

サブテラヘルツ波を用いた 束縛系QEDの精密検証

浅井祥仁（東京大学大学院・理学系研究科）

この実験は、

小林富雄・難波俊雄（東京大学・素粒子物理国際研究センター）

齋藤晴雄（東京大学大学院・総合文化研究科）

出原敏孝（福井大学・遠赤外領域開発センター）

と共同で行っています。

1 イン트로ダクション

[1-1] ポジトロニウムとは

[1-2] 超微細構造(Hyper Fine Split)

[1-3] 測定結果

[1-4] 何故 ずれを気にするのか？

[1]ポジトロニウム (Positronium: Ps) とは

一番軽い原子・分子は水素ではない！！



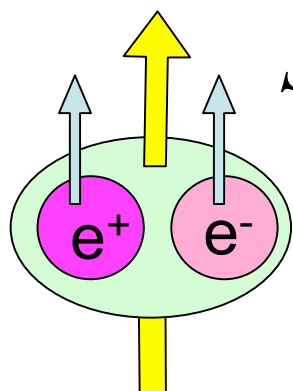
水素様原子で最も軽い原子:
質量 $2m_e = 1022 \text{ keV}$ (水素 $1/1000$)

電子と陽電子が作る”原子”

- レプトンだけの系: クリーン
綺麗な実験が出来る
- 電子・陽電子の系
粒子・反粒子対消滅
エネルギーを持った真空

- 量子電気学 (QED)、特に束縛系の研究に適している
エネルギー準位や寿命の精密測定
- 超高感度での”未知の素粒子現象の探索”にも適している
低エネルギー極限の e^+e^- コライダー

二つの状態

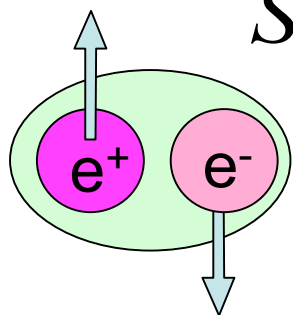


$$\vec{S} = 1 \text{ (三重項)}$$

オルソポジトロニウム o-Ps

Spin=1 光と同じ量子数

$\text{o-Ps} \rightarrow 3\gamma, (5\gamma)$

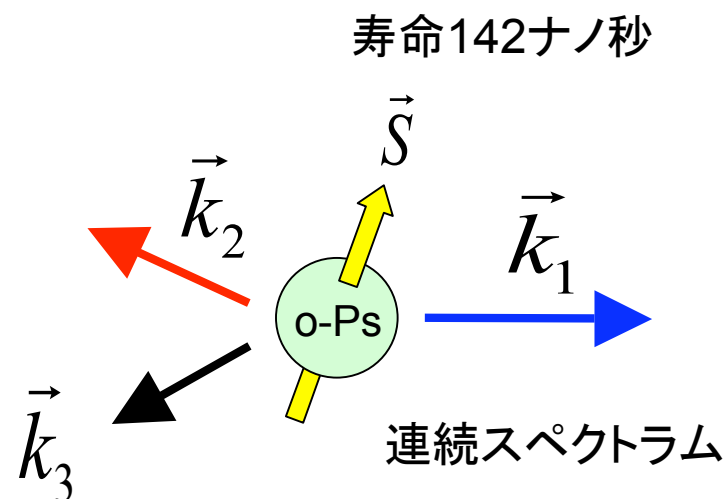


$$\vec{S} = 0 \text{ (一重項)}$$

パラポジトロニウム p-Ps

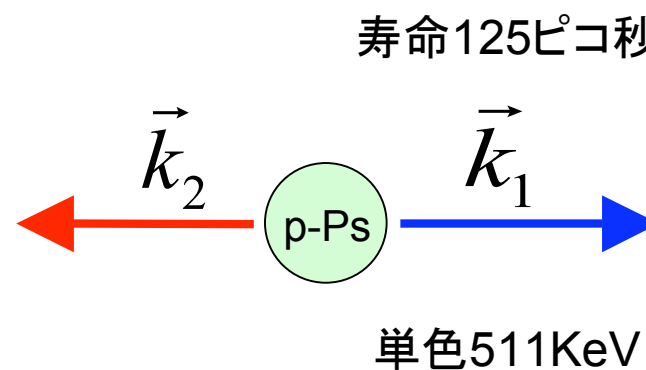
Spin=0 スカラー粒子

$\text{p-Ps} \rightarrow 2\gamma, (4\gamma)$



寿命142ナノ秒

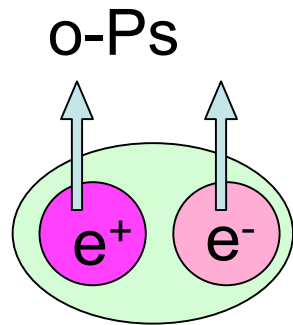
連続スペクトラム



寿命125ピコ秒

単色511KeV

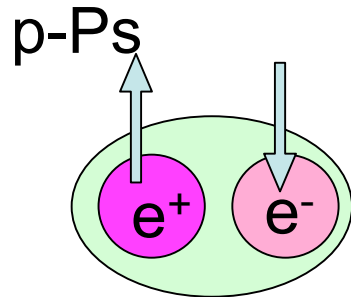
[2] 超微細構造 (Hyper Fine Split)について



磁気モーメント $\vec{\mu} = \frac{e}{2m} \vec{\sigma}$

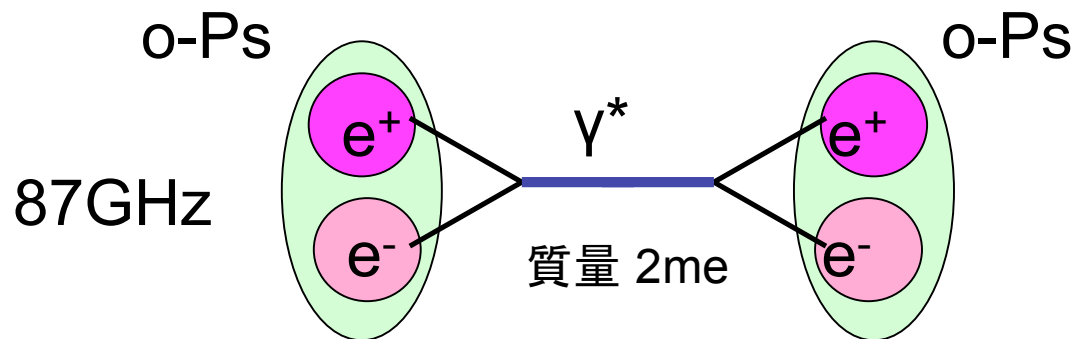
電荷が逆だから、スピンのそろった方が、磁石としては反平行になりエネルギー準位が高くなる。

$$E(o\text{-Ps}) > E(p\text{-Ps})$$



- mに反比例 ポジトロニウムでは大きい
水素原子 1.4GHz
ポジトロニウム 203GHz

- o-Ps 光と同じ量子数 仮想 γ 線に量子的に揺らいでいる



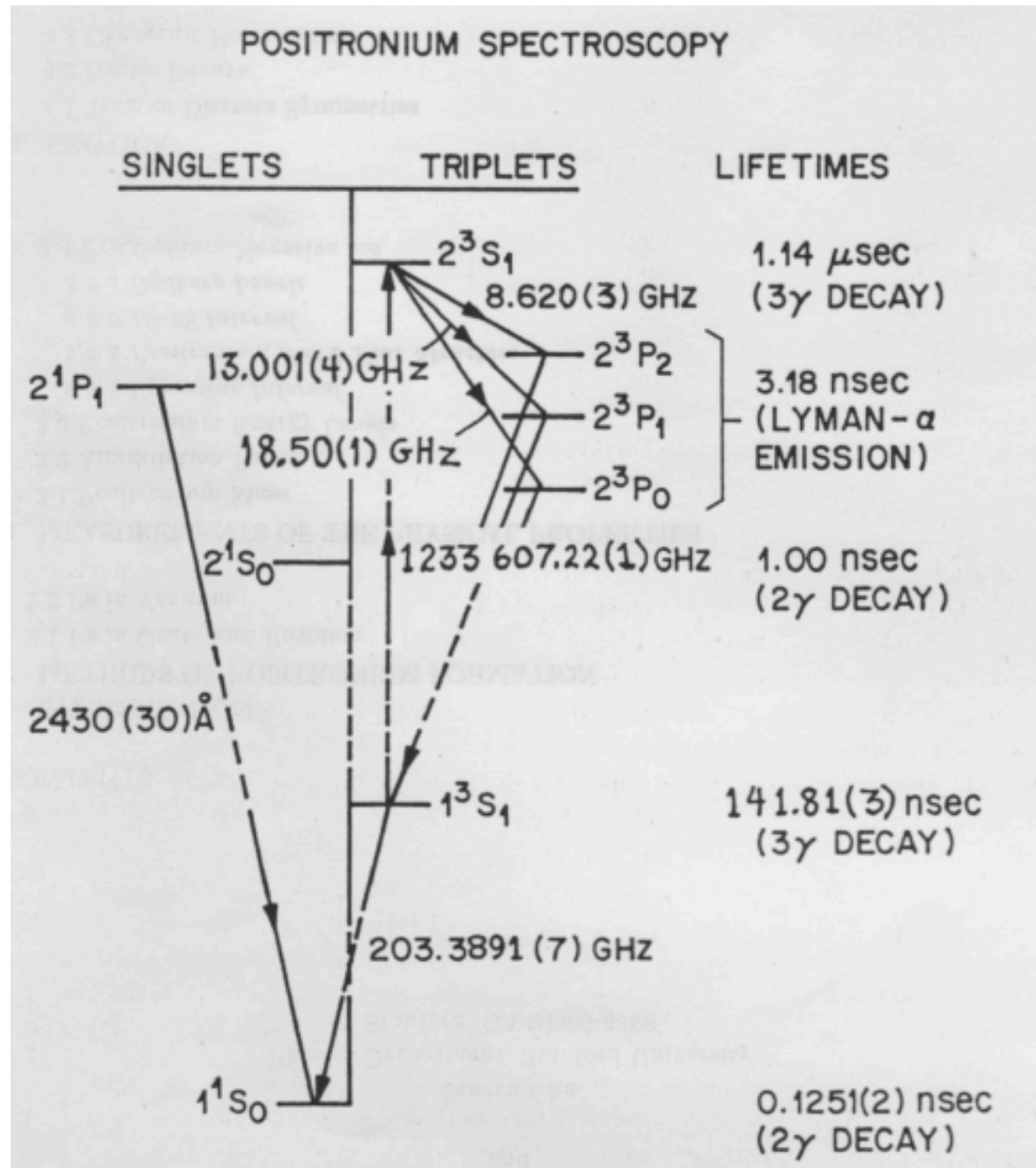
p-Psは量子数の関係でこの寄与がない。水素などのHFSにもこの寄与はない。
これはポジトロニウム HFSでしか観測できない効果(素粒子物理的に一番面白い効果)

エネルギー準位

多彩なレベルが
存在する

- n 軌道準位
 $E = -1/n^2$
- Spin-Orbit 相互作用
- Spin-spin 相互作用

それぞれの準位間の エネルギーや寿命の 精密測定



[3] HFSの測定結果

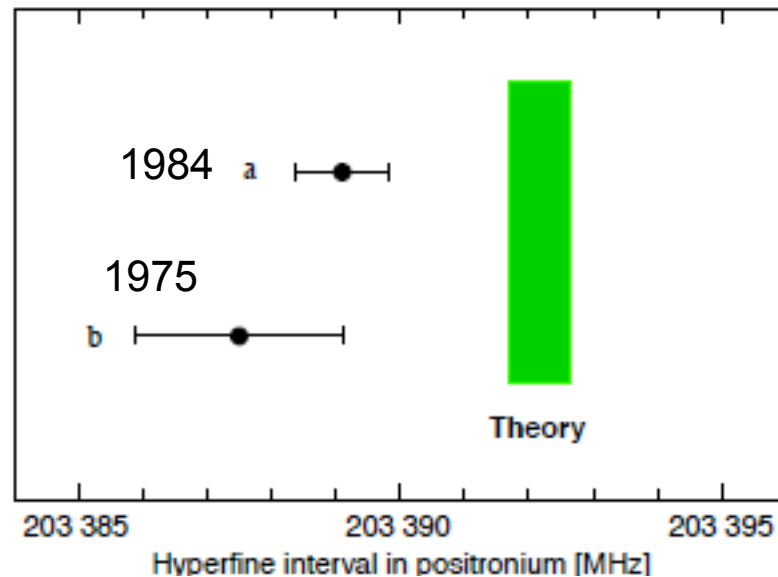


Table 13
Theory of the 1S hyperfine interval in positronium

Term		Fractional contribution	ΔE (MHz)	References
E_F	$\alpha^4 mc^2$	1.000 000 0	204 386.6	
QED1	$\alpha^5 mc^2$	-0.004 919 6	-1 005.5	
QED2	$\alpha^6 mc^2$	0.000 057 7	11.8	[184]
QED3	$\alpha^7 mc^2$	-0.000 006 1(22)	-1.2(6)	[61,149,150,185]
Total		0.995 132 1(22)	203 391.7(6)	

実験値: 203 389.10(74)MHz
(精度 3.6ppm)

理論値: 203 391.7(6) MHz

約3.5 σ 程度のずれ

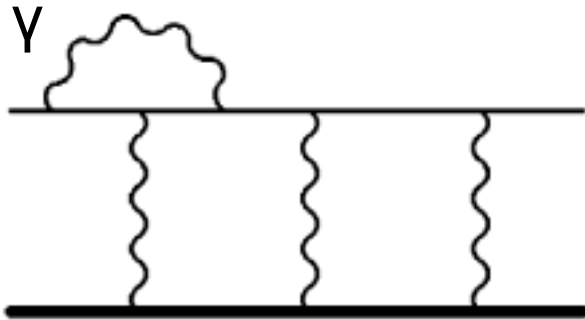
昔は予言精度が悪くて10MHz(50ppm)くらい誤差があり、実験よりかなり精度が悪かった

2000年前後に束縛系の高次効果(2次以上)の計算方法が理解されはじめた。
(束縛系の物理: 最近の物理)

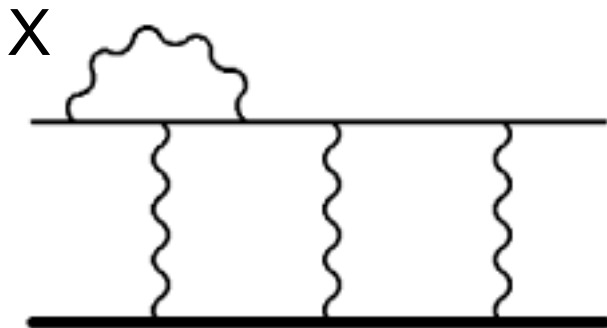
[4] 「なぜ細かいことを気にするか？」

「a few ppmレベルのずれを気にするのか？ 偏執狂？」

ズレ：未知の素粒子現象が寄与している可能性



精密に測定することで
この様な高次効果の補正を見ている
(輻射補正)
交換する粒子はknownである。



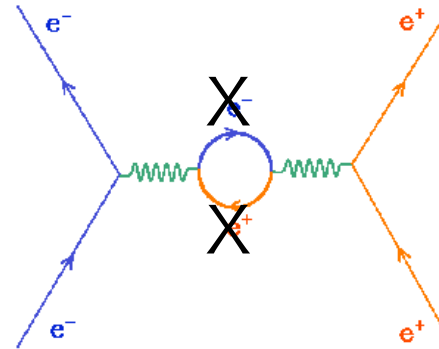
もし知らない未知の粒子(X)が存在したら、
同様に補正ダイアグラムに寄与する。

量子力学: “全ての状態の和”

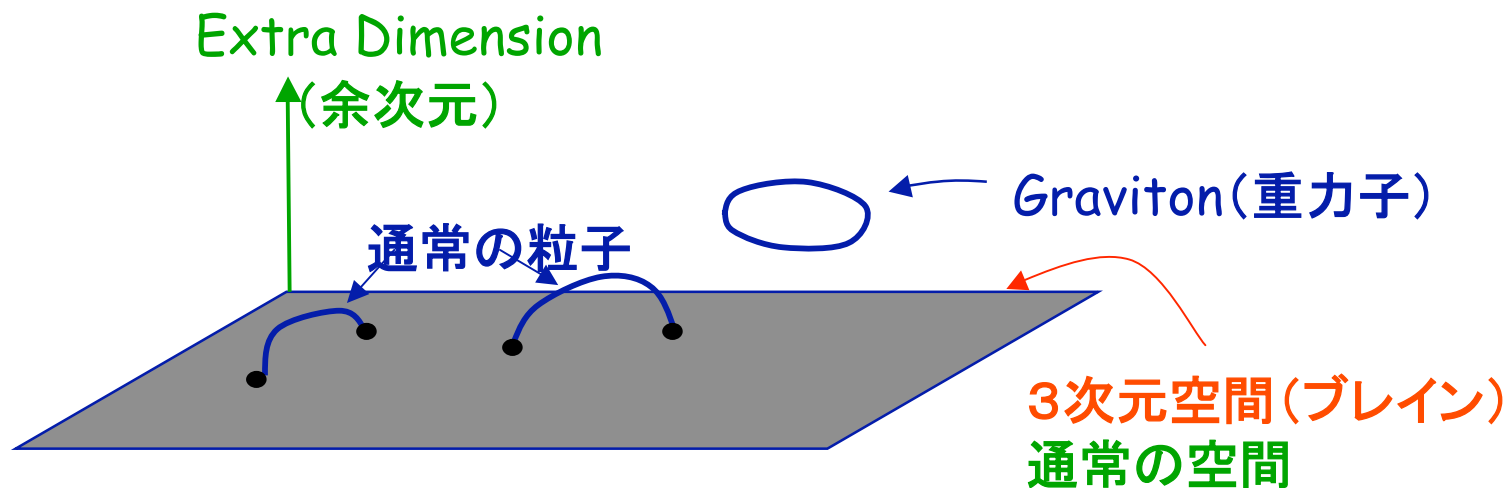
実験値と計算値の”ずれ”を探ることで、
X等の新しい物理を探ることが出来る。

素粒子物理としてo-Psだけ効く「真空振動(87GHz)」が
とくに面白い。(ズレは、これらnew Physics の信号の可能性?)

- 未知の重い粒子のループ効果

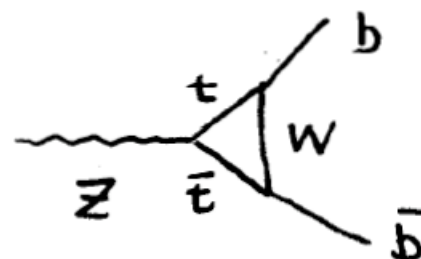
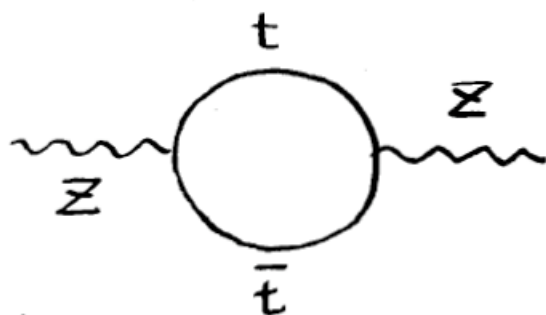


- 未知の軽く、相互作用の極めて弱い反応の粒子の効果
axion, Millicharged など
- 余剰次元の効果があると、この状態は影響を受ける

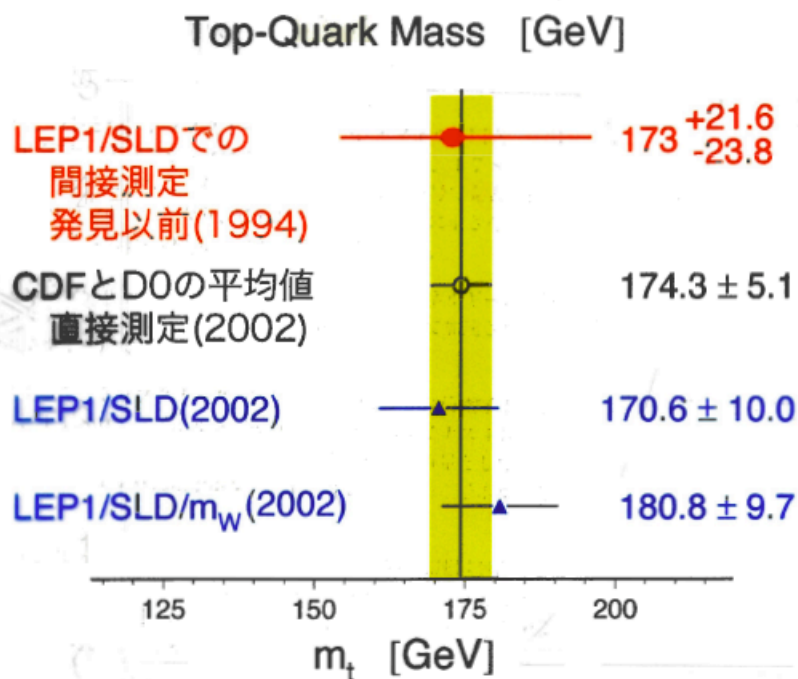


「また夢みないなことを言っている」と思われるかと思いますが、

(論より証拠) トップ・クォークの予言: 重くて直接見えていなくても



このような効果を及ぼす



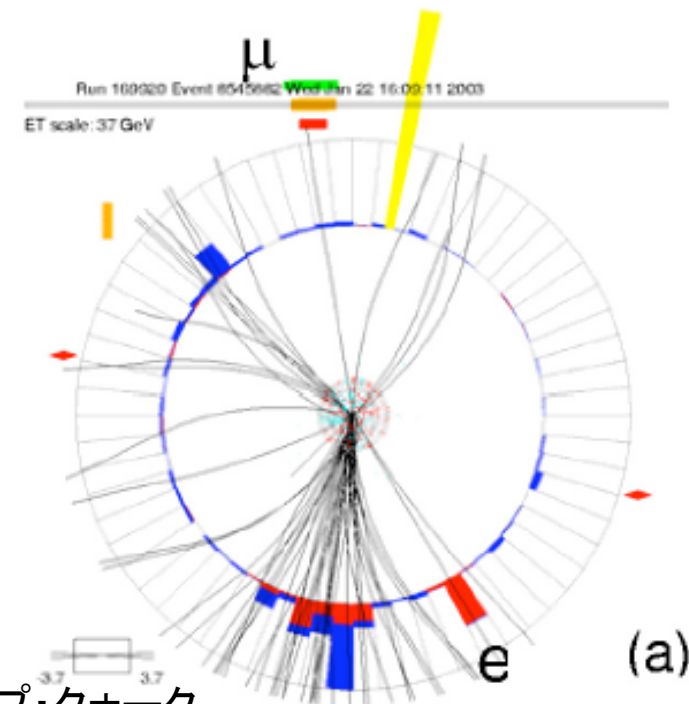
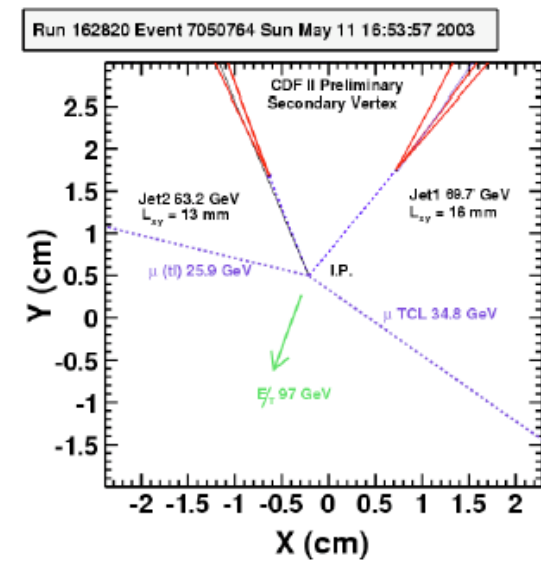
Z粒子の性質(質量・結合)を高い精度でことで、存在やその質量を予言

1994年に発見: 直接測った質量と一致:

その輻射補正は、精度は、別のW粒子の性質を加えてますます一致している。

1994 アメリカ・シカゴ郊外フェルミ研究所 トップ・クォークの(再)発見

テバトロン加速器:
(円周6km 大型加速器)



直接、生成されたトップ・クォーク

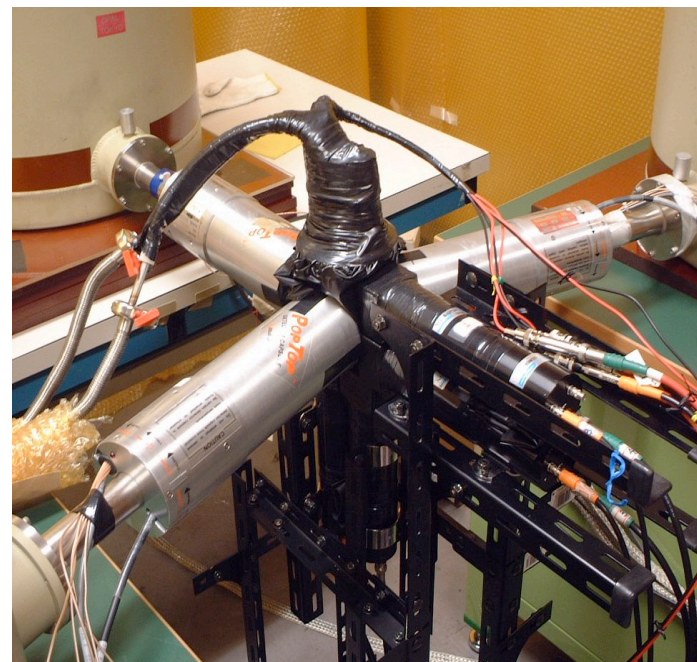
この様に、精密測定は**未知の素粒子現象**を量子力学の効果で
探る有力な手段である。(加速器実験と「車の両輪」をなす)

直接重い粒子を叩き出す
最先端の加速器実験



世界最高エネルギー加速器実験(LHC) 円周27km

精密測定を通して間接的に
新しい現象を探る



テーブルサイズの小型だが超高精度

2 HFSの過去の測定

[2-1] 過去の測定方法

[2-2] 系統誤差Ⅰ（熱化）

[2-3] 系統誤差Ⅱ（磁場）

[1] 過去のHFS測定実験を吟味

直接HFSを測定しているわけではない。

ゼーマン効果

静磁場(z方向)をかけると

S=1 $m_z=\pm 1$ の状態は

磁場(光子)と反応しない

$$\tilde{\mathcal{H}}_0 = \tilde{H}_0 + \frac{1}{2}g'\mu_B B_0(\sigma_z^- - \sigma_z^+)$$

一方、S=1 ($m_z=0$)の状態と

S=0 ($m_z=0$)は磁場と反応して

混合する。

この部分に対角化する。

シフト分は、もとのenergyの差

$\Delta=E_1-E_0$ すなわちHFSに

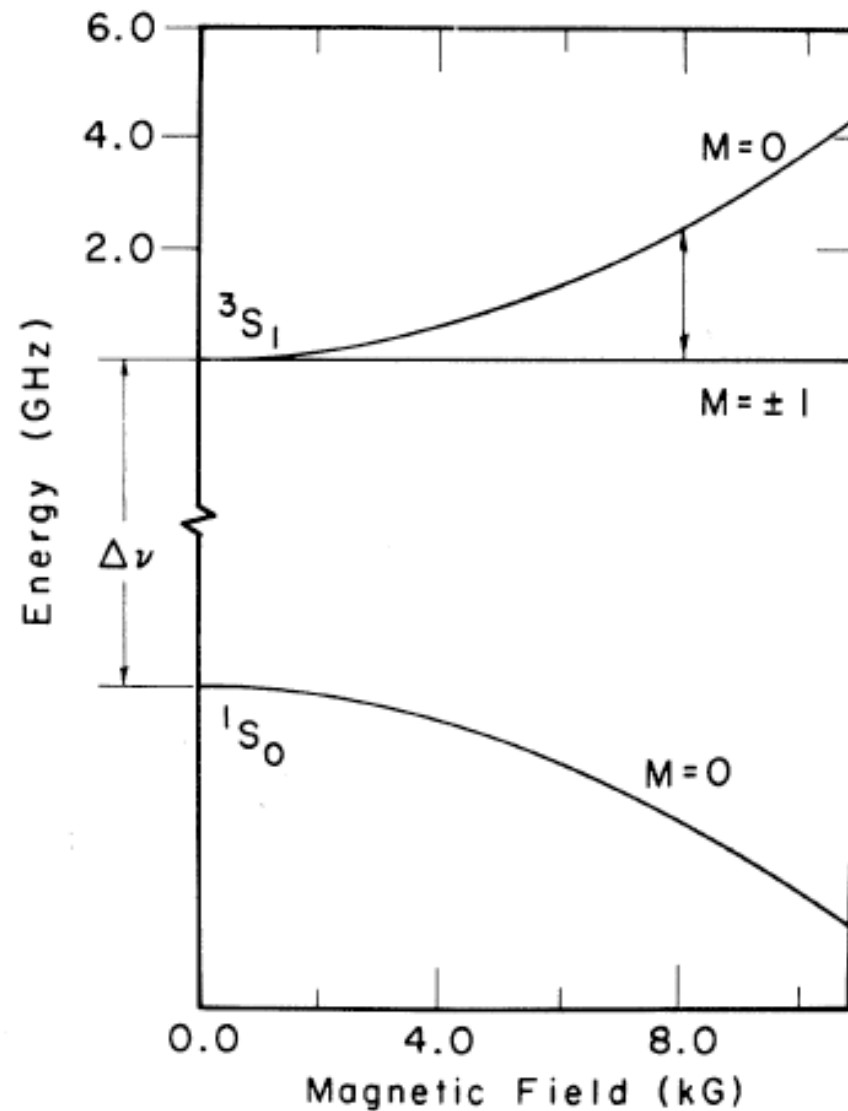
比例する

$$E' = \frac{1}{2}(E_1 + E_0) \pm \frac{1}{2}\Delta\sqrt{1+x^2}$$

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

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

約7.8kGの静磁場で S=1 共鳴周波数 2.3GHz



S=1の $M_z=0$ と ± 1 の差

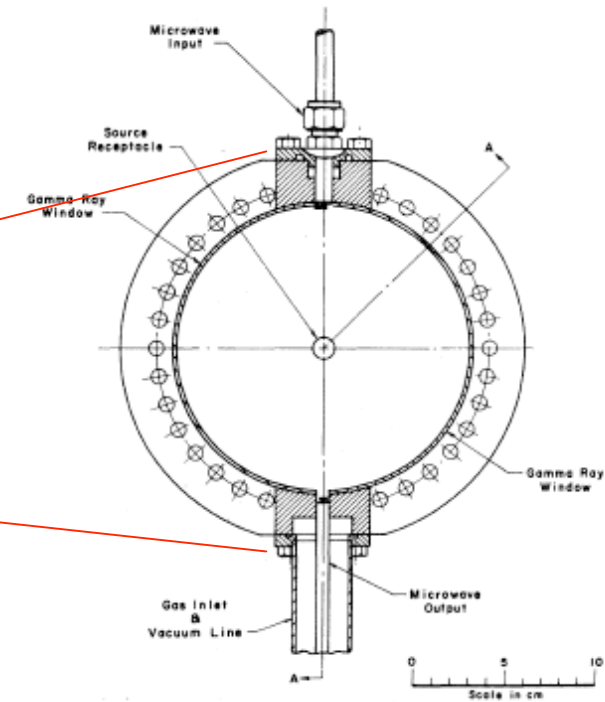
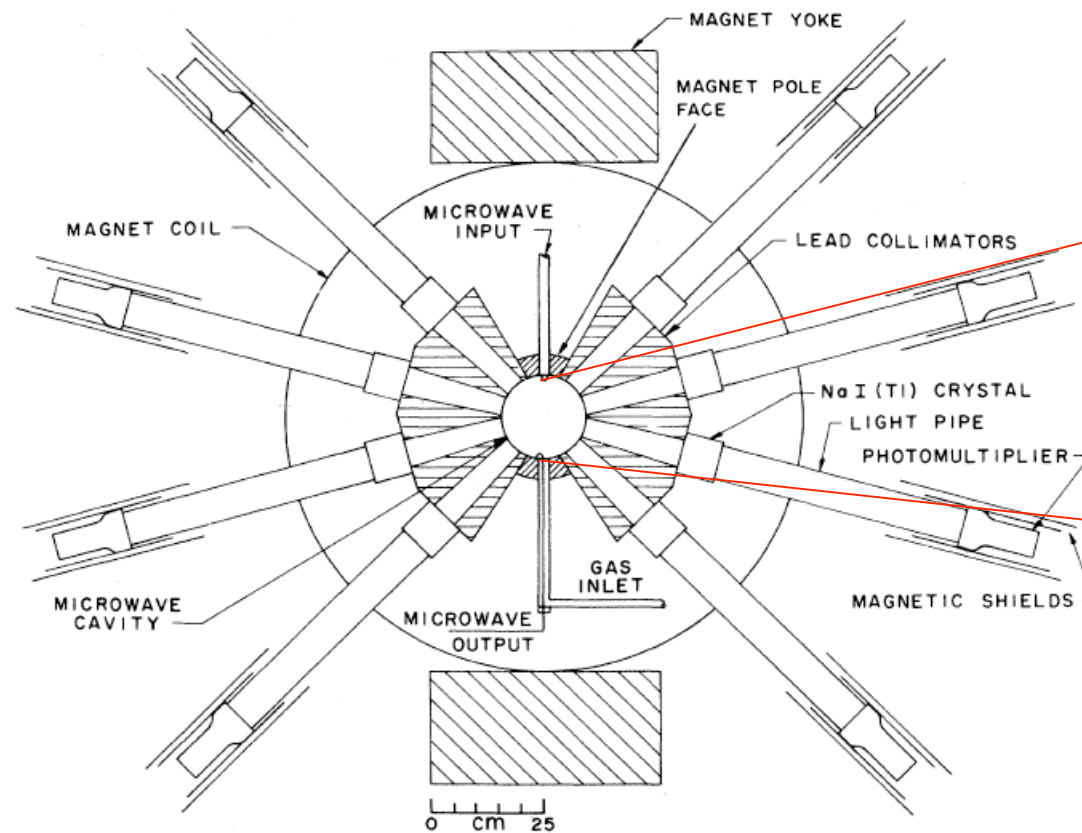
$$\Delta E' = \frac{1}{2} \Delta \left[\sqrt{1 + x^2} - 1 \right]$$

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

S=1(o-Ps) $m_z=\pm 1$ の成分は、
 142nsecと長寿命なので
 ふらふらしている。
 そこへ共鳴RF($\Delta E'$)を加えると
 S=1 $m_z=0$ へ遷移
 この状態は静磁場の効果で
 S=0(p-Ps)と混合しているので
 2 γ へすぐに崩壊する。
 単色511keV γ 線がback-to-backに放出される。
 $\Delta E'$ をもとめ、磁場から Δ を出す

紙面方向に $B=7.8\text{kG}$

2.3GHz RFをキャビティーに入れる



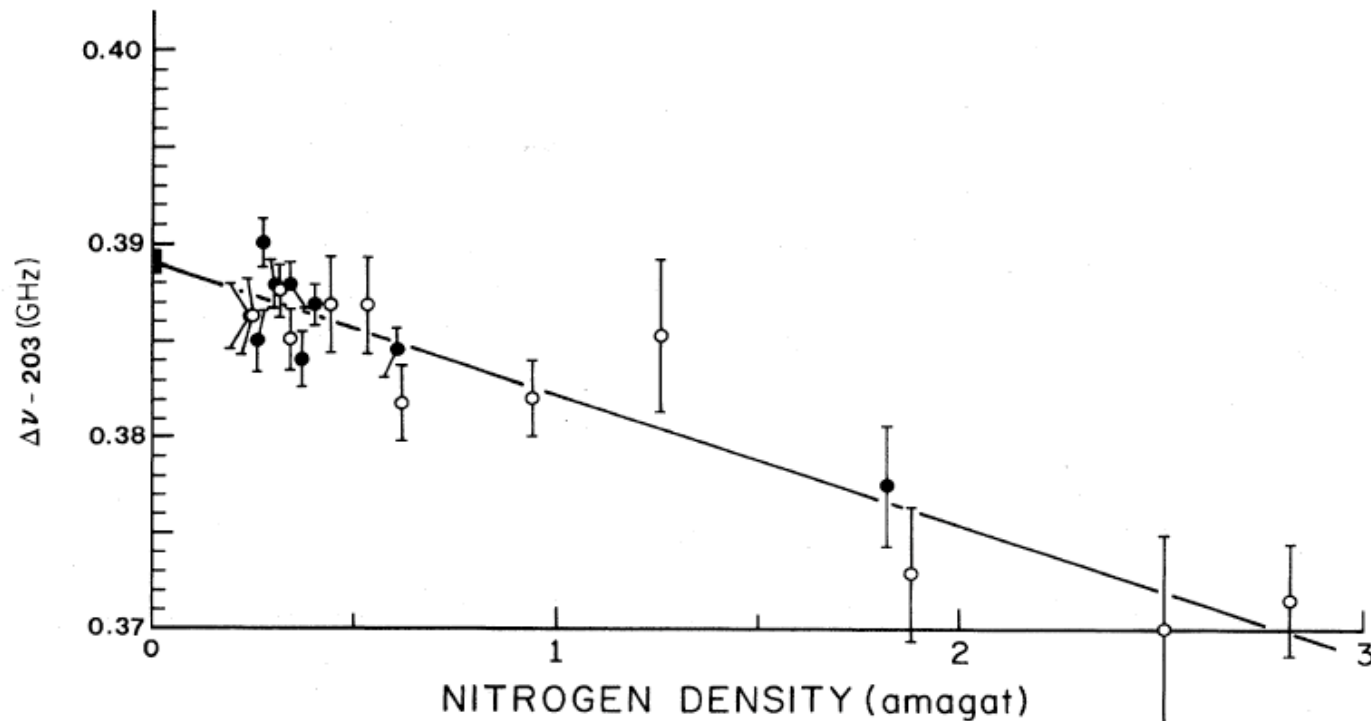
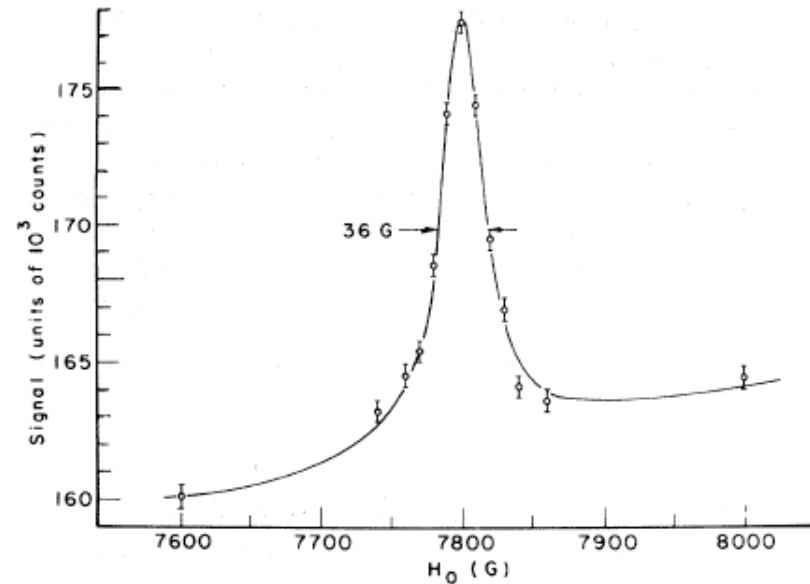
2 γ back-to-backを
2対のNaIで捉える。

TM110:紙面内
 $Q=6000-10000$ (銅製)

$^{22}\text{Na}\beta^+$ 線源+ガス
これでポジトロニウムを作る

高周波をfixして磁場を変化、
 2γ へ行く割合が5%ほど増加
 (共鳴 $\Delta E'$ を求める)

物質の効果を外挿で評価する。
 物質(ガス)はPsを作る上で
 不可欠だが、出来たあとは、BGとなる。
 衝突やまわりの電場がHFSをずらす。
 評価するため、外挿: 圧力を横軸 $P \rightarrow 0$



[2] 系統誤差I ポジトロニウム熱化問題

物質(ガスや SiO_2)は、電子供給源として不可欠だが、生成後Ps実験のバックグラウンドとなる。ぶつかって、Pickoff (2体崩壊)や電場:シュタルク効果

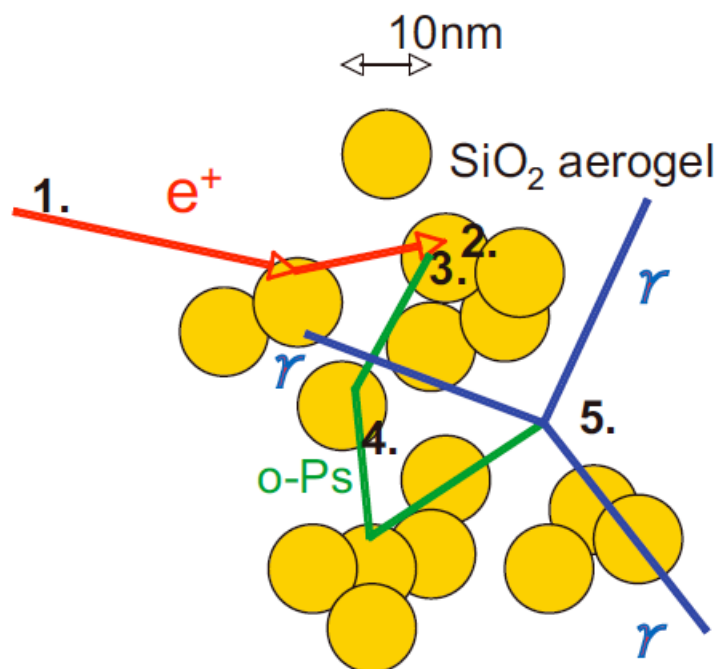
物質との衝突回数や、どのくらい物質付近に滞在しているか？

これが圧力だけで評価できるか？

出来た直後のPs $E_{\text{kin}} = 0$ (eV)

物質と衝突を繰り返しながら常温 (1/30 eV) に熱化する。

物質の効果 ~ 衝突頻度 $\neq$ 密度 (もし熱化していないと)



特に密度を低くして衝突頻度が低くなると、熱化しにくくなる。

「気体分子の原子振動モードや、 SiO_2 振動モードを励起して、たちまちのうちにエネルギーを失い、熱化する」と期待していた。

(昔の人は)

HFSのズレは最近の問題ですが、1980年代、「o-Psの寿命問題」

o-Ps $\rightarrow$ 3 γ への寿命測定が
1000ppmずれていた。(5-7 σ)
実測寿命の方が短くなっていた。
(新しい素粒子現象に起因するモード
が寄与??)
「o-Ps寿命問題」と呼ばれていた。

ドブロイ波長考えてみると、
eVエネルギーだと分子全体が見えて
細かな振動を励起できない。
熱化に時間がかかる。
これが系統誤差なのでは？

この系統誤差を指摘し、
全く新しい測定方法を提案：
外挿でなく直接物質の効果を
補正する方法

94年物理学会誌より

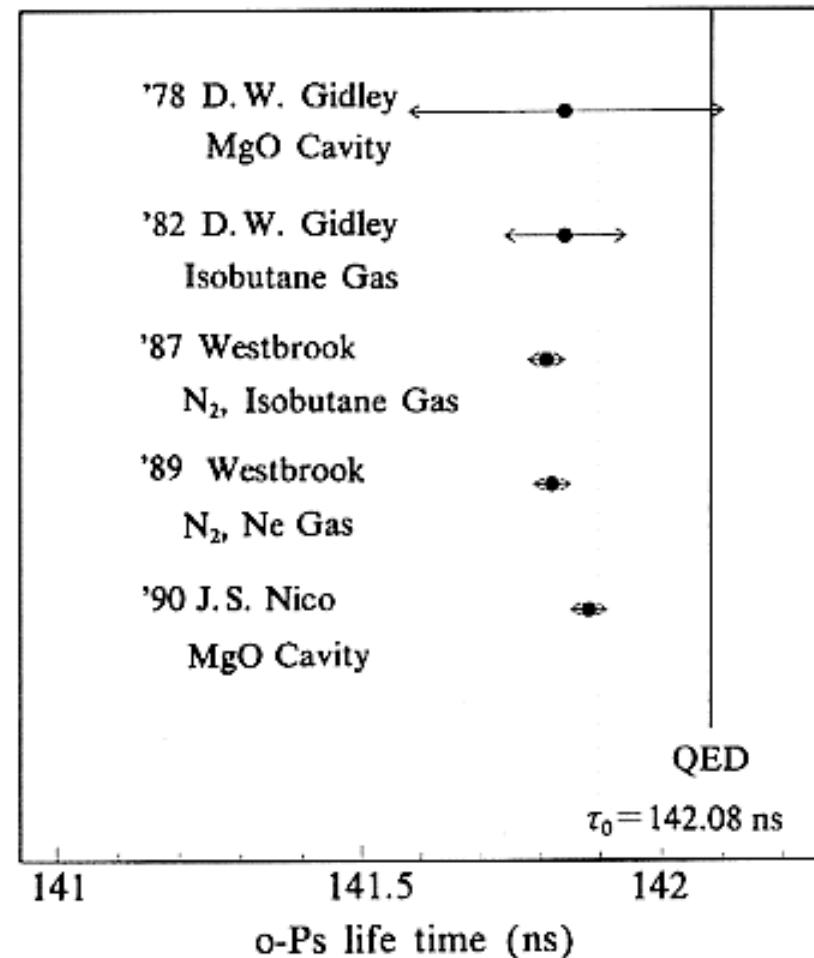
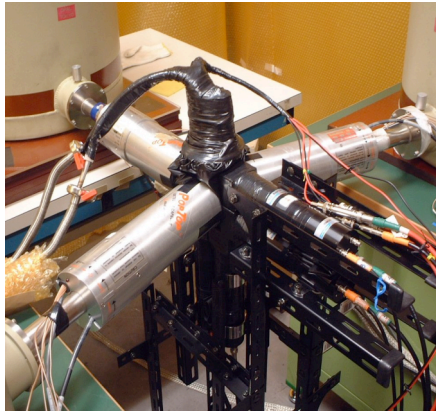
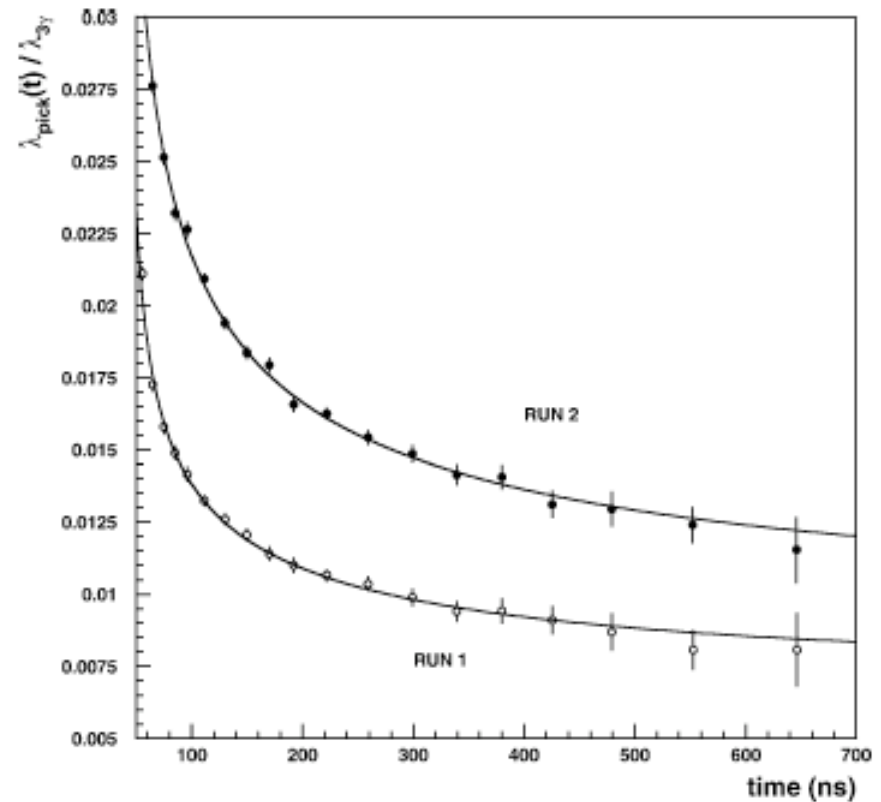
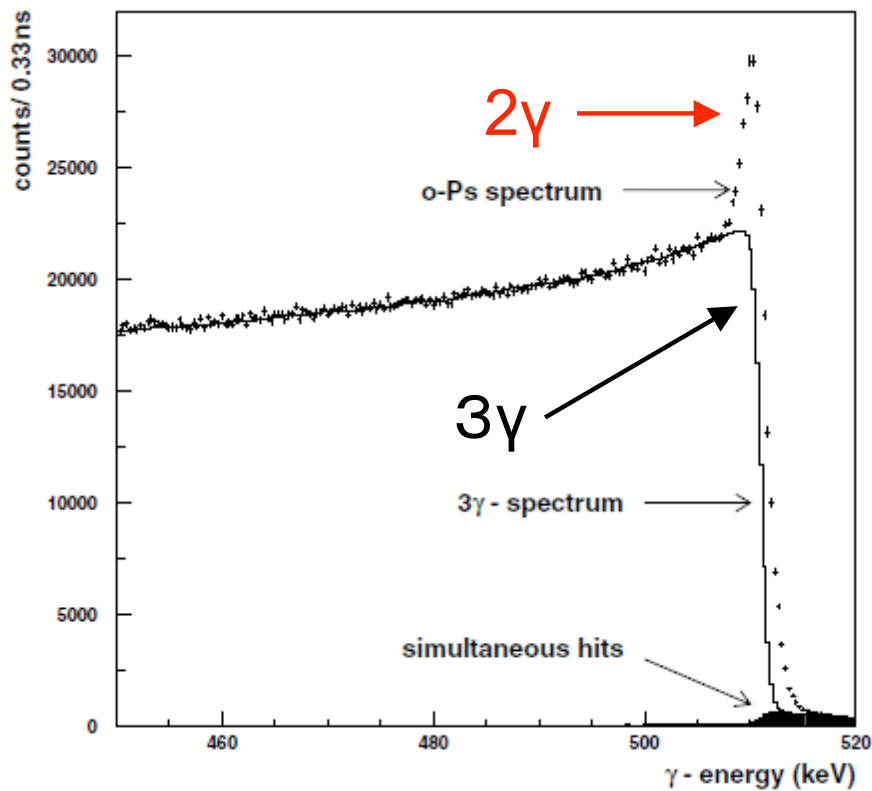


図1 オルソポジトロニウムの寿命測定の世界。



高いエネルギー分解能の半導体検出器で
物質効果: pickoff(2γ) 反応した事象を識別する。
その割合を、ポジトロニウムが生成してからの
時間を同時に測定する。
非常にゆっくり熱化していることが分かった。
物質の効果をマクロな量でなく、ミクロな直接評価



半導体検出器で見たガンマ線のエネルギー

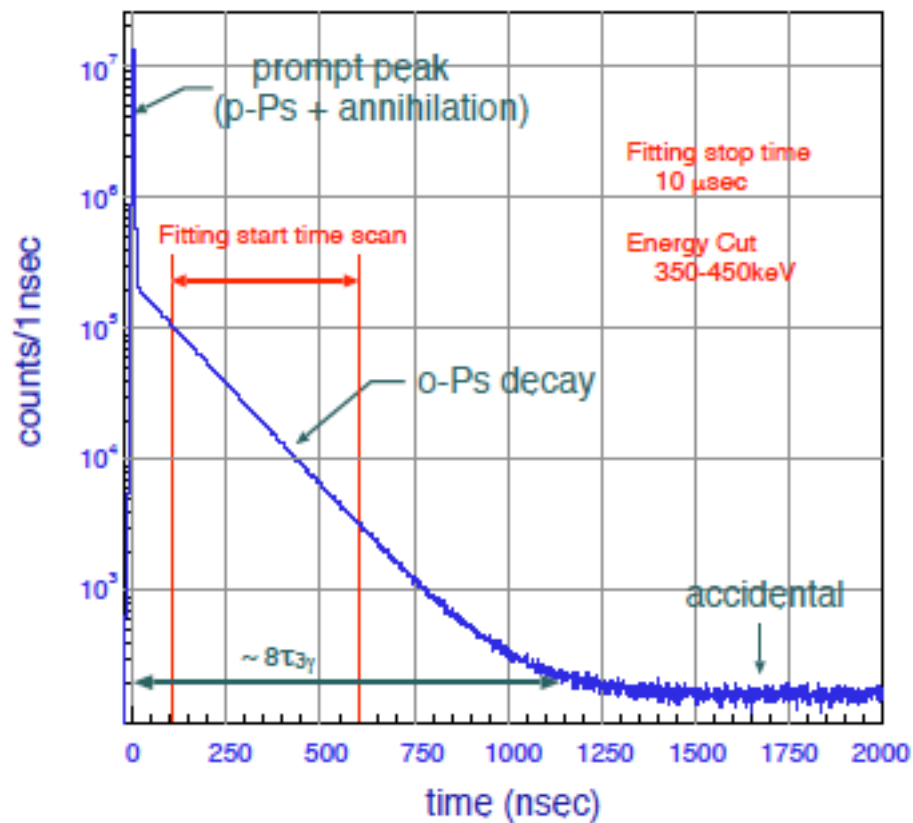
生成してからの時間

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

観測された時間スペクトラム

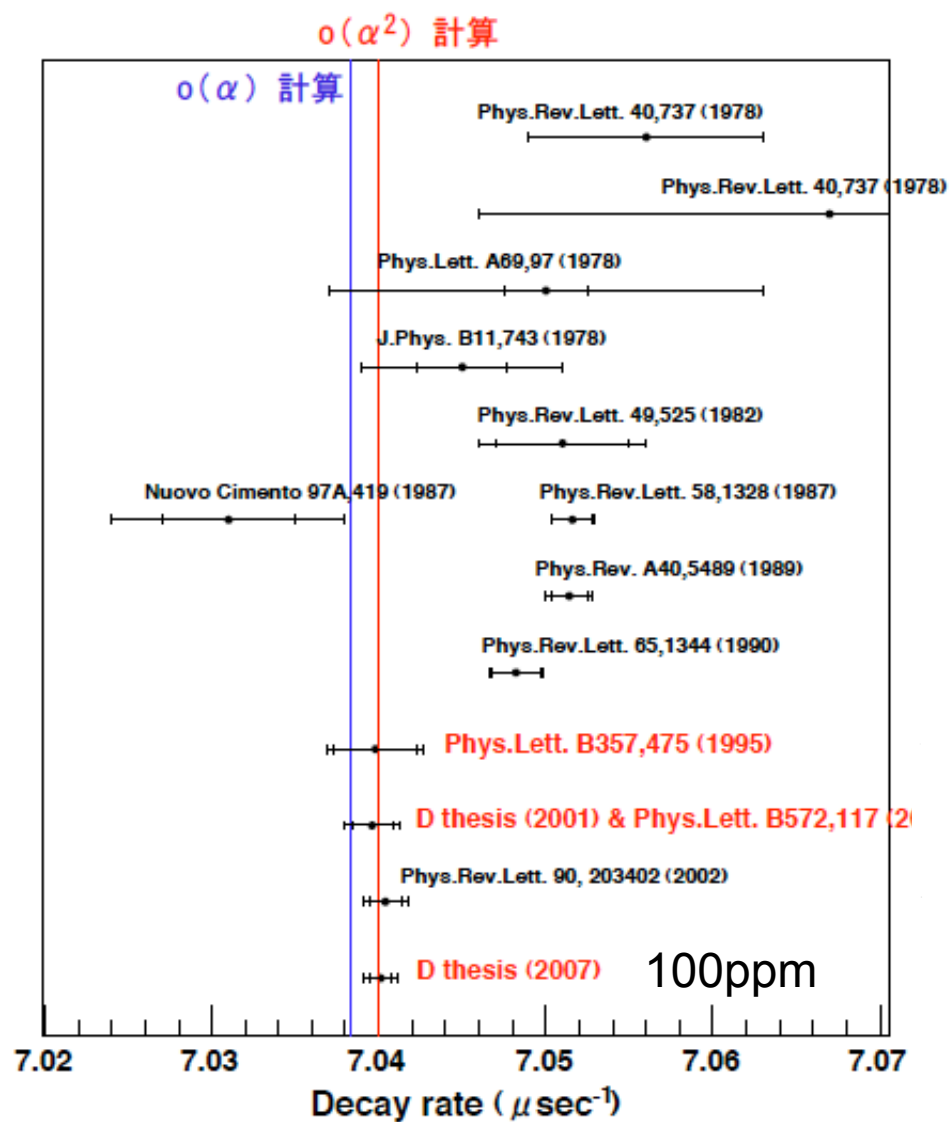
$$N(t) = N_0 \exp \left(-\lambda_{3\gamma} \int_0^t \left(1 + \frac{\lambda_{\text{pick}}(t')}{\lambda_{3\gamma}} \right) dt' \right)$$

Time spectrum of NaI(Tl)



物質の効果は、
直接測る。

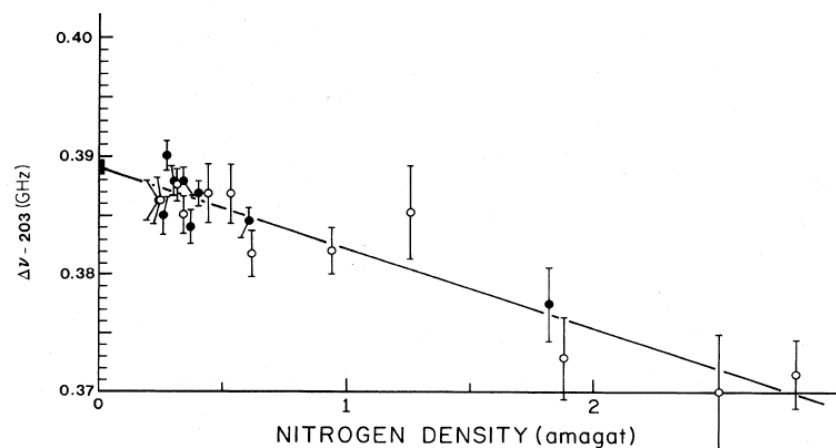
この方法で寿命を測定



崩壊率(寿命の逆数)

赤字: 我々の新しい方法の結果
最近計算された2次の補正と無矛盾

熱化は遅い: 励起出来るモードが限られている。ただの外挿は駄目
低密度になると速度が速いままなので密度以上に物質の効果が大きい。



HFSにも同様の系統誤差になりうる。

[2] 系統誤差II 磁場の精度と一様性問題

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

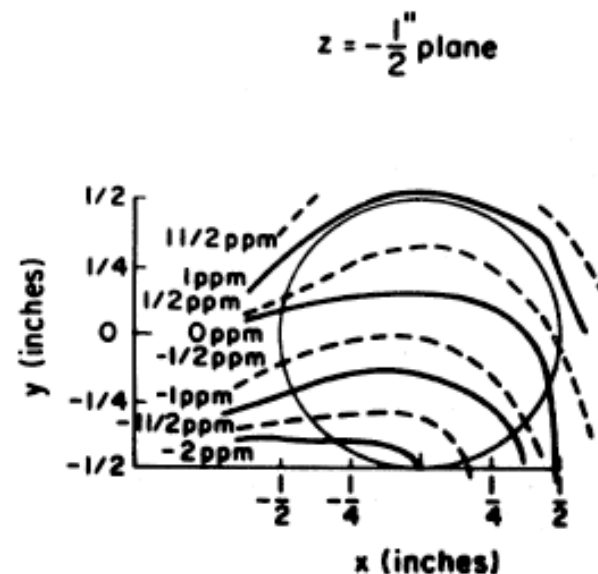
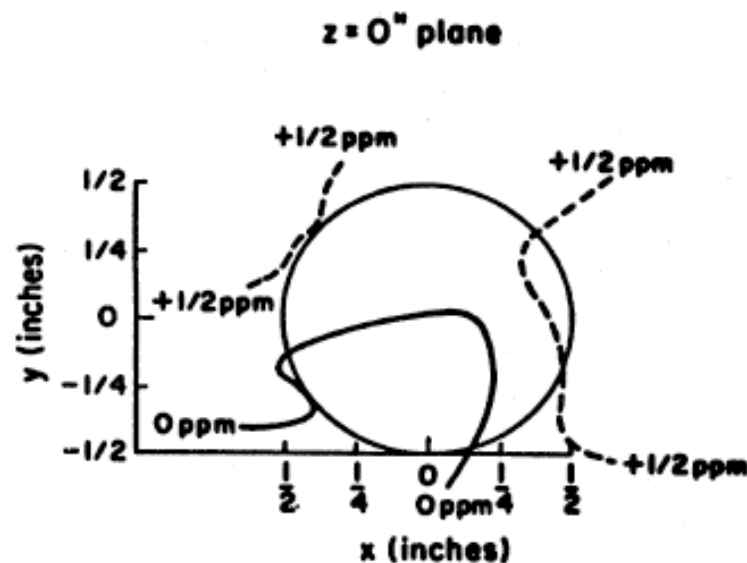
$$x = 2g\mu_0 H_0 / \Delta$$

磁場の精度がそのまま、HFS測定精度
磁場の絶対値や一様性
(ホジトロニウムが生成される場所は
数cm程度の広がりがある)

過去の実験: この系統誤差が最大の問題
5ppm程度 非一様性があり
補正をかけている。

物質入れたり、圧力変えたり
安定性など、??

磁場を本当に理解できているのか？



3 サブテラヘルツを用いた 直接測定のプロ案

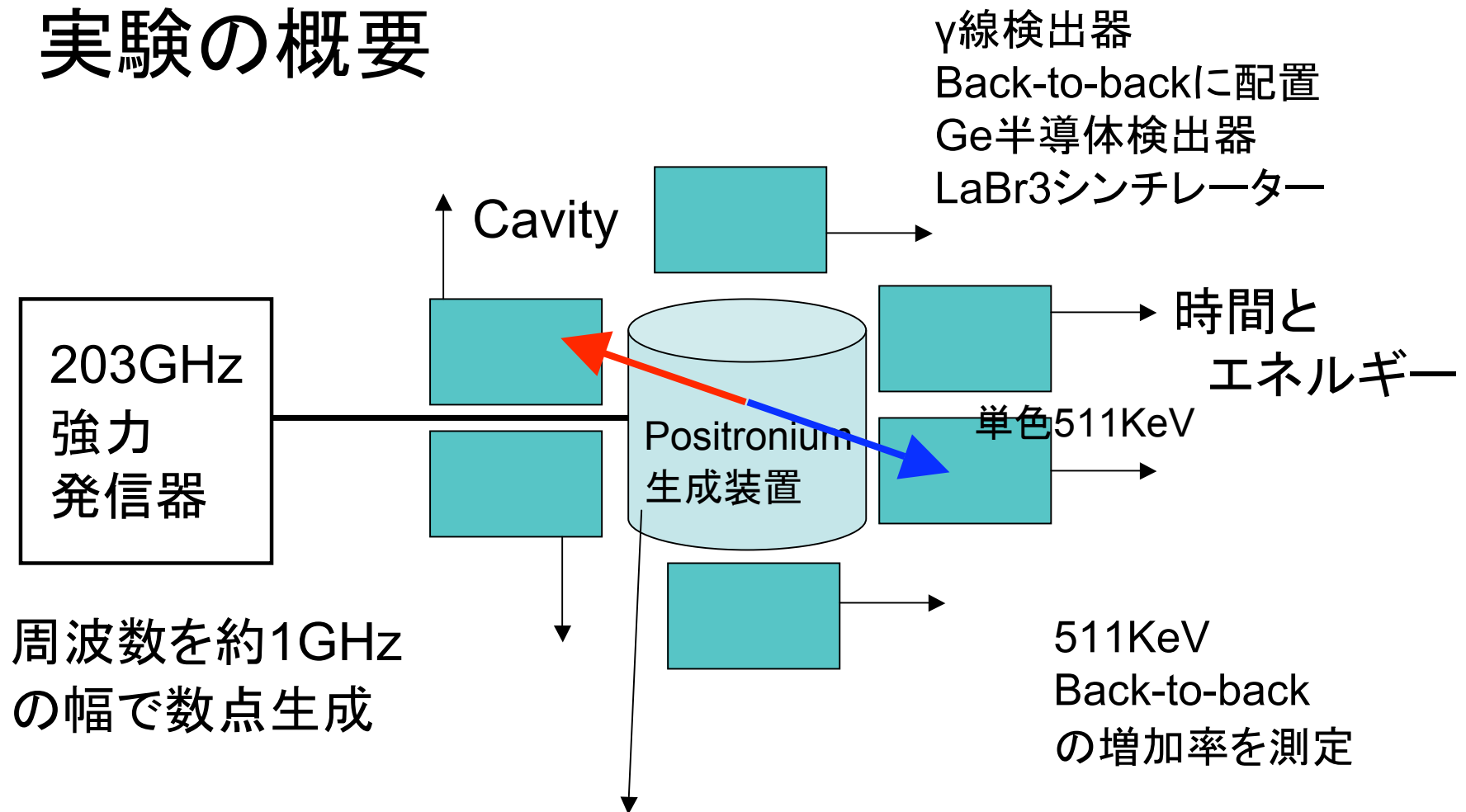
過去の測定に共通の系統誤差を解消し、
新しい方法で測定をおこなう

(1)ズレが本物か否か？

→ 標準理論を超えた新しい物理現象の可能性

(2)より高い精度 $O(1)$ ppmを目指す

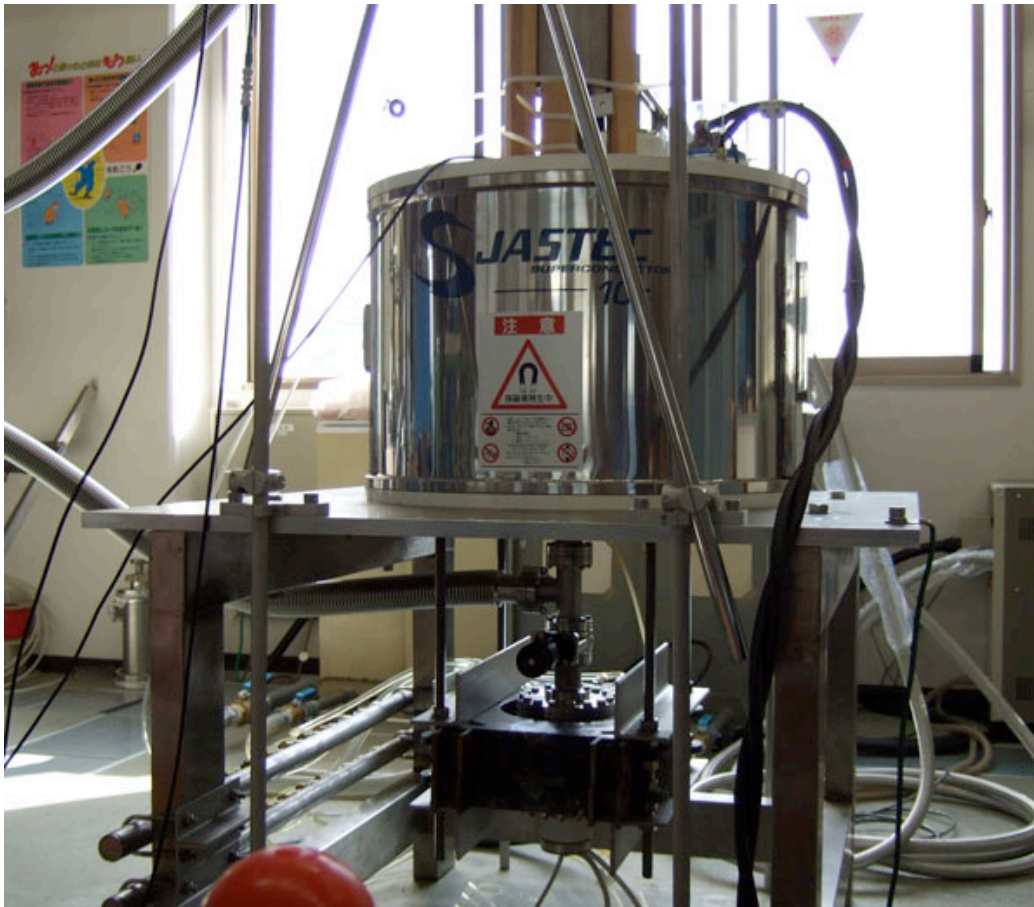
実験の概要



t=0 陽電子放出時間
電子回路のトリガー t>10nsec p-Psはいなくなる。
o-Psだけ、ふらふらしている。ここへ、203GHzのRF
誘導放射でp-Ps stateへ

[1] 203GHz発生装置

ゼーマン効果をみるのではなく、“直接遷移”を測る。(ミリ波:初めて)
これにより磁場に起因する不定性を除くことが可能になる。

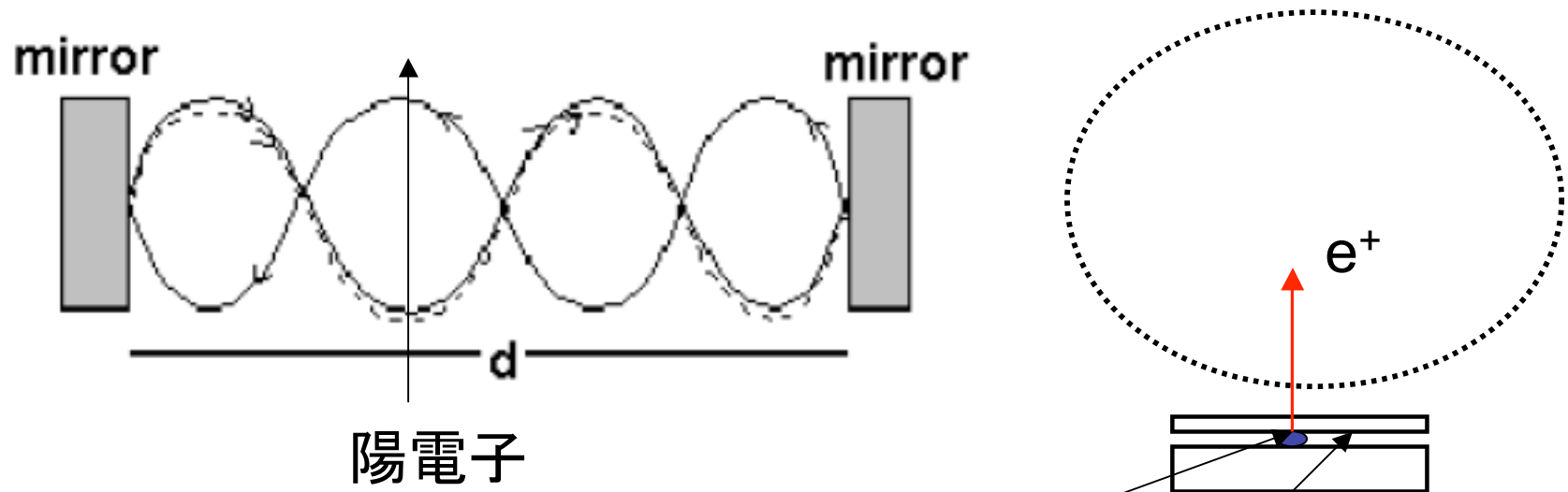


強力 > 100 W
可変 : 203+-1GHz
安定 < 1ppm
連続 CW

福井大学・
遠赤外領域研究センター
出原先生
ジャイロトン: FU CWシリーズ
に新しい性能の追求をお願い

[2] 203GHz $Q=6000-10000$ キャビティ

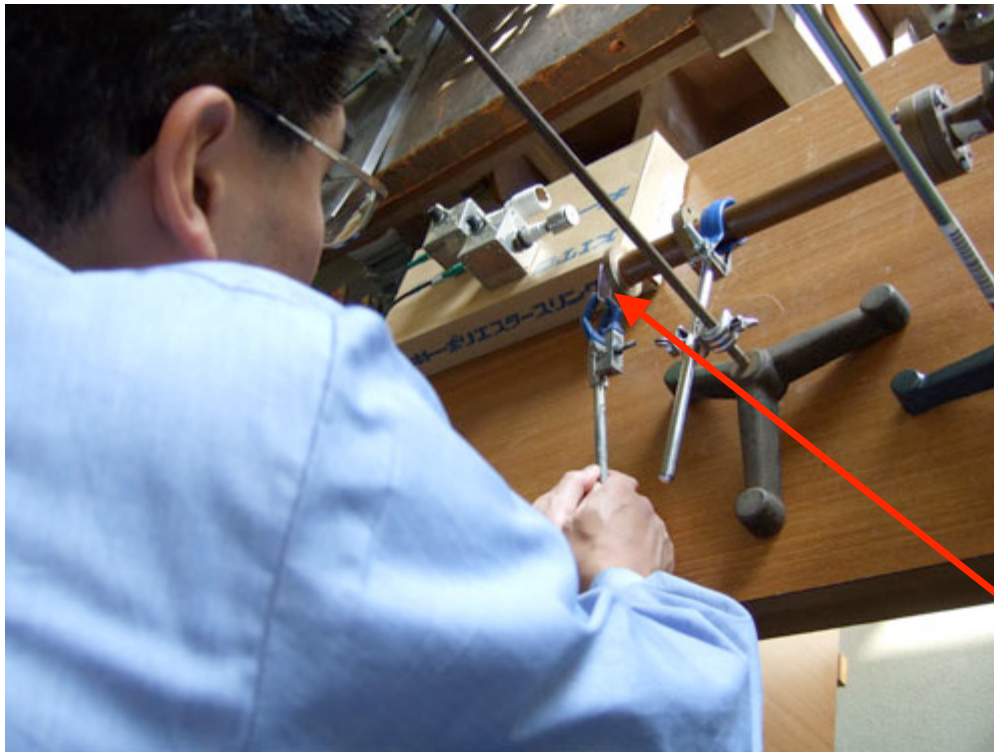
波長が1.5mmで
約 $d=5\text{cm}$ ほどのFabry-Perot型共振器を考えている
($203\pm 1\text{GHz}$ で数点測定する: Q の波長依存性)



^{22}Na (陽電子線源) 1MBqくらい
100ミクロン厚さ プラスチックシンチレーター ($t=0$)
これでPsが出来てからの時間を測定し、熱化を制御
ガスかシリカエアロジェルでpositroniumを作る

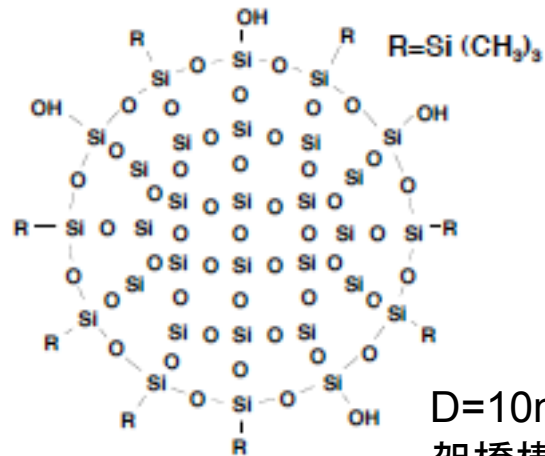
プラスチックシンチレーター：
節の電波強度弱いところになるべく物質をおくようにする。
ただし、吸収がおこるとQが悪くなる。

* * 400GHz 100W（福井大学：ジャイロトロン） 加熱してみました * *



Plastic シンチレーター
NE102

Positronium を作る。 密度0.03g/cc SiO_2



D=10nmくらいの構造
架橋構造: 多くの自由空間

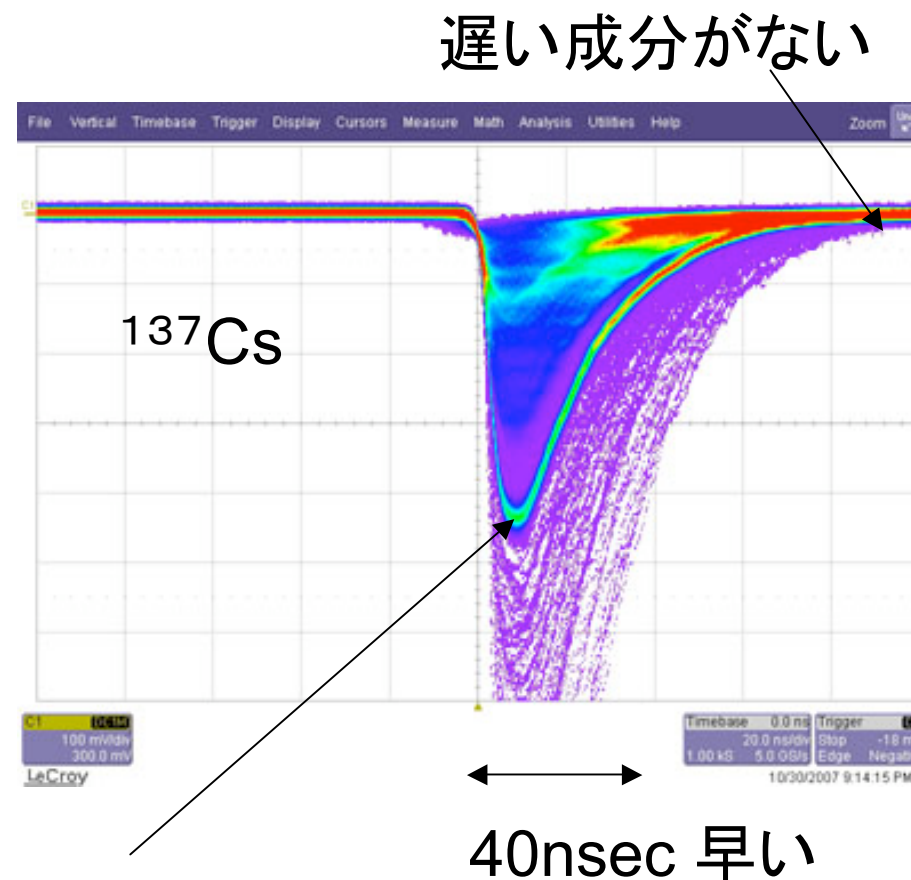
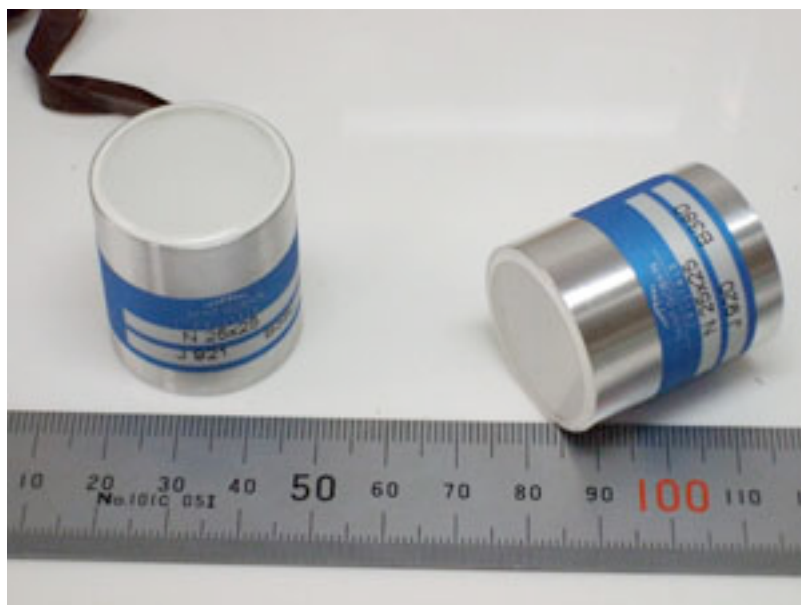


焼いてみたんですが
吸収して駄目:

ガス(希ガス)を使う予定:
Ne, Arなど(isobutan)
ガスによる吸収の研究

[3] γ 線検出器

LaBr_3



高いEnergy 分解能 3% FWHM

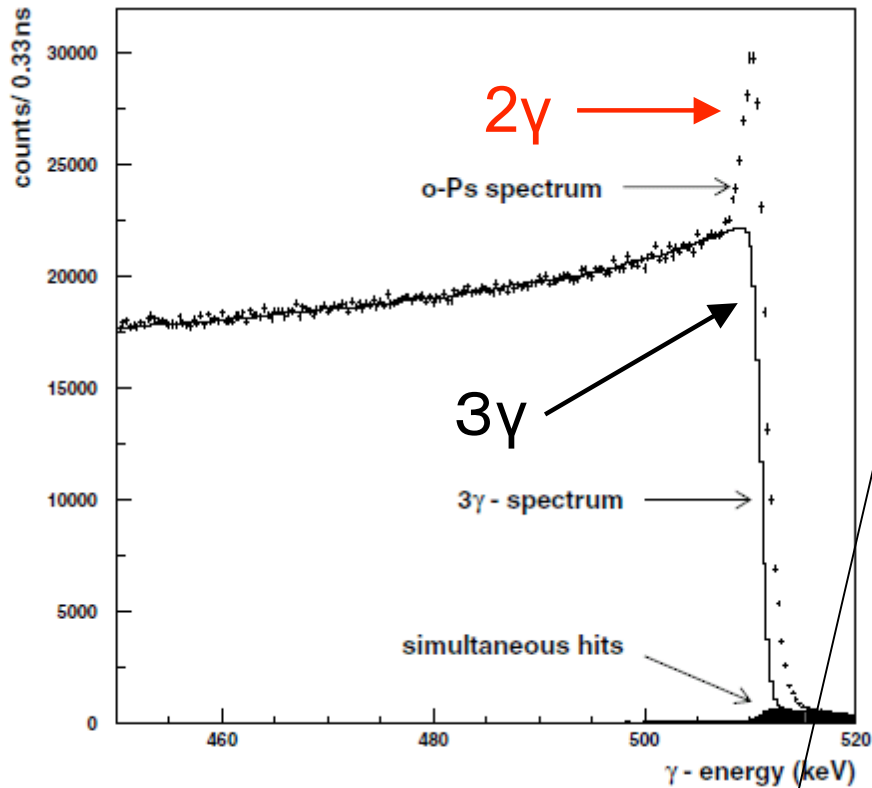
早い: 時間分解能良い (熱化過程を測定)

遅い成分がない: 強い線源強度可能

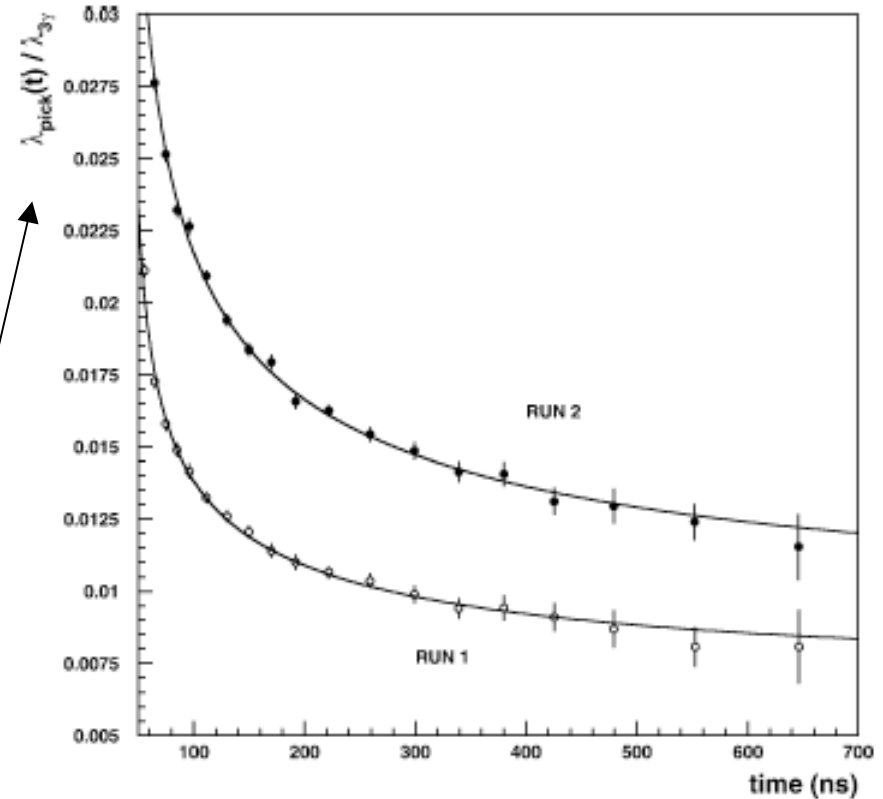
高いエネルギー分解能: **Back to Back** で511KeVをtag

Ge半導体検出器

熱化の様子や物質の効果直接わかる



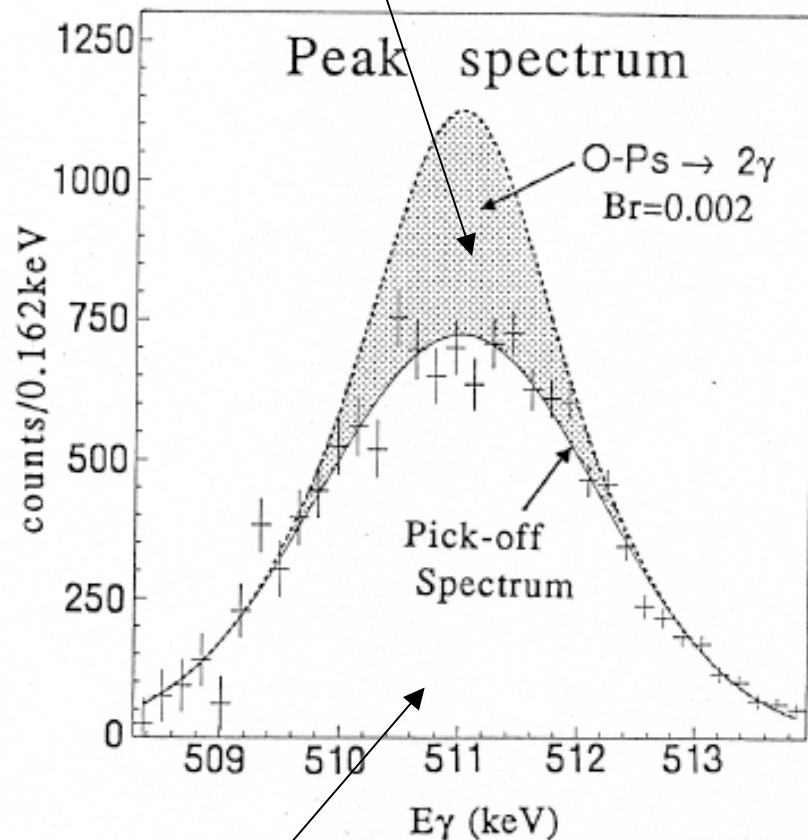
分解能 0.25% FWHM
で 2 γ へ行った事象分離
Pick/3 γ を測定出来る



生成してからの時間

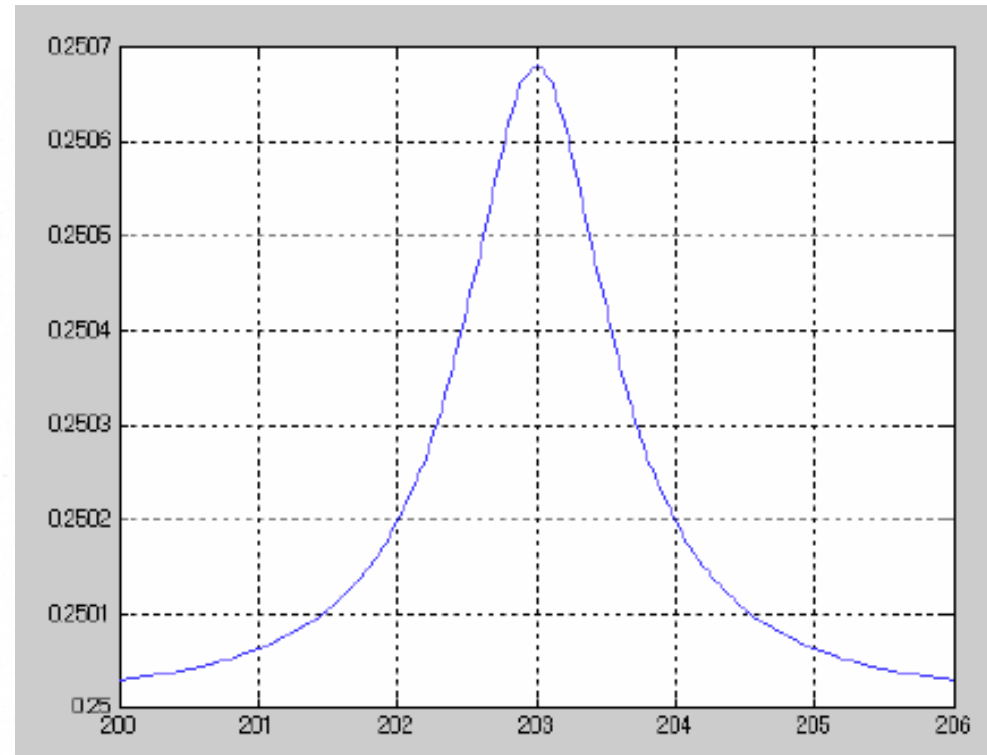
積分すると
物質の効果が分かる:
系統誤差Iが解決出来る

RFを加えると、511KeVが
増加。(細いFWHM 1.3KeV)



物質効果はフェルミ運動量
(FWHM 2.6KeV) 分離も可能

RFを変えながら、増加分を測定
ブライト・ウィグラー共鳴が観測



RF周波数(GHz)

直接HFS を物質の効果の
関数として決定できる。
物質効果 $\rightarrow$ 0 でHFSを決定

纏め

1. 大切な物理量 P_s HFSがずれている。
203GHzを直接遷移させる全く新しい実験を行う。
1ppmの高精度測定をめざし、ずれの原因を解明する。
ズレが確定すると標準理論を超える新しい物理の信号となる
ズレが消えると、束縛系の精密計算の証明(クォークにも適用)
2. ミリ波、サブミリ波は、素粒子・原子核物理実験にとっても
未知の新しい領域
高強度、安定、可変な光源で新しい応用が拓ける。
meV は、例えばニュートリノ質量やDark energyのスケール
新しい検出器(リュードベリ原子や、量子ドットphoto counting)
の開発と相まって、新しい領域が拓くことが可能である。

クォークの束縛状態(カラー結合が強いので高次効果が大切)
 Positroniumの束縛系の研究を通して、これらの研究や
 分子構成に大きな寄与が可能

