

機関番号：15401

研究種目：特別推進研究

研究期間：2006～2010

課題番号：18002010

研究課題名（和文）クォーク物質創成とフォトン物理

研究課題名（英文）Formation of Quark Matter and Photon Physics

研究代表者

杉立 徹 (SUGITATE TORU)

広島大学・大学院理学研究科・教授

研究者番号：80144806

研究成果の概要（和文）：

欧州 CERN 研究所 LHC 加速器の高エネルギー原子核衝突 ALICE 実験において、鉛タングステン酸単結晶電磁カロリメータ PHOS の建設及び運用責任を分担するとともに、同加速器による初めての陽子+陽子衝突及び鉛+鉛原子核衝突実験を遂行し、同検出器により初めて実現される高分解能フォトン物理を推進した。その結果、鉛原子核衝突直後のエネルギー密度及びジェット抑制現象などクォーク物性の解明に繋がる新たな知見を得た。

研究成果の概要（英文）：

We have developed and constructed an electromagnetic calorimeter PHOS, composed of finely segmented lead-tungstate crystals coupled with APD readout, as a part of the ALICE international collaboration at CERN. We have deployed PHOS in the first p+p and Pb+Pb collisions at the LHC accelerator, and successfully carried out photon physics in the new LHC domain based on high precision measurement, which PHOS uniquely makes possible. We observed new features of the nuclear collision system at LHC including high energy density and strong jet quenching. They shed new light on properties of quark matter.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	76,600,000	22,980,000	99,580,000
2007年度	103,600,000	31,080,000	134,680,000
2008年度	57,400,000	17,220,000	74,620,000
2009年度	47,100,000	14,130,000	61,230,000
2010年度	26,600,000	7,980,000	34,580,000
総計	311,300,000	93,390,000	404,690,000

研究分野：実験クォーク物理学

科研費の分科・細目：物理学・素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：クォーク物質、高エネルギー原子核衝突、LHC 加速器、ALICE 実験、極初期宇宙

1. 研究開始当初の背景

高エネルギー原子核衝突実験は、静止質量の数千倍もの運動エネルギーをビーム原子核に与え、ふたつの原子核が正面衝突した極小空間に莫大なエネルギーを注入する。殆ど物質質量零のまま急激に加熱された空間は 10 兆度にも達し、真空から対生成されたクォーク

と反クォーク及びグルーオンが混ざり合ったクォーク物質を創成する。宇宙誕生直後、百万分の一秒後の私たちの宇宙創成の再現である。米国 BNL 研究所 RHIC 加速器実験から私たちは、クォーク物質は強く相互作用する完全流体的であることを突きとめた。それは、「宇宙の誕生しずくから？」(平成 17 年 4

月 19 日朝日新聞)等と社会的にも関心を集めた。ビッグバンの瞬間までより遡ったとき、即ち、クォーク物質創成温度を更に上げたとき、クォーク物性が果たしてどの様な変化を見せるかが次の研究の焦点であった。

2. 研究の目的

物質の究極的な姿形を追求するという先人から受け継いだ努力の中で、クォーク物質の研究を“発見”から定量的な“理解”へ展開することが本研究の使命である。色荷による強い相互作用がその“強さ”の特徴を最も明示的に露呈する非摂動現象であり、クォーク物質の物性解明は、量子色力学 (QCD) の完全理解に向けた世界的な研究動向である。電磁相互作用により組み立てられた従来の物質概念を打ち破り、今まで全く考えられなかった色相互作用により“強く”結びついたクォーク物質 (QCD プラズマ) の概念を構築するとともに、超高温クォーク物質で充たされていた極初期物質宇宙の時空発展を決めたダイナミクスを理解を目指す。

3. 研究の方法

米国 BNL 研究所 RHIC 加速器より遙かに高い衝突エネルギーを実現する欧州 CERN 研究所最新鋭 LHC 加速器による鉛+鉛原子核衝突を用いて、人類史上最高温度のクォーク物質を創りだす。新開発の鉛タングステン酸単結晶を用いた高分割・高エネルギー分解能光子検出器 PHOS を ALICE 実験装置 [図 1, 2] に組み込み、超高温クォーク物質が膨張し冷却し最後にハドロン化して離散するまでに発する光をこれまでにない高精度で測定する。中性エネルギー流の測定から到達エネルギー密度、2 光子崩壊した中性パイ中間子の運動量分布からハドロン析出条件、更に運動量分布の衝突中心度依存性からクォーク物質のジェット抑制因子を明らかにする。最先端の高分解能 PHOS 検出器により初めて観測可能になる直接光子エネルギー分布を測定し、摂動的 QCD 光子とクォーク物質からの熱輻射光子成分に分離し、熱輻射光子のエネルギー分布からクォーク物質の熱統計力学状態を特定することによりその物性を解明する。

4. 研究成果

CERN 研究所 LHC 加速器 ALICE 実験は世界 30 カ国、109 研究機関、約 1000 名が構成する国際共同実験組織であり、本研究代表者が日本組織代表となり、広島大学、東京大学、筑波大学が公式参加した。LHC 加速器 4 実験 (ALICE, ATLAS, CMS, LHCb) のなかで原子核物理学の実験研究に唯一特化した実験装置として、17 種の検出器を巧妙に組み合わせ、特色あるトピックスをできる限り包括することを使命とした。わが国研究チームは高分解能光子検



図 1 ALICE 実験装置と日本チームが共同建設した高性能フォトン検出器 PHOS.

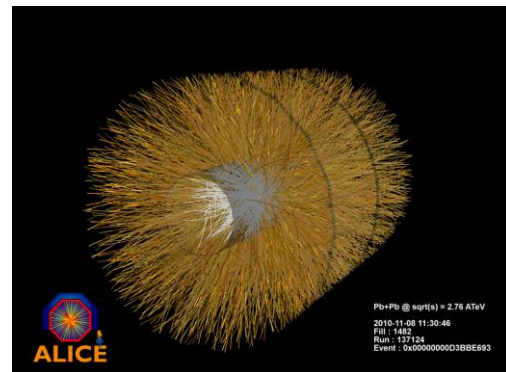


図 2 鉛+鉛原子核の初衝突事象。
(ALICE 実験装置 2010. 11. 8)

出器 PHOS の建設及び運用責任を分担し、APD 光子検出素子及び APD 電荷感応型増幅器など、光子検出読出系の開発と国内生産、及び現地組み立てを完遂した。PHOS 検出器は同型モジュール 5 基から構成し、各モジュールには 3,584 本の PW0 検出素子を 56×64 の格子状に配置し、ビーム衝突位置から約 5m の距離に設置する。

PHOS 検出器は従来のシンチレーション材に比較してモジュール半径が小さく高性能な鉛タングステン酸単結晶 (PbWO_4)、及び優れた APD 光子検出方式を新規開発したこと、並びにこれらの性能を更に高める低温運用技術を導入したことにより、GeV エネルギー領域の大型光子検出器のなかで世界最高性能を有し、エネルギー分解能 $\Delta E/E = 3.3\%/\sqrt{E}$ [GeV] $\oplus 1.1\%$ 、並びに空間分割度 $\Delta\Omega = 4 \times 4 \text{ mrad}^2$ を達成した。LHC 加速器実験の競合相手と比較しても、ATLAS 実験液体アルゴンカロリメータのエネルギー分解能 $10\%/\sqrt{E}$ [GeV] $\oplus 0.5\%$ 、あるいは CMS 実験電磁カロリメータの空間分割度 $17.4 \times 17.4 \text{ mrad}^2$ に比較して圧倒的に優れている。飛び抜けたエネルギー分解能及び空間分割能力は、技術的困難が指摘されてきた直接光子エネルギー分布測定を可能にするひとつの重要な技術要素であり、本研究に

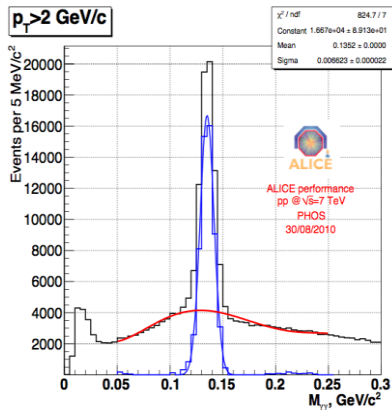


図3 PHOS 検出器により測定した中性パイ中間子の不変質量分布. 不変質量分解能 5.2%を達成.

よる格段に高度で詳細なフォトン物理の推進を担保している。

LHC 加速器は当初計画より1年遅れて2008年9月に完成したが、完成直後に予期せぬ障害を引き起こし、復旧に更に14ヶ月を要した。PHOS 検出器建設も2008年米国リーマンショックに端を発する世界同時不況に起因した予測・回避不能な困難（ロシア側検出器主要部材供給遅延）に直面したものの、2009年初ビーム衝突実験までに3基のモジュールを完成させ、ALICE 実験装置に組み込んだ。なお、現在、遅れていた第4モジュールの組み立てを進めている。

私たちは検出素子のエネルギー利得較正方法について、①最小電離粒子によるエネルギー損失、②中性パイ中間子の不変質量、③未同定粒子によるエネルギー損失分布を用いる手法を開発し、模擬データを用いた検証研究から直接光子測定に必要とする1%の較正精度を達成できることを初めて証明した。更に検出素子間の時間同時性も0.5nsの系統誤差まで較正する手法を開発し技術論文として公表した。私たちの較正手法は広く支持され、鳥井久行（広島大PD）を筆頭にPHOS 検出器較正グループが形成され、その時点での競争的案件であったPHOS 検出器データ解析チーム筆頭の主導権争いに勝利した。

2009年11月23日、LHC 加速器による初めての陽子+陽子衝突事象を検出し、2010年3月31日には衝突エネルギーは史上最高の7TeVに達した。鳥井久行を筆頭に広島大グループが中心となって初めてのデータ解析を先導し、中性パイ中間子に対するPHOS 検出器の不変質量分解能5.2%を達成させ[図3]、現状の統計精度で期待される充分優れた性能

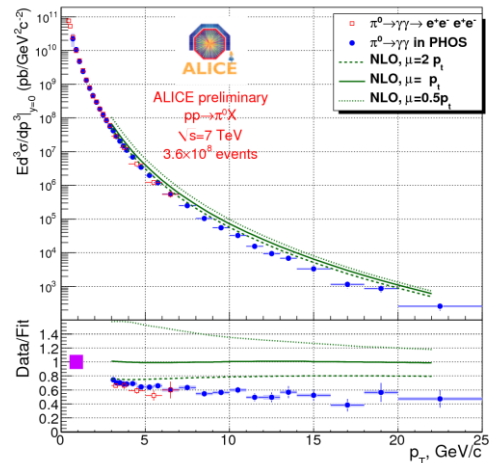


図4 7TeV 陽子+陽子衝突における中性パイ中間子の横運動量分布. 実線はQCD理論予測. 下段はQCD予想との比.

であること、並びにクォーク物質の詳細な理解に向けた高品位光子データの収集に成功していることを確認した。引き続き、中性パイ中間子生成の運動量分布を他LHC実験に先駆け解析し、QCD理論予想（図中実線）と比較した結果、QCD理論は約20%過大予想することを明らかにした[図4]。これは従来の知識の中で組み立てたパートン分布関数（PDF）が、新たなエネルギー領域で破綻していることを意味しており、クォーク物理学分野にとって重要な発見である。現在、論文公表の最終段階にある。

2010年11月8日、LHC 加速器による初めての鉛+鉛原子核衝突実験を開始した。LHC 加速器の初期不良により衝突エネルギーは核子対あたり2.76TeV（当初計画は5.5TeV）に制限されたものの、従来のRHIC実験（0.2TeV）を遙かに超える未踏領域での初事象である[図2]。広島大グループは早速、電磁カロリメータの特色を活かした中性エネルギー流の解析に着手し、部分的なデータセットを解析した予備的な結果ではあるものの、エネルギー密度が $14.1 \pm 0.7 \text{ GeV/fm}^3$ に達し、RHIC実験が記録したエネルギー密度（ 4.9 GeV/fm^3 ）を遙かに凌ぐことを真っ先に突きとめた。

並行して、高分解能PHOS 検出器の性能を活かした中性パイ中間子生成の解析を進めた。鉛原子核中心衝突における生成粒子多重度は非常に大きいため、PHOS 検出器に事象あたり1000個を超えるヒットが作られる。この中から2光子崩壊した中性パイ中間子を選び出す手順は、粒子多重度の低い陽子衝突データと比較して格段に難しさを増す。例えば、2つの独立な粒子が偶然近い位置にヒットしたため、エネルギーを合算したひとつのヒットのように見つかることなどが確率的に起

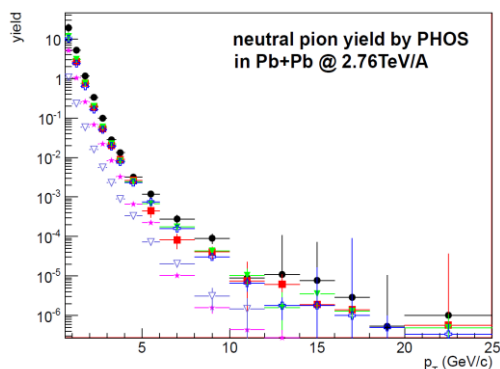


図5 PHOS 検出器により測定した鉛+鉛原子核衝突@2.76TeV/Aにおける中性パイ中間子横運動量分布（未補正）の衝突中心度依存性。

こる。2光子崩壊の候補対となる組み合わせも指数的に増大するなかで、これらの影響を正しく理解し補正できるかが解析チームに科せられた命題であった。私たちはイベントミキシング技法を開発することにより、正しい運動量分布の抽出手順を確立し、鉛衝突事象全イベント（90M事象）の約半分の事象を先行解析し、横運動量分布（未補正）の測定に成功した [図5]。

衝突中心度毎に分割して運動量分布を調べたところ、中心衝突事象ではQCD理論から予想される運動量生成分布の約10-40%しか収量がなく、生成粒子が大幅に欠損していることを突きとめた [図6]。米国RHIC加速器実験で私たちが発見したジェット抑制現象に大変よく似ている。図6には全測定事象（衝突中心度0-90%）によるジェット抑制因子データ、及び衝突中心度により4分割（0-20%, 20-40%, 40-60%, 60-90%）に事象選別したデータを載せた。空間的に最も大きく且つ最高温度のクォーク物質が創られると考えられる最中心衝突事象（0-20%）のジェット抑制因子（赤データ点）は、他衝突事象に比較して、全運動量範囲（0-20GeV/c）にて常に最強の抑制現象を示す。図中には同じ衝突系に於ける荷電粒子（ h^\pm ）に注目して測定したジェット抑制因子、及びRHIC加速器PHENIX実験によるジェット抑制因子を比較のために載せている。本研究による中性パイ中間子を同定したジェット抑制因子と測定粒子種未同定の荷電粒子によるデータとの比較は今後の興味ある検討課題である。低い衝突エネルギーのPHENIX実験データ（Au+Au@0.2TeV/A）と比較すると、本衝突系において格段に強い抑制が観測され、従来のジェット抑制の知見だけでは説明できない現象が起きている可能性もある。明確な結論は今後の全収集データをつかった詳細なデータ解析、並びに、多方面からの検証を必要とするが、本年5月に開催さ

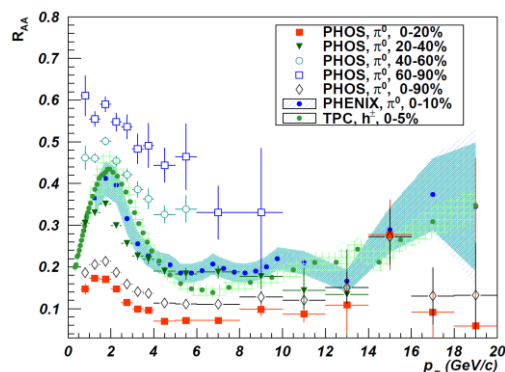


図6 鉛+鉛原子核衝突@2.76TeV/Aにおける中性パイ中間子のジェット抑制因子 R_{AA} 。同衝突系における荷電粒子（ h^\pm ）、及びRHIC実験結果（PHENIX）と比較。

れる当該分野で最も権威ある国際会議QM2011にて速報を予定する。中性パイ中間子生成のデータ解析が順調に進展していることを受け、同グループは陽子衝突及び鉛衝突における単光子データ解析に着手した。これら新たな知見は、非摂動的なクォーク多体系の研究に新たな地平を拓くことは確実である。

本研究開始以来、学術論文及び著書計20編、国際会議及び学会等に於いて54編の報告、並びに国内外シンポジウム主催共催3件を行った。国内においては、ALICE実験地域データ解析拠点（JP-HIROSHIMA-WLCG）を広島大学に立ち上げ、計算機資源を強化しながら上記データ解析国内活動を強力に支援するとともに、グローバルなデータ解析活動に多大な貢献を果たした。

わが国研究組織は発足当時6名であった研究者が12名、大学院生も9名に増大した。組織力の拡充に伴ってALICE実験への関わり方も広くそして深くなりつつある。本研究代表者のPHOS検出器副責任者（PHOS Deputy Project Leader）、並びにALICE技術審査部会やALICE計算機国際諮問部会への就任など、大型研究組織の中でしっかりした存在感と発言力を担保するとともに、世界トップの国際共同研究の中でフォトン物理の更なる深化と発展を図るべく、日本発の研究拡充計画を提言した。筑波大グループはジェット対電磁カロリメータ（DCAL）建設、東京大グループは前方電磁カロリメータ（FoCal）開発を先導し、広島大グループとともにALICE実験組織におけるフォトン物理の推進に責任と指導力を発揮した。これらはクォーク物理学に於ける世界最先端の研究動向を左右する重要な学術的貢献であり、本科研費により始動し成長したわが国研究組織の実力と成果を証明したものに他ならない。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 16 件)

- 1) **Centrality Dependence of the Charged-Particle Multiplicity Density at Midrapidity in Pb-Pb Collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ TeV**, K. Aamodt, H. Hamagaki, Y. Miake, K. Shigaki, T. Sugitate, H. Torii 他, Physical Review Letters 106(2011)032301/1-10, 査読有
- 2) **Two-pion Bose-Einstein correlations in central Pb-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ TeV**, K. Aamodt, H. Hamagaki, Y. Miake, K. Shigaki, T. Sugitate, H. Torii 他, Physics Letters B696(2011)328-337, 査読有
- 3) **Suppression of charged particle production at large transverse momentum in central Pb-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ TeV**, K. Aamodt, H. Hamagaki, Y. Miake, K. Shigaki, T. Sugitate, H. Torii 他, Physics Letters B696(2011)30-39, 査読有
- 4) **Elliptic flow of charged particles in Pb-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ TeV**, K. Aamodt, H. Hamagaki, Y. Miake, K. Shigaki, T. Sugitate, H. Torii 他, Physical Review Letters 105(2010)252302/1-11, 査読有
- 5) **Charged-particle multiplicity density at mid-rapidity in central Pb-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ TeV**, K. Aamodt, H. Hamagaki, Y. Miake, K. Shigaki, T. Sugitate, H. Torii 他, Physical Review Letters 105(2010)252301/1-11, 査読有
- 6) **Transverse momentum spectra of charged particles in proton-proton collisions at $\sqrt{s}=900$ GeV with ALICE at the LHC**, K. Aamodt, H. Hamagaki, Y. Miake, K. Shigaki, T. Sugitate, H. Torii 他, Physics Letters B693(2010)53-68, 査読有
- 7) **Midrapidity antiproton-to-proton ratio in pp collisions at $\sqrt{s}=0.9$ and 7TeV measured by the ALICE experiment**, K. Aamodt, H. Hamagaki, Y. Miake, K. Shigaki, T. Sugitate, H. Torii 他, Physical Review Letters 105(2010)072002/1-12, 査読有
- 8) **Charged-particle multiplicity measurement in proton-proton collisions at $\sqrt{s}=7$ TeV with ALICE at LHC**, K. Aamodt, H. Hamagaki, Y. Miake, K. Shigaki, T. Sugitate, H. Torii 他, European Physical Journal C68(2010)345-354, 査読有
- 9) **Two-pion Bose-Einstein correlations in pp collisions at $\sqrt{s}=900$ GeV**, K. Aamodt, H. Hamagaki, Y. Miake, K. Shigaki, T. Sugitate, H. Torii 他, Physical Review D82(2010)052001/1-14, 査読有
- 10) **Charged-particle multiplicity measurement in proton-proton collisions at $\sqrt{s}=0.9$ and 2.36TeV with ALICE at LHC**, K. Aamodt, H. Hamagaki, Y. Miake, K. Shigaki, T. Sugitate, H. Torii 他, European Physical Journal C68(2010)89-108, 査読有
- 11) **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**, K. Aamodt, H. Hamagaki, Y. Miake, K. Shigaki, T. Sugitate, H. Torii 他, European Physical Journal C65(2010)111-125, 査読有
- 12) **Solving a Deconvolution Problem in Photon Spectrometry**, D. Aleksandrov, K. Shigaki, T. Sugitate, H. Torii 他, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A620(2010)526-533, 査読有
- 13) **Alignment of the ALICE Inner Tracking System with cosmic-ray tracks**, K. Aamodt, H. Hamagaki, Y. Miake, K. Shigaki, T. Sugitate, H. Torii 他, Journal of Instrumentation 5(2010)P03003/1-36, 査読有
- 14) **Time of Flight resolution of the prototype of the electromagnetic calorimeter PHOS**, M. Bogolyubsky, T. Sugitate 他, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A598(2008)702-709, 査読有
- 15) **The ALICE experiment at the CERN LHC**, K. Aamodt, H. Hamagaki, Y. Miake, K. Shigaki, T. Sugitate, H. Torii 他,

Journal of Instrumentation
3(2008)S08002/1-245, 査読有

- 16) **ALICE: Physics Performance Report, Volume II**, B. Alessandro, **T. Sugitate**, **K. Shigaki**, **Y. Miake**, **H. Hamagaki** 他, Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics 32(2006)1295-2040, 査読有

[著書] (計4件)

- 1) **高エネルギー原子核衝突実験物理学の新展開**, **志垣賢太**, **杉立徹**, **郡司卓**, **浜垣秀樹**, **江角晋一**, **三明康郎**, 原子核研究 53巻2号62-73頁 (2009), 査読なし
- 2) **Calibration Methods of PHOS Modules**, Fumihiro Chuman, Ayako Hiei, Takuma Horaguchi, Kenta Mizoguchi, **Kenta Shigaki**, **Toru Sugitate** and **Hisayuki Torii**, ALICE-INT-2008 (2009)1-31, 査読なし
- 3) **ALICE electromagnetic calorimeter technical design report**, **T. Sugitate** 他, CERN-LHCC-2008-014(2008)1-132, ISBN=978-92-9083-320-8, 査読なし
- 4) **The PHOS Detector at ALICE**, **T. Sugitate** for ALICE/PHOS Collaboration, AIP Conference Proceedings 842 (2006) 1088-1090, 査読有

[学会発表] (計54件)

- 1) **T. Sugitate**, ALICE GRID operation in Japan and upgrade plan, 2011年3月8日, 大韓民国ソウル市, 延世大学, アジア諸国によるALICE実験増強計画研究会 (2011) 招待講演
- 2) **T. Sugitate**, First Photon Measurements with PHOS at ALICE, 2010年10月18日, 中華人民共和国武漢市, 華中師範大学, 第3回アジア3ヶ国重イオン衝突国際研究会招待講演
- 3) **杉立徹**, はじめに, 2010年9月13日, 九州工業大学, 日本物理学会シンポジウム「LHC加速器ALICE実験によるハドロン物理の幕開け」基調講演
- 4) **T. Sugitate**, ALICE at the LHC First Collisions, 2010年8月10日, 大韓民国ソウル市建国大学, APCTP 2010 LHC Physics Workshop at Korea 招待講演
- 5) **T. Sugitate**, PHOS Performance at the LHC First Collisions, 2010年7月4-9日, カナダバンクーバー市, プリティッシュコロンビア大学, 第24回原子核物理学国際会議 INPC2010 一般講演
- 6) **T. Sugitate**, ALICE experiment at LHC,

2009年11月10日, 筑波大学, 第7回日中核物理学シンポジウム招待講演

- 7) **T. Sugitate**, Photon Physics with PHOS, 2008年5月21日, 中華人民共和国武漢市, 華中師範大学, International Workshop on Heavy Ion Physics at LHC 招待講演
- 8) **T. Sugitate**, Photon Physics in ALICE, 2007年10月20日, 大韓民国済州島国際会議場, Physics with PHENIX and ALICE 会議招待講演
- 9) **杉立徹**, アリス実験とQGP物理, 2007年3月25日, 首都大学東京, 日本物理学会シンポジウム「LHCが開く新たな地平」招待講演

[その他]

ホームページ等

<http://www.hepl.hiroshima-u.ac.jp>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

杉立 徹 (SUGITATE TORU)

広島大学・大学院理学研究科・教授
研究者番号: 80144806

(2) 研究分担者

志垣 賢太 (SHIGAKI KENTA)

広島大学・大学院理学研究科・准教授
研究者番号: 70354743

三明 康郎 (MIAKE YASUO)

筑波大学・大学院数理物質科学研究科・教授
研究者番号: 10157422

浜垣 秀樹 (HAMAGAKI HIDEKI)

東京大学・大学院理学系研究科・准教授
研究者番号: 90114610

稲葉 基 (INABA MOTOI)

筑波技術大学・産業技術学部・准教授
研究者番号: 80352566

(3) 連携研究者

本間 健輔 (HOMMA KENSUKE)

広島大学・大学院理学研究科・助教
研究者番号: 40304399
(H18→H21 研究分担者)

鳥井 久行 (TORII HISAYUKI)

広島大学・大学院理学研究科・特任助教
研究者番号: 30392046