

Heavy Hadron Physics at Belle

昭和薬科大学 瀧澤 誠

Nuclear Physics Consortium

Belle Collaboration

1 Belle 実験

Belle 実験は 1999 年から 2010 年まで高エネルギー加速器研究機構の KEKB e^+e^- コライダーを用いて行われた。Belle 実験はこの加速器の衝突点を囲んで設置された Belle 検出器を用いて行う実験であり、このデータを解析をする国際共同研究の枠組みが Belle Collaboration である。(なお、Belle の発音はベレではなくベルである。)

KEKB e^+e^- コライダーは電子のエネルギーがおよそ 8GeV、陽電子のエネルギーがおよそ 3.5GeV という非対称エネルギー構成で、運動量を持った $\Upsilon(4S)$ 状態を生成するために設計されたコライダーである。 $\Upsilon(4S)$ は主に、 $B\bar{B}$ 中間子対に崩壊するので、この過程により、多数の B 中間子が生成される。Belle 実験は B 中間子を詳しく研究することによって CP 非保存の物理を探究することを主目的として始まった。

Belle 検出器は超伝導磁石により 1.5T の磁場がかけられており、 B 中間子の崩壊点を測定するための silicon vertex detector (SVD)、荷電粒子の飛跡をトラッキングする central drift chamber (CDC)、aerogel Cerenkov counter (ACC)、time-of-flight counter (TOF)、電磁シャワー測定用の CsI(Tl) crystal (ECL)、ミューオンと K_L 測定用の resistive plate counter (KLM)、超前方カロリメータである bismuth germanate oxide (BGO) crystal から構成されている。

実験では $\Upsilon(4S)$ のピーク点のみならず、 $\Upsilon(1S)$ 、 $\Upsilon(2S)$ 、 $\Upsilon(3S)$ 、のピーク点とそれぞれのピークから 60MeV 下のオフピーク点での測定および、 $\Upsilon(4S)$ から $\Upsilon(6S)$ の間のエネルギースキンの測定も行われた。蓄積されたデータ量はルミノシティで 1000 fb^{-1} を超え、生成された B 中間子ペアの数は 7 億個を超えている。

Belle 実験の成果については J. Brodzicka, et al, Prog. Theor. Expe. Phys. **2012**, 04D001 に詳しく報告されているので、興味のあるかたは、この論文を参照のこと。

2 Belle 実験におけるヘビーハドロンの物理

Belle 実験では、多数のボトムクォークを含む中間子やチャームクォークを含む中間子や重粒子が生成され、その性質を研究することが可能である。現在では、CP 非保存の物理の探求や New Physics の探索のみならず、ヘビーハドロンの物理の研究も 1 つの主要なテーマとなっている。B-factory は多数の B 中間子を生成して、B 中間子の性質を詳しく調べる事により、CP 非保存の物理を研究することを主目的にしているので、ボトムクォークを 1 つ含む中間子や、 $b\bar{b}$ 中間子に関しては幅広く研究されている。一方、ボトムバリオンは一番軽い Λ_b^0 でもその質量が約 5.62GeV なので、ボトムバリオンペアを作るには、11.24GeV 必要である。KEKB では、 $\Upsilon(5S)$ の質量が 10.88GeV なので、ボトムバリオンペアを生成するにはエネルギーが足りず、ボトムバリオンの研究はできない。

Belle 実験では、ボトムクォークだけでなく、チャームクォークも多数生成される。Belle 実験における、チャームクォークの生成過程を見てみよう。主に以下の 4 つのプロセスでチャームクォークペアは生成される。

1. B 中間子の弱崩壊: $b \rightarrow c\bar{c}s$ という過程を通して B 中間子は K 中間子と $c\bar{c}$ 中間子に崩壊する。
2. $\gamma\gamma$ 融合: 衝突点近傍で e^+ と e^- がそれぞれハード光子を放出し、その 2 つの光子が融合して、チャームクォークペアが生成される。
3. ISR (initial-state radiation): e^+ または e^- が対消滅する前にハード光子を放出してエネルギーが減少した状態で対消滅し、生成された仮想光子のエネルギーが 1^{--} の $c\bar{c}$ 中間子の閾値近傍になって、 1^{--} の $c\bar{c}$ 中間子が生成される。
4. J/ψ を伴った $c\bar{c}$ 生成: $e^+ + e^- \rightarrow c\bar{c} + gluon \rightarrow c\bar{c} c\bar{c}$ のプロセスで、最初に生成された c ($\bar{c}$) とハードグルーオンから生成された $\bar{c}$ (c) が J/ψ となり、残りの $c\bar{c}$ が η_c または χ_{cJ} になるという過程。

以上 4 つの過程を通して、Belle 実験では非常に多数で多種のチャームクォークを含むハドロンの生成される。実際、Belle 実験で多くの興味深いチャームクォークを含む状態が発見されている。特に 2003 年に発見された $X(3872)$ はエキゾチックハドロンとして非常に注目されており、この論文の引用数は 800 を超えている。

Belle 実験においてヘビーハドロンを研究するにおいて、Belle 測定器の高いエネルギーと運動量の分解能、詳細な衝突頂点の位置情報、広い立体角での高いアクセプタンス、KEKB 加速器による高統計のデータは大変有益である。

3 理論ハドロン物理屋が Belle データ解析に参加して

大規模な高エネルギー実験では、大きなグループの1つの駒として実験グループに貢献し、自分自身の興味で、好きな物理解析をすることができないのではと思われがちですが、Belle 実験では、新しい解析は自分の物理的な興味で自由に始める事ができ、大変フェアに運営されている。

実験解析は、理論屋が一人でいきなり始めることは事実上不可能で、すでに解析をしている方から、教わりながら始める必要があるが、ある程度慣れれば、理論屋でも解析を問題なく行う事が出来るようになる。

現在の Belle はすでに加速器が停止しており、現在は KEK Super B-factory へのアップグレード中である。そのため、データ解析をするのに、サービスタスクとして、シフトを取る必要はなく、すぐに、データ解析を始めることができる。(加速器運転中にシフトを取る経験も貴重で、一緒にシフトをとると、仲間と仲良くなれるのがよい。)

Belle のコラボレーションに入ると、今まで行われた解析のノートを自由に読む事ができるので、それを参考に解析を進める事ができる。2 週間に 1 度程度の割合で、物理的な内容で分かれた解析グループ (TDCPV, EWP, Charm, $\Upsilon(5S)$, Two photons, etc.) の電子会議があり、ここで、自分の解析について有益なコメントをもらう事ができる。インターナルレフェリーが1つの解析当り3人つくので、解析のクオリティは保証される。

理論物理の研究で使うツールと実験の解析で使うツールは異っており、実験解析で使う PAW や ROOT などを使いこなすにはそれなりに慣れが必要。理論屋は Ntuple や TTree といったデータ形式を扱ったことがないので、このようなデータの概念を最初に理解しておく事は重要だと思う。

理論屋が測定器の原理を理解した上でデータ解析を一度行くと、実験の論文を読んだ時の理解度が格段に上がる。これは、その後、理論物理の研究を続ける上でも、プラスになる。

理論屋は一般的に誤差の扱いが不得意である。特に、系統誤差の見積方を理解している人は、ほとんどいないと思う。系統誤差を押さえるために、理論の助けが必要な場合もあるので、理論屋は、系統誤差について、理解するように努めると良い。また、物理解析において、個別に理論的な解析が必要なケースは多々あるので、理論的な解析とデータ解析の両方を行うことが可能である。物理データ解析で出てくる問題を解決するには、自分の物理屋としてのすべての能力とセンスが問われるので、自分が鍛えられる。

物理データを解析するとき、イベントジェネレータを使って、モンテカルロデータを作成し、そのデータと比較することで、アクセプタンスを見積もる。今後、エキゾチックハドロンの解析を進める上ではそのような状態をイベントジェネレータに含める必要があり、理論的なサポートが必要である。また、一般的な意味でイベントジェネレータの精度を上げることは重要なので、ハドロンに生成過程やハドロン間相互作用の研究が必要である。

4 Hadron2013 で発表した NPC の Belle データの解析結果について

奈良で開催された Hadron2013 で報告した我々のグループ (NPC:Nuclear Physics Consortium) の Belle データ解析の結果を簡単に述べる。詳しくは会議の proceedings: PoS(Hadron2013)024 参照のこと。

我々は、ハイペロンとチャームバリオンの KEKB のオフレゾナンスデータすなわち $\sqrt{s} = 10.52 \text{ GeV}$ における生成率を測定した。このエネルギーでの積分ルミノシティは 79.366 fb^{-1} である。バリオンの生成率をそのバリオンの $2J+1$ で割ったものをバリオンの質量の関数として片対数でプロットした図を以下に示す。ここで J はバリオンのスピンを表す。この結果は暫定的なものであり、最終結果ではない。通常のバリオンはこのプロットが直線上に来ると考えられているが、それからずれたものは、そのバリオンがエキゾチックな構造をもっているのではないかと期待される。図 1 をみると、ハイペロンでは、 Ω の生成率が直線よりも下に来ている。一方、チャームバリオンでは、 $\Lambda_c(2625)$ と Ω_c が直線よりも上に来ている。生成率とハドロンの構造を議論する為には、 $\Lambda(1405)$ といったエキゾチックハドロンの候補者や他のチャームバリオンの生成率等の測定が重要であると考えられる。また、生成率とハドロンの構造との関係の理論的な研究も欠かせない。

5 まとめ

最近、 $Z_b^\pm$, $Z_c(3900)$ 等エキゾチックな状態が次々と見つかっている。KEKB 加速器の運転はすでに 2010 年 6 月 30 日で停止しているが、これまでに測定した Belle データの中には、まだまだ、面白いヘビーハドロンの物理が眠っている可能性がある。特に、理論屋でも解析は可能なので Belle Collaboration への参加を求む。

ヘビーハドロンの励起状態の中には、量子数、生成率、崩壊率、状態の幅等がまだ測定されていないものが多数あるので、新たな状態を探すだけでなく地道に、このような量を測定することも重要である。

Super KEKB 加速器による Belle II 測定器を用いた実験が 2016 年に開始される予定である。ダブルチャームバリオン等、さらに高統計が必要な現象へのアプローチももうすぐ可能となる。Belle II 実験でのヘビーハドロン物理を楽しみましょう。

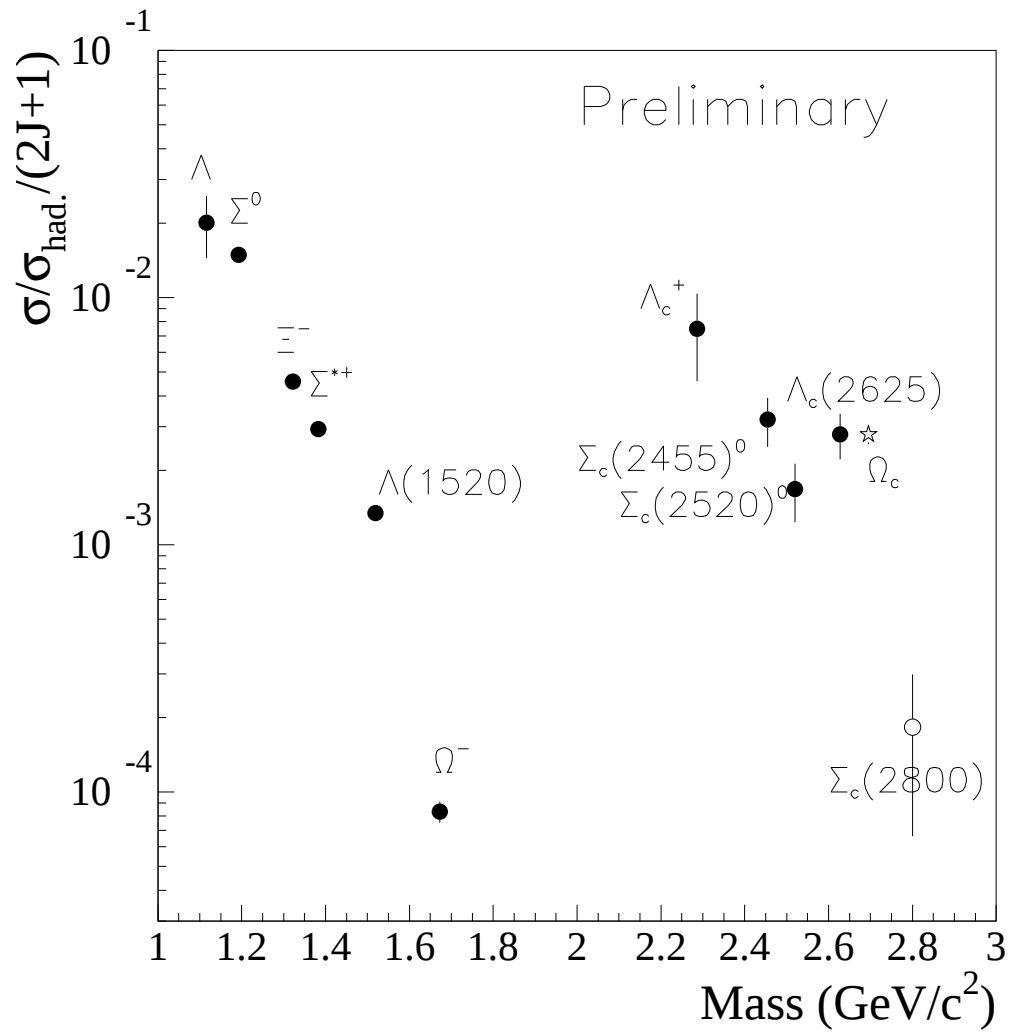


図1 バリオンの生成率をそのバリオンの $2J+1$ で割ったものをバリオンの質量の関数としてプロットした図