



KYUSHU  
UNIVERSITY

# 宇宙線 x 加速器 = 宇宙線化学組成を紐解く 極限QCDの量子ダイナミクス研究

稲田 知大 (九州大学 先端素粒子物理研究センター)

[tomohiro.inada@cern.ch](mailto:tomohiro.inada@cern.ch)

# 自己紹介

九州大学 先端素粒子物理研究センター

稲田 知大



東大宇宙線研  
大学院生, 博士研究員



清華大学  
博士研究員



欧州原子核研究機構  
リサーチフェロー



KYUSHU  
UNIVERSITY

九州大学  
助教

CTAO



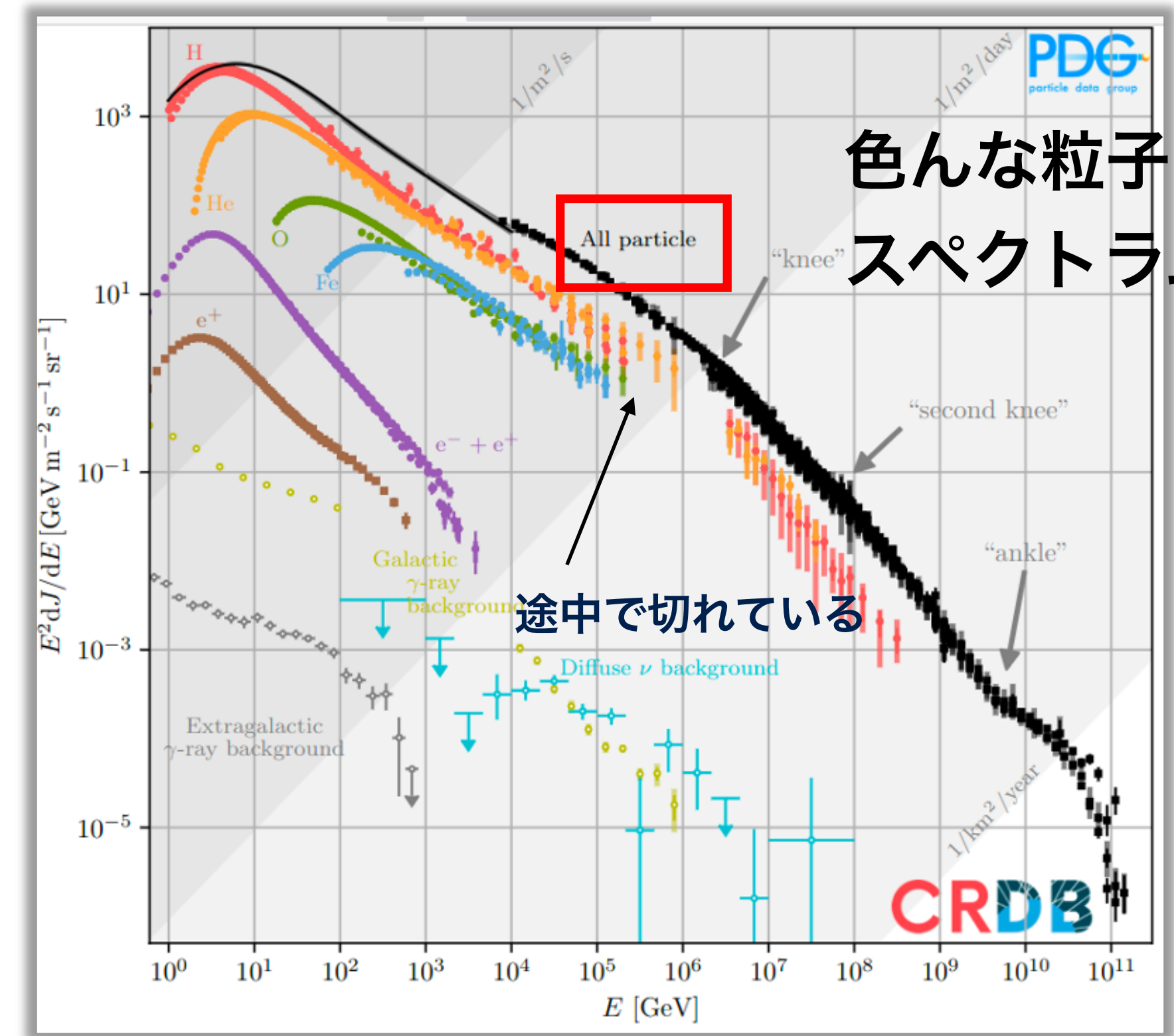
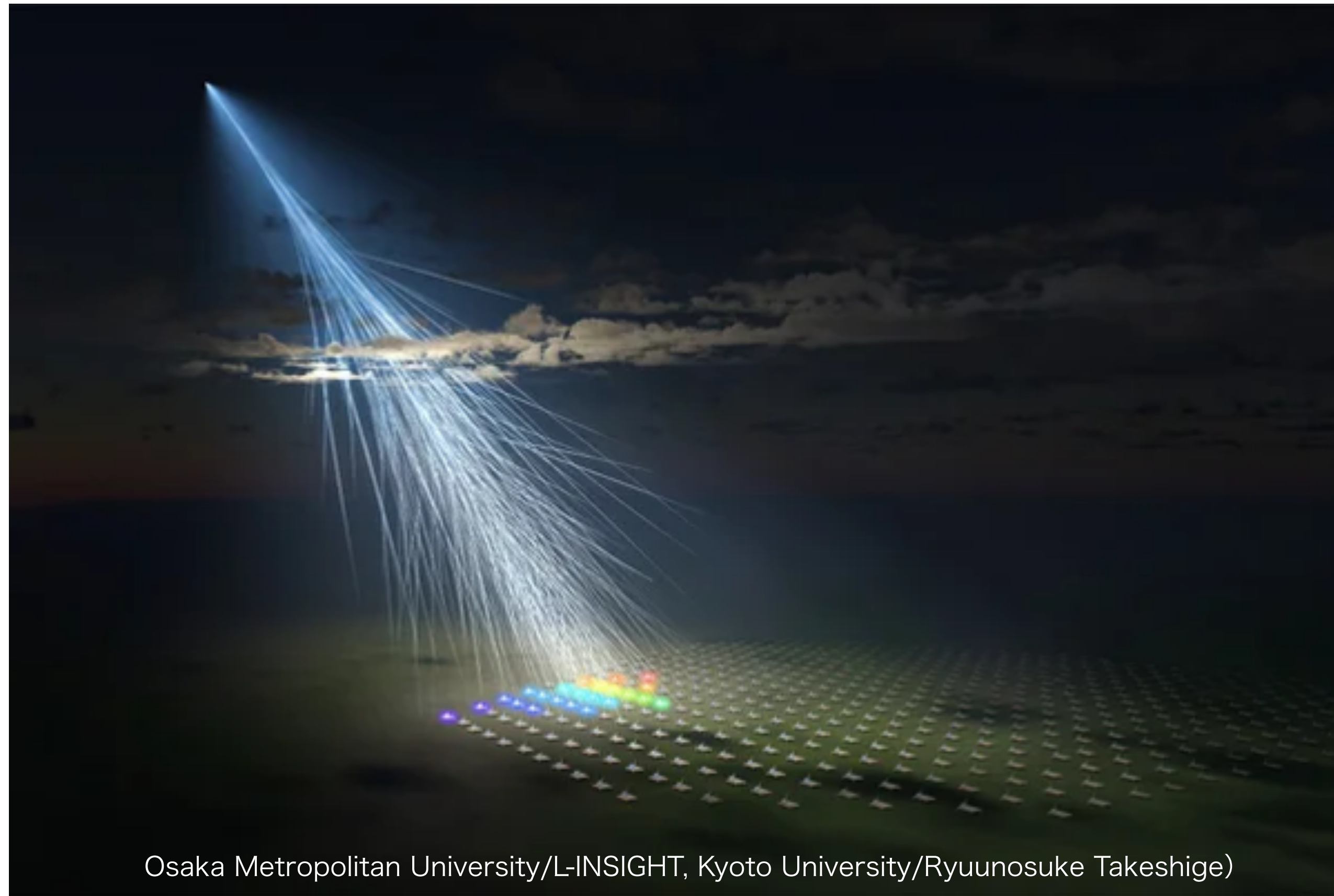
- 高エネルギーガンマ線宇宙物理学
- 宇宙ガンマ線を用いた暗黒物質探索
- 天の川銀河系内における天体研究
- 空気シャワー研究



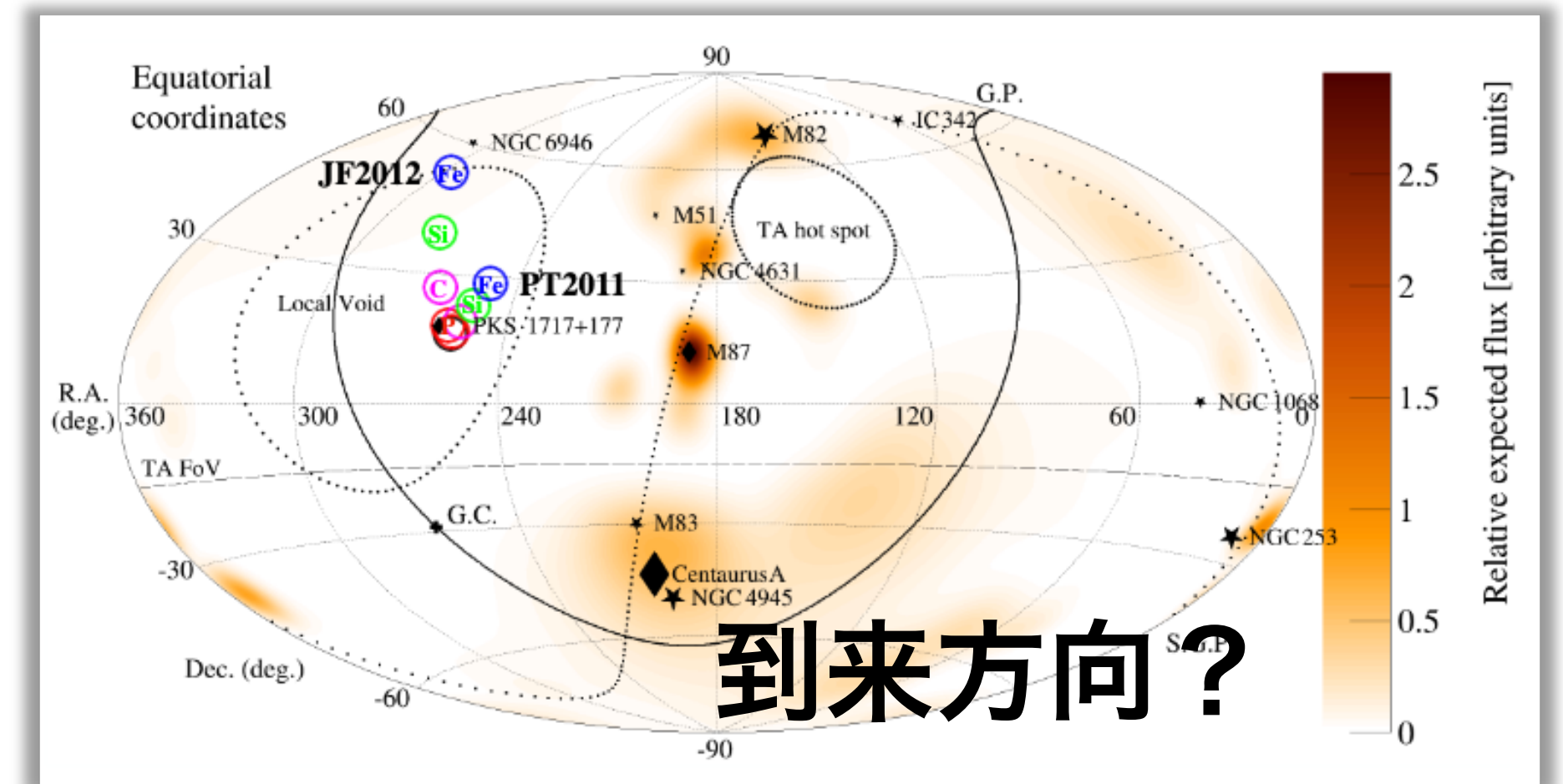
- 高エネルギー実験素粒子物理学
- 高エネルギーニュートリノ
- 新粒子探索
- ハドロン相互作用研究

宇宙線物理学と粒子物理学を行ったり来たり→高エネルギー極限での粒子の振る舞いの研究をしています

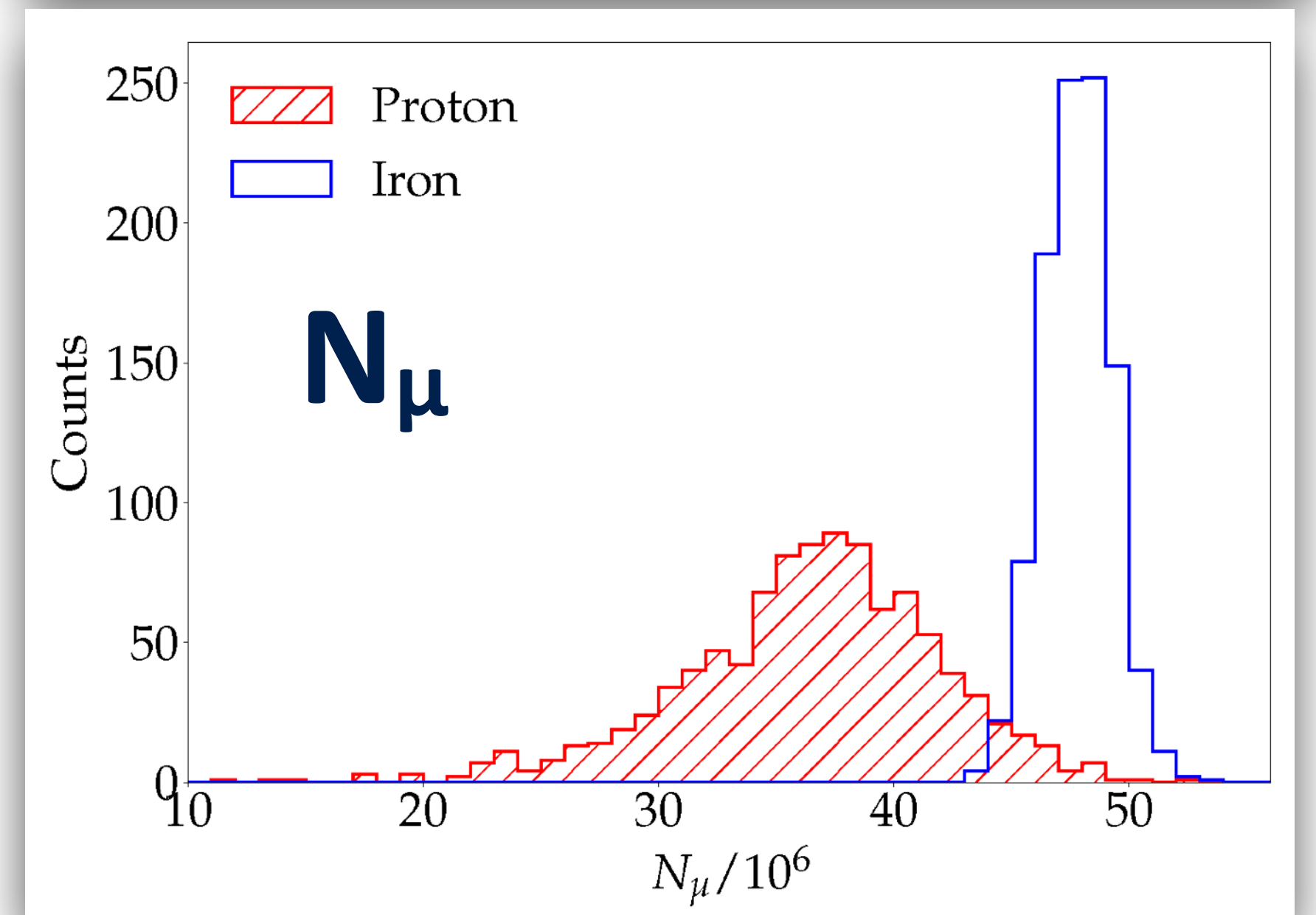
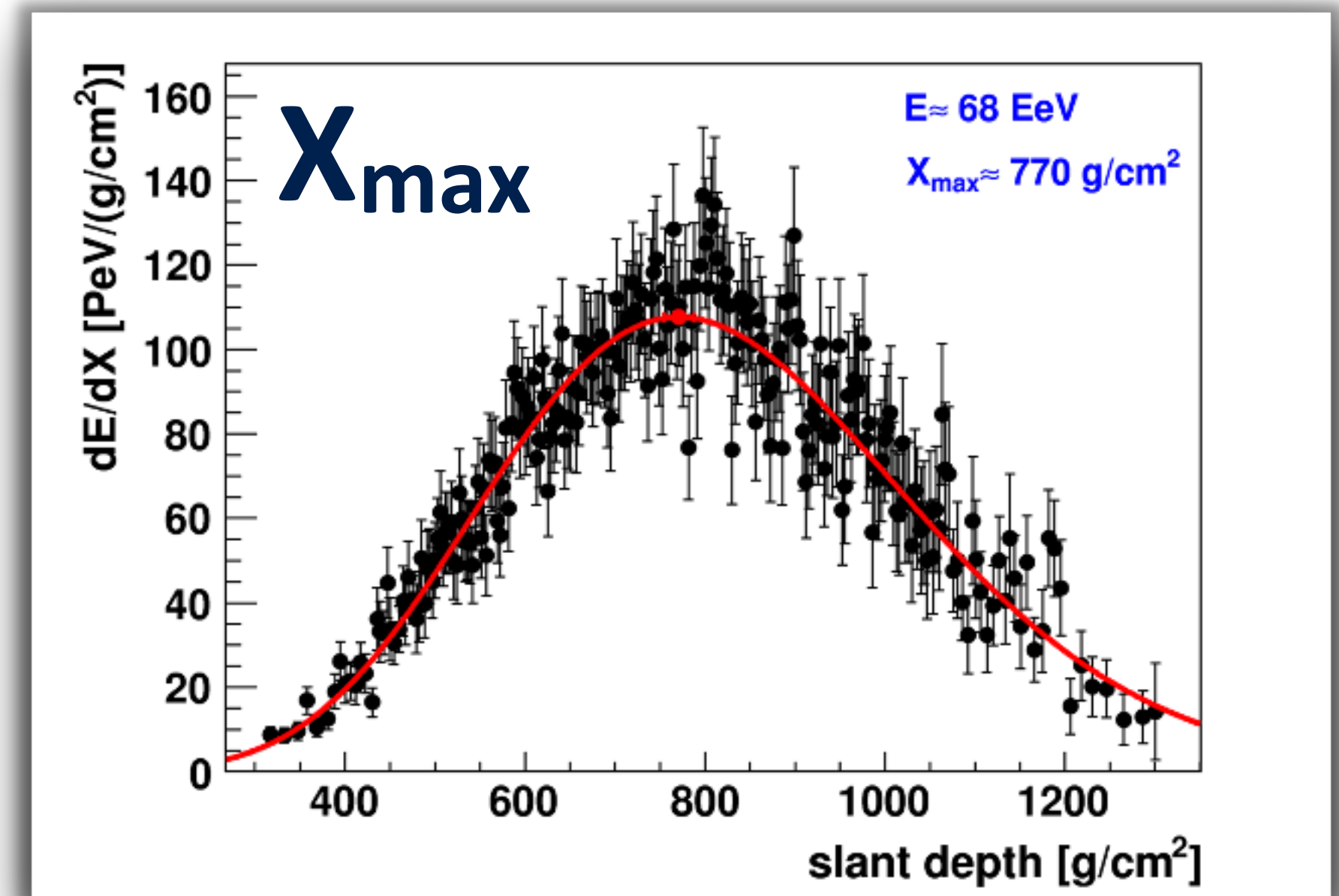
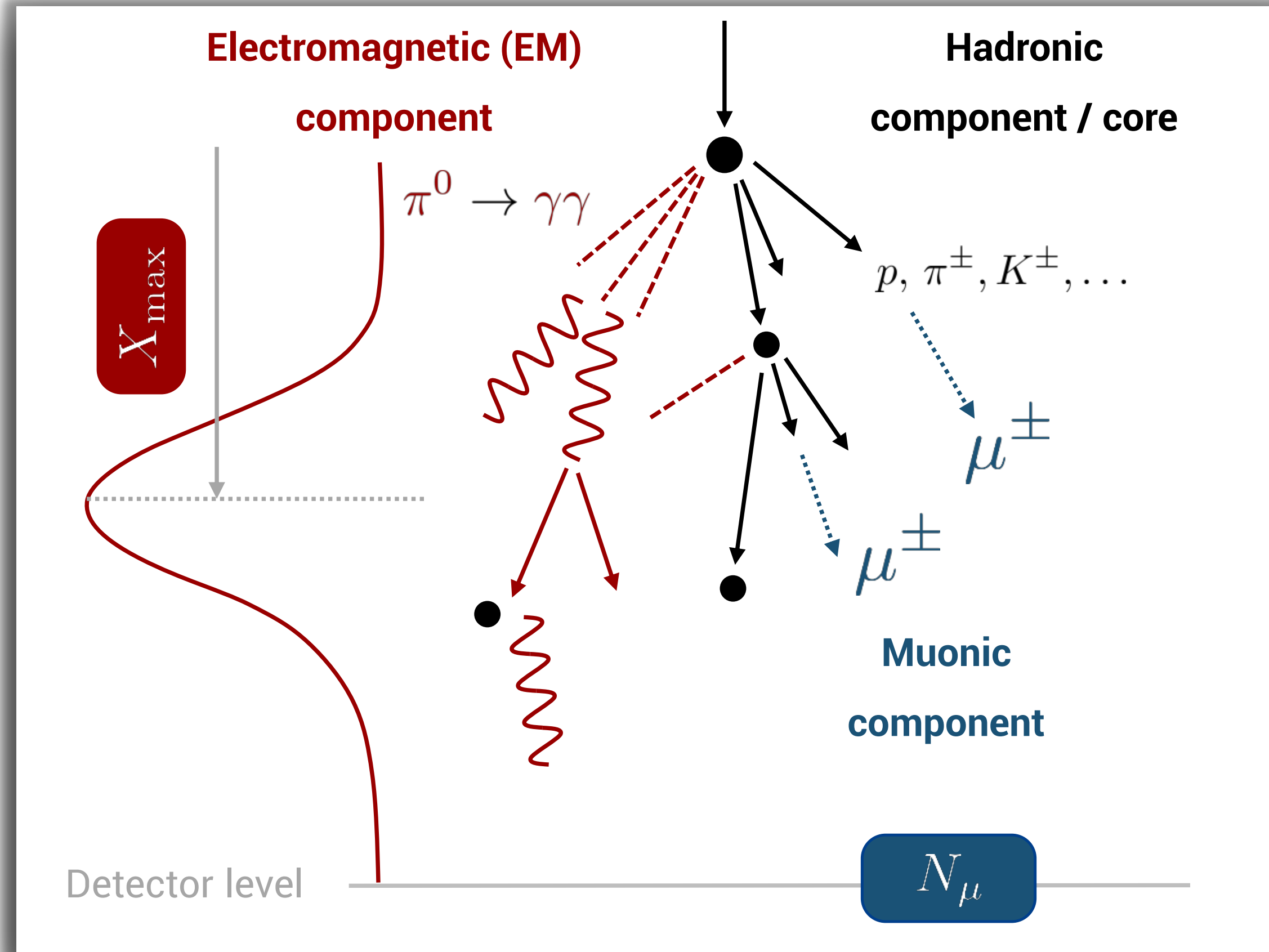
# 宇宙線の組成？



宇宙線→宇宙から飛来する荷電粒子  
 銀河磁場で荷電粒子は影響を受ける  
 粒子識別を行い方向の決定精度向上へ→化学組成研究



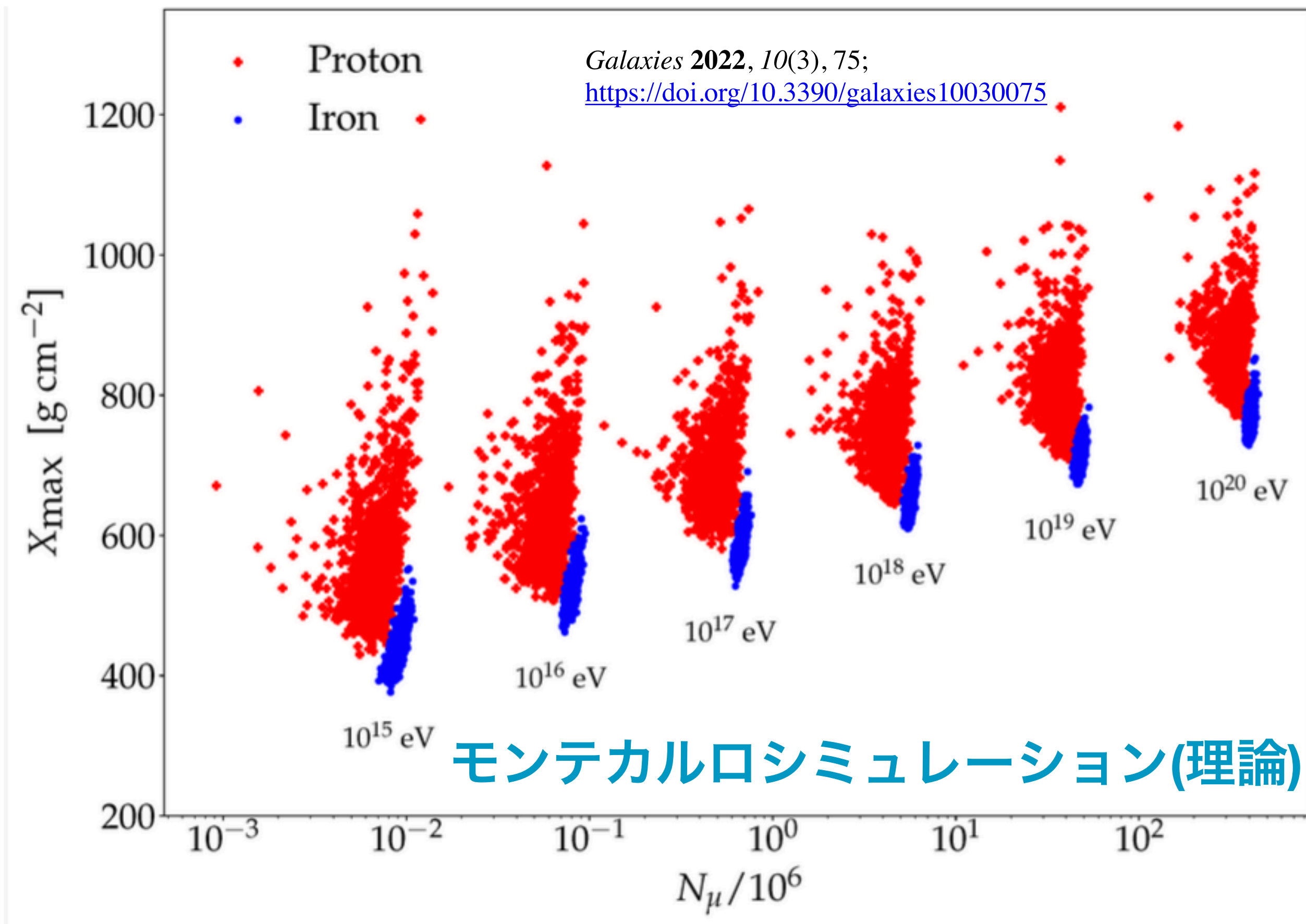
# 粒子識別に必要なこと



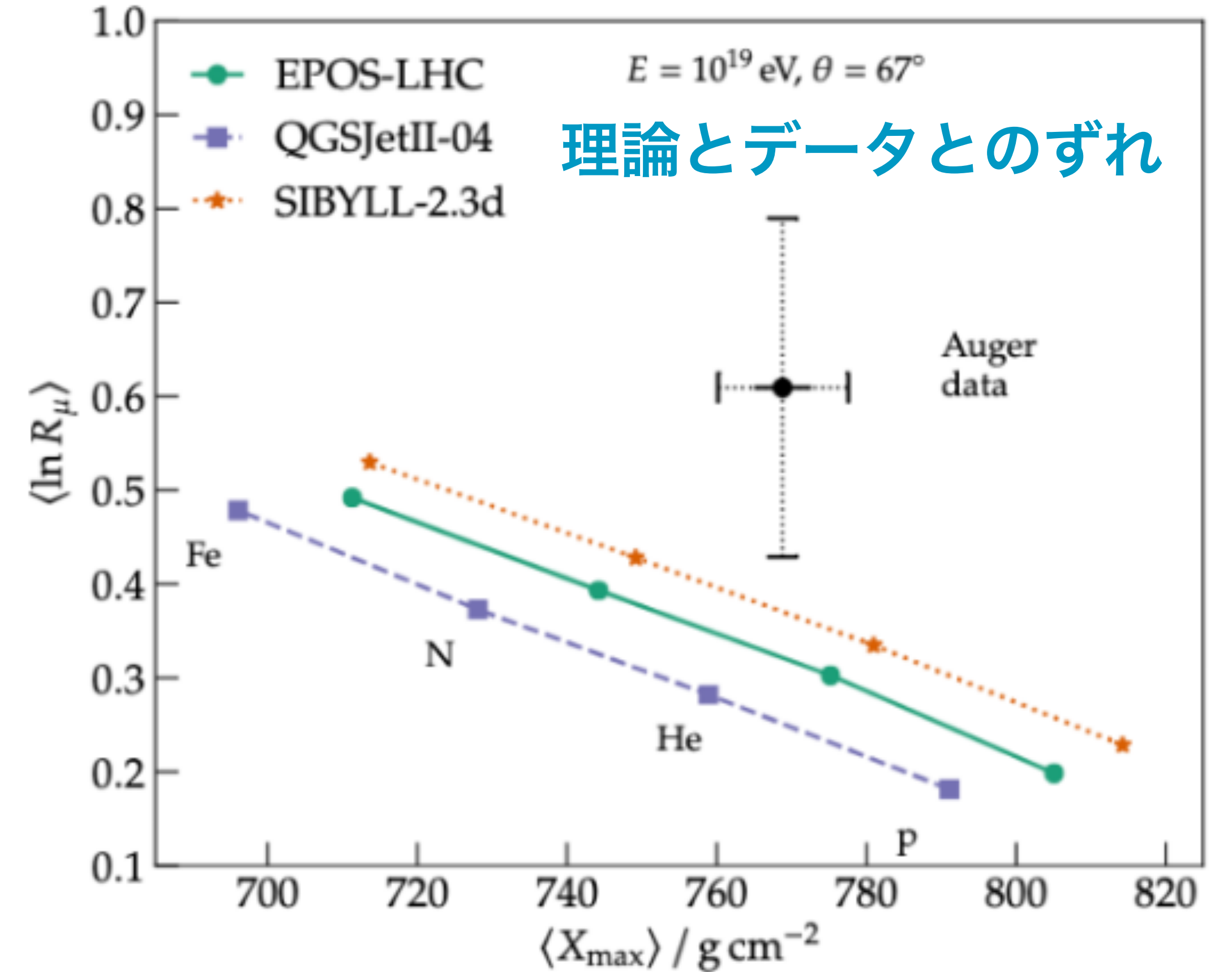
空気シャワーの最大発達→電磁成分  
 地上で観測できるミューオンの数→ハドロン成分  
 これらを使って、粒子識別を行う

Galaxies 2022, 10(3), 75:  
<https://doi.org/10.3390/galaxies10030075>

# 粒子識別のむずかしさ



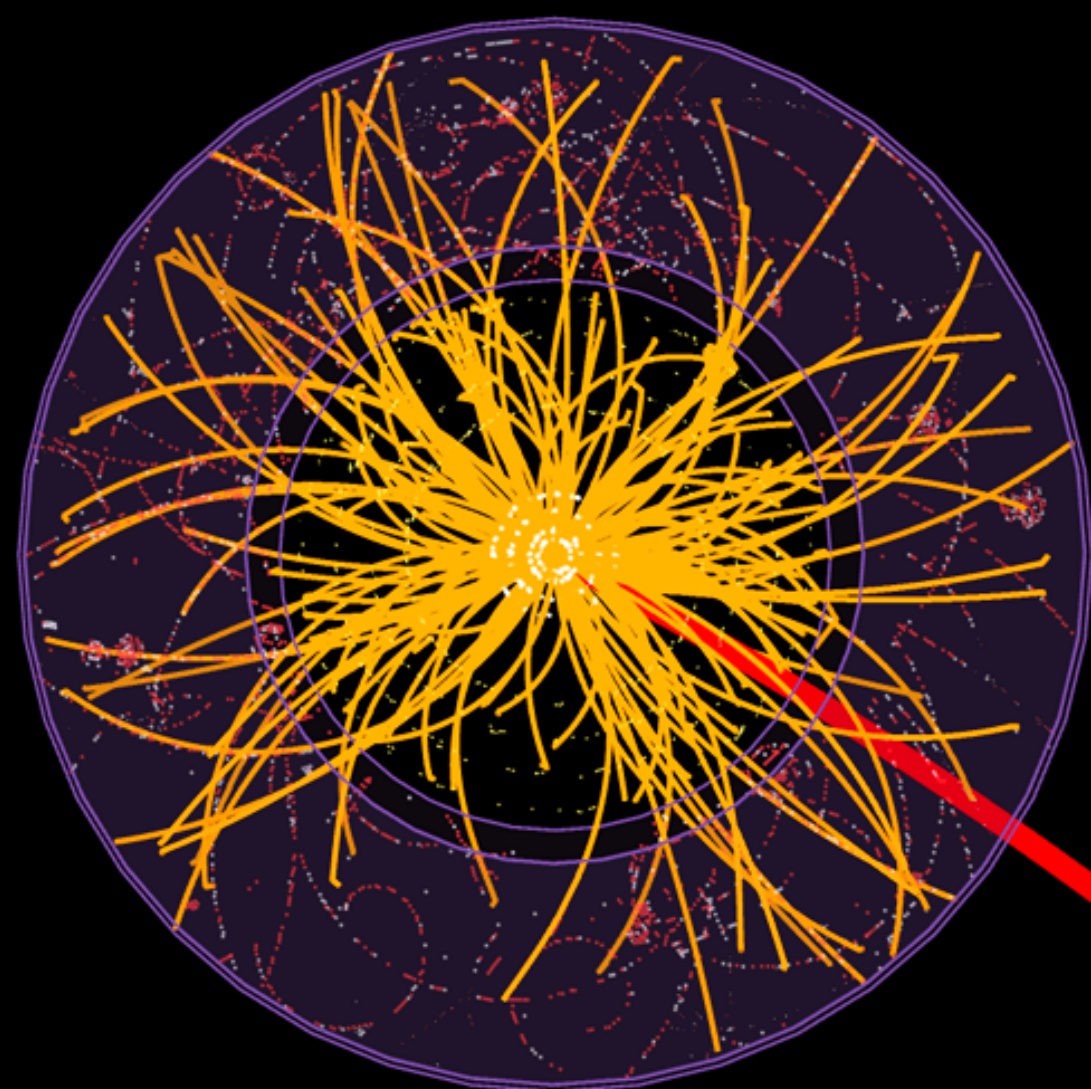
Auger 2021 PRL 126, 152002



既存の粒子物理モデルをいれてシミュレーションすると陽子と鉄は綺麗に区別できるはず？  
 観測してみるとモデルが合わない、粒子反応で見逃していることがある？

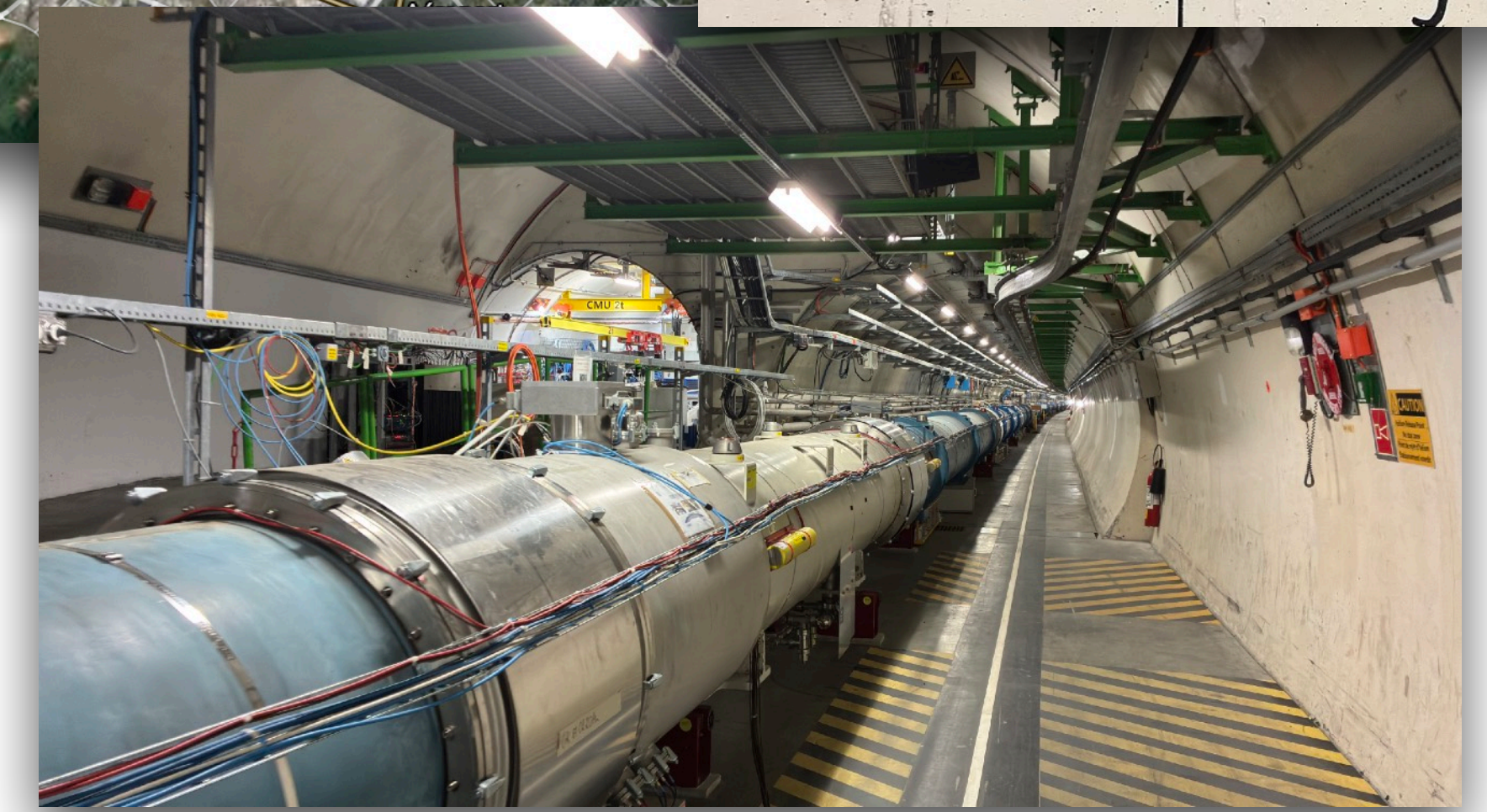
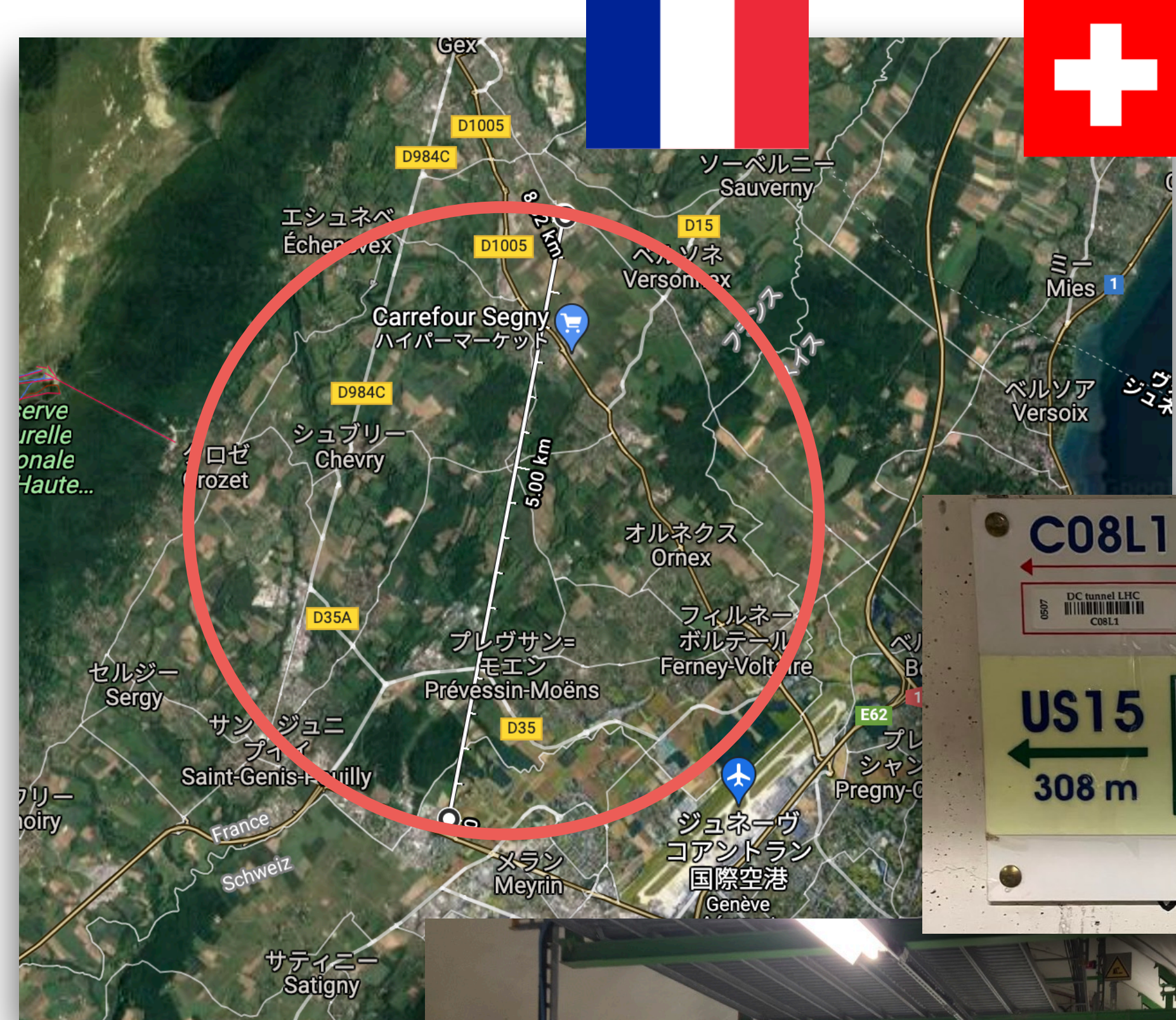
Run: 501607  
Event: 232097566  
2025-07-01 06:53:15 CEST

e.g. p-O 衝突のイベント



加速器で粒子反応を精密測定して宇宙線測定に役立てよう

# CERN - Large Hadron Collider, LHC



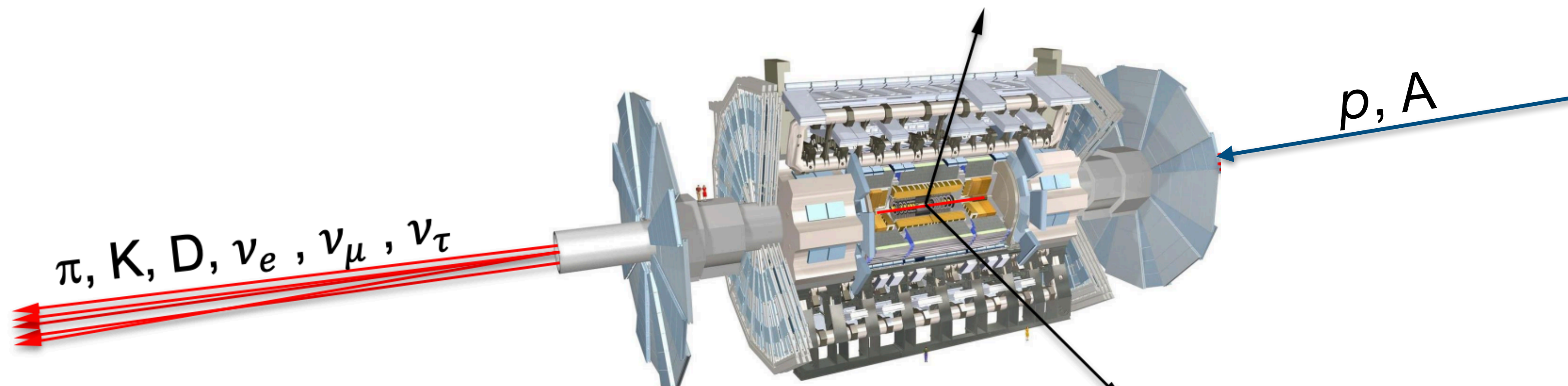
## 欧州原子核研究機構 (CERN)

世界最大の加速器 Large Hadron Collider を運用  
世界最高エネルギー (重心系13.6 TeV) での実験  
素粒子物理学を推進している

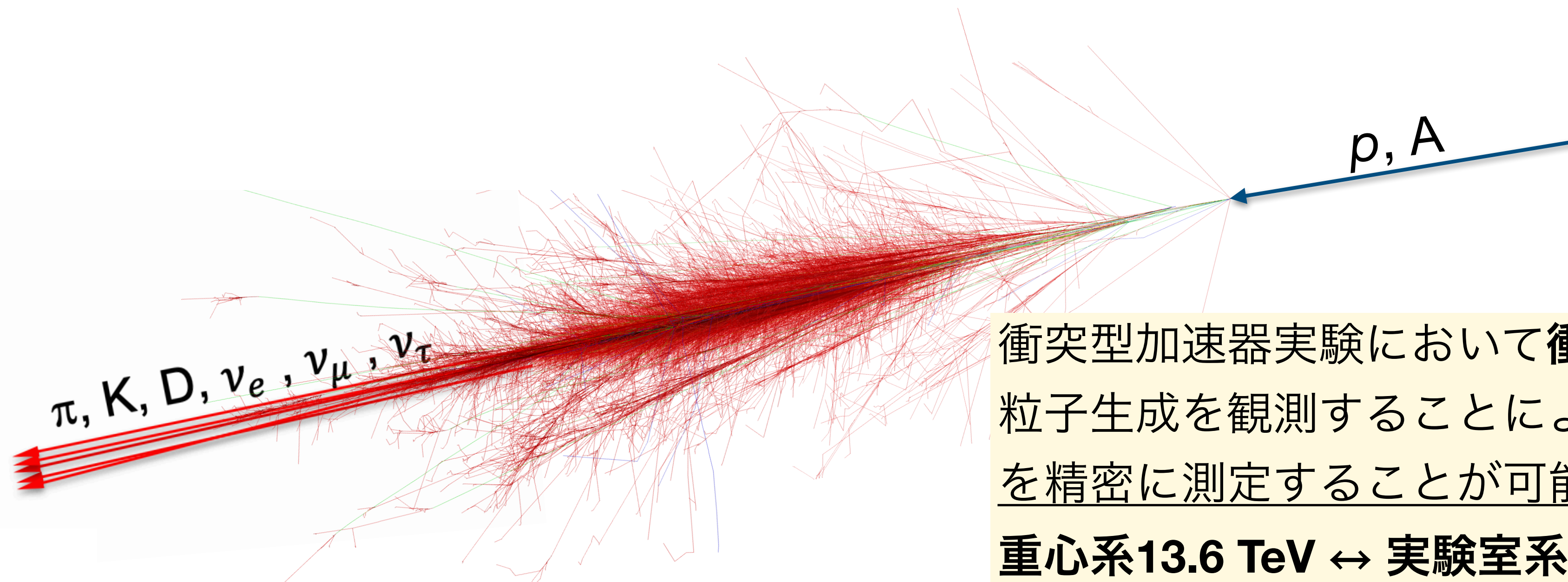


# 宇宙線観測と加速器実験のアナロジー

4 $\pi$



超前方



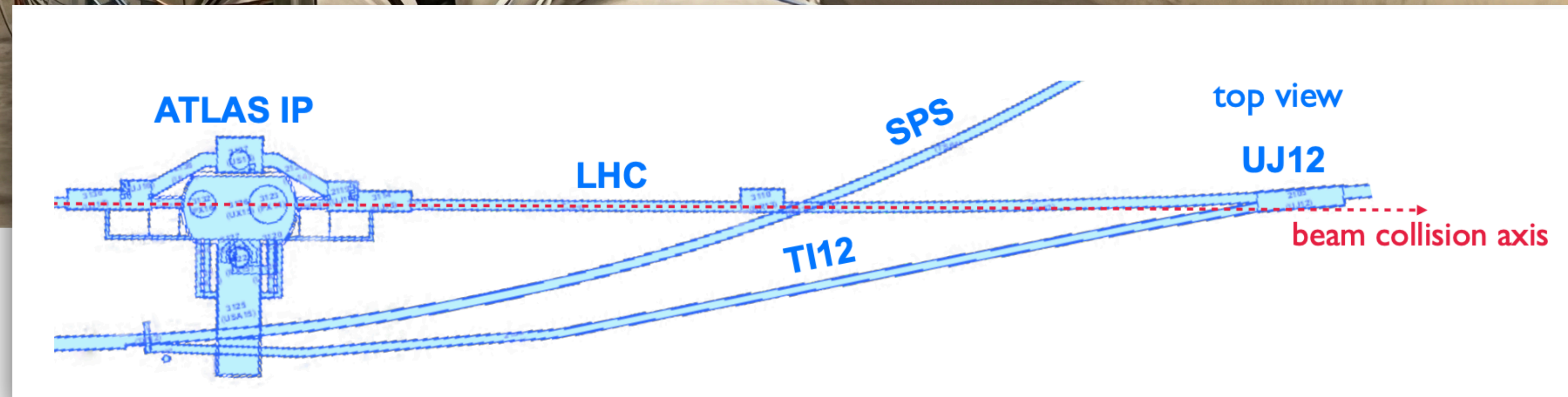
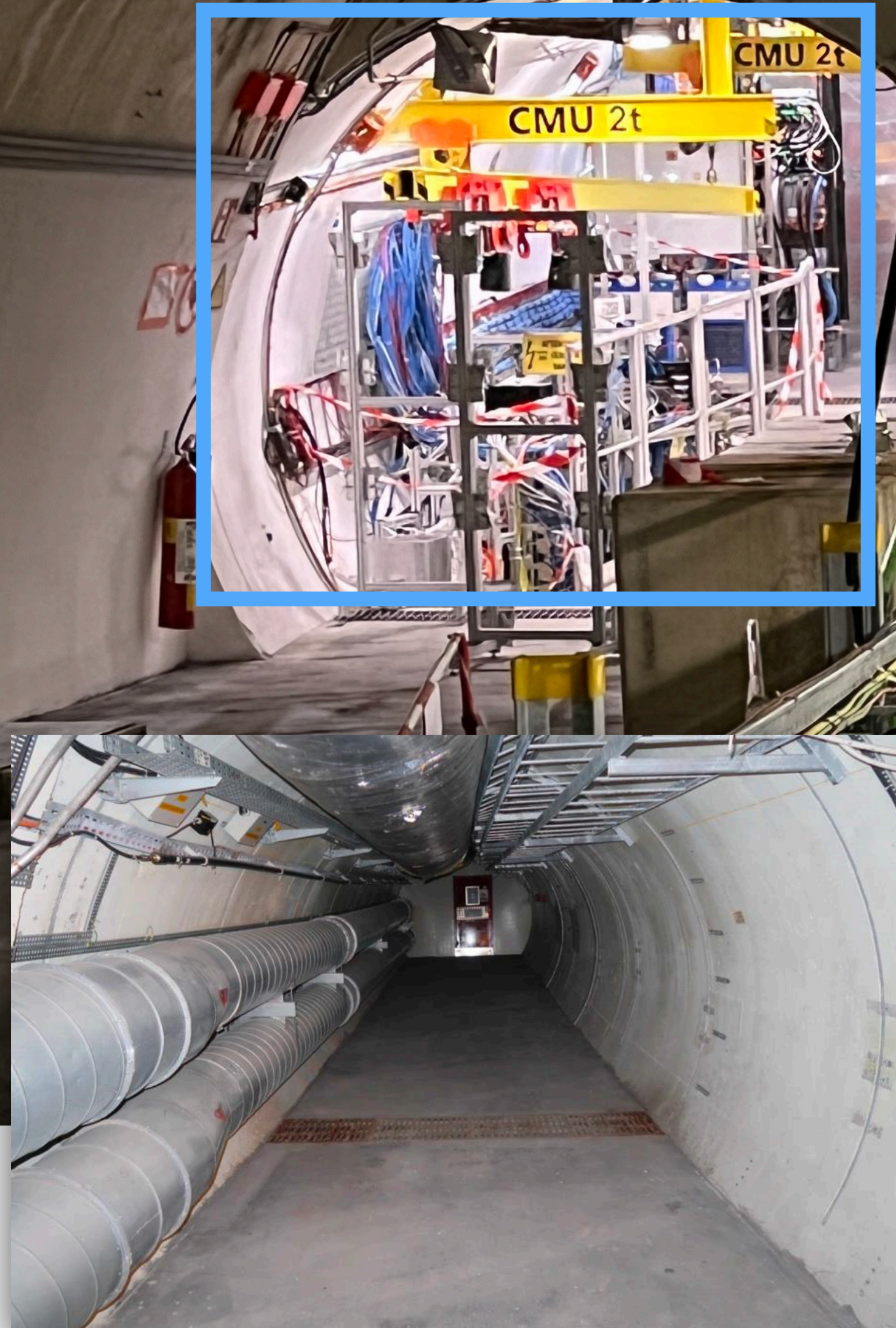
衝突型加速器実験において衝突方向超前方の粒子生成を観測することにより空気シャワーを精密に測定することが可能

**重心系13.6 TeV ↔ 実験室系100 PeV 反応相当**

# ForwArd Search ExpeRiment FASER実験

2022年7月に実験開始

LHC beamline



超前方は放射線環境が非常に厳しく、“定常的”に検出器を設置できないのが問題であった  
→使われなくなったアクセストンネルをリノベーションし、実験を可能な環境に。

# ForwArd Search Experiment FASER実験

粒子はこちらから



# ハドロン研究の新たなプローブ - ニュートリノ

## DETECTION OF THE TAU-NEUTRINO AT THE LHC\*

Klaus Winter  
CERN, Geneva, Switzerland

CERN-TH-3892/84

### NEUTRINO AND MUON PHYSICS IN THE COLLIDER MODE OF FUTURE ACCELERATORS\*)

A. De Rújula and R. Rückl  
CERN - Geneva

#### ABSTRACT

Extracted beams and fixed target facilities at future colliders (the SSC and the LHC) may be (respectively) impaired by economic and "ecological" considerations. Neutrino and muon physics in the multi-TeV range would appear not to be an option for these machines. We partially reverse this conclusion by estimating the characteristics of the "prompt"  $\nu_\mu$ ,  $\nu_e$ ,  $\nu_\tau$  and  $\mu$  beams necessarily produced (for free) at the pp or  $\bar{p}\bar{p}$  intersections. The neutrino beams from a high luminosity (pp) collider are not much less intense than the neutrino beam from the collider's dump, but require no muon shielding. The muon beams from the same intersections are intense and energetic enough to study  $\mu p$  and  $\mu N$  interactions with considerable statistics and a  $Q^2$  coverage well beyond the presently available one. The physics program allowed by these lepton beams is a strong advocate of machines with the highest possible luminosity: pp (not  $\bar{p}\bar{p}$ ) colliders.

\*) To be published in the Proceedings of the ECFE-CERN Workshop on the Feasibility of Hadron Colliders in the LEP Tunnel, Lausanne and Geneva, March 1984. A preliminary version was also included in the "Workshop on Fixed Target Physics at the SSC", Texas, 1984.

CERN-TH.3892/84

May 1984

lepton in  $e^+e^-$  collisions by M. Perl and collaborators, the hypothesis that it is a sequential heavy lepton [2]. From measurements of the forward-backward asymmetry in  $e^+e^-$  annihilations [3], [4]

the measured coupling constant of  $g_{a\tau} = -0.45 \pm 0.05$  is consistent with  $1/2$  for the assignment of left-handed tau-lepton of a weak isospin doublet. Hence, the most likely assignment ( $I_3 = +1/2$ ) would be to a neutrino with the

VIEWPOINT

## The Dawn of Collider Neutrino Physics

Elizabeth Worcester

Brookhaven National Laboratory, Upton, New York, US

July 19, 2023 • Physics 16, 113

The first observation of neutrinos produced at a particle collider opens a new field of study and offers ways to test the limits of the standard model.

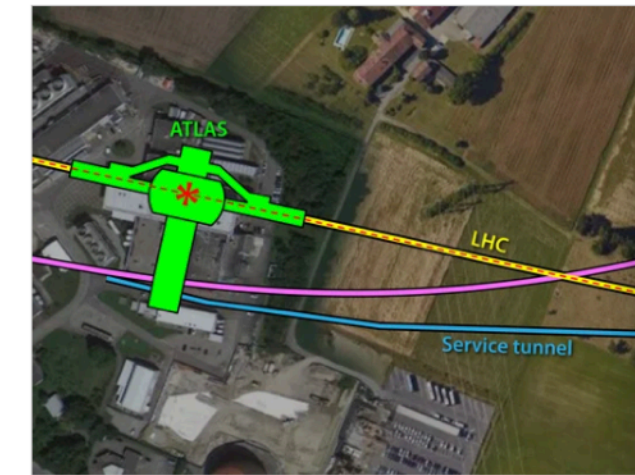


Figure 1: The Forward Search Experiment (FASER) is installed in a service tunnel along a tangent to the LHC. The experiment's interaction point (red star) generate beams of neutrinos along a tangent to the LHC.

PHYSICAL REVIEW LETTERS 131, 031801 (2023)

Editors' Suggestion

Featured in Physics

### First Direct Observation of Collider Neutrinos with FASER at the LHC

Henso Abreu<sup>1</sup>, John Anders<sup>2</sup>, Claire Antel<sup>3</sup>, Akitaka Ariga<sup>4,5</sup>, Tomoko Ariga<sup>6</sup>, Jeremy Atkinson<sup>4</sup>, Florian U. Bernlochner<sup>7</sup>, Tobias Blesgen<sup>7</sup>, Tobias Boeckh<sup>7</sup>, Jamie Boyd<sup>8</sup>, Lydia Brenner<sup>8</sup>, Franck Cadoux<sup>3</sup>, David W. Casper<sup>9</sup>, Charlotte Cavanagh<sup>10</sup>, Xin Chen<sup>11</sup>, Andrea Coccaro<sup>12</sup>, Ansh Desai<sup>13</sup>, Sergey Dmitrievsky<sup>14</sup>, Monica D'Onofrio<sup>10</sup>, Yannick Favre<sup>3</sup>, Deion Fellers<sup>13</sup>, Jonathan L. Feng<sup>9</sup>, Carlo Alberto Fenoglio<sup>3</sup>, Didier Ferrere<sup>3</sup>, Stephen Gibson<sup>15</sup>, Sergio Gonzalez-Sevilla<sup>3</sup>, Yuri Gornushkin<sup>14</sup>, Carl Gwilliam<sup>10</sup>, Daiki Hayakawa<sup>5</sup>, Shih-Chieh Hsu<sup>16</sup>, Zhen Hu<sup>11</sup>, Giuseppe Iacobucci<sup>3</sup>, Tomohiro Inada<sup>11</sup>, Sune Jakobsen<sup>2</sup>, Hans Joos<sup>2,17</sup>, Enrique Kajomovitz<sup>1</sup>, Hiroaki Kawahara<sup>6</sup>, Alex Keyken<sup>15</sup>, Felix Kling<sup>18</sup>, Daniela Köck<sup>13</sup>, Umut Kose<sup>2</sup>, Rafaella Kotitsa<sup>2</sup>, Susanne Kuehn<sup>2</sup>, Helena Lefebvre<sup>15</sup>, Lorne Levinson<sup>19</sup>, Ke Li<sup>16</sup>, Jinfeng Liu<sup>11</sup>, Jack MacDonald<sup>20</sup>, Chiara Magliocca<sup>3</sup>, Fulvio Martinelli<sup>3</sup>, Josh McFayden<sup>21</sup>, Matteo Milanesio<sup>3</sup>, Dimitar Mladenov<sup>2</sup>, Théo Moretti<sup>3</sup>, Magdalena Munker<sup>3</sup>, Mitsuhiro Nakamura<sup>22</sup>, Toshiyuki Nakano<sup>22</sup>, Marzio Nessi<sup>3,2</sup>, Friedemann Neuhaus<sup>20</sup>, Laurie Nevay<sup>2,15</sup>, Hidetoshi Otono<sup>6</sup>, Hao Pang<sup>11</sup>, Lorenzo Paolozzi<sup>3,2</sup>, Brian Petersen<sup>2</sup>, Francesco Pietropaolo<sup>2</sup>, Markus Prim<sup>7</sup>, Michaela Queitsch-Maitland<sup>23</sup>, Filippo Resnati<sup>2</sup>, Hiroki Rokujo<sup>22</sup>, Elisa Ruiz-Choliz<sup>20</sup>, Jorge Sabater-Iglesias<sup>3</sup>, Osamu Sato<sup>22</sup>, Paola Scamporrino<sup>4,24</sup>, Kristof Schmieden<sup>20</sup>, Matthias Schott<sup>20</sup>, Anna Sfyrla<sup>3</sup>, Savannah Shively<sup>9</sup>, Yosuke Takubo<sup>25</sup>, Noshin Tarannum<sup>3</sup>, Ondrej Theiner<sup>3</sup>, Eric Torrence<sup>13</sup>, Serhan Tufanli<sup>2</sup>, Svetlana Vasina<sup>14</sup>, Benedikt Vormwald<sup>2</sup>, Di Wang<sup>11</sup>, Eli Welch<sup>9</sup>, and Stefano Zambito<sup>3</sup>

(FASER Collaboration)

### 第19回 (2025年) 日本物理学会若手奨励賞 (Young Scientist Award of the Physical Society of Japan) 受賞者一覧

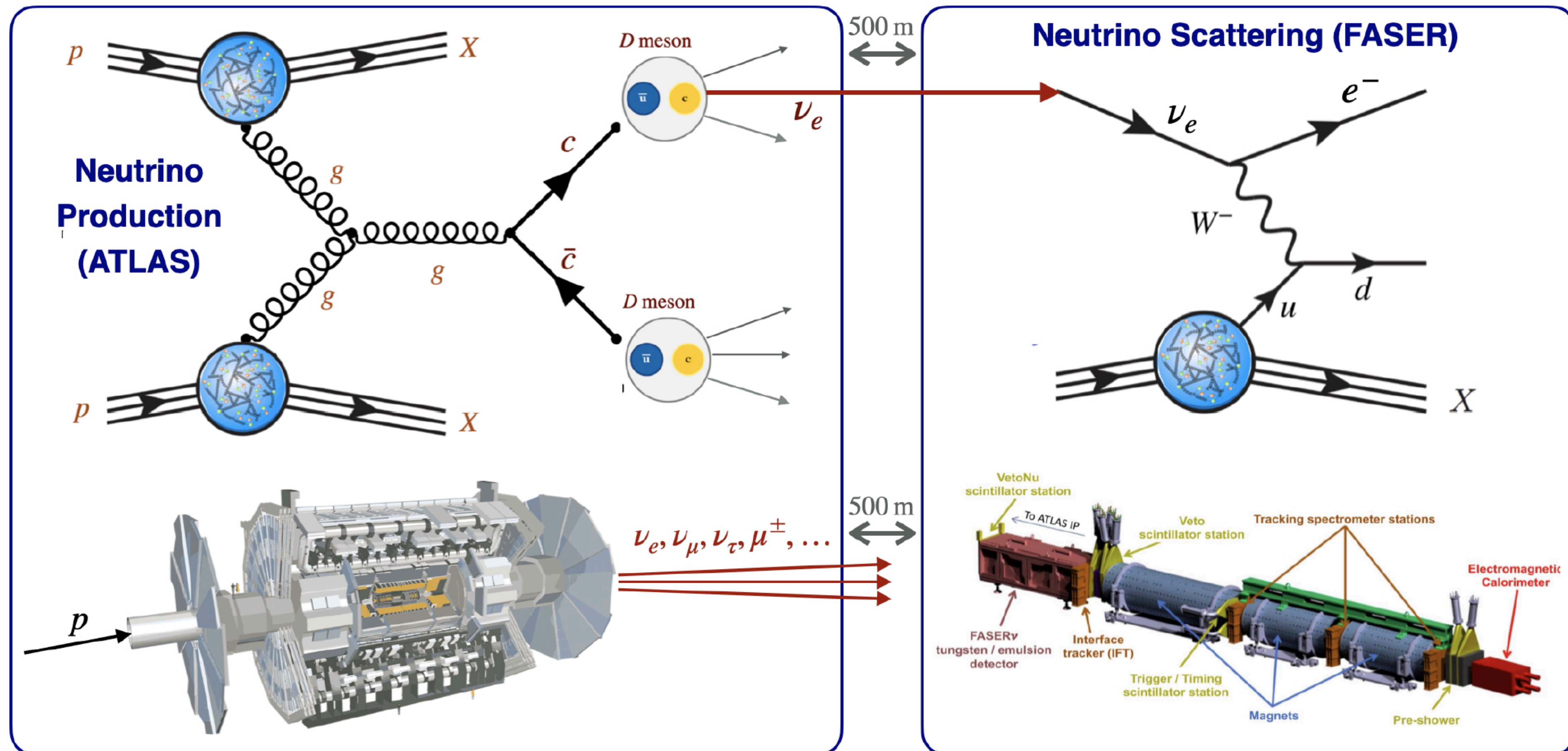
領域名	素粒子実験領域 (3名)
氏名 (所属)	稲田知大 (欧州原子核研究機構 (CERN))
対象研究/対象論文	LHC-FASER実験における衝突型加速器起源ニュートリノの初観測 First Direct Observation of Collider Neutrinos with FASER at the LHC, Phys. Rev. Lett. 131, 031801 (2023)

30年前の理論予想から  
様々な幸運が重なり実験的に実現  
(元々のLHC計画には含まれていなかったが思わぬ拡張)

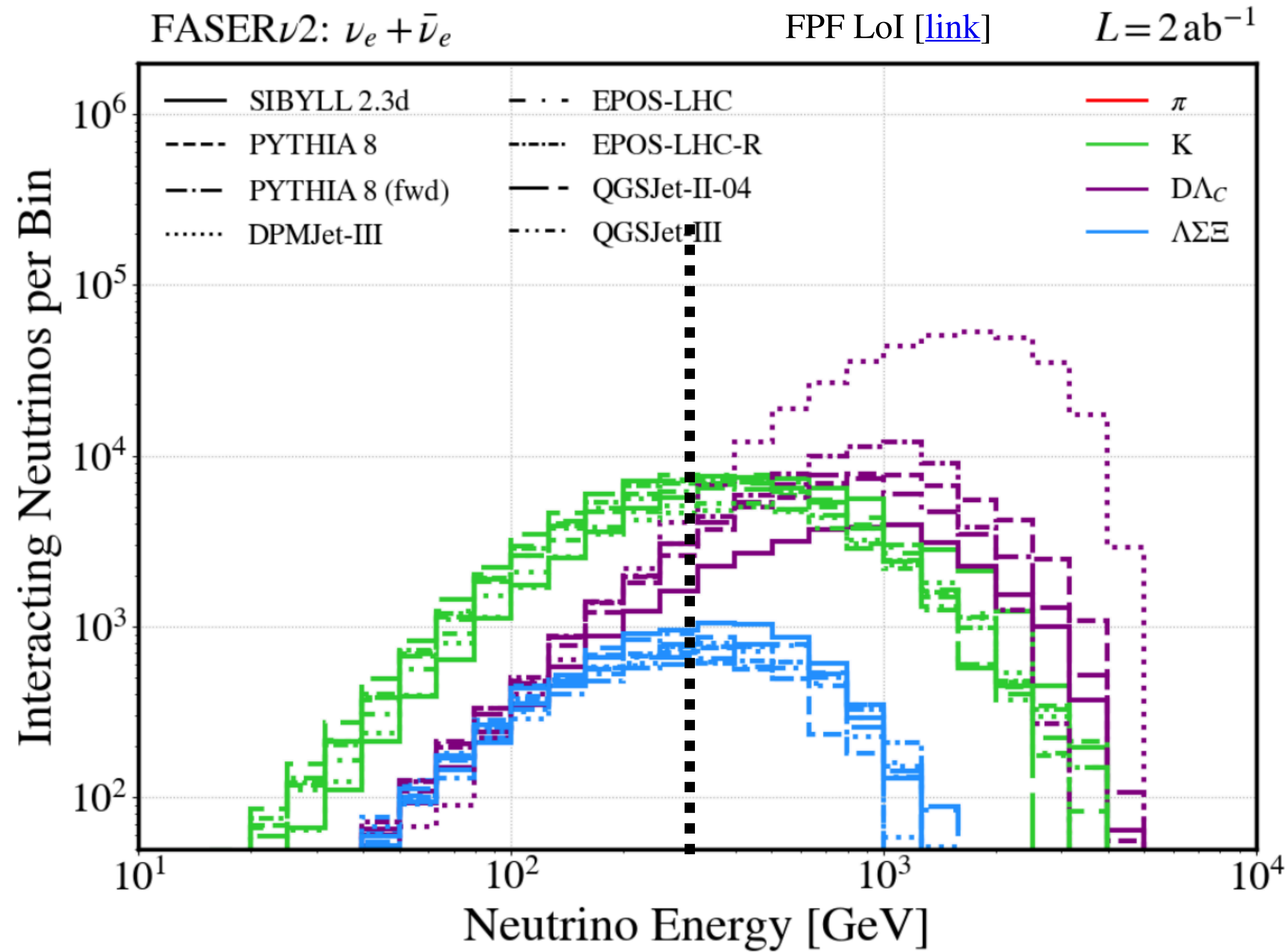
# ニュートリノをプローブとしたハドロン相互作用研究への発展

初検出から物理研究へ

ニュートリノでハドロン構造に”針を刺す”→ニュートリノを用いたフェムトスコーピー



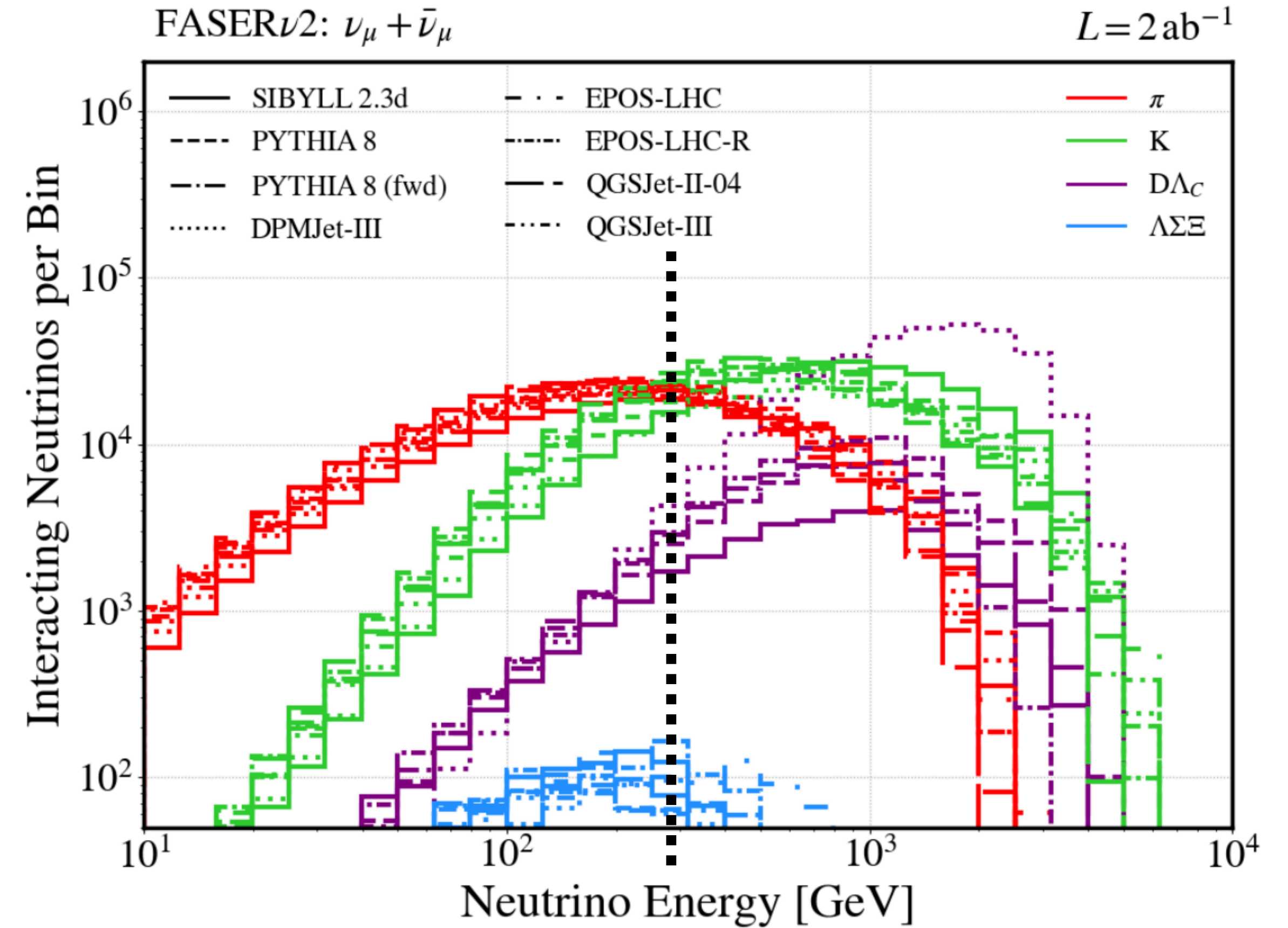
# ニュートリノエネルギースペクトラム→親粒子を取り出す



主に

K: 低エネルギー電子ニュートリノ

D (charm): 高エネルギー電子ニュートリノ



主に

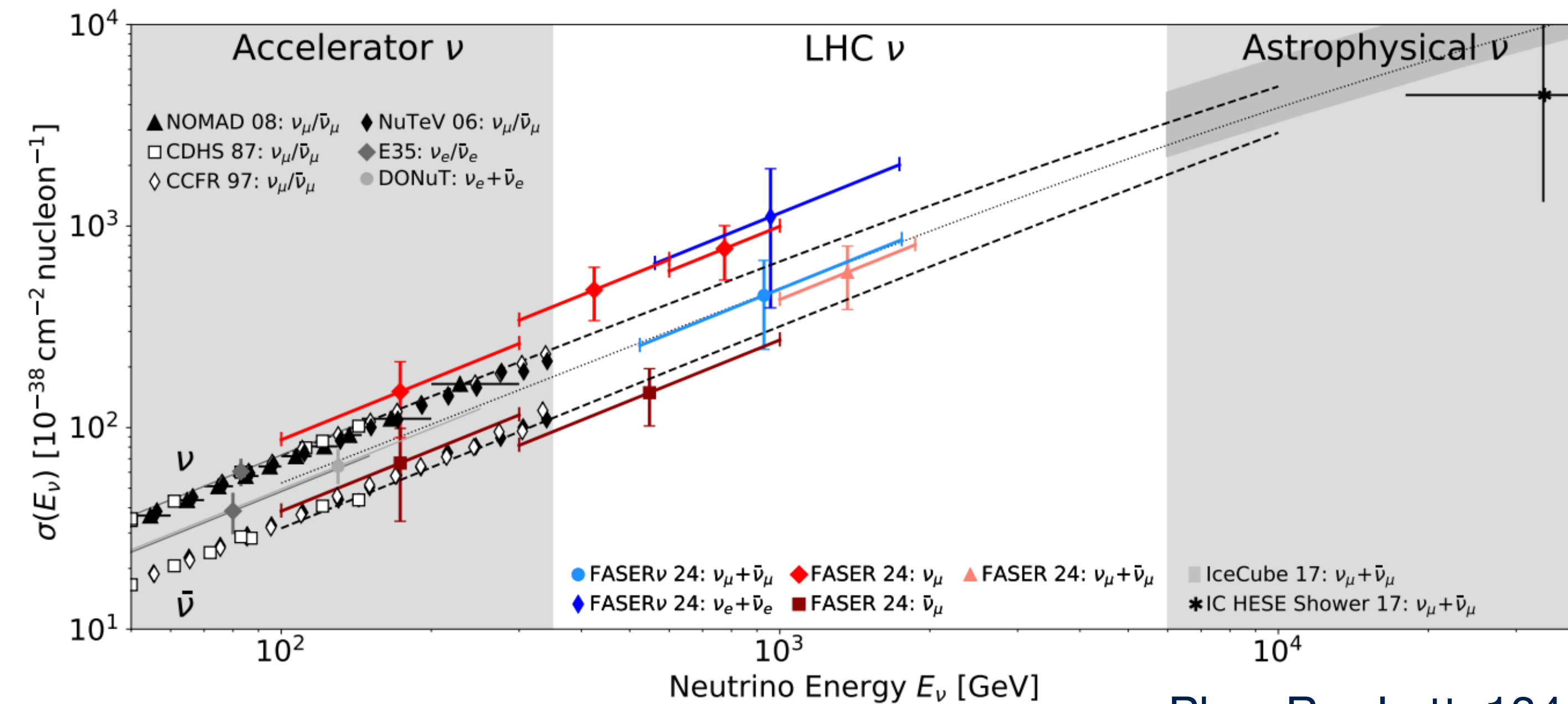
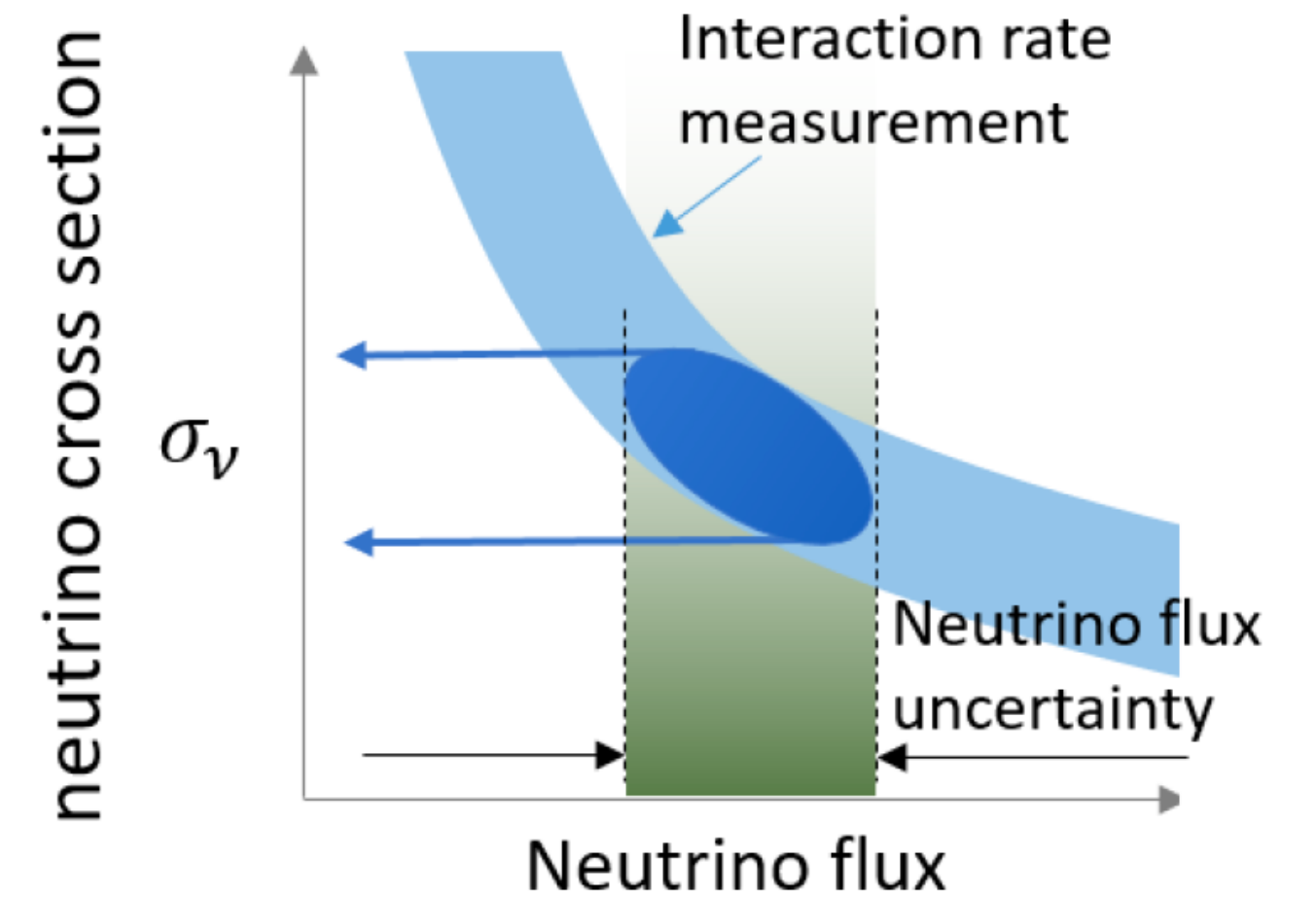
$\pi$ : 低エネルギーミューオンニュートリノ

K: 高エネルギーミューオンニュートリノ

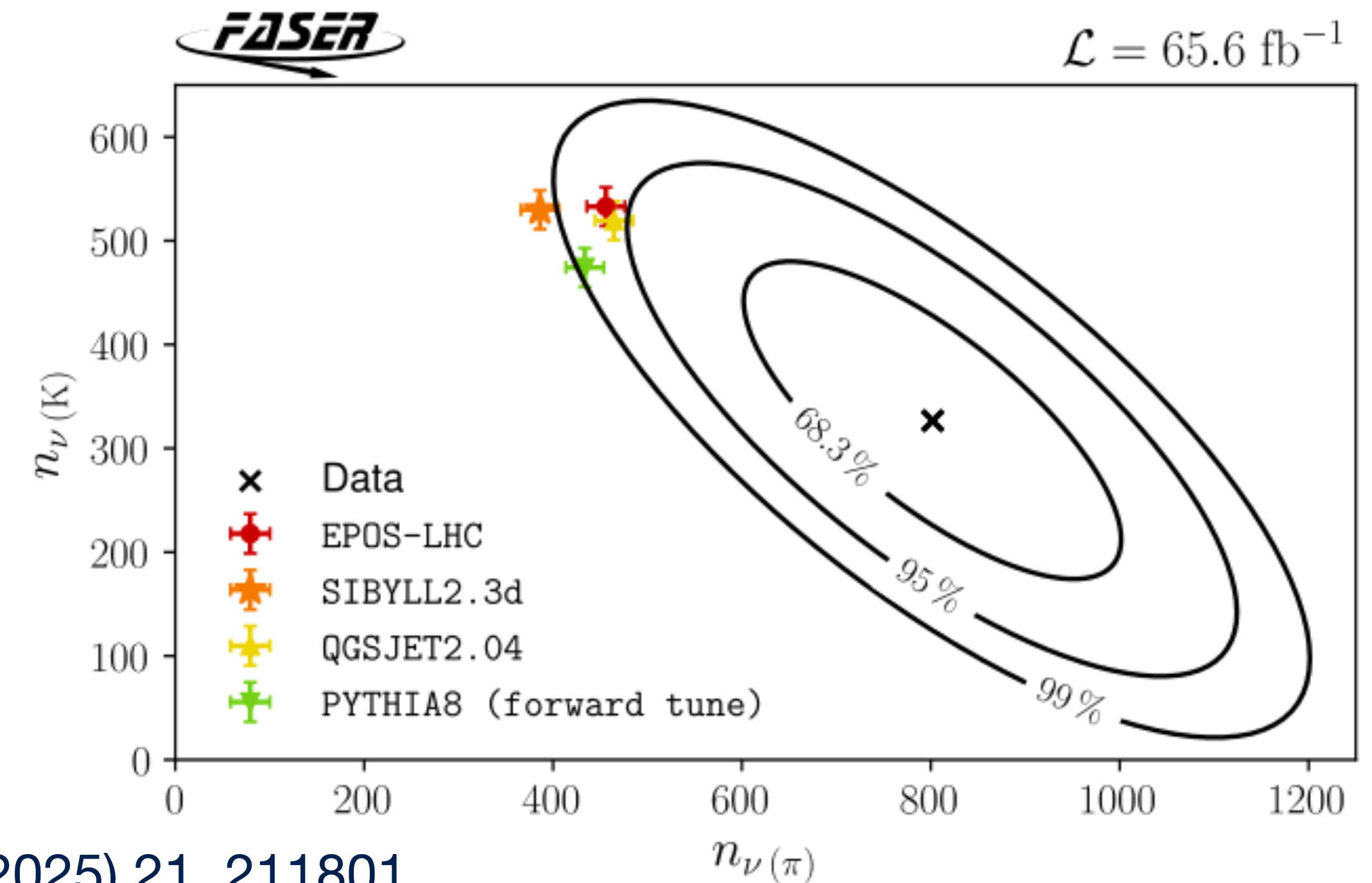
# ミューオンニュートリノによるハドロン相互作用モデルへの制限

ミューオンニュートリノの反応数測定より

- テラ電子ボルト領域での反応断面積の測定
- ニュートリノフラックスの親粒子の組成モデルの制限
- を行った
- 高エネルギー宇宙線組成観測のためのハドロン相互作用モデルの精度向上のための第一歩

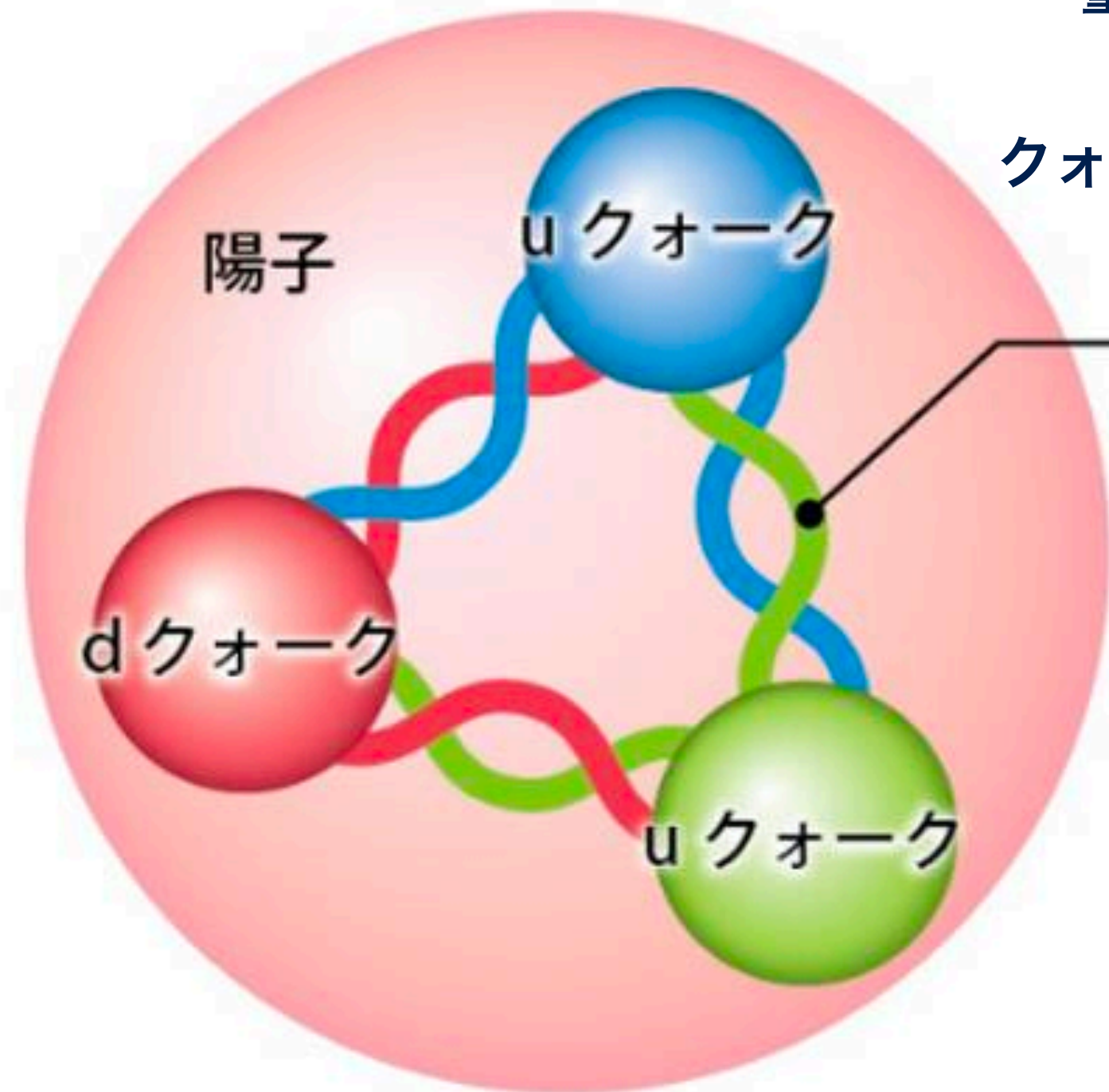


Phys.Rev.Lett. 134 (2025) 21, 211801



# もう一步踏み込む: 陽子の内部構造

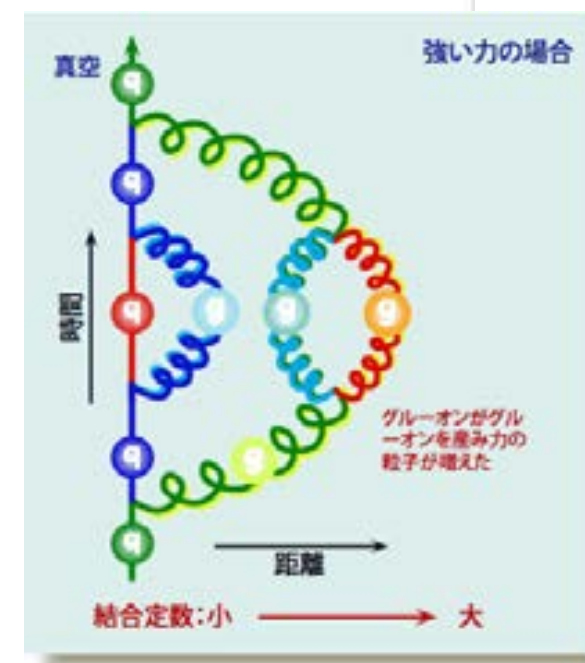
教科書的なイメージ



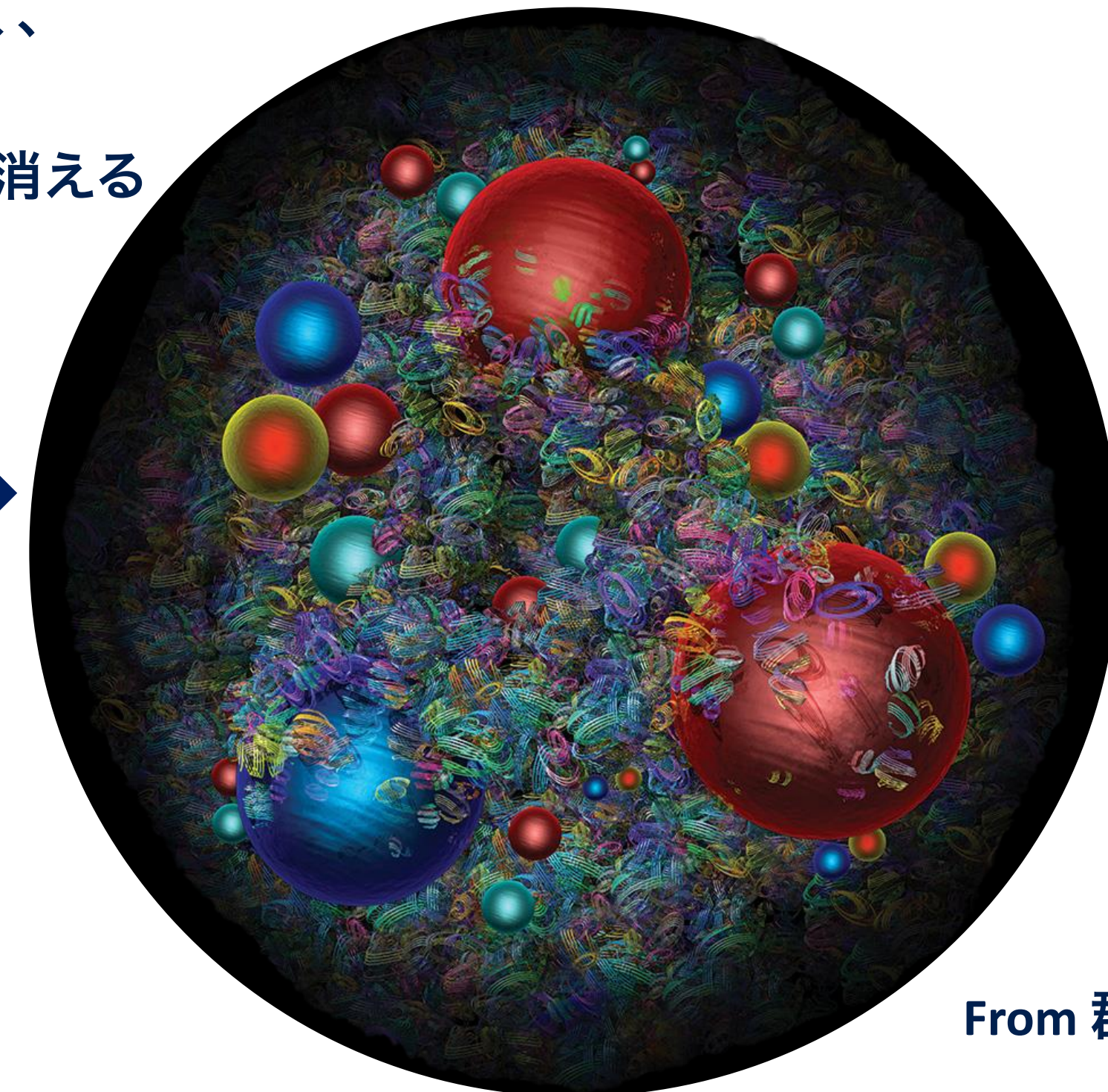
量子力学では真空は静かではなく、  
グルーオンが生成・消滅  
クォーク・反クォーク対が湧いては消える

グルーオン

量子ゆらぎ



実際の陽子の中身



From 郡司さんのスライド

<https://cerncourier.com/a/the-proton-laid-bare/>

陽子は3つのクォーク (uud) からできている  
クォーク同士はグルーオンで結びついている  
いわば「3粒子+バネ」のようなシンプルなモデル

陽子の中はクォーク・反クォーク, グルーオン  
が高密度で詰まった状態

「3個」ではなく、多数の自由度が動的に存在

# もう一步踏み込む: 陽子の内部構造

教科書的なイメージ

実際の陽子の中身

量子力学では真空は静かではなく、  
グルーオンが生成・消滅  
クォーク・反クォーク対が湧いては消える

- 陽子は“3つの粒子”ではなく、量子ゆらぎに満ちた強い相互作用系
- その質量のほとんどはクォーク自身の質量ではなくQCDのダイナミクス（運動エネルギーと結合エネルギー）から創発する。
- 内部構造の起源はまだ完全には理解されていない

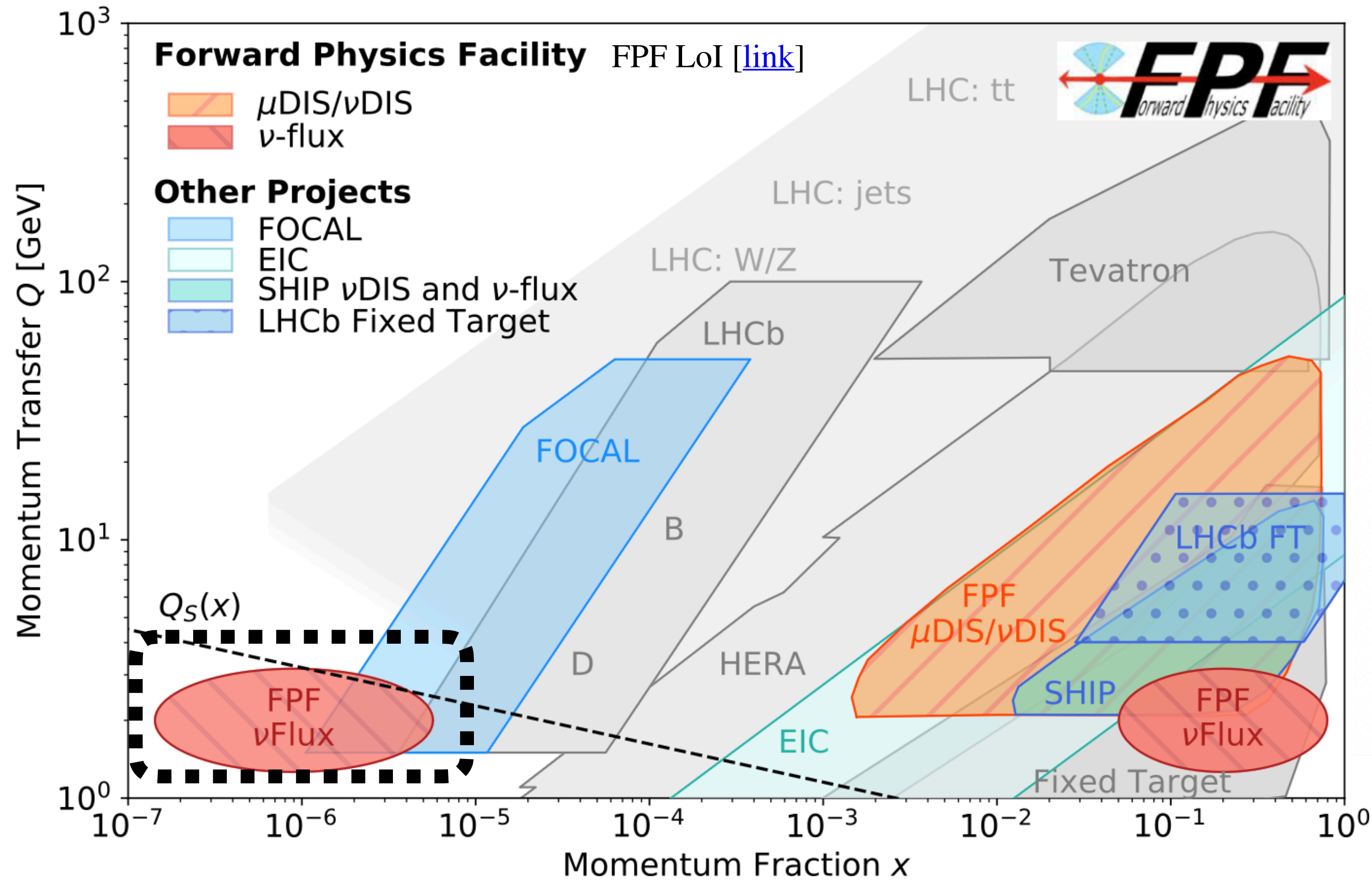
陽子は3つのクォーク (uud) からできている  
クォーク同士はグルーオンで結びついている  
いわば「3粒子+バネ」のようなシンプルなモデル

陽子の中はクォーク・反クォーク, グルーオン  
が高密度で詰まった状態  
「3個」ではなく、多数の自由度が動的に存在

<https://cerncourier.com/a/the-proton-laid-bare/>

# 電子ニュートリノを用いた陽子の内部構造研究

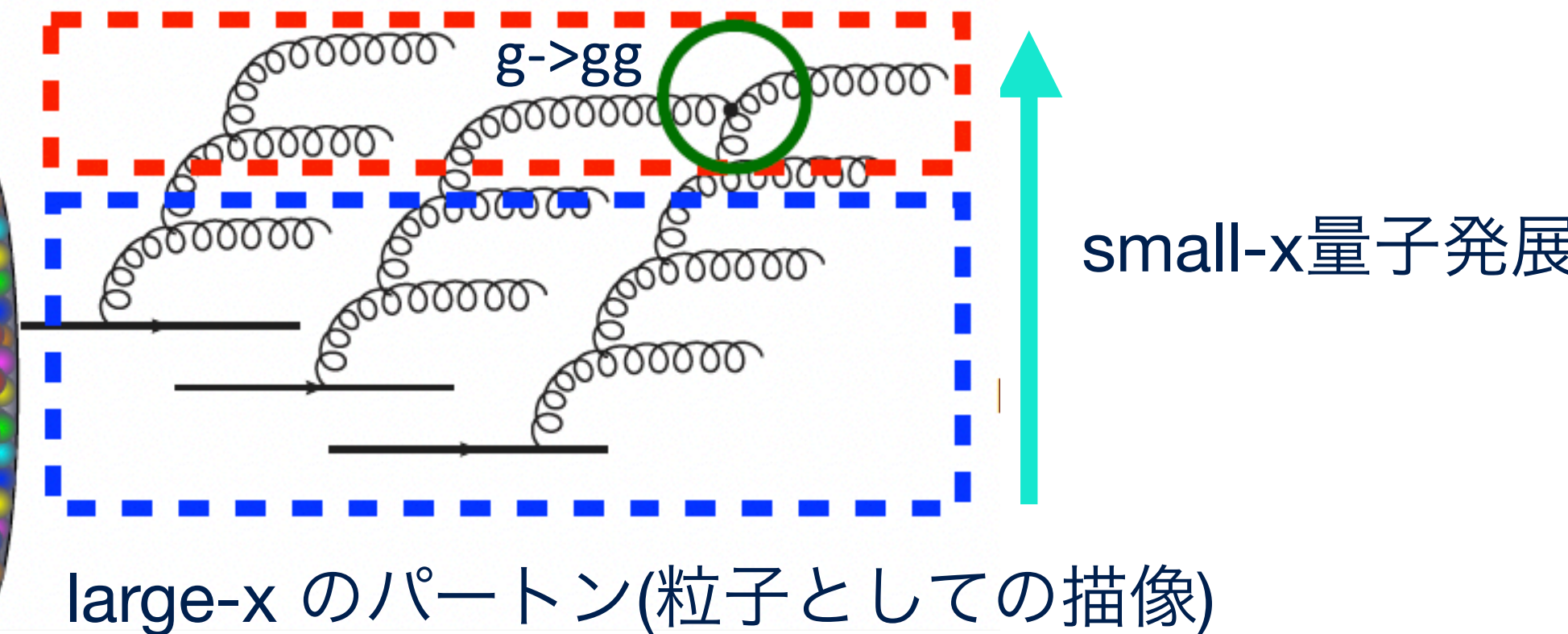
Q: 横方向の解像度



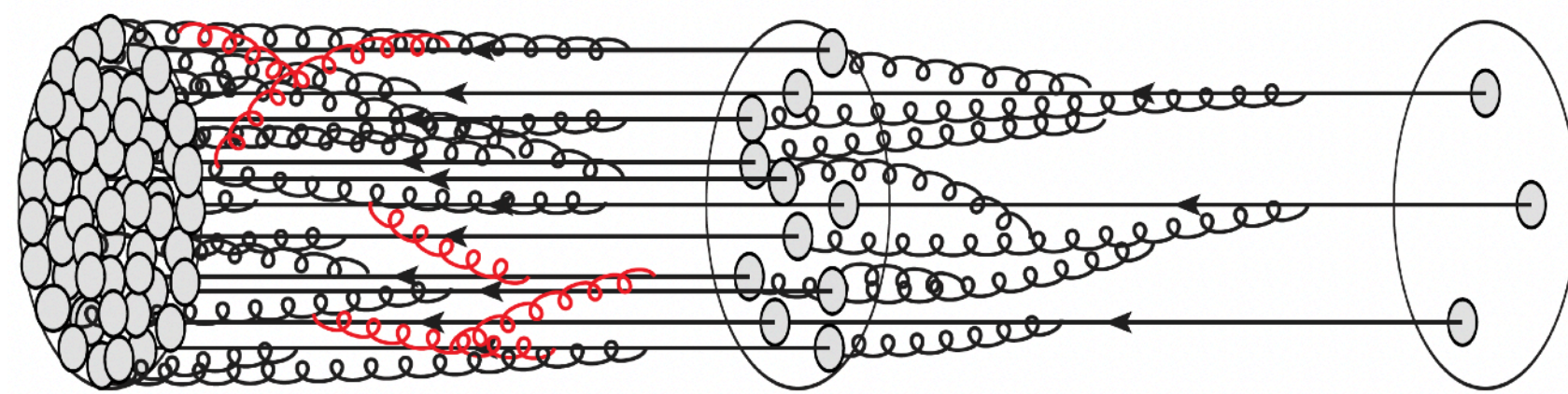
パートン: クォークとグルーオン  
をまとめたもの

x: パートンが持つ縦運動量比

small-xのゲージ場(古典場の極限としての描像)

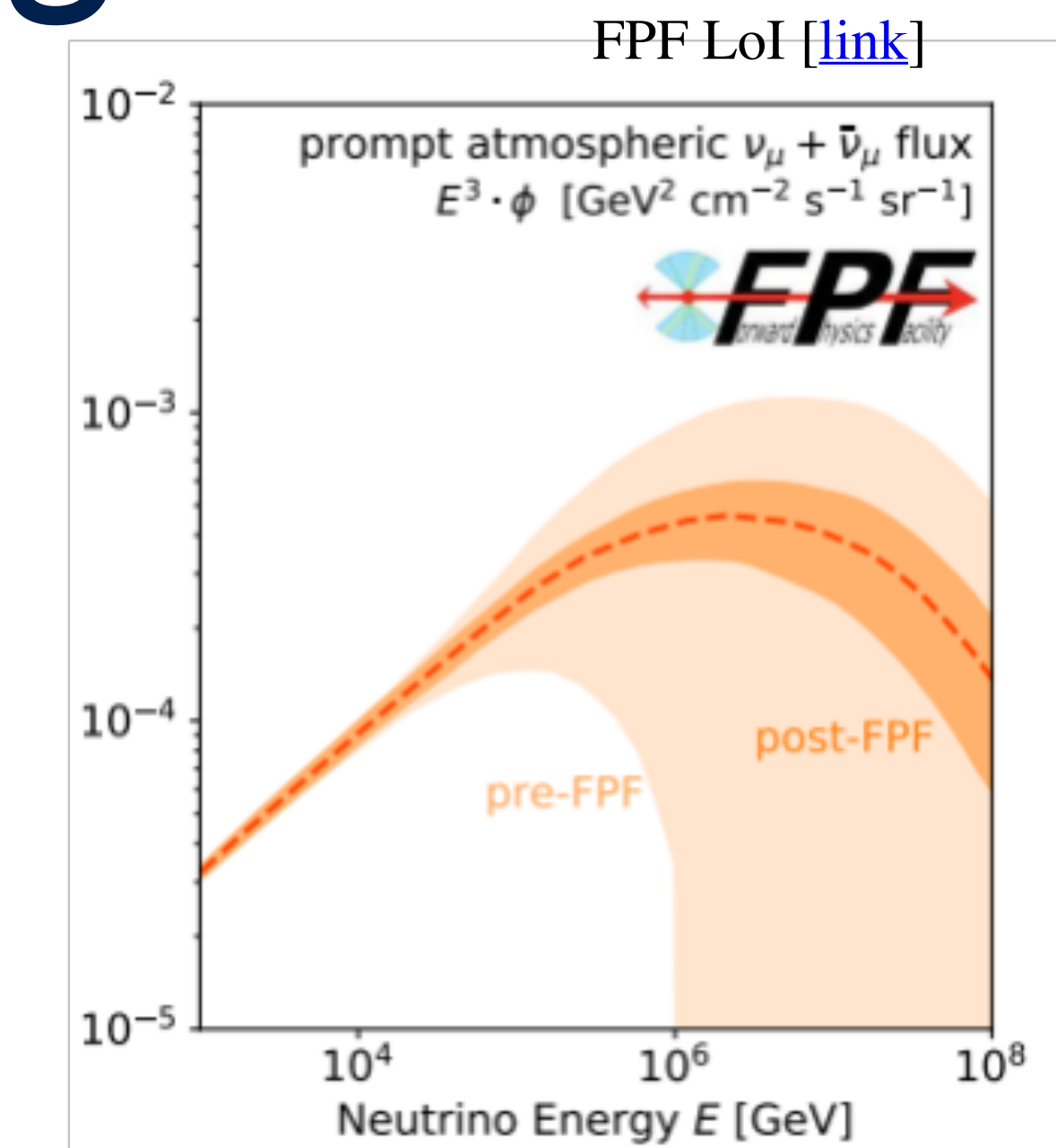
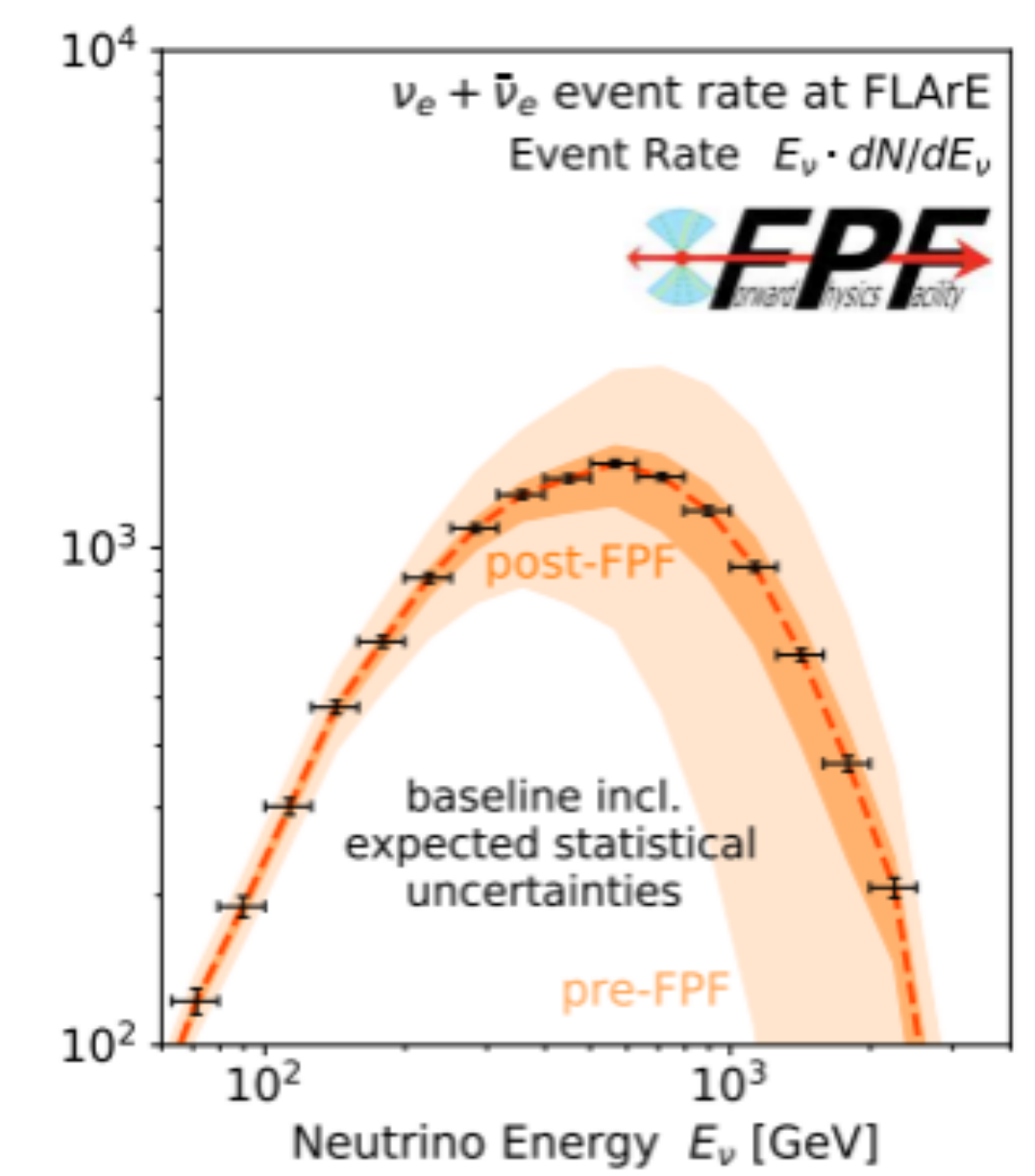
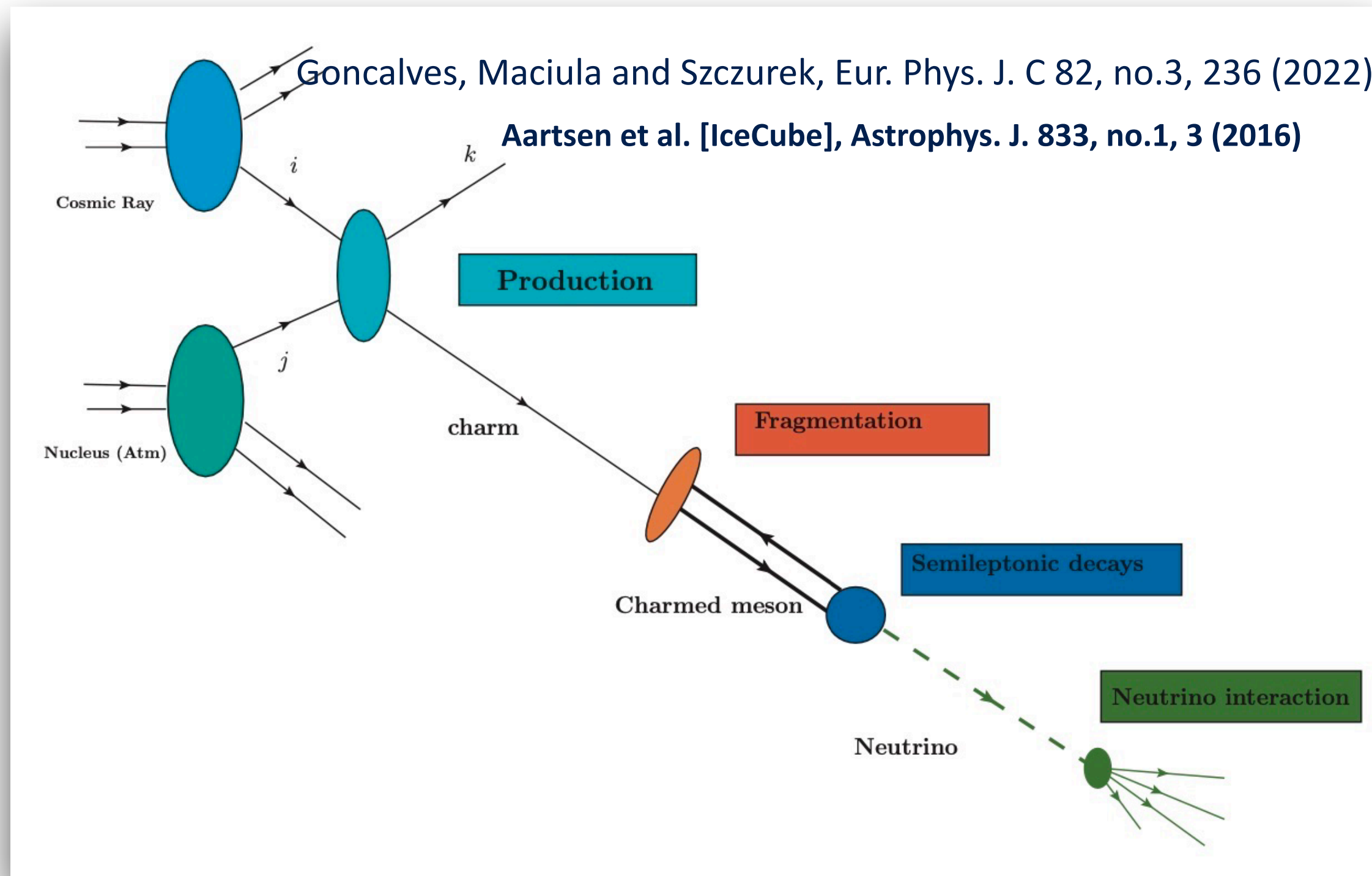


Large-xのパートンが源となり、small-xのグルーオン場が生成され、その密度が十分高くなると飽和領域 (Color Glass Condensate) が形成される。その境界を決める飽和スケール  $Q_s$  が創発する。

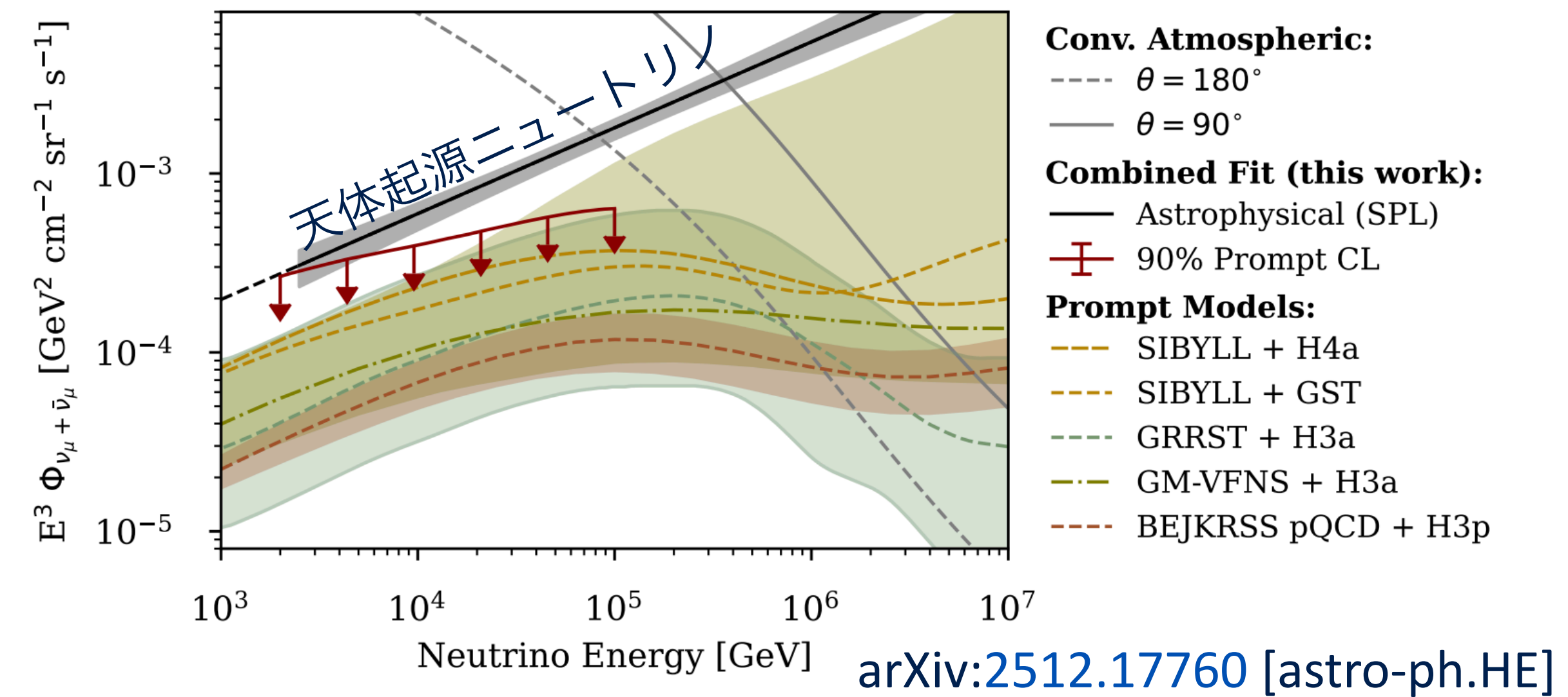


衝突エネルギー

# 宇宙線ニュートリノ観測の背景事象の理解にも



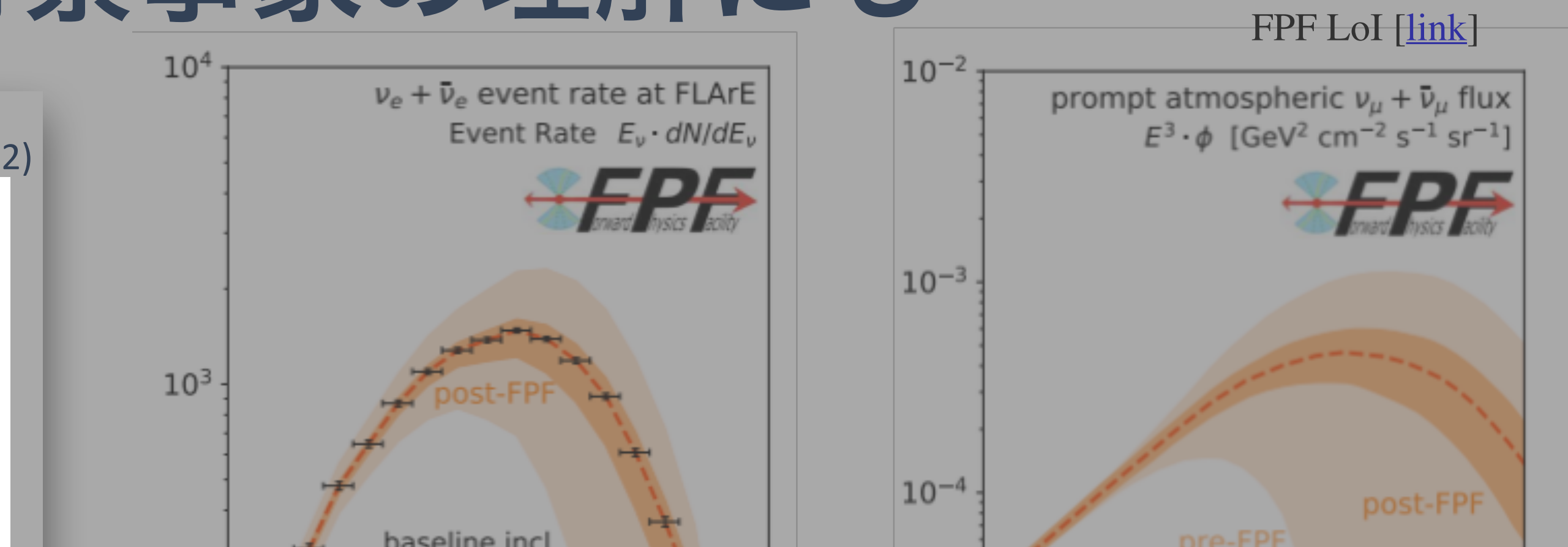
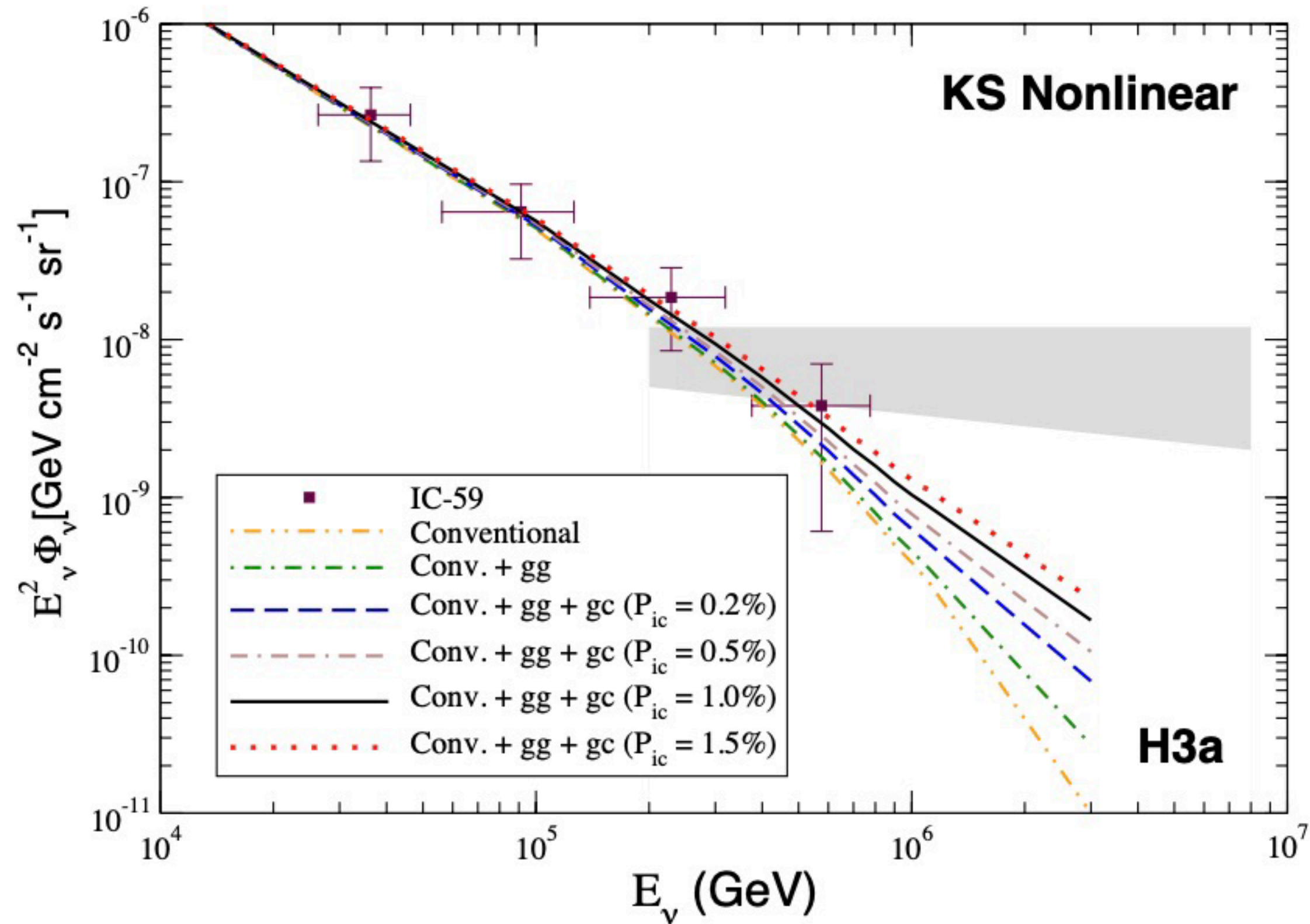
- プロンプトニュートリノと呼ばれるチャーム崩壊起源のニュートリノは高エネルギーのため地表に到達するためIceCubeなどの将来ニュートリノ天文学の系統誤差になりうる
- モデルごとの差が1桁以上



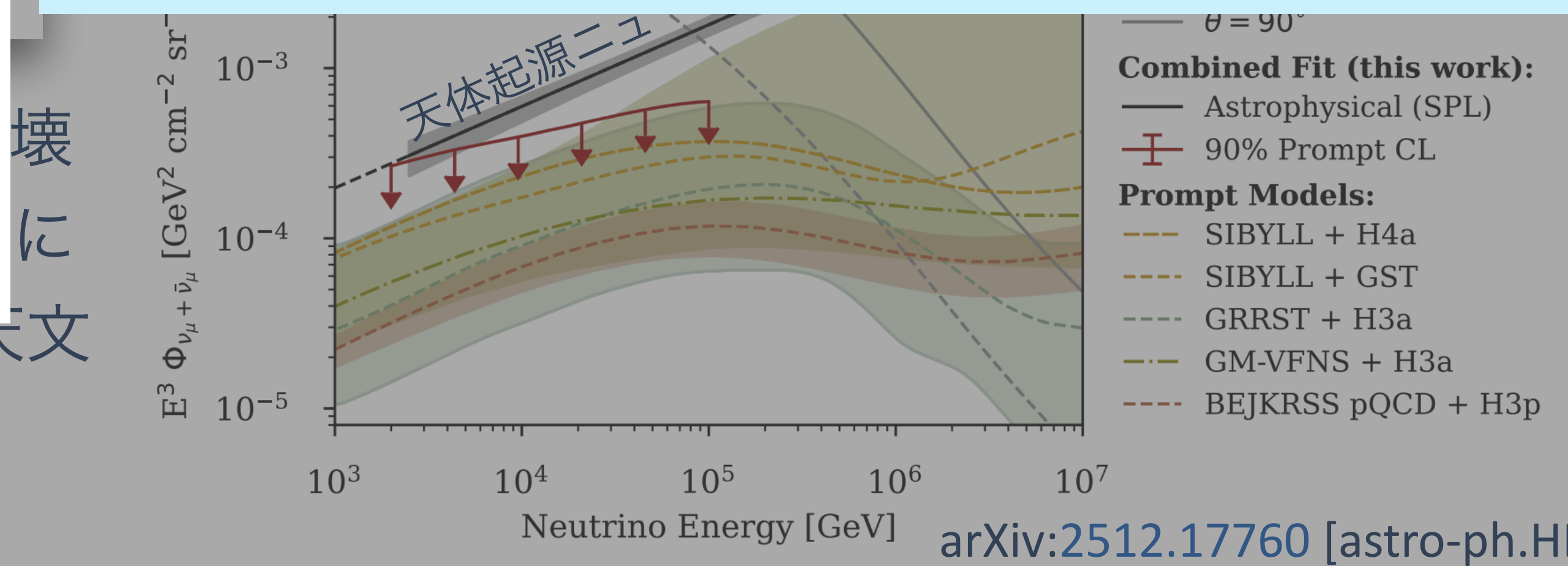
# 宇宙線ニュートリノ観測の背景事象の理解にも

Goncalves, Maciula and Szczurek, Eur. Phys. J. C 82, no.3, 236 (2022)

Aartsen et al. [IceCube], Astrophys. J. 833, no.1, 3 (2016)



将来的には宇宙線・ニュートリノスペクトラム  
を使って、加速器がアクセスできないほどの高  
エネルギーQCD物理に迫れると面白い



到達するためIceCubeなどの将来ニュートリノ天文

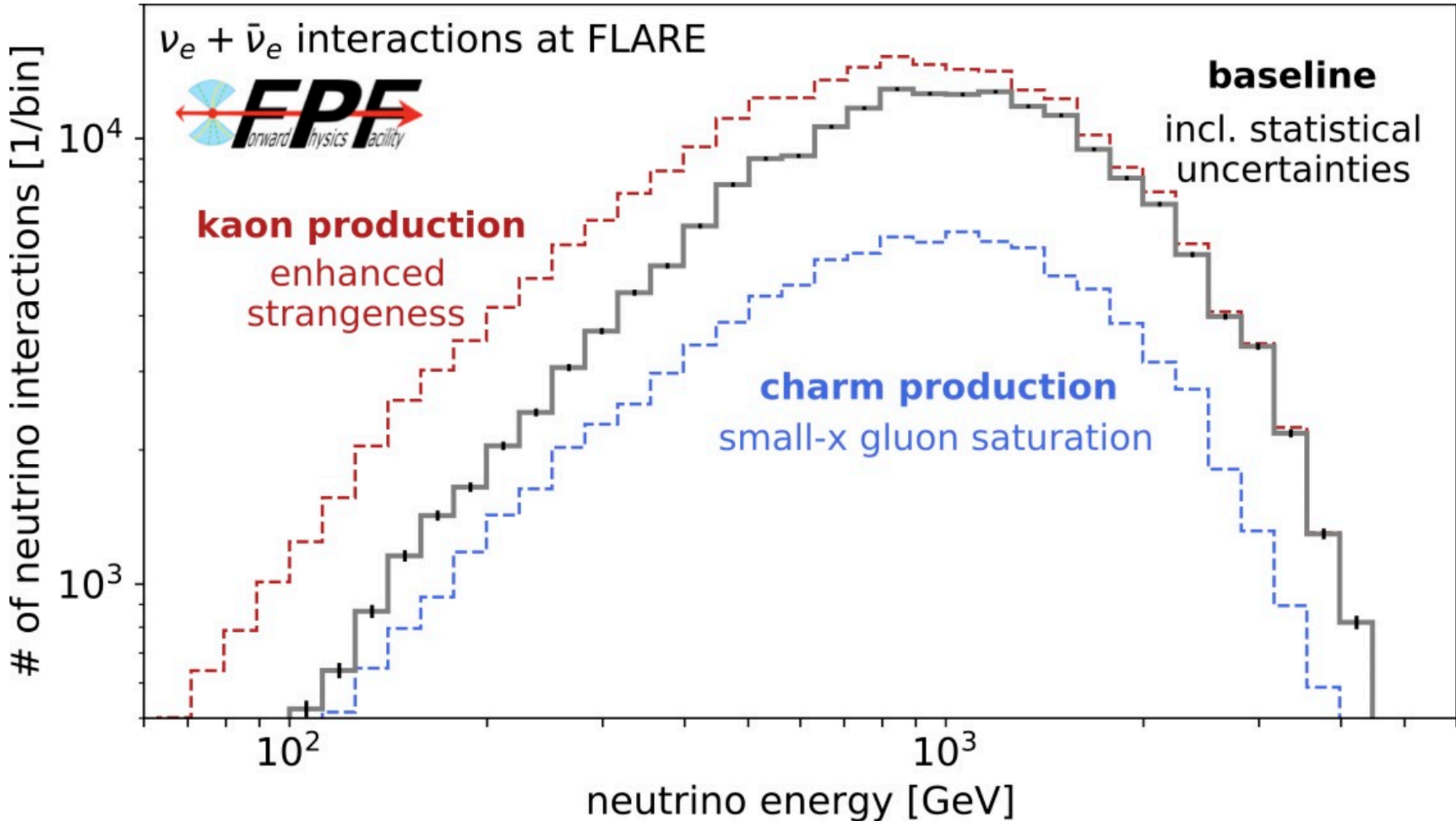
学の系統誤差になりうる

- モデルごとの差が1桁以上

# エネルギーに加えて、空間情報も

グルーオン飽和効果によるニュートリノのエネルギーフラックスが減衰する効果を観測したい

→空間分布でよりcharm成分が優位な場所まで広げて取ることでより感度を向上させる



# 検出器の最適化、インストール、データ取得

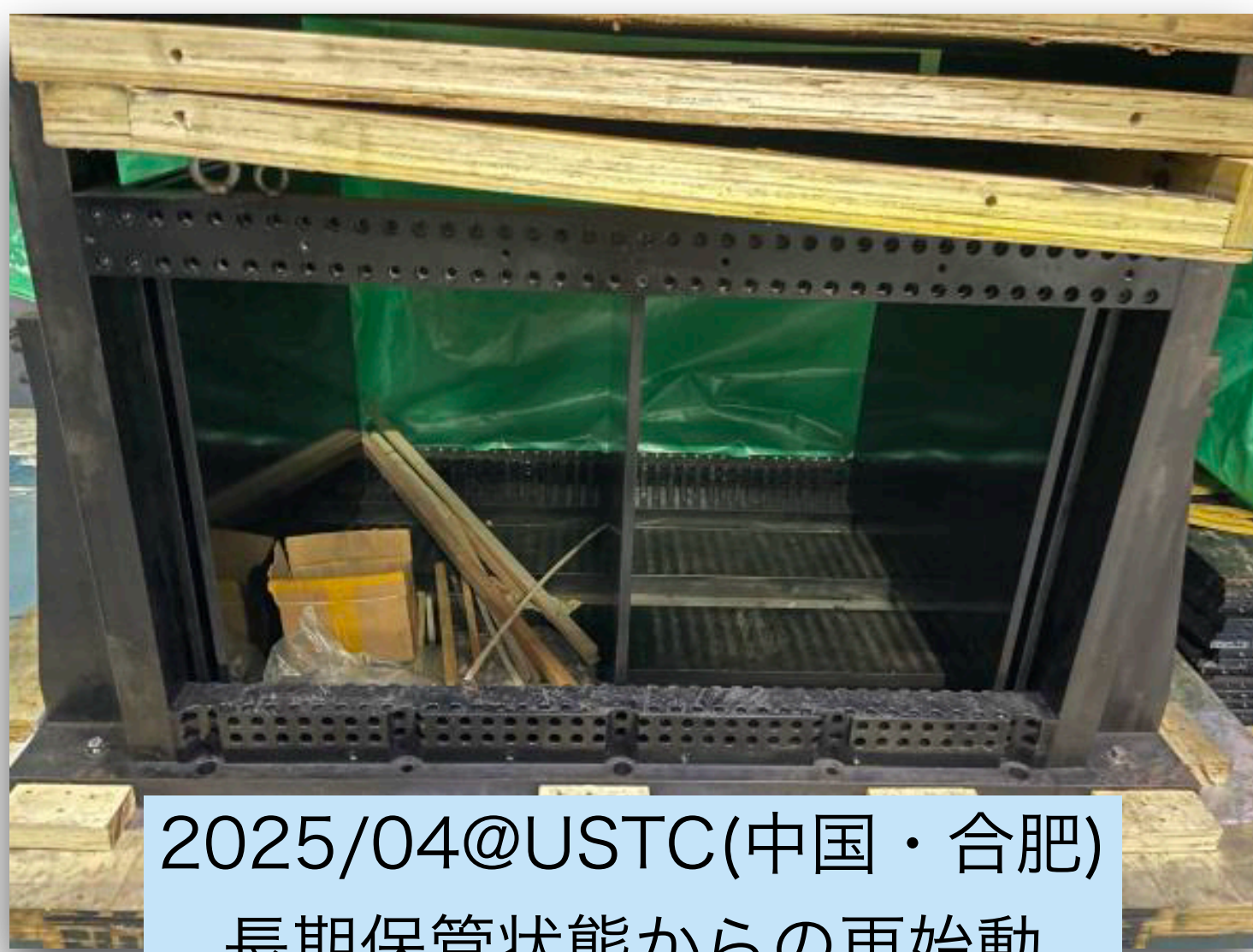
- LHCの稼働期間は今年6月まで(その後2030年までアップグレードのために運転休止する)
- 今年検出器を間に合わせるために中国の次世代大型加速器計画のために数年前に作られたプロトタイプを転用
- 中国でコミッショニング、CERNに輸送、地上実験室でコミッショニング、LHCにインストールし、データ取得へ
  - この間8ヶ月 (超タイトスケジュール)



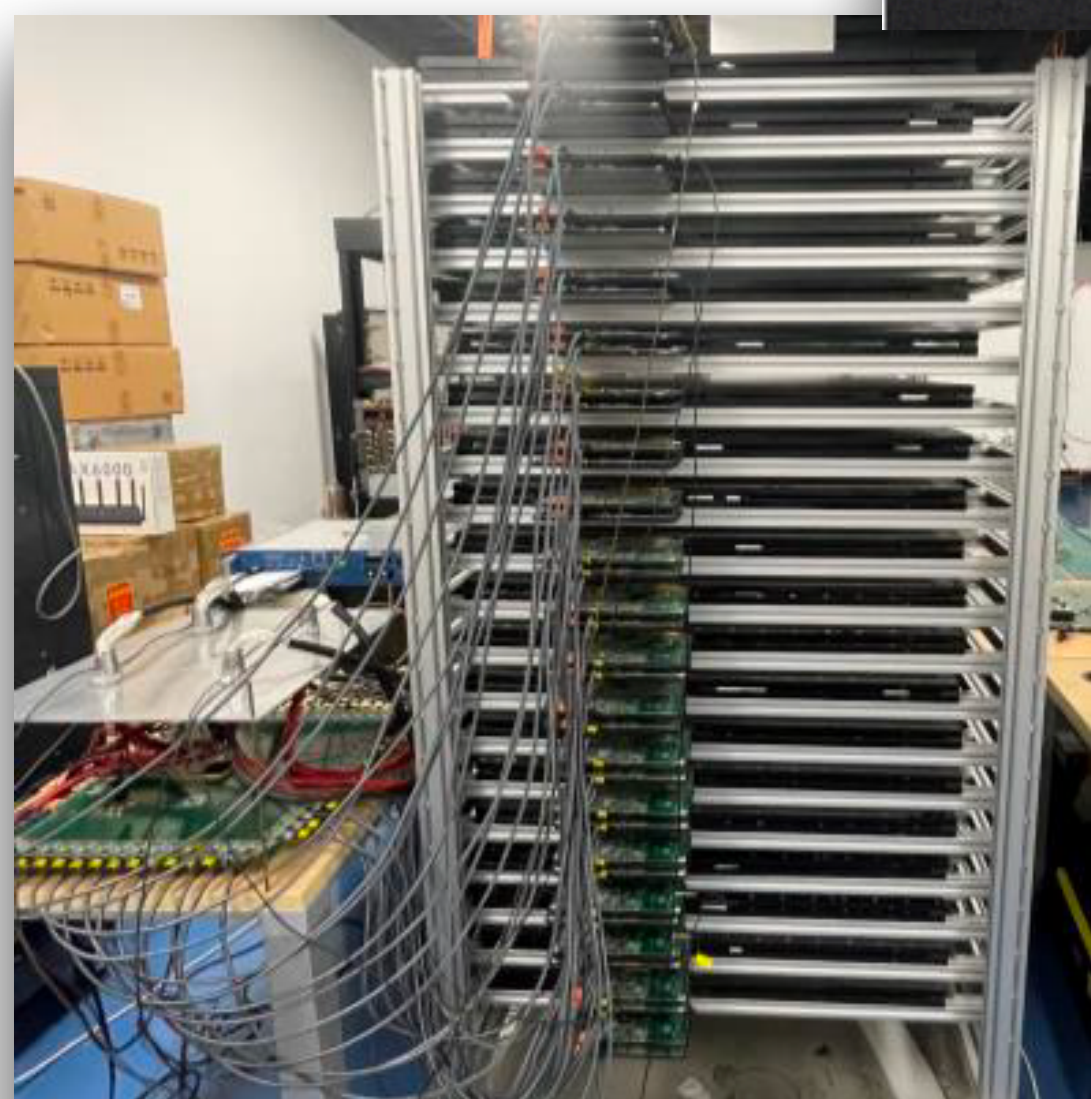
2025/11@CERN  
地上での統合試験



2026/01@CERN  
LHCトンネルでの組み立て



2025/04@USTC(中国・合肥)  
長期保管状態からの再始動



2025/08@USTC(中国・合肥)  
宇宙線データの取得



2026/01@CERN  
LHCトンネルへのインストール完了

# 検出器の最終

LHCビーム開始の2月下旬よりデータ取得中

- LHCの稼働期間は今年6月まで(その後2030年までアップグレード)

レート

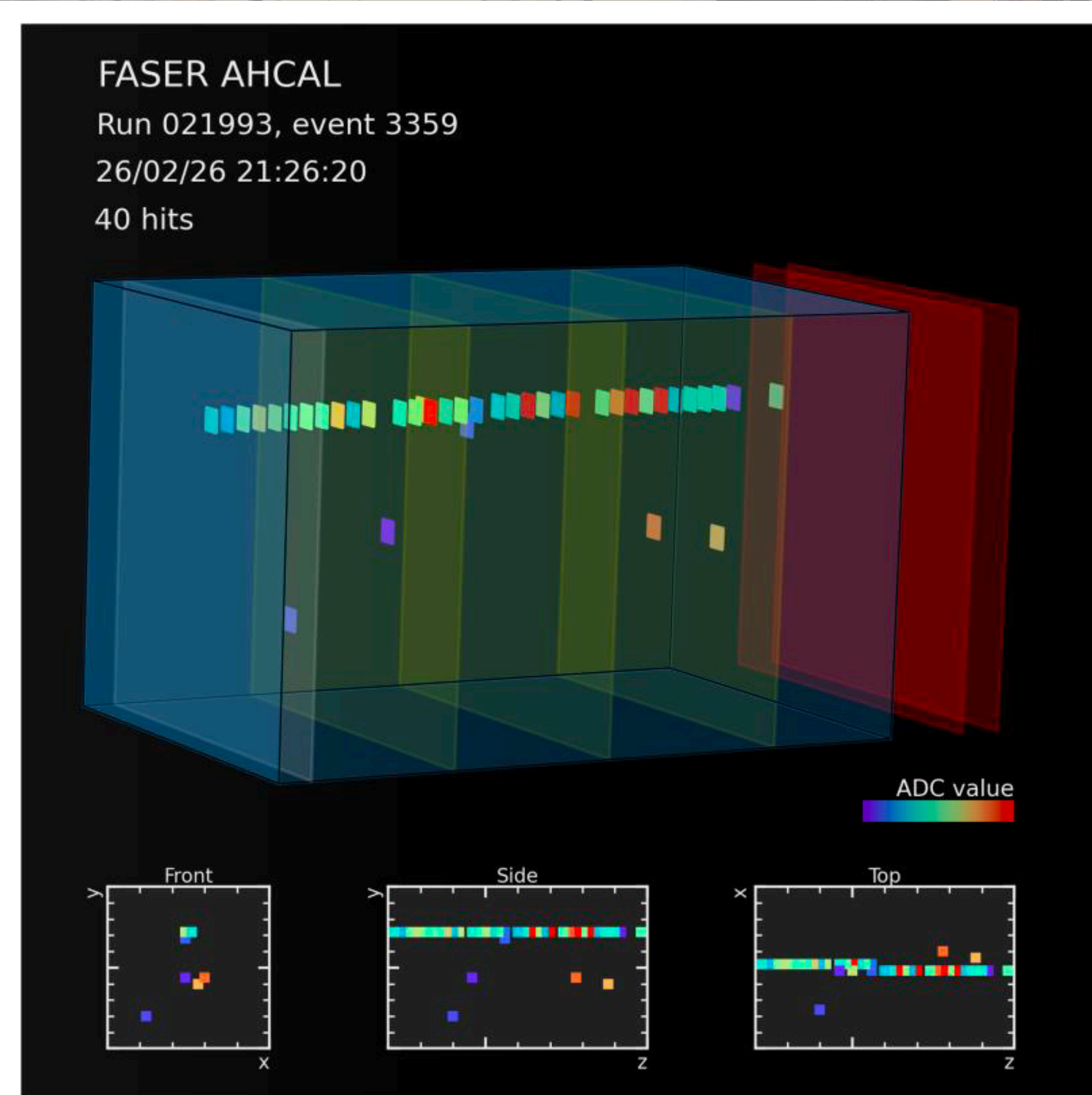
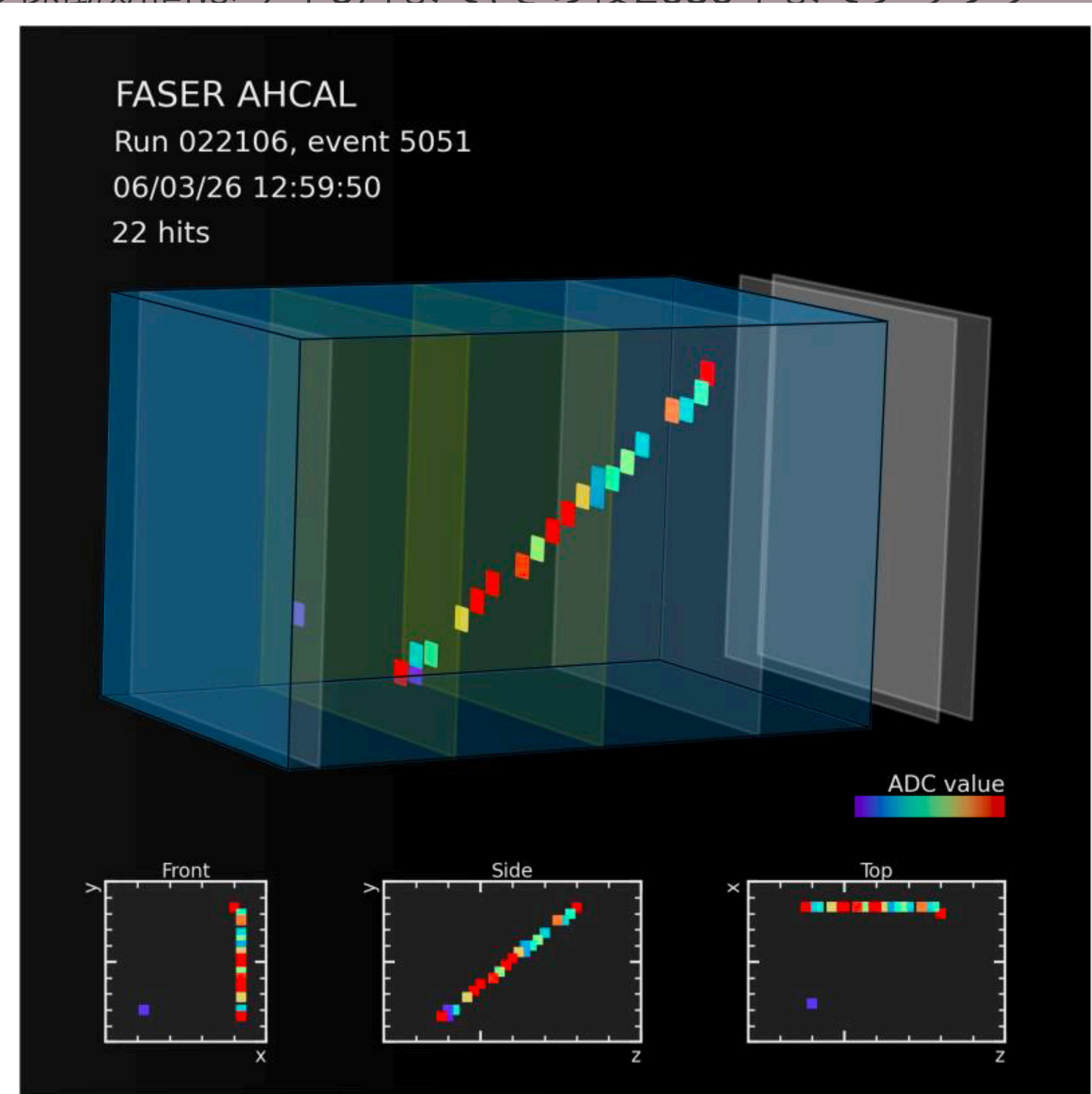
- 今年検

画のた

- 中国で

ミッシ

- この



202

長期休官伏態からの再始動

2025/08@CERN(中国・合肥)

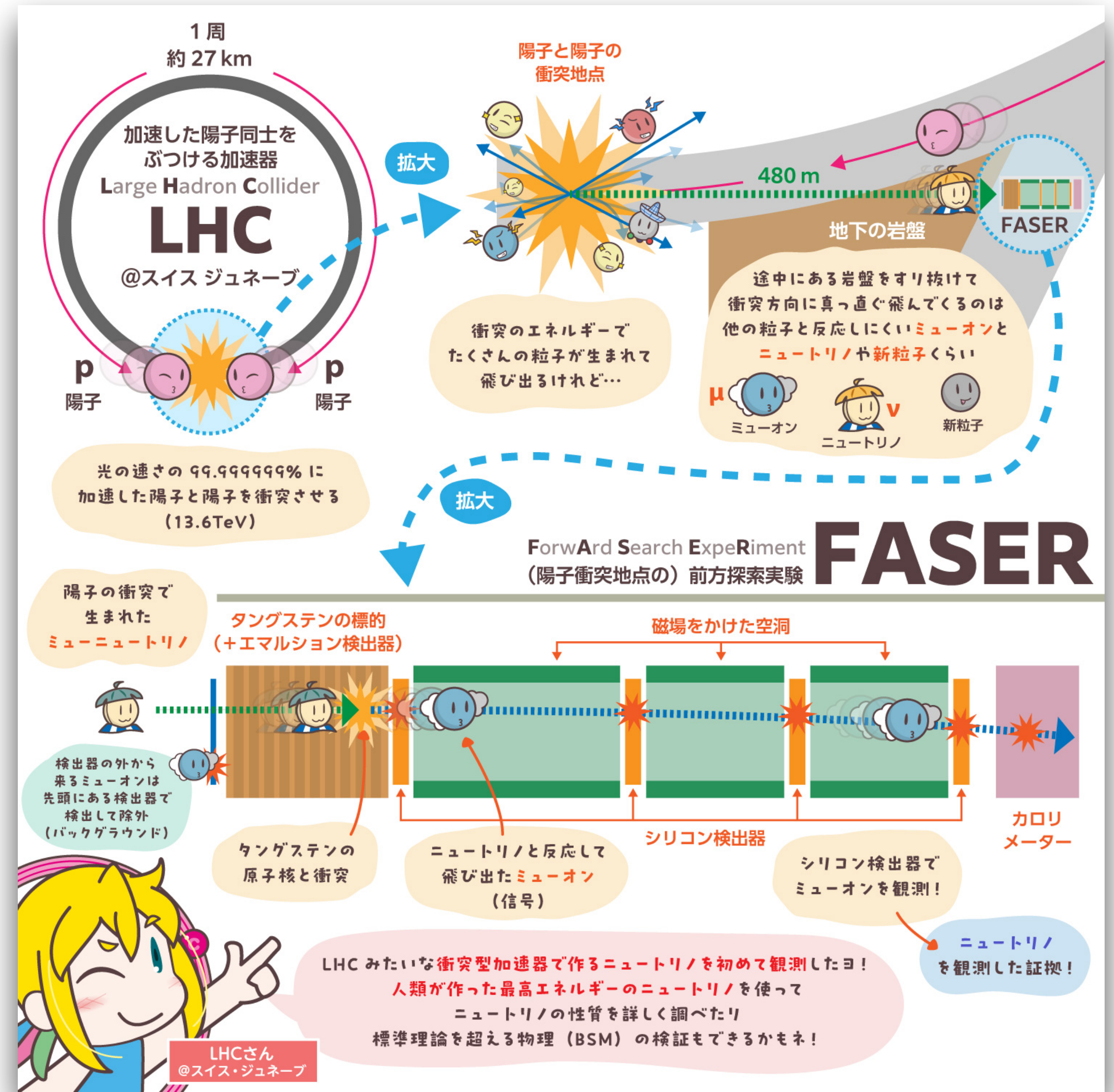
宇宙線データの取得

2026/01@CERN

LHCトンネルへのインストール完了

# まとめ

- 宇宙線測定の方法決定精度を上げるためには宇宙線の化学組成を知る必要がある
- 模型予想がデータと合わない→加速器を使ってデータを測定、模型をチューンする必要がある
- 加速器超前方での観測は宇宙線起源空気シャワーと似ている
- 色々な幸運が重なり、衝突加速器起源ニュートリノの観測が実現した
  - 陽子内部構造研究にニュートリノが使えるように
  - 未発見の物性状態であるグルーオン飽和が創発する運動学領域に感度あり
- FASER実験に新しい検出器を追加して観測を狙っている
- 原子核研究と素粒子研究を合わせて、宇宙線研究へ



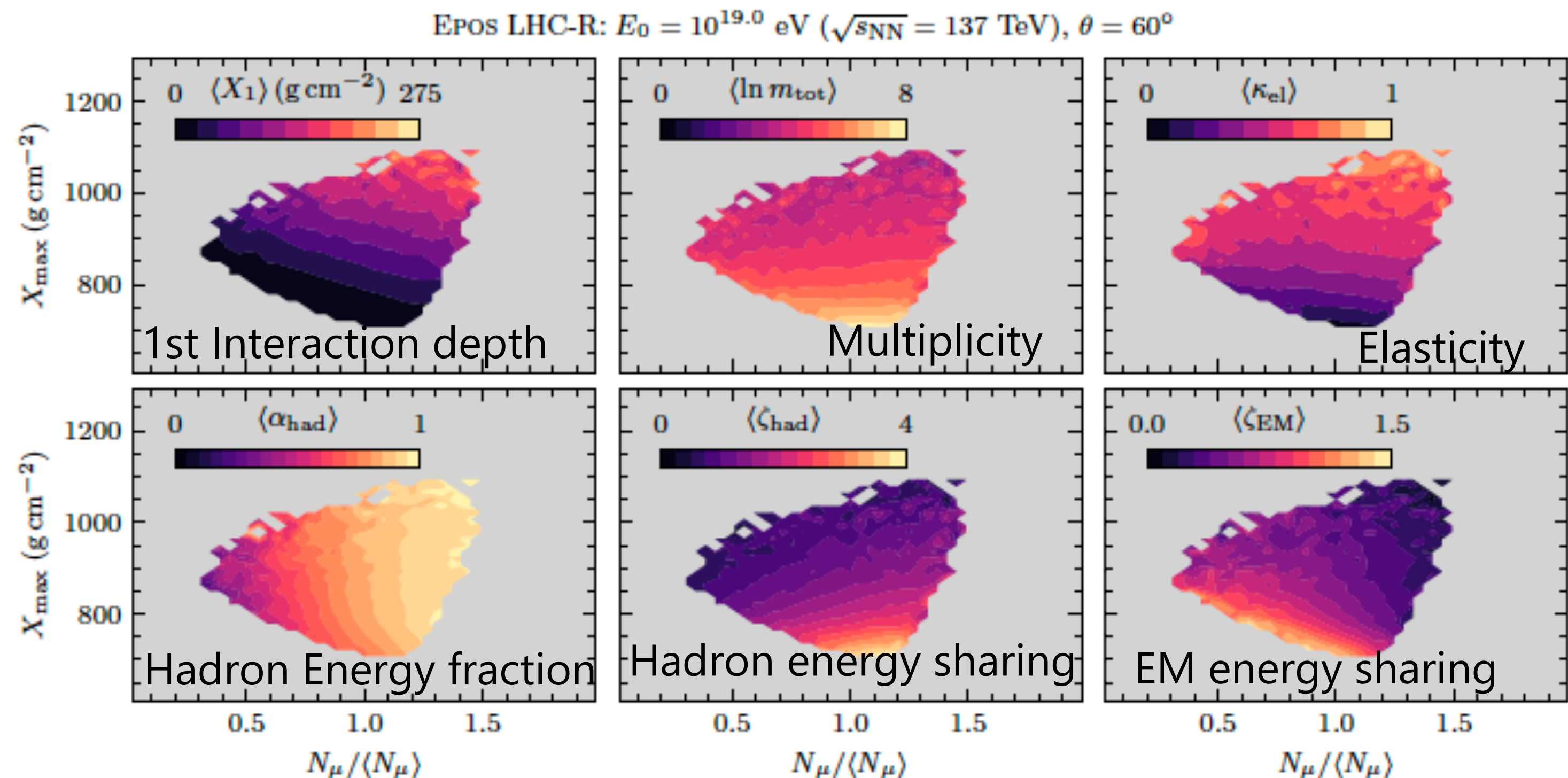
# Cosmic-ray to Hadron Physics?

arXiv:2602.22105 [\[link\]](#)

Air shower observables ( $X_{\max}$ ,  $N_{\mu}$ )  
→ first interaction hadron physics

Enable to approach the forward  
hadron production beyond the LHC  
(100 PeV)

Different regions of the ( $X_{\max}$ ,  $N_{\mu}$ )  
plane correspond to  
different properties of the first  
proton–air interaction  
→ sensitive to forward particle  
production



This work does not directly compare with LHC data,, but provides a framework to interpret cosmic-ray air showers in terms of particle production in the first interaction, complementary to accelerator measurements.