

# LHC–ALICE 実験の最新状況

筑波大学数理物質系物理学域

中條 達也

chujo.tatsuya.fw@u.tsukuba.ac.jp

筑波大学大学院数理物質科学研究科

横山 広樹

hiroki.yokoyama@cern.ch

2017年(平成29年)12月6日

## 1 はじめに

2015年のCERN LHC加速器の第2物理運転(Run-2)の開始に合わせて、我々が参加しているALICE実験[1, 2]では、世界最高エネルギーによる重イオン衝突実験の第二幕が上がった。高エネルギー重イオン衝突実験のエネルギーフロンティアであるALICE実験は、重イオン衝突により生成される超高温物質「クォーク・グルーオン・プラズマ(QGP)」を生成し、その物性解明を最大の目的としている。そこでは、ハドロンの閉じ込めから解放されたクォークとグルーオンの自由度が発現し、世界最高温度で生成されるQGP研究が可能となる。

ALICE実験のRun-2データ収集においては、現在までに陽子・陽子13 TeV, 5.02 TeVデータに加えて、核子あたりの重心衝突系エネルギー5.02 TeVの鉛・鉛衝突実験, 5.02 TeV, 8 TeVの陽子・鉛衝突実験を行い、またRun-2最後の年となる2018年11月には、高統計の鉛・鉛5.02 TeV衝突実験が行われる予定である。Run-2のデータ収集の目標値は、鉛・鉛5.02 TeV衝突実験で、 $1 \text{ nb}^{-1}$  (250 M ミニマムバイアス事象, 200 M 高多重度事象)である。

この研究紹介では、ALICE実験におけるRun-2のデータ、及び第1物理運転(Run-1)のデータから、新しく分かったことを中心に報告する。また、日本グループが中心となりRun-2に向けて新たに提案、建設・設置、物理運転を始めた検出器「ダイジェットカロリメータ検出器(Di-jet Calorimeter; DCal)」を紹介し、その運転状況と性能について述べる。最後にまとめと今後の将来展望を概観する。LHC第1稼働期の初期結果については[3]を参照のこと。

## 1.1 ALICE 実験

ALICE実験(図1, 2)は、2017年12月現在、42カ国、176研究機関、1,800名の研究者からなる大型国際共同実験である。日本からは、正規機関として、筑波大学、東京大学、長崎総合科学大学、奈良女子大学、広島大学の5機関が参加し、また準正規機関として、日本原子力研究開発機構、理化学研究所の2機関が参加している。現時点で、スタッフ13名、大学院生24名(内10名が博士後期課程学生)、合計37名によりALICE-Jグループ[4]を組織している。



図1: ALICE コラボレーション。ALICE 実験エリア(Point-2)前にて撮影[5]。

ALICE実験は、LHC実験の中で原子核衝突の物理に特化した唯一の実験であり、主な目的は、高エネルギー重イオン衝突において、クォーク・グルーオン・プラズマ(QGP)相を生成し、その高温クォーク相の物性研究、極限状態の量子色力学、カイラル対称性の自発的

破れに伴うハドロン質量発現機構の解明にある。それにより、宇宙ビッグバンから約  $10 \mu\text{sec}$  の間に存在したとされる QGP 状態を地上で再現し、その状態を調べる。米国・ブルックヘブン国立研究所で 2000 年に稼働開始した RHIC 加速器によって、QGP 相の生成が確かめられ [6, 7, 8], また完全流体に近い性質を持つことが分かった。LHC では、RHIC 以上に高温の QGP 相を安定かつ大量に生成し、より詳細な QGP 物性研究を行う。高いエネルギー領域では容易に生成可能な、ジェットや直接光子、チャームやボトムといった重クォークを使うことにより、その物性を詳細に決めることができる。

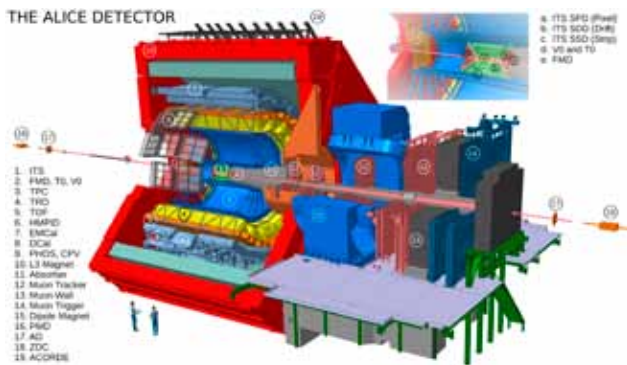


図 2: Run-2 における ALICE 検出器。

## 2 ALICE 実験における Run-2 重イオン物理のハイライト

LHC Run-2 が始まり、これまでの核子あたりの重心衝突エネルギー 鉛・鉛  $\sqrt{s_{NN}}=2.76 \text{ TeV}$  から約 2 倍となる  $5.02 \text{ TeV}$  での原子核衝突実験が始まった。ここでは、これまでに分かってきた Run-2 のハイライトを、Run-1 の結果と合わせて紹介する。

### 2.1 高温クォーク物質のバルクな性質 (大きな集団膨張と熱統計モデルの予言力)

まず、鉛・鉛衝突実験で見られたバルクな性質を見てみよう。バルクな性質の代表例としては、原子核衝突で生じるハドロン生成量 (粒子多重度), 集団的な運動 (等方的膨張や、粒子の方位角異方性), 温度, ハドロン生成源のサイズ (HBT 半径) などが挙げられる。ここではまず、等方的な集団運動を表す量である、系の膨張速度 (radial flow) と、そのときの温度 (運動学的ハドロン凍結温度; kinetic freeze-out temperature) に着目する。図 3 は、粒子識別された  $\pi^\pm, K^\pm$ , 陽子, 反陽子の横運動量分布を、膨張モデルの 1 つである Boltzmann-Gibbs Blast-Wave モデル [9] でフィットし、得られる 2 つのパ

ラメータを分布を描いたものである。パラメータの 1 つは、光速  $c$  を基準とした平均の系の膨張速度を表す  $\langle \beta_T \rangle$ , もう 1 つは、ハドロンが系から運動学的に離れた (運動エネルギーが固定された) 時の温度  $T_{kin}$  である。図 3 は、横運動量分布のフィットから得られる  $\langle \beta_T \rangle$  と  $T_{kin}$  を、様々な衝突系, 中心衝突度, 衝突エネルギーで測定したものである。中心衝突度とは、原子核・原子核衝突における衝突径数 impact parameter に相当する量であり、0 % に近いほど中心衝突であることを示し、100 % に近いほど周辺衝突であることを示す。ここでは粒子多重度 ( $dN/d\eta$ ,  $\eta$  は擬ラピディティ) の大小で色分けしている。Run-2 で測定された  $\langle \beta_T \rangle$  は、光速の約 0.65 倍にも達し、また大きな膨張速度のため、ハドロンの運動学的放出温度もそれに伴って低くなっていることがわかる。この膨張速度は、LHC  $5.02 \text{ TeV}$  における鉛・鉛中心衝突で最も大きい。この大きな集団運動は、LHC での重イオン衝突の重要な特徴の 1 つである。面白いことに、小さな系である陽子・陽子, 陽子・鉛原子核衝突においても、粒子多重度が上がるにつれて、重イオン衝突と同様に大きな集団膨張速度をもつことがわかる。小さな系での振る舞いについては、この後でまた詳しく述べることにする。同じ多重度でも、小さな系での膨張速度の方が、鉛・鉛衝突のそれと比べて大きい結果が出ていることも興味深い。

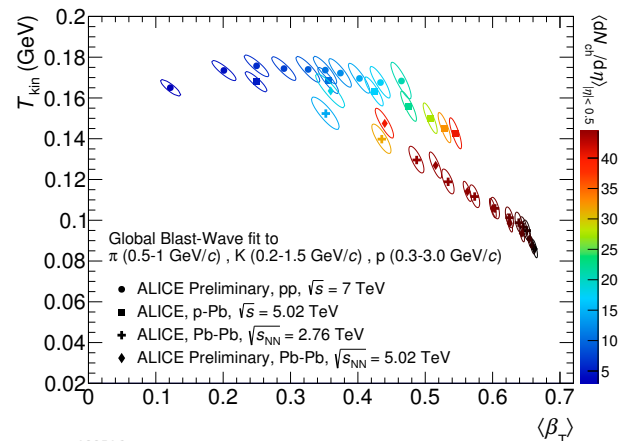


図 3:  $\pi^\pm, K^\pm$ , 陽子, 反陽子の横運動量分布を使った Blast-Wave モデルでのフィット結果。フィットによって得られるパラメータ  $\langle \beta_T \rangle - T_{kin}$  の粒子多重度依存性。

図 4 に示したのは、 $2.76 \text{ TeV}$  での鉛・鉛衝突における粒子識別された様々なハドロンの生成量 ( $dN/dy$ ,  $y$  はラピディティ) である。これも高エネルギー重イオン衝突を表すバルクな測定量の代表例であるが、これらのデータは、統計的サーマルモデル (statistical thermal model) [10] を使って、基本的に 2 つのパラメータのみで、全てのハドロンの収量を非常によく記述することができる。2 つのパラメータとは、ハドロンの化学的凍結

温度  $T_{ch}$  (chemical freeze-out temperature) と、バリオン化学ポテンシャル ( $\mu_B$ ) である。LHC のエネルギーでは、陽子と反陽子の生成比がほぼ 1 であることから分かるように、 $\mu_B \approx 0$  としてよく、各々のハドロンの収量はほぼ  $T_{ch}$  のみで決定される。決定された  $T_{ch}$  は、この場合、155 MeV である。この温度は RHIC での結果でも同様であるが、格子 QCD 計算が予言するハドロン相と QGP 相のクロスオーバー相転移温度とほぼ同じ値をとる。

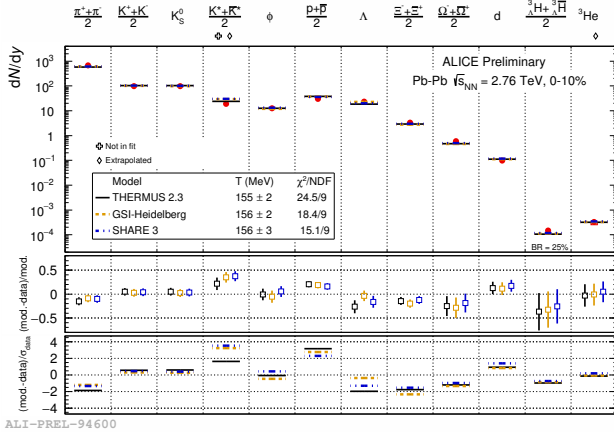


図 4: ハドロンの収量と統計的サーマルモデル。

## 2.2 $J/\psi$ 粒子で見られたチャームクォーク再結合

次に、LHC データでみられたユニークな特徴の 1 つである  $J/\psi$  の生成について見てみよう。高エネルギー重イオン反応において、 $J/\psi$  粒子は特別な意味をもつ。1980 年代、QGP 中でのカラーデバイ遮蔽効果による  $J/\psi(c\bar{c})$  生成の抑制が、松井・Satz らによって提唱され [11]、その後も QGP 生成の有力なプローブとして生き残った。1990 年代の SPS 加速器での重イオン反応ではその抑制の兆候が、また 2000 年代に入り RHIC 実験が始まり、 $J/\psi$  生成の抑制効果が確認されるに至った。一方、LHC ではどうだろうか。LHC の実験結果からわかったことは、驚くべきことに、 $J/\psi$  の抑制ではなく、その反対の増大現象であった。

図 5 に示したのは、 $J/\psi$  の  $R_{AA}$  (原子核抑制因子<sup>1</sup>) を横軸  $p_T$  (横運動量) でプロットしたものである。原子核抑制因子  $R_{AA}$  は、原子核衝突における効果を表す量として、以下の式で定義される。

$$R_{AA}(p_T) = \frac{d^2 N_{AA}/dp_T dy}{\langle N_{coll} \rangle \times d^2 N_{pp}/dp_T dy} \quad (1)$$

<sup>1</sup>nuclear modification factor

ここで、 $N_{coll}$  は原子核衝突における核子間二体衝突数である。つまり、 $R_{AA}$  は、核子対衝突あたりの原子核衝突と  $p+p$  衝突での収量比である。もし  $A+A$  衝突が  $p+p$  衝突の重ね合わせで表されるとすると、 $R_{AA} = 1$  となり、収量に抑制があると  $R_{AA} < 1$  となる。

図 5 に見られる様に、低い運動量領域では増加 ( $R_{AA} > 1$ ) が、高い運動量領域では抑制 ( $R_{AA} < 1$ ) されていることが分かる。このデータの解釈としては、QGP 中の  $c\bar{c}$  のうち、位相空間の近い  $c\bar{c}$  が再結合し、 $J/\psi$  がパートン同士の初期衝突で生成されたものよりも多く生成されているという見方が有力である。一方で、高い運動量領域では、RHIC エネルギーと同様、強い抑制が見られる。この低い運動量領域での  $J/\psi$  生成増大は、LHC の重イオンデータのみで見られる大きな特徴である。 $c\bar{c}$  再結合を示唆するもう一つのデータは、 $J/\psi$  粒子の大きな方位角異方性である。方位角異方性とは、原子核同士の非中心衝突反応において、衝突径数ベクトル  $\vec{l}$  が張る平面 (反応平面  $\Psi$ ) に対して、粒子の放出角度を方位角  $\phi$  で測った際、 $dN/d(\Psi - \phi)$  で粒子の収量を測定し、その 2 次のフーリエ成分のことである。具体的には、次式で表される量であり、2 次のフーリエ成分のことを  $v_2$  で表す。

$$\frac{dN}{d(\Psi - \phi)} = A \cdot (1 + 2v_2 \cos(2(\Psi - \phi))) \quad (2)$$

図 6 にある様に、 $J/\psi$  の方位角異方性  $v_2$  は大きく、またその大きさは、他の ( $u, d, s$  クォークを含む) 軽いハドロンの同様の大きさを持つことがわかった。モデルとの比較では、大きな  $v_2$  の寄与は、初期生成起源 (Primordial) のものより、再結合 (Inclusive) からきていることも分かってきた (図 7)。また、チャームクォークを含む  $D$  中間子の  $v_2$  も、大きな値を観測している (図 6)。

## 2.3 小さな衝突系で QGP 生成?

近年特に注目を浴びているのは、小さな衝突系 (Small System) での集団運動的な振る舞いである。Small System とは、2 核子系である陽子・陽子衝突、または一方は陽子だが、もう一方は原子核 (例えば  $p+Pb$  や  $p+Au$  衝突) などの衝突系を指す。LHC 加速器が稼働し、 $\sqrt{s_{NN}} = 7$  TeV での陽子・陽子衝突データが出始めてまもなくの 2010 年 9 月、CMS 実験により、非常に高い粒子多重度のイベントを選ぶと、あたかも重イオン衝突でみられた様な現象が観測されたとの報告があった [12]。その後、LHC での実験のみならず、RHIC においても同様の解析がなされ、現在でも様々なプローブを用いてこの小さな系の研究が進んでいる。

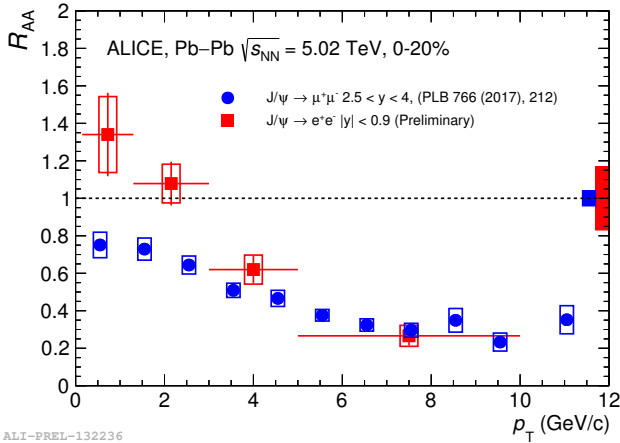


図 5:  $J/\psi$  粒子の原子核抑制因子 (鉛・鉛  $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$  TeV, 0-20% 中心衝突)。中心ラピディティ領域で測られた  $J/\psi \rightarrow e^+e^-$  (赤角), 前方方向で測られた  $J/\psi \rightarrow \mu^+\mu^-$  (青丸) のデータ。  $R_{AA} = 1$ , 右側のバーは, 取量規格化に起因する系統的不確かさ。

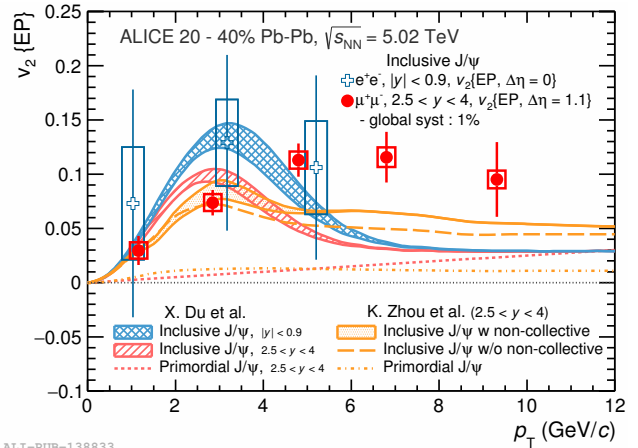


図 7:  $J/\psi$  中間子の方位角異方性 ( $v_2$ ) とモデルとの比較。

再現が難しいこともわかっている。「ストレンジネス増大」現象は, かつては QGP のシグネチャとして提唱され [13], これまで重イオン衝突特有のものだと思われてきた現象が, 実は高い粒子多重度の小さな衝突系においても, 顕著に「ストレンジネス増大」があることが初めて明らかになった [14]。

では, 小さい衝突系での集団的な運動はどうであろうか。図 9 は, 横軸が横運動量, 縦軸が前出の方位角異方性  $v_2$  である。衝突系は陽子・鉛衝突  $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$  TeV で, 高い粒子多重度事象を選んでいる。データは主に粒子識別されたハドロンである。重イオン衝突でもみられた大きな  $v_2$  が, 小さな系である陽子・鉛でも見えていることが分かった。

それでは, QGP 生成の証拠の 1 つであるジェット抑制は小さな衝突系で見えたのだろうか。図 10 に示すのは, 粒子識別された様々な粒子の原子核抑制因子を陽子・鉛衝突系  $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$  TeV で見たものである。高い横運動量領域 (8 GeV/c 以上) のハドロンは, その生成起源を初期パートンの硬散乱 (hard scattering) にもつ。それらはジェットとなって終状態で観測される。図 10 の赤角のデータ (中心ラピディティ領域  $|y| < 0.9$ ,  $J/\psi \rightarrow e^+e^-$ ) に見られるように, 8 GeV/c 以上の横運動量の原子核抑制因子  $R_{pPb}$  はどの粒子種も 1 付近にあり, ジェット抑制効果が小さな衝突系では見られていない。この図は中心衝突度を分けていないが, 分けた場合でもジェット抑制効果は見られなかった。

小さな衝突系で集団運動やストレンジネス増大が見られたのにも関わらず, ジェット抑制が見られていないことの解釈として, QGP 的なものが作られたとしても, そのサイズが小さい為に十分なパートンのエネルギー損失が生じないで, 系の外に出てきてしまったとの見方もある。ただこの小さい衝突系での集団運動の起源がマルチパートン相互作用から生じる流体現象として解釈できるのか, あるいは, 衝突初期の条件として考えられてい

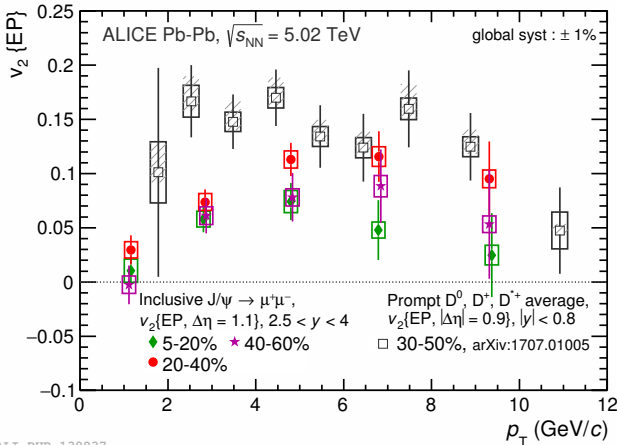
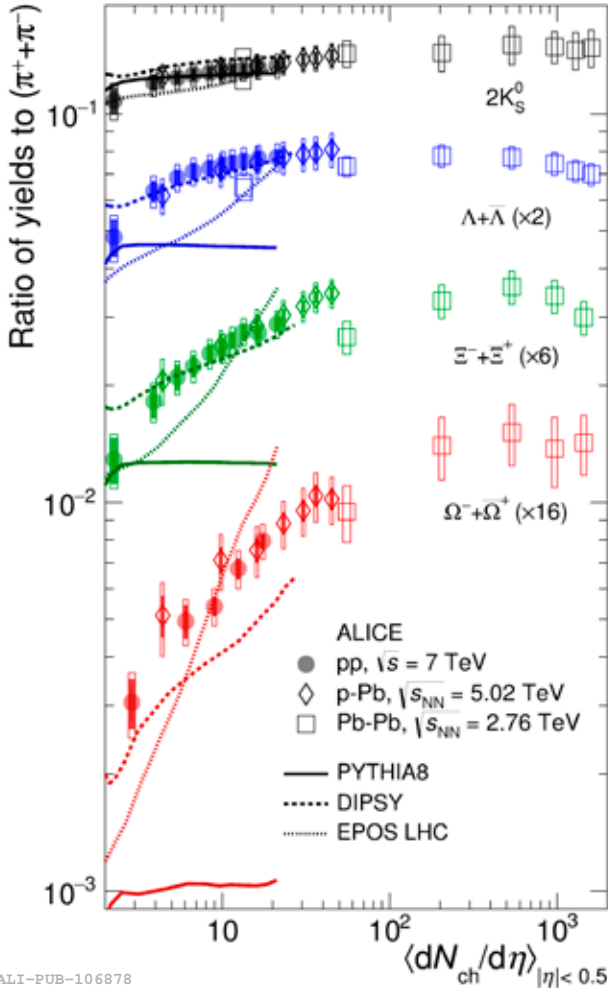


図 6:  $J/\psi$  と  $D$  中間子の方位角異方性 ( $v_2$ )。  $D$  中間子は,  $D^0, D^+, D^-$  の測定を平均化している。

小さな系での多重粒子生成イベントにおいて, QGP は生成されたのであろうか? まず, これまで ALICE でみられた, 小さな系での結果を見てみることにする。

図 8 は, 横軸が粒子の多重度 ( $dN/d\eta$ ) で, 縦軸がストレンジネスを含む様々なハドロン ( $K_s^0, \Lambda, \Xi, \Omega$ ) の取量と, 荷電  $\pi$  中間子の取量の比をとったものである。プロットしている衝突系は, 7 TeV の陽子・陽子, 5.02 TeV の陽子・鉛, 2.76 TeV の鉛・鉛である。陽子・陽子, 陽子・鉛の粒子多重度がそれぞれ上がるにつれて, ストレンジネス・ハドロンの取量も増加し, ほぼ 1 つのラインを形成していることがわかる。また陽子・鉛での最も高い粒子多重度の点は, 鉛・鉛データの周辺衝突のデータと良く一致している。図にはモデル計算の値も示しており, PYTHIA などの従来のイベントジェネレーター (soft な QCD モデル) では再現できず, マルチパートン相互作用を含むモデル (DIPSY, EPOS) などでない



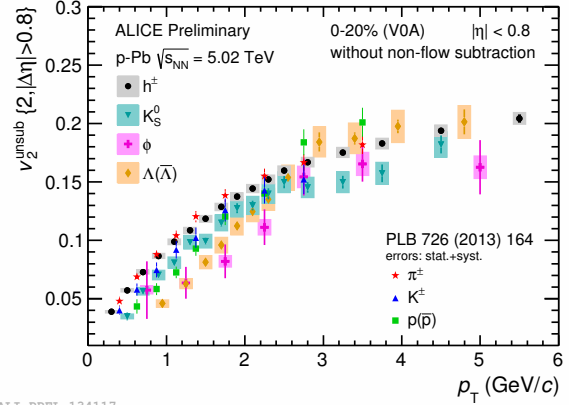
ALI-PUB-106878

図 8: ストレンジネスを含むハドロンと  $\pi$  中間子の収量比の粒子多重度及び衝突系依存性。

るグルーオン飽和現象 (CGC, Color Glass Condensate) に起源をもつものなのかまだ分かっておらず、今後の重要な研究課題の 1 つとして残されている。

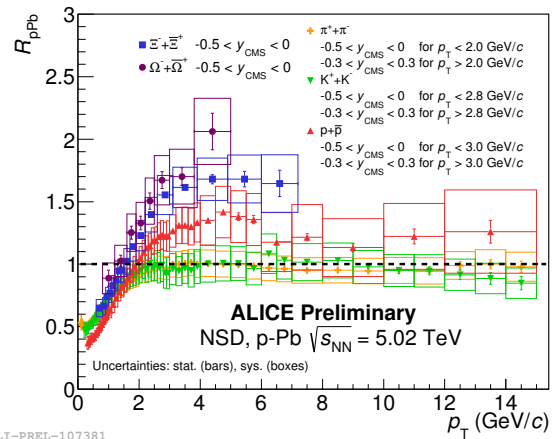
## 2.4 ジェットで探るパートンのエネルギー損失機構

QGP の輸送特性や QGP 中でのパートンのエネルギー損失機構の探索において、衝突初期に生じる硬散乱パートンは、非常に有効なプローブとなる。なぜなら、そのようなパートンは、高エネルギー重イオン衝突で生成される物質を通過する際に、その物性を反映した影響を受けるからである。理論的には、パートンが QGP 中を通過する時、主にグルーオン放射により、QGP 中のグルーオン密度 ( $dN_g/dy$ ) 及び、通過距離に応じたエネルギーを失うと考えられている。実験において、これらのパートンの多くは高い横運動量 ( $p_T$ ) を持つハドロン束 (ジェット) として観測される。したがって、パートンのエネルギー損失は、高エネルギージェットの収量減少



ALI-PREL-134117

図 9: 陽子・鉛衝突  $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$  TeV の高粒子多重度事象における粒子識別されたハドロンの方角異方性 ( $v_2$ )。



ALI-PREL-107381

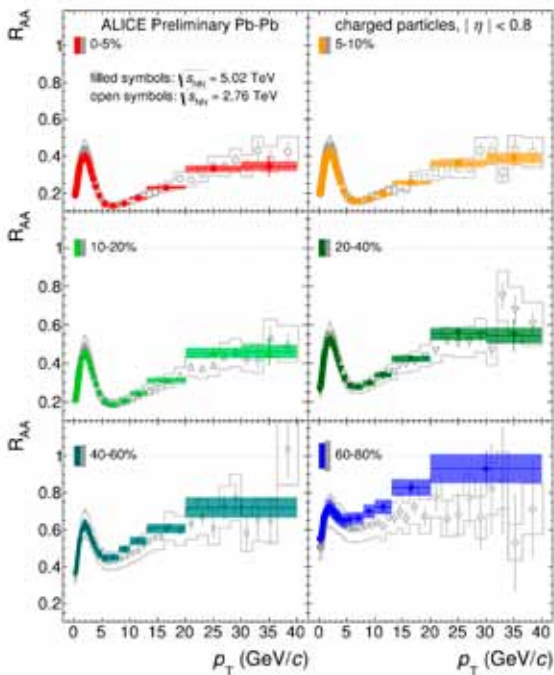
図 10: 陽子・鉛衝突  $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$  TeV の粒子識別されたハドロン原子核抑制因子。

へとつながる。これを、ジェット抑制効果<sup>2</sup>と呼ぶ。ここでは、ジェット抑制効果とパートンのエネルギー損失に関する最新の実験結果を報告する。

前述の通り、ジェットは高横運動量のハドロン束であるため、高横運動量ハドロン収量を測定することにより、ジェット抑制効果を間接的に調べることができる。図 11 は、ALICE において測定された  $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$  TeV、及び、5.02 TeV の鉛・鉛衝突における荷電粒子の  $R_{AA}$  である。原子核の中心衝突 (0 ~ 5%) では、ジェット起因の粒子が優位となる高運動量領域において、強い収量抑制が測定され、逆に、周辺衝突 (60 ~ 80%) では、その効果が弱いことがわかる。この違いは、中心衝突において、QGP 中での硬散乱パートンの平均通過距離が長い為であると考えられる。

LHC での重イオン衝突では、生成される高エネルギーパートン物質中でのエネルギー損失と比べ、充分大きな

<sup>2</sup>jet quenching effect



ALI-PREL-107300

図 11:  $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$  TeV, 及び, 5.02 TeV Pb+Pb 衝突における荷電粒子の原子核抑制因子  $R_{AA}$ 。

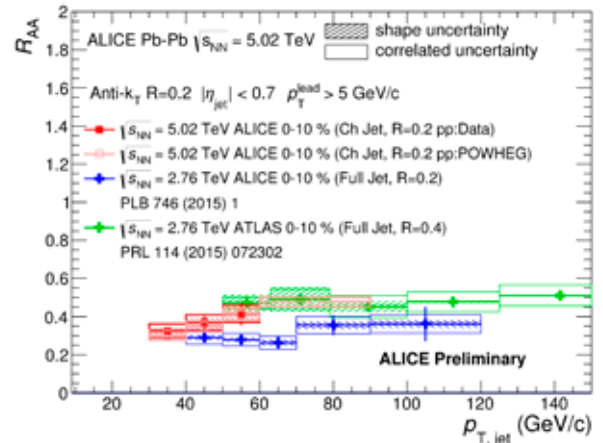
エネルギーを持つ多数の硬散乱パートンが生成される。そのため、ジェット再構成を用いたジェットの直接測定が可能となった。図 12 に、鉛・鉛衝突  $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$  TeV において測定された荷電粒子ジェットの  $R_{AA}$  を示す [15]。前節で示した荷電粒子の  $R_{AA}$  と同程度の強い収量抑制が測定された<sup>3</sup>。また、同図中の  $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$  TeV の荷電粒子と中性粒子によって再構成されたジェットの結果との比較すると、荷電ジェット抑制と同程度のジェット抑制が生じていることが分かった。

### 3 ALICE 電磁カロリメータ

ALICE 実験は 2013~2015 年の LHC 運転停止期間中 (LS1) にいくつかの検出器アップグレードを行った。ここでは、日本グループが参画し大きな役割を果たした、(1) ジェット対測定用電磁カロリメータ “DCal<sup>4</sup>” の新設と、(2) 電磁カロリメータを活用したジェット及び高エネルギー光子トリガの開発について紹介する。

<sup>3</sup>共著者の横山広樹は、本データ解析及び後述のカロリメータ検出器の Level-1 トリガの開発により、第 2 回 TYL-FJPLP Young Investigator Award を受賞した (2017 年 5 月)。

<sup>4</sup>Di-jet CALorimeter



ALI-PREL-114186

図 12: 鉛・鉛衝突における荷電粒子ジェット ( $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$  TeV), 及び荷電+中性粒子ジェット ( $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$  TeV) の原子核抑制因子  $R_{AA}$  [15]。

### 3.1 カロリメータ群のアップグレード

LHC のエネルギー領域では、RHIC と比較して多くの高エネルギージェットが生成され、ジェットの直接測定によるパートンのエネルギー損失の研究が可能となる。ジェットはパートンの二対散乱を起源を持つため、ジェット事象は方位角方向に相対したジェット対 (Di-jet), または光子-ジェット対 ( $\gamma$ -jet) として観測される。DCal プロジェクトは、既存の大立体角電磁カロリメータ “EMCal<sup>5</sup>” の反対側に新たな電磁カロリメータを設置し、Di-jet  $\cdot$   $\gamma$ -jet を高エネルギー分解能で測定することを目的としている (図 13 参照)。EMCal, DCal の検出器デザインは同じであり、鉛・シンチレータのサンプリング型電磁カロリメータであり、シャシリック構造 WLS ファイバーにてシャワー起源の光を集光し、APD (Avalanche Photo Diode) で光検出して読み出す。エネルギー分解能は  $\Delta E/E \approx 8\%/\sqrt{E} + 2\%$  である。

本プロジェクトは 2008 年に日米仏伊中の 5 カ国共同にて立ち上げられ、筑波大学は主に、DCal 導入による物理の有用性の評価、検出器製作、Level-1 トリガアルゴリズムの開発に携わった。全部で 8 スーパーモジュール、1,344 モジュールを Run-2 に向けて新たに導入し、2014 年に全てのモジュールのインストールを完了 (図 14)、2015 年の Run-2 より物理測定を開始した。Run-2 の Pb+Pb 衝突にて得られたダイジェット候補を含むイベントディスプレイ (図 15) を示す。DCal のデータが正常に取得できていることがわかる。

<sup>5</sup>ElectroMagnetic CALorimeter

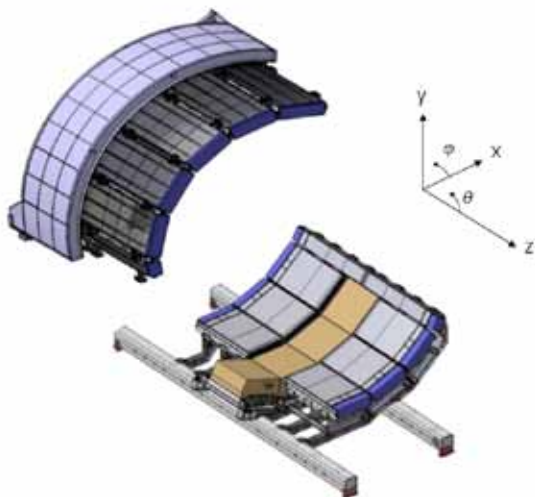


図 13: ALICE におけるカロリメータ検出器群。左上:EMCal, 右下:DCal 検出器。右下の茶色中央の検出器は PHOS。



図 14: DCal スーパーモジュールのインストール前の写真 (ALICE point-2 にて)。2013 年 9 月撮影。

### 3.2 トリガシステムのアップグレード

高エネルギー重イオン衝突は極めて複雑な事象であり、1 度の衝突に 2 万個もの多数の粒子が生成される。そのため、効率良く高エネルギージェットを含むイベントを抽出するためのオンライントリガシステムが必須となる。ジェット及び高エネルギー光子のトリガとして、読み出し速度の比較的高速なカロリメータの使用が有効である。ALICE 実験では、LS1 期間においてカロリメータを用いたトリガシステムのアップグレードが行われた。

カロリメータのトリガは、図 16 のように数段のモジュールを通して作成される。その中の最終段であるトリガ装置 “STU<sup>6</sup>” (図 17) では、下位モジュールが統合され、トリガアルゴリズムが実行される。今回のアップ

<sup>6</sup>Summary Trigger Unit

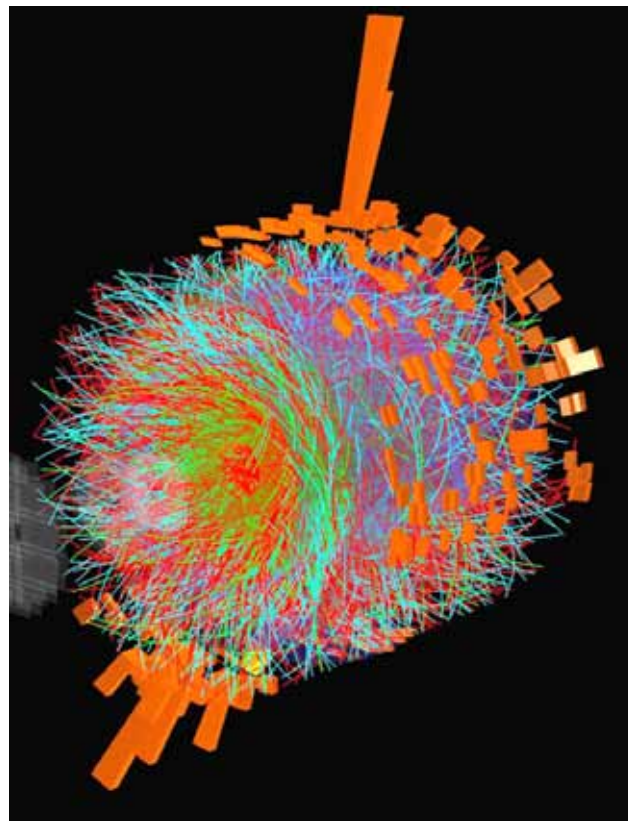


図 15: Run-2  $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$  TeV 鉛・鉛衝突実験におけるダイジェットイベント候補のイベントディスプレイ (右上: EMCal, 左下: DCal)。 (plot: 細川律也)

グレードでは、効率よく高エネルギージェットを含むイベントを選びだすため、以下の点を課題とし、トリガアルゴリズムの変更が行われた。

1. イベントバックグラウンドの見積もり
2. 処理時間の短縮

課題 1 の解決のために、ALICE 実験にインストールされている 3 種のカロリメータ、EMCal, DCal, PHOS を統合した新たなトリガアルゴリズムを採用した (図 16)。ここでは、重イオン衝突の特徴である大きなバックグラウンドを EMCal と DCal+PHOS でそれぞれ見積もり、それを相対する検出器である DCal+PHOS と EMCal の平均バックグラウンドとして取り扱うことにより、自己バイアスの減少を図った。

一方、課題 2 に関しては、トリガモジュール間のデータ通信中に可能な限り処理を進め、通信時間を含めた処理時間の最適化を行った。結果、ALICE の要求仕様である  $7\mu\text{s}$  以内という短時間で全処理を完了させることに成功した。

この新しいトリガシステムは、2015 年の鉛・鉛衝突実験より運用が開始され、その後の Run-2 のデータ収集において安定したトリガ性能を実現している。データ取得後、設定閾値におけるジェットのリジェクション能力、

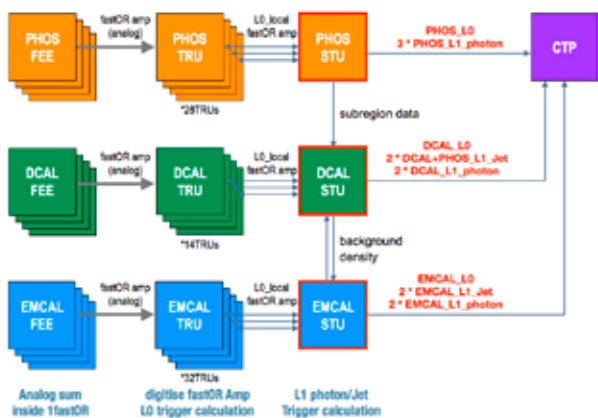


図 16: ALICE 実験におけるカロリメータトリガのデータフロー概要。左から FEE (Front End Electronics), TRU (Trigger Region Unit), STU (Summary Trigger Unit), CTP (Central Trigger Processor)。

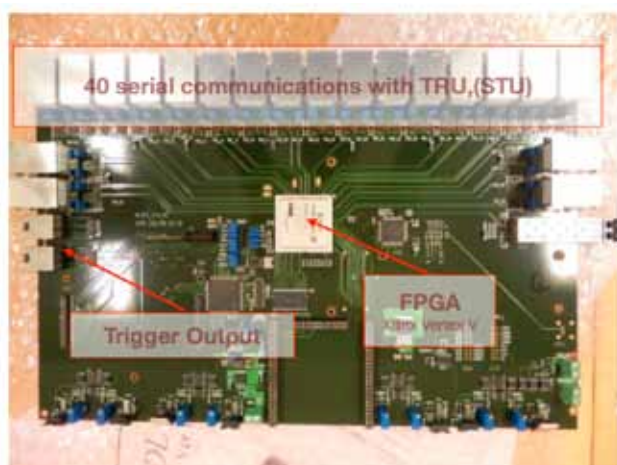


図 17: カロリメータ検出器用, Level-1 トリガ装置 STU (Summary Trigger Unit)。

トリガ効率等の評価を行い, トリガシステムが正常・安定に動作することを確認した。

図 18 は, 2015 年の鉛・鉛衝突実験における DCAL 検出器で得られたジェットトリガデータである。左側は DCAL 検出器でのクラスターエネルギー分布をミニマムバイアストリガ (kINT7) とジェットトリガ (DJ1) で得られたものを重ねてプロットしている。その両者の比が右側の図であり, ミニマムバイアストリガに対するリジェクション能力がおよそ 200, また設定した閾値からの立ち上がり, 約 30 GeV にて平坦な分布になっており, それより高いエネルギー領域ではトリガ効率がほぼ 100% に達していることが示されている。

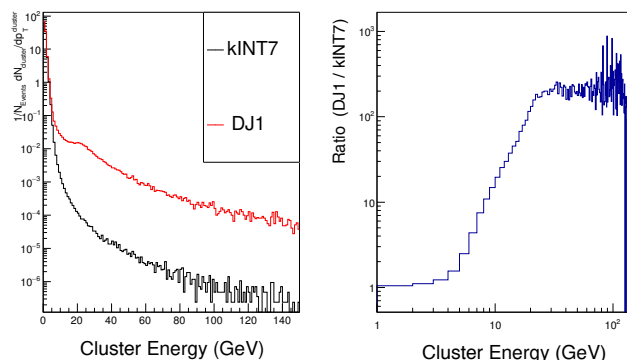


図 18: DCAL 検出器で得られたジェットトリガデータ。左: クラスターエネルギー分布。右: リジェクション能力 (plot: キム ビョンチョル)。

## 4 まとめと展望

以上, これまで得られた ALICE の実験結果ハイライト, 及び, Run-2 で日本グループらが新しく導入した DCAL 検出器の紹介を行った。2018 年は Run-2 最後の年であり, 11 月には再度の鉛・鉛 5.02 TeV の高統計データ収集が行われる予定である。今後は, 未解明の小さな衝突系で見られた重イオニックな振る舞いの理解を様々なプローブを使って探査することになるだろう。例えば, 小さな系での熱的光子探査, あるいはジェットや重クォークを使った小さな衝突系の物理, その生成起源についての研究である。そのような物理において, 我々が設置した DCAL などを含むカロリメータ検出器群は大きな威力を発揮することが期待されている。さらには, ジェットと QGP 媒質との相互作用・応答 (medium response), および  $c, b$  クォークを含む重クォークハドロン物理の新展開も期待される。

さらに, 2019 年からは LHC の第 2 期長期シャットダウン (LS2) が行われ, ALICE の大規模なアップグレードが行われる。一つは GEM を使った TPC アップグレード, もう一つは MAPS 検出器技術を使った ITS (シリコン検出器) アップグレードである。それらにより, 50 kHz ミニマムバイアス事象の連続読み出しを実現し, これまでの 100 倍のデータ読み出しを行い, トリガが難しい事象 (例えばチャームハドロン崩壊) などを余すことなく記録し, 解析を行うことが可能となる。この高速読み出しのアップグレードが, O<sup>2</sup> プロジェクト (Online-Offline computing) である。加えて, 前方ミュー粒子対測定において質量分布をより正確に測定することを目的とした MFT (Muon Forward Tracker) プロジェクトも進行中であり, Run-2 の期間中にアップグレードを行う。TPC, ITS, MFT, O<sup>2</sup> のアップグレードにより, レプトン対 (仮想熱的光子, 熱的電子対, クォークコニア) の高精度測定が可能となる。さらに, 超前方の直接光子, ハドロン,



ジェットを捉え、前方の物理を新規開拓する新しいプロジェクト FoCal(Forward Calorimeter) も始動中であり、日本グループの寄与も大きい。高温 QGP 物性とその生成起源解明に向けて、我々 ALICE 日本グループは、今後 ALICE 実験への貢献をさらに高め、新しい物理を推進してゆく。

## 参考文献

- [1] <http://aliweb.cern.ch/>.
- [2] ALICE Collaboration (K. Aamodt *et al.*), JINST **3**, S08002 (2008).
- [3] 志垣賢太, 中條達也, 郡司卓 「LHC-ALICE 実験の初期成果」 高エネルギーニューズ **32-1,6** (2013).
- [4] <http://alice-j.org/>.
- [5] Courtesy of ALICE Collaboration.
- [6] PHENIX Collaboration, Formation of dense partonic matter in relativistic nucleus-nucleus collisions at RHIC: Experimental evaluation by the PHENIX collaboration, Nucl.Phys. A757 (2005) 184-283, DOI: 10.1016/j.nuclphysa.2005.03.086
- [7] STAR Collaboration, Experimental and theoretical challenges in the search for the quark gluon plasma: The STAR Collaboration's critical assessment of the evidence from RHIC collisions, Nucl.Phys. A757 (2005) 102-183, DOI: 10.1016/j.nuclphysa.2005.03.085
- [8] BRAHMS Collaboration, Quark gluon plasma and color glass condensate at RHIC The Perspective from the BRAHMS experiment, Nucl.Phys. A757 (2005) 1-27, DOI: 10.1016/j.nuclphysa.2005.02.130
- [9] E. Schnedermann, J. Sollfrank, U. Heinz, Thermal phenomenology of hadrons from 200 AGeV S+S collisions, Phys.Rev.C48:2462-2475,1993.
- [10] A. Andronic, P. Braun-Munzinger, J. Stachel, Phys. Lett. B 673 (2009) 142; Erratum: ibid. B 678 (2009) 516; Acta Phys. Pol. 40 (2009) 1005.
- [11] T. Matsui, H. Satz,  $J/\psi$  Suppression by Quark-Gluon Plasma Formation, Phys.Lett. B178 (1986) 416-422, DOI: 10.1016/0370-2693(86)91404-8
- [12] The CMS collaboration, Observation of long-range, near-side angular correlations in proton-proton collisions at the LHC, JHEP 09 (2010) 091.
- [13] Johann Rafelski and Berndt Müller, Strangeness Production in the Quark-Gluon Plasma, Phys. Rev. Lett. 48, 1066, Published 19 April 1982; Erratum Phys. Rev. Lett. 56, 2334 (1986).
- [14] ALICE Collaboration, Enhanced production of multi-strange hadrons in high-multiplicity proton-proton collisions, Nature Physics 13, 535-539 (2017), DOI: 10.1038/NPHYS4111
- [15] H. Yokoyama (for the ALICE Collaboration), Measurement of Inclusive Charged Jet Production in pp and Pb-Pb collisions at  $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$  TeV with ALICE, Nucl.Part.Phys.Proc. 289-290 (2017) 109-112, DOI: 10.1016/j.nuclphysbps.2017.05.021