

平成 29 年 6 月 14 日現在

機関番号：12102

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2013～2016

課題番号：25287048

研究課題名(和文) 粒子・ジェット方位角相関測定によるグルーオン衝撃波の探索

研究課題名(英文) Study of particle-jet azimuthal correlations for gluon shock-wave search

研究代表者

三明 康郎 (MIAKE, Yasuo)

筑波大学・数理物質系(副学長)・副学長

研究者番号：10157422

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 11,000,000円

研究成果の概要(和文)：ビッグバン宇宙の初期に存在したとされるクォーク・グルーオンプラズマ(QGP)状態を生成し、その物性を調べる研究が進められている。私たちはQGP物性を調べるためLHC-ALICE実験において高エネルギー衝突に特徴的なダイジェット事象を効率よく測定するDi-Jet識別装置(DCAL)の設置・運用、さらにDi-Jet事象トリガー装置を開発を行った。両装置とも当初計画通りの性能をあげていることが確認されつつあり、フルジェットを用いた解析、ジェット減少度の解析結果を得ている。また衝撃波の探索を鋭意進めている。

研究成果の概要(英文)：To study the property of Quark Gluon Plasma, we have implemented a di-jet calorimeter (DCAL) and a trigger system for the DCAL at the LHC ALICE experiment. Both system have been implemented and operated successfully. Full jet analysis using DCAL is in progress.

研究分野：原子核物理

キーワード：クォーク・グルーオンプラズマ 高エネルギー原子核・原子核衝突 ジェット 方位角相関 LHC ALICE 実験

1. 研究開始当初の背景

我々の宇宙を構成する素粒子(ハドロン)は、クォークとグルオンが閉じ込められた状態と考えられており、これらクォーク、グルオンの運動状態は量子色力学によって記述される。量子色力学の計算によれば、非常に高温高密度になると、閉じ込めから開放されて、クォーク・グルオンのプラズマ状態に相転移すると予測されている。ビッグバン宇宙の極めて初期には宇宙は QGP 状態として存在し、その後相転移を起こしてハドロンが生成されたと考えられている。

2000年に開始された米国ブルックヘブン国立研究所の RHIC 加速器において QGP の生成が確認された。さらに、CERN の LHC 加速器において、RHIC に比べ 10 倍以上高エネルギーの相対論的原子核・原子核衝突実験が可能となり、QGP の研究は、その発見から物性の理解のステージに進んでいる。

RHIC や LHC 加速器における原子核・原子核衝突実験で QGP が生成されたとする主な根拠として、次の4点が挙げられる。

(1) 運動学的・化学的平衡状態の成立と高い温度。

様々な種類のハドロンの収量とその運動学的分布が測定され、クォークの組み合わせも生成メカニズムも異なる様々なハドロンの収量比は、クォークレベルの熱的平衡の成立を示し、その温度は約 170 MeV と QCD 計算の提示する QGP 相転移温度とよく一致している。

(2) 大きな方位角異方性 (v_2)

生成粒子の平均自由行程が十分に短いと非中芯衝突において粒子の放出方向に影響を与える。つまり反応の空間的異方性が粒子の運動量空間の異方性に転換される。識別測定された p、K、 Λ の v_2 観測から衝突後 0.6 fm/c という極めて短時間に平衡状態に到達し、粘性のない理想流体という描像がもたらされた。その後粘性率 $\eta/s \sim 0.1-0.2$ という量子限界に極めて近い測定結果が得られた。

(3) バリオン異常生成 とクォーク数則

ハドロンの識別測定から p/π 生成比が 2 GeV/c 以上で異常に高くなる現象(バリオン異常生成)が発見され、クォーク融合模型が提案された。この模型ではクォークはユニバーサルな分布関数を持ち、ハドロンの横運動量分布や方位角異方性が示すクォーク数則という特徴的振舞を説明することができた。

(4) ジェットの変貌(Jet Modification)

高エネルギーの pp 衝突や e+e-衝突実験において高横運動量領域では、パートン・パートン 2 体散乱を粒子生成起源とし、正反対方向のジェット相関が観測される。ところが原子核・原子核衝突では反対方向の粒子群が消失/減少するという衝撃的な観測結果が得られた。これは、

パートンが QGP 中を通過する際の特徴的なエネルギー損失のためと考えられている。

これらの実験事実から原子核・原子核衝突で QGP が生成されたことは疑う余地はないと思われるが、QGP の物性的性質についてはまだ十分に理解されていない。

2. 研究の目的

上述の通り当該分野の研究の流れは、RHIC 実験において QGP 生成の確証を掴み、LHC 実験において 10 倍以上の高エネルギー衝突を用いて、より高エネルギーのプロープを用いた QGP 物性の計測へとフェーズが移りつつある。QGP 物性の最も有望かつ直接的測定は、上述の ジェットの变貌効果(Jet Modification) による研究であると考えている。これは、物質の密度あるいは厚さを測るために、電子ビームなどを打ち込み、物質中のエネルギー損失を測ることによって、物質の電子密度など物性を直接測ることと同等である。色電荷を持つパートンの QGP 中の dE/dx を測ることによってグルオン密度など重要な QGP 物性を計測できる。

QGP 中の dE/dx 測定以上に、我々が期待しているのは、パートンが QGP のグルオン場に引き起こす衝撃波を見つけることである(図1)。衝撃波の開き角度からグルオン場における「音速」を直接決めることが出来、そして音速は QGP 物質の状態方程式に直結した情報である。バックグラウンドの中から見つけるのは困難が予想されるが、発見を目指して測定を続けている。

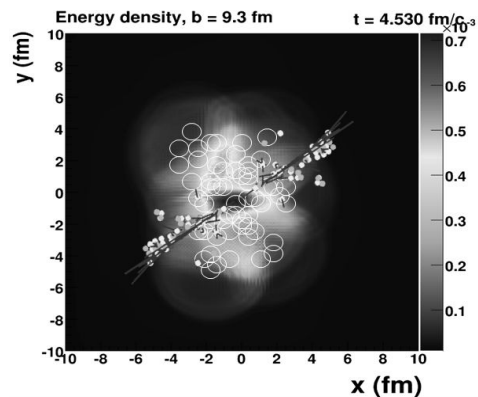


図1) 超高エネルギーの Di-Jet 事象とグルオン衝撃波生成の様子

3. 研究の方法

私たちの研究の目的を達成するために重要な実験技術として次の2点が挙げられる。

(1) Di-Jet 識別測定装置。

パートン対は等しい横エネルギーで発生するが、それぞれが見る QGP の厚さに相当するエネルギー損失を受け、結果としてエネルギー差が観測される。エネルギー差から QGP 中における発生点を知ることができるため、ジェット識別装置のエネルギー分解能は極めて重要である。

(2) Di-Jet 事象トリガー装置。

高エネルギー重イオン衝突は極めて複雑な事象であり、多数の粒子が発生する。このために、効率良く Di-Jet 事象を検出・収集するためには、トリガー装置が重要な役割を果たす。

私たちは、(1)の Di-Jet 識別測定装置を建設するために、LHC-ALICE 実験において、米国、フランス、イタリア、中国の研究者に呼びかけ、Di-Jet カロリメータプロジェクト DCAL (提案者; 三明康郎、運営; 5 カ国代表による合議) を新たに立ち上げ、カロリメータの建設を行った(科研費基盤 S、H20-24、代表者; 三明康郎)。LHC 運転の遅延や 3.11 震災による DCAL 建設の遅延も重なり、DCAL 検出器のインストールは H24 になったが、同年より運用が開始された。そして、(2)の Di-Jet 事象トリガー装置の開発・製作を本科学研究費によって行い、H25 から物理測定に於ける運用が開始された。

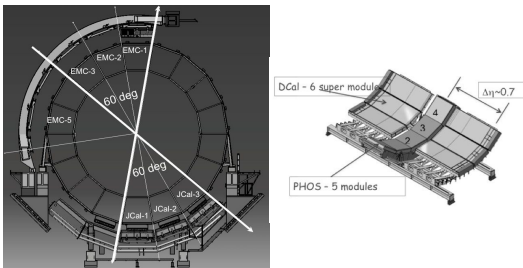


図 2) 5 カ国共同で建設した DCAL

4 . 研究成果

本研究は、以下の 4 段階を経て進めた。

(1) Di-Jet 識別測定装置の建設・運用

Di-Jet 事象とは高エネルギー衝突初期の 2 体パートン・パートン散乱によって高エネルギーの 2 つのパートンが相反方向に大きな横運動量を持って飛び出し、比較的狭い運動量空間に多数の粒子発生 (ジェット) を引き起こす現象である。ジェット識別測定の要点の第 1 は、ジェット測定の分解能 (エネルギー分解能と角度分解能) である。特にエネルギー分解能は、ダイジェットのエネルギーバランスにより QGP 中の衝突点を測定するため重要である。ALICE 実験では、既設の Time Projection Chamber に DCAL (電磁カロリメータ) を組み合わせると最善の分解能を得ることができる。既設の EMCAL 装置、PHOS 装置と組み合わせることによって、相反方向に放出される Di-Jet をそれぞれ高分解能で識別測定し、そのエネルギーバランスにより QGP 中に於ける衝突点を決定することが特に重要なポイントである。H26 年 11 月までにインストールを完了し、H27 より物理測定を開始した。(図 4)

(2) Di-Jet 事象トリガー装置の開発・製作

高エネルギー重イオン衝突では数多くの粒子が生成放出されるために、効率良

く Di-Jet 事象を高統計で収集するためには、トリガー装置が必須である。トリガーレベルのオンラインで粒子群の方向とエネルギーを推定し、ジェット事象のトリガーを生成するための装置を開発・制作した。FPGA(Xilinx Vertex) を搭載した Jet トリガー装置 (Summary Trigger Unit、図 3) を新たに導入した。平成 27 年の物理測定から使用され、90% 以上の高いトリガー効率と 30GeV のジェットに対し 10^4 の rejection 能力を有することが確認された。

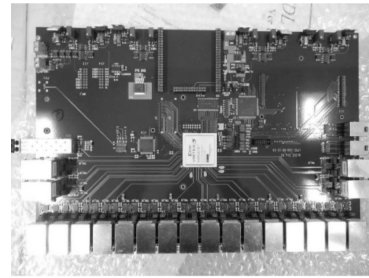


図 3) FPGA 搭載 Jet トリガー装置

(3) Di-Jet 識別装置の運用とジェット解析

平成 27 年の実験から Jet トリガー装置とともに DCAL の運転も順調に始まった。中條達也氏が Deputy Leader を務め、Di-Jet 識別装置全体の運用が開始された。図 4 に今回導入した DCAL によって得られた 2 光子質量分布を示す。既に DCAL においても 0 中間子に相当するピークが明確に観測され、既設の EMCAL と同等の質量分布が得られ、解析・調整作業が順調に進んでいることを示している。

ジェットの識別解析も順調に進んでいる。図 5 は、本学院生の横山らを中心に行った $\sqrt{s}=5.02$ GeV における鉛・鉛原子核衝突におけるジェット減少度の結果である。同エネルギーの陽子・陽子衝突に比べて陽子・陽子衝突では、高エネルギーパートンの QGP 中での特徴的な dE/dx を大きく受けるため、ジェット収量が減少する。減少度はその割合を示している。他のデータと比較して矛盾しない結果が得られてきており、我々のジェット解析能力の達成度を示すと捉えている。この時点では DCAL のデータをまだ含んでいないが、図 4 に示したように DCAL の調整も完成しつつあり、フルジェット解析に着手している。図 5 に示した

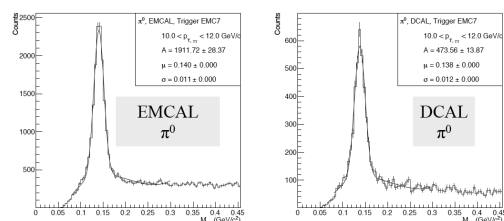


図 4) DCAL による 2 光子質量分布。明確な π^0 中間子のピークが見られる。

ジェット減少度(R_{AA})から QGP 中の dE/dx 、さらに衝撃波の探索を進めている。

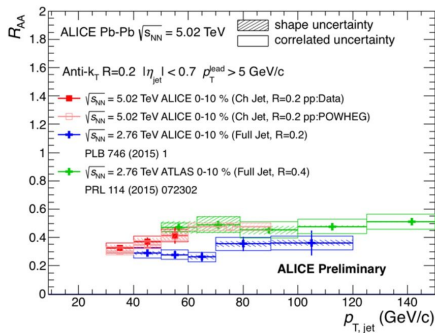


図5) $s=5.02$ GeV Pb+Pb 衝突におけるジェット減少度 (R_{AA}) 解析結果。(横山ら、国際会議 Hard Probes 2016 で発表)

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文(査読付)](計 98 件)

- 1) Jet-like correlations with neutral pion triggers in pp and central Pb-Pb collisions at 2.76 TeV, J. Adam, , T. Chujo, S. Esumi, Y. Miake et al. (ALICE Collaboration), Phys.Lett. B, 763 (2016)238-250, 10.1016/j.physletb.2016.10.048
- 2) Higher harmonic flow coefficients of identified hadrons in Pb-Pb collisions at $s_{NN}=2.76$ TeV, J. Adam, , T. Chujo, S. Esumi, Y. Miake et al. (ALICE Collaboration), JHEP, 1609(2016)164, 10.1007/JHEP09(2016)164
- 3) Elliptic flow of electrons from heavy-flavour hadron decays at mid-rapidity in Pb-Pb collisions at $s_{NN}=2.76$ TeV, J. Adam, , T. Chujo, S. Esumi, Y. Miake et al. (ALICE Collaboration), JHEP, 1609(2016)28, 10.1007/JHEP09(2016)028
- 4) Pseudo rapidity dependence of the anisotropic flow of charged particles in Pb-Pb collisions at $s_{NN}=2.76$ TeV, J. Adam, , T. Chujo, S. Esumi, Y. Miake et al. (ALICE Collaboration), Phys. Lett. B, 762(2016)376-388, 10.1016/j.physletb.2016.07.017
- 5) Centrality dependence of charged jet production in p-Pb collisions at $s_{NN}=5.02$ TeV, J. Adam, , T. Chujo, S. Esumi, Y. Miake et al. (ALICE Collaboration), Eur.Phys.J. C, 76 (1026) 271, 10.1140/epjc/s10052-016-4107-8
- 6) Anisotropic flow of charged particles in Pb-Pb collisions at $s_{NN}=5.02$ TeV, J. Adam, , T. Chujo, S. Esumi, Y. Miake et al. (ALICE Collaboration), Phys.Rev. Lett., 116(2016)132302, 10.1103/PhysRevLett.116.132302
- 7) Azimuthal anisotropy of charged jet production in $s_{NN}=2.76$ TeV Pb-Pb collisions, J. Adam, ..., T. Chujo, S. Esumi, Y. Miake (ALICE Collaboration), Phys. Lett. B, 753(2016)511-525, 10.1016/j.physletb.2015.12.047
- 8) Event shape engineering for inclusive spectra and elliptic flow in Pb-Pb collisions at $s_{NN}=2.76$ TeV, J. Adam, ..., T. Chujo, S. Esumi, Y. Miake (ALICE Collaboration), Phys. Rev. C, 93 (2016)34916, 10.1103/PhysRevC.93.034916
- 9) Measurement of jet quenching with semi-inclusive hadron-jet distributions in central Pb-Pb collisions at $s_{NN}=2.76$ TeV, J. Adam, ..., T. Chujo, S. Esumi, Y. Miake (ALICE Collaboration), JHEP, 1509(2015)170, 10.1007/JHEP09(2015)170
- 10) Measurement of dijet k_T in p-Pb collisions at $s_{NN}=5.02$ TeV, J. Adam, ..., T. Chujo, S. Esumi, Y. Miake (ALICE Collaboration), Phys. Lett. B, 746 (2015)385-195, 10.1016/j.physletb.2015.05.033
- 11) Measurement of charged jet production cross sections and nuclear modification in p-Pb collisions at $s_{NN}=5.02$ TeV, J. Adam, ..., T. Chujo, S. Esumi, Y. Miake (ALICE Collaboration), Phys. Lett. B, 749 (2015) 68-81, 10.1016/j.physletb.2015.07.054
- 12) Measurement of jet suppression in central Pb-Pb collisions at $s_{NN}=2.76$ TeV, J. Adam, ..., T. Chujo, S. Esumi, Y. Miake(ALICE Collaboration), Phys. Lett. B, 746(2015)1-14, 10.1016/j.physletb.2015.04.039
- 13) Charged jet cross sections and properties in proton-proton collisions at $s=7$ TeV, J. Adam, ..., T. Chujo, S. Esumi, Y. Miake (ALICE Collaboration), Phys. Rev. D, 91(2015) 112012, 10.1103/PhysRevD.91.112012
- 14) Elliptic flow of identified hadrons in Pb-Pb collisions at $s_{NN}=2.76$ TeV, J. Adam, ..., T. Chujo, S. Esumi, Y. Miake (ALICE Collaboration), JHEP, 1506 (2015) 190, 10.1007/JHEP06 (2015) 190
- 15) Measurement of charged jet suppression in Pb-Pb collisions at $s_{NN}=2.76$ TeV, B. Abelev, ..., T. Chujo, S. Esumi, Y. Miake (ALICE collaboration), JHEP, 1403(2014)13, 10.1007/JHEP03(2014) 013
- 16) Measurement of the inclusive differential jet cross section in pp

collisions at $\sqrt{s} = 2.76$ TeV, B. Abelev, ..., T. Chujo, S. Esumi, Y. Miake (ALICE collaboration), Phys.Lett. B, 722(2013) 262-272, 10.1016/j.physletb.2013.04.026

[学会発表](計 79 件)

- 1) R. Hosokawa (院生), Measurements of charged jet spectra in pp and PbPb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ TeV with ALICE, Quark Matter 2017, 2017 年 02 月 06 日, Chicago (USA)
- 2) T. Chujo, Measurements of Jets and Photons in Heavy Ion Collisions at the Highest Beam Energy during the LHC-Run 2 by ALICE, 2016 Joint Workshop of the France-Korea (FKPPL) and France-Japan (TYL/FJPPL) (招待講演), 2016 年 05 月 18 日, Seoul (Korea)
- 3) H. Yokoyama (院生), Measurement of Inclusive Charged Jet Production in pp and Pb-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ TeV with ALICE, Hard Probes 2016, 2016 年 09 月 22 日, Wuhan (China)
- 4) T. Chujo, Correlation measurements with jets, Mini-workshop on jet physics in ALICE at LHC Run2 (招待講演), 2015 年 04 月 15 日, Wuhan (China)
- 5) D. Watanabe (院生), 0 -jet correlations in pp and PbPb, Mini-workshop on jet physics in ALICE at LHC Run2 (招待講演), 2015 年 04 月 15 日, Wuhan (China)
- 6) N. Tanaka (院生), HBT measurement with jets, Mini-workshop on jet physics in ALICE at LHC Run2 (招待講演), 2015 年 04 月 15 日, Wuhan (China)
- 7) T. Chujo, Measurements of Jets and Photons in Heavy Ion Collisions at the Highest Beam Energy during the LHC-Run 2 by ALICE, 2015 Joint Workshop of TYL/FJPPL and FKPPL (Particle Physics Laboratories) @OIST (招待講演), 2015 年 05 月 20 日, OIST, Okinawa, Japan
- 8) T. Chujo, Jet Physics in Run-2 ALICE, Russia-Japan ALICE meeting (招待講演), 2015 年 08 月 05 日, IHEP, Protovino, Russia
- 9) D. Watanabe (院生), Azimuthal correlations of neutral pions and charged jets in pp 7 TeV and Pb-Pb 2.76 TeV, Quark Matter 2015 (国際学会), 2015 年 09 月 27 日, Kobe, Hyogo, Japan
- 10) D. Watanabe (院生), Jet azimuthal distributions with high pT neutral pion triggers in pp collisions from LHC-ALICE, Quark Matter 2014, 2014 年 05 月 19 日 ~ 2014 年 05 月 24 日, Darmstadt (Germany)
- 11) T. Chujo, Experimental status of

heavy-ion collisions at LHC ATHIC 2014, The 5th Asian Triangle Heavy Ion Conference (招待講演) 2014 年 08 月 05 日 ~ 2014 年 08 月 08 日, 大阪大学 (吹田市)

- 12) S. Esumi, Study of Hot QCD matter at RHIC and LHC, mini-workshop "Future Directions in High Energy QCD", HAWAII 2014 (招待講演), 2014 年 10 月 07 日 ~ 2014 年 10 月 11 日, Hawaii (USA)
- 13) H. Yokoyama (院生), Implementation of triggers for Run2, new approaches, France-Japan workshop on physics analysis in the ALICE experiment, 2015 年 03 月 14 日 ~ 2015 年 03 月 15 日, Sainte-Maxime (France)
- 14) T. Chujo, Summary of recent results from LHC, 2013 RHIC & AGS Annual Users' Meeting (招待講演), 2013 年 06 月 27 日, New York (USA)

[その他]

ホームページ;

<http://utkhii.px.tsukuba.ac.jp/>

<http://alice-j.org/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

三明 康郎 (Yasuo MIAKE)

筑波大学・数理物質系 (副学長)

研究者番号: 10157422

(2) 研究分担者

江角 晋一 (Shin'ichi ESUMI)

筑波大学・数理物質系・准教授

研究者番号: 10323263

中條 達也 (Tatsuya CHUJO)

筑波大学・数理物質系・講師

研究者番号: 70418622

(3) 連携研究者

(4) 研究協力者