

LHC

Long-Lived Particles

澤田 龍

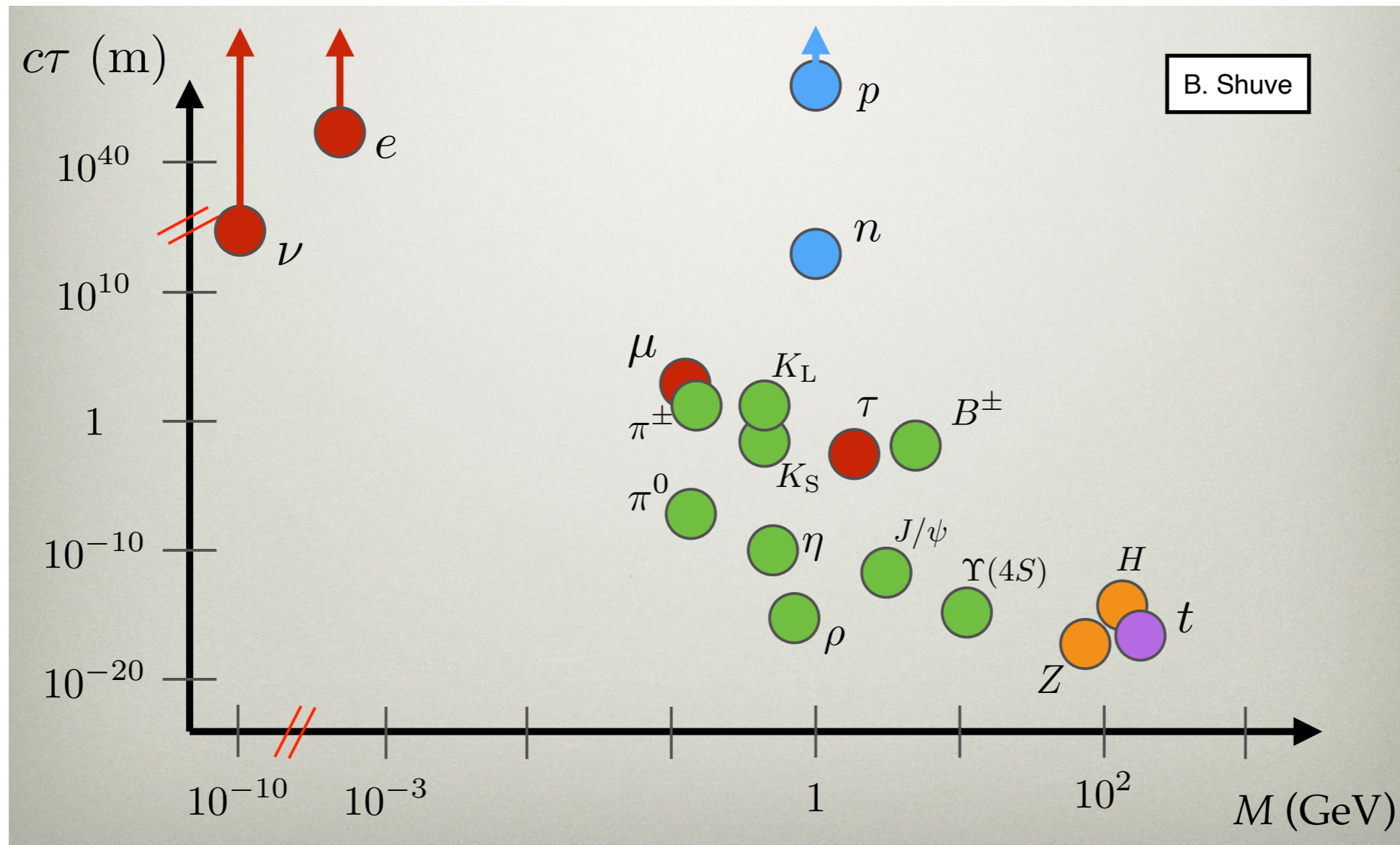
東大ICEPP

新テラスケール研究会

2020年 8月11—12日



長寿命粒子



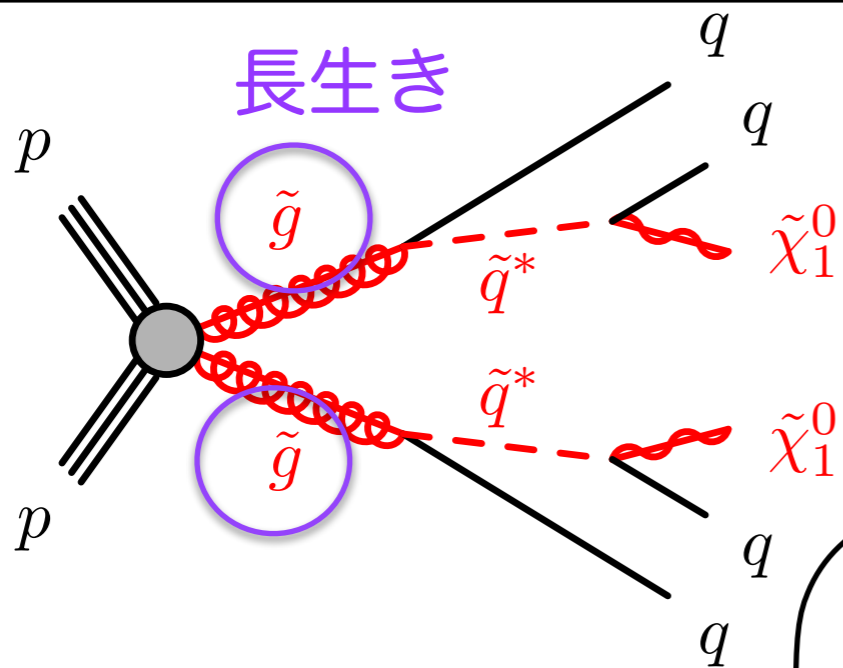
素粒子は色々な理由で長い寿命を持つ

崩壊を媒介する粒子が重い, 結合が弱い, 終状態の位相空間が小さい...

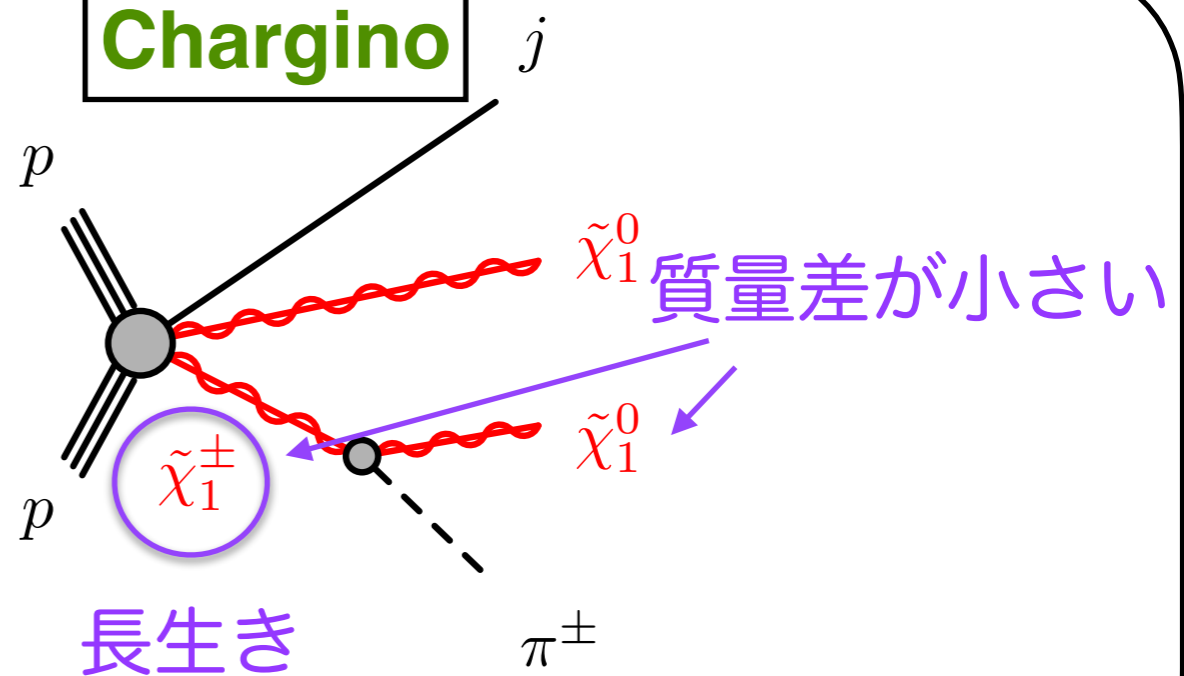
新粒子も同様に寿命が長い可能性

例 :SUSYの長寿命粒子

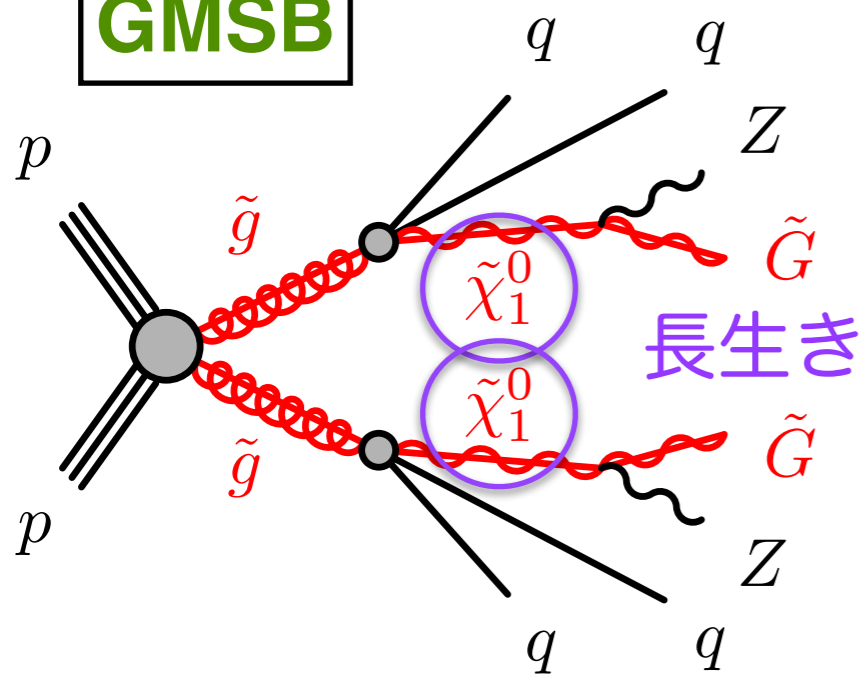
Heavy squark (Split SUSY)



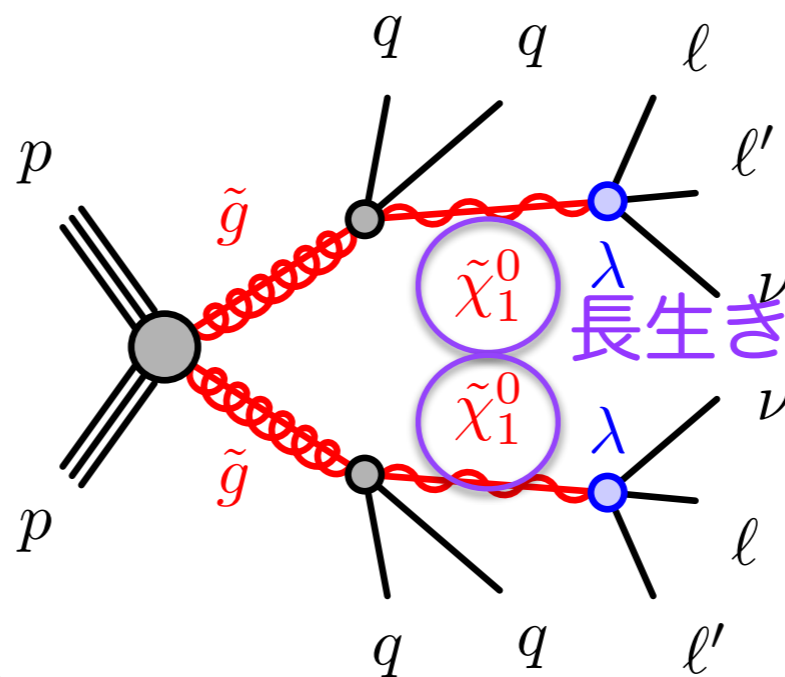
Chargino



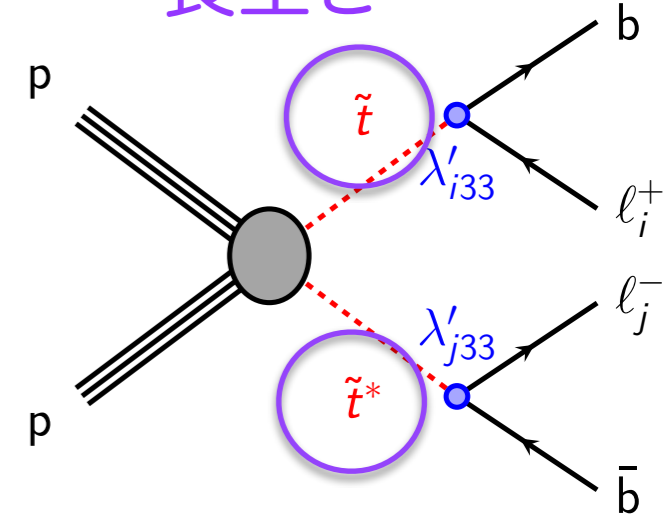
GMSB



R-parity violation

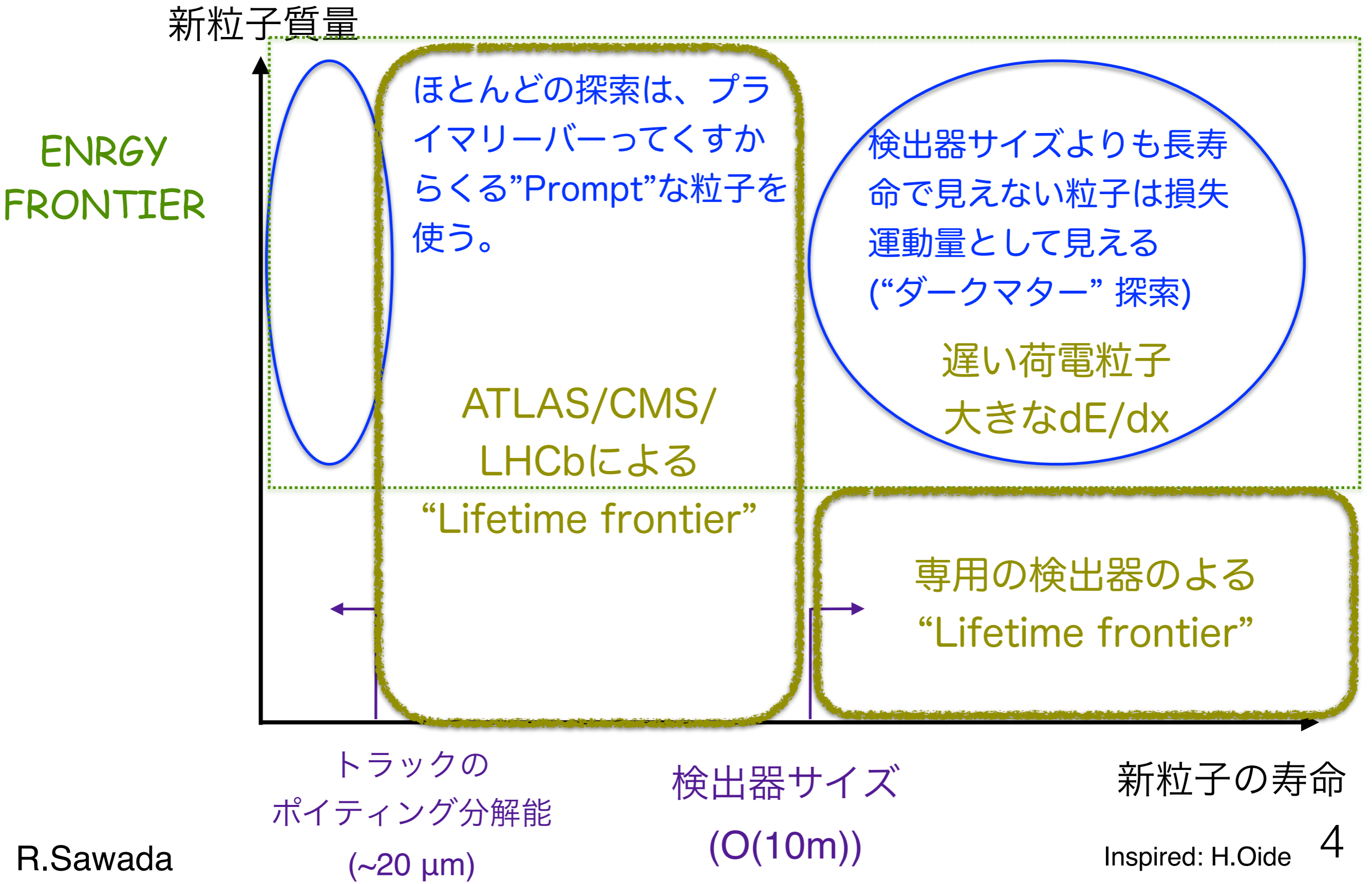


長生き



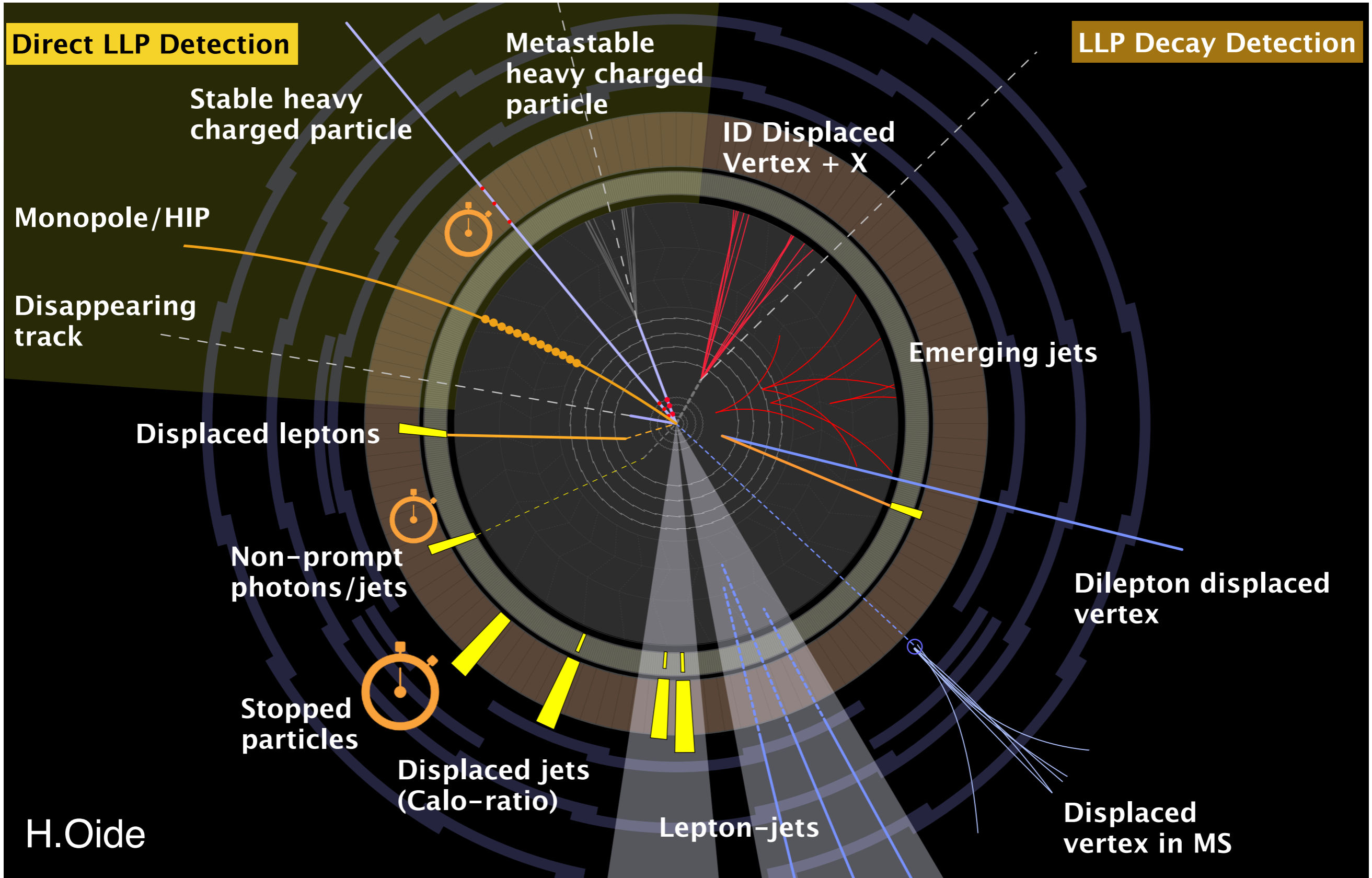
SUSY以外でも: HNL, dark photon, ALP...

LHCにおける”Lifetime frontier”



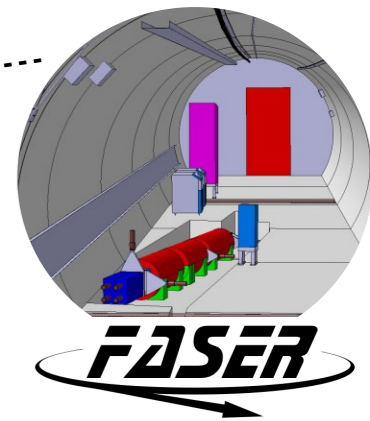
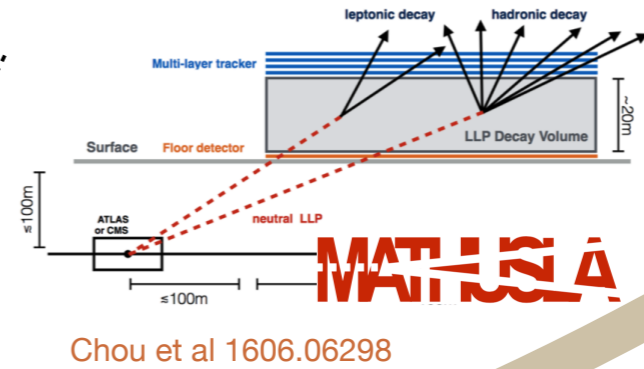
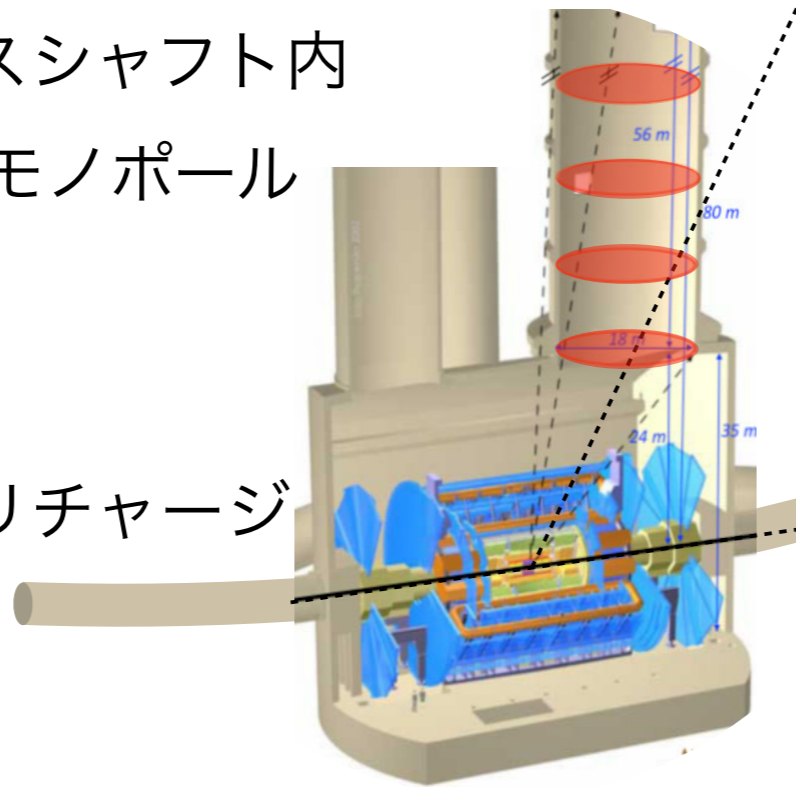
長寿命探索

位置、時間、速さが特徴的

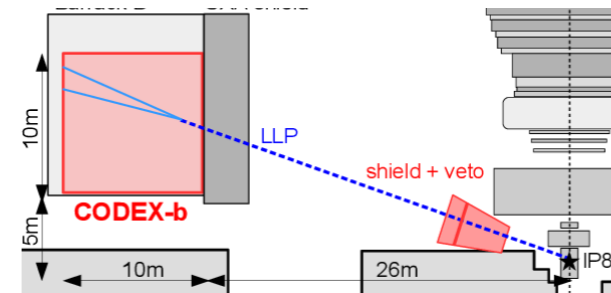


LHCでの専用検出器

- CODEX-b:** LHCb付近
- FASER:** ATLAS IPから~500 m、前方
- MATHUSLA:** CMSの地上検出器
- ANUBIS:** ATLASサービスシャフト内
- MoEDAL:** LHCb付近で、モノポール
- NA62:** 中性LLP探索
- SHiP:** ビームダンプ
- milliQan:** CMS付近でミリチャージ



Feng, et al 1710.09387



CODEX-b

Gligorov et al 1708.09395

ATLAS, CMS LHCbからも多くの人が、これらの実験に参加

Bauer, OB, Lee, Ohm 1909.13022

FASER

日本からも、KEK、名古屋、九大から参加

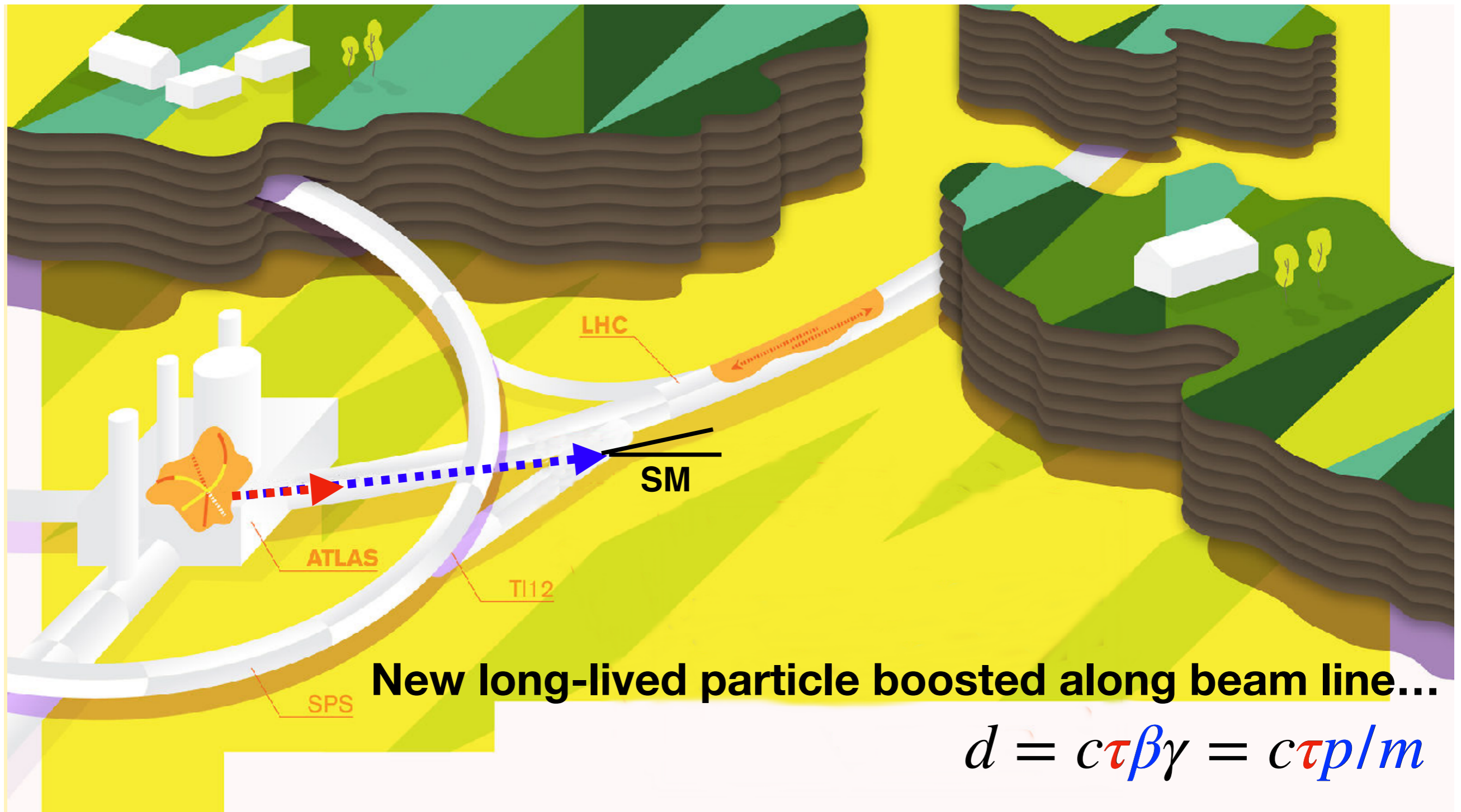
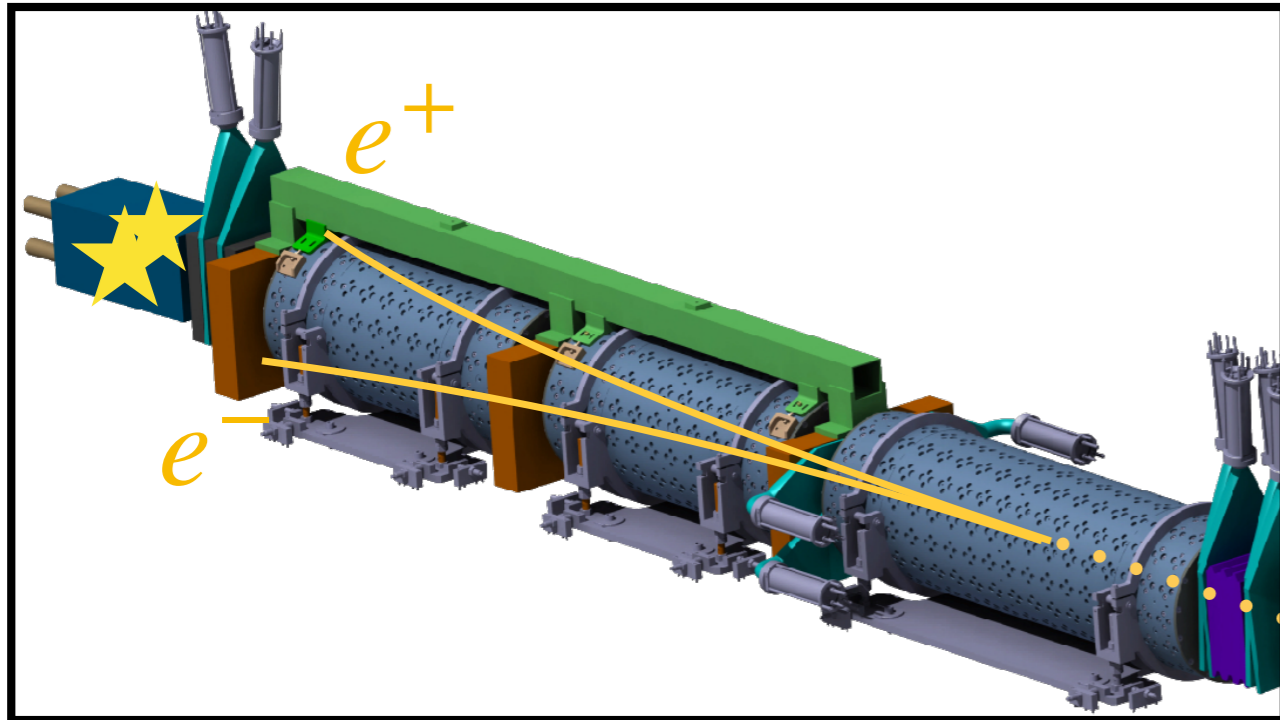


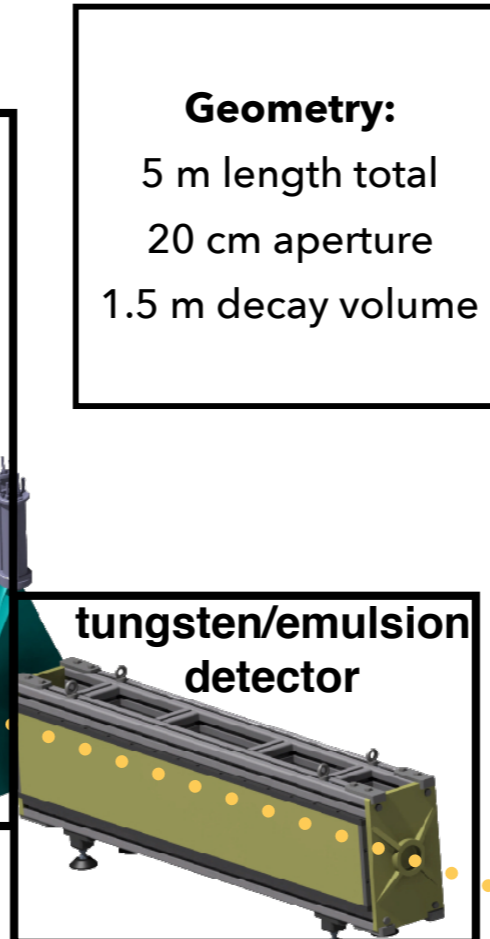
illustration from symmetry magazine

FASER



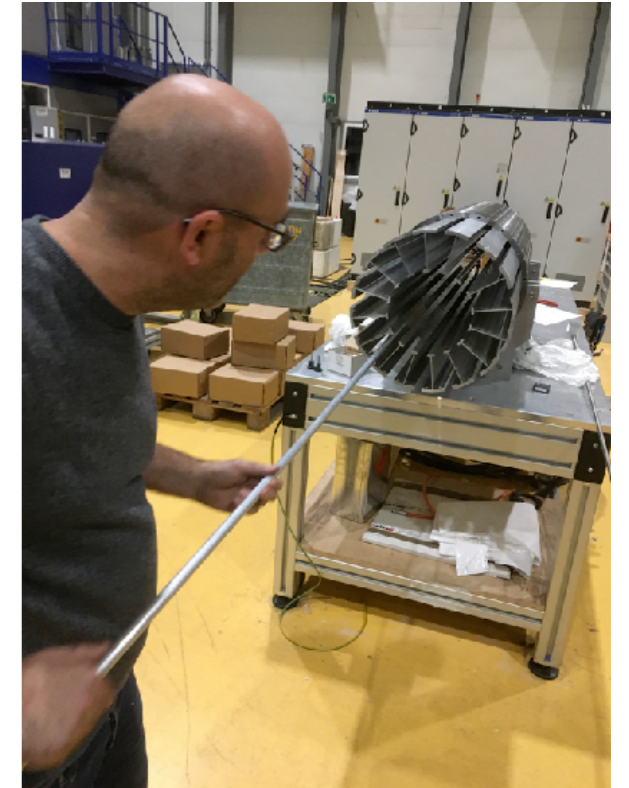
FASER: In search for long-lived physics

+ newly approved component:



FASERv
To detect and measure collider neutrinos.

Geometry:
5 m length total
20 cm aperture
1.5 m decay volume



Designed and to be constructed at CERN



Tracker prototype plane testing ongoing at CERN.

A'

Run 2

Long Shutdown 2

FASER

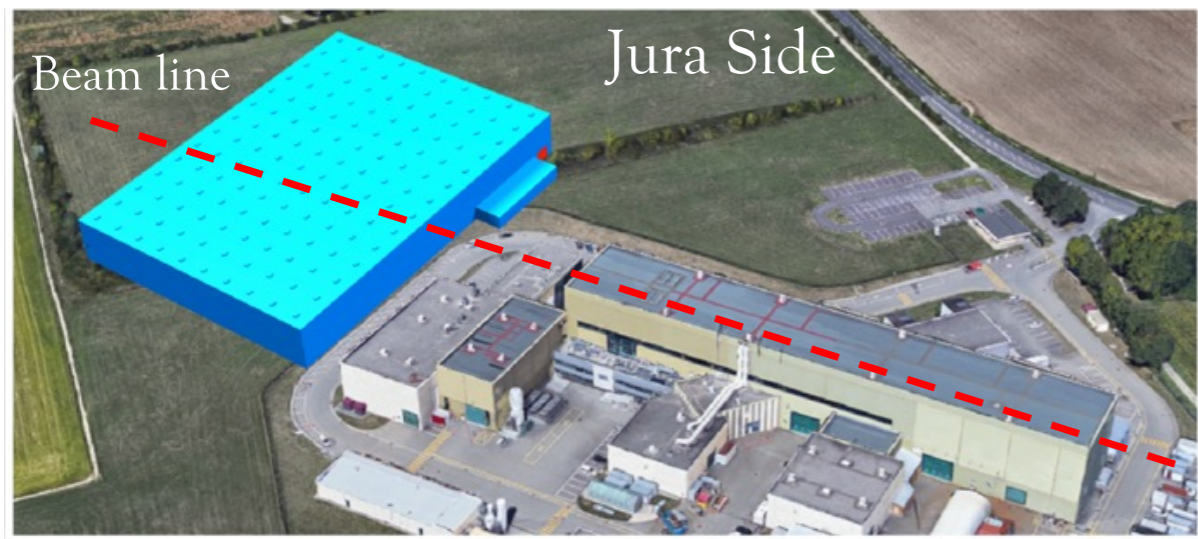
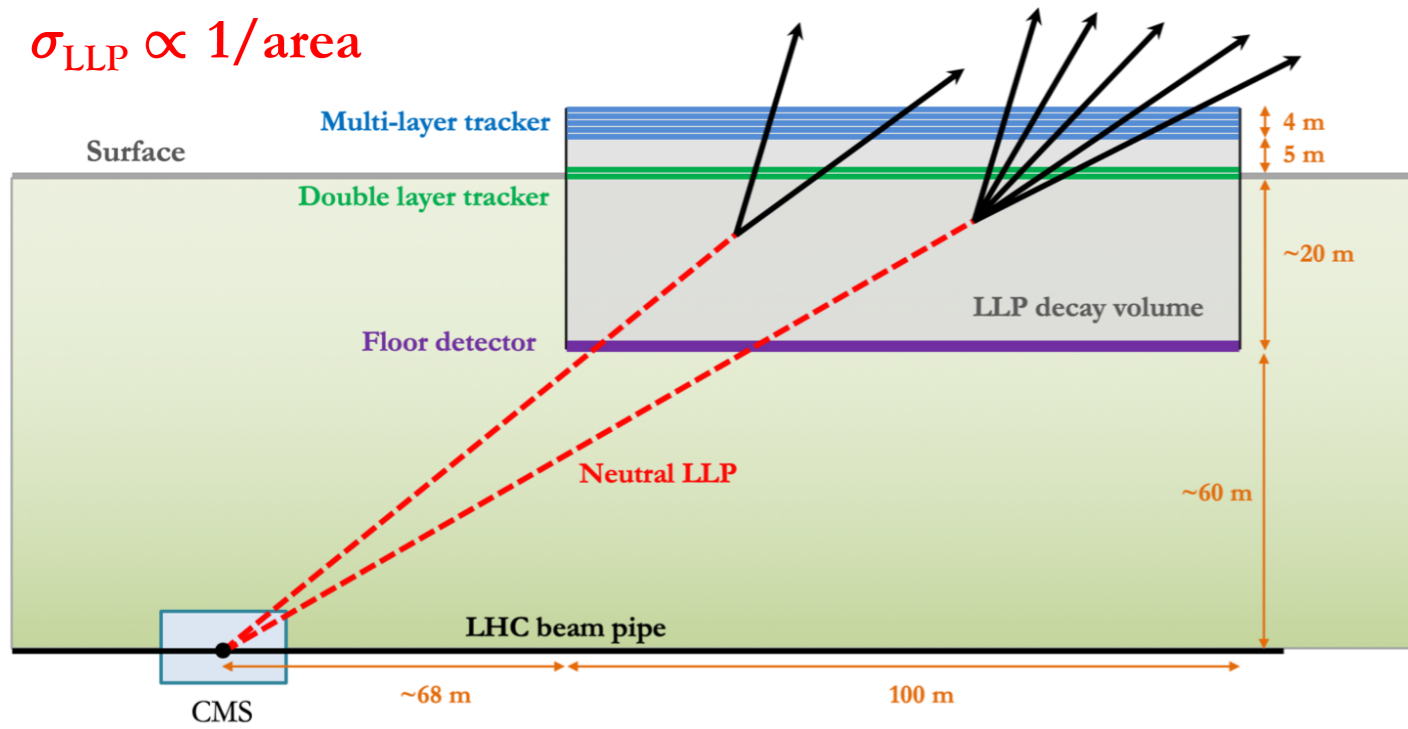
Run3

↑
CERN Approved
March 2019

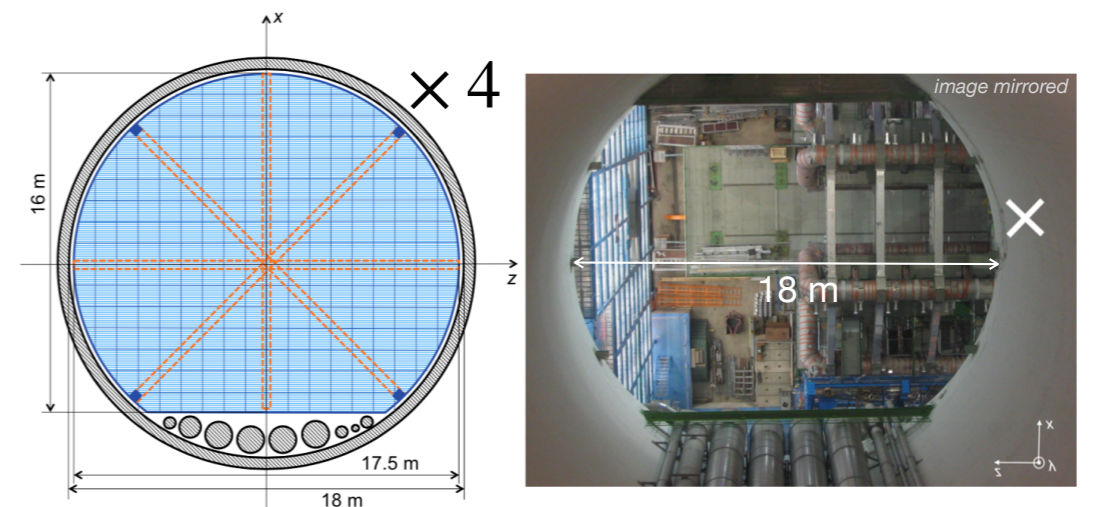
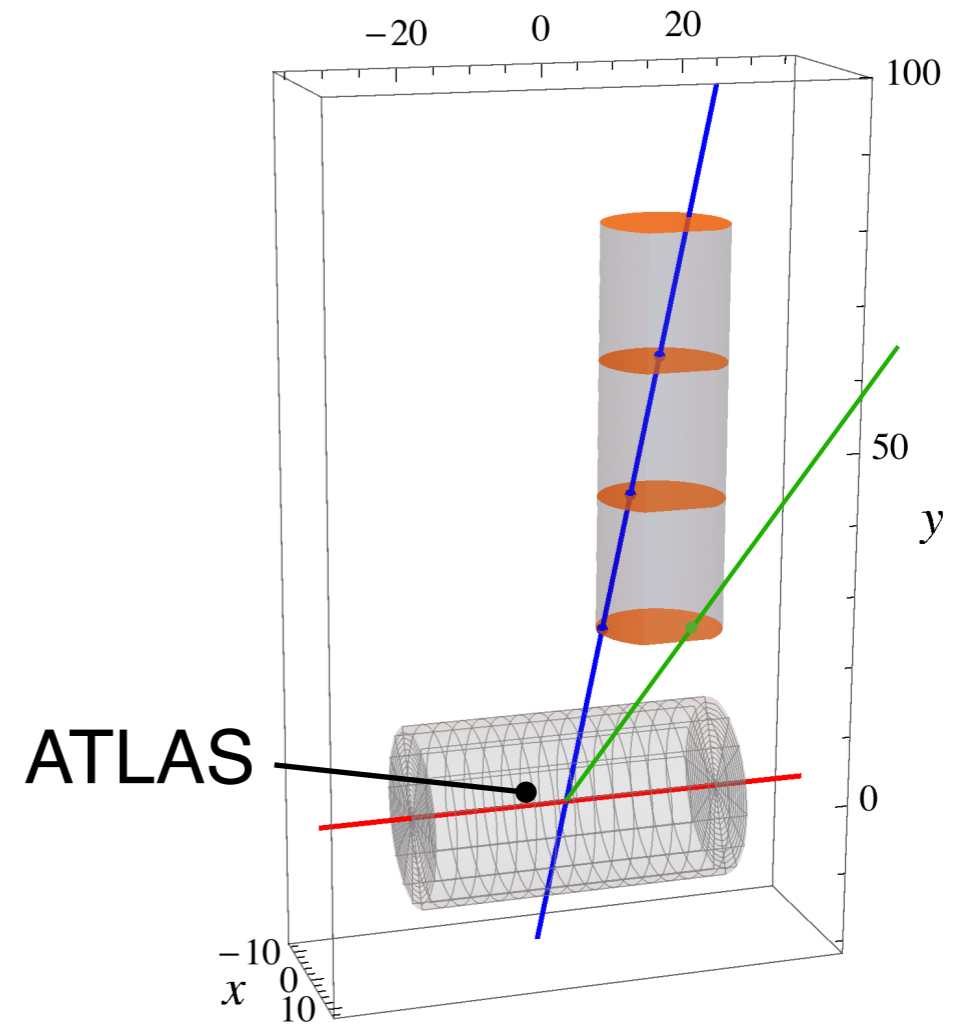
Construction and commissioning by collaboration of 64 people
(20 institutes, 8 countries)

MATHUSLA

$\sigma_{LLP} \propto 1/\text{area}$

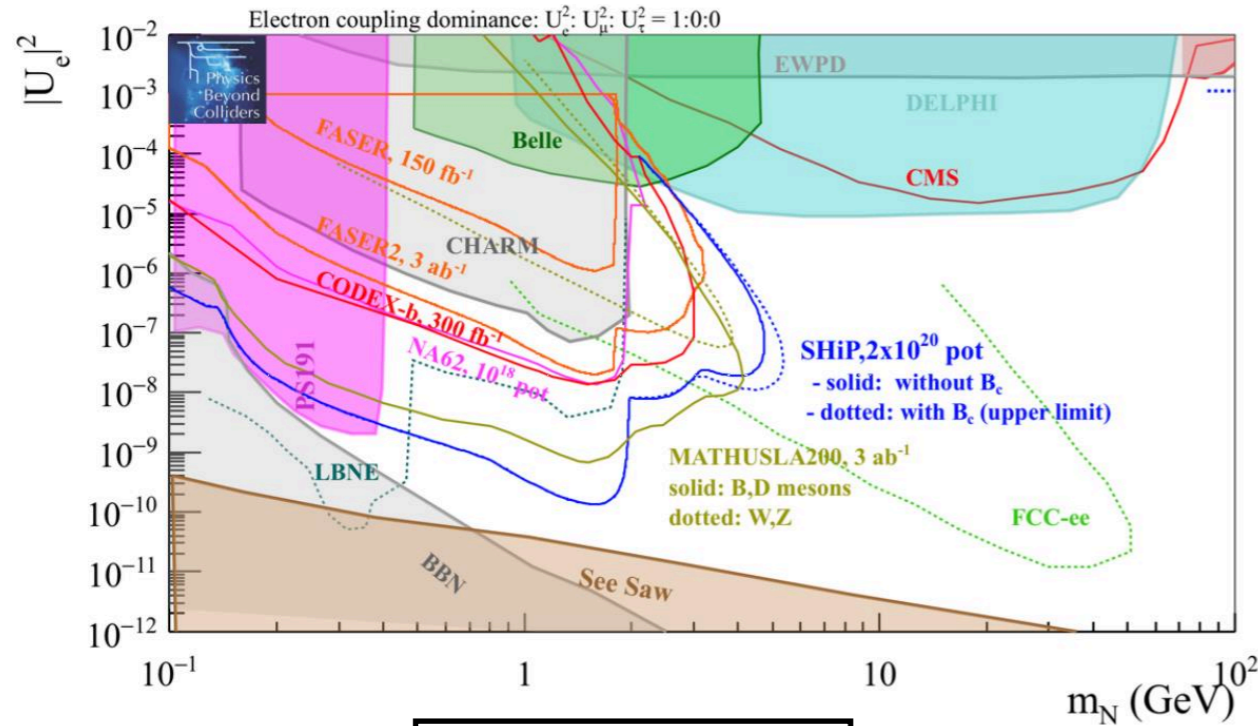


ANUBIS

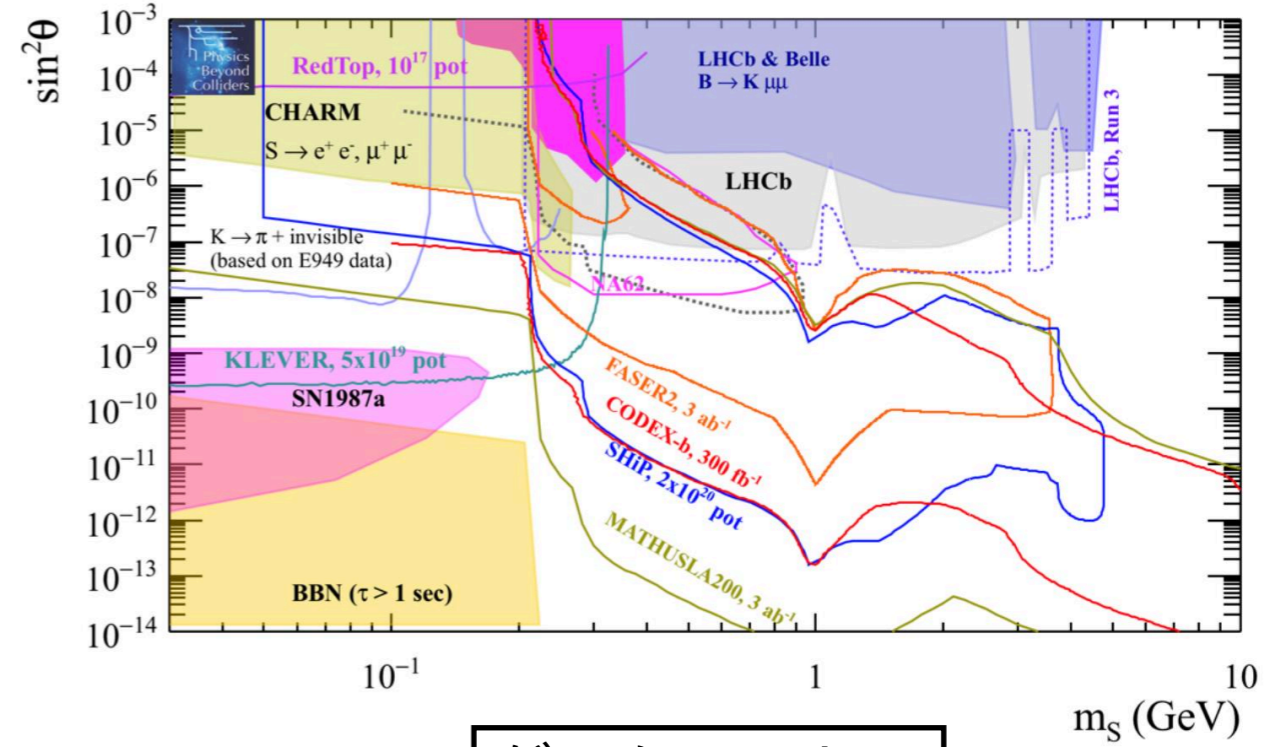


専用実験の物理感度

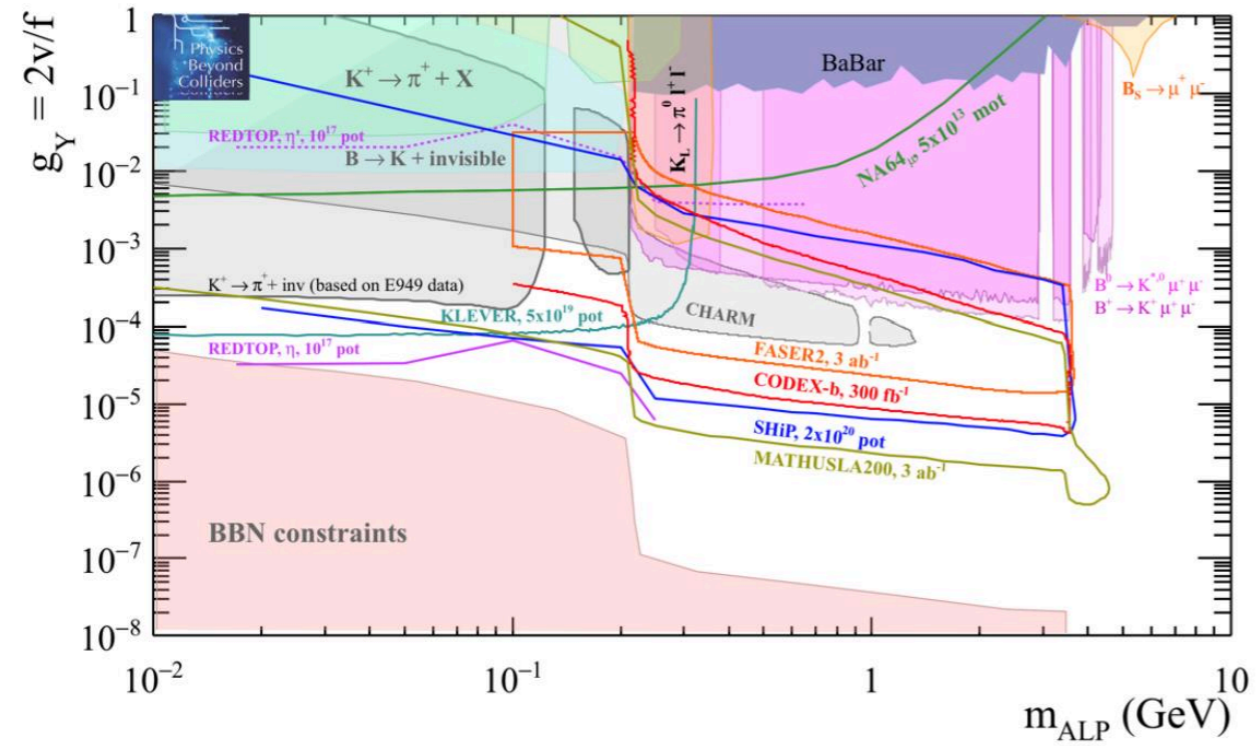
重いニュートリノ



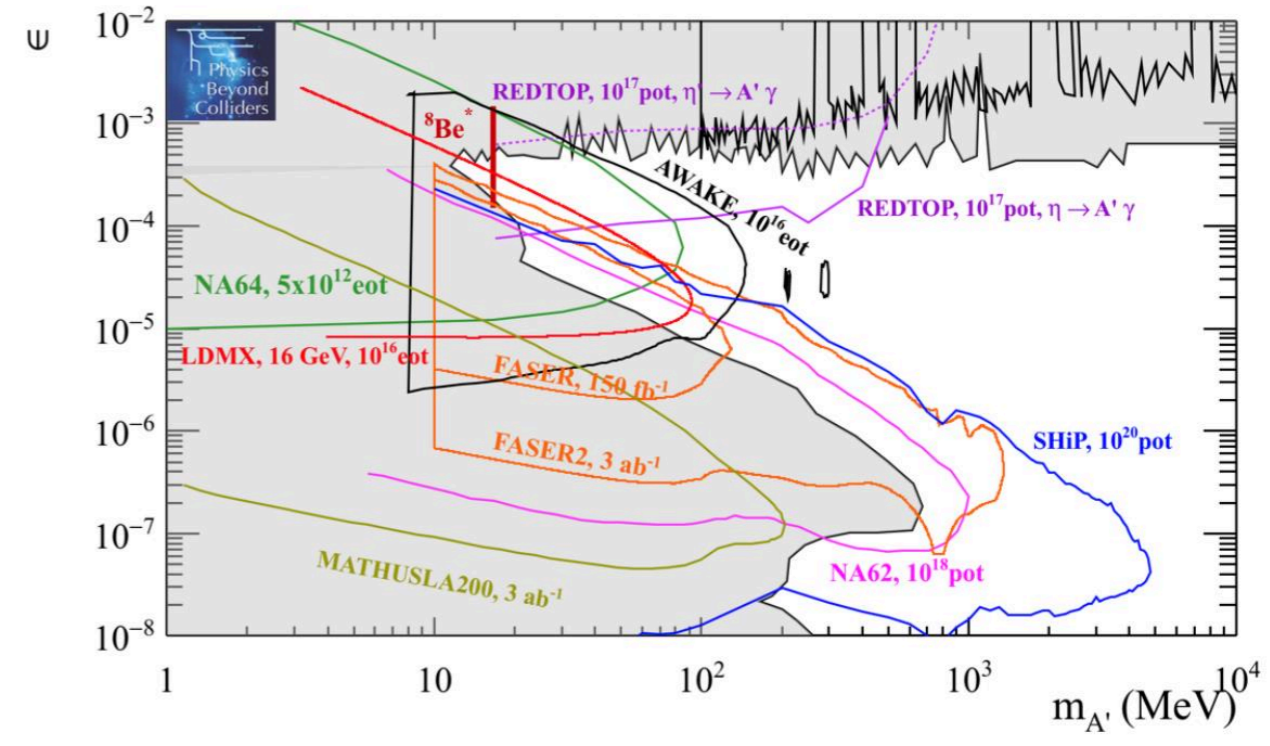
ヒッグス・ダークスカラー混合



Axion-like粒子



ダークフォトン



コミュニティの動向

LPCC (LHC Physics Centre at CERN)の元で、新たに長寿命粒子探索ワーキンググループが発足。

(他には、top, ダークマター、EWK, Heavy flavour, 機械学習などがある)

- ・ 実験と理論の橋渡し
- ・ ベンチマークモデルの推奨
- ・ 長寿命粒子のシミュレーション開発
- ・ 結果の発表の仕方や、解釈の仕方の推奨
- ・ 新しい探索についての議論をリード

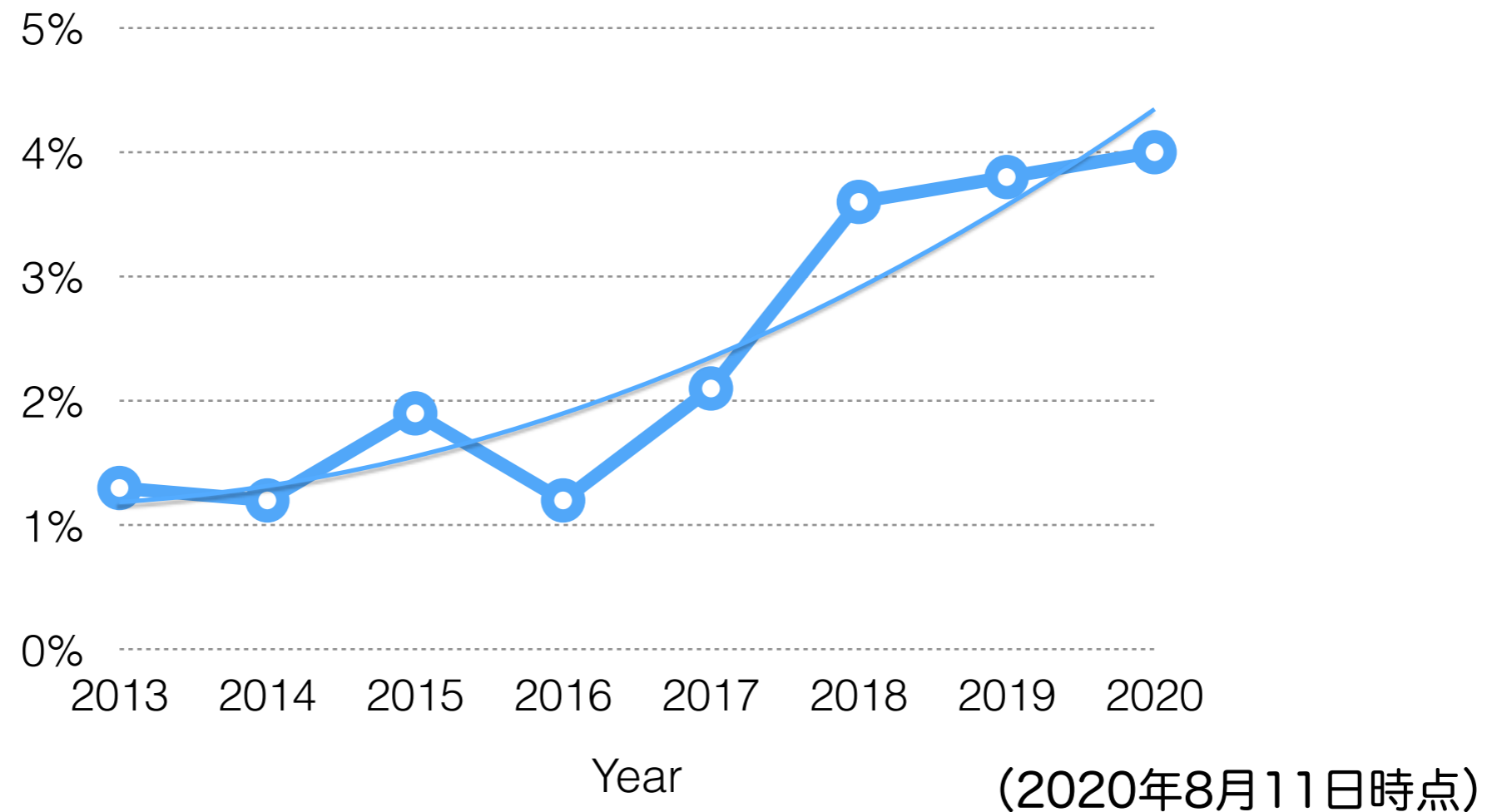
承認されている実験(ATLAS, CMS, FASER, LHCb, MoEDAL) と理論の代表者によって構成

草の根のコミュニティ: 年二回のワークショップ

ホワイトペーパー: [arXiv:1903.04497](https://arxiv.org/abs/1903.04497)

日本でも2017年から国内研究会を毎年秋に開催

長寿命粒子関連論文の増加



arXivのphysics分野で、
”long lived, LHC”を含む論文数 / “Higgs”を含む論文数

Inspired: H.Oide

ICHEPのハイライト

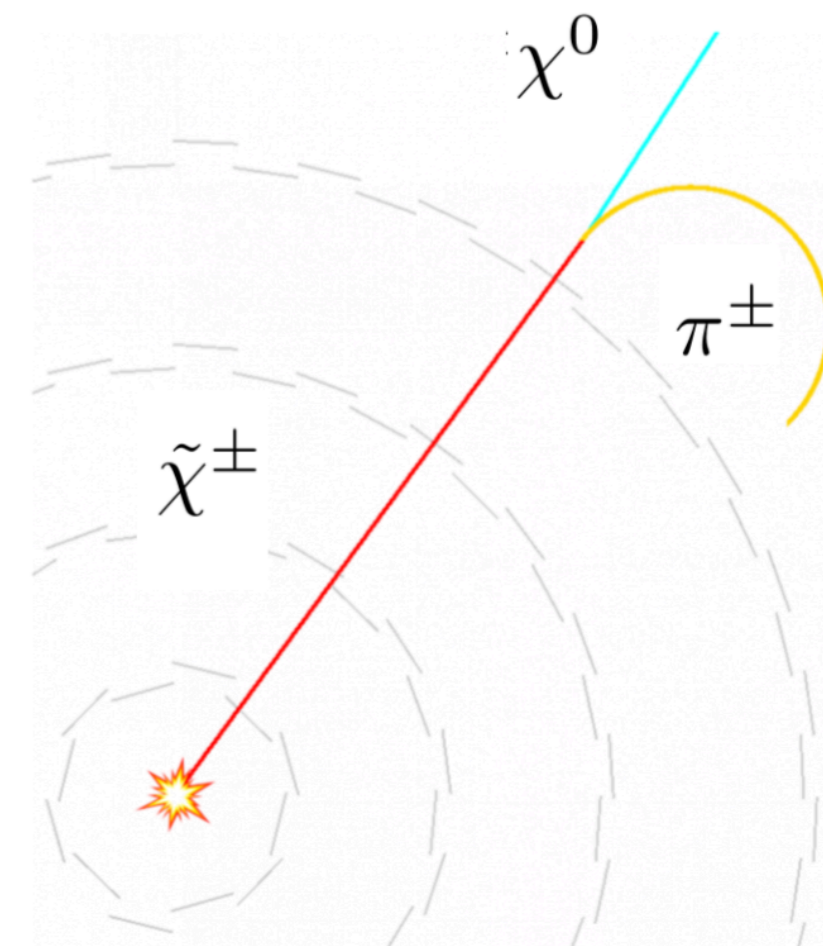
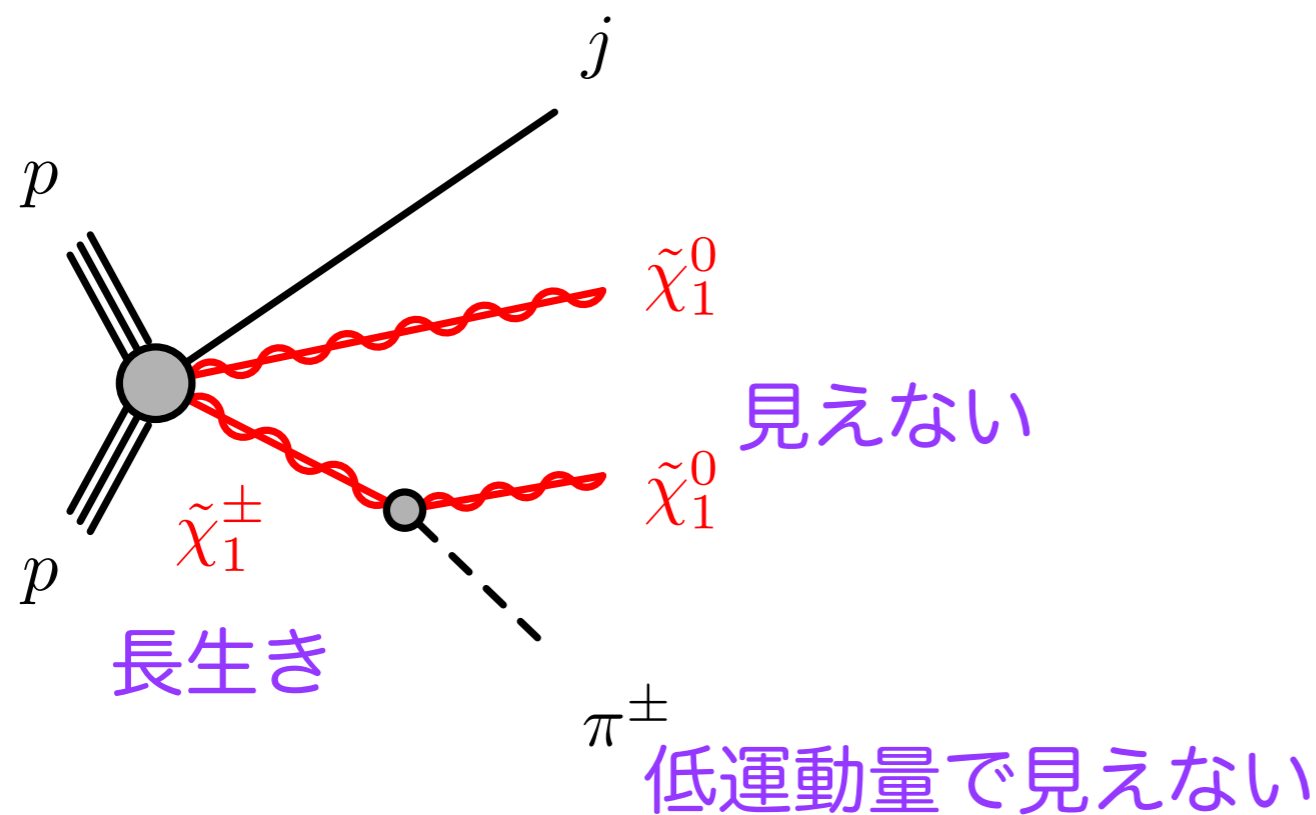
個人的なバイアスもかかっていますが、なるべくデータ量の多い結果を選びました。

長寿命粒子探索は時間がかかるので、まだ2015—2016年の新しい結果も出てきています。その他の結果は以下を参照してください。

- [Search for Long-lived Particles and Unconventional Signatures with the ATLAS detector](#)
- [Searches for SUSY with long-lived particles in ATLAS](#)
- [Search for new physics with unconventional signatures at CMS](#)
- [Search for long-lived particles at CMS](#)

CMS: 消失飛跡

Phys. Lett. B 806 (2020) 135502



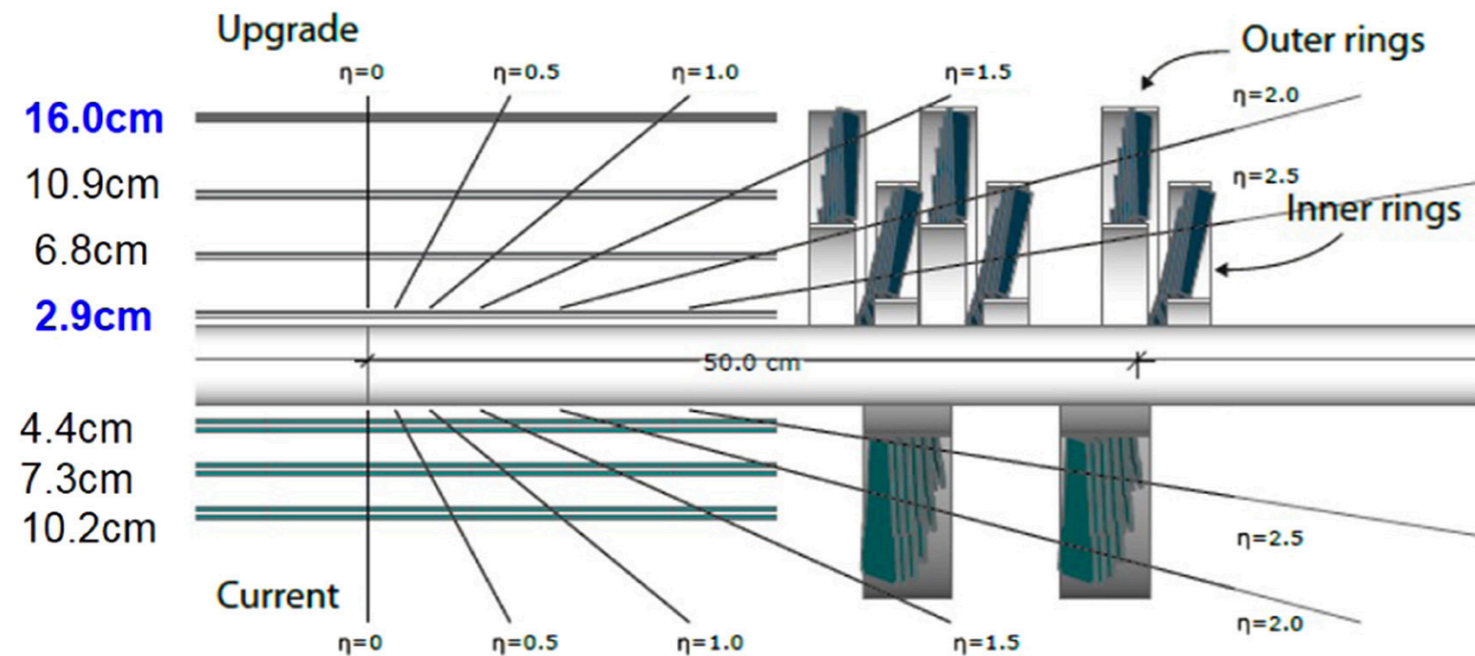
ウィーノやピュアなヒッグシーノは、荷電粒子と中性粒子の質量差が小さくなり、長生きになる。

例: AMSBウィーノ: $\Delta M \sim 160 \text{ MeV}$, $c\tau_0 \sim 6\text{cm}$

崩壊物は(普通の解析では)見えないので飛跡が消えたように見える。

CMS: 消失飛跡

Phys. Lett. B 806 (2020) 135502



トリガー: p_T^{miss} , isolatedトラック

オフラインカット:

ISRジェット ($p_T > 110 \text{ GeV}$),

$p_T^{\text{miss}} > 120 \text{ GeV}$

≥ 1 トラック:

$p_T > 55 \text{ GeV}$, $|n| < 2.1$

≥ 4 ピクセルヒット

検出器のギャップリージョンではない

近くにジェットやレプトンがない

上が2017年からのレイアウト

消失飛跡選択条件:

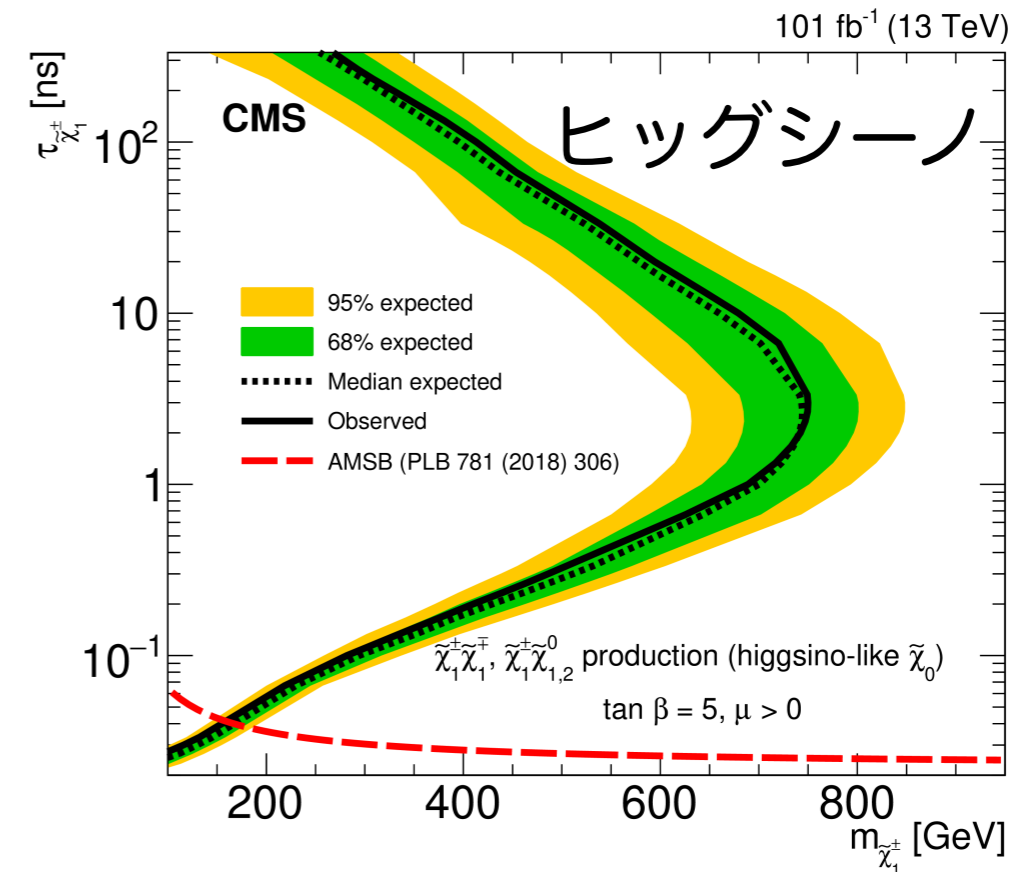
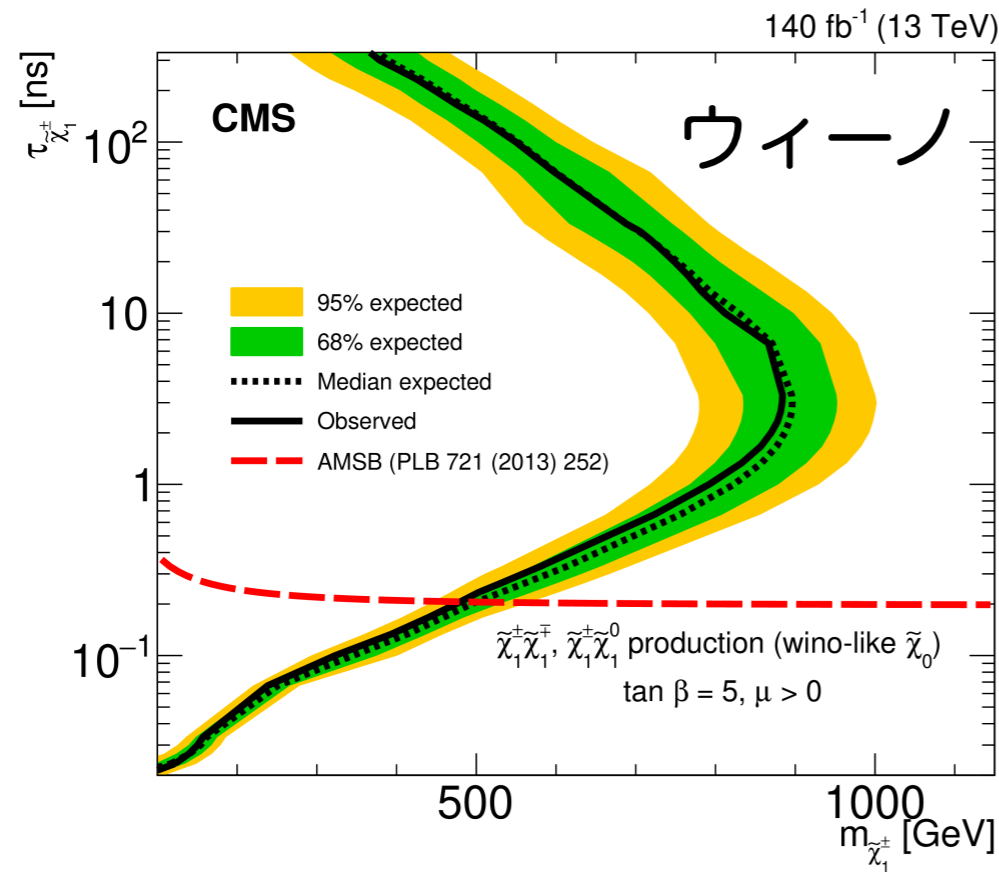
- ・内側や途中に、missingヒット無し
- ・消失条件:
 - ・ $\Delta R < 0.5$ カロリメータのエネルギーが 10 GeV 未満
 - ・ 外側に3個以上の missingヒット
- ・ シリコンレイヤー数でカテゴリー分け、 $=4, =5, \geq 6$

CMS: 消失飛跡

Phys. Lett. B 806 (2020) 135502

期待BG: $47.8^{+2.7}_{-2.3}$ (stat) ± 8.1 (syst)

観測数: 48 events



ウィーノLSP:

2017-2018の新しい解析と、2015-2016の結果をコンバイン

棄却領域: 3 ns で 884 GeV。 0.2 ns で 474 GeV。

ヒッグシーノLSP:

2017-2018データだけ使用

棄却領域: 3 ns で 750 GeV。 0.05 ns で 175 GeV。

c.f. ATLAS @ 36 fb⁻¹ では wino:460 GeV, higgsino:152 GeV

CMS: LLPの光子への崩壊

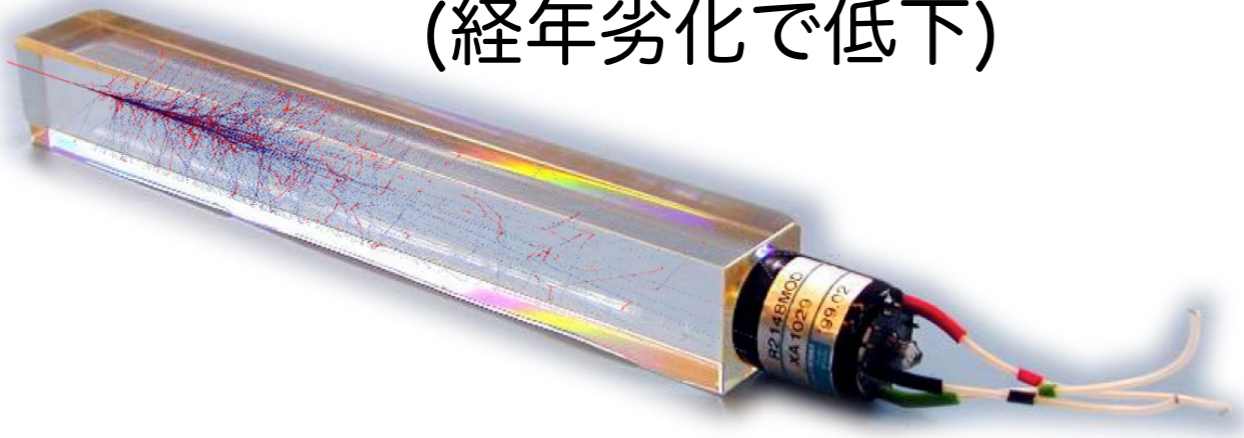
ECAL: 鉛タングステン結晶

時間分解能 70—100 ps

(経年劣化で低下)

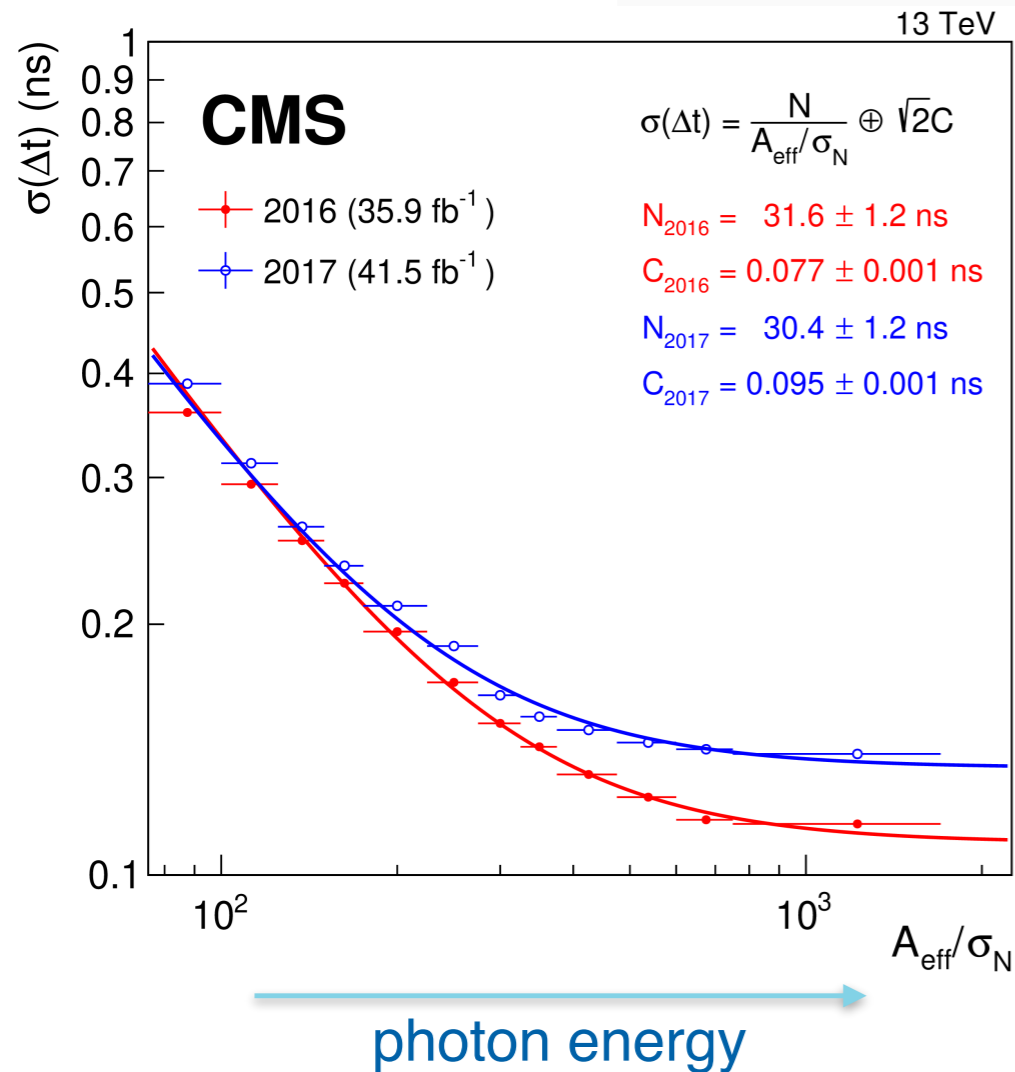
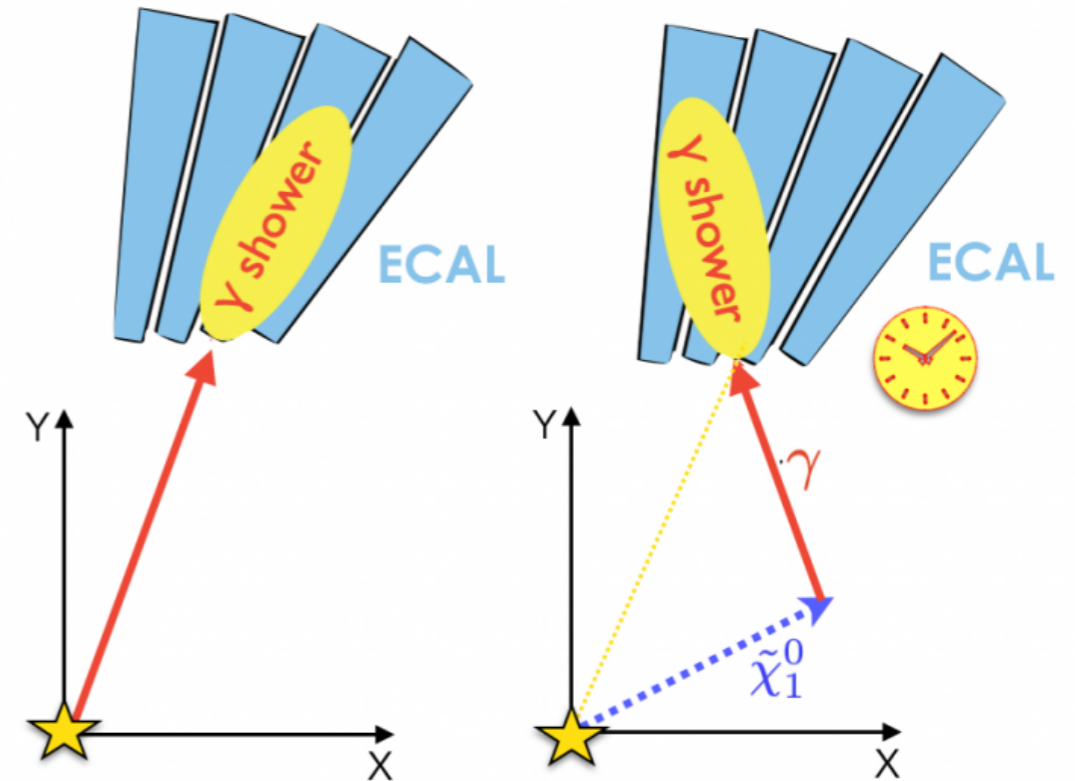
10.1103/PhysRevD.100.112003

EXO-19-005



普通の光子

重いLLPからの光子



- 重い粒子 → 光束より遅い
- 直接来るよりも遠回り

普通の光子よりも、遅く到達する。

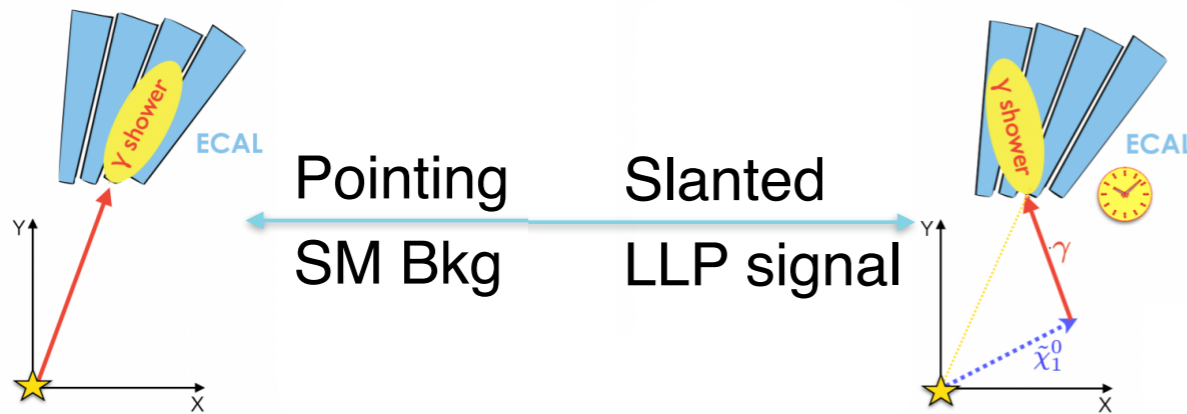
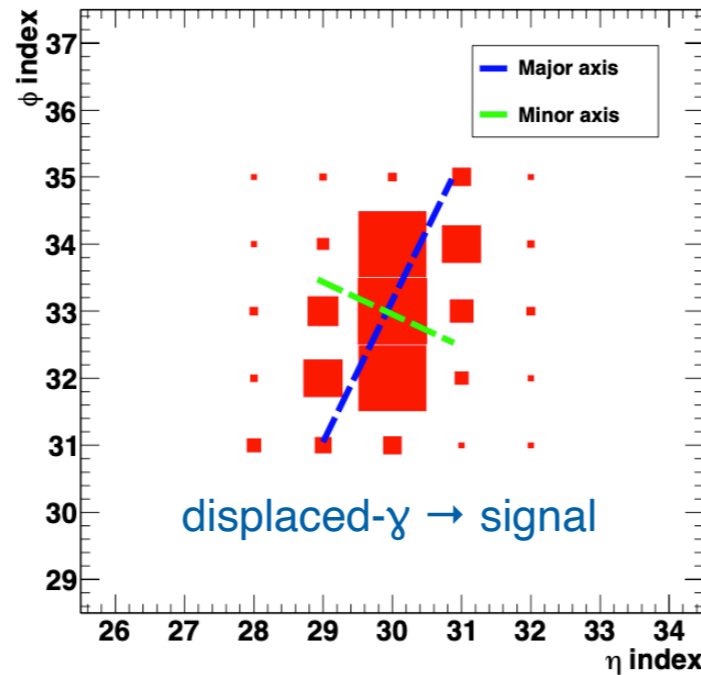
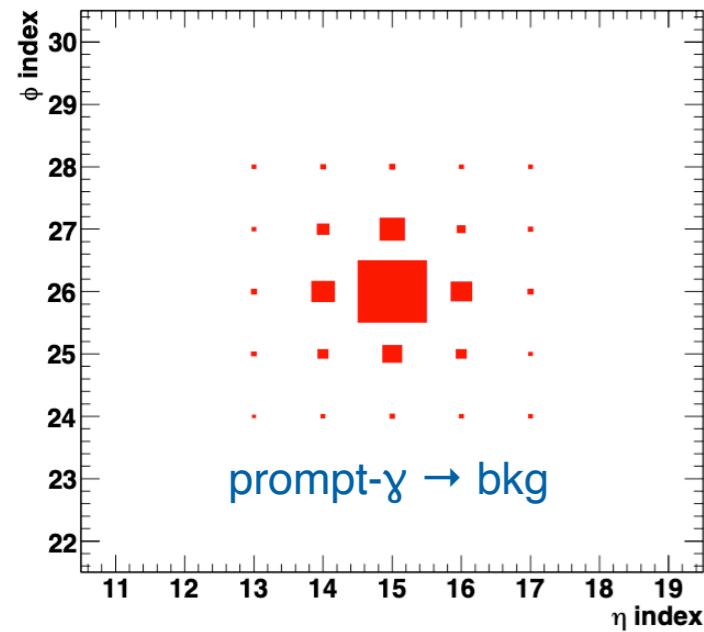
CMS: LLPの光子への崩壊

10.1103/PhysRevD.100.112003

EXO-19-005

- 2016—2017データ
- トリガー: 2光子 or 斜め入射光子トリガー (HLT)
- オフライン
 - 普通の光子の他に, “OOT”光子 ($p_T > 70 \text{ GeV}$) を使用。
 - ≥ 3 ジェット
 - 1光子、2光子のカテゴリ
 - p_T^{miss} と t_γ のビンでフィット

ECAL cluster from a pointing photon



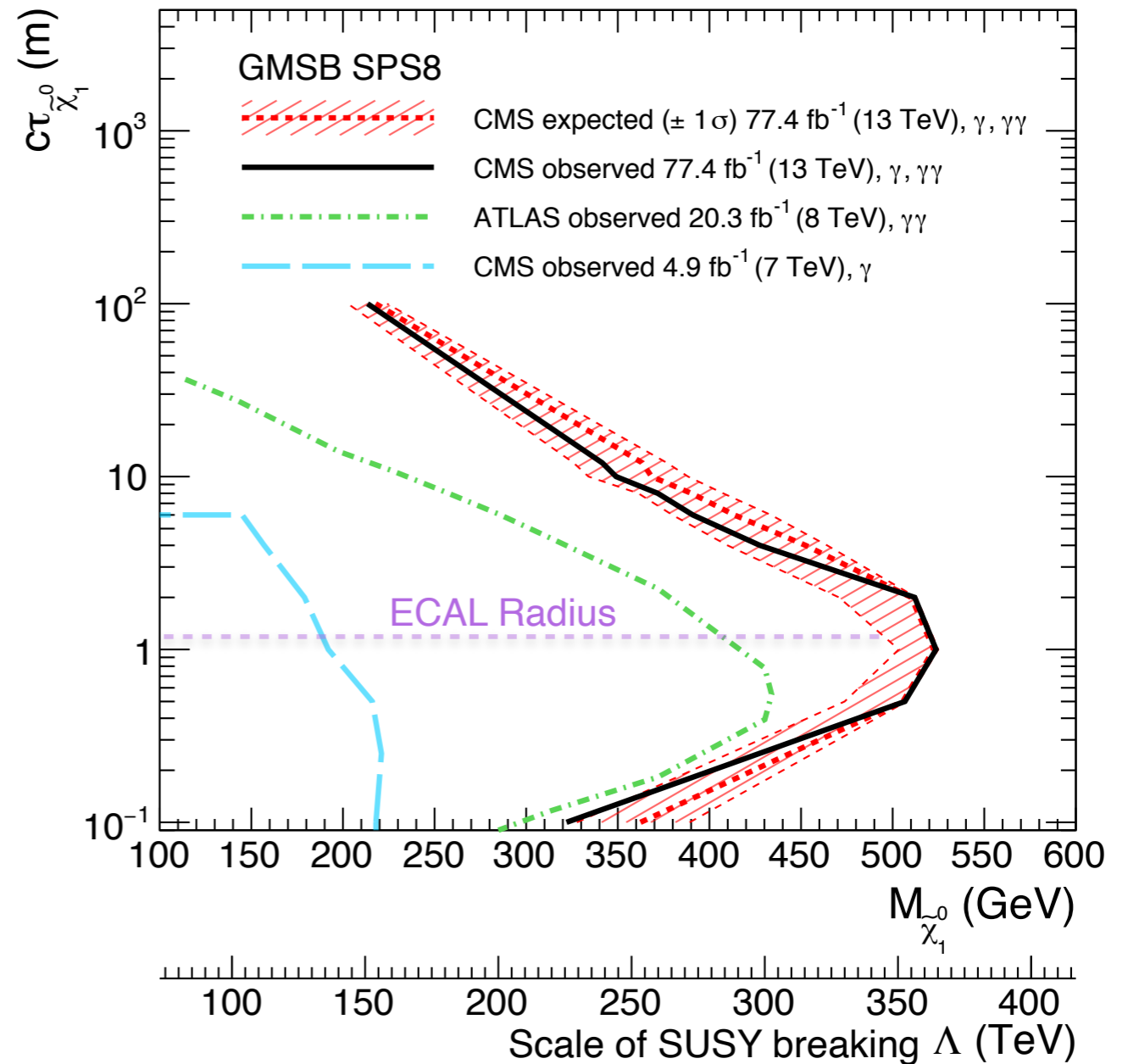
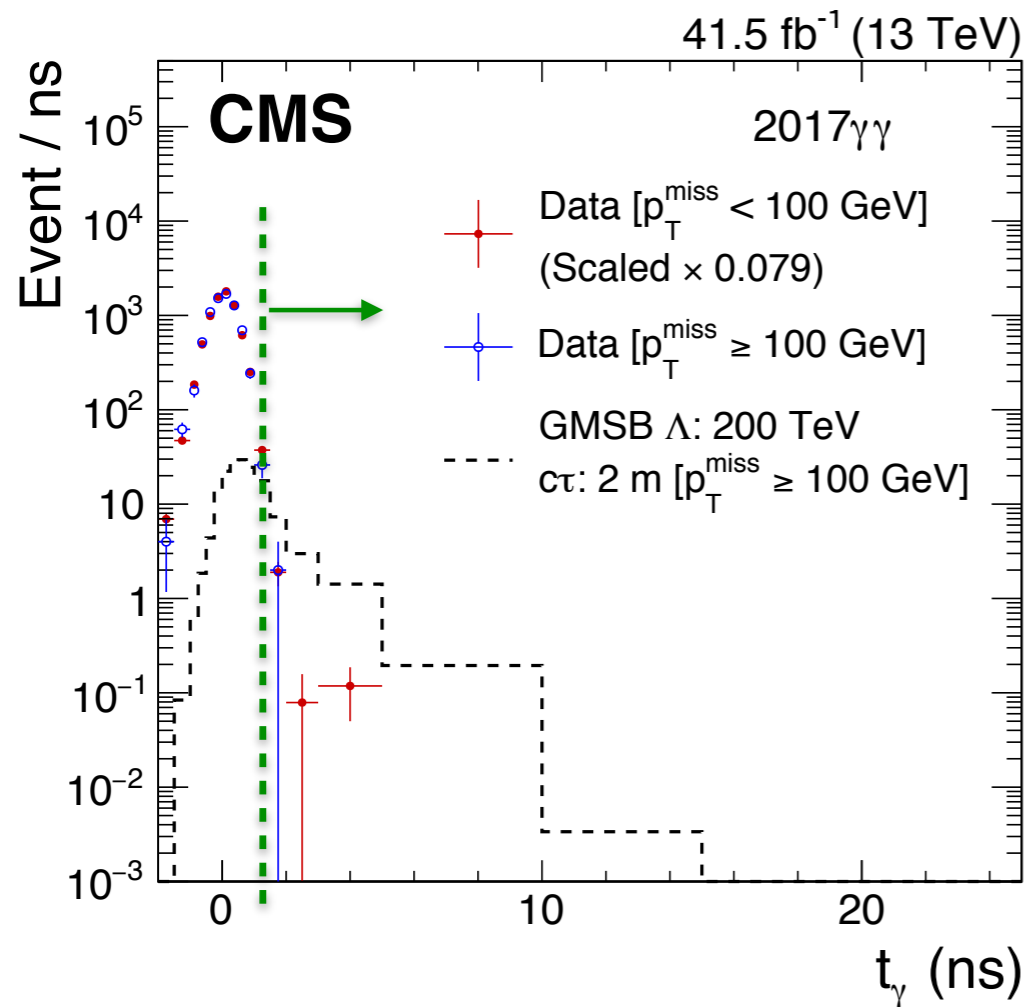
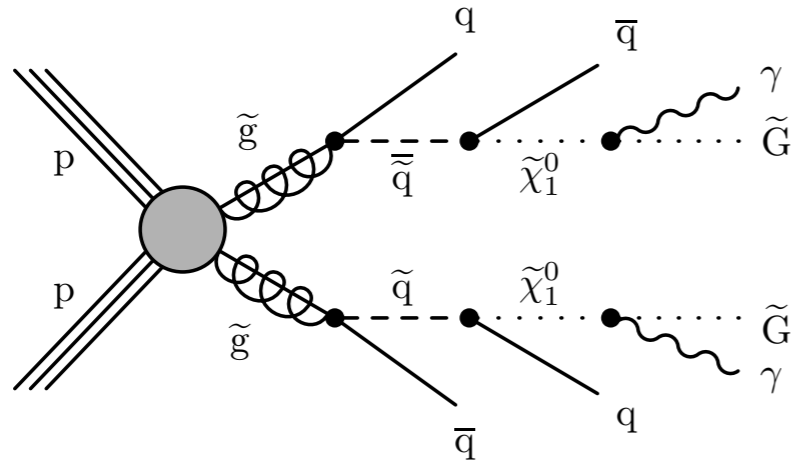
Out-of-time (OOT) 光子

3ns以上遅いエネルギー損失からスタートしてカロリメータのクラスタリング
さらに、OOT光子は斜めであることを要求。

CMS: LLPの光子への崩壊

10.1103/PhysRevD.100.112003

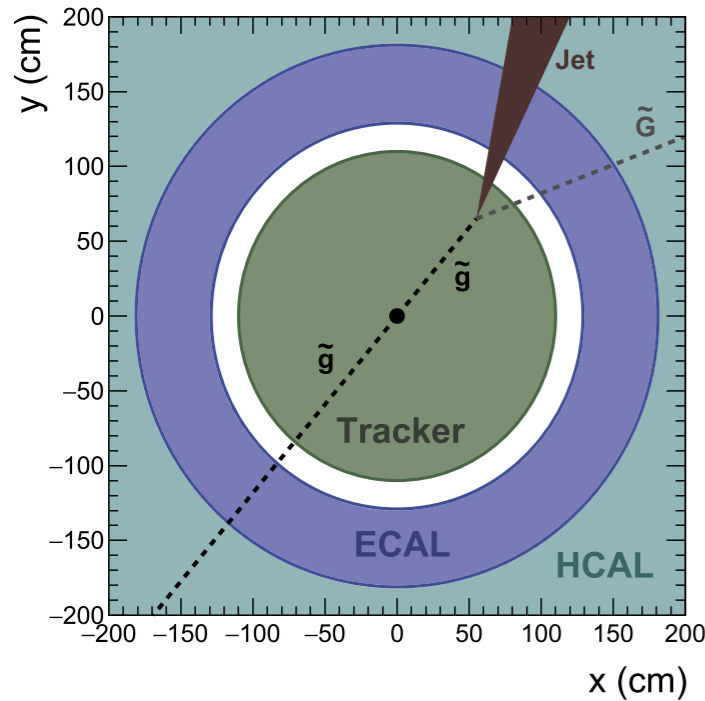
EXO-19-005



解析のポイント: 斜め入射光子トリガーの導入によって、
2017年からは、1光子信号領域が追加されて感度向上。

CMS: LLPのジェットへの崩壊

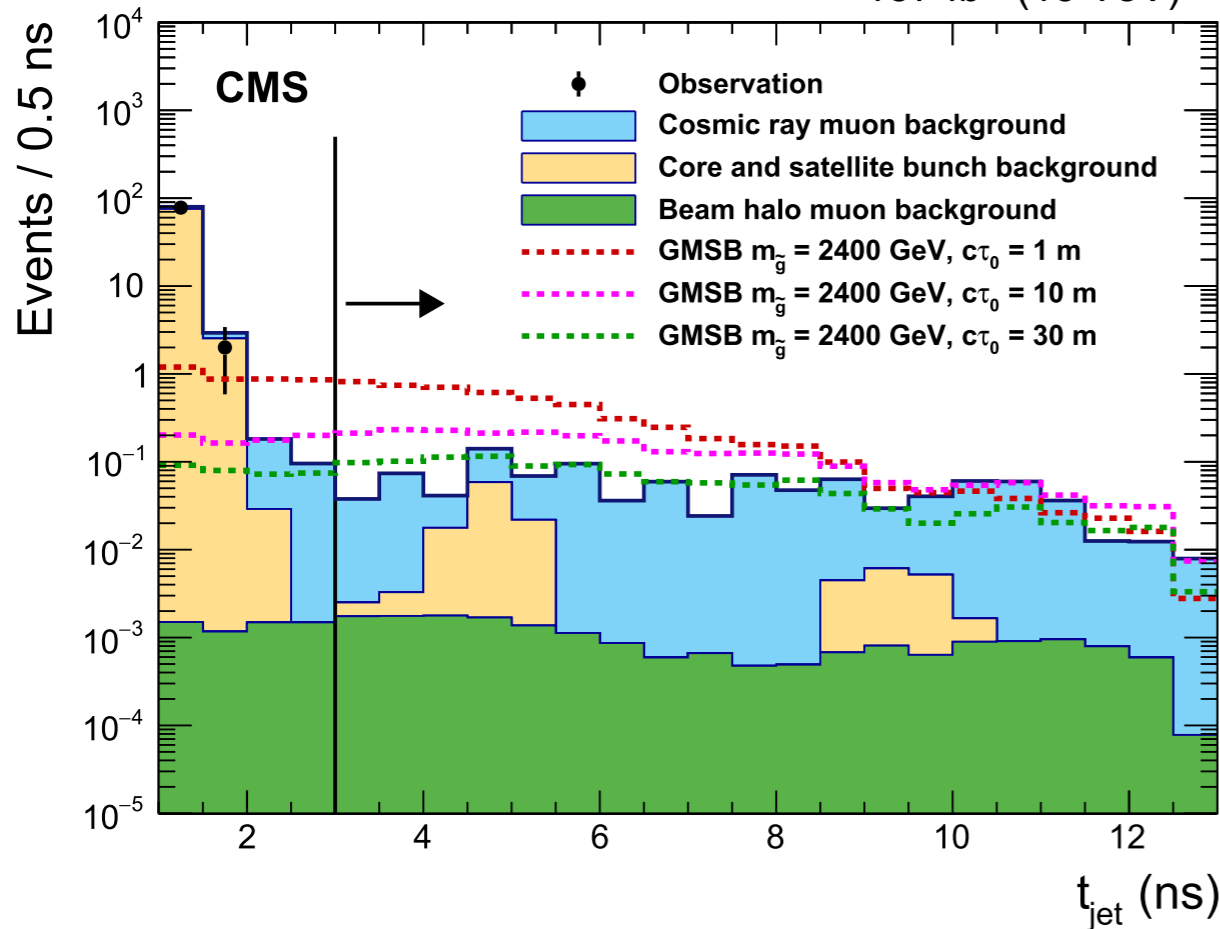
10.1016/j.physletb.2019/134876
EXO-19-001



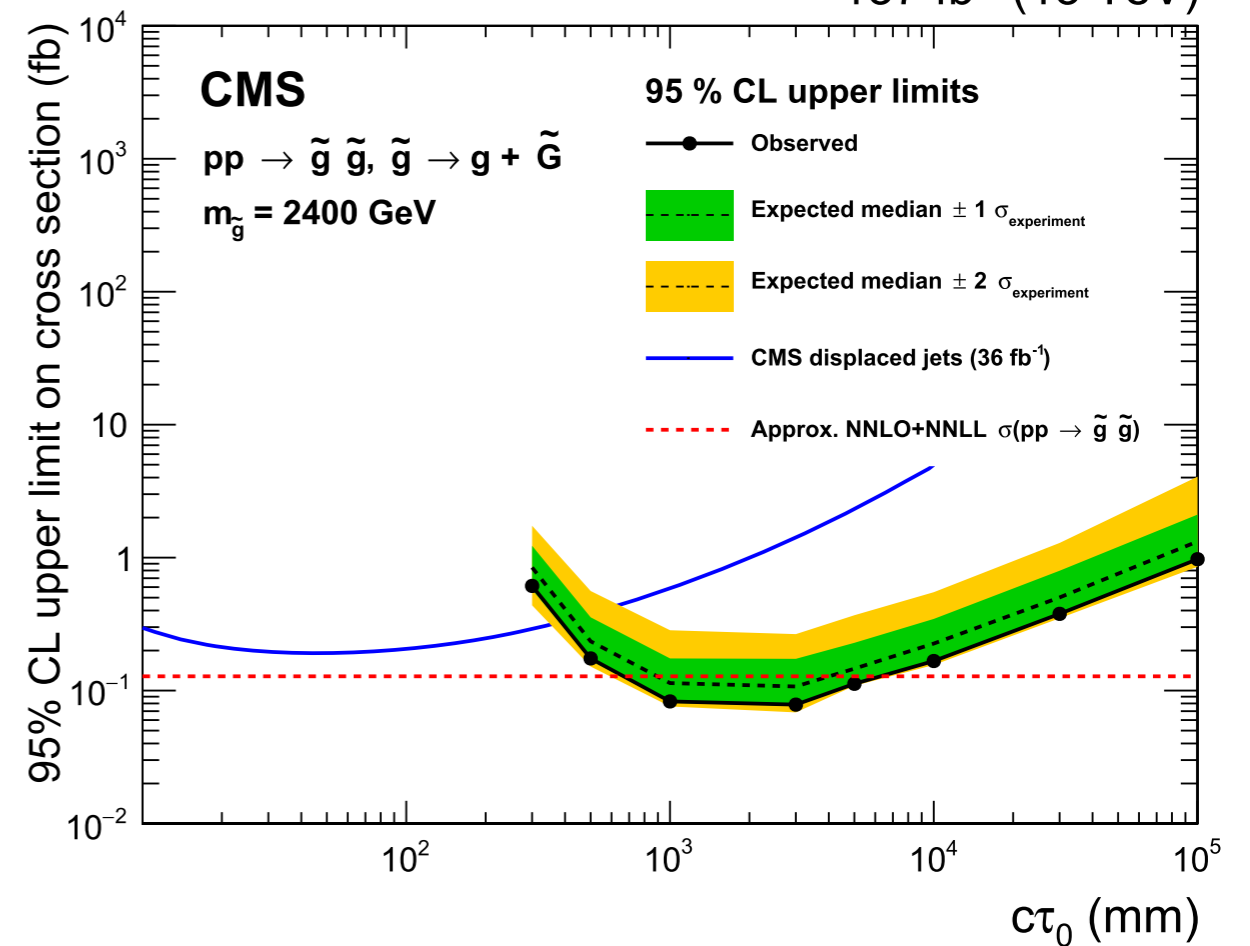
- 2016—2018年データ
- トリガー: p_T^{miss}
- オフライン
 - $p_T^{\text{miss}} > 300 \text{ GeV}$
 - MSヒットの条件で宇宙線除去
 - 3ns以上遅いジェット

期待BG: $1.1^{+2.5}_{-1.1}$
観測数: 0

137 fb⁻¹ (13 TeV)



137 fb⁻¹ (13 TeV)



2.5 TeV gluino @ $c \tau_0 = 1 \text{ m}$ 棄却

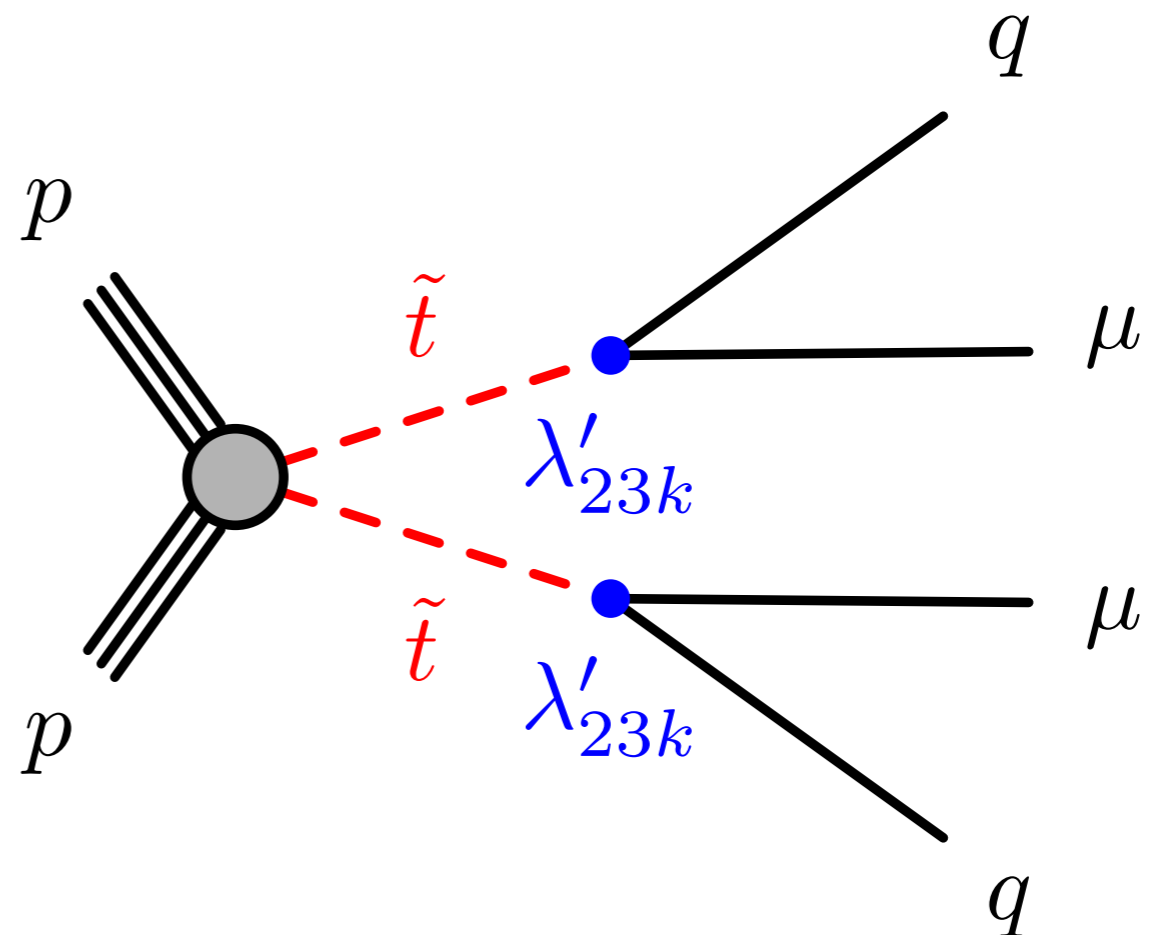
20

displaced muon

いろいろなモデルで現れるSignature

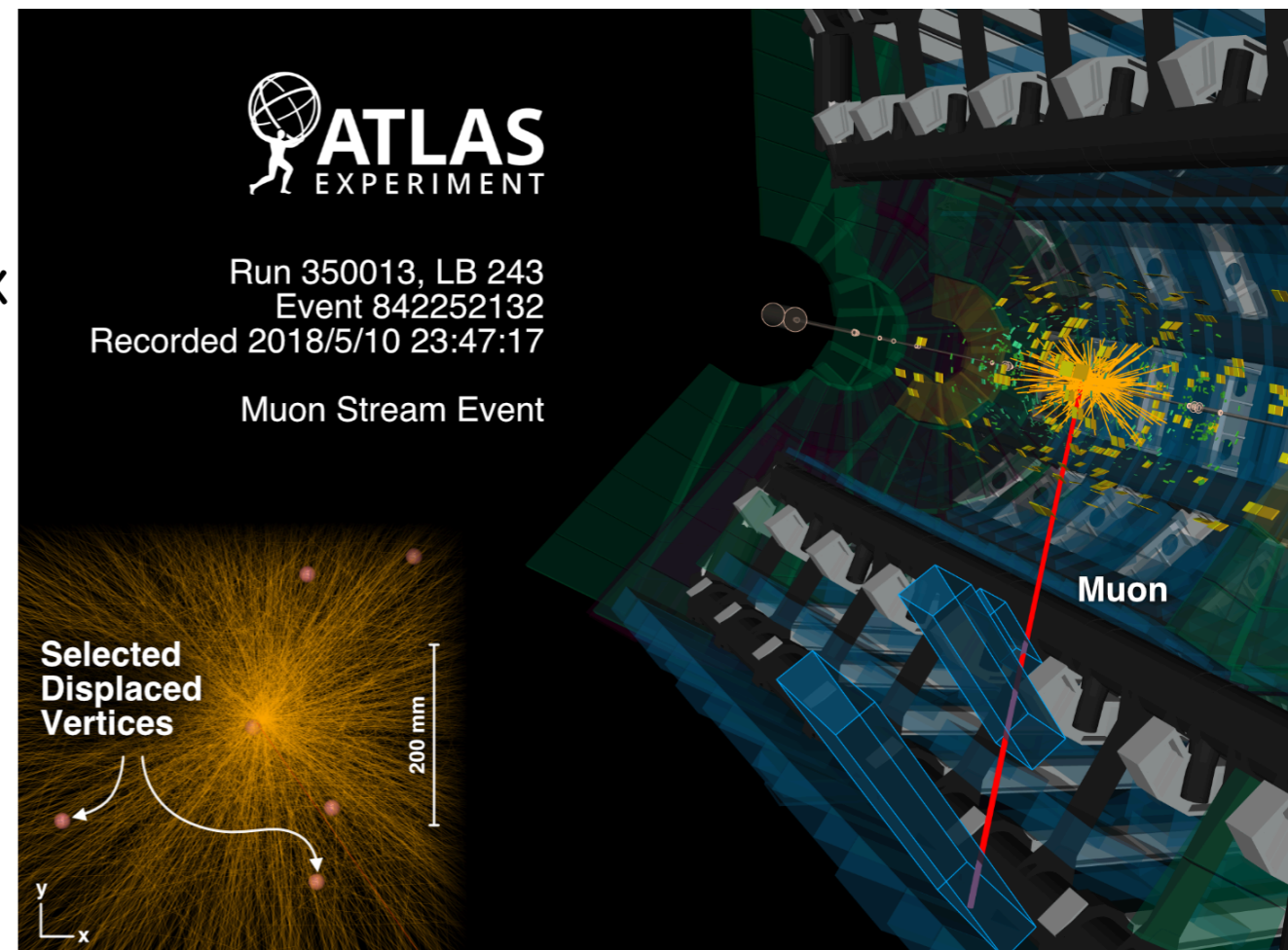
- StopのRPV崩壊
 - RPV結合定数は小さいはず
 - → 長寿命になる
- 長寿命 electroweakino のRPV崩壊
- 長寿命Long-lived レプトクォーク
- ヒッグス粒子のLLPへの崩壊
- 重いニュートリノ

この論文ではこのモデルで解釈



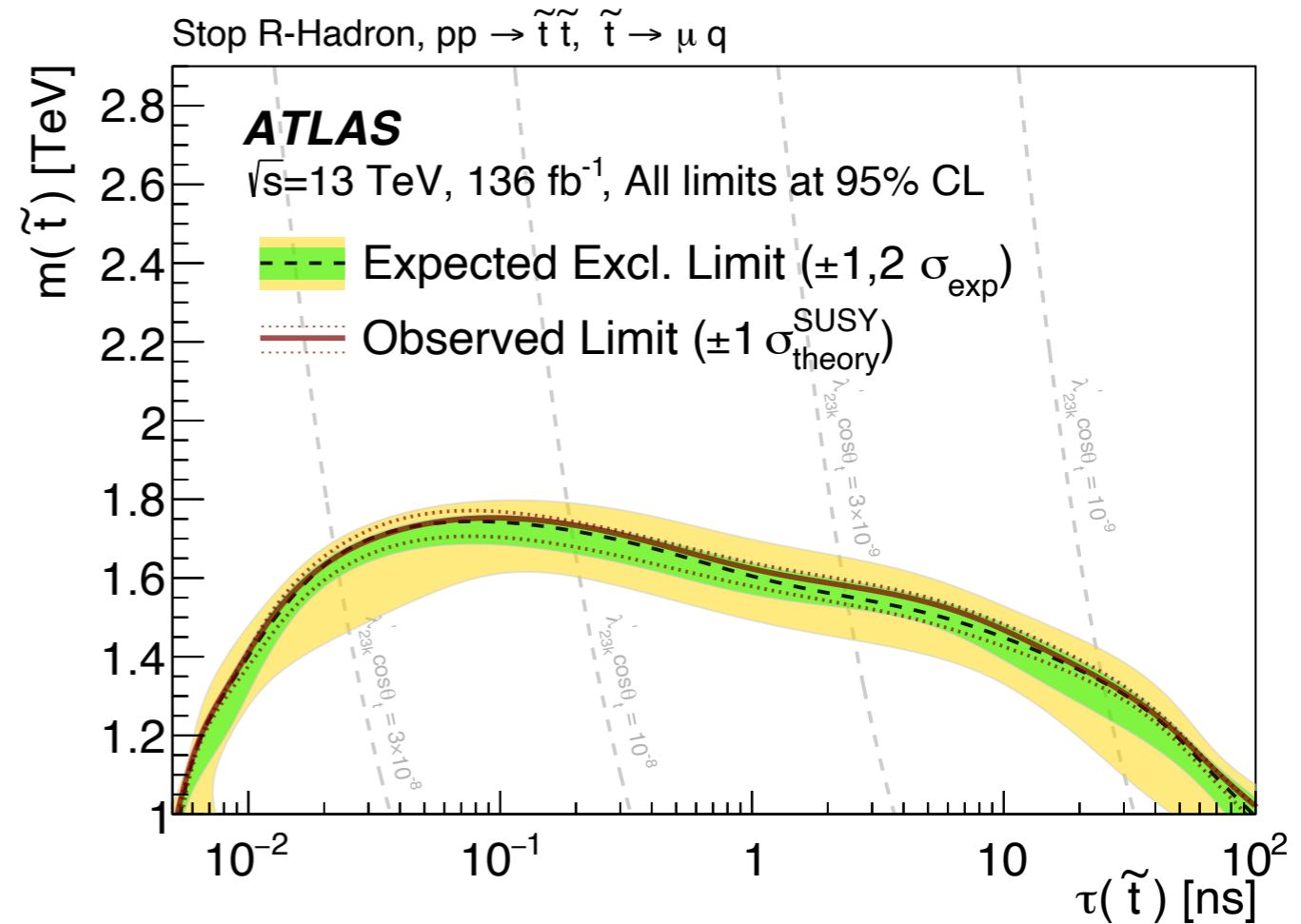
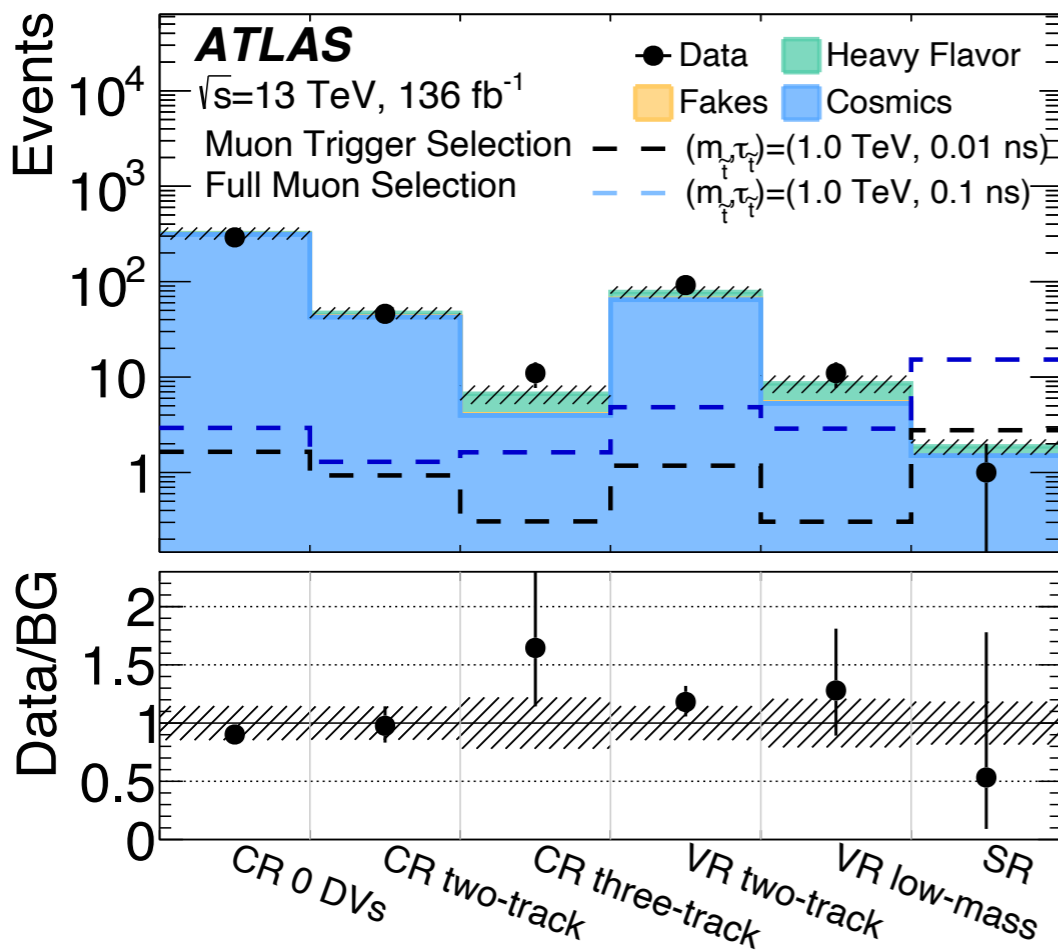
displaced muon

- 2016—2018年データ
- トリガー: E_T^{miss} , or MSトラック (>60 GeV)
- “Large-radius”トラック と secondary-vertex の再構成を行う、特別なデータプロセス。
- Displaced vertex
 - マテリアルveto
 - ハドロン崩壊BGの削減
 - $n_{\text{track}} \geq 3$, $m_{\text{DV}} > 20$ GeV
 - フェイクと、ハドロン崩壊BG
- ミューオントラック
 - $|d_0| > 2\text{m}$
 - qualityカットと、宇宙線のカット



displaced muon

	E_T^{miss} トリガー	ミュオントリガー
期待 BG	$0.43 \pm 0.16 \pm 0.16$	$1.88 \pm 0.20 \pm 0.28$
観測数	0	1



1.7 TeV stop @ $\tau_0=0.1 \text{ ns}$ まで棄却

まとめ

- “Lifetime frontier”はまだ探索されていない領域がある
 - 論文数増加、WG設置など、コミュニティも活発
- 専用の検出器の提案も多数
- 解析では、特殊な、トリガー、オブジェクト再構成、データプロセス、BG見積もり手法を伴うことがあり、大変だが面白い
- フルRun2の解析は、まだ発表されていないものが多く、今後に期待
- (今日は話していませんが) Run3に向けての開発にも力を入れています