

# LHC-ALICE実験と光子測定

～宇宙開闢シナリオ: QCD相転移の理解～

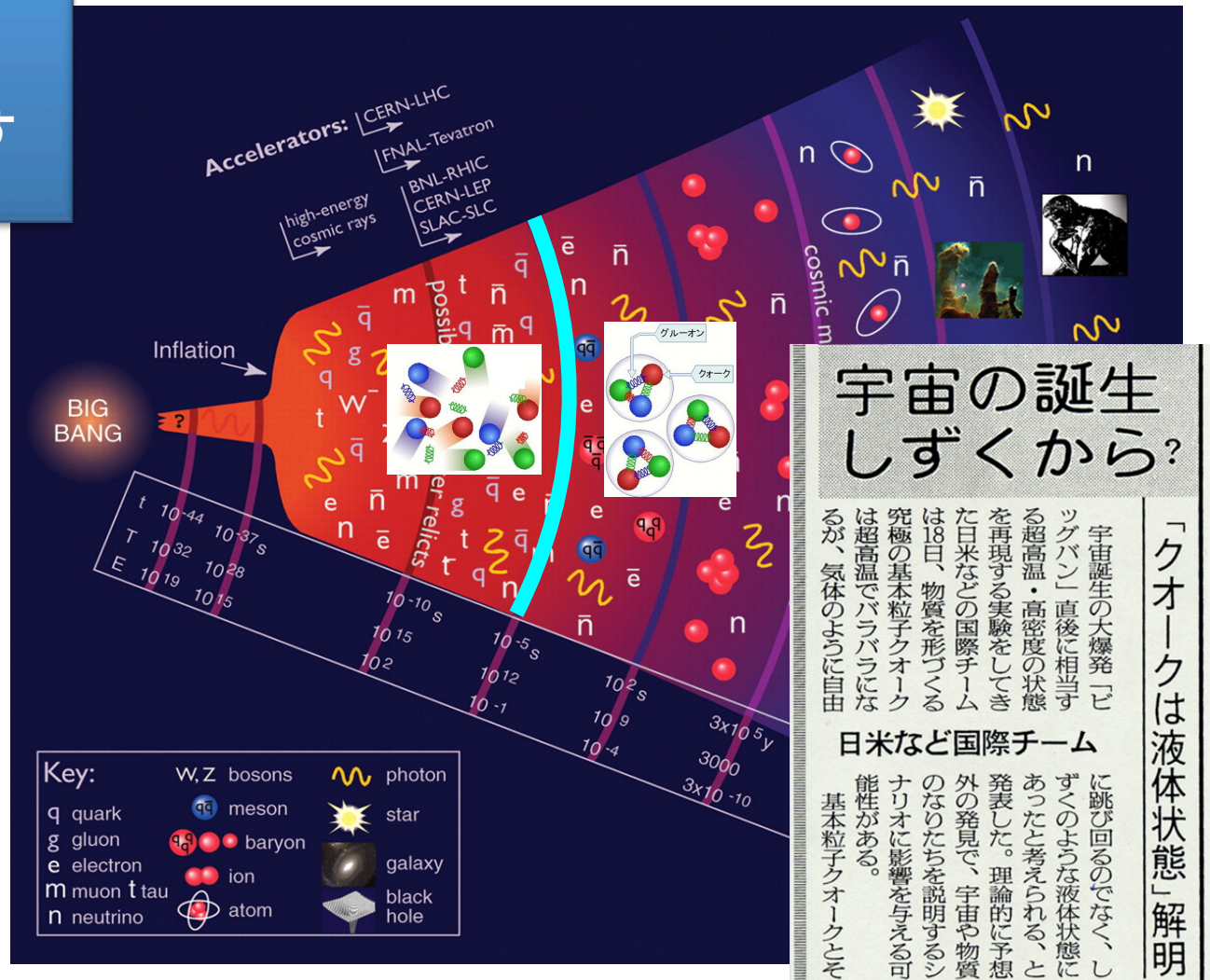
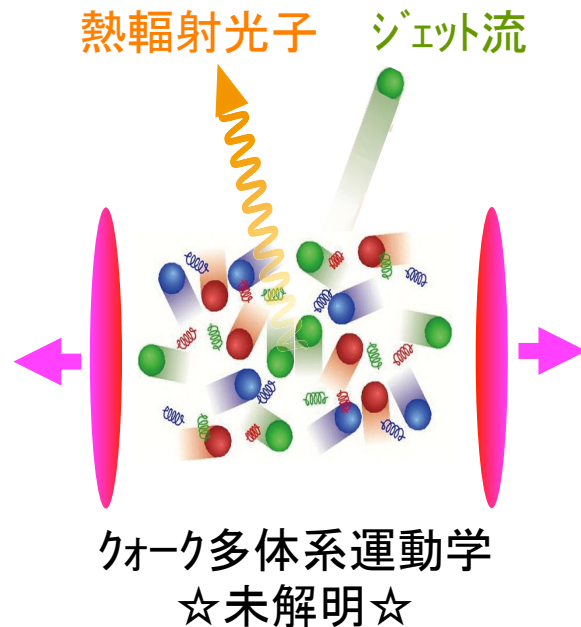
～最も熱く、最も重い物質の解明～

**杉立 徹**

**ALICE-Japan代表**  
**広島大学・理学研究科**

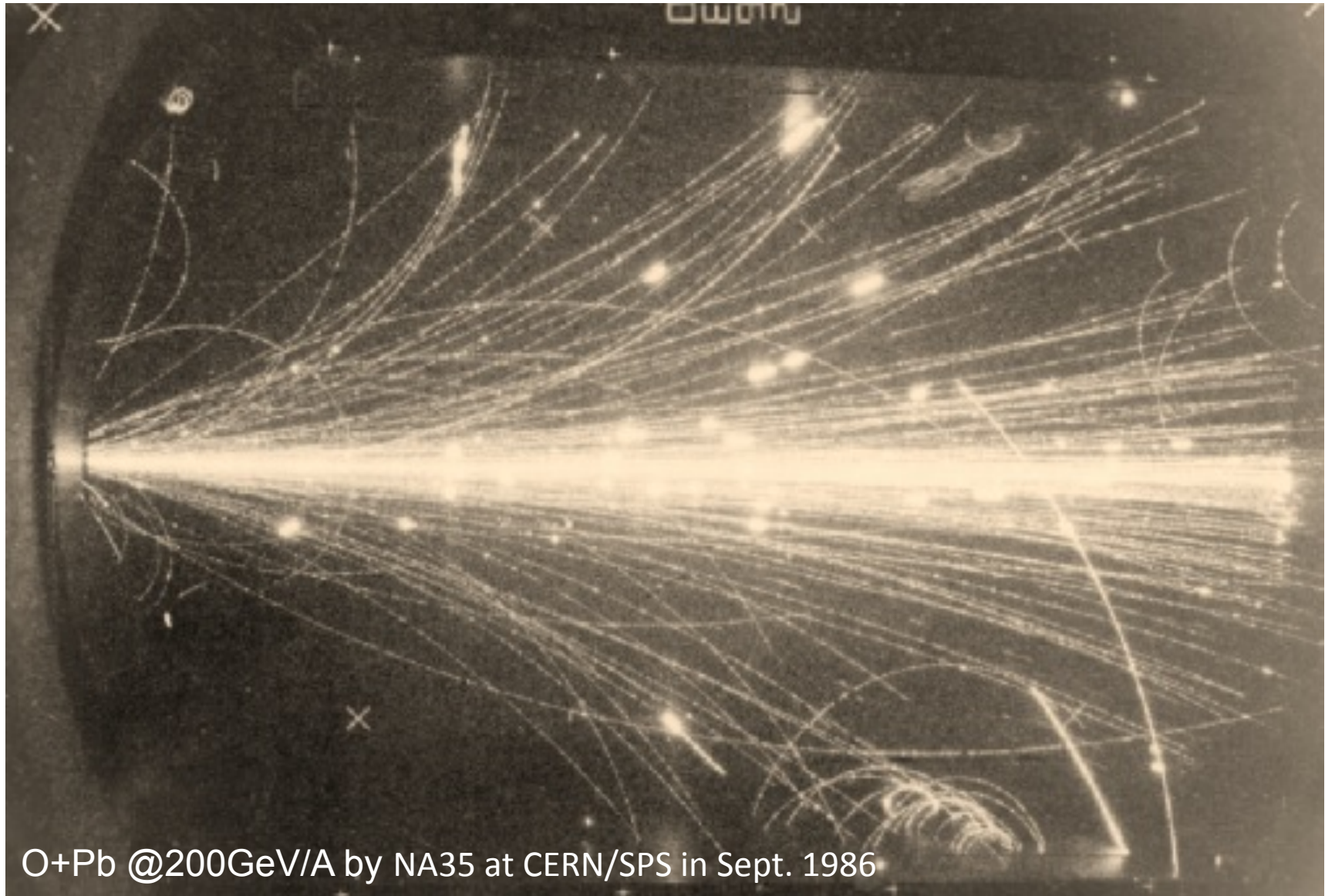
# 宇宙開闢のシナリオと相転移

- ◆ QCD相転移
  - > 対称性の自発的破れ
  - > クォーク閉込
  - > 質量獲得
- ◆ 宇宙誕生を解き明かすパズルの1ピース



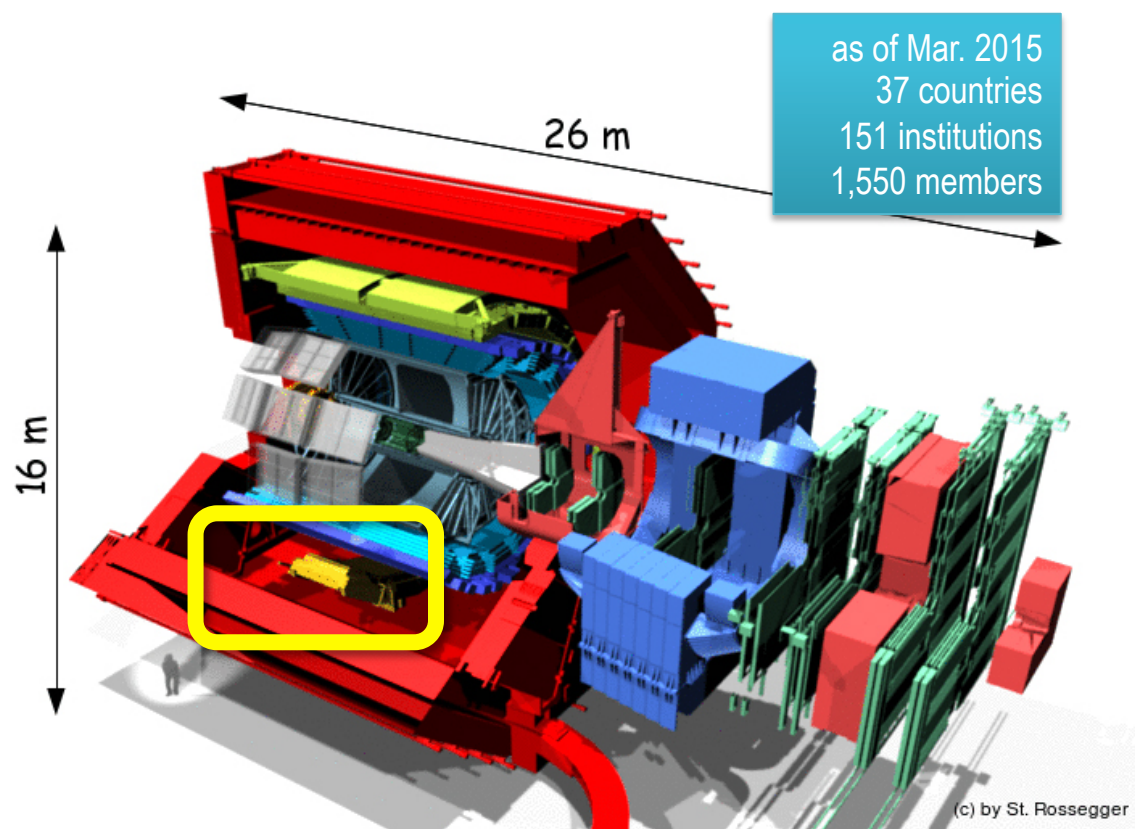


# 高エネルギー原子核衝突 初事象

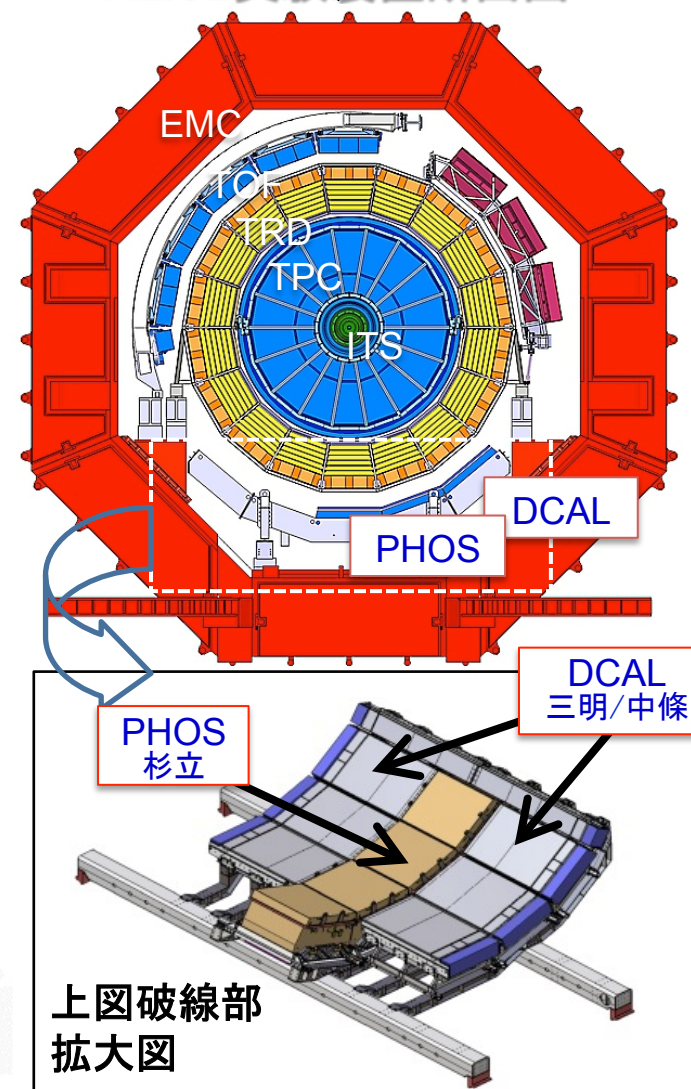


# CERN研究所LHC加速器ALICE実験

- 高分解能フォトン測定 <広島大> PHOS
- 荷電粒子測定 <筑波大/東大> TRD/TPC
- ジェット対測定 <筑波大> DCAL



ALICE実験装置断面図



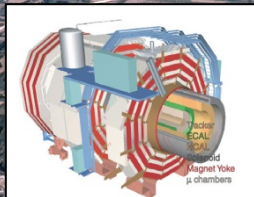


# LHC加速器大型実験 @CERN

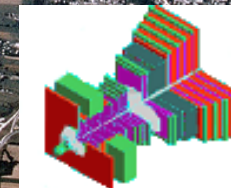
$\sqrt{s_{pp}} = 2.76, 7$  in 2010-11,  $8$  in 2012, and  $14$  TeV in design

$\sqrt{s_{Pb-Pb}} = 2.76$  in 2010-11, and  $5.5$  TeV in design

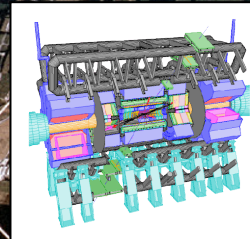
$\sqrt{s_{p-Pb}} = 5.02$  in 2012/13, and  $10.0$  TeV in design



**CMS**



**LHCb**



**ATLAS**



**ALICE**

$\sqrt{s_{NN}}$  at LHC =  $28 \times \text{RHIC} = 320 \times \text{SPS} = 1000 \times \text{AGS}$

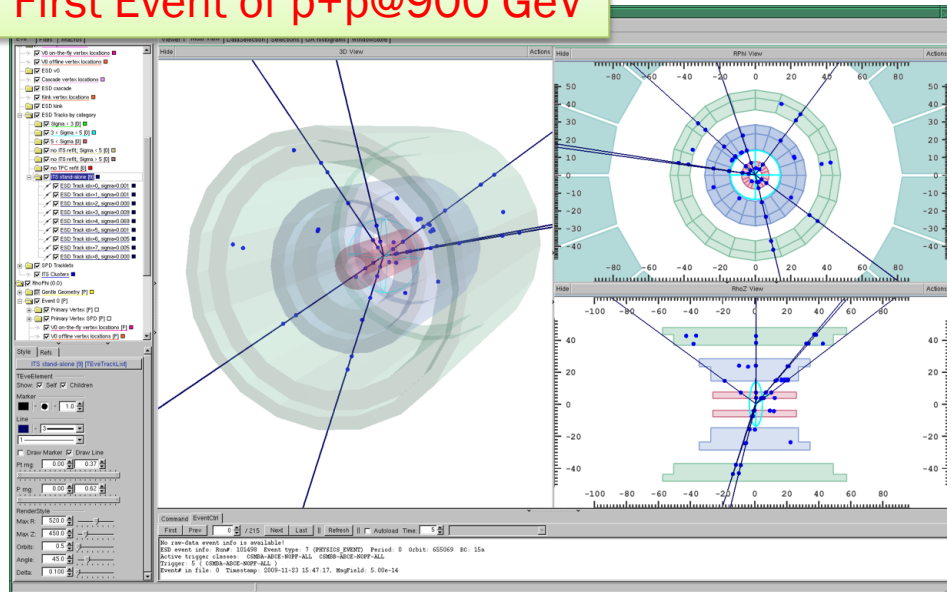


# ALICE実験 Point-2 in France



# 2009年11月23日 ALICE実験初衝突事象

First Event of p+p@900 GeV



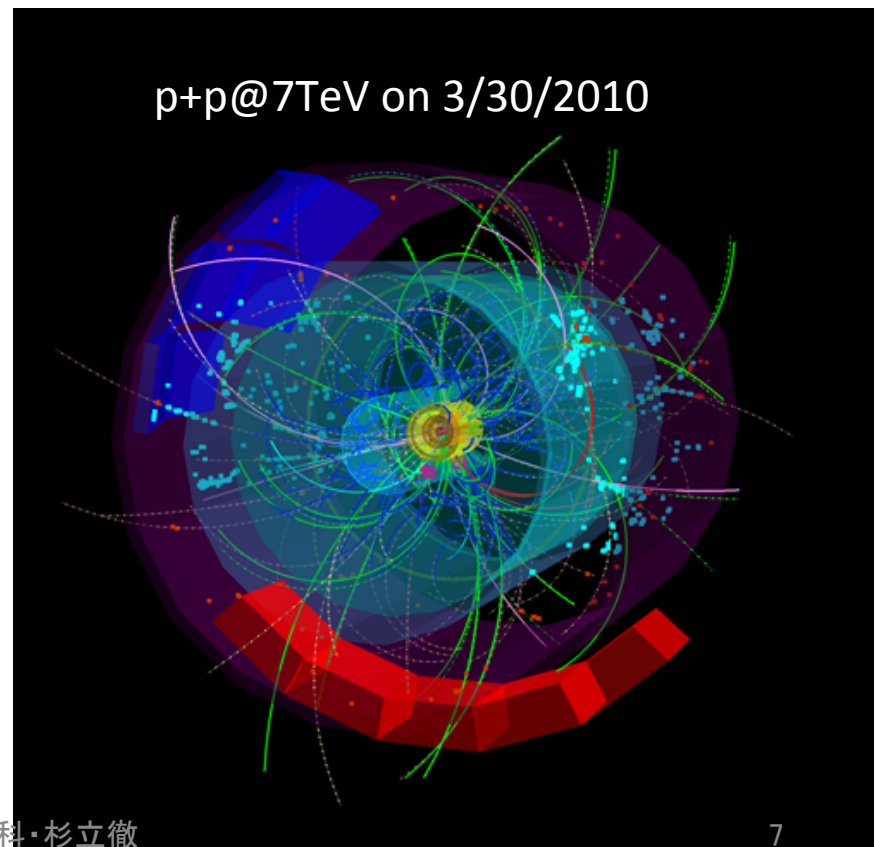
**First proton–proton collisions at the LHC  
as observed with the ALICE detector:  
measurement of the charged-particle pseudorapidity  
density at  $\sqrt{s} = 900$  GeV**

The ALICE Collaboration

$$dN_{ch}/d\eta = 3.10 \pm 0.13 \text{ (stat)} \pm 0.22 \text{ (syst)}$$

submitted to EPJC on 11/28/09 and

published on EPJ C65:111-125, 2010/Jan





# 社会・国民に発信するALICE実験第一報

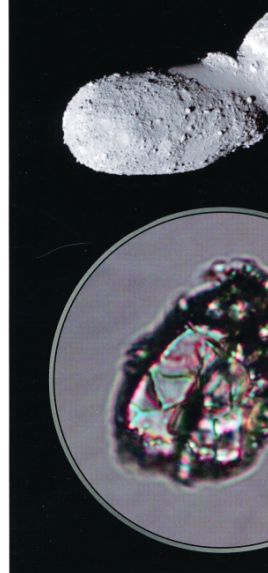


原子・分子:マクスウェルの悪魔 | 物性:ナノグラフェンの物性

素粒子:LHC原子核衝突実験 | 地球惑星:「はやぶさ」試料

核融合エネルギー | QGP研究 | スターバースト銀河 | DNAナノテクノロジー

## 特集:物理学,この1年



物理学雑誌

parity

第27巻第1号  
2012年1月1日発行  
毎月1回1日発行  
ISSN 0911-8115

パリティ

2012  
01

## LHC原子核衝突実験:クォーク物質を探る

杉立 徹

正面衝突するビーム原子核どうしが重なり合う微小な空間に、莫大なエネルギーを注入する。空間を一気に加熱し、真空から生成した大量のクォーク対とグルーオンが渾然一体となって、局所的平衡状態を形成する高温クォーク物質状態<sup>1)</sup>をつくりあげる。固体やプラズマを含めて、私たちの知る物質は電子と原子核を構成要素とし、電磁気力により結びつくが、この物質はクォークとグルーオン<sup>2)</sup>が強い力で結びつき形成する。非摂動的な強い力が支配的なため、量子色力学(QCD)が確立したいまでも、その性質はわかっていない。

科学者が実験室でつくりあげるだけの対象なら、熱心に調べる必要はないかもしれない。しかし、ビッグバン直後、私たちの宇宙は超高温のこのクォーク物質で満たされていた。約100万分の1秒後に相転移が起こり、クォークは陽子などのハドロンに閉じ込められ、同時にハドロンは大きな質量を獲得して現在にいたる。したがって、クォーク物質の解明は、

ごく初期の宇宙に起きた動力学現象を明らかにすることでもある。

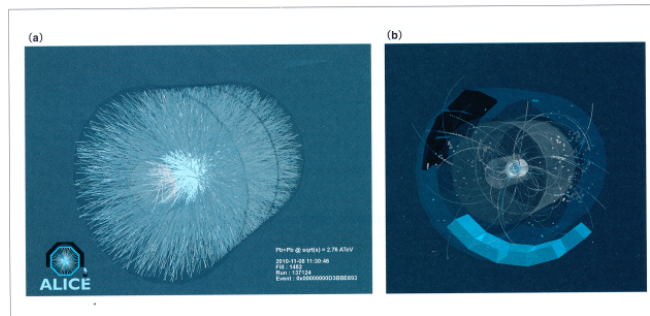
### ■ 待望のLHC原子核衝突

2010年11月はじめ、欧州CERN研究所の最新鋭LHC加速器は同年の陽子衝突実験プログラムを終了し、原子核衝突実験プログラムを開始した。初めての鉛-鉛原子核衝突を待ち構えていた実験チームは、同7日、華々しい花火のようなイベント表示(図1a)を目に大喜びした。重心衝突エネルギーは核子対あたり2.76 TeVと、従来の米国RHIC加速器を使うPHENIX/STAR実験<sup>1)</sup>に比べて、14倍も強力な原子核衝突を実現した。クォーク物質探索を最先端でリードしてきた研究者たちにとって、PHENIX実験開始以来、10年ぶりの未踏領域での挑戦が始まった瞬間である。

LHC大型実験の1つ、ALICE実験<sup>2)</sup>は、ビーム衝突点を2種類の飛跡検出器で囲み、ビーム衝突から放出される荷電粒子を広い範囲で測定する。検出器全体を

■ 4 高エネルギー素粒子反応は高い精度でクォーク対を生成する。対生成されたクォークと反クォークは、運動量平衡のために空間的に反対方向(back-to-back)に同じエネルギーをもって飛び出すことになるが、それぞれがすぐにたくさんのハドロンの雲(ジェット)に包摂する。したがって通常、空間的に反対方向で、全エネルギーが等しいジェットの対が観測される。ところが、鉛原

子核衝突において、対となるジェットに大きなエネルギー不均衡を発見した。クォーク対のどちらかがクォーク物質を通り抜ける大きなエネルギーを持ったものと考えられる。



(図1) ALICE実験でみるLHC鉛原子核衝突現象(a)と陽子衝突現象(b)

(a)鉛原子核どうしがほぼ正面衝突したときに検出した荷電粒子の向陽を立体構成し、中心部をやや拡大して表示する。(b)(カラー画像は自次ページを参照。)同じ実験装置で陽子衝突現象を観測する。衝突エネルギーは7 TeV。核子対あたりの衝突エネルギーは(a)に比べて2倍以上高いが、生成粒子数はわずかな。ソレノイド磁場により荷電粒子が曲げられて出ていくことがはっきりわかる。曲率の逆数が運動量に相当し、曲が方向により電荷の極性がわかる。(© CERN)

これまで観測されたこともない強さでそれを止めようとする。この現象はRHIC実験で発見され、ジェット抑制(jet quenching)とよばれる。人々の興味は、RHIC実験より何倍も高温・高密度のクォーク物質が、どのような抑制能力をみせるかであった。ATLAS実験はジェット対生成現象に大きなエネルギー不均衡<sup>3)</sup>を発見し、強い抑制能力を示唆した。ALICE実験は荷電粒子の運動量分布から、抑制能力を解析した。クォーク物質を横切る粒子の運動量が7 GeVまでのときは、RHIC実験で観測した阻止能力とかなり似た特徴を示し、その強さは30~40%程度強めである。7 GeVを超えたあたりから、阻止能力は徐々に弱まってくることを明らかにした。

国際会議ではCMS実験も、阻止能力を明かすデータをもって登場した。衝突

中心度と測定領域はわずかに違うが、ALICE実験が測定した100 GeVまでのジェット抑制能力の結果を重ねてみせた。びたりと一致しており、聴衆を大いに安心させた。

### ■ やはり完全流体なのか?

2002年、RHIC実験がクォーク物質の驚くべき性質である完全流体を発見したとき、新聞に「宇宙の始めはしずかか?」との見出しが載ったことを覚えているだろうか。LHCの実験では、このような流体的性質<sup>4)</sup>がどこまでみられるかも大きな焦点である。

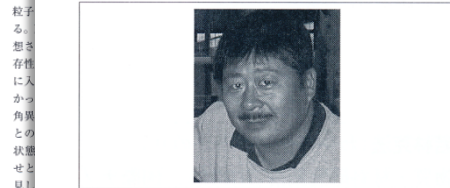
ビーム原子核の中心どうしがわずかにずれた衝突をするとき、重なり合う部分はラグビーボールの形になる。変形した粒子源が膨張しながら生成する粒子の、変形対称面からの方位角分布を調べると、

48

密度は感動的でさえある」と語っている。残る誌面で2つの発見について紹介する。

### ■ どこまでジェットを止めるか?

色荷をもった高速の素粒子がクォーク物質を通り抜けるようにすると、この物質は



杉立 徹(すぎたて・とおる)

広島大学大学院理学研究科教授。理学博士。1981年東京工業大学大学院理工学研究科物理学専攻修士課程修了。広島大

学理学部物理学科助手、助教授を経て、2002年より現職。おもな研究分野は高エネルギー原子核衝突実験によるクォーク多体系の物理学。米国BNL-AGS、欧州CERN-SPS、米国BNL-RHIC加速器による高エネルギー原子核衝突実験に従事し、2006年欧州CERN研究所LHC加速器ALICE実験に参画する日本研究組織を立ち上げ、以来、組織代表を務める。家族は妻と息子4人。





# alice-j.org

ALICE実験 | 研究内容 | メンバー | NEWS

キーワードを入力



- イベントのお知らせ (過去の開催)
- 2014.07.01

科研費・基礎研究 (S) 「クォーク物質を解き明かすALICE実験フォトン物理の発展」 (研究代表 杉立徹 (広島大), H26年度~H30年度) が採択されました。

[【詳細を見る...】](#)
  - 2014.06.20

FJPP-L-TYL 2014 採択

[【詳細を見る...】](#)
  - 2014.10.01

長崎総合科学大学、フルメンバーとしてALICE 正式参加

[【詳細を見る...】](#)
  - 2014.11.01

ダイジェット電磁カロリメータ (DCal) の ALICE 実験エリアへのインストールが完了

[【詳細を見る...】](#)

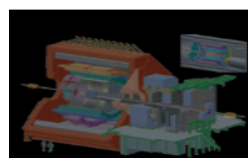


## LHC-ALICE実験 日本グループ

このページでは、LHC-ALICE 実験について関する様々な情報を日本語で配信しています。

### News

- 2014.07.01 科研費・基礎研究 (S) (研究代表 杉立徹 (広島大))
- 2014.06.20 FJPP-L-TYL 2014 採択
- 2014.10.01 長崎総合科学大学、フルメンバーとしてALICE 正式参加
- 2014.11.01 ダイジェット電磁カロリメータ (DCal) の ALICE 実験エリアへのインストールが完了
- 2015.01.31 日本学術振興会・二重光子と中性中間子測定 (筑波大), H27年度~H28年度) が採択されました。
- 2015.01.31 日本学術振興会・二重光子と中性中間子測定 (筑波大), H27年度~H28年度) が採択されました。
- 2015.03.01 第2回ALICE 物理研究委員会



Copyright 2012 Alice-J.

## ALICE-JAPAN 研究機関・メンバー

### ●広島大学

杉立徹 (グループリーダー)	sugitate_at
志垣賢太	shigaki_at

### ●東京大学

浜垣秀樹 (グループリーダー)	hamagaki_a
郡司 卓	gunji_at_c
渡辺 陽介	wyosuke_at

### ●筑波大学

三明康郎 (グループリーダー)	ymiake_at
江角晋一	esumi_at_s
中條達也	chujo.tatsuy
稲葉基 (筑波技術大学)	inaba_at_a
益井宙	masui.hirosh
Busch, Oliver	o.busch_at

### ●長崎総合科学大学

大山健 (グループリーダー)	
田中義人 (ゲストメンバー)	

### ●理化学研究所

延與秀人 (アソシエイトメンバー)	enyo_at_r
-------------------	-----------

2015年3月3日更新

## ALICE 実験組織における国内メンバーの役割

### ■ 杉立徹

- 日本組織代表、実験技術審査部会、国際会議審査部会 (CC)
- 広島大学 グループリーダー
- PHOS 検出器准責任者
- ALICE Tier 2 Hiroshima 責任者、日本解析拠点責任者

### ■ 浜垣秀樹

- 共同組織准議長 (Collaboration Board)、組織管理部会、公表論文審査部会 (Editorial Board)
- 東京大学 グループリーダー

### ■ 郡司 卓

- ALICE低質量レプトン対 (low mass dielectron) 物理解析コーディネーター

### ■ 三明康郎

- 筑波大学 グループリーダー

### ■ 中條達也

- DCAL 検出器准責任者
- Outreach 日本代表
- ALICE-Japan web サイト管理者

### ■ Busch, Oliver

- ジェット物理ワーキンググループ (PWG-JE) コンビナー

### ■ 大山健

- 長崎総合科学大学 グループリーダー
- TPC 検出器読み出しシステム (CRU) 責任者

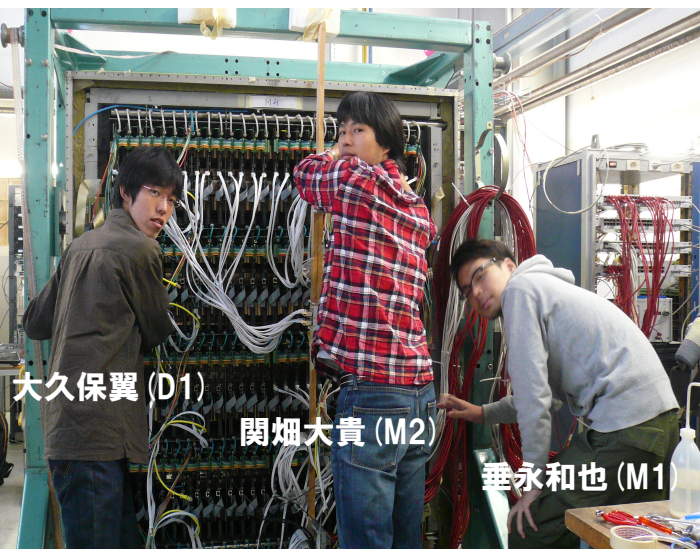
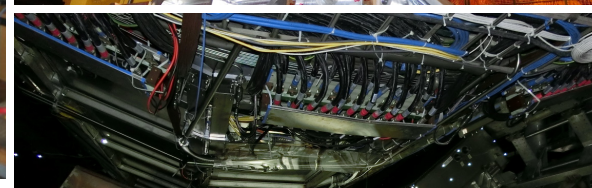
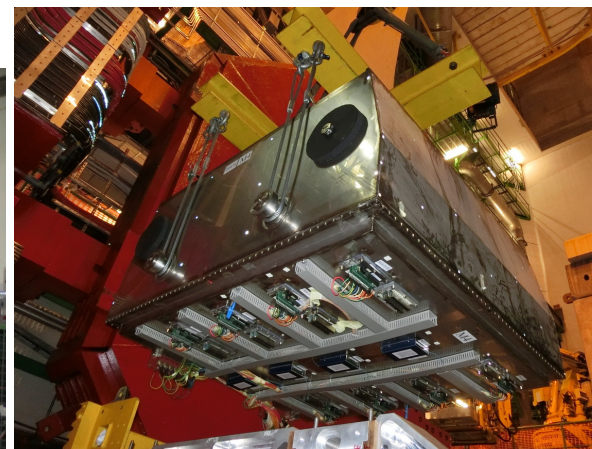
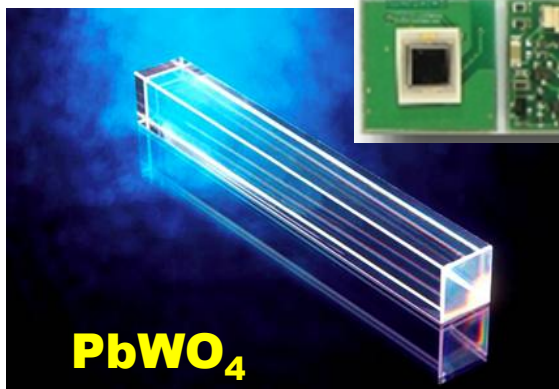
2015/3/12 CifSEワークショップ@筑波大

広島大学理学研究科・物



# 最高性能フoton検出器PHOS建設 (2006-)

H15基盤B/H18特推/H23基盤A/H26基盤S



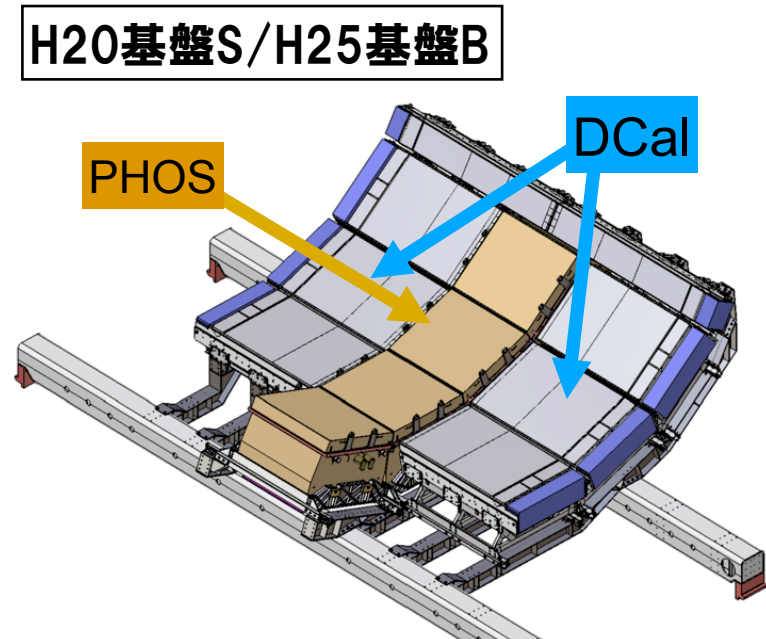
2015/3/12 CiRfSEワークショップ@筑波大

広島大学理学研究科・杉立徹



# ジェット対検出器 **DCal**建設 (2008-)

- ◆ 2008年 三明康郎(筑波大) 中性成分を含むジェット測定器+ジェットトリガー提案 → 日仏米伊中の国際共同建設を主導 → **Di-jet Calorimeter (DCal)**
- ◆ 2009年 建設開始. 筑波大は1.5モジュール(全6モジュール)建設. 2011年 搬出.
- ◆ 2013-14年 CERNにて全機テスト(渡辺D2等). **EMCal/DCal/PHOS L1ジェットトリガー構築**(横山D1、細川M2).
- ◆ 2014年11月 **ALICE実験装置に組込完了.**
- ◆ 2014年11月 中條達也(筑波大) **EMCal/Dcal** 准責任者就任.



DCal検出器 インストール前  
2013年9月 @ CERN,  
ALICEアッセンブルホール



DCal検出器組込完了時  
2014年11月 @ ALICE実験エリア



# ジェット対相関による抑制機構解明

## ◆ jet-jet (di-jet), $\gamma$ -jet, h-jet 測定

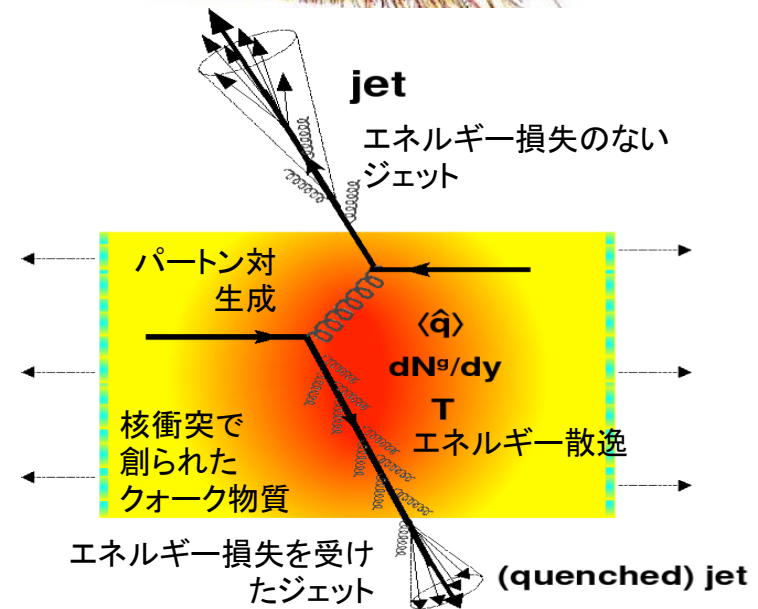
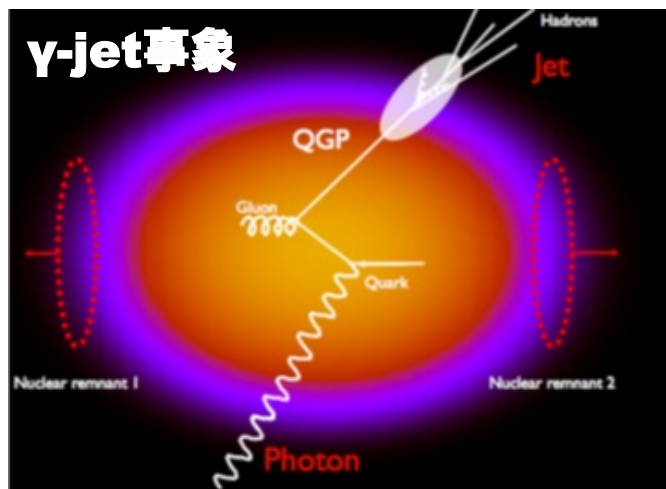
- パarton衝突位置の決定、エネルギー損失の通過距離依存性
- パartonエネルギー損失機構の解明

## ◆ Jetエネルギー損失とソフトハドロン生成

- QGPの媒質応答
- グルーオン衝撃波→EOS決定の可能性

## ALICE Run-2:

- ジェット対及びジェット高統計サンプルが重要
- DCal+PHOSのジェットLevel-1トリガー構築



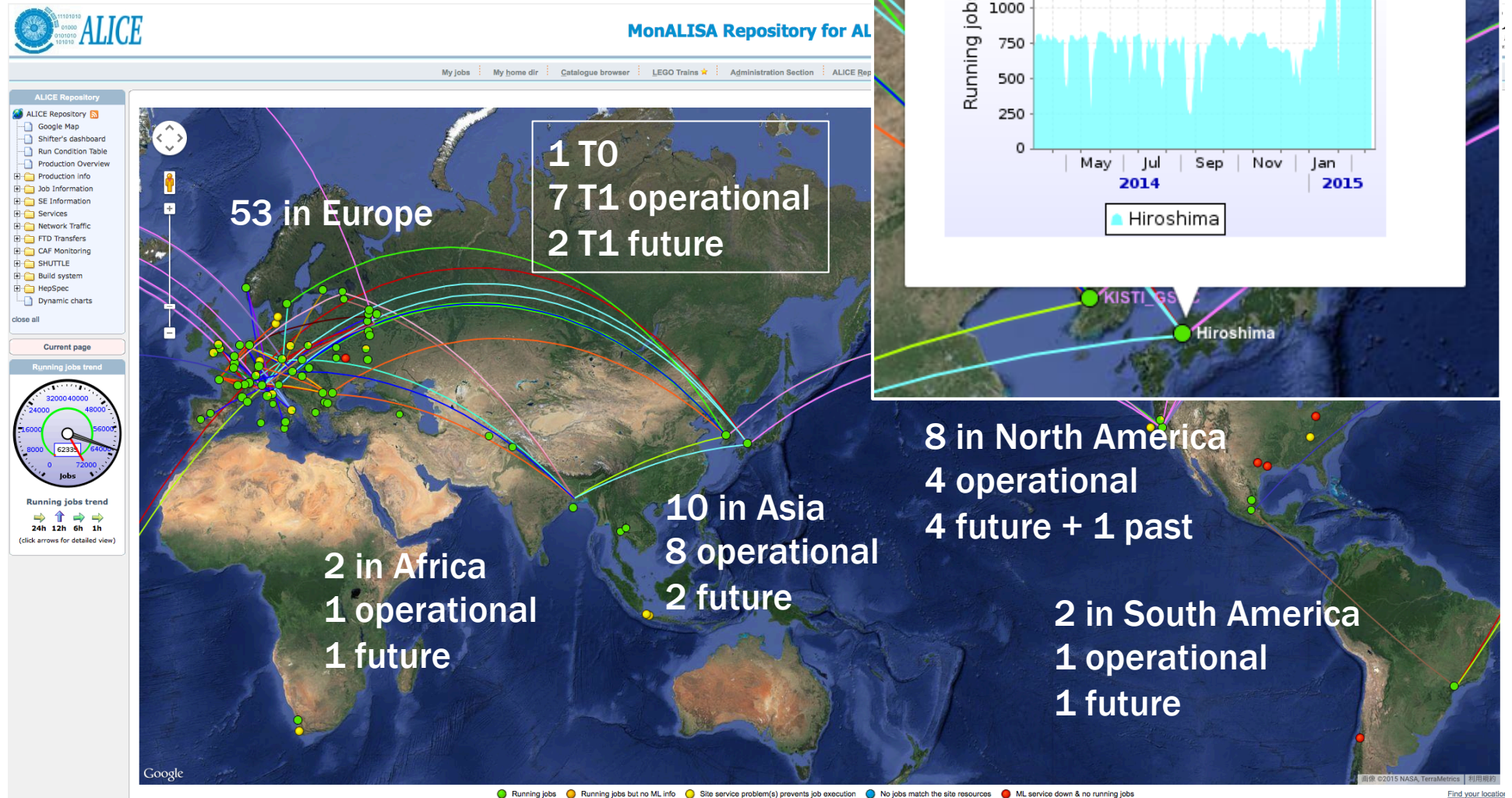
# ALICE Tier-2 at Hiroshima

- The ALICE T2 site “**JP-HIROSHIMA-WLCG**” with grid middleware EMI-3 on SL6.5... **as stable as possible.**
- GRID service; APEL, sBDII, CREAM-CE, XROOTD, DPM-SE, VOBX... **as compact as possible.**
- WN resources; **1356 Xeon-cores in total**  
Xeon5355(4c@2.6GHz) x 2cpu x 16 boxes  
Xeon5365(4c@3.0GHz) x 2cpu x 20 blades  
Xeon5570(4c@2.9GHz) x 2cpu x 26 blades  
Xeon5670(6c@2.9GHz) x 2cpu x 3 blades  
Xeon5660(6c@2.8GHz) x 2cpu x 42 blades  
E5-2470v2(10c@2.4GHz) x 2cpu x 16 blades
- Storage cap; **408TB (+ 312TB under installation)**  
**disks on 6 (+1) servers and no MS**
- Around **2/3 resource** deployed to ALICE GRID
- The rest for a local cluster
- Network B/W: **1Gbps** on 40Gbps-SINET4 in Japan
- WLCG support by ASGC in Taiwan
- Responsible by Prof. Toru Sugitate
- Operated by TS and **垂永和也 (M1)** under remote technical support by **SOUN** corp., Tokyo.





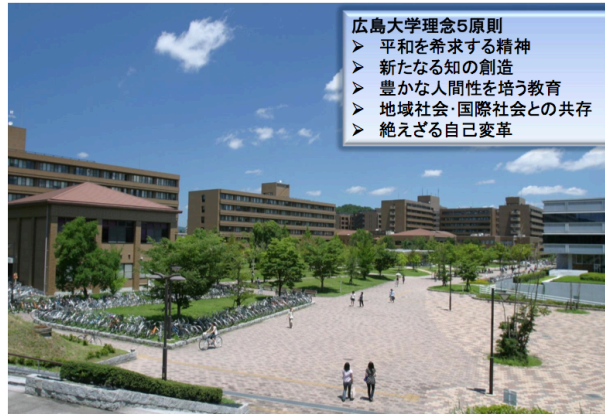
# ALICE Tiers in the World





# 広島大学の最近の取り組み

## H25年度「研究大学強化促進事業」 研究大学強化促進事業



## H26年度科学技術 人材育成費補助事 業「科学技術人材 育成のコンソーシア ムの構築事業」



## H26年度「スーパーグローバル大学創成支援 事業(タイプA)」

### グローバル人材育成による国際的評価の向上



5



研究推進機構

# Researcher Interview

研究を通じて見えてくる様々な世界とその成果を語ります



研究推進機構は、特に優れた研究者および研究課題を選定し、重点的支援を通じて、個性ある研究拠点の構築を行うこと、また、研究者が研究に専念できるよう研究環境基盤整備を行うなど、本学が総合研究大学としてより一層の発展を遂げられるよう、本学の研究に関する総合的なマネジメントを行う組織です。

[illegible][illegible]



# 広島大学 極限宇宙研究拠点 CORE-U

広島大学 極限宇宙研究拠点  
Core of Research for the Energetic Universe  
HIROSHIMA UNIVERSITY

広島大学 極限宇宙研究拠点  
CORE-U  
Core of Research for the Energetic Universe  
HIROSHIMA UNIVERSITY

日本語 English お問い合わせ アクセス

HOME

- ＞ 拠点の目的
- ＞ 拠点長からのあいさつ
- ＞ 組織
- ＞ 研究グループ紹介
  - ＞ Astro-H推進 高エネルギー宇宙
  - ＞ クォーク物理学
  - ＞ 素粒子理論
  - ＞ 宇宙物理理論
  - ＞ 光赤外線天文学 (かなた望遠鏡)
- ＞ ニュース一覧
- ＞ 研究成果リスト

学部 物理科学科

大学院 物理科学専攻

広島大学 HIROSHIMA UNIVERSITY

検索

関連リンク

バナー

Copyright © CORE-U Hiroshima University All Rights Reserved.

cf. [www.hiroshima-u.ac.jp/orp/](http://www.hiroshima-u.ac.jp/orp/)

- ◆ クロマチン動態数理研究拠点  
理学研究科 楯 真一 教授
- ◆ ゲノム編集研究拠点  
理学研究科 山本 卓 教授
- ◆ 広島肝臓プロジェクト研究センター  
医歯薬保健学研究院 茶山 一彰 教授
- ◆ 統計科学研究拠点  
社会科学部 山田 宏 教授
- ◆ 学習システム促進研究センター  
教育学部 池野 範男 教授
- ◆ キラル物性研究拠点  
理学研究科 井上 克也 教授
- ◆ 極限宇宙研究拠点  
理学研究科 深沢 泰司 教授
- ◆ 基礎研究を畜産技術開発につなげるトランスレーショナル型研究拠点  
生物圏科学研究科 吉村 幸則 教授
- ◆ 広島大学健康長寿研究拠点(HiHA)  
先端物質科学研究科 平田 大 教授
- ◆ 緊急被ばくに即時対応できる再生医療研究拠点  
原爆放射線医科学研究所 東 幸仁 教授

# LHC Baseline Schedule

ちょっと古いです。すみません。

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
2011												
2012												
2013												
2014												
2015												
2016												
2017												
2018												
2019												
2020												
2021												
2022												
2023												

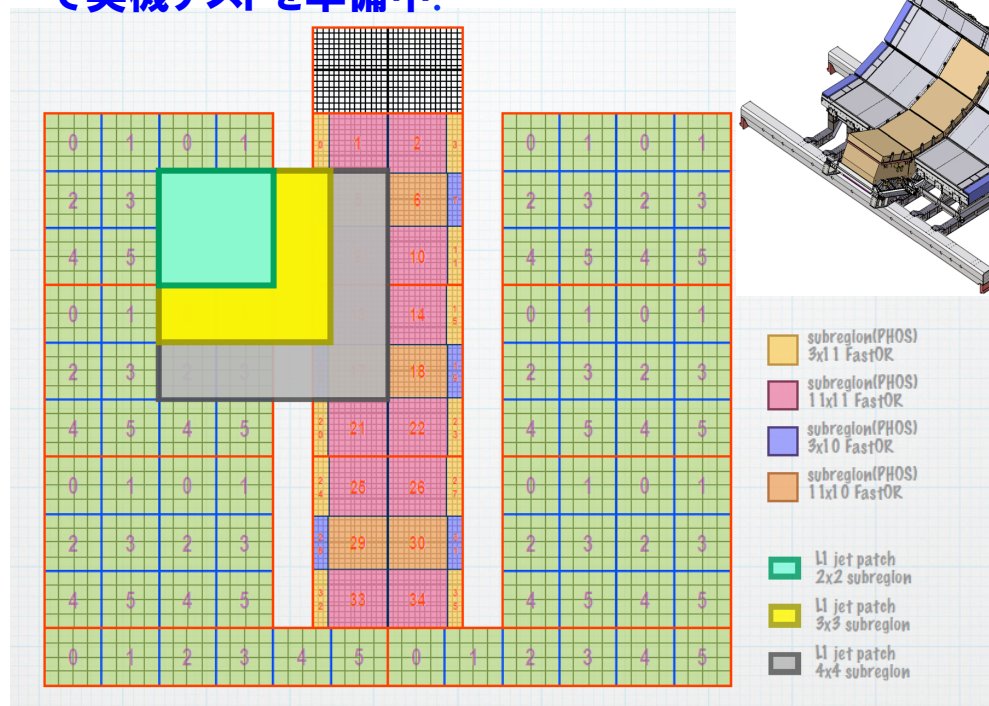
	Technical stop or shutdown
	Proton physics
	Ion Physics
	Recommissioning

LS2 starts Dec. 2017 and lasts 14 months

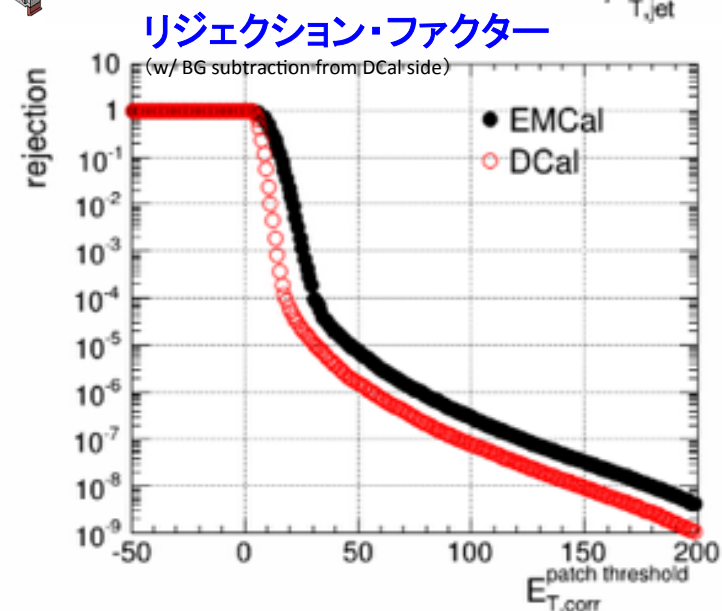
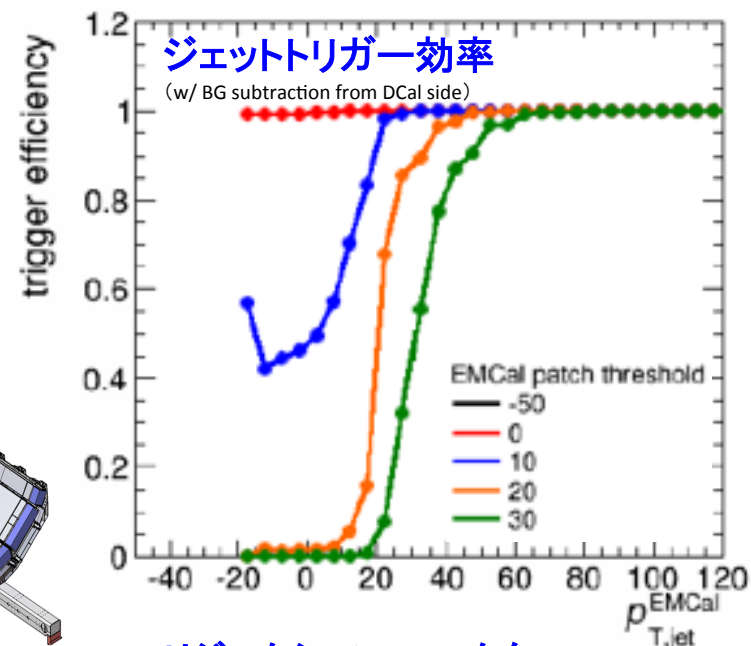


# EMCal/DCal/PHOS ジェットトリガー構築

- 筑波大・中條達也と横山 (D1), 細川 (M2) は、ユバスキラ大とグルノーブルLPSCと共同してEMCal/DCal/PHOSを組み込むLevel-1ジェットおよび光子トリガーを構築.
- Jetトリガー効率曲線のシャープな立ち上がりを実現.
- ミニマムバイアス事象のjets@30GeVでrejection係数10,000 を達成.
- FPGAファームウェア開発はほぼ終了. RUN-2に向けて実機テストを準備中.

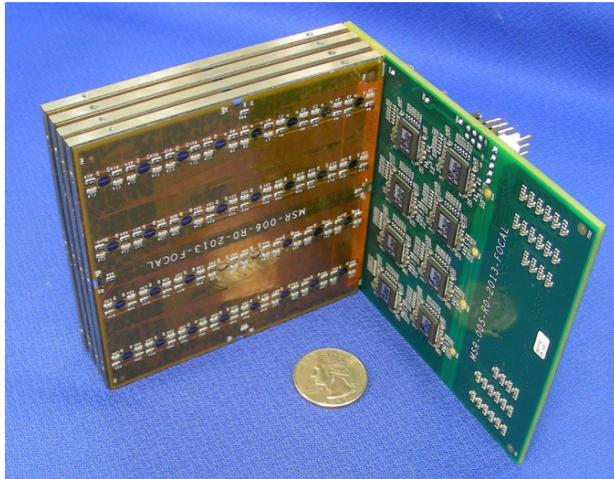


DCal + PHOS ジェットトリガーパッチ (横山 D1)

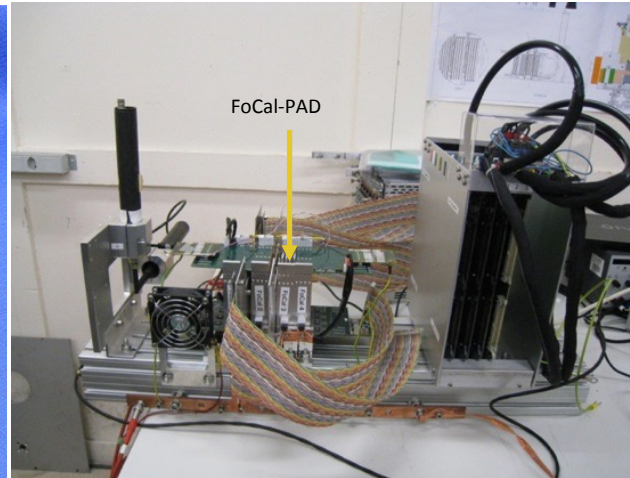


# 前方光子検出器 **FoCal** で拓く未開物理

～カラーグラス凝縮、QGP早期熱化の解明～

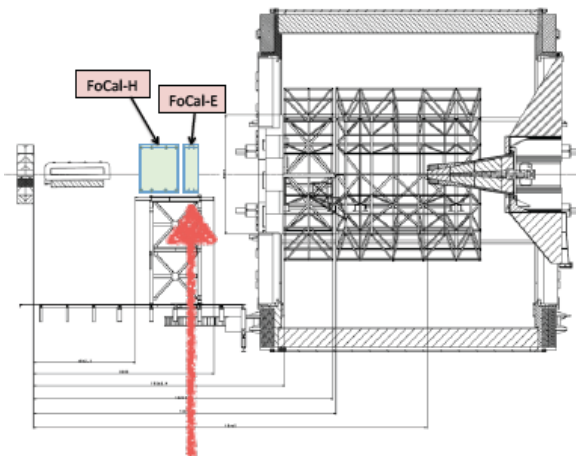
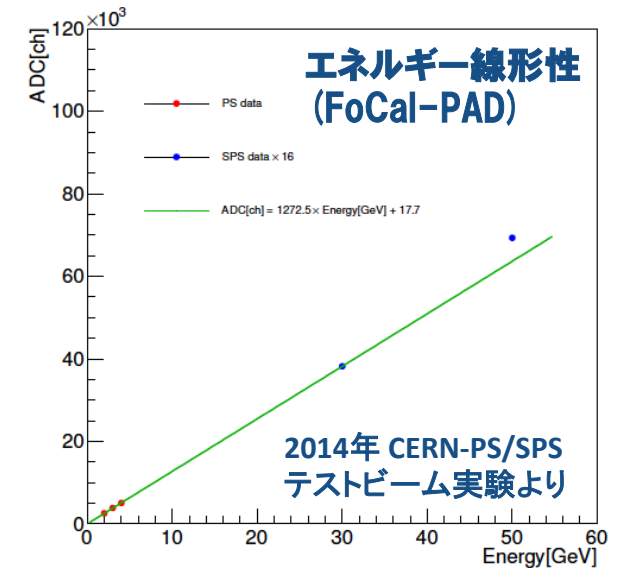


FoCal-PAD (LGL) 検出器  
試作機 (ORNL製)



ビームテスト用試作機 (4PAD+2MAPS)

**H25基盤B/H20基盤S分担**



**FoCal:  $\eta = 3.3 - 5.3$**

- $\eta = 3.3 - 5.3$  に超前方光子検出器 (FoCal) を建設。
- 電磁(PAD, MAPS)及びハドロン成分から構成。
- **超前方直接光子測定**によりカラーグラス凝縮 (CGC)の検証;  
重イオン衝突初期条件の決定; QGP熱化機構を解明。
- **中條 (筑波大) がPAD検出器の主開発グループとして参加。**
- 2014年 CERN-PS/SPS テストビーム実験実施。
- 2015年末までにALICE実験内外での設置提案、承認(予定)
- 2018年 mini-FoCal 導入; 2023年 実機導入; 本測定開始。



# 筑波大学 ALICE Tier-2 拠点構想

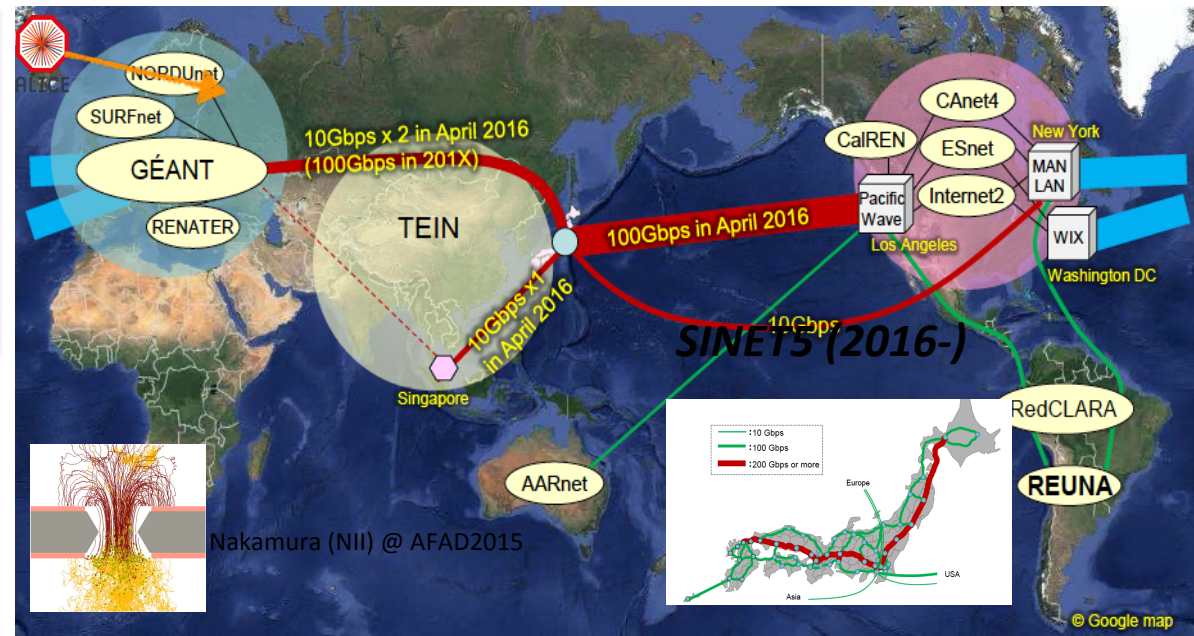


筑波大学  
University of Tsukuba

- ◆ LS2(2019年頃)以降、ALICE測定器の高度化により、ALICE実験生データ生成量が **×100倍 → 1TB/s.**
- ◆ Grid解析網再構築が必須 → 新たなALICE-T0@CERNの建設.
- ◆ 実験組織はRun-3に向けた新たな解析網の構築要請 → 日本組織.
- ◆ 筑波大 ALICE Tier-2 拠点構想
  - 広島大(現ALICE-T2)の協力により、筑波大にTire-2プロトタイプを構築中.
  - 筑波大HPC, SINET5 (2016年稼働; 国内200Gbps, 欧米100Gbps) の活用.



2015/3/12 CiRfSEワークショップ@筑波大



広島大学理学研究科・杉立徹

# まとめ

- ◆ 衝突エネルギー増強する**LHC**加速器**RUN-2**（2015年4月開始）を迎えて今後10年、クォーク多体系の完全解明に向けた大きな成果を約束
- ◆ 国際共同研究**ALICE**実験の日本組織は、員数規模を超える重要な【役割】×【発言力】×【主導力】を獲得
- ◆ 【クォーク多体系】×【プラズマ物性】×【低温原子分子】×【流体理論模型】×【素粒子理論】の深化発展を併せた新たな学術領域の可能性大
- ◆ 【教育力】×【研究力】×【国際力】が試されるなか、組織力を合算した牽引力が不可欠
- ◆ 筑波大学数理物質融合科学センターの益々の強化発展を強く期待





ありがとうございました

2015-03-12  
Toru Sugitate