

氏 名	細川 律也				
学 位 の 種 類	博 士 (理学)				
学 位 記 番 号	博 甲 第 9229 号				
学位授与年月日	平成31年4月30日				
学 位 授 与 の 要 件	学位規則第4条第1項該当				
審 査 研 究 科	数理物質科学研究科				
学 位 論 文 題 目	Measurement of jet properties in pp and Pb-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ TeV with the ALICE experiment at the LHC (LHC-ALICE 実験における重心系衝突エネルギー 5.02 TeV 陽子・陽子衝突及び鉛-鉛衝突実験データを用いたジェットの測定)				
主 査	筑波大学	教授	理学博士	三明 康郎	
副 査	筑波大学	准教授	博士(理学)	江角 晋一	
副 査	筑波大学	講師	博士(理学)	中條 達也	
副 査	筑波大学	准教授	博士(理学)	原 和彦	
副 査	長崎総合科学大学	教授	博士(理学)	大山 健	

論 文 の 要 旨

本論文は、欧州原子核研究機構 (CERN)の大型ハドロン衝突型加速器 LHC を用いた実験の1つ、ALICE 実験におけるジェット測定に関する論文である。ALICE 実験では、同加速器で重イオンを加速、衝突させ、超高温・高エネルギー密度物質「クォーク・グルーオン プラズマ (QGP)」を生成し、その性質の解明を目的としている。QGP とは、通常は核子 (陽子や中性子) の中に閉じ込められているクォークやグルーオンが、核子の閉じ込めから解放され、自由粒子の様に振る舞うことができる超高エネルギー密度の物質であり、宇宙のビックバンから数10マイクロ秒後に存在したとされる物質の状態である。

著者は、2015 年に収集された世界最高エネルギー $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ TeV での鉛・鉛原子核衝突データ、および陽子・陽子衝突データを用いてジェットを測定した。ジェットとは、初期パートン同士の高い運動量移行を伴う衝突によって発生する、高横運動量の粒子束である。測定により、以下の結果が得られた。

1. 陽子・陽子衝突データ $\sqrt{s} = 5.02$ TeV において、Anti-kT アルゴリズムという手法を用いて荷電粒子を用いたジェットを再構成し、100 GeV/c までの横運動量領域でのジェット横運動分布を測定した。異なるコーン半径 (Resolution Parameter, R) でジェット横運動分布の測定を行い、摂動論的 QCD 計算と比較した。その結果、高次補正項を含む NLO pQCD 計算において、実験データをよく再現することが分かった。

2. 次に、鉛・鉛衝突データ $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ TeV において、荷電粒子を用いたジェットを Anti-kT アルゴリズムで再構成し、ジェット生成の反応平面依存性の測定を行った。その結果、中心衝突度 30-50% において、約 10% のジェットの楕円的異方性 (v_2) が測定された。

3. これまで測定されていたジェット抑制効果の結果、1. の陽子・陽子衝突におけるジェットの横運動量分布、および 2. の v_2 の測定から、初期パートンの QGP 通過距離 (L) の違いによって、どの様に初期パートンがエネルギー損失を行っているかをトイモデルを使って検証した。その結果、エネルギー損失が $L^{2.6}$ の依存性を持つことと矛盾がないことが分かった。

4. さらに鉛・鉛衝突データ $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ TeV において、ジェットの周りに生成されるハドロンの粒子生成、特に 2 GeV/c 以下の低い横運動量を持つ粒子について、ジェット軸と反応平面依存性を調べた。その結果、QGPの通過距離が長い方向に対して、ハドロンの方位角方向の広がり、通過距離が短い方向に比べてより広がっていることが分かった。この結果は、ジェットと QGP との相互作用と関連していると考えられ、今後モデルと比較により、その分布の広がりについて新たな知見を与えることが期待される。

以下、博士論文の各章の内容について、概要を説明する。

第1章では、導入として、量子色力学、QGP の物理、QGP 中でのパートン・エネルギー損失機構、これまでのジェット測定についての記述があり、本研究の動機付けがなされている。

第2章では、LHC 加速器、ALICE 実験の検出器、特に本論文でのデータ解析に使われた検出器について、述べられている。

第3章では、著者が開発に大きく関わった ALICE 電磁カロリメータの Level-1 トリガー・アップグレードについて述べられている。高エネルギーの光子、ジェットを効率よく捉えるために開発された本トリガーシステムについて、トリガーの仕組み、開発要素、トリガーアルゴリズム、アップグレード完了後の動作、について述べられている。

第4章では、データとデータ解析手法について記述している。2015 年に取得したデータを使っているが、データのイベント選択、荷電トラック選択、ジェット再構成、バックグラウンドの差し引き方法、検出器効果の補正、反応平面の決定方法、ジェット-ハドロン相関の測定方法について、詳細が述べられている。

第5章では、(1) 陽子・陽子衝突のジェット横運動量分布、(2) ジェット-ハドロン相関、(3) ジェット楕円的方位角異方性、の各測定における系統誤差の評価方法と、系統誤差が記載されている。

第6章では、まず (a) 陽子・陽子衝突のジェット横運動量分布、(b) ジェット楕円的方位角異方性、の測定結果が示されている。その後、(a)、(b) の結果を用いて、パートンのエネルギー損失の通過距離依存性について、トイモデルを使って検証している。また、(c) ジェット-ハドロン相関の結果と JEWEL モデルとの比較を行っている。

第7章では、まとめと今後の展望が述べられている。

審 査 の 要 旨

〔批評〕

審査会は全て英語で行われた。まず本人による本論文の内容についての発表が行われ、その後、質疑応答が行われた。前半の発表と質疑応答の部分については公開で行われた。後半の非公開部分では、主査、副査から本論文の内容について、さらなる質疑応答がなされた。

本論文での示されているデータのうち、陽子・陽子衝突における荷電ジェット横運動量分布の結果は、既に投稿論文として準備され、コラボレーション内での審査が最終段階にあること、またジェット-ハドロン相関測定は、ALICE 実験内で審査され、暫定結果 (preliminary data) として既に公開されているものであり、信頼性が高いことが、審査員から挙げられた。

また本論文は、著者が行ってきた3種類の異なるデータ解析に加えて、電磁カロリメータ検出器の光子・ジェット Level 1 トリガーアルゴリズムの新規開発に、本人が大きく関わったことも評価された。通常の博士論文では見られない、幅の広い研究活動が博士論文にも現れている。また審査委員会は、本データ解析と考察において、パートンの QGP 中でのエネルギー損失機構に関して、その通過距離依存性に新たな知見を得たと評価している。博士論文においては、内容が非常に高いレベルにあることが評価された。審査会当日の研究内容の発表、質疑応答においても、本論文に即した充実した内容であった。

〔最終試験結果〕

平成31年3月29日(於 筑波大学)、数理物質科学研究科 学位論文審査委員会において審査委員の全員出席のもと、著者に論文について説明を求め、関連事項につき質疑応答を行った。その結果、審査委員全員によって、合格と判定された。なお副査の 江角晋一 氏は、テレビ会議システムを用いて審査会に参加した。

〔結論〕

上記の論文審査ならびに最終試験の結果に基づき、著者は博士(理学)の学位を受けるに十分な資格を有するものと認める。