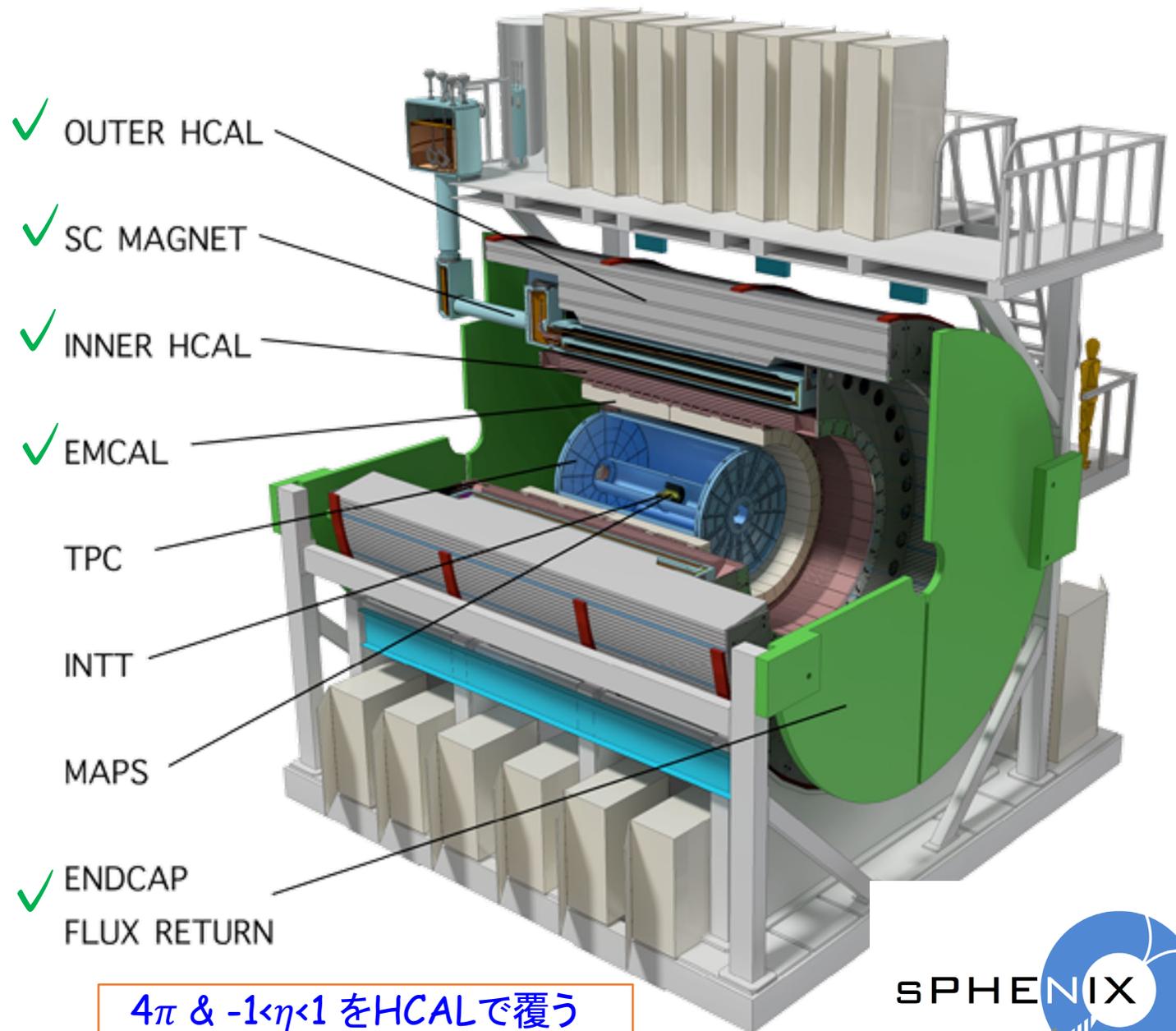
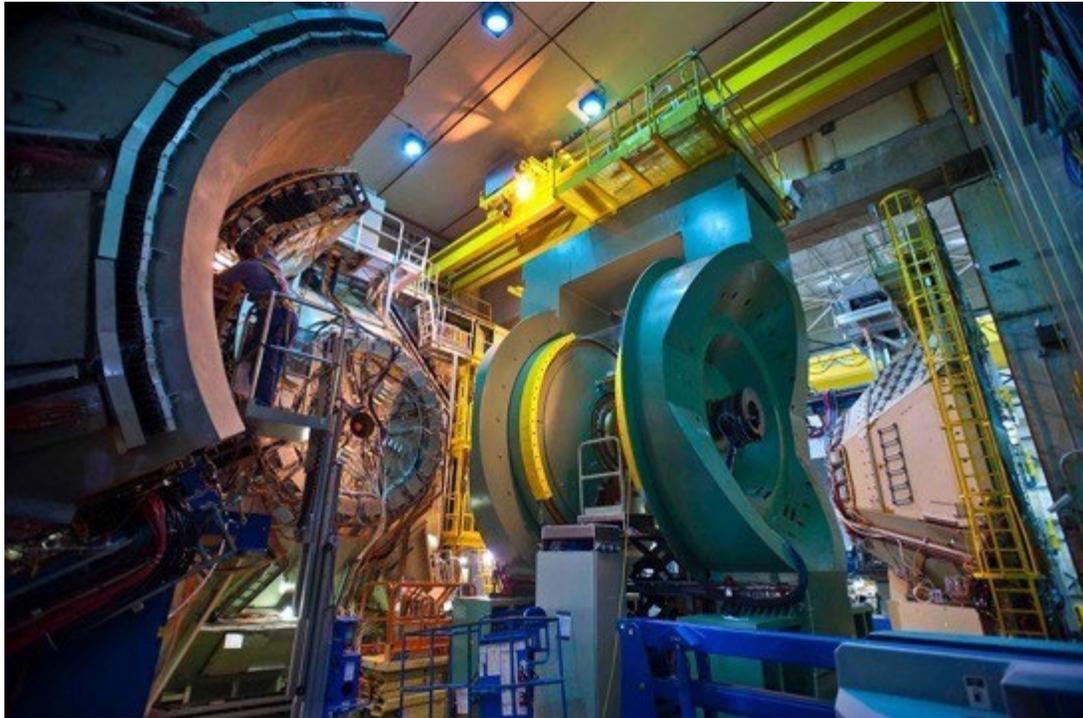


# sPHENIX実験と INTT検出器



4 $\pi$  &  $-1 < \eta < 1$  をHCALで覆う  
Jetに特化した新検出器

# RHIC-PHENIXからsPHENIX実験へ



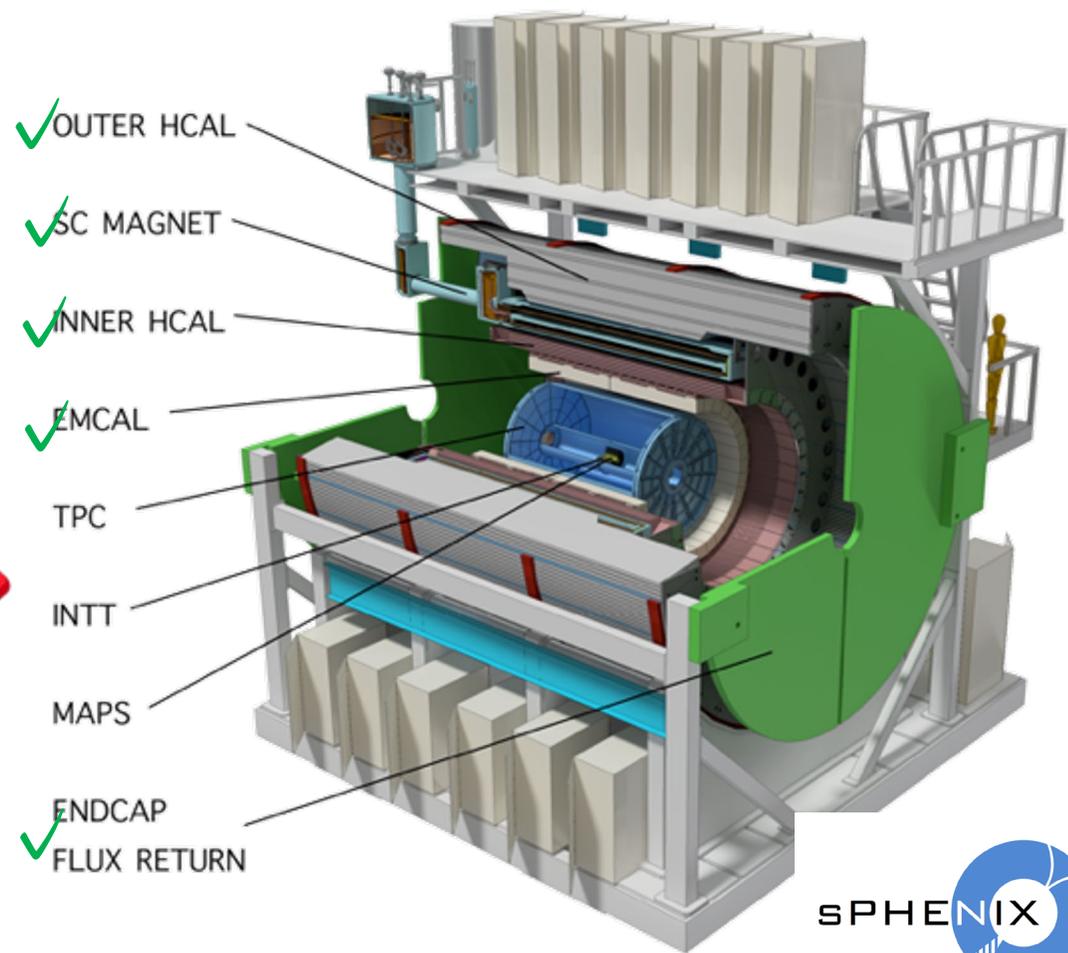
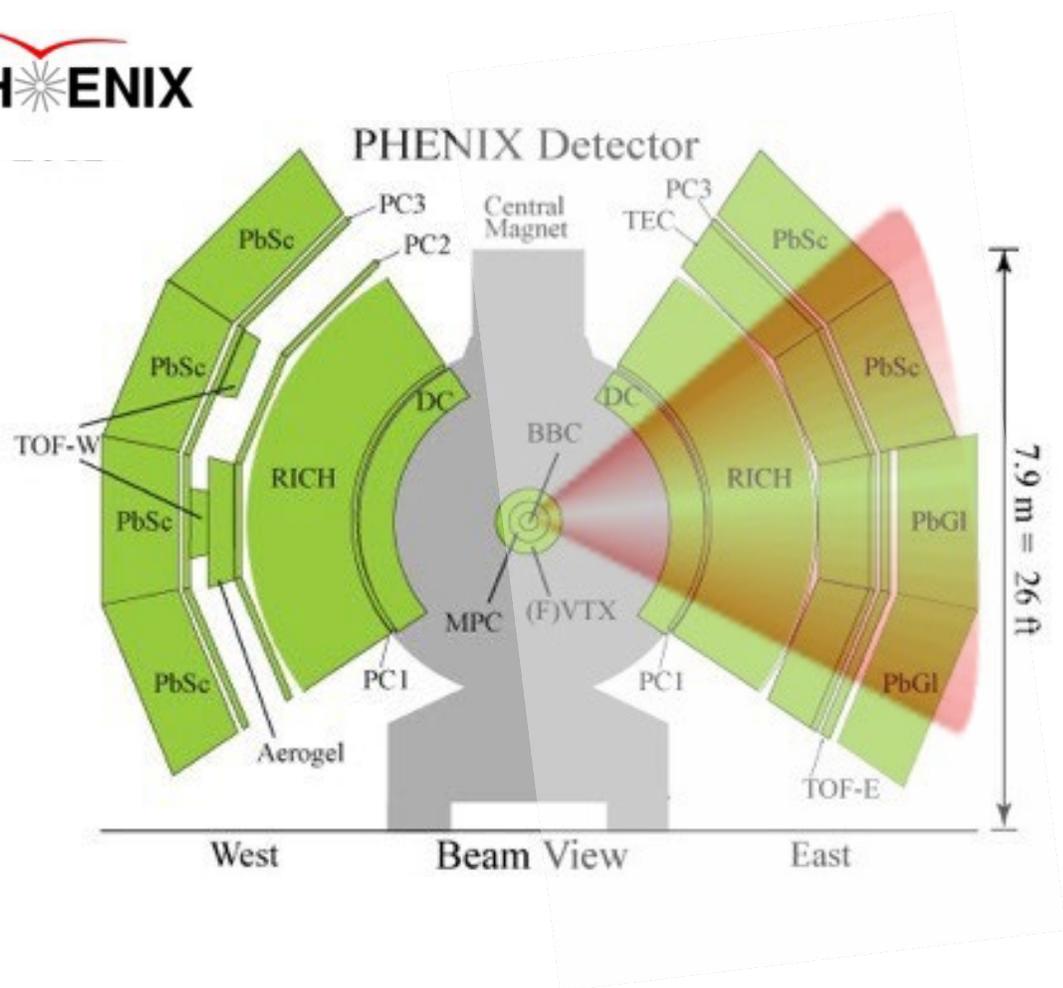
PHENIX検出器(2000 ~ 2016年)



sPHENIX検出器(2023 ~ 2025+?)

# PHENIXからsPHENIX実験へ

PHENIX



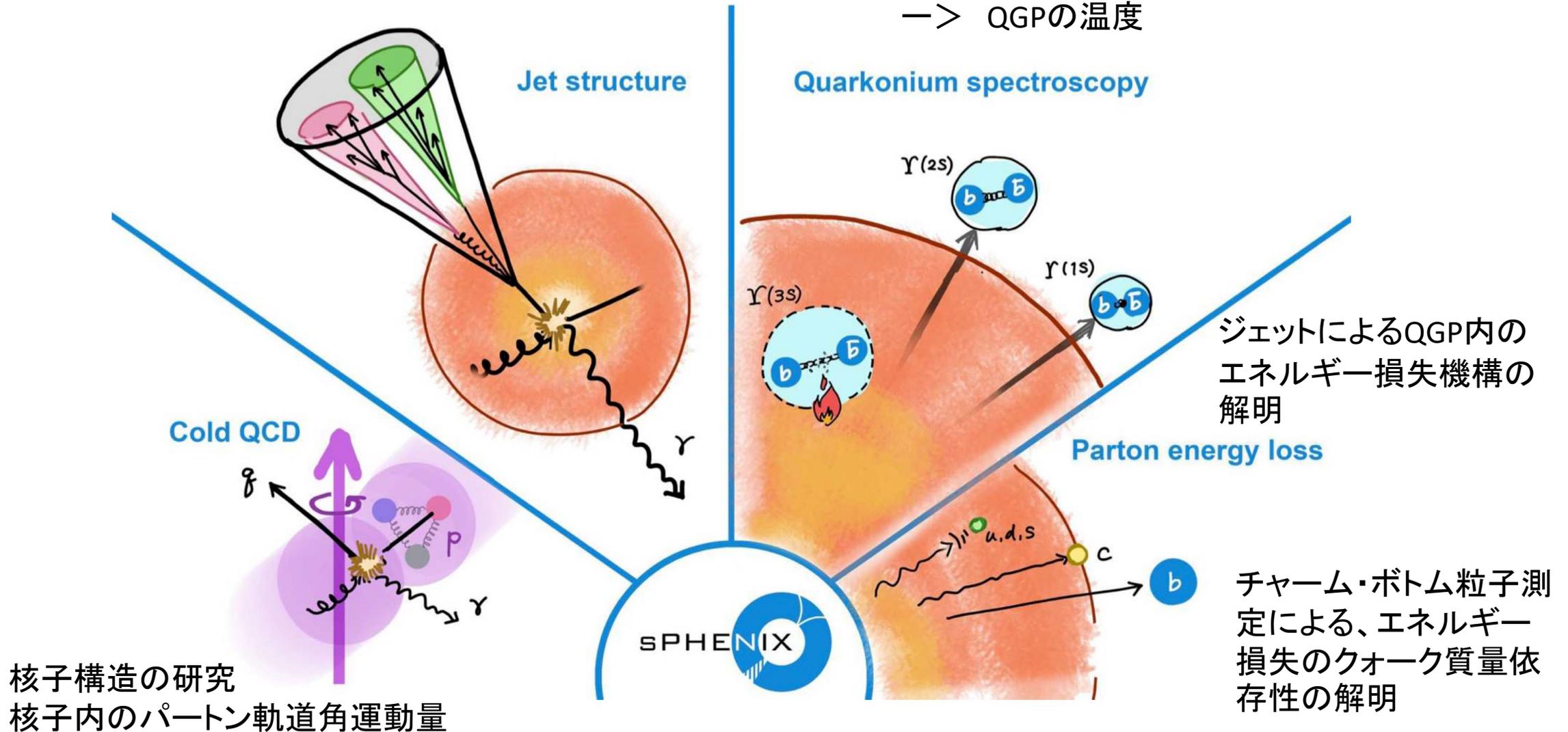
Jetの測定には検出器の覆う範囲が乏しい

全方位角を覆いJetの測定に理想的な検出器

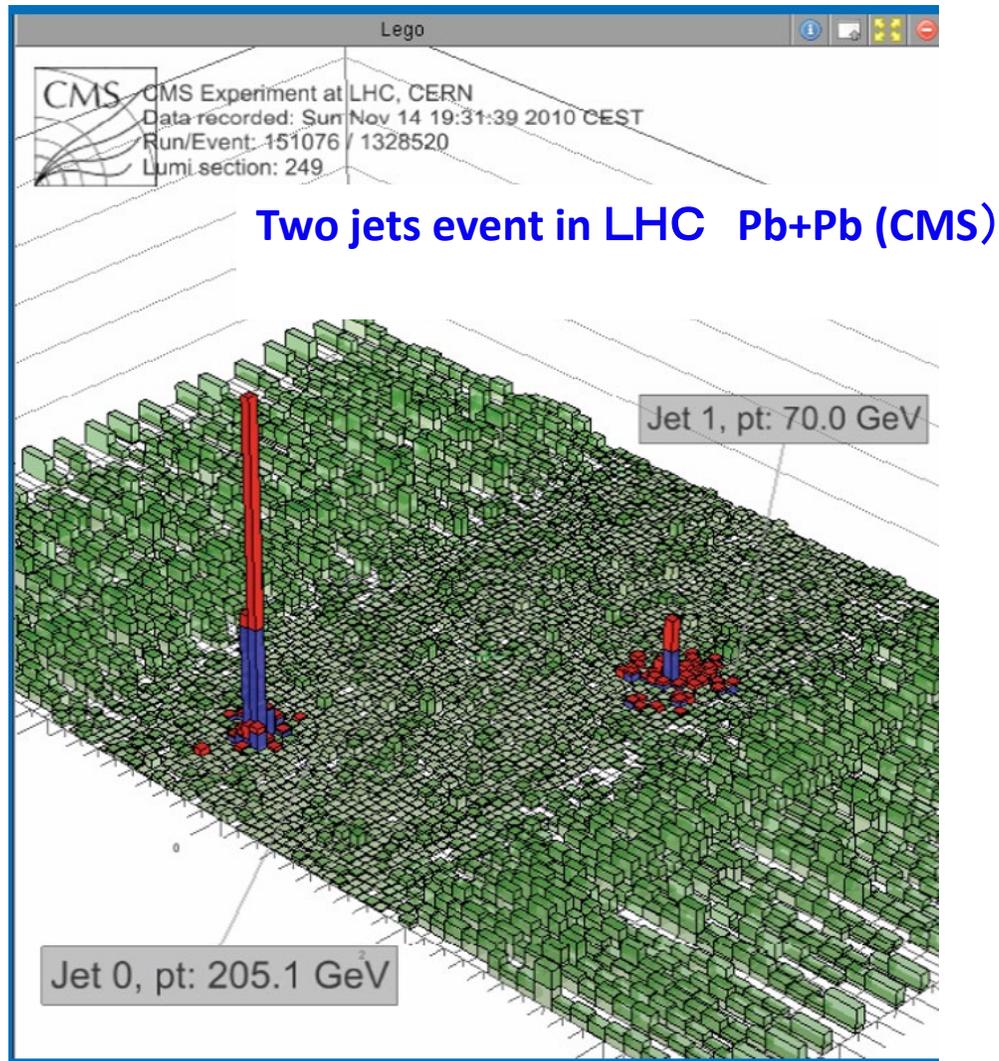
# sPHENIXの物理の目標

ジェット構造の測定 → QGP物質の反応の研究

Upsilon粒子のQGP内での抑制の測定  
→ QGPの温度

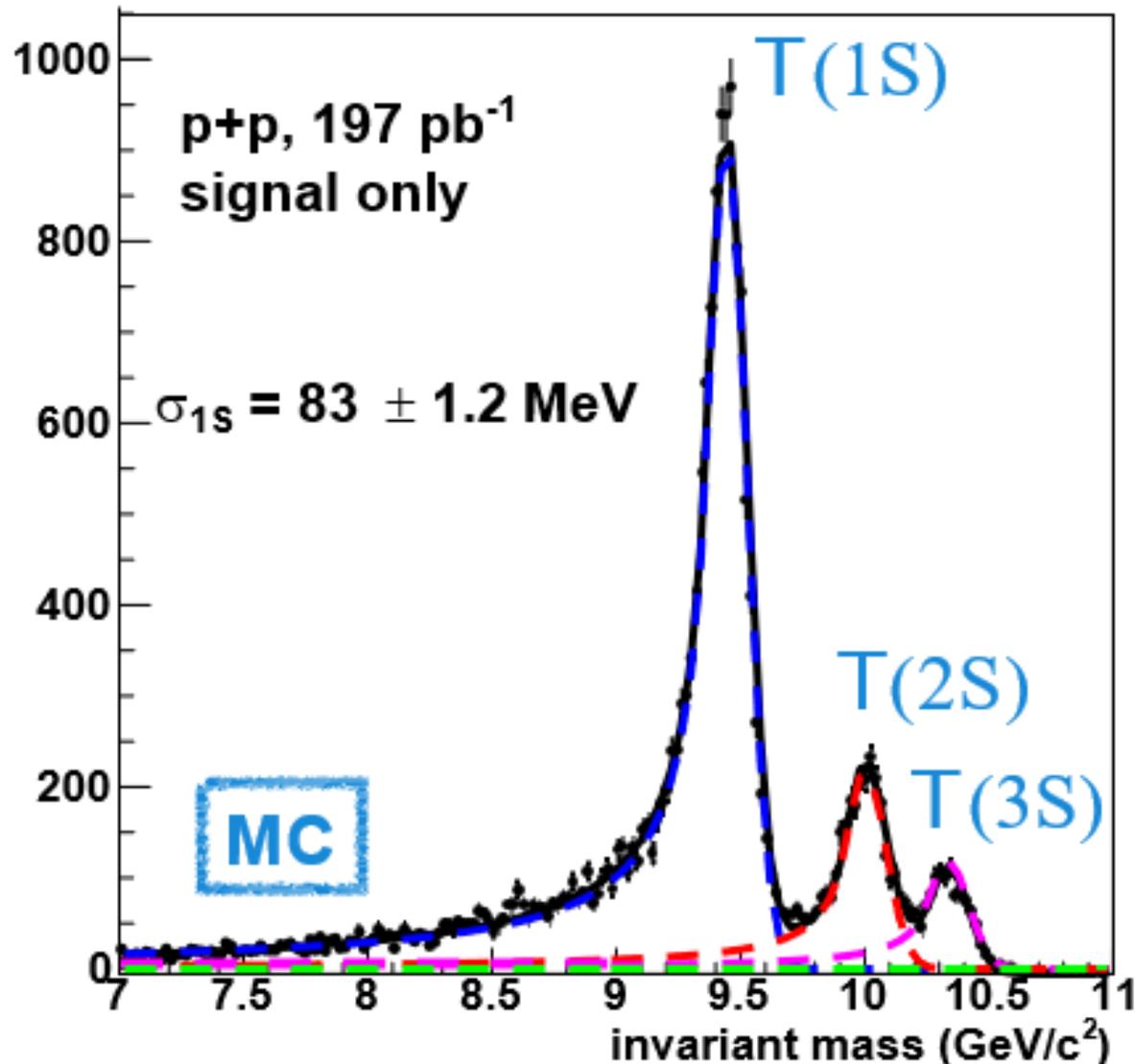


# 物理目標: ハドロン・ジェットの測定



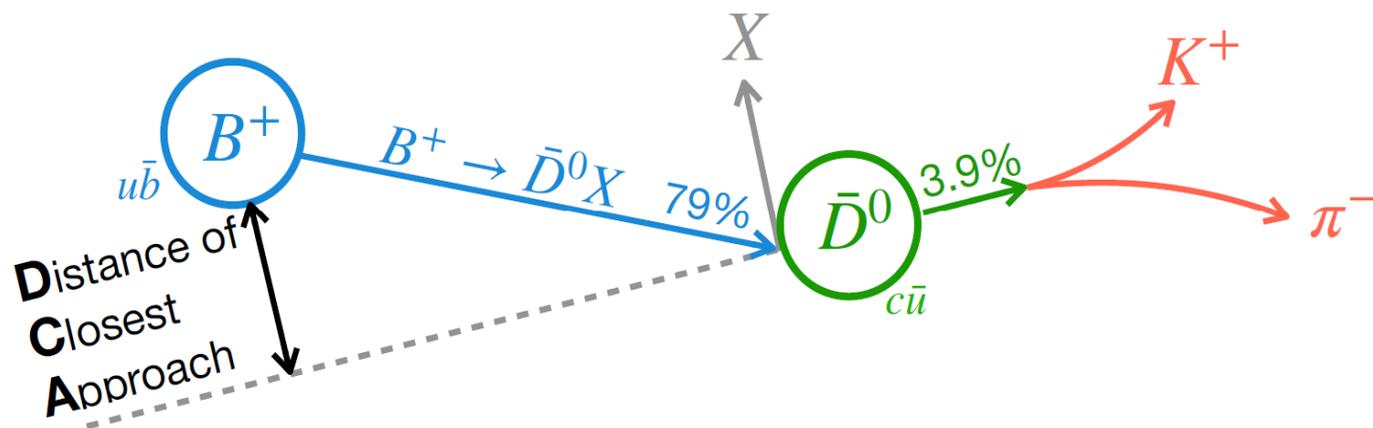
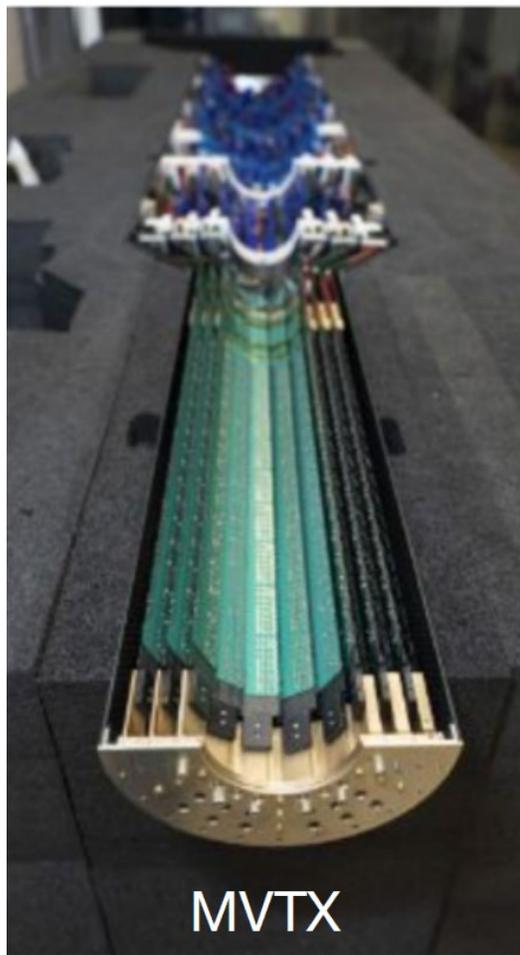
- 高エネルギーのクォーク・グルーオンは、多数のハドロンに分解し、ハドロン・ジェットとして観測される。
- LHCでの鉛+鉛衝突実験でジェットが直接測定され、ジェットがQGPの性質の研究のために非常に有用なことがわかった
- しかし、90年台に設計・建設されたRHICの測定器は、ジェット測定のために設計されていなかった。
- ジェット測定のための新測定器の建設→ sPHENIX

# 物理目標: ウプシロン抑制の測定:→ QGPの温度



- $b$ クォークと反 $b$ クォークの束縛状態であるウプシロン粒子を高精度・高統計で測定する。
- 高温のQGP内では、 $b\bar{b}$ 束縛状態が壊れるので、ウプシロン粒子の生成量が減少する。
- 3つあるウプシロンは、束縛エネルギーが深いほどQGP効果により抑制されにくい。
- 3つのウプシロンの生成量の測定から、QGPの温度を推定できる。

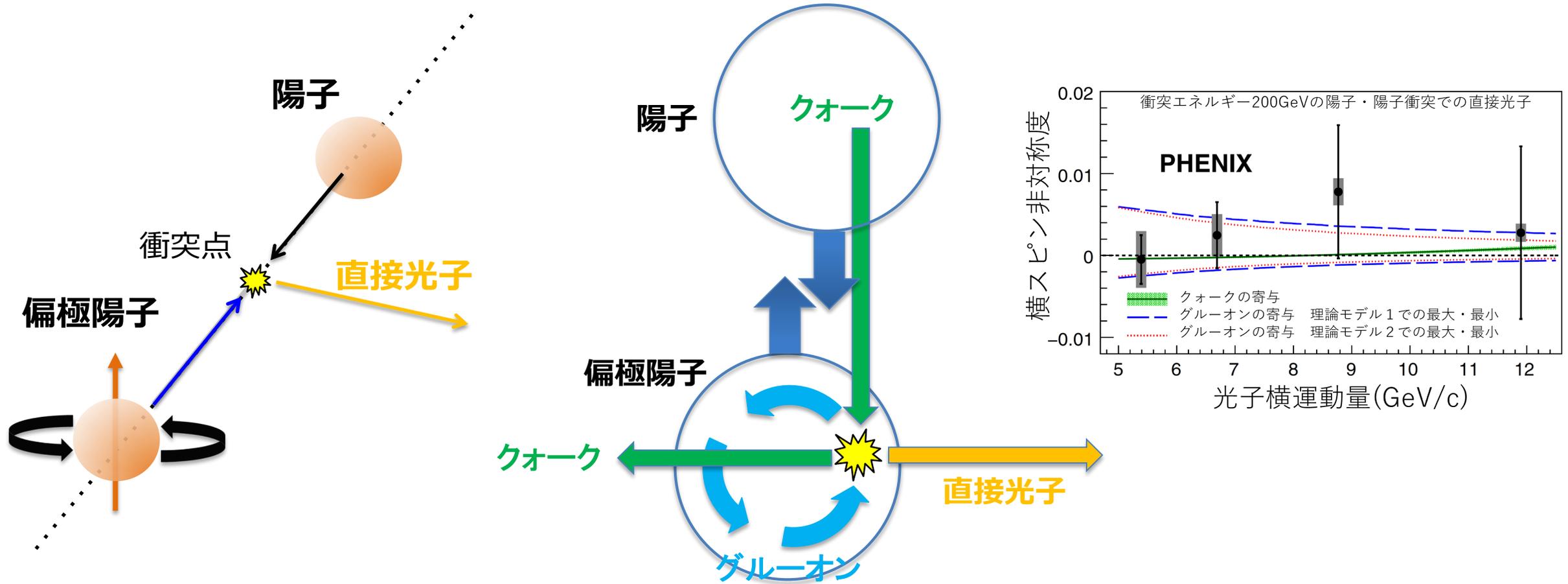
# 物理目標: 重いクォーク(チャーム・ボトム)の測定



チャーム・クォークやボトム・クォークを含むハドロンは崩壊するまでに数100ミクロンを飛行する。シリコン飛跡測定器(MVTX, INTT)でこの飛行距離を測定することで、チャームやボトムを含むハドロンを測定できる。

これから、QGP内のエネルギー損失のクォーク質量依存性などが解明できる。

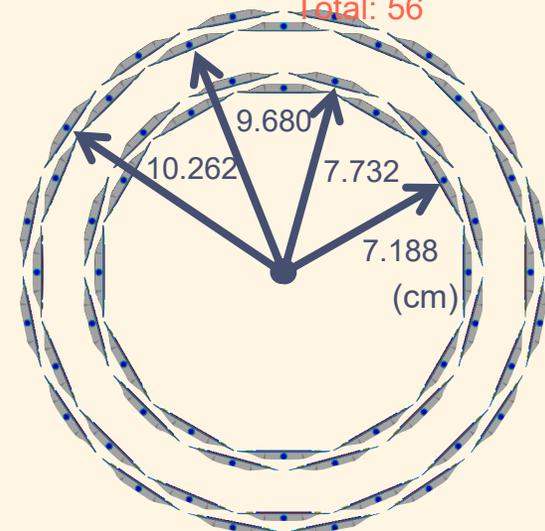
# 物理目標: 核子のスピン構造の研究



- 直接光子は、「偏極陽子内のグルーオン」と「陽子内のクォーク」の衝突で、グルーオンが光子に変わることで作られる。直接光子の「横スピン非対称度」 $A_N$ から、偏極陽子内のグルーオンの回転運動の強さがわかる。
- sPHENIXではPHENIXの4-5倍の精度で直接光子の $A_N$ を測定できる。

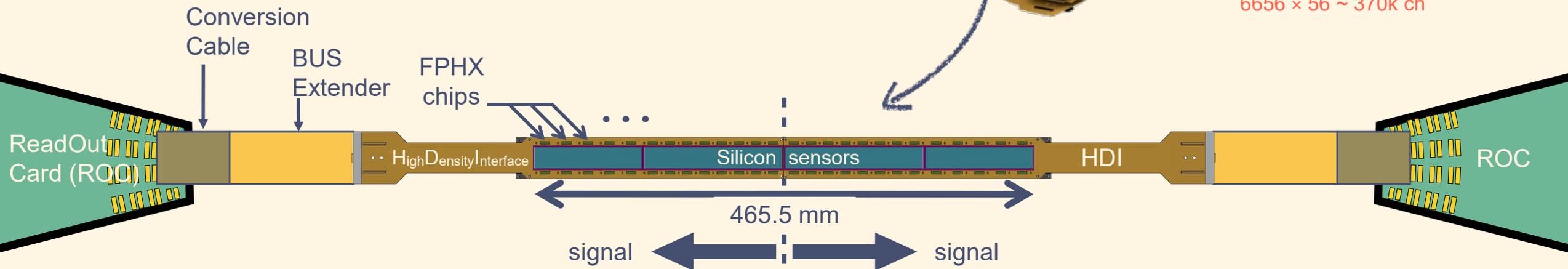
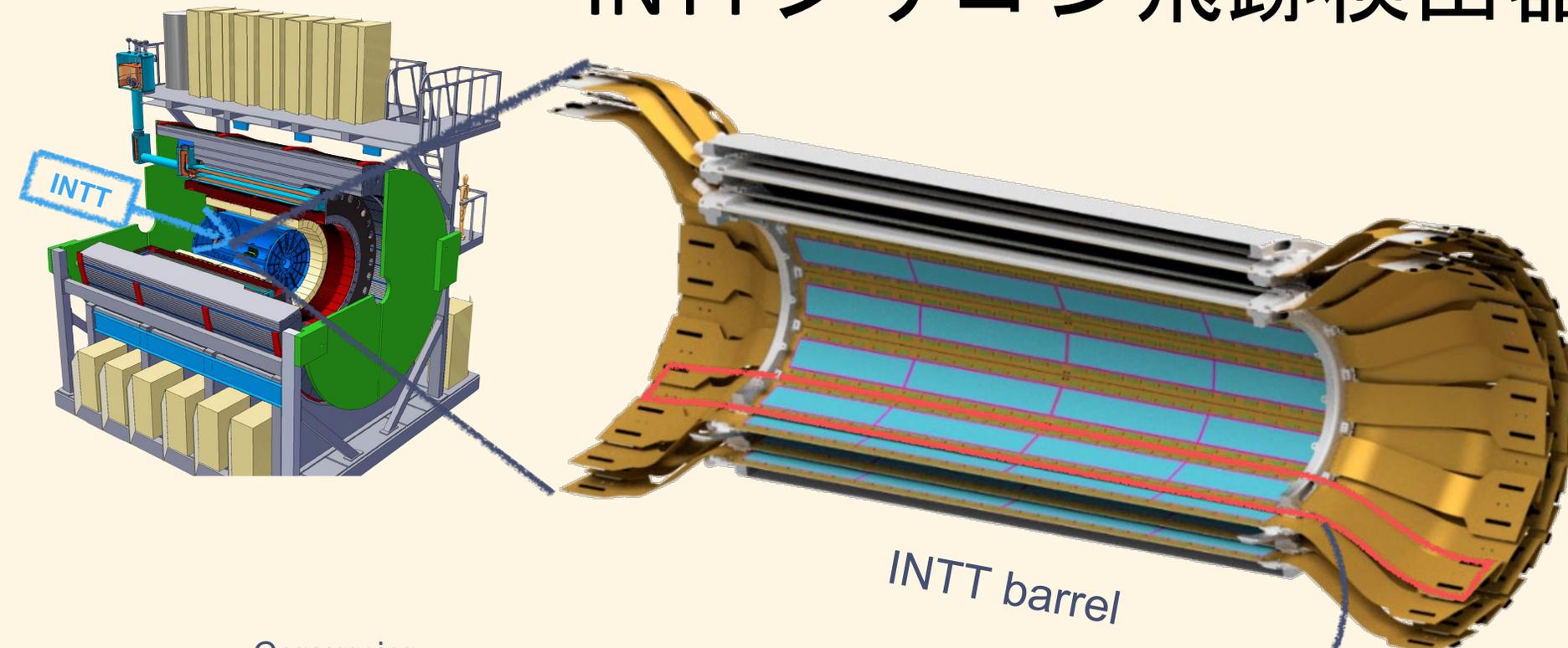
# INTTシリコン飛跡検出器

Inner ladders: 12 × 2  
 Outer ladders: 16 × 2  
 Total: 56

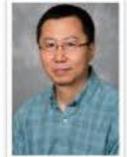


Cross-section of the INTT barrel

$128 \times 26 \times 2 = 6656 \text{ ch/ladder}$   
 $6656 \times 56 \sim 370\text{k ch}$



# INTT Collaboration



Wei Xie



Rachid Nouicer



Dan Cacace



Itaru Nakagawa



Robert Pisani



Yui Ishigaki



Raul Cecato



Stephen Boose



Megumi Naruki



Natsuki Tomida



Ryotaro Koike



Joseph Bertaux



Jaein Hwang



Lian-Sheng Tsai



Jenny Huang



Byungsik Hong



Chia-Ming Kuo



Shan-Yu Chen



Rong-Shyang Lu



Kai-Yu Cheng



Wei-Che Tang



Ou-Wei Cheng



Cheng-Wei Shih



Hinako Tsujibata



Mai Kano



Manami Fujiwara



Mahiro Ikemoto



Nao Morimoto



Yasuyuki Akiba



Takashi Hachiya



Maya Shimomura



Genki Nukazuka



Akitomo Enokizono



Shoichi Hasegawa



Yuko Sekiguchi



Ryota Shishikura



Tomoya Kato



Takahiro Kikuchi



Tomoki Harada



Hayato Yanagawa



Yusuke Fujino



Itsuka Omae



Takashi Kondo

## Rikkyo Univ.

Yusuke Fujino,  
Tomoki Harada,  
Tomoya Kato,  
Takahiro Kikuchi,  
Ryota Shishikura

## Korea Univ.

Byungsik Hong,  
Jaein Hwang

## National Taiwan Univ.

Rong-Shyang Lu, Jenny Huang,  
Lian-Sheng Tsai, Ou-Wei Cheng

## National Central Univ.

Shan-Yu Chen,  
Kai-Yu Cheng, Chia-Ming Kuo,  
Cheng-Wei Shih, Wei-Che Tang,

## Kyoto Univ.

Ryotaro Koike,  
Megumi Naruki, Natsuki Tomida

## BNL

Stephen Boose, Daniel Cacace,  
Raul Cecato, Rachid Nouicer,  
Robert Pisani

## Purdue Univ.

Joseph Bertaux,  
Wei Xie,

## TIRI

Takashi Kondo

## JAEA

Shoichi Hasegawa

## RIKEN, RBRC

Yasuyuki Akiba, Akitomo Enokizono,  
Itaru Nakagawa, Genki Nukazuka, Yuko Sekiguchi

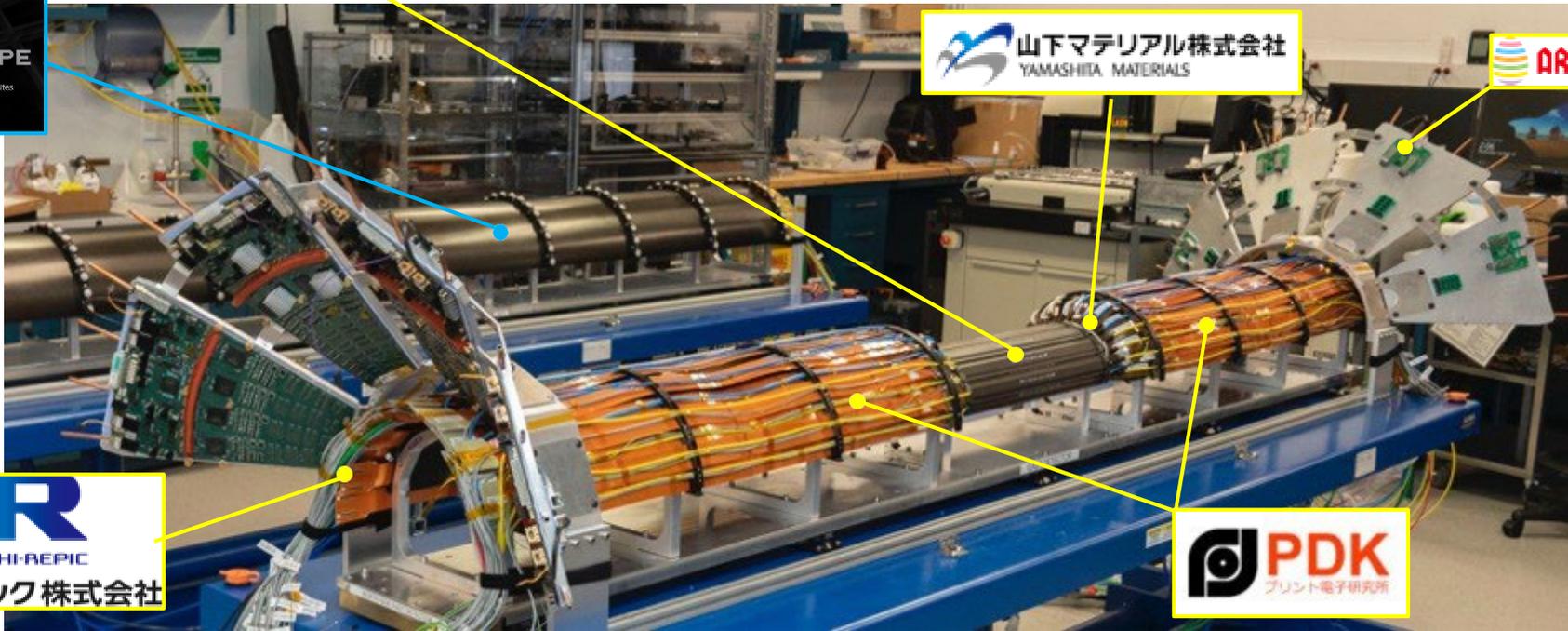
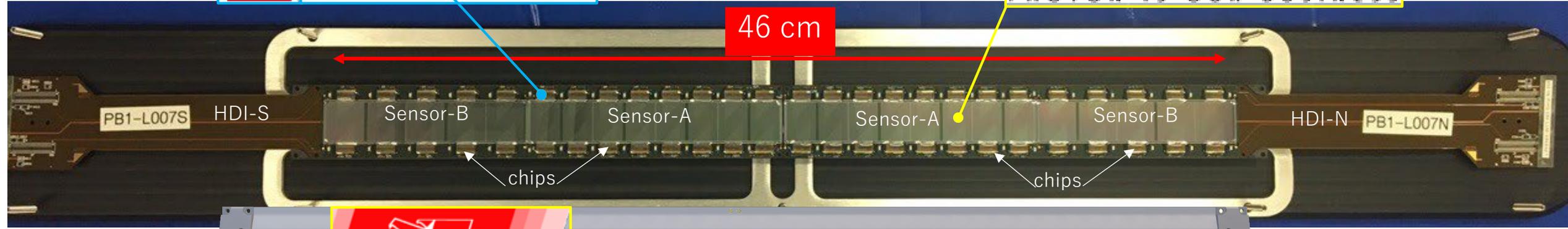
## Nara Women's Univ.

Manami Fujiwara, Takashi Hachiya,  
Mahiro Ikemoto, Yui Ishigaki,  
Mai Kano, Nao Morimoto, Itsuka Omae,  
Maya Shimomura, Hinako Tsujibata

# INTTバレル各種パーツの量産



46 cm



# マテリアルの量産@日本

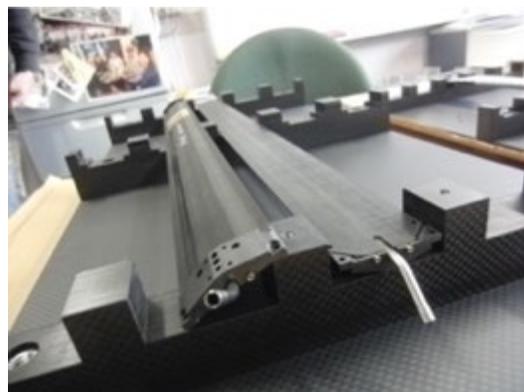


奈良女子大学



理研

カーボンファイバー裏打ち板



ASUKA Co., Ltd.



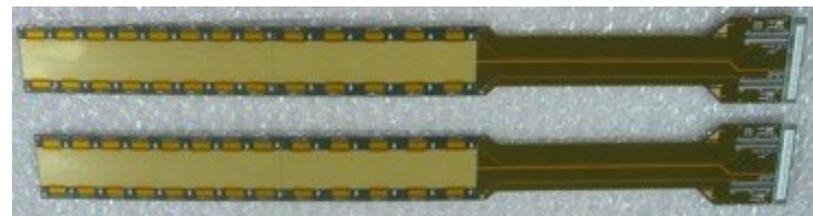
シリコンセンサー



1.2mバスケーブル



読み出しケーブル



HAMAMATSU

HAMAMATSU

ビームクロック回路



アルス株式会社



変換ケーブル

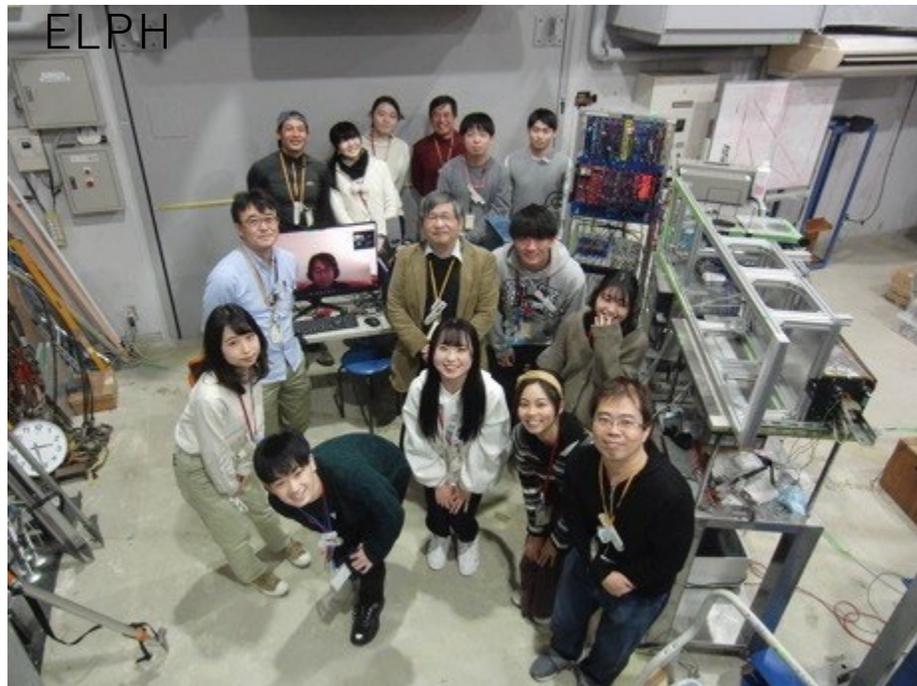
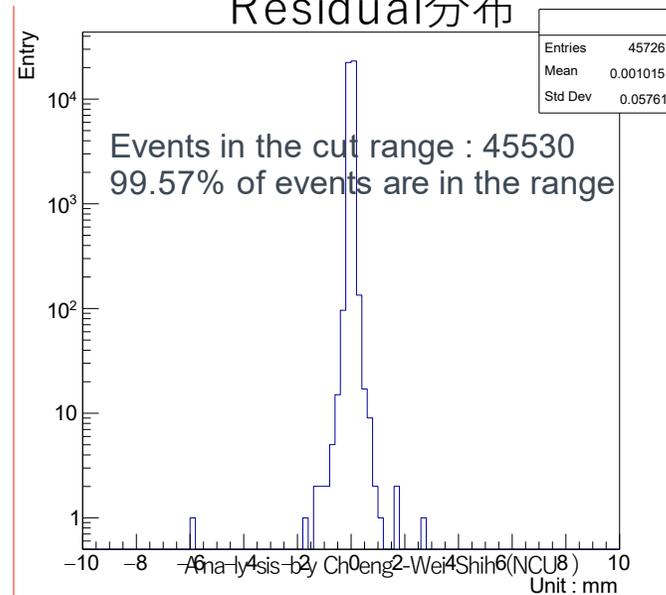
# INTTシリコンラダー

ビームテスト  
Residual分布

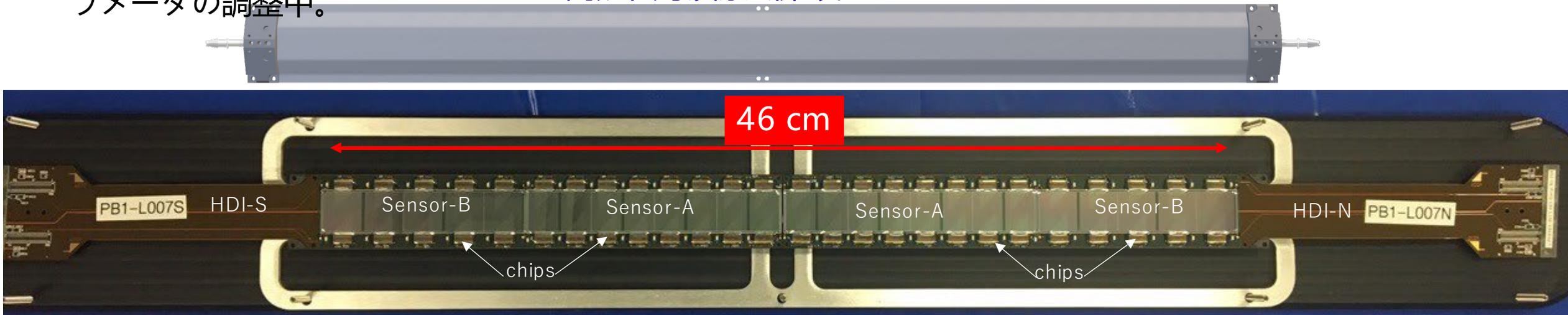
2021年12月ビームテスト@東北大  
ELPH

## パフォーマンス

- 1ビームクロック以下の時間分解能を確認。
- 2021年ビームテストで検出効率(>99%)を確認
- 宇宙線測定@奈良女でアクセプタンス中検出効率の勾配がないことを確認。
- ほぼ設計通りのパフォーマンス。
- シミュレーションモデルの細かいパラメータの調整中。

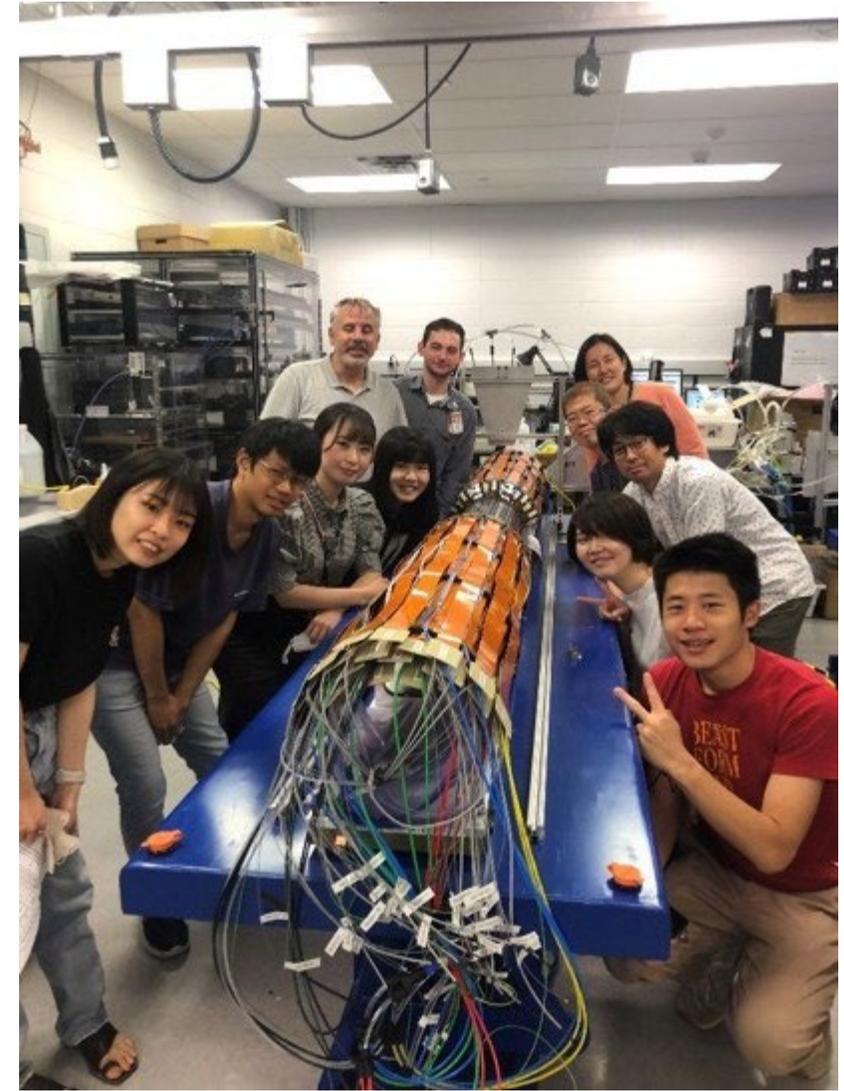
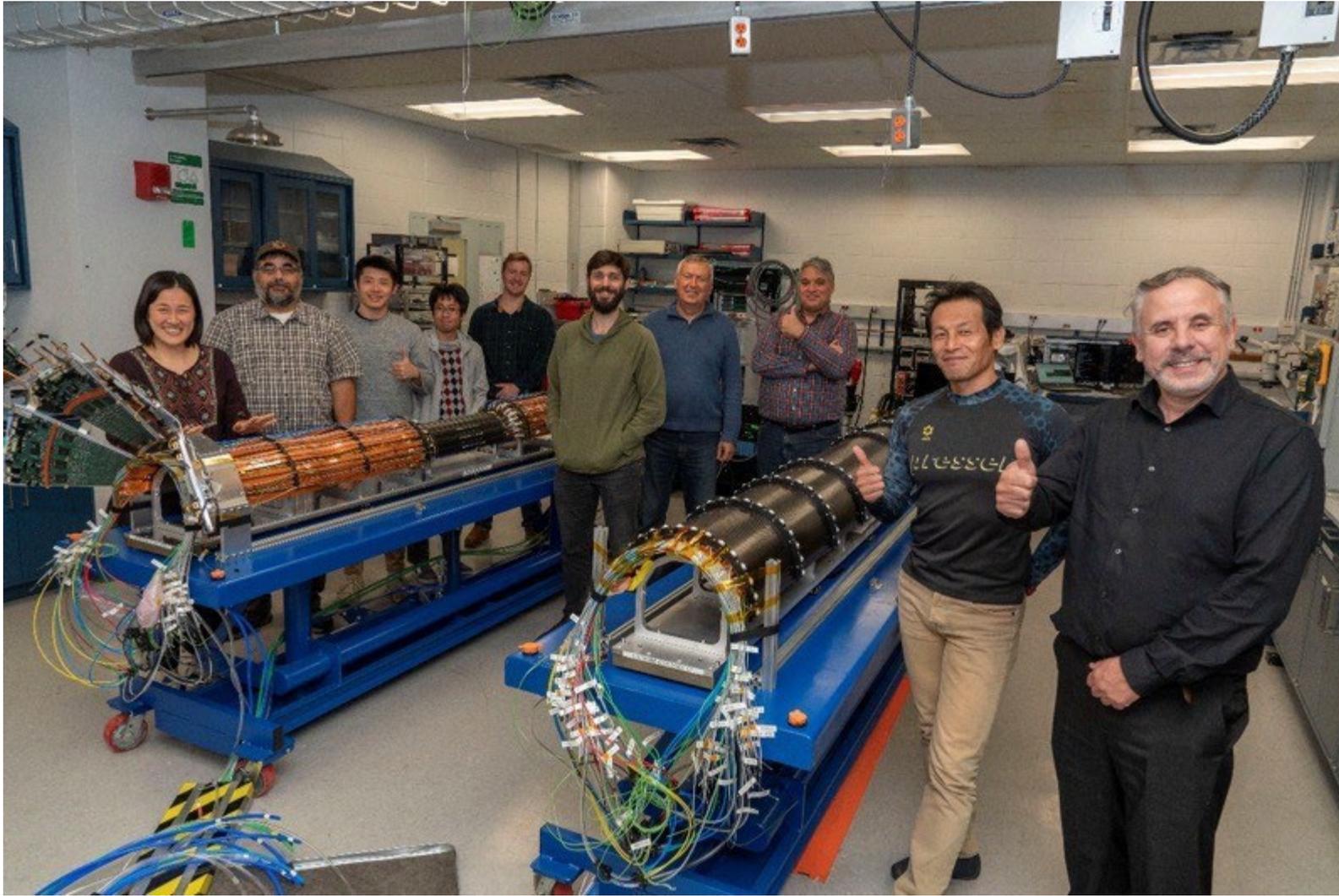


高熱伝導炭素繊維製ステーブ

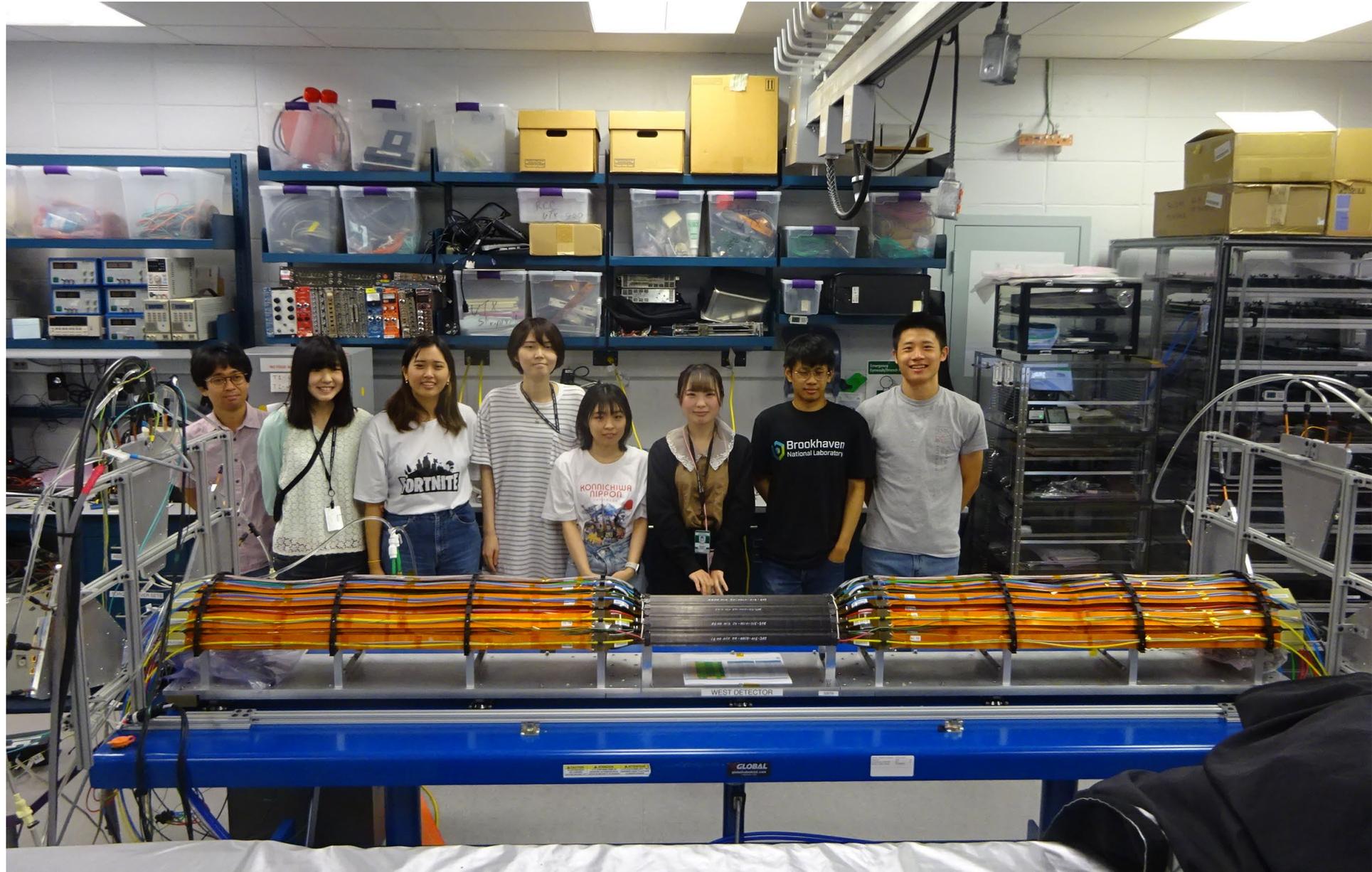


120ラダーの組み立て量産は2022年の3月にBNL+台湾にて完了

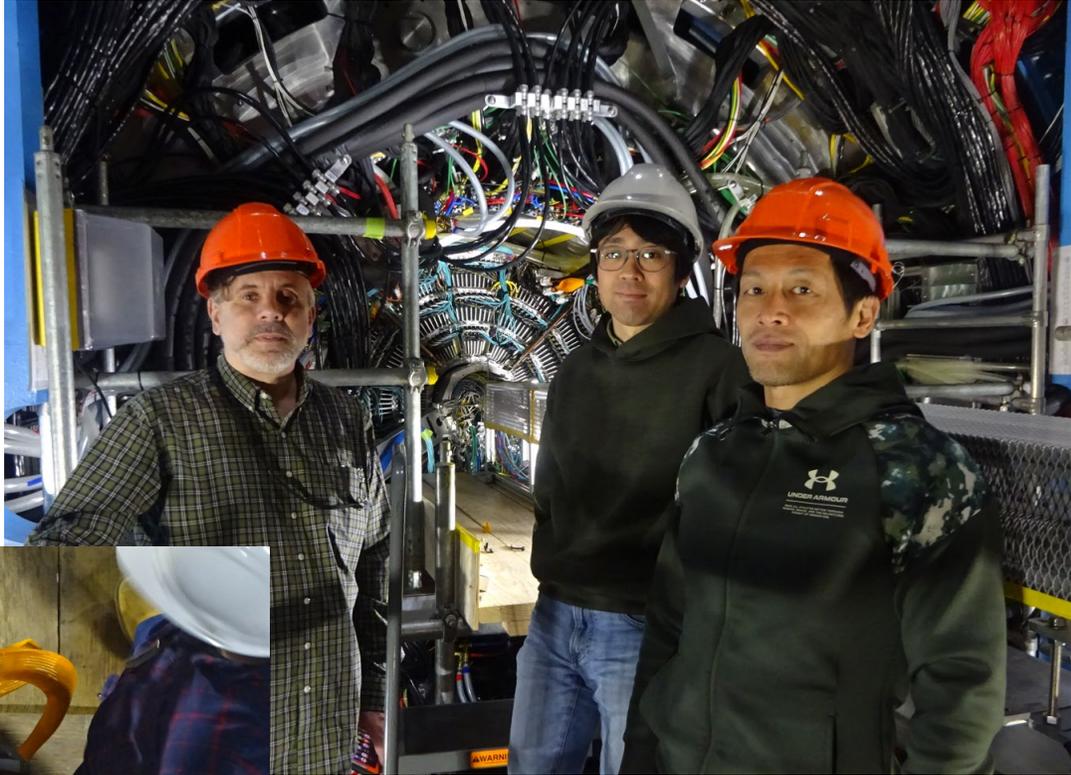
# INTT バレル組み立て@BNL



# 2022年のINTT完成時。多くの学生が貢献 (奈良女子大、立教大学、台湾国立中央大学)



# 2023年3月1日 sPHENIXへの組み込み完了



# 日経サイエンス2023年6月号のRHICの記事

原子核物理学 “Primordial Soup”

## 加速器実験で探る 「強い力」 クォーク・グルーオン・プラズマを作る

“素粒子のスープ”だった誕生直後の宇宙を  
かつてないほど精密に解き明かす実験が始まる

C. モスコウィッツ (SCIENTIFIC AMERICAN 編集部)

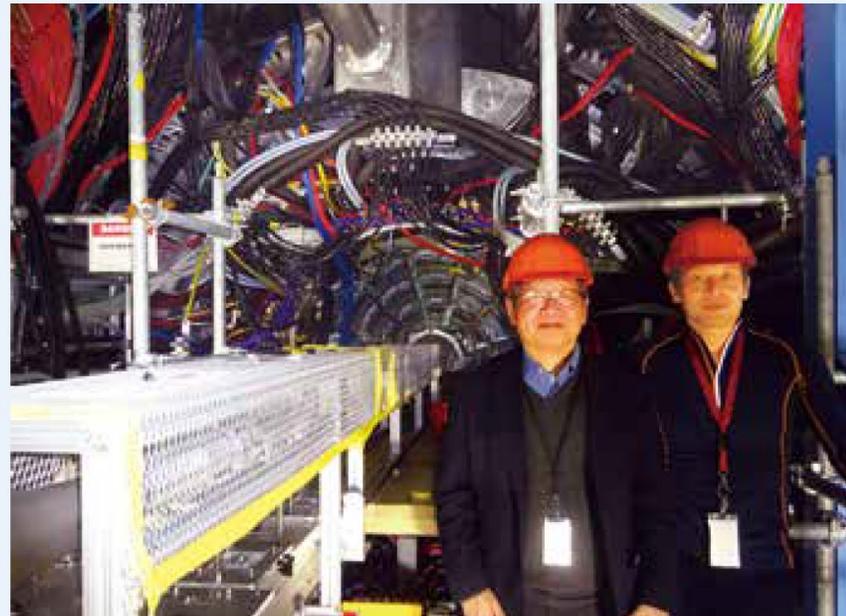
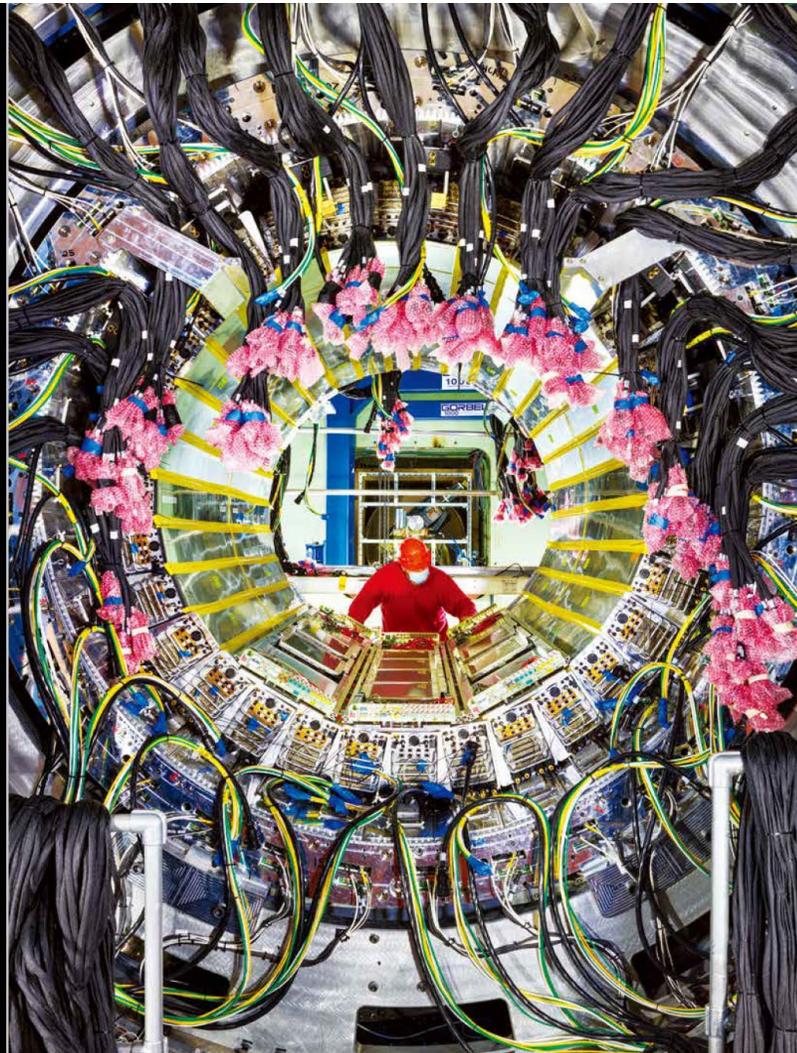
Photographs by Christopher Payne

原子を観察できる顕微鏡を持っている。そして、最も小さな原子である水素原子を詳しく見てみる。外縁を飛び回っている1個の電子を横目にさらに拡大していくと、原子核が見えてくる。水素原子の場合は1個の陽子だ。高校の物理では、陽子はクォークという素粒子が3個（2個のアップクォークと1個のダウンクォーク）集まってできたものであると教わる。しかし、実際には陽子ははるかに複雑であり、その内部構造や、陽子の質量やスピンといった性質が陽子を構成している粒子の性質にどう由来しているのかはまだ明らかになっていない。陽子内部の模式図に描かれる3個のクォークは単に「価クォーク」(91ページの訳者ノート1を参照)にすぎず、クォークや反クォーク（クォークの反物質）、さらにはそれらをつなぐ「グルーオン」の海を漂うパイのようなものだ。陽子の中のクォークとグルー

ンの総数は絶えず変化している。クォークと反クォークの対が常に生成と消滅を繰り返しており、グルーオンは、特に陽子が高速で運動している（大きな運動エネルギーを持っている）場合に分裂・増殖しやすい。要するに、陽子の構造は混沌としている。自然界の4つの基本的な力のうち最も強い「強い力」はこの雑然とした粒子たちを陽子（と中性子）の中に閉じ込めている。だが、そうではない状況もある。ビッグバンの直後、宇宙はあまりに高温・高密度で、強い力はクォークやグルーオンを閉じ込めておくことができなかった。代わりに、それらは「クォーク・グルーオン・プラズマ」と呼ばれるほとんど抵抗なくサラサラと流れる大海原をなしていた。この段階は宇宙史におけるほんの一瞬だった。ビッグバンから約10<sup>-6</sup>秒以内にクォークとグルーオンは陽子や中性子に閉じ込められた。しかし、ビッグバンから138

億年後の今、物理学者は加速器によってこのクォーク・グルーオン・プラズマを再現できるようになった。大きな原子核（金の原子核など）を2個用意し、光速に近い速度まで加速して正面衝突させる。衝突によってクォーク・グルーオン・プラズマの“しずく”ができるのに十分な温度と圧力を作り出すのだ。ただし、このしずくはすぐに散り散りになり崩壊してしまう。この衝突を捉える装置はそびえ立つ建造物であり、同心円状に配置された多くの検出器などの機器やそれらをつなぐ何千ものケーブルからなる。昨年、私はニューヨーク州ロングアイランド

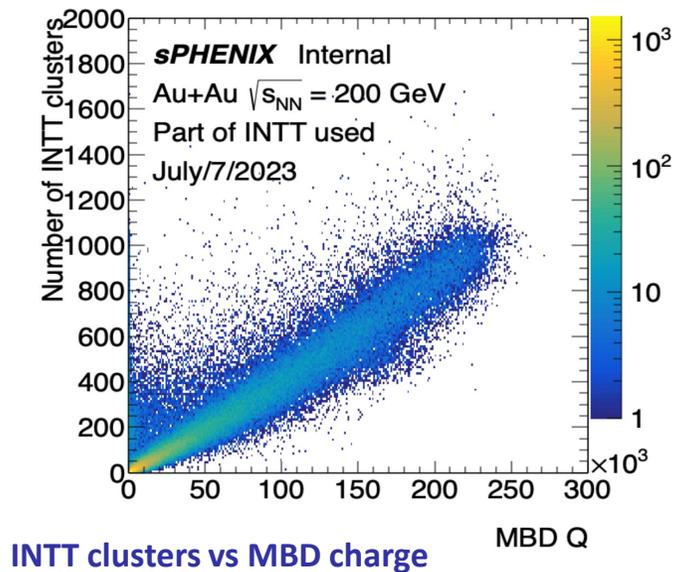
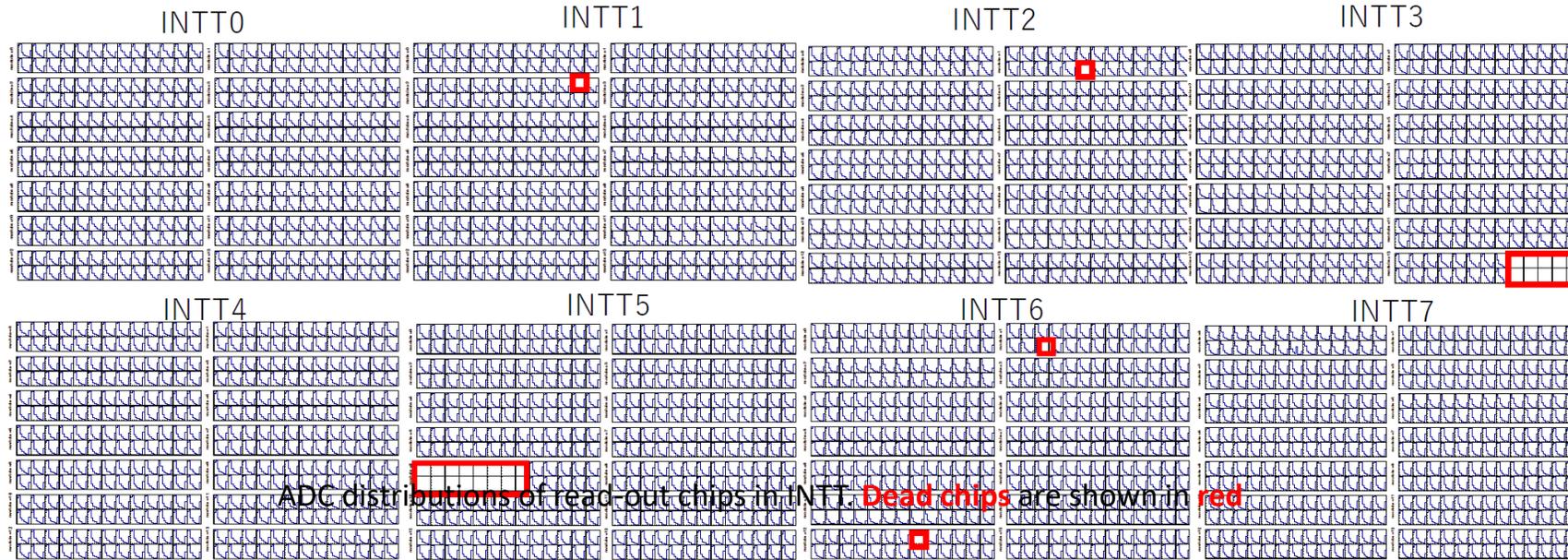
米国立ブルックヘブン研究所（ニューヨーク州ロングアイランド）の相対論的重イオン衝突型加速器（RHIC）で新たに稼働する検出器 sPHENIX の内部でケーブルを脱着している技術者。円筒状の空間で原子核どうしが衝突し、宇宙の始まりに存在していたクォーク・グルーオン・プラズマの“しずく”を作り出す。



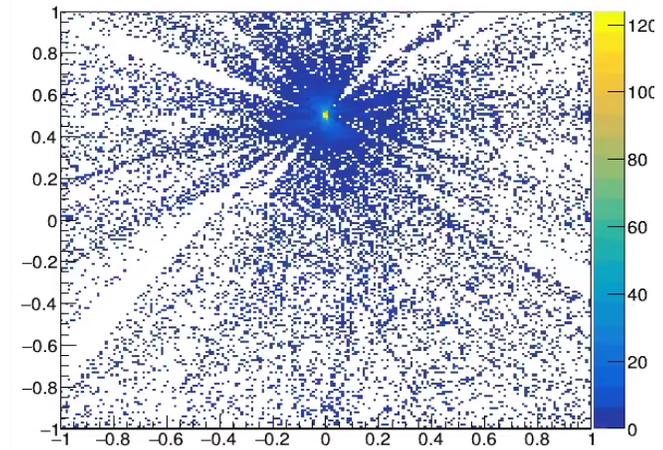
**検出器の中心部** sPHENIXはバウムクーヘンのような多層構造をしており、まずは外層部分が設置され（83ページの写真）、最後に最内層の部分が組み込まれ、2023年1月に完成した。左手の手前から奥に伸びている構造物がRHICのリングを構成する真空パイプで、このパイプを取り囲むように、日本を中心とする国際共同グループが開発したシリコン半導体検出器が配置されている。人物は理研の秋葉康之（左）と中川格（右）。

理化学研究所 加速器科学センター

# RUN23でのINTTのコミッショニング



INTT clusters vs MBD charge

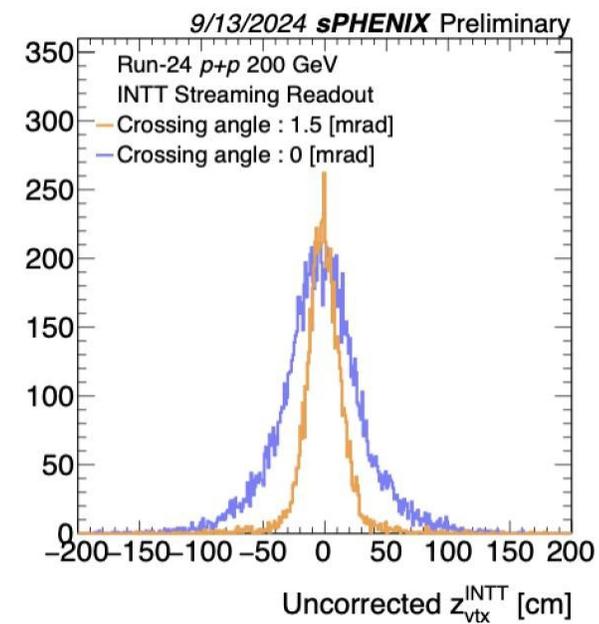
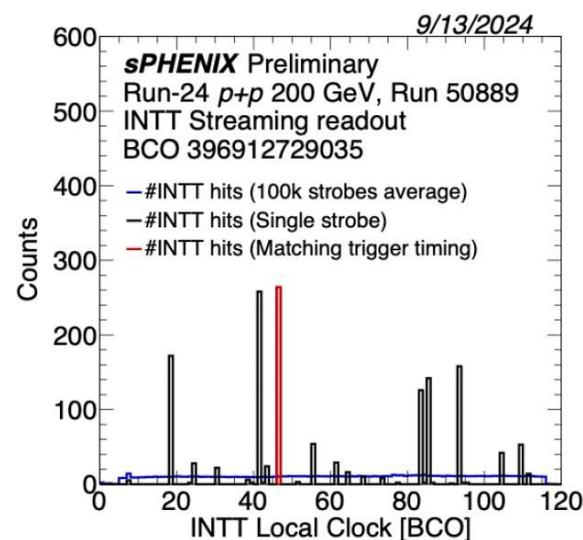
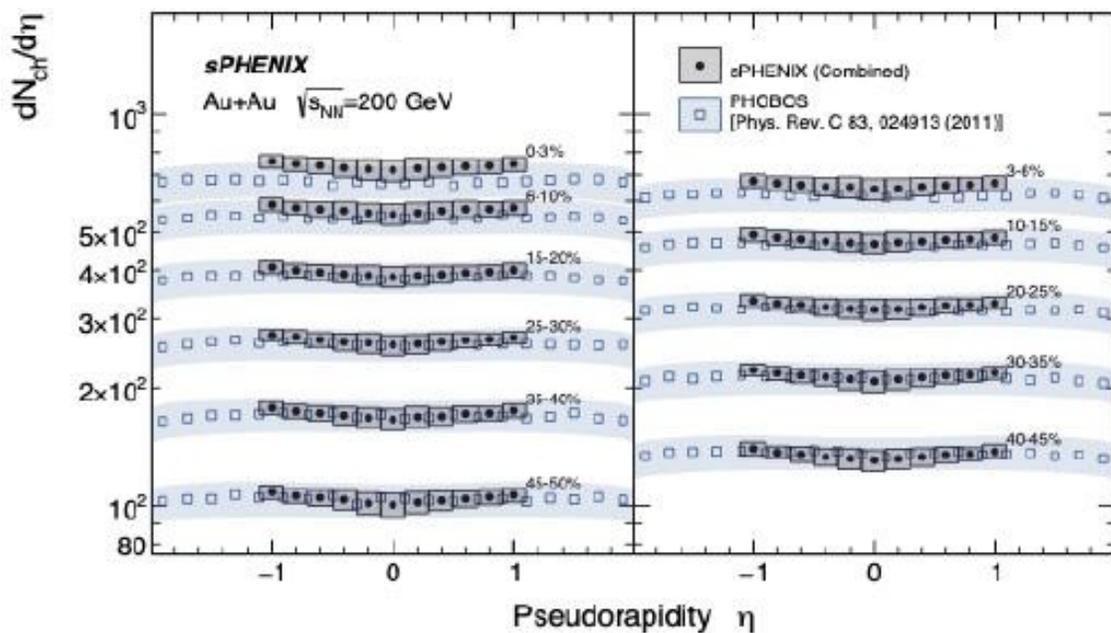
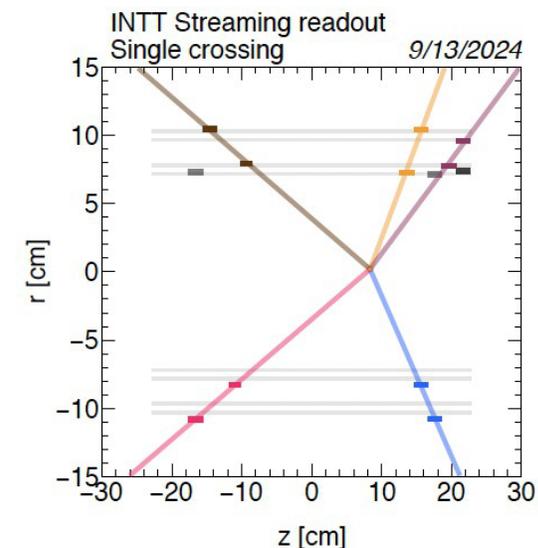
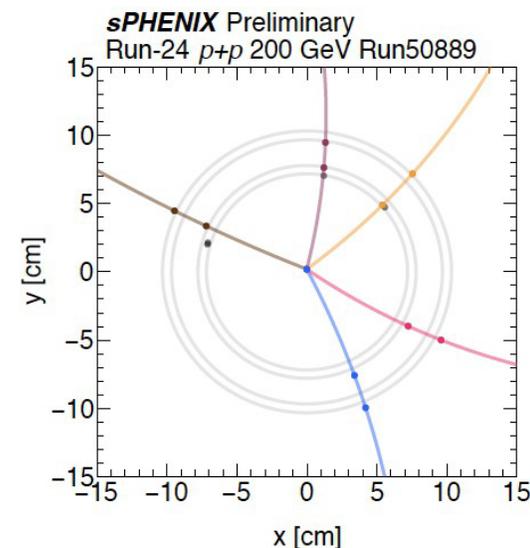


Vertex reconstruction by INTT in XY plane

5月から8月1日の  
RUN23(金+金衝突)  
でINTTのコミッショ  
ニングがほぼ完了  
2912 個の読み出し  
チップ (128ch/chip)  
の99%が生きている

# INTTの成果

- 2025年4月、INTTが中心的役割を果たした2023年の金+金衝突におけるsPHENIX実験の初めての物理結果の一つの論文が投稿
- 陽子+陽子衝突でもINTTの動作は良好であることが確認された



# Bulk Observables: Au+Au $dN_{ch}/d\eta$



[arXiv:2504.02240](https://arxiv.org/abs/2504.02240)

$dN_{ch}/d\eta$

Pseudorapidity  $\eta$

$N_{part}$

$dN_{ch}/d\eta$  測定。INTT測定器の成果。  
sPHENIXからの最初の物理結果論文2篇の一つ。今年4月にPhysical Review Cに投稿

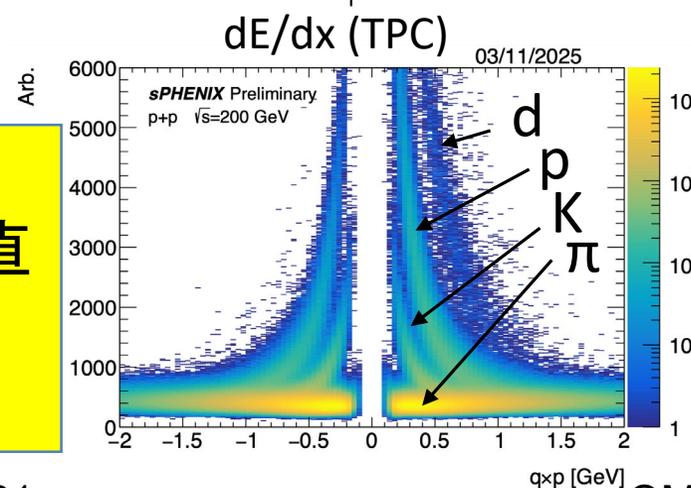
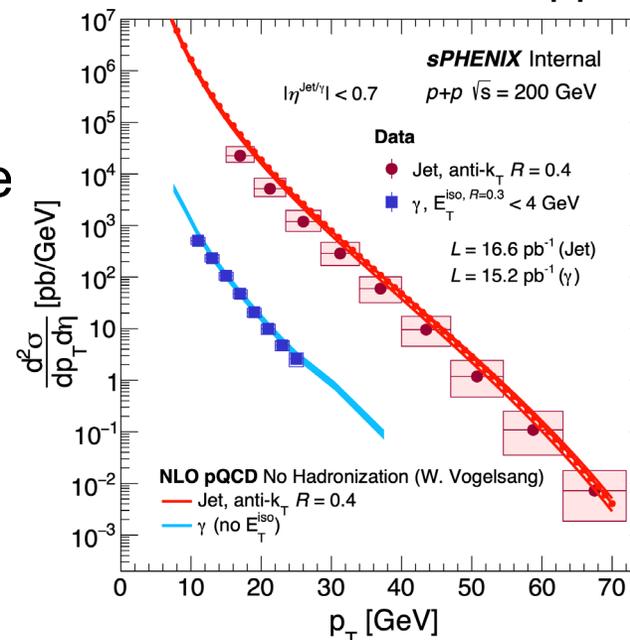
# Summary

- sPHENIX is fully commissioned and producing physics
  - Recorded substantial pp reference dataset in 2024
  - Demonstrated
    - jet, photon and track reconstruction
    - physics analysis capability of large scale datasets
      - Remeasure standard physics candles
      - First publications submitted
  - Well equipped to complete the RHIC science mission

今年4月のQuark Matter 2025国際会議での sPHENIX Overview のサマリー。Jet測定、直接光子測定、 $dN_{ch}/d\eta$  測定などの成果が出始めている

## Photons, Jets in pp

Au+Au



# まとめ

- RHICではこれまで十分にできなかったジェット・ウプシロン・重クォークの測定のために、新測定器sPHENIXを建設。
- sPHENIXは2023年に完成、2023年のランでコミッショニング
- 日本グループは、シリコン飛跡測定器INTTを建設・運用
  - 2023年完成・sPHENIXに組み込み・コミッショニング完了
- sPHENIXはRHICの科学的使命を完遂する
  - 2024年 偏極陽子+陽子衝突実験
  - 2025年 金+金衝突実験
- RHICは2025年に運転終了し、EICに改造される。