2015年度　修士論文

RHIC-PHENIX実験Run15における FVTX検出器を用いた高多重度トリガーシステムの開発と 陽子+陽子衝突系における方位角異方性の検証

Development of the FVTX high-multiplicity trigger system for the RHIC-PHENIX experiment Run15 and Investigation of the azimuthal anisotropy in proton+proton collision system

指導教員　村田　次郎

立教大学大学院理学研究科
物理学専攻博士前期課程

学生番号　14LA002T
長島　徹

概要

原子が正イオンと電子とに電離した状態をプラズマと呼ぶ。プラズマ状態は固体・液体・気体に次ぐ第四の状態相であり、電子が原子の束縛を振り切るほどの高エネルギーを獲得したときに実現する。同様に、高エネルギー下でクォークやグルーオンが陽子や中性子の閉じ込めから解放され、自由に動き回る状態をクォーク・グルーオン・プラズマ（QGP）と呼ぶ。QGP 状態はビッグバンから数 μ 秒後、ハドロン生成前に実現していたと考えられており、QGP の理解は初期宇宙発展の解明に大きな役割を担う。

米国ブルックヘブン国立研究所に建設された相対論的重イオン加速器（RHIC : Relativistic Heavy Ion Collider）は、QGP の生成とその性質の解明を目的とした世界初の高エネルギー重イオン衝突型加速器である。2005 年までに RHIC で行われた金原子核同士の衝突実験で観測された生成粒子方向の角度相関において、QGP 由来と見られる特徴的な楕円型方位角異方性が確認され、QGP 生成を裏付ける結果のひとつとされている。従来、楕円型方位角異方性は原子核同士衝突系でしか観測されないと考えられていた。しかしながら近年、同様の方位角異方性が陽子+陽子や陽子+鉛原子核の様な小さな衝突系においても見られることが LHC の複数の実験グループから報告された。RHIC ではこれまでに重水素+金原子核、ヘリウム 3+金原子核衝突で同様の相関が観測されているが、陽子+陽子衝突での詳細な検証は行われていない。

これまでの実験から、楕円型方位角異方性をはじめとする衝突時の集団運動現象は、衝突系の大小に関わらず終状態における粒子多重度に依存することを示唆する結果が報告されている。本研究では RHIC では初となる陽子+陽子衝突系における楕円型方位角異方性の観測を目指し、PHENIX で稼働中の前置半導体検出器（FVTX : Forward Silicon Vertex Detector）を用いた高多重度トリガーシステムの開発に取り組んだ。PHENIX の先行する重水素+金原子核、ヘリウム 3+金原子核衝突では Beam Beam Counter（BBC）を用いた高中心度トリガーが実用されているが、陽子+陽子衝突において BBC は中心領域を覆う検出器群との相関が弱く、高多重度トリガーとしては機能しない。一方、FVTX は PHENIX 検出器群の中でも最も衝突点に近い位置に設置された飛跡検出器のひとつであり、中心領域を覆う検出器の高多重度イベントとの相関が強く、高多重度トリガーを備える検出器として適している。トリガー信号は FVTX で検出された飛跡の数を元に生成される。信号発行は FVTX 読み出し回路である Front End Module（FEM）および FEM Interface Board（FEM-IB）に組み込まれた FPGA 上で行われる。FVTX のヒット情報から検出された飛跡の数を数え、飛跡数がしきい値よりも高いイベントにトリガー信号を発行する。

本トリガーシステムは 2015 年 3 月より稼働を開始し、PHENIX 実験 Run15 で行われた陽子+陽子、陽子+金原子核、陽子+アルミニウム原子核すべての衝突実験で物理データを取得した。本トリガーにより収集されたイベント数は陽子+陽子で 500M、陽子+金原子核で 300M、陽子+アルミニウム原子核で 180M イベントを達成し、陽子+陽子衝突系における方位角異方性の検証に最低限必要と予想されていた 80M イベントを大幅に上回るイベント数の収集に成功した。取得データを用いて本トリガーの性能評価を行った所、トリガー稼働前の試験運用期間を除き概ね安定的に稼働していたことが分かった。また高多重度領域においては最小バイアストリガーと比べて 100 倍程度のトリガー効率を達成した。また FVTX よりも中心ラピディティ領域においても、FVTX トリガーは高多重度イベントに感度があることが分かった。

更に、FVTX 高多重度トリガーを用いた解析に向けた前段階として、最小バイアストリガートリ

ガーを使った陽子+金原子核衝突系における方位角異方性の検証を行った。新たな衝突系において新たなトリガーシステムを用いた解析を目指す本研究は、既存の解析法からの飛躍があり結果の解釈が困難になる。そこで、PHENIX 実験グループにおいて過去にも取り組まれたこの解析をスタートとして段階的に理解しながら本解析へと進む。ラピディティ差 $2.75 < |\Delta\eta| < 3.9$ を覆うセントラルアームと BBC との相関を調べたところ、高横運動量で楕円型成分の変化率が小さくなる特徴的な横運動量依存性が見られた。また BBC の電荷量で定義された粒子多重度に対し有意な依存性が見られ、多重度が大きいほど楕円型異方性成分が大きい傾向があることが分かった。

目 次

第 1 章　序論 **5**
1.1　原子核、素粒子の物理学 5
1.2　クォーク・グルーオン・プラズマ 5
1.3　実験的な QGP の検証 6
1.4　研究目的 7

第 2 章　PHENIX 実験 **9**
2.1　RHIC 加速器 9
2.2　PHENIX 検出器 10
2.2.1　Forward Silicon Vertex Detector 11
2.2.2　Beam Beam Counter 11
2.2.3　Drift Chamber 12
2.2.4　Pad Chamber 12
2.3　PHENIX データ収集系 13

第 3 章　高多重度トリガーシステムの開発 **14**
3.1　FVTX 高多重度トリガーシステム導入のモチベーション 14
3.2　FVTX 読み出し回路 15
3.2.1　Wedge（Silicon Sensor, FPHX Chip） 15
3.2.2　ROC 15
3.2.3　FEM 16
3.2.4　FEM-IB 17
3.3　トリガーデザイン 18
3.4　トリガー開発用テストベンチの構築 20
3.5　トリガー発行用 FPGA ブロックの開発 21
3.6　トリガー発行のタイミング 23
3.7　PHENIX 実機へのトリガー回路の導入とコミッショニング期間の測定 24
3.8　エミュレータを用いたトリガー効率の評価 29

第 4 章　Run15 におけるトリガー性能の評価 **31**
4.1　Run15 における稼働 31
4.2　システムの安定性の評価 31
4.3　飛跡数分布の比較 32
4.4　FVTX トラッククオリティカット 32
4.5　最小バイアストリガーと FVTX トリガーの比較 33
4.6　他のサブシステムへの感度 35

第 5 章　二粒子相関解析 **37**
5.1　解析方法 37
5.2　陽子+陽子衝突系検証に向けたストラテジー 40
5.3　陽子+金原子核衝突における解析 40

第 6 章　結論 **43**

付 録 A 擬ラピディティのはなし **44**

付 録 B FVTX トリガー QA **45**
B.1　各種プロット 45
B.2　衝突位置に依存した FVTX の検出領域の変化 45

付 録 C 誤差の計算 **46**
C.1 46

第1章　序論

1.1　原子核、素粒子の物理学

物質の究極の構成要素は何かという問いは、現代物理学において最も重要な研究対象のひとつである。1800 年代から 1900 年代の分子、原子、原子核、核子等の発見を経て、現代では物質を構成するクォーク、レプトンおよび力を伝えるボソンがそれ以上分割できない、大きさを持たない素粒子と考えられている。こうした小さな世界の物理学は粒子衝突、散乱実験を通してその性質、振る舞いが探究されてきた。粒子の持つ運動量 p とその波長 λ はプランク定数 h を用いて $\mathrm{p} = \mathrm{h}/\lambda$ の反比例関係にあり、粒子に付与できる運動量が大きいほどより小さな世界を観測することができる。現代の加速器により実現する衝突エネルギーで観測することのできる下限はおよそ 10^{-19}m であり、逆に言うとこの値が現代の「素粒子」の大きさの上限であるとも言える。このような fm スケールの極小の世界では、重力および電磁気力が主要な日常的なスケールとは異なり、クォークどうしを結びつける強い力による影響が支配的になる。陽子と中性子からなる原子核が電気的に中性でないにも関わらず安定して存在できるのは、核子間に中間子交換による核力が働いているからである。同様に、u クォークと d クォークから成る陽子はグルーオン交換による強い力で強固に結びついており、低温、低密度下では崩壊することは無い。陽子のように三つのクォークから成る粒子をバリオン、π 中間子のようにクォークと反クォークからなる粒子をメソン、バリオンとメソンをまとめてハドロンと呼び、強い力を感じないレプトンと区別される。

1.2　クォーク・グルーオン・プラズマ

原子が正イオンと電子とに電離した状態をプラズマと呼ぶ。プラズマ状態は固体、液体、気体に次ぐ第四の状態相であり、物質がイオン化エネルギーに相当する高温状態に達したときに実現する。同様に、核子を構成するクォーク、グルーオンの結合が切れて核子による閉じ込めが消失したような状態をクォーク・グルーオン・プラズマ (QGP:Quark Gluon Plasma) と呼ぶ。原子核密度は典型的に $6\mathrm{fm}^3$ あたり一つの核子を持つ。これに対し核子自身の体積はおよそ 10 分の 1 であり、通常の 10 倍程度の高密度状態になると核子どうしが重なりはじめ、クォークやグルーオンがひとつの核子に属するという描像が不自然になる。一方原子核密度を変えずに原子核の温度を上げる場合、核子の沸点に相当する 200MeV 程度になると π 中間子が大量に発生し、結果的に高密度状態が実現する。すなわち、ハドロンは超高温または高密度下においてクォーク、グルーオンが凍り付いた状態から解放され QGP 状態へと相転移すると考えられる。1GeV 程度の通常の原子核はクォークとグルーオンが凍り付いて強固に結合した状態であるが、強い力を記述する量子色力学（QCD : Quantum Chromo Dynamics）の計算によると温度方向では 200MeV、密度方向では 10GeV 程度で QGP への相転移が予想される。QGP はビッグバン数 μ 秒後の宇宙初期に実現していたと考えられている。従って、QGP 現象の理解は QCD の発展に寄与すると共に、初期宇宙発展の解明に大きな役割を担う。

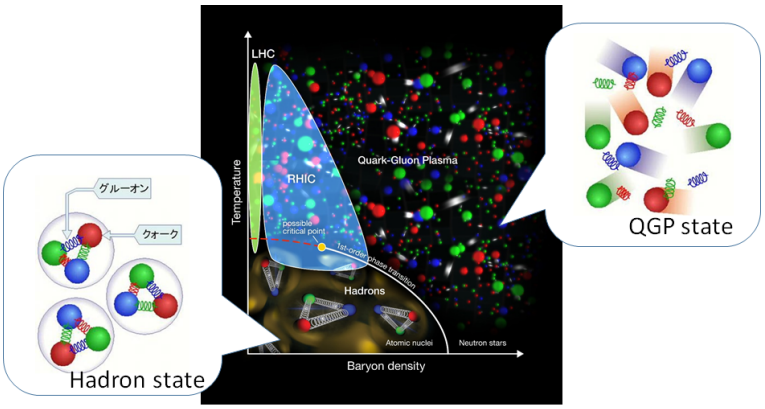


図 1.1: QCD 計算が予想する相図. 横軸は密度、縦軸は温度.

1.3 実験的な QGP の検証

米国ブルックヘブン国立研究所 (BNL:Brookhaven National Laboratory) に建設された相対論的重イオン衝突型加速器 (RHIC:Relativistic Heavy Ion Collider) は、QGP を実験的に検証することを目的のひとつとして 2000 年より稼働を開始した。RHIC は周長約 4km におよぶ 2 つのリングからなる衝突型シンクロトロンで、光速近くにまで加速された原子核どうしを高エネルギーで正面衝突させることで高温・高密度状態をつくりだす。2010 年までに、これまで RHIC で行われた金原子核衝突実験でつくりだされた物質が約 4 兆 K に達していたことが分かり、QGP への相転移が予想される 2 兆 K を上回る超高温状態を世界で初めて実現した。

QGP 生成を示唆する結果のひとつとして、生成粒子方向の楕円型方位角異方性がある。原子核どうしの衝突を考えるとき、多くの場合衝突に関与する反応領域は二つの原子核が重なる楕円形になる（方位角異方性を持つ)。このとき反応領域で QGP が実現していた場合、ラグビーボール状の反応領域とまわりの真空との圧力勾配が楕円形の短軸方向と長軸方向で異なることから、生成粒子の時間発展に異方性が生じる。一方、反応領域が相転移せず核子どうしの衝突が起こっていると考えると、QGP に比べ粘性の高い生成物質から放出される生成粒子どうしが作用しあい、衝突時の異方性が時間発展に伴い平均化されていく。この場合、検出粒子は特定の方向を持たず、放出方向は円形に近い分布が得られる。すなわち、原子核衝突による生成粒子の異方性を調べることでその系で QGP 相転移を起こしたかどうかを検証することができる。

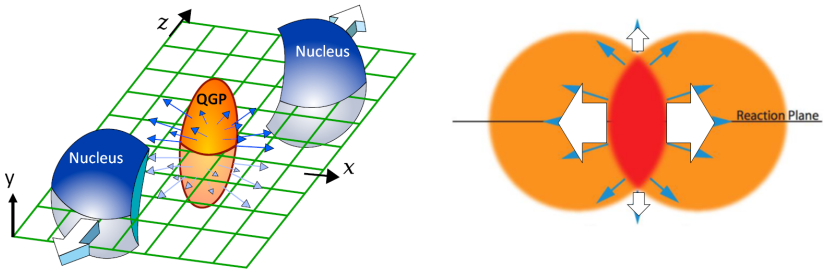


図 1.2: 左：衝突で生成する楕円形の QGP 物質. 形状は粒子同士が重なるラグビーボール型になる. 右：QGP 物質と周りの真空との圧力勾配. 楕円の短軸方向に押し出す力が強く働くため、粒子の放出方向に異方性が生じる.

実験的な検証の際、楕円型異方性成分は反対方向に放出される 2 ジェットによる効果が支配的なため、厳密には方位角成分と共にラピディティ方向の分布を調べる必要がある。このような生成粒子の異方性を調べる解析手法として、生成粒子間でペアを作り方位角差およびラピディティ差の分布を調べる二粒子相関解析が広く受け入れられている。この解析において、$\Delta\phi = 0$ 付近を Near side、$\Delta\phi = \pi$ 付近を Away side と呼び、楕円型方位角異方性が広いラピディティ領域に渡って Near side に分布する山の尾根型の相関（ridge）が QGP 由来のシグナルと考えられている。図 1.3 は CMS で観測された二粒子相関解析の結果で、典型的な ridge 型の相関が確認できる。RHIC での金原子核衝突では核子どうしの衝突よりも有意に大きな楕円型異方性成分が観測され、QGP が生成していることを示唆する結果のひとつと理解されている。QGP 由来の楕円型異方性成分の大きさは生成粒子の横方向運動量 p_T に依存し、$p_T = 3\mathrm{GeV/c}$ 付近で変化率が緩やかになる。低運動量領域ではソフトな散乱による効果が支配的で、本来 p_T 依存性のない楕円形の異方性が小さく見えるためである。

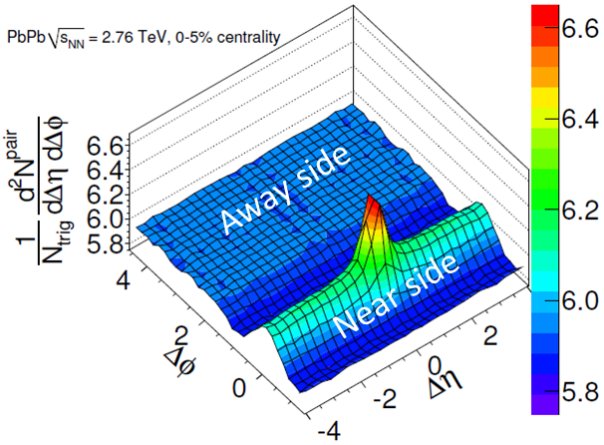


図 1.3: CMS で観測された鉛原子核衝突系における ridge 相関.$\Delta\phi = 0$ のピークが広い $\Delta\eta$ に渡って見られ、QGP 由来の現象と理解される.

1.4 研究目的

従来、二粒子相関解析における ridge 型相関は原子核どうしの衝突でしか観測できないと考えられてきた。小さな衝突系では衝突時のエネルギー密度が小さく QGP 生成の確率が小さいためである。しかしながら近年、LHC での複数の実験グループで陽子+陽子や陽子+鉛原子核のような小さな衝突系においても QGP 生成に特徴的な ridge 型の相関が観測された。図 1.4 は陽子+陽子衝突における二粒子相関で、左が低多重度イベント、右が高多重度イベントである。二粒子相関については第五章で詳細に議論するが、低多重度イベントの相関は典型的なジェットによる影響を示していて、$(\Delta\eta, \Delta\phi) = (0, 0)$ の鋭いピークと away side の鈍ったピークが見えている。away side でピークがラピディティ方向に伸びるのは、陽子内部の価クォークの持つ運動量バランスが衝突時点で崩れているためである。一方、高多重度イベントにおける二粒子相関では図 1.3 に類似した Near side ridge の相関が見られる。そもそも原子核同士の衝突における楕円形の反応領域が ridge の由来と考えられていたため、衝突時の描像が異なる小さな衝突系においても ridge が確認されたことは大変な驚きであった。この現象の解釈として、小さな QGP 生成、衝突時の核子のゆらぎなどの初期状態による影響、カラーグラス凝縮など複数のモデルが考えられているが、これまでの実験結果だけではいずれの解釈もそれを裏付けるには決め手に欠ける。後述するように、RHIC のエネルギー領域での測定によ

りこれら複数のモデルを限定できる可能性がある。しかしながら、PHENIX が備える BBC を用いたトリガーは陽子+陽子衝突においては高多重度事象への感度が低く、ridge シグナルの観測には不向きである。そこで、本研究では RHIC では初となる陽子+陽子衝突系における楕円型方位角異方性の観測を目的とし、前置半導体検出器 (FVTX:Forward Silicon Vertex Detector) を用いた新たな高多重度トリガーシステムを導入した。また PHENIX 実験 Run15 で行われた種々の衝突系における方位角異方性の検証に取り組んだ。これまでに LHC での実験で確認された結果はいずれも同じ加速器を用いた、似通った条件下で観測されたものだが、RHIC では LHC よりも高 x 領域を観測することができる。仮にグルーオンの存在確率が小さい高 x 領域で ridge シグナルが観測された場合、それはすなわち LHC よりもカラーグラス凝縮による影響が小さい条件下で観測したことになり、ridge の由来となるモデルを限定する上で非常に大きな一歩となり得る。本論文では新たに導入したトリガーシステムの開発過程と性能評価について報告すると共に、RHIC で行われた陽子+金原子核および陽子+陽子衝突実験における方位角異方性相関の解析結果について議論する。

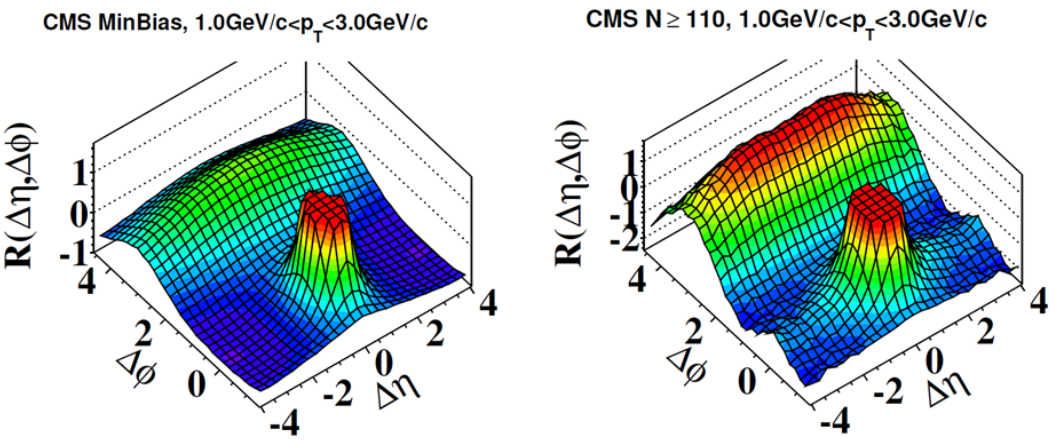


図 1.4: CMS で観測された陽子+陽子衝突系における二粒子相関. 左：多重度の低い最小バイアス事象. 右：トラック数が 110 以上の高多重度事象. 陽子+陽子衝突においては高多重度事象では ridge 型の相関が見えやすい.

第2章　PHENIX実験

2.1　RHIC加速器

BNLでは衝突型加速器RHICを用いて原子核・素粒子スケールの物理学を研究している。RHICはQGPの生成およびその性質の研究を目的として建設された世界初の重イオン衝突型加速器で、2000年の稼働開始以来金原子核、銅原子核、ヘリウムイオン、重陽子、陽子など種々のビーム実験に寄与してきた。図2.1はBNLで撮影されたRHIC加速器の航空写真である。RHICはブルーリング、イエローリングと呼ばれる二つの環状のビームラインを持ち、種々の粒子を加速、衝突させることができる。RHICで実現する最大の重心系衝突エネルギーは、陽子+陽子衝突系で510GeV、原子核衝突系では核子対あたり200GeVである。

図 2.1: RHIC加速器の航空写真.

RHICで加速される粒子は以下の様な前段加速の過程を経てRHICへと入射される。まず原子核の場合、Tandem Van de Graaffで原子から電子を取り除き原子核（正に帯電したイオン）にした後、磁場をかけて加速する。陽子の場合、イオン源で作り出した陽子を線形加速器で加速する。その後Booster Synchrotron、Alternating Gradient Synchrotronを経て加速された粒子は左右逆回りに走る二つのRHICリングに入射される。

RHICは6つの地点で時計回りのブルーリングと反時計回りのイエローリングが交差しており、両方向に走るビームが衝突する。ビームはバンチ構造を持ち、各リングにそれぞれ120のバンチが蓄積される。各バンチは典型的に60〜90cmの長さを持ち、106nsの間隔（9.4MHz）で衝突が起こる。現在、RHICリングの北方向を12時として8時および6時に位置する衝突点に検出器が設置され、PHENIX(Pioneering High Energy Nuclear and Ion Experiment)、STAR(Solenoid Tracker at RHIC)の二つの実験が稼働している。

2.2 PHENIX 検出器

PHENIX 実験は RHIC で行われている主要実験のひとつで、世界 15ヵ国 70 以上の研究期間から約 500 名が参加する国際共同実験である。PHENIX では QGP 生成とその性質に関わる研究の他、陽子スピンの構成要素の解明を目的として研究が行われている。

図 2.2 に PHENIX 検出器の概観を示す。PHENIX は粒子衝突で生成される膨大な量の粒子を観測するための放射線検出器群で、粒子識別や横方向運動量測定等を行う能力を備えている。図 2.2 左は衝突点まわりの中心領域を覆うセントラルアームと呼ばれる検出器群である。セントラルアームはセントラルマグネットと呼ばれる電磁石がつくるビーム軸方向の磁場中にあり、生成粒子の磁場中での曲率からその横方向運動量を測定できる。図 2.2 右は衝突点の前後方領域を覆うミューオンアームと呼ばれる検出器である。ミューオンアームの内、特にミューオン飛跡検出器（MuTr : Muon Tracker)、ミューオン識別器（MuID : Muon Identifier）はハドロン吸収剤の外側に設置されており、衝突により生成したミューオンを測定するのに特化した検出器である。尚、PHENIX では幾何学的な定義として北をビーム軸の正方向、西および上をビームに対し垂直な軸の正方向としており、これらの軸を基準として放出角 ϕ や方位角 θ を測定する。図 2.3 は PHENIX の座標系を図示したものである。

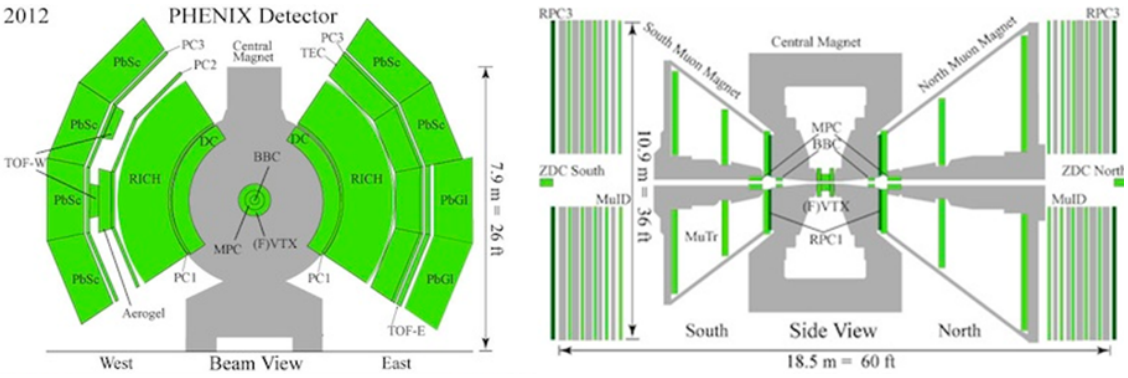


図 2.2: PHENIX 検出器概観. 左：ビーム軸に垂直な断面図. 右：ビーム軸に平行な断面図.

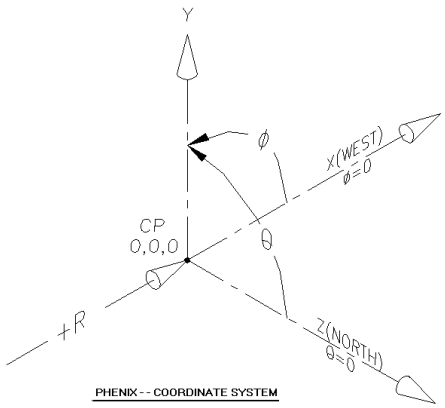


図 2.3: PHENIX の座標系

以下に、本研究に関わるサブシステムについて詳述する。

2.2.1 Forward Silicon Vertex Detector

前置半導体検出器（FVTX : Forward Silicon Vertex Detector）はミューオンアーム最内層に設置された半導体検出器であり、検出領域は前後方向の全放出角を覆う。半径方向に 75μm ピッチで並ぶ半導体ストリップからなる 4 層構造の検出器で、中心領域を覆う衝突点検出器（VTX/SVX : Silicon Vertex Detector）と共に衝突点に最も近い位置に設置された飛跡検出器である。高精度での飛跡検出が可能で、ビームの衝突点と生成粒子の崩壊点との最近接距離（DCA : Distance from Closest Approach）測定を介した重クォーク由来ミューオンの識別を目的として開発された。FVTX の開発は米国ロスアラモス国立研究所において行われ、2012 年より PHENIX 本実験で稼働を開始した。

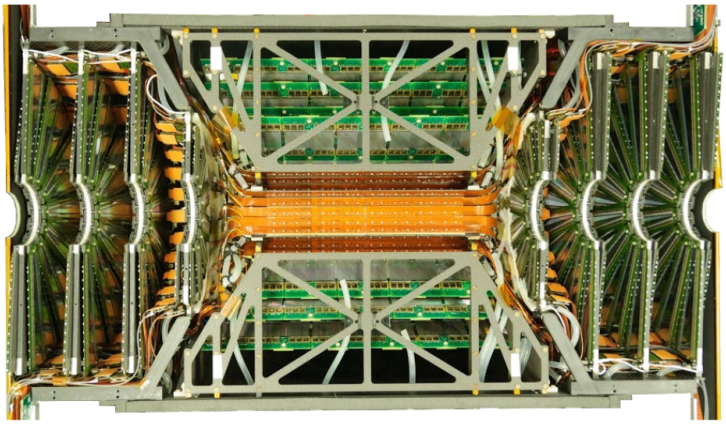


図 2.4: FVTX 検出器（左右）と VTX 検出器（中央）

2.2.2 Beam Beam Counter

ビーム・ビームカウンター（BBC : Beam Beam Counter）は FVTX よりも更に前後方検出領域を覆うチェレンコフ検出器で、南北それぞれ 64 本のクォーツ放射体と光電子増倍管から成る。BBC は衝突事象への感度が良く、PHENIX 実験の最小バイアストリガーに用いられている。また psec オーダーの非常に高い時間分解能から、衝突が起こった位置と時間を測定することができる。

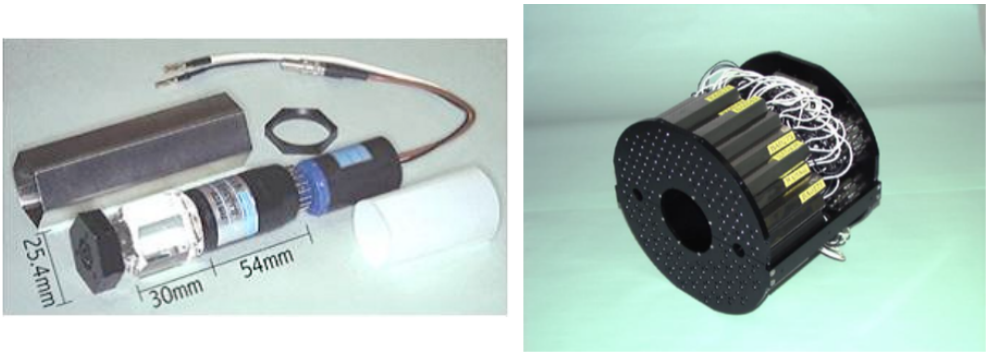


図 2.5: BBC 検出器を構成するクォーツ放射体と光電子増倍管および片アームの BBC 検出器.

2.2.3 Drift Chamber

セントラルアームでの飛跡検出に用いられる検出器のひとつが Drift Chamber（DC）である。DC は芯線が網目状に張られた面を半径方向に 6 層備えた多線ドリフトチェンバーで、衝突点近傍の中心領域を東西それぞれ 90°ずつ覆っている。 DC はセントラルマグネットが作る磁場中にあり、観測された飛跡の曲率から荷電粒子の運動量測定ができる。

2.2.4 Pad Chamber

Pad Chamber（PC）は DC の外側に設置されたセントラルアーム検出器群のひとつで、東側に 2 層、西側に 3 層の多線比例計数管から成る。PC の位置する領域ではセントラルマグネットによる磁場がほぼゼロであり、磁場外の直線軌道を走る粒子の飛跡検出を目的としている。またビーム軸方向の位置情報に感度を持つため、DC 単独では不可能な三次元飛跡検出を可能にする。

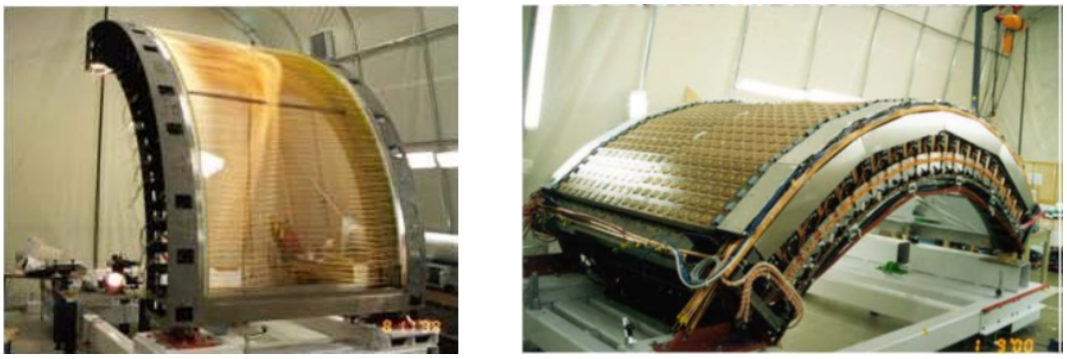


図 2.6: 建設中の DC と DC 上に設置された PC1

図 2.7 に各サブシステムの検出領域を縦軸を方位角、横軸を擬ラピディティとして示す。

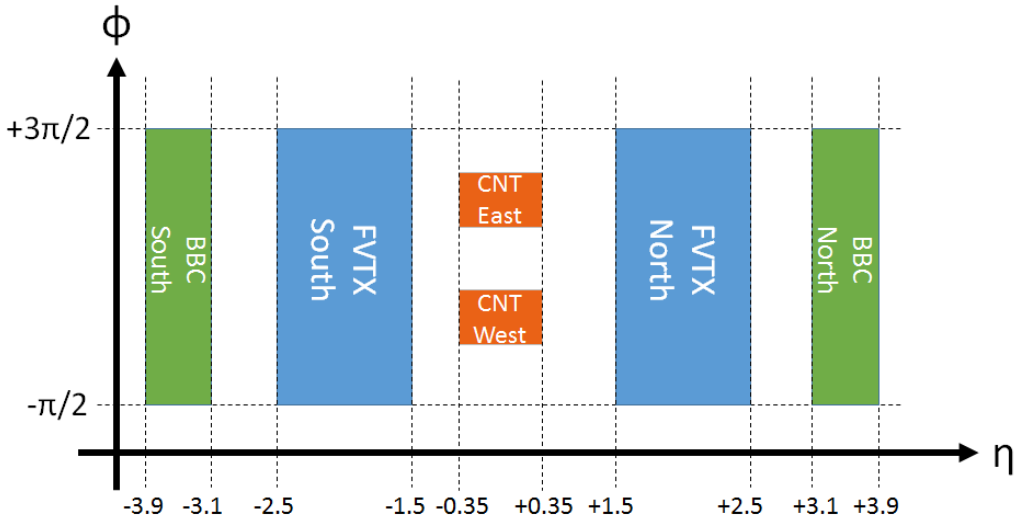


図 2.7: 各サブシステムが覆う検出領域

2.3 PHENIX データ収集系

PHENIX は複数のサブシステムから成る放射線検出器群である。センサー部分やその読み出し回路は全て合わせると膨大な数になるが、そのどれもが PHENIX の一部として機能する必要があるため、PHENIX ではその読み出し系（DAQ : Data Acquisition）に全システム共通の同期信号（BCO : Beam Clock）が RHIC から供給されている。BCO はビームの衝突頻度である 9.4MHz であり、タイミング統括回路（MTM : Master Timing Module）、サブシステム用同期回路（GTM : Granule Timing Module）を通して各サブシステムに供給されている。また、PHENIX では各サブシステムから発行される複数のトリガー信号を元にデータ収集の判断を統括的に行うトリガーシステムが採用されている。トリガー判断に使われるサブシステム（BBC、MuTr、FVTX 等）は、それぞれ独立にトリガー信号（Level0 trigger）を発行する。各トリガー信号は PHENIX トリガー統括回路（GL1 : Global Level1）へと送られる。PHENIX の DAQ の最大トリガーレートは 6 8kHz と上限が決まっているため、各トリガーに割り当てられたバンド幅に応じた間引きが GL1 では行われる。また GL1 モジュール上で複数のトリガーの論理積、論理和を取ることも可能である。GL1 で発行されたデータ収集判断のためのトリガー（Level1 trigger）は MTM、GTM を介して各サブシステムの FEM へと返され、トリガー信号を受け取ったイベントのデータはデータ収集回路（DCM : Data Collection Module）へと送られ、バッファの後各サブシステムのイベント情報が統合される。

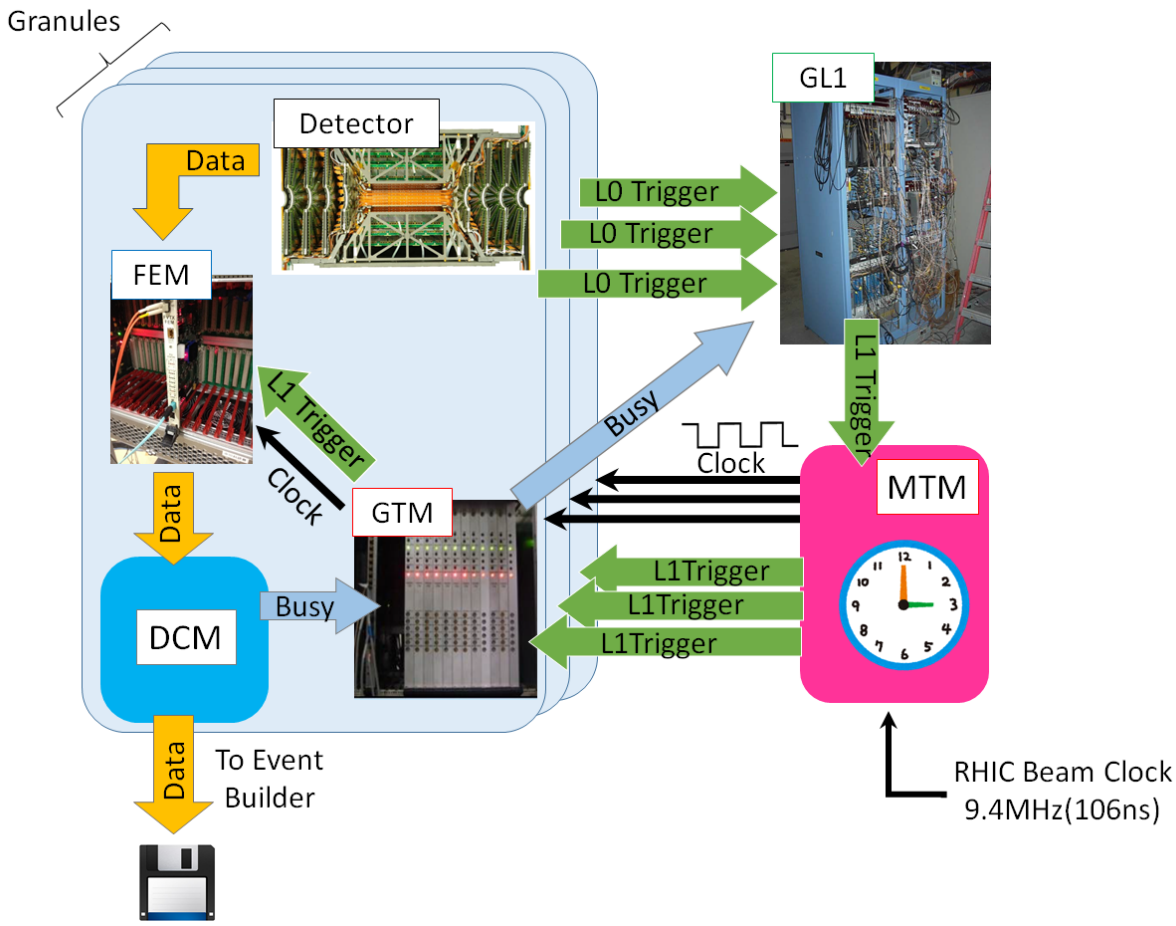


図 2.8: PHENIX データ収集系. 各サブシステムの FEM は MTM、GTM から供給される BCO で同期され、Level1 トリガーを受け取ると DCM へとデータを出力する.

第3章　高多重度トリガーシステムの開発

第一章で前述した通り、小さな衝突系における楕円型異方性相関の観測には高多重度イベントが鍵となり得る。本章では FVTX 検出器を用いた高多重度トリガーシステムの開発について述べる。

3.1　FVTX 高多重度トリガーシステム導入のモチベーション

原子核同士の衝突では粒子多重度と類似した中心度という量が指標として用いられる。中心度は原子核衝突の際、衝突に関与する領域がどれほど重なり合っているかを表す量で、完全に重なった中心衝突を 0%として、中心衝突からずれるほど値が大きくなる。中心衝突に近いほど反応に関わる領域が大きく、すなわち生成する QGP 物質も大きいため、QGP 由来のシグナルは見えやすくなる。PHENIX ではこうした高中心度イベントに感度を持つ BBC 中心度トリガーが本研究以前より稼働している。BBC 中心度トリガーは BBC の南アームの内、粒子検出をした PMT の本数を元にトリガー信号を発行する（RHIC では異なる種類のビームを加速させるとき、陽子や重陽子といった小さな物質を時計回り、金原子核のような大きな物質を反時計回りのリングに加速しており、PHENIX では南は原子核の進む方向である）。これは中心度の高い衝突ほど生成する粒子の数が大きいことを仮定したデザインであり、金原子核+金原子核や重水素+金原子核、ヘリウム 3+金原子核衝突実験ではセントラルアーム領域の高多重度イベントに対しても感度を持つことが確認されている。しかしながら、陽子+陽子衝突においては BBC とセントラルアームとの相関が弱く高多重度トリガーとしては機能しない。そこで、2012 年度より稼働を開始した FVTX 検出器に注目する。FVTX は PHENIX の中でも衝突点に最も近い位置に設置された飛跡検出器の一つであり、衝突から検出までの放射長が小さいという観点から高多重度イベントを選び出すのに適した検出器であると言える。また本研究で取り組む二粒子相関解析においては BBC とセントラルアームを用いるため、トリガーを解析で用いる検出器とは異なるものを使うことでトリガーバイアスを少なくする効果も期待できる。

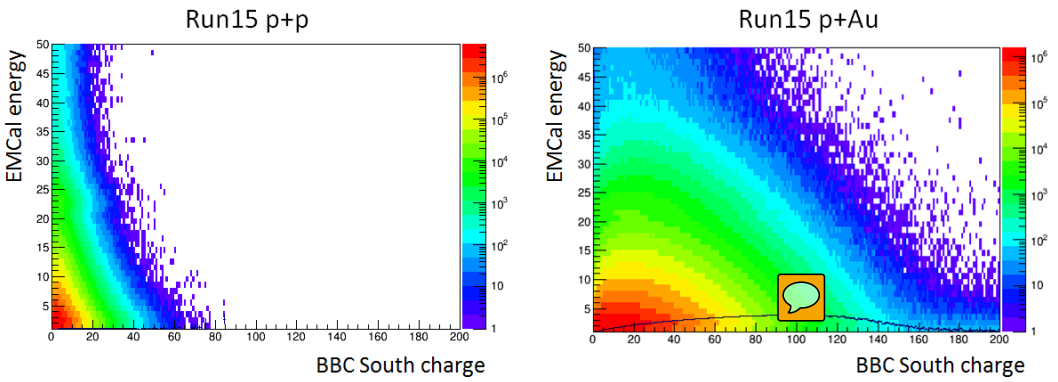


図 3.1. 陽子+陽子（左）と陽子+金原子核（右）衝突におけるセントラルアームで観測したエネルギーと BBC 電荷量の相関. 陽子+陽子では陽子+金原子核に比べ相関が弱い.

3.2 FVTX 読み出し回路

FVTX 高多重度トリガーは FVTX 検出器で検出された飛跡数をもとにトリガー信号を発行する。トリガー機構は読み出し回路上のデータ処理のデザインによるため、トリガー回路実装に加え既存の読み出し機構に影響が出ないようにするためにも読み出しシステムを理解することは避けては通れない。本節では FVTX 用エレクトロニクスについて詳述する。

3.2.1 Wedge（Silicon Sensor, FPHX Chip）

FVTX のセンサー部分はロスアラモスグループによるデザインの下、浜松ホトニクス株式会社が実装した、半径方向に 75μm ピッチで並ぶ短冊形のシリコン半導体である。各ストリップはビームパイプに近い最内層で 3.4mm、最外層で 11.5mm の長さを持ち、方位角方向 7.5 °の検出領域を覆う。シリコンは 320μm 厚の n 型半導体と、それに埋め込まれた p 型半導体で構成され、チャンネルごとに実装されたキャパシタで交流カップリングされた信号を出力する。バイアス電圧は 1.5MΩ の抵抗を通して供給される。FPHX（FVTX chips for PHENIX）は 128 チャンネル読み出しを備えた FVTX 読み出し専用チップで、米国フェルミ研究所において開発された波形整形回路と 3 ビット ADC から成り、ゲイン値や閾値、チャンネルマスクなど複数のパラメータ制御可能である。また処理にかかる時間として、4BCO（∼4 × 106nsec = 424nsec）に 4 つまでのヒット情報を処理できるようデザインされている。FPHX は 2020 年度より稼働が予定されている sPHENIX 実験に新たに導入される半導体検出器の読み出し回路の一部としての利用が検討されている。シリコン半導体と FPHX チップはまとめて Wedge と呼ばれ、本実験ではビームパイプ周り、衝突点最近傍に設置されるエレクトロニクスである。Wedge は四層構造の FVTX の内、衝突点に最も近い最内層で 20 個の FPHX を備える Small Wedge、他層では 26 個の FPHX を備える Large Wedge が用いられる。図 3.2 は Large Wedge の写真である。

図 3.2: Large Wedge の写真. シリコンセンサで検出した信号は ADC を備えた FPHX チップで直ちにデジタル化される.

3.2.2 ROC

FPHX から出力されたデータは HDI（High-Density Interconnects）ケーブルを通して下流の読み出し回路（ROC : Read Out Card）へと送られる。ROC では複数の FPHX からのデータを同期、

結合し、光信号ケーブルを通して下流のエレクトロニクスへと伝送される。ROC は衝突点近傍（IR : Interaction Region）に設置されたエレクトロニクスであるため、処理用 FPGA には放射線耐性のある ACTEL 社製 ProASIC3E が採用されている。

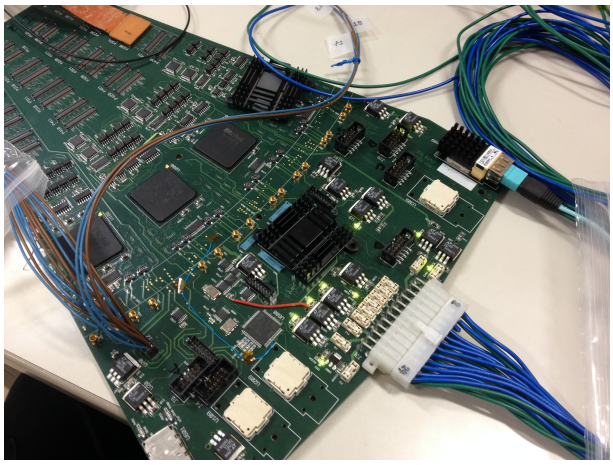


図 3.3: ROC の写真. 理化学研究所トリガー開発用テストベンチで撮影.

3.2.3 FEM

ROC の処理を経たデータは前端回路（FEM : Front End Module）へと出力される。FEM は VME 規格の読み出しモジュールで、後述する FEM-IB と共に Counting house 内に設置されている。FVTX 読み出し系の中では最下流のエレクトロニクスで、DCM のデータフォーマットに合わせてヒット情報が統合される。処理用 FPGA は Xilinx 社製 Virtex-4 が搭載されており、本研究内容のひとつである FVTX 高多重度トリガーの実現の鍵となる。図 3.4 は VME クレートに設置された FEM である。

図 3.4: VME クレートに設置された FEM. 理化学研究所トリガー開発用テストベンチで撮影.

3.2.4 FEM-IB

複数の FEM を包括的に制御するエレクトロニクスとして FEM 制御回路（FEM-IB : FEM Interface Board）がある。FEM-IB は FVTX GTM からエレクトロニクスを同期するための同期信号やデータ読み出しのための Level1 トリガー信号を受け取っている。また FEM-IB 上に搭載された FPGA は FVTX 高多重度トリガーに重要な役割を担う。FEM および FEM-IB の FPGA デザインについては後節で詳述する。

図 3.5: VME クレートに設置された FEM-IB. 理化学研究所トリガー開発用テストベンチで撮影.

図 3.6 は FVTX 検出器読み出しの概念図である。まとめると、半導体検出器で検出された信号は FPHX で直ちにデジタル化される。FPHX から送り出されたヒット情報は読み出しカード ROC、FEM を経て DCM へと送られる。またデータ収集用の信号経路とは別に、FEM を一括して制御するための FEM-IB がある。半導体センサー部で検出された全てのヒット情報は最下流のモジュールである FEM までカットをかけられることなく到達する。

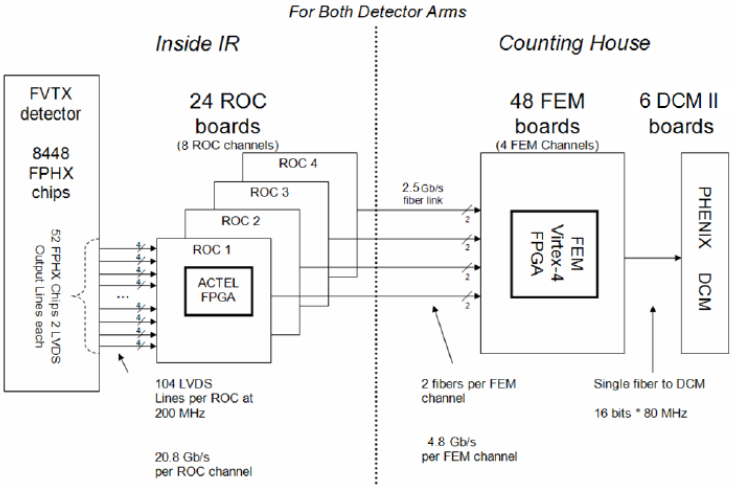
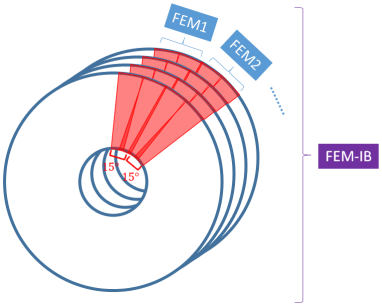


図 3.6: FVTX 検出器読み出し回路の概念図. 半導体センサー部で検出されたヒット情報は全て最下流エレクトロニクスである FEM までカットをかけられることなく到達する.

図 3.7 は FVTX 読み出し回路の対応である。各 FEM は Wedge8 枚分のヒット情報を処理しており、幾何学的には FVTX センサー部分の方位角方向 15 度分のスライスに対応する。また各 FEM は FEM-IB によりコントロールされ、1 つの FEM-IB は 12 の FEM を一括して制御している。各々のエレクトロニクスが覆う検出領域との対応を図 3.7 に併記した。



Electronics	Coverage	
Wedge	7.5 °	
FEM	8Wedges = 15 ° ×	4stations
FEM-IB	12EFMs = 180 ° ×	4stations

図 3.7: FVTX エレクトロニクスとセンサー部の幾何学的対応.FEM 一台あたり方位角 15 度分の検出領域の信号を処理する.FEM-IB は一台あたり FEM12 台分、検出領域にして方位角 180 度分の制御を担う.

3.3 トリガーデザイン

既存のデータ処理のみを行う FEM および FEM-IB の FPGA には、その処理にトリガーブロックを追加する余剰能力を残していた。これを利用し、トリガー信号の生成機構は既存の読み出し回路に搭載された FPGA に処理ブロックを追加することで実現する。前述の通り、FVTX で検出された信号は FEM のデータ処理用 FPGA まで全てのヒット情報がカットをかけられることなく到達する。現状の処理ではイベントごとのヒット情報を一定時間バッファし、L1 トリガーを受け取ったイベントで DCM へ転送するデザインになっている。このヒット情報を FEM の FPGA に到達した時点でトリガーブロックへと分岐し、トリガーロジックを通してトラックの有無を判断したフラグを立てる。FEM は同じ方位角領域を覆う 2 列× 4 層分の Wedge のヒット情報を処理できるため、同じ方位角領域で複数層のヒットを要求することにより Wedge 単位の粗いオンライントラッキングができることになる。

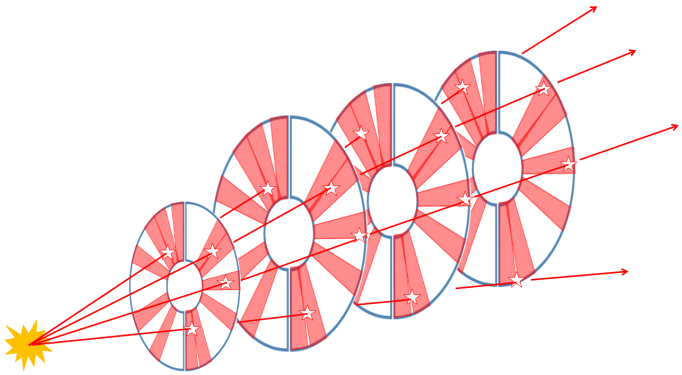


図 3.8: FVTX 高多重度トリガーの構想.Wedge 単位の粗いオンライントラッキングを元にトラック数を数える.

FPGA 内のトリガーロジックの概念図を図 3.9 に示す。まず Wedge ごとにヒット数を数え、閾値よりもヒットが多かった場合はヒットフラグを立てる。このヒットフラグを Wedge トリガーと呼ぶ。次に同じ列の中で Wedge トリガーの数を数え、閾値よりも高い場合にトラックフラグを立てる。このフラグを Column トリガーと呼ぶ。更に、二列の Column トリガーで論理積あるいは論理和を取り、最終的に FEM でトリガー信号を出力する。この信号を FEM トリガーと呼ぶ。これらの処理は全て FEMFPGA 上で行う。次に、FEM トリガーを FEM-IB の FPGA へと送り、FEM-IB FPGA 上での処理で FEM トリガーの数を数え、閾値よりも高い場合にトリガー信号を出力する。この信号を FEM-IB トリガーと呼ぶ。最後に、2 台の FEM-IB トリガーの論理積を取り、FVTX の片アームのトリガーとして GL1 へと出力する。

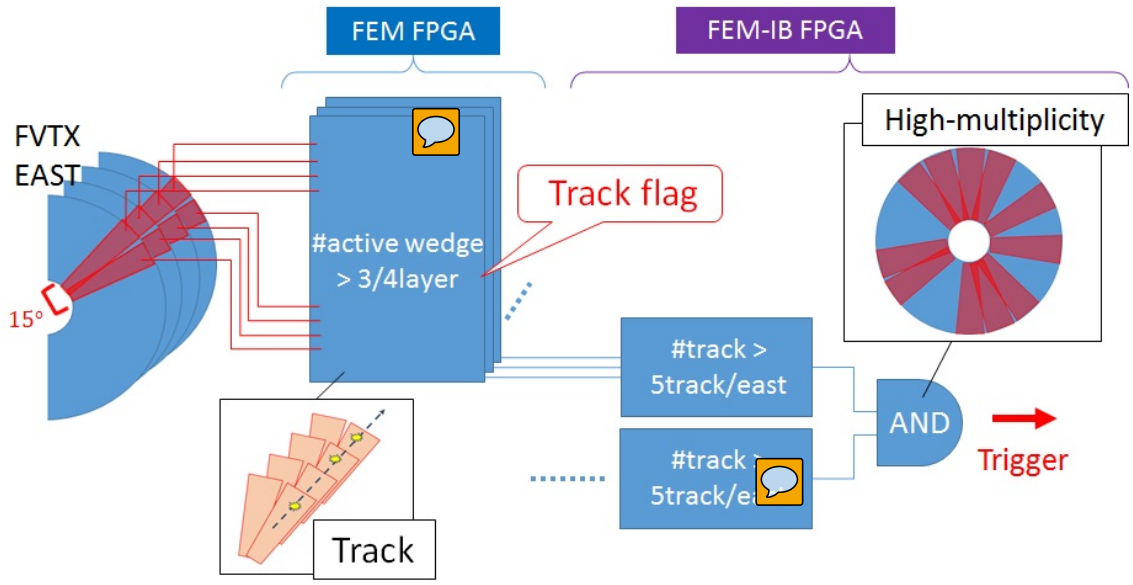


図 3.9: FVTX 高多重度トリガーデザイン. 各読み出しエレクトロニクスが FVTX センサー部の方位角方向のスライスに対応していることを利用する.

本トリガーのデザイン上、オンラインでの飛跡検出は Wedge 単位で行うため、ストリップ単位で行うオフライントラッキングと比べ粗いものになる。これは、トリガー信号を生成するまでの時間に制約があるため、オンラインでは精密なトラッキングにかけられる時間が無いからである。そのため、オンラインでのトラック数とオフラインでのトラック数は必ずしも一致しない。例として、衝突事象由来でないヒットが同列の Wedge の各層にあり、それらが直線軌道を構成しない様な場合、オフラインではトラック認識されないがオンラインではトラックとして認識される。これはトラック数の過大評価の要因となる。一方、同列 Wedge 内に複数のトラックがある場合、オフラインでは正しくトラックの数を数えることができるが、オンラインでは 1 トラックと認識される。また Wedge の列を跨いでトラックが走るような場合、オフラインではトラック認識がされない。これらは数え落としの要因になり得る。図 3.10 にオフラインとオンラインで識別が異なる例を示す。図 3.11 はトリガーロジックが認識するトラック数とオフラインで再構成されたトラック数との相関図である。トラック数が多くなるとオンラインよりもオフラインの方がトラック数が多く認識される傾向が見られ、同列 Wedge 内に複数のトラックが走るイベントによる影響が大きくなることが分かる。

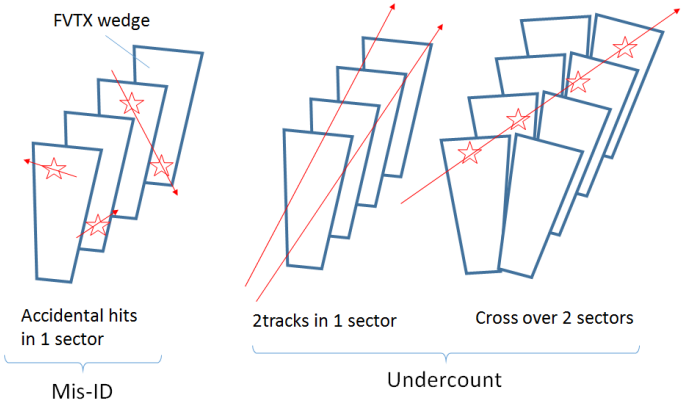


図 3.10: オンライントラッキングによる誤検出および数え落としの主な要因

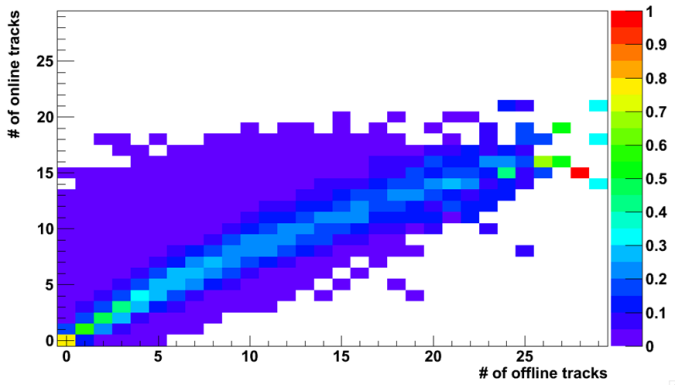


図 3.11: トリガーロジックが認識するトラック数とオフラインで再構成されたトラック数の相関. 解析は陽子+陽子衝突実験データによるもの.

3.4 トリガー開発用テストベンチの構築

新たなトリガー回路の導入に当たり、ロスアラモス国立研究所 FVTX 開発グループの協力の下、理化学研究所およびブルックヘブン国立研究所にトリガー開発用テストベンチを構築した。トリガー開発に必要な FVTX センサーおよび読み出しエレクトロニクスは同研究所より提供を受けた。尚、トリガー開発用テストベンチの構築過程については筆者卒業論文（参考文献 [8]）に詳しく記載されている。

テストベンチ構築の際、まず FVTX 実機と再現できているかどうかのテストとして種々の測定に取り組んだ。FVTX の読み出し回路のひとつである ROC にはテストベンチ用のセットアップとして、シリコンが発行するアナログ信号を模した擬似信号を発生するパルス発生器が実装されている。この擬似信号はキャリブレーションパルスと呼ばれ、FPHX より下流、すなわち ADC 以降全ての読み出し回路のテストに有効である。図 3.12 は入力したキャリブレーションパルスの波高と読みだされた ADC 値との相関を測定した際の概念図と結果である。この測定では入力信号を FPHX,ROC,FEM 全ての読み出し回路を通し、データとして読みだされた値との相関を見ることで信号経路のテストおよび閾値等のパラメタ調整に利用することができる。図 3.12 に示す通り入力信号と出力信号の間に明らかに強い相関が見られ、読み出し回路が正しく動作していることが分かる。FPGA 開発やデータ処理にかかる時間の測定など、トリガー導入に向けた測定をテストベンチのセットアップを用いて

行った。

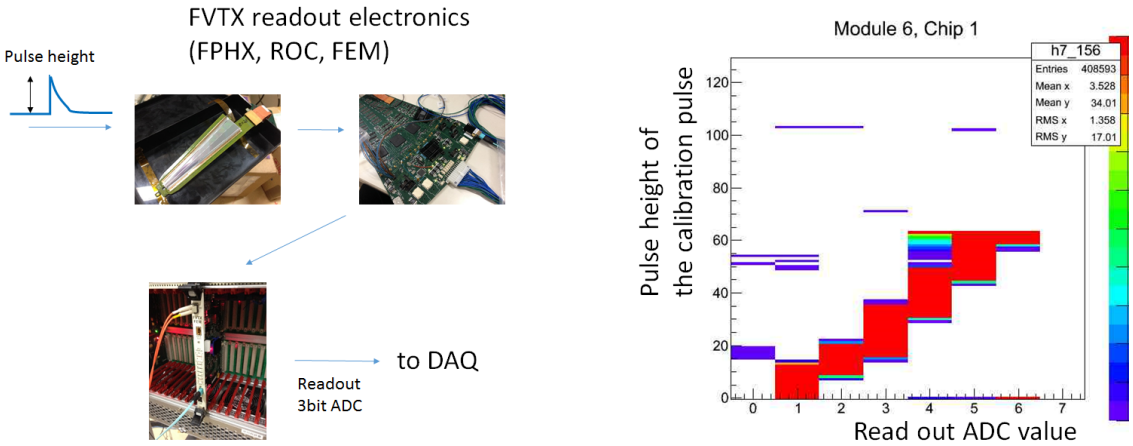


図 3.12: 入力信号の波高と出力データの ADC 値の相関. 入力信号と出力信号の間に強い相関が見られ、読み出し回路や信号伝送となるケーブル類が正しく動作していることを示している.

3.5 トリガー発行用 FPGA ブロックの開発

本節ではトリガー発行用に新たに追加した FPGA ブロックの開発について述べる。前述した通り、本トリガーシステムは Wedge トリガー、FEM トリガー、FEM-IB トリガーと段階的にトリガー判断をする。このデザインを実現するため、各々に対応する FPGA 内で異なる処理ブロックを開発した。尚、FEM のデータ処理用 FPGA には Xilinx 社製 Virtex-4（XC4VSX55）、FEM および FEM-IB のエレクトロニクス制御用 FPGA には Xilinx 社製 Spartan3（XC3S200）が採用されている。FPGA のコーディングやピンアサイン等を行うソフトウエアは Xilinx ISE 7.1i、FPGA ブロックのシミュレーションには ModelSim、FPGA への実装には ISE iMPACT を用いた（シミュレーションソフトと実装ソフトは比較的互換性があり、例えば ISE Design Suite に付属したシミュレータ iSim も使える。しかしながらコーディングと実装ファイルの生成には ISE7.1i が必要。原因の一つとして、2016 年現在の最新版 ISE14.7 では XC4VSX55 に対応しておらず、FPGA 内のブロックおよび信号線の構成ができないことが挙げられる）。言語は FVTX 読み出し回路に共通の VHDL である。

トリガー判断の基礎となる Wedge 単位のヒット数のカウントをする機構は、FVTX 開発グループの Aaron Key 氏によって開発された。Dual Port RAM を基礎とするトリガーロジックで、ヒット数カウンタと外部入力されたヒット数の閾値との比較によりトリガー発行の有無を判断する。IR 内に設置された Wedge のヒット情報がラックルーム内の FEM に到達するまでは伝送時間がかかるため、ヒットの到達を待つためのディレイ値が設けられている。筆者は Wedge トリガーから下流、最終的なトリガー判断機構に至るまでの全ての FPGA ブロックを開発した。図 3.13 に FEM に実装したトリガーブロックの概念図を示す。まず Wedge トリガーの情報を元に、同列内の 4 層の内発行された Wedge トリガーの数を数え、外部入力された閾値と比べてトリガー発行を判断する。次に、隣接した列のトリガー信号との論理和を取る。これらは FEM データ処理用 FPGA 内のトリガーブロックとして追加した。尚、各 Wedge からのヒット情報はファイバーケーブルを通して並列に FEM へと伝送されるため、トリガーカウンタは信号をシリアルに処理する必要が無く、1 クロックでの処理が可能である。図 3.14 は実際のソースコードの一部である。

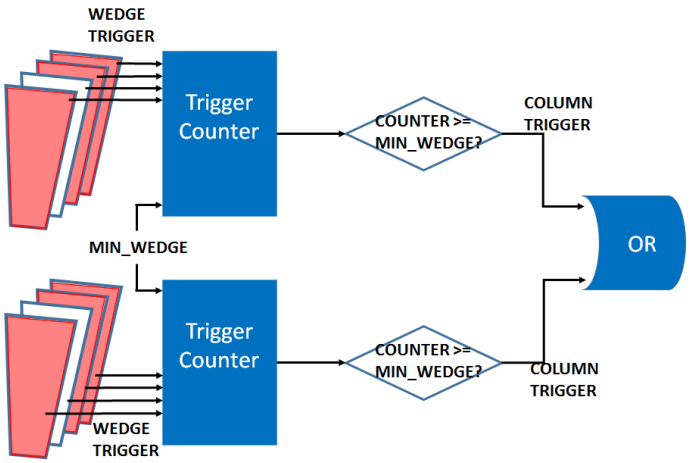


図 3.13: FEM トリガー概念図. 各 Wedge からのトリガー信号を元に同列内でのトリガー判断をし、二列分の論理和を FEM トリガーとして発行する.

```
process(BCO_CLK,RST)
begin
   if RST = '1' then
      COUNTER_0 <= (others => '0');
      COUNTER_1 <= (others => '0');
   elsif rising_edge(BCO_CLK) then
      COUNTER_0 <= ("00"&TRIG_OUT_0(0)) + ("00"&TRIG_OUT_0(1)) + ("00"&TRIG_OUT_1(0)) + ("00"&TRIG_OUT_1(1)); --top fiber
      COUNTER_1 <= ("00"&TRIG_OUT_3(0)) + ("00"&TRIG_OUT_3(1)) + ("00"&TRIG_OUT_2(0)) + ("00"&TRIG_OUT_2(1)); --bottom fiber
   end if;
end process;

COLUMN_TRIG_0 <= '1' when COUNTER_0 >= MIN_WEDGE else '0';
COLUMN_TRIG_1 <= '1' when COUNTER_1 >= MIN_WEDGE else '0';

process(BCO_CLK,RST)
begin
   if RST = '1' then
      FEM_TRIG <= '0';
   elsif rising_edge(BCO_CLK) then
      if SECTOR_MODE = '1' then
         FEM_TRIG <= COLUMN_TRIG_0 and COLUMN_TRIG_1;
      else
         FEM_TRIG <= COLUMN_TRIG_0 or COLUMN_TRIG_1;
      end if;
   end if;
end process;
```

Trigger Counter

AND/OR

図 3.14: FEM トリガーコード（fem_trigger.vhd）

次に、各 FEM が発行したトリガーを数え、最終的なトリガー判断をする FEM-IB トリガーを開発した。FEM トリガーロジックと同様パラレルに入力されるトリガー信号を数え、閾値と比較することでトリガー判断をする。図 3.15 と図 3.16 に概念図とソースコードの一部を示す。東西 FEM-IB の論理積は西 FEM-IB の FPGA 内で取られ、最終的な FVTX トリガーとして発行される。ここで、一方の FEM-IB へと送るトリガー信号と、最終的な FVTX トリガーとしてのトリガー信号は別のテストピンから出力している。そのため、FEM-IB ではケーブルが繋がっておらず回路がオープンになっているピンがある。ピンマップについては後節図 3.20 を参照のこと。尚、テストピンの使い方に違いはあるが東西 FEM-IB で FPGA コードの違いは無い。

各段階におけるトリガー機構から分かる通り、FVTX 高多重度トリガーには Wedge あたりのヒット数、ヒットを検出した FEM の数など、複数のトリガー閾値が存在する。後述するように、これらは PHENIX データベースを介して外部から閾値が入力される。

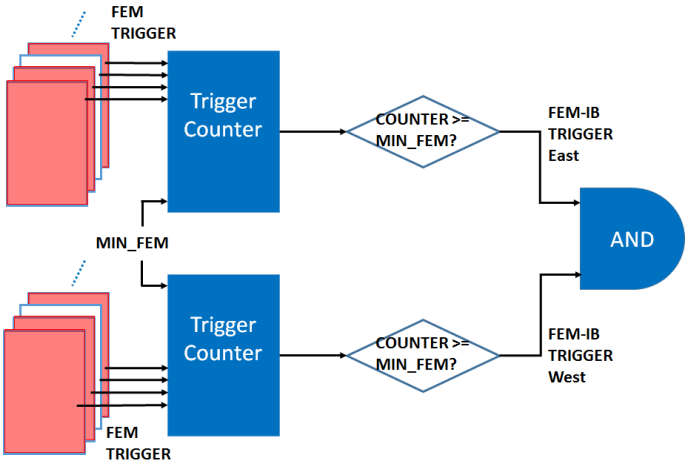


図 3.15: FEM-IB トリガー概念図. 各 FEM からのトリガー信号を元に半アーム内でのトリガー判断をし、FEM-IB トリガーとして発行する. 東西 FEM-IB の論理積は西 FEM-IB で取られ、最終的な FVTX トリガー信号として GL1 へと送られる.

```
process(CLK,RST)
begin
   if(RST = '1') then
      COUNTER <= (others => '0');
   elsif rising_edge(CLK) then
      COUNTER <= ("000"&FEM_TRIG(0)) + ("000"&FEM_TRIG(1)) + ("000"&FEM_TRIG(2)) +
                 ("000"&FEM_TRIG(3)) + ("000"&FEM_TRIG(4)) + ("000"&FEM_TRIG(5)) +
                 ("000"&FEM_TRIG(6)) + ("000"&FEM_TRIG(7)) + ("000"&FEM_TRIG(8)) +
                 ("000"&FEM_TRIG(9)) + ("000"&FEM_TRIG(10)) + ("000"&FEM_TRIG(11));
   end if;
end process;
```

Trigger Counter

```
FEMIB_TRIG_ARM <= (FEMIB_TRIG_BUF and TRIG_EXT_BUF) when SECTOR_MODE = '1'
                  else (FEMIB_TRIG_BUF or TRIG_EXT_BUF);
```

AND/OR

図 3.16: FEM-IB トリガーコード（fem_ib_trigger.vhd）

3.6 トリガー発行のタイミング

PHENIX では種々のトリガーが稼働しており、各サブシステムからの複数のトリガー信号を元に最終的にデータ収集するか否かを判断する統合的なトリガーシステムを採用している。FVTX 高多重度トリガーも例外ではなく、このタイミングに揃えた信号出力が求められる。図 3.17 はトリガー発行までのタイミングチャートである。PHENIX 統括トリガーモジュール GL1 への入力タイミングは衝突事象から 20BCO = ∼2μsec に揃える必要がある。

図 3.18 は FPHX から FEM までの信号処理にどれほどの時間がかかるかを測定した結果である。測定は理化学研究所のトリガー開発テストベンチにおいて行った。測定時、FEM の FPGA ロジックにはトリガー生成には必要の無いロジックとセンサー部からのヒット情報の取りこぼしを防ぐためのディレイが加えられていた。この測定から、FPHX-FEM 間の正味の信号処理時間は 0.5μsec 程度であることが分かり、新たにトリガーを実装する際の信号処理と信号伝達に使える時間は 1.1μsec 程度であることが分かった。前述のトリガーロジックは処理に必要とするクロック数で処理にかかる時間が予想できる。この測定により、FVTX の読み出し回路が GL1 モジュールへの信号伝送時間を加味した上でトリガーとして機能するために十分に早い処理機能を有していることが分かった。

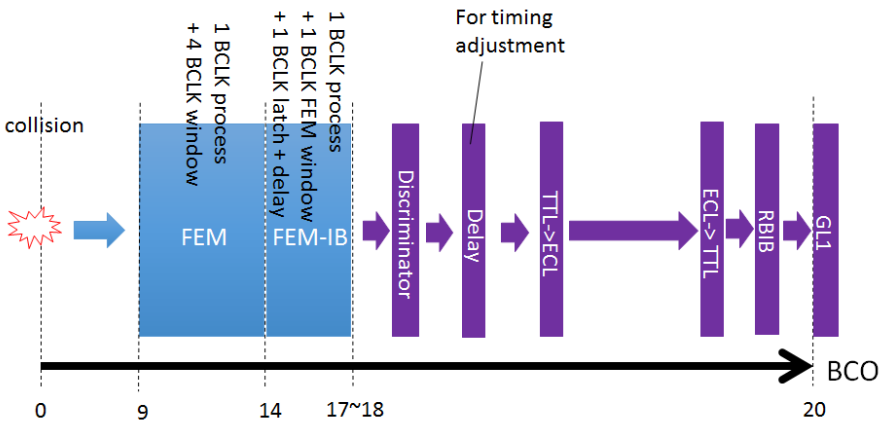


図 3.17: FVTX トリガータイミング図

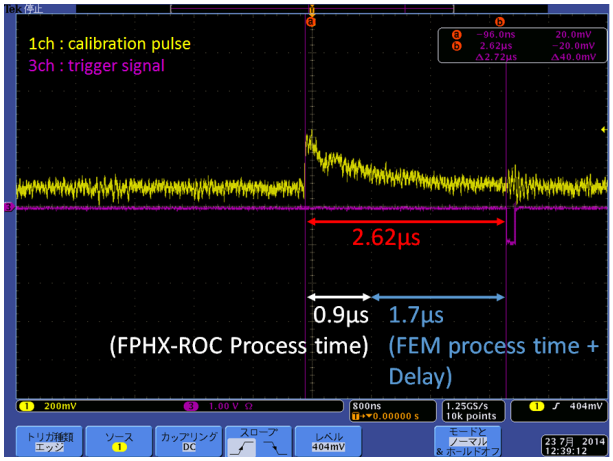


図 3.18: FVTX 読み出し回路処理時間測定

3.7 PHENIX 実機へのトリガー回路の導入とコミッショニング期間の測定

既存の FVTX 読み出し回路はトリガー機構を備えることは想定されておらず、図 3.9 に示したような FEM と FEM-IB を繋ぐ信号線は存在しない。そこで、各ボード側面に取り付けられたテストピンを利用する。テストピンは本来エレクトロニクス開発時のデバッグに用いられるが、実験稼働中は使用しない。このテストピンをトリガー信号入出力の為の信号経路として使うことで、トリガー生成のための専用集積回路の導入など、大規模な装置開発を必要とすることなくトリガー生成を実現した。トリガー導入のために新たに追加したハードウエアは FVTX エレクトロニクス間のケーブルおよび GL1 への転送ケーブルのみである。図 3.19 は FEM テストピン用トリガーケーブルである。FEM には 4 本の GND 線を含め 14 本のテストピンがある。この内ひとつのピンをトリガー信号の伝送経路として用いる。

図 3.20 は FEM-IB テストピン用トリガーケーブルである。FEM には 4 本の GND 線を含め 20 本のテストピンがある。この内 12 本を FEM トリガー信号用の入力信号線として用いる。残りのピンの内、East FEM-IB では West FEM-IB に信号発行するための出力線として、West FEM-IB では

GND	GND
GND	GND
X	X
X	X
X	X
X	X
FEM Trig	X

FEM TEST pin

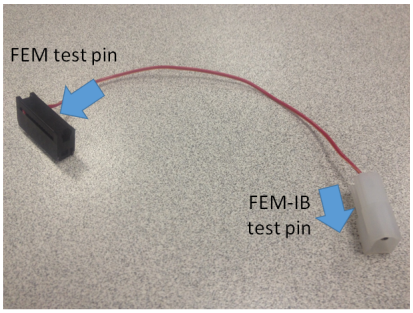


図 3.19: FEM テストピン用トリガーケーブルの写真（右）とピンマップ（左）

East FEM-IB からの入力線と GL1 への出力線として用いる。尚、FEM-IB トリガー用の FPGA コードは West と East で共通である。図 3.20 には FPGA 内のピンマップを併記した。図中の各 FEM の色はケーブルの色に対応している。

GND	X	X	FEM11	FEM10	FEM9	FEM8	FEM7	FEM6	GND
GND	To *FEMIB*[1)]	X	FEM5	FEM4	FEM3	FEM2	FEM1	FEM0	GND

FEMIB East TEST pin　　1) Trigger to West FEMIB

GND	To GL1[3)]	X	FEM11	FEM10	FEM9	FEM8	FEM7	FEM6	GND
GND	X	From *FEMIB*[2)]	FEM5	FEM4	FEM3	FEM2	FEM1	FEM0	GND

FEMIB West TEST pin　　2) Trigger from East FEMIB
3) Trigger to GL1

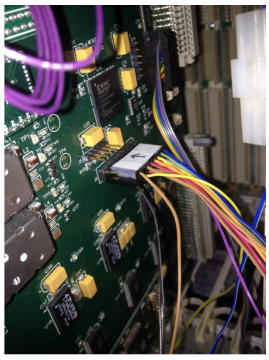


図 3.20: FEM-IB テストピン用トリガーケーブルの写真（右）とピンマップ（左）

図 3.21 は FEM と FEM-IB を繋ぐ信号線と、実際に装着された FEM の写真である。ケーブルは FEM のフロントパネルを通してボード側面のテストピンに装着されている。

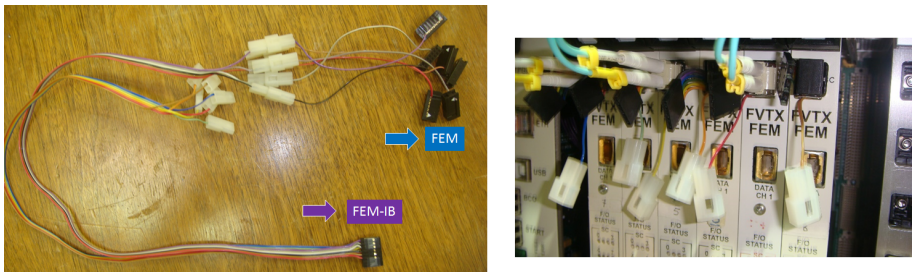


図 3.21: FEM と FEM-IB を繋ぐトリガー用シリアルラインケーブル

図 3.22 は FEM-IB テストピンからのトリガー発行ケーブルである。このケーブルが最終的な GL1 への FVTX トリガー発行ケーブルとなる。GL1 用のボードと FVTX の FEM-IB はラックルーム内で約 20m ほどの距離があるため、信号減衰およびノイズ対策が必要になる。そこで、TTL 規格の FEM-IB トリガー信号を ECL 規格に変換し、ツイストケーブルで信号伝送することにした。FEM-IB

トリガー発行後の信号経路の概念図は 3.17 に示す通りである。

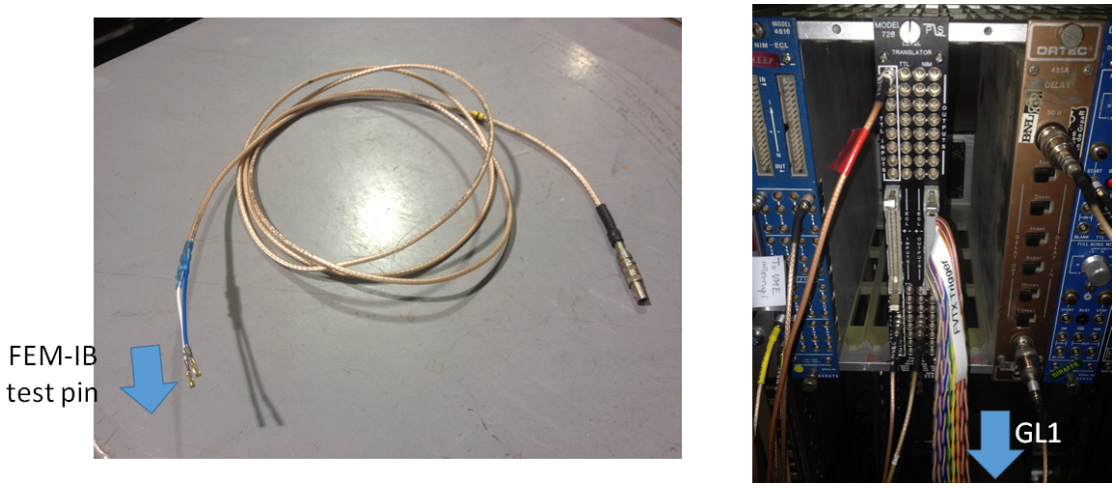
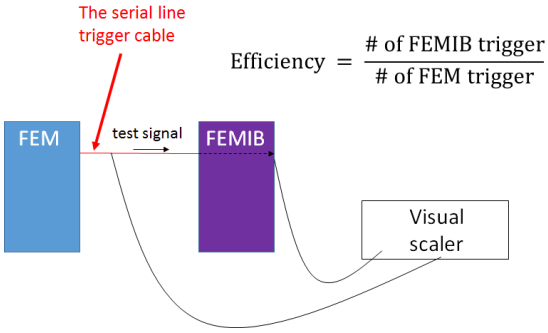


図 3.22: FEM-IB トリガー発行用ケーブル

信号線の細い FEM FEM-IB 間トリガーケーブルはテストベンチにて、高レートのパルスを用いて伝達テストを行った。測定方法を図 3.23 に示す。測定用のテスト信号は FEMFPGA 上で生成し、FEM および FEM-IB のテストピンを信号の入出力経路として、前述のトリガーケーブルを信号線として用いた。この測定により、トリガー信号として発行し得るレートとしては最も高い 4.7MHz の環境下でもトリガー信号の数え落としが無いことを確認した。



$$\text{Efficiency} = \frac{\text{\# of FEMIB trigger}}{\text{\# of FEM trigger}}$$

Signal rate	#FEM-IB trigger / #FEM trigger
3kHz	100%
300kHz	100%
4.7MHz(BCO/2)	100%

図 3.23: FEM FEM-IB 間トリガーケーブルの信号伝達テスト. テスト用の信号は FEM の FPGA で生成し、FEM および FEM-IB のテストピンを信号経路として用いた. 高レート下でも信号の数え落としは無い.

以下に、FVTX トリガーシステムが FPGA 内に備えるトリガーパラメータを列記する。

- FEM delay
- hits/Wedge threshold
- Active Wedge/Column threshold
- Sector AND/OR logic
- Active Sector/half arm threshold
- FEM-IB delay
- West/East AND/OR logic

これらは全て PHENIX データベースを介して制御される。図 3.24 に示す通り、FVTX Expert GUI でマニュアルでも変更可能である。実験稼働中はランごとにトリガーパラメタを入力するのが困難であるため、DAQ 開始時のスクリプトに PHENIX データベースにアクセスするプロセスを組み込み、自動的にトリガーパラメータが GTM を経由して入力される。

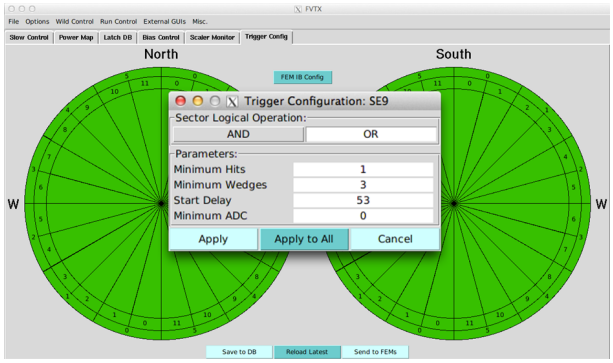


図 3.24: FVTX Expert GUI に組み込まれたトリガーパラメータコントロール用の画面.

トリガー用ケーブルや FPGA 導入後、本実験のための稼働に向け種々の測定を行った。図 3.25 はトリガー閾値を変えながらトリガーレートを調べた際の測定結果である。前述の通り、FVTX 高多重度トリガーには Wedge あたりのヒット数、検出信号があったステーション数、片アームあたりの飛跡信号の数など、複数の変更可能な閾値が備わっている。各々についてスレッショルドスキャンを行い、閾値を高くするとトリガーレートが低くなることを確認した。この結果はトリガー用 FPGA やケーブル類が PHENIX 実機でデザイン通り動作したことを示す初の測定である。

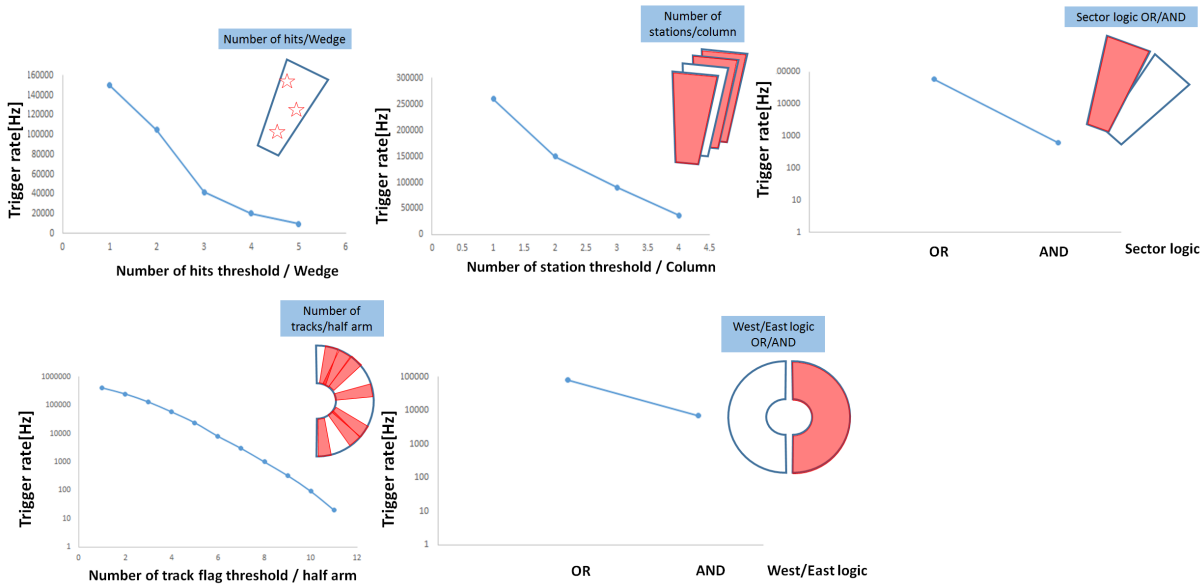


図 3.25: 各トリガー閾値におけるトリガーレートの変化

次に、PHENIX 統括トリガー GL1 にタイミングを合わせるため、既存トリガーである MPC トリガーとの相関を確認した。図 3.26 は PHENIX カウンティングルームで測定を行った際のオシロスコープのスナップショットである。これは FVTX トリガーが衝突事象に感度を持つことの確認に成

功した初の測定であった。また、この測定を後述するエミュレータを用いた厳密なタイミング調整の指針とした。

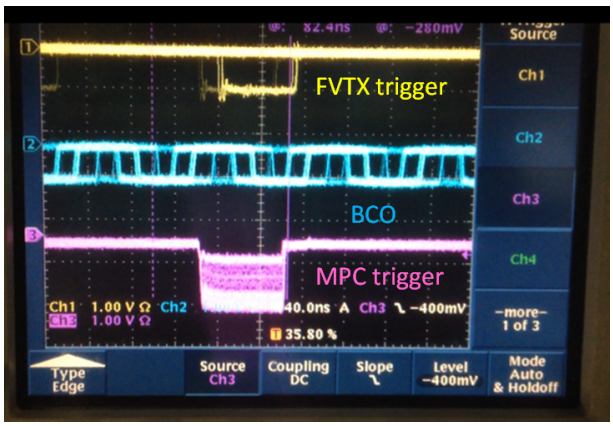


図 3.26: MPC トリガーに対する FVTX トリガーの coincidence

GL1 とのタイミング調整の際、トリガー信号が発行されているにも関わらず GL1 側の Scaler で認識されないことがあった。そこで、ディレイ値を BCO よりも更に細かい単位でスキャンしたところ、図 3.27 のような結果が得られた。横軸はトリガー信号に加えたディレイ値で、FEM FPGA 内での BCO 単位のディレイに加え、ケーブルディレイを用いて測定を行った。縦軸は、FVTX トリガー回路が発行しているトリガーレートに対する、GL1 が認識したトリガーレートの比である。この測定により、GL1 がトリガー信号を認識しないタイミングがあることが分かった。この測定を元に GL1 が確実に認識するタイミングでトリガーが発行されるようケーブルディレイを調節し、その後 BCO 単位でのタイミング調整を行った。

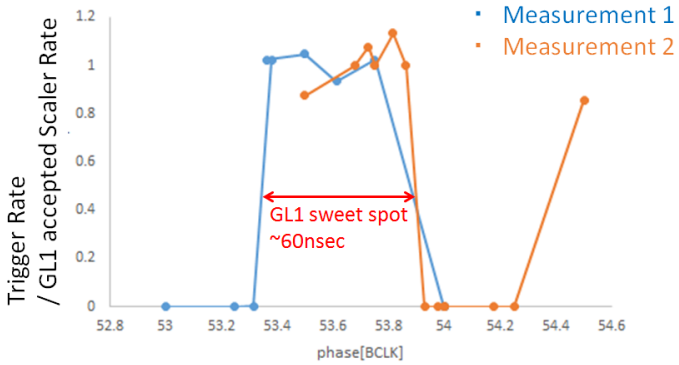


図 3.27: 発行トリガーレートと GL1 が認識したトリガーレートの比. タイミングによっては GL1 が認識しないタイミングがある.

FVTX トリガーシステムには制御可能なディレイ値が複数あり、FEM FPGA、FEM-IB FPGA およびケーブルディレイを調整することができる。この内、FEM FPGA のディレイ値にはトリガーが動作するための下限値がある。FEM に加えられたディレイ値は発行のタイミング調整の他に、IR に設置された Wedge が検出したヒット情報がラックルーム内の FEM へと到達するまでの待機時間を決める大きな役割がある。従って、このディレイ値が小さすぎるとヒット情報が到達する以前にトリガーロジックが働くことになり、閾値が 0 ヒットでない限りはトリガー信号が発行されなくなる。

図 3.28 は FEM FPGA 内のディレイ値を変化させていったときのトリガーレートの変化である。測定時はトリガー閾値は変更していない。この測定から分かる通り、ディレイ値が小さくなるとトリガーが発行されなくなるポイントがあるため、タイミング調整の際 FEM のディレイ値はヒット情報の到達を待つのに十分大きな値を採用することにした。

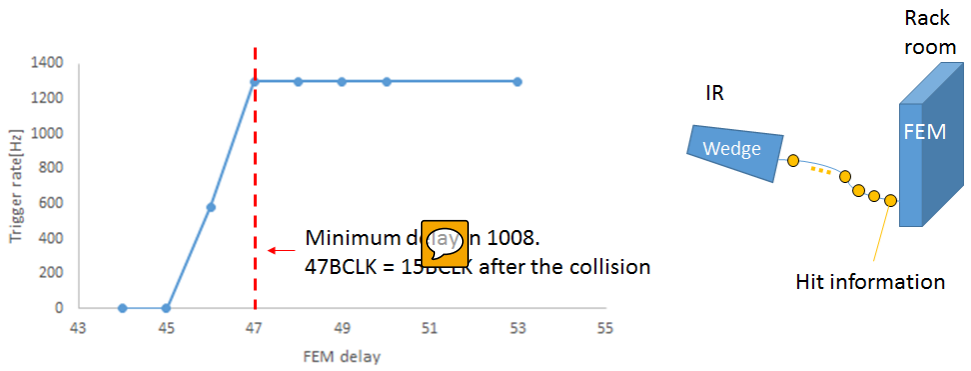


図 3.28: FEM FPGA 内のディレイ値とトリガーレートの関係. ディレイ値が小さすぎるとトリガー信号が発行されなくなる.

3.8 エミュレータを用いたトリガー効率の評価

トリガーシステムがデザイン通り動作しているかどうか確認するため、トリガーエミュレータを用いたトリガー効率の評価を行った。エミュレータはヒット情報を元にヒットが検出された Wedge、FEM の情報を再構成し、擬似的なトリガーロジックを通すことでオフラインでトリガーの振る舞いを予想することができる。図 3.29 にエミュレータの概念図を示す。エミュレータの予測はオンライントリガーとは独立に行われるため、トリガー効率の評価に有効である。

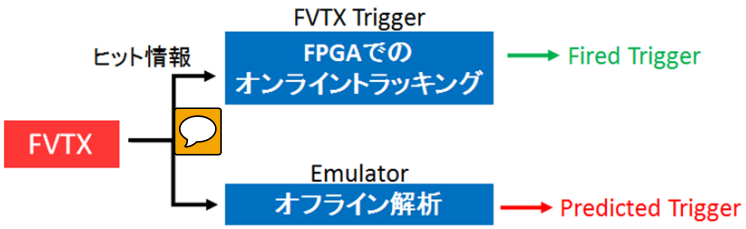


図 3.29: トリガーエミュレータの概念図. エミュレータの予測との整合性から、トリガー回路がどれほどデザイン通りに動作しているかを評価することができる.

図は 3.30 はエミュレータを用いたタイミング調整の結果である。横軸は FEM トリガーロジックに加えるディレイ値、縦軸はエミュレータが予測したトリガーの数と実際に鳴ったトリガーの数の比である。エミュレータはオフラインでのヒット情報を元にトリガーが鳴るイベントを予測するため、トリガータイミングが合っているディレイ値のみで明らかに 0 でない比が観測される。尚、トリガー効率が 1 にならないのは、測定時はトリガーコミッショニング期間中であり、トリガーシステムは FVTX の一部のみを用いて稼働していたためである。この測定により、開発したトリガーが GL1 の

仕様に応じたタイミング、予測したイベントに対してデザイン通りトリガー信号を発行していることが確認できた。

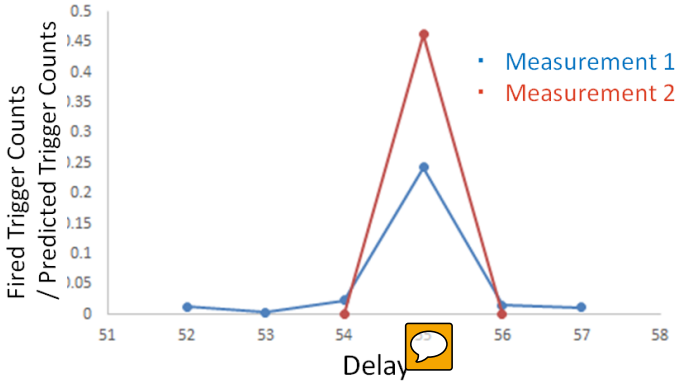


図 3.30: エミュレータを用いたタイミング調整. エミュレータの予測するトリガーと実際に鳴ったトリガーとの比を FEM FPGA 内のディレイ値を変えながら測定した.

図 3.31 左は FVTX で観測されたトラック数分布を外部トリガーによるイベント（青）、エミュレータが予測したイベント（赤）、実際に FVTX トリガーが収集したイベント（緑）それぞれについてプロットしたものである。低多重度イベントで効率的に棄却できていると共に、高多重度イベントでトリガー効率が上がる様子が確認できる。この結果からエミュレータの予想と実際のパフォーマンスが一致していることが分かり、開発したトリガー回路が PHENIX の実際のセットアップでデザイン通りに機能していることを確認した。図 3.31 右は外部トリガーと FVTX トリガーとの比を FVTX のトラック数の関数としてプロットしたものである。トラック数が高くなるにつれて有意な立ち上がりが見られ、確かに高多重度トリガーとして機能していることが分かる。

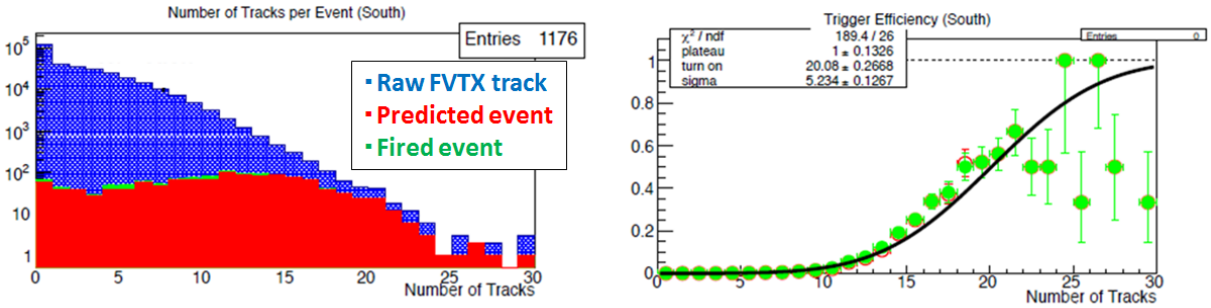


図 3.31: エミュレータを用いたトリガー効率の評価. 左：最小バイアストリガー（青）、エミュレータが予測するトリガー（赤）、実際に鳴ったトリガー（緑）で比較した FVTX トラック数分布. エミュレータの予測と実際に鳴ったトリガーがほぼ一致し、デザイン通り動作したことを示す. 右：最小バイアストリガーに対する比. 低多重度イベントが効率的に棄却されていると共に、高多重度イベントで有意な立ち上がりが見られる.

第4章　Run15におけるトリガー性能の評価

本章ではFVTX高多重度トリガー稼働初年度となったRun15で取得したデータを用いて、トリガーシステムの性能を評価する。

4.1　Run15における稼働

本トリガーシステムは2015年3月より稼働を開始し、PHENIX実験Run15で行われた陽子+陽子、陽子+金原子核、陽子+アルミニウム原子核全ての衝突実験で物理データを取得した。尚、陽子+陽子では南北それぞれのトリガー信号の論理積および論理和で、陽子+原子核衝突では南北独立にトリガーを生成し、それぞれ異なる閾値の元稼働した。本トリガーにより収集されたイベント数は陽子+陽子で500M、陽子+金原子核で300M、陽子+アルミニウム原子核で180Mイベントを達成し、陽子+陽子衝突系における方位角異方性の検証に最低限必要と予想されていた80Mイベントを大幅に上回るイベントの収集に成功した。図4.1にラン番号とFVTXトリガーによる取得イベント数を示す。

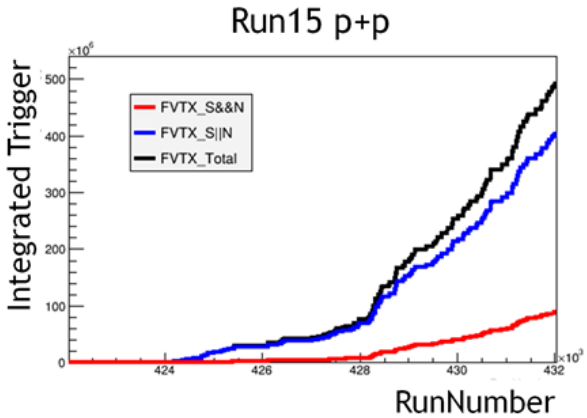


図4.1: FVTXトリガーで取得されたイベント数の推移

Run15ではFVTX検出器の一部分が機能しなくなることがあった。この問題は、FVTXのヒット情報を元にトリガー信号を生成するFVTX高多重度トリガーシステムへの影響も懸念され、Drop Off問題として調査を行った。Drop Off問題については藤山直樹氏、益田英知氏の卒業論文（参考文献[9]）に詳しく記載されている。

4.2　システムの安定性の評価

トリガー安定性の評価として、FVTXで検出されたトラック数の平均値を各ラン番号ごとに調べた。トリガーが安定して稼働していた場合、理想的にはラン番号によらず一定値になる。尚、FVTX

トリガーは FVTX のヒット信号を元にトリガー信号を発行するため、、FVTX 検出器そのものの安定性にも左右される。ここでは FVTX トリガーの安定性を評価するために、FVTX 検出器の安定性による影響を差し引く方法として、最小バイアストリガーでの解析結果をもとにあらかじめ FVTX の安定性を評価し、安定性が確保されているラン番号を用いてトリガーの安定性を評価した。図 4.2 は陽子+陽子衝突における安定性の評価である。赤点と青点でプロットした FVTX トリガーのデータセットでは、黒点でプロットした最小バイアストリガーに比べ平均トラック数が大きい。これは後述する通り、FVTX トリガーが高多重度イベントに感度を持つことを示す結果のひとつである。一方、最小バイアストリガーと FVTX トリガーの安定性を比べると FVTX トリガーでは平均トラック数が上下するような振る舞いが見られる。特に番号が若いランではトリガー稼働前の試験運用期間であったため、平均トラック数は安定しない。また後半のランではトリガー閾値の変更による影響で数トラック上下する傾向が見られる。これらの影響はいずれも原因が分かっており、解析のためのデータとしては問題なく利用することができる。

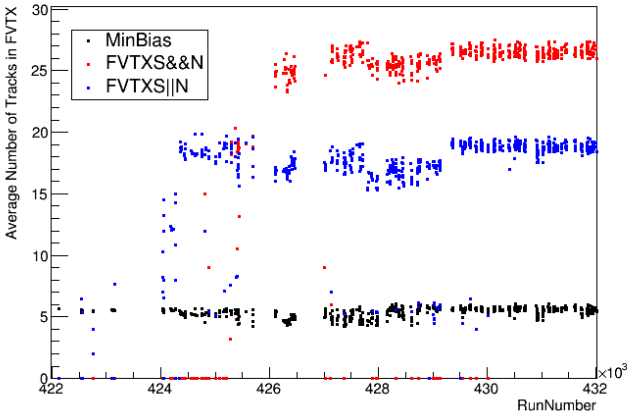


図 4.2: 各ラン番号での FVTX 平均トラック数

4.3 飛跡数分布の比較

図 4.3 は陽子+陽子衝突実験において、FVTX でオフラインで再構成されたトラック数分布の各トリガー間の比較である。ここで、最小バイアストリガーは BBC、BBC novtx、BBC narrow の三種類のトリガーの集合である。FVTX トリガーは南北論理積トリガー、論理和トリガー共に最小バイアストリガーよりも高多重度イベントの収集に成功していることが確認できる。これは PHENIX では初の陽子+陽子衝突における高多重度トリガーが機能したことを示す結果である。

4.4 FVTX トラッククオリティカット

FVTX は位置分解能が良く、検出されたトラックに対し更にそのクオリティを要求することができる。この要求により、衝突事象由来でないような物理的に意味がないと思われるトラックを排除することができる。本研究で使用したクオリティカットを列記する。

- トラック再構成に使われたヒット数：ヒット数の少ないトラックは再構成時の自由度が高く、偶然の同時ヒットによる誤認識のトラックを含む可能性が高い。

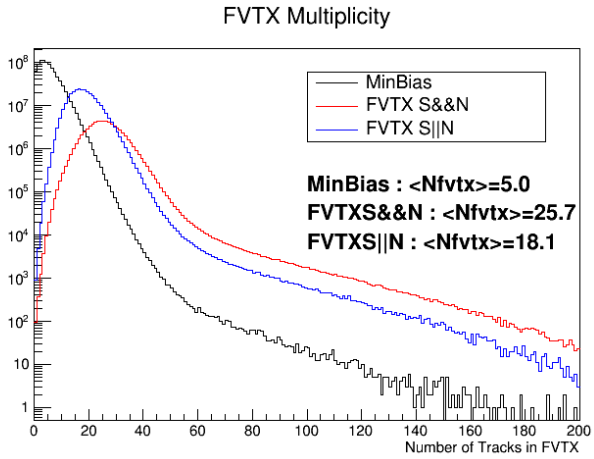


図 4.3: FVTX トラック数分布の比較

- トラックとヒット位置との χ^2/NDF：トラック再構成時、ヒット位置と飛跡とが一致するほど信頼度が高い。
- ラピディティ領域：FVTX が覆う検出領域外からのトラックは衝突由来でない可能性が高い。
- DCA：衝突点と飛跡との距離が遠いトラックは衝突由来でない可能性が高い。

これらのトラックカットを通した後、改めて飛跡数分布を各トリガーで比較した。図 4.4 左に示した通り、クオリティ要求によりトラックを排除した後であっても FVTX トリガーは高多重度イベント収集に利点があり、最小バイアストリガーに比べ 100 倍程度の統計量を達成したことが分かった。図 4.4 右には FVTX トリガーの統計と最小バイアストリガーの統計との比を各トラック数ごとにプロットした。

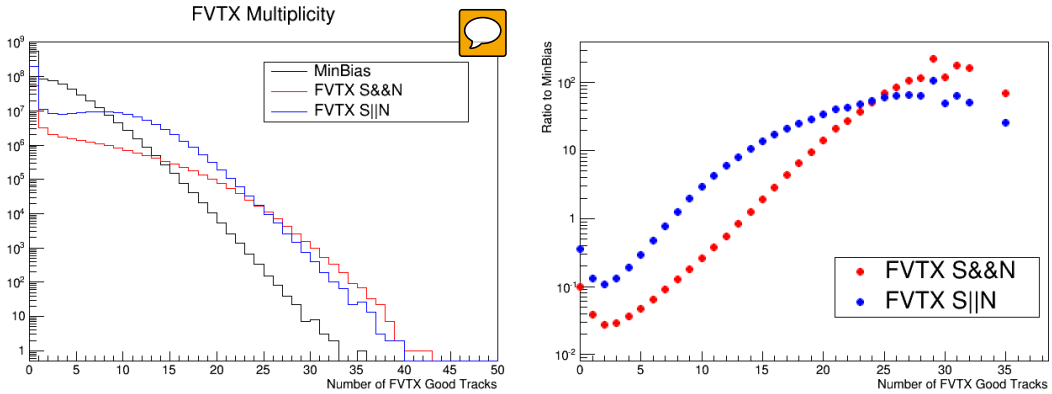


図 4.4: クオリティカット後の FVTX トラック数分布の比較（左）と、最小バイアストリガーとの比（右）

4.5 最小バイアストリガーと FVTX トリガーの比較

図 4.5 左は上記のトラックカット前後のトラック数の相関を調べたものである。尚、本解析は最小バイアストリガーを用いて行った。この解析から、FVTX で検出されるトラックの内クオリティカッ

ト後に残る割合は 10%程度であることが分かった。更に、同様の解析を FVTX トリガーを用いておこなった。結果を図 4.5 右に示す。高多重度イベントの統計が最小バイアストリガーに比べ多いことに加え、低多重度イベントでは図 4.5 左とは異なる相関が見えている。

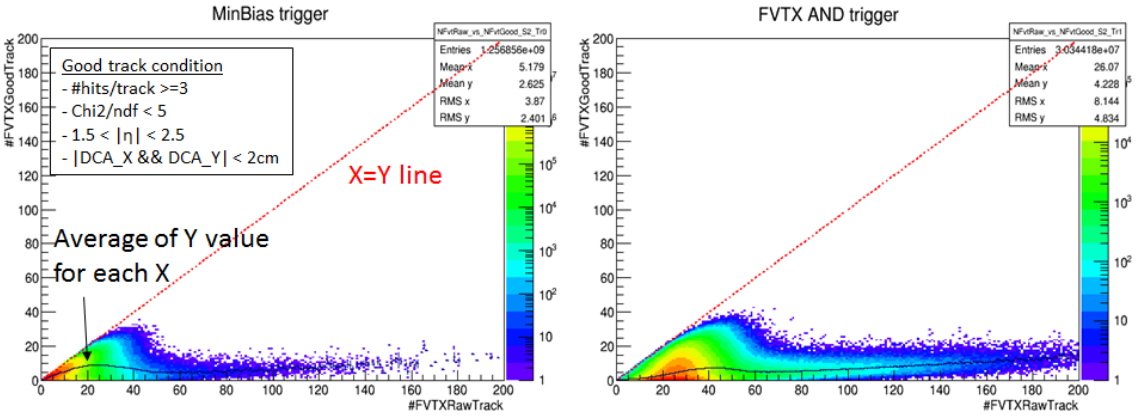


図 4.5: FVTX トラック数のクオリティカット前後の相関

この結果を踏まえ、最小バイアストリガーと FVTX トリガーを比較した。図 4.6 はクオリティカット前後のトラック数の比を、カット前のトラック数の関数としてプロットしたものである。青点で示した最小バイアストリガーと赤点で示した FVTX トリガーは共に 60 トラック付近で約 10%の一定値を取るようになる。これは、高多重度イベントでは両トリガーによる FVTX のトラッククオリティが同等であることを示している。一方、低多重度イベントでは FVTX トリガーは最小バイアストリガーに比べクオリティの低いトラックに感度を持つ傾向が見られる。

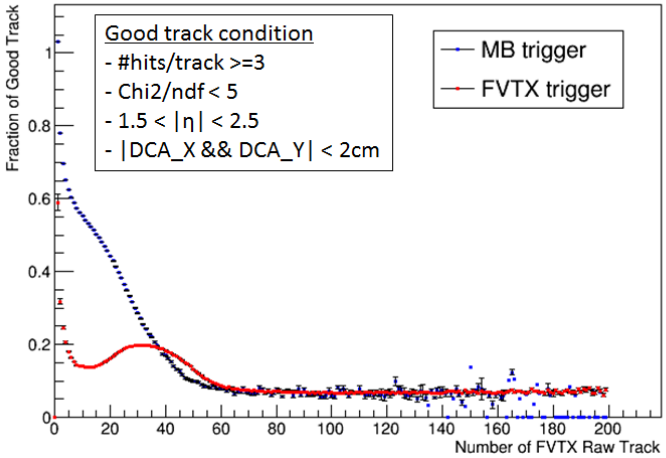


図 4.6: クオリティカット前後のトラック数比の比較

この振る舞いを詳細に理解するため、前述の各クオリティ要求によってどれほどトラックが排除されるか、多重度ごとに分けて定量的に評価した。図 4.7 はクオリティカット後に残るトラック数の割合をプロットしたもので、右に進むに連れてクオリティ要求が追加される（カット条件がきつくなる）。図 4.7 右に示す通り、高多重度イベントではトリガー間に大きな違いは見られない。すなわち、同等のトラッククオリティが確保されていると言える。一方、図 4.7 左の低多重度イベントでは

検出領域および DCA のカットが FVTX トリガーサンプルに対してより多くのトラックを排除している。これらのカットは主に幾何学的に決まる FVTX が検出し得る領域外のトラックを排除するものである。

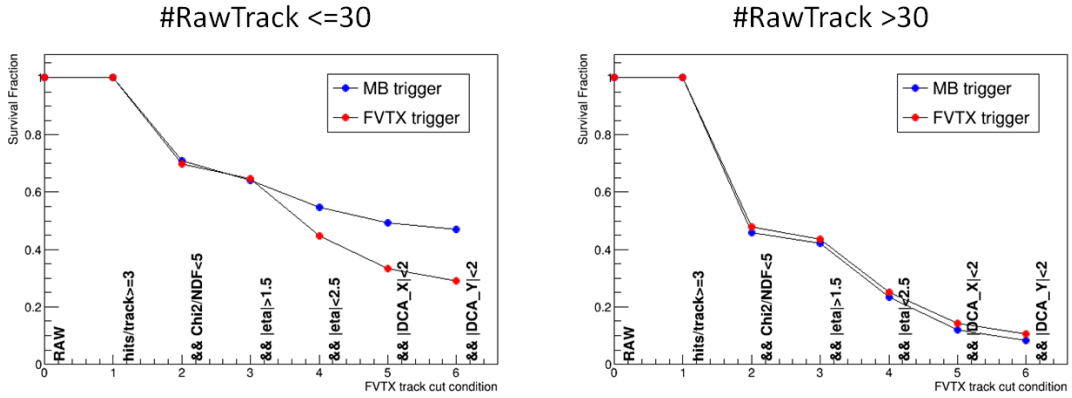


図 4.7: 各クオリティ要求により排除されるトラックの割合

次に、衝突の位置とトラックの擬ラピディティとの相関を調べた。衝突事象由来のトラックであれば FVTX の幾何学的な領域から擬ラピディティが限定されるため、この解析により直接的に unphysical な領域からのトラックがどれほどあるかを調べることができる。図 4.8 に示す通り、特に低多重度イベントについて FVTX トリガーは最小バイアストリガーに比べて unphysical な領域からのトラックに感度があることが分かった。

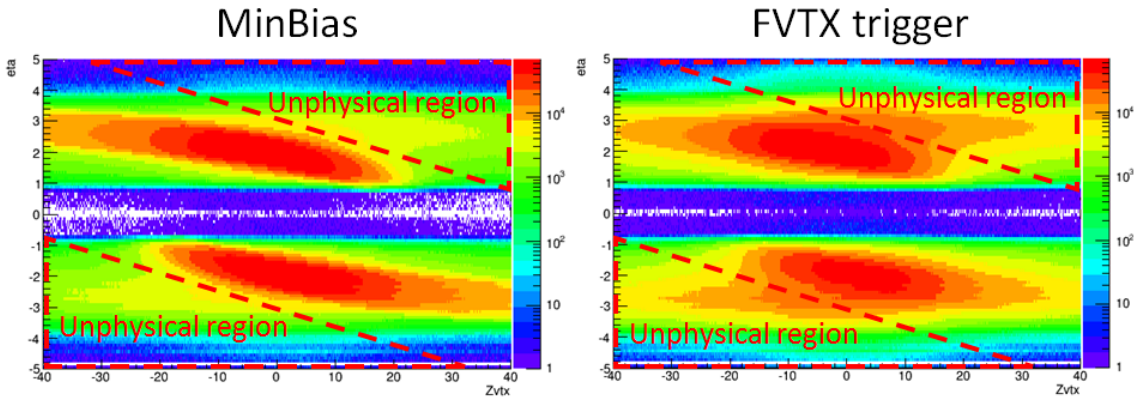


図 4.8: 衝突位置とトラック擬ラピディティの相関.FVTX トリガーは最小バイアストリガーに比べて unphysical な領域からのトラックに感度がある.

4.6 他のサブシステムへの感度

後述する二粒子相関解析では FVTX をトリガーとして、解析では異なるサブシステムを利用する。そこで、本節では解析に用いるセントラルアームおよび BBC への感度を調べた。図 4.9、4.10 に DC、PC で検出した衝突事象あたりのトラック数分布と、BBC で検出した電荷量分布を各トリガーサンプルごとにプロットした。尚、縦軸は全統計量で規格化された値で、このプロットによりトリガー性

能としてのサブシステムへの感度を評価できる。各トリガーの分布を比べると、いずれも最小バイアストリガー（黒）、FVTX 論理和トリガー（青）、FVTX 論理積トリガー（赤）の順で傾きが緩くなる傾向が見られる。これは前節に示した FVTX での飛跡数分布と同様の傾向である。この解析により、セントラルアームや BBC のような FVTX とは検出領域のオーバーラップの無い検出器においても FVTX トリガーは高多重度イベントに感度があることが分かった。高多重度領域において、セントラルアームでは約 10 倍、BBC では約 100 倍の感度がある。

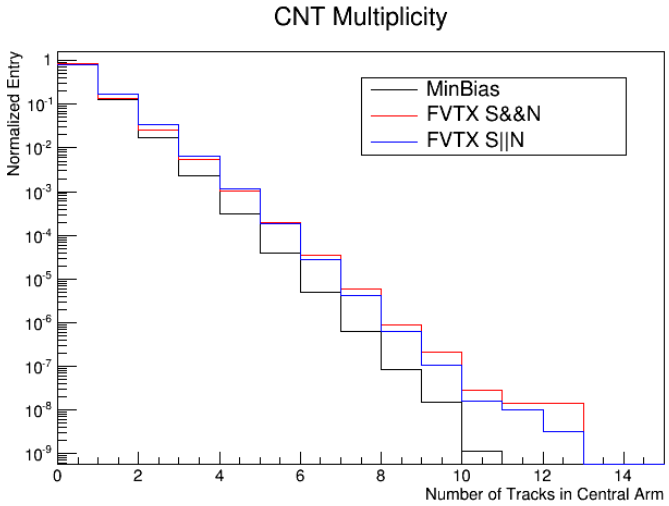


図 4.9: 最小バイアストリガー（黒）、FVTX 南北論理積トリガー（赤）、FVTX 南北論理和トリガー（青）各トリガーサンプルにおける、セントラルアームで検出された飛跡数分布の比較

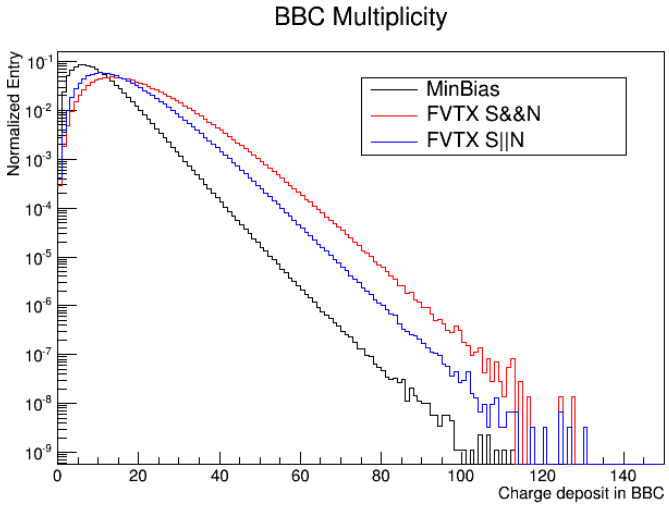


図 4.10: 最小バイアストリガー（黒）、FVTX 南北論理積トリガー（赤）、FVTX 南北論理和トリガー（青）各トリガーサンプルにおける、南北 BBC で検出された電荷量分布の比較

第 5 章　二粒子相関解析

二粒子相関解析は衝突時の生成物質の性質を調べる解析手法のひとつである。特に原子核同士の衝突実験においては、二粒子相関解析により生成粒子の放出方向に楕円型の異方性が観測され、QGP 生成を裏付ける結果のひとつと理解されている。本章では二粒子相関の解析手法について詳述した後、PHENIX 実験 Run15 で行われた陽子+金原子核および陽子+陽子衝突系における解析結果について議論する。

5.1　解析方法

高エネルギー衝突実験では粒子同士の非弾性散乱が起こり、核子を構成するパートンの再結合と崩壊過程を経て大量の粒子が発生する。二粒子相関解析の目的は、これら生成粒子の放出方向の異方性の検証である。まず衝突事象で発生した粒子の中で基準となる粒子を決める。この粒子を Trigger particle と呼び、それ以外の粒子を Associated partice と呼ぶ。次に、全ての Associated particle について Trigger particle との放出方向の角度差を測定する。このとき、二粒子間の差はビーム軸方向の射影である方位角差 $\Delta\phi$ と、ビーム軸に垂直な方向の射影である擬ラピディティ差 $\Delta\eta$ を測定する。図 5.1 に $\Delta\eta, \Delta\phi$ の幾何学的な定義を示す。

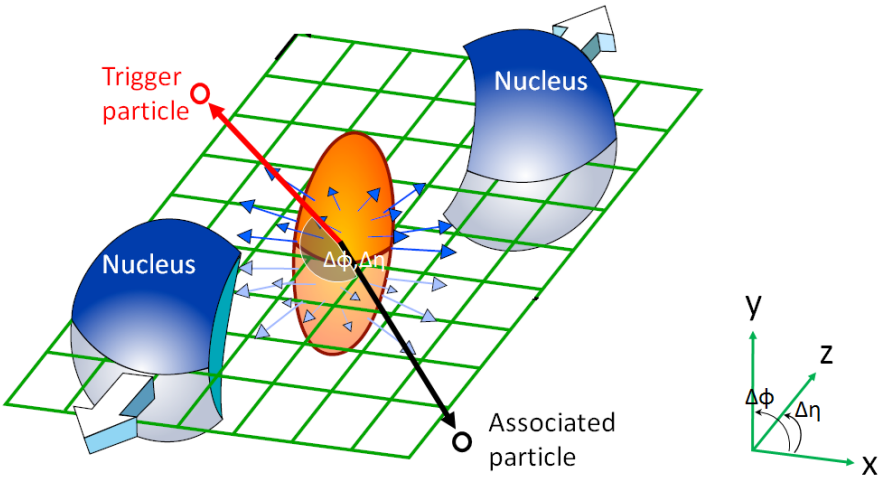


図 5.1: 二粒子相関解析における、擬ラピディティ差 $\Delta\eta$ と方位角差 $\Delta\phi$ の定義

前述した「異方性」とは、特定の方向に生成粒子が検出されやすくなる傾向のことである。例えば楕円型の異方性が見えると言う場合、それは Trigger particle に対して同方向と逆方向に Associated particle が観測されやすい傾向が見えるということである。同様に、三角型、四角型や一方向のみの異方性の成分を二粒子相関解析では定量的に評価することができ、生成物質の形状や性質を明らかにする上で有用である。図 5.2 に角度異方性のイメージを示した。異方性が全く無い場合、それはすなわち特定の方向を持たないということであり、形状は円形になる。

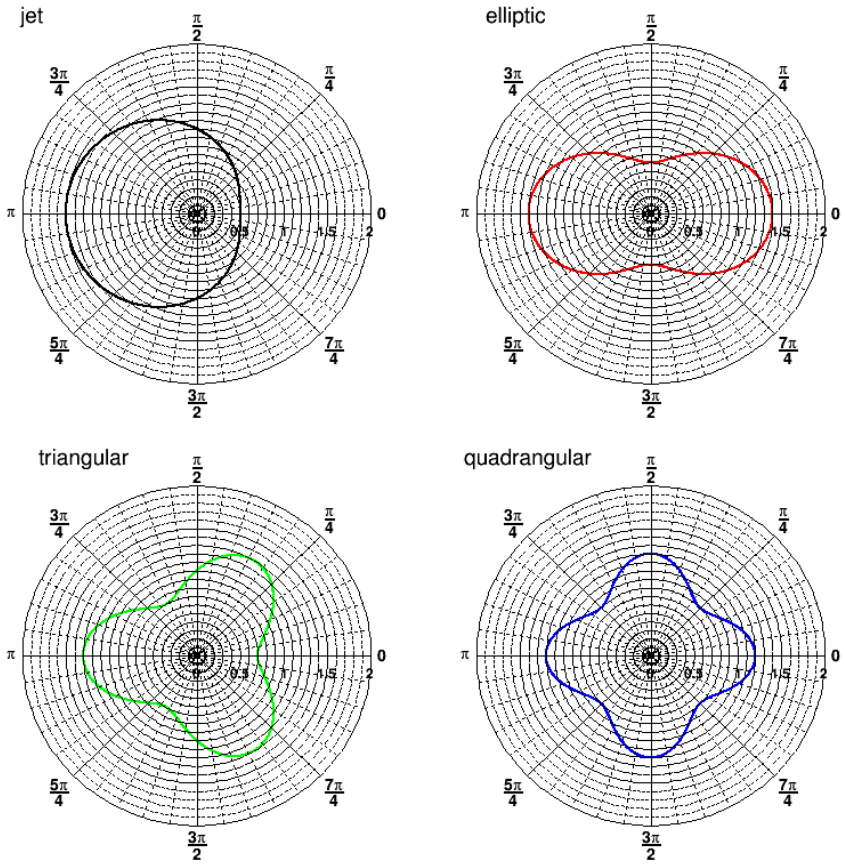


図 5.2: 方位角異方性のイメージ. 異方性が無い場合は円形になる.

例として、PHENIX セントラルアームで観測された粒子群に対して本解析をする場合、$\Delta\eta - \Delta\phi$ の二次元ヒストグラムを作ると図 5.3 左の様な分布になる。$(\Delta\eta, \Delta\phi) = (0, 0)$ にピークが確認でき、すなわち同一方向に放出した粒子ペアの影響が強く見える。これはジェットによる影響で、衝突時の物理的な効果である。しかしながら $\Delta\eta$ 軸方向の射影に着目すると、$\Delta\eta = 0$ をピークに山型の分布が見られる。これはビーム軸に垂直な方向への射影が長方形で、ラピディティに関して対称でないセントラルアームの形状の効果である。また方位角方向には形状が対称であるにも関わらず、各ビンで統計が異なる。これは統計誤差に加え、各チャンネルの検出効率による効果が影響している。この例から分かる通り、二粒子相関解析では検出器の検出領域や検出効率による効果が強く影響する。

そこで、検出器による影響を取り除く手法としてイベントミキシング法を導入する。前述した、1 衝突事象で検出した粒子群から構成する $\Delta\eta - \Delta\phi$ 分布を Real event と呼ぼう。これに対し、Trigger particle をそのままに Associated particle を別の衝突事象から選び出して $\Delta\eta - \Delta\phi$ 分布をつくる。これを Mixed event と呼ぶ。ジェットの放出方向や反応平面の方向といった物理的な効果は各イベントごとにランダムであるから、Mixed event ではどの検出領域で粒子が観測されやすいかという純粋な検出器の効果が表れる。図 5.3 右は Mixed event で構成した $\Delta\eta - \Delta\phi$ 分布である。Real event を Mixed event で補正することにより、検出器による効果を取り除いた方位角異方性の検証が可能となる。イベントミキシングによる補正を加味した異方性検証のため、二粒子相関関数を定義する。

$$CorrelationFunction(\Delta\eta, \Delta\phi) = \frac{N_{real}(\Delta\eta, \Delta\phi)}{N_{mix}(\Delta\eta, \Delta\phi)} \frac{\int\int N_{mix}(\Delta\eta, \Delta\phi) d\Delta\eta d\Delta\phi}{\int\int N_{real}(\Delta\eta, \Delta\phi) d\Delta\eta d\Delta\phi}$$

ここで、$N_{real}(\Delta\eta, \Delta\phi)$、$N_{mix}(\Delta\eta, \Delta\phi)$ はそれぞれ Real event、Mixed event において $\Delta\eta, \Delta\phi$ で

検出された粒子ペアの数である。以下の解析では Real event 後の 3 イベントを使って Mixed event を構成した。

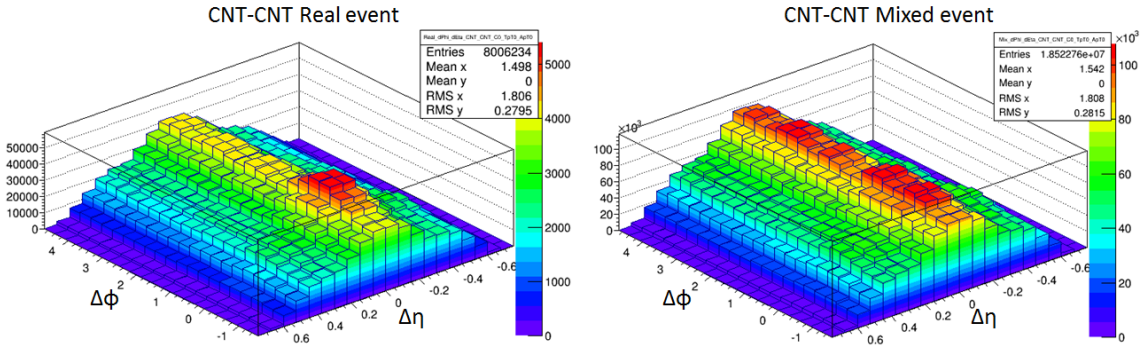


図 5.3: CNT-CNT 相関における $\Delta\eta - \Delta\phi$ 分布

尚、ミキシングに使うイベント数は多いほど純粋な検出器の効果が得られるが、2 イベントで十分に検出器の効果を再現できる。ミキシングするイベント数を変化させて二粒子相関関数の値を調べたところ、イベント数を固定することによる系統誤差は統計誤差に比べ十分に小さい[illegible]が分かった。図 5.4 はミキシングの数を変えたときの楕円型異方性成分 C_2（後述）の値である。

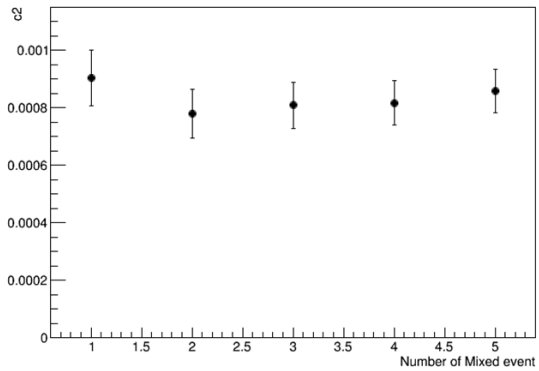


図 5.4: イベントミキシングに使うイベント数を変化させることによる影響. 統計誤差の範囲内で一致しており、ミキシングの数を固定することによる系統誤差は小さいと考えられる.

PHENIX で二粒子相関解析を行う場合、解析に用いる検出器の選び方によって図 2.7 に示した検出領域に応じて検証できる $\Delta\eta, \Delta\phi$ の領域が決まる。前例で示したセントラルアーム内で相関を取る場合、セントラルアームの検出領域は $|\eta| < 0.35$ であるから $0 < \Delta\eta < 0.7$ の領域を検証できる。表 5.1 に、検出器のコンビネーションと検証できる領域を示す。これらの組み合わせの内、擬ラピディティ領域が小さいコンビネーションは Near side ridge の観測には不向きである。擬ラピディティ差が小さい領域の Near side では、$(\Delta\eta, \Delta\phi) = (0, 0)$、すなわち同方向に放出される粒子群の効果が見えることになる。このような領域は 2 ジェットによる影響が支配的で、QGP 生成による楕円型フローの効果を評価することが難しくなるからである。一方、擬ラピディティ差が大きい領域では Away side にはジェットの影響が残るものの、Near side ではジェットによる影響が小さいと考えられる。

表 5.1: 検出器の組み合わせと検証領域

Combination	$\lvert\Delta\eta\rvert$	$\lvert\Delta\phi\rvert$
CNT-CNT	0 - 0.7	0 - 2π
CNT-FVTXN or S	1.15 - 1.85	0 - 2π
CNT-BBCN or S	2.75 - 4.25	0 - 2π
FVTXN-S	3.0 - 5.0	0 - 2π
BBCN-S	6.2 - 7.8	0 - 2π

5.2 陽子+陽子衝突系検証に向けたストラテジー

本研究の最終目標は FVTX 高多重度トリガーを用いた陽子+陽子衝突系における方位角異方性の検証である。これらは PHENIX 実験グループでは初の試みであるため、解析の結果得た値の解釈が困難になる。そこで、陽子+陽子衝突系検証に向けた前段階として、Run15 で行われた陽子+金原子核衝突における方位角異方性の検証を、最小バイアストリガーを用いて行った。この解析は横運動量依存性やイベントクラスの定義等のパラメタ調節の指針を得るためにも有効で、本研究のボトムラインとなる。この解析結果をスタート地点として、陽子+陽子衝突系における最小バイアストリガーを用いた解析、陽子+金原子核衝突系における FVTX トリガーを用いた解析へと段階的に取り組む。

また解析に用いる検出器のコンビネーションは CNT-BBC を集中的に用い、解析の際は $\Delta\eta - \Delta\phi$ 分布を元に $\Delta\phi$ 軸方向への射影を取った後、二粒子相関関数を評価した。前述の通り、CNT-BBC のコンビネーションを選んだ時点で擬ラピディティ差が十分に大きい領域、すなわちジェットによる影響が少ないと考えられる領域を選んだことになり、擬ラピディティ差の情報を使う必要が無いからである。また FVTX トリガーを用いた解析を念頭に置き、トリガーバイアスを含む可能性のある CNT-FVTX 相関や FVTXN-S 相関は次の段階と位置付けた。

5.3 陽子+金原子核衝突における解析

まず Run15 実験で行われた陽子+金原子核衝突系における解析を、最小バイアストリガーを用いて行った。イベントミキシングにより二粒子相関関数を各 $\Delta\phi$ について評価した後、下式で示す 4 次の項までのフーリエ関数でフィッティングし、楕円型異方性に対応する 2 次の項の大きさを評価した。

$$FittingFunction = 1 + \sum_{n=1}^{4} 2C_n \cos(n\Delta\phi)$$

図 5.5 は陽子+金原子核衝突における二粒子相関分布である。セントラルアームで観測した粒子の横運動量でクラス分けし、二粒子相関関数にフーリエ関数によるフィッティングを行った。また各成分の寄与を明らかにするため、1 次から 4 次までの余弦関数をフィッティングの結果得られた振幅でプロットした。

次に、楕円型異方性成分 C_2 の横運動量依存性を調べた。結果を図 5.6 に示す。QGP 由来のシグナルに特徴的な、高横運動量で変化率の小さくなる傾向が確認できる。また南 BBC で測定した電荷量で定義した粒子多重度依存性も検証し、粒子多重度が大きくなると C_2 成分が大きくなることが分かった。

次に、粒子多重度の定義を南 FVTX で検出した飛跡数で定義し直し、改めて依存性を調べた。ここで、飛跡数は前述したクオリティカットを通した後のものである。図 5.7 に示す通り、図 5.6 と同様粒子多重度が大きいほど C_2 が大きく、高横運動量では飽和する傾向が見られる。この測定は、PHENIX で初となる FVTX を用いた粒子多重度依存性を示す結果である。前述の通り、これらの解

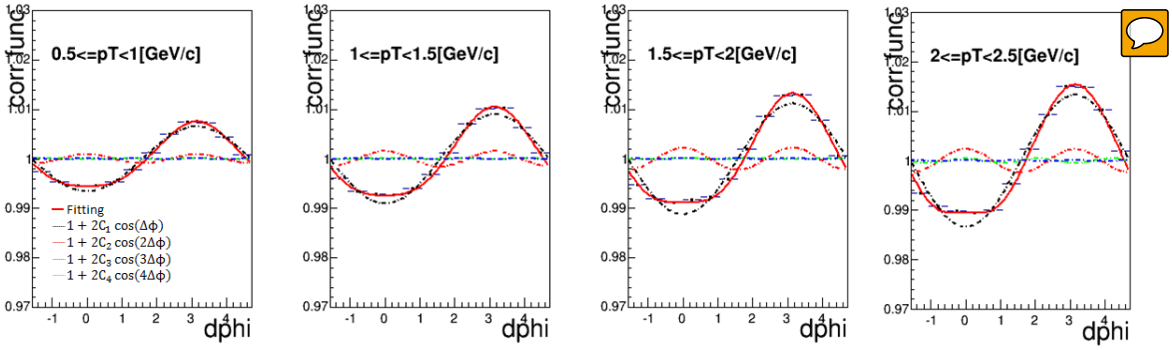


図 5.5: Run15 陽子+金原子核衝突における二粒子相関分布. 黒点で示した二粒子相関関数に対し 4 次までのフーリエ関数でフィッティングした. 赤の実戦はフィッティングの結果. 黒、赤、緑、青の破線はフィッティングで得た振幅でプロットした 1 次から 4 次までの余弦関数.

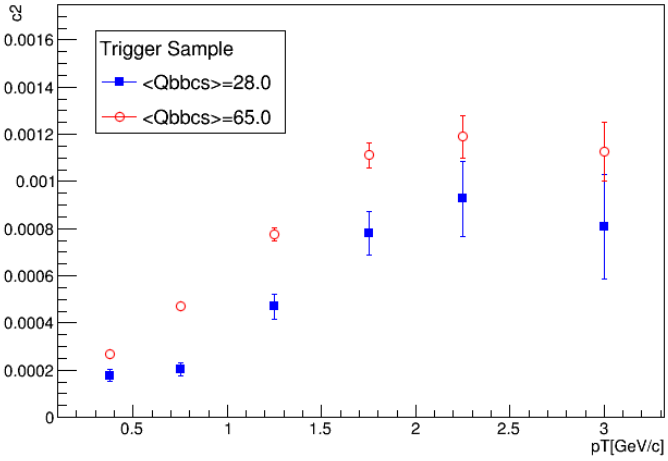


図 5.6: Run15 陽子+金原子核衝突における C_2 の横運動量および BBC 電荷量依存性

析は BBC 最小バイアストリガーによるデータセットを用いて行った。FVTX の多重度に依存性がある傾向は、高多重度事象に感度のある FVTX トリガーを利用する強いモチベーションになる。

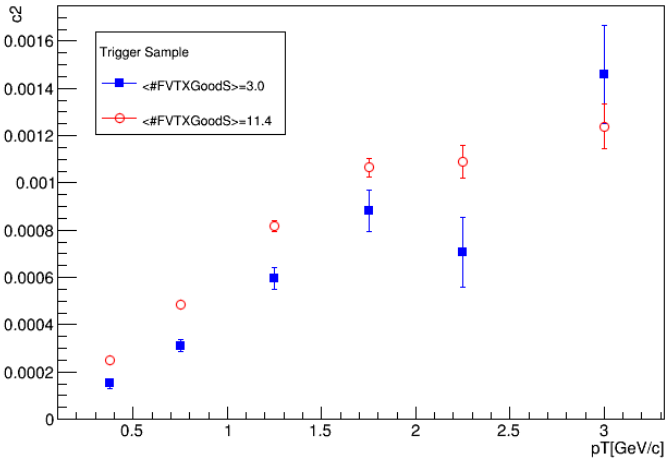


図 5.7: Run15 陽子+金原子核衝突における C_2 の横運動量および FVTX トラック数依存性

第6章　結論

原子核同士の衝突に特有と考えられていた、生成粒子の放出方向の楕円型異方性が陽子+陽子衝突のような小さな衝突系においても観測された。RHIC では重水素+原子核やヘリウム 3+金原子核では同様の相関が確認されているが、陽子+陽子衝突における詳細な検証は行われていない。LHC とはエネルギースケールの異なる RHIC の陽子+陽子衝突における方位角異方性の検証は、小さな衝突系の楕円型異方性を説明する理論モデルを限定する上で大きな意味がある。

これまでの実験から、小さな衝突系における楕円型異方性には粒子多重度に依存性が確認され、生成粒子が多いほど強い楕円型異方性がある傾向が観測されている。PHENIX で稼働している BBC を用いたトリガーシステムは陽子+陽子衝突では感度が低く、高多重度トリガーとしては機能しない。そこで、2012 年度から稼働を開始した FVTX 検出器を用いた新たな高多重度トリガーシステムを考案、開発した。

FVTX 高多重度トリガーは読み出しエレクトロニクスに搭載されたデータ処理用 FPGA の余剰能力を用いて、トリガー信号生成のためのブロックを追加することにより実現した。筆者はこの内、ヒットを検出した Wedge の数を数える FEM トリガーロジックおよび FEM トリガーの数を数える FEM-IB トリガーロジックを開発、実装した。FPGA コーディングやケーブル製作を始め種々のトリガー開発は理化学研究所、ブルックヘブン国立研究所に構築したトリガー開発用テストベンチにおいて、ロスアラモス研究所 FVTX 開発グループの協力の下行った。また PHENIX 実機への導入にあたり、FPGA コードの導入やトリガー信号用ケーブルの設置、GL1 の仕様に合わせたトリガー信号発行のタイミング調整等をブルックヘブン国立研究所 PHENIX 実験ホールにおいて行った。トリガー信号発行のタイミングは FPGA 内の BCO 単位のディレイとケーブルディレイを併用し、MPC トリガーとの coincidence を測る大まかな調整の後、トリガーエミュレータを用いた精密な調整を行った。

本トリガーシステムは PHENIX 実験 Run15 で実験終了時まで物理データを取得した。陽子+陽子衝突実験データを用いてトリガー性能を評価したところ、BBC 最小バイアストリガーに対し低多重度イベントを効率的に棄却できていると共に、高多重度イベントではおよそ 100 倍の統計を達成したことが分かった。

FVTX 高多重度トリガーを用いた陽子+陽子衝突系の物理解析に向け、ボトムラインとして最小バイアストリガーを用いた陽子+金原子核衝突系における方位角異方性の検証に取り組んだ。この解析で楕円型異方性が BBC で測定した粒子多重度に依存性があることが分かった。更に、FVTX で測定した粒子多重度依存性を調べたところ、特に低横運動量領域において同様の依存性が見られた。今後、FVTX 高多重度トリガーを用いて更に高多重度領域の解析を行う予定である。

付 録 A　擬ラピディティのはなし

付 録B　FVTXトリガーQA

B.1　各種プロット

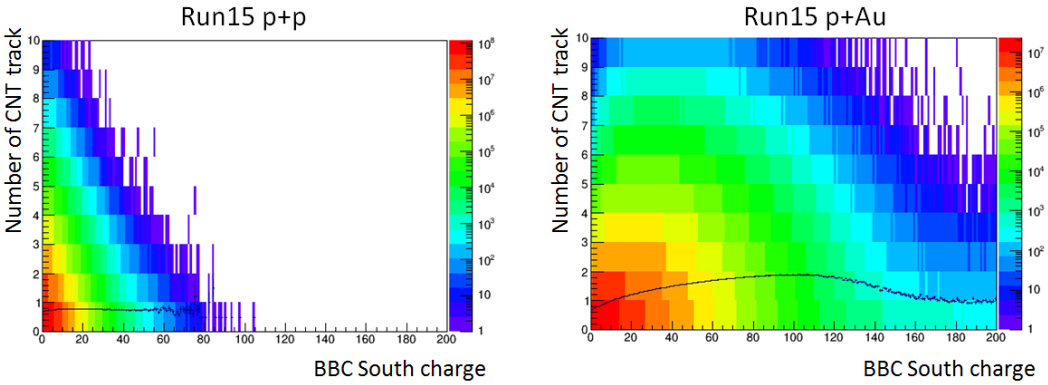


図 B.1: 陽子+陽子（左）と陽子+金原子核（右）衝突におけるセントラルアームで観測したトラック数と BBC 電荷量の相関

B.2　衝突位置に依存した FVTX の検出領域の変化

付 録C　誤差の計算

C.1

関連図書

[1] 秋葉康之「クォーク・グルーオン・プラズマの物理 実験室で再現する宇宙の始まり」(共立出版,2014)

[2] FVTX NIM C.Aidala, et al., Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 755 (2014) 44-61

[3] Pb+Pb The CMS Collaboration, JHEP 07 (2011) 076

[4] p+p The CMS Collaboration, JHEP 1009 (2010) 091

[5] p+Pb The CMS Collaboration, Physics Letters B 718 (2013) 795-814

[6] d+Au A. Adare, et al. (The PHENIX Collaboration), Phys. Rev. Lett. 111,212301 (2013)

[7] 3He+Au Piotr Bozek, et al., Physics Letters B 747 (2015) 135-138

[8] 齋藤航、長島徹 平成 25 年度卒業論文 立教大学理学部物理学科

[9] 藤山直樹、益田英知 平成 27 年度卒業論文 立教大学理学部物理学科