オルソポジトロニウム崩壊ガンマ線の エネルギースペクトルにおける 高次補正の初検証

First test of $O(\alpha)$ correction on the energy spectrum in the orthopositronium decay

理学系研究科物理学専攻 浅井研究室 安達 俊介 修士論文審査会 2015/01/21(水)

<u>目次 1/2</u>



目次 2/2

さらに… ◆ 未知粒子探索 - 未知粒子探索の背景 - 未知粒子探索の結果



はじめに

ポジトロニウム(Ps)

- 陽子と電子の束縛系
- パラポジトロニウム(p-Ps) スピン1重項 (S=0) 状態 2本の γ 線に崩壊 短寿命(125ps)
- オルソポジトロニウム(o-Ps) スピン3重項(S=1)状態
 - 3本のγ線に崩壊 ⇒•<u>連続スペクトル</u> ・長寿命(142.05ns)









<u>難しさ②: O(α) の補正が小さい</u>

O(α)の補正は500keV付近で大きい 測定で期待されるスペクトルにおける O(α) / Tree level は、



<u>O(α) の検証の方針</u>

検出器の影響を Monte Carlo シミュレーション (MC) で推定して、 <u>QED計算&MCから得られるスペクトル</u> と <u>測定スペクトル</u> を比較 して O(α)を検証する











①o-Ps由来の事象の選択 と ②アクシデンタルイベントの推定と除去

比較

O(α) の検証

MC シミュレーション

(検出器の影響)



ピックオフ崩壊事象の除去













Monte Carlo シミュレーション (MC)

- シミュレーションにGEANT4を使用 MC内 検出器を精密に再現 - o-Ps生成部やLaBr₃は0.1mm 単位で - LaBr₃は 0.5mm厚の外装や内 部の反射材まで再現し、実測 とMCで<u>質量が一</u>致することを 確認 実測 MC内 LaBr₃の質量 323.4g 324.0g
- O(α)、Tree level のQED計算から得られるエネルギー分布に おのおの従う3本のγ線を o-Ps生成部(エアロゲル)から放射し て、γ線がLaBr₃で落とすエネルギーをシミュレート
 統計精度を上げるため 各統計量: <u>約2.2×10¹¹回</u>













511keVのピークは ピックオフ崩壊による背景事象が残っているため



⇒ 2γ崩壊が増加する 酸素ガス中の測定から2γ崩壊のエネ ルギースペクトルを求めた







$O(\alpha)$ と Tree level の比較をするために



$O(\alpha)$ と Tree level の比較をするために



<u>o-Ps測定スペクトルとMCスペクト</u> ルの \chi² fitting 方法

- 比較領域は<u>400-530keV</u>
 ✓ O(α)に対する<u>感度が高い</u>
 ✓ 検出器の影響が小さい
- MCスペクトルは比較領域の <u>総事象数でnormalize</u> して測定スペク トルに高さを合わせる
- ・ 測定スペクトル と MCスペクトル との χ^2 fitting をするときの free parameter は以下の3つ;

O(α)か Tree level かを表す <u>"F"</u>
 MCスペクトルでの <u>Smear量</u>(検出器のエネルギー分解能)
 酸素スペクトルを差し引く量(<u>ピックオフ崩壊事象の割合</u>)
 MCスペクトルのfittingとピックオフ崩壊事象の除去を同時に



^{比較結果の前に…} MCの系統誤差について





非全吸収イベント

- 400—530keVでの非全吸収イベントは、多重散乱の他にエアロゲルとLaBr₃の間にある物質での散乱過程をもつ
 ⇒物質の影響を受け、不定性が大きい
- 400keV以上はコンプトンエッジ以上のエネルギー領域
- ・単色線源では、コンプトンエッジから光電吸収ピークの間("コンプ トンフリー領域")が同じ過程を持つ

400-530keV前後の2つの単色線源で測定とMCを比較

- ⁵¹Cr 320keV
- ¹³⁷Cs 662keV

単色線源でMCが合うように、Physics model のcheckや物質の再現の確認を行っていった

* 光電吸収ピークでnormalizeしている 単色線源の比較 斜線部がコンプトンフリー領域 Count / 0.5keV ⁵¹Cr 320keV ¹³⁷Cs 662keV Count / 0.5keV Data Data **0**⁷ MC MC 10⁶ 10⁶ 10⁵ 10⁵ 50 600 100 200 250 300 200 500 150 100 300 400 Energy (keV) Energy (keV) Ratio <u>Data</u> MC Ratio <u>Data</u> MC + + ŧ,ŧ 0.95 0.95 100 150 200 250 300 100 200 300 400 500 600 50 Energy (keV) Energy (keV) 3.7%以内で一致 <u>3.6%以内で一致</u> 非全吸収イベントの誤差は3.7% 31





<u>MCの系統誤差</u>

- シミュレーションの系統誤差には主に
- 非全吸収イベント・・単色線源の3.7%の誤差
 非全吸収イベントの全事象に対する割合
 ⇒ 400keV以上で 5%以下
 ⇒ スペクトルの高さに対して 3.7%×5% 以下 = 0.19%以下

• 全吸収イベント •• 400-530keVの間で0.15%ずれる誤差			
を計上	MC の 系	〔統誤差	
エネルギー	@400keV	@500keV	@530keV
非全吸収イベント	0.19%	0.02%	0.16%
全吸収イベント	0.15%	0.04%	∼0%
Simultaneous hits (3本の γ 線のうち複 数本がLaBr ₃ に入る イベント)	~0%	0.03%	0.48%
計	0.24%	0.06%	0.51%












<u>ピックオフ崩壊事象の割合の吟味</u>

- ・ピックオフ崩壊によってo-Psがクエンチされるので、測定 寿命は短くなる
- ⇒ <u>測定寿命からピックオフ崩壊の割合が求められる</u>
- 事象選択で用いたタイムウィンドウ 35-280nsでは、測 定寿命は 128-131ns

この寿命幅は<mark>ピックオフ崩壊の割合</mark>が熱化によって<u>時間に依</u> <u>存</u>して変わるため

⇒この測定寿命から得られるピックオフ崩壊の割合は



さらに... 未知粒子探索



- ・得られたエネルギースペクトルを用いて、未知粒子Xの崩壊の
 ピークサーチを行った
- 未知粒子Xの仮定する崩壊過程は



本実験によるピークサーチの利点

- 1 背景事象であるピックオフ崩壊事象を取り除くことができている 先行実験では除いていなかった
- ⇒ <u>E_p = 511 keV に近い領域</u>も探索できる
 - <u>① 短寿命未知粒子X₁の探索</u>
- MCによってo-Psの3γ崩壊によるスペクトル(ピークサーチでの背 景事象)が精密に推定できている

先行実験では背景事象はピーク前後を多項式で fit することで推定し、 ピーク幅の狭いものしか探索できなかった

⇒ <u>幅の広いピーク</u>も探索できる



<u>① 短寿命未知粒子X₁の探索</u>

" p₀ × [O(α)のMCスペクトル] + p₁ × [ガウシアン(E_p)] "で 測定スペクトルを fit して、

 p_1 から 400 < E_p < 492 keV の範囲でのピークの大きさを求めた.

残念ながら有意なピークは見られなかったが、今までに制限されていない質量領域 で分岐比 $Br(o - Ps \rightarrow \gamma + X_1 \rightarrow 3\gamma)$ に新しい制限(90%C.L.)をつけられた



② 超短寿命未知粒子X₂の探索

 $E_p(m_X)$ だけでなく崩壊幅も $0 < \Gamma_{X_2} < 35$ keV の範囲で変えて 超短寿命な未知粒子 X_2 の探索を行った

残念ながら有意なピークは見られなかったが、今までに制限されていない崩壊幅を 持つ領域で 分岐比 $Br(o - Ps \rightarrow \gamma + X_2 \rightarrow 3\gamma)$ に新しい制限(90%C.L)をつけられた



まとめ

- ・ O-Ps崩壊 γ 線のエネルギースペクトルで、初めて<u>O(α)の補正</u>の 測定・検証を試みた
- MCシミュレーションで高い精度(400-510keVで0.24%以下)を達成
- <u>400-530keV</u> での x² fitting の結果、
 <u>F = 0.90 ± 0.64</u> となり <u>O(α)に無矛盾</u>、Tree level のスペクトルを <u>92%C.L.で棄却</u>する結果を得た
- 得られたエネルギースペクトルを用いて、o-Ps $\rightarrow \gamma + X \rightarrow 3\gamma$ と崩壊 する短寿命未知粒子Xを探索した結果、 m_X の低い場合と、Xが崩壊 幅 Γ_X を持つ場合で分岐比に対する新しい制限を得た

Backup

p-Ps & o-Ps

 $S=0 |0;0\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|\uparrow\rangle|\downarrow\rangle - |\downarrow\rangle|\uparrow\rangle) \cdots 1^{1}S_{0} \, \exists \mu$ パラポジトロニウム (p-Ps),

$$\begin{pmatrix} |l;m\rangle & \cdots & l: 系の全スピン, m: 系の z 方向のスピン \\ |\uparrow or \downarrow\rangle |\uparrow or \downarrow\rangle & \cdots & 左側が電子のスピン, 右側が陽電子のスピン \end{pmatrix}$$

C保存から γ 線の本数が決まる $C_{Ps} = (-1)(-1)^{s+1}(-1)^{L} = (-1)^{s+L}$ 粒子反粒子 の系であるため より ⇒ L=0では、 $(-1)^{s} = (-1)^{n}$ 光子1本で-1 C_γ = $(-1)^{n}$

<u>Tree level と $O(\alpha)$ の効果</u>

511keV 10^{3} QEDの効果で頻度が高くなるdecay counts phase space 800 <700 tree level 600 **511**keV 511/2 keV×2本 **500** QEDでスピンの効果を考えると、 400 上図のような運動量をもった 300 3本のγ線への崩壊イベントが 511/2keV 多くなるため、phase space に比べて 200 tree level は511keVと 100 511/2keVのイベントが多くなる 0.1 0.2 0.3 0.4 0.5 0.6

tree level と O(α) のずれは 左図のような photon の1-loop によって生じる

energy(MeV)



形としては0.4%の 差しかないが、 絶対的には-2%程 全体的に低くなる





<u>MC での o-Ps 崩壊γ線の出射位置</u>

o-Ps崩壊 γ 線の出射位置はMCで陽電子をシミュレートして求めた。



49







電圧値が高いほどLaBr₃のDiscriminatorでの thresholdを超えるときの時間が速くなるので、 β⁺タグとLaBr₃の時間差が短くなる



ウォーク補正前後でのプロンプトピーク



52





(2)アクシデンタルイベントの除去の方法



²²Na からβ⁺と同時に生じる1275keVのγ線は ① 後のスペクトルとアクシデンタルのスペクトルで同じ ⇒ 1275keV のフィットから① 後のスペクトルにおけるアクシデ ンタルイベントの量を求めた



<u>熱化</u>とは、Psが熱平衡状態になるまで周囲の物質と 衝突して速度を失っていく過程

⇒ Psの速さが遅くなる

⇒ピックオフ崩壊率(∝速さ)が小さくなる (物質との衝突回数が減るため)

⇒ <u>時間に依存</u>して<u>測定寿命</u>が変化する

熱化の途中では、ピックオフ崩壊率が変化するので、 測定寿命からピックオフ崩壊の割合を正確に求める のは難しい



熱化後の寿命は安定している



56



(2)アクシデンタルイベントの除去のスケール



おおよそ一致しているが、多少の差が存在する (この差ではfitting結果のFの値は変わらず、F=0.9±0.64) これは、アクシデンタルイベントの分布が<u>実は完全な平坦でないた</u>め



Start の Pla が stop の La を作るもので、 Stop の La が 相関の無い La の場合

t が短い方が許されるt'の範囲が広くなり起こりやすくなる ⇒時間スペクトル上で右下がりの効果



アクシデンタルイベントについて

前ページのようにアクシデンタルイベントは平坦から ずれる

さらに、NIM回路上のトリガー生成の方法によっても アクシデンタルイベントの分布は変化するので、分 布の推定は難しい

⇒ 本実験ではエネルギースペクトルでアクシデンタ ルイベントの量を推定した







o-Ps が酸素中の電子とスピン相互作用をしてスピンが反転し、短寿 命(125ps)で2γ崩壊するp-Psに換わる現象



酸素のような常磁性のガスが存在する場合、スピン交換は起こりや すくなる

ピックオフ崩壊とスピン交換の違い

- ピックオフ崩壊は他の物質中の電子と反応するので、 相手の電子の運動量の影響をうける
- ⇒ ピックオフ崩壊後の2γのエネルギーが変わる
- ⇒ γ線のエネルギー511keV に電子の運動量分の幅を持つ

ー方、スピン交換は p-Ps の崩壊なので厳密に511keVのγ線を出す

- この差は以下の論文の値を用いて補正した(酸素ガス中スペクトルの ピーク幅を smear して広げた[$\Delta \sigma = 1 \text{keV}$])
- S.Orito, *et al*, PRL 63 (1989) 597-600
- S. Asai, *et al,* PRL 66 (1991) 1298–1301

酸素ガス中スペクトルのピーク幅補正の吟味



ピーク幅を広げる量を変えて fitting 結果のFと χ^2 を確認 x=1 付近で χ^2 は最小値をとり、補正量は妥当といえる



イベントの分類



<u>Simultaneous hits イベントの誤差</u>

Simultaneous hits イベント : o-Ps 崩壊の <u>3 γ の内の複数本</u>がLaBr₃ にエネルギーを落としたイベント

⇒ 単色線源には存在しないイベントなので、別途誤差を見積もった

⇒ 複数本LaBr₃に入るには、アクセプタンスが重要になる

(直接LaBr₃に複数本のγ線が入ることのできる kinematics はアクセプ タンスに依存して変化するので)

⇒ LaBr₃とエアロゲルの距離の誤差2mmで変化しうるスペクトルの変 化をこのイベントの誤差とした



<u>Free parameter の 吟味</u>

② 検出器の resolution の smear量 単色線源の比較から得られる smear量で確認

	⁵¹ Cr	¹³⁷ Cs	Fitting 結果
σ (keV)@511keV	9.205 ± 0.003	9.233 ± 0.005	9.26 ± 0.05

③ <u>Pick-off 崩壊の割合</u>
 時間スペクトルから得られる測定寿命から確認

測定寿命	測定寿命から 得られる pick-offの割合	Fitting 結果
128—131ns	11.4—14.3 %	13.35 ± 0.04 %



前後10keVで変えた場合

比較領域 (keV)	400—530	390—530	410—530	400—540	400—520		
χ ² /自由度	14.5/23	14.9/25	13.7/21	17.4/25	13.2/21		
F @68.3%C.L.	0.90	0.98	0.77	0.85	0.95		
	<u>+</u> 0.64	<u>+</u> 0.60	<u>+</u> 0.69	<u>+</u> 0.64	<u>+</u> 0.66		
Fに±0.1程度の変化しかなく、O(α)を支持する 大きく範囲を変えた場合							
比較領域 (keV)	350—580	350—530	375—530	400—580	450—530		
χ ² /自由度	46.4/43	25.1/33	17.6/28	35.1/33	11.1/13		
F @68.3%C.L.	1.62 ±0.50	1.65 <u>+</u> 0.51	1.21 <u>+</u> 0.56	0.88 <u>+</u> 0.64	1.22 ±1.10		

低エネルギー側はFが少し1からずれる-->コンプトン散乱の影響 70












測定スペクトルが 誤差の範囲で MCスペクトルと一致して いるのがわかる

2γ崩壊エネルギースペクトル

酸素ガス中スペクトルから真空スペクトルを差し引くことで、2 γ 崩壊の エネルギースペクトルを求められる。











ピークフィットの方法

" *p*₀ × [O(α)のMCスペクトル] + *p*₁ × [ガウシアン(*E*_{*p*})] "で 測定スペクトルを fit する様子



 $E_p = 450 \text{keV}$ $\sigma = 8.68 \text{keV}$ での fit





① 短寿命未知粒子X₁の探索(同時fitで)

" $[O(\alpha) OMCスペクトル] + p_1 \times [ガウシアン(E_p)]$ "で ピックオフ崩壊の割合とsmear量とを測定スペクトルに同時fitして、 p_1 ピークの大きさを求めた.



