

論文内容の要旨

論文題目 Measurement of J/ψ Yield in d+Au Collisions at $\sqrt{s_{NN}}=200$ GeV
(核子対あたり 200GeV での重陽子・金衝突における J/ψ 中間子生成量の測定)

氏名 亀谷 聡一郎

本論文は、核子対あたりの重心エネルギー (以降、 $\sqrt{s_{NN}}$) 200 GeV での重陽子・金衝突において J/ψ を電子対崩壊チャンネルにおいて測定し、通常状態における J/ψ 生成の原子核効果を研究したものである。

現在のところ物質の最小構成要素として考えられているクォークとグルーオンは、通常の状態ではハドロン中に閉じ込められており、単体では存在しない。しかしながら、格子量子色力学の計算によれば、系のエネルギー密度が $2 \text{ GeV}/\text{fm}^3$ 程度に達すると、閉じ込めから開放された系、クォーク・グルーオン・プラズマ (QGP) へと相転移すると予想されている。実験的には、高エネルギー重イオン衝突により高温高密度状態を生成することで、QGP 状態の検証が可能であると考えられている。BNL の RHIC では、 $\sqrt{s_{NN}}=200$ GeV で衝突させることが可能である。RHIC によって実現されるエネルギー密度は $10\text{-}20 \text{ GeV}/\text{fm}^3$ に達すると予想されており、QGP 生成の決定的な証拠が得られると期待されている。

QGP 生成を示すシグナルの一つとして J/ψ 中間子の収量抑制が理論的に予言されている。QGP 中においては、Debye 効果によりチャームクォークが反チャームクォークに対して力を及ぼすことのできる距離 λ_D は系の温度の上昇に伴い小さくなっていく。系の温度が上昇し λ_D が J/ψ におけるチャーム反チャーム間の距離よりも小さくなったとき、 J/ψ は束縛状態を維持できずに崩壊する。その結果、 J/ψ の収量は減ることになる。 J/ψ の収量抑制はハドロンによる閉じこめが破れていることを直接的に示す現象であるため、RHIC における実験の一つである PHENIX 実験においては J/ψ の生成量測定は最重要課題の一つになっている。

原子核衝突では、 J/ψ は衝突初期の入射核子と標的核子によるハード散乱で生成されるため、一回の原子核衝突で生成される J/ψ の数はその原子核衝突における NN 衝突の回数 N_{coll} に比例することになる。しかしながら、原子核衝突内での個々の核子核子衝突 (以降、 NN) における J/ψ の収量は、QGP が生成されない場合でも、陽子陽子衝突から変化する

ことが知られている。そのため、金原子核衝突のみで QGP の生成を確認することはできない。こうした原子核効果には二つの過程があることが知られている。

一つ目は、 J/ψ を構成するチャームクォークの初期生成量の変化である。チャーム反チャーム対は入射および標的原子核中のパートン同士の相互作用によって生成される。CERN-EMC 実験の結果などに見られるように、原子核中における核子のパートン分布関数は核子単体のそれとは異なる。結果として、単体での陽子陽子衝突に比べて原子核衝突での NN 衝突におけるチャーム反チャーム対の生成量は変化する。

もう一つの過程は、衝突最終段階における入射ないし標的原子核による J/ψ の原子核吸収と呼ばれる過程である。吸収に寄与する主な過程は、 J/ψ が標的原子核中の核子と衝突し D 中間子および反 D 中間子に分解される反応である。吸収過程に対する J/ψ の生存確率は

$$e^{-L\rho_0\sigma_{abs}} \quad (1)$$

と表すことができる。ここで、 L は生成された J/ψ が原子核外に出るまでの実効的な距離、 ρ_0 は核密度、 σ_{abs} は吸収断面積である。

これらの原子核効果に関する測定は CERN-SPS における NA38/50/51 共同研究 ($\sqrt{s_{NN}} = 17-29$ GeV) および FNAL-Tevatron における E866 共同研究 ($\sqrt{s_{NN}} = 39$ GeV) 等、RHIC よりも低い衝突エネルギー領域での陽子・原子核衝突実験によって行われてきた。しかしながら、これらの実験で得られた測定結果に対し行われてきた理論的考察には統一見解がなく、RHIC の衝突エネルギーでの振舞が必ずしもよくわからないので、実験的に確かめる必要がある。RHIC では $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV における通常状態での原子核効果を検証するため、2003 年 1 月から 3 月にかけて、重陽子と金原子核による衝突を行った。NA50 や E866 は固定標的の実験であるが、RHIC での実験は衝突実験である、そのため衝突を正面衝突に近づけるため、入射原子核として重陽子を用いている。著者は PHENIX 実験において電子対測定を行い、中間ラピディティ領域 ($-0.5 < y < 0.5$) の J/ψ の収量を求め、原子核効果の検証を行った。

電子対測定には PHENIX 検出器の Beam-Beam Counter (BBC) および Central arm を使用した。BBC は前・後方領域に設置されており、前方と後方の BBC に対して衝突点から粒子が到達する時間の差から、衝突位置が決定される。粒子の飛跡は Central arm の Drift Chamber (DC) および Pad Chamber (PC) によって検出される。衝突点から DC まではビーム軸方向に磁場がかかっており、粒子の飛跡から運動量が決定される。陽子、 K 中間子、 π 中間子を用いて運動量の分解能を評価したところ、電子に対する分解能として

$$\delta p/p \simeq 1.37 \times 10^{-2} \times p [\text{GeV}/c] + 0.29 \times 10^{-2} \quad (2)$$

が得られた。

電子識別には Central arm のリングイメージングチェレンコフ検出器 (RICH) ならびに電磁カロリメータ (EMC) が用いられた。PHENIX の RICH 検出器は電子と π 中間子を運動量 $5 \text{ GeV}/c$ 以下で識別することが可能である。EMC による電子識別では、電子とそれ以外の荷電粒子が EMC に残すエネルギーの違いを利用して電子を識別している。RICH と EMC の両方を用いた場合、 $1 \text{ GeV}/c$ の電子に対し検出効率は 86% で、同じ運動量のハドロンによるバックグラウンドを 1700 分の 1 にすることができる。

衝突ごとに、検出されたすべての電子と陽電子の組み合わせについて不変質量 m を計算し、その分布を作成した。中性 π 中間子の Dalitz 崩壊あるいは外部変換に起因するバック

グラウンドは事象混合法を用い除去した。最終的に質量 $2.52 < m < 3.57$ [GeV/ c^2] の間に 326 ± 15 個の J/ψ を得ることができた。検出効率をモンテカルロシミュレーションによって見積り、断面積の決定を行った。結果として全ての横運動量に対し積算した重陽子・金衝突での J/ψ の断面積として

$$\frac{d\sigma_{dAu}^{J/\psi}}{dy}\Big|_{y=0} = (1.17 \pm 0.06(stat.) \pm 0.17(sys.)) \times 10^5 \text{ nb} \quad (3)$$

が得られた。

重陽子・金衝突実験で得られた J/ψ の収量 $Y_{dAu}^{J/\psi}$ と、陽子陽子衝突における J/ψ の収量 $Y_{pp}^{J/\psi}$ との比

$$R_{dAu} = \frac{Y_{dAu}^{J/\psi}/N_{coll}}{Y_{pp}^{J/\psi}} \quad (4)$$

によって収量変化の考察を行った。ここで N_{coll} は原子核衝突における NN 衝突の数であり、Glauber 模型による計算から、一回の重陽子・金衝突におけるその平均は 4.69 と見積もられる。2003 年 4 月から RHIC-PHENIX で行われた陽子陽子衝突実験において測定された J/ψ の収量を用いて R_{dAu} は

$$R_{dAu} = 0.80 \pm 0.10(stat.) \pm 0.09(sys.) \quad (5)$$

と求められた。

J/ψ 生成に関与した標的側のパートンが核子に対して担う運動量比 x_2 と生成された J/ψ のラピディティ y とは

$$x_2 = \frac{m_T}{\sqrt{s}} e^{-y} \quad (6)$$

で関連づけられている (m_T は J/ψ の横質量)。従ってパートン分布関数に起因する収量変化は J/ψ のラピディティに依存する。PHENIX ではミュオン対測定による前方および後方ラピディティ領域 ($1.2 < |y| < 2.4$) の J/ψ 測定も行われており、このラピディティ領域で得られた R_{dAu} を採り入れることでパートン分布の変化に対する J/ψ の収量変化を考察した。図 1 に、電子対崩壊チャネルおよびミュオン対崩壊チャネルの各ラピディティ領域に対し測定された R_{dAu} を示す。図 1 に実線で示されているのは Eskola らが予想した原子核内パートン分布関数を用いて計算された原子核内パートン分布の効果による R_{dAu} である。計算された値は実験値の傾向を再現している。

また、 R_{dAu} から初期生成に関する原子核効果を差し引くことで吸収断面積を求めた。 J/ψ が原子核内を移動する実効的な距離 L は、Glauber 模型による計算により 4.36 fm と求まる。吸収過程がラピディティに依存しないとし、Eskola らが予想した原子核内パートン分布関数を用いた場合、式 (1) より、吸収断面積は

$$\sigma_{abs} = 1.0 \pm 0.7 \text{ mb} \quad (7)$$

と求まる。Frankfurt らが予想した原子核内パートン分布関数を用いた場合、吸収断面積は

$$\sigma_{abs} = 0.1 \pm 0.7 \text{ mb} \quad (8)$$

と求まる。

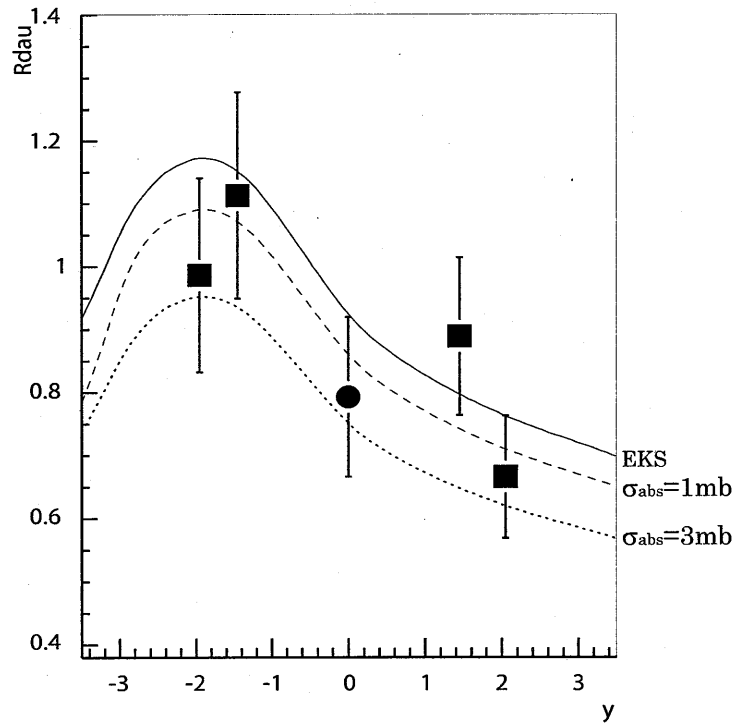


図 1: 陽子陽子衝突における J/ψ の収量に対する、重陽子金原子核衝突時の核子間衝突あたりの J/ψ の収量の比 R_{dAu} 。電子対崩壊チャネル測定による中央ラピディティ領域の J/ψ に対する R_{dAu} が丸い点で、ミュオン対崩壊チャネル測定による前方および後方ラピディティ領域の J/ψ に対する R_{dAu} が四角い点でそれぞれ示されている。Eskola らの予想したパートン分布関数による理論的な R_{dAu} が実線でしめされている。破線、点線はさらに吸収断面積が 1 mb ないし 3 mb であるときの吸収過程を含めた R_{dAu} である。

求められた吸収断面積の中心値はいずれも NA50 実験や E866 実験で得られた E866 実験で得られた値 ($\sigma_{abs}=3-5$ mb) よりも小さい。RHIC のエネルギーで吸収断面積が小さくなることは、入射核子と二つの標的核子にわたるグルーオンの反応によって J/ψ の初期生成量が増加しているという描像、あるいは Landau-Migdal-Pomeranchuk 効果によってグルーオンと J/ψ の反応が減少しているという描像によって説明することができる。これらの描像に対しては今後標的あるいは衝突エネルギーを変更した実験を行うことでより深い考察を行うことができると期待される。

本研究により得られた結果は、今後の RHIC における QGP 検証のための基礎データとして重要な役割を果たしていくと考えられる。