

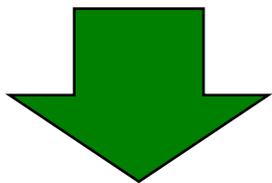
LHC-FASER実験における 新粒子探索

'20 8/31 音野瑛俊(九大RCAPP), 田窪洋介 (KEK)

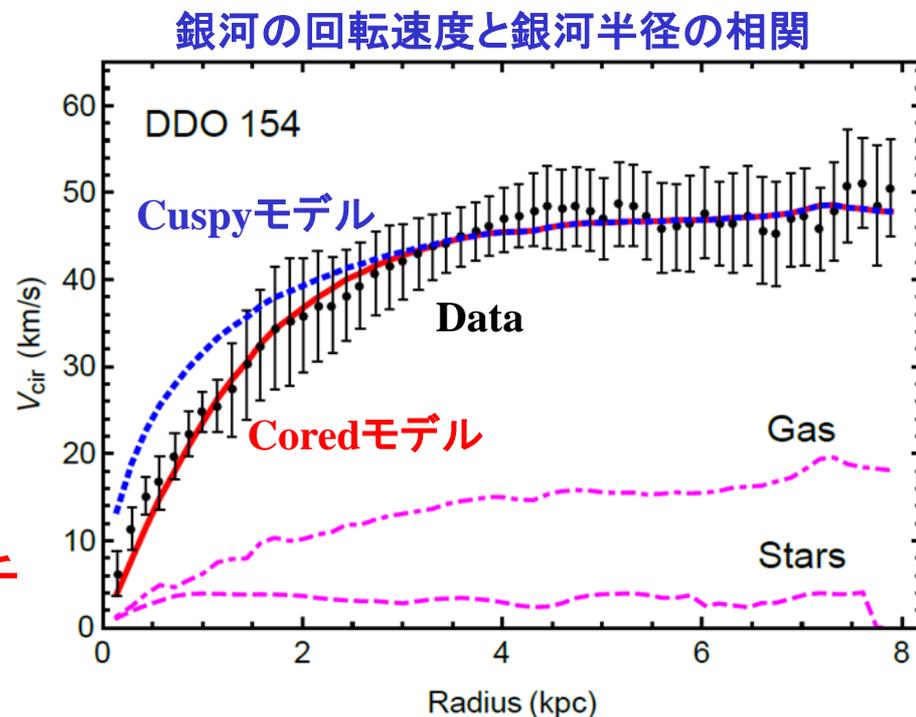
FASER実験の物理的背景

Core-cusp問題

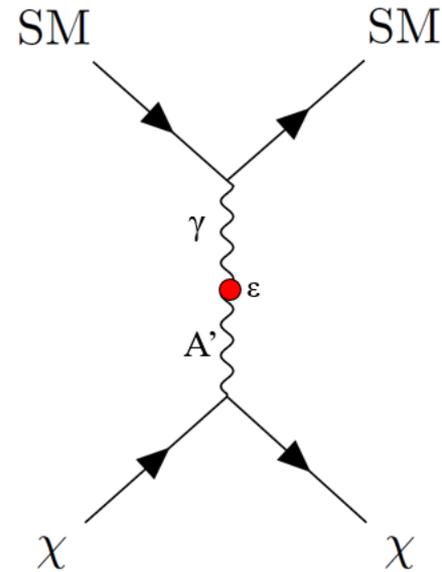
- 銀河の回転速度から、暗黒物質(DM: Dark Matter)は銀河内に一様(cored)に分布していることが示唆されている
- しかし、WIMPs(Weakly Interacting Massive Particles)をDMと仮定すると、DM密度は銀河中心で累乗で増加(cuspy)
 - core-cusp問題、またはsmall-scale問題と呼ばれる
- DMがWIMPsであるとせず、DM密度が銀河内で一様な分布を再現できるいくつかの物理モデルが考案されている



ここでは、WIMPなしミラクルをベンチマーク・モデルとして考える

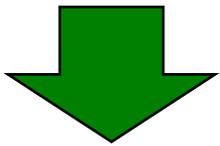


WIMPなしミラクル



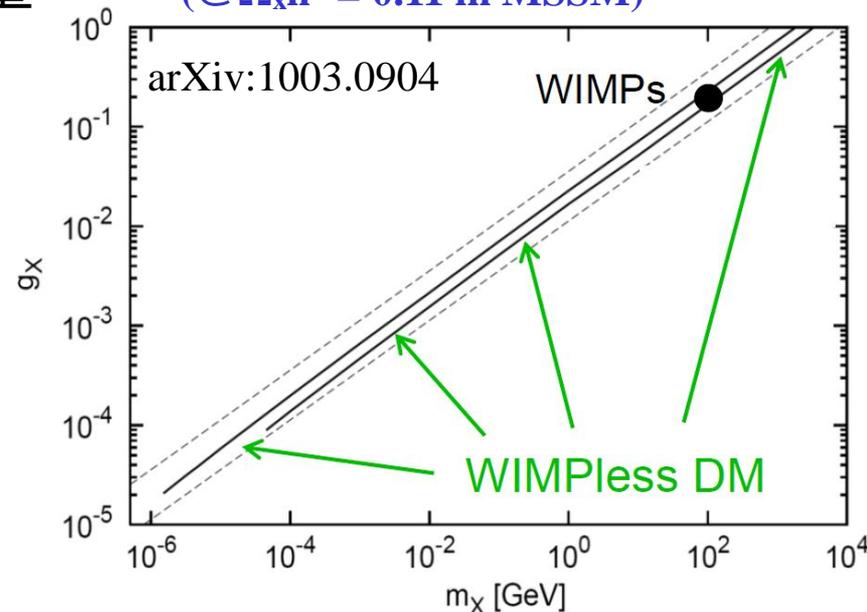
- GSMBなどから自然に導かれる(PRL 101, 231301 (2008))
- $O(100\text{GeV})$ より軽いDMを導入
- DMは媒介粒子を介してSM粒子と相互作用する
- 媒介粒子とSM粒子の混合角(ϵ)が、DMとSM粒子の実効的な相互作用の大きさを決める
- ϵ を調整することで、DMの熱的残存量を再現できる

➤ DMが軽いと、 ϵ は小さくなる



DMが軽い場合、媒介粒子は軽くて、SM粒子に崩壊する長寿命粒子となる
(媒介粒子の例: 暗黒光子)

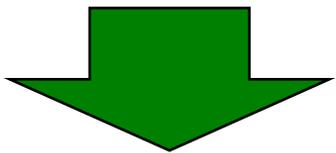
DM結合定数とDM質量の相関
(@ $\Omega_{\chi}h^2 = 0.11$ in MSSM)



軽い新粒子に対する現在の制限

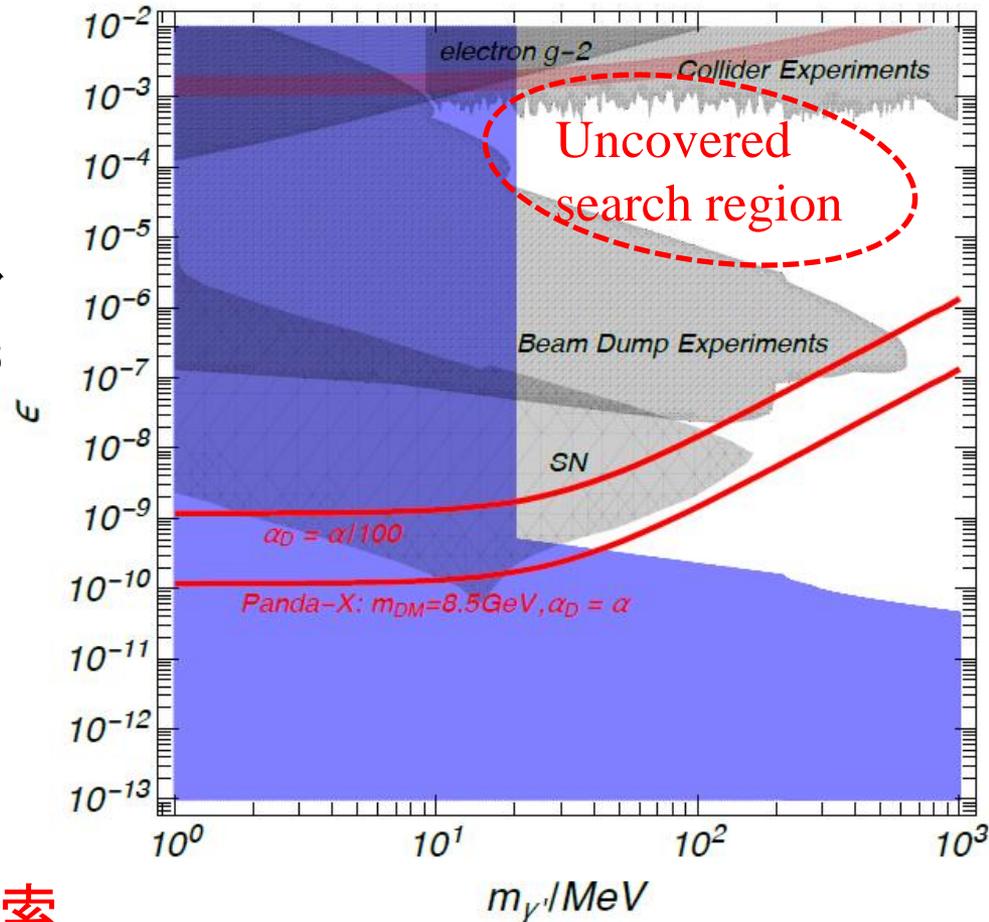
暗黒光子に対する制限

- 強い結合領域($\epsilon \sim 10^{-3}$)は衝突型実験で排除されている
 - 暗黒光子に対する検出器アクセプタンスの制限で、 $\epsilon < 10^{-3}$ の領域には感度がない
- ビーム・ダンプ実験が弱い結合領域の制限を付けている



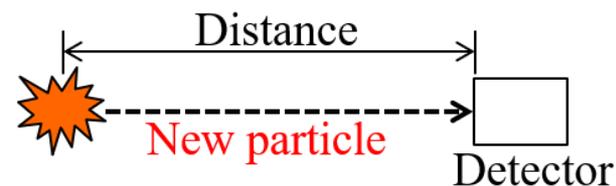
これらの2つの制限領域の間が探索領域となる

暗黒光子に対する制限 (arXiv:1805.06876)



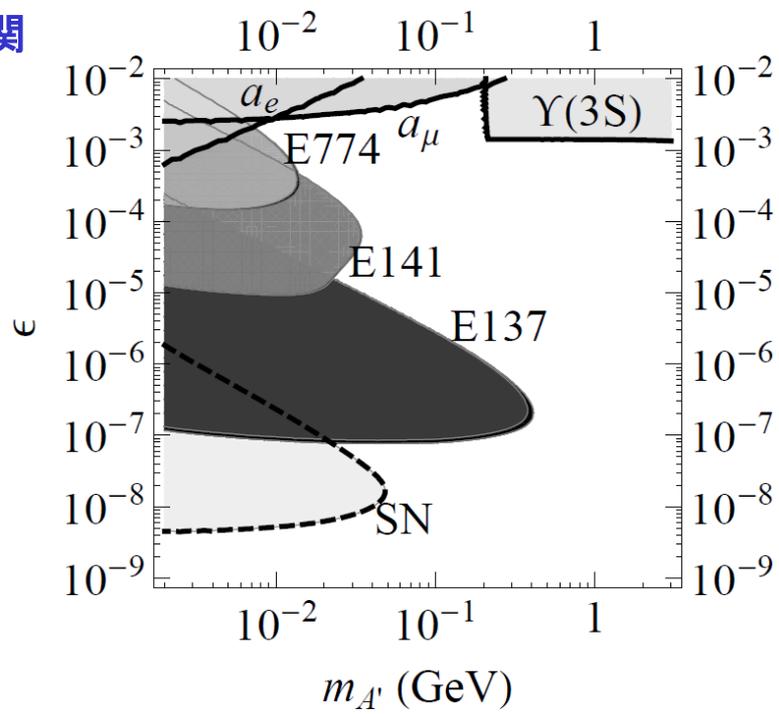
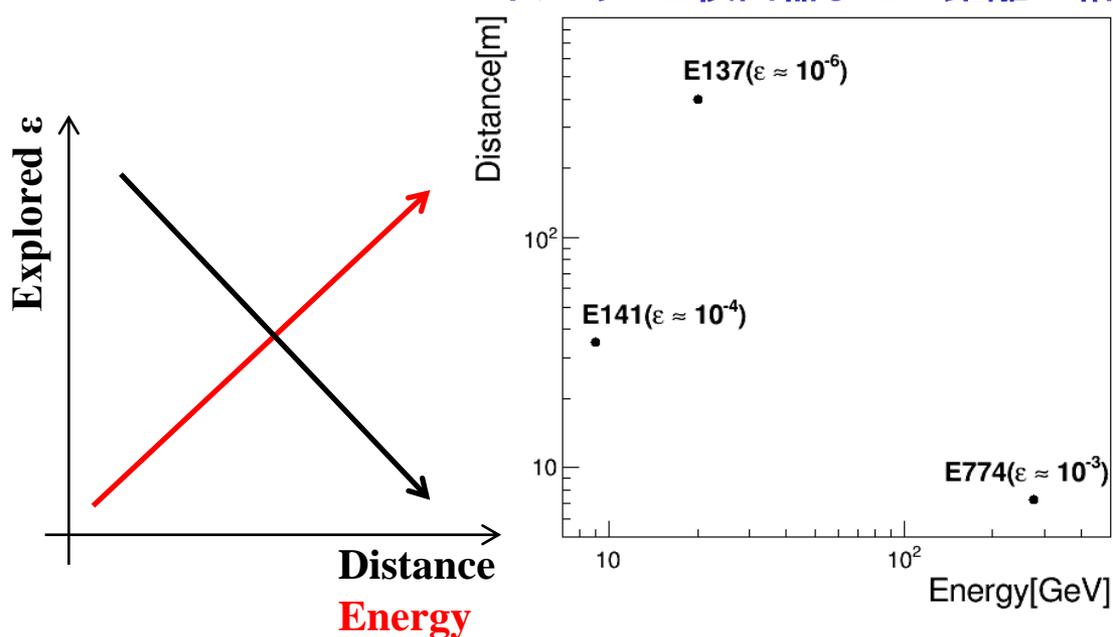
弱い結合領域に対する探索能力

- ビーム・ダンプ実験は非常に弱い結合領域に制限を付けている (SLAC E137, SLAC E141, FLAB E774) [[arXiv:0906.0580](https://arxiv.org/abs/0906.0580)].



- 排除領域はビーム・エネルギーと、生成位置と検出器の距離によって決まる

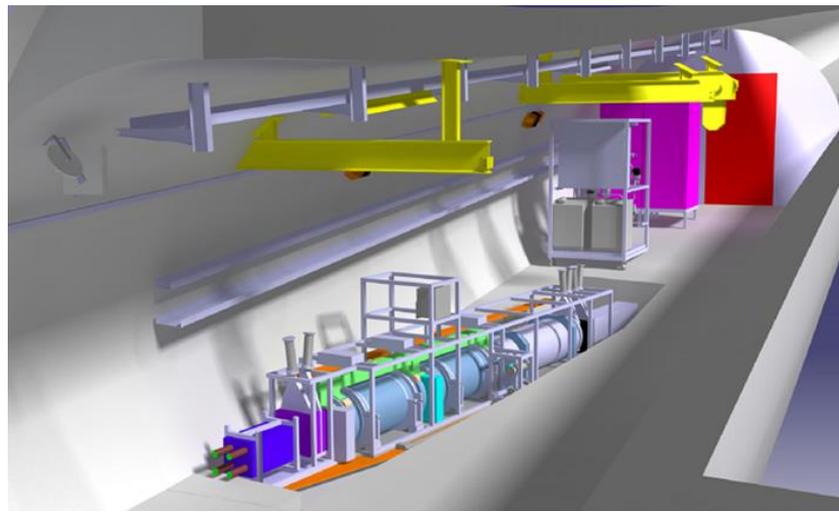
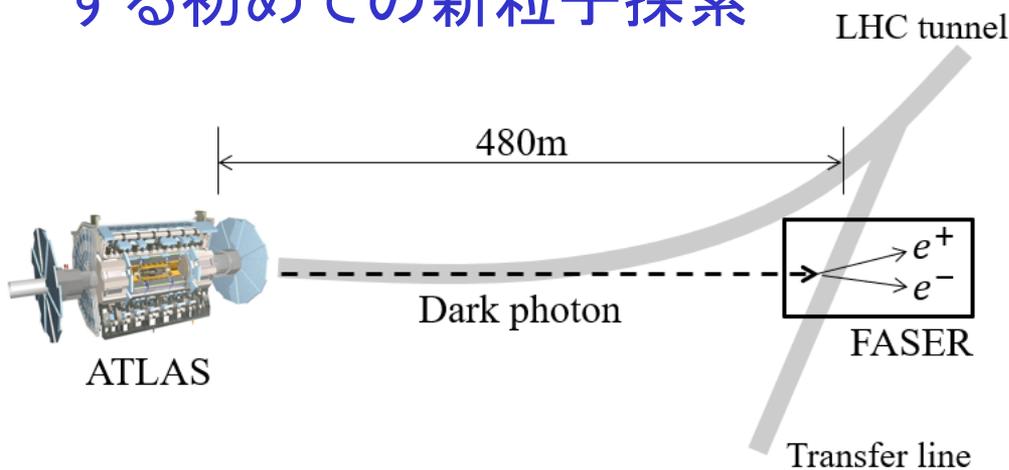
エネルギーと検出器までの距離の相関



FASER実験

FASER実験の概要

- FASER (ForwArD Search ExpeRiment at the LHC)は、2022年から開始される新しい軽い新粒子探索実験
- ベンチマーク探索モード: 暗黒フォトンの電子・陽電子対への崩壊($A' \rightarrow e^+e^-$)
 - 他の探索: dark Higgs, Axion-like particle, sterile neutrino, etc..
- 検出器はATLASビーム衝突点の480m下流に設置する
- LHCにおける前方方向の陽子・陽子衝突事象の高い断面積を活用する初めての新しい新粒子探索

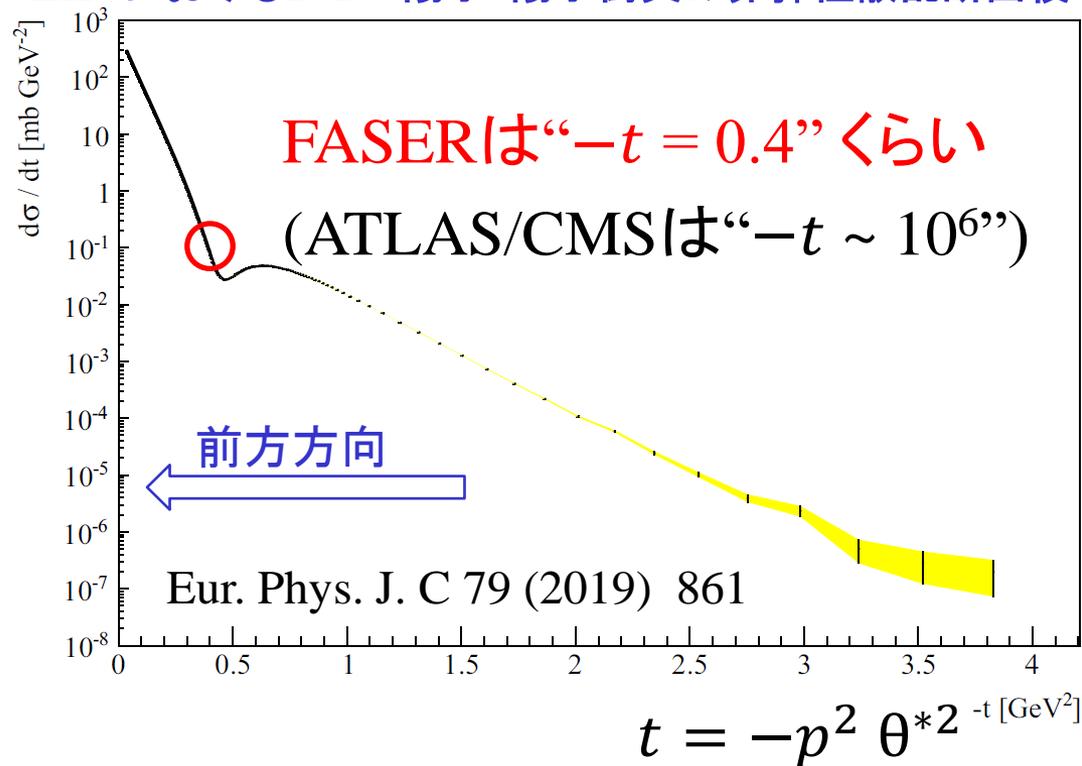


前方方向事象の活用の利点

陽子・陽子衝突の非弾性散乱の断面積は前方方向で劇的に大きくなる (Bjorkenスケール)

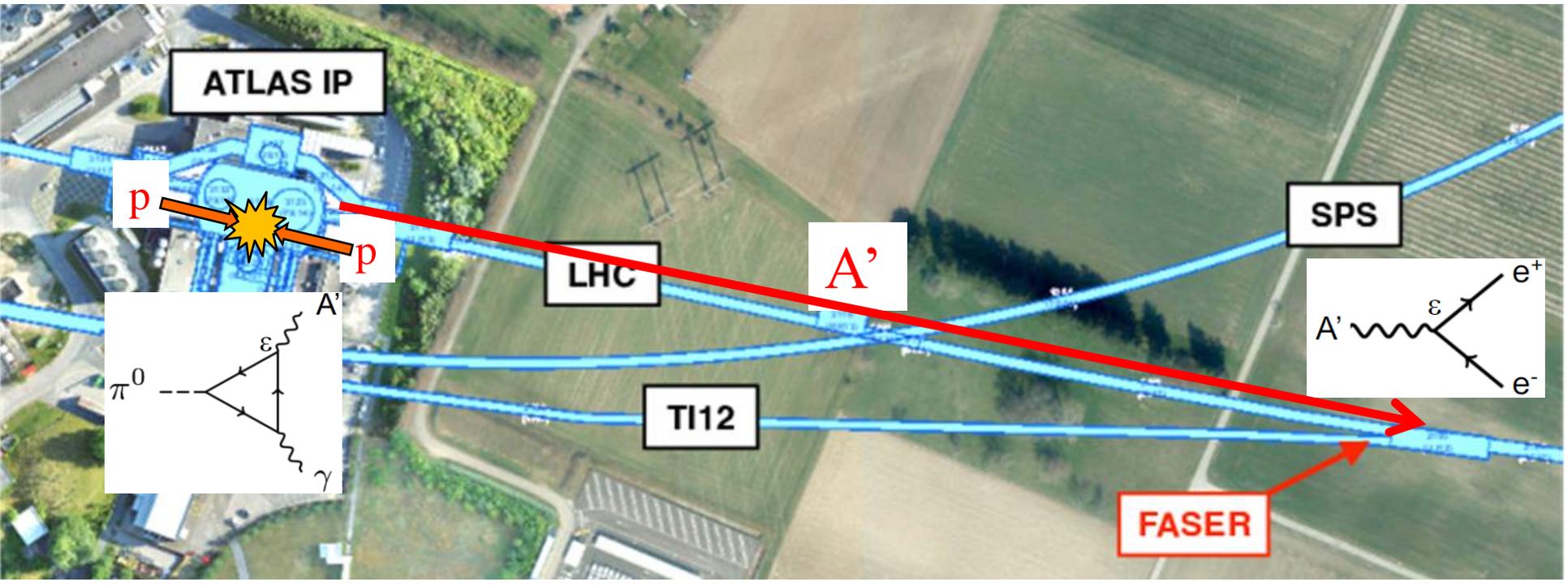
➡ 超前方に設置されるFASER実験は、コンパクトな検出器でも新粒子探索に対して高い感度を実現ができる

LHCにおける13TeV陽子・陽子衝突の非弾性散乱断面積



軽い新粒子の検出 (1)

- FASERで($m_{A'}=100\text{MeV}$, $\epsilon=10^{-5}$)の暗黒光子を検出することについて考える
 - ϵ : A' と γ の混合角
- 大量の π^0 がATLASでのビーム衝突で生成され、暗黒光子は $\pi^0 \rightarrow A' \gamma$ 過程で作られる

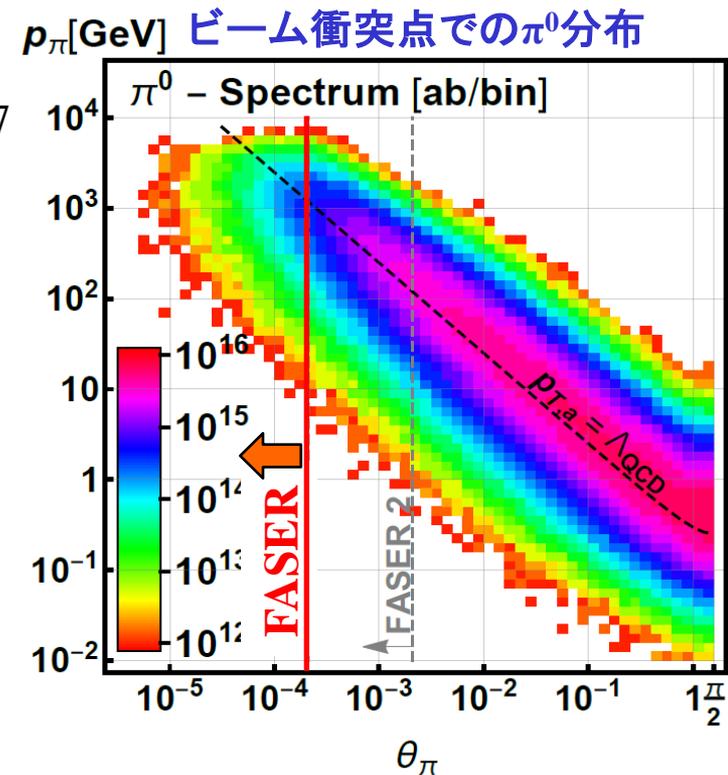


軽い新粒子の検出 (2)

FASERアクセプタンス内での信号の収量について考える

- 半径10cm、長さ5m

1. LHC Run3における 150 fb^{-1} で、約 2.3×10^{17} 個の π^0 が生成される
2. 0.6%の π^0 が検出器アクセプタンス内に収まる
3. $\text{BR}(\pi^0 \rightarrow A'\gamma) : \varepsilon^2 = 10^{-10}$
4. $A' \rightarrow e^+e^-$ に対する検出器アクセプタンス：
 $\sim 10^{-3}$



$$[2.3 \times 10^{17}] \times [0.6\%] \times [10^{-10}] \times [10^{-3}]$$

~ 100事象がFASER実験で検出できる！

FASER実験のコンセプト

低予算！

- コンパクトな検出器 (半径10cm、長さ5m)
- 他の実験で使用されている検出器を可能な限り再利用(飛跡検出器、カロリメータ、データ収集システム)
- 建設費用: <1MCHF(約1億円)

早い！

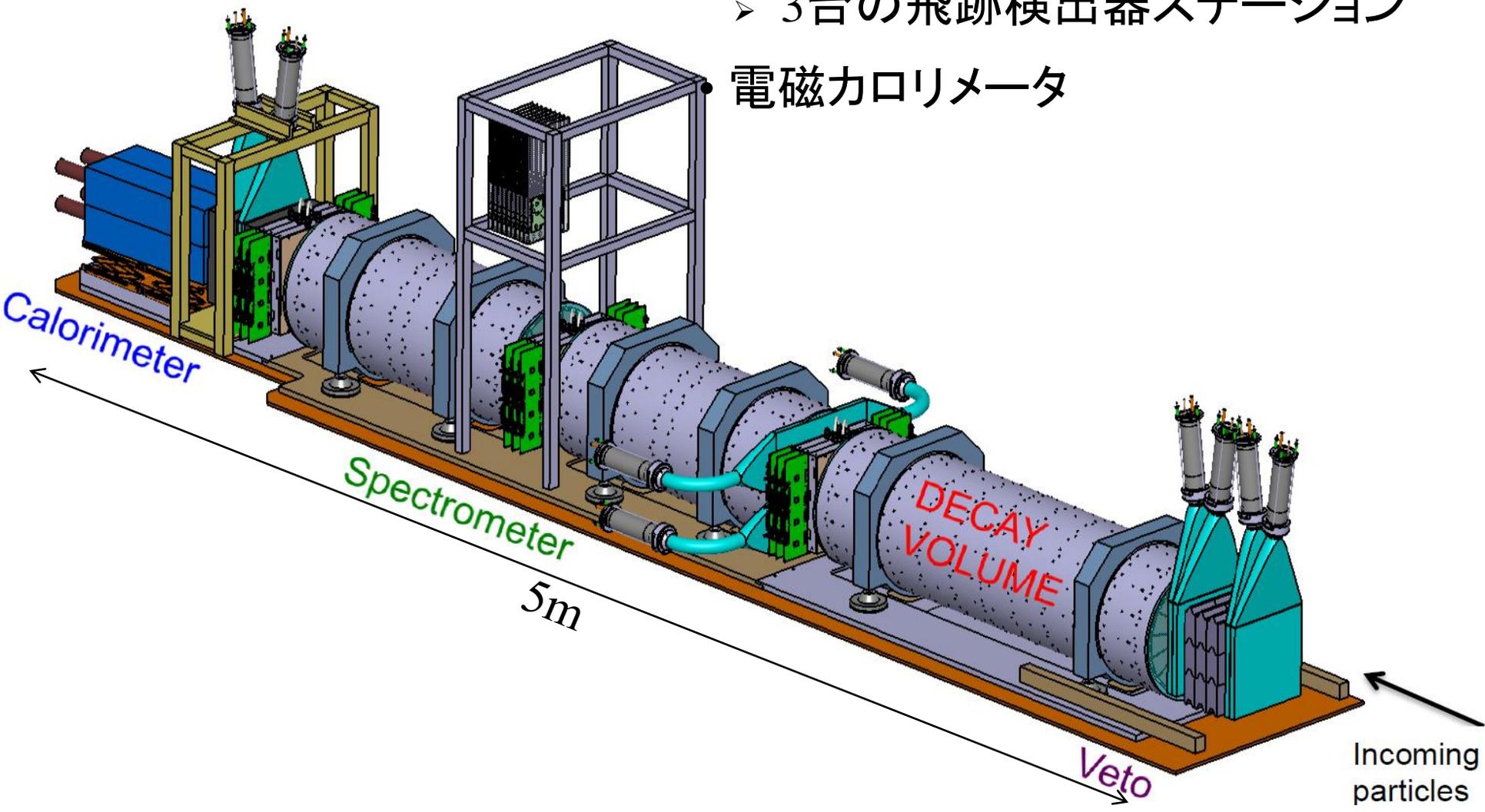
- 2年間のLHCの長期シャットダウン中に建設し、LHC Run3の最初からデータ取得を目指す
- 他の実験で使用されている検出器を使用することで、新たな開発や性能評価をする必要がないので有利

優れた物理感度！

- FASER実験は、断面積が高い前方方向の陽子・陽子衝突を利用することで、新粒子に対して高い感度を持つ

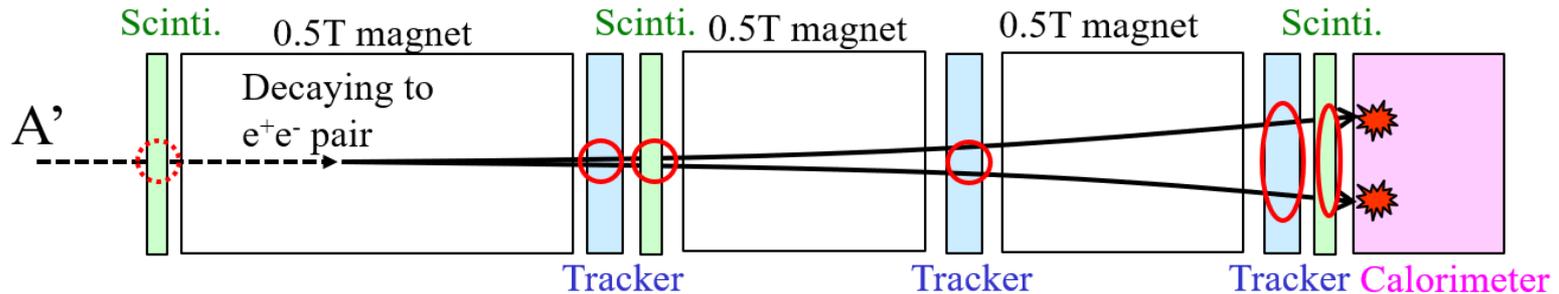
FASER検出器

- シンチレータ veto/トリガー
- 1.5m長の崩壊領域 (0.55T磁場)
- 2m長のスペクトロメータ(0.55T磁場)
 - 3台の飛跡検出器ステーション
- 電磁カロリメータ



信号と背景事象

ベンチマーク信号: 暗黒光子からの電子・陽電子トラック



背景事象

- 岩石とLHCシールドでほとんどの背景事象は吸収される
 - 高エネルギーのミュオンからの γ と、ニュートリノ事象が主な背景事象となる
 - EM/HDシャワーを伴うミュオン: 80k事象
 - 100GeV程度のCC/NCニュートリノ: 数事象
- } $150 \text{ fb}^{-1} @ \text{Run3}$

2台のVetoステーションの荷電粒子に対する99.99%(/1台)の veto能力を仮定すると、これらの背景事象は無視できる

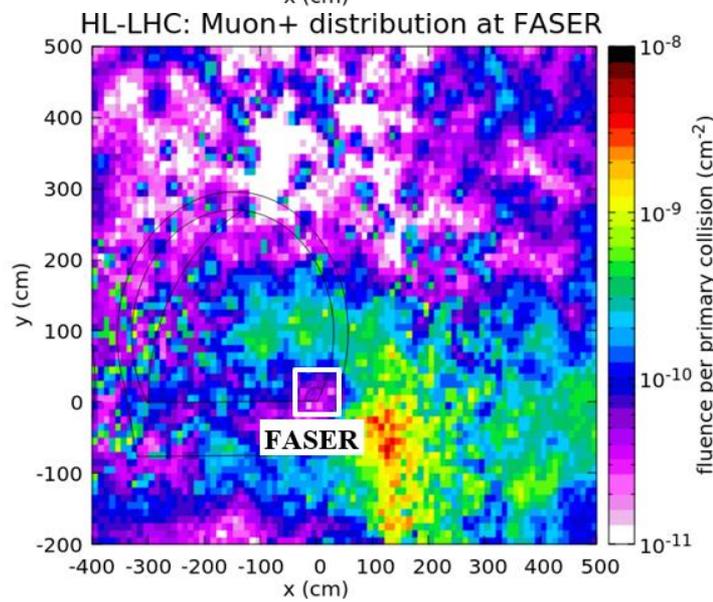
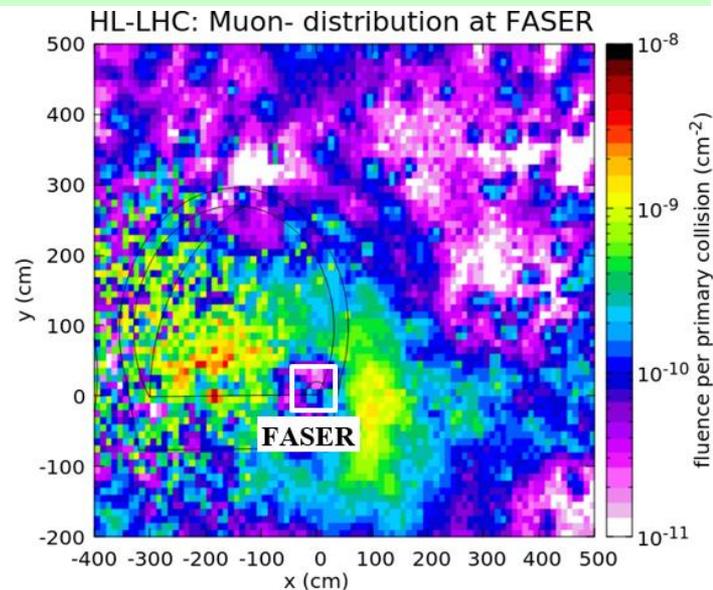
如何にFASERがミラクルか？

- ATLASビーム衝突点で生成された高エネルギーのミュオンが最も大きい背景事象
- これらのミュオンはFASER検出器を避けるようにLHC磁石で曲げられる
 - FASER検出器に対して μ^- は左に、 μ^+ は右に曲げられる

➔ **FASER実験サイトは高エネルギー・ミュオンを避けるのにたまたま完璧な場所だった！**

荷電粒子レートの見積もり(FLUKA)

Energy threshold [GeV]	Charged particle flux [$\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$]
10	0.40
100	0.20
1000	0.06

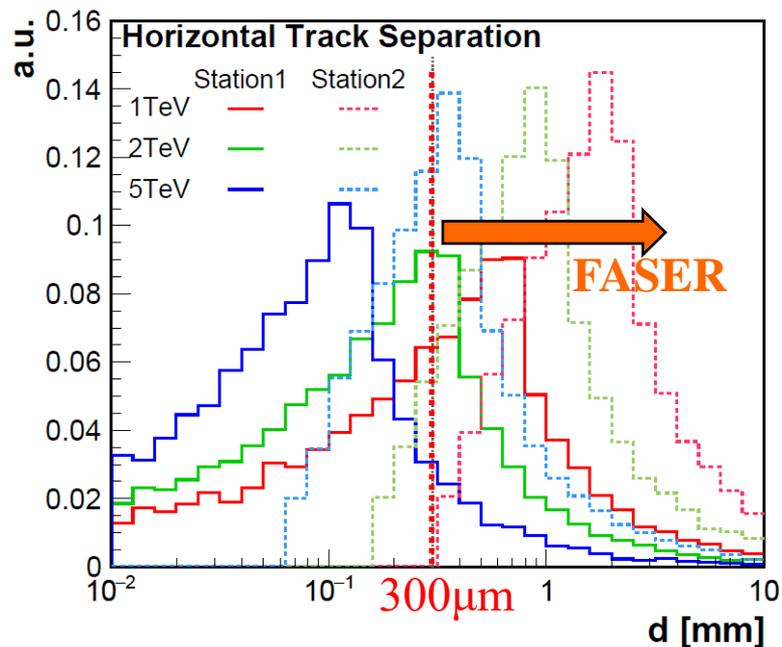


スペクトロメータへの要求性能

- 電子・陽電子の分離のために、0.55Tの永久磁石を使用する
- スペクトロメータには、A'が崩壊してできた電子・陽電子に対して300 μm 以上の分離能力を要求 ($mA' = 100 \text{ MeV}$)

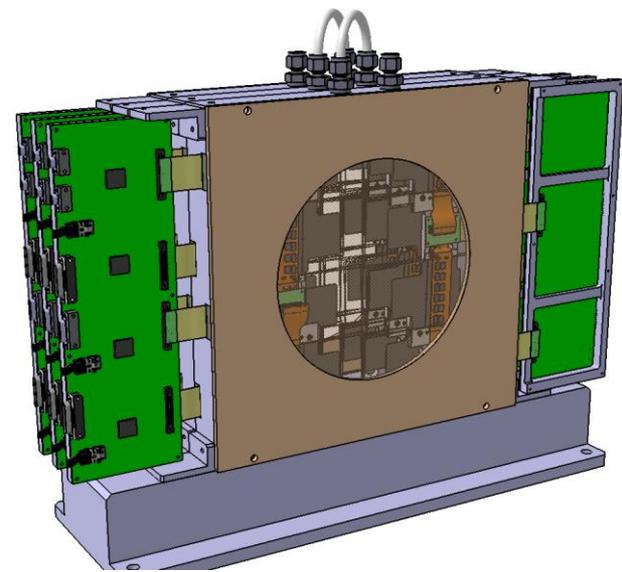
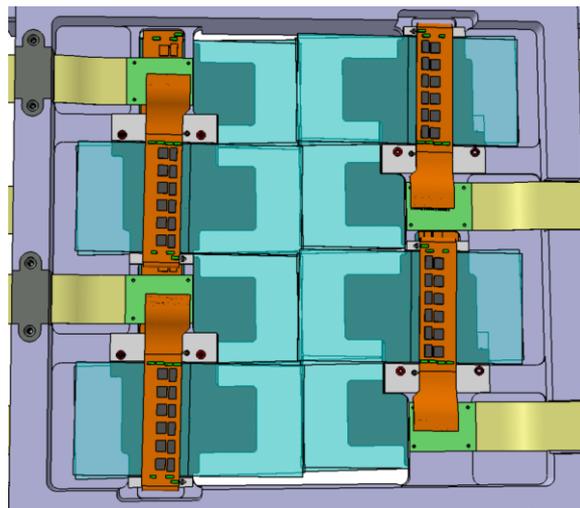
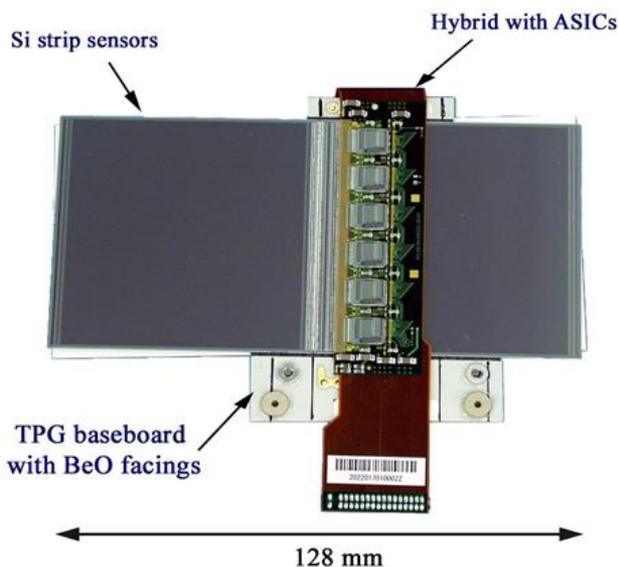
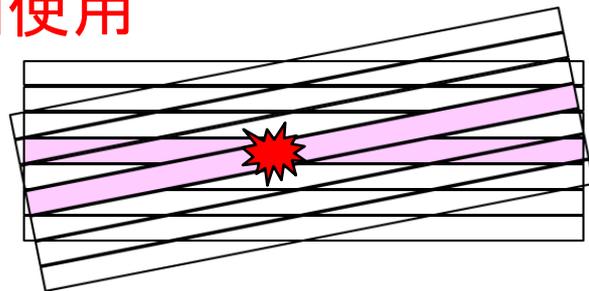
➡ シリコン・ストリップ検出器を飛跡検出器に使用

A'からの電子・陽電子の距離 @FASER



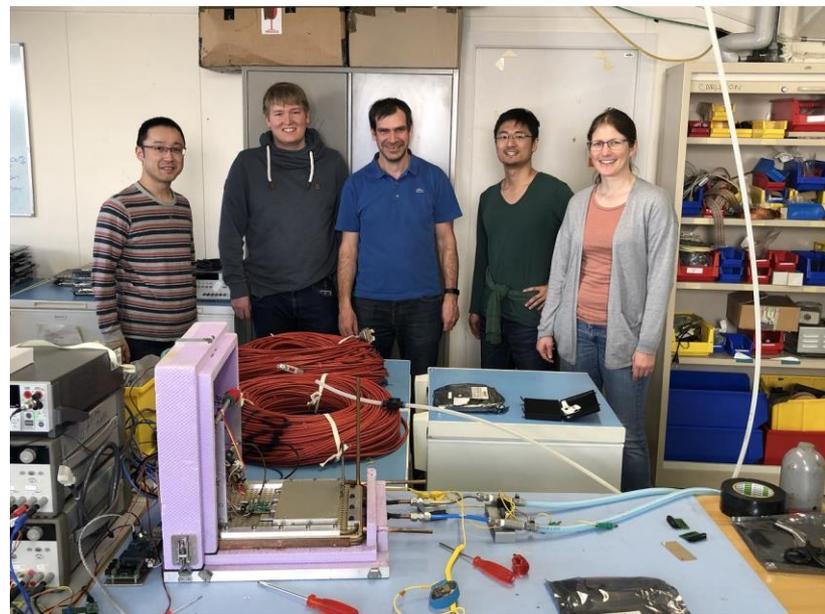
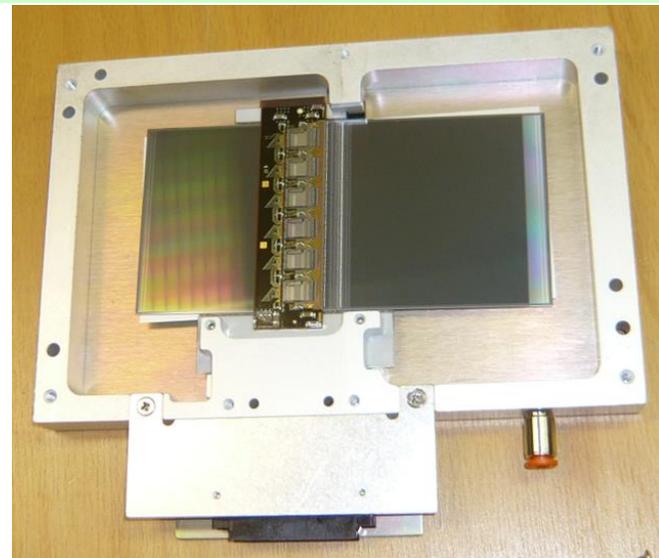
FASER飛跡検出器 (イントロ)

- ATLAS SCTバレル・モジュールのスペアを80個使用
 - ATLAS SCTグループが無償で提供
- ストリップ: 80 μ mピッチ、長さ12.8cm
- 飛跡検出器は全9レイヤー(3ステーション)で構成される
 - 1レイヤーは8SCTモジュールで、1ステーションは3レイヤー



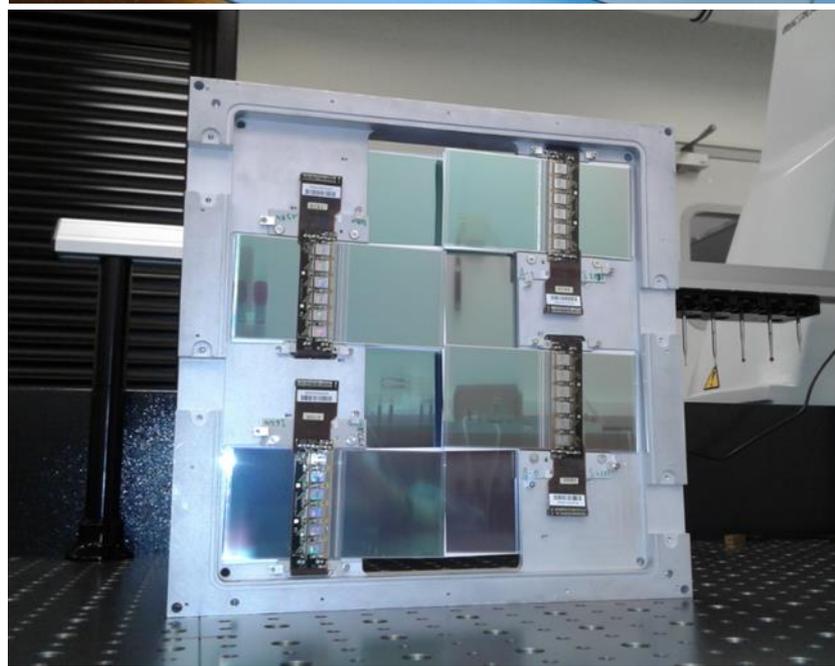
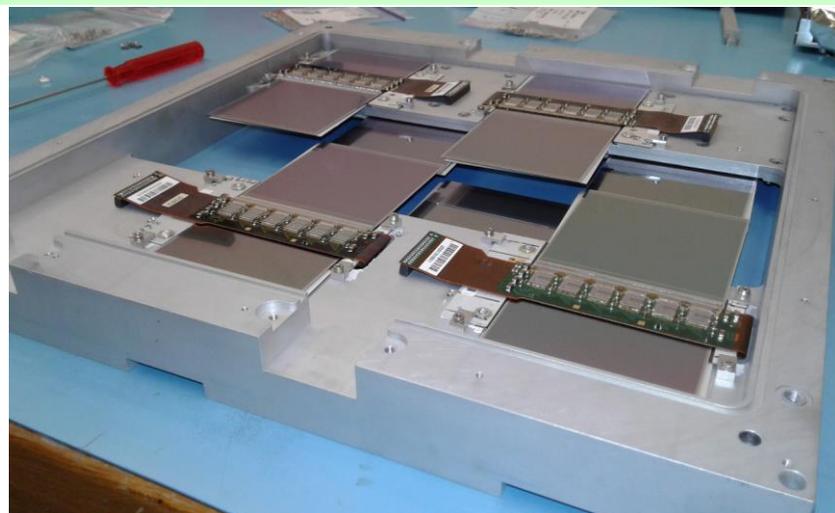
FASER飛跡検出器 (モジュール選別)

- ATLAS SCTバレル・モジュールのスペアは約200個あり、製造から20年が経っている
- FASER用に、最も性能の良い80モジュールを選び出さなければならない
- ケンブリッジ大学で開発された[データ収集システム](#)を用いて、性能評価試験を行った
- モジュール性能の経年変化は見られなかった
- 2019年春に80モジュールの選別を完了した



FASER飛跡検出器 (レイヤー製造)

- プロトタイプ・レイヤーを開発し、フレームの設計を最適化した
- 2020年7月から、実機レイヤーの製造と試験が進んでいる
- 2020年9月中に全9レイヤー(3ステーション)を製造する



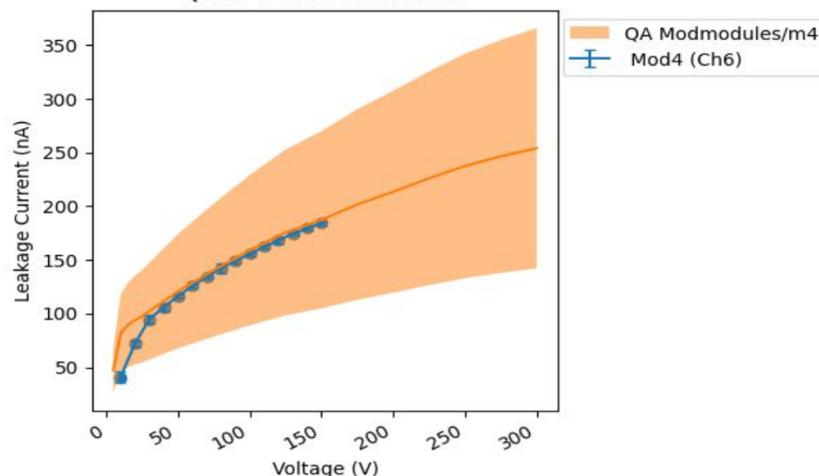
FASER飛跡検出器 (レイヤー試験)

モジュール選別の際の結果と比較して、性能の変化がないかを確認

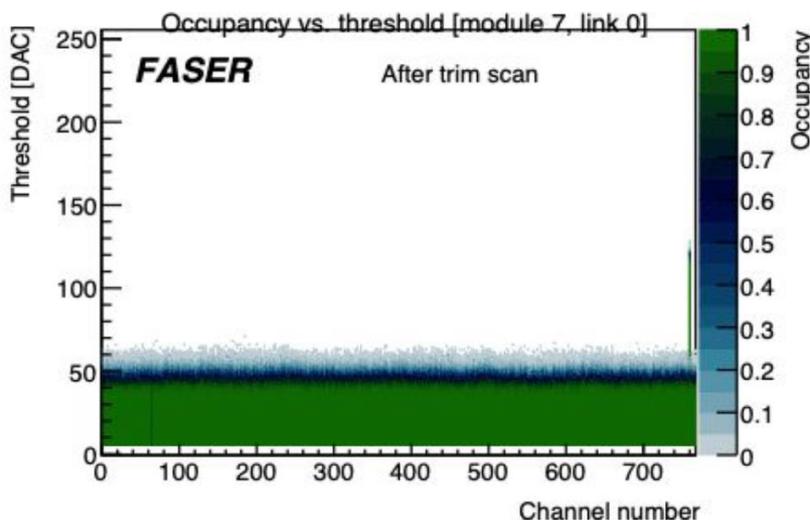
- センサーの印加電圧特性
- ノイズ測定
- 増幅率測定
- 不具合ストリップの特定

センサーにおける印加電圧と電流の相関

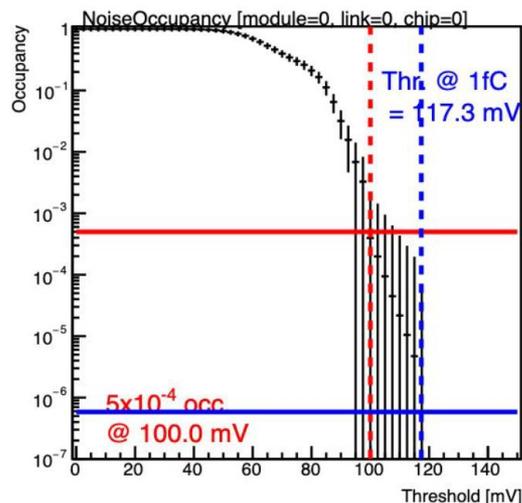
QA vs FSM IV Scan Mod4



各ストリップの閾値分布

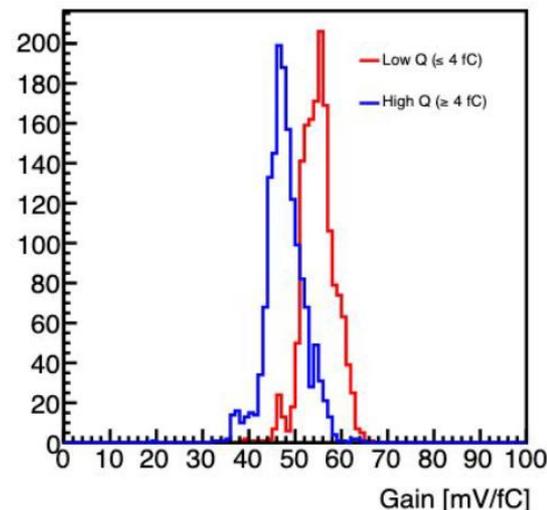


ノイズと閾値の相関



アンプの信号増幅率

Module0(20220170200803)

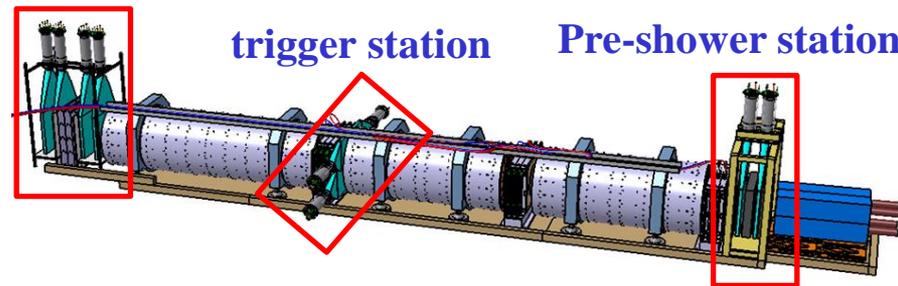


シンチレータ

veto station

trigger station

Pre-shower station



シンチレータは3ステーションある:

vetoステーション

鉛層を配置し、FASER上流からやってくる γ と荷電粒子をveto

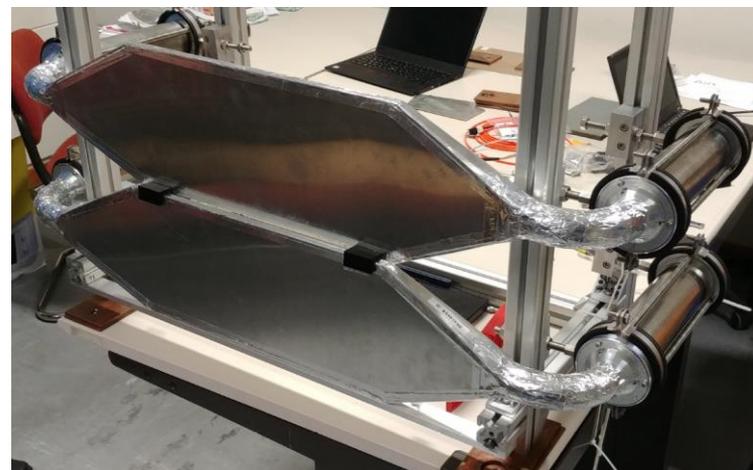
トリガー・ステーション

FASER内で生成された荷電粒子を取得するためのトリガーを発行

プレシャワー・ステーション

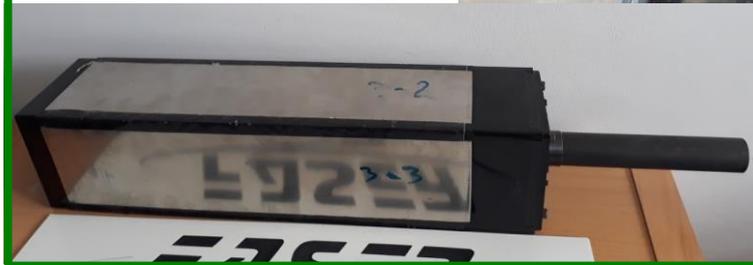
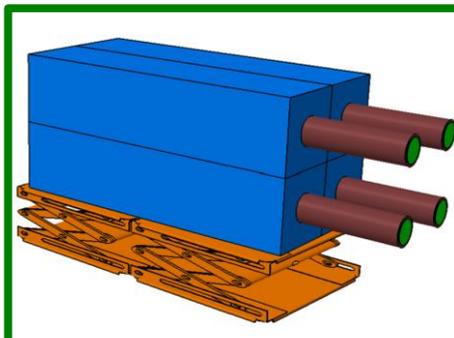
鉛層で γ シャワーを生成し、カロリメータ内で起こるニュートリノ事象との識別に使用

全てのシンチレータの開発を完了



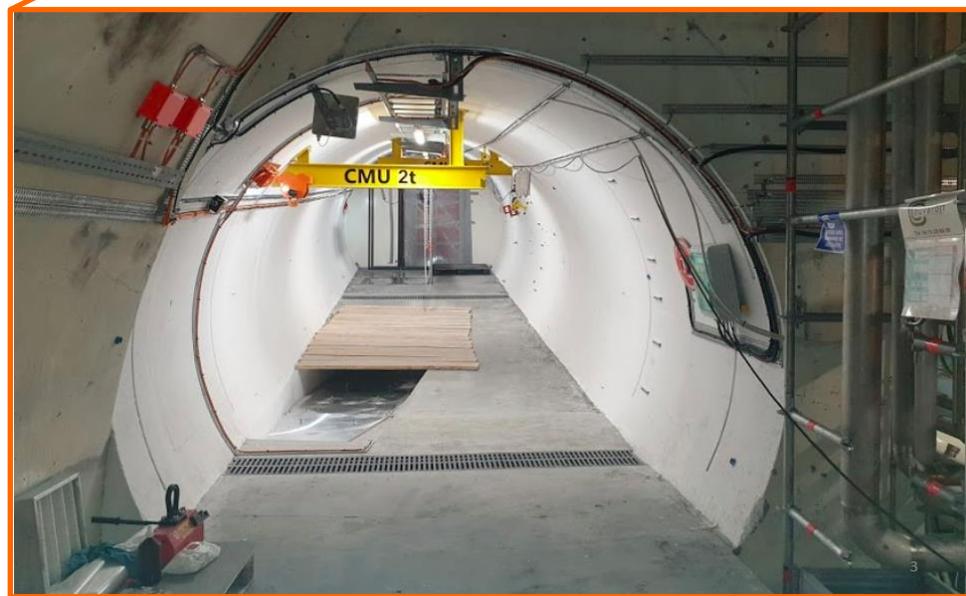
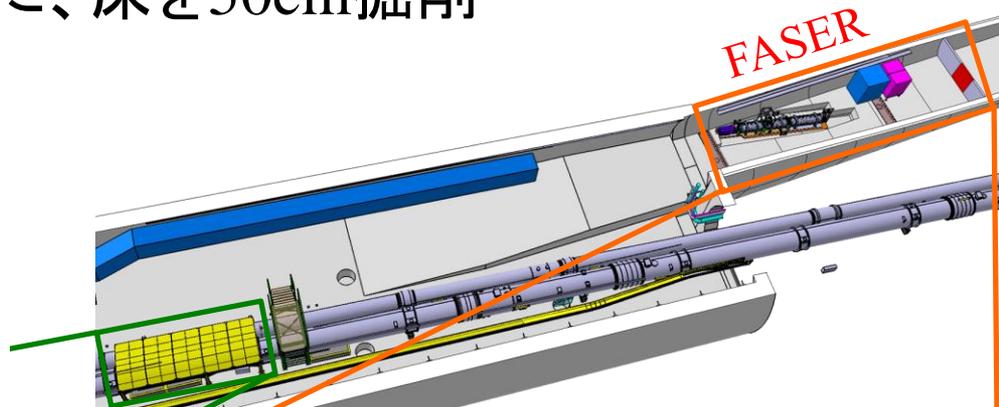
電磁カロリメータ

- 電磁カロリメータにはLHCbのスペアを4個使用
- 2mmの鉛と4mmのプラスチック・シンチレータのサンドイッチを66枚重ねた構造 (約25放射長)
- TeVのエネルギー損失に対して約1%のエネルギー分解能を持つ
- 組み立ては完了し、CERNのテストベンチで動作試験が行われている



FASER実験サイト

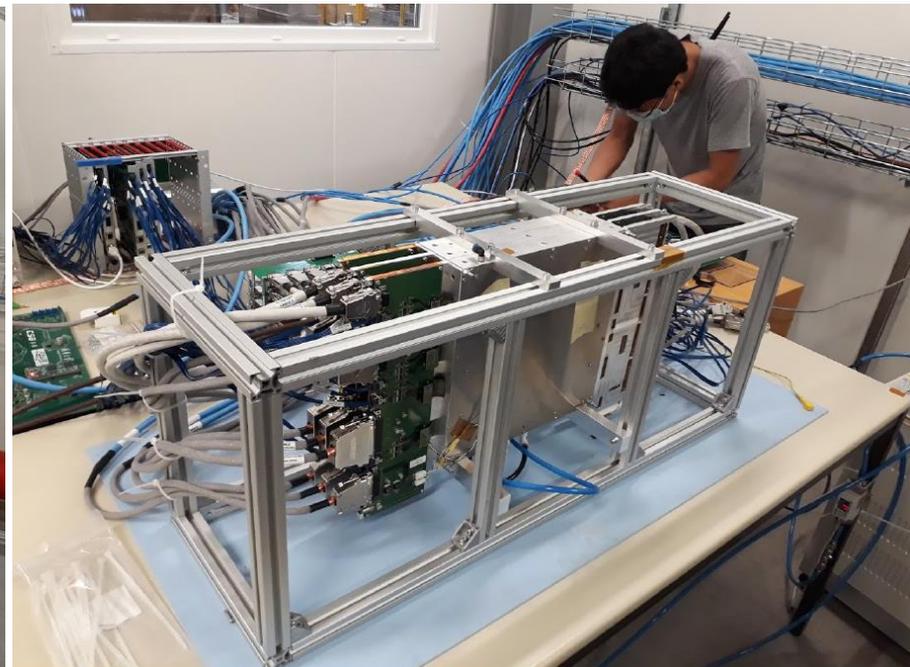
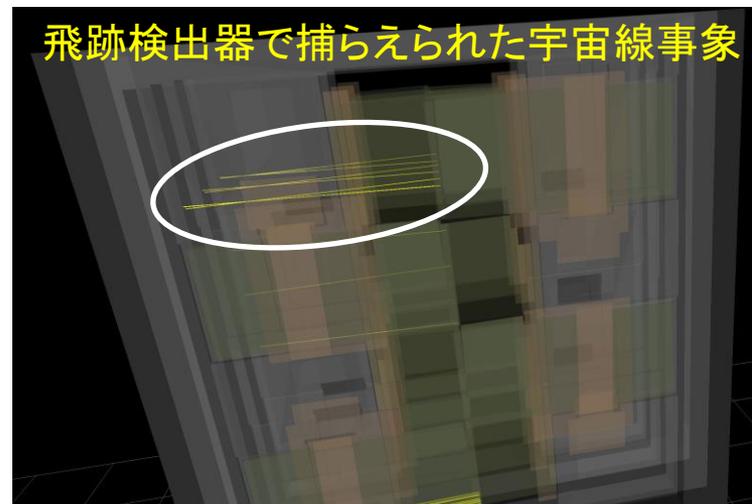
- ビーム軸上に検出器を置くために、床を50cm掘削
- LHC加速器のシールドも設置
- 2020年春に土木工事を完了
- 2020年秋に全ての設備を設置



地上コミッショニング

- 実験サイトにインストールする前に、地上でコミッショニングを行う
- 全ての検出器要素を並べて、実機を模した読み出し試験を準備中
- 宇宙線を使った飛跡検出も進行中

飛跡検出器で捕らえられた宇宙線事象

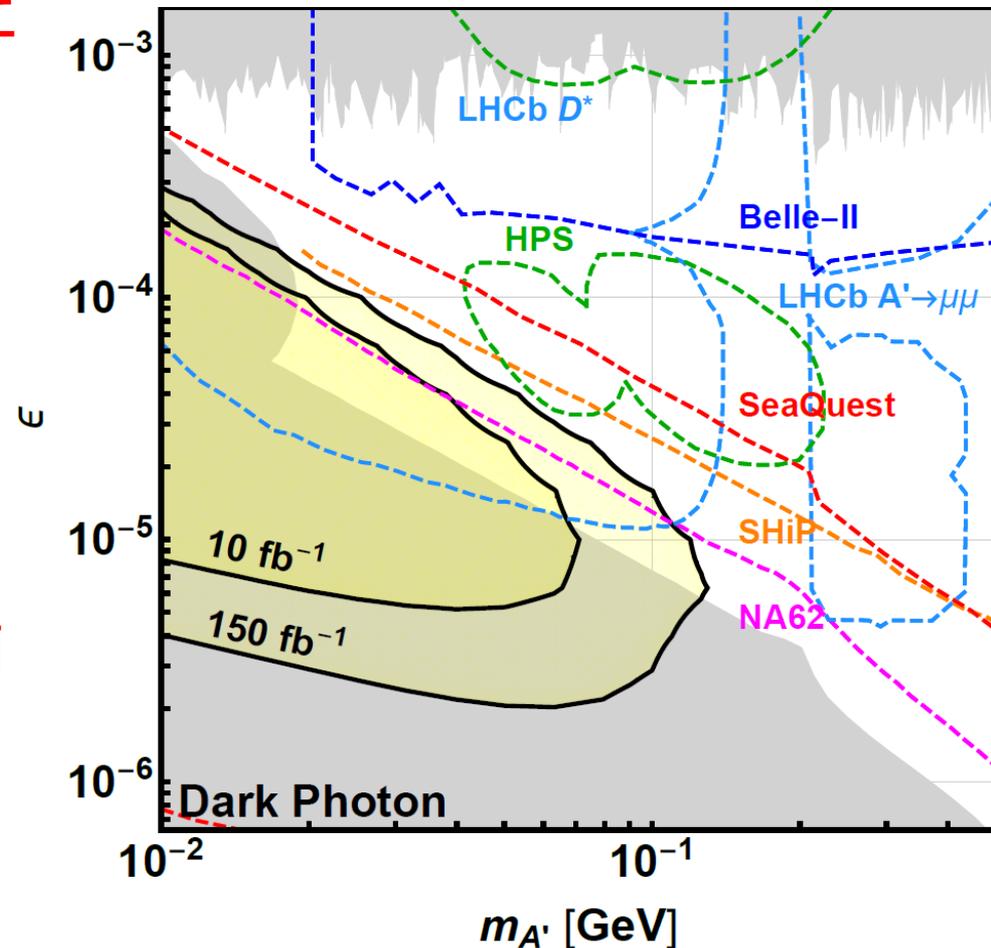


暗黒光子への感度

- これまでの実験で、弱い結合領域は排除されている
- **FASERは $10^{-4} \sim 10^{-5}$ の結合領域に感度を持っている**
- 2022年のデータ($\sim 20 \text{ fb}^{-1}$)だけでも、新しいパラメータ領域を探索できる
- LHCbとBelle IIは強い結合領域に感度を持つ

→ FASER、LHCb、Belle IIは相補的で、これらの結果を合わせると1GeV以下の探索領域をほぼカバーできる

暗黒光子に対する感度の見積り



新粒子探索の現状

FASERと同じ探索領域を持つ実験がいくつか提案されている

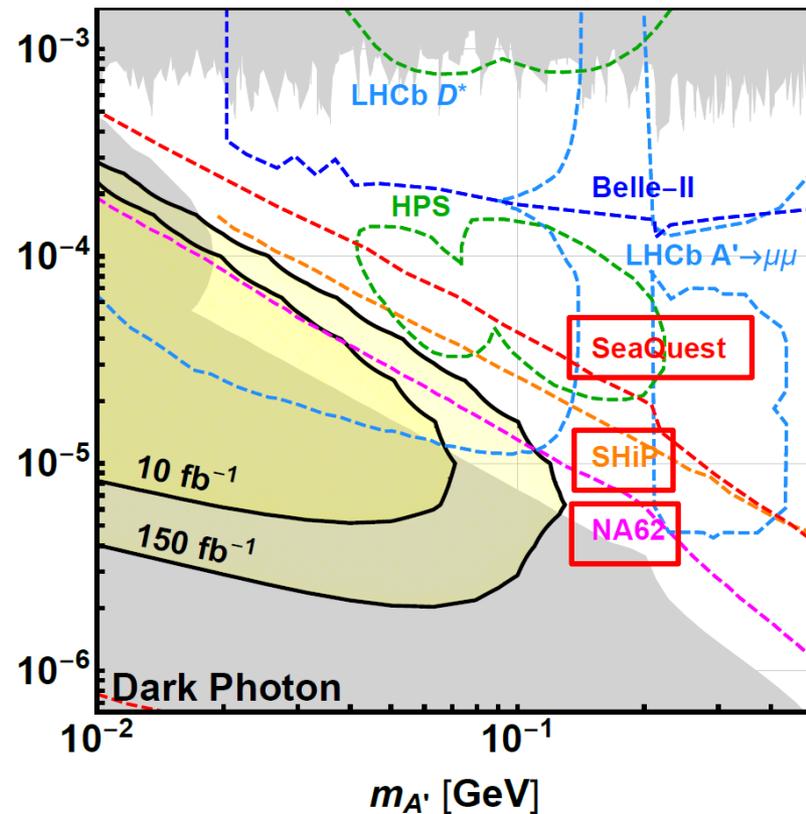
SHiP

- CERN-SPSからの陽子ビームを用いたビーム・ダンプ実験
- 強磁場と大規模なビーム・ダンプが必要

NA62/SeaQuest

- 他の物理測定のために稼働中 (K中間子/原子核実験)
- 検出器のアップグレードが必要

暗黒光子に対する感度の見積もり



どの実験も承認されておらず、予算の確保もできていない

→ FASERが現状で確実に稼働できる唯一の実験

FASER実験の歴史と今後の予定

- 2018年8月、LOI (Letter Of Intent)をLHC委員会に提出 ([arXiv:1811.10243](https://arxiv.org/abs/1811.10243)).
- 2018年11月、TP (Technical Proposal)をLHC委員会に提出 ([arXiv:1812.09139](https://arxiv.org/abs/1812.09139))
- 2019年3月、CERNに公式に承認された
- 検出器の建設と運転費用は、Simons財団とHeising-Simons財団が提供
- 2020年秋に検出器を実験サイトに設置する予定
- 2021年はコミッショニング作業
- データ取得はLHC Run3が始まる2022年に開始

FASERコラボレーション

8か国、19研究機関、65人で構成されていて、徐々にグループが拡大している



The University Of Sheffield.



KYUSHU UNIVERSITY



UC IRVINE

u^b UNIVERSITÄT BERN



Technion
Israel Institute of Technology



NAGOYA UNIVERSITY



UNIVERSITY of WASHINGTON



UNIVERSITÉ DE GENÈVE



מכון ויצמן למדע
WEIZMANN INSTITUTE OF SCIENCE



KEK



UNIVERSITY OF OREGON

JOHANNES GUTENBERG UNIVERSITÄT MAINZ



清華大學
Tsinghua University

SLAC
NATIONAL ACCELERATOR LABORATORY

UNIVERSITÄT



ROYAL HOLLOWAY UNIVERSITY OF LONDON

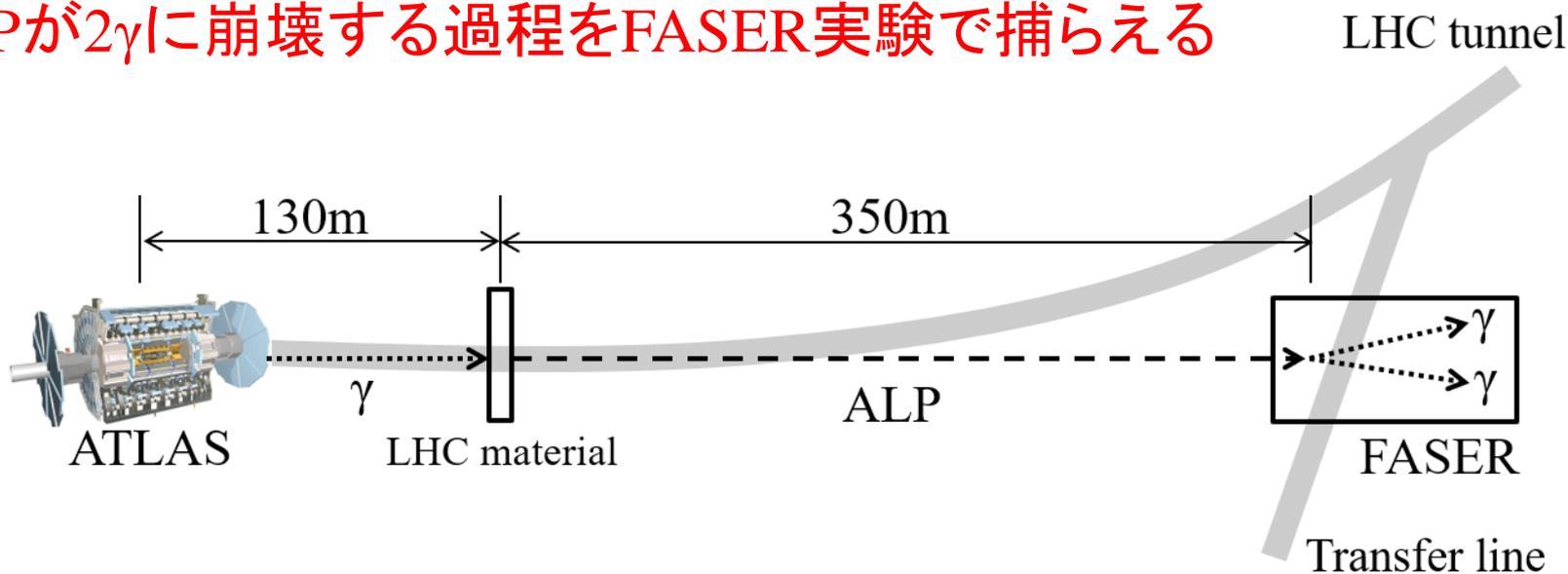


UNIVERSITY OF LIVERPOOL

FASERアップグレード計画

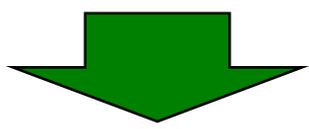
ALP探索のためのピクセル検出器(1)

- 暗黒光子に加えて、ALP(Axion Like Particle)もFASER実験で重要な探索プログラムである
 - ALPはSM1重項の擬スカラーとして現れ、SM粒子と次元5の相互作用を介して相互作用する
- ALPはATLASビーム衝突点から130m下流にあるLHC要素と γ のPrimakoff相互作用によって作り出される
- **ALPが 2γ に崩壊する過程をFASER実験で捕らえる**



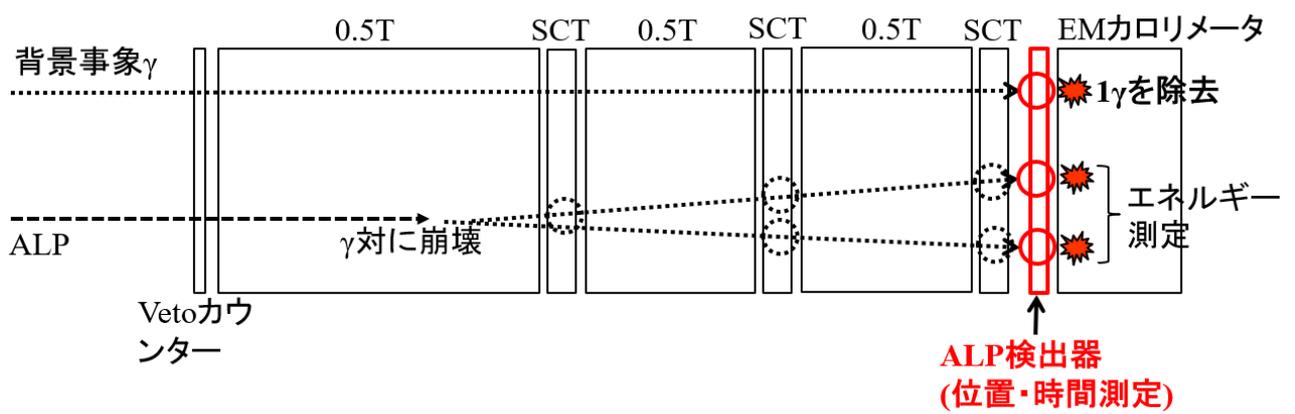
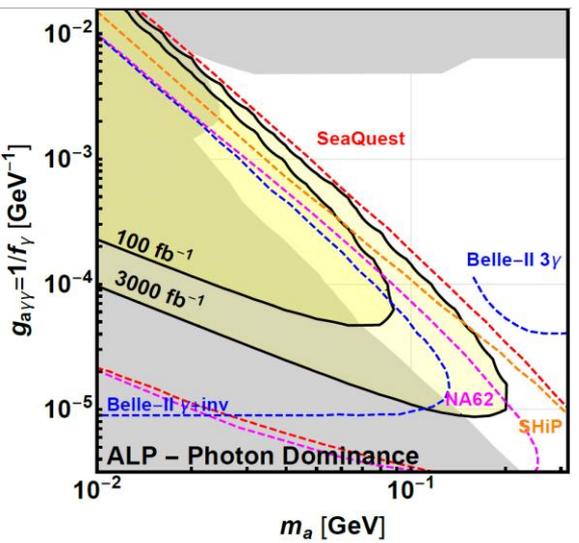
ALP探索のためのピクセル検出器(2)

- ALP探索のためには近接した 2γ を識別できなければいけない
- FASERカロリメータはセグメント化されておらず、現状ではALPからの 2γ を識別できない
- もしALPからの 2γ を識別できれば、Run3のデータでALPの未探索領域を開拓できる



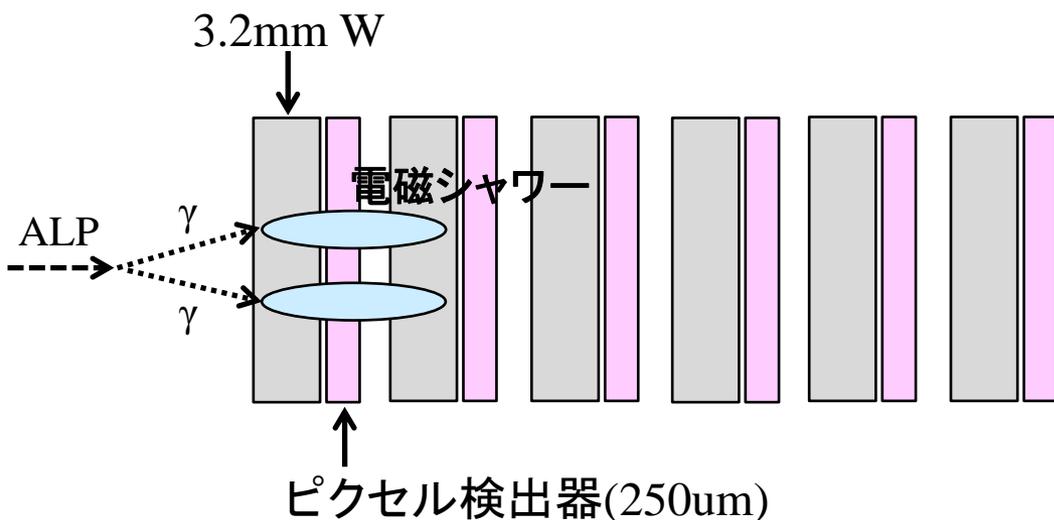
ピクセル検出器を用いたプレシャワー検出器を開発することになった

ALP $\rightarrow 2\gamma$ を特定可能な場合のFASER実験の探索感度

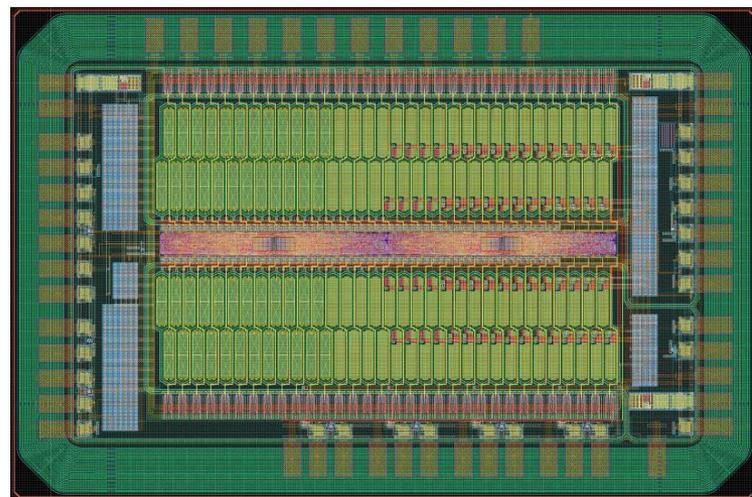


ALP探索のためのピクセル検出器(3)

- BiCMOSモノリシック型ピクセル検出器を用いたプレシャワ検出器
(「ピクセル + タングステン」の6層)の開発が進んでいる
 - ピクセル・サイズ: $50 \times 50 \text{ um}^2$ 、時間分解能: 50 ps
 - ジュネーブ大、KEK、九州大、マインツ大学のプロジェクト
- 2020年秋にピクセル・センサーのプロトタイプが完成
- LHCの最終年度である2024年までに導入する計画



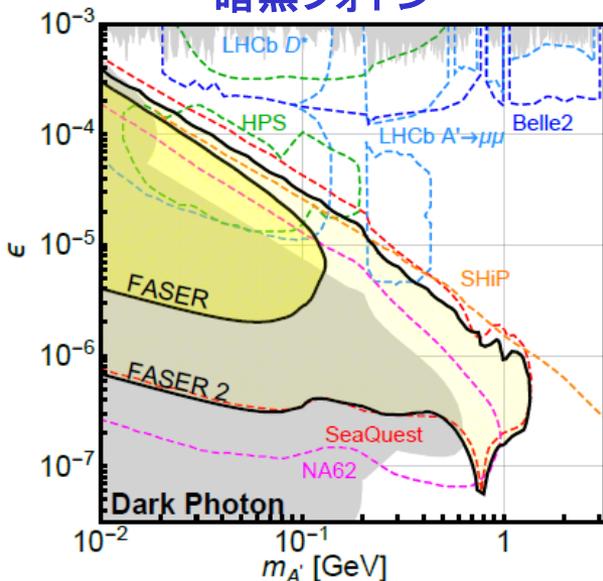
プロトタイプ・センサーのレイアウト



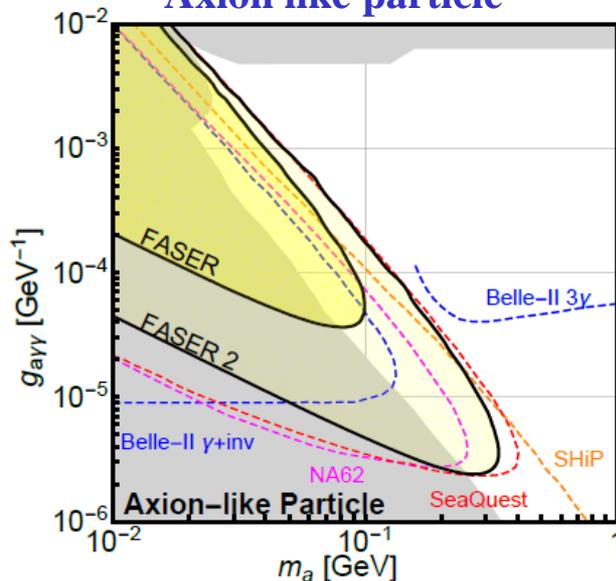
FASER2 @ HL-LHC

- FASER2はHL-LHCのためのアップグレード計画
- 検出器を大型化することで、感度の向上を目指す
 - 半径: 1m (FASERは10cm)、崩壊領域の長さ: 5m
- FASER2は暗黒セクターについて、さらに探索領域を拡張することができる

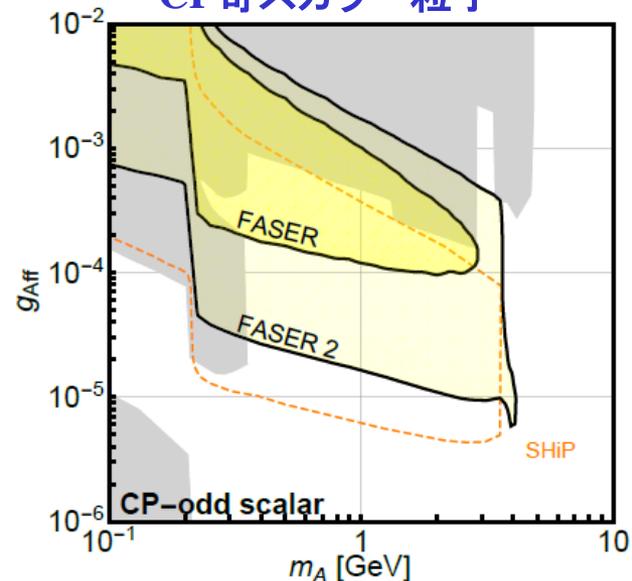
暗黒光子



Axion like particle



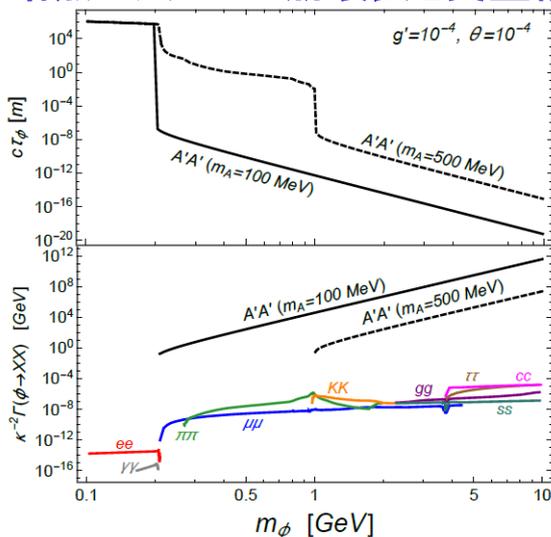
CP奇スカラー粒子



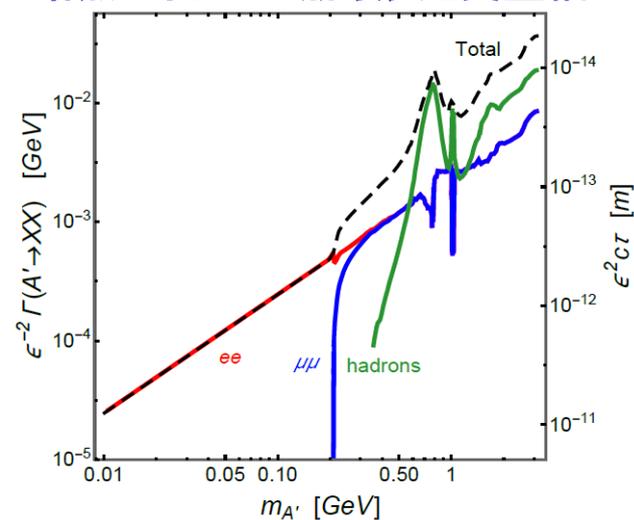
暗黒ヒッグス崩壊からの暗黒光子探索 (1)

- 新しいU(1)対称性に関わる暗黒ヒッグス(ϕ)は、対称性の破れによって真空期待値を持ち、暗黒光子(A')が質量を持つ
- ϕ はH- ϕ 混合を介してメソンの崩壊(特にBメソン)から生成可能で、 $m_\phi \gg m_{A'}$ の場合、すぐに A' 対に崩壊
- A' は γ との混合を介してレプトン対に崩壊する
- メソン崩壊などからの直接生成される A' と合わせて信号事象として現れる

暗黒ヒッグスの崩壊長と質量幅



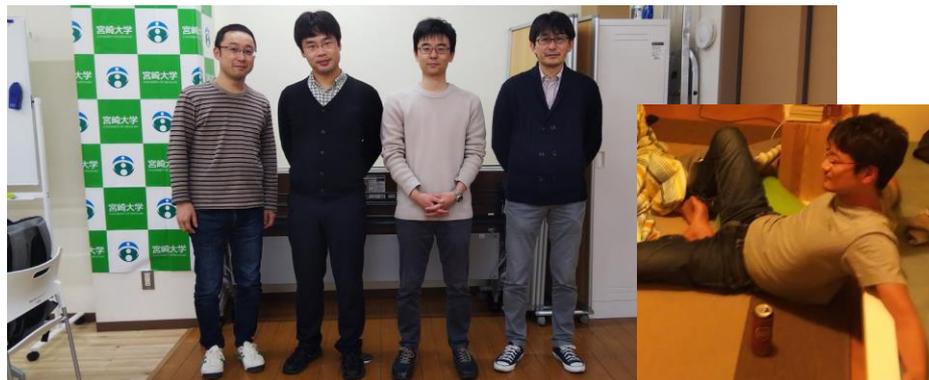
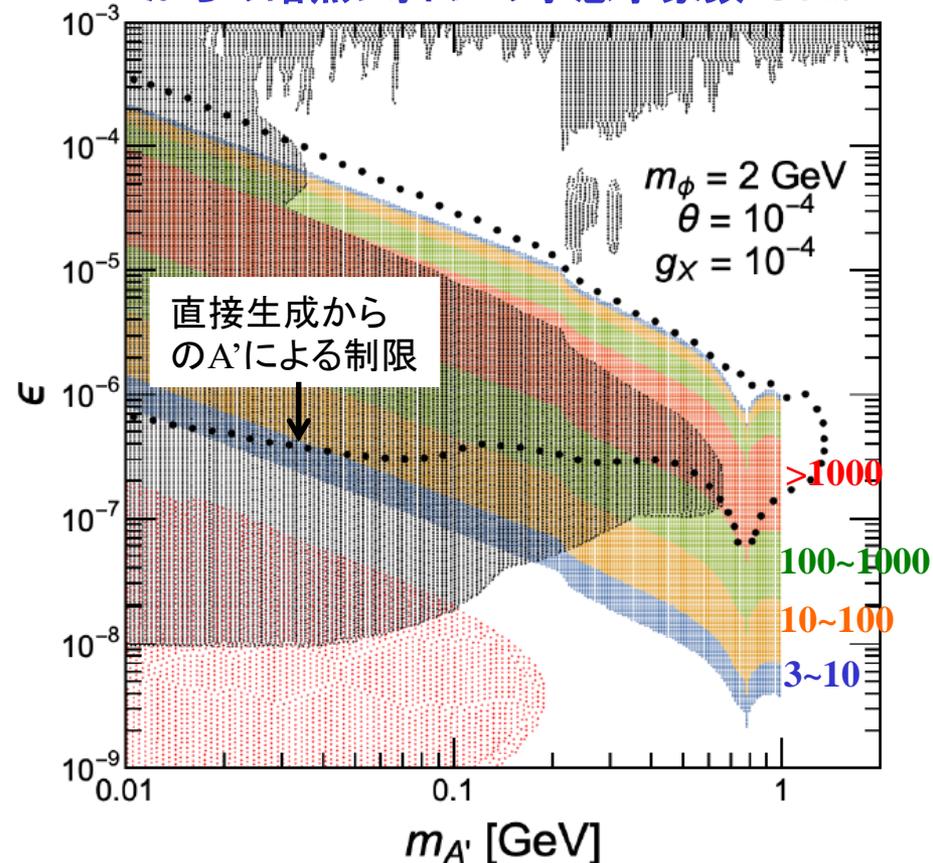
暗黒光子の崩壊長と質量幅



暗黒ヒッグス崩壊からの暗黒光子探索 (2)

- $(\phi \rightarrow A'A')$ からの2つの A' が、FASER検出器内で崩壊する事象数を評価($m_\phi = 2 \text{ GeV}$, $\theta_{\phi-H} = 10^{-4}$, $g_{\phi-A'} = 10^{-4}$ を仮定)
- FASER2だと $(\phi \rightarrow A'A')$ 事象が小さい結合領域に寄与することを確認
 - パラメータの取り方でFASERでも感度がある可能性がある
- 浅井さん(東大)、荒木さん(奥羽大)、音野君、下村さん(宮崎大)との共同研究([arXiv:2008.12765](https://arxiv.org/abs/2008.12765))

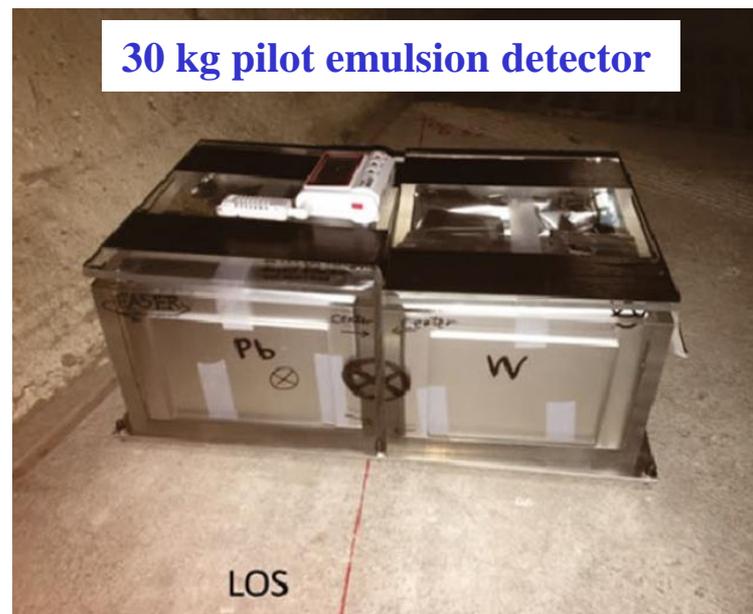
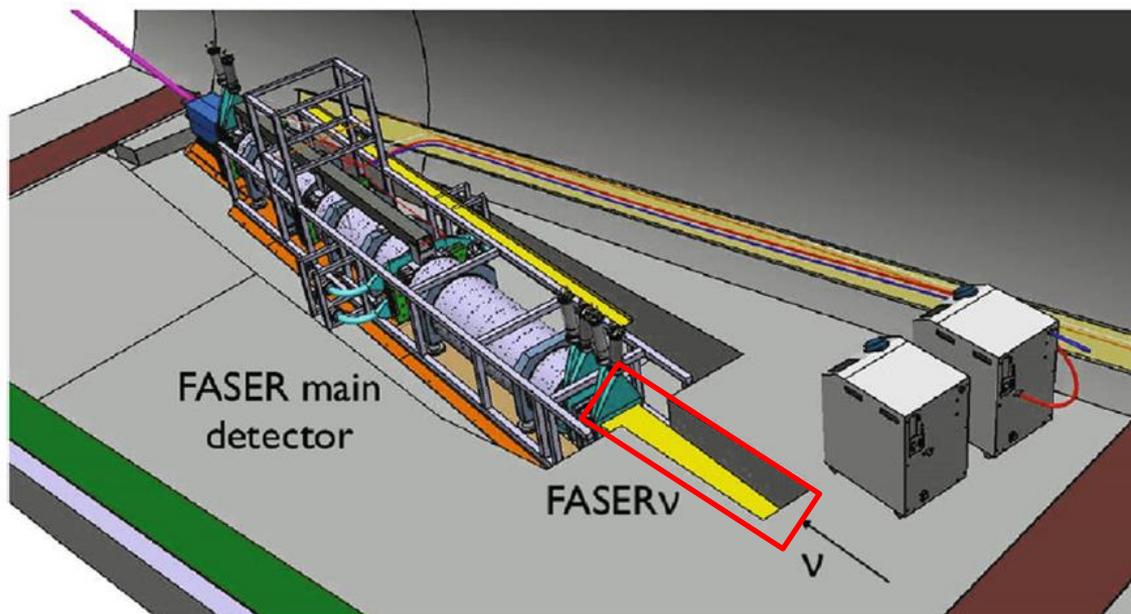
FASER2で観測される暗黒ヒッグス崩壊からの暗黒光子の予想事象数 @3fb⁻¹



FASERでのニュートリノ測定

FASER ν

- FASER ν は、ATLASでの陽子・陽子衝突で生成された高エネルギー・ニュートリノを測定するプロジェクト (2022年開始予定)
- エマルション・フィルムと1mm厚のタングステン・プレートのサンドイッチを1,000枚をFASER検出器の手前に設置(1.2 t, 285 X_0)
- SCT飛跡検出器もエマルションとFASER検出器のインターフェースとして使用

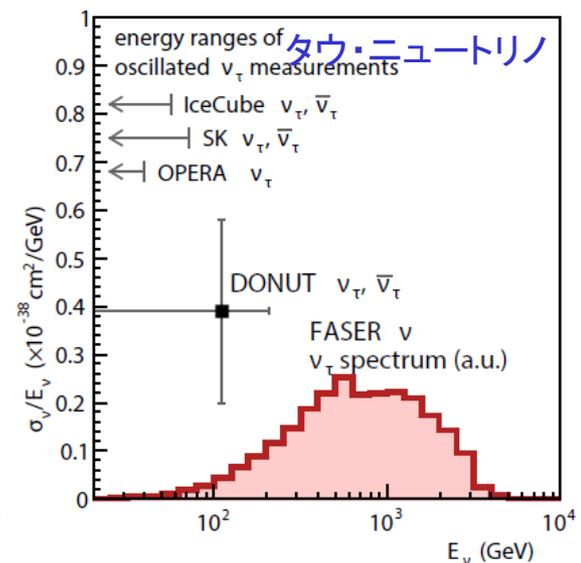
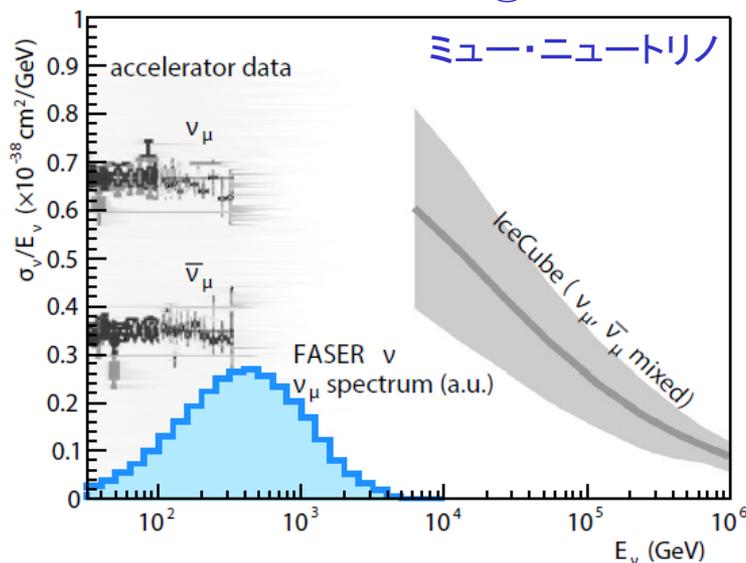
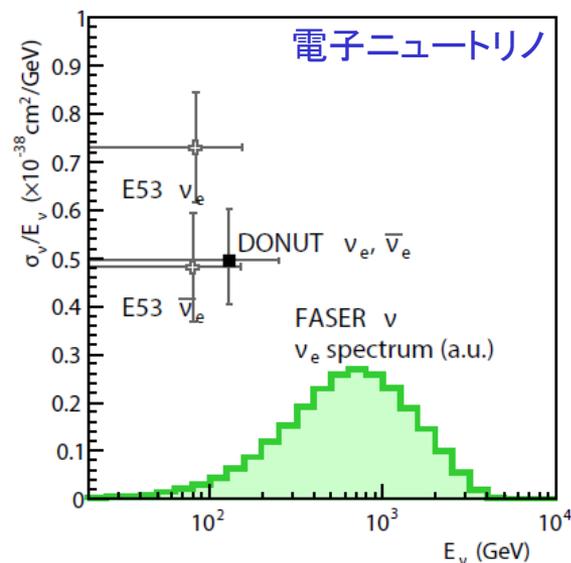


FASER ν でのニュートリノ測定 (1)

- TeV領域のニュートリノ反応断面積の測定
 - 加速器・大気ニュートリノ実験とIceCubeで測定されていないエネルギー領域
- エマルジョン検出器の高い位置分解能を活用して、全てのニュートリノ・フレーバーを測定

	CC反応数 @150fb $^{-1}$
$\nu_e + \bar{\nu}_e$	$\sim 1.3 \times 10^3$
$\nu_\mu + \bar{\nu}_\mu$	$\sim 2.0 \times 10^4$
$\nu_\tau + \bar{\nu}_\tau$	~ 20

ニュートリノ・エネルギー分布 @FASER ν

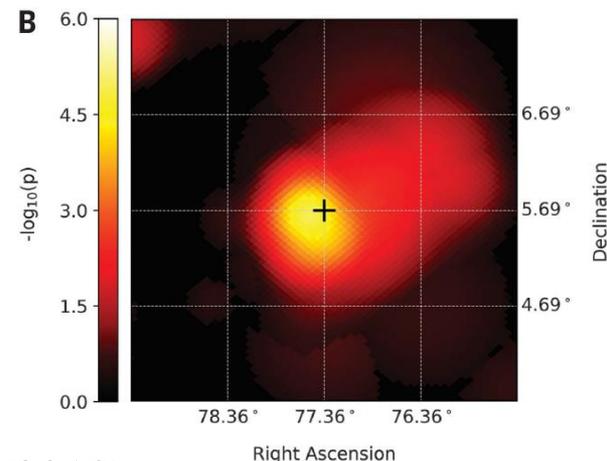
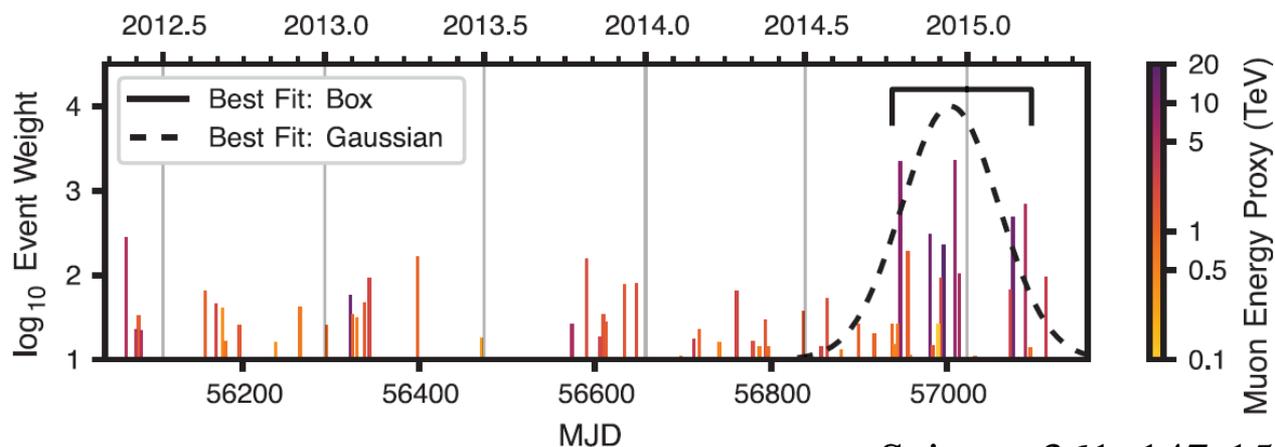


FASER_vでのニュートリノ測定 (2)

- $sv \rightarrow cl$ 反応を用いて、原子核中に含まれるsクォークの割合の測定
- 前方方向の軽いメソン生成に関するハドロン相互作用の測定
 - 現状ではシミュレーションの不定性が大きい
 - 特に、陽子・陽子衝突におけるcクォークの生成断面積の情報が、IceCubeなどの宇宙線観測の背景事象の見積もりに重要

IceCubeで観測されたブレーザーTXS 0506+056方向のニュートリノ事象の事象重みとエネルギー

高エネルギー・ニュートリノ事象のp-valueとブレーザーTXS 0506+056の位置(+印) @IceCube



まとめ

- FASERはATLAS陽子・陽子衝突点で発生した軽い新粒子を探索するための新しいLHC実験(詳しくは、[こちら](#)を参照してください)
- 検出器要素の開発が進んでおり、2020年秋に実験サイトに設置する
- 物理データの取得はLHC Run3が始まる2022年に開始
- FASERは暗黒セクターの未探索領域の開拓において、LHCbとBelle IIと相補的な実験である
 - 1年目のデータ($\sim 20 \text{ fb}^{-1}$)だけでも、新しい探索領域を開拓できる
- ALP探索のためにBiCMOSモノリシック型ピクセル検出器を用いたプレシャワー検出器の開発が始まっている
- HL-LHCのために検出器の大型化計画(FASER2)も進行中。
- 姉妹実験であるFASER_vでは、TeV領域の高エネルギー・ニュートリノ反応断面積の測定を目指している

SnowmassのためのLOIの宣伝

- Snowmassでの議論のインプットとして、FASER2を含む Forward Physics Facilityに関するLOIを準備中
- 誰でも参加可能ですので、名前を載せてくれる人を募集中
 - どれだけの方がプロジェクトをサポートしているかを示すために重要

興味がある方はこちらをクリック↓

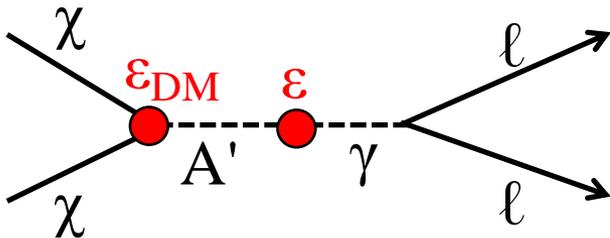
https://docs.google.com/forms/d/e/1FAIpQLSevONgDGzrJ3SVCXLh_3jxPSNuGPG7FkKh3fP0If4uEN6h_Lw/viewform

Backup

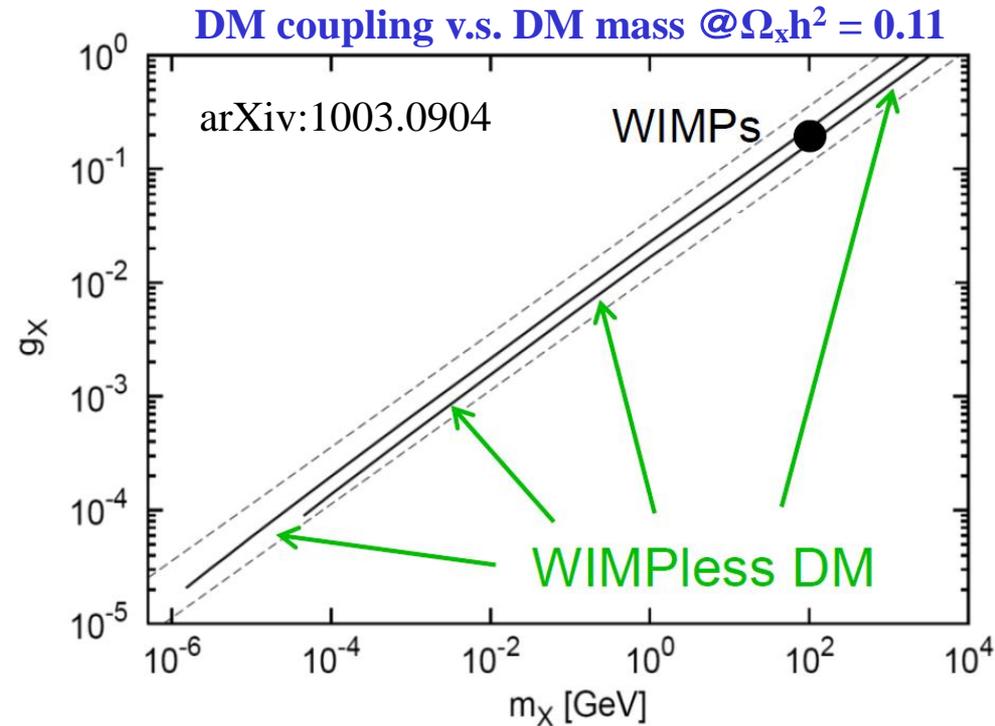
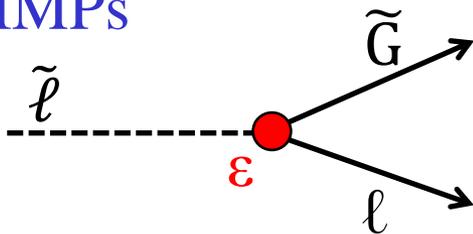
Dark matter & New light particles

Several new physics models can reproduce observed DM density with thermal relic abundance of new particles.

WIMPless miracle



SWIMPs

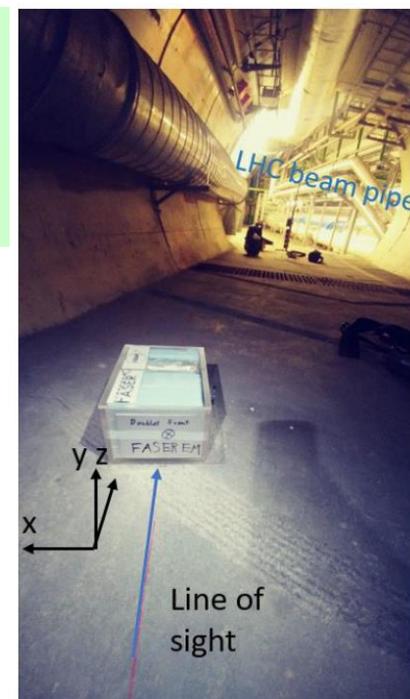


	Mass	Coupling
WIMP miracle	O (100 GeV)	$\epsilon \sim 1$
WIMPless miracle	MeV ~ GeV	$\epsilon_{DM} \sim 1, \epsilon \ll 1$
SIMPs	O (100 GeV)	$\epsilon_{DM} > 1, \epsilon \ll 1$
SWIMPs	O (100 GeV)	$\epsilon \ll 1$

Beam background & Radiation

Beam background

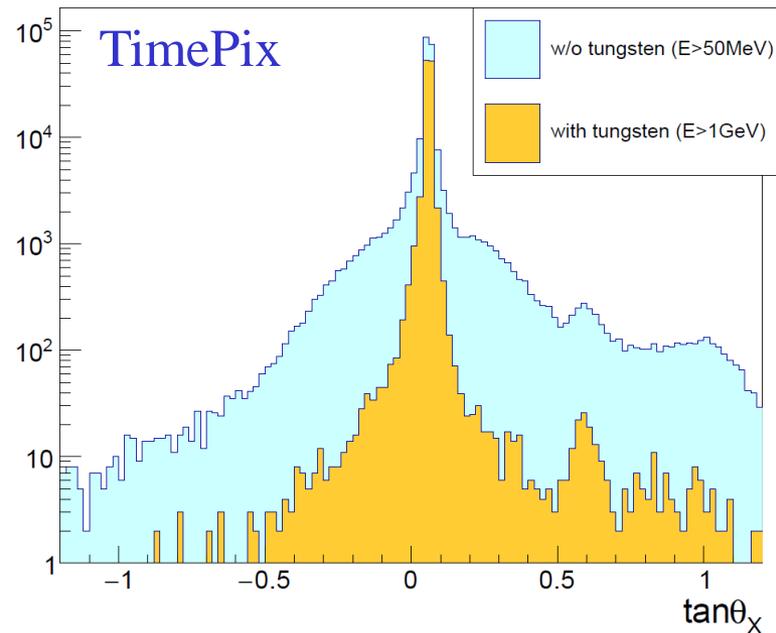
- The emulsion detector and TimePix beam loss monitor were installed at TI12 in 2018 to measure particle flux.
- The results were consistent with FLUKA expectation.
- Detailed study is ongoing.



Radiation

- FLUKA expectation was confirmed by measurement with BatMon detector:
 - $<5 \times 10^{-3}$ Gy/year
 - $<5 \times 10^7$ 1 MeV n_{eq} /year
- **FASER does not need radiation hard electronics.**

Angular dist. of beam BG @ TI12



FASER Calorimeter

- FASER calorimeter will be used for measuring EM energy, electron/photon identification and creating trigger.
- 4 spare LHCb outer ECAL modules will be used.
 - Thanks to LHCb for letting us use these modules!
- 66 layers of lead/scintillator (25 radiation length), light out by wavelength shifting fibers.
- ~1% energy reso. for 1TeV electrons.
- The performance of the modules was checked already with strong support from Y. Guz!



Measurement in FASER QA

