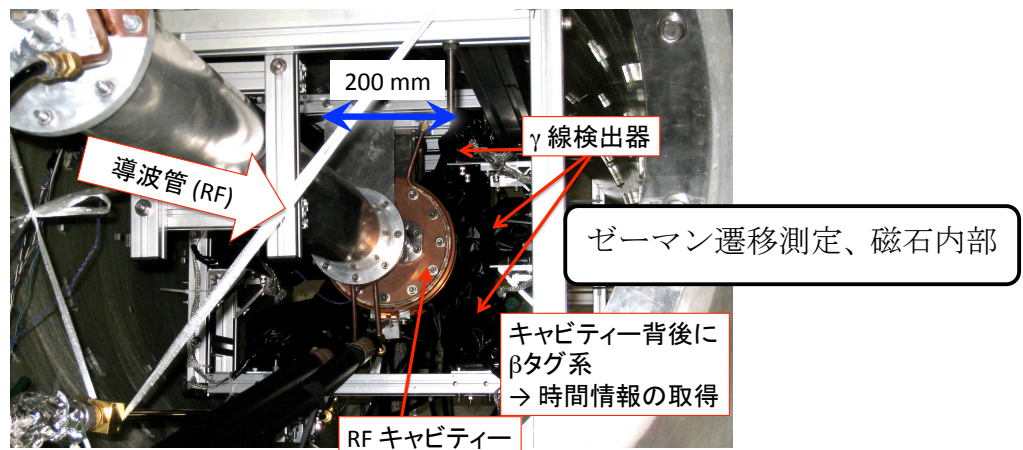
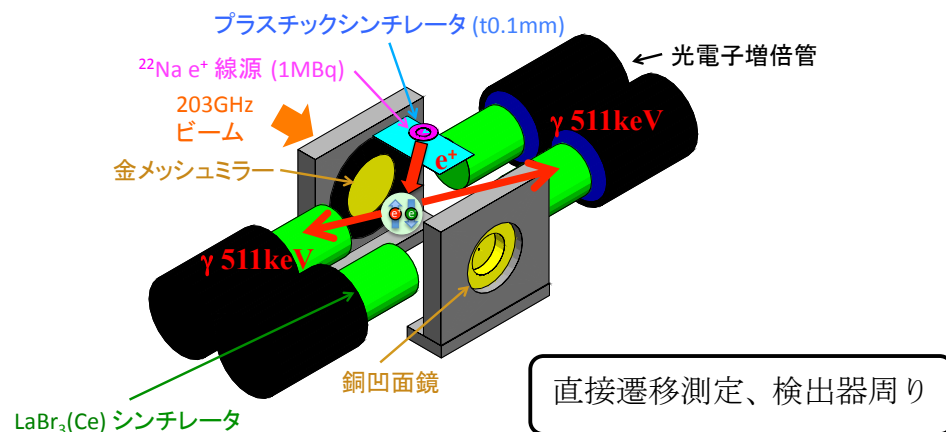


ポジトロニウムを用いた 素粒子物理学実験

最も軽い「原子」で探る「標準理論を超えた素粒子物理」

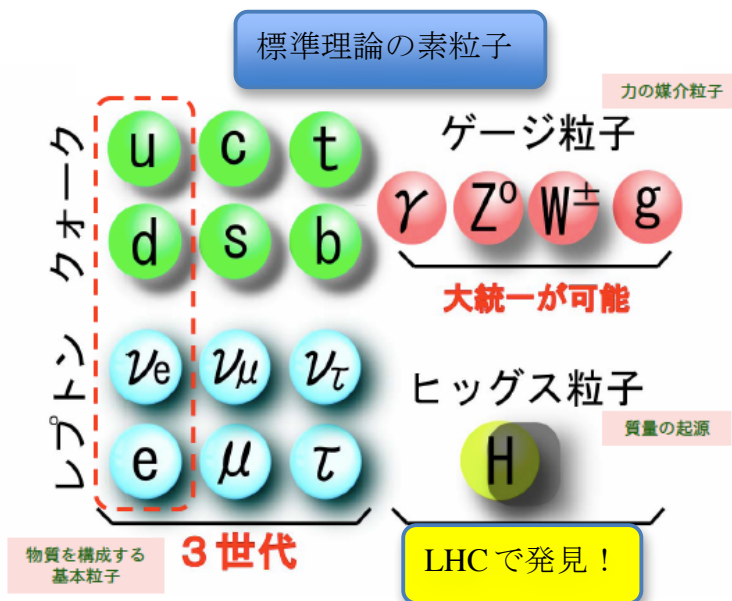


東京大学・素粒子物理国際研究センター

物理学専攻・浅井研究室

<http://tabletop.icepp.s.u-tokyo.ac.jp/>

(2014 年 9 月改訂)

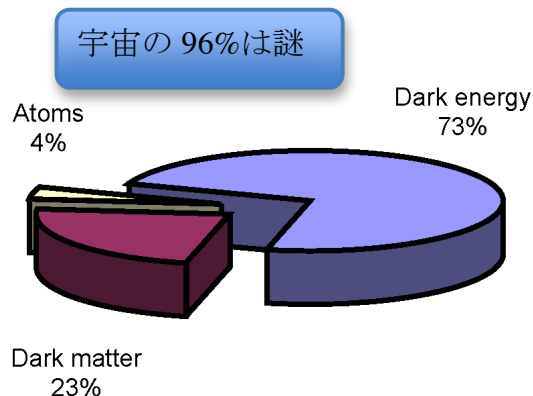


この世の中の物質は究極的には何から出来ていて、どういう法則に従っているのでしょうか。それを解き明かすために、素粒子物理学の研究は進展してきました。20 世紀後半に確立された「標準理論」はその大きな成果である。標準理論によると、物質は陽子などを構成する「クォーク」と、電子やニュートリノなどの「レプトン」と呼ばれる素粒子

から出来ている。それぞれの素粒子は、「強い相互作用」、「電磁気力」、「弱い相互作用」と呼ばれる相互作用によってお互いに影響を及ぼし合う。相互作用の媒介はそれぞれ、「グルーオン」、「光子」、「W/Z ボソン」と呼ばれる粒子がおこなう。また、LHC 実験で見つかった「ヒッグス粒子」が各素粒子に質量を与えられている。

(なお、素粒子物理学においては、エネルギーを表す単位として eV(電子ボルト)を用いる。3 桁ごとにキロ電子ボルト($1\text{keV}=1000\text{eV}$)、メガ電子ボルト($1\text{MeV}=10^6\text{eV}$)、ギガ電子ボルト($1\text{GeV}=10^9\text{eV}$)、テラ電子ボルト($1\text{TeV}=10^{12}\text{eV}$)と呼ばれる。逆に小さい方はミリ電子ボルト($1\text{meV}=10^{-3}\text{eV}$)、マイクロ電子ボルト($1\mu\text{eV}=10^{-6}\text{eV}$)と呼ばれる。)

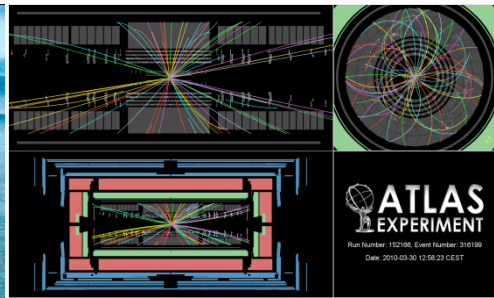
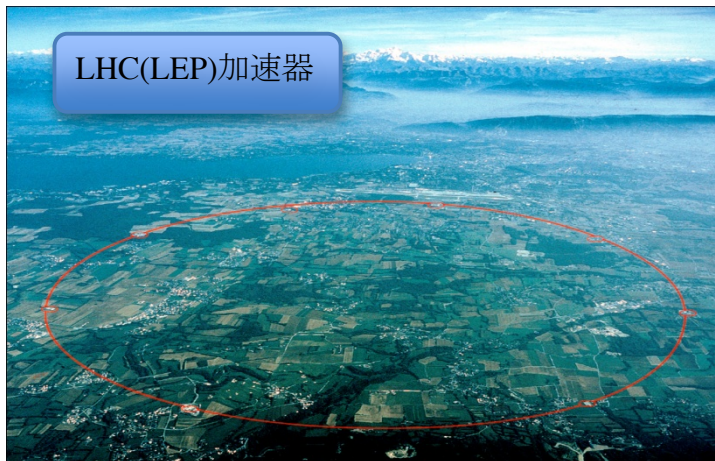
標準理論はほとんどの素粒子現象をうまく記述し、多くの実験によって正しいと検証されている。



ところが、標準理論は完全な理論ではないことも知られている。まず、重力が理論の中に入っていない。また、電磁気力と弱い相互作用を統一するエネルギースケール($O(100\text{GeV})$)を大きく超えたエネルギーでは、標準理論がうまく適用できない可能性がある。さらに、宇宙の暗黒物質や暗黒エネルギー、物質と反物質の対称性など、標準理論では説明のつかない大きな謎が残されている。

このため、標準理論を超えた理論がいくつも考えられている。

標準理論を超えた現象を実験的に見つけ検証するためには、大きく分けて二つの方法がある。一つは、「大型加速器を用いて高いエネルギーを作り出し、新現象を直

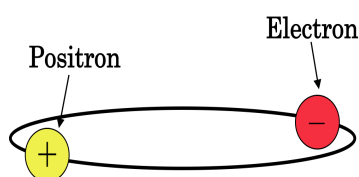


「接たたき出す」やり方である。素粒子センターはこれまで、世界最高エネルギーの加速器実験(DORIS、PETRA、LEP)に参加してきた。こ

れらの加速器実験は、標準理論を確立する上で歴史的に重要な役割を果たしてきた。現在の世界最高エネルギー加速器実験は、2008 年にスタートした **LHC 実験** である。われわれは LHC 実験にも参加し、新しいエネルギーフロンティアで標準理論を超えた現象の探索を行っている。LHC 実験では、7TeV まで加速した陽子を正面衝突させることにより、数 TeV のエネルギーでの物理現象を直接探索することができる。2012 年には、神の素粒子と呼ばれるヒッグス粒子を発見し、精密な検証をすすめている。他にも、超対称性粒子やミニブラックホールの探索も行っている。

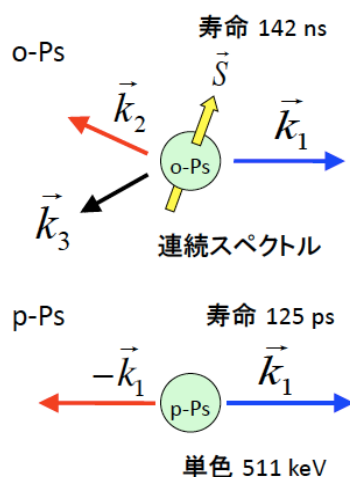
一方、LHC でも到達できない、数 TeV よりも上のエネルギーでの物理を探るには、「**低エネルギー領域で精密な測定を行い、間接的に標準理論を超えた物理を探索する**」という手法を用いる。高エネルギーの未知の物理現象が、仮想粒子を媒介して、あるいは稀な現象として、低エネルギー領域で標準理論では説明のつかない効果をおこしていないかを検証する。加速器による直接測定と比べて、間接測定は標準理論の予想値からの微かなズレや極めて稀な現象を調べる必要があり、測定対象は非常に良く理解されている必要がある。そのための道具としてわれわれが使用するのが、「**ポジトロニウム**」という粒子である。

[1] ポジトロニウム



ポジトロニウムとは、素粒子である電子と、その反粒子である陽電子が電磁気力によって結びついた準安定な粒子である。ちょうど水素原子の陽子が陽電子に置き換わった原子であり、全質量が 1022keV と非常に軽い。基底状態は 6.8eV の結合エネルギー(水素原子の結合エネルギー13.6eV の半

分)で結びついている。基底状態は、スピンの平行の**オルソポジトロニウム**(全スピン 1)と、反平行の**パラポジトロニウム**(全スピン 0)の 2 種類の状態があり、粒子と反粒子の入れ替えに対する変換性の違いから、異なる崩壊モードを持つ。パラポジトロニウム



ムが寿命 125ps で瞬時に 2 本(あるいは偶数本)のガンマ線に崩壊するのに対し、オルソポジトロニウムはそれより 1000 倍以上長生きであり、142ns の寿命で主に 3 本(または 3 本以上の奇数本)のガンマ線に崩壊する。

素粒子物理学を研究する上で、ポジトロニウムを利用するメリットはいくつかある。まず、非常にシンプルな系である。素粒子である 2 個のレプトンどうしが電磁気力のみで束縛されているため、ハドロンの変異性を含まず、量子電磁力学によって計算ができる。理論計算

が高い精度で行われているため、もし計算値からの微小なズレを観測できれば、標準理論を超えた物理現象を示唆している可能性が高い。また、粒子と反粒子のペアでできていることもポジトロニウムが面白い点であり、s-チャンネルと呼ばれる過程を介して未知の物理現象とつながることができる。パラポジトロニウムは真空と同じ量子数を、オルソポジトロニウムは光子と同じ量子数を持つことも興味深い。また、オルソポジトロニウムの寿命が電磁気学で記述される系としては例外的に長寿命であることも、未知の物理現象を探索する上で有利である。標準理論での崩壊モードが抑制されているために、探索したい現象への感度が相対的に高くなっている。

実験的な面では、ポジトロニウムの入手のしやすさが大きな利点となる。²²Na や ⁶⁸Ga などの放射性同位体は壊変の際に陽電子を放出する。この陽電子をシリカエアロゲルや不活性ガスなどに打ち込むだけで、ポジトロニウムが生成できる。巨大な加速器などを建設しなくても、放射線源を用いた卓上のセットアップで物質と反物質からなる系の研究ができる。小人数で、準備期間も含めわずか数年で、実験の計画から結果の公表まで行うことが可能である。

[2] ポジトロニウムを用いたわれわれの実験

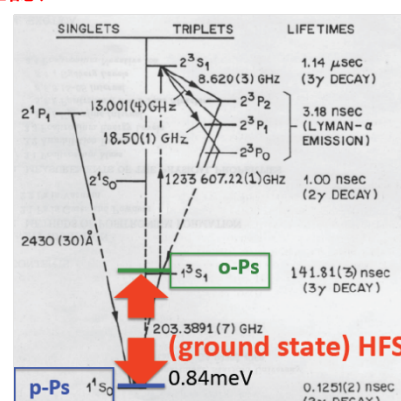
以下では、われわれが行っている 5 つのポジトロニウム実験を紹介する。いずれもポジトロニウムを使用して標準理論を超えた物理現象を探す実験であるが、2 つの異

なるアプローチをとっている。1 つはポジトロニウムに関係した物理量を精度よく測定して、数値的に標準理論からのズレを探索する方法であり、もう 1 つは、ポジトロニウム崩壊を大量に測定して、標準理論で禁止された崩壊モードを探索する方法である。前者に対応するのが、「ポジトロニウムの超微細構造の測定」、「オルソポジトロニウムの寿命測定」、「オルソポジトロニウム崩壊のスペクトルの精密検証」であり、後者に対応するのが「ポジトロニウムを用いた CP の破れの探索」、「ポジトロニウムの不可視崩壊の探索」である。

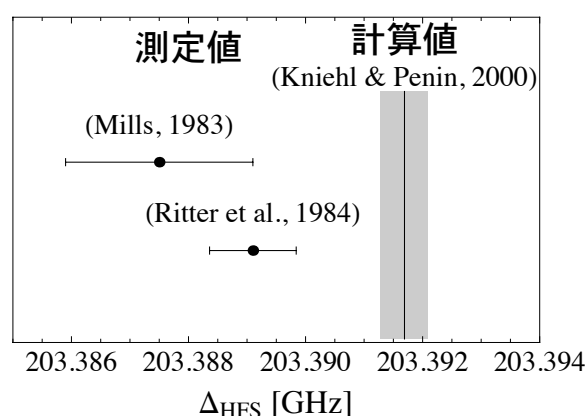
[2.1] ポジトロニウムの超微細構造の測定 (3 種類の異なる方法で測

定し、量子電磁力学の計算値と無矛盾であることを確認)

ポジトロニウムの二つの基底状態、オルソポジトロニウムとパラポジトロニウムの間には、両者のスピン状態の違いに起因して 0.84meV のわずかなエネルギー準位差がある。この準位差はポジトロニウムの超微細構造と呼ばれ、束縛系量子電磁力学によって正確に計算することができる。特に 2000 年代に入って理論計算の進歩があり、光子の周波数に



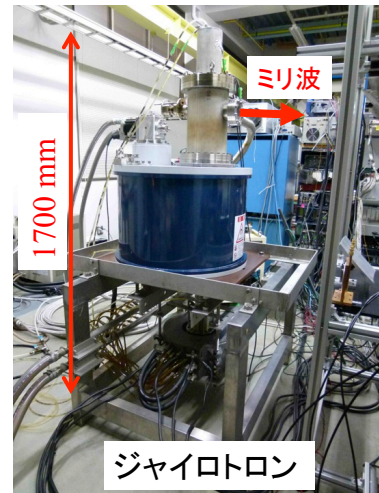
直して 203.3917GHz と、6 桁の精度まで計算されている。ところがこの計算結果は、1980 年代に測定された結果と誤差の範囲を大きく超えて食い違っている(右図)。もし、計算結果と測定結果の両方が正しいとしたら、標準理論を超えた物理の介在を示し、大発見につながる。たとえば、未発見の弱結合擬スカラー粒子の介在などが新物理の候補となり



える。ただし、過去の測定は現在のわれわれの見地からすると疑わしい点がいくつかあり、再測定による検証が非常に重要である。

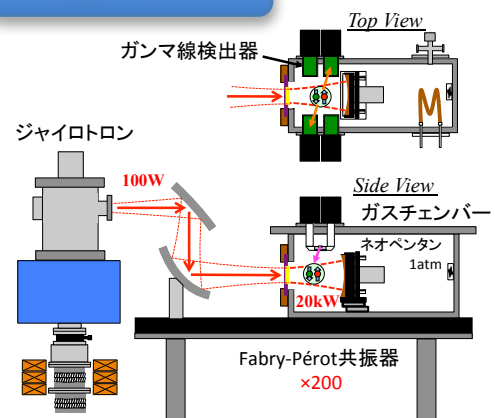
そこでわれわれは、3 種類の異なる方法でポジトロニウムの超微細構造の測定を行い、理論と実験の間のズレを定量的に、系統的な過ちなく確認した。以下に、その実験について述べる。

1 つ目の方法は超微細構造の準位差に相当するミリ波を照射して直接遷移を測定する方法である。直接遷移法は単純であるにもかかわらず、今まで誰にも行われてこなかった。これは、この遷移が禁制遷移で非常に起こりにくい上に、周波数がミリ波領域なため、適切な大強度デバイスが存在しなかったためである。そこでわれわれは、ミリ波源であるジャイロトロンとファブリペロー共振器を組み合わせた大強度ミリ波システムを新たに開発し、世界初となる直接遷移測定に成功した。この結果は Phys.Rev.Lett.108(2012)253401 として

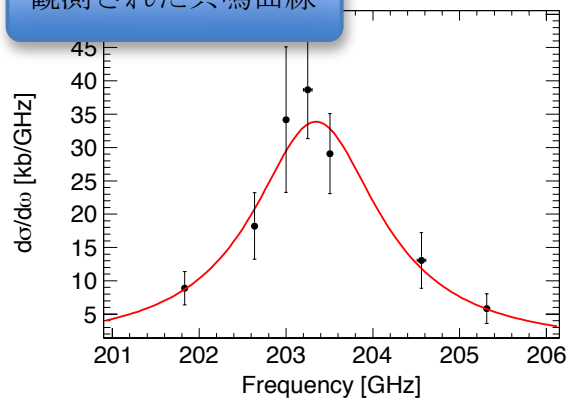


報告した。その後、さらに装置の改良を進め、周波数を可変にしてブライト・ウィグナー共鳴曲線を測定し、超微細構造を測定した。得られた結果の精度はそれほど高くないが、初めて超微細構造の値 ($203.39 + 0.15/-14(\text{stat.}) \pm 0.11(\text{syst.})$ GHz) とパラポジトロニウムの寿命 ($89 + 18/-15(\text{stat.}) \pm 10(\text{syst.})$ ps) を直接測定することができ、今後の高精度直接測定に向けた大きなマイルストーンとなった(arXiv: 1403.0312)。また、ミリ波領域は、素粒子実験のみならず各種実験デバイスがほとんど開発されていなかった未踏の領域であり、今後の大きな飛躍が期待される。

直接遷移測定系



観測された共鳴曲線



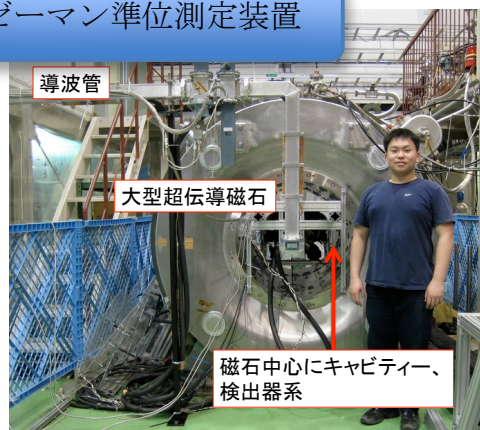
2 つ目と 3 つ目の方法は、ポジトロニウムに静磁場を印加し、生じたゼーマン分裂の準位差から超微細構造の値を求める方法である。0.8T 程度の静磁場を用いると、オルソポジトロニウムとパラポジトロニウムが量子力学的に混合して、3GHz($\sim 12 \mu\text{eV}$)程度のゼーマン準位に分裂する。ゼーマン準位は超微細構造と静磁場の値によって決まるため、ゼーマン準位差の測定は超微細構造の値に直結する。

3GHz のエネルギー差はちょうどマイクロ波領域に相当し、高精度なデバイスや大強度デバイスが多数存在する。このため、過去の精密測定はすべてゼーマン準位の

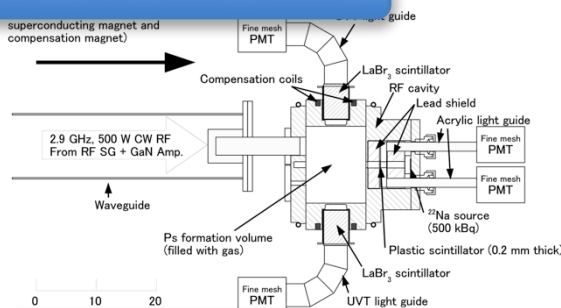
測定であった。静磁場の生成に関しては大型の超伝導磁石を使用することで、過去の実験では不可能だった均一磁場を大きな空間に印加することも可能となった。さらに、ポジトロニウム生成からの時間情報も利用することで、過去の測定よりも1桁以上 S/N を向上させ、熱化に伴う系統誤差をなくすことにも成功した。ゼーマン準位に相当するマイクロ波を静磁場中のポジトロニウムに照射し、ガス圧と磁場の2次元でスキャン測定を行った。その全データに対して系の時間発展も取り入れて同時フィットすることで、超微細構造の値 ($203.3941 \pm 0.0016(\text{stat.}) \pm 0.0011(\text{syst.})\text{GHz}$) を求めることが出来た。この値は、過去の測定値よりも理論計算値に近い値であり、束縛系量子電磁力学の計算を支持するものである。この結果は、Phys.Lett. B 734(2014)338 に掲載された。

3つ目の方法は、量子力学特有の現象を用いる。静磁場中でのゼーマン準位はオルソポジトロニウムとパラポジトロニウムの量子力学的な重ね合わせである。両者のガンマ線への崩壊モードは異なるため、崩壊ガンマ線の方角分布がエネルギー準位差に応じて振動する。特定方向にガンマ線検出器を配置することで、この量子振動の周期を測定し、超微細構造の値を求めた。結果は Phys.Lett. B 697(2011)121 に掲載された。量子振動を用いてさらなる感度向上を目指したスタンディーも行っている。

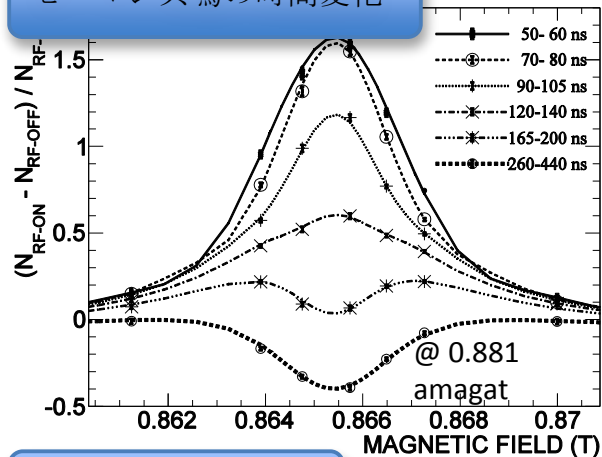
ゼーマン準位測定装置



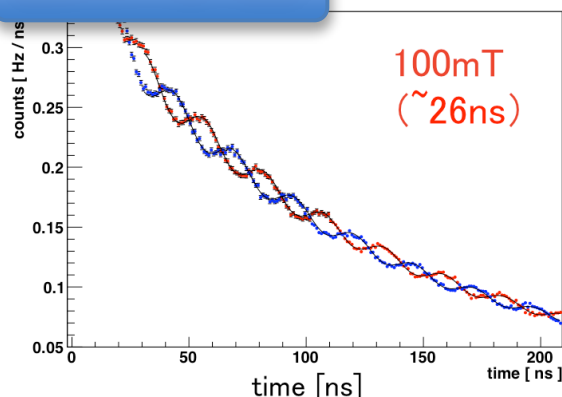
磁石内部の装置の断面図



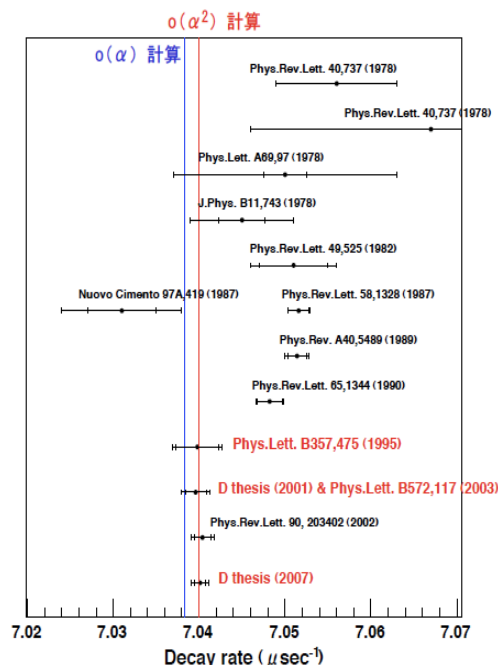
ゼーマン共鳴の時間変化



観測された量子振動



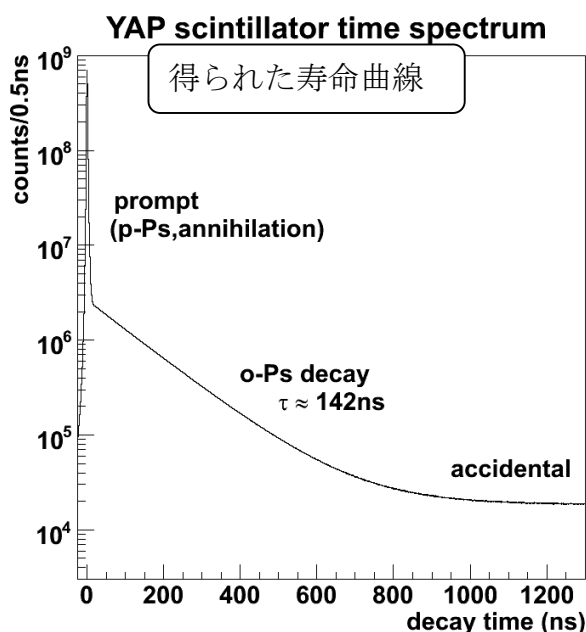
[2.2] オルソポジトロニウムの寿命測定 (過去の実験の間違いを確認し、束縛系量子電磁力学の計算を2次の項まで確認)



超微細構造のズレと同様に、オルソポジトロニウムの寿命も、1990年代前半まで実験値と束縛系 QED の計算値の間で大きくズレていた。このことは、「オルソポジトロニウムの寿命問題」として知られ、束縛系量子電磁力学の本質的な問題、あるいは標準理論を超えた新しい物理現象の介在の可能性を示唆するものとして注目を集めていた。

われわれはこの「寿命問題」が実験の系統的な誤りに起因する事を指摘し、束縛系量子力学の計算と無矛盾な結果を得た。左図にオルソポジトロニウムの寿命の変遷を示す(赤字の点がわれわれの測定)。1995 年のわれ

われの測定が、「寿命問題」の解決への鍵となった事がわかる。以降、二度の再測定を行い、2007 年には二次の高次量子効果の確認のできる精度まで到達した。これは、束縛系 QED の二次の効果の世界で初めての検証となった。結果は Phys.Lett.B 671(2009)219 に掲載された。

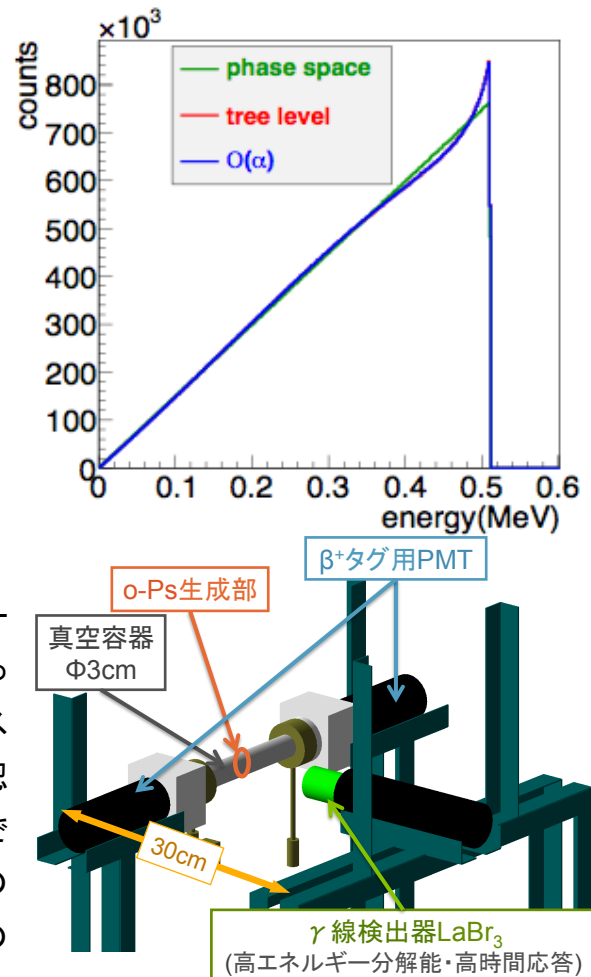


われわれの寿命検証が世界で初めて成功した大きな理由は、見落とされていた系統誤差を正しく評価したためである。物質中でのポジトロニウムの振る舞いを注意深く考察し、熱化による物質効果の時間依存性が問題になることを指摘した。時間依存性を直接測定して補正することで、理論値と無矛盾な寿命値を得たのである。

[2.3] オルソポジトロニウム崩壊スペクトルの精密検証 (シンプル

な系のシンプルな測定で未知の現象を探索)

オルソポジトロニウムの崩壊は純粋に電磁気力による過程であると考えられるため、その崩壊スペクトルも正確に計算できる。寿命のずれと同様に、崩壊の際、未知の短寿命粒子 χ がわずかも介在していたら、それはスペクトルのゆがみとして観測される。ところが、オルソポジトロニウムの崩壊スペクトルは今までほとんど検証されておらず、 $O(\alpha)$ はおろか、最低次の tree level の確認もされていなかった。そのため、エネルギー/時間分解能の良いシンチレータを用いて、スペクトルの精密検証を行っている。検出器のガンマ線に対するレスポンスはチェックソースを用いて確認し、また、ピックアップ崩壊による 511keV でのバックグラウンドは酸素雰囲気中での実測スペクトルによって差し引いた。その結果得られた 400keV から 511keV の間のスペクトルは、 $O(\alpha)$ の予想スペクトルを支持するものであった。現在、結果を取りまとめ中である。

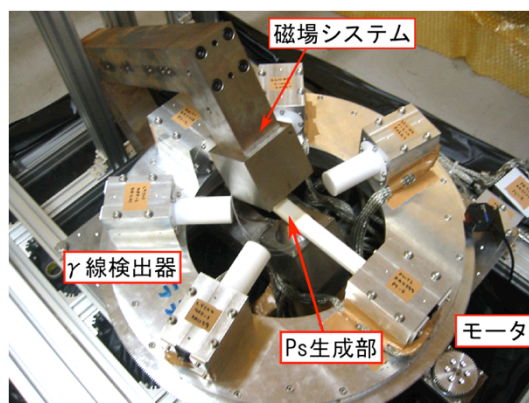


[2.4] オルソポジトロニウムを用いた CP の破れの探索 (独自の

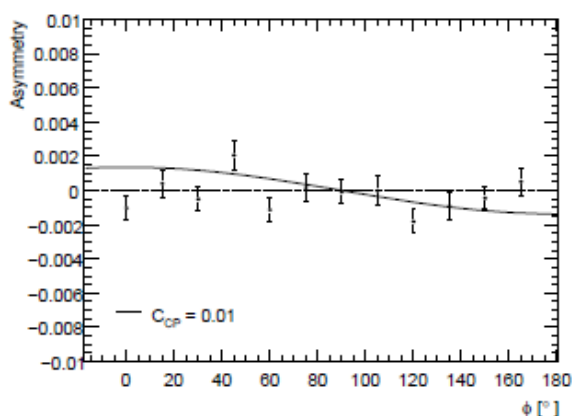
装置で系統誤差を減らし、世界最高感度で検証)

宇宙に物質が満ちているにもかかわらず、反物質がほとんど存在しないのはなぜだろうか？ その鍵を握っているのは CP 対称性だと考えられている。CP 対称性とは、C 変換 (粒子と反粒子の入れ替え) と P 変換 (鏡像との反転) を組み合わせた対称性のことであり、宇宙初期でこの対称性が破れていると、その破れを経由して物質と反

物質のバランスが崩れ、反物質が消えてしまうと考えられている。現在までに、CP 対称性の破れは、K 中間子、B 中間子といったクォークセクターにおいて発見されているが、その破れは非常に小さく、これらの系以外にも CP 対称性の破れた機構が必須であると考えられている。



CP 対称性の破れを探す上でも、粒子と反粒子が組み合わさった中性粒子系であるポジトロニウムは有利である。オルソポジトロニウムのスピンと崩壊ガンマ線の方角を組み合わせた角度相関の分布から、CP 対称性の破れを探すことができる。われわれは、ネオジム磁石を用いてオルソポジトロニウムをスピン偏極させ、その崩壊時のガンマ線の分布を測定することで、CP 対称性の破れを探索した。この時、最も注意しなければならなのは、検出器にまつわる系統誤差である。微小な検出器の個体差や方向依存性が誤った CP の破れのシグナルとならないよう、回転テーブルを用いて巧妙に系統誤差をキャンセルする実験装置を製作した。この装置を使用して、約半年間の測定により、K 中間子での CP の破れと同程度の感度まで探索した。CP の破れは見つからなかったが、得られた制限は過去の制限よりも一桁近く厳しいものであった。結果は、Phys.Rev.Lett. 104(2010)083401 に掲載された。



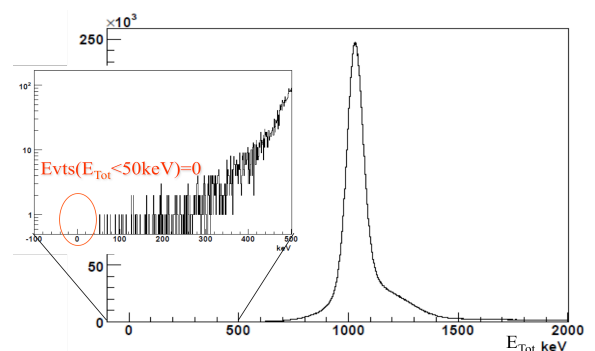
[2.5] オルソポジトロニウムの不可視崩壊の探索 (TeV に近いエネルギースケールの余剰次元に対して制限)

標準理論の最大の問題点は、W/Zボソンが担う電弱相互作用の破れのスケール ($O(100)\text{ GeV}$) と、重力が担う Planck スケール (10^{19} GeV) の二つのスケールを自然に説明出来ないことにある。一つの可能性として、TeV スケールの余剰次元の効果が

考えられている。重力以外の粒子は4次元の面(D プレーン)に束縛されているのに、重力子は余剰次元まで含めた空間を伝搬出来ると仮定すると、重力だけが余剰次元に逃げ出すことで、見かけ上重力が非常に弱い(=エネルギースケールが非常に大きい)という理論である。

余剰次元を用いた力の統一的な理解は古くはアインシュタインにまで遡るアイデアであり、彼は重力と電磁相互作用を5次元での統一を試みた。もし、余剰次元が1TeV-10TeVに潜んでいる場合、オルソポジトロニウムが量子的に振動した仮想光子が、トンネル効果で非常に小さい確率(崩壊分岐比、 $10^{-7} \sim 10^{-9}$)ではあるが、余剰次元を含んだ世界に崩壊する。結果、我々の世界からは検出不可能になってしまう。超高感度でポジトロニウムが消えた事象(Invisible 崩壊)を探索することで数TeVの余剰次元モデルを探ることが可能である。

われわれは、独自に装置を設計、製作し余剰次元の探索を行った。巨大なシンチレータ内部でポジトロニウムを作り、崩壊時のガンマ線を観測した。確実にポジトロニウム生成をタグするための工夫を行っている。 3.55×10^7 個の陽電子事象(4.76×10^6 個のオルソポジトロニウム事象)を観測した結果、残念ながらポジトロニウムが消えた事象は全く観測されなかった。ただしこの結果から、オルソポジトロニウムが消える現象に対する崩壊分岐比として、 6.9×10^{-7} (90%の確からしさ)の上限値が得られた。この値は、余剰次元がたとえ存在したとしても、エネルギースケールが0.42TeV 以上であるという制限を意味する。これは、既存の余剰次元に対する制限とほぼ同じレベルの制限であり、全エネルギーがわずか1MeVのポジトロニウムによって、TeV スケールに迫る制限が得られた。



[3] 次は?

われわれが行っている、ポジトロニウムを手段として新たな物理現象を探る実験を

紹介してきた。ポジトロニウムを使った実験はアイデア次第で簡単に新物理を探索する事ができる。大きな実験と違って、全部自分で行う事ができ、数年で論文にまとめて発表することができる。興味があればぜひ相談して欲しい。

(文責: 難波 naniwa@icepp.s.u-tokyo.ac.jp)

浅井研究室: shoji.asai@cern.ch

小林研究室: tomio@icepp.s.u-tokyo.ac.jp