

論文の内容の要旨

論文題目：

Mixed harmonic azimuthal correlations in $\sqrt{s_{NN}}=2.76$ TeV Pb-Pb collisions measured by ALICE at LHC

(LHC-ALICE 実験における重心系エネルギー2.76TeV 鉛鉛衝突実験での方位角多粒子相関の測定)

氏名 堀 泰斗

QCD によれば通常クォークはハドロン内に閉じ込められているが、エネルギー密度約 $1\text{GeV}/\text{fm}^3$ 以上の高温高密度状態では閉じ込めの破れとカイラル対称性回復が起き、クォークグルオンプラズマ (Quark Gluon Plasma、以下 QGP) 相になると考えられている。QGP 相は相対論的重イオン衝突直後に実験的に生成されうると考えられる。図1のような重イオン周辺衝突では、生成粒子の方位角分布は非等方的 (楕円的) である。このフーリエ2次非等方性は方位角多粒子相関の方法で実験的に測定できる。実験値は、「格子 QCD 計算によって計算された QGP の状態方程式」を用いた相対論的完全流体モデルの予想と良く一致する。

通常の流体モデルでは、「生成粒子同士の弾性散乱の確率が系の膨張によって無視できるようになった温度」、つまり運動量凍結温度まで系の温度が下がった時点で、流体的描像から粒子的描像に移る。このとき、図2に示したように粒子-反粒子のペアを同じ時空点から放出する、つまり実効的に Local Charge Conservation (LCC) を課すとす。すると、最終的に測定される粒子-反粒子間に強い相関 (LCC 相関) がみられることが予想される。電荷依存型の方位角多粒子相関によって「粒子-反粒子間の相対的な方位角分布」を定量化し、LCC 相関を研究することができる。

図1: 衝突関与部 (赤色) の方位角分布が非等方的に流体発展 (灰色の矢印) 2つの原子核の傍観部が青色

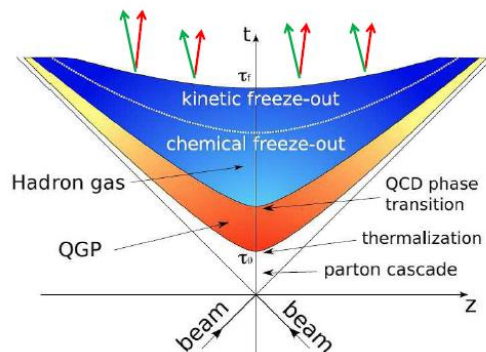
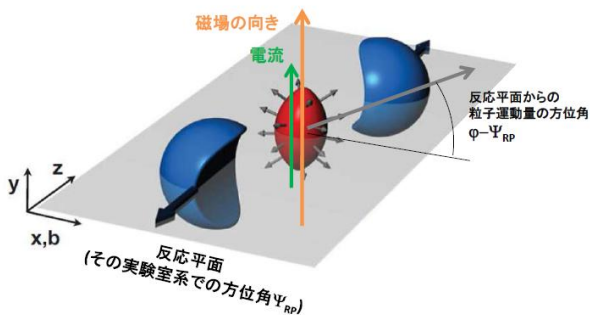


図2: 相対論的重イオン衝突後の系の時空発展。流体的描像 (青まで) から自由粒子ガス描像へ移る「運動量凍結面」において、粒子-反粒子の間に強いLCC相関が存在している場合の図。

本論文は 2010 年 11 月にスイス・ジュネーブにある欧州原子核機構 (The European Organization for Nuclear Research、CERN) 研究所にある大型ハドロン加速器 (Large Hadron Collider、以下 LHC) と ALICE 実験による検出器群を使って行われた、核子あたり重心系エネルギー 2.76 TeV 鉛鉛重イオン衝突実験における方位角多粒子相関の測定に関する論文である。方位角多粒子相関の電荷依存性の測定により、LCC が運動量凍結面上において実効的に成り立っていることを実証した。

図 3 に相関量 $\Delta\langle\cos(\varphi_\alpha - \varphi_\beta)\rangle$ の衝突中心度依存性を示す。ここで φ は生成された粒子の方位角、 α と β は粒子の電荷、 $\langle\dots\rangle$ はすべての衝突イベントにおけるすべての生成粒子のペアでの平均を意味している。 $\Delta\langle\dots\rangle$ は α と β が異符号の場合から同符号の場合を引いたものを意味する。

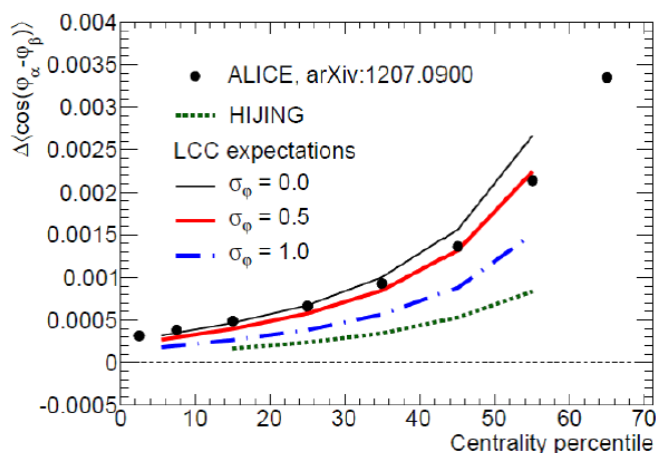


図3: 方位角相関 $\Delta\langle\cos(\varphi_\alpha - \varphi_\beta)\rangle$ の衝突中心度依存性。HIJINGモデルとLCCブラストウェーブモデルの予想の比較

衝突中心度 0% で衝突インパクトパラメータが 0 になり、衝突中心度が大きくなるほど重イオン同士がかかるような周辺衝突である。この相関は、粒子-反粒子間の方位角方向の“距離”に反比例している (つまり LCC 相関の強さに比例している) と考えられる。LCC 相関を含まない流体モデルでは当然この相関量は 0 となるが、実験値はすべての衝突

中心度において正である。系の流体的膨張を考慮にいれていない HIJING モデル (グリーンの点線) ではこの“距離”が大きくなり、実験データを再現できない。一方、流体的膨張と運動量凍結面における LCC を考慮にいれた LCC ブラストウェーブモデル (流体モデルの一種) では再現できる。図 3 の σ_φ はモデルのパラメータで、運動量凍結面上の粒子-反粒子間の距離に対応する。 $\sigma_\varphi=0.5$ はハドロンのフォーメーション時間程度の距離に対応し、運動量凍結面においてほぼ完全な実効的 LCC が実現していることを示唆している。

粒子-反粒子間の方位角方向の“距離”は、運動量凍結面が非等方的方位角分布を持つと、

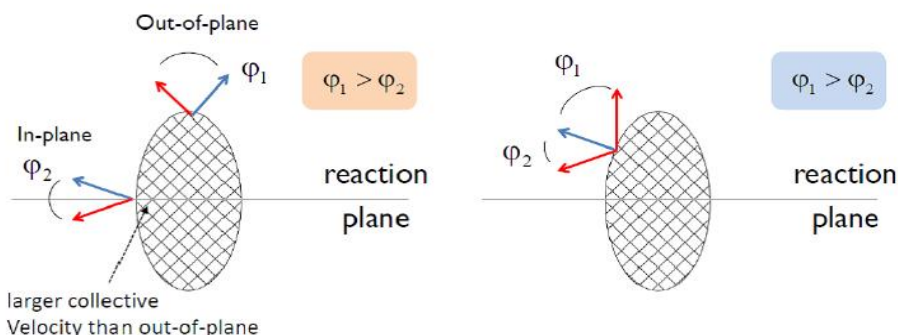


図4: 2次非等方的方位角分布をもった運動量凍結面上においてハドロン(青矢印)と反ハドロン(赤矢印)が空間的・運動量空間的に強く相関しているとする: (左) 反応平面内のペアは最終的な相関が強くなり、反応平面外のペアの相関は弱くなる。(右) あるハドロンの対になる反ハドロンは反応平面側に見つかる確率が高くなる。

ペアの方位角に依存した変調を受ける。図4左に示すのは、運動量凍結面がフーリエ2次の非等方性を持つ場合に、粒子-反粒子間の“距離”が変調を受けている様子である。これを一般化すると、運動量凍結面のフーリエ高次の非等方性も“粒子-反粒子間の相対的な方位角分布”に方位角方向変調を及ぼすと予想される。そのようなフーリエ|m|次の非等方性とLCCによる効果は方位角多粒子相関量 $\Delta\langle\cos[\varphi_\alpha-(m+1)\varphi_\beta+m\Psi_{RP}]\rangle$ で実験的に観測できると提案した。図5がLHC-ALICE実験における測定結果と、LCCブラストウェーブモデルによる理論予想との比較である。

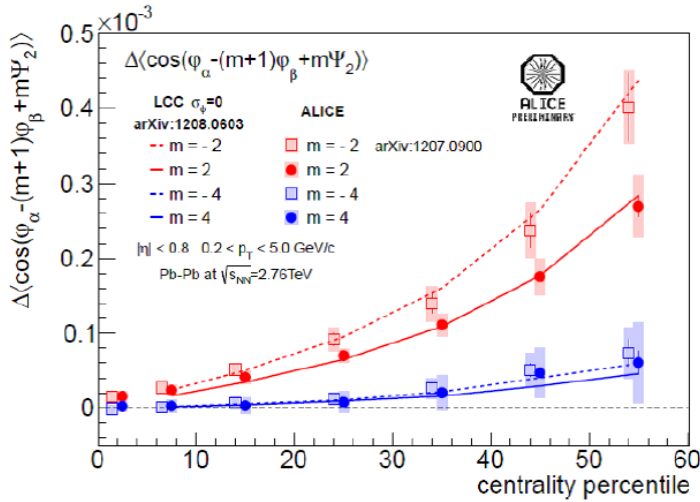


図5: 方位角相関 $\Delta\langle\cos[\varphi_\alpha-(m+1)\varphi_\beta+m\Psi_{RP}]\rangle$ の衝突中心度依存性とLCCブラストウェーブモデルの予想の比較。

モデルによる理論予想との比較である。一連の相関量が非常に良くモデルと一致している。したがって、やはりこの測定結果も運動量凍結面上でのほぼ完全なLCCが成り立っていることを示唆している。

運動量凍結面上でのほぼ完全なLCC相関のミクロスコピックな起源を考えること自体大変物理的に興味深い。そのためには、QGP相からハドロン相への相転移直後に粒子描像に移るような流体計算に、LCCを課し、またその後の粒子

間相互作用を考慮にいたした理論モデルの構築が必要不可欠である。そのような半ミクロスコピックなモデルにより、運動量凍結面上での粒子-反粒子間の強いLCC相関が、粒子間の非弾性散乱の結果なのか、それ以前の相転移によるハドロン化の時点で作られたLCC相関が生き残って見えているのか、という議論が可能になる。

図5の $m = -2$ の相関量 $\langle\cos(\varphi_\alpha + \varphi_\beta - 2\Psi_{RP})\rangle$ は、もともとはカイラル磁気効果(Chiral Magnetic Effect、以下CME)の探索のために提案されたものである。相対論的重イオン衝突後の高温下または非平衡状態ではグルオンの特異な配位(スファレロン)が量子異常を通してクォークと相互作用し、結果として局所的にパリティとチャージパリティを破る可能性のあることが議論されている。このパリティ破れを持つ領域が、反応平面に垂直に生成される非常に強い磁場(図1の橙色矢印)と組み合わせることで、正電荷と負電荷の粒子が磁場の軸上逆向きに放出されると予想される。この予想がCMEである。CMEによって反応平面に垂直に電流が流れると、

$$\begin{aligned} \langle\cos(\varphi_\alpha + \varphi_\beta - 2\Psi_{RP})\rangle &\sim -\langle\sin(\varphi_\alpha - \Psi_{RP})\sin(\varphi_\beta - \Psi_{RP})\rangle \\ &< 0 \quad (\alpha, \beta, \text{same sign}) \\ &> 0 \quad (\alpha, \beta, \text{opp. sign}) \end{aligned}$$

となると予想される。ここで「opp.」(「same」)のラベルは α と β が異符号(同符号)の電

荷ペアの相関量である。したがって、CME によっても $\Delta\langle\cos(\varphi_\alpha+\varphi_\beta-2\Psi_{RP})\rangle$ が正值であることが予想される。

CME 探索は、はじめ米国ブルックヘブン研究所の RHIC 加速器と STAR 実験の検出器群を使った核子あたり重心系エネルギー200GeV 金金重イオン衝突実験において行われ、QCD 局所パリティ破れの証拠として注目を浴びた。また、CME が起こるにはカイラル対称性回復が必要なので、CME の発見は QGP 相ができてカイラル対称性が回復していることの証拠ともいえる。図6の星印が RHIC-STAR 実験の結果である。異(同)電荷ペア相関量が中心衝突以外のほぼすべての中心度の衝突で正(負)となる。これは CME の予想に一致する。また、その相関の強度も CME の理論的な予想とオーダーで一致している。図6の丸印が ALICE 実験での結果である。RHIC-STAR 実験の結果とほとんど変わらず、やはり CME の予想と定性的に一致している。

一方で、図5で見てきたように、相関量 $\Delta\langle\cos(\varphi_\alpha+\varphi_\beta-2\Psi_{RP})\rangle$ は「LCC と運動量凍結面のフーリエ2次非等方性が組み合わさった効果」によってほとんど説明できてしまう。従って、LCC 効果が CME 探索に対するバックグラウンドとしてかなり寄与することになる。今後、より精密な LCC 流体モデルの構築により、精密に LCC 効果によるバックグラウンドを評価し、これを測定値から差し引くことが最終的な CME 探索に必要な不可欠である。

最後に、図6青バンドが示すように相関量 $\langle\cos(\varphi_\alpha+\varphi_\beta-2\Psi_{RP})\rangle$ の電荷非依存部は負であった。

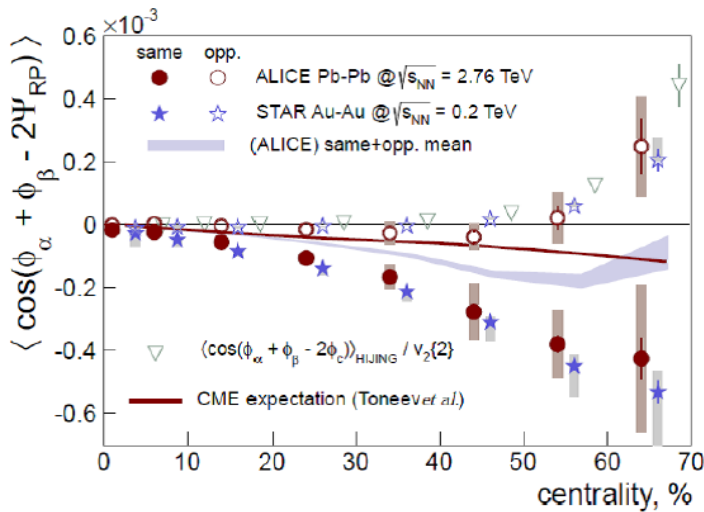


図6: 方位角相関 $\langle\cos(\varphi_\alpha+\varphi_\beta-2\Psi_{RP})\rangle$ の衝突中心度依存性 (丸印: LHC-ALICE、星印: RHIC-STAR)。赤線は同符号電荷ペアの相関に対する理論モデル予想。青バンドはLHC-ALICE実験での電荷非依存部。

CME の観点からは、これはパリティ破れの領域と QGP 物質が相互作用して異電荷相関量が抑制されれば 0 になった結果と考えられる。一方で、「系全体の横運動量保存則による効果」あるいは「粒子方位角分布のフーリエ1次非等方性と高次非等方性の相関」による電荷非依存部が CME 以外の解釈として考えられる。前者の効果は非常に小さいことを半解析的な方法で示した。また、後

者でも現在の流体モデルではこの電荷非依存部が説明できないことを示した。付随して、このような方位角多粒子相関で測定されるフーリエ1次非等方性が系の流体的運動に由来している可能性を理論との比較により議論した。