

日本物理学会 2024 年春季大会

2024/03/18 – 2024/03/21

# sPHENIX Cold-QCD プログラム

糠塚元気 (RIKEN), 

他 sPHENIX Collaboration





# 目次

- sPHENIX コラボレーション
  - 物理プログラム
  - sPHENIX 検出器
  - 計画
- sPHENIX Cold-QCD プログラム
- sPHENIX の現状



# sPHENIX コラボレーション



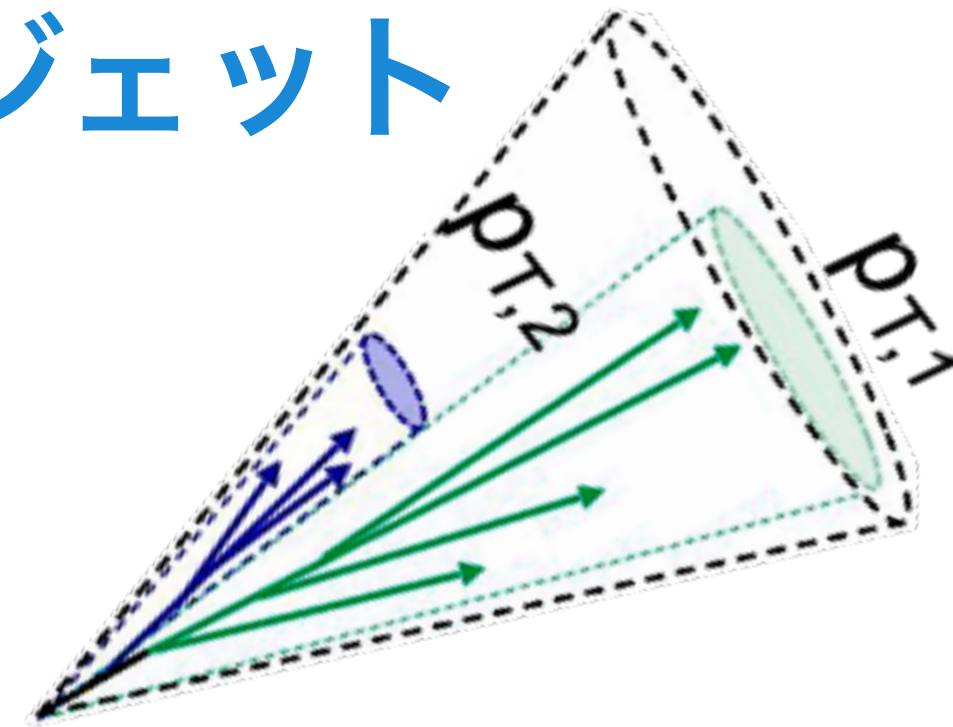
## PHENIX

2016年にデータ収集完了。  
データ解析が継続中。

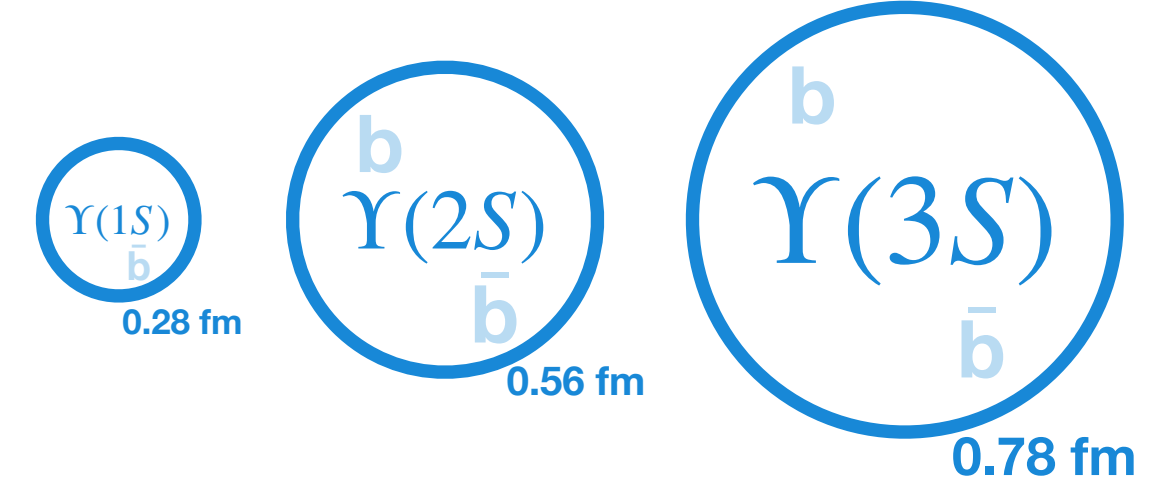


## sPHENIX における主なトピック

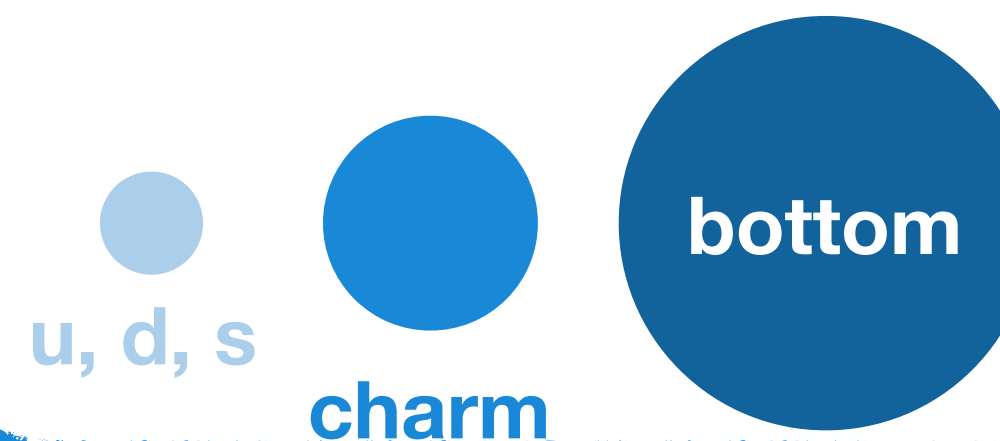
### ジェット



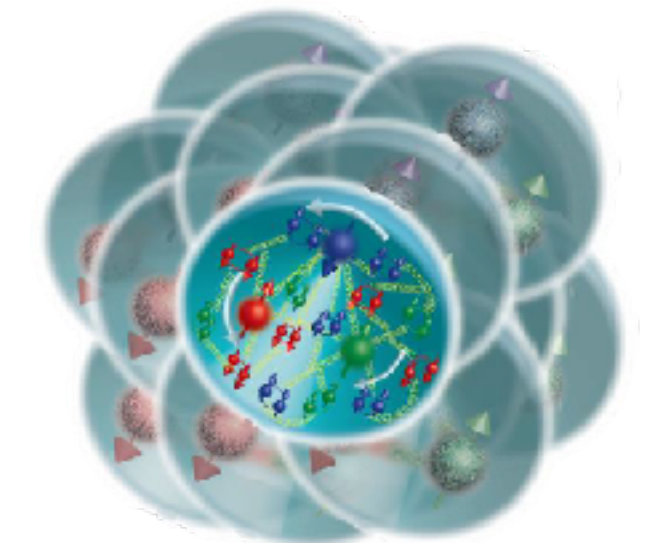
### クォークonium



### QGP 中の エネルギー損失



### Cold-QCD



- State-of-the-Art Jet Detector at RHIC
- 2016年にコラボレーション発足
- クォーク・グルーオン・プラズマ (QGP) と Cold-QCD の実験による研究を行う
- 14カ国の81機関から約400名が参画
- ホームページ: <https://www.sphenix.bnl.gov/>





# sPHENIX 検出器

Midrapidity をカバーするハドロンカロリメータ (RHIC 初) でフルジェットの再構成が可能

全方位角  $2\pi$  を  $|\eta| < 1.1$  と  $|z_{\text{vtx}}| < 10 \text{ cm}$  において覆う検出器群

## マグネット

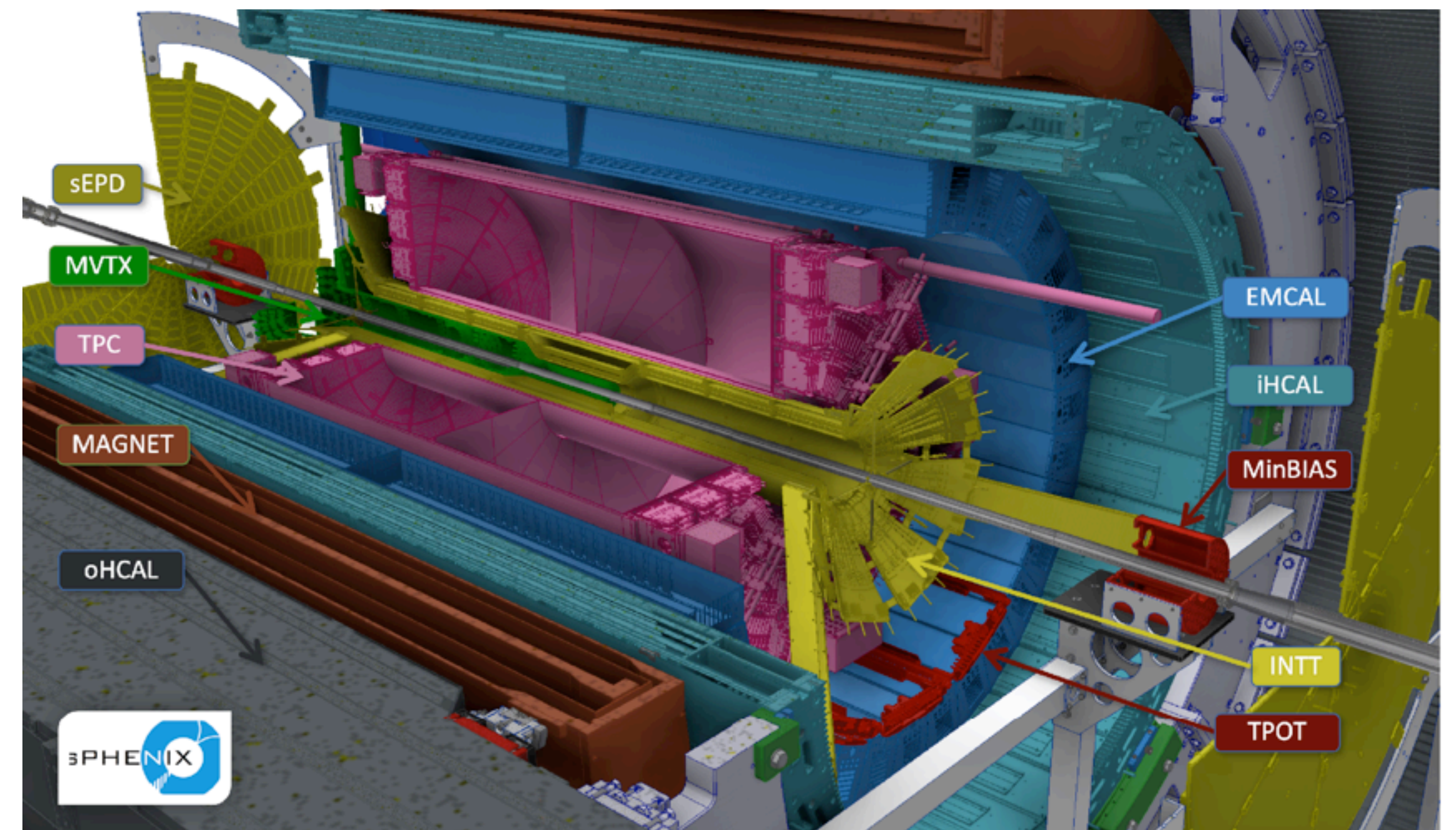
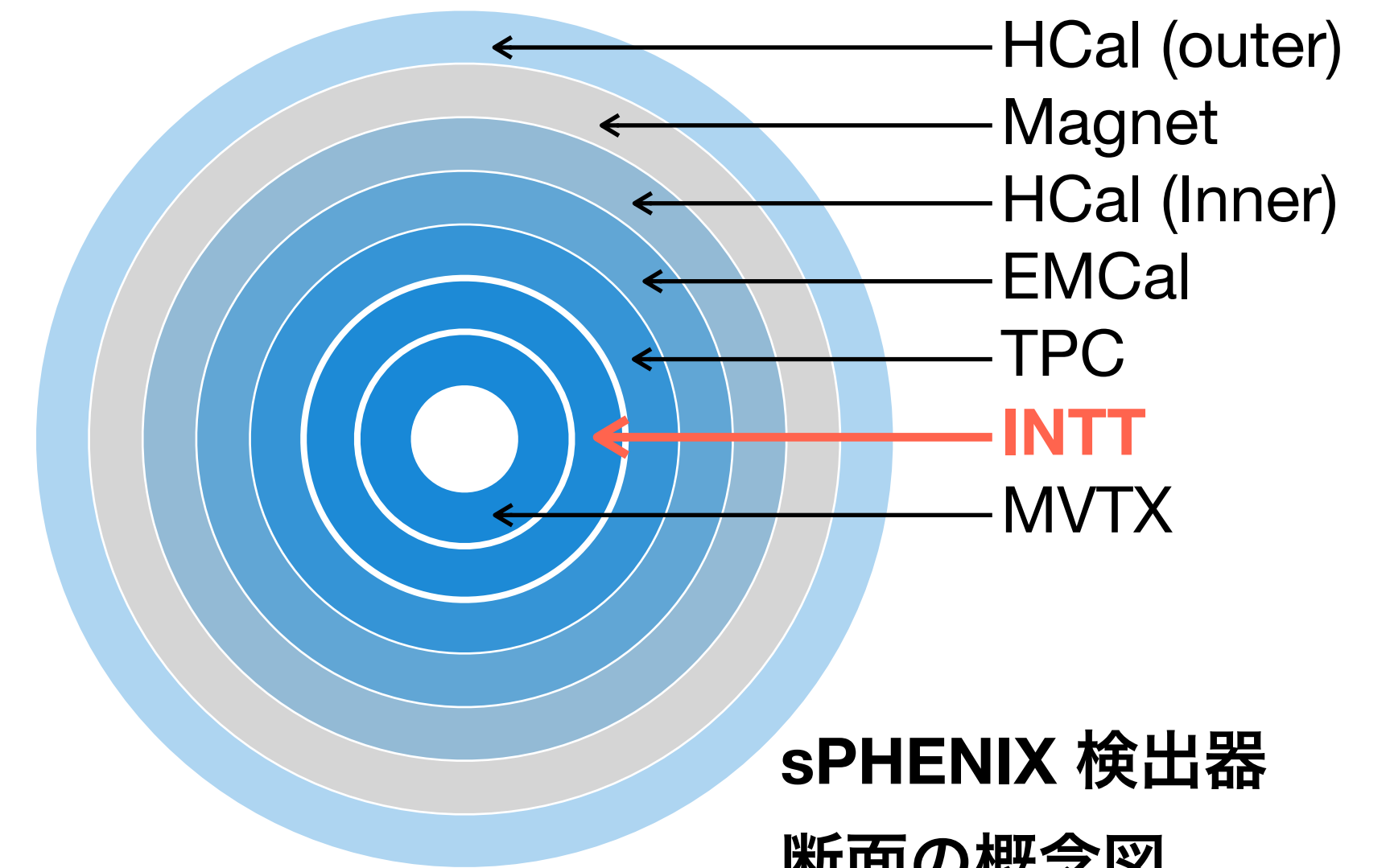
SLAC Babar 実験から譲り受けた超電導磁石 1.5 T

## ハドロンカロリメータ (HCAL)

- マグネット内側: 非磁性金属 + シンチレーター
- マグネット外側: 鉄 + シンチレーター
- マグネット内側の測定でマグネットによる多重散乱の影響を抑える

## 電磁カロリメータ (EMCAL)

- タングステンパウダー + シンチレーションファイバー
- 小型、small segmentation ( $\Delta\eta \times \Delta\phi = 0.024 \times 0.024$ )



sPHENIX 検出器





# sPHENIX 検出器

Midrapidity をカバーするハドロンカロリメータ (RHIC 初) でフルジェットの再構成が可能

全方位角  $2\pi$  を  $|\eta| < 1.1$  と  $|z_{\text{vtx}}| < 10 \text{ cm}$  において覆う検出器群

## マグネット

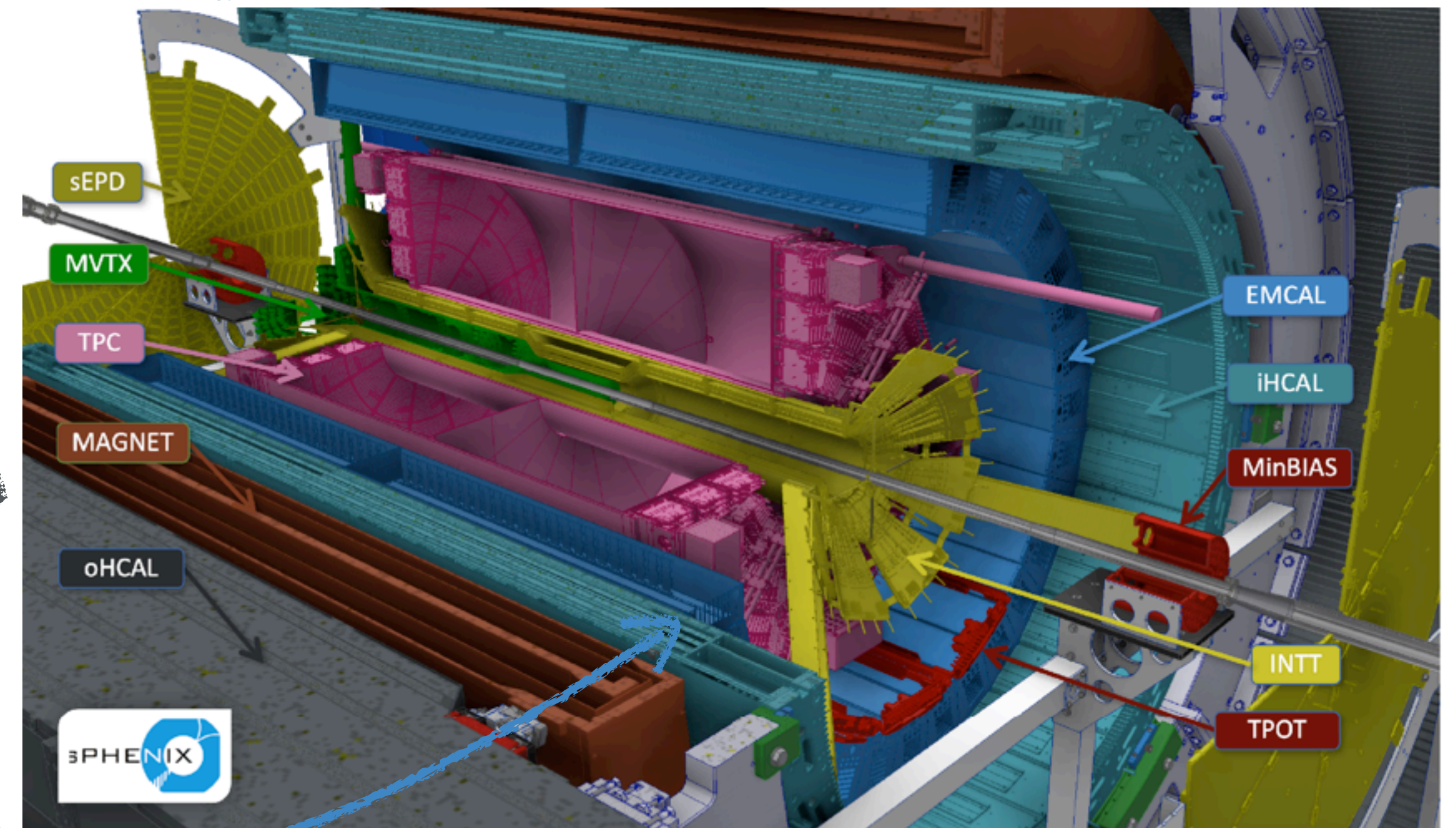
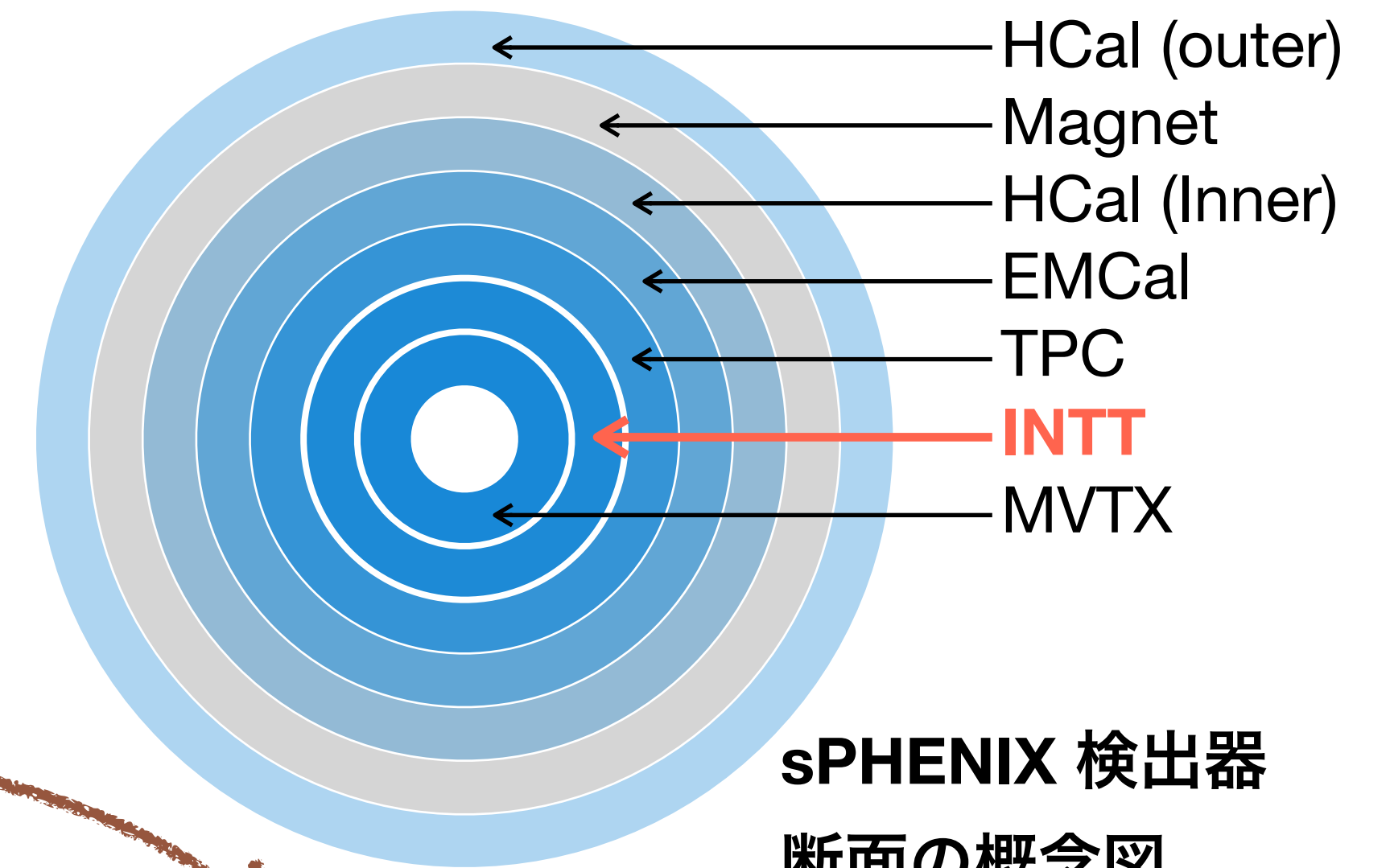
SLAC Babar 実験から譲り受けた超電導磁石 1.5 T

## ハドロンカロリメータ (HCAL)

- マグネット内側: 非磁性金属 + シンチレーター
- マグネット外側: 鉄 + シンチレーター
- マグネット内側の測定でマグネットによる多重散乱の影響を抑える

## 電磁カロリメータ (EMCAL)

- タングステンパウダー + シンチレーションファイバー
- 小型、small segmentation ( $\Delta\eta \times \Delta\phi = 0.024 \times 0.024$ )



sPHENIX 検出器





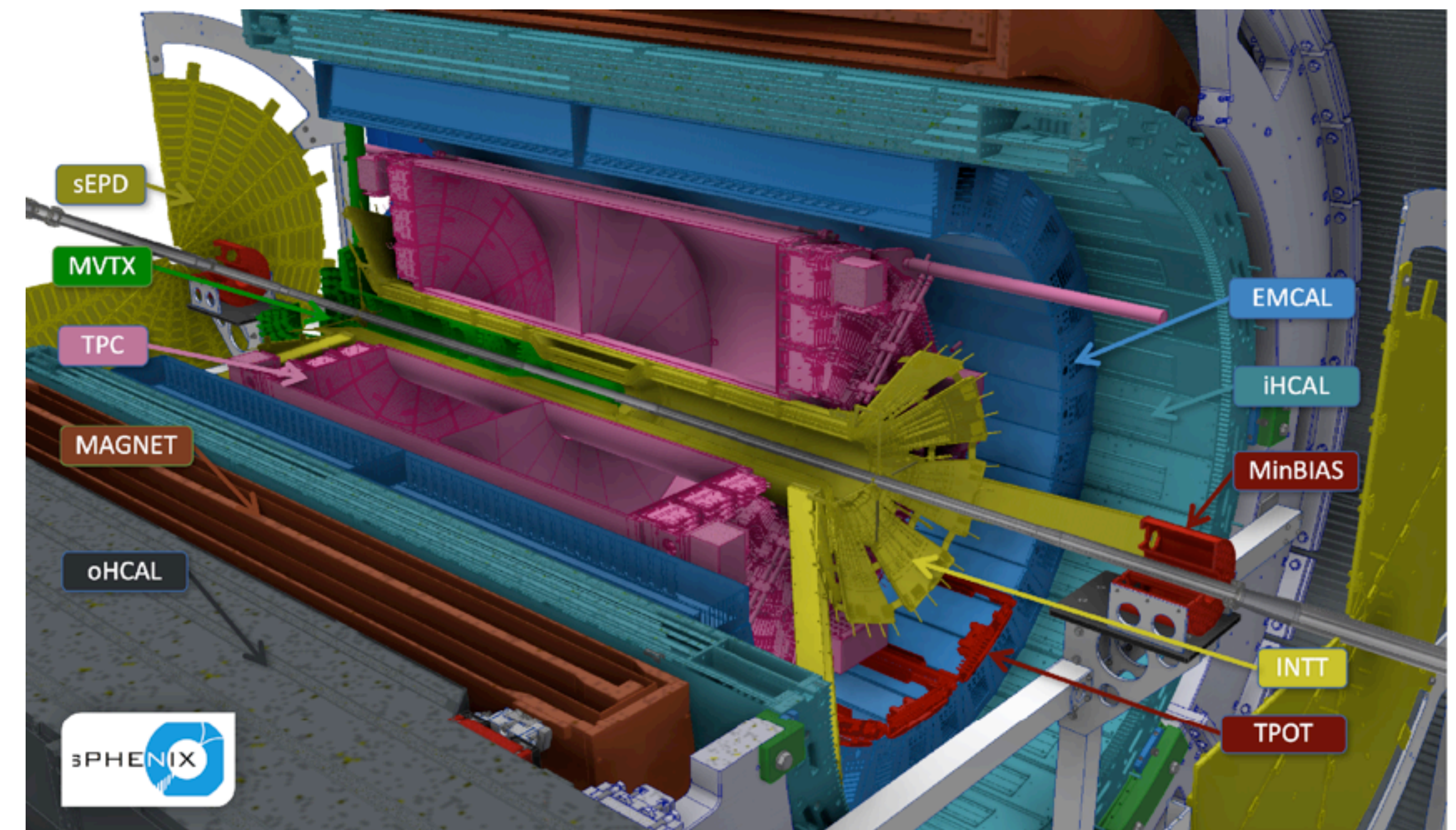
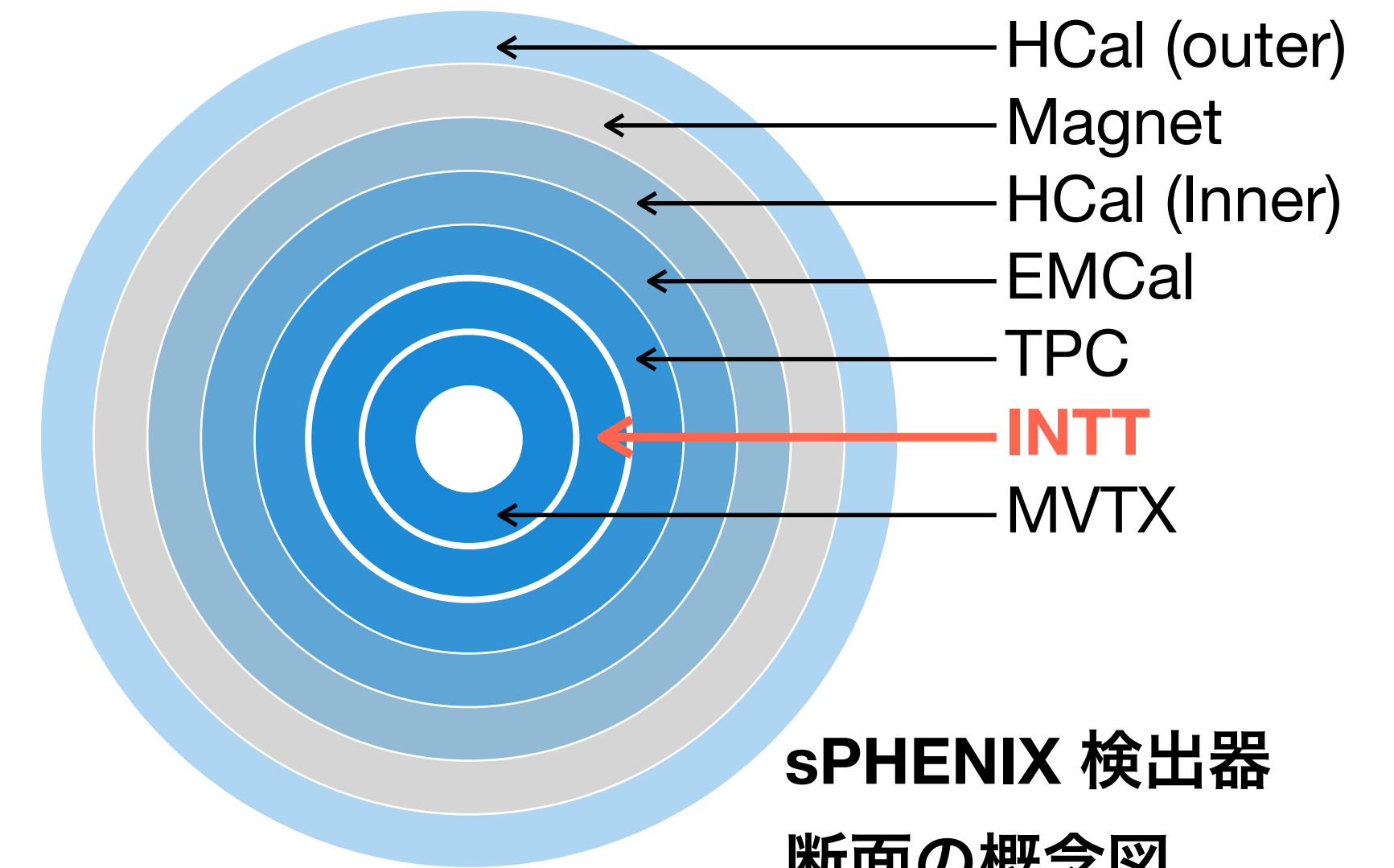
# sPHENIX 検出器

## 飛跡検出器群

- **TPC** (Time Projection Chamber)
  - $r < 80$  cm
  - 高運動量分解能を与える
- **TPOT** (TPC Outer Tracker)
  - Micromegas
  - TPC の空間電荷による歪みのキャリブレーション
- **INTT** (Intermediate Silicon Tracker)
  - $r < 10$  cm
  - TPC と MVTX の間での測定、高時間分解能
- **MVTX** (MAPS-based Vertex Detector)
  - $r < 4$  cm
  - $30 \mu\text{m}$  ピッチのピクセルによる反応点測定

## 前方検出器

- **MBD** (Minimum Bias Detector) (PHENIX 時代の  $B_{\text{eam}}B_{\text{eam}}C_{\text{ounter}}$ )
  - $-3.51 < |\eta| < 4.61$
  - ミニマムバイアストリガー発行
- **sEPD** (sPHENIX Event Plane Detector)
  - $-2.0 < |\eta| < 4.9$ ,
  - 高分解能での反応平面測定
- **ZDC** (Zero Degree Calorimeter)
  - $z = \pm 18.5$  m
  - 中心衝突度、ルミノシティ測定とトリガー



sPHENIX 検出器





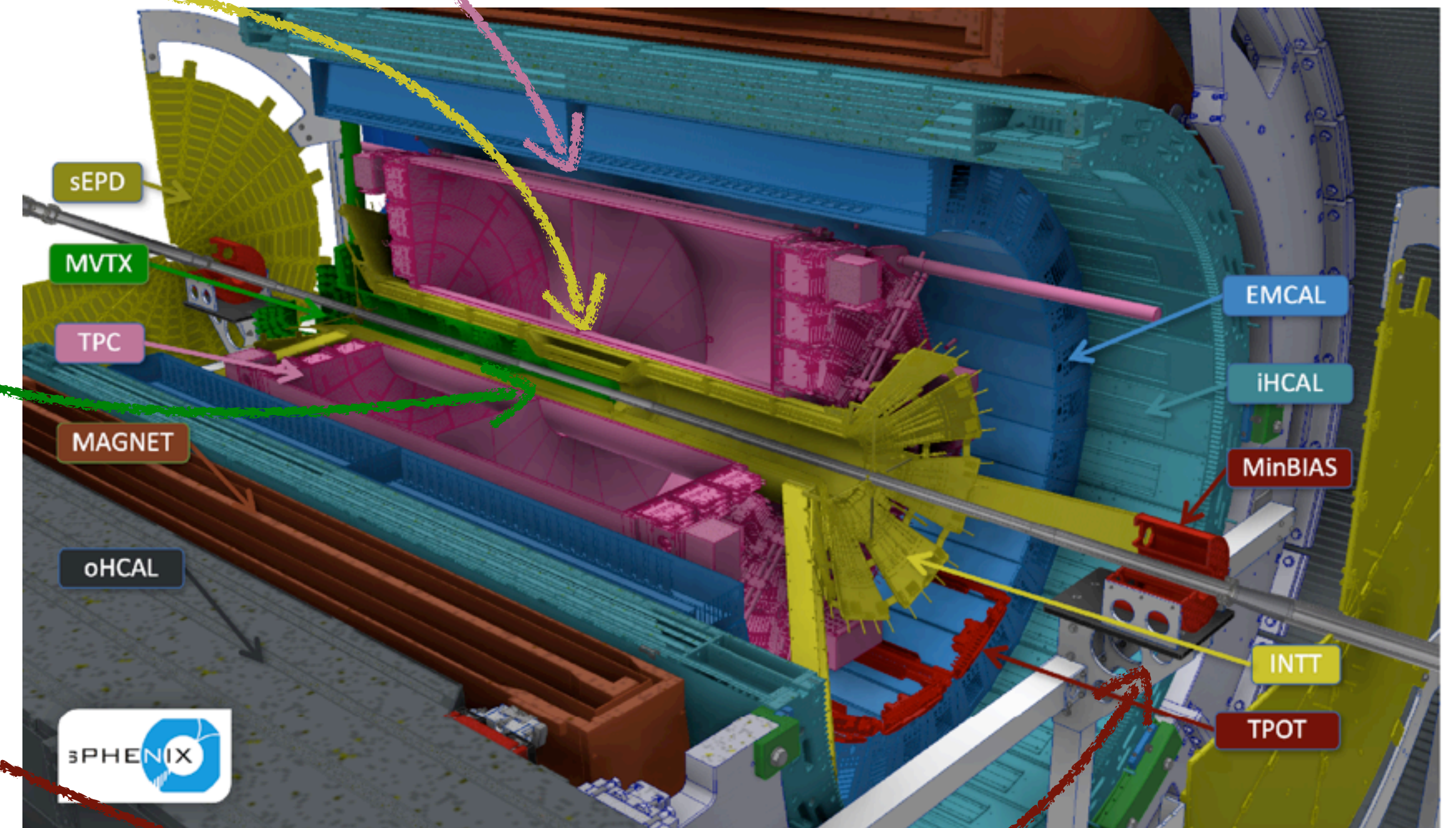
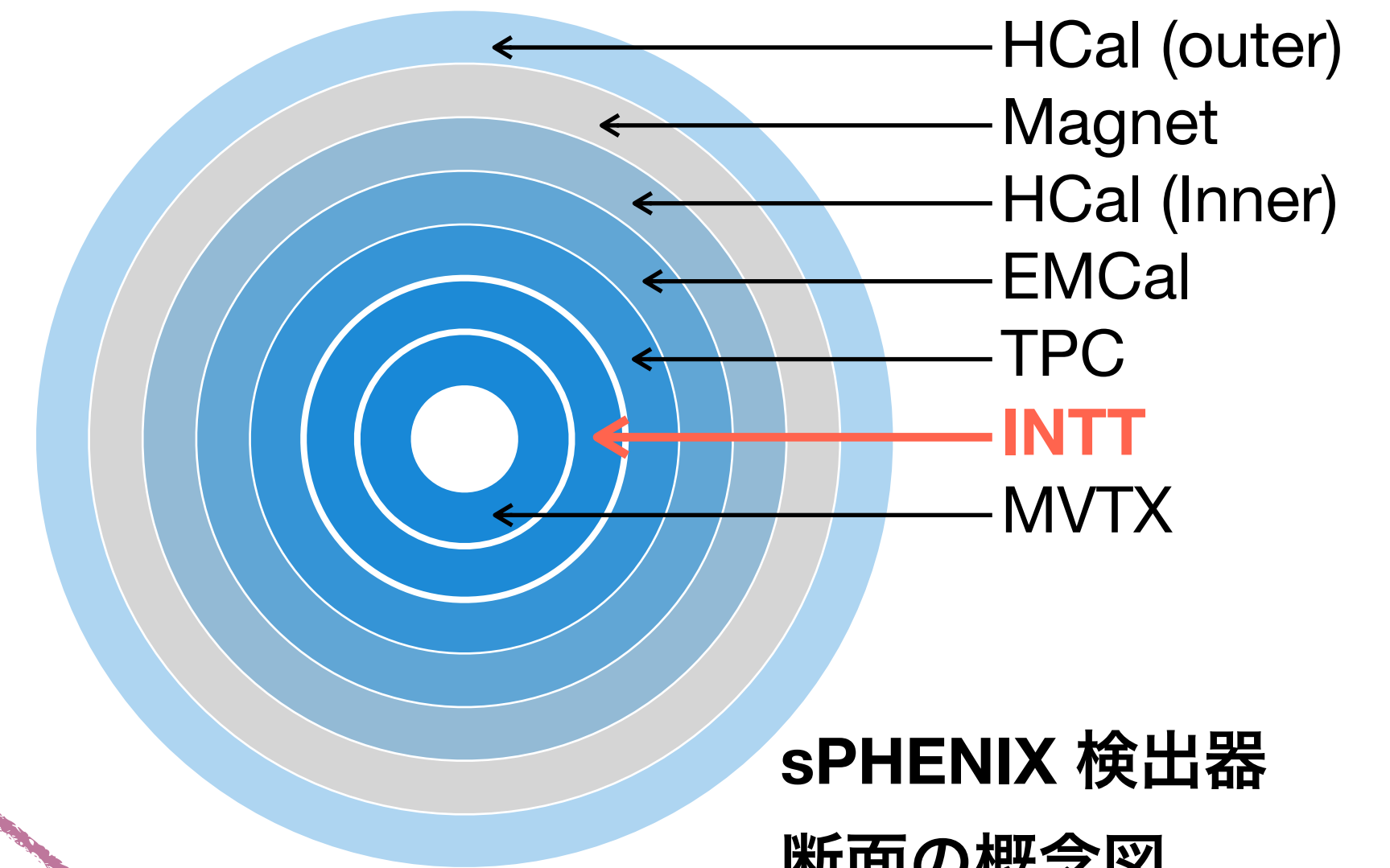
# sPHENIX 検出器

## 飛跡検出器群

- **TPC** (Time Projection Chamber)
  - $r < 80$  cm
  - 高運動量分解能を与える
- **TPOT** (TPC Outer Tracker)
  - Micromegas
  - TPC の空間電荷による歪みのキャリブレーション
- **INTT** (Intermediate Silicon Tracker)
  - $r < 10$  cm
  - TPC と MVTX の間での測定、高時間分解能
- **MVTX** (MAPS-based Vertex Detector)
  - $r < 4$  cm
  - $30 \mu\text{m}$  ピッチのピクセルによる反応点測定

## 前方検出器

- **MBD** (Minimum Bias Detector) (PHENIX 時代の  $B_{\text{eam}}B_{\text{eam}}C_{\text{ounter}}$ )
  - $-3.51 < |\eta| < 4.61$
  - ミニマムバイアストリガー発行
- **sEPD** (sPHENIX Event Plane Detector)
  - $-2.0 < |\eta| < 4.9$ ,
  - 高分解能での反応平面測定
- **ZDC** (Zero Degree Calorimeter)
  - $z = \pm 18.5$  m
  - 中心衝突度、ルミノシティ測定とトリガー



**sPHENIX 検出器**





# sPHENIX 検出器

## 飛跡検出器群

- **TPC** (Time Projection Chamber)
  - $r < 80$  cm
  - 高運動量分解能を与える
- **TPOT** (TPC Outer Tracker)
  - Micromegas
  - TPC の空間電荷による歪みのキャリブレーション
- **INTT** (Intermediate Silicon Tracker)
  - $r < 10$  cm
  - TPC と MVTX の間での測定、高時間分解能
- **MVTX** (MAPS-based Vertex Detector)
  - $r < 4$  cm
  - 30  $\mu$ m ピッチのピクセルによる反応点測定

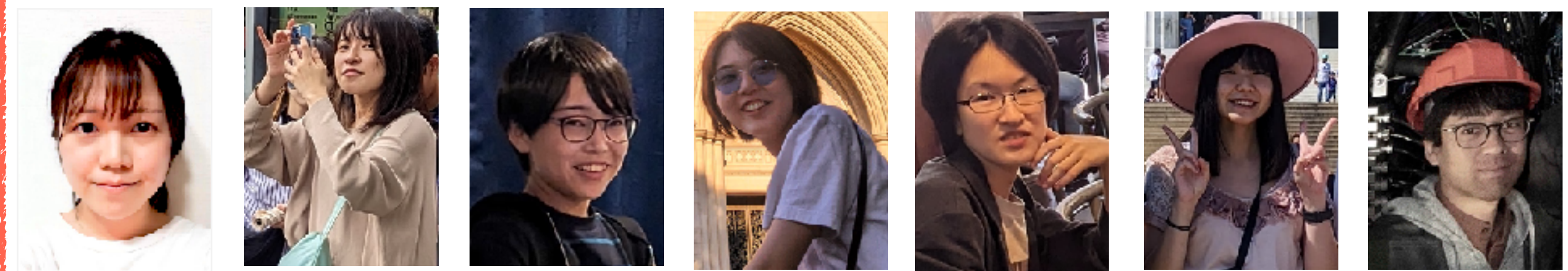
## 前方検出器

- **MBD** (Minimum Bias Detector) (PHENIX 時代の  $B_{\text{eam}}B_{\text{eam}}C_0$ )
  - $-3.51 < |\eta| < 4.61$
  - ミニマムバイアストリガー発行
- **sEPD** (sPHENIX Event Plane Detector)
  - $-2.0 < |\eta| < 4.9$ ,
  - 高分解能での反応平面測定
- **ZDC** (Zero Degree Calorimeter)
  - $z = \pm 18.5$  m
  - 中心衝突度、ルミノシティ測定とトリガー

sPHENIX 日本グループが開発・建設に大きく貢献している

関連する講演：

講演番号	登録番号	タイトル	著者	所属	領域
21aV2-10	2083	RHIC-sPHENIX実験における中間飛跡検出器INTTの動作検証	杉山由佳, 秋葉康之 <sup>A</sup> , 池本真尋, 榎園昭智 <sup>B</sup> , 加藤智也 <sup>C</sup> , 加納麻衣, 甘林, 菊池陸大 <sup>C</sup> , 近藤崇 <sup>D</sup> , 穴倉遼太 <sup>C</sup> , 下村真弥, 辻端日菜子, 寺坂優里, 中川格 <sup>A</sup> , 糠塚元気 <sup>A</sup> , 長谷川勝一 <sup>E</sup> , 波多美咲, 蜂谷崇 <sup>A</sup> , 藤木一真 <sup>C</sup> , 藤原愛実, 森本菜央, 渡部舞	奈良女子大, 理研 <sup>A</sup> , 理研BNLセ <sup>B</sup> , 立教大 <sup>C</sup> , 都立産技研 <sup>D</sup> , JAEA <sup>E</sup>	実験核物理領域
21aV2-11	1994	RHIC-sPHENIX実験における中間飛跡検出器INTTのデータ購出し	加納麻衣, 秋葉康之 <sup>A</sup> , 池本真尋, 榎園昭智 <sup>B</sup> , 加藤智也 <sup>C</sup> , 甘林, 菊池陸大 <sup>C</sup> , 近藤崇 <sup>D</sup> , 穴倉遼太 <sup>C</sup> , 下村真弥, 杉山由佳, 辻端日菜子, 寺坂優里, 中川格 <sup>A</sup> , 糠塚元気 <sup>A</sup> , 長谷川勝一 <sup>E</sup> , 波多美咲, 蜂谷崇 <sup>A</sup> , 藤木一真 <sup>C</sup> , 藤原愛実, 森本菜央, 渡部舞	奈良女子大, 理研 <sup>A</sup> , 理研BNLセ <sup>B</sup> , 立教大 <sup>C</sup> , 都立産技研 <sup>D</sup> , JAEA <sup>E</sup>	実験核物理領域
21aV2-12	1973	RHIC-sPHENIX実験における中間飛跡検出器INTTを用いた飛跡再構成	辻端日菜子 <sup>A</sup> , 秋葉康之 <sup>B</sup> , 池本真尋 <sup>A</sup> , 榎園昭智 <sup>C</sup> , 加藤智也 <sup>D</sup> , 加納麻衣 <sup>A</sup> , 甘林 <sup>A</sup> , 菊池陸大 <sup>D</sup> , 近藤崇 <sup>E</sup> , 穴倉遼太 <sup>D</sup> , 下村真弥 <sup>A</sup> , 杉山由佳 <sup>A</sup> , 寺坂優里 <sup>A</sup> , 中川格 <sup>B</sup> , 糠塚元気 <sup>B</sup> , 長谷川勝一 <sup>F</sup> , 波多美咲 <sup>A</sup> , 蜂谷崇 <sup>A,B</sup> , 藤木一真 <sup>D</sup> , 藤原愛実 <sup>A</sup> , 森本菜央 <sup>A</sup> , 渡部舞 <sup>A</sup>	奈良女子大 <sup>A</sup> , 理研 <sup>B</sup> , 理研BNLセ <sup>C</sup> , 立教大 <sup>D</sup> , 都立産技研 <sup>E</sup> , JAEA <sup>F</sup>	実験核物理領域
19pU1-11	1870	RHIC-sPHENIX実験におけるシリコン飛跡検出器を用いた光子多重度の測定	波多美咲 <sup>B</sup> , 秋葉康之 <sup>A</sup> , 池本真尋 <sup>B</sup> , 榎園昭智 <sup>C</sup> , 加藤智也 <sup>D</sup> , 加納麻衣 <sup>B</sup> , 甘林 <sup>B</sup> , 菊池陸大 <sup>D</sup> , 近藤崇 <sup>E</sup> , 穴倉遼太 <sup>D</sup> , 下村真弥 <sup>B</sup> , 杉山由佳 <sup>B</sup> , 辻端日菜子 <sup>B</sup> , 寺坂優里 <sup>B</sup> , 中川格 <sup>A</sup> , 糠塚元気 <sup>A</sup> , 長谷川勝一 <sup>F</sup> , 蜂谷崇 <sup>B,A</sup> , 藤木一真 <sup>D</sup> , 藤原愛実 <sup>B</sup> , 森本菜央 <sup>B</sup> , 渡部舞 <sup>B</sup>	理研 <sup>A</sup> , 奈良女子大 <sup>B</sup> , 理研BNLセ <sup>C</sup> , 立教大 <sup>D</sup> , 都立産技研 <sup>E</sup> , JAEA <sup>F</sup>	理論核物理領域
19pU1-12	1890	RHIC-sPHENIX 実験における反応平面の測定	藤原愛実 <sup>B</sup> , 秋葉康之 <sup>A</sup> , 池本真尋 <sup>B</sup> , 榎園昭智 <sup>C</sup> , 加藤智也 <sup>D</sup> , 加納麻衣 <sup>B</sup> , 甘林 <sup>B</sup> , 菊池陸大 <sup>D</sup> , 近藤崇 <sup>E</sup> , 穴倉遼太 <sup>D</sup> , 下村真弥 <sup>B</sup> , 杉山由佳 <sup>B</sup> , 辻端日菜子 <sup>B</sup> , 寺坂優里 <sup>B</sup> , 中川格 <sup>A</sup> , 糠塚元気 <sup>A</sup> , 長谷川勝一 <sup>F</sup> , 波多美咲 <sup>B</sup> , 蜂谷崇 <sup>B,A</sup> , 藤木一真 <sup>D</sup> , 森本菜央 <sup>B</sup> , 渡部舞 <sup>B</sup>	理研 <sup>A</sup> , 奈良女子大 <sup>B</sup> , 理研BNLセ <sup>C</sup> , 立教大 <sup>D</sup> , 都立産技研 <sup>E</sup> , JAEA <sup>F</sup>	理論核物理領域
19pU1-13	1905	RHIC-sPHENIX実験におけるジェット検出手法の開発と評価	渡部舞 for the sPHENIX Collaboration	奈良女大	理論核物理領域
21pU1-9	839	sPHENIX Cold-QCD プログラム	糠塚元気, 他 sPHENIX Collaboration	理研	理論核物理領域





## sPHENIX Beam Use Proposal 2023 一部抜粋

年	ビーム	$\sqrt{s_{NN}}$ (GeV)	データ 収集 (週)	ルミノシティ, ( $ z  < 10$ cm)	
				Recorded	Sampled
2023	Au + Au	200	9	<del>3.7 nb<sup>-1</sup></del>	<del>4.5 nb<sup>-1</sup></del>
2024	p <sup>↑</sup> + p <sup>↑</sup>	200	17	0.44 pb <sup>-1</sup> (5 kHz)	31 pb <sup>-1</sup>
2024	Au + Au	200	3	0.4 nb <sup>-1</sup>	-
2025	Au + Au	200	24.5	6.3 nb <sup>-1</sup>	-

### 2023: コミッショニング

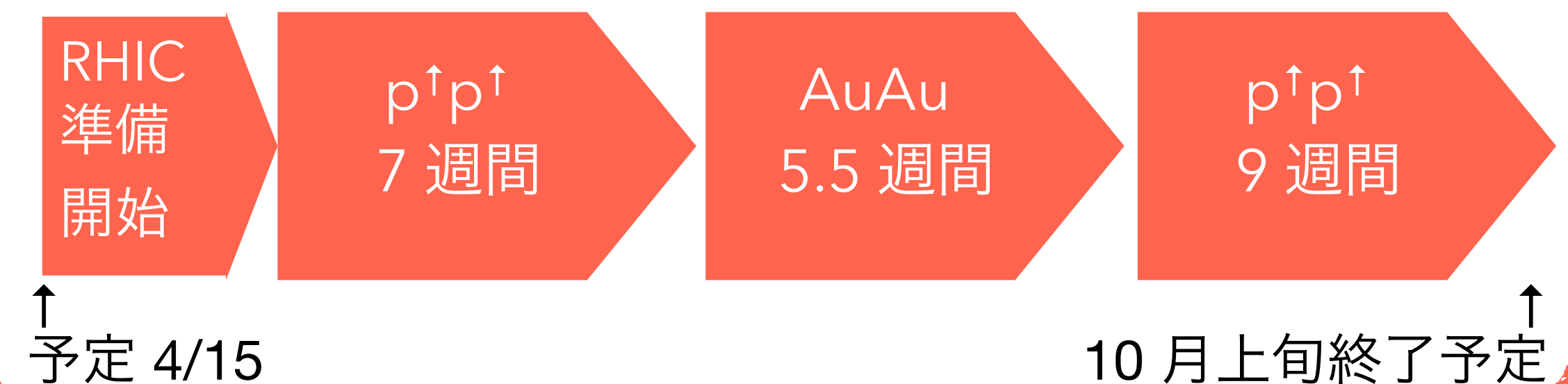
- 検出器の建設は 2023/04 に完了
- 2023/05 からビーム供給開始
- 2023/08/01 加速器トラブル発生
- 2023/08-09: 宇宙線を用いてコミッショニング継続

### 2024: p<sup>↑</sup>+p<sup>↑</sup>, Au + Au

- 横偏極陽子 p<sup>↑</sup> + p<sup>↑</sup> (~60% polarization) のデータ収集 ( $\sqrt{s} = 200$  GeV)
- 2023 年に予定されていた Au+Au によるコミッショニング (6 週間)

### 2025: Au + Au

- Au + Au のデータ収集





# 目次

- sPHENIX コラボレーション
  - 物理プログラム
  - sPHENIX 検出器
  - 計画
- sPHENIX Cold-QCD プログラム
- sPHENIX の現状





# sPHENIX Cold-QCD プログラム

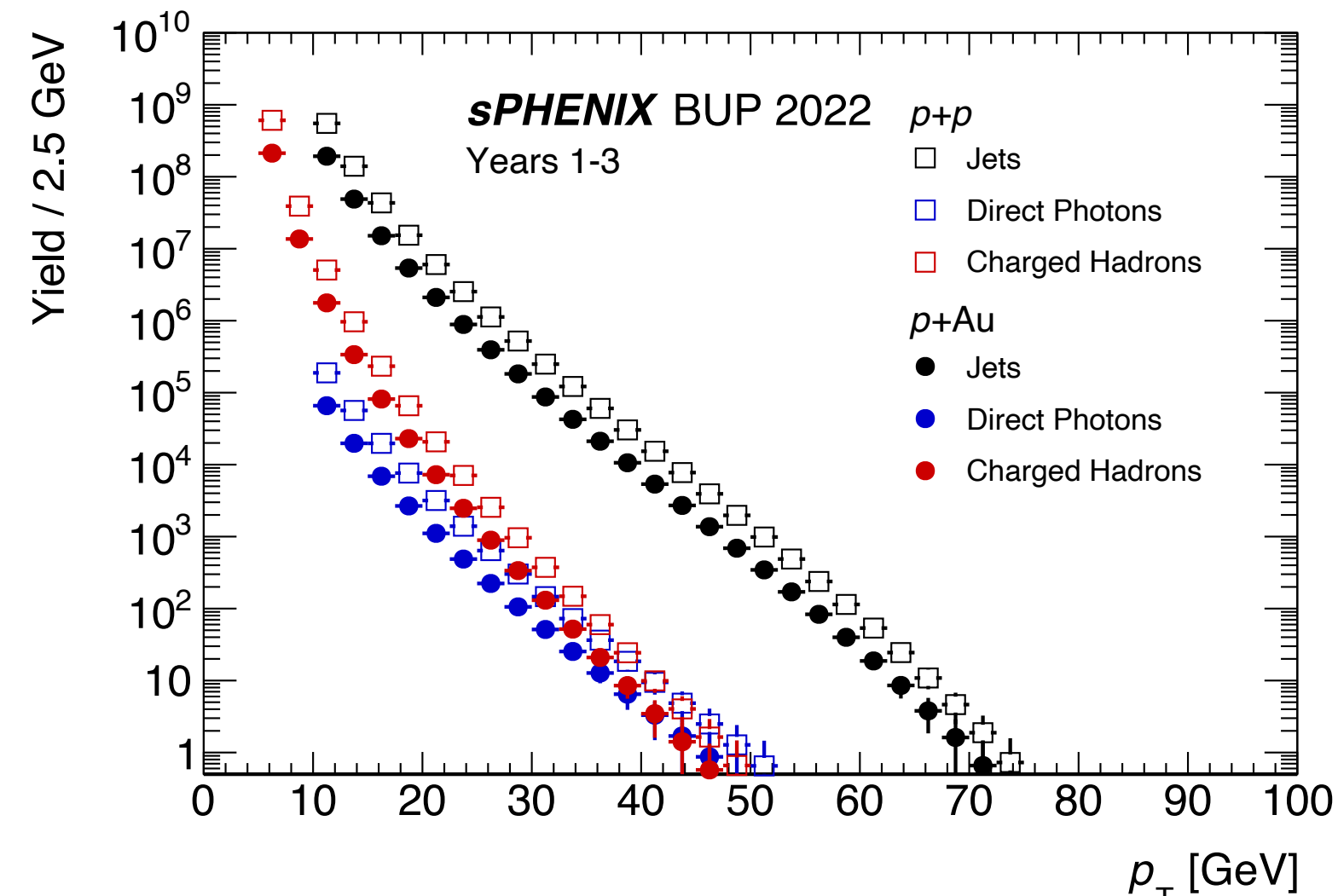
横偏極陽子  $p^\uparrow + p^\uparrow$  衝突 ( $\sqrt{s} = 200$  GeV) を測定する

横スピン非対称度 (transverse single spin asymmetry, TSSA) を決定し

$$A_N = \frac{\sigma^\uparrow - \sigma^\downarrow}{\sigma^\uparrow + \sigma^\downarrow}$$

- Transverse-momentum dependent parton distribution functions (TMDs)
- 高次ツイスト相関関数
- 破砕関数
- 等等

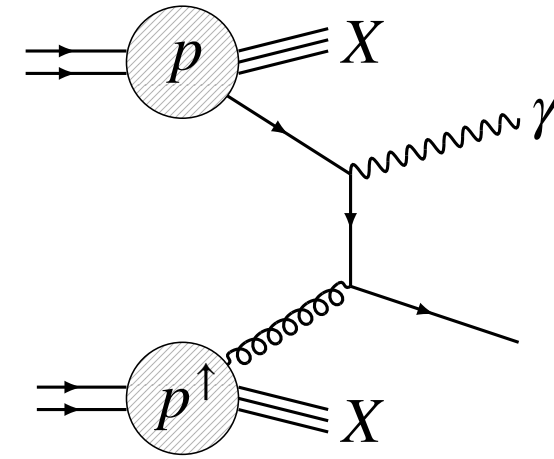
を研究する



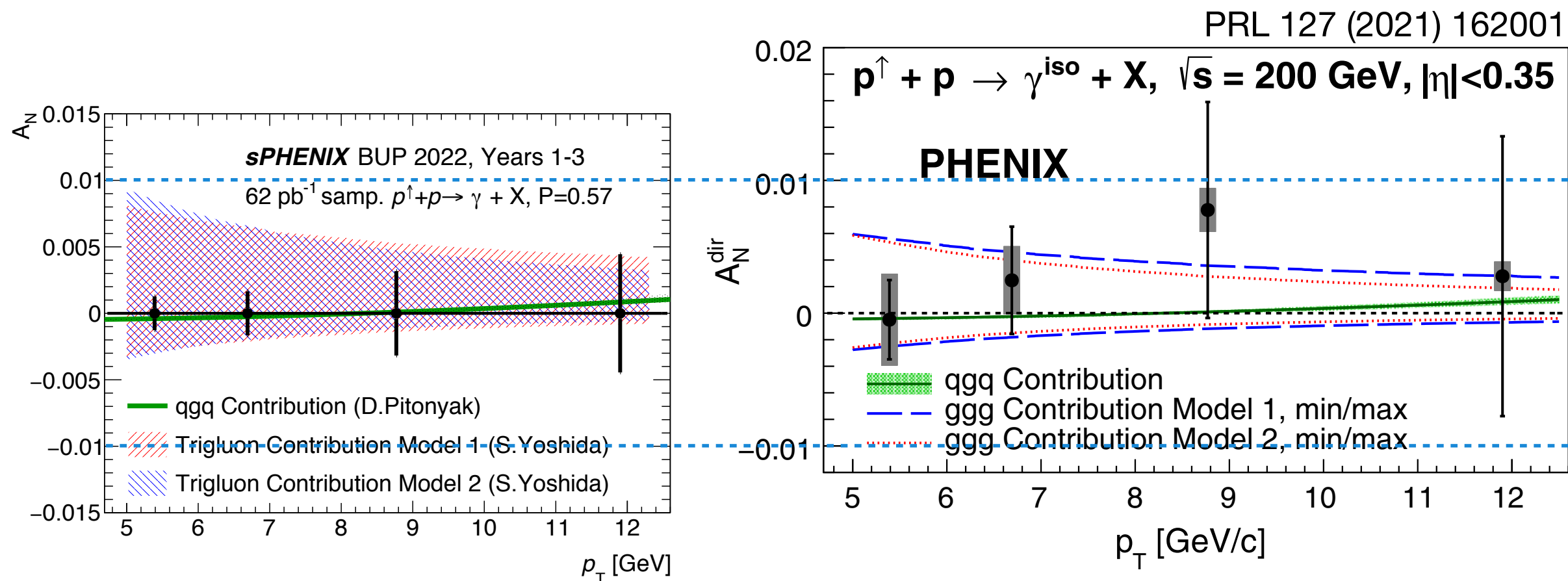
sPHENIX でのチャンネルごとの統計の見積もり

		核子のスピン		
		$0$	縦	横
パートンのスピン	$0$	Number density $f_1$		Sivers $f_{1T}^\perp$
	縦		Helicity $g_{1L}$	Worm-Gear $g_{1T}$
	横	Boer-Mulders $h_1^\perp$	Worm-Gear $h_{1L}^\perp$	Transversity $h_1$ Pretzelosity $h_{1T}^\perp$

## 直接光子 $p^\uparrow + p \rightarrow \gamma + X$

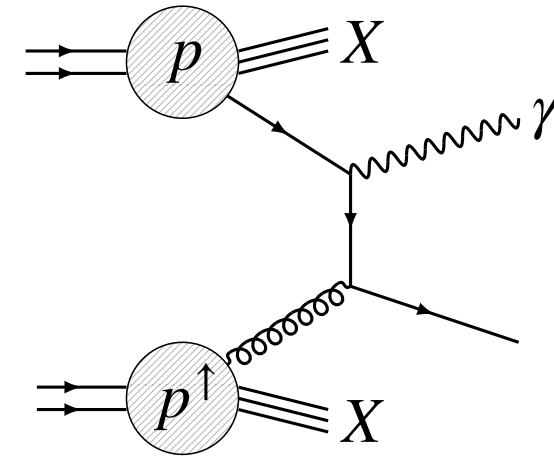


- **Initial state effect** のみ関与
- **Tri-gluon correlation function** (collinear twist-3 相関関数) が得られる  
← グルーオン Sivers に関連する
- 初測定は PHENIX ( PRL127(2021)162001 )
- sPHENIX の高統計データで  $A_N$  の更新を図る

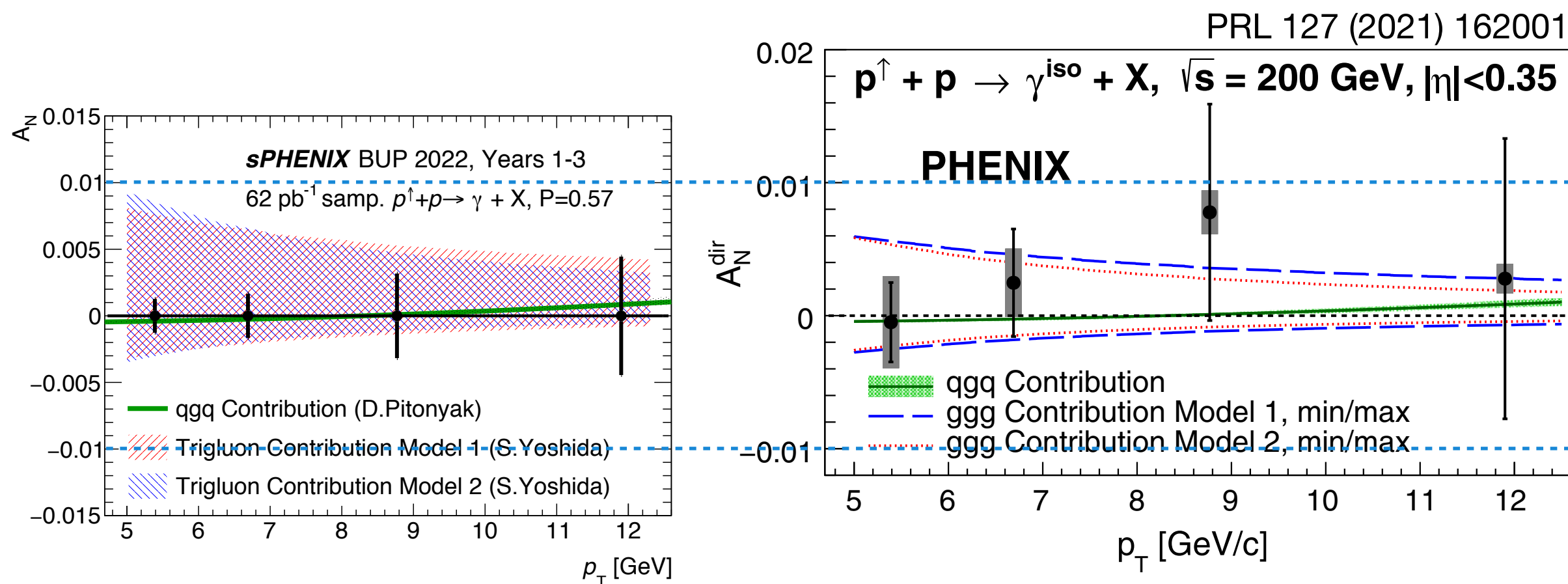




## 直接光子 $p^\uparrow + p \rightarrow \gamma + X$



- **Initial state effect** のみ関与
- **Tri-gluon correlation function** (collinear twist-3 相関関数) が得られる  
← グルーオン Sivers に関連する
- 初測定は PHENIX ( PRL127(2021)162001 )
- sPHENIX の高統計データで  $A_N$  の更新を図る

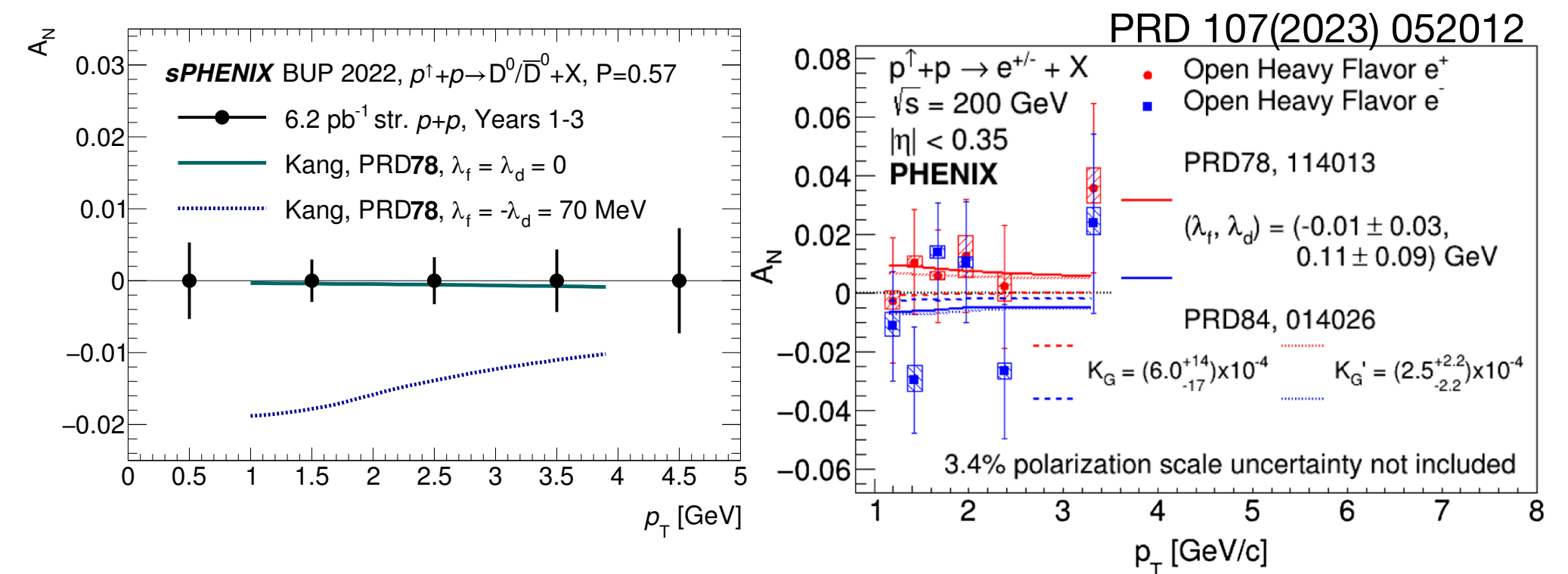


sPHENIX における直接光子  $A_N$  測定と PHENIX の測定

## Open heavy flavor $p^\uparrow + p \rightarrow e^{+/-} + X$

## Prompt $D^0$ $p^\uparrow + p \rightarrow D^0/\bar{D}^0 + X$

- **Tri-gluon correlation function** が得られる
- $D^0$  測定にはストリーミング読み出しによる高統計データが必要



sPHENIX における  $D^0/\bar{D}^0$   $A_N$  測定への統計誤差の見積もりと

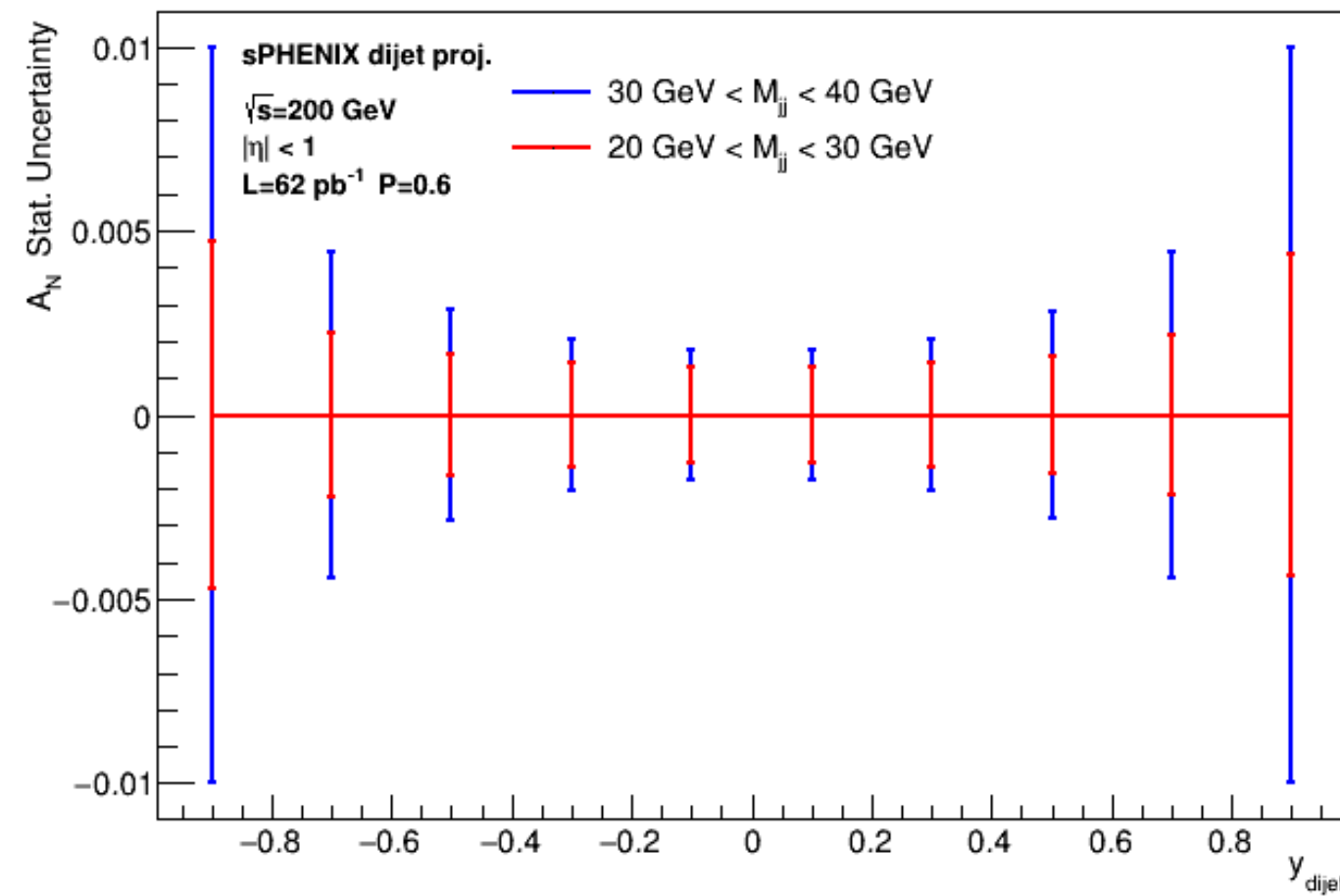
PHENIX の open heavy flavor  $A_N$  測定



# sPHENIX Cold-QCD プログラム

## Jet, Dijet, $\gamma$ -Jet

- Jet : mid-rapidity での  $A_N$  は初
- Dijet : パートの固有横運動量へアクセス可能
- $\gamma$ -Jet: グルーオン **Sivers** へアクセス可能



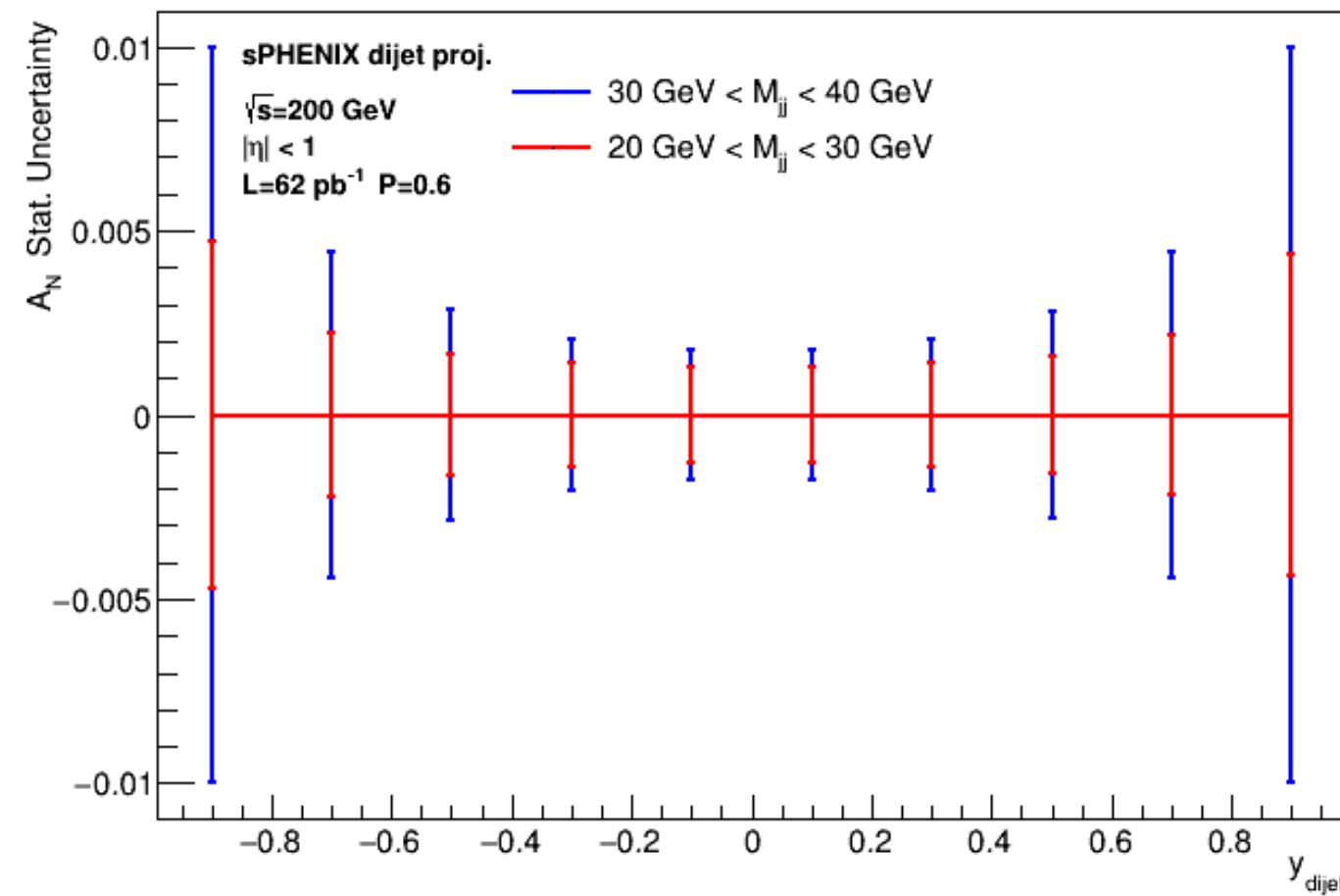
sPHENIX における Dijet  $A_N$  測定で  
予測される統計誤差



# sPHENIX Cold-QCD プログラム

## Jet, Dijet, $\gamma$ -Jet

- Jet : mid-rapidity での  $A_N$  は初
- Dijet : パートの固有横運動量へアクセス可能
- $\gamma$ -Jet: グルーオン Sivers へアクセス可能



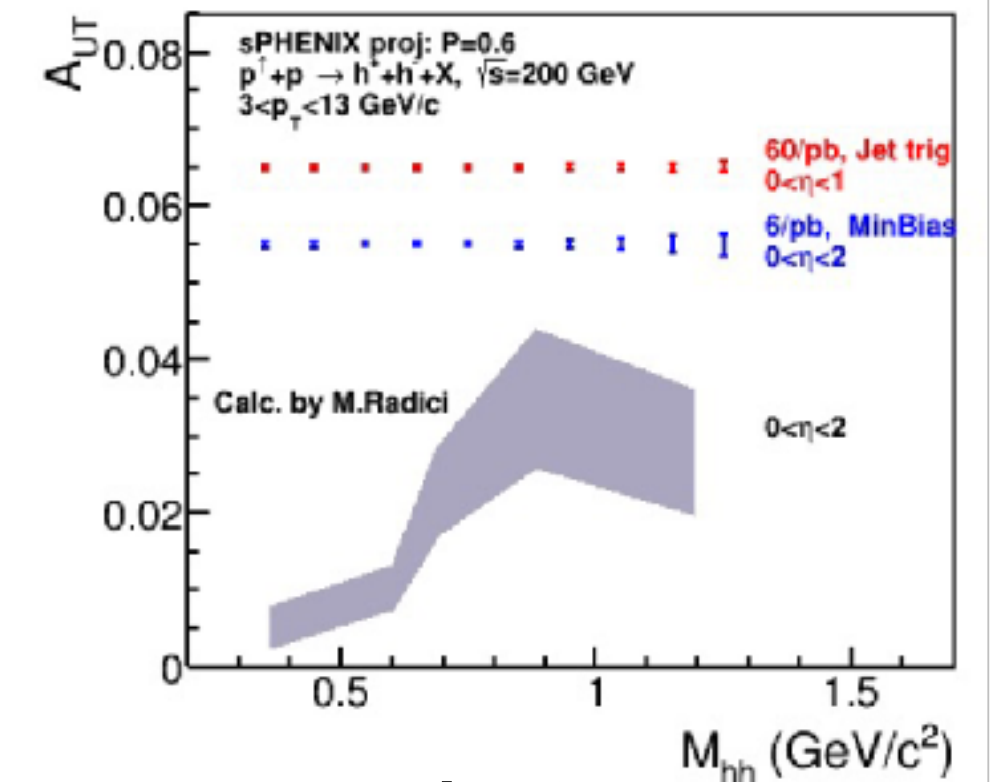
sPHENIX における Dijet  $A_N$  測定で  
予測される統計誤差

## Di-hadron $p^\uparrow + p \rightarrow h^+ + h^- + X$

Di-hadron TSSA  $A_{UT}$  から

Transversity と Interference

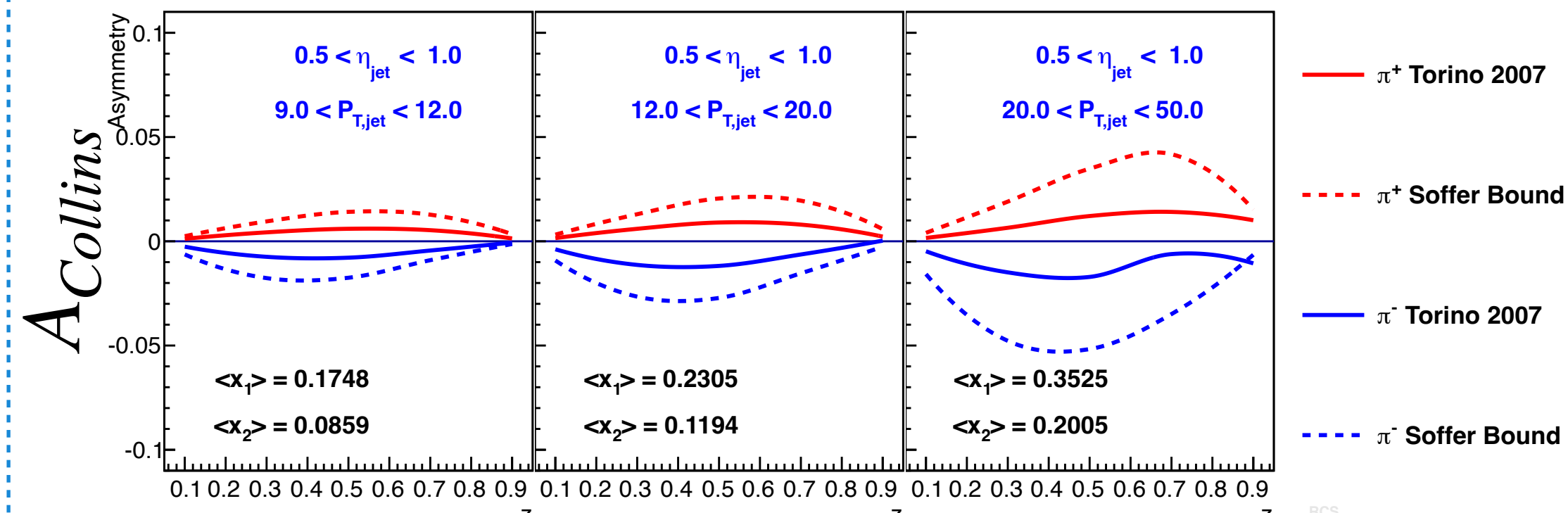
Fragmentation Function (FF) にアクセス可能



sPHENIX における di-hadron  
 $A_{UT}$  測定への統計誤差の見積もり

## Hadron in Jets $p^\uparrow + p \rightarrow \text{jet} + h + X$

Collins 非対称度が見られる  $\rightarrow$  Transversity & Collins 破砕関数

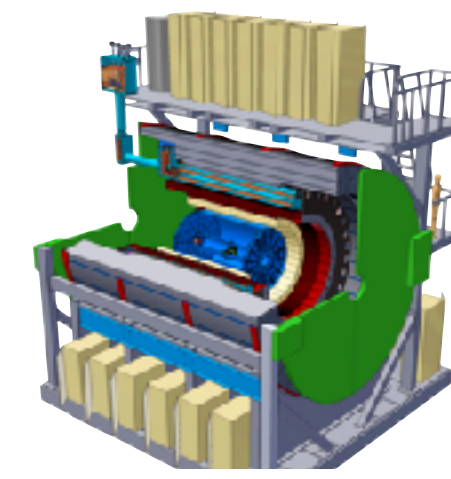


sPHENIX 測定範囲における  $A_{collins}$  の予測

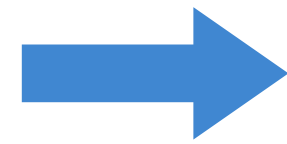




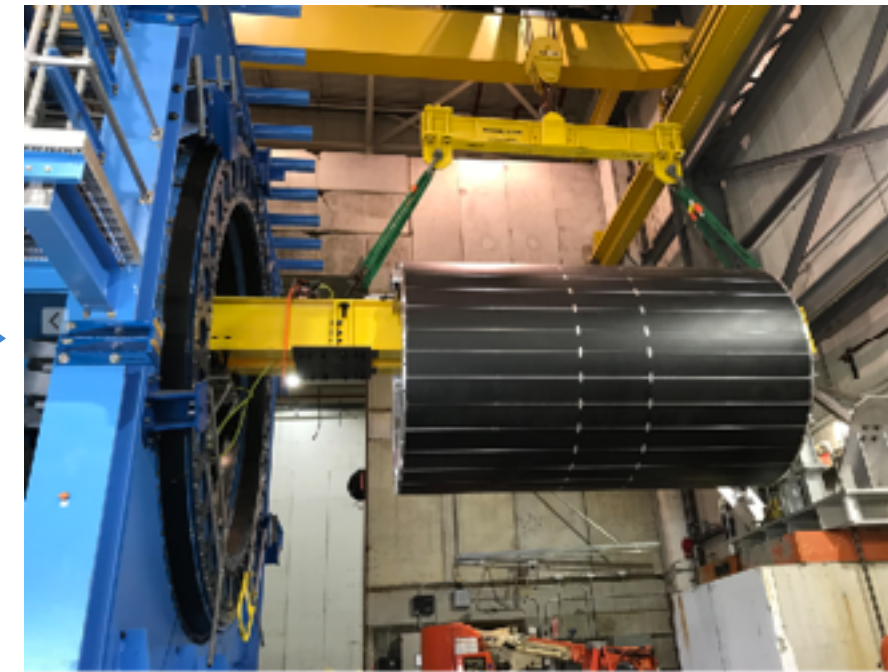
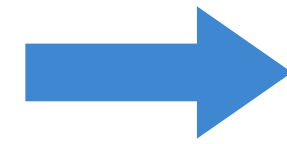
# Construction of sPHENIX



2021/10 マグネット



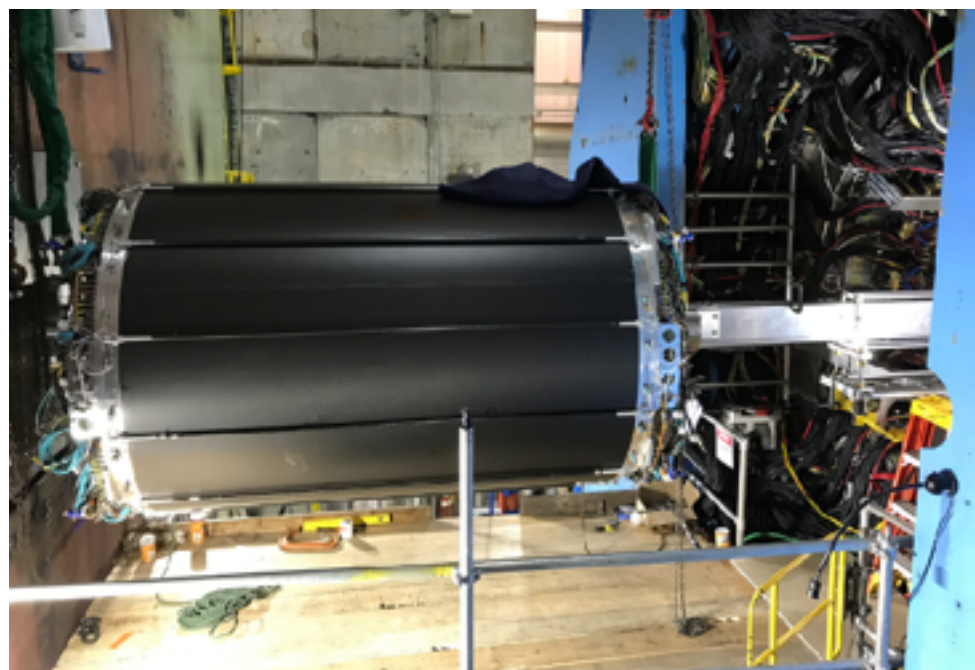
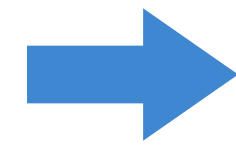
2022/05 Outer HCAL



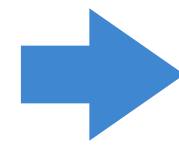
2022/06 Inner HCAL



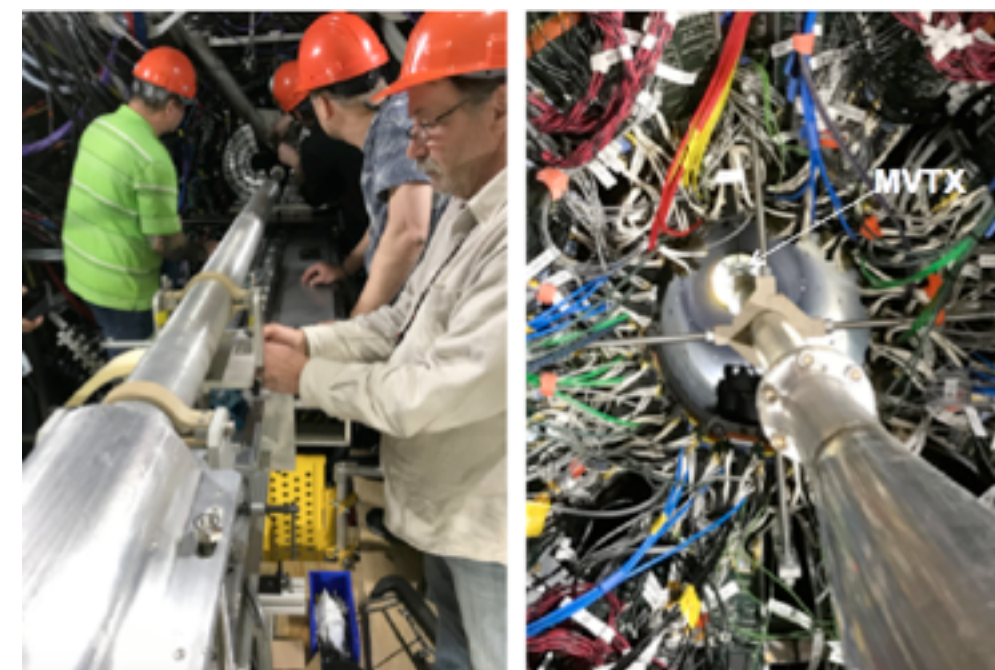
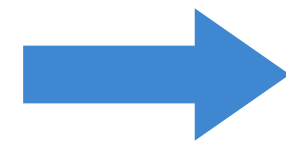
2022/11  
EMCAL



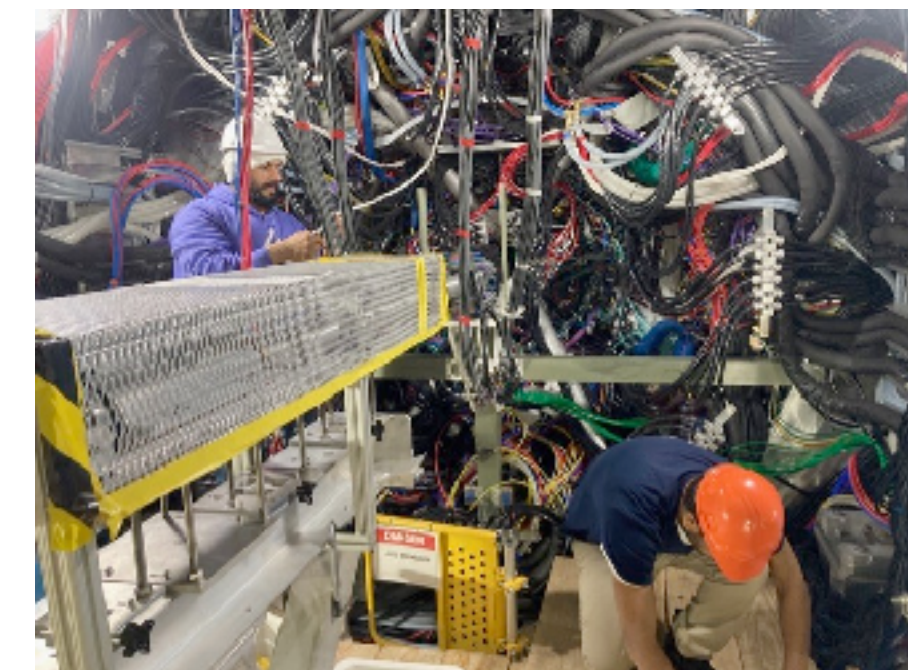
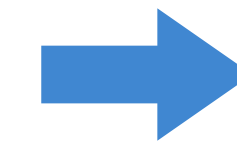
2023/01 TPC



2023/03 INTT



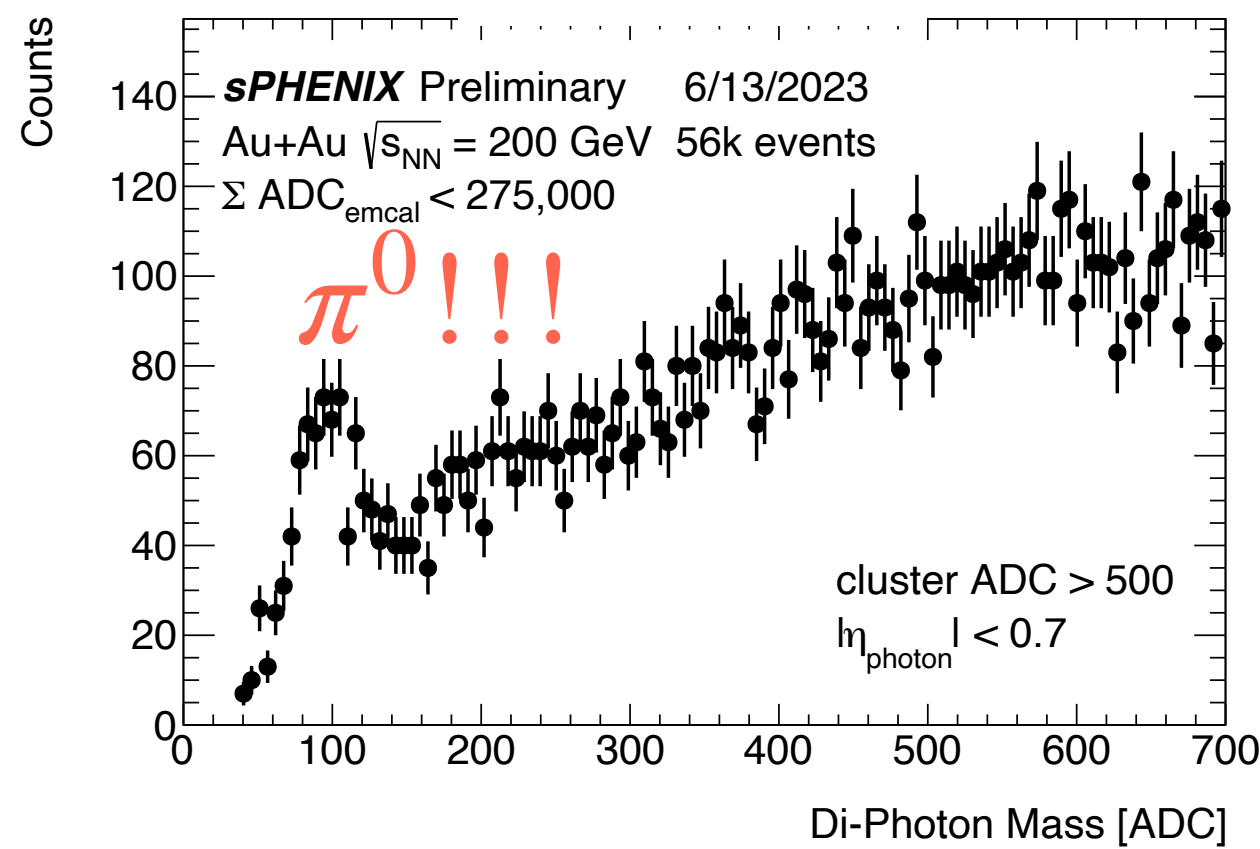
2023/03 MVTX



2023/04 MBD

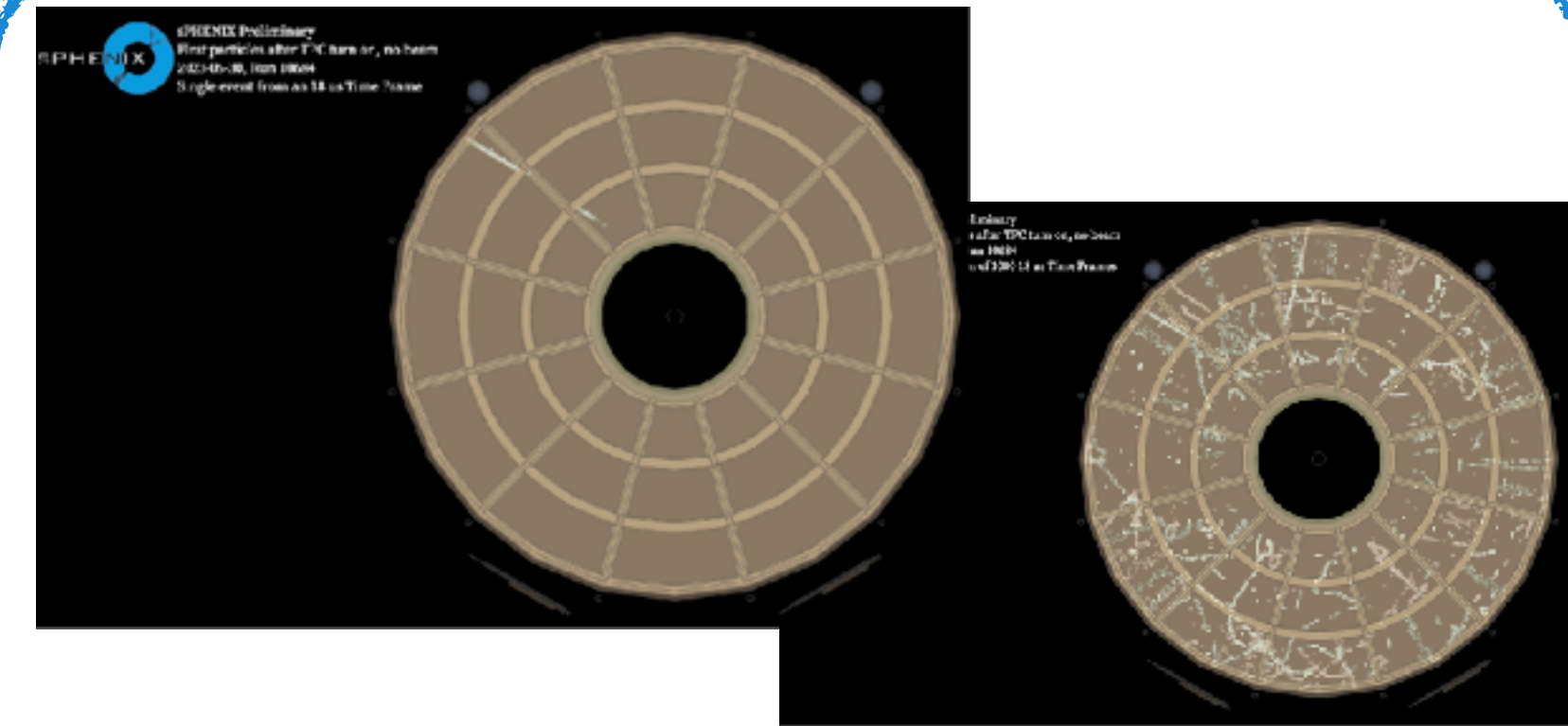


# EMcal

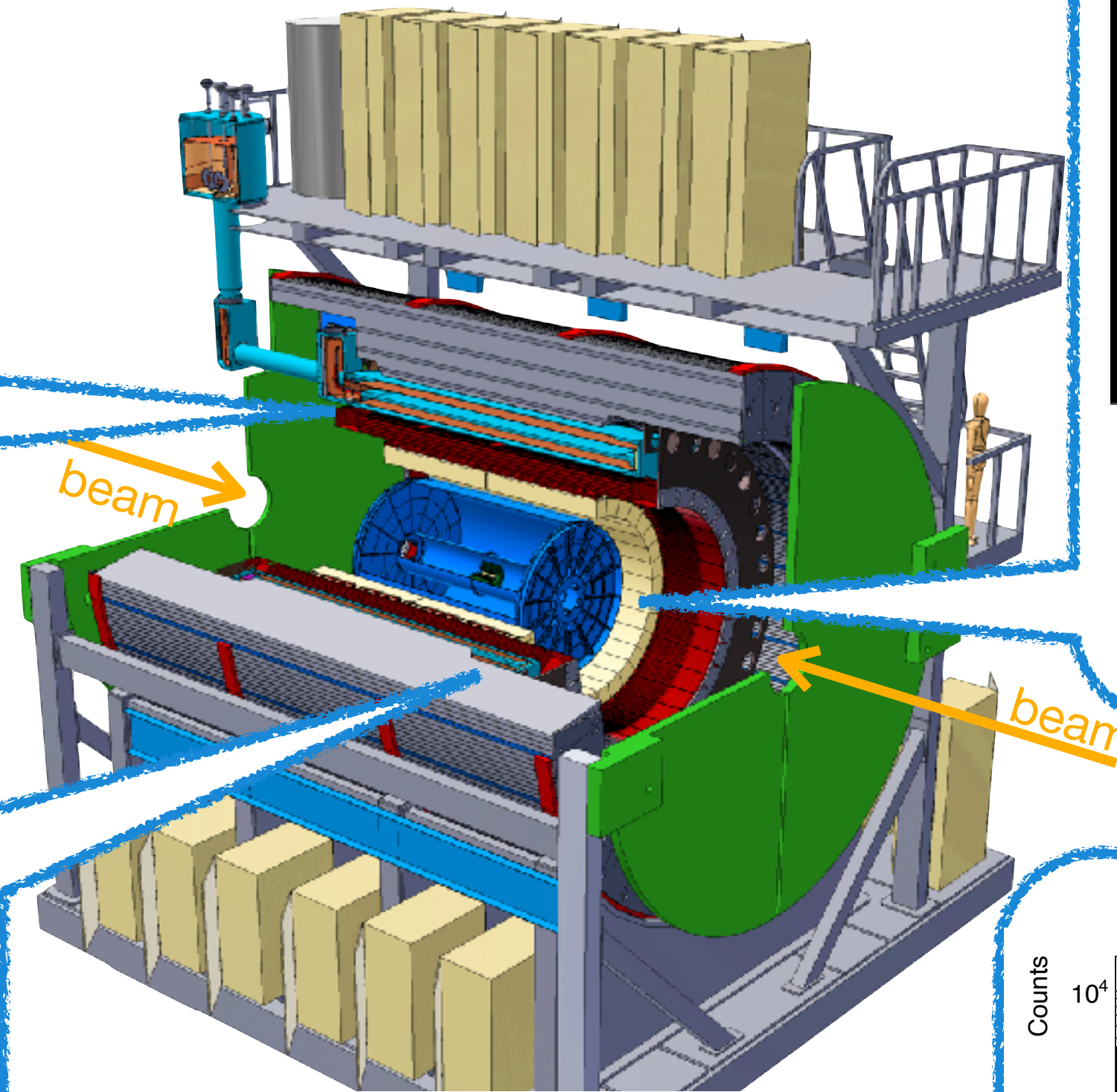


2 $\gamma$  不変質量分布に  $\pi^0$  崩壊によるピークを確認！

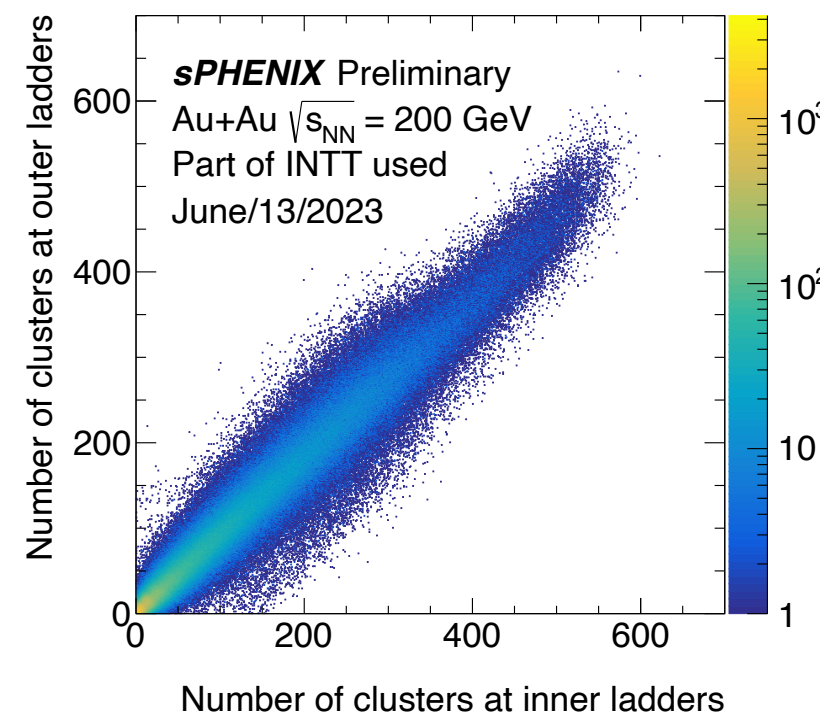
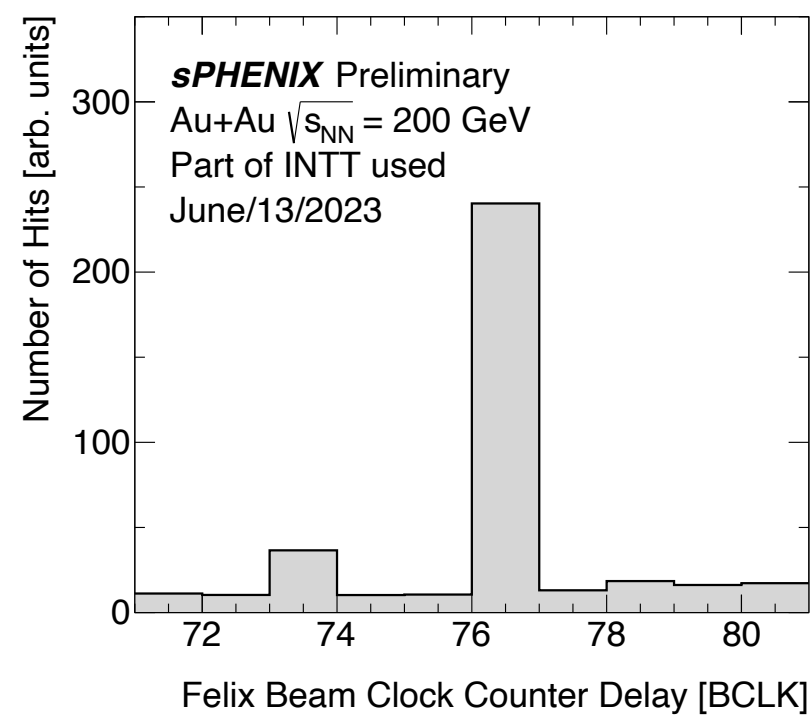
# Run23: コミッショニング TPC



宇宙線測定イベントディスプレイ  
左：1 宇宙線イベント  
右：多数のイベントの重ね書き

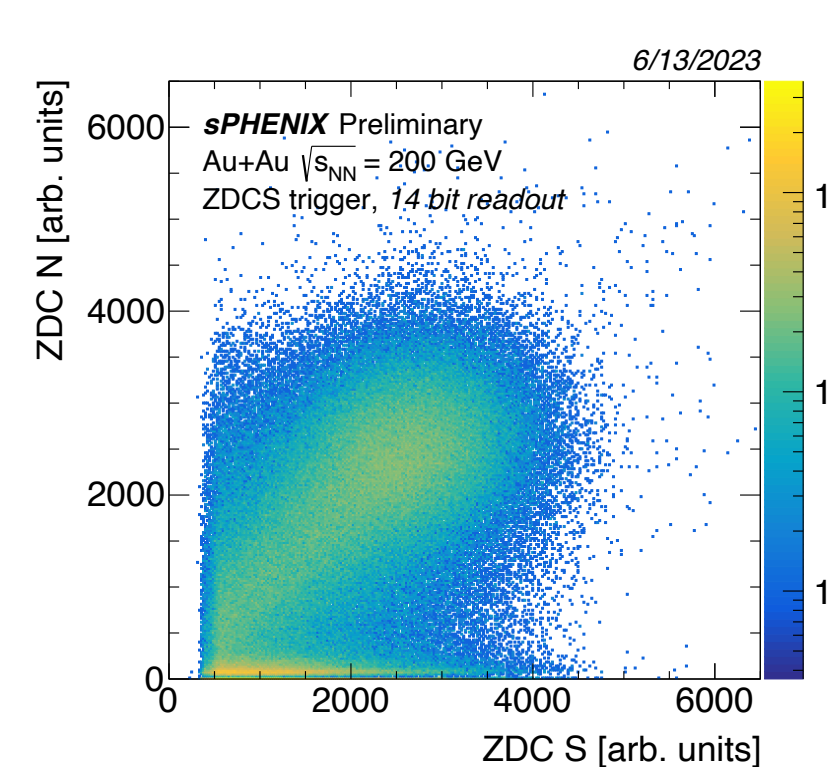
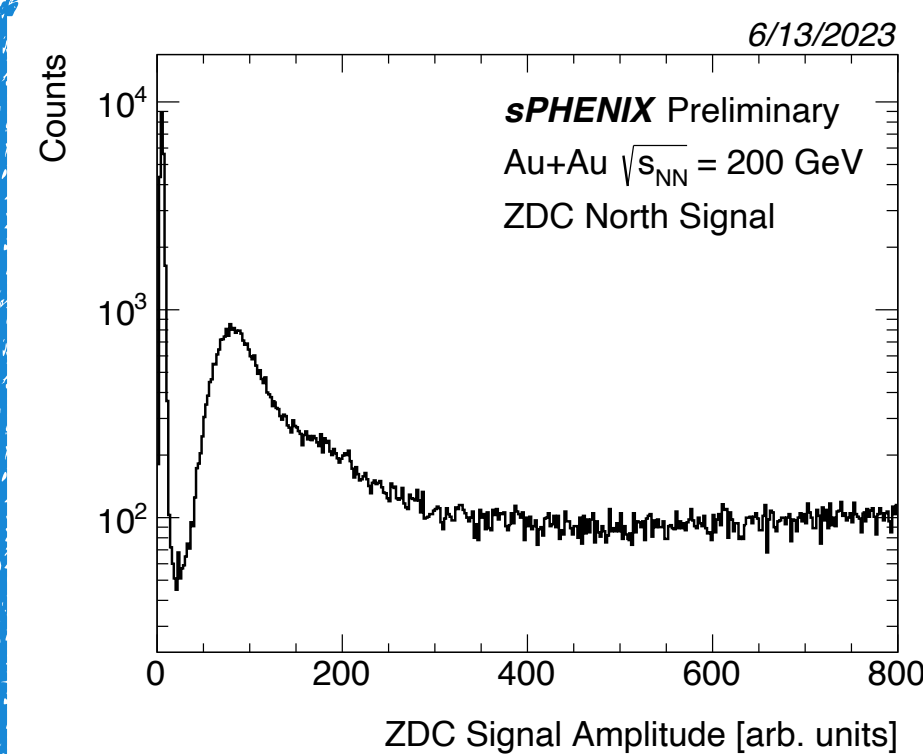


# INTT



左：Au-Au 衝突によるヒット分布のピークを確認！  
右：内外バレルのクラスター数相関

# ZDC

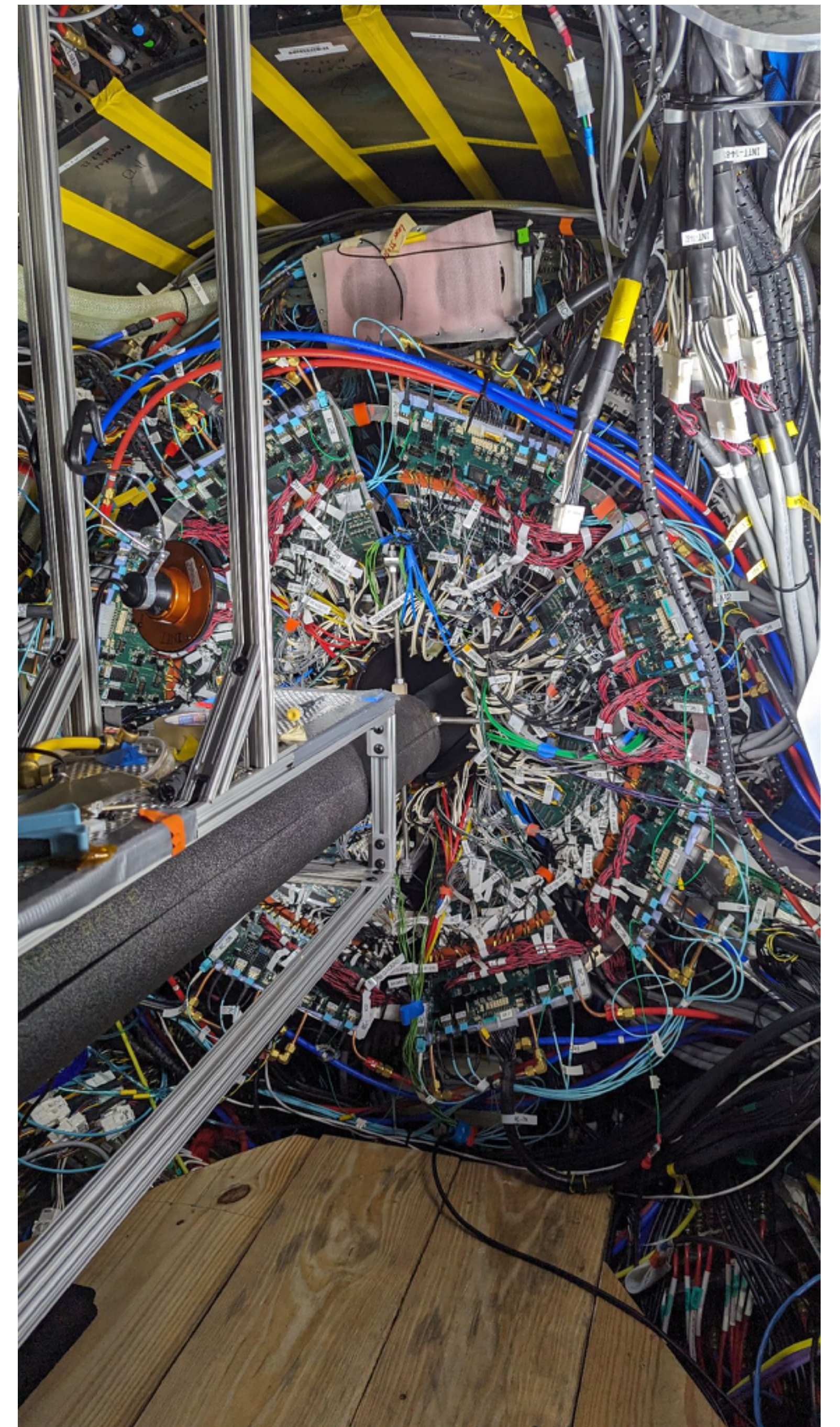


左：ADC 分布に中性子によるピークを確認！  
右：検出器南北（約 37 m 離れている）で相関



# 現状・今年の手定

- ✓ 2023/09 : Run23 終了
- ✓ ~2023/11 : TPC メンテナンスのため MVTX 本体取り出し、  
INTT 読み出し基板取り出し
- ✓ 2024/02 : TPC メンテナンス終了
- ✓ 2024/03/12 : INTT 基板再設置・検出器テスト完了
- ✓ 2024/03/13 : MVTX 再インストール作業開始
- 2024/03 : MBD, sEPD 再インストール
- 2024/04 : RHIC 稼働開始
- 2024/05 :  $p^{\uparrow} p^{\uparrow}$  衝突のデータ収集開始





- sPHENIX は BNL RHIC で QGP と Cold-QCD の実験による研究を行う。

- sPHENIX 検出器は

- Hcal, EMcal
- 超伝導ソレノイド磁石
- トラッキング：TPC, TPOT, INTT, MVTX
- 前方検出器：sEPD, MBD, ZDC

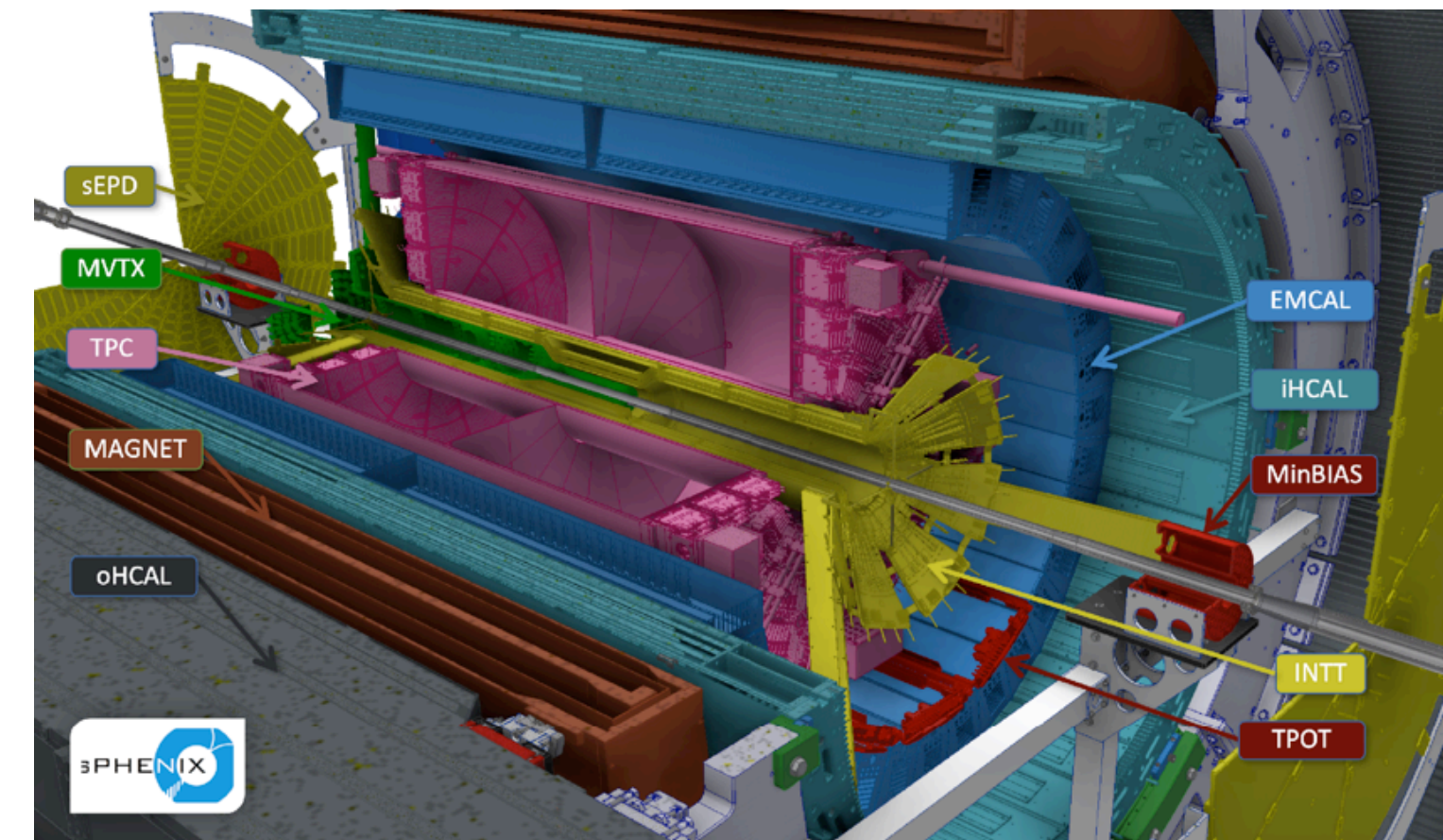
からなる。

- 2024 年は  $p^\uparrow + p^\uparrow$  のデータ収集と Au + Au を用いたコミッションングを行う。 $p^\uparrow + p^\uparrow$  から

- Tri-gluon correlator
- Sivers TMD PDF, Transversity PDF
- Collins FF, Interference FF
- 等など

の研究を行う。

- 現在 Run24 に向けた準備を行っている



**STAY TUNED**