

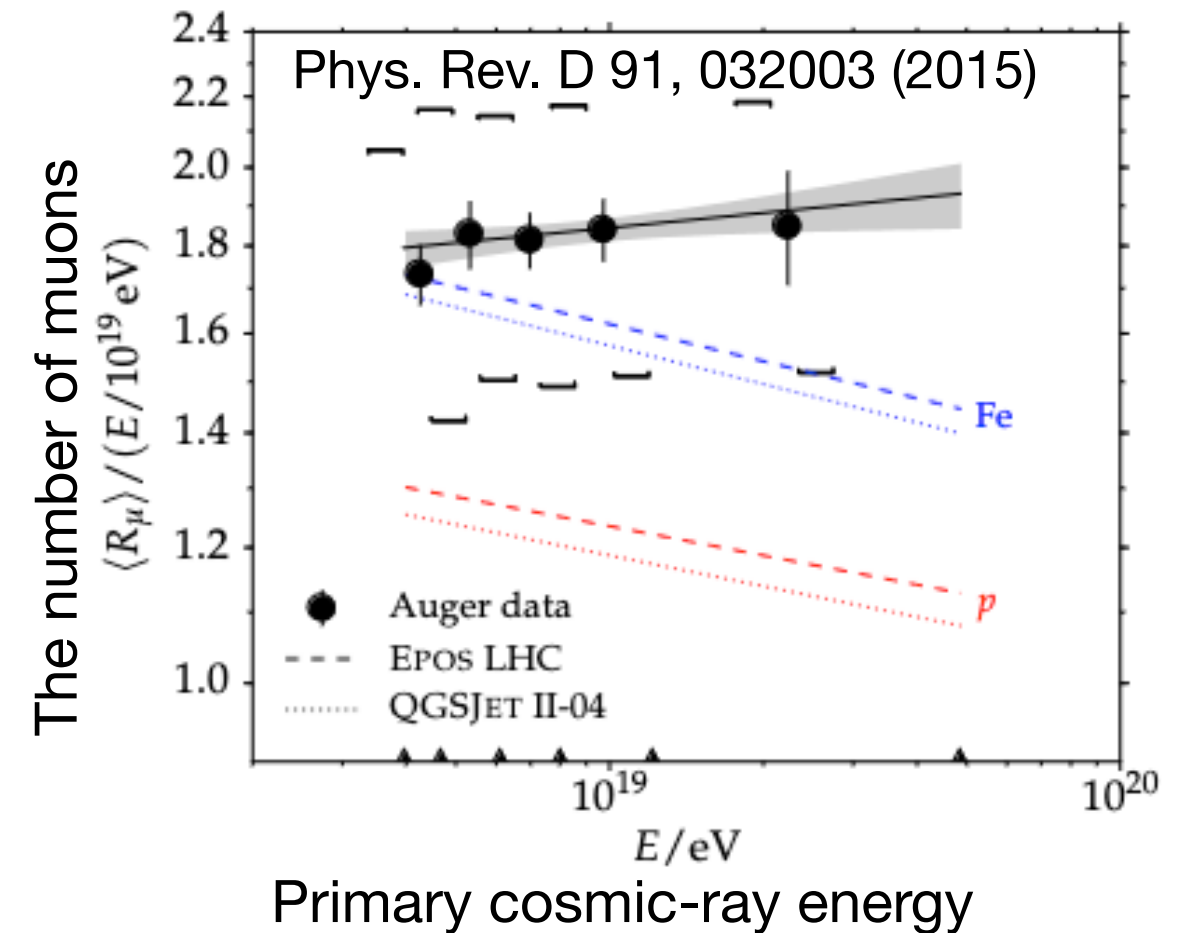
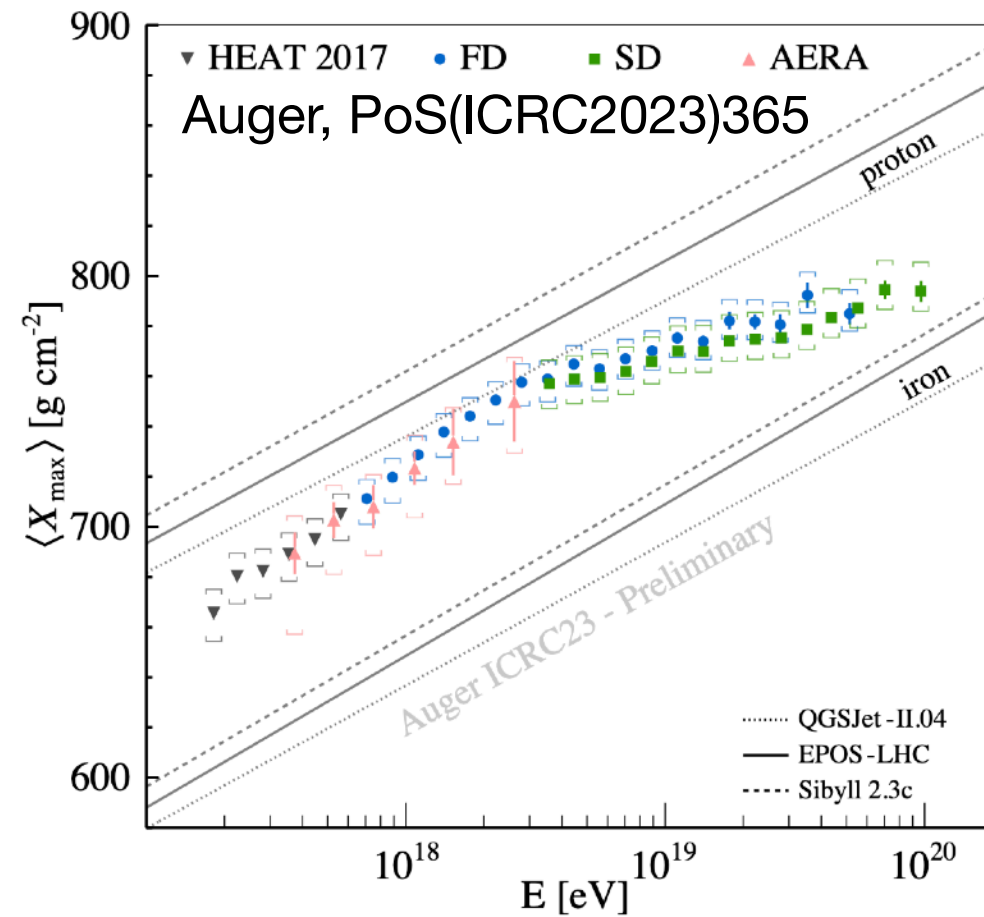
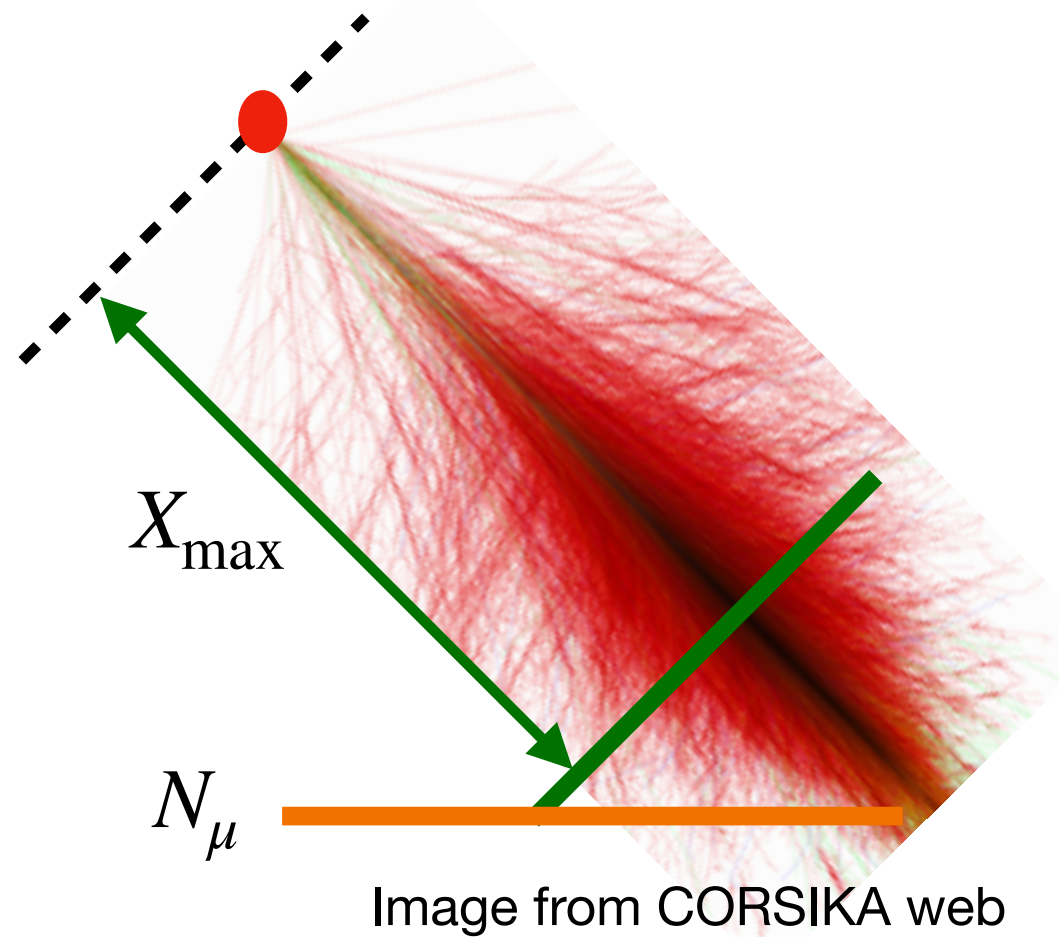
CERNにおける衝突型加速器

ニュートリノ実験についての将来計画

大橋健 (ベルン大)、稲田知大(九州大)、他FASER-Japan collaboration

宇宙線測定とハドロン相互作用

超高エネルギー宇宙線の核種の推定にはハドロン相互作用の予測が不可欠

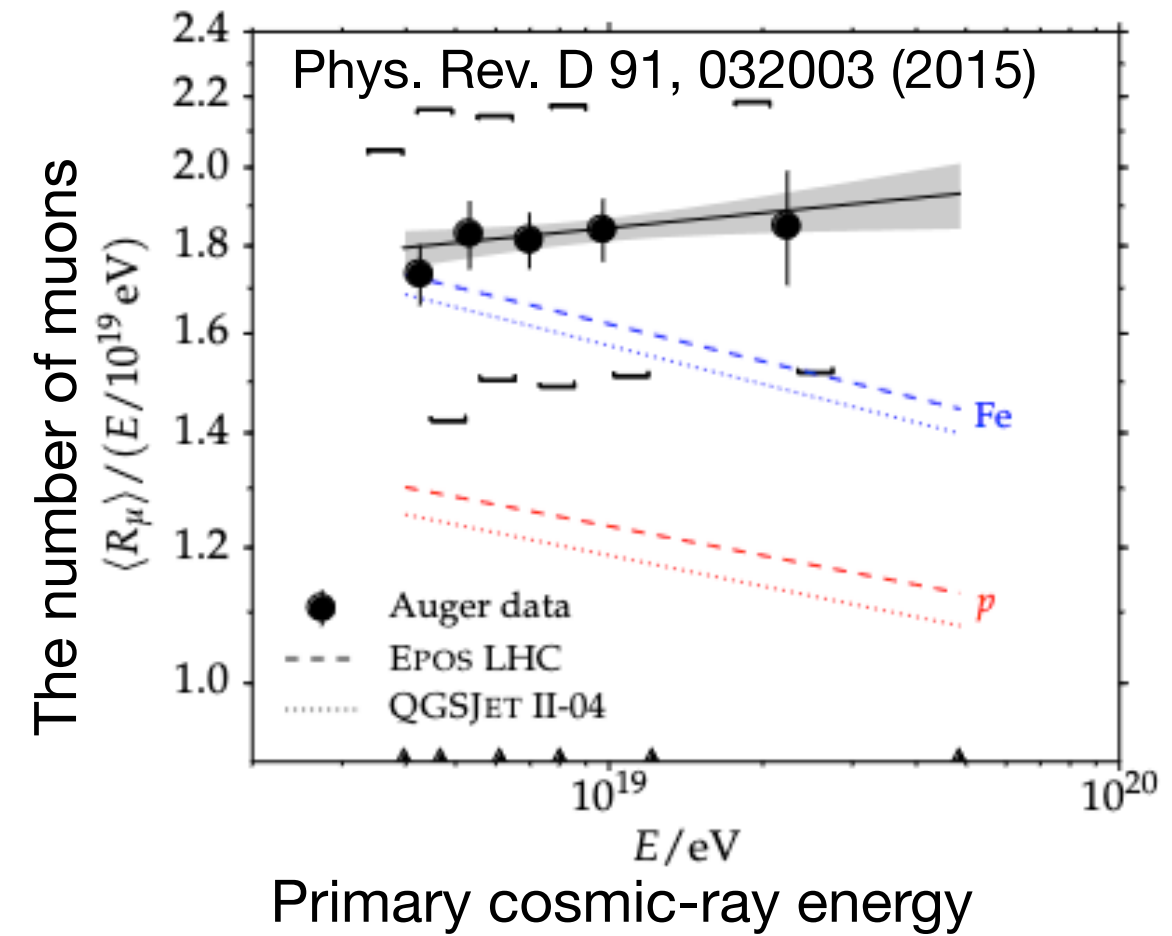
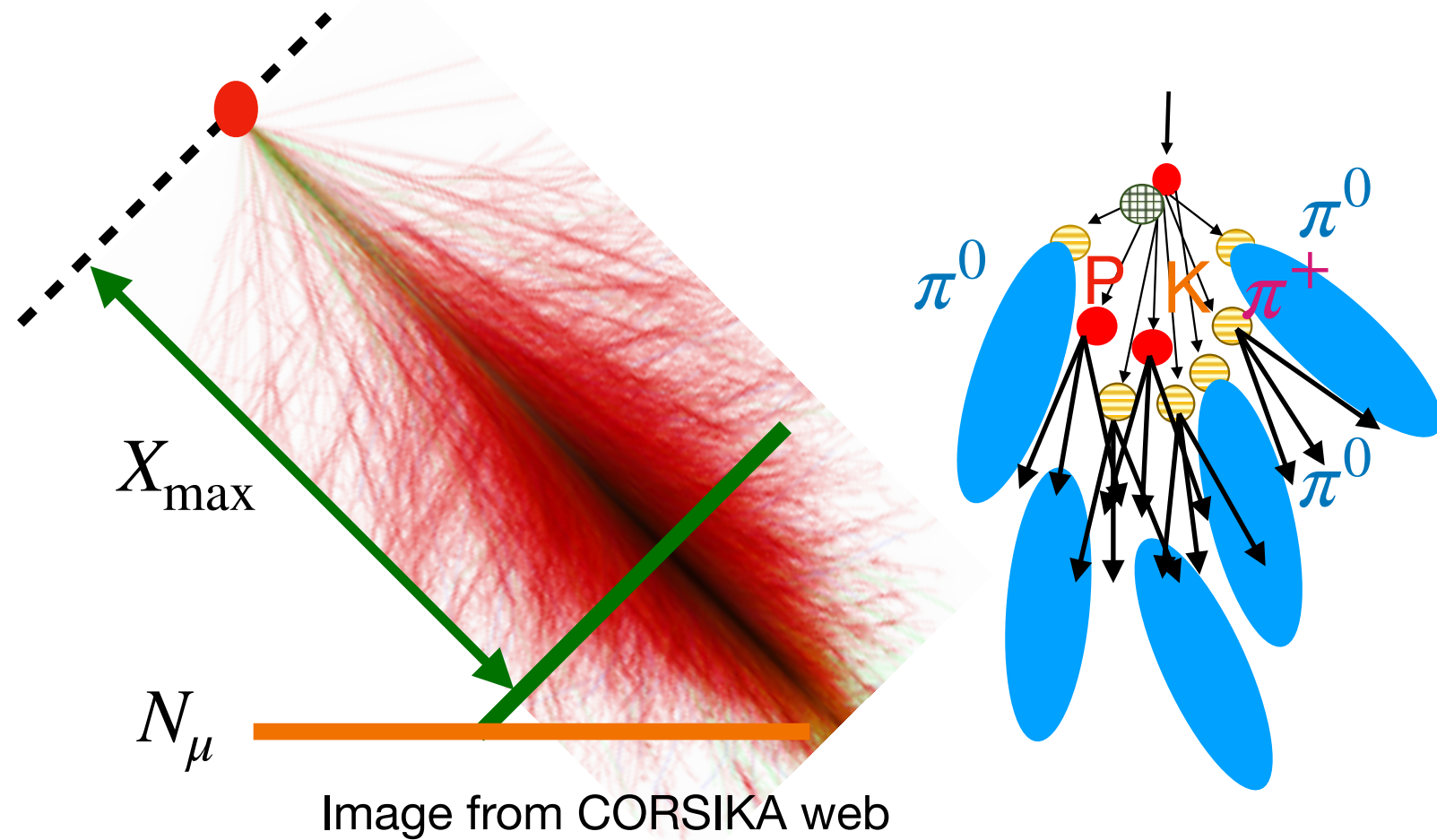


測定とシミュレーションの比較により核種を推定している。

空気シャワーでの粒子生成をシミュレーションが再現できていない。

宇宙線測定とハドロン相互作用

超高エネルギー宇宙線の核種の推定にはハドロン相互作用の予測が不可欠



高エネルギーハドロン生成の理解が、正確な宇宙線核種の理解に不可欠
特に π と K それぞれの割合が N_{μ} の予測向上に不可欠

宇宙線測定とハドロン相互作用

高エネルギー大気ニュートリノの予測

大気ニュートリノ $(\bar{\nu})_{\mu}$ の親粒子 Phys. Rev. D **100**, 103018

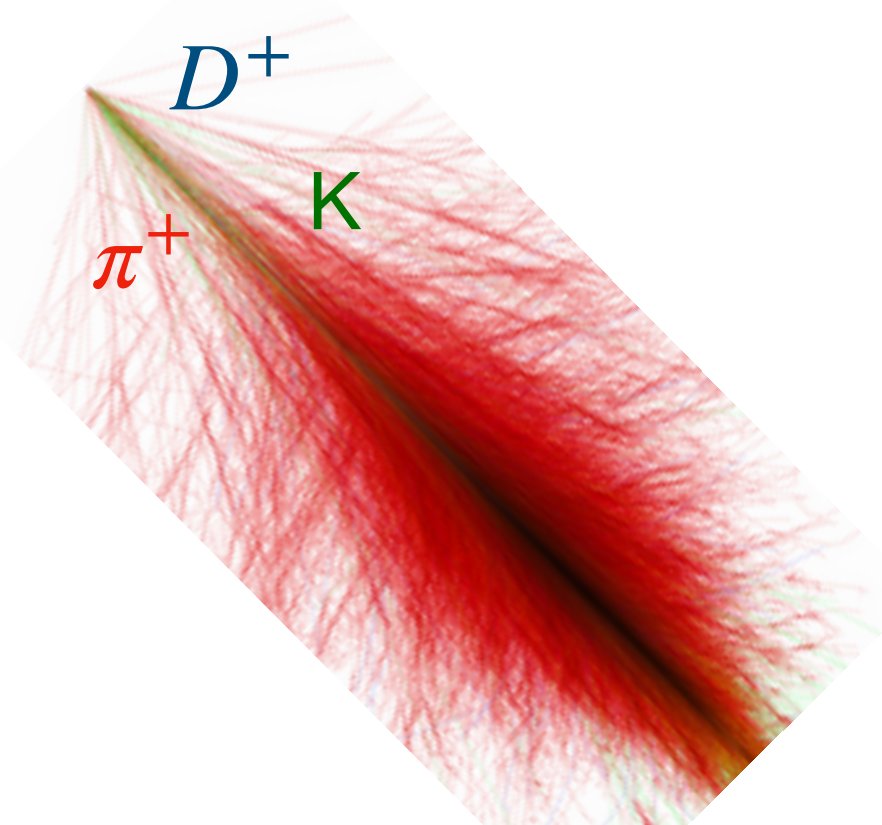
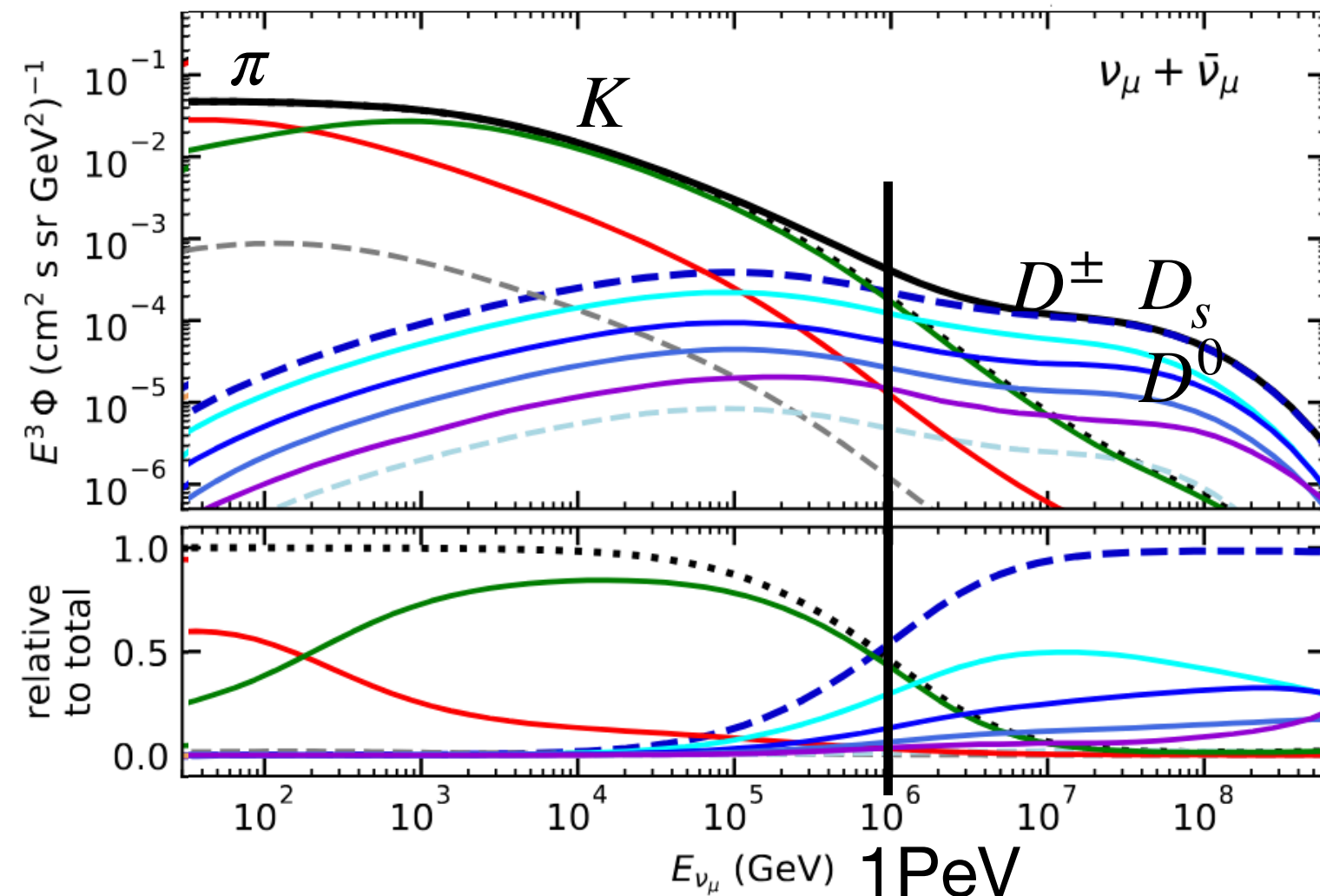


Image from CORSIKA web

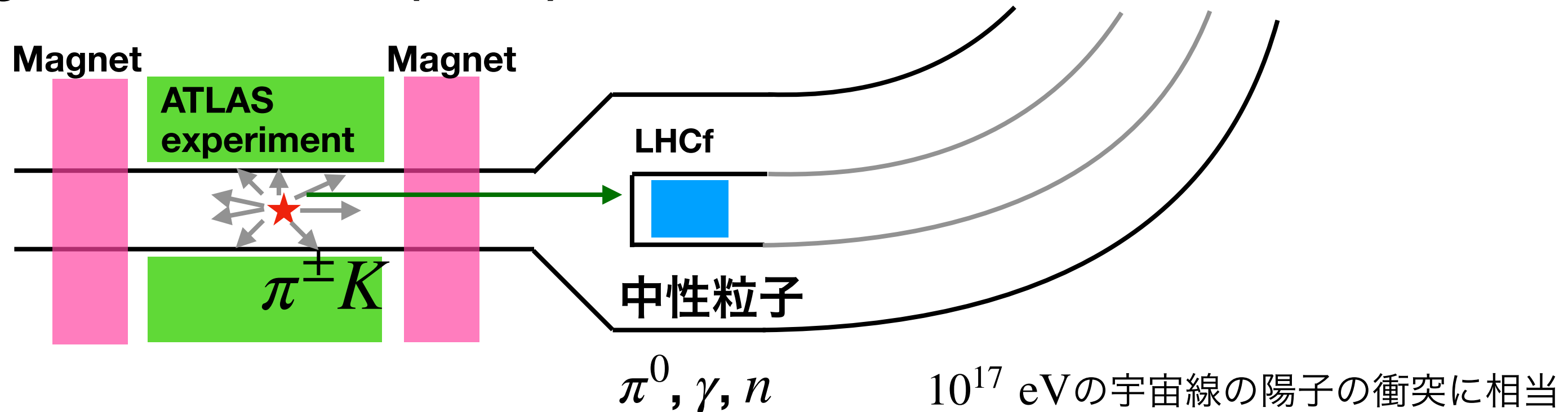


1PeV以上の高エネルギーニュートリノは D mesonなどcharm由来

ハドロン相互作用による粒子生成は、高エネルギー宇宙線を測定する上で基礎的情報

衝突型加速器による実験

Large Hadron Collider (CERN) によるハドロン相互作用測定



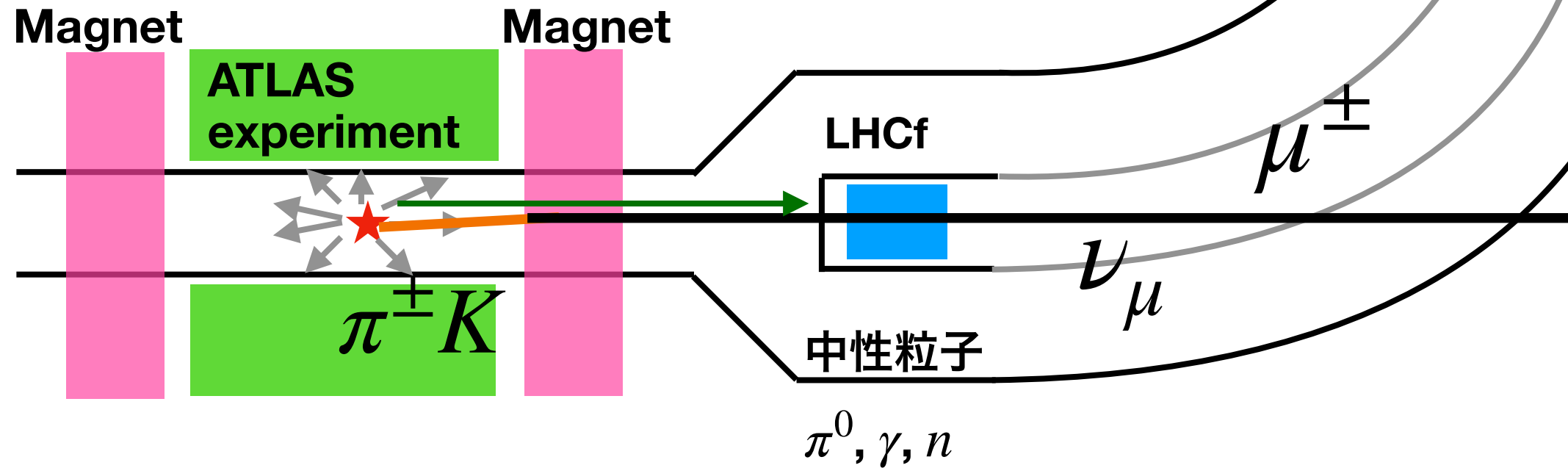
前方ハドロン生成の研究

LHCf実験が π^0 や中性子を測定し、宇宙線空気シャワーに重要なハドロン相互作用を検証

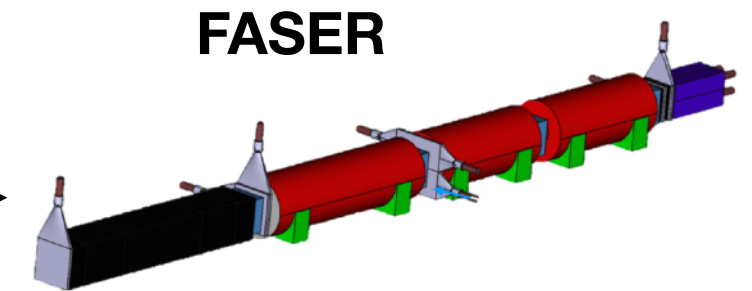
高エネルギーの π^\pm や K, D メソンなどの測定は磁石などの加速器の構造上困難

衝突型加速器によるニュートリノ実験

ニュートリノを使ったハドロン相互作用測定

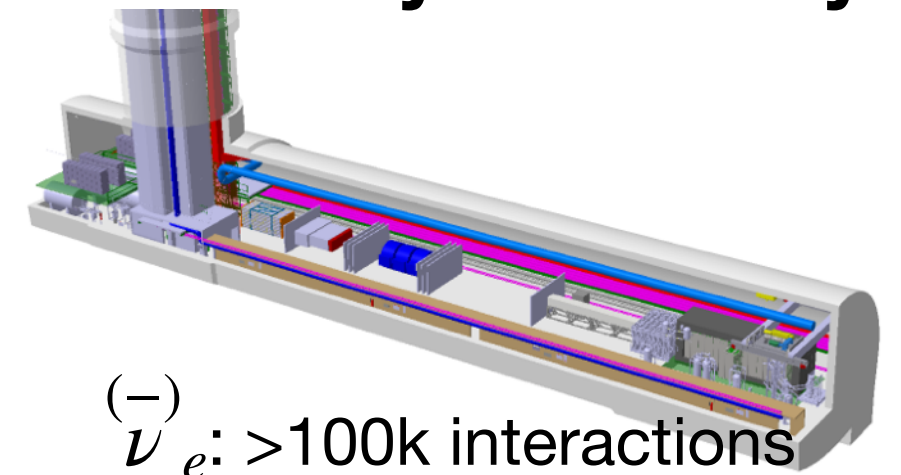


TeV neutrinoを測定



$O(10^3)$ neutrino events

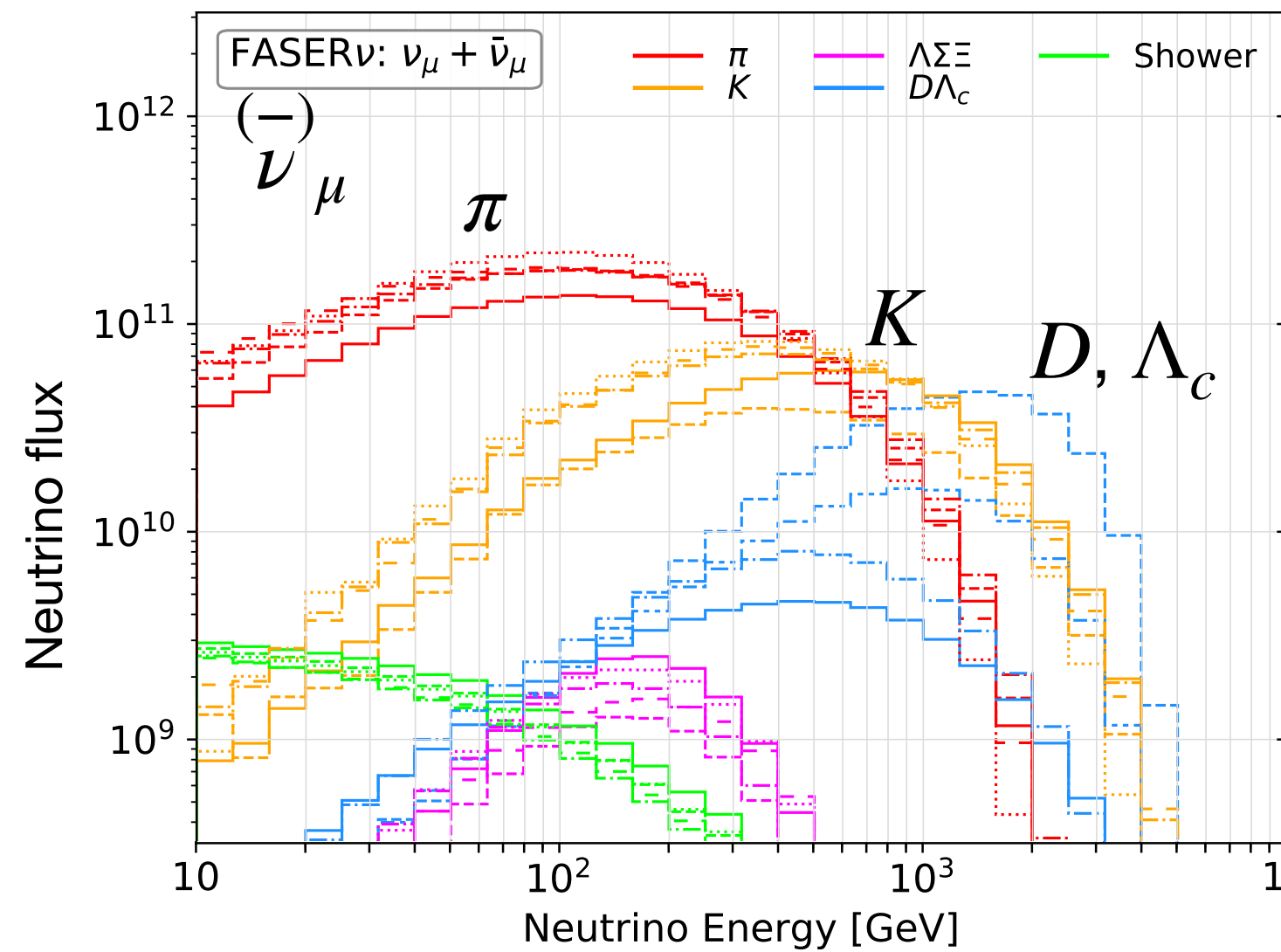
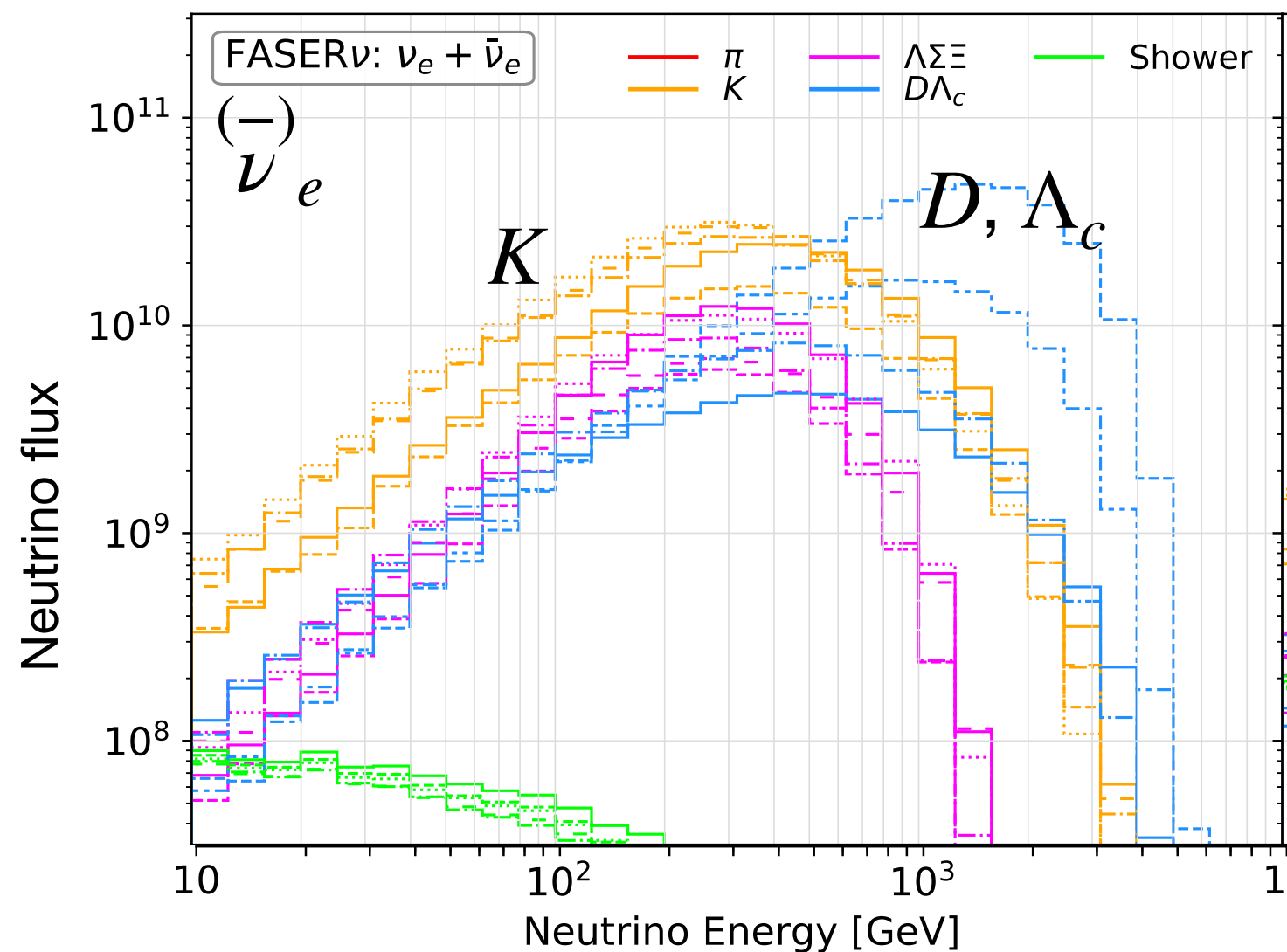
Forward Physics Facility



$\bar{\nu}_e$: >100k interactions

$\bar{\nu}_\mu$: > 900k interactions

衝突型加速器によるニュートリノ実験



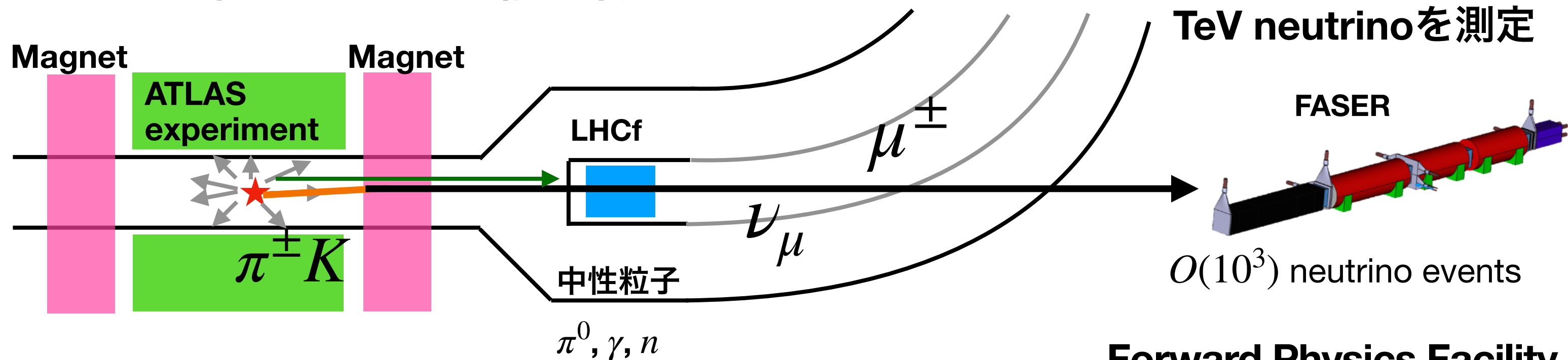
arXiv: 2105.08270

--- DPMJET 3.2017
 — SIBYLL 2.3d
 - - EPOS LHC

..... QGSJET II-04
 - - - Pythia8 (Hard)
 - · - Pythia8 (Soft)

衝突型加速器によるニュートリノ実験

ニュートリノを使ったハドロン相互作用測定

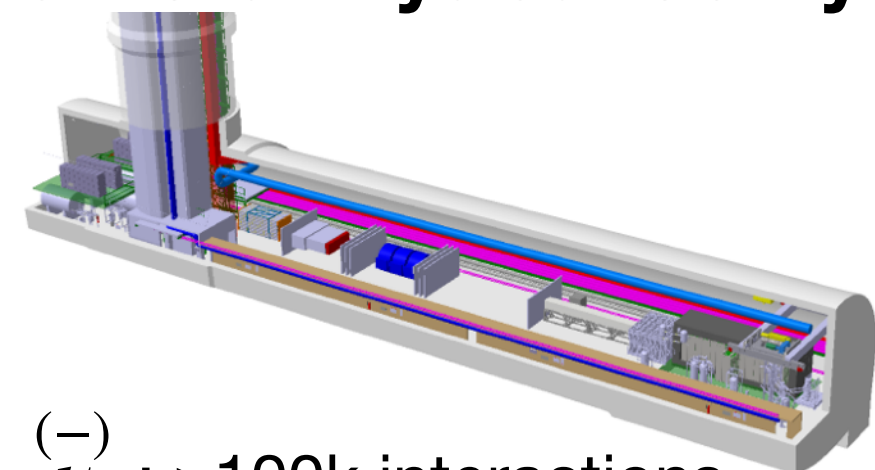


前方ハドロン生成の研究

これまで加速器の構造上難しかった高エネルギー π^\pm や K 、 D メソンの生成の研究が可能に!

π^0 や中性子を測定してきたLHCf実験と相補的

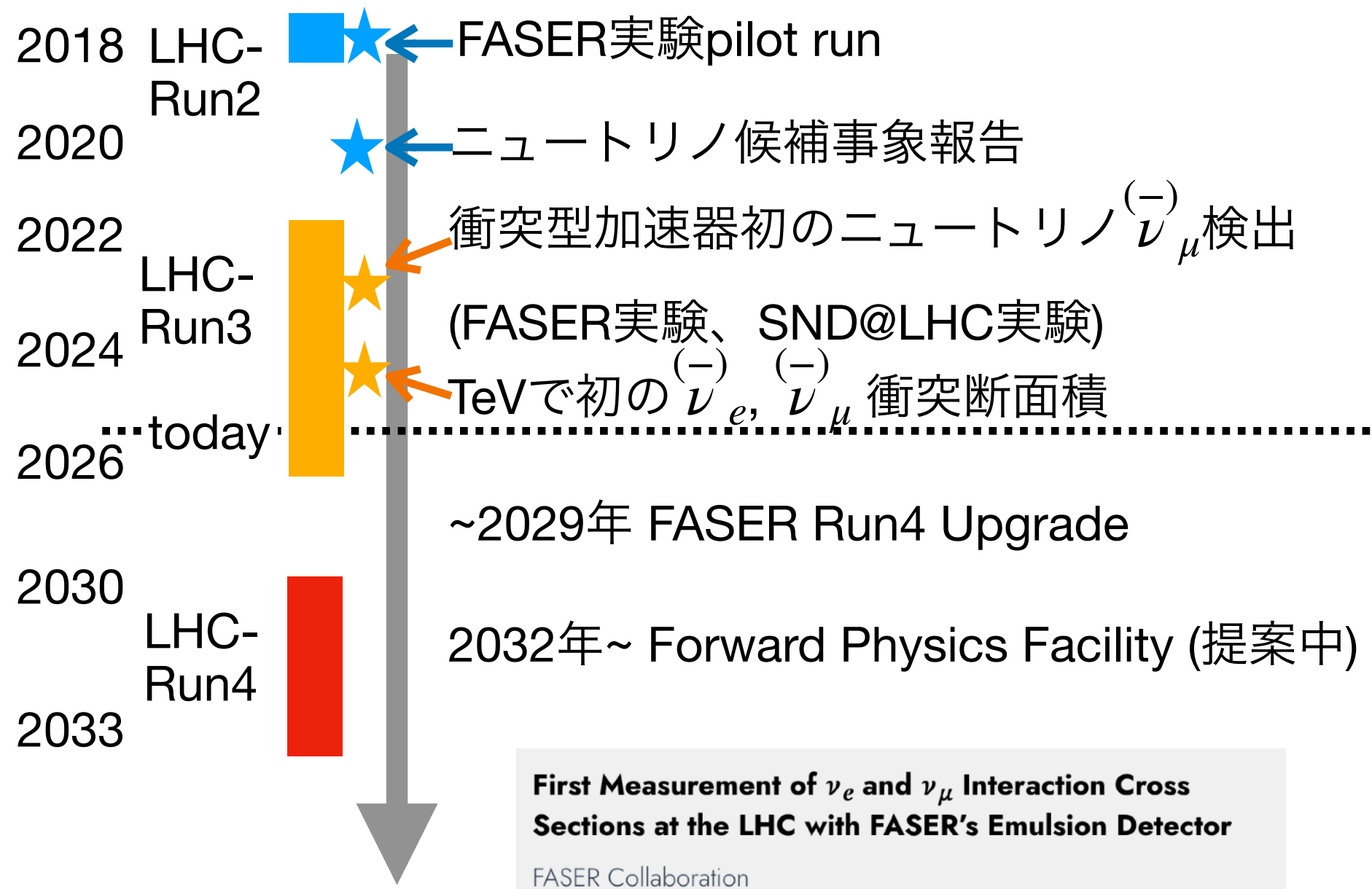
Forward Physics Facility



- (-) ν_e : >100k interactions
- (-) ν_μ : > 900k interactions

FASER実験

FORWARD SEARCH EXPERIMENT AT THE LHC



Physical Review Letters collection of the year 2024

Phys. Rev. Lett. 133, 021802 – Published 11 July, 2024

FASER collaboration

- 11カ国、112人
- 日本人 スタッフ11名 + 修士学生 5名
- FASER Executive Board member 11人中3名日本人
- CRC会員 3名: 六條(名古屋大)、稲田(九州大)、大橋(ベルン大)
- 九州大学
 - 有賀智子、音野瑛俊、稲田知大、河原宏晃
- 名古屋大学
 - 佐藤修、中野敏行、六條宏紀
- 千葉大学
 - 有賀昭貴、早川大樹
- 新居浜高専 / KEK
 - 田窪洋介

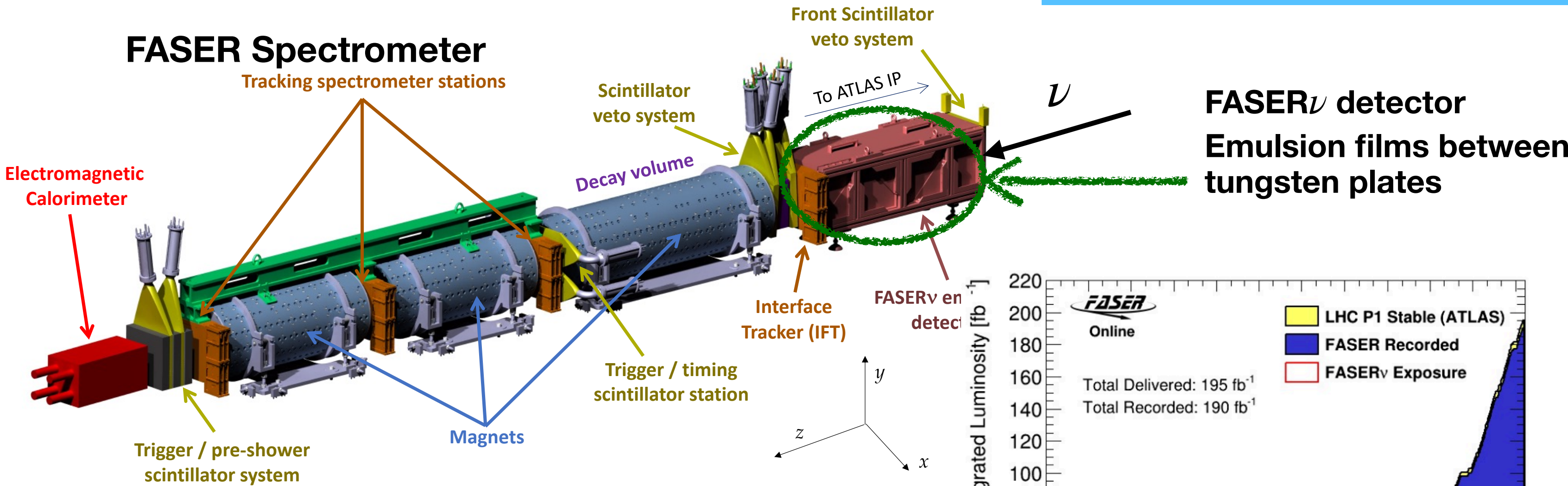
<https://faser-japan.org/>

FASER COLLABORATION

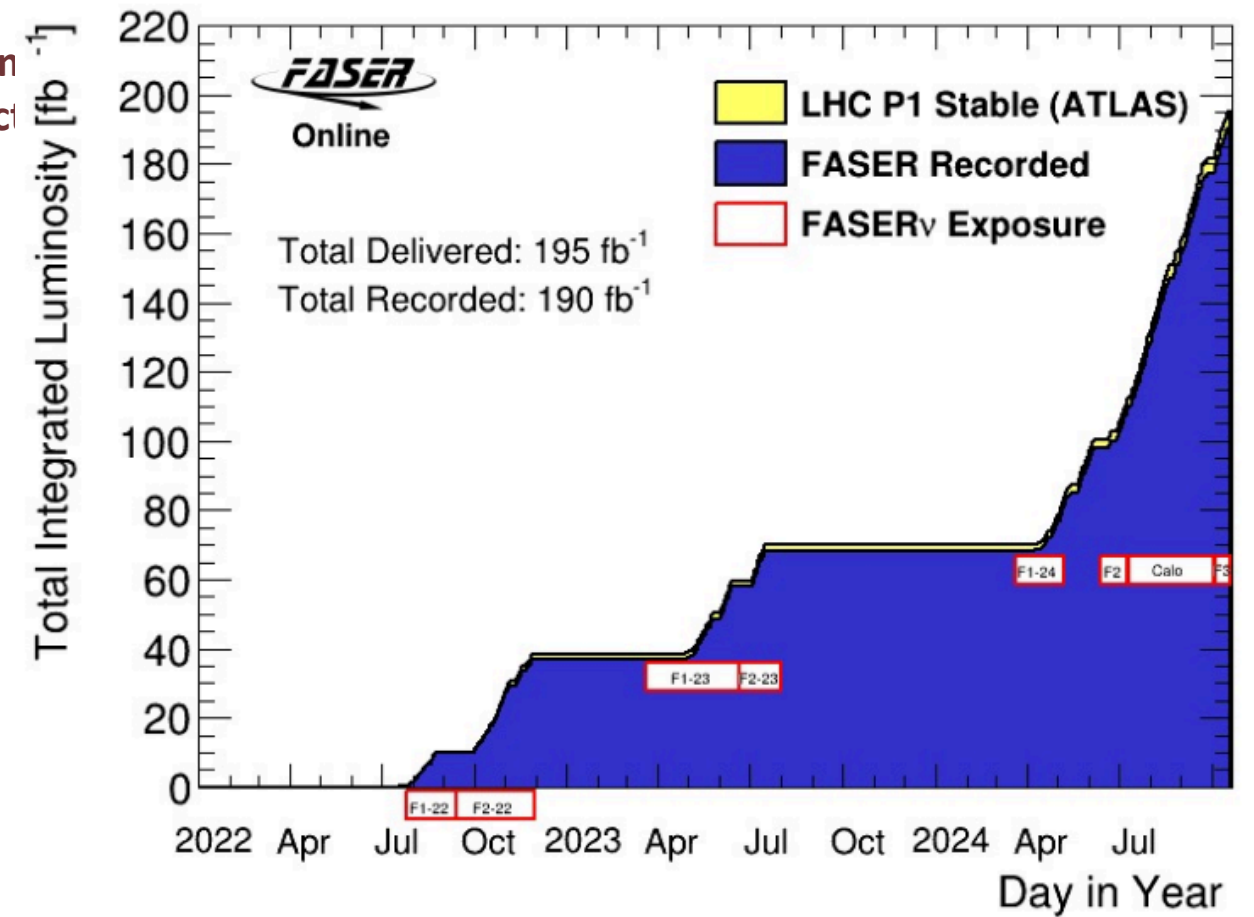
112 collaborators, 28 institutions, 11 countries



FASER実験によるニュートリノ測定

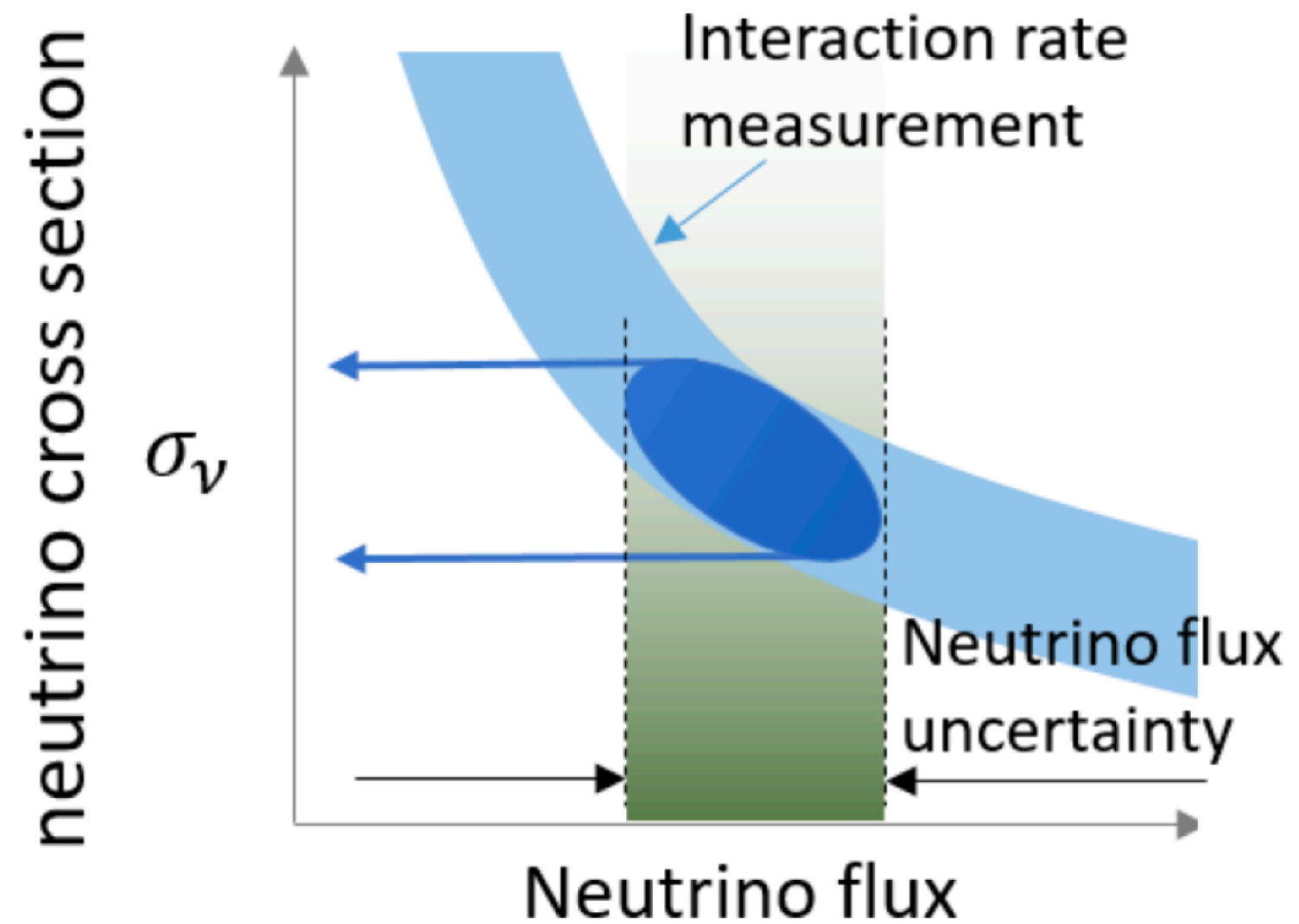


原子核乾板を用いたターゲットを交換しながらデータ取得



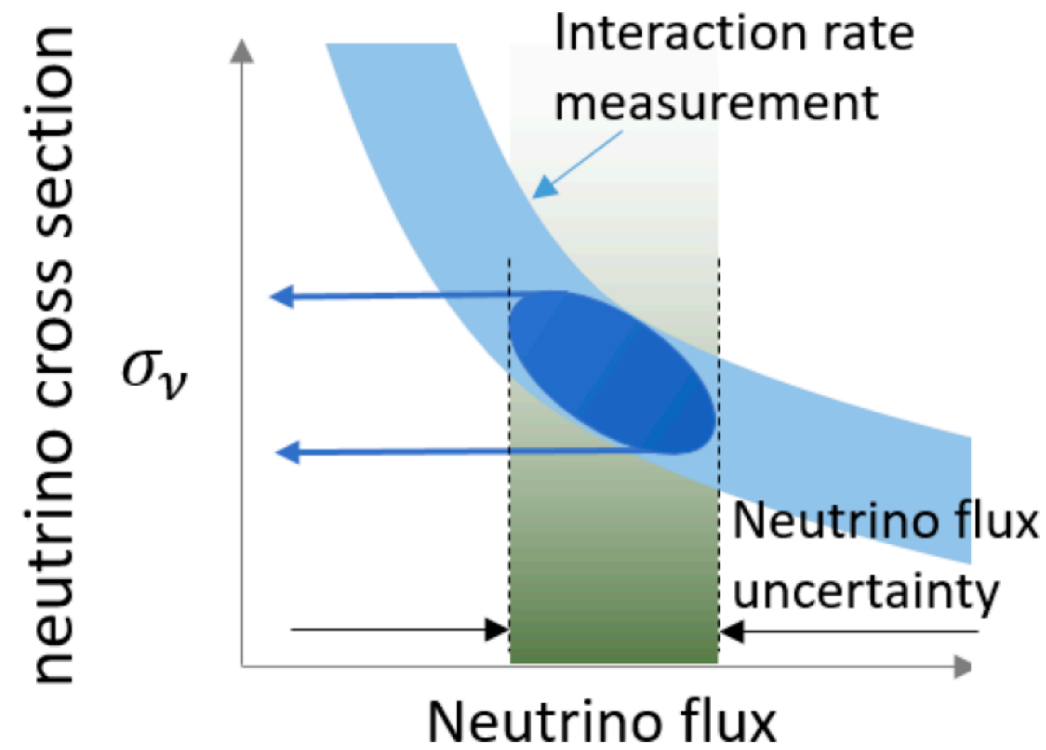
FASER実験によるニュートリノ測定

FASER実験では、ニュートリノの衝突数を測定

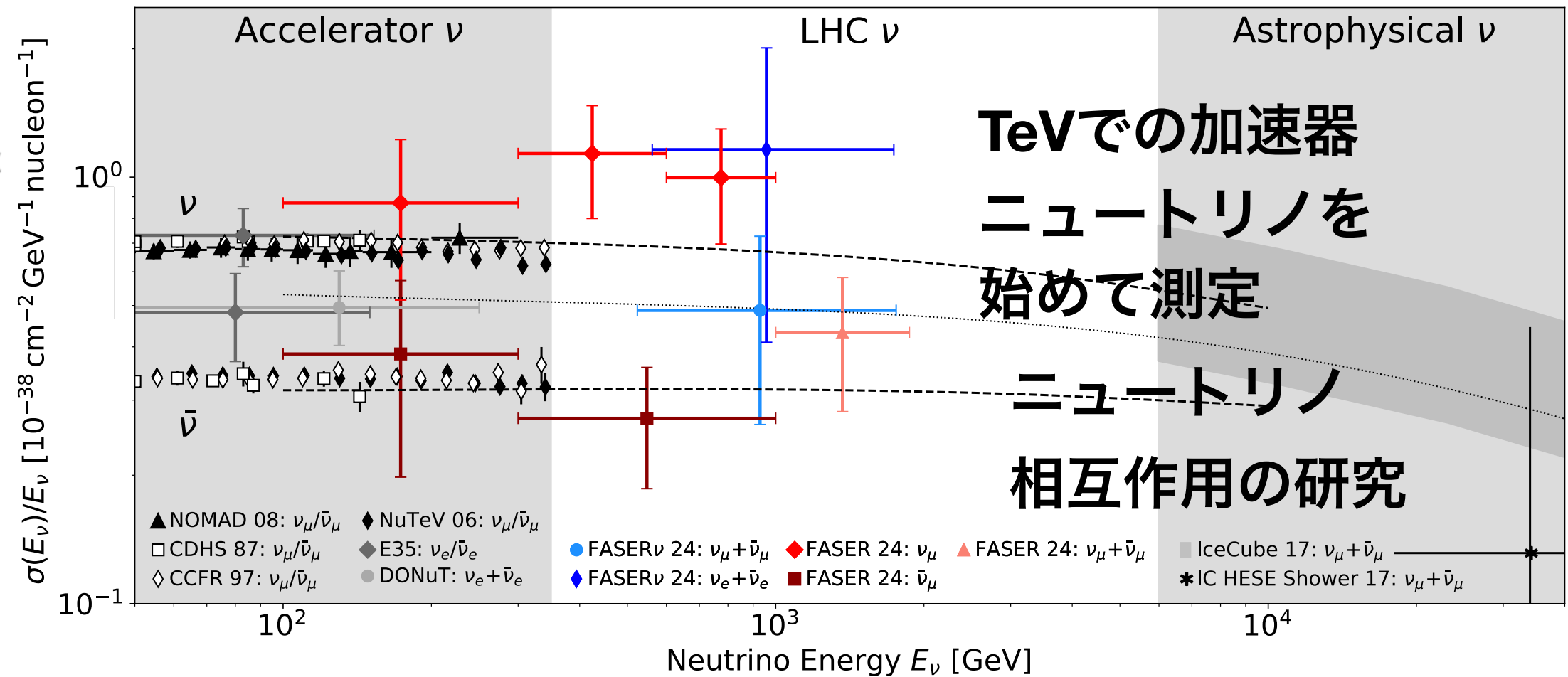


FASER実験によるニュートリノ測定

FASER実験では、ニュートリノの衝突数を測定

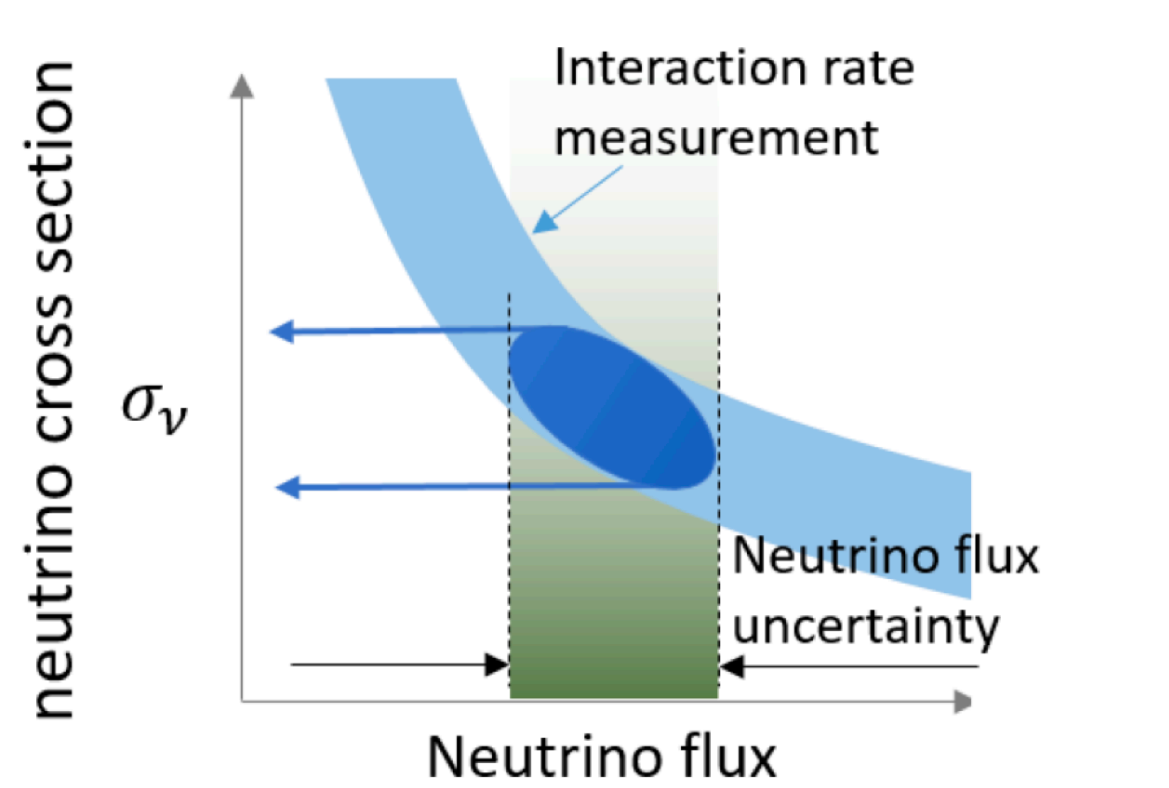


測定した衝突数から、シミュレーションでのニュートリノフラックスを仮定して、衝突断面積を計算

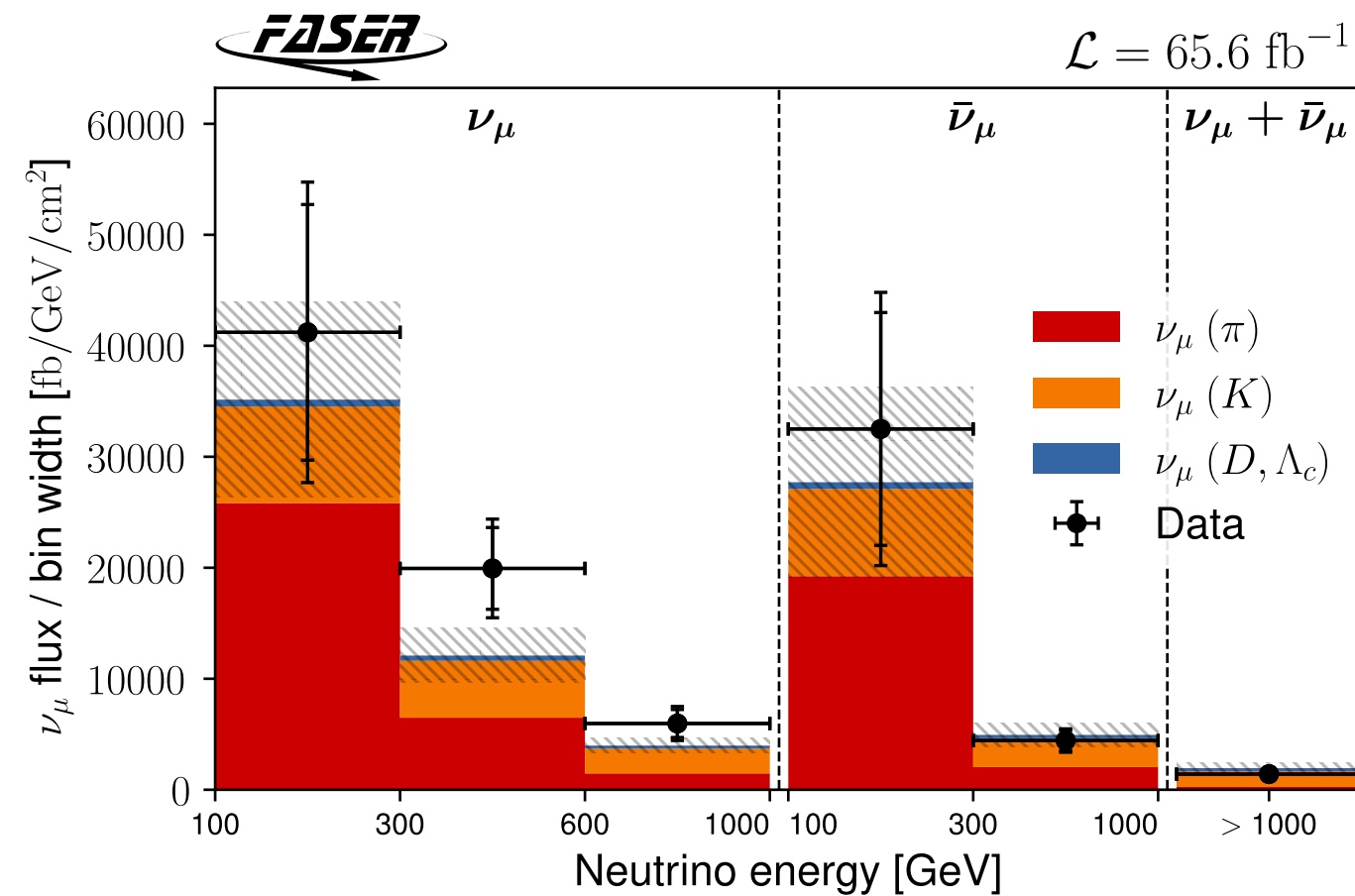


FASER実験によるニュートリノ測定

FASER実験では、ニュートリノの衝突数を測定



測定した衝突数から、シミュレーションでの衝突弾面積を仮定して、ニュートリノフラックスを計算

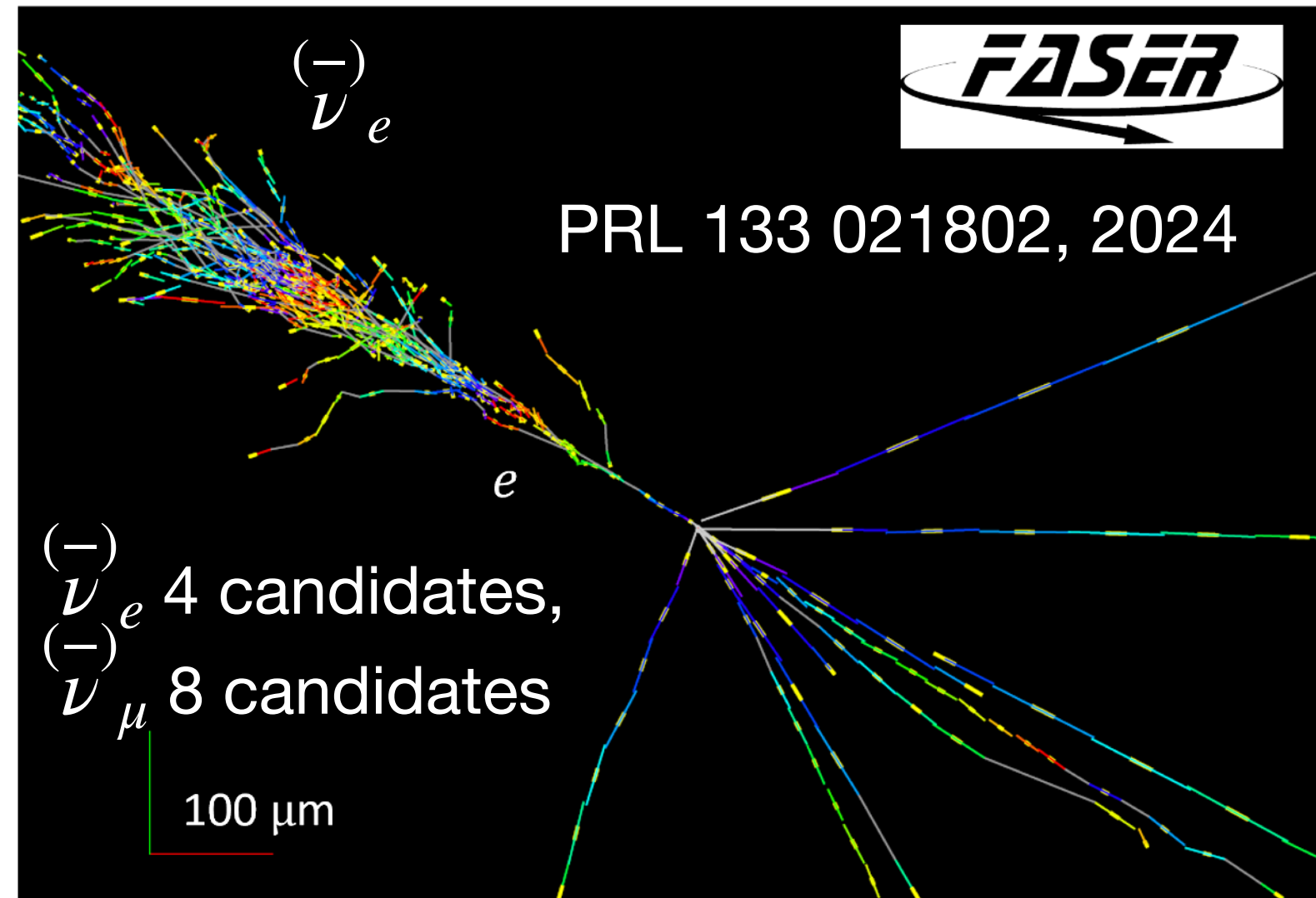
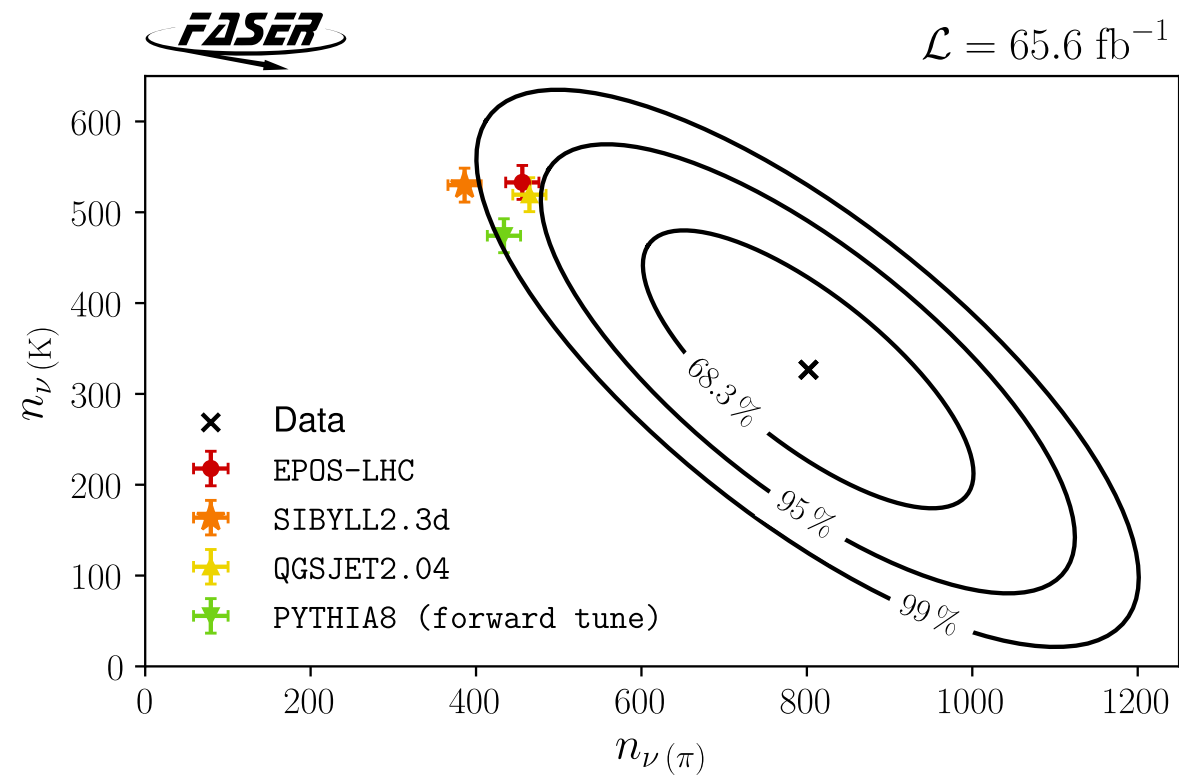
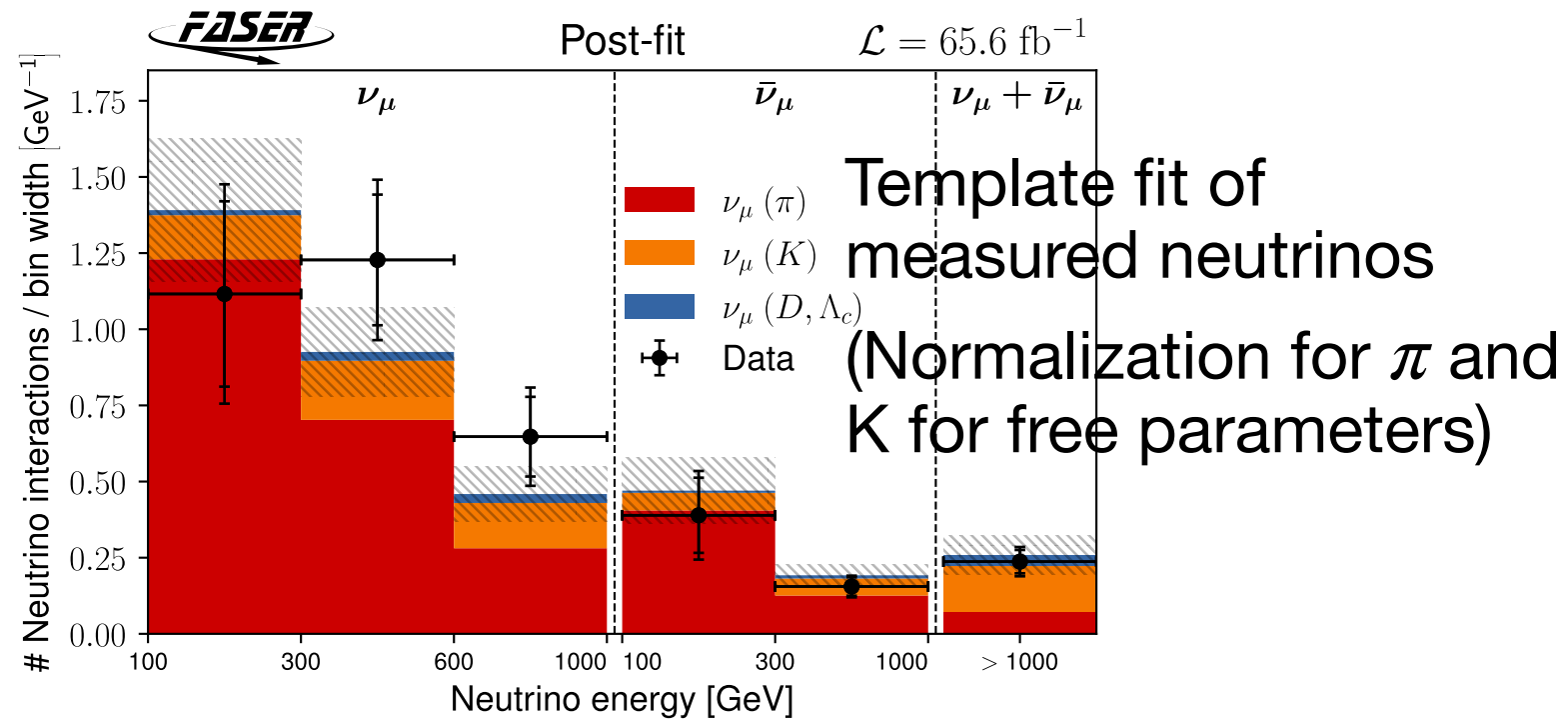


Paper submitted,
arXiv: 2412.03186

ニュートリノ候補 363イベントを報告

LHC-Run3でこの解析の3.8倍のデータを取得する予定

ニュートリノによるハドロン相互作用研究



$(\bar{\nu})_e$ は K やチャームにより主に生成される
 -> 高エネルギー K およびチャームの測定へ

将来計画

- FASER Run4
 - 現在のFASER実験の継続が承認済み
 - LHC Run4 (2030-2033) の期間に 680 fb^{-1} \rightarrow Run3 (2022-2026) の2.7倍
 - 新たな検出器の導入を検討中
- Forward Physics Facility (FPF)
 - LHCにおけるニュートリノの実験を行うための新たな実験エリアを提案
 - より大きな検出器の設置が可能、4つの実験が提案
 - 承認されれば、2032年ごろまでに実験開始
 - 現在欧州において、European strategy for Particle physicsが策定中であり、FPFについて提案中
 - 幅広いコミュニティのサポートが重要
 - European strategy へのインプットを提出 <https://arxiv.org/abs/2411.04175>
 - LHC Run4以降 (~2041) で現在のFASER Run3の10倍に当たる 3000 fb^{-1} を測定

FASER Run 4

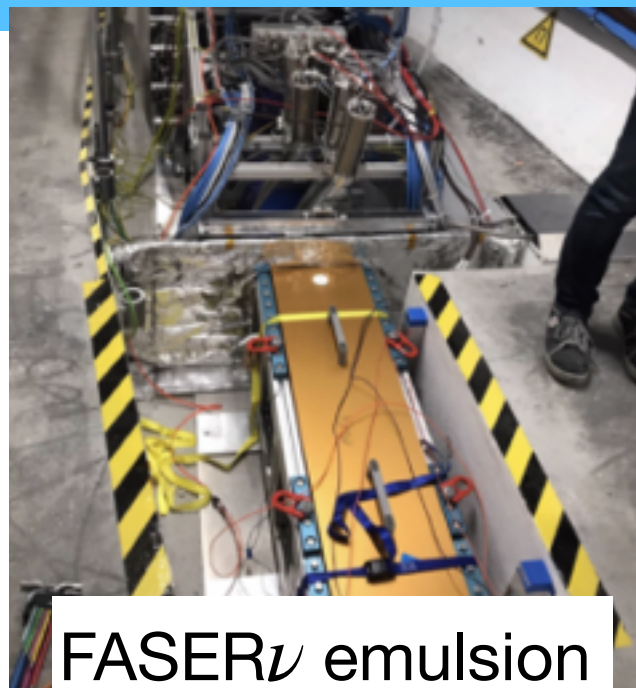
Approved!!

Run 3: $\sim 250 \text{ fb}^{-1}$, Run 4: $\sim 680 \text{ fb}^{-1}$

高頻度のミュオンバックグラウンドにより
Emulsion detectorでのデータ取得に制限

高頻度のバックグラウンドでの
データ取得に向けたR&D

新しい検出器の導入に向けたR&D



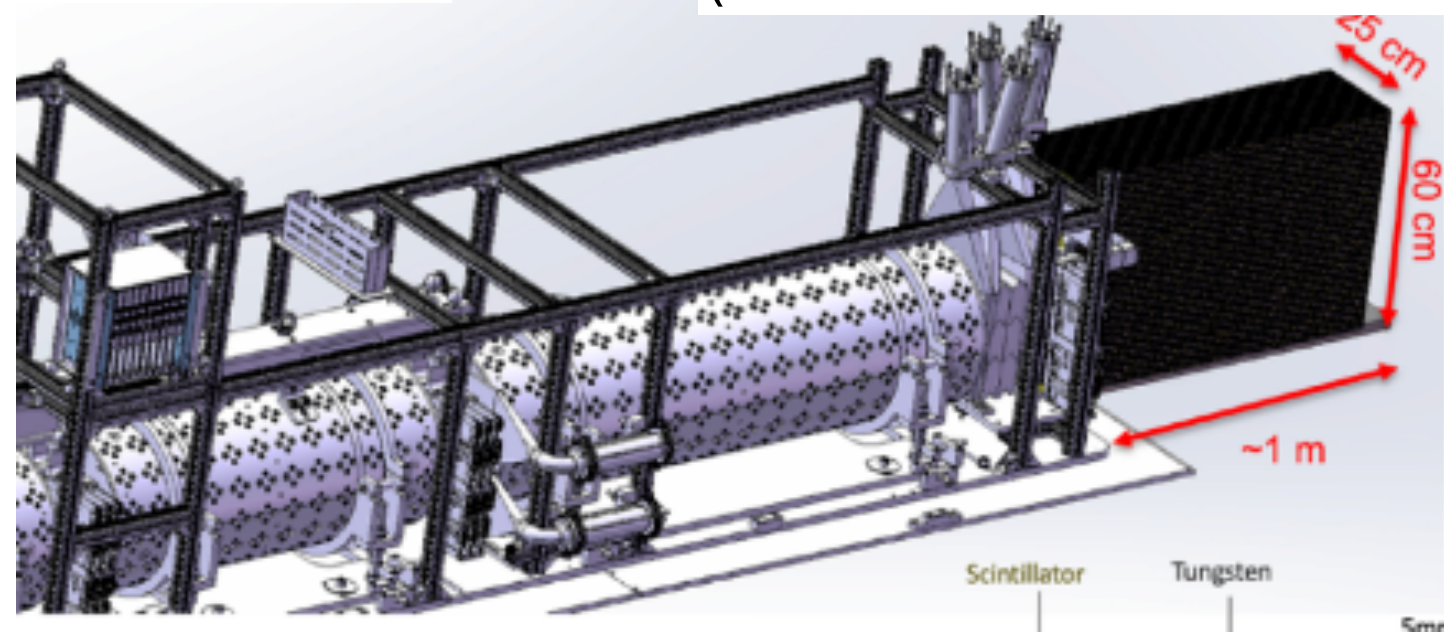
FASER emulsion detector



FASER検出器後方

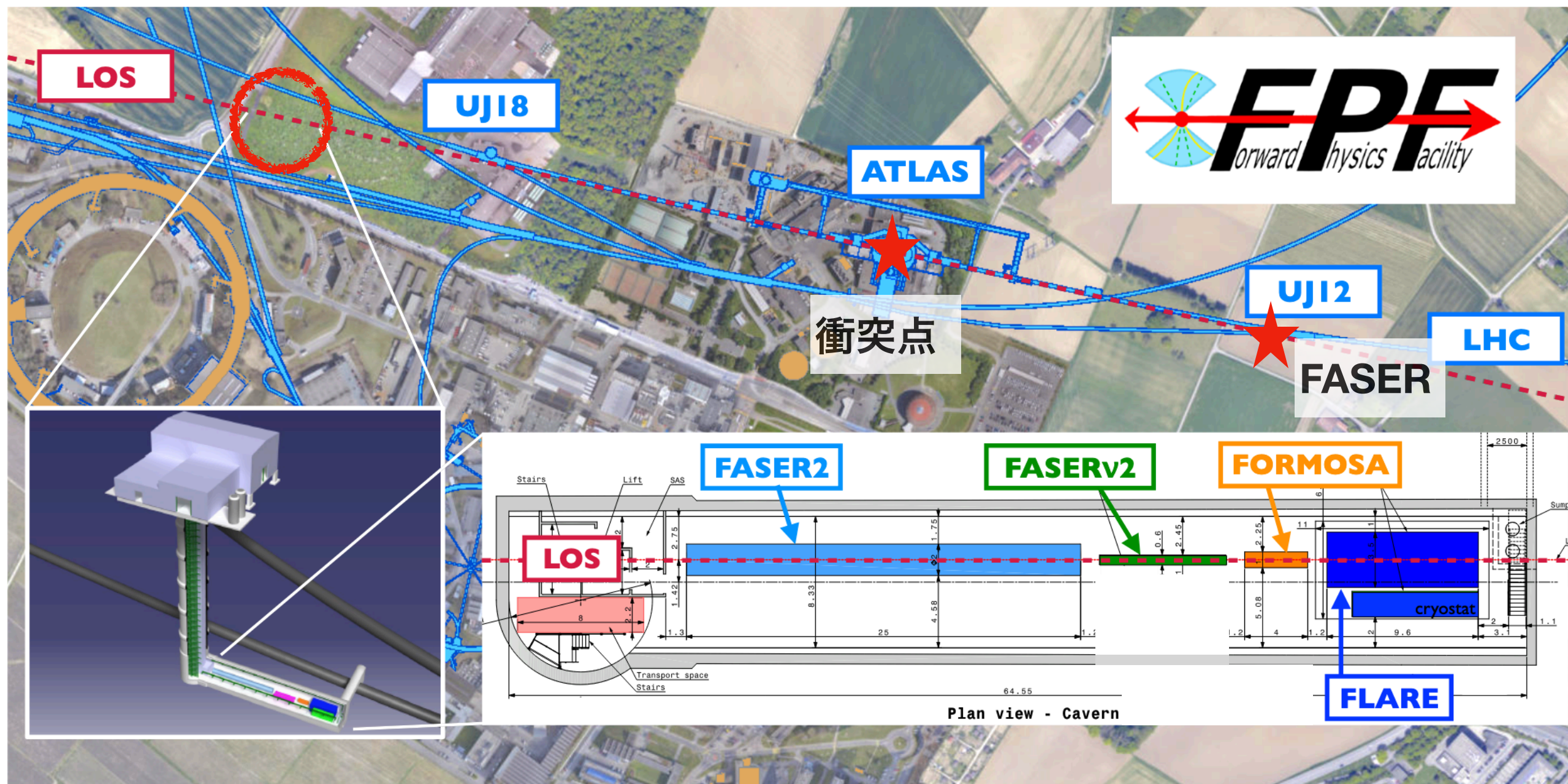
(新たな検出器を設置可能)

検出器の大型化や後方への設置により、
Run3の検出器から角度カバー領域を増やす
-> より広い角度のハドロン生成を測定



From slides by Akitaka Ariga in Neutrino at CERN workshop

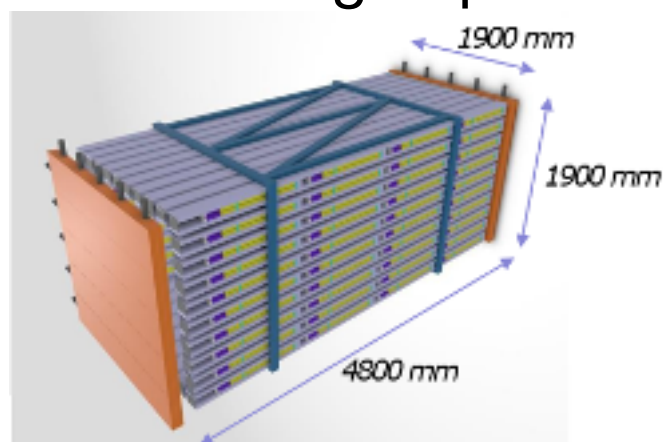
Forward Physics Facility (FPF)



Forward Physics Facility (FPF)

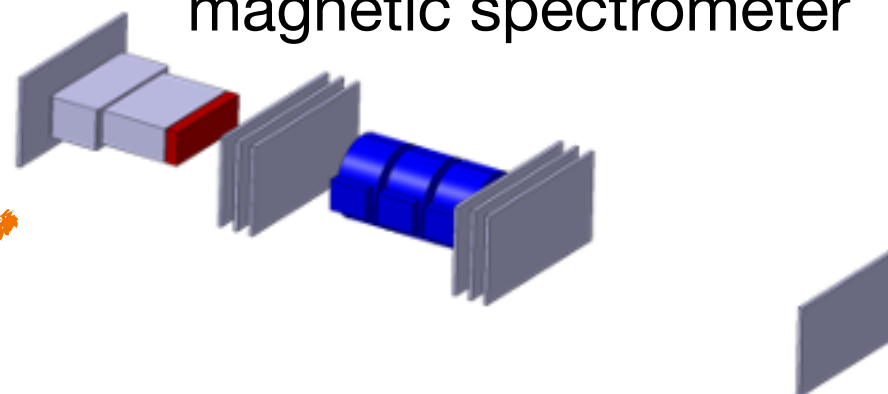
FORMOSA

Scintillator array for milli charged particle



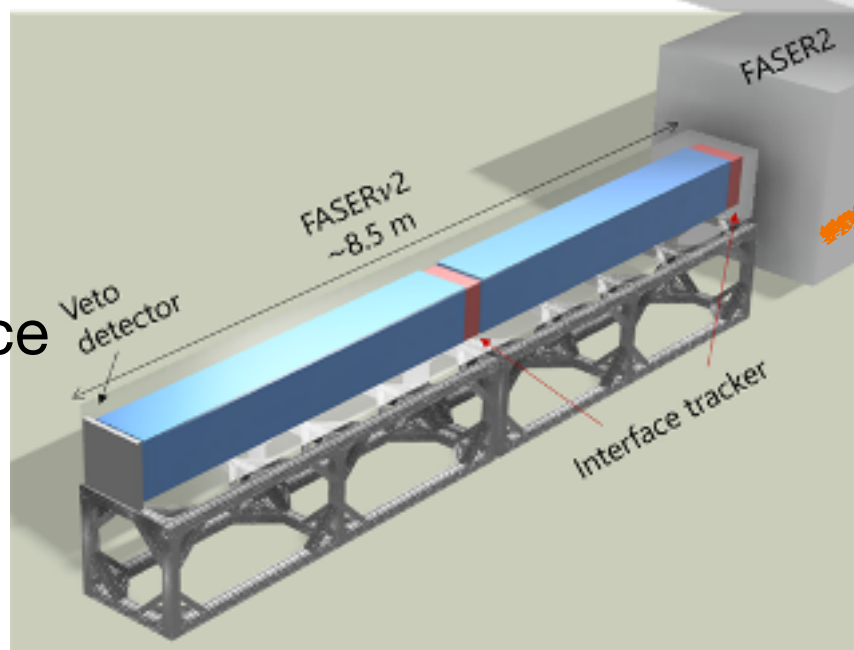
FASER2

Large decay volume and magnetic spectrometer



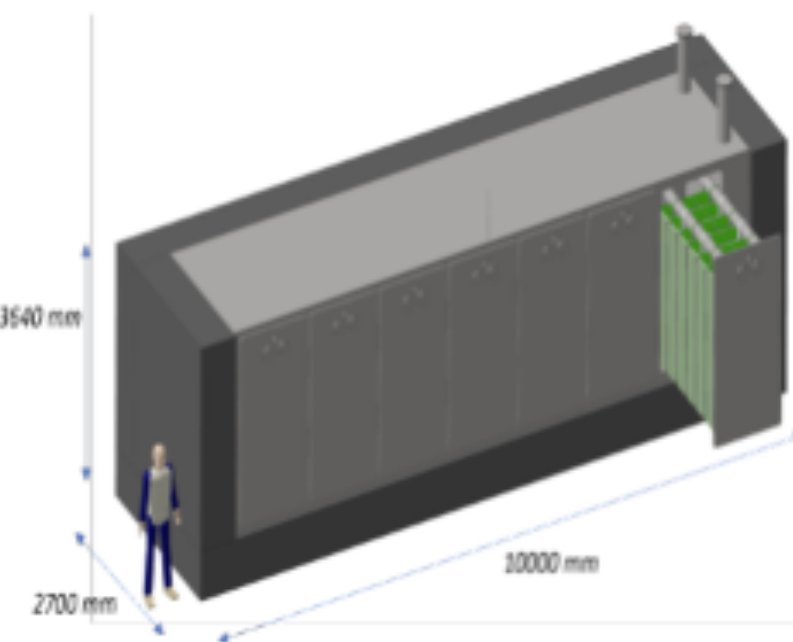
FASER ν 2

20-ton emulsion-based neutrino detector with interface detector to FASER2



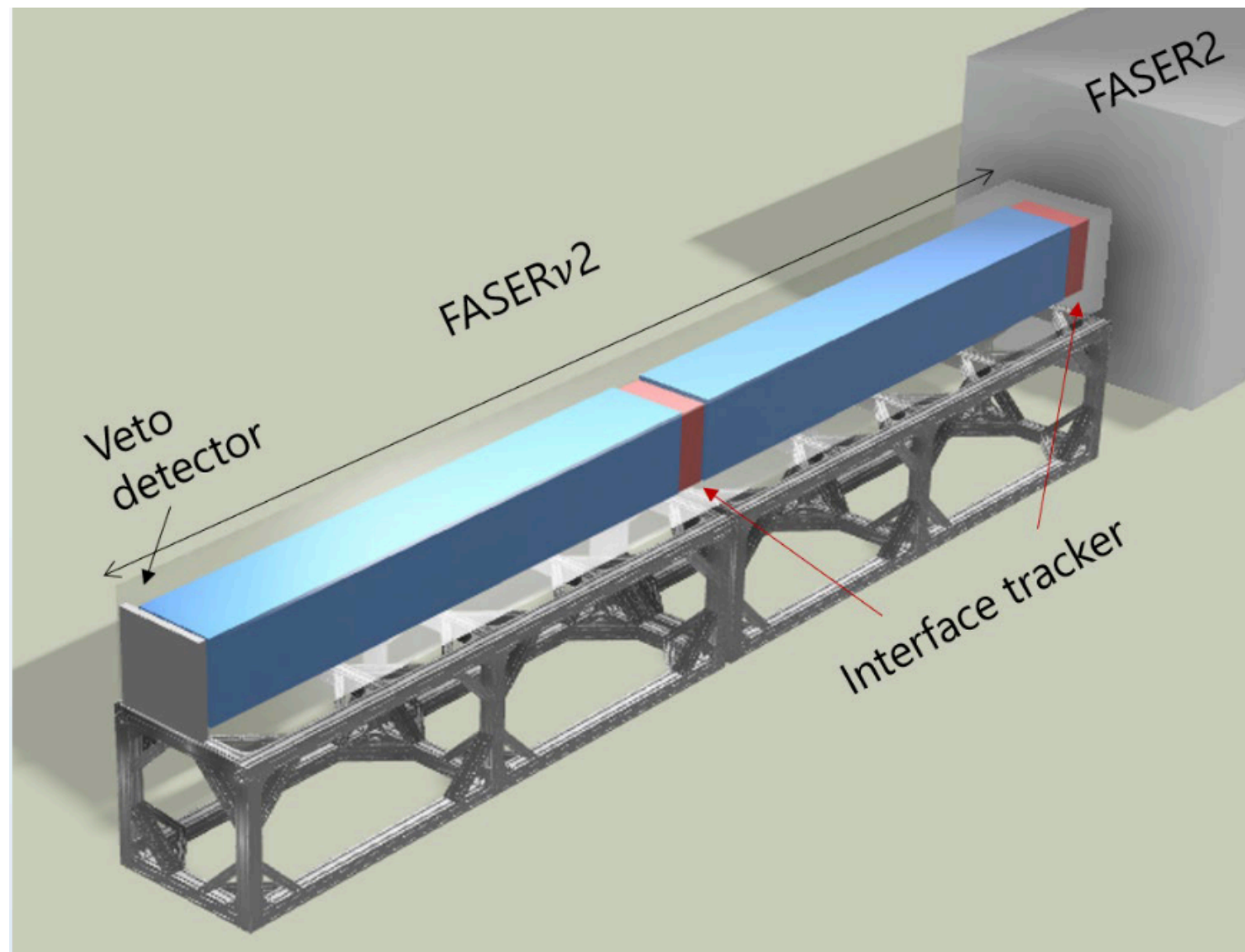
FLArE

100-ton liquid-Ar neutrino detector



Pictures from slides by Akitaka Ariga in Neutrino at CERN workshop

FASER ν 2 experiment



ターゲット内でのニュートリノ衝突数が
 現行実験の約200倍!!

ν int. rate estimated based on **Sibyll 2.3d**

		$\nu_e + \bar{\nu}_e, \text{CC}$	$\nu_\mu + \bar{\nu}_\mu, \text{CC}$	$\nu_\tau + \bar{\nu}_\tau, \text{CC}$
FASERν2 (20 tons, 3 ab ⁻¹)	ν int.	178k	943k	2.3k
	ν int. with charm	~20k	~90k	~0.2k
	ν int. with beauty	~2	~10	~0.02

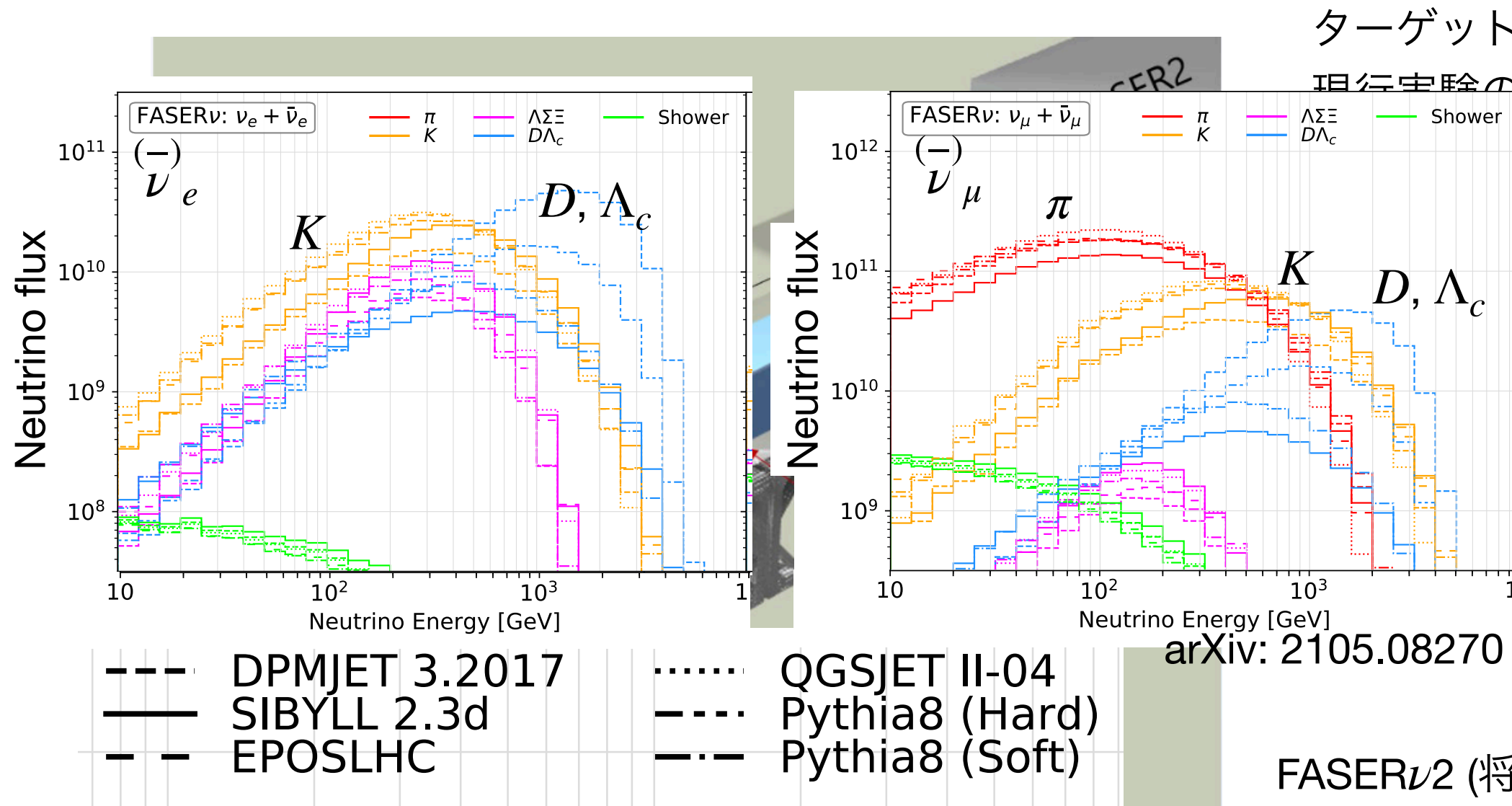
FASER ν (現行実験, 250fb⁻¹)では検出効率 30%として

$(\bar{\nu})_e$ は~500イベント程度

複数のbinに分けて解析して $\nu_e + \bar{\nu}_e$ の統計エラー10%程度

FASER ν 2 (将来実験)ではより細かなbinに分けて、
 さらに統計エラー数%を実現

FASER ν 2 experiment



ターゲット内でのニュートリノ衝突数が
旧行実験の200倍!!

estimated based on **Sibyll 2.3d**

	$\nu_e + \bar{\nu}_e, \text{CC}$	$\nu_\mu + \bar{\nu}_\mu, \text{CC}$	$\nu_\tau + \bar{\nu}_\tau, \text{CC}$
	0.9k	4.8k	15
with charm	~0.1k	~0.5k	~2
with beauty	-	~0.05	-
	178k	943k	2.3k
with charm	~20k	~90k	~0.2k
with beauty	~2	~10	~0.02

arXiv: 2105.08270

FASER ν 2 (将来実験)ではより細かなbinに分けて、
さらに統計エラー数%を実現

ニュートリノを用いて、 π , Kおよびチャームの生成をエネルギーごとに詳細に測定し
宇宙線実験に重要なハドロン相互作用を精密に測定する

まとめ

- 衝突型加速器ニュートリノを用いたハドロン相互作用研究により、これまで加速器の構造上難しかった高エネルギーの π^\pm や K 、チャームの生成の研究が可能に
- これらのハドロン相互作用の研究により、空気シャワーにおけるシミュレーションの向上に不可欠な基礎的なデータを提供。超高エネルギー宇宙線実験や高エネルギーの大気ニュートリノ予測に貢献
- 2030年以降の現在のFASER実験の継続が決定しており、これに向けて検出器アップグレードを推進
- 将来計画として、LHCニュートリノの実験を行うための新たな実験エリア、Forward Physics Facility (FPF)を提案中。より大きな検出器の設置が可能で、4つの実験が提案されている。承認されれば、2032年ごろまでに実験開始。
- FPFにより現行のFASER実験の計画の200倍のイベントを取得することで、 π 、 K およびチャームの生成をエネルギーごとに詳細に測定する。

Backup

未来の学術構想2023掲載状況

<https://www.scj.go.jp/ja/info/kohyo/pdf/kohyo-25-t353-3-176.pdf>

No. 176 (グランドビジョン^⑩)

素粒子標準模型を超える新物理に向けた FASER 実験と FPF 計画の推進

① ビジョンの概要

素粒子標準模型を超える物理の発見に向けて MeV から GeV の質量を持つ新粒子探索と、TeV 領域のエネルギーを持つ 3 世代ニュートリノ研究に挑戦する。欧州原子核研究機構 (CERN) の衝突型加速器を活用し、衝突点から前方(ビーム軸上)における素粒子実験を推進し、世界で進展する多彩な実験と協力して宇宙を支配する物理法則の解明に取り組む。天文、原子核、宇宙線分野とも連携し、新たな融合領域を創出する。

2032 年末までに必要となる経費は 20 億円である。FASER 実験を遂行するための CERN への渡航費と研究員の雇用費に 0.5 億円を計上する。FPF において FASER2 実験で必須となる超電導磁石について 9 億円が必要となる。設計などのための人件費として 0.5 億円を計上する。FASERnu2 実験でニュートリノの標的として用いるタングステンに 3 億円、写真乾板の読み出し装置に 2 億円とその組み上げの人件費として 0.5 億円、周辺装置の準備に 0.5 億円が必要となる。写真乾板の製作費に 3 億円が必要となる。新粒子及びニュートリノの背景事象削減のためのスーパー磁石について 1 億円を計上する。

Large Hadron Colliderにおける加速器ニュートリノ実験

物理

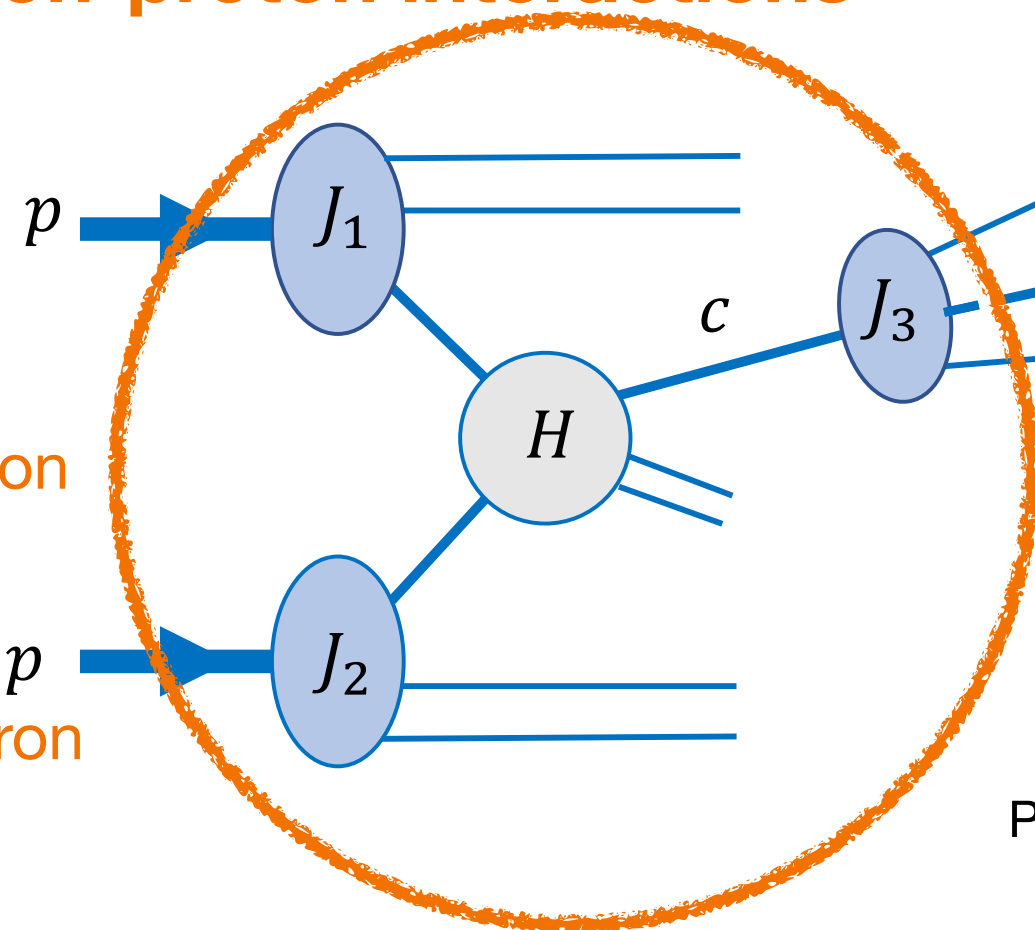
ATLAS Proton-proton interactions

Analysis using neutrino flux

Parton Distribution Function using forward charm hadron

Forward light hadron productions

Forward charm productions



FASER/FPF

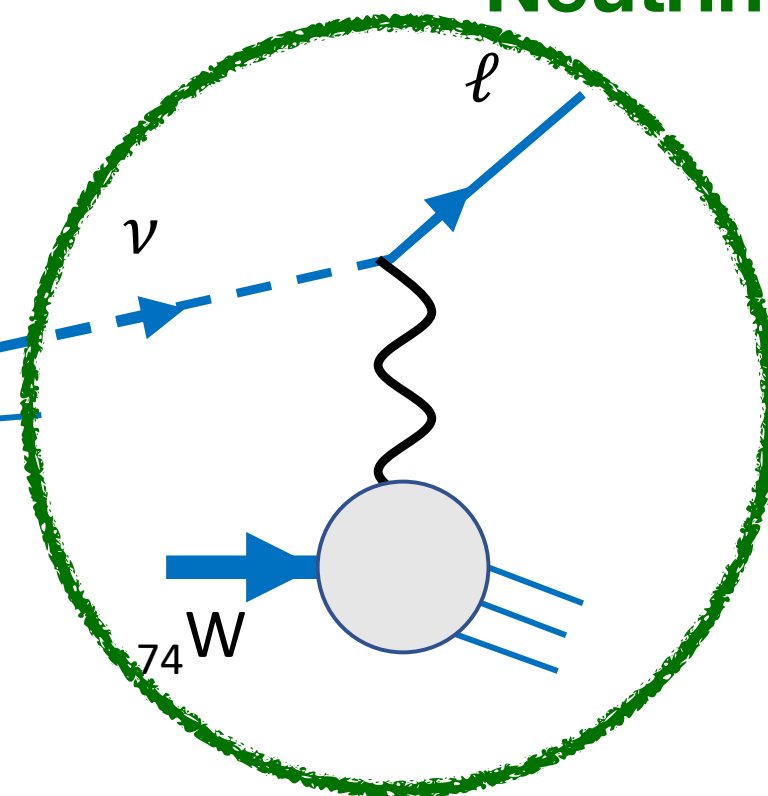
Neutrino-nucleon interactions

Analysis using neutrino interactions in the detector

Cross-section of neutrino-nucleon interactions for ν_e , ν_μ , and ν_τ at TeV

Hadron productions in the neutrino interactions

Neutrino-induced deep inelastic scattering



Physics Reports 968 (2022) 1–50

Light long-lived particle search

Axion-like particles
Milli-charged particles