

新実験 sPHENIX で観る宇宙の始まり

－ この世に始まりはあるのか、検証実験の最終章が今始まる －

概要

理化学研究所（理研）の仁科加速器科学研究センターRHIC 物理研究室、国際リサーチ・アソシエイト Cheng-Wei Shih、糠塚元気基礎科学特別研究員、中川格専任研究員、奈良女子大学蜂谷崇准教授が参画する sPHENIX 実験国際共同研究^[1]グループは、過去 10 年の検出器開発・建設期間を経て 2023 年から稼働を開始し、この度最初の物理論文を出版しました。「宇宙の始まり」を「この世の始まり」とするなら、現在最も有力なビッグ・バン説によれば、現在から約 140 億年前に超高温・高密度物質状態からこの世は誕生したとされます。

米国ブルックヘブン国立研究所（BNL）では、ビッグ・バン直後の超高温・高密度物質状態、即ちクォーク・グルーオン・プラズマ^[3] (QGP)状態を検証すべく、相対論的重イオン衝突型加速器(RHIC)^[2]計画を立ち上げ、2005 年に QGP を地上で再現することに成功しました。これにより人類は、この世には始まりがあることを科学的に裏付ける有力な証拠を手にしました。その後、QGP の物性的性質を詳細に調べ、ビッグ・バン説に矛盾が生じないか検証するため sPHENIX 実験計画が立ち上がり、2023 年から新検出器群の試運転が始まりました。この新実験がこれから 10～20 年かけて成果を上げていくその第一歩として、主要検出器の一つである INTT シリコン検出器で、衝突の基本特性である荷電粒子の多重度性を測定しました。解析の結果、過去の実験データを見事に再現し、sPHENIX 実験がこれから精密測定をしていく礎が順調に築かれていることをこの論文で世に示しました。INTT は日本が出資し日本グループが主導し、ほぼ国産で開発・建設しました。25 年に及ぶ RHIC 計画は、sPHENIX 実験を以て「ミッション・コンプリート」されます。その最終章の幕開けを告げるのに日本グループが重要な役割を果たしたのは、日本の高度なものづくり技術の後ろ盾もあってこそです。sPHENIX から QGP の新たな知見が出るのはこれからですが、謎に包まれた宇宙の起源の解明へ向けて、今スタートラインに立ちました。

本研究は、科学雑誌『Journal of High Energy Physics』オンライン版（x 月 x 日付：日本時間 x 月 x 日）に掲載されます。

背景

この世には始まりがあって終わりがあろうのだろうか？

ここでは「この世」を仮に「宇宙」だと定義すると、すでに人類はこの素朴な疑問の科学的な解明に挑んできています。現在ではこの世には始まりがあるとする学説が最も有力です。この学説は有名なビッグバン理論で、今から約140億年前に超高温・高密度の物質状態から宇宙が誕生したとされます。果たしてこの理論が正しいのか、140億年前に起きたことなんて検証のしようがないと思うかもしれません。しかし実はこの超高温・高密度状態を再現するミニ・ビッグバン実験が、この地上で行われています。

米国ブルックヘブン国立研究所では、2000年以降稼働を開始した相対論的重イオン衝突型加速器（RHIC）で金原子核をほぼ光速まで加速し、重心系エネルギー200GeVで金原子核同士を衝突させ、そこにクォーク・グルーオン・プラズマ（QGP）と呼ばれる超高温・高密度の物質状態を生成させるのに成功しました。宇宙創成の10万分の1秒以下では、全宇宙はこのQGP状態で満たされていたと考えられています。この現象はRHICのPHENIX実験とSTAR実験等で観測され、人類はビッグバン説を裏付ける有力な手掛かりを得ました。これまでにQGPの温度が2兆度以上あること、東京スカイツリー（約36,000トン）の約5万倍の重さが角砂糖一個分（1立方センチメートル）に押し込められた程の高密度など、およそ浮世離れた性質が解き明かされてきました。

この謎めいたQGP物質の正体をさらに暴くため、RHICに新たな国際共同研究sPHENIX実験が発足しました。sPHENIXチームはPHENIX検出器群を高度化し、QGPを観測するのに最も精度が高いとされるジェット^[4]・光子・重いクォーク^[5]の検出能力を備えたsPHENIX検出器群を10年かけて開発・建設しました。

打ち上げ花火が上空で炸裂するように、QGPが生成されると原子核同士の衝突点から大量の放射線が飛散します。夜空を彩る花火を見上げて、花火玉はどんな仕掛けになっているのだろうと思いを巡らせるように、QGPの観測はその放射線の方角や数（生成粒子多重度）などを検出して元のタネであるQGPの特性を推察します。

PHENIX検出器は、敢えて建物の影から花火の一部しか見られないような設計でした。全体を観ようとする、火薬の煙のようなノイズの混入が大きすぎて正確にQGPを観測できないと危惧されていたからです。これではQGPを精密観測するのに不十分ですが、PHENIXで得た煙の濃さの知見をもとに、次世代検出器及び最先端情報処理技術を駆使することでノイズ問題を克服できる見込みとなりました。そこでsPHENIX検出器群ではコンセプトを一新し、広場で花火全体を優雅に観測できるような全方位型設計にしました（図1）。

報道解禁：日本時間 20XX 年 XX 月 XX 日午前 X 時・XX 日付朝刊

QGP探索のために立ち上げられたRHIC計画は、このsPHENIX実験による精密測定をQGP研究の集大成と位置付け、この実験を以て完了となることが決まっています。



図 1 sPHENIX 検出器群

sPHENIX実験は2023年に試運転を開始し、2024年、2025年の稼働で大量の実験データを収集中です。sPHENIX実験はこれから10~20年かけて多数の物理論文出版していく見込みです。しかし、その前にsPHENIX実験が設計通りの高性能を発揮できて、QGPの精密測定が可能であることをまず実証しなければなりません。そのためには基本的な衝突特性の測定を行い、既存の実験データを再現する必要があります。そこでその一つの観測量である衝突で発生する粒子多重度を測定しました。

研究手法と成果

sPHENIX実験は高エネルギー加速器実験の大規模実験の一つで、国際共同研究です。世界11カ国56の大学・研究機関に所属する300人以上の共同研究者で構成されます。sPHENIX検出器群の中核を担う検出器の一つ、INTTシリコン検出器（図2）は、INTT国際チーム（日本：理研・奈良女・立教・原子力機構 米国：BNL・Purdue 台湾：国立中央大・国立台湾大 韓国：高麗大）が開発から建設・稼働を担っています。

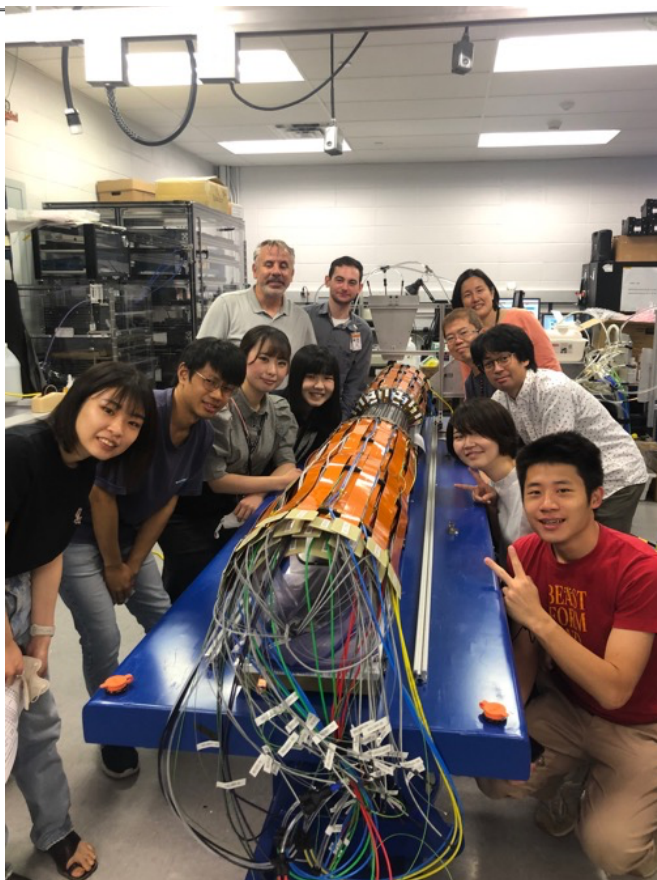


図 2 INTT 検出器。写真は円筒型検出器の半分。

粒子多重度測定はこのINTT検出器(図2)で測定されており、日本グループのメンバーがデータ解析においても主要な役割を果たしています。INTTは原子核同士の衝突点を全方位包み込むように覆うことで、衝突点で発生する荷電粒子をPHENIXより漏れなく検出しその数を数えます(図3)。検出器の主要部は、日本の産業界との共同開発によってカスタム生産されており、INTTは日本の高度なものづくり技術の粋を集めて実用化した検出器です。

論文はデータ取得後わずか9ヶ月足らずの異例の早さで出版に至りました。このスピード感を実現できたのは、ひとえに日本グループが主導するINTTグループが、検出器の性能を知悉しその性能を設計通りに発揮させたからに他なりません。勿論これを可能にしたのは、日本の高度なものづくり技術という後ろ盾があったことも特記します。妥協を許さない姿勢が実を結び、RHICミッション最終章の幕開けを告げる鐘をINTTが鳴らすに至りました。

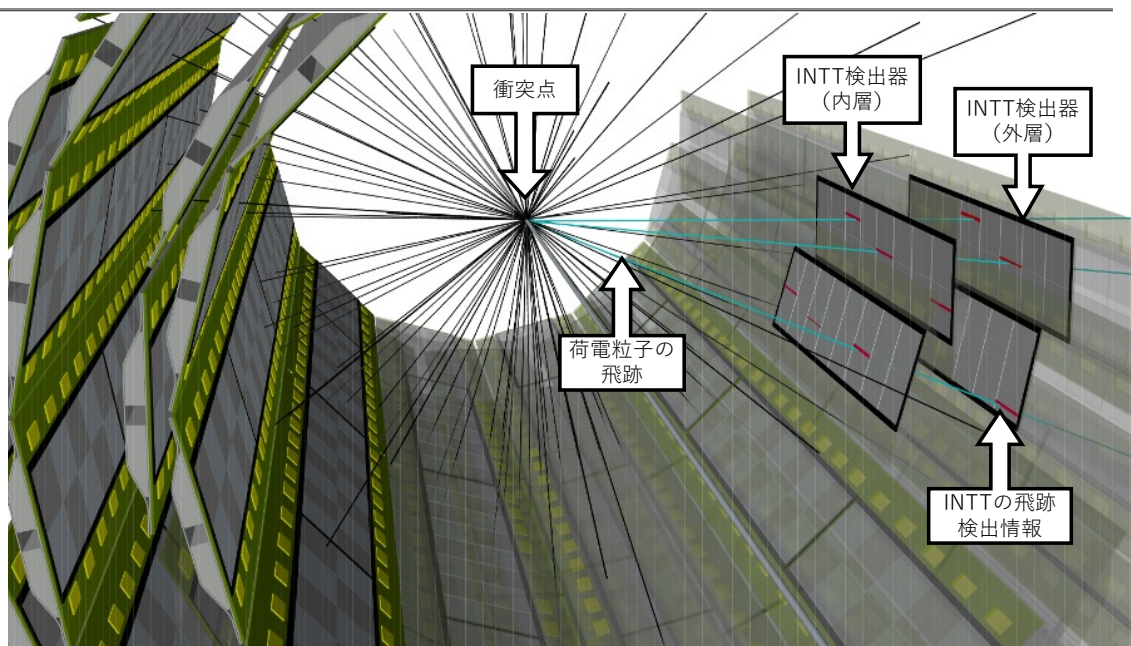


図 3 円筒型の INTT 検出器の中心付近で衝突が起こり、飛散する粒子を全方位で取りこばしなく検出します。

今後の期待

sPHENIX 実験は他の検出器も含めて基本測定を繰り返し、既存実験データの再現能力を実証しつつ、QGP 物性の新たな知見に向けて物理解析を進めていきます。今そのスタートラインに立ちました。

ビッグ・クランチ理論モデルによると、現在膨張を続けている宇宙が 40 億年後にその勢いを失い、重力に負ける瞬間から宇宙は収縮に転じ、これまでの宇宙の歴史を巻き戻しながら 180 億年かけ最後は一点に収束されてしまう、とされます。時間の可逆性を考えれば、この宇宙終末の瞬間はやはり QGP 状態になると考えられます。これがこの世の終わりなのか、それともその後またビッグ・バンが繰り返されるのか、興味は尽きません。RHIC の QGP 研究が、この理論をも裏付けるのかそれとも否定するのか、これからです。

論文情報

< タイトル >

Measurement of charged hadron multiplicity in Au + Au Collisions at $\sqrt{s_{NN}}=200$ GeV = 200 GeV with the sPHENIX Detector

< 著者名 >

The sPHENIX Collaboration

報道解禁：日本時間 20XX 年 XX 月 XX 日午前 X 時・XX 日付朝刊

< 雑誌 >

Journal of High Energy Physics

< DOI >

XXXXXXXXXXXX

補足説明**[1] sPHENIX 実験国際共同研究グループ**

sPHENIX は、RHIC に設置された実験装置の一つ。世界 11 カ国から 56 研究機関、約 300 名が参加する大型の国際研究グループ(sPHENIX Collaboration)が運転している。RHIC での重イオン衝突で生み出される超高温・高密度クォーク・グルーオン・プラズマの研究や、偏極陽子衝突反応による陽子の内部構造の研究を行う。日本からは理研、奈良女子大学、立教大学、日本原子力研究開発機構、京都大学の 5 機関が参加している。sPHENIX は、the super Pioneering High Energy Nuclear Interaction eXperiment の略。

[2] RHIC 衝突型加速器

米国ブルックヘブン国立研究所 (BNL) にある衝突型加速器で、二つの独立な超電導加速リングを持ち、陽子から金原子核までの原子核のさまざまな粒子をほぼ光速まで加速し、衝突させることができる。全周は約 3,800 m。2000 年からさまざまな粒子の組み合わせの衝突実験を行っている。陽子の場合は偏極させたまま (スピンの向きをそろえたまま) 加速・衝突させることができる世界初かつ唯一の衝突型加速器である。RHIC は Relativistic Heavy Ion Collider の略。

[3] クォーク・グルーオン・プラズマ

クォークは物質を構成する最も基本的な構成要素。アップ (u)、ダウン (d)、ストレンジ (s)、チャーム (c)、ボトム (b)、トップ (t) の 6 種類がある。グルーオンはクォーク間の「強い力」を媒介する粒子。通常クォークやグルーオンは陽子や中性子などの複合粒子の中に閉じ込められているが、原子核同士の衝突時に超高温、高密度になると閉じ込めが破れてクォーク、グルーオンが自由に飛び回る (プラズマ) 状態になる。この状態をクォーク・グルーオン・プラズマと呼ぶ。

報道解禁：日本時間 20XX 年 XX 月 XX 日午前 X 時・XX 日付朝刊

[4] ジェット

高エネルギー衝突で生じたクォークやグルーオンが外に飛び出し、たくさんの粒子に変わ
りながら細い方向性を持って飛び散る粒子の流れ。非常に高いエネルギーを持ち、QGP を
「通過」して観測にかかります。つまり、ジェットは QGP という見えない「粒子の霧」の
中を貫通し、その性質を反映した痕跡を残すため、レントゲンのような観測ができます。

[5] 重いクォーク

6 種類あるクォークの種類のうち、質量の重い c、b、t クォークを総じて重いクォークと
呼ぶ。そのどっしりとした重さゆえに、高密度 QGP 中での運動の変化（エネルギー損
失や散乱）に特徴がある。QGP の粘性や高密度物質との相互作用を通して QGP 物性を特
定するのに優れた観測量と考えられている。

研究チーム

理化学研究所 RHIC 物理研究室

チームリーダー Robert Tribble

奈良女子大学

准教授 蜂谷崇

准教授 下村真弥

研究支援

発表者・機関窓口

報道解禁：日本時間 20XX 年 XX 月 XX 日午前 X 時・XX 日付朝刊



解析チームの主要メンバー。左から蜂谷崇准教授（奈良女子大）、Cheng-Wei Shih 国際プログラム・アソシエイト（理研）、中川格専任研究員（理研）

<発表者> ※研究内容については発表者にお問い合わせ下さい

理化学研究所 仁科加速器科学センター

理研 BNL 研究センター 実験研究グループ

グループリーダー Robert Tribble (ロバート トリブル)

RHIC 物理研究室

専任研究員 中川 格 (なかがわ いたる)

国際プログラム・アソシエイト チェンウェイ・シー (Cheng-Wei Shih)

TEL : 048-467-9587 (中川)、FAX : 048-462-4641 (中川)

@riken.jp (中川)

2025 年 4 月變更

発表者コメント欄の新設

<発表者のコメント>

[illegible]

~~~~~



報道解禁：日本時間 20XX 年 XX 月 XX 日午前 X 時・XX 日付朝刊

[illegible]

XXX XXX

<機關窓口>

理化学研究所 広報部 報道担当

Tel: 050-3495-0247

Email: ex-press @ ml.riken.jp

＜発表者のコメント＞ ＜顔写真＞

- ・掲載するかは発表者の任意。複数コメントの掲載可。
  - ・コメントの内容は解説、感想、謝辞など自由だが、ウェブメディア等でそのまま掲載されることも想定する。
  - ・成果の意義や位置づけが平易な言葉で語られると、記者をはじめ読者の理解を助けになる。また本文では伝えにくい、成果にいたるまでの苦労や感動などが語られると、若者らにもアピールする可能性が高まる。
  - ・ただし内容や表現が社会的・時勢的にセンシティブな場合など、広報判断で編集や削除する可能性がある。
- 
- ・顔写真は個人写真・グループ写真どちらも可。
  - ・顔写真の掲載を希望しない場合はその旨を記入。