

ポジトロニウム 超微細構造の精密測定I

25pZE-4

秋元銀河, 石田明, Mark M. Hashimoto^A, 難波俊雄^A, 浅井祥仁,
小林富雄^A, 吉田光宏^B, 出原敏孝^C, 斎藤晴雄^D

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

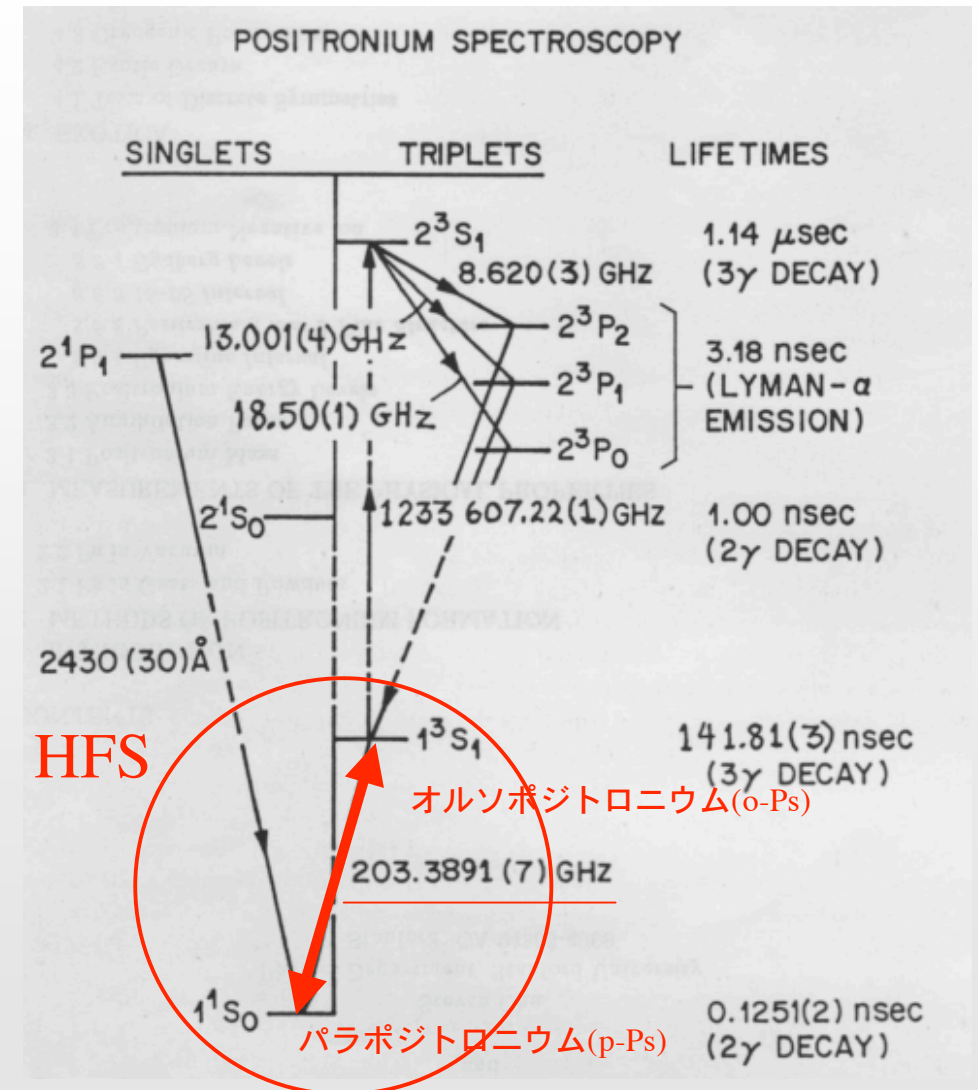
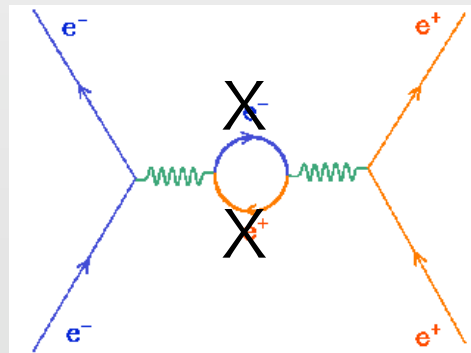
ポジトロニウム(Ps)のエネルギー準位と超微細構造(HFS)

1. o-Psとp-Psの間にはエネルギー差
 $\Delta v = 203 \text{ GHz} = 0.84 \text{ meV}$
2. スピン双極子の相互作用に由来し、Lowest EnergyのHFS
3. 水素のHFS(1.4GHz)に比べて大きい

なぜHFSが大きいのか？

1. Psはe-e系であり質量が小さい
2. o-Psは光子と量子数が同じ。Hやp-Psでは禁止されている真空量子振動(87GHz)が存在

o-Psの真空振動
に対する未知粒子Xの効果



PsのHFSは未知の素粒子現象に対して **sensitive** !

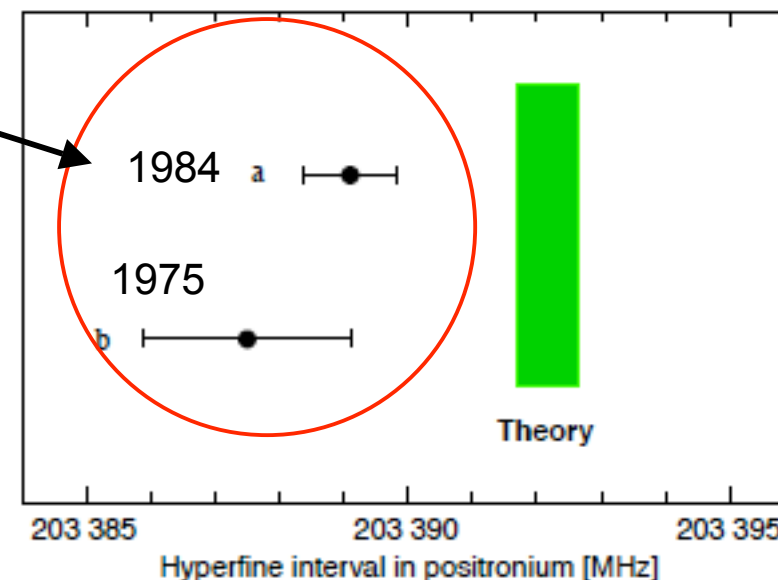
HFSの理論計算と測定結果は乖離している

1. HFSは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. 昔は理論の精度が実験精度よりも遥かに悪かった。
3. 近年、高次項($O(\alpha^3)$)の計算が確立し、理論と測定結果の間にズレがあることが確認された。

実験値: 203 389.10(74)MHz
(精度 3.6ppm)

理論値: 203 391.7(6) MHz
(精度 3.0ppm)

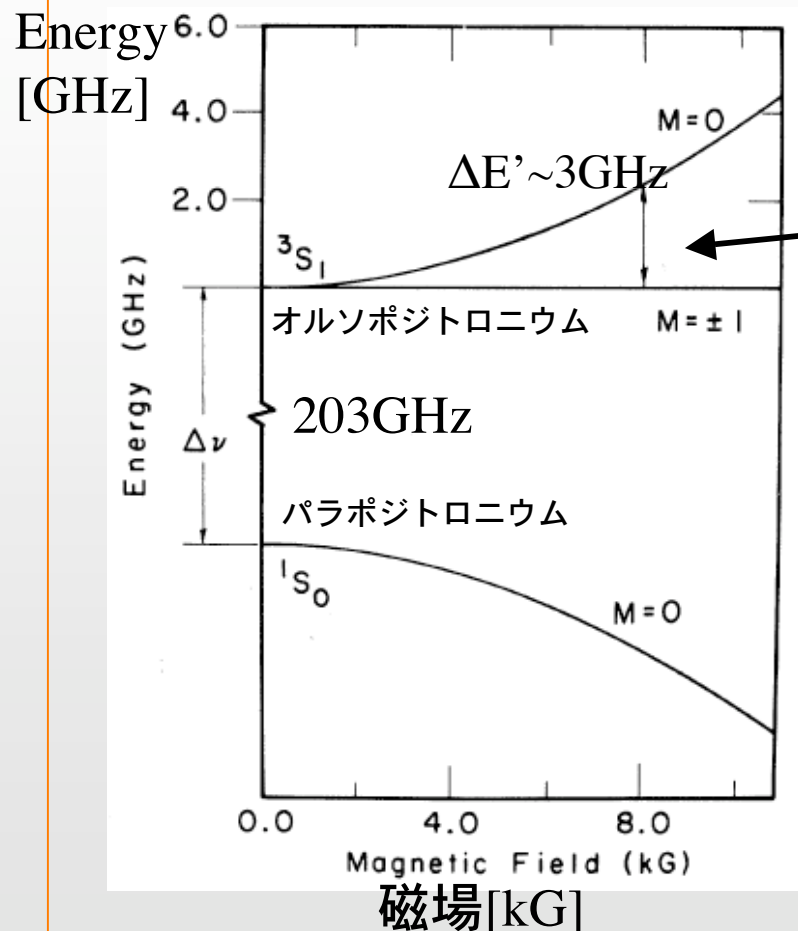
約3.5 σ 程度のずれ



新しい物理が存在している可能性があるため
精密な測定を行う。

過去の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($\Delta\nu=203\text{GHz}$)を直接みることは周波数が高く難しい。**磁場を加え** Zeeman効果を利用して間接的に測定している。

$$\Delta E' = \frac{1}{2} h \Delta \nu \left[\sqrt{1 + x^2} - 1 \right]$$

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

$$\Delta \nu = \text{HFS (203GHz)}$$

1. 磁場を加えると、p-Psとo-Psの $m=0$ の成分がmixingを起こしてEnergyがシフト。一方o-Psの $m=\pm 1$ の成分は変化しない。
2. $\Delta E'$ (8kGで3GHz) に対応するRFを導入してSpin-磁気共鳴させる。
3. o-Psの $m=0$ はp-PsとMixingしており、p-Psは寿命が短いため即座に崩壊し、 2γ -decayが増加する。

我々の提案する新しい2つの実験

実験 1

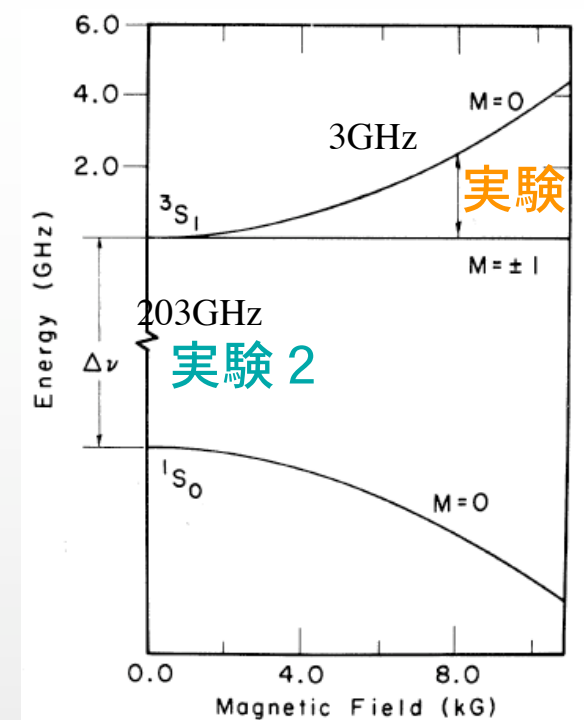
1. 時間情報を加えたHFSの精密測定

Psの寿命問題を解決した時のように、**Ps生成から崩壊までの時間**を直接計ることで**物質の効果**を理解することができる。

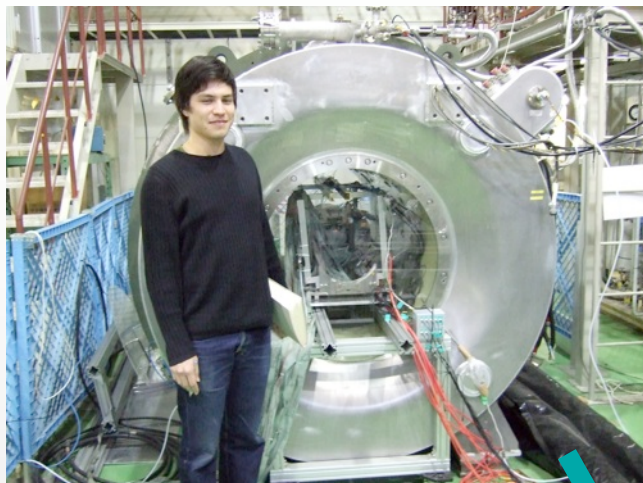
実験 2

2. 大強度サブテラヘルツ光をもちいた直接測定

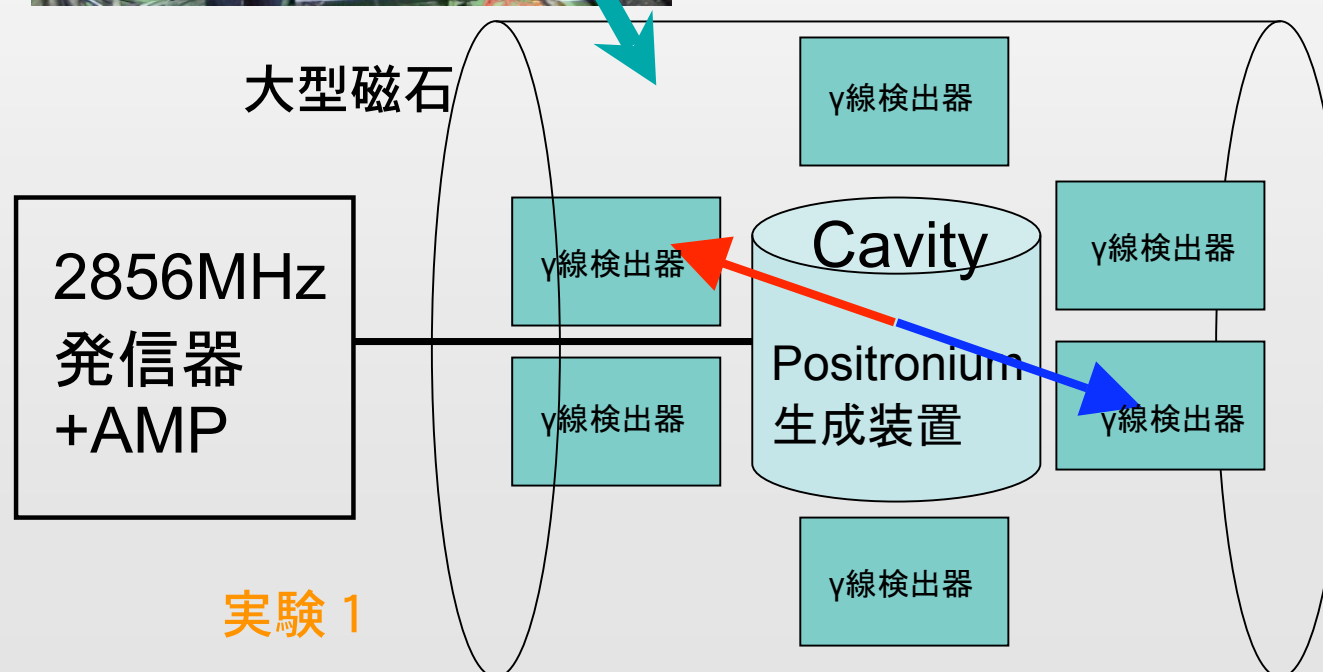
実験 1に加えて203GHzのサブテラヘルツ波を用いて共鳴を直接測定することで、最大の系統誤差を生む磁場の影響を回避することができる。



実験1の概要 (時間情報を用いた精密測定)



1. Ps生成装置を兼ねたCavityに3GHz/600WのRF (TM₁₁₀)を導入し、周囲をGe検出器とLaBr₃で覆う。(詳細は次の石田が話します。)
2. その周りを0.8Tの**一様**かつ**強力(0.8T)**な大型磁石でかこむ。(KEKの低温センターの高精度磁石をお借りする方向で話を進めています)



実験 1

$$\Delta E' = \frac{1}{2} h \Delta \nu \left[\sqrt{1 + x^2} - 1 \right]$$

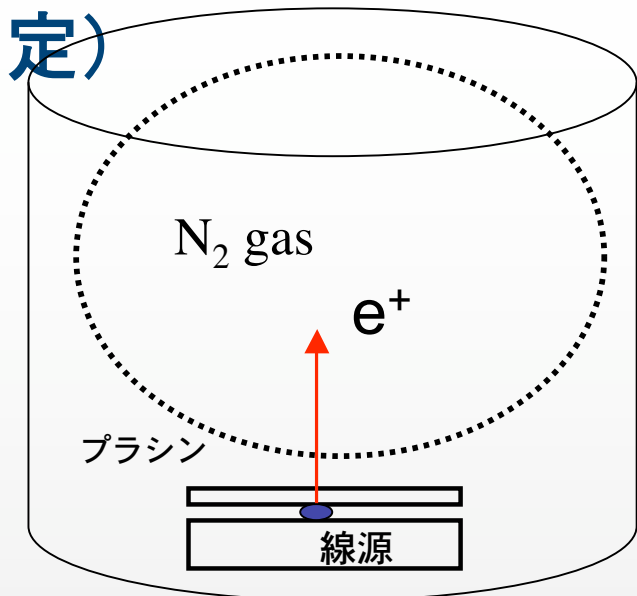
$$x = 2g\mu_0 H_0 / h \Delta \nu$$

磁場の**一様性**は系統誤差に直接効いてくる最大の因子(5ppm)であり広い領域で厳しく制御する必要がある。

実験1の概要（時間情報を用いた精密測定）

Ps生成まわりと検出器

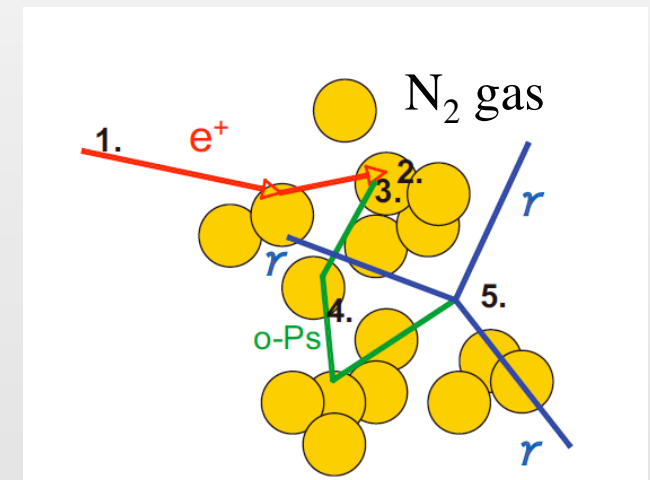
1. 1MBq程度の e^+ 線源を使い、100-200 μm の薄いプラスチックシンチレーターでトリガーを掛ける。
2. 0.5atm-1.5atmの N_2 でPsを生成。
3. Back-to-Backに配置した検出器で崩壊 γ 線を検出、時間情報とエネルギースペクトルを取得する。



Cavity 内部の様子

Ps生成からの時間情報を用いて何が改善できるのか？

1. 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。
2. また時間情報を加える事でp-Psのprompt peakからo-Psを分離することができるため、S/Nが一桁改善する。(寿命の違い)



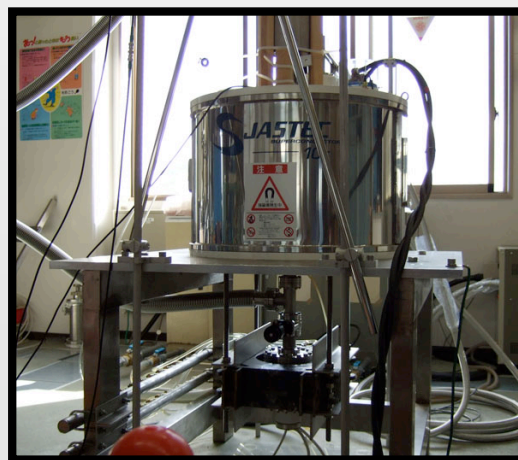
生成Psは崩壊までに物質と衝突して熱化する

実験2: 大強度サブテラヘルツ光をもちいた直接測定

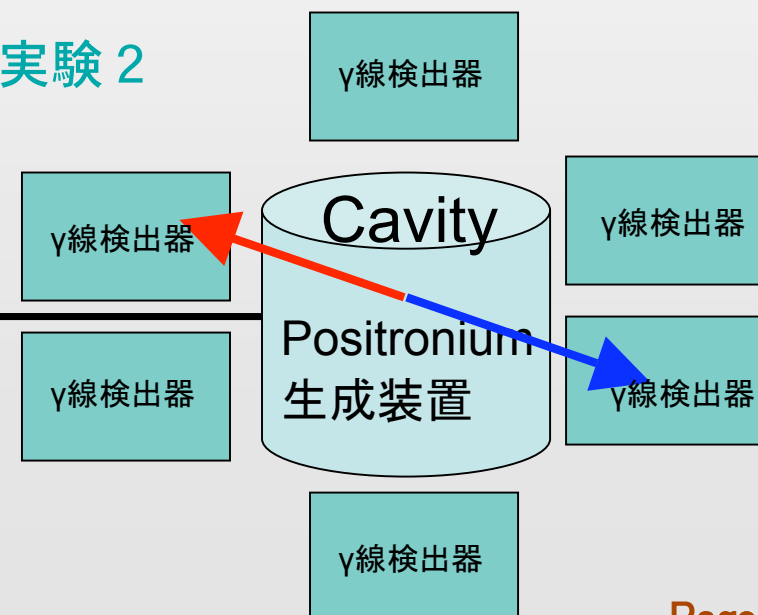
1. ゼーマン効果を利用するのではなく、203GHzのミリ波を用いてHFSの**直接遷移**を観測する。磁場に起因する不定性を完全に取り除く事ができる。ミリ波で直接観測は世界で初めての試み。
2. 検出器と生成系は基本的に**実験1**と同じだが磁石を用いない。
3. 3GHz発信器のかわりに203GHzの強力発信器使用する。ジャイロトロンの詳しい説明は**明日午前26aQE**(領域2)で行われます。(福井大学遠赤外領域開発研究センター)

203GHz大強度 ジャイロトロン

1. 強力: 100W
2. 可変 $\pm 1\text{GHz}$
3. 安定: 1ppm



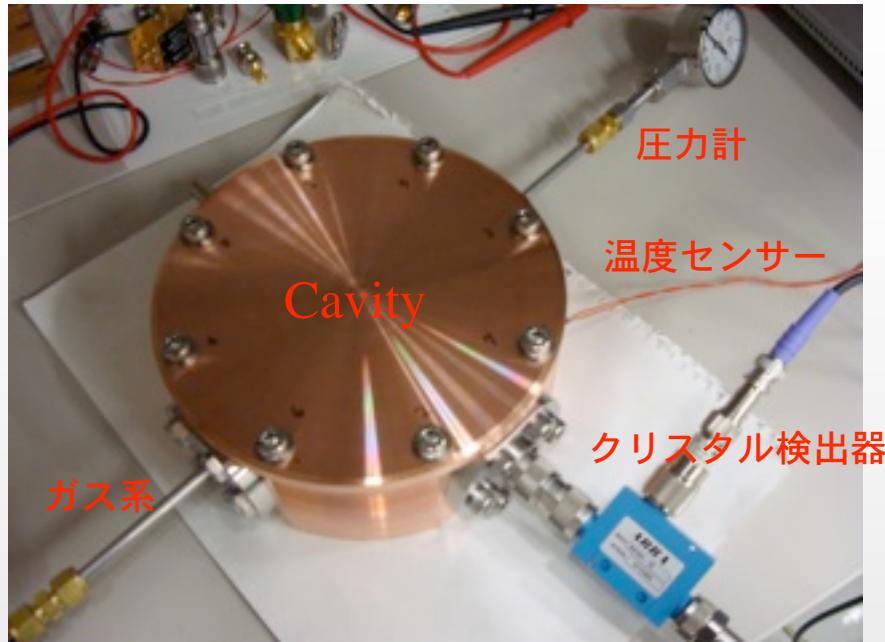
実験 2



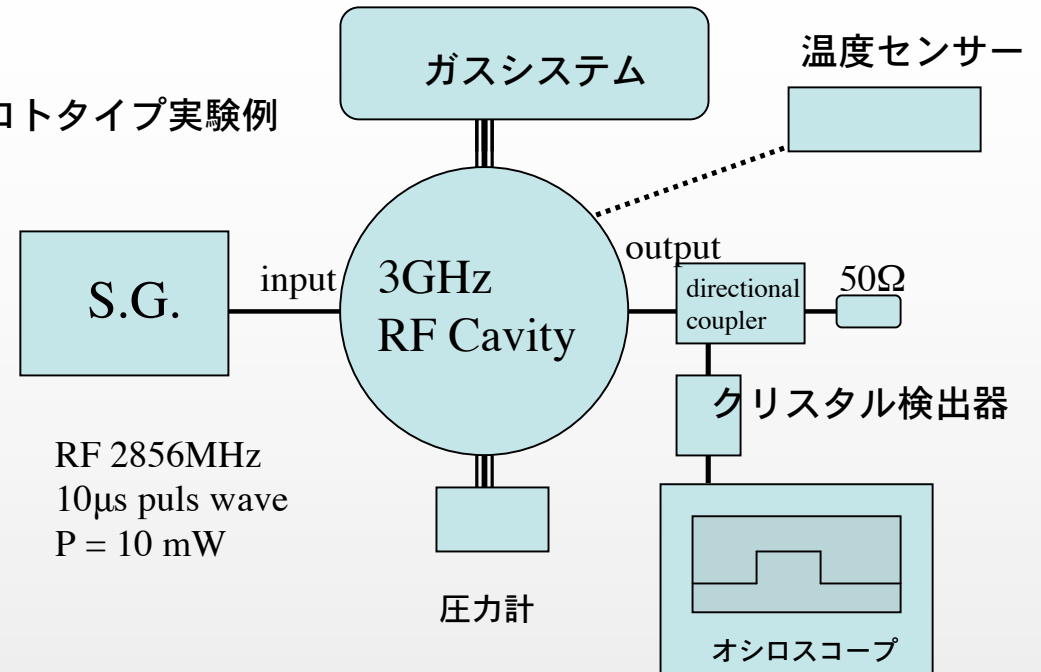
実験1

2.856GHz RF Cavityの設計および作成とプロトタイプテスト

実験1 : Cavityの作成とプロトタイプテスト



プロトタイプ実験例



RFの為のCavityを設計/作成し、目的の仕様を満たしているか確認した。

1. Signal Generatorでpulse波を生成し、RF Cavityで2856MHz **TM110**-modeのresonanceを立てる。
2. Directional Coupler およびクリスタル検出器を用いて電力透過係数および反射係数を測定し、共振周波数およびQ値を測定した。
3. ガスやプラシンを入れても**期待した通りのQ**が得られるのか確認した。

実験1 : Cavityの作成とプロトタイプテスト

1. 共振周波数 f_0 およびQ値は電力透過と反射をfit (左図)
2. Cavityはいずれの条件においても $Q > 10000$ を達成し、十分な共鳴RFが得られる事が確認された。

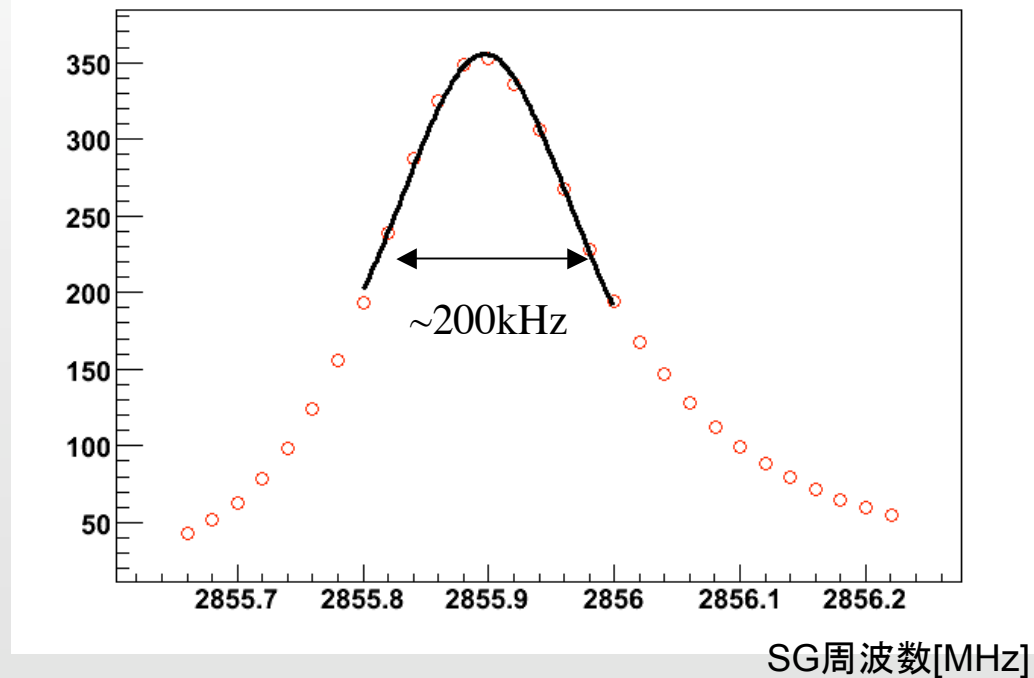
乾燥窒素(1atm)

Peak= 2855.9MHz

FWHM= 0.22MHz

Q=12940

電力透過量(例)

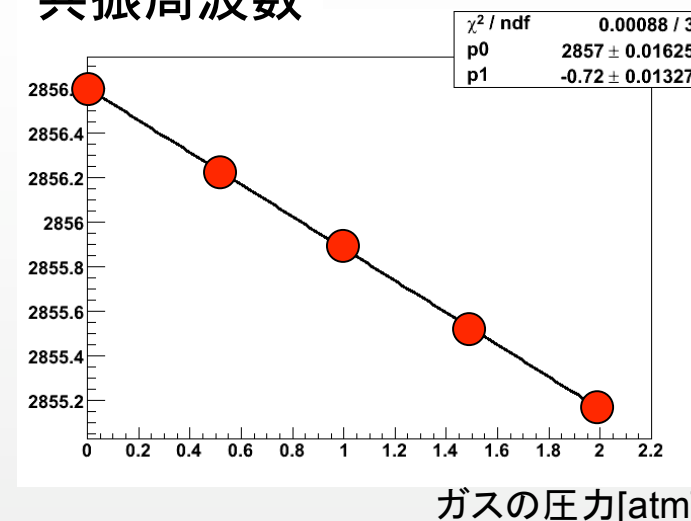


実験1 : Cavityの作成とプロトタイプテスト

Ps生成用ガスの影響

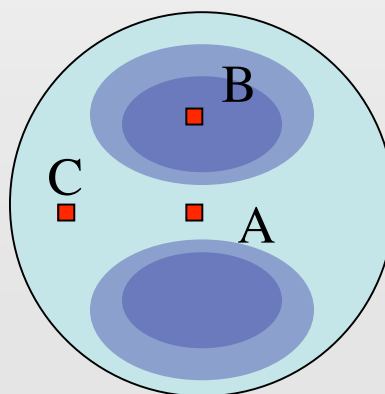
1. 共振周波数は誘電率から期待される通りの変動をみせた。
2. Q値については $Q=13500 \pm 800$ の範囲に収束した。Qのガス圧力依存性については現在精密に検証中

共振周波数



ベータトリガー用プラシンの影響

1. 1cm*1cmのプラシンをCavityに入れて測定。
2. 蓋の開け閉めに対する不定性が10%あるので有為な差はみられていない。



	f_0 [MHz]	Q
場所A	2855.6	13074
場所B	2855.5	12908
場所C	2855.7	12892



は電場の強い領域

まとめと今後の展望

1. P_s はQEDのみで構成される最もシンプルな系であり、そのHFSに理論値と実験値でズレがあるのは重大な問題である。
2. 我々は時間情報を加えた精密測定(実験1)とサブテラヘルツによる直接測定(実験2)の両方を用いた検証を目指している。
3. プロトタイプ実験のためのCavityを設計および作成し、プラズマやガスの効果を測定し、本実験での要求を満たしているか確認した。

今後の展望

1. (実験1)の最終的なセットアップを確定
2. 6月に磁場のテスト、9月に本実験を予定
3. 203GHzサブテラヘルツ光による直接測定(実験2)に向けた、実験系のデザイン

BackUp

Zeeman効果とPsの相互作用ハミルトニアン

- $E_1 = E(o-Ps)$ $E_2 = E(p-Ps)$ $\gamma_i = \text{lifetime項}$

$$\tilde{\mathcal{H}}_0 = \begin{pmatrix} E_1 - i\hbar\gamma_1 & & & \\ & E_1 - i\hbar\gamma_1 & & \\ & & E_1 - i\hbar\gamma_1 & \\ & & & E_0 - i\hbar\gamma_0 \end{pmatrix} + g' \mu_B B_0 \begin{pmatrix} 0 & & & \\ & 0 & & \\ & & 0 & 1 \\ & & 1 & 0 \end{pmatrix}$$

静磁場による摂動項

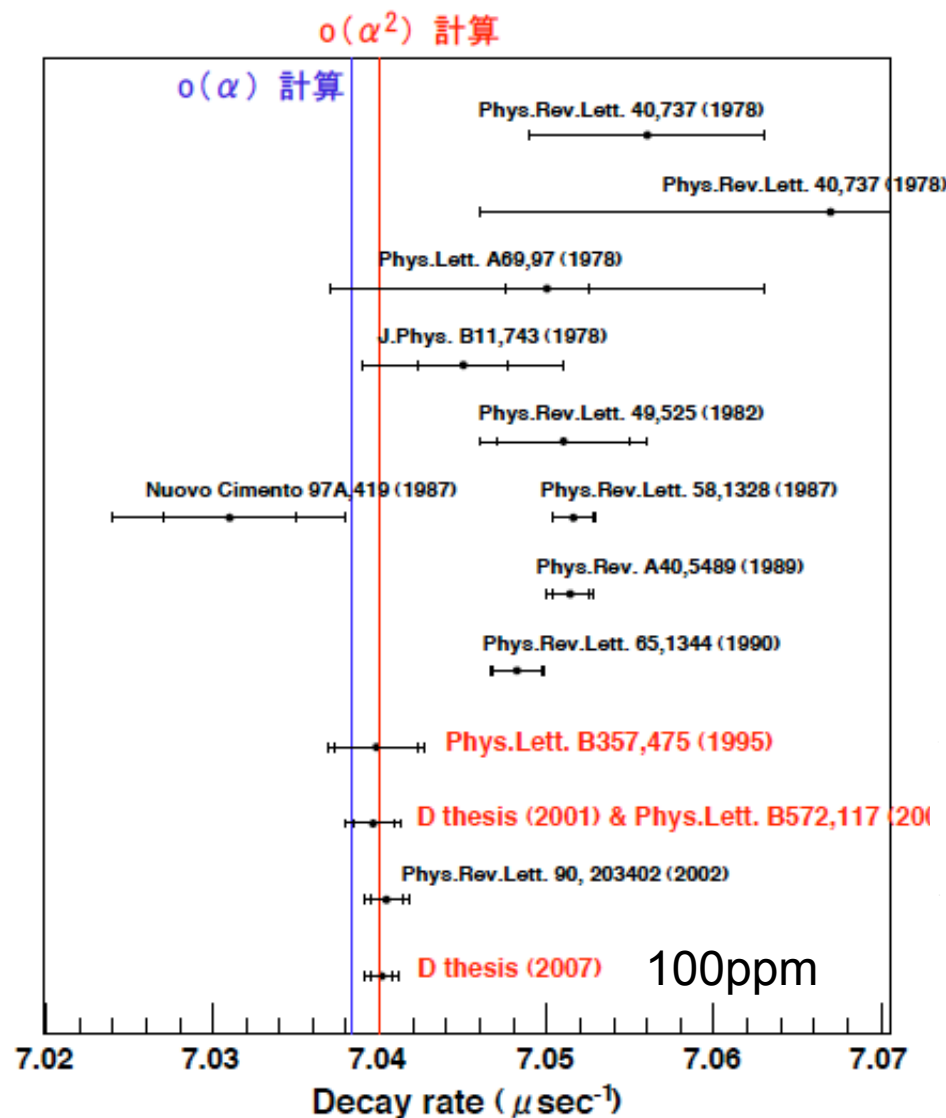
静磁場による摂動項が $(s,m)=(1,0)$ と $(0,0)$ のMixingをおこす。

$$\Delta E' = \frac{1}{2} h \Delta \nu \left[\sqrt{1 + x^2} - 1 \right]$$

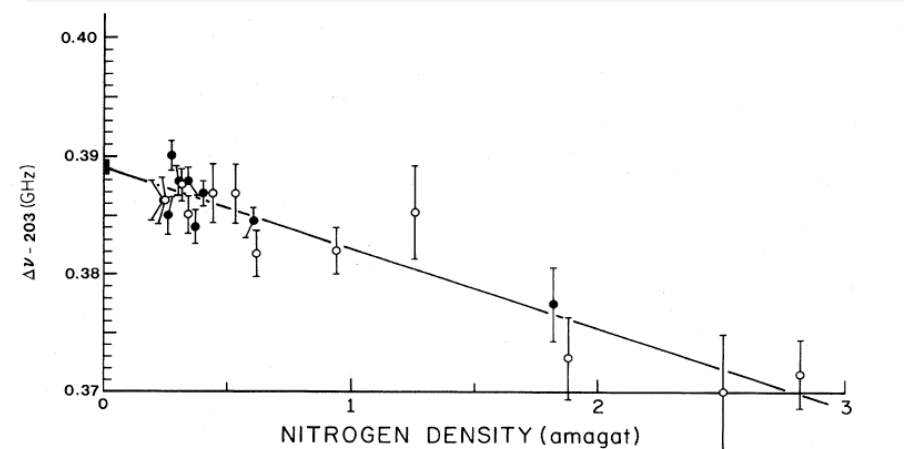
$$x = 2g\mu_0 H_0 / h \Delta \nu$$

$$\Delta \nu = \text{HFS (203GHz)}$$

熱化 P_s の寿命問題

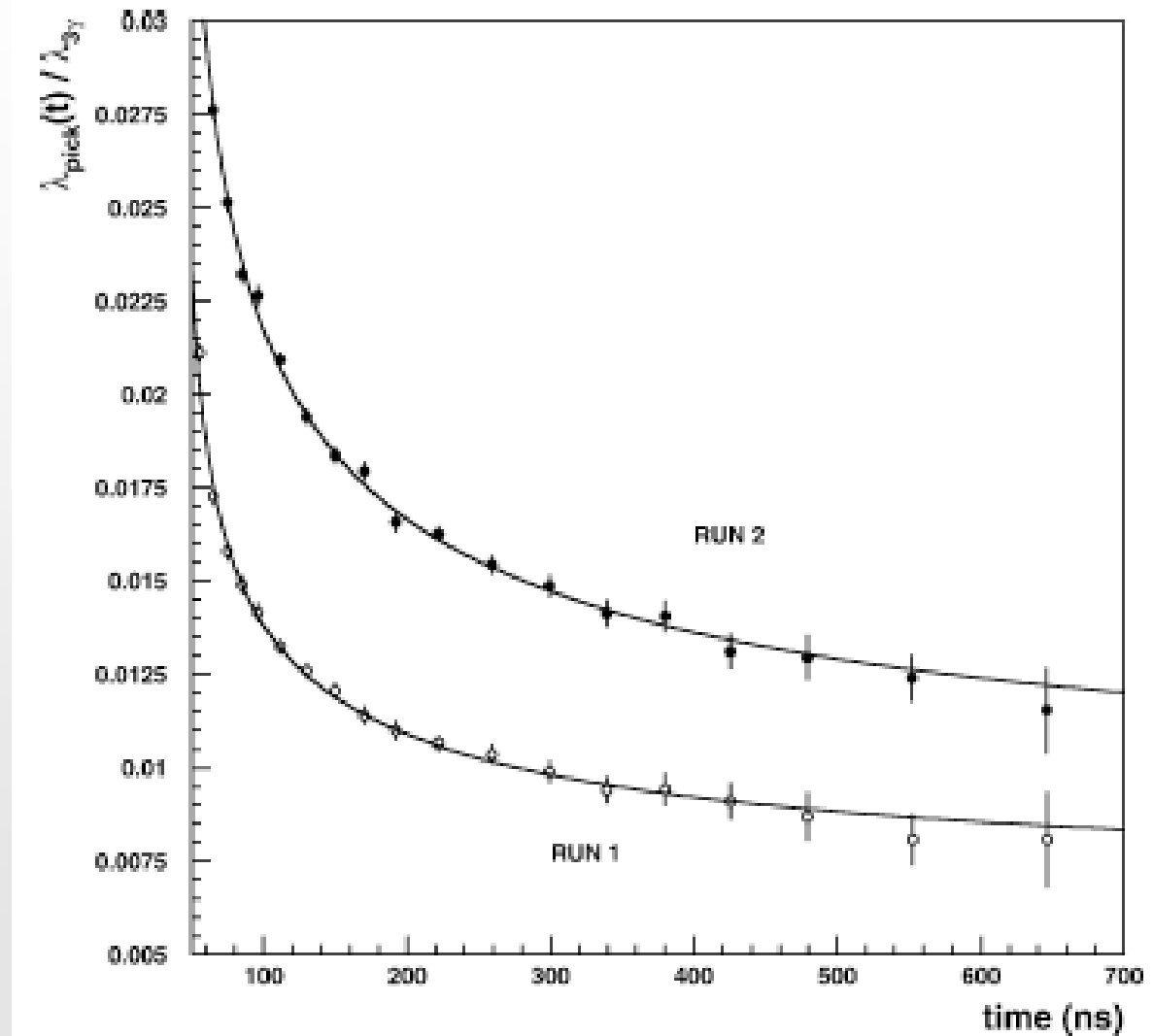


熱化は遅くHFSにも同様の
系統誤差となりうる



崩壊率(寿命の逆数)

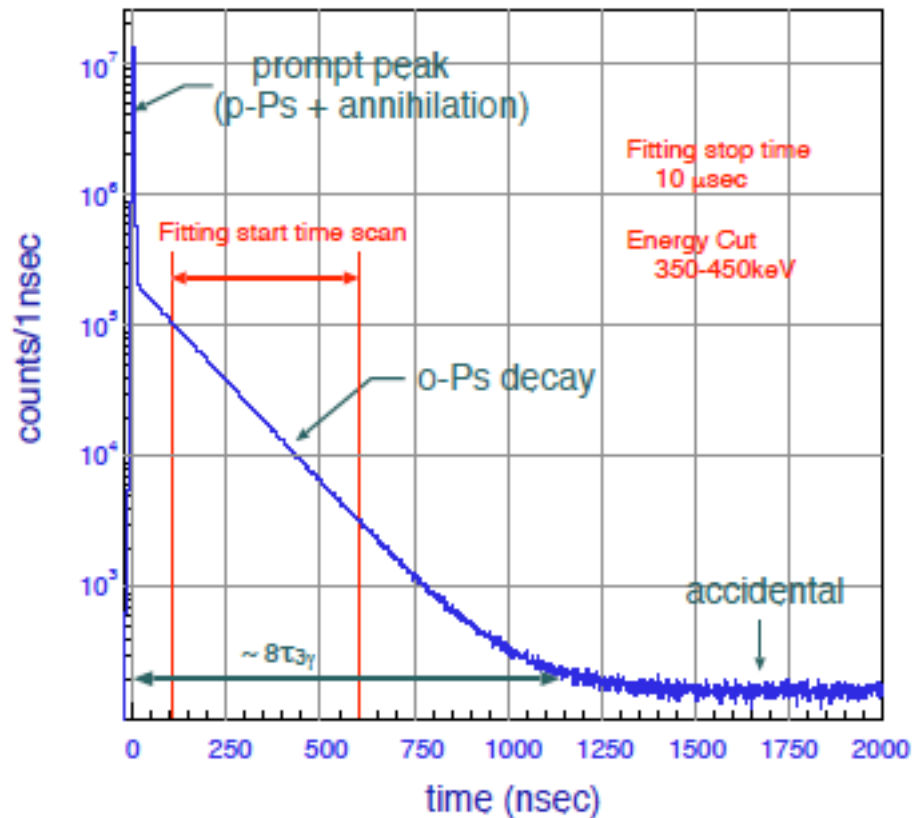
熱化 熱化までは時間がかかる。



Psが生成してからの時間

熱化 外挿

Time spectrum of NaI(Tl)

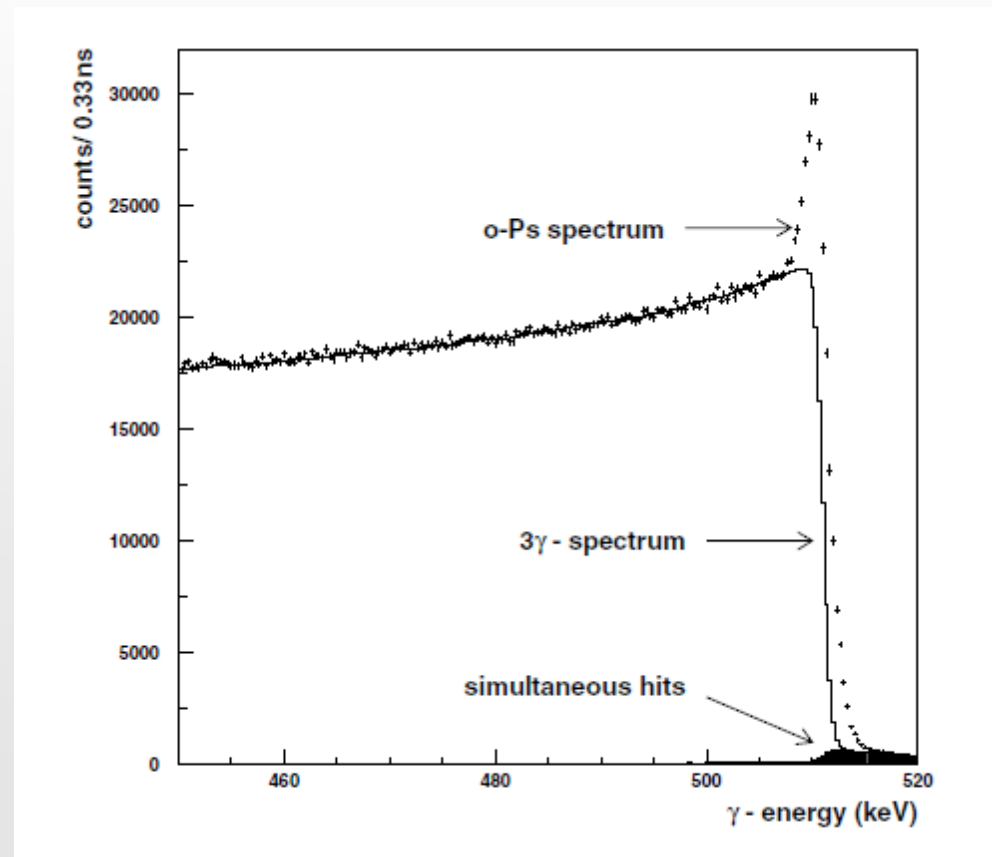


$$\lambda_{\text{obs}}(t) = \lambda_{3\gamma} + \lambda_{\text{pick}}(t)$$

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

時間情報 Pickoff

P_s生成からの時間情報を用いて、o-P_sとp-P_sの分離を行う。

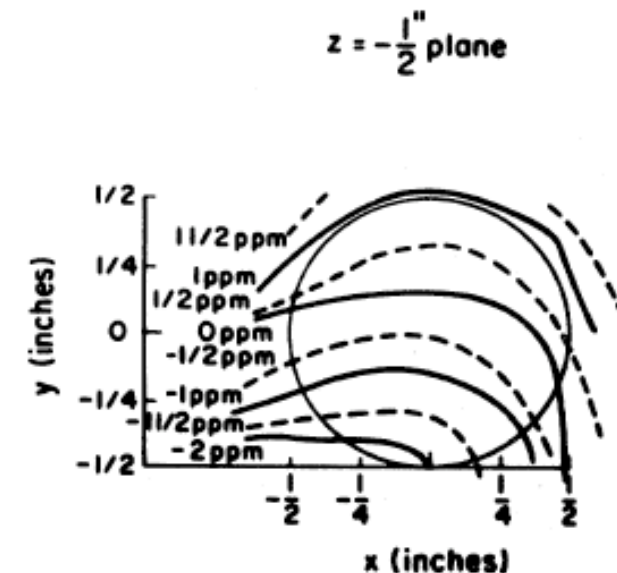
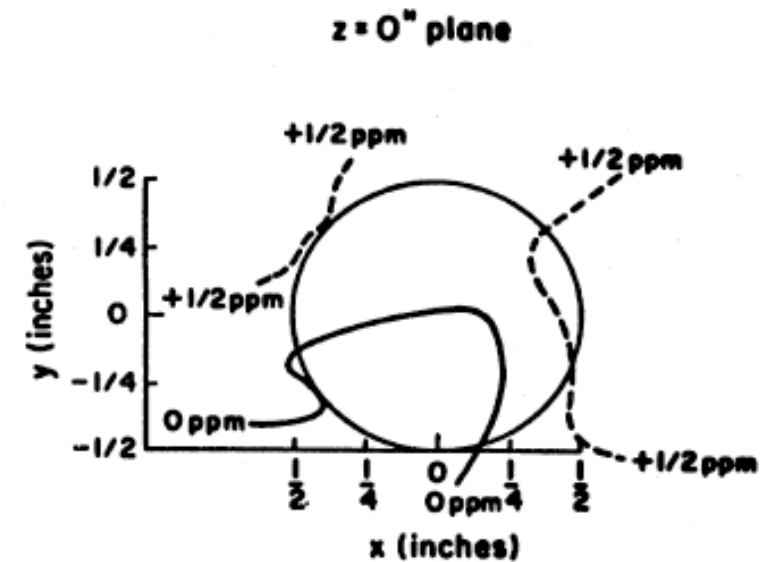


磁場の一様性の問題

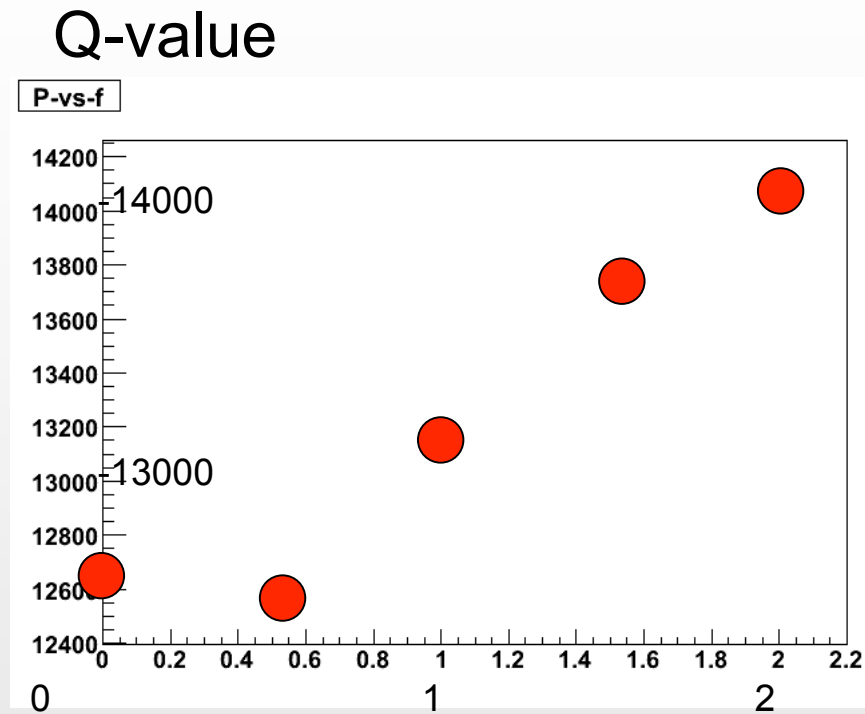
$$\Delta E' = \frac{1}{2} h \Delta \nu \left[\sqrt{1 + x^2} - 1 \right]$$

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

磁場の精度は直接HFSの
精度となる



Gas圧とQ値の範囲



N₂の圧力