

ポジトロニウム 超微細構造の精密測定 I (全体とRF-Cavity)

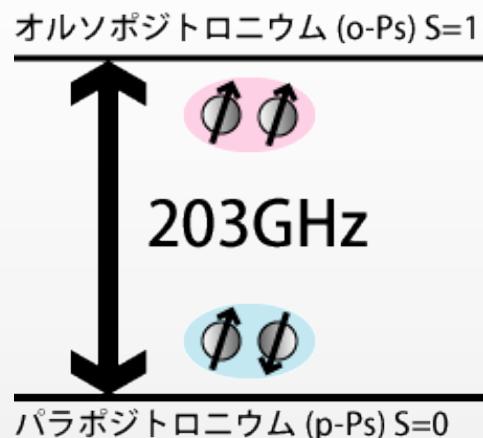
21aSM-7

秋元銀河, 石田明, Mark M. Hashimoto, 田川智博, 末原大幹^A, 難波俊雄^A, 浅井祥仁,
小林富雄^A, 斎藤晴雄^B, 吉田光宏^C, 小川勇^D, 小林真一郎^D, 出原敏孝^D

東大理, 東大素セ^A, 東大院総合文化^B, 高工研^C, 福井大遠赤セ^D

ポジトロニウム(Ps)の超微細構造(HFS)とnew Physics

PsのHFSについて



$$E(o\text{-Ps}) - E(p\text{-Ps}) = 0.84 \text{ meV} = 203 \text{ GHz}$$

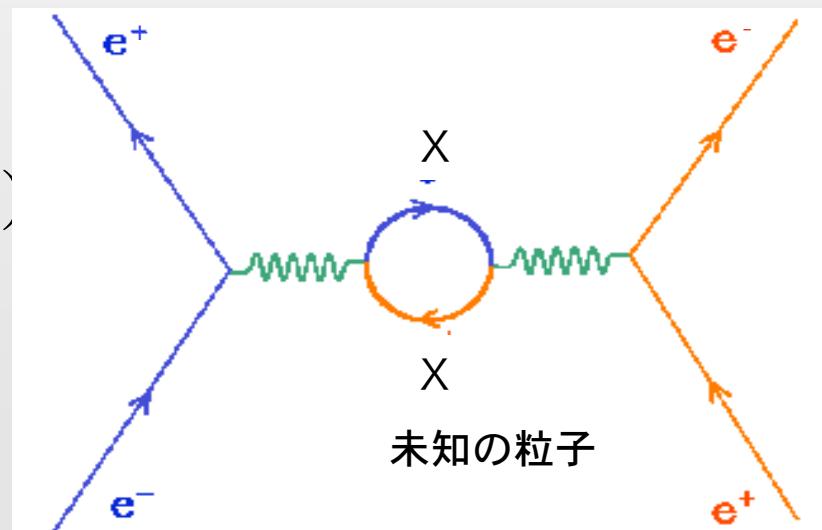
ミリ波域

1. スピンスピン相互作用に由来
2. 基底状態のHFS
3. 203GHz @ Ps \gg 1.4GHz @ H

何故、 PsのHFSが面白いのか

1. 束縛系QEDの精密検証に使える
(→レプトンのみのクリーンな系)
2. 未知の物理状態にsensitive
(→o-Psが $S=1$ で光子と量子振動)

例えばs-channelで光子を介して未知の物理Xが存在するとo-Psの準位が変化する。



HFSの理論計算と測定結果はズれている

実験値と理論計算の動向

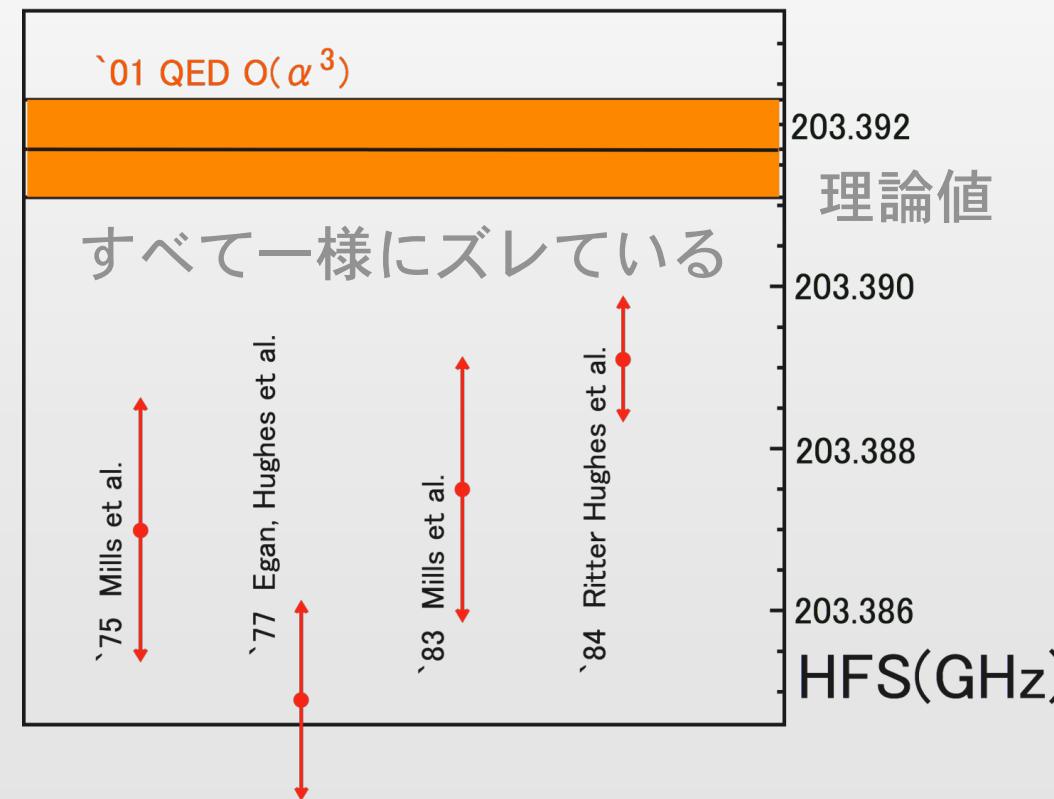
1. 実験：70-80年代を中心に測定されている。(最終的に3.6ppmの精度)
2. 理論：昔は理論の精度が実験精度よりもはるかに悪かった
3. ズレ：近年、高次項($O(\alpha^3)$)の計算が確立し、理論と実験値の間に系統的なズレがあることが確認された。

実験値: 203 389.10(74) MHz
(3.6ppm accuracy)

理論値: 203 391.7(6) MHz
(3.0ppm accuracy)

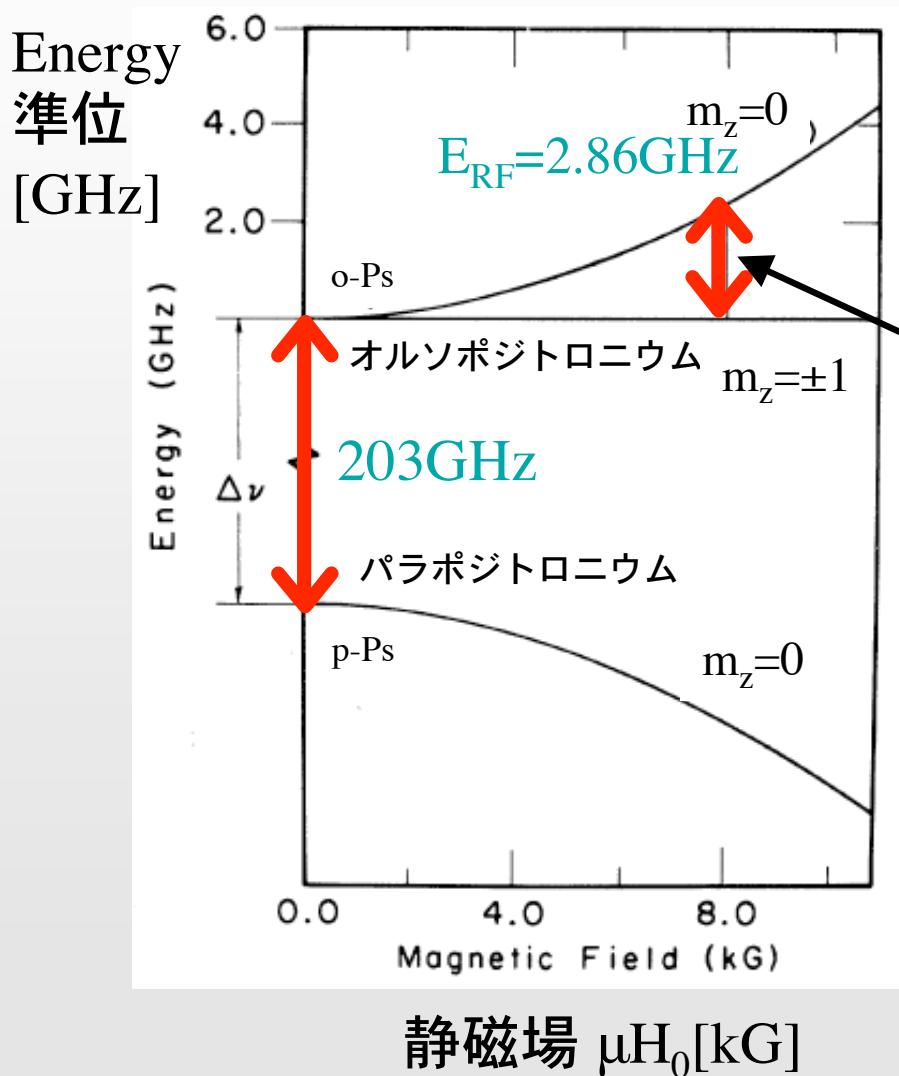
約3.5ο程度のずれ

もしズレが本当なら
新しい物理を示唆、新しい実験でより精密な測定を行う。



昔のHFS測定実験では何をしているか

磁場の強さとエネルギー順位



HFSの共鳴遷移($\Delta\nu=203\text{GHz}$)を直接測定することはミリ波域であるため難しい。そのため **Zeeman効果**を利用して**間接的に測定**している。 静磁場 H_0 の摂動により、o-Psの $m_z=0$ とp-Ps($m_z=0$)がミキシングして、準位がシフトする。

$$E_{RF} = \frac{1}{2} h \Delta\nu \left[\sqrt{1 + x^2} - 1 \right] \doteq 3\text{GHz} @ 9\text{kG}$$

$$x = 2g\mu_0 H_0 / h \Delta\nu \quad E_{RF} \text{はHFSと比例関係}$$

E_{RF} に対応するRFでo-Psを($m_z=\pm 1$)から($m_z=0$)へ励起させると、p-Psとのミキシングにより 2γ -decayのレートが増加する。

RF(3GHz)に対して、磁場を変化させると $H_0=9\text{kG}$ をピークに崩壊レートのresonanceが生じる。共鳴ピークの磁場を周波数に焼き直すことでHFS($\Delta\nu$)求める。

過去の実験は何が問題点となりうるか

過去の実験は一様にズれている。
考えられる要因としては次のものが考えられる。

1. 物質の効果を正しく評価していない

「物質の効果はガス圧に比例する」という仮定の元、圧力を変えた数点の測定から真空へ外挿している。しかし、後で述べる熱化問題により圧力だけで直線を引くことは適当でない。この系統誤差はPsの寿命問題を生んでいた。

2. 磁場の非一様性が測定値に影響を与える

RF周波数($\propto E_{RF}$)は高い精度でモニター可能。

H_0 の精度が最大の系統誤差を生む

$$HFS = \Delta\nu(H_0, E_{RF}) \leftarrow E_{RF} = \frac{1}{2} h\Delta\nu \left[\sqrt{1+x^2} - 1 \right]$$

$$x = 2g\mu_0 H_0 / h\Delta\nu$$

我々の計画している新しい実験計画

A 1. 物質の効果を正しく評価する

Ps生成からの時間情報(過去の実験では測られていない)を用いて、物質の効果を評価。同時にprompt γ を落とすことでS/Nを改善出来る。

A 2. 磁場をコントロールする

KEK低温センターの大型超伝導磁石を用いて、1ppmで磁場を制御する。

A 3. γ 線検出器を改良

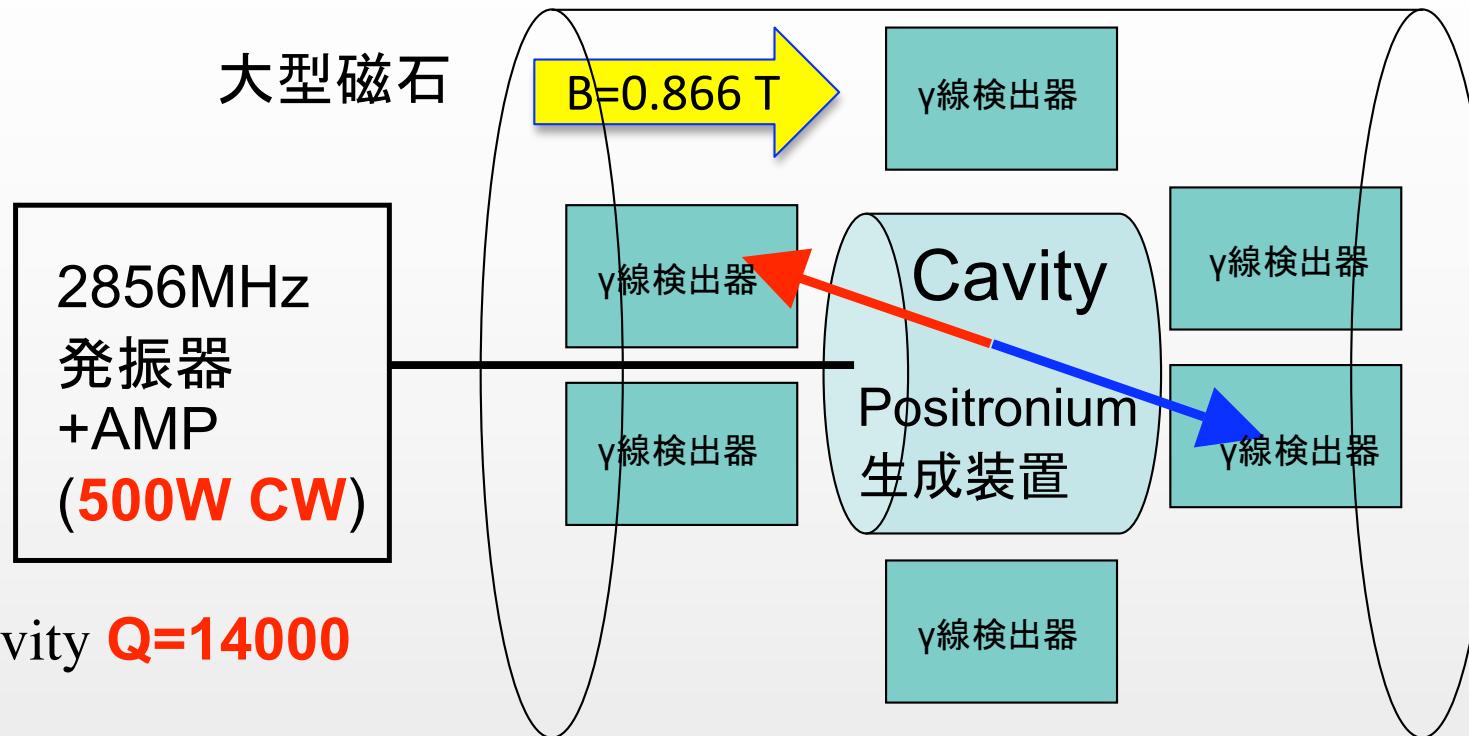
LaBr₃を用いて、2 γ をtagする新しい手法を開発。高統計

以上3点について、まず秋元、Hashimoto、石田が話します。

B. ミリ波による磁場を用いない直接測定

203GHzの大強度ミリ波をもちいて遷移 末原が話します。

実験の概要 // 全体のSETUP



1. 中心部にRF Cavityが存在する。中には N_2 gasと ^{22}Na 線源が入れられておりPsが生成されている。**500Wの大強度RF**を外から導入することで遷移を行う。
2. 周囲をGe検出器と $LaBr_3$ シンチレーターで囲み、**back-to-back**の γ を検出する。
3. 各検出器とCavityは大型電磁石の中に納められており、**一様な静磁場**(0.866T)が掛かっている。

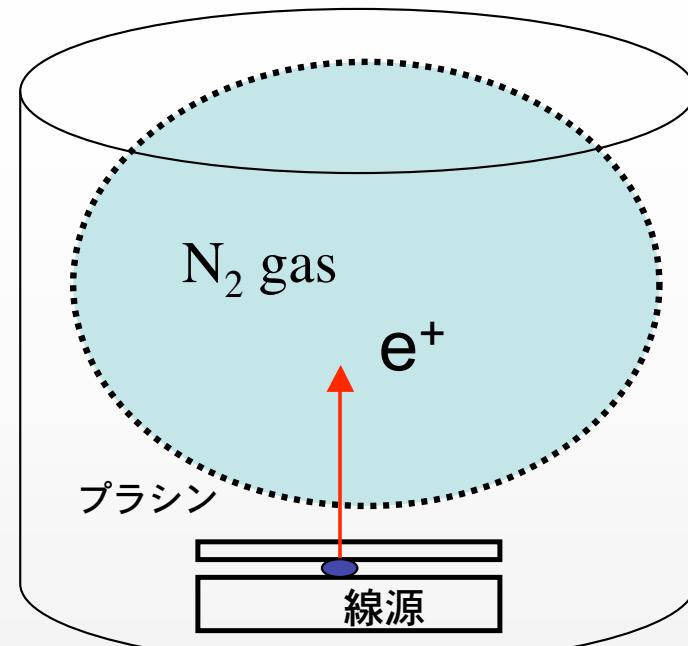
実験の概要 // Ps生成と検出器

Ps生成まわりと検出器

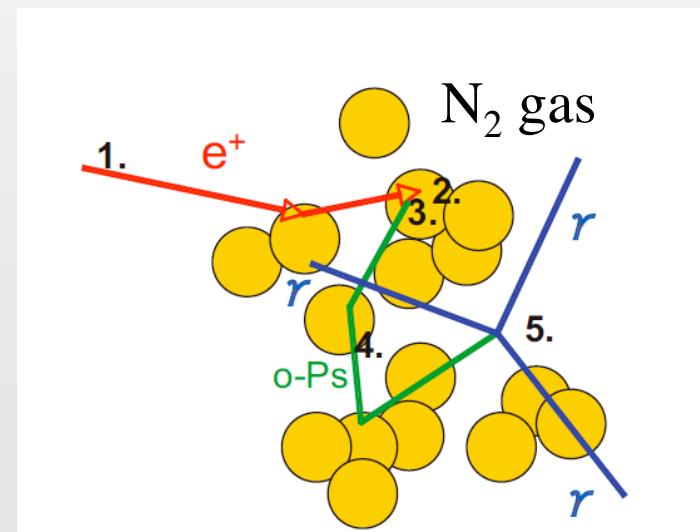
- 1MBq程度の e^+ 線源を使い、200μmの薄いプラスチックシンチレーターでトリガーを掛ける。
- 0.3atm-2.0atmの N_2 でPsを生成。
- Back-to-Backに配置した検出器で崩壊 γ 線を検出、時間情報とエネルギースペクトルを取得する。

Ps生成からの時間情報を用いて何が改善できるのか？

- 生成したPsはeVオーダーの速度で運動しているが、物質と頻繁に衝突を繰り返して室温(0.03eV)まで冷却する(熱化)。Psが生成してからの時間を測定することで熱化過程を測定できる。
- 熱化は遅いO(100ns)：Psの速度が変化→Psが生成されてからの時間に応じてpick-off ratioが変化
- またdelayed coincidenceをとることで p-Ps / annihilationのprompt peakからtiming windowを分離することができるため、S/Nが一桁改善する。



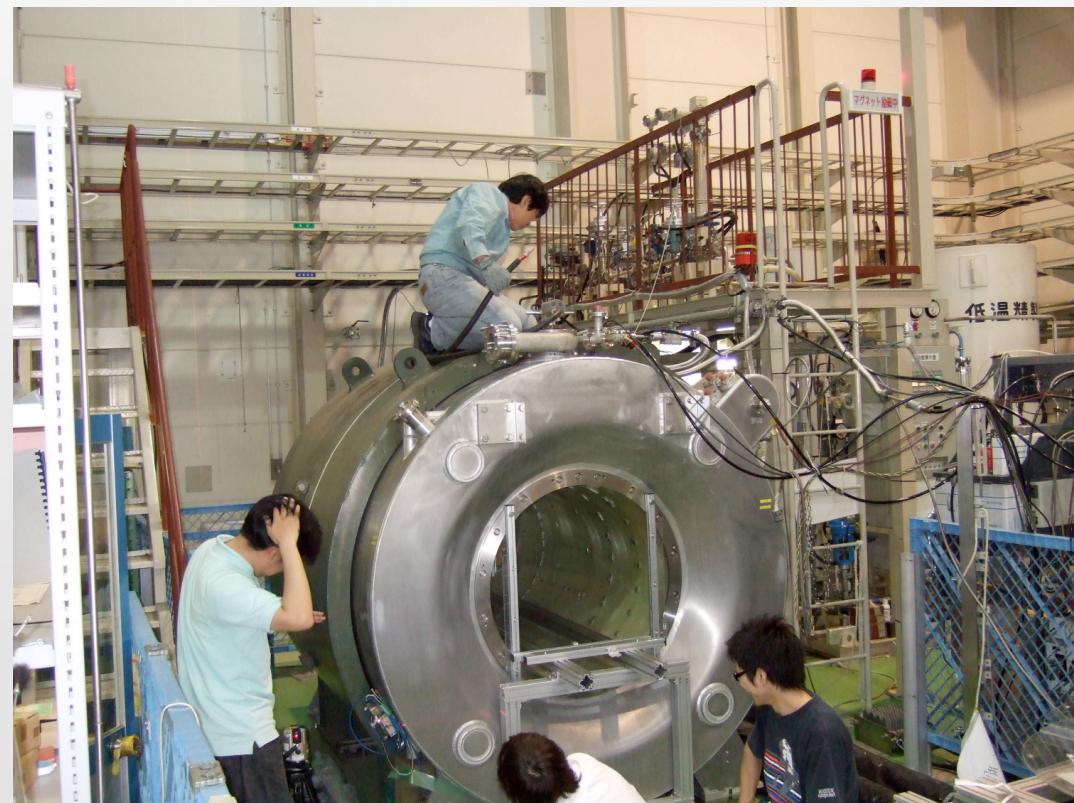
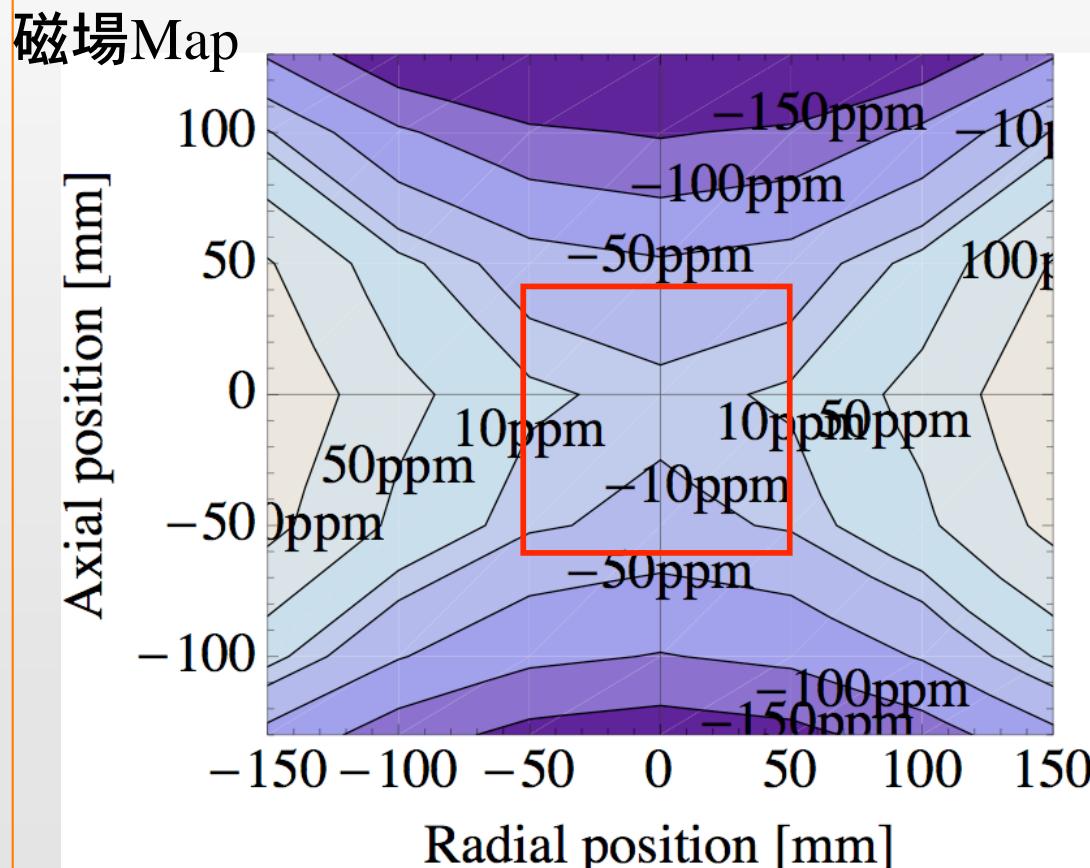
Cavity 内部の様子



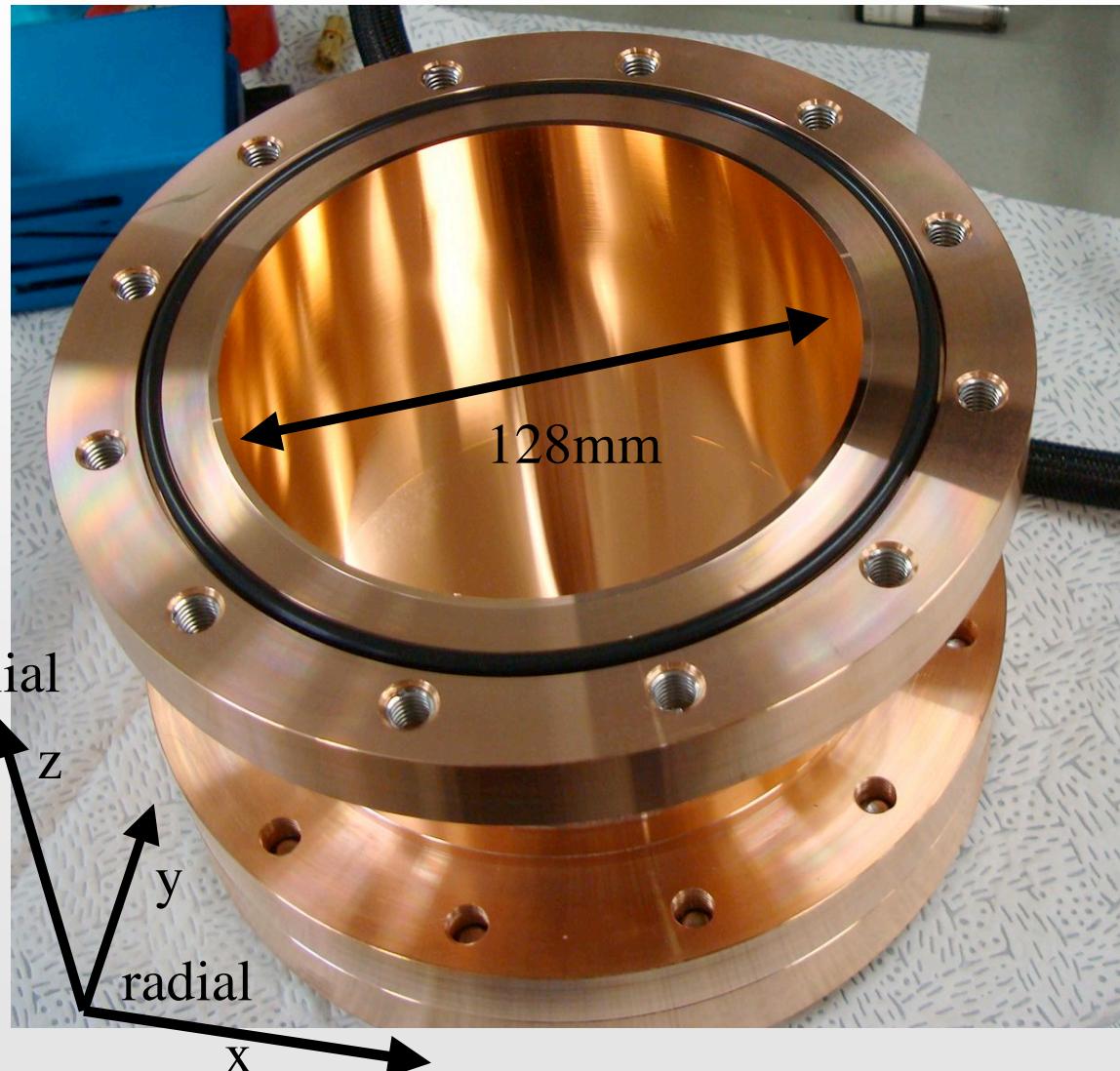
生成Psは崩壊までに物質と衝突して熱化する

実験の概要 // 磁場のコントロール

1. 6月最終週に磁場マップを測定
2. Psの生成領域である中心付近10cm立方で、補正を入れていない状態でも
70ppmの高い一様性を達成
3. 補正コイルおよびシムをいれることで**1ppm**の精度を目指す



PF Cavityの作成とテスト



2856 MHz の RF (500W CW) を入れて o-Ps の遷移を起こす

測定で用いるCavityの仕様

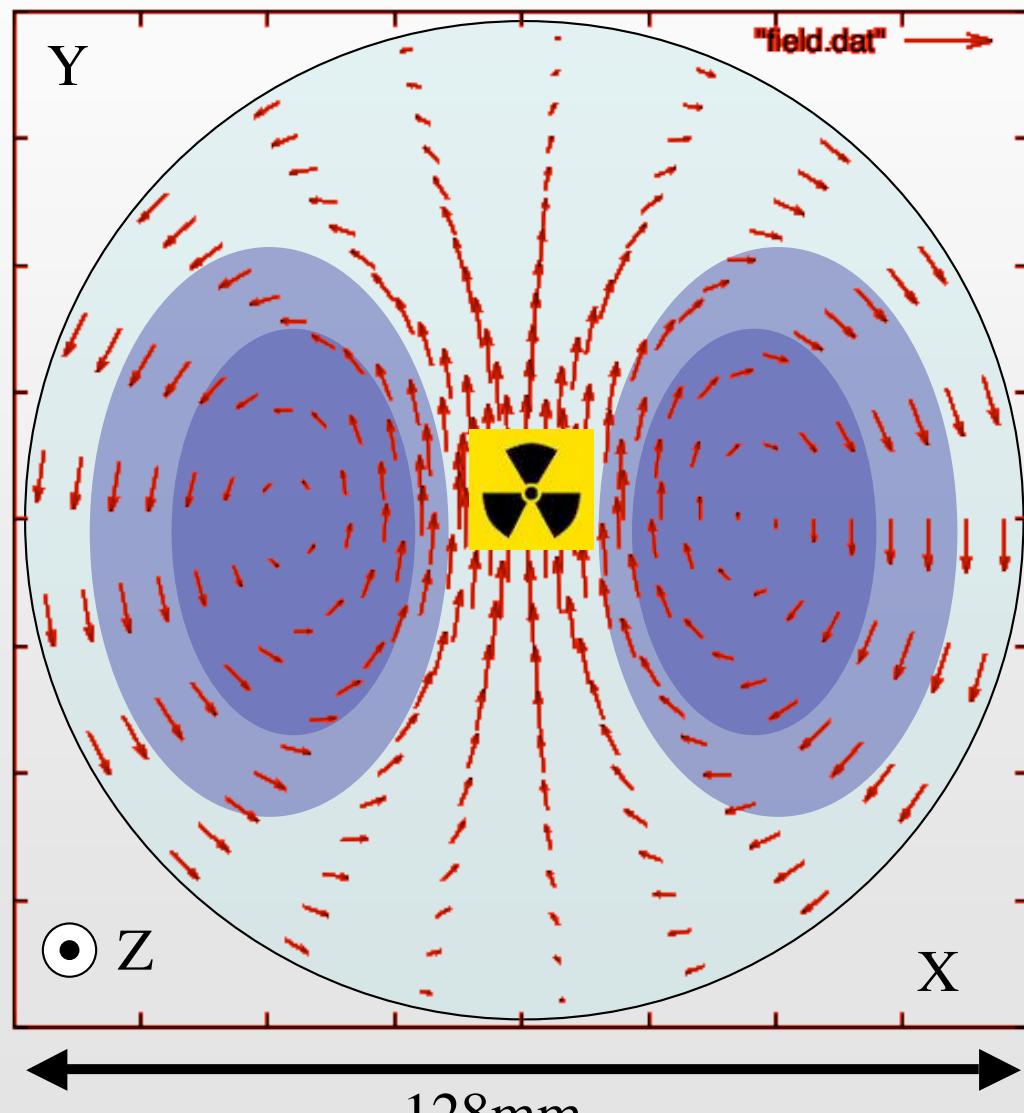
- 共振周波数 : 2856MHz
- 共振モード : TM_{110}
- RF耐圧 : 500W [CW]
- 側面厚(Cu) : 2.0 mm
- 運転圧力 : 0.3-2.0 atm [N_2]
- $Q=14000$

Cavityは γ を透過させるため、側面の肉厚が2.0mmまで薄くなっている。また、冷却およびGasやRFの導入、陽電子ソースは底面部に集約させる。

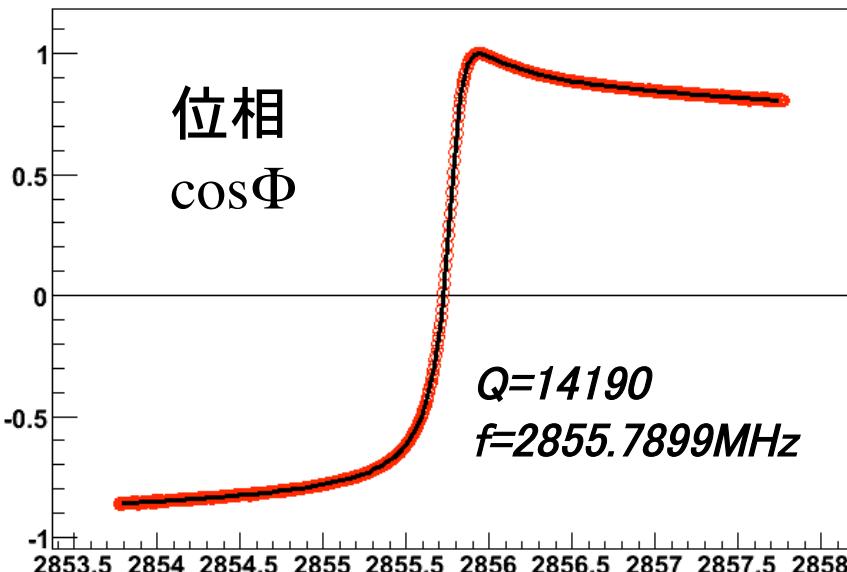
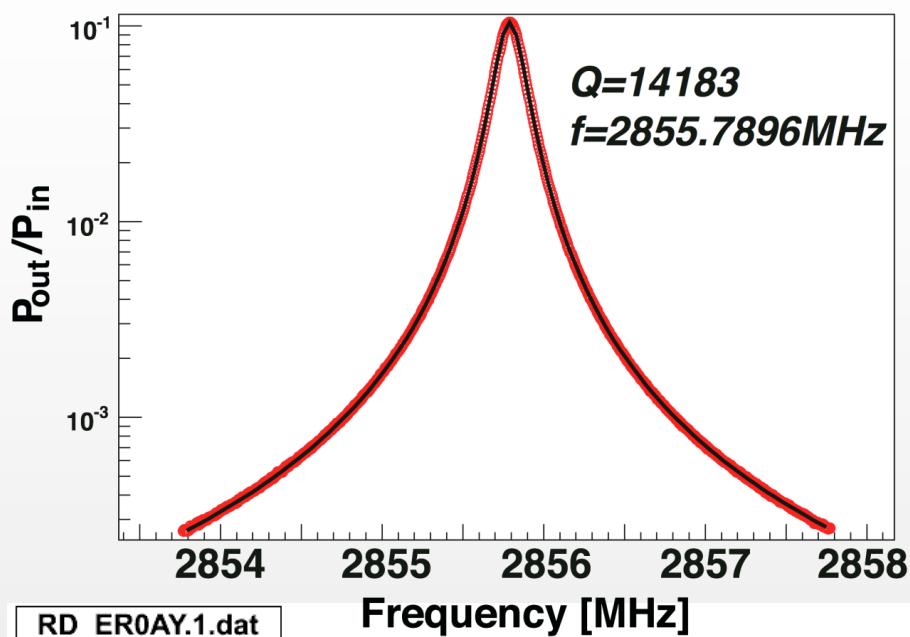
RF Cavityの性能評価 // RF

1. 線源：底面部中央
2. 線源から鉛直方向に静磁場
3. ソースのある**中央のRF磁場が最大**になるように TM_{110} モードを選択
4. Z (axial) 方向のRF磁場はなし
5. 2856MHzで共振→径128mm
6. 他のModeを抑えるため、Cavityの高さを100mmに設定

RF 磁場 (TM110 -mode) X-Y



RF Cavityの性能評価 // 測定



本測定用のCavityを作成し、仕様通りの $Q=14200$ を得た。このときRF磁場は15 gaussであり、遷移確率は10%である。

また、600Wpeak pulse RFを用いて放電試験を行いこれをクリアした。
(duty factor $\sim 10^{-6}$)

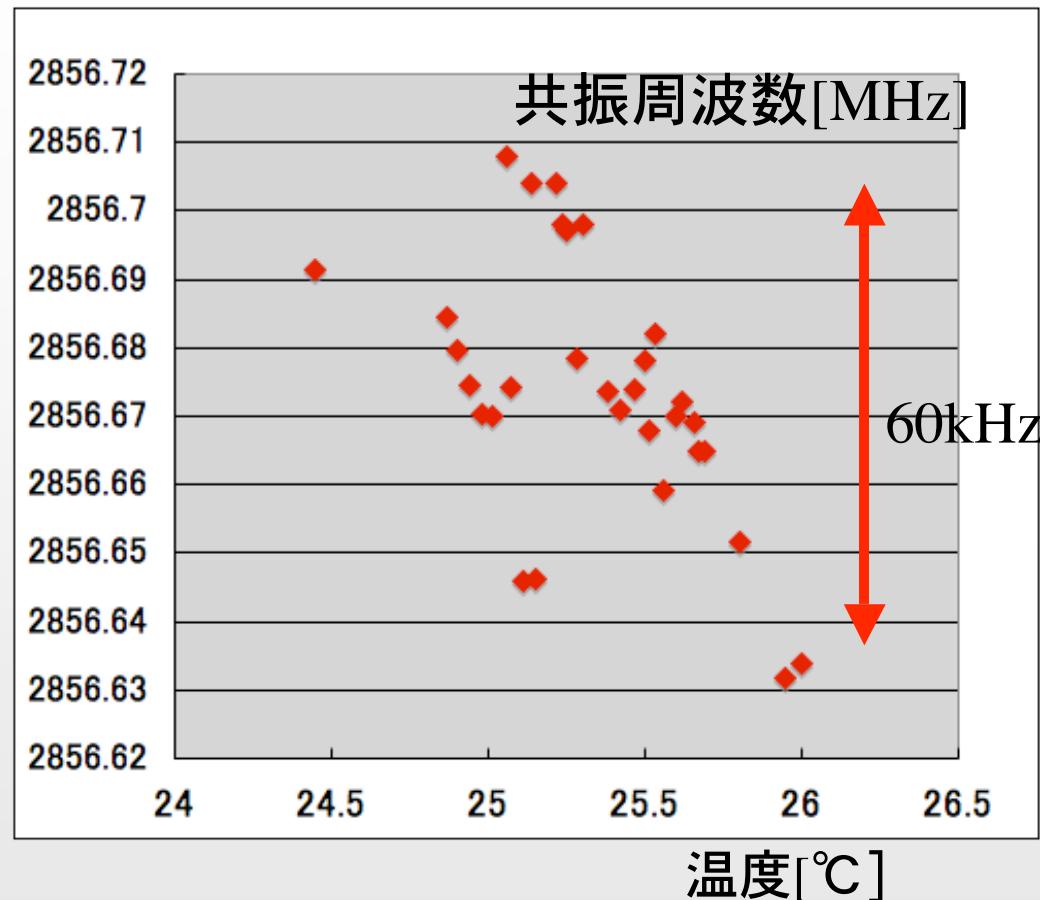
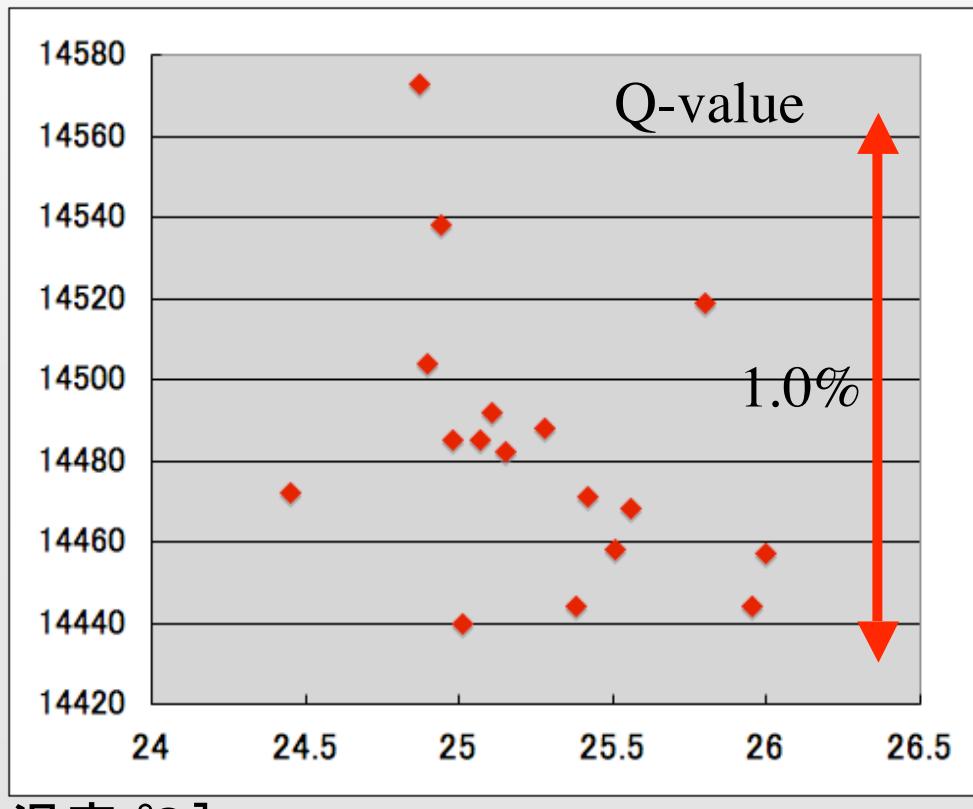
目標精度1ppmの達成に向けて

この値を実現するには共振周波数 f_0 を **3kHz**以内の精度で、Q値を0.1%以下でコントロールする必要がある。

温度変化に対する安定性のチェックや、ガスを入れたときの特性の確認をおこなった。

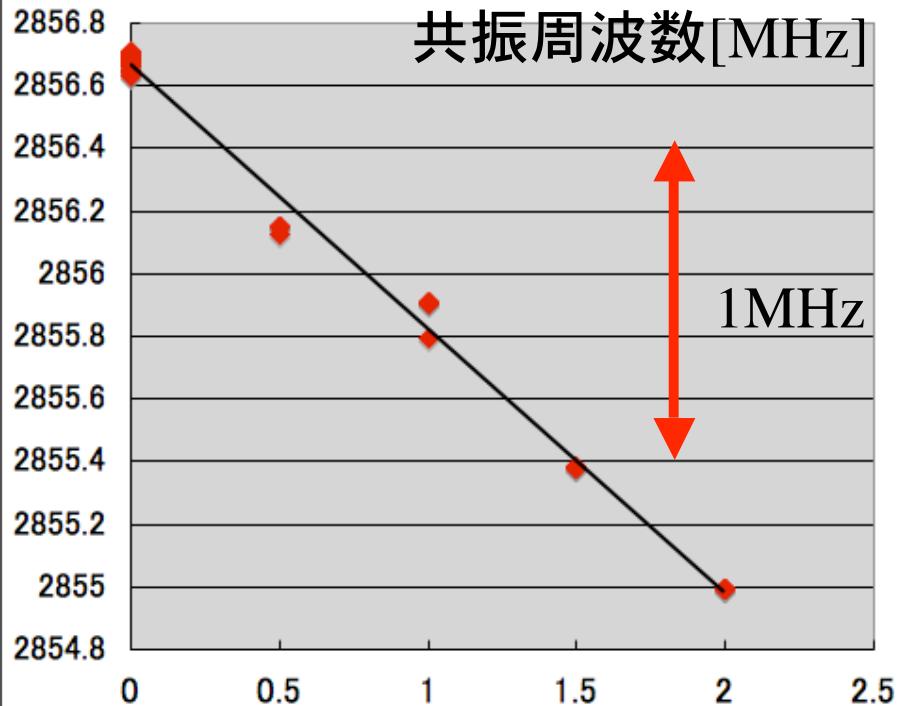
RF Cavityの性能評価 // 温度依存性

Cavityの共振周波数は温度の影響を強く受ける。1ppm測定の為には0.05Kでモニターするとともに、フィードバック量などからの補正が必要になる。
共振周波数は温度に対して -40kHz/K (-13ppm/K)の関係がある。

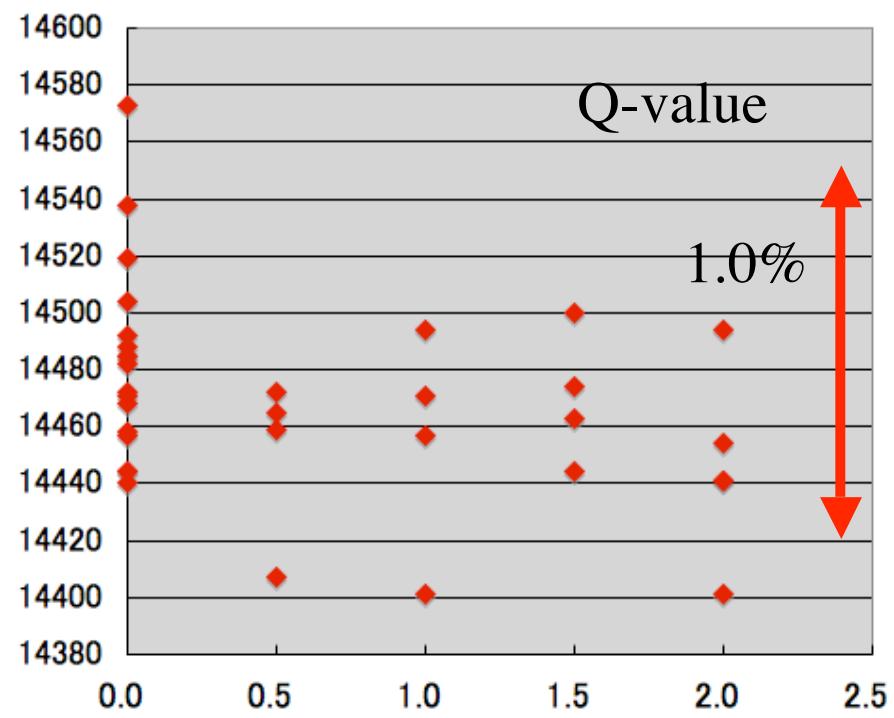


Q値は $14480 \pm 34(1\sigma)$ のばらつきに収まっており、有意な温度依存性はみられない。

共振周波数 [MHz]



Q-value



RF Cavityの性能評価 // Gas 圧の効果と安定性

CavityはGas圧に応じて屈折率が変化するため、共振周波数は 0.841 MHz/atm (200 ppm/atm) で変動する。これは誘電率の理論値から計算した計算した値 0.781 MHz/atm と 3% の範囲で一致する。

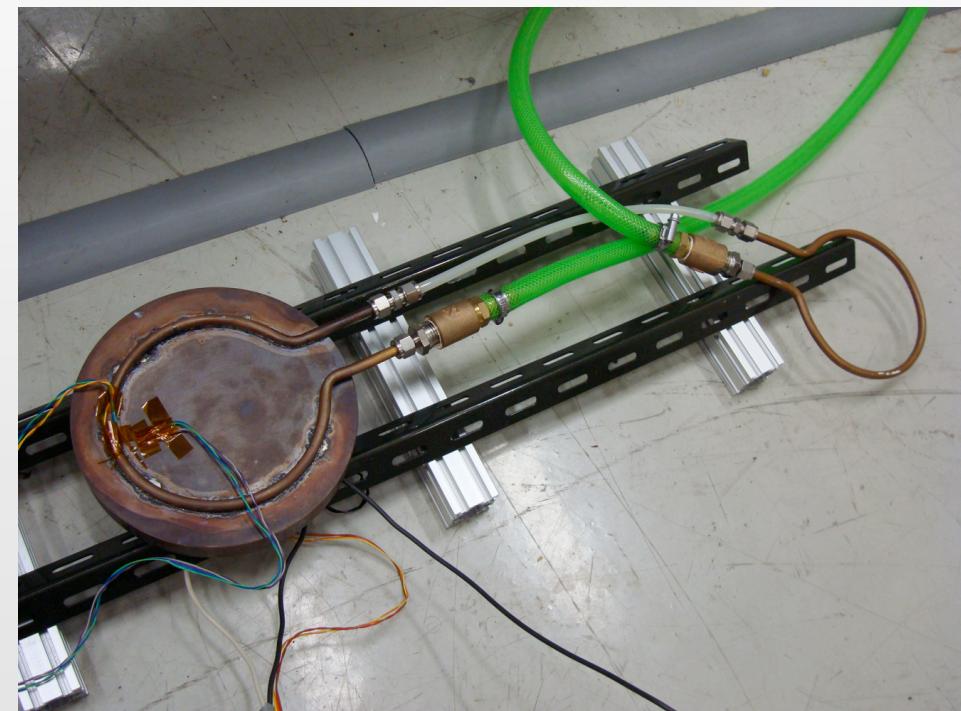
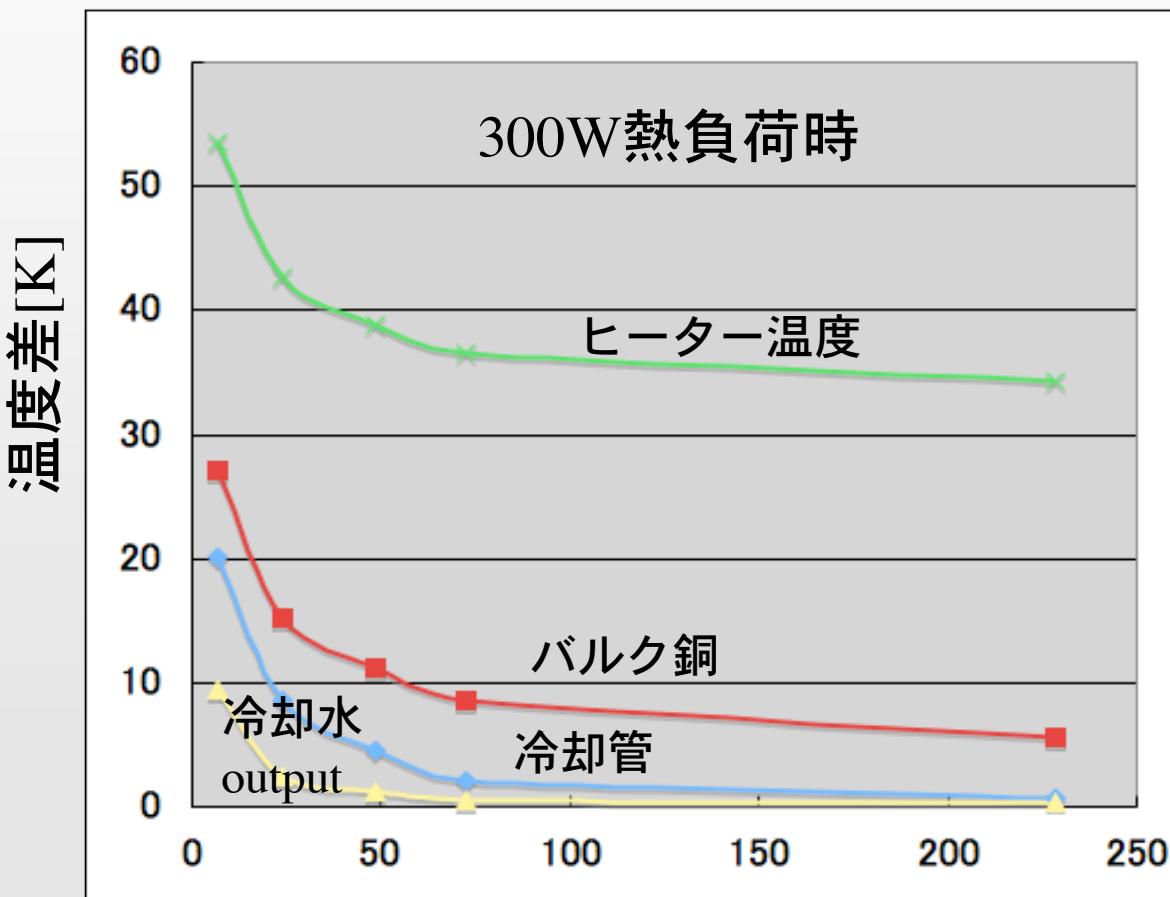
Q値は測定毎に 1% 程度でばらついている。現在これを抑えるための方法を研究中。測定時間(~1日)の平均で 0.1% に収まるようとする。
また、圧力変化に対する有意な依存性は認められない。

圧力 [atm]

Cavity 冷却システムと温度管理

Cavityの蓋と同じサイズのバルク銅を300Wのヒーターで過熱。長さ80cm、径8mmの冷却管(銅)に20°Cの冷却水を流す。

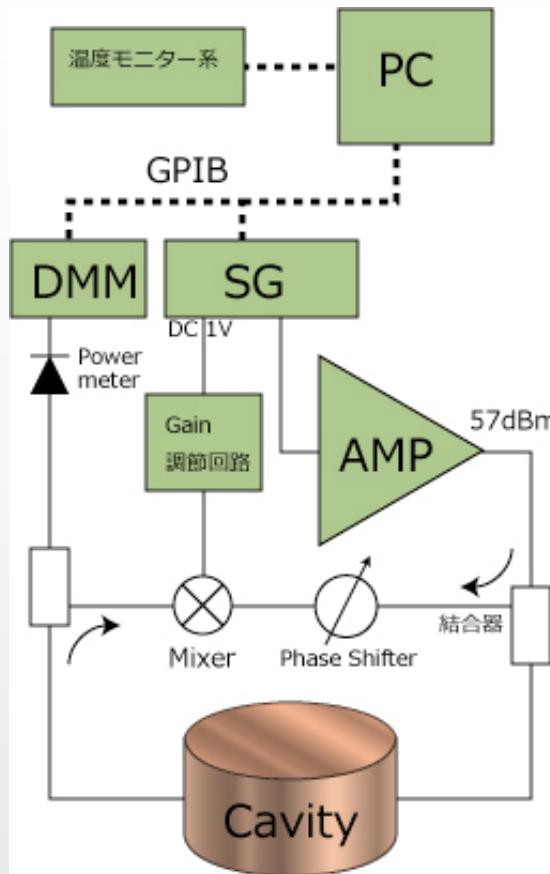
バルク銅は熱伝導がよく1°C以内で均一。流量50cc/sec(3L/min)以上では蓋と冷却管の熱抵抗が支配的。Cavityの温度上昇を10°C以下に押さえ込む。



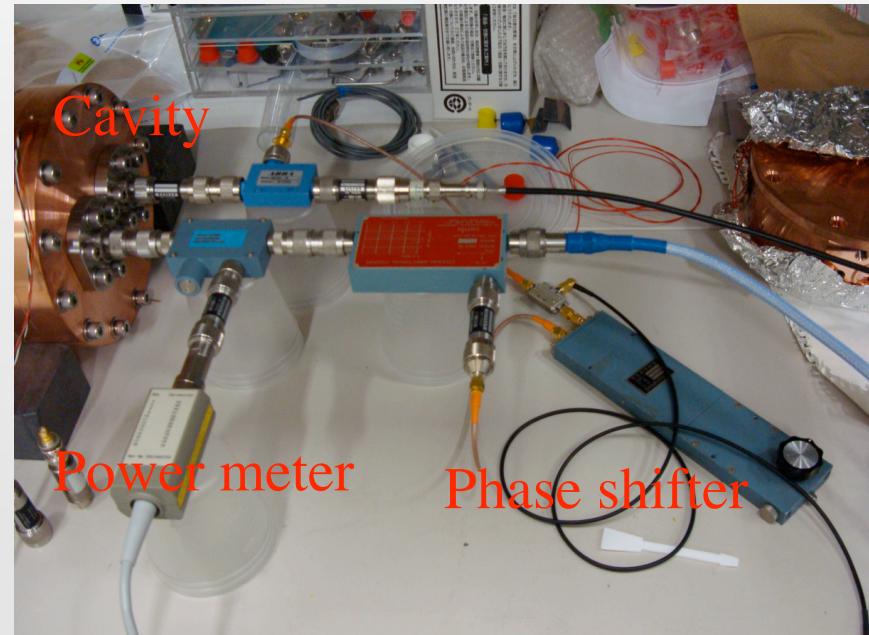
流量 [cc/sec]

冷却水の流量[cc/sec]を変化させたときの冷却水inputに対する温度差[K]

モニター&フィードバックシステム: Cavityの共鳴周波数



フィードバック
システム概要



位相による共振ピーク追隨



600Wpulse AMP & SG

まとめ

1. PsはQEDのみで記述されるシンプルな系であり、そのHFSは束縛系QEDの精密検証やnew Physicsの探索に適している。
2. PsのHFSは理論値と実験値の間にズレが存在し、我々は「時間情報を用いた物質の効果の評価」、「磁場の制御」、「新しい検出器」でこの問題に挑戦する。
3. 実験で用いるCavityを作成してテスト、温度や周波数のフィードバックやモニター機構といった周辺要素を決定し、準備を行った。

Backup

熱化 Psの寿命問題

$\circ(\alpha^2)$ 計算

$\circ(\alpha)$ 計算

Phys.Rev.Lett. 40,737 (1978)

Phys.Rev.Lett. 40,737 (1978)

Phys.Lett. A69,97 (1978)

J.Phys. B11,743 (1978)

Phys.Rev.Lett. 49,525 (1982)

Nuovo Cimento 97A,419 (1987)

Phys.Rev.Lett. 58,1328 (1987)

Phys.Rev. A40,5489 (1989)

Phys.Rev.Lett. 65,1344 (1990)

Phys.Lett. B357,475 (1995)

D thesis (2001) & Phys.Lett. B572,117 (2003)

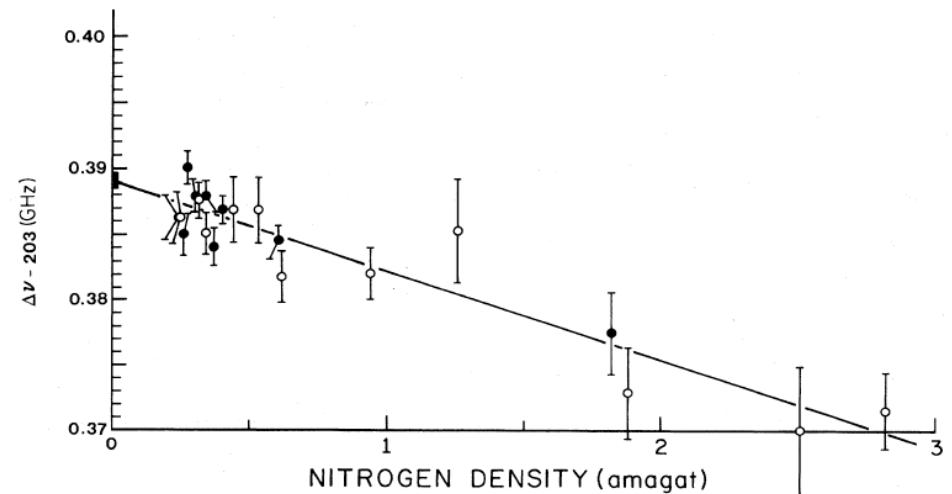
Phys.Rev.Lett. 90, 203402 (2002)

D thesis (2007)

100ppm

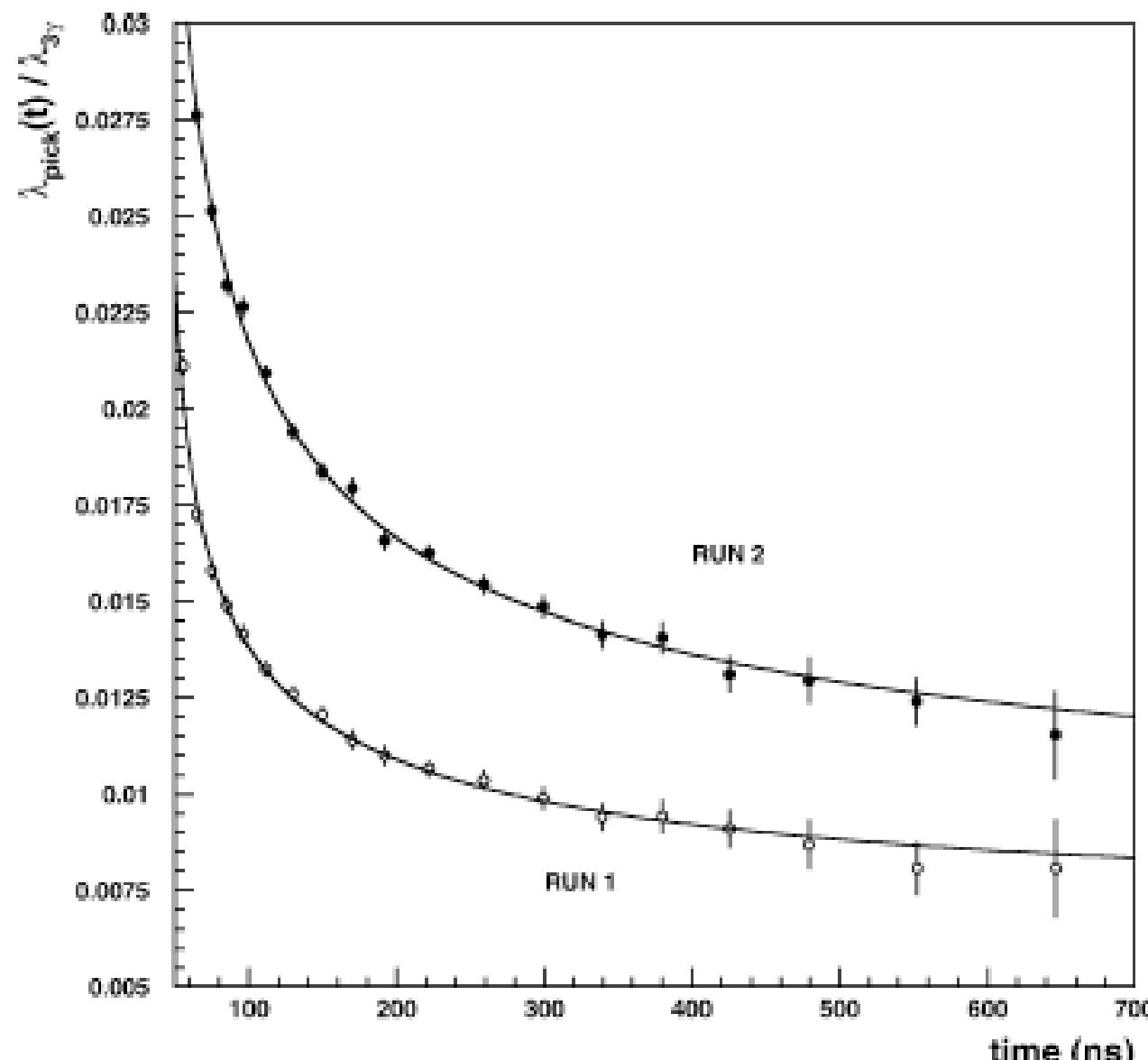
7.02 7.03 7.04 7.05 7.06 7.07
Decay rate (μsec^{-1})

熱化は遅くHFSにも同様の系統誤差となりうる



崩壊率(寿命の逆数)

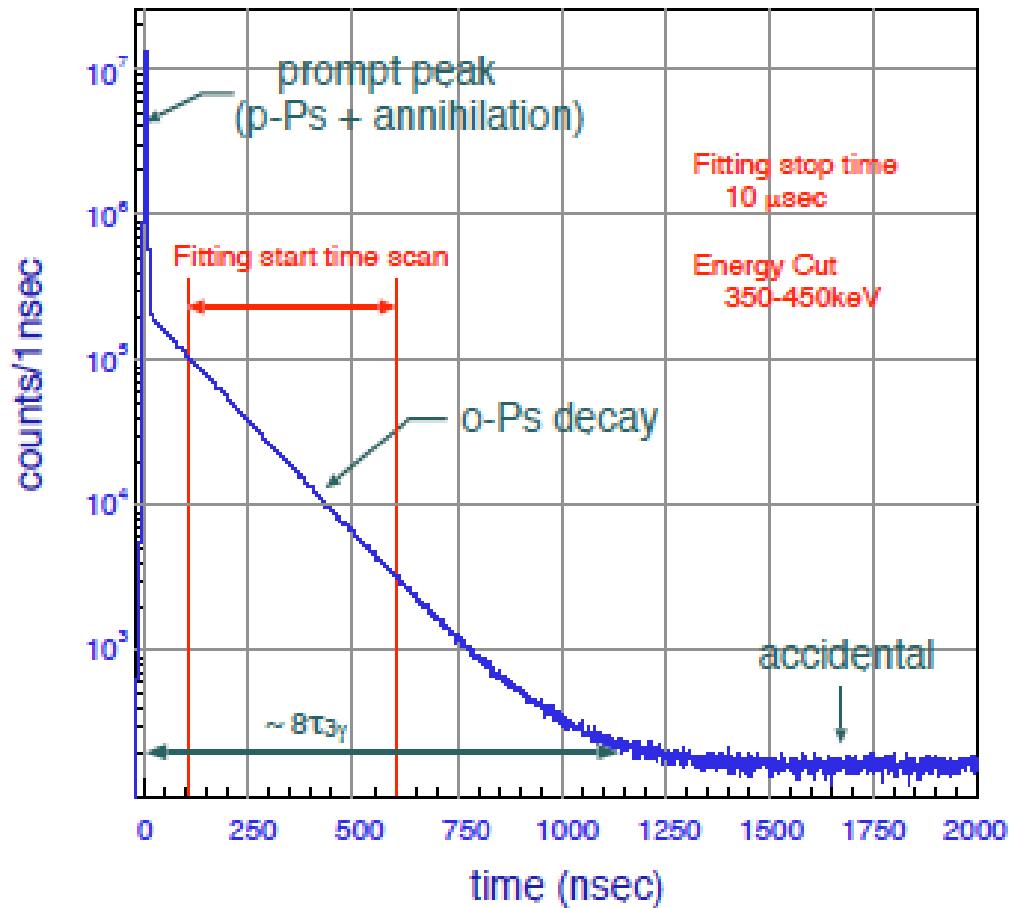
熱化の時間スケール:pick-off



Psが生成してからの時間

寿命問題

Time spectrum of NaI(Tl)



$$\lambda_{\text{obs}}(t) = \lambda_{3\gamma} + \lambda_{\text{pick}}(t)$$

$$N(t) = N_0 \exp \left(-\lambda_{3\gamma} \int_0^t \left(1 + \frac{\lambda_{\text{pick}}(t')}{\lambda_{3\gamma}} \right) dt' \right)$$