\Gamma}{R_s}, \Gamma = 275 \, \Omega \text{ for Pill box cavity TM}_{010}$$

磁場による影響の先行研究 (NbTi)

Superconducting NBTI Microwave Cavity

D. SOUMPASIS AND K. LÜDERS

III. Physikalisches Institut der Freien Universität Berlin, 1 Berlin 33, Germany

(Received 17 December 1969)

Reprinted from JOURNAL OF APPLIED PHYSICS, Vol. 41, No. 6, 2475-2476, May 1970

Copyright 1970 by the American Institute of Physics

Printed in U. S. A.

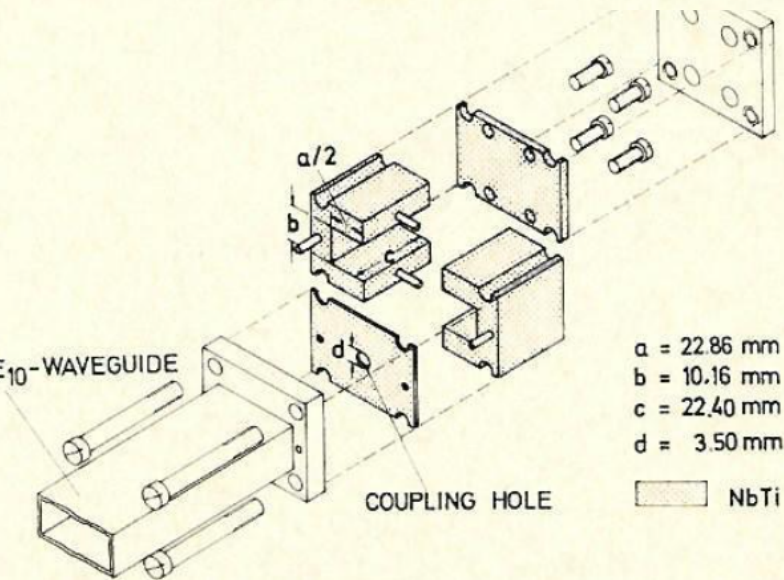


FIG. 1. Exploded view of the cavity assembly.

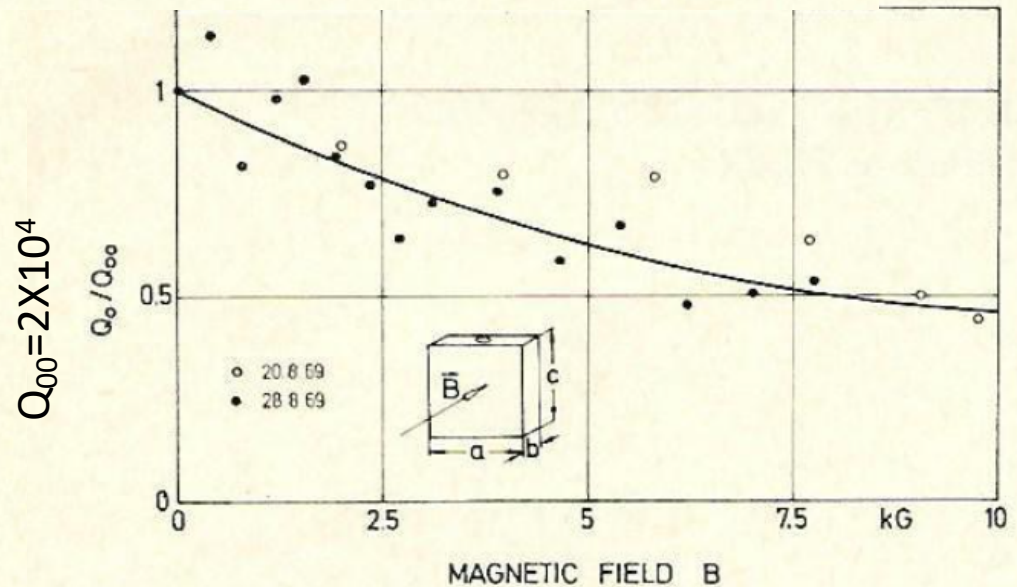


FIG. 2. Magnetic field dependence of the relative quality factor (Q_{00} : field-free value).

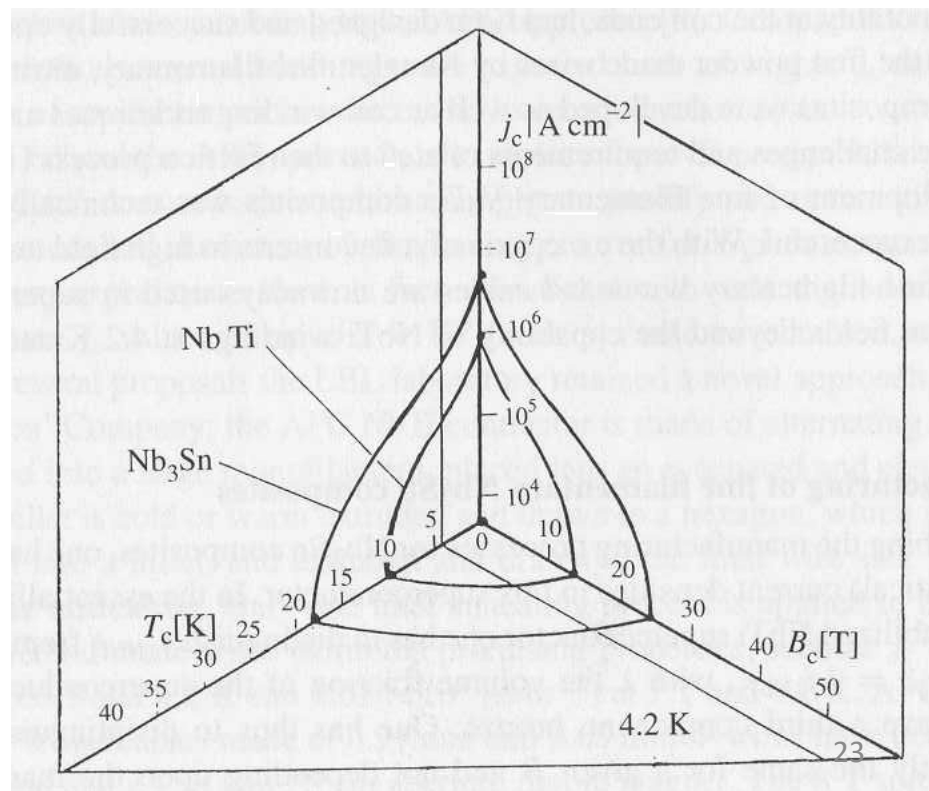
- NbTi CavityのTEモード 9.125GHzの場合, B=1Tで, 約半分
- その後も, 緩やかに減少. B~8 Tでは?

NbTi 空洞

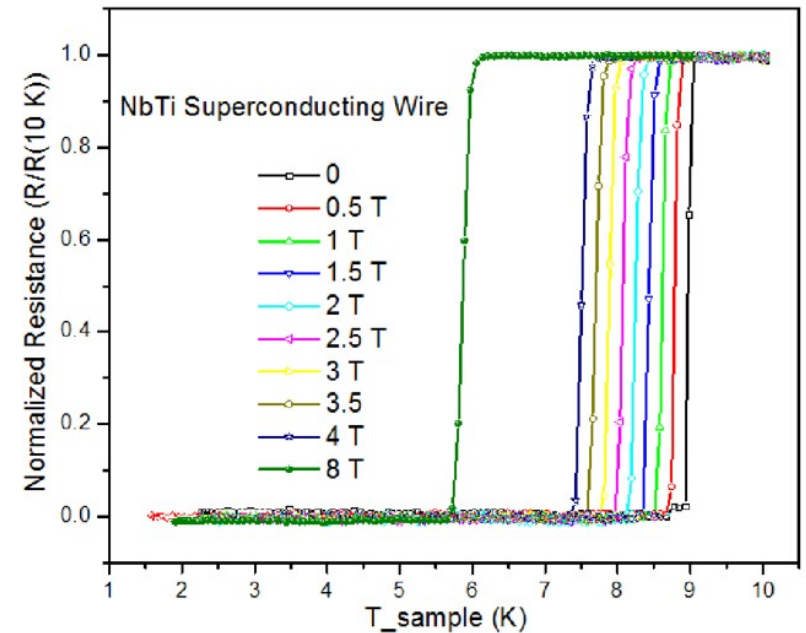
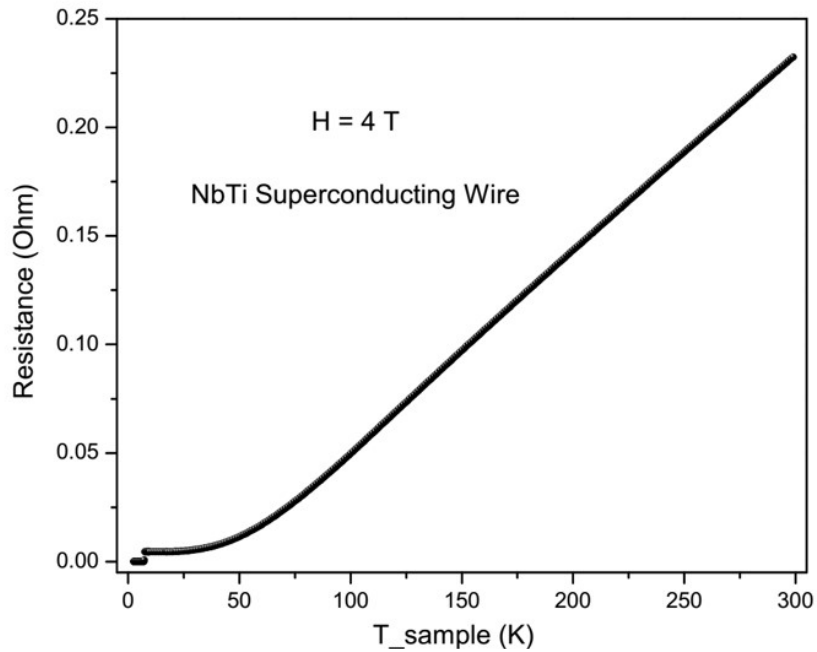
- NbTi の特徴
 - よく使われ, よく分かっている素材
 - $T_c \sim 9$ K
 - 強磁場下で超伝導
 - 合金で加工が容易

WIDES.

Composition (at. %)	T_c (K)	$B_{c2}(4.2 \text{ K})$ (T)	$B_{c2}(1.8 \text{ K})$ (T)
Nb-60.0 Ti	9.41	11.3	14.0
Nb-62.8 Ti	9.22	11.2	13.9
Nb-63.0 Ti	9.11	11.2	14.0
Nb-64.7 Ti-7.2 Ta	8.95	11.1	14.5
Nb-61.7 Ti-3.0 Hf	8.74	11.3	14.4
Nb-59.0 Ti-3.3 Hf	8.75	11.1	14.2



- 線材として、技術は確立している
 - Cu と NbTi の組み合わせで、Quench を防止するなど



- 考えている空洞

- Pill box cavity

- $Q_0 = \frac{\omega \mu \frac{L}{R}}{\left(1 + \frac{L}{R}\right) R_{\text{surf}}}$

- 円筒上面は高純度銅 and/or NbTi

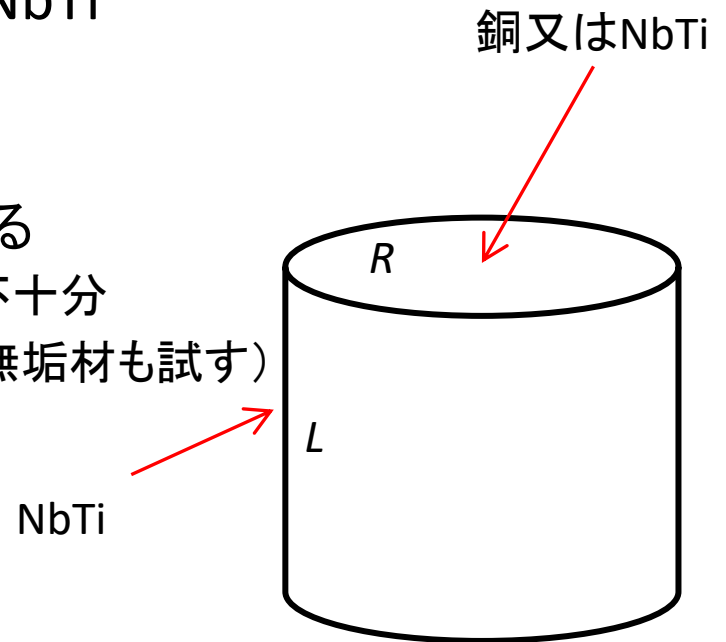
- 円筒側面はNbTi

- NbTi 線材を円筒軸方向に張る

- NbTi 薄膜 + Cuの裏材で作成する

- 無垢材では, Quench 対策が不十分

- (先行研究との比較の意味で無垢材も試す)



- 考えている空洞

- 円筒上面は高純度銅 and/or NbTi

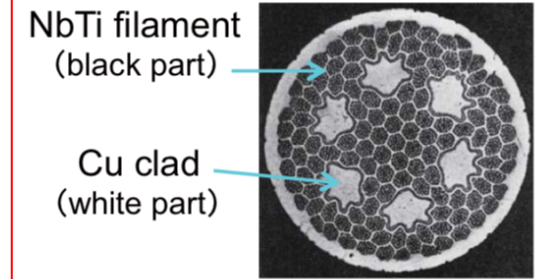
- 円筒側面はNbTi

- NbTi 線材

- NbTi 薄膜 + Cuの裏材

- NbTi の厚み $< \xi, \lambda_L$ なら,

磁場とRFの影響を最小に出来る(かも)



cross section of $\text{Nb}_{0.48}\text{Ti}_{0.52}$ wire
(multi filament)

Material	T_c (K)	$\lambda(0)$, nm	$\xi(0)$, nm	H_{c2} (T)
Nb-Ti	9.5	240	4	13
Nb-N	16	200	5	15
Nb_3Sn	18	65	3	30
MgB_2 (dirty)	32-39	140	6	35
$\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$	92	150	1.5	>100
Bi-2223	108	200	1.5	>100

MgB₂空胴

- MgB₂ の特徴
 - T_c が高い！ $T_c=39\text{ K}$
 - 非金属
 - 加工に難
 - メッキの特許がある
- コイルの先行研究有り

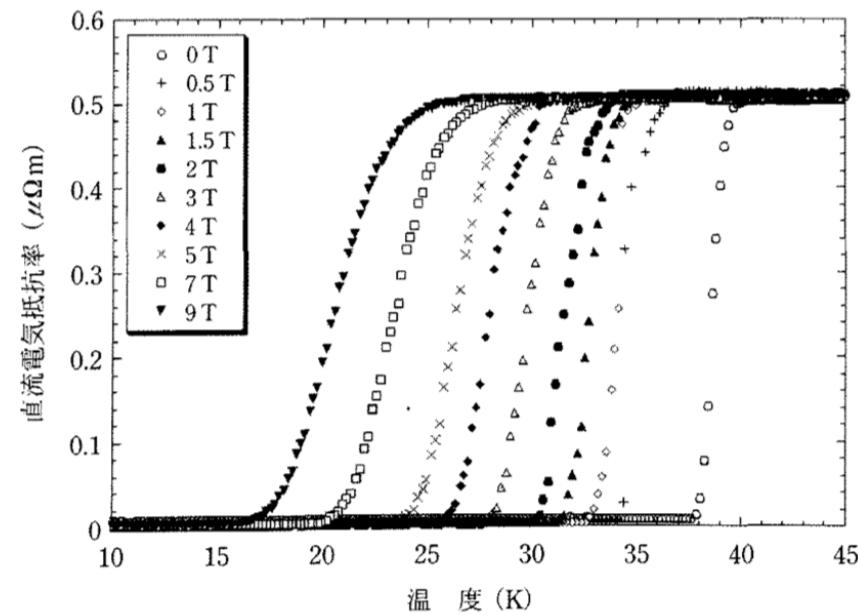
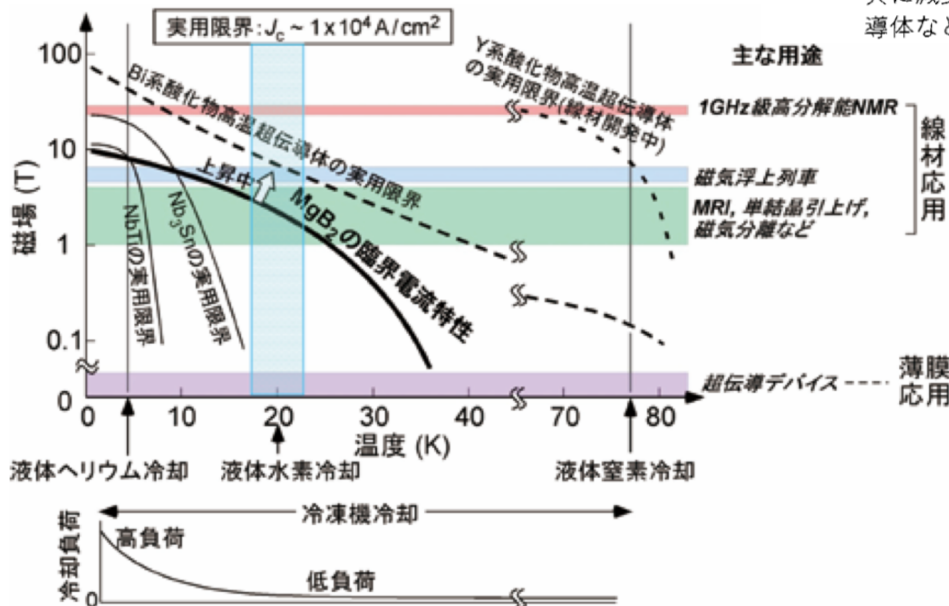


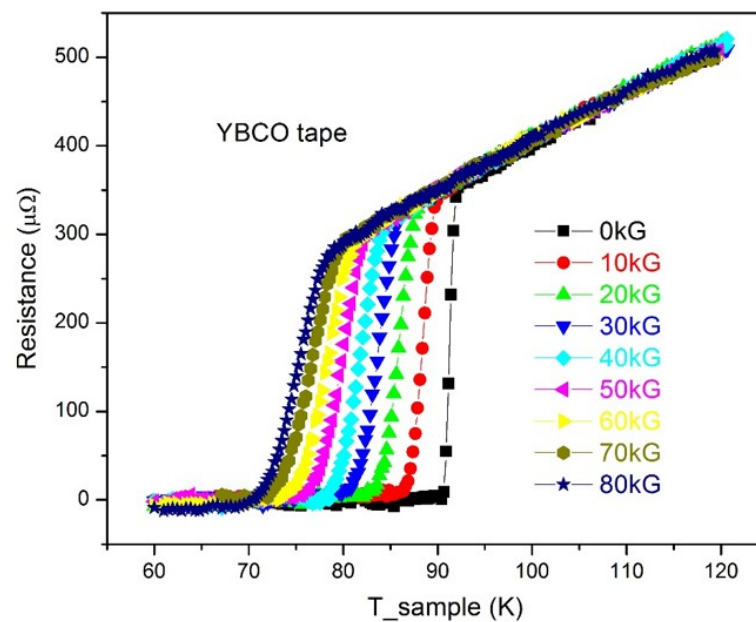
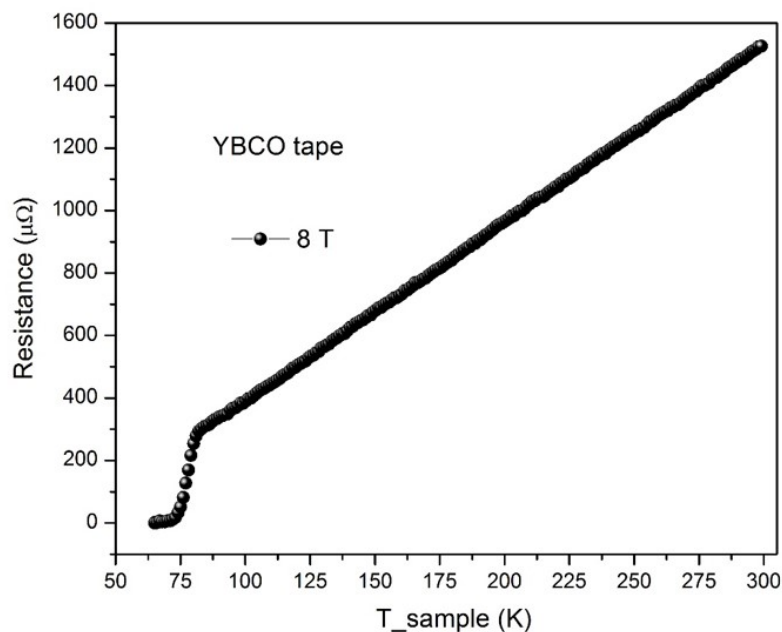
図7 ニホウ化マグネシウムの磁場下での電気抵抗率の温度依存性. 印加磁場の増大に伴って, 超伝導転移開始温度とゼロ抵抗を示す温度が共に減少する振る舞いとなり, 従来の金属系超伝導体 (A 15 型超伝導体など) で観測される振る舞いと非常に酷似している.



第21図: MgB₂ の材料応用が期待されている領域 (東京大学下山淳一准教授のご厚意による)

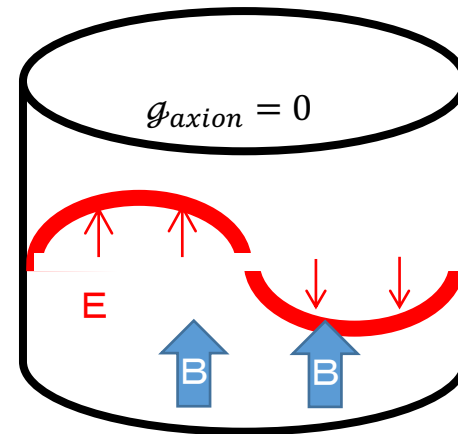
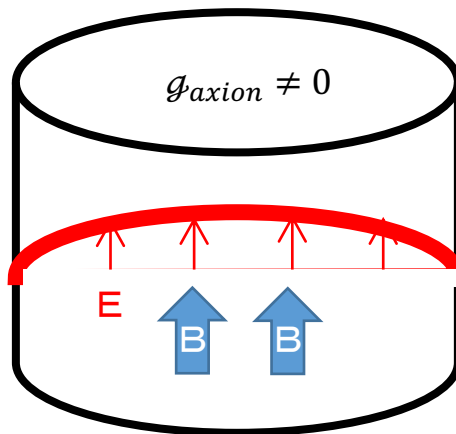
YBCO ?

- 高温超伝導体 $T_c > 90$ K
- 2次元素材なので, テープとして入手可能
- つかえるのでしょうか？



- 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