

博士論文の要旨及び審査結果の要旨

氏名 清野 義敬
学位 博士 (理学)
学位記番号 新大院博 (理) 第 457 号
学位授与の日付 令和3年3月23日
学位授与の要件 学位規則第4条第1項該当
博士論文名 Belle 実験における二光子過程での $\chi_{c2}(1P)$ の測定

論文審査委員 主査 教授・宮田 等
副査 教授・浅賀 岳彦
副査 准教授・大坪 隆
副査 准教授・早坂 圭司
副査 助教・遊佐 洋右

博士論文の要旨

本研究では Belle 実験において蓄積された 971fb^{-1} の二光子散乱のデータを使用して、二光子過程における $\chi_{c2}(1P) \rightarrow J/\psi \gamma$ の崩壊過程を解析することにより、 $\chi_{c2}(1P)$ の二光子崩壊幅を測定した。

Belle 実験は電子・陽電子衝突型加速器実験であり、蓄積された世界最高統計量である積分ルミノシティが約 1000 fb^{-1} のデータから様々な物理解析が行われている。その中において二光子過程は電子・陽電子の両ビームから放出された光子と光子が反応する物理過程であり、二光子衝突による粒子生成を測定することができる。

$\chi_{c2}(1P)$ は強い相互作用によってチャームクォークと反チャームクォークが束縛された状態の粒子であるチャーモニウムの1つである。量子色力学において強い相互作用の媒介粒子であるグルーオンはグルーオン同士での相互作用がある。そのため強い相互作用の結合定数はエネルギー依存が大きく、高エネルギー極限では漸的に0となるが、低エネルギー領域に近づくると結合定数が大きくなっていき摂動論が破綻してしまう。このような特性から低エネルギー領域での量子色力学による現象メカニズムの理解は難しい。

チャーモニウムは強い相互作用の結合定数において破綻する直前のエネルギー領域であるため摂動と非摂動の取り扱い境界付近にある現象として興味深い研究対象となっている。またチャーモニウムはチャームの質量が重いいため非相対論的近似を適用することができ、クォークと反クォークが強い相互作用によって束縛された状態の中で最も簡単な系の一つとして考えることができる。

チャーモニウムである $\chi_{c2}(1P)$ には2つの光子に崩壊するチャンネルがあり、その崩壊率を表す二光子崩壊幅の予測値は提案されている理論モデルでの相対論的補正や放射補正に大きく影響を受けるため量子色力学に基づいたクォーク・反クォーク系の束縛状態を説明する理論モデルの検証に利用されてきた。これまでに多くの理論モデルが提案されており、その $\chi_{c2}(1P)$ における二光子崩壊幅の予測値は $0.28\text{--}0.93 \text{ keV}$ と幅広い。そのため実験によって正確で精密な二光子崩壊幅を測定することが現象理解のために重要となってくる。

二光子崩壊幅は二光子過程において生成する $\chi_{c2}(1P)$ の測定によって求めることができる。この手

法の中で最も精度の良い結果が Belle 実験の初期(32.6fb⁻¹)に報告されている。

このとき測定された $\chi_{c2}(1P)$ の信号数は 136.0 ± 13.3 イベントとなっており、二光子崩壊幅は $\Gamma_{\gamma\gamma}(\chi_{c2}(1P)) = 0.59 \pm 0.06 \pm 0.05 \pm 0.02$ keV であった。ここで1つ目、2つ目、3つ目の誤差はそれぞれ統計誤差、系統誤差、そして他の測定値に起因する誤差となっており、全体の誤差は 12.9% であった。一方で $\chi_{c2}(1P)$ の二光子崩壊幅の測定において、これまでで最も良い精度の結果は BESIII 実験での $\chi_{c2}(1P) \rightarrow \gamma\gamma$ の崩壊分岐比測定から換算した値となっている。その換算値は $\Gamma_{\gamma\gamma}(\chi_{c2}(1P)) = 0.59 \pm 0.02 \pm 0.01 \pm 0.03$ keV で全体の誤差は 6.2% であった。この $\chi_{c2}(1P) \rightarrow \gamma\gamma$ の崩壊分岐比による測定と比較して二光子過程での測定では精度の良い結果がまだ報告されていなかった。本研究では Belle 実験での先行研究と比べて約 30 倍となる 971fb⁻¹ のデータを使用することに加えて、新しい解析手法の導入や系統誤差の評価方法の改善により、二光子過程での測定において精度の大幅な改善を目指した。結果としては $\chi_{c2}(1P)$ の信号数を 5131.2 ± 97.4 イベントと測定することができた。ここでの統計誤差は 1.9% となっており、これまで行われてきた測定において一番良い結果となっている。また系統誤差についても Belle 実験での先行研究では 8.0% だったが、評価方法の改善などによって 4.7% までにすることができた。

最終的に本研究では二光子過程で生成した $\chi_{c2}(1P) \rightarrow J/\psi \gamma$ の解析から二光子崩壊幅の値が $\Gamma_{\gamma\gamma}(\chi_{c2}(1P)) = 0.68 \pm 0.01 \pm 0.03 \pm 0.02$ keV で、全体の誤差が 5.7% という結果を報告できた。この測定値は BESIII 実験での結果も含めてこれまで行われてきた実験結果と矛盾せず、世界最高精度の結果となっている。この精密な測定値は提案されている理論モデルの較正や高次補正の評価における今後の指針となり、クォーク・反クォーク系の物理をより深く理解することに繋がることを期待できる。

審査結果の要旨

本論文は国際共同研究 Belle 実験において収集された 971fb⁻¹ の 2 光子散乱過程のデータを用いて $\chi_{c2}(1P)$ が生成した事象を選別し $\chi_{c2}(1P)$ の 2 光子崩壊幅を世界最高精度で評価したものである。本論文の研究対象である $\chi_{c2}(1P)$ は、チャーモニウムと呼ばれるチャームクォークと反チャームクォークからなる準粒子(中間子)の 1 つである。チャーモニウムは量子色力学の基本的な理解を進める上でシンプルな系として注目度が高い。本論文ではチャーモニウムの電磁気学的な構造を表す量である 2 光子崩壊幅を評価した。詳細な系統誤差評価方法の検討などを経て、独自の方法の測定を遂行し、先行研究と比べてデータ量増加以上の精度向上を達成した。

$\chi_{c2}(1P)$ の 2 光子崩壊過程を用いて評価された 2 光子崩壊幅と 2 光子による $\chi_{c2}(1P)$ 生成過程から評価された 2 光子崩壊幅が無矛盾であることを示したことで、世界最高精度で 2 光子崩壊幅測定に成功したインパクトは非常に大きい。

よって、本論文は博士(理学)の博士論文として十分であると認定した。