

Topicalities in experimental search for hot and dense partonic matter (高温高密度パートン物質の実験的探索における最近の話題)

広島大学大学院理学研究科 志垣賢太¹

高エネルギー原子核衝突実験による高温高密度パートン物質の探索に関して、米国ブルックヘブン国立研究所 (BNL) RHIC 加速器における近年の実験的成果と現在進行中のプログラム、および欧州合同原子核研究機構 (CERN) LHC 加速器における次世代実験への取組みを紹介する。

1. はじめに

高エネルギー原子核衝突物理学は極限状態における量子色力学 (QCD) の実験的追及である。固定標的実験に代表される中間エネルギー衝突では高原子核物質密度極限が、衝突型加速器実験に代表される高エネルギー衝突では高エネルギー密度 (高温) 極限が対象となる。世界初の衝突型重イオン加速器 RHIC が 2000 年 6 月に稼働を開始し、2003 年 5 月までに核子間衝突エネルギー $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV における Au+Au、p+p、d+Au 衝突からの物理データ収集を一通り完了した。現在までに、Au+Au 中心衝突事象における横方向運動量の高いハドロンの収量抑制などにより強い終状態相互作用を伴う高温原子核物質状態の生成が示された。また、2003 年秋以降に予定される高輝度高統計データ収集からは、パートン非閉込相 (クォーク・グルーオン・プラズマ = QGP 相) の有力な証拠と期待される重いベクトル中間子の生成抑制、カイラル対称性回復に起因する軽いベクトル中間子の質量状態変化、衝突系の熱輻射やパートンの制動放射などによる直接生成光子の検出などに期待が集まる。以下では我々の推進する PHENIX 実験²を中心にこれらの実験的成果と現状を解説する。さらに 2007 年には $\sqrt{s_{NN}} = 5.5$ TeV の原子核衝突を実現する LHC 加速器の稼働開始が予定され、これに向けての実験準備も本格化しつつある。LHC 加速器で唯一原子核衝突物理学に特化した ALICE 実験への取組みなどにも併せて触れる。

2. 近年の実験的成果

表 1 に RHIC 加速器の運転実績を示す。2003 年 5 月に完了したラン 3 までで、高エネルギー原子核衝突プログラムの中心である Au+Au 衝突に加え、素過程としての p+p 衝突、さらに通常状態原子核の効果を評価するための d+Au 衝突を

¹ E-mail: shigaki@hiroshima-u.ac.jp

² PHENIX 実験については <http://www.phenix.bnl.gov/>を、PHENIX 実験日本グループについては <http://phenix.cns.s.u-tokyo.ac.jp/phenix-j/>を参照して頂きたい。

用いたデータ収集が一通り完了した。また PHENIX 実験もラン 3 において当初計画の測定器系建設を完了し完全稼動状態となった (図 1)。

	実施年	衝突核種	核子間衝突エネルギー $\sqrt{s_{NN}}$	積分ルミノシティ $\int Ldt$
ラン 1	2000	Au+Au	130 GeV	$1 \mu\text{b}^{-1}$
ラン 2	2001- 2002	Au+Au p+p	200 GeV 200 GeV	$24 \mu\text{b}^{-1}$ 0.13pb^{-1}
ラン 3	2002- 2003	d+Au p+p	200 GeV 200 GeV	2.7nb^{-1} 0.35pb^{-1}

表 1 : RHIC 加速器の運転実績

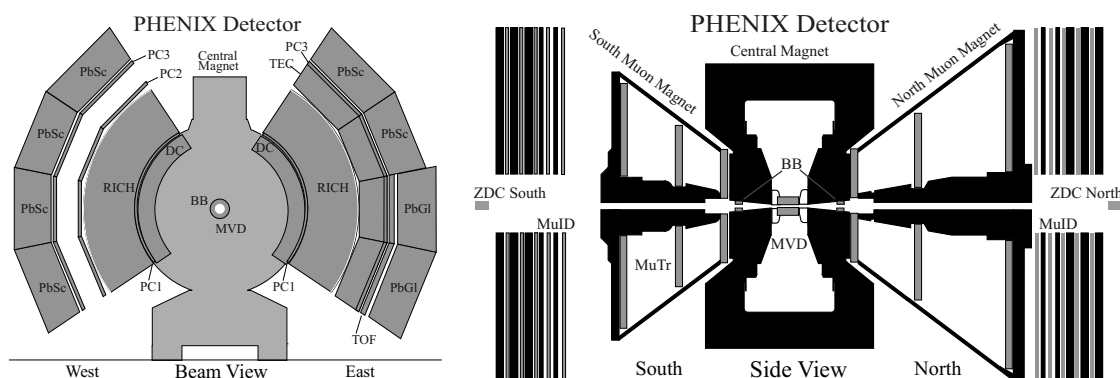


図 1 : PHENIX 実験検出器系。ラン 3 において当初計画に従い完全稼動状態となった。

RHIC ラン 1 およびラン 2 の Au+Au 衝突実験において最も注目すべき結果は横方向運動量の高いハドロン の 収 量 抑 制 である。すなわち、Au+Au 中心衝突事象において、核子間衝突の線形重合せによる記述が期待される高い Q^2 領域で原子核物質による効果が観測された (図 2)。また、横方向運動量の高い二粒子の方位角相関の消失も観測された (図 3)。これらの効果は d+Au 衝突事象においては観測されないことから初期状態相互作用では説明できず、パートン起源ジェットの終状態における抑制効果の顕れと考えられる。ジェット抑制効果は QCD 相転移に伴う QGP 相生成の結果として予言される。この結果だけにより QGP 相生成を断定することはやや早計の感があるが、RHIC 加速器のエネルギー領域における Au+Au 中心衝突事象において通常原子核と全く性質の異なる高温原子核物質状態の生成が強く示唆される。

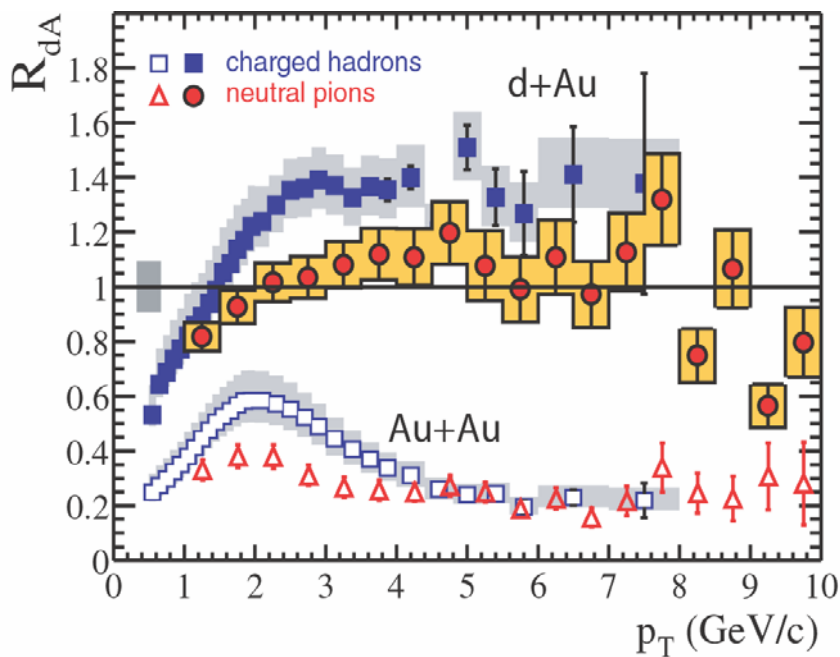


図 2 : Au+Au 中心衝突および d+Au 衝突における π^0 中間子および荷電ハドロン
の横方向運動量分布を p+p 衝突における横方向運動量分布に核子間衝突回数を
掛けたもので規格化した。Au+Au 中心衝突において大きな抑制効果を観測した。

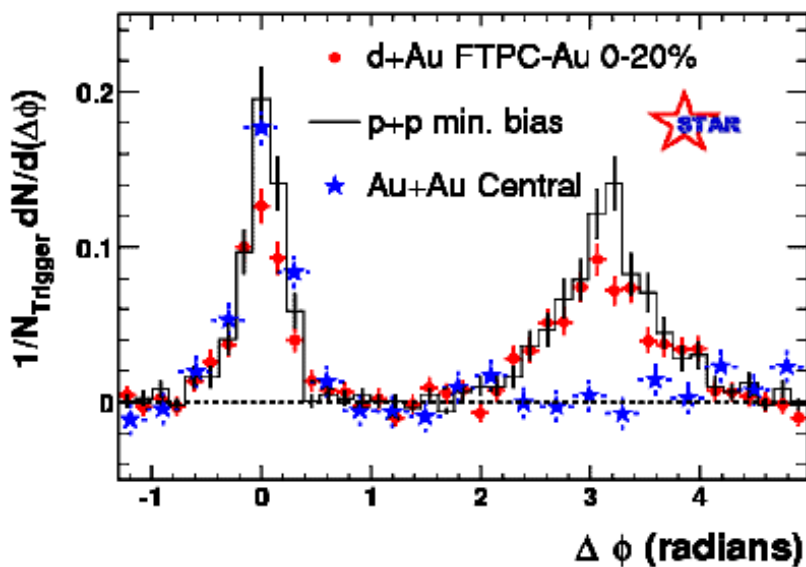


図 3 : STAR 実験による横方向運動量の高い二粒子の方位角相関測定。Au+Au
中心衝突において逆 ($\Delta\phi = \pi$) 方向の相関が消失した。

3. 現在進行中および近い将来に期待されるプログラム

2003 年秋以降に予定される高輝度高統計データ収集に向けて、PHENIX 実験で

は QGP 相生成の確証を与えると期待される複数の測定プログラムの準備が進行中である。第一に、CERN SPS 加速器 NA50 実験において報告され QGP 相検出手段の有力候補と期待される J/Ψ など重いベクトル中間子の異常抑制効果測定のため、 $p+p$ 衝突における J/Ψ 粒子生成の測定解析を完了して (図 4) 高統計の Au+Au 衝突データ収集と解析に臨む体制を整えた。RHIC 加速器の多彩な運転モードと PHENIX 実験の多様な測定能力により、衝突核種、衝突エネルギー、衝突中心度、ラピディティ、横方向運動量などへの依存性、 Ψ や Y 系列の異なった質量状態、複数の校正基準過程など、重いベクトル中間子の系統的測定が期待される。

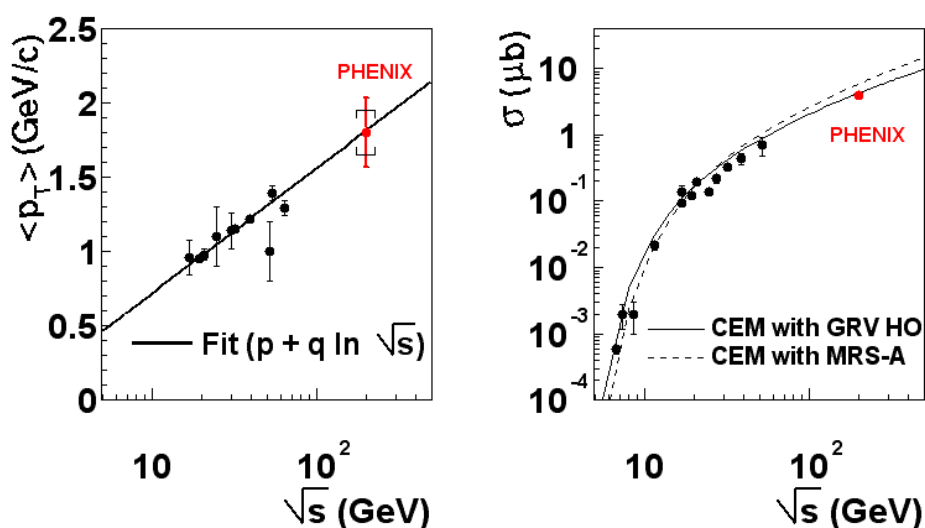


図 4 : $p+p$ 衝突における J/Ψ 粒子生成を電子対チャンネル、 μ 粒子対チャンネルの双方で測定した。 J/Ψ 粒子の収量、平均横方向運動量ともに、より低い衝突エネルギーにおけるデータおよび理論計算と合致した。

第二に、カイラル対称性回復に起因する ω 、 ϕ 、 ρ など軽いベクトル中間子の質量状態変化を終状態における強い相互作用の攪乱を受けないレプトン対チャンネルを通して検出するため、レプトン生成事象選別トリガを含むデータ収集系とレプトン同定などのデータ解析法の両面から最終調整が進行中である。第三に、衝突系の熱輻射やパートンの制動放射などに起因する直接生成光子の検出に向け、背景となるハドロン崩壊からの光子分布の理解がハドロン分布測定に基づき進んでいる。系統誤差の低減により直接生成光子の検出可能性が近付いている (図 5)。

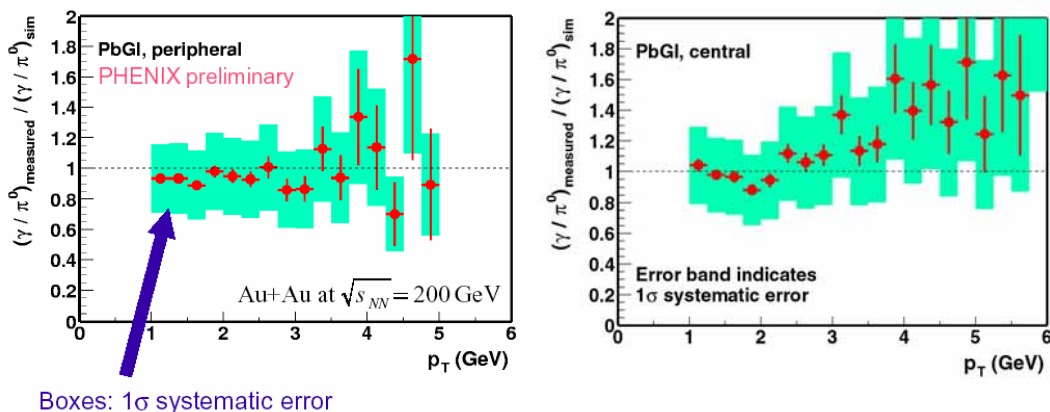


図 5 : Au+Au 衝突における光子の横方向運動量分布をハドロン崩壊からの光子分布で規格化した。系統誤差のさらなる理解と低減が進行中である。

2003 年秋以降の RHIC 加速器運転条件は現 (2003 年 9 月) 時点で未確定であるが、 $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV における Au+Au 衝突事象 $300 \mu\text{b}^{-1}$ 以上の早期達成を要望しており、2003 年から 2004 年にかけてのラン 4 において実現が期待される。また、比較対照実験として Si+Si または Fe+Fe などの軽い原子核衝突や、低い核子間衝突エネルギーにおける実験なども予定されており、系統的測定により高エネルギー原子核衝突反応の理解がさらに進むと期待される。

4. 次世代実験への取組み

次世代のハドロン衝突型加速器 LHC は 2007 年春の稼動開始予定で建設が進んでいる。LHC 加速器では ATLAS と CMS の両実験も原子核衝突プログラムを検討中であるが、ALICE 実験は高エネルギー原子核衝突物理学に特化した唯一の実験として、RHIC 加速器において相補的な 4 実験が覆った物理の大部分を単独で覆う設計がなされている (図 6)。LHC 加速器のエネルギー領域においては直接生成光子が RHIC 領域以上に重要な測定と期待されるため、ALICE 実験では光子スペクトロメータ (PHOS) を用いて横方向運動量 100 GeV/c 付近までの光子と中性中間子の測定を行う。PHOS 検出器には電磁カロリメータ結晶として PbWO_4 を採用して優れた二粒子分解能とエネルギー分解能を実現する。広島大学グループ³は PHOS 検出器系開発に参加し、現在までに比較対照用 PbWO_4 結晶の試験、読出用雪崩光ダイオード (APD) 検出器の開発試験、読出回路系の開発試験、PHOS 検出器試作機の性能試験解析などを進めている。

³ 広島大学大学院理学研究科物理科学専攻オーク物理学研究室については <http://www.hepl.hiroshima-u.ac.jp/hadron/welcomejp.html> を参照して頂きたい。

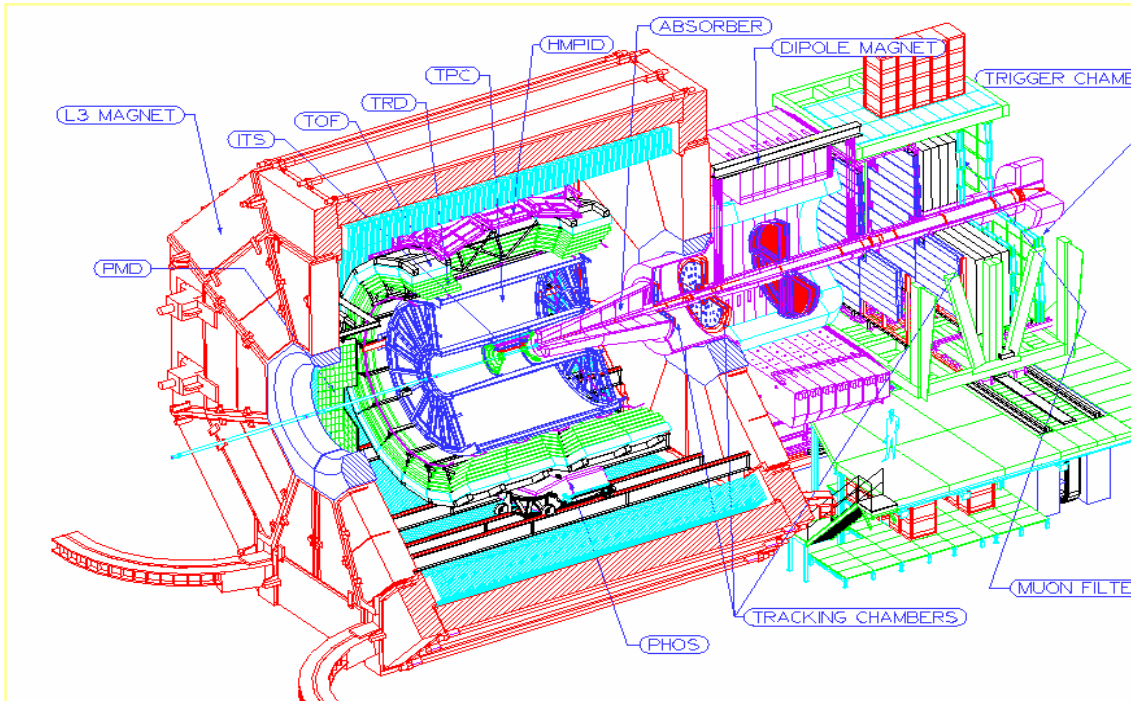


図 6 : ALICE 実験検出器系。中央下部に光子スペクトロメータ (PHOS) を備える。

PHOS 検出器は RHIC 加速器で稼動中の 4 つの実験にはない優れた性能の電磁カロリメータであり、RHIC 加速器のエネルギー領域においても直接生成光子検出、二光子相関などの新たな物理測定プログラムを拓くと期待される。RHIC 加速器における実験に PHOS 検出器の一部を設置する可能性についても 2005 年頃の実現を目標に検討を進めている。

5. まとめ

RHIC 加速器における高エネルギー原子核衝突実験は高温極限における QCD の追及に多大な成果を挙げつつある。特に Au+Au 中心衝突事象における横方向運動量の高いハドロンの収量抑制の観測および d+Au 衝突事象における同効果の非存在観測により、強い終状態相互作用を伴う高温原子核物質状態の生成が示された。これは QCD 相転移に伴うパートン非閉込相 = QGP 相の生成を強く示唆する結果である。また、2003 年秋以降に予定される高輝度高統計データ収集において QGP 相生成のより確実な検出が期待される。一方で次世代のハドロン衝突型加速器 LHC の建設と実験準備も着実に進行中である。既に誕生から数十年を経た高エネルギー原子核衝突物理学領域であるが、今後 10 年以上に亘り豊富な物理成果が期待される豊穡の時期を迎えたと確信する。