

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 6 日現在

機関番号：82401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25400312

研究課題名(和文) RHIC-PHENIXにおける重クォーク測定のための前置検出器トリガー回路の開発

研究課題名(英文) Development of Forward Vertex Detector Trigger for Heavy Flavor Quarks at RHIC-PHENIX

研究代表者

中川 格 (Nakagawa, Itaru)

国立研究開発法人理化学研究所・仁科加速器研究センター・専任研究員

研究者番号：60505668

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：水が温度や圧力の変化によって、固体、液体、気体、プラズマなど様々な相を取る様に、原子核や陽子、中性子も高温状態では溶けて素粒子のクォークとグルーオンが自由に運動するクォーク・グルーオン・プラズマ(QGP)状態になる。QGP状態はこれら素粒子が熱振動をする集団運動状態と考えられ、この状態を起こすにはある一定数の素粒子数が必要と考えられる。本研究では従来の重イオン同士の衝突によるQGP状態の再現とは一線を画し、陽子同士と素粒子数の圧倒的に少ない衝突でQGP生成の有無を調査する。これを観測するために、QGPから崩壊する多粒子終状態を効率的に収集するトリガーシステムを開発し、収集に成功した。

研究成果の概要(英文)：The quark gluon plasma (QGP) is the state of the matter appears in very high density and temperature circumstances where quarks and gluons are deconfined from nucleons just like the electrons get freed from an atom in a plasma state. The QGP is considered to be the collective state of thermal motion of quarks and gluons and therefore one may expect a boundary condition in the minimum number of quarks and gluons to form QGP. This research is aiming to search for the QGP phenomenon in smallest colliding system proton+proton as ever executed where number of initial quarks and gluons are much smaller than conventional heavy ion collisions. A new trigger system was successfully invented in order to acquire high multiplicity events efficiently which is well known as the final state feature of QGP phenomena. 50 Million high multiplicity events are accumulated.

研究分野：高エネルギー原子核実験分野

キーワード：原子核実験 クォーク・グルーオン・プラズマ トリガー回路 FPGA 高エネルギー 高多重度 陽子
陽子衝突

1. 研究開始当初の背景

物質にエネルギーを与え続けていくと、固体→液体→気体→プラズマ状態へと変化する。常温では電子は原子の束縛状態にあるが、ハドロンを構成するクォーク・グルーオンも通常ハドロンの束縛状態にある。高エネルギー重イオン衝突実験では、図1のように衝突点に原子核の高温高密度状態を形成し、そこにクォーク・グルーオンが束縛状態から解き放たれるプラズマ状態を起こす。

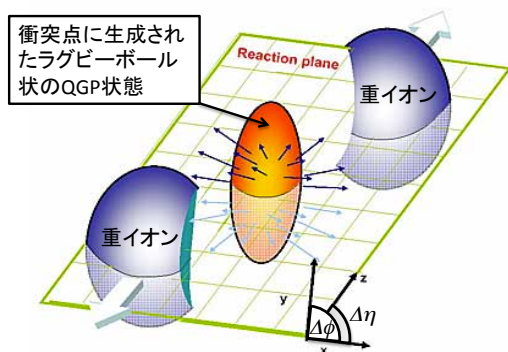


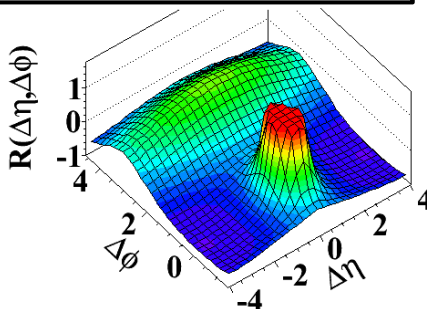
図1 重イオン衝突の際に楕円型オーバーラップ領域に発生したQGP状態

QGP 現象にはまだ解っていない謎があり、その一つに QGP 現象を起こすための最低限必要なパートン数がある。近年パートン数の多い重イオン同士の衝突系だけでなく、陽子-鉛、重水素-金などの小さな衝突系でも QGP を示唆する現象が観測され、脚光を浴びている。さらに LHC の CMS 実験では陽子-陽子衝突でも観測したとの報告もある。当初陽子-陽子の衝突系ではパートン数が少な過ぎて QGP のような平衡状態はまず起きないと考えられており、この現象が観測されたのは大変な驚きであった。

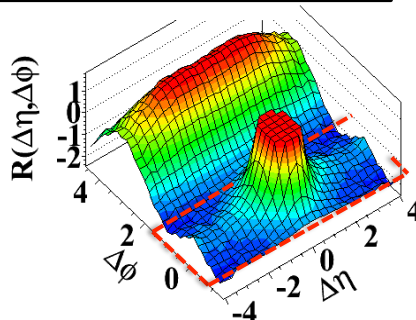
QGP の特徴には図1に示すような原子核または核子が衝突する際のラグビーボール上の形状がある。QGP が冷えていく過程で大量に放出される粒子の2粒子間相関を観測すると、図2(b),(c)のように楕円形を示唆する方位角分布が観測される。これは楕円フローと呼ばれ、QGP 現象の実験的証拠の一つとされる。一方でこの方位角分布は QGP を仮定しなくてもグルーオン抑制効果で説明できるとするモデルも出現し、解釈は収束していない。グルーオン抑制効果は核子に対するパートンの運動量比 x の低領域でグルーオン数が抑制される量子色力学理論で前から予言されている効果であるが、実験的にはまだ観測されていない現象である。CMS 実験に続き、ATLAS と ALICE 実験でそれぞれ CMS の観測を支持する結果が得られたが、実験条件がほぼ CMS と同じであることからモデルを排除する決定力に欠け、解釈は依然分かれたままである。

一方米国相対論的重イオン衝突型加速器 (RHIC)では LHC よりも一桁小さい衝突エネ

(a)陽子-陽子(平均トラック数=15)



(b)陽子-陽子(トラック数 > 110)



(c)鉛-鉛原子核衝突

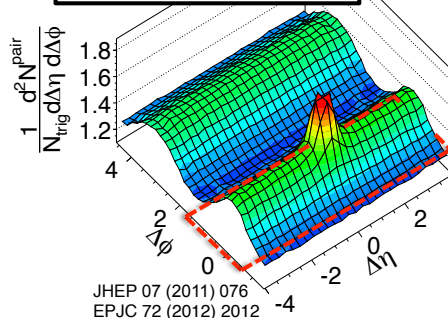


図2 二粒子相関の角度分布。(b),(c)図の点線領域に楕円フローを示唆する隆起が認められる。

ルギーで、 $^3\text{He} + \text{金}$ 原子核、重陽子+金原子核、さらに陽子+金原子核と異なる小さな衝突系で、集団運動を示唆する現象を系統的に示してきた。これらの系統的理解により、集団運動や初期の基底状態による異方性の効果、そしてグルーオン抑制な異なる効果の一つ一つを検証する下地ができていく。この延長上に究極の小さい衝突系である陽子+陽子でこの現象を測定すれば、より系統的な理解が可能である。

2. 研究の目的

本研究代表者はこの問題に有効な検証方法として、QGP とグルーオン抑制のエネルギー依存性の違いに着目した。RHIC と LHC のこれまでの重イオン衝突研究から、フローにはあまりエネルギー依存性がないことが

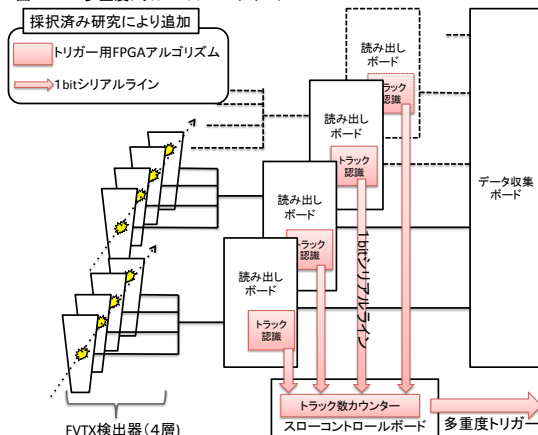
わかっているが、対照的に LHC に比べて一桁低いエネルギーの RHIC 実験では衝突に関与するパートンの x の領域が大きく違うので、グルーオン抑制効果は小さくなることが予測される。一方図 2 の(b),(c)が示す通り、小さな衝突系では隆起も小さくなり、そもそも RHIC ではエネルギーが低くて効果が見えないのではないかと悲観的見解もある。そこで研究代表者は、CMS 実験が非常に高多重度な終状態を選ぶことにより図 2(b)のようなフローを示唆する現象を観測した事に着目し、CMS 実験と同等な多重度条件を RHIC 実験でも課せば、例え衝突エネルギーが低くても現象自体は同じ状態を観測している事になるのではないかと考えた。即ち QGP 現象を起こす条件は、実験的には元々のパートン数や衝突エネルギー等の初期状態が決めるのではなく、高多重度という終状態が決めるという発想である。

本研究はこの仮説を実証するために RHIC-PHENIX において陽子+陽子衝突実験において高多重度事象を収集し、フロー現象の観測を目指すものである。

3. 研究の方法

前述の通りこのフロー現象は終状態に粒子多重度が非常に高い現象においてのみ観測される特徴がある。CMS に匹敵する粒子多重度事象はエネルギーが一桁低い RHIC ではさらに希少な事象になるが、現行 PHENIX のデータ収集システムの処理能力は 5kHz 程

図3 FVTX多重度トリガーのフローチャート



度に限られ、その能力の 3 桁も多い 2MHz にも及ぶ衝突事象から、高多重度事象のみを効率的に収集する機構が必要となる。

そこで研究代表者は PHENIX 衝突点近傍に設置された前方前置飛跡検出器 (FVTX) に着目した。この検出器は衝突点の近傍にあることから、衝突点との間に物質量が少なく粒子飛跡を物質中で吸収され失うことなく、衝突時に放出される粒子数をそのまま検出することができる。FVTX 検出器は合計 4 層のシリコン飛跡検出器で、ビームラインを北側と南側にそれぞれ一対設置され、ラピディティ

$1 < \eta < 2$ をカバーしている。この FVTX 検出器の読み出し回路上で、検出器のヒット情報を元に粗い飛跡の構築を行い、その飛跡数が多い場合にのみトリガーを発行するシステムを開発した。

ここでトリガーのために読み出し回路上で構築した飛跡を online track と呼び、データが収集され記憶媒体に保存されたのちに、精細な飛跡の再構築を行った結果の飛跡を offline track と呼びこれらを区別する。

4. 研究成果

研究代表者は既存の FVTX シリコン検出器の読み出し回路 FPGA には余剰容量があることに着目し、この容量に新しい高多重度トリガーアルゴリズムを搭載することでトリガーを実現するデザインを考案した。この構想では最小限のハードウェア変更・追加でトリガーが実現できる利点がある。図 3 の模式図にトリガー発行のフローチャートを示す。このデザインでは従来の読み出しボード FPGA に粗いオンライントラッキングアルゴリズムを導入して、4 層の FVTX 検出器のヒットパターンから online track を認識させる。ここで track と認識された数を数え、これが事前に設定した閾値よりも多い場合は、高多重度事象としてトリガーを発行する【学会発表 6】。この新トリガーシステムの開発は 2014 年末には完了し、2015 年の陽子-陽子衝突実験で実働に成功させた。図 4 は PHENIX のミニマムバイアス (MB) トリガーで収集した事象 (黒線) と FVTX トリガーの北アームと南アームの論理和 (青線) と論理積 (赤線) の FVTX 検出器における飛跡多重度分布を示す。図が示す通り、FVTX トリガーは低多重度でよく抑制され高多重度事象をより効率的に収集しているのがわかる。高多重度事象では MB トリガーのおよそ 100 倍の統計取得に成功し、FVTX トリガー合計で約 50 億事象収集した【学会発表 5,4,2】。

研究代表者は 2015 年 9 月に行われた QGP 研究分野最高峰の Quark Matter 国際会議にて、トリガーパフォーマンスの口頭発表を行っている【学会発表 3】。

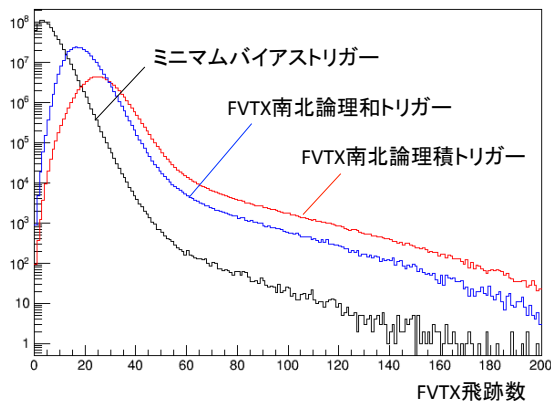


図4 ミニマムバイアス、FVTXトリガーで収集した事象のFVTX飛跡数分布。横軸はオフラインで再構築された一事象あたりの飛跡数。

データ取得後精力的に解析を進め、重イオン衝突実験で用いられてきた従来の解析手法では QGP を示唆する兆候は見られていない【学会発表 1】。一方陽子+陽子衝突実験では重イオン衝突実験とはビーム輝度が二桁高く、多重衝突事象の寄与によって QGP の信号が見えにくくなる可能性が指摘されている。今後はこの多重衝突事象の補正を施した上で、陽子+陽子衝突における QGP 現象の再検証を行う。

本トリガーシステムは高多重度トリガーとして開発したが、低多重度を条件としてトリガーを発行させることで、ミニマムバイアス(MB)トリガーとして今年 2016 年の重心エネルギー20GeV の重陽子+金原子核衝突実験において稼働中である。トリガーを開発する上で、容易にトリガー条件を変更可能な設計にしたため、このような汎用性を持ち、PHENIX 実験全体の利益に大きな貢献をしている。

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] (計 0 件)

[学会発表] (計 6 件)

1. 長島徹, “RHIC-PHENIX実験Run15における高多重度トリガーシステムの性能評価および陽子+陽子衝突系生成物質の方位角異方性の検証”, 日本物理学会第71回年次大会, 2016年3月19日, 東北学院大学, 仙台市, 宮城県
2. 益田英和, “FVTX検出器のトリガー回路における解析”, 日本物理学会第71回年次大会, 2016年3月19日, 東北学院大学, 仙台市, 宮城県
3. I. Nakagawa, “PHENIX results on collectivity tests in high-multiplicity p+p and p+Au collisions at $\sqrt{s}=200\text{GeV}$ ”, Quark Matter 2015, Sept 27th, Kobe, Japan
4. Toru Nagashima, “Development of FVTX high-multiplicity trigger system

for the RHIC-PHENIX experiment”, Quark Matter 2015, Sept 27th, Kobe, Japan

5. SeYoung Han, “Performance of FVTX high-multiplicity trigger system for the RHIC-PHENIX experiment”, Quark Matter 2015, Sept 27th, Kobe, Japan
6. 長島徹, “RHIC-PHENIX実験における FVTX High Multiplicityトリガーシステムの開発”, 日本物理学会, 2015年3月21 [その他]

ホームページ等

https://www.phenix.bnl.gov/WWW/offline/wikioff/index.php/FVTX_Trigger

上記 URLn には PHENIX 共同実験者が情報を共有できるように、トリガーの仕組みや稼働方法のマニュアル等が掲載されている。(パスワードアクセス規制)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

中川 格 (NAKAGAWA, Itaru)

国立研究開発法人理化学研究所

仁科加速器研究センター・専任研究員

研究者番号：60605668

(2) 研究分担者

今津 義充 (IMAZU, Yoshimitsu)

国立研究開発法人理化学研究所

仁科加速器研究センター・特別研究員

研究者番号：20593677