

暗黒物質アキシオン探索実験用共振空洞パラメータ測定システムの開発

福井大工, 東北大RCNS^A, 東北大RARiS^B, 北九州高専^C

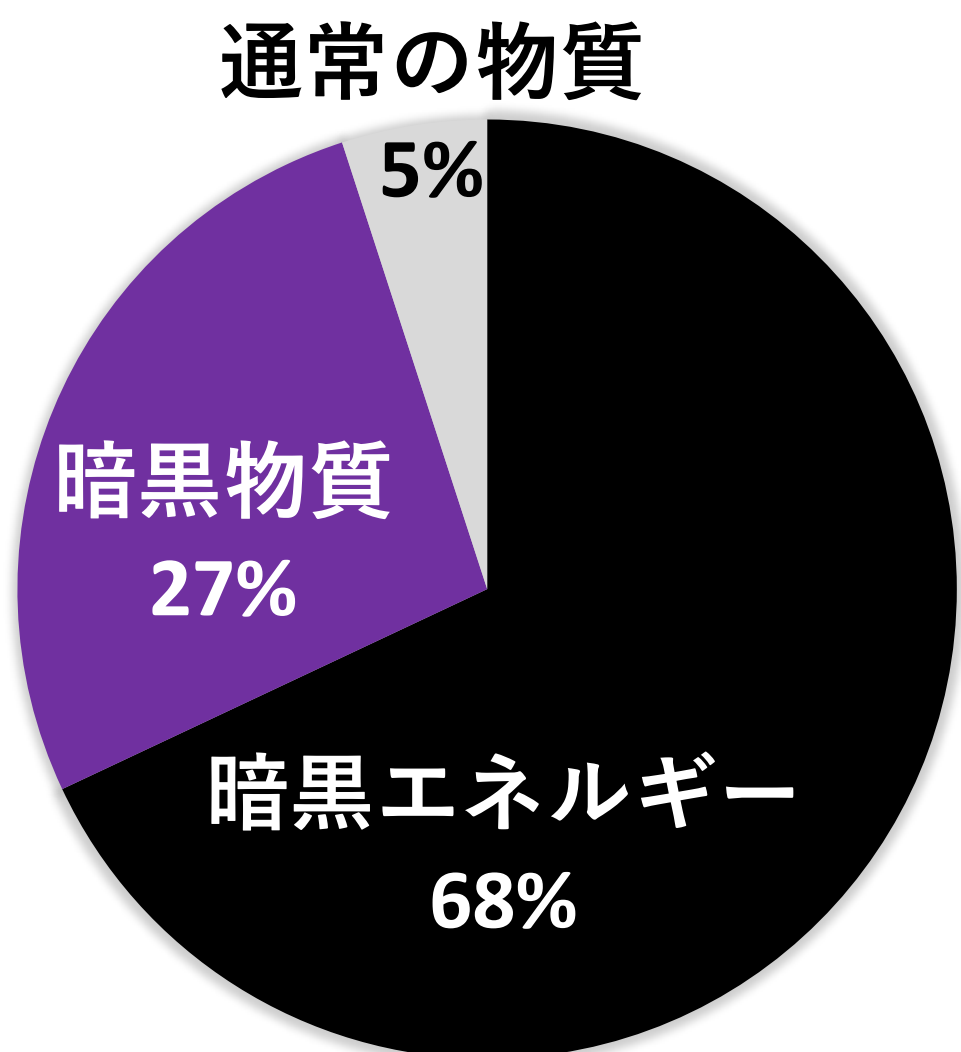
中川闘暉, 服部圭汰, 小川泉, 岸本康宏^A, Azzi Marthe Louise Adele^A, 時安敦史^B, 伊藤慎太郎^C, 他, アキシオン探索ワーキンググループ

Dept. of Engineering, Univ. of Fukui, ^ARCNS, Tohoku Univ., ^BRARiS, Tohoku Univ., ^CNational Institute of Technology, Kitakyushu College

T. Nakagawa, K. Hattori, I. Ogawa, Y. Kishimoto^A, Azzi Marthe Louise Adele^A, A. Tokiyasu^B, S. Ito^C, for the axion search working group

1. 暗黒物質アキシオン

■ 宇宙の組成

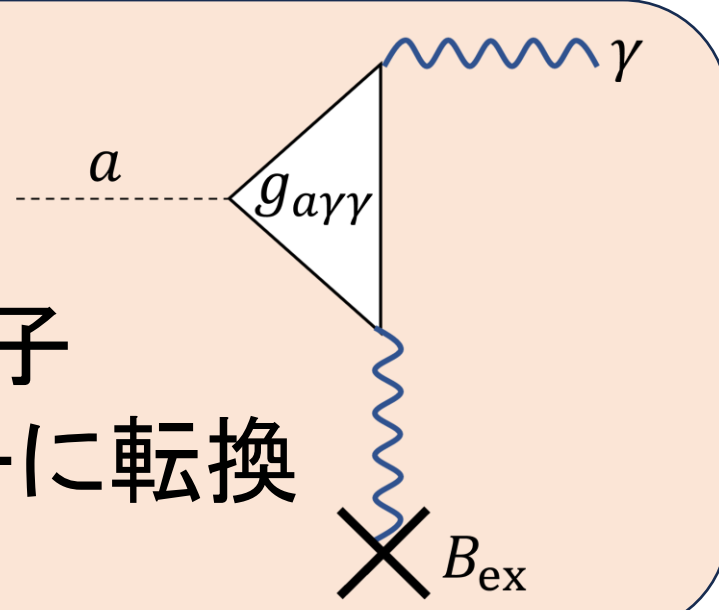


暗黒物質とは

- 宇宙のエネルギーの約27%
- 未知の重力源
- 標準模型粒子との相互作用が非常に弱い

アキシオンとは

- 暗黒物質の有力候補の1つ
- 強いCP問題を解決する素粒子
- 磁場との相互作用により光子に転換
→ **転換光子を検出**



2. アキシオンの検出原理

■ 共振空洞 (アキシオンハロスコープ)

共振空洞内部でのアキシオン転換光子の信号を測定する

アキシオンハロスコープ実験

- メリット: 高感度測定が可能
- デメリット: 一度に探索できる領域が狭い
→ **共振周波数を掃引して探索する必要がある**
共振空洞内の導体球の位置により調整する

共振空洞内部でのアキシオン由来のパワー

$$P_{axion} \propto V B_0^2 g_{a\gamma\gamma}^2 \rho_a f_a C Q$$

設計時に決まるパラメータ

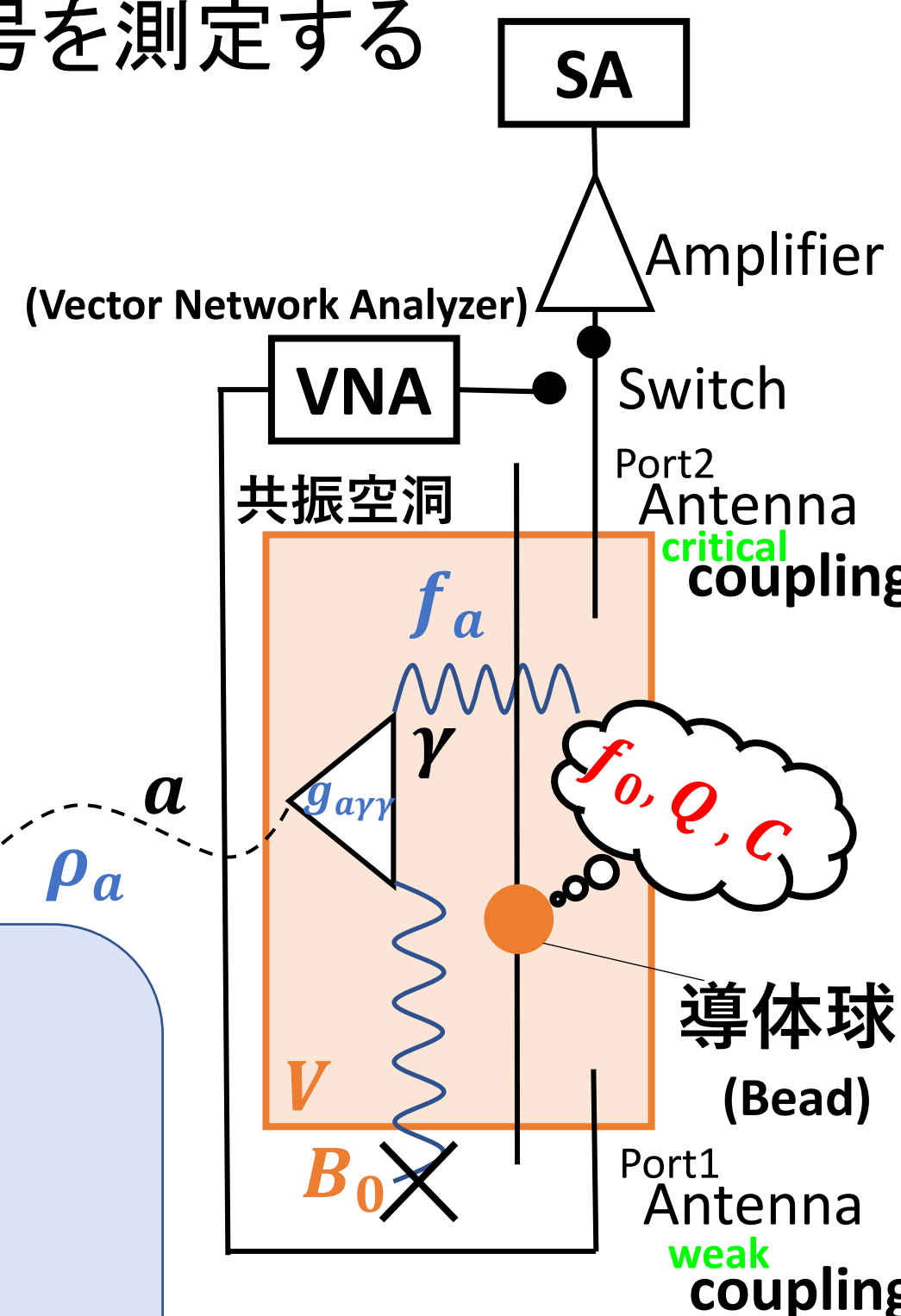
- V : 共振空洞の体積, B_0 : 外部磁場
- 未知の自然パラメータ

$g_{a\gamma\gamma}$: 結合定数, ρ_a : アキシオン密度

f_a : 転換光子の周波数

調整毎に変化するパラメータ

f_0 : 共振周波数, Q : 共振空洞のQ値, C : 形状因子



共振周波数変調
共振空洞内の導体球の位置が変化
→ 共振空洞の有効体積が変化
→ **共振周波数変化**

アンテナとの結合(coupling)

- Port1: 調整に用いる, 信号を逃がさないために弱結合(Weak)に調整
- Port2: 本測定にも用いる, 臨界結合(Critical)に調整

$f_0 = f_a$ のときアキシオン由来のパワーが最大化
共振周波数 f_0 を調整することで探索領域を拡大 → **共振周波数調整毎に各パラメータを測定, 必要に応じてアンテナを調整**

3. 本研究の目的

■ 目的

暗黒物質アキシオン探索実験用共振空洞パラメータ測定システムの開発

検出感度を到達するための共振空洞
パラメータ (f_0, Q, κ) の算出手法の確立

測定したSパラメータからソフトウェア処理により算出

- 共振周波数 f_0
- Q値
- アンテナとのcoupling

Lorentz Fitting
Circle Fitting

4. データ

■ Sパラメータ

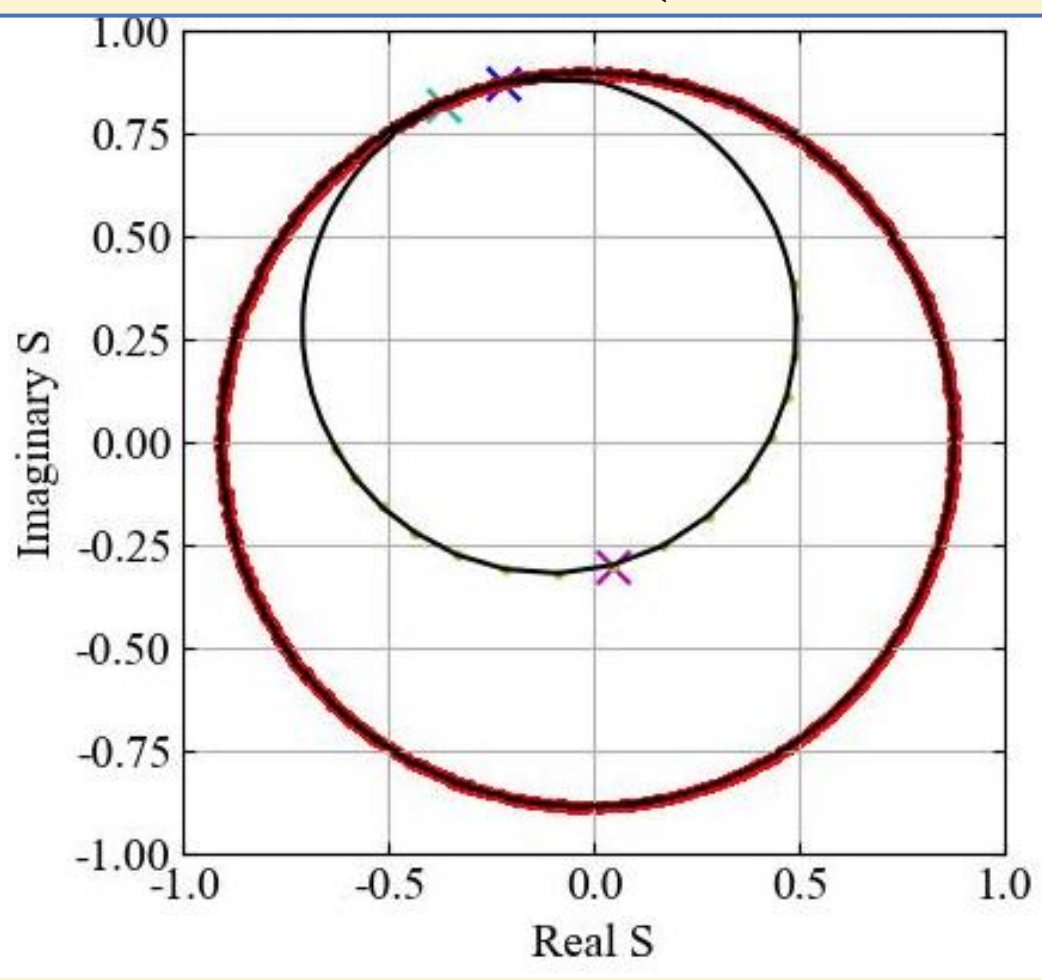
Vector Network Analyzer により測定したSパラメータ (主に S_{22}) を用いる
解析のために共振領域(On Resonance), 非共振領域(Off Resonance)を次のように設定した

- 共振領域: $f_0 - \text{HWHM} \leq \text{OnRes.} \leq f_0 + \text{HWHM}$
- 非共振領域: $\text{OffRes.} \leq f_0 - 11\text{HWHM}, f_0 + 11\text{HWHM} \leq \text{OffRes.}$

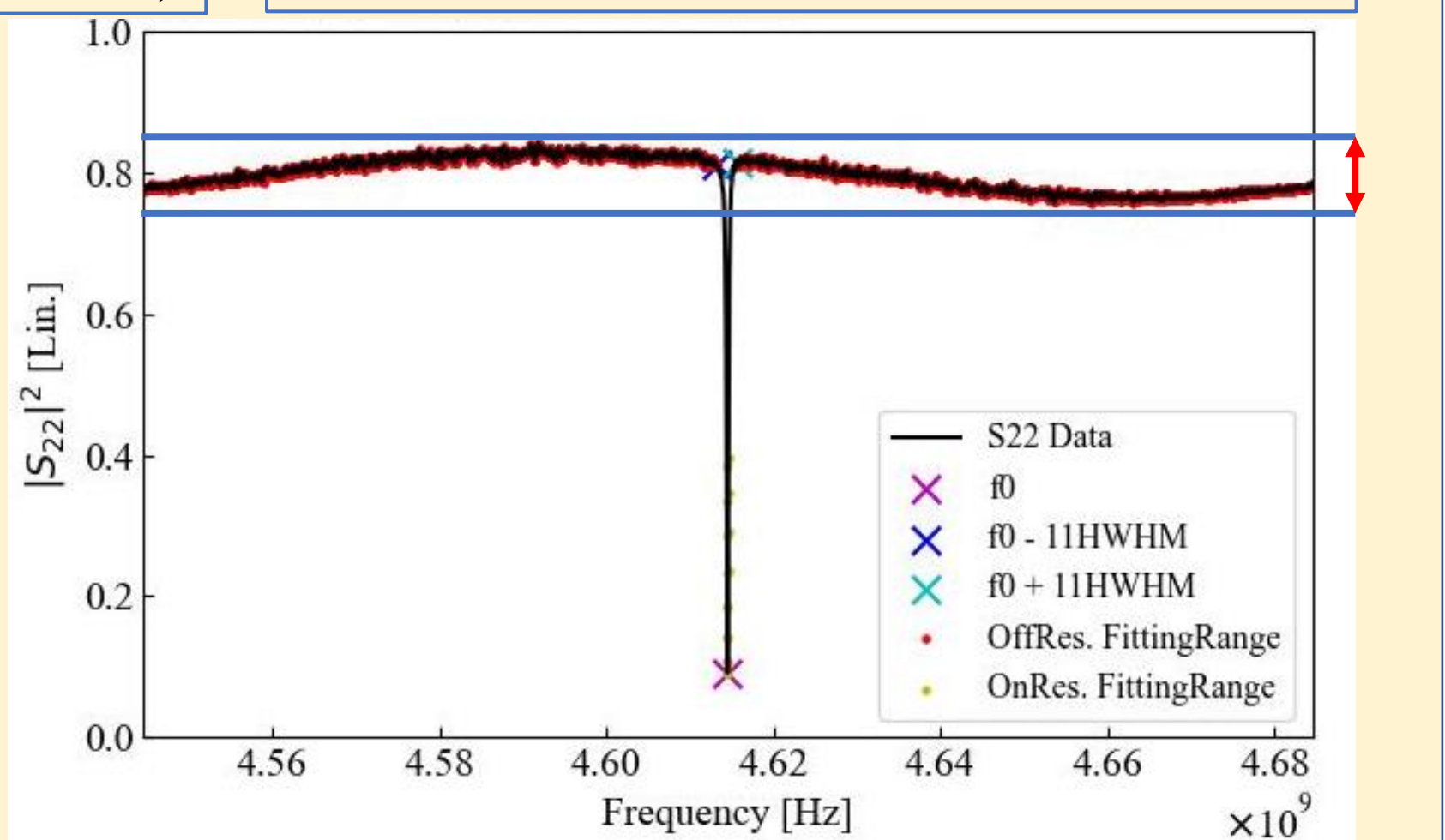
以下のような測定を行った

- 共振周波数固定広帯域測定 (パラメータ算出手法確立のため)
- 共振周波数変調狭帯域測定 (導体球の位置の寄与調査のため)

非共振領域のベースラインに歪みがある
→ **データの補正が必要**



S_{22} の測定例(SMITH Chart)



S_{22} の測定例(周波数と $|S_{22}|^2$ の関係)

5. データ解析手法

■ Circle fitting によるcoupling κ の算出

S_{22} のSMITH Chartデータを各領域で円フィッティングする

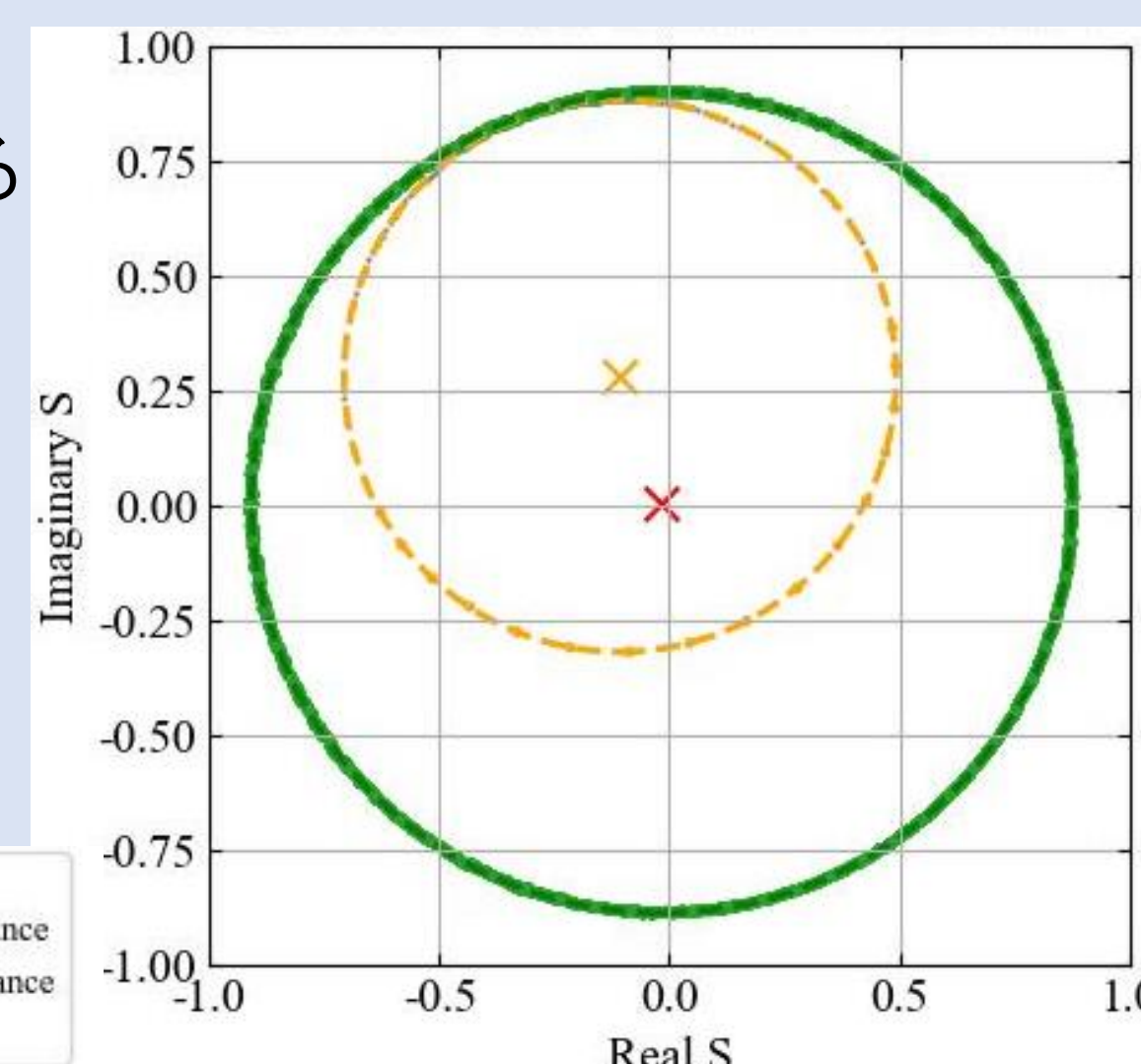
Fitting parameters

- On Resonance
 - 中心座標 (x_{on}, y_{on})
 - 直径 d
- Off Resonance
 - 中心座標 (x_{off}, y_{off})
 - 直径 D

アンテナとのcoupling (κ) の算出[1]

$$\kappa = \frac{1}{\frac{D}{d} - 1}$$

Center On res.
Fitting: On resonance
Center Off res.
Fitting: Off resonance

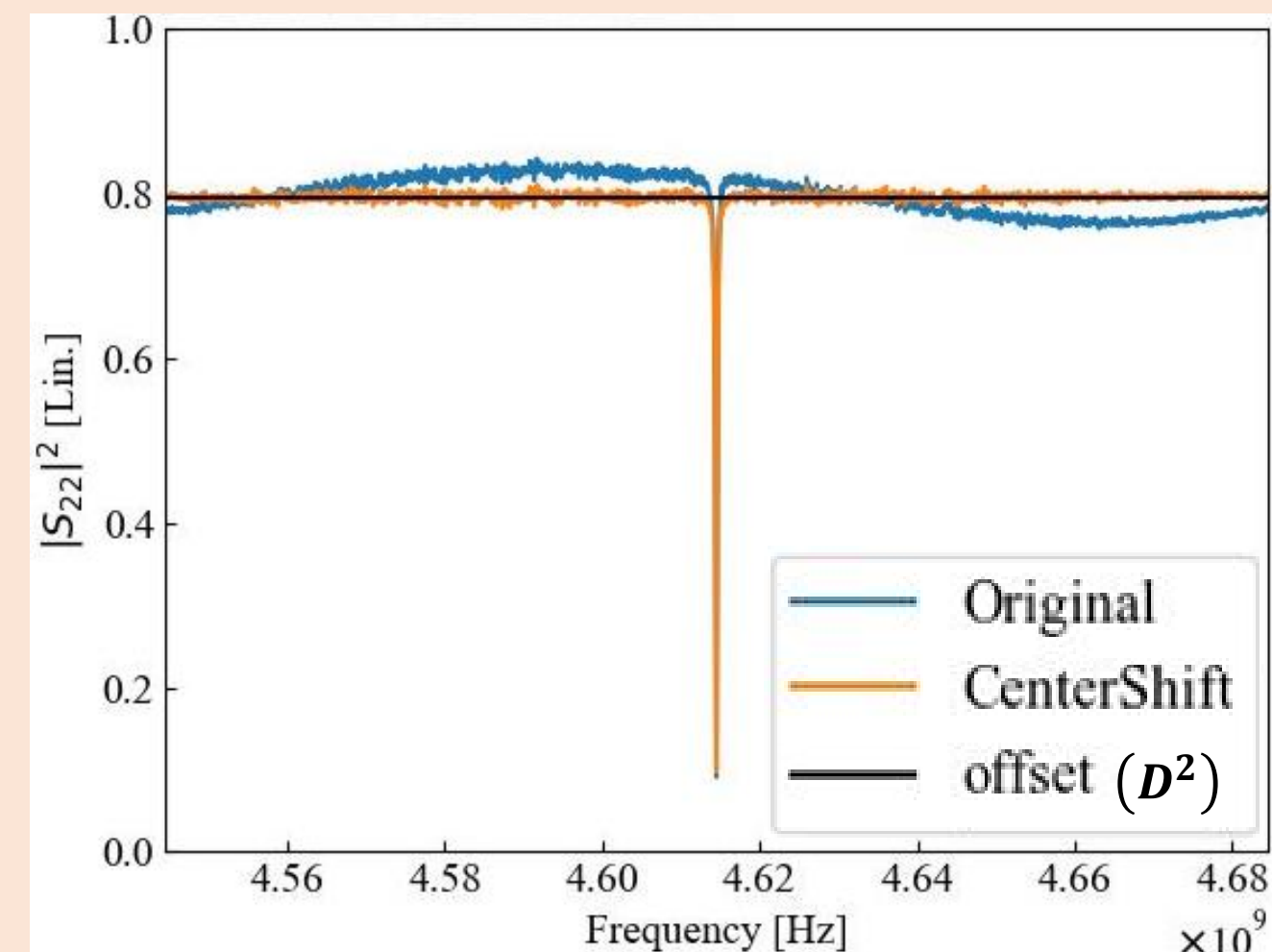
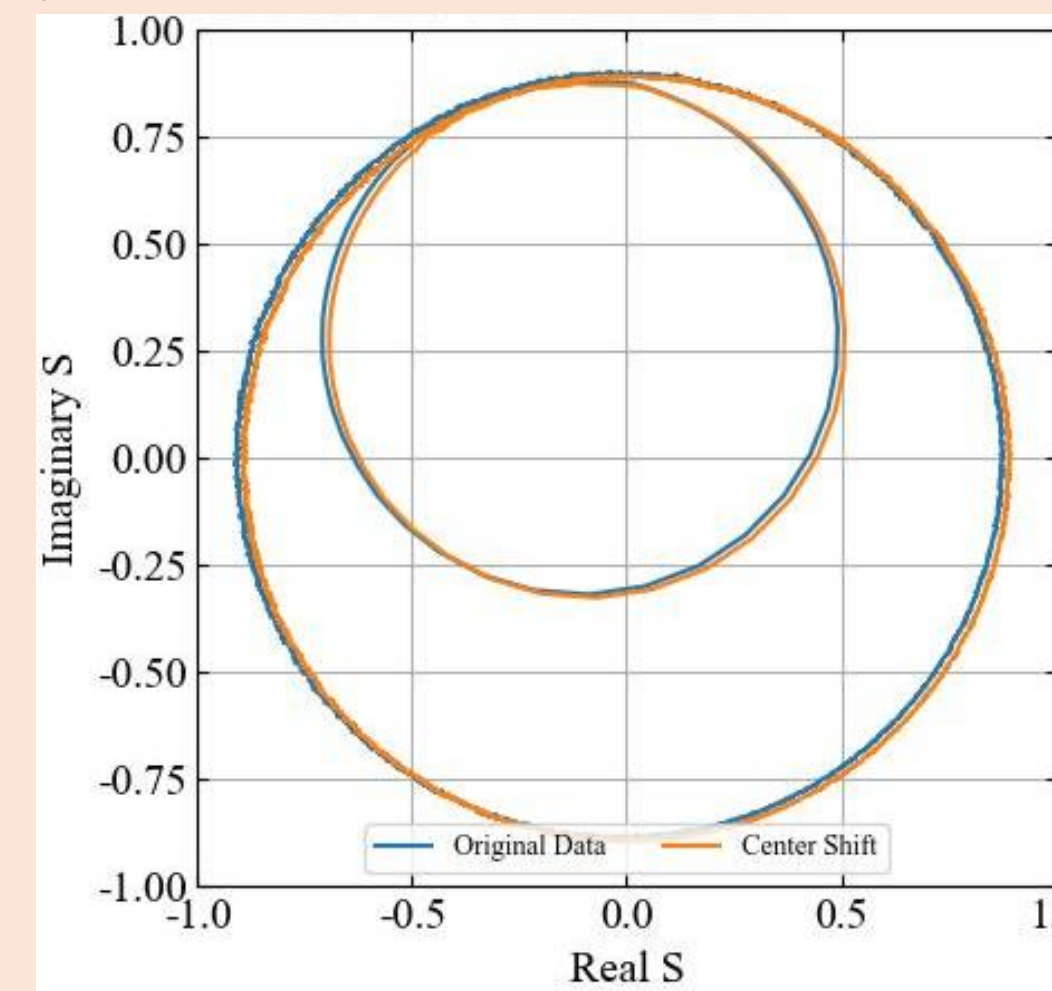


■ Center Shift によるベースラインの歪みの補正

非共振領域のベースラインが外部回路の影響で歪んでいる

これはスミスチャートにおいてOff Res.の中心座標 (x_{off}, y_{off}) が原点からずれていることに対応すると考えられる

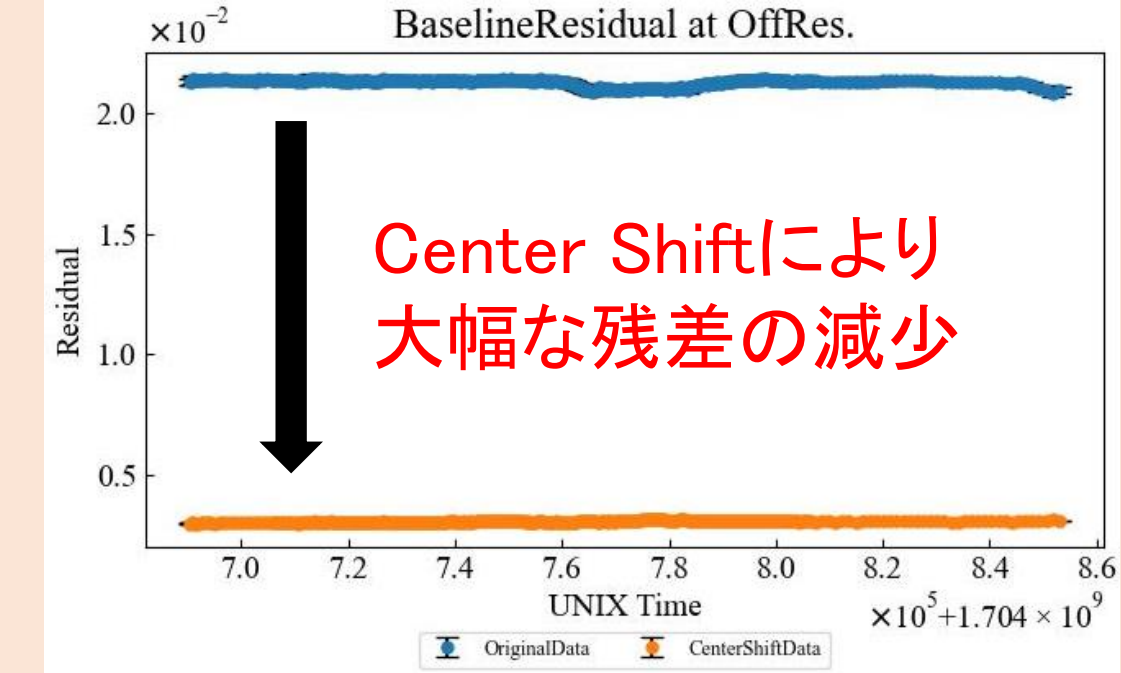
→ (x_{off}, y_{off}) = (0, 0) となるようにデータ全体を平行移動させることを試みた(Center Shift)



非共振領域におけるoffset(D^2)と $|S_{22}|^2$ 間の残差の平均±標準誤差を補正前後のデータについて計算した

- Original Data (補正前データ)
- Center Shift Data (補正後データ)

2日弱の期間で取得した合計323データ全てに渡って
Center Shift Data の方が残差が小さい結果となった
→ Center Shift により非共振領域のベースラインの歪みを補正できることが分かった



■ Lorentz fitting による共振周波数 f_0 , Q値の算出

Center Shift Dataに対してローレンツ関数でフィッティング

Fitting function

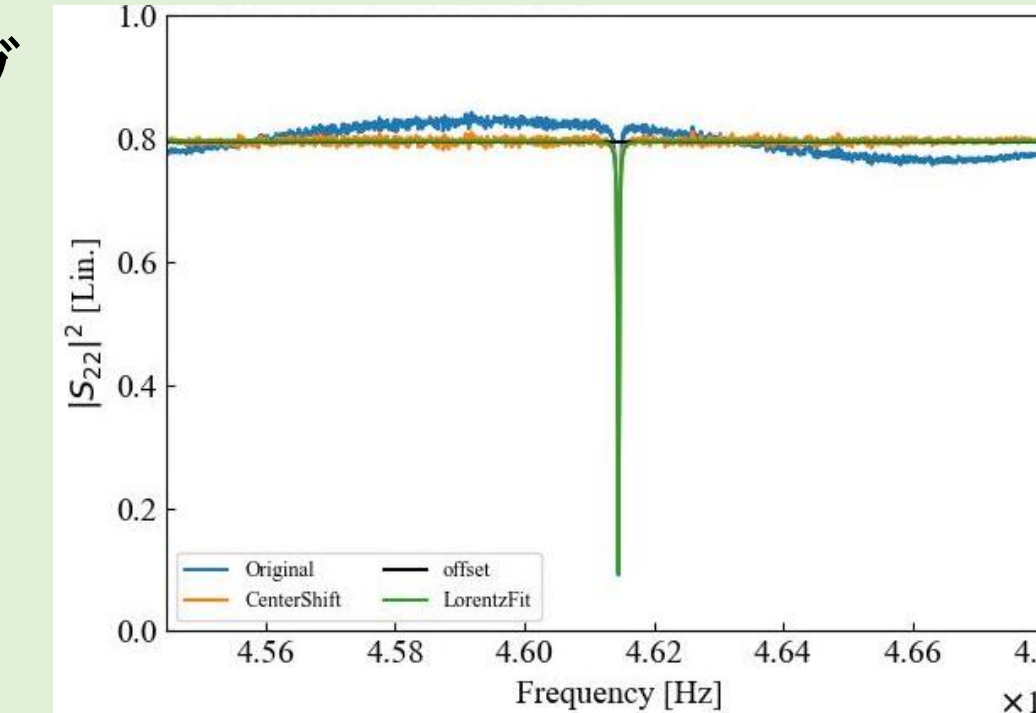
$$\text{Lorentz} = D^2 - A \frac{\Gamma}{\{(f - f_0)^2 + \Gamma^2\}}$$

Fitting parameters

A, Γ, f_0

Q値の算出

$$Q = \frac{f_0}{2\Gamma}$$



ベースライン補正を含めた共振空洞パラメータの算出手法を確立した

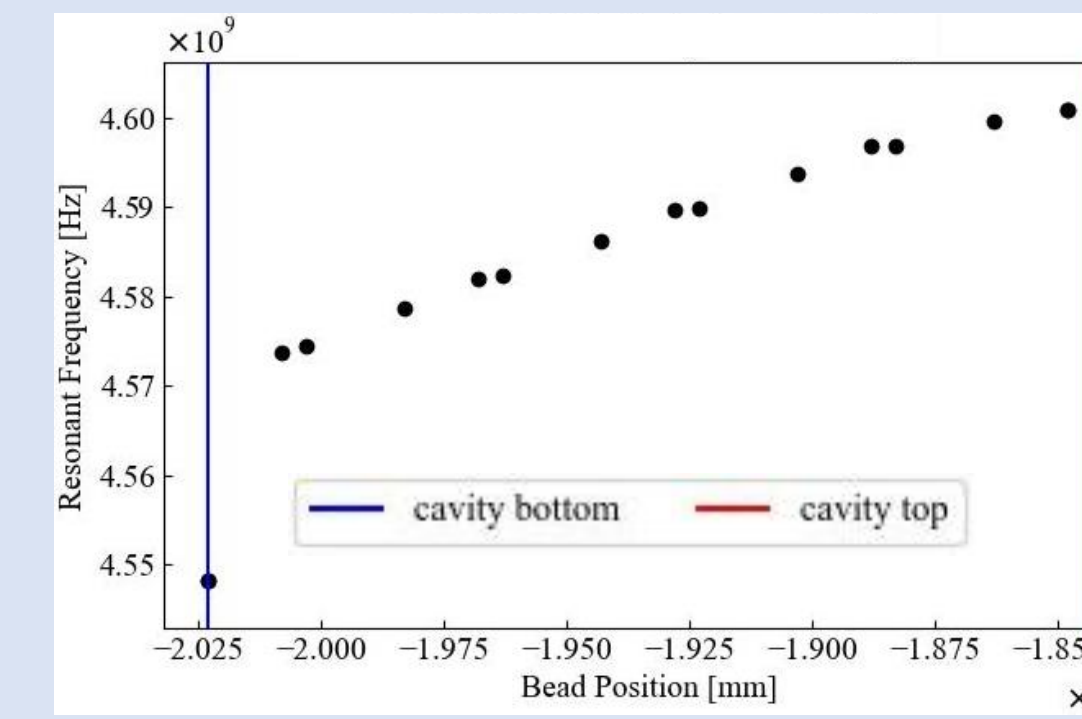
6. 共振周波数変調測定結果

導体球の位置を変化させることによる共振周波数変調測定データについて確立した手法で解析した

■ 導体球(Bead)の位置と共振周波数の関係

導体球の位置を変えることで共振周波数を50MHz程度調整できることが確認できた

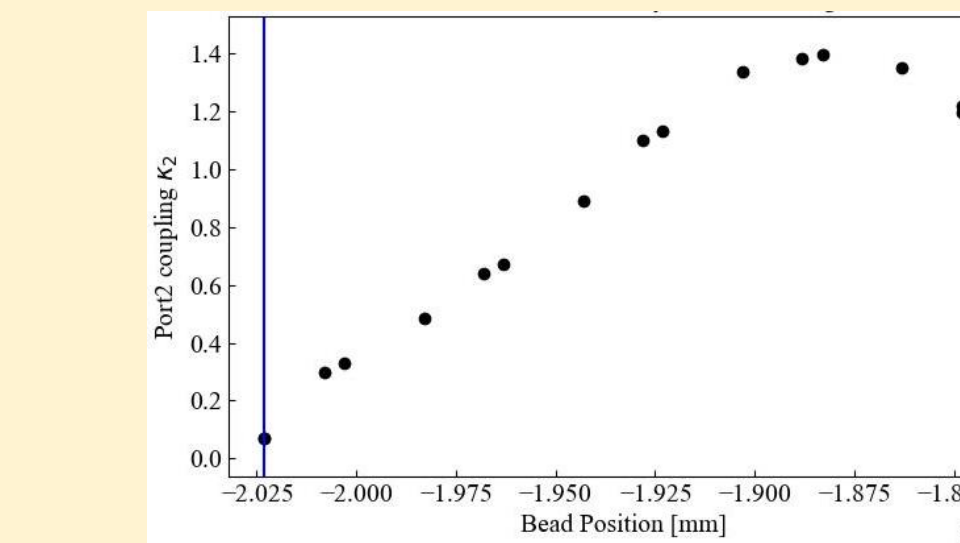
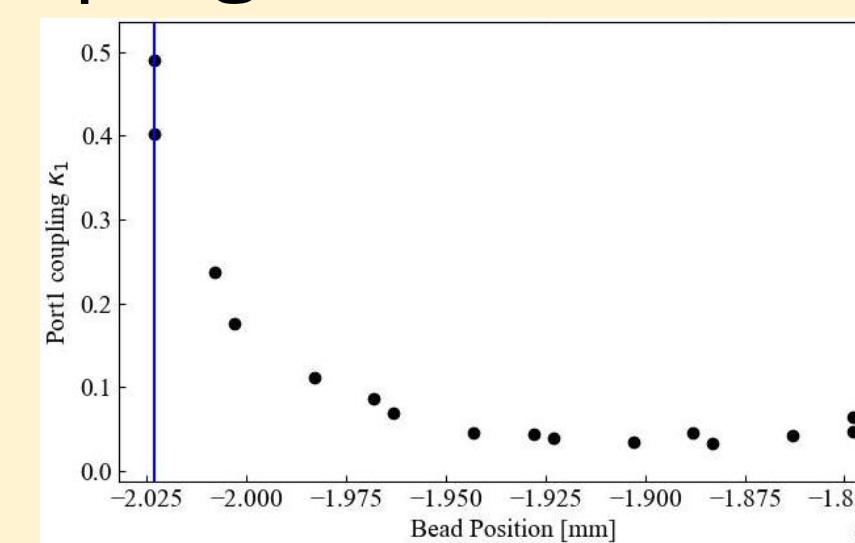
- Port1: cavity bottom 付近
- Port2: cavity top 付近



■ 導体球(Bead)の位置とcouplingの関係

導体球の位置の変化によるcouplingの変化状況を調べた

couplingの変化幅が大きい
→ **適宜アンテナ調整が必要**



導体球の位置とPort1(Weak)のcouplingの関係

導体球の位置とPort2(Critical)のcouplingの関係

今後、アンテナを調整し、リアルタイムで調整状況を確認できるようにする予定

7. まとめ

- 共振空洞パラメータの算出手法を確立した
- 開発した共振空洞パラメータ測定システムにより、アキシオン探索に用いるパラメータをVNAにより測定したSパラメータから算出できることを確認した
- 今後リアルタイムで調整状況を確認できるように導入する予定

[1] Darko Kajfez, "Q factor measurements, analog and digital", (1999)