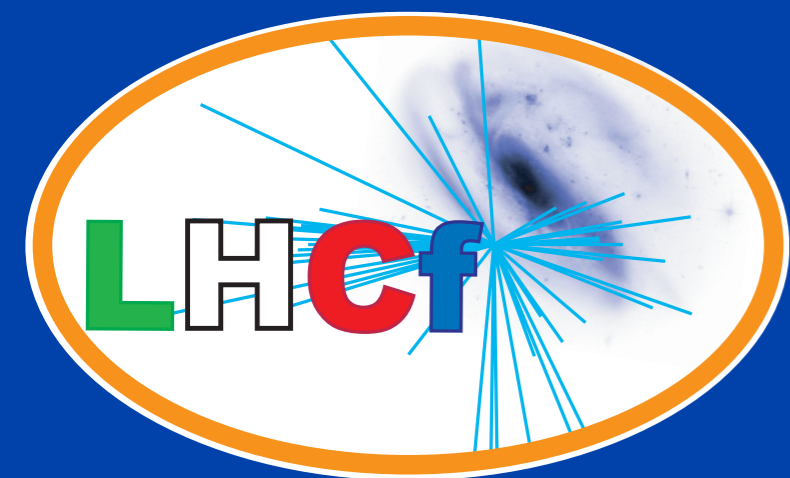


東京大学宇宙線研究所 共同利用研究

# Knee領域および最高エネルギー領域での 宇宙線反応の実験的研究



毛受弘彰 (名大ISEE)



# 本研究課題の内容

## ■ 研究目的

加速器実験を用いた宇宙線相互作用の理解を通して、ミューオン超過問題など空気シャワー観測結果とシミュレーション結果との不一致問題の解決を目指す。

## ■ 共同研究者 10名 (代表:毛受)

## ■ 共同利用研究費 14.3万円(旅費) → 返還

毎年開催している勉強会の参加者旅費補助に使用予定。

→コロナ対策としてオンライン開催に変更

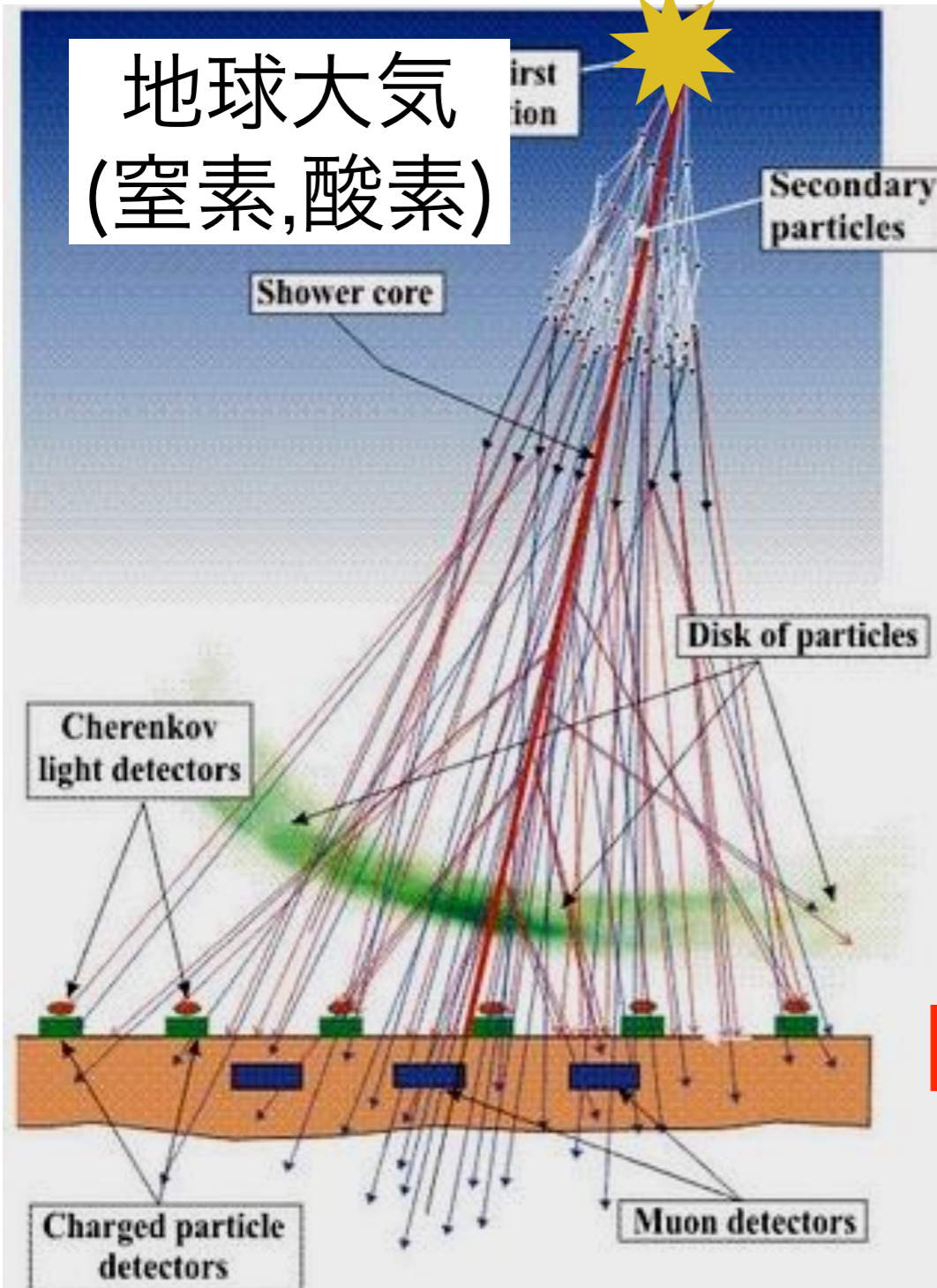
## ■ 大型計算機利用

## ■ 本年度の成果

- データ解析の進展 (LHCf中性子測定、RHICf  $\pi^0$ スピン非対称性)
- 次期 LHCf測定 (pp, p0) に向けての準備進行中
- 次期 RHICf測定 (RHICf II) のLOI提出
- 勉強会(オンライン)を開催予定 (3/25,26)

# 空気シャワーとハドロン相互作用

宇宙線(陽子,鉄など)



空気シャワーは、  
高エネルギー粒子(宇宙線)と大気原子核衝突  
2次生成粒子と大気原子核衝突  
またその2次粒子と、、、  
無数の電磁+ハドロン相互作用によって形成

高エネルギー領域での理解が重要

現在のハドロン相互作用モデルの問題

- ▶ 化学組成決定の不確定性  
モデル間の差 > 実験誤差
- ▶ ミューオン超過問題  
どのモデルも実験を再現できていない

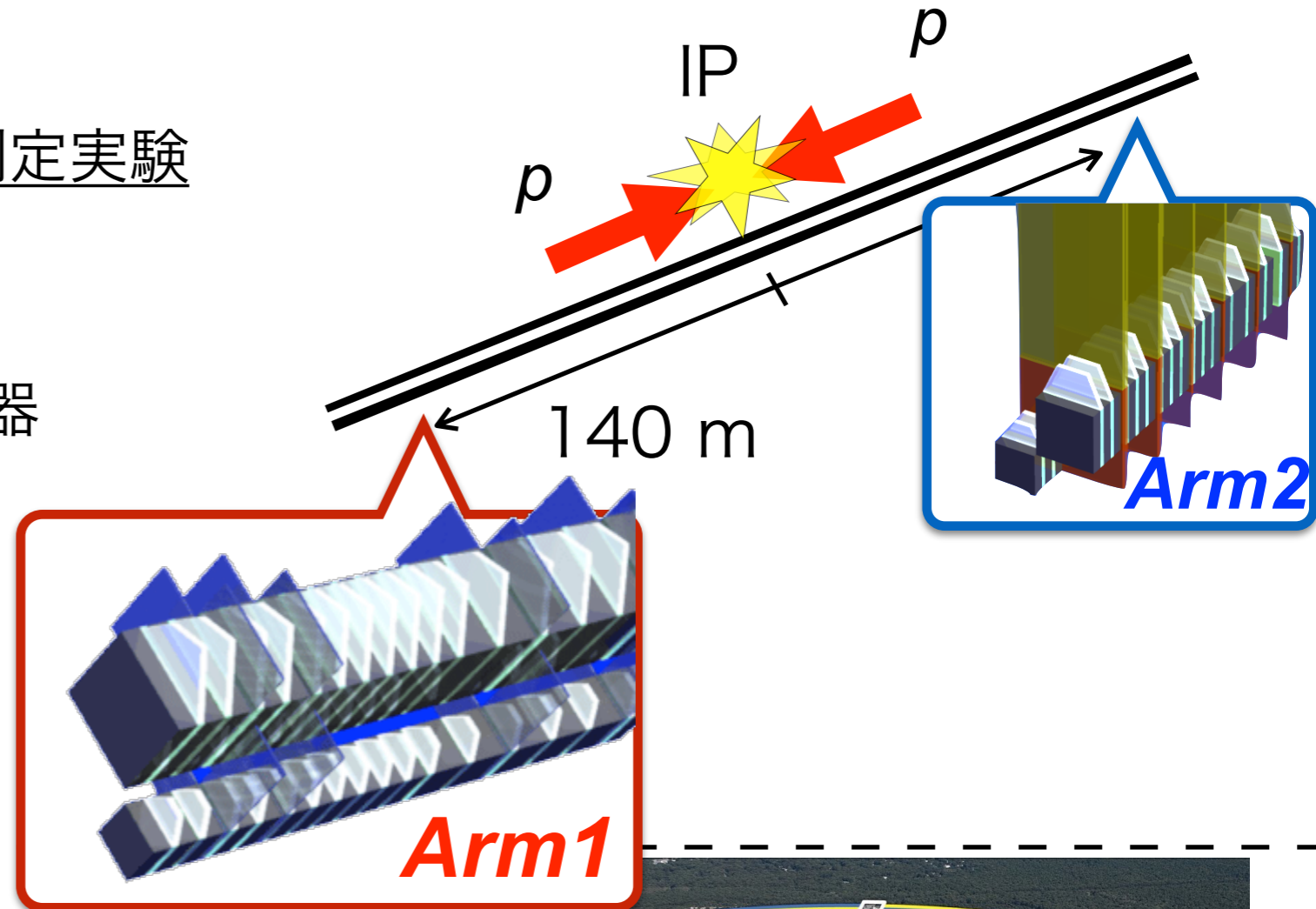
加速器実験によって

ハドロン相互作用の理解を進め、  
高エネルギー宇宙線観測の課題を解決

# LHCf/RHICf実験

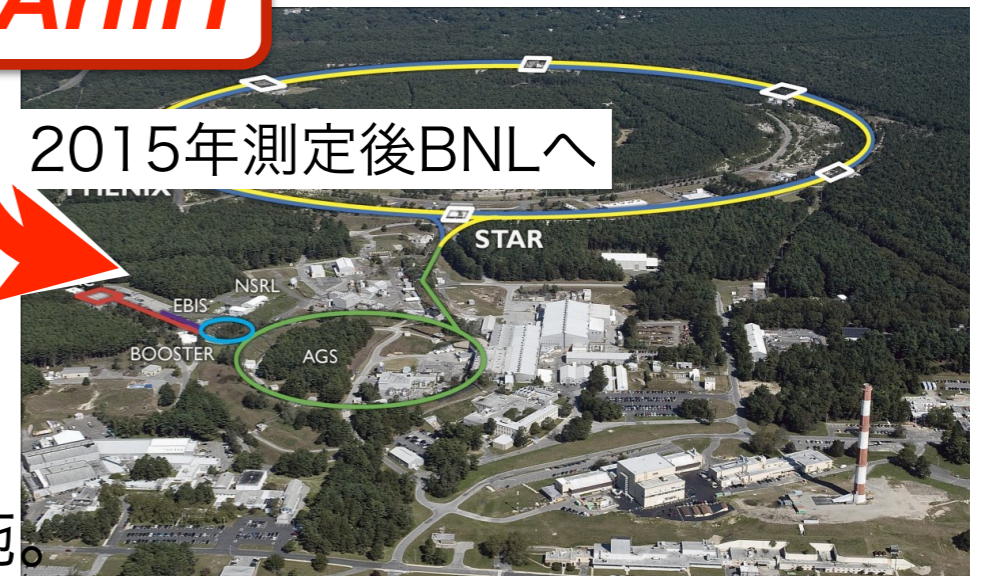
## LHCf実験

- CERN-LHC加速器の最前方領域測定実験
- ATLAS衝突点の両側140mに検出器を設置 (Arm1、Arm2)
- サンプリングカロリメータ検出器
  - ▶ タングステン(44 r.l.)
  - ▶ GSOシンチレータ 16層
  - ▶ 位置検出層 4層Arm1: GSOバーXYホドスコープ  
Arm2: シリコンストリップ



## RHICf実験

- BNL-RHIC加速器の最前方領域測定実験
- STAR実験衝突点の片側18mにLHCf-Arm1検出器を設置。
- 偏極陽子を用いており、スピン物理の測定も実施。



# 測定と解析状況

## ■ 測定

**LHCf**

pp衝突,  $\sqrt{s} = 0.9, 2.76, 7, 13 \text{ TeV}$

pPb衝突,  $\sqrt{s_{NN}} = 5, 8 \text{ TeV}$

**RHICf**

pp衝突,  $\sqrt{s} = 0.51 \text{ TeV}$

宇宙線換算

$\sim 10^{17} \text{ eV}$

$\sim 10^{14} \text{ eV}$

## ■ 本年度の解析の進展

**LHCf**

□ pp 13TeV 中性子解析の拡張 **JHEP 2020, 016 (2020)**

□ LHCf-ATLAS連動解析

- 光子(Diffractive Col.)

**内部Review中**

- 中性子(MPIモデル検証)

**進行中**

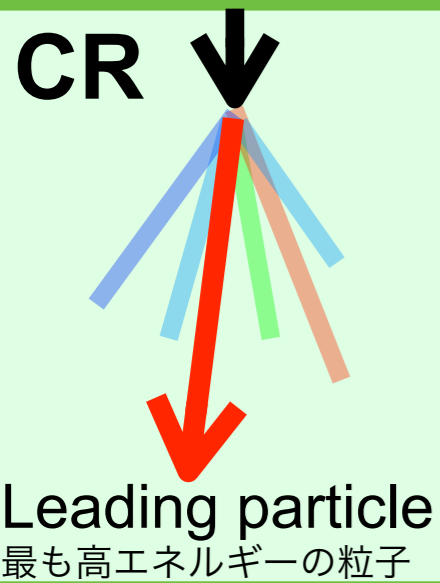
**RHICf**

□ 超前方生成  $\pi^0$  のスピン非対称性 **PRL 124 252501 (2021)**

□ 光子の微分断面積測定

**進行中**

# 中性子解析@pp, $\sqrt{s}=13\text{TeV}$



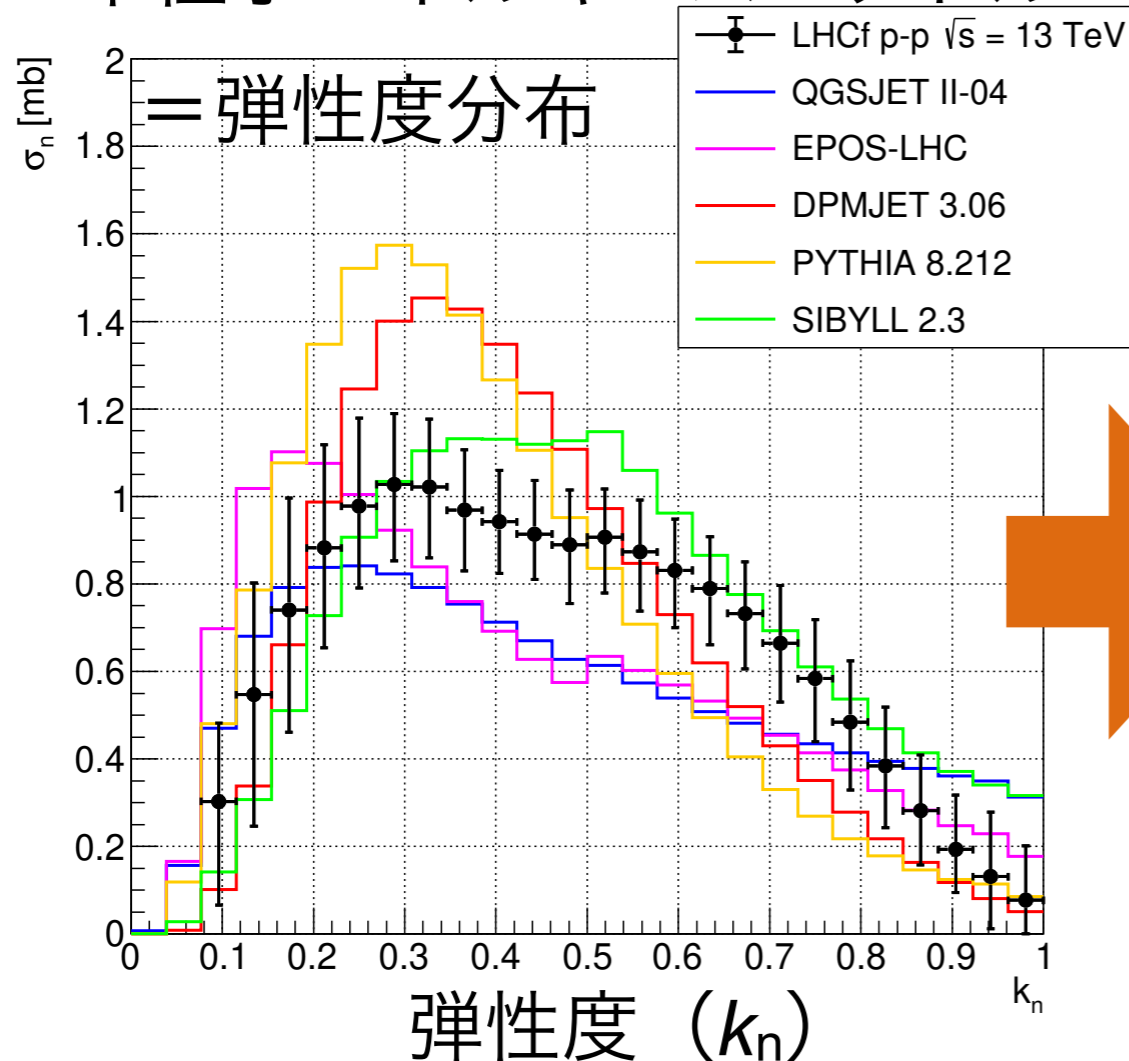
- 被弾精度は、空気シャワー発達に関係する重要なパラメータ

被弾精度： $1-k = 1 - E_{\text{leading}}/E_{\text{CR}}$

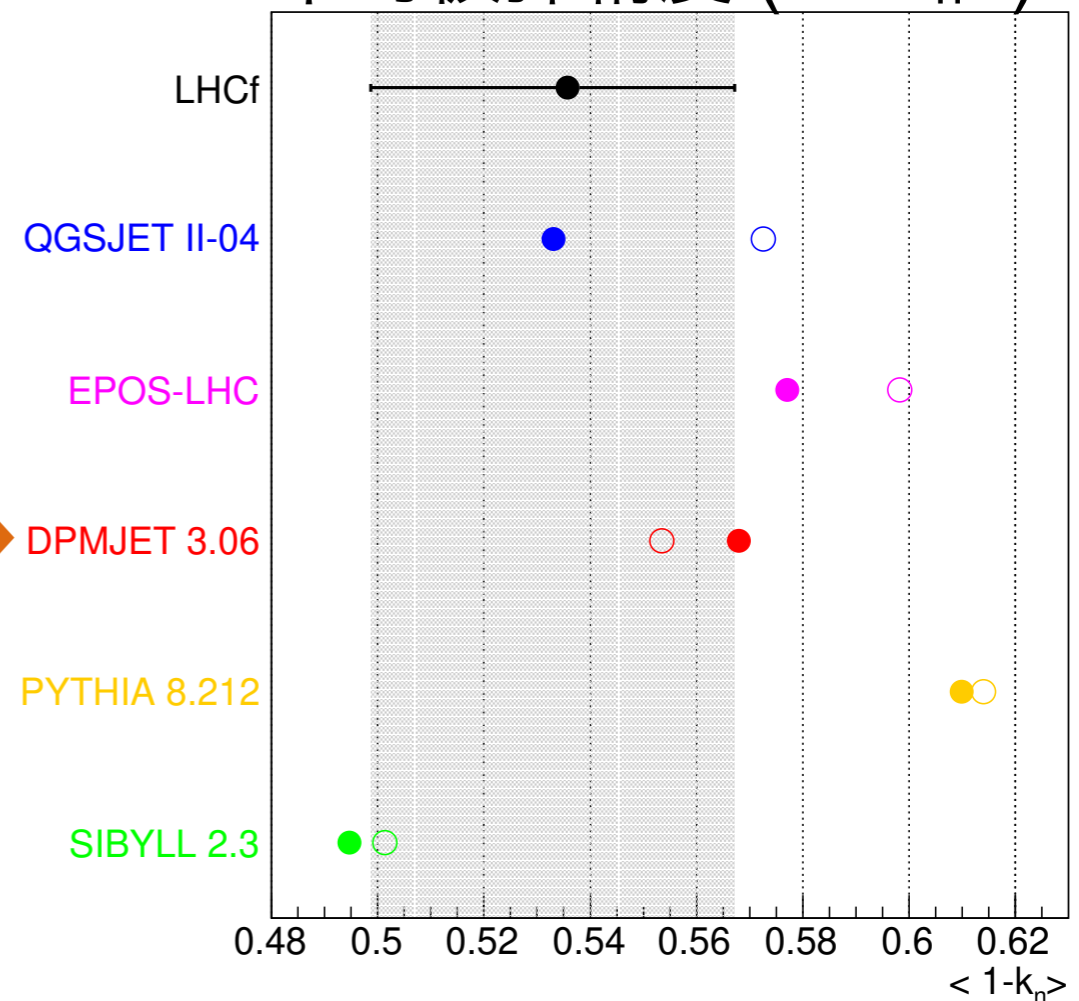
衝突時に2次粒子生成に使われるエネルギーの割合を示す。

- LHCf検出器が測定する高エネルギー中性子は多くの場合Leading particle

## 中性子エネルギースペクトル

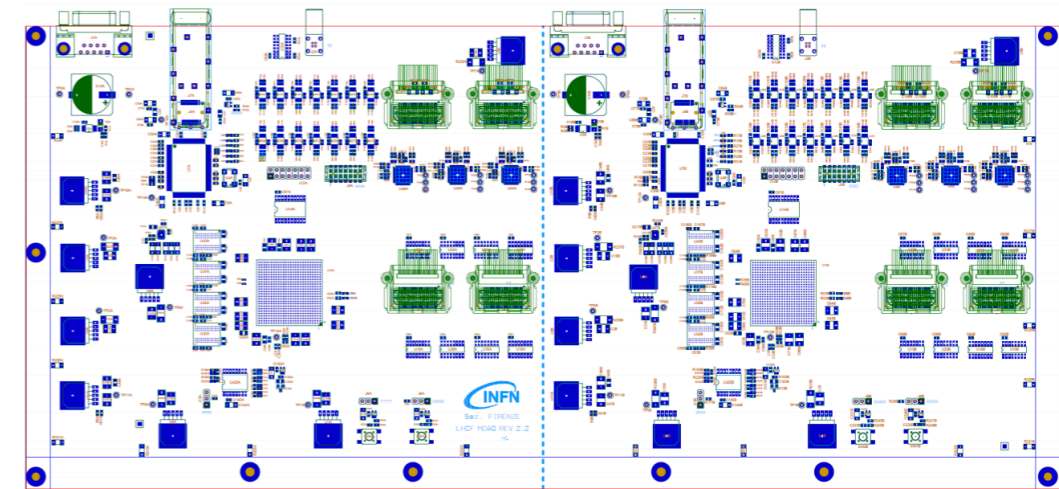


## 平均被弾精度 ( $\langle 1-k_n \rangle$ )



# 次期 LHCf測定 Run3

- 陽子-陽子衝突測定  $\sqrt{s}=13, 14$  TeV
  - 2022年測定予定（コロナ影響で1年延期）
  - 10倍の高統計データ取得
    - $\pi^0$ の精密測定、 $K^0_s$  ( $\rightarrow 2\pi^0 \rightarrow 4\gamma$ ) 測定
  - 準備が進行中
    - ・ シリコン検出器の読み出しの高速化
    - ・ アナログ遅延回路の導入
    - ・  $K^0_s$ 解析手法の開発



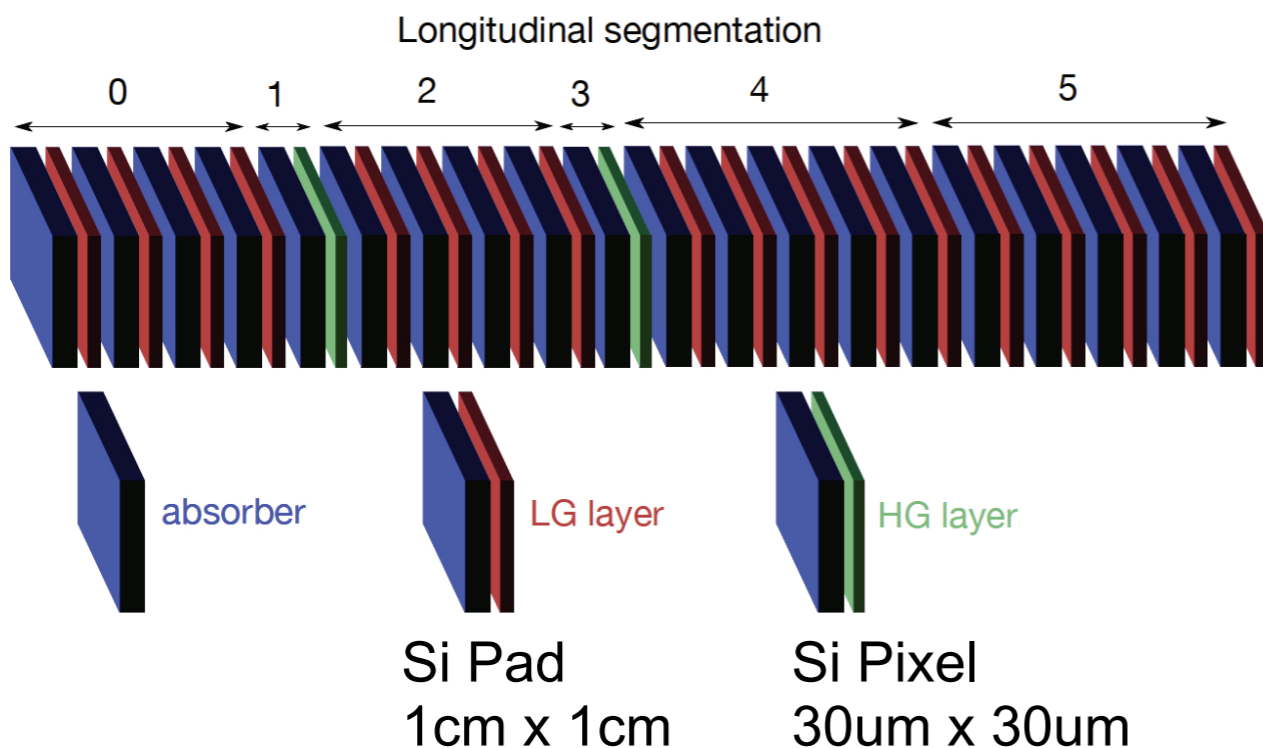
新シリコン検出器読み出し回路  
イタリアグループが開発しており、プロトタイプ試験中

- 陽子-酸素 衝突測定
  - 宇宙線-大気衝突を再現する理想的測定条件。 原子核効果の測定
  - LHC-Run4 (2027-)以降では、ビームパイプ構造が変更になるため現在のLHCf検出器は設置できなくなる。
  - 陽子-酸素衝突がLHC-Run3(2021-2024)期間で実現するかは春頃に決まる予定
    - ・ Workshop “ Opportunities of OO and pO collisions at the LHC ”  
Online, 4-10 Feb 2021, <https://indico.cern.ch/e/oxygen>
    - ・ 実現を求めるレターをLHCC(運営委員会)議長へ提出。  
→ レターは100名以上の世界中の宇宙線研究者がサイン。

# 次期測定 RHICfII

## ■ RHICf II

- 広いアクセプタンスを持つ新検出器でpp衝突測定  
新検出器：Si Pad + W カロリメータ  
↔ALICE-FoCalグループと協力して開発
- RHIC-PACにLoIを8月に提出。
- 2024年に測定を予定
- 高統計  $\pi^0$  データ、 $K^0_s$  測定



### Letter of Intent RHICf-II experiment in Run 24

Y. Goto, I. Nakagawa, and R. Seidl  
*RIKEN Nishina Center for Accelerator-Based Science,  
Wako, Saitama 351-0198, Japan*

T. Sako  
*ICRR, University of Tokyo, Kashiwa, Chiba, Japan*

A. Tricomi  
*INFN Section of Catania, Catania I-95123, Italy*

O. Adriani, L. Bonechi, and R. D'Alessandro  
*INFN Section of Florence, Sesto Fiorentino (FI) I-50019, Italy*

K. Tanida  
*Japan Atomic Energy Agency, Tokai-mura, Ibaraki 319-1195, Japan*

B. Hong and M.H. Kim  
*Korea University, Seoul 02841, Korea*

Y. Itow, and H. Menjo  
*Nagoya University, Nagoya, Aichi, Japan*

K. Kasahara  
*Shibaura Institute of Technology, Minuma, Saitama 337-8570, Japan*

T. Chujo  
*Tsukuba University, Tsukuba, Ibaraki 305, Japan*

August 31, 2020



# 空気シャワー観測による 宇宙線の起源探索勉強会

仮プログラム

- 例年、年度末に勉強会を開催。  
2017年度から共同利用研究「新しい宇宙線空気シャワーシミュレーションコード開発」との共同開催。
- ”去年度”は、3/23,24に予定。  
→コロナのためキャンセル
- 本年度は、3/25,26に開催予定。  
オンラインで開催。  
25日は若手セッション  
→若手間の交流と相互の研究理解  
26日はシニアセッション  
→「将来計画」がテーマ

第四回 空気シャワー観測による宇宙線の起源探索勉強会  
25 Mar 2021, 13:00 → 26 Mar 2021, 18:00 Asia/Tokyo  
ONLINE

THURSDAY, 25 MARCH

13:00 → 17:00 若手セッション: 初日午後 ONLINE

- 13:00 趣旨説明 Speaker: Hiroaki Menjo (Nagoya University (JP)) 5m
- 14:20 Break 40m
- 16:30 議論 30m
- 17:00 → 18:30 オンライン懇親会? 1h 30m

FRIDAY, 26 MARCH

10:00 → 12:00 シニアセッション: 2日目午前 ONLINE

- 10:00 趣旨説明 Speaker: Hiroaki Menjo (Nagoya University (JP)) 5m
- 10:05 理論からの高エネルギー宇宙線観測への期待 Speaker: Katsuaki Asano (ICRR) 40m
- 10:45 UHECR将来計画 Speaker: TBD 40m
- 11:25 Simple FD Array for UHECR Observation Speaker: Yuichiro Tameda (Osaka Electro-Communication University) 30m
- 12:00 → 13:00 ランチ 1h
- 13:00 → 17:00 シニアセッション: 2日目午後
- 13:00 FASTと高分解能大気蛍光望遠鏡 (TBD) Speaker: Toshihiro Fujii (Kyoto Univ.) 40m
- 13:40 ALPACA 将来計画 (TBD) Speaker: Kazumasa Kawata 30m
- 14:10 IACTによるアイデア 30m
- 14:40 Break 20m
- 15:00 TBD 30m
- 15:30 LHCfと相互作用研究の将来計画 Speaker: Takashi Sako (University of Tokyo (JP)) 30m
- 16:00 Discussion 40m

# まとめ

- LHCf/RHICf実験は、宇宙線相互作用理解のために、LHCとRHIC加速器で最前方領域測定実験を実施している。
- 本年度は、pp 13TeVの中性子再解析結果とRHIC f での $\pi^0$ スピン非対称性測定の結果を論文発表。またATLAS-LHCf連動解析なども進行している。
- LHC-RUN3(2022-2024)期間に実施予定のpp 14(13)TeV, pO(OO)衝突測定に向けた準備を進めている。
- RHICfの次期測定のLoIを2020年8月に提出。新検出器の開発を進めている。
- 勉強会を毎年年度末に開催。

東京大学宇宙線研究所 共同利用研究

# 新しい宇宙線空気シャワー シミュレーションコードの開発

毛受弘彰 (名大ISEE)



2020年度共同利用研究成果発表会・2021/2/8-9・オンライン

# 本研究課題の内容

## ■ 研究目的

空気シャワー実験および関連実験の基礎ツールとなる  
新たな空気シャワーシミュレーションコードをCOSMOSを  
ベースにしながら開発する。

## ■ 共同研究者 25名 (代表:ICRR さこ)

中堅を中心として、さまざまな機関から多数参加。

## ■ 共同利用研究費 19万円 → 残額は繰越予定

↔ 使用額：約2.5万円 打ち合わせ時の旅費等で使用。

年1,2回行っていた多人数での対面ミーティングができなかった。

年度末に行っている勉強会はオンライン開催に変更

## ■ 大型計算機利用

# 空気シャワーシミュレーション

## 空気シャワーシミュレーション

### 計算技術

- ・ Thinning
- ・ Tracking

### 素過程

- ・ ハドロン相互作用
- ・ EM相互作用

### インターフェース

- ・ べき乗宇宙線スペクトルの指定
- ・ データ出力

- ▶ 現状、CORSIKA (KIT他) が広く使われているが、日本にも長い歴史あり!! (笠原先生COSMOSなど)
- ▶ シミュレーションの基礎要素もまだ完全に確立したとはいえない。

## 新しい空気シャワーシミュレーションを開発していく

- ・ COSMOSをベースに進める。
- ・ 長期メンテナンス性の向上。
- ・ 若い世代に使いやすくする。
- ・ さまざまなニーズに対応
- ・ 雷雲中の電場による加速
- ・ 地球大気以外にも太陽や火星大気での計算

# これまでの活動

- 2013年から「モンテカルロ・シミュレーション研究会」としてスタート (2014年度から宇宙線研共同利用)
- COSMOSの理解
- COSMOS8 GFortran版の公開
- cmake によるコンパイルの実現
- 構造の改良：モジュール化して整理。
- サンプルコードの整備。
- 毎月のオンライン打ち合わせを開催。  
バグレポート、方針決定、作業分担など  
十年1,2回の対面での打ち合わせ＋共同作業。→今年度は実施できず。
- 「空気シャワー観測による宇宙線の起源探索勉強会」  
「Knee領域および最高エネルギー領域での宇宙線反応の実験的研究」と共同。  
今年が4回目

# 本年度の活動

## ■ COSMOS X 公開に向けての最終段階

### □ COSMOS 8 から機能を大きく拡張

- 大気中だけでなく、地表など物質も含めた計算が可能に。
- 大気、磁場、電場などをユーザーレベルでより設定しやすくなった。  
(太陽大気、火星など地球以外も可能に)
- これにともないコードの構造を大幅に変更。8→X

### □ Webpage, マニュアルの整備

- 特に新規ユーザーが迷わずに使うことができることを重視して準備を進めている。

### □ Visualizationツールの準備

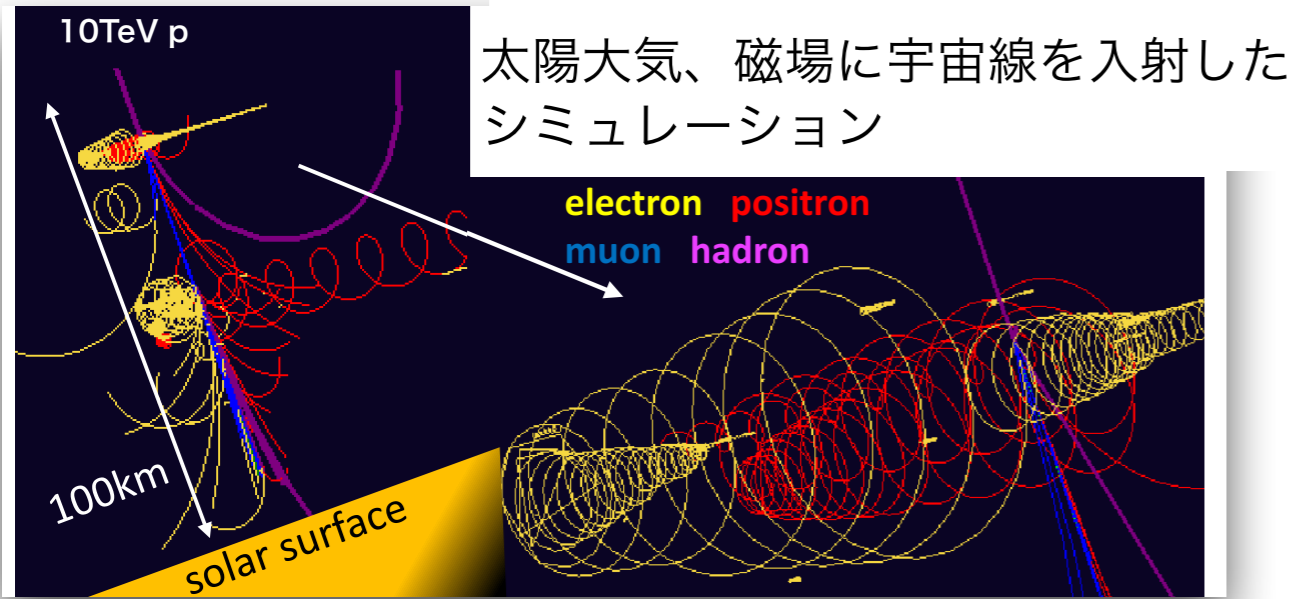
- 従来のGEOMVIEW(開発ストップ)を用いた方法からROOTを使ったシミュレーション結果の表示ツールを開発。

### □ 実際に動かしてのデバッグ、検証

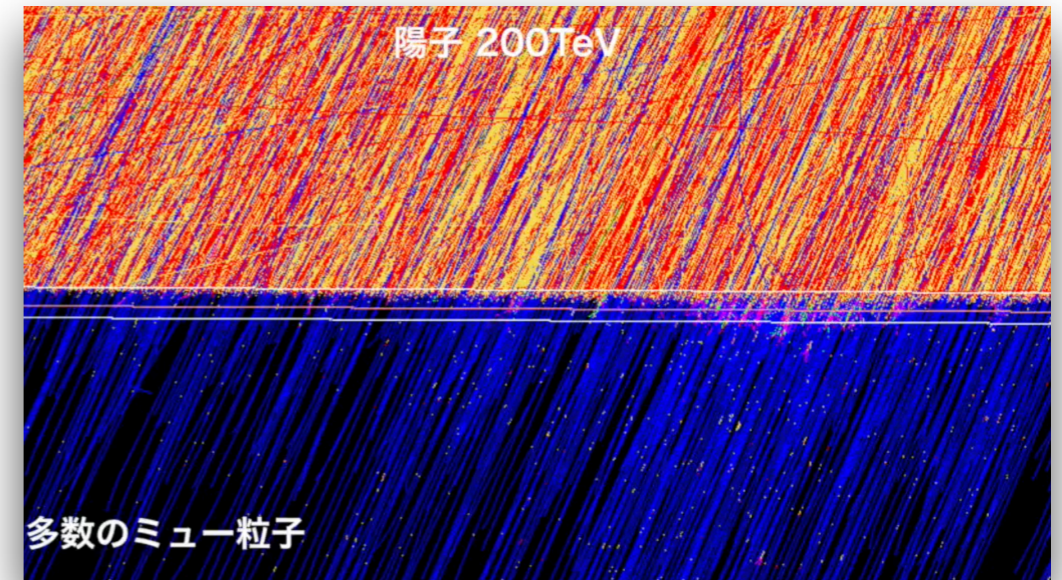
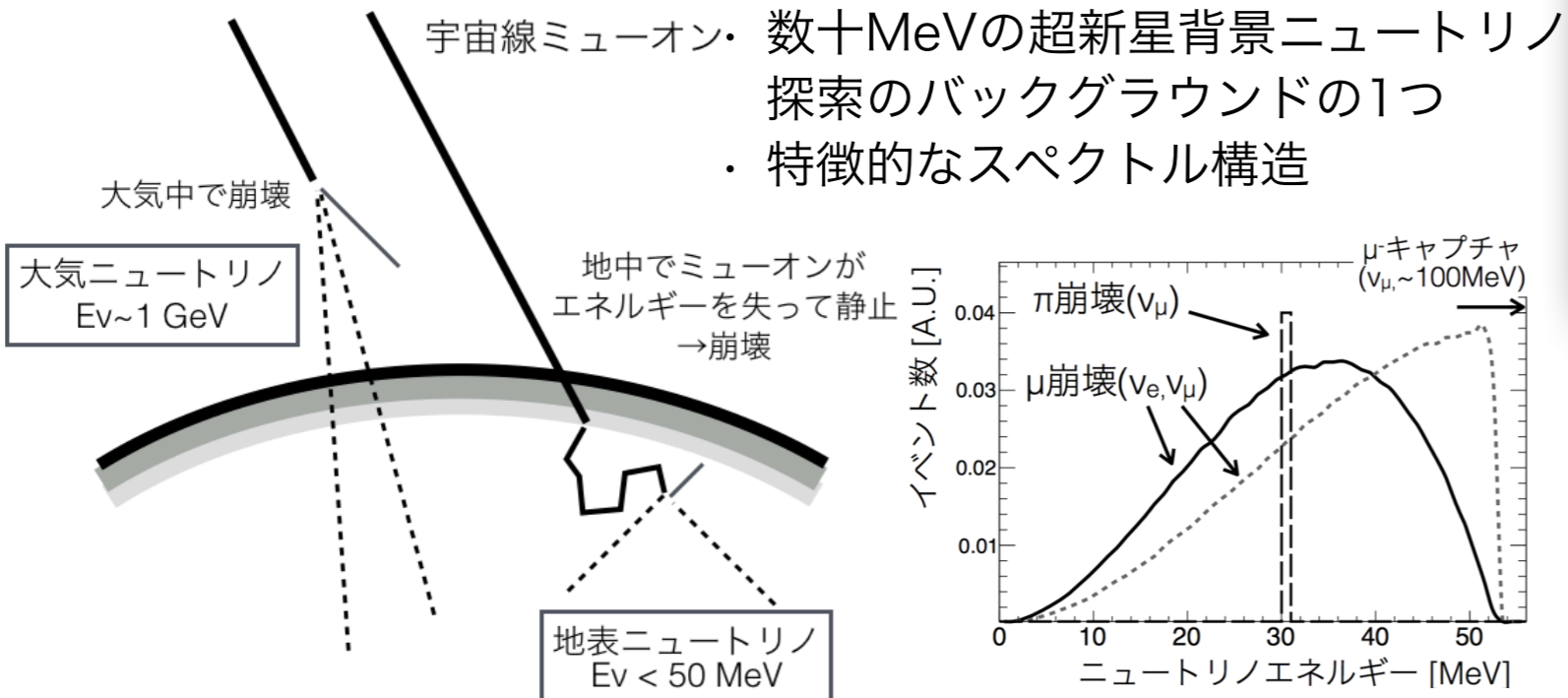
- Mac, 各種Linuxなどの各OS下でコンパイル、動作確認
- 旧COSMOSでの結果との比較

# さまざまな応用

## 太陽大気中でのシミュレーション



## 地中でのミュオン、パイオン崩壊による低エネルギーニュートリノ



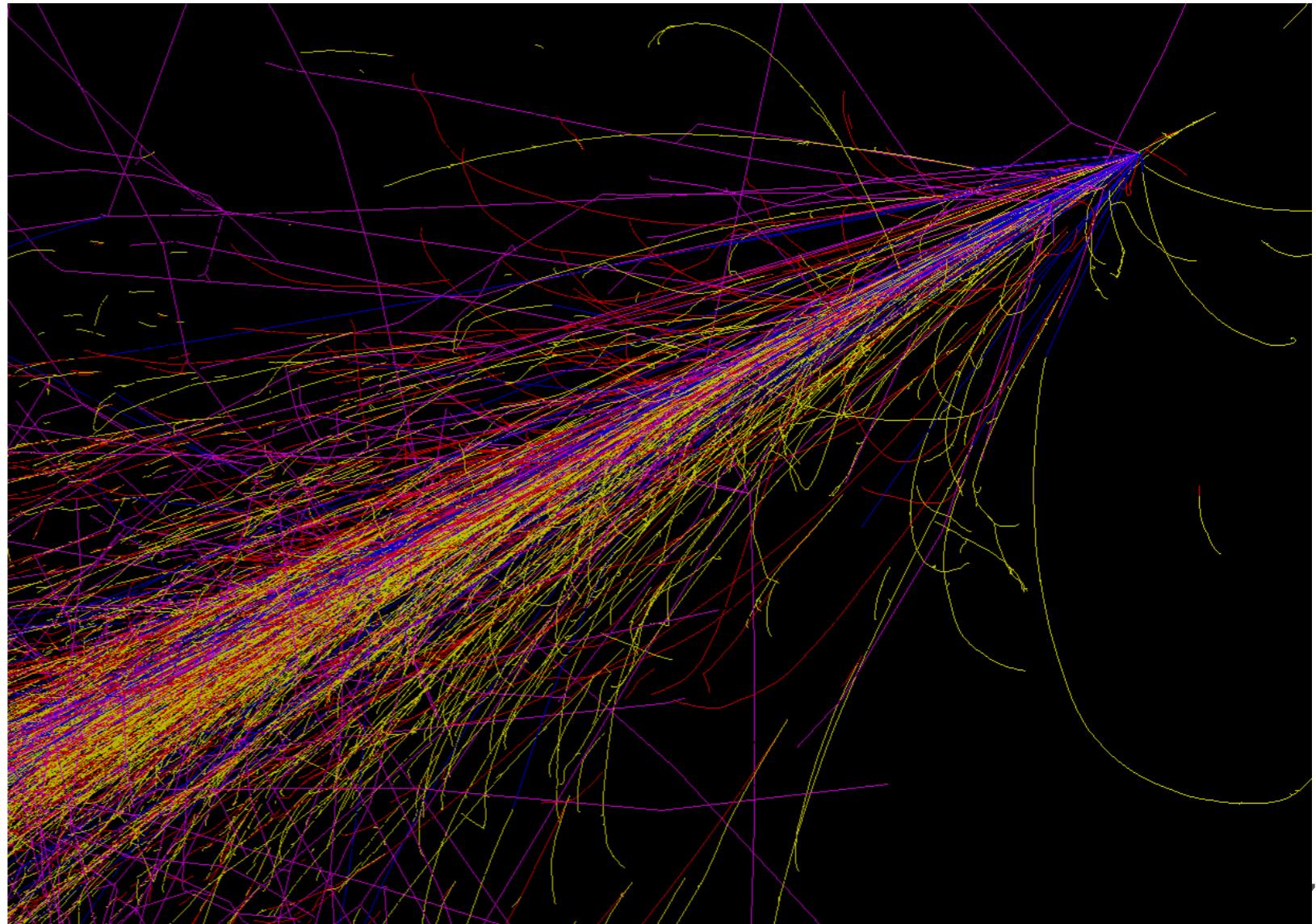
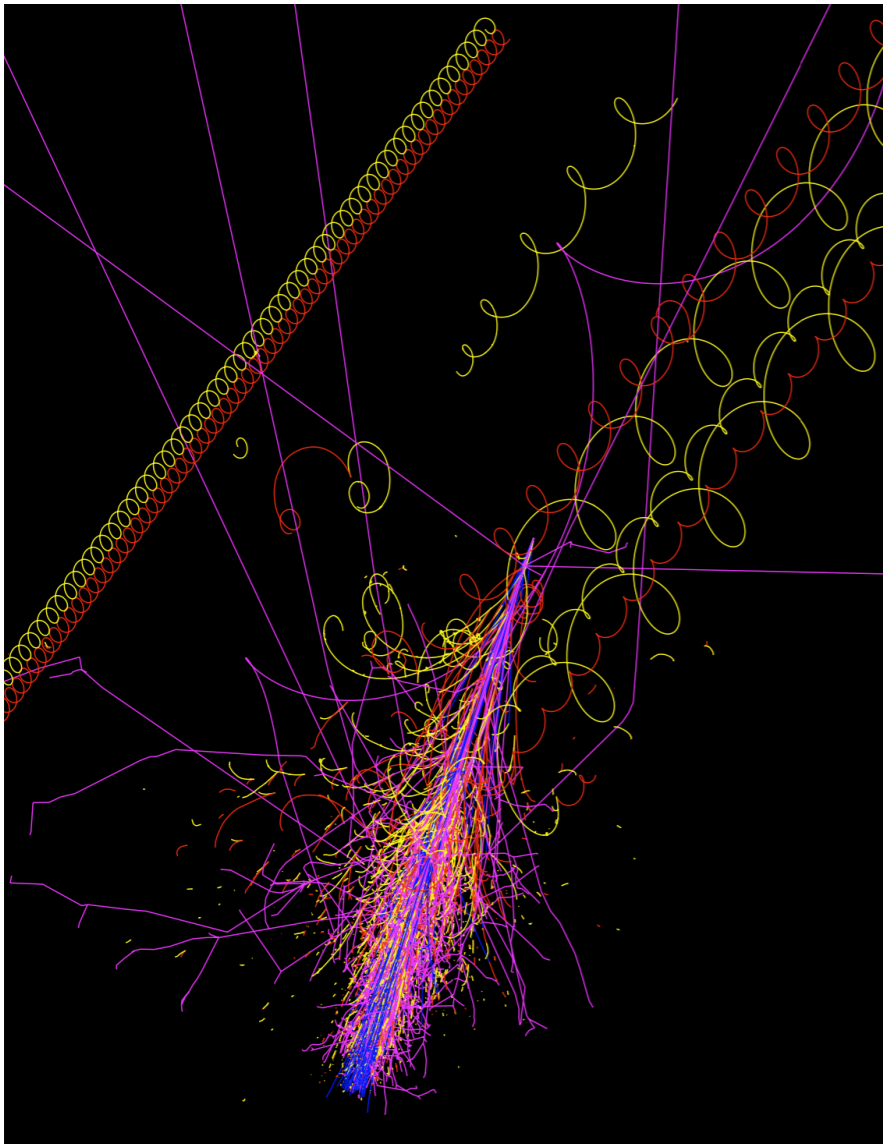
© Tibet ASy webpage

COSMOS Xは地表を含めた計算が可能  
GEANT4などを使わなくてもCOSMOS X  
だけでシミュレーションが完結できる。



# Visualization tool

- ▶ 従来はGEONVIEWというツールを使用。  
使い勝手は良かったが開発がストップしているため、  
新しいマシンにインストールできなかった。
- ▶ **新たにROOT (+OpenGL) で実装**  
COSMOSXの粒子情報のファイルをもとにシャワーを表示



# 新Webpage

Welcome to the Home Page of Cosmos

現在



**Cosmos (from v8.00)** is now compatible with the formal Fortran compiler, i.e., can be compiled with GNU gfortran as well as Intel ifort, etc. The essential difference from the older ones is in the treatment of cosmic ray air shower monte carlo code, which was managed by [the new Cosmos development team](#). For more details, [see a short manual](#) with some updated features.

## Contents

- [What is Cosmos?](#)
- [Documentation](#) **additional new manual is available**
- A step-by-step guide to how to use [Distribution](#) (2007). Revised; more comprehensive.

COSMOS Air Shower MC Tool

Beta版

cosmic ray air shower monte carlo code

COSMOS Develop Team  
cosmos@icrr.u-tokyo.ac.jp

COSMOS Top

What is COSMOS

Platform

Download

Installation

Users' Guide

Sample Codes

Doxygen

Documents



# 今後に向けて

- COSMOSのさらなる改良
  - C++, Pythonなどから制御できるようにAPI化。
- Air Shower Simulation スクールの開催 (積み残し)
  - 若い世代にユーザーを増やすとともに、中身の理解を深めてSimulationをブラックボックスにしない。
- CORSIKAとの比較と協力
  - CORSIKAも現在新Versionの開発を行っており、結果の比較や相互作用部分の相互利用など協力を進めていく。
- 宇宙線課題の解決、応用
  - ミューオン超過問題などの宇宙線観測の問題に対して空気シャワーシミュレーションによる研究
  - さなざまな応用実験に用いていく。  
ミューオントモグラフィ、太陽大気でのガンマ線放射などなど。

**こんな計算がしたいなどのアイディア Welcome!!**

# まとめ

- 新しい空気シャワーシミュレーションを開発中
  - COSMOSをベースとして、笠原先生＋中堅宇宙線研究者多数で進めている。
  - 長期メンテナンス性向上、さまざまなニーズに対応
- 近日中にCOSMOS Xを公開予定。
  - 構造を含めて前Versionから大きく変更  
地表面を含む計算、太陽大気、雷雲中などが可能に。
  - マニュアルやWebpageの整備
- COSMOSの普及
  - 若手向け空気シャワーシミュレーションスクールの開催
  - 年度末の勉強会の開催（今年度は3/25,26）
  - CORSIKAグループとの交流

**Backup**