



Introduction: ATLAS (#atlas)

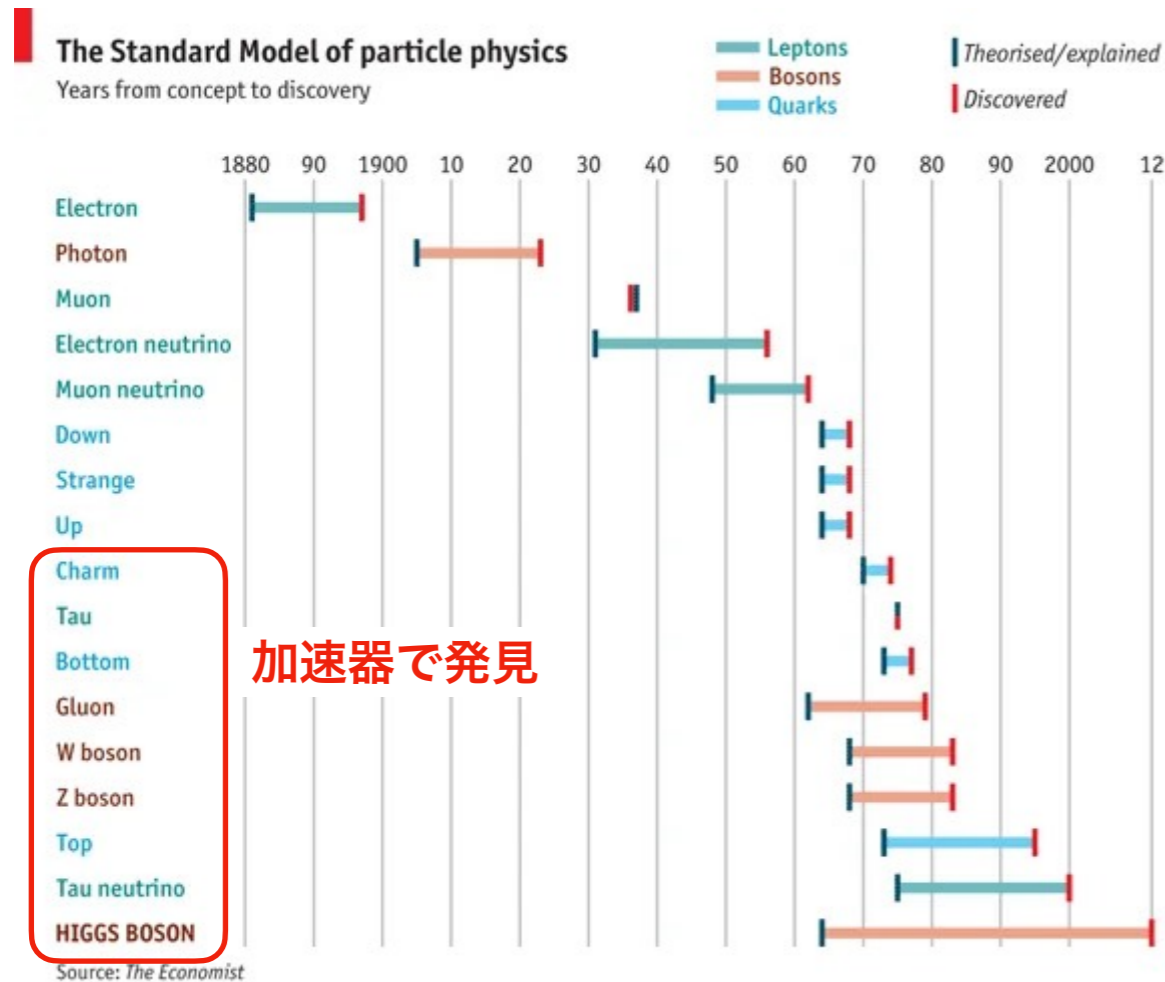
2026.4.23 高エネ 新M1 ガイダンス

Web page: <https://sites.google.com/view/kyoto-atlas/home>

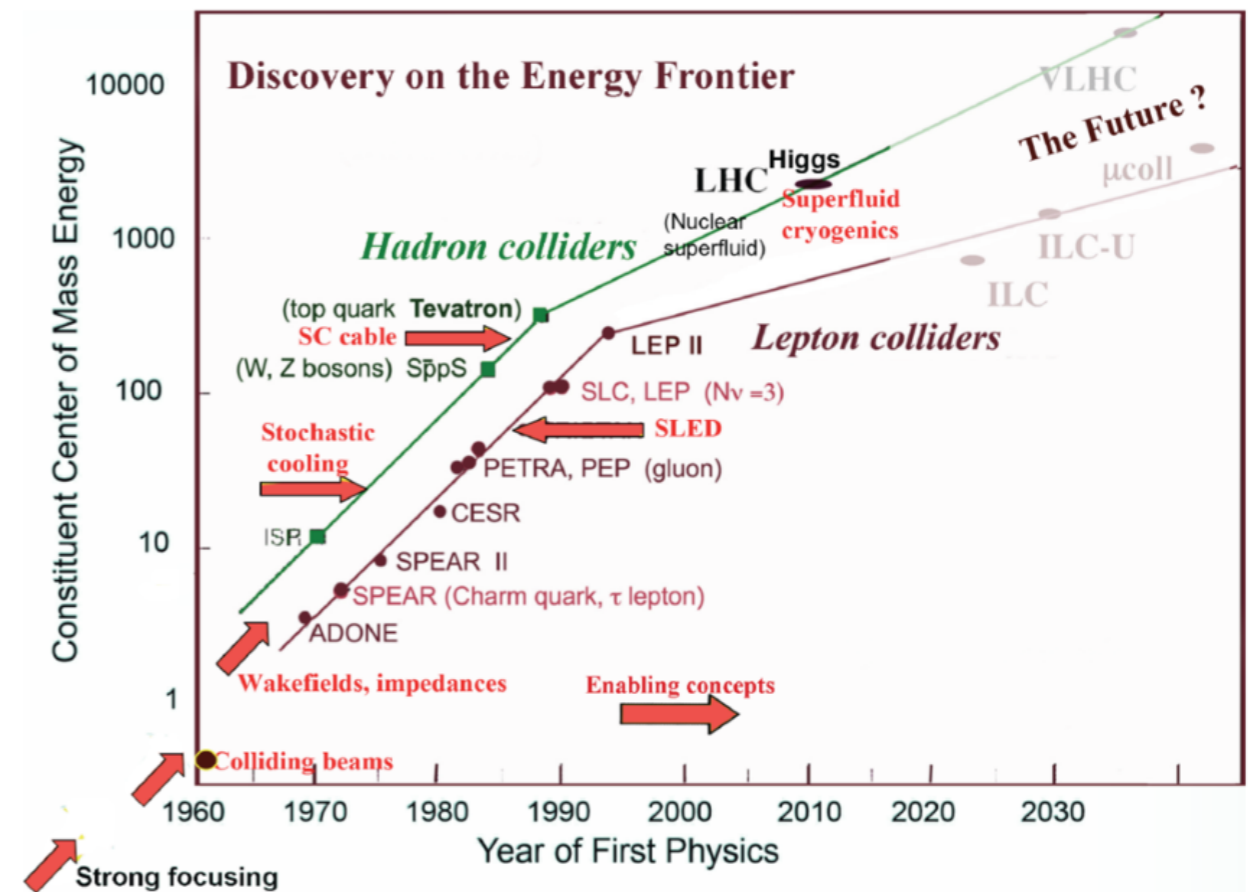
高エネルギーを目指すことで人類は叡智を開いてきた

この世は何でできているのか
"究極の理論"とはなんなのか

より高いエネルギー ⇔ より小さいスケール



加速器で発見



最高エネルギーの加速器: より基本的な法則に迫る

Large Hadron Collider

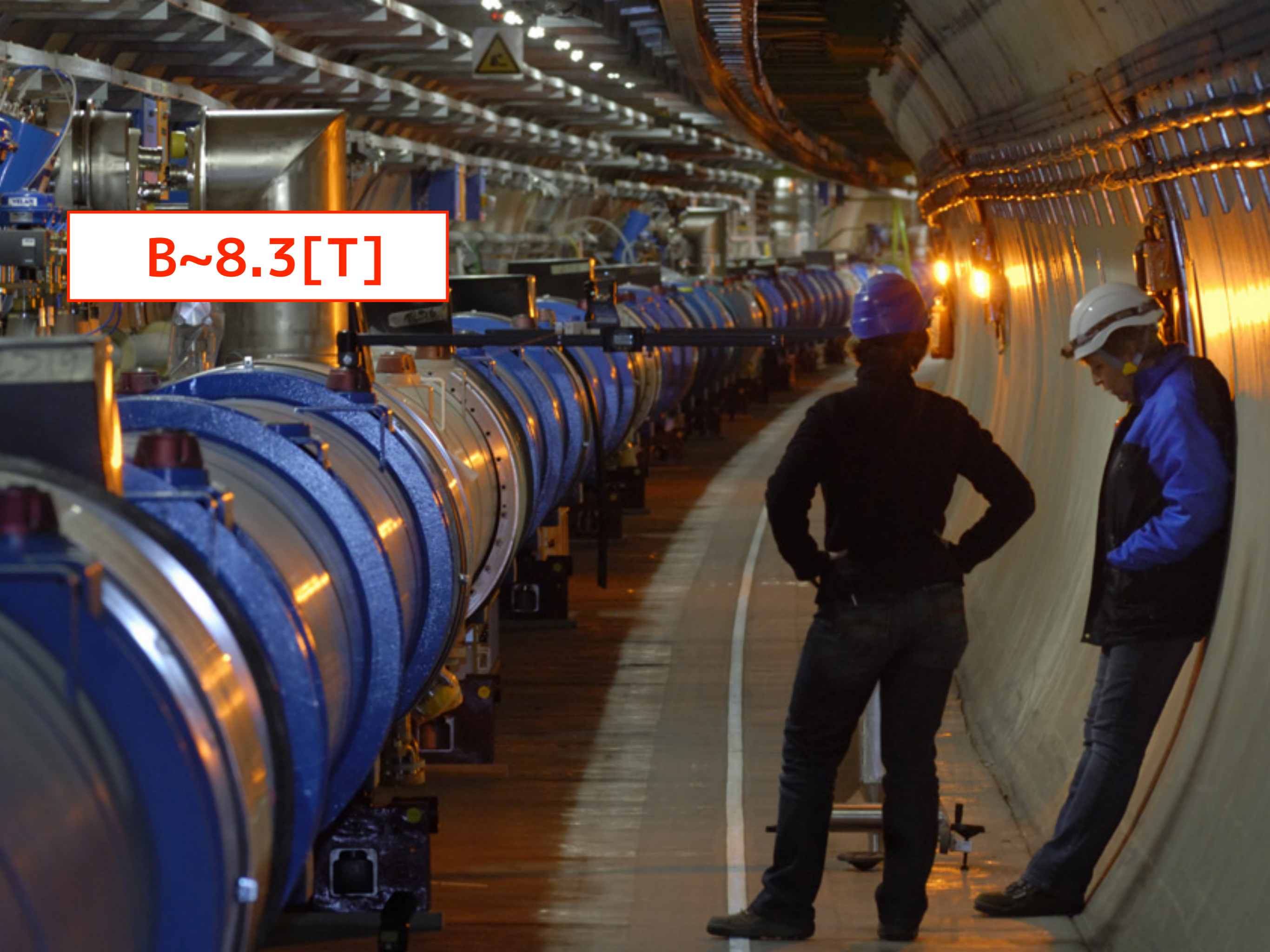


LHC (周長27km)

LHC 27 km

地下100mに埋まってる
陽子ビーム: 6.8TeV+ 6.8TeV

$B \sim 8.3 [T]$

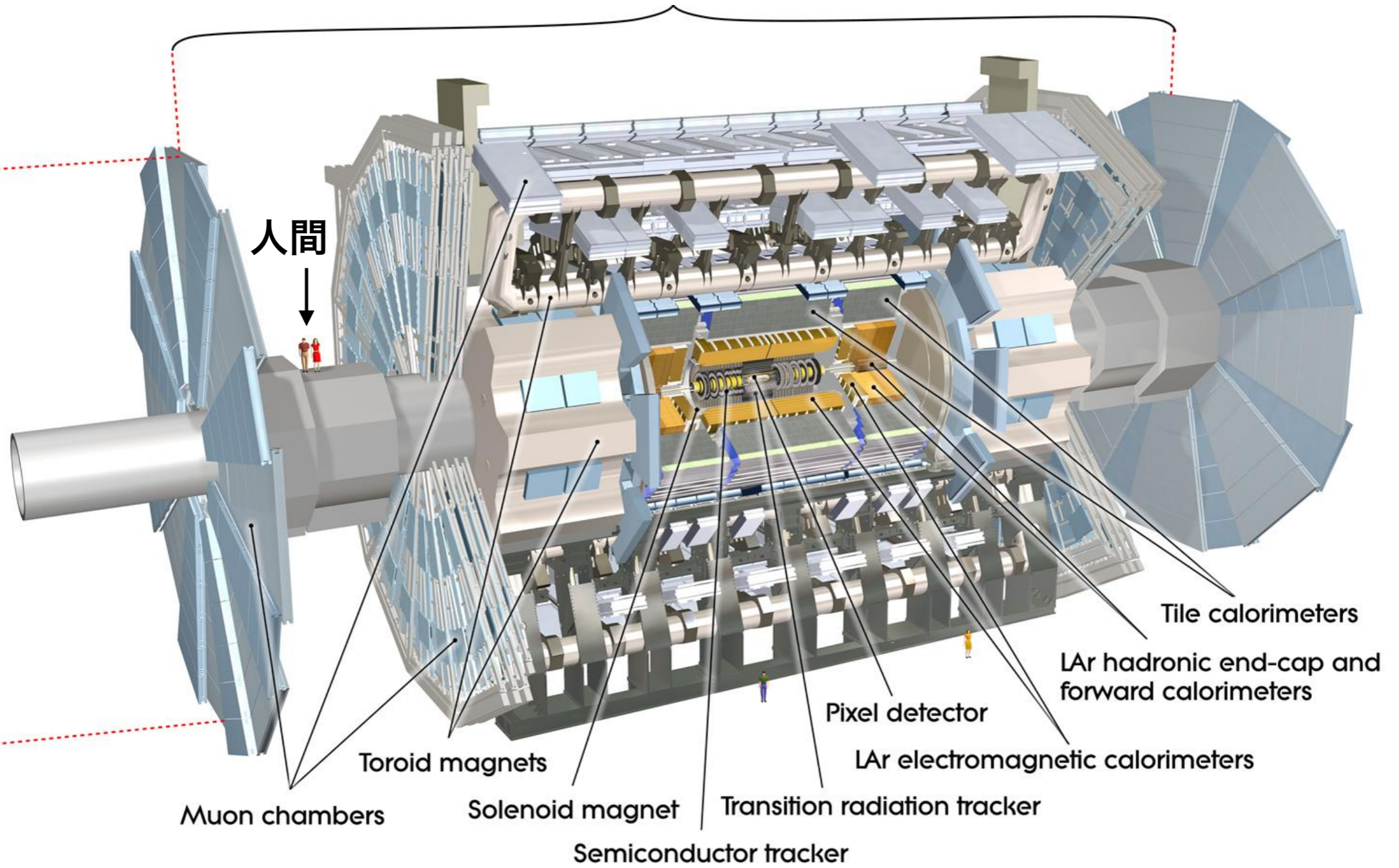


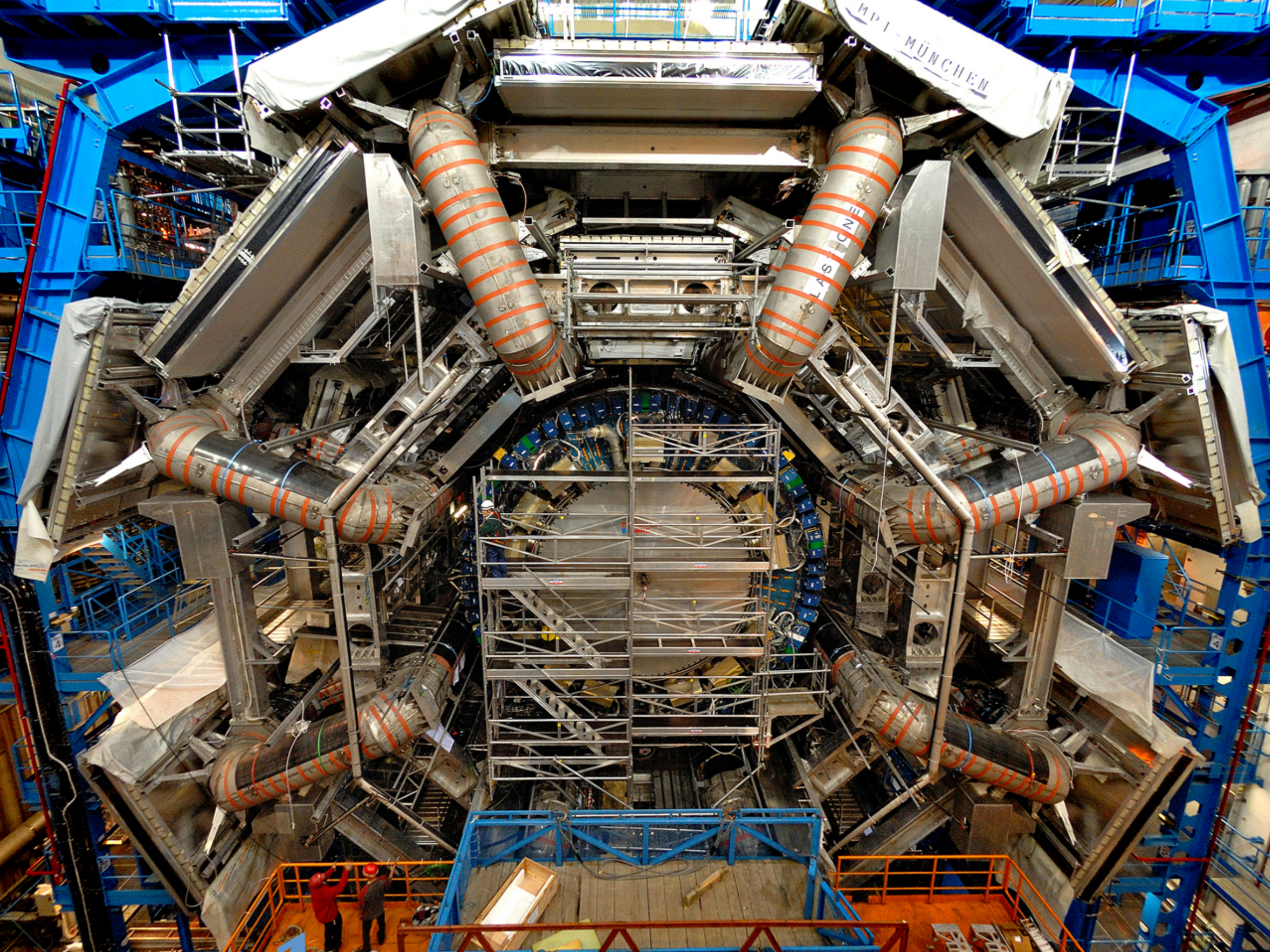
ATLAS検出器

44m

25m

人間
↓

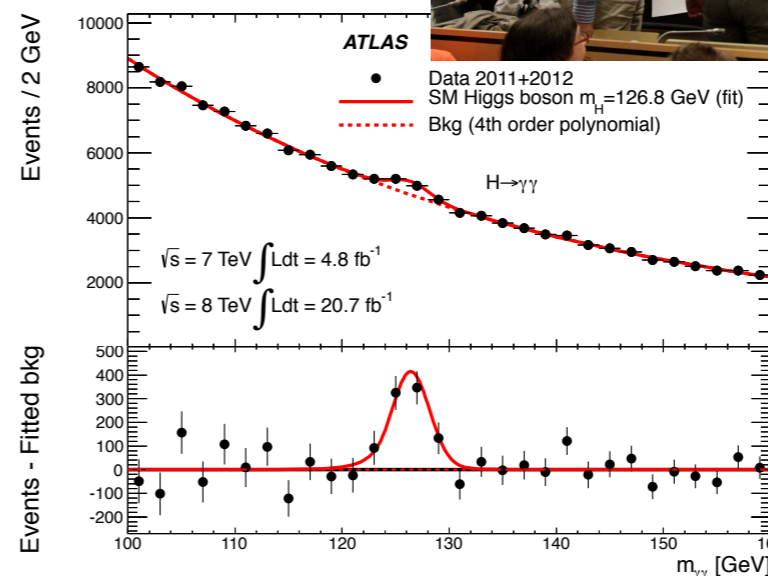
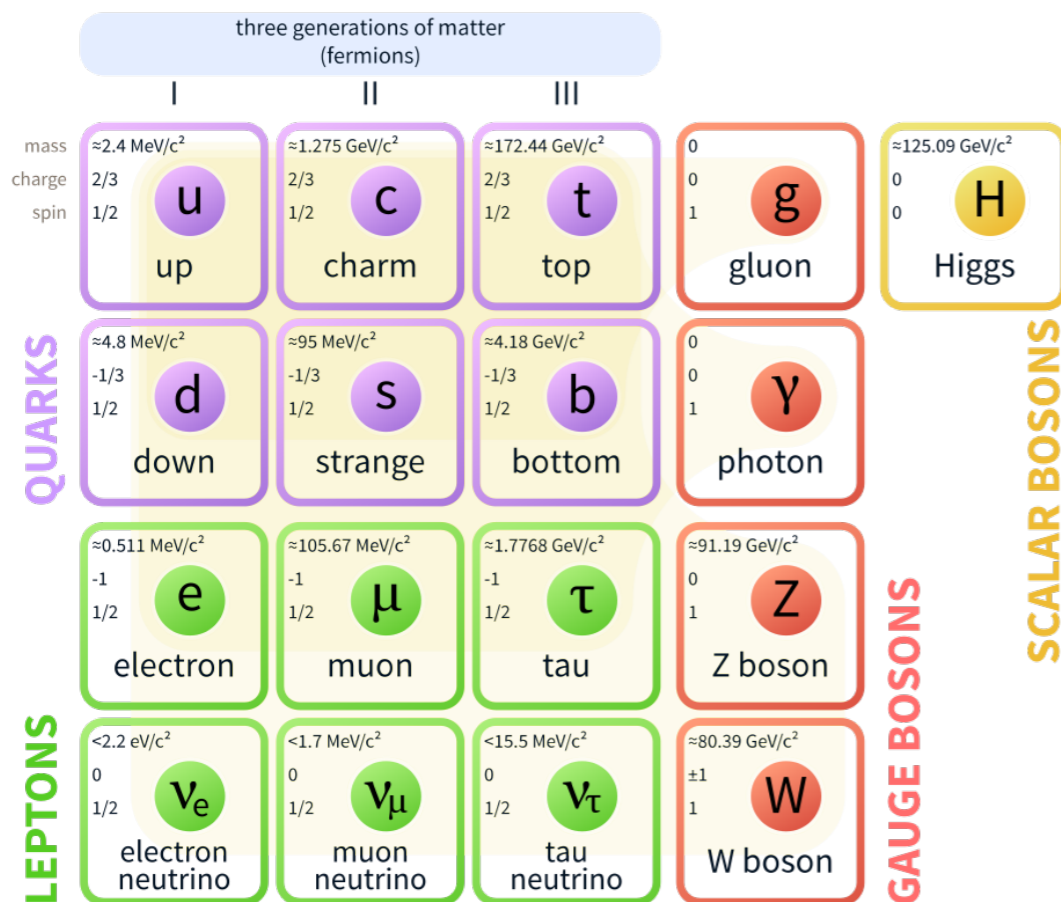




LHCここまでの最大の業績: 素粒子標準理論の完成

Standard model (SM)

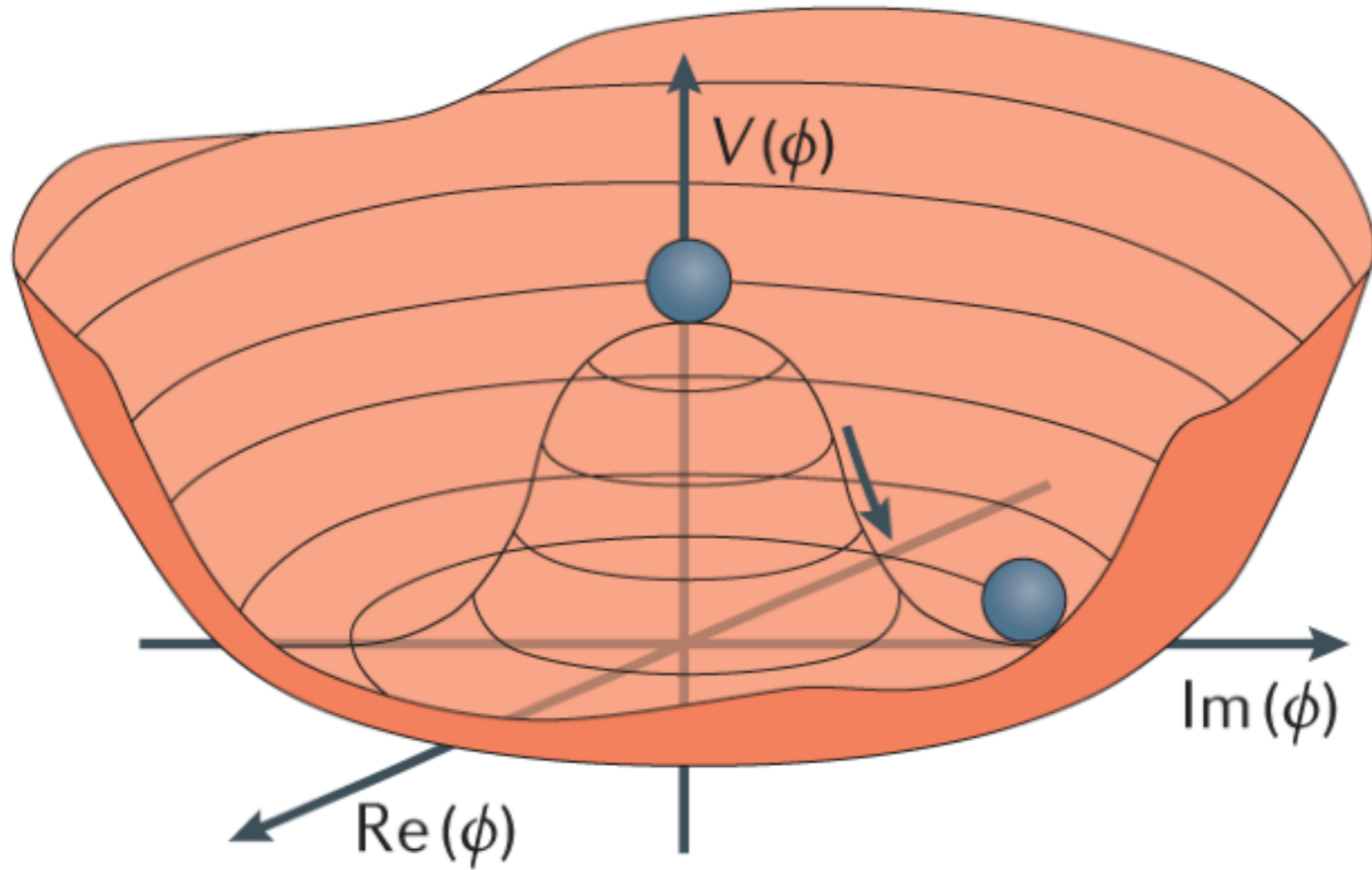
Standard Model of Elementary Particles



- ✓ モノの最小単位にたどり着いた (quark, lepton)
- ✓ それらの間に働く(ゲージ)相互作用もまあ理解できた
- ✓ それらに質量を与えるもの (higgs場) も発見

まだやることはあるのか？

?



結合・形・安定性 etc.

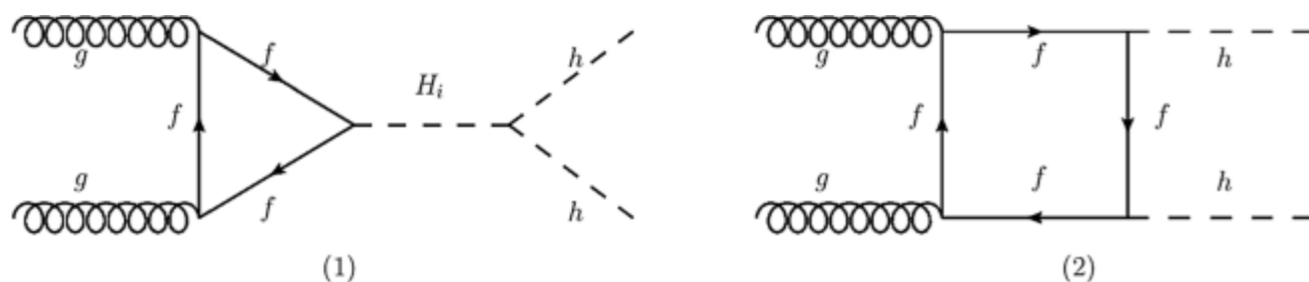
Higgs 3点結合測定

Potentialの形に直接迫る。LHCの最大の目標の一つ。

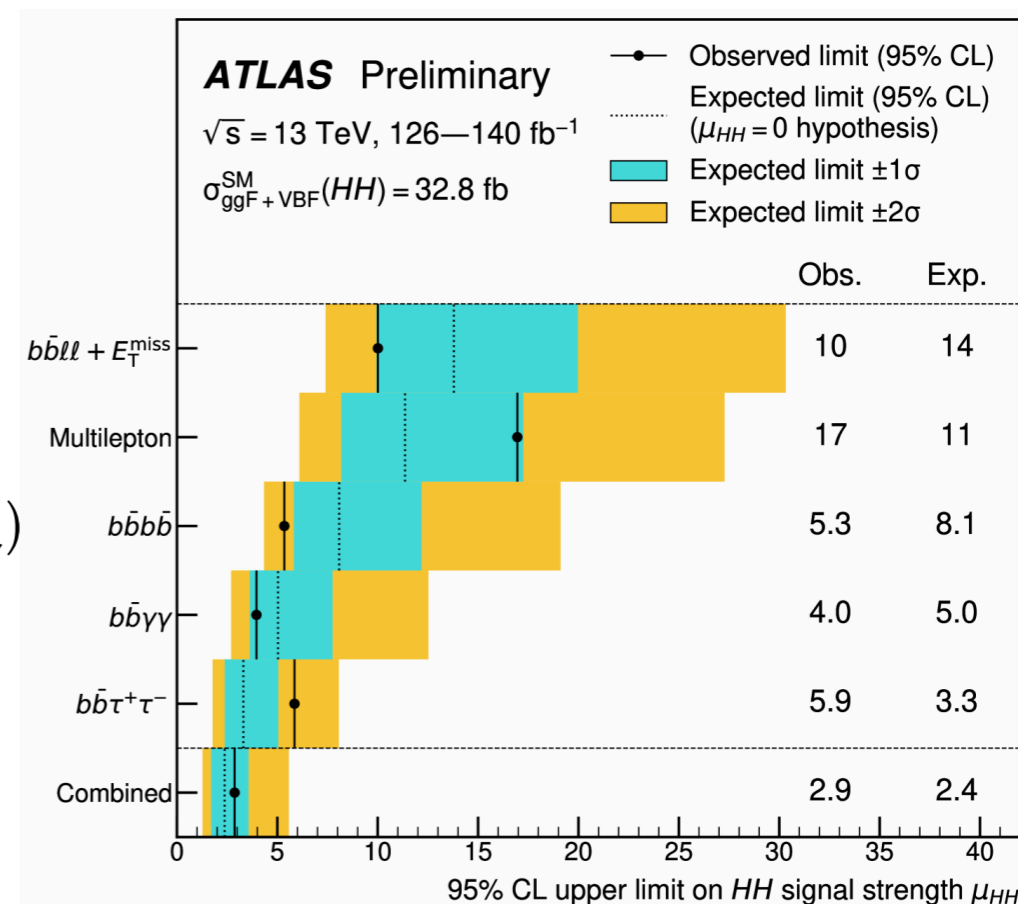
$$V = \mu^2 \Phi^\dagger \Phi + \lambda (\Phi^\dagger \Phi)^2.$$

$$v^2 = -\mu^2 / \lambda \simeq (246 \text{ GeV})^2, \quad m_h^2 = 2\lambda v^2 = 2|\mu^2|.$$

$$hhh : -6i\lambda v = -3i \frac{m_h^2}{v}, \quad hhhh : -6i\lambda = -3i \frac{m_h^2}{v^2}.$$



- Di-higgsの生成を見るしかない
- 3点結合を介さないdi-higgs生成もある (背景事象)
↑これがまだ見えてない
- Di-higgs自体の発見がここ5年くらいの目標



現状: 標準模型×2.8までを棄却

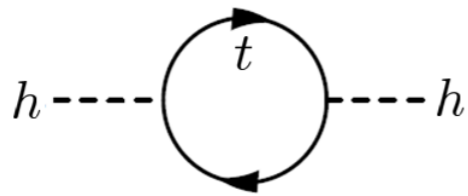
またそもそも標準理論は完璧ではない

Higgs質量の2次発散 ("階層性問題")

ダークマター候補がない

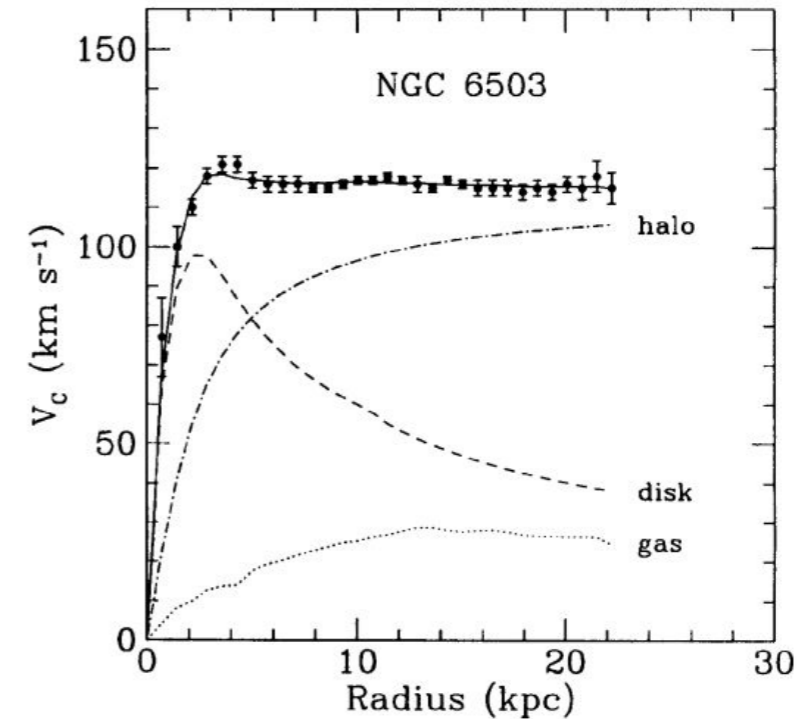
$$\text{SM} : \Delta m_{\text{higgs}}^2 \sim -\frac{3|\lambda|^2}{8\pi^2} \Lambda^2 + \text{finite}$$

Credit: 岩本祥さん



$$m_{\text{higgs}}^2 \sim m_{\text{bare}}^2 + \Delta m_{\text{higgs}}^2$$

125	10^{38}	-10^{38}
(測定値)	(理論パラメータ)	(Λ で決まる定数)



"そよ風でも倒れるstandard model"

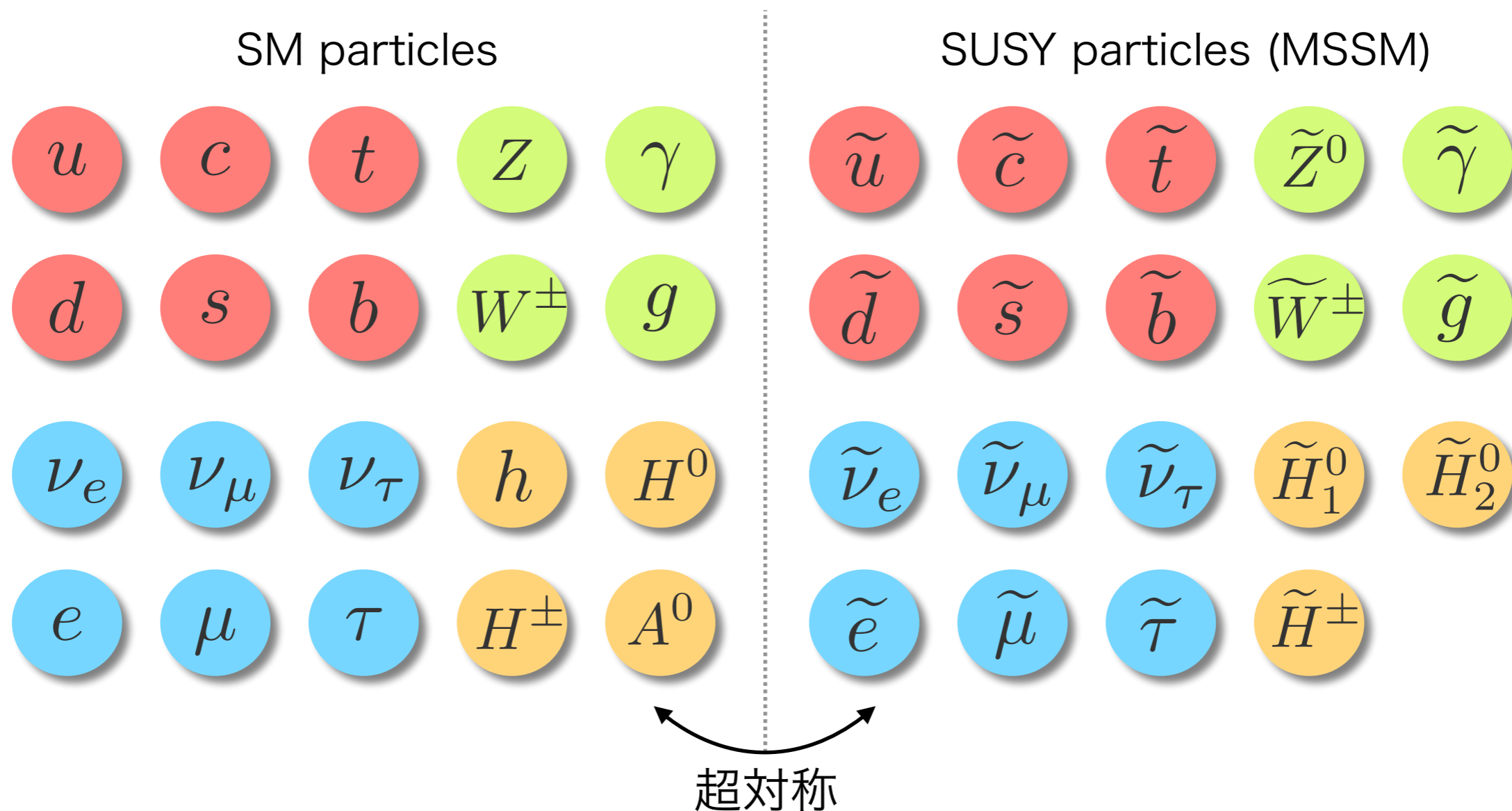
ニュートリノは電氣的に中性で質量もあるが
相対論的速度 → 銀河の構造を再現できないのでNG

- 他にも問題がちらほら (物質反物質非対称性など)
- SMは内部矛盾のない理論だが、この世の究極理論ではないことは確定している
- 標準理論を超える**新物理**が必要なのは間違いない

超対称性理論 (SUSY)

= 超対称性を持つように拡張されたSM

Supersymmetric theory



スピンだけ違う粒子がもう1セット

SUSYのうれしいところ

標準理論の諸問題の解決能力

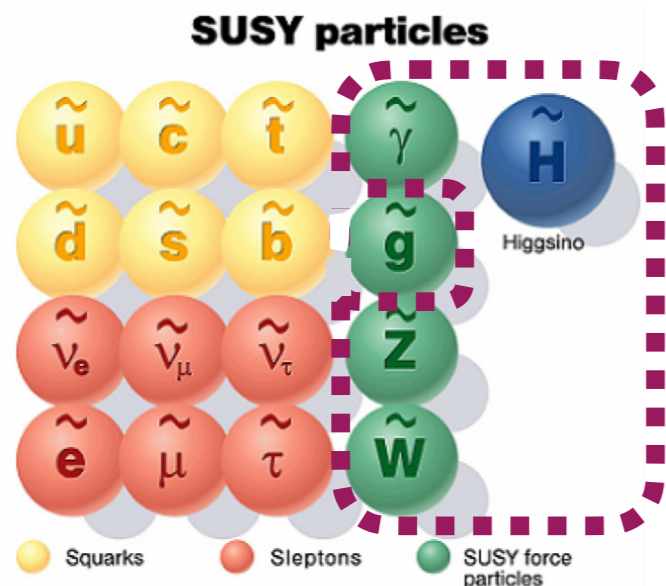
Higgs mass 2次発散→log発散

$$\text{MSSM} : \Delta m_{\text{higgs}}^2 \sim -\frac{3|\lambda|^2}{8\pi^2} \Lambda^2 + \left(2 \times \frac{3|\lambda|^2}{16\pi^2} \Lambda^2 \right) + O(\log \Lambda)$$

超top = scalar-top ("stop")

ダークマター候補いる

Neutralino: SUSY版中性ゲージボソン

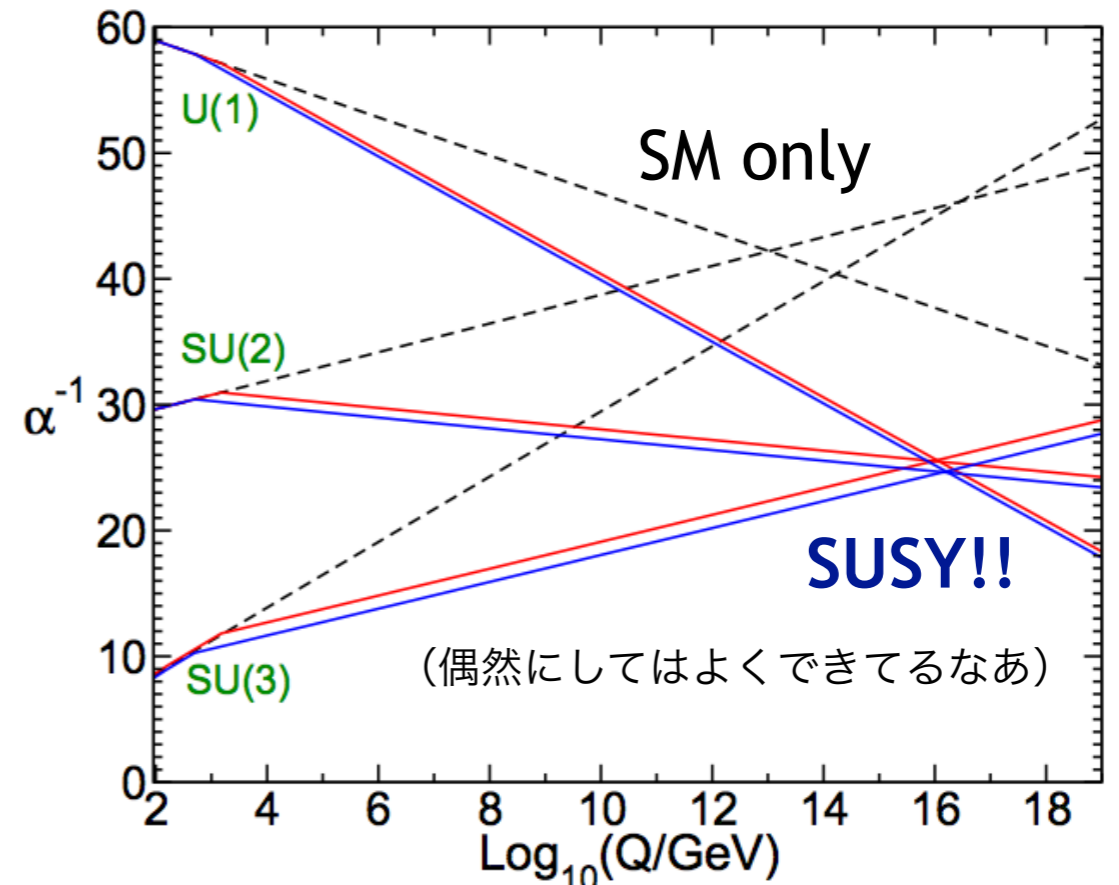


Wino
Bino
Higgsino

他にも
Gravitino
Axino etc.

究極理論を目指したformalismで有利

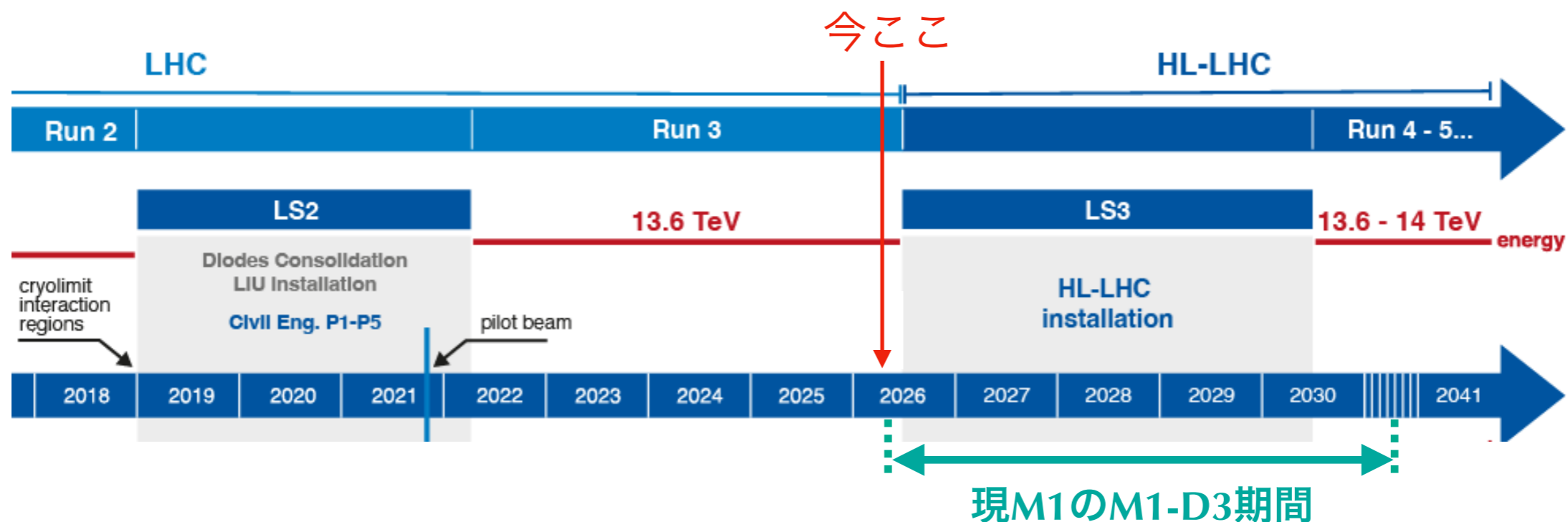
大統一 (GUT) が自然に実現



量子重力への足がかり... ?

- SUSY代数が内部対称性と時空対称性を同時に含む
- 高次元理論でのくりこみの難易度 etc.

LHCのタイムスケール



今年の6月でRun3は終わり

- 500fb^{-1} 貯まった。Run2の2.5倍 → 質的に違う物理成果。
- 今後3.5年間の長期シャットダウンへ。

"Phase-II upgrade" 内部検出器の総入れ替え (ITk), ミューオントリガー回路の刷新など

2030年から高輝度運転 (High-Lumi LHC; HL-LHC)

- ビームluminosity 4倍 → 4倍速でデータ貯まる
- Run2+3のデータ量を超える2032年あたりに新しい物理成果出始める

2022

2030

2040

2050

2100

LHC

HL-LHC

FCC-ee

FCC-hh

FCC- $\mu\mu$

Higgs 3 点がSMだ
or SMじゃない!

New Physicsを
絞り込もう。
ヒッグスの結合?

New Physics 発見。
DMを地上で生成とか。

precision & 発見で、
New Physicsの全容が
明らかに!

そして月へ?
このシナリオに乗るのか、勝
てるシナリオがあるのか?

C³, CLIC

ヒッグスの結合がおかしい!

1-10TeV e+e-で新粒子発見!

ILC250

ILC++

New Physicsを絞り込もう。

New Physicsを探す!

SuperKEKB

SuperKEKB++

LEMMA based $\mu^+\mu^-$

いつできる? e+ driven

新しいCP/flavorの破れ?

このあたりでproton driver増強か?

J-PARC

J-PARC++

K, pi, muonの物理でNew Physicsを探る。
中性子

neutrino CP

g-2はこの辺?

そろそろprotonが崩壊するころ?

新粒子?

μ しか勝たん。

**μ TRISTAN
 μ^+ only collider**

μ TRISTAN10TeV, μ TRISTAN100TeV

muonいっぱいできるし加速したれ。

double beta

DM発見はこの辺?

$\mu^+\mu^-$

いつできる?

Dark Matter SearchからDark Matter Precisionへ

new collider revolution?



電子派



陽子派

寄田委員会 (将来計画委
員会) で作った絵。(絵
に関する責任は私に。)

京都ATLASが最近やっていること

物理解析 好きなテーマを探してやる

- Di-higgs探索
- 新物理探索 (最近はSUSYが多い)
- 量子力学基礎論測定
- 光子衝突
- ジェット中の(反)原子核生成

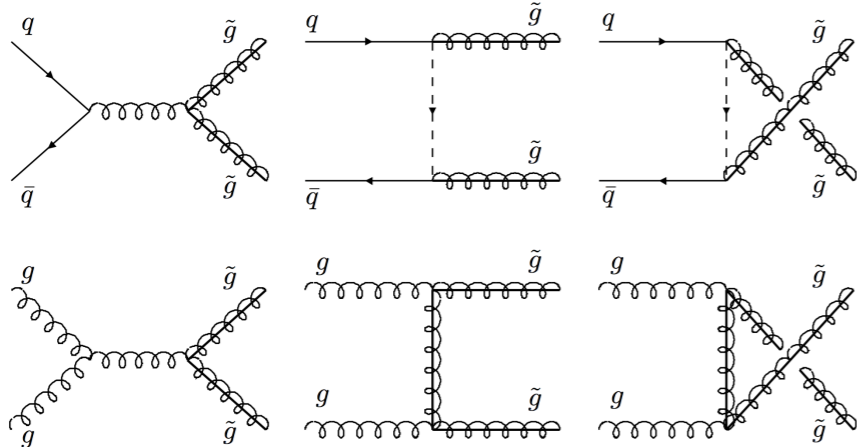
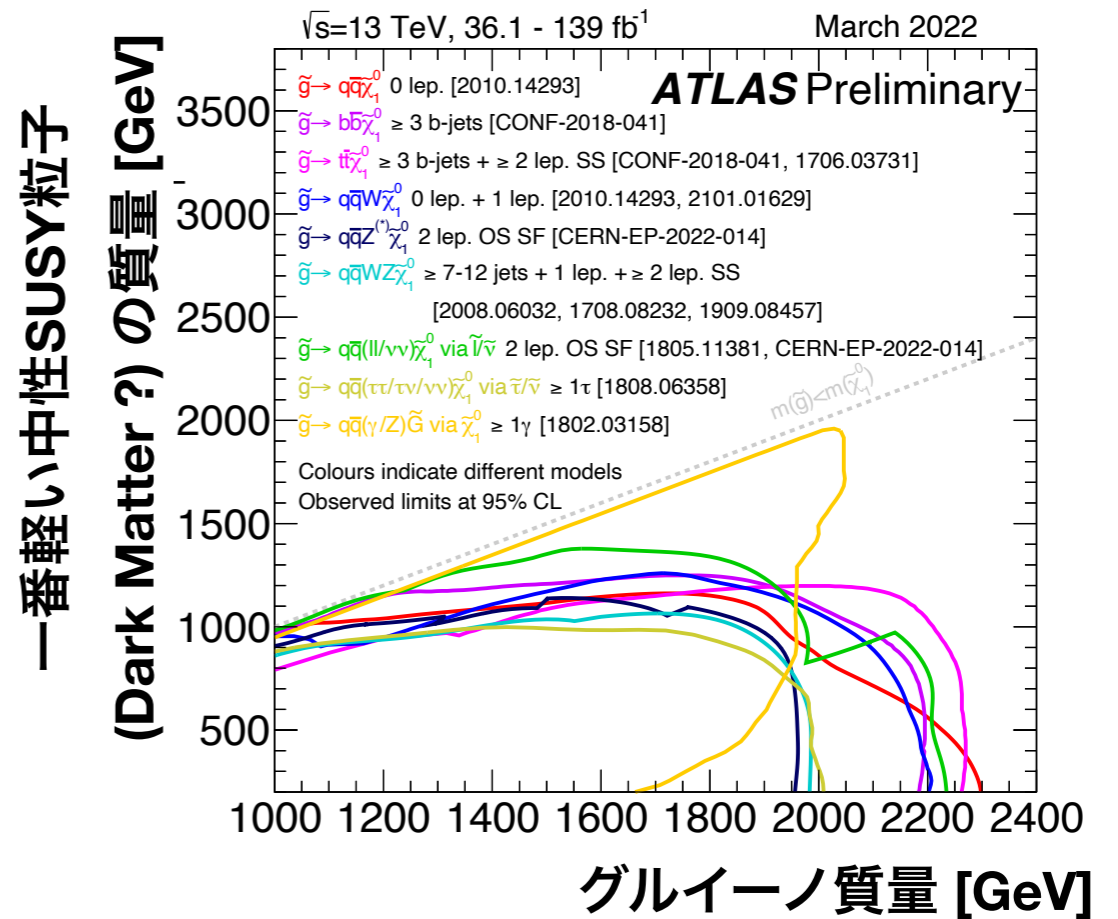
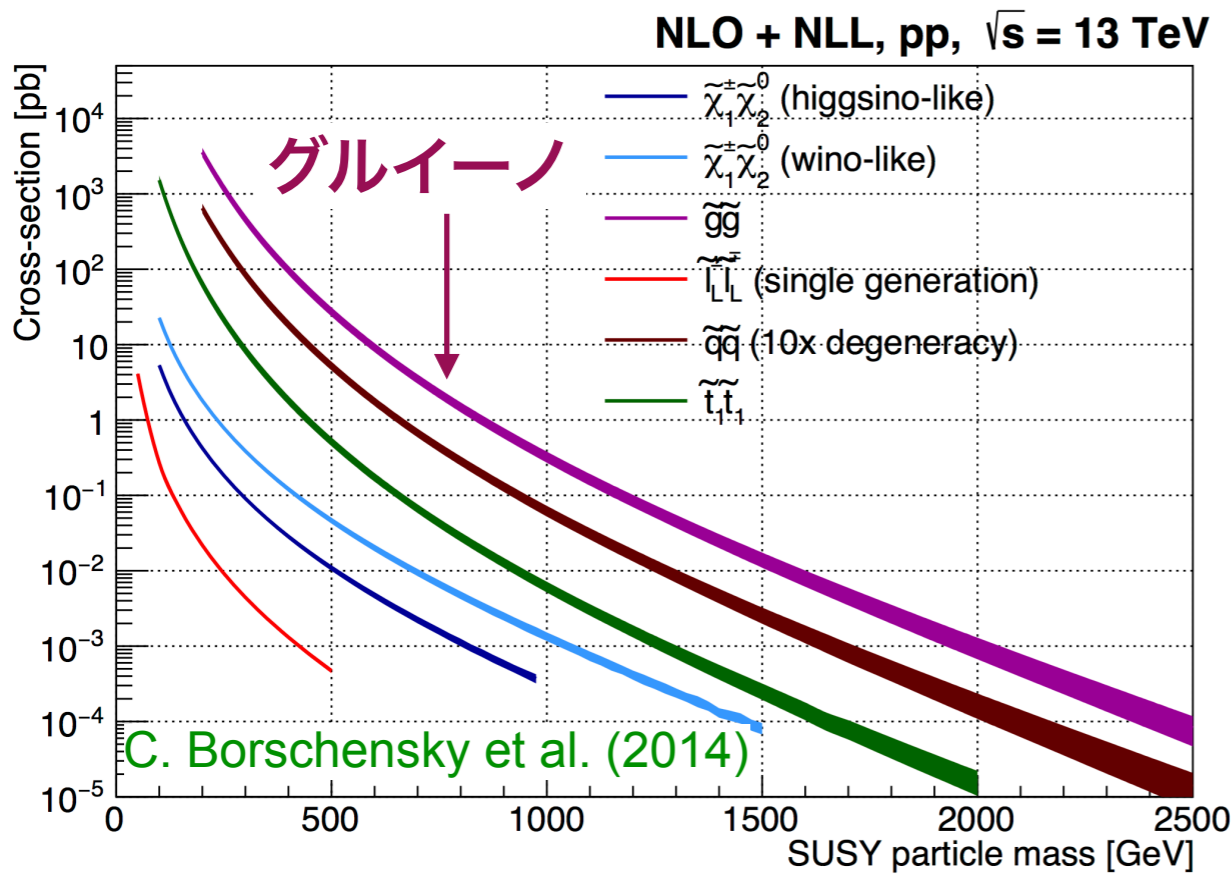
ミュオントリガー検出器 (TGC) の開発と運転

- Run3運転
- HL-LHCに向けたアップグレード

LHCでの王道: 強い相互作用で重い粒子生成して探す

生成断面積が大きい

いなかった



見つけやすいやつは
基本もうやり尽くされた

私の尊敬する物理学者、伊部昌宏さんは言っていた。



[ICRR webpageより拝借]

「今、知っているものをすべてだと思うのは人間の愚かさだ。自然をなめるな。」

「つまり、SUSYとか新物理があるというのはconservativeな仮定だ。」

伊部さんに写真・発言使用許可を確認したところ「そんなに偉そうには言ってないです。」とのこと。

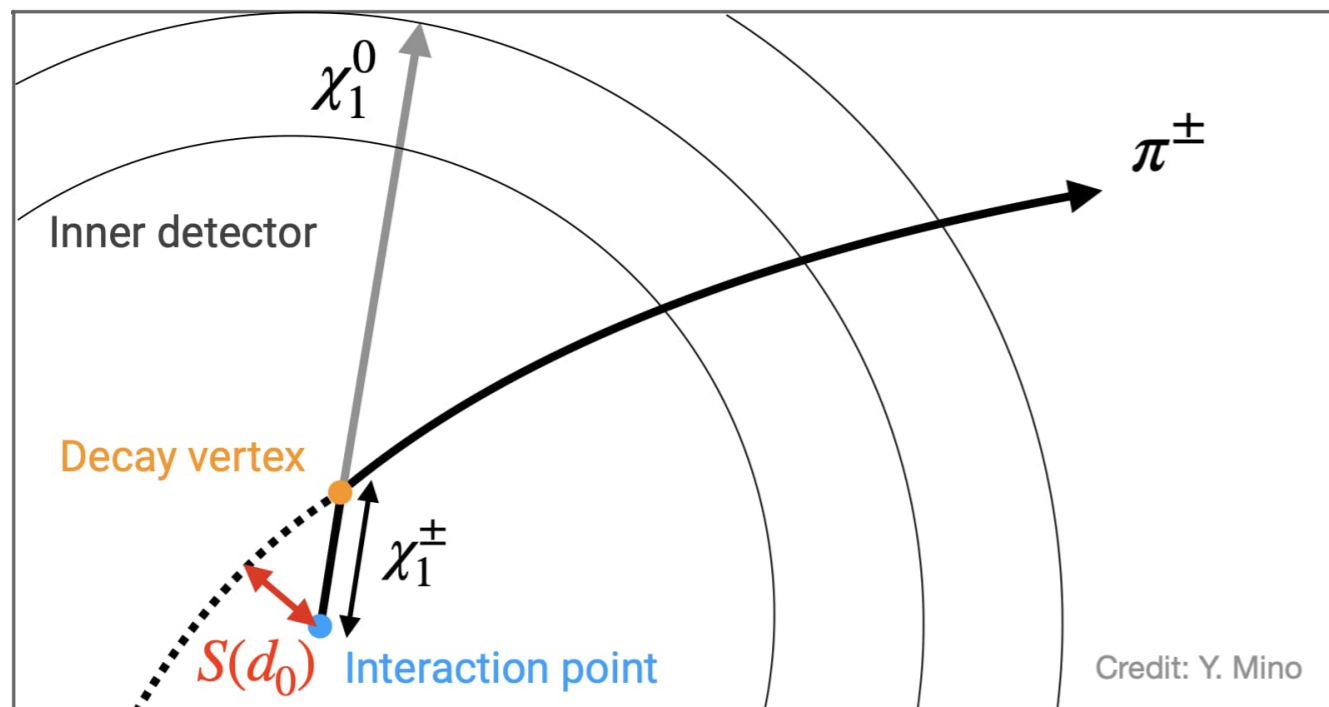
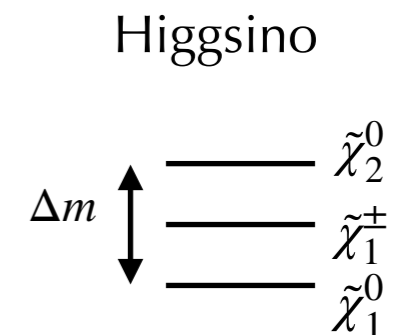
内容的にはほんとに言ってました。かなり脚色してますが。

LHCでの今の王道: 難しいけど重要な物理をやる

中川・田中? (SUSY): 特殊飛跡を使ったHiggsino/Wino探索

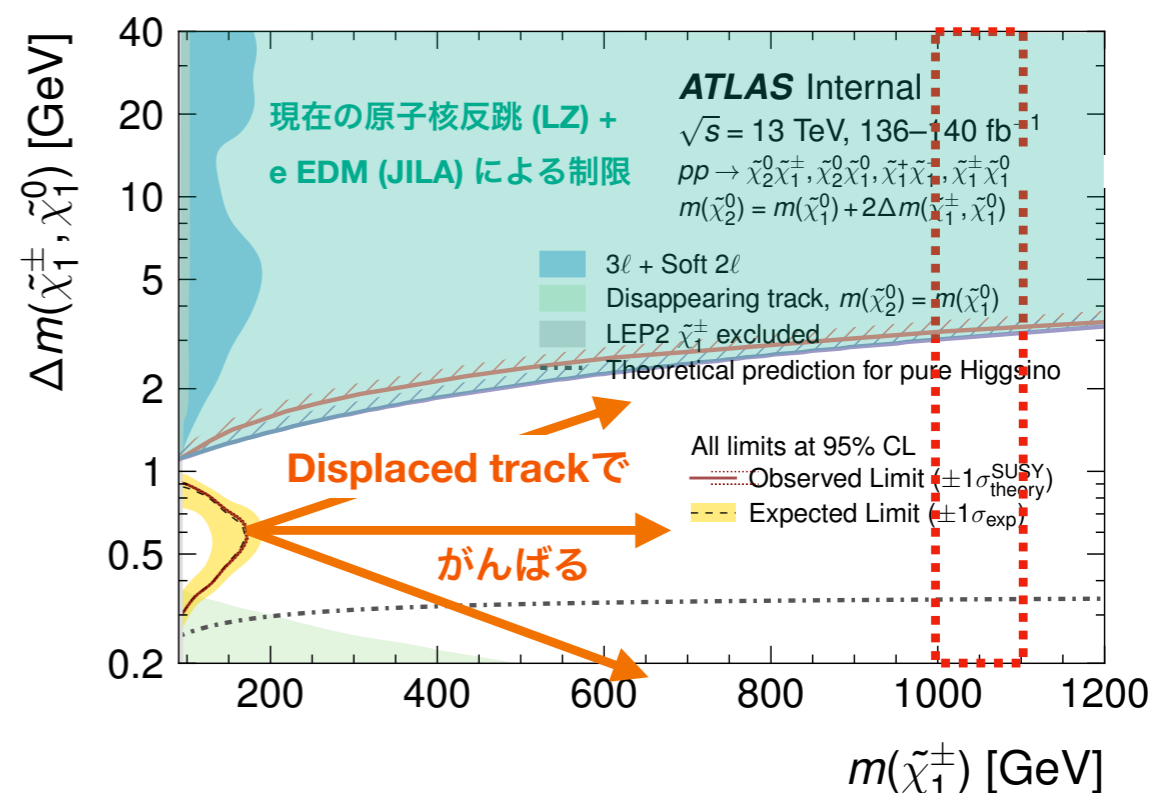
- Wino/Higgsino : 一番軽いやつはWIMPダークマターのよい候補
- それと縮退した重いペア : ちょっと長生き → 衝突点からズレた場所で崩壊
 Wino ($c\tau=6\text{cm}$) : 検出器に当たることもある ("消失飛跡")
- 崩壊で生じる粒子の運動量 : 0.1-1GeV **100MeV飛跡という必殺技**

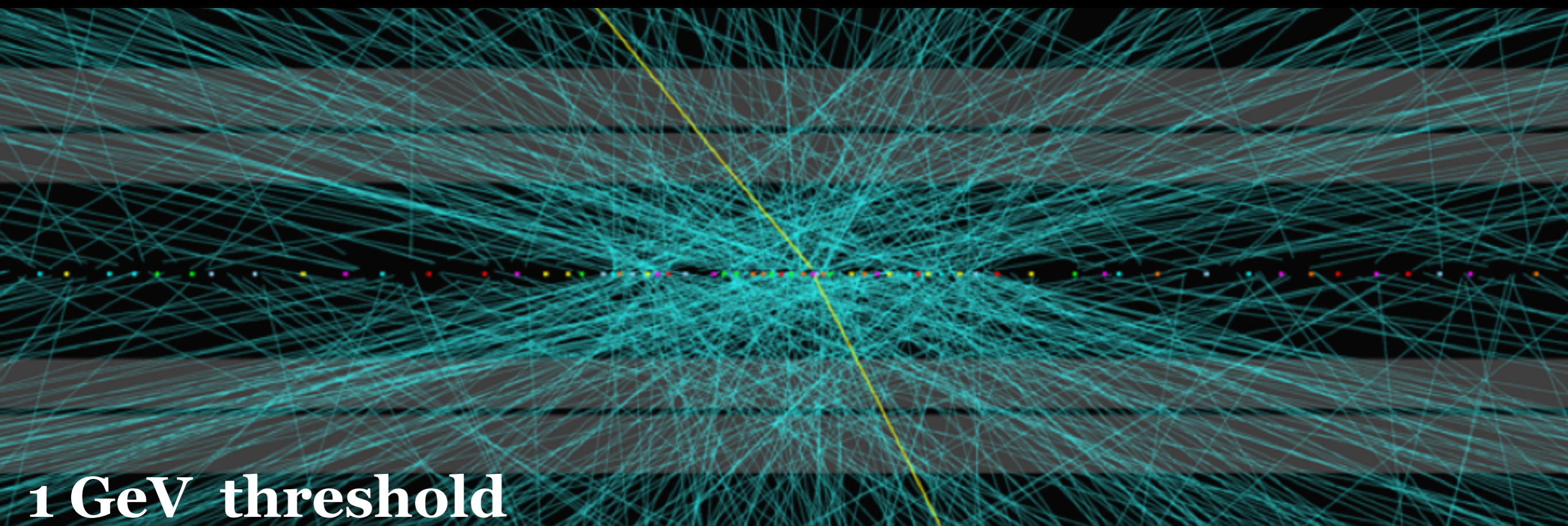
京都ATLASは歴史的に超低運動量粒子の解析が得意 (飛跡・e/ μ / τ etc.)



Higgsinoの探索現状

目指せ1TeV





1 GeV threshold

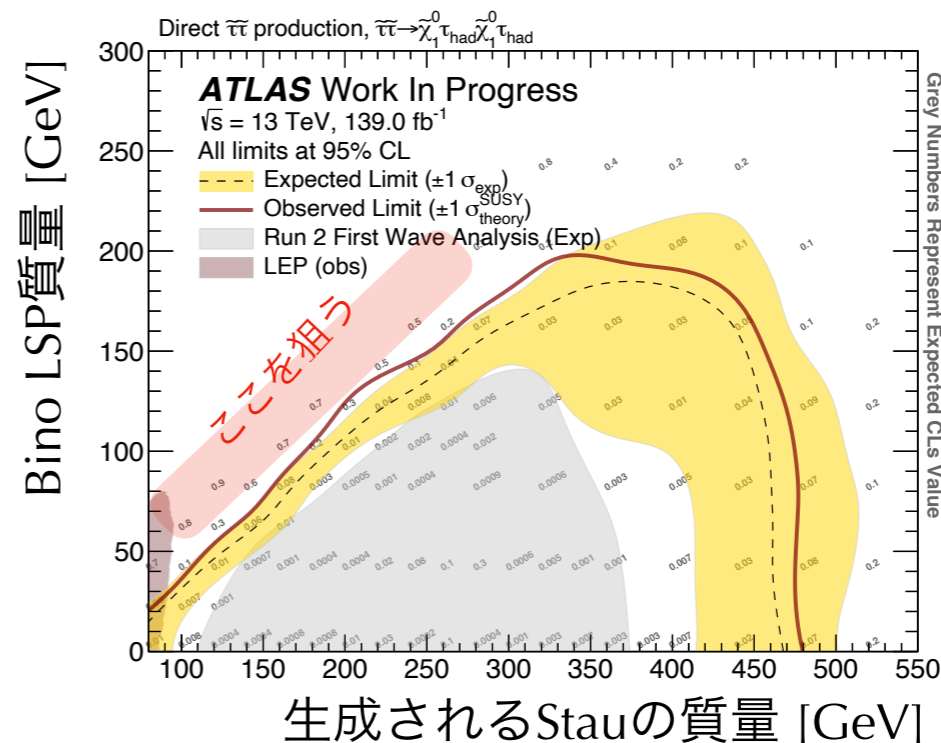
LHCの典型的な衝突。陽子 10^{10} 個からなる束同士を交差させているため、交差あたり平均60個の陽子衝突が重畳する。

(HL-LHCでは140-200)

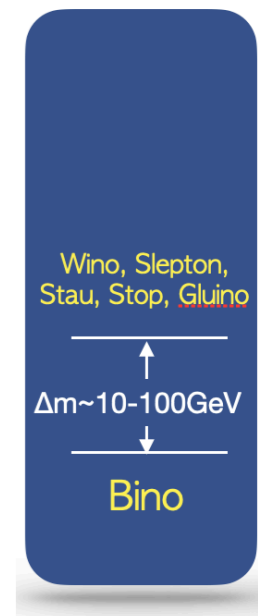
LHCでの今の王道: 難しいけど重要な物理をやる

河本 (SUSY): Bino LSPと縮退したStauの探索

- Binoがダークマターになるシナリオで最も未開拓
未だに最強の制限はLEP
- 始状態放射 (ISR) を用いた新しい解析
 - HL-LHCでも無理という下馬評を覆せそう
 - 低運動量tau IDの開発

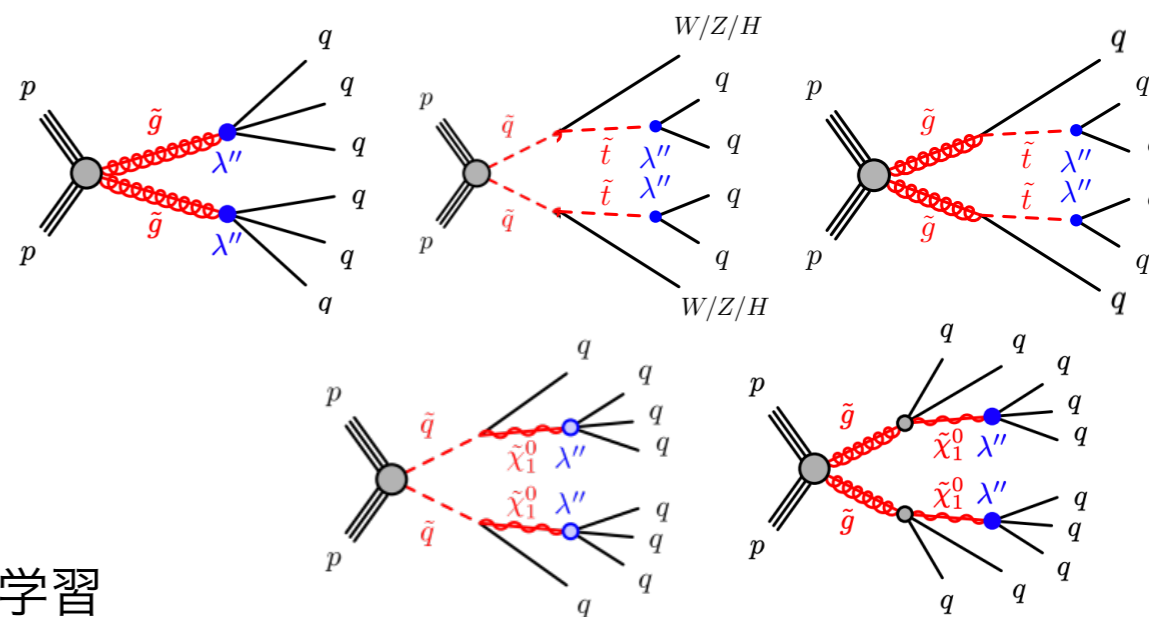


Co-annihilation



佐野 (SUSY): 弱機械学習を使った包括的共鳴探索

- 機械学習を使った新物理探索のネック:
狙える信号の範囲の広さ \Leftrightarrow 探索感度のトレードオフ
- 弱教師学習を使って両立 \rightarrow 究極の一般探索
 - 信号の対称性だけを要請したイベント再構成学習
 - 信号を含んでそうなデータ vs いなそうなデータの分類学習
- Multi-jet終状態に崩壊する共鳴信号各々に対して最強の感度を狙う

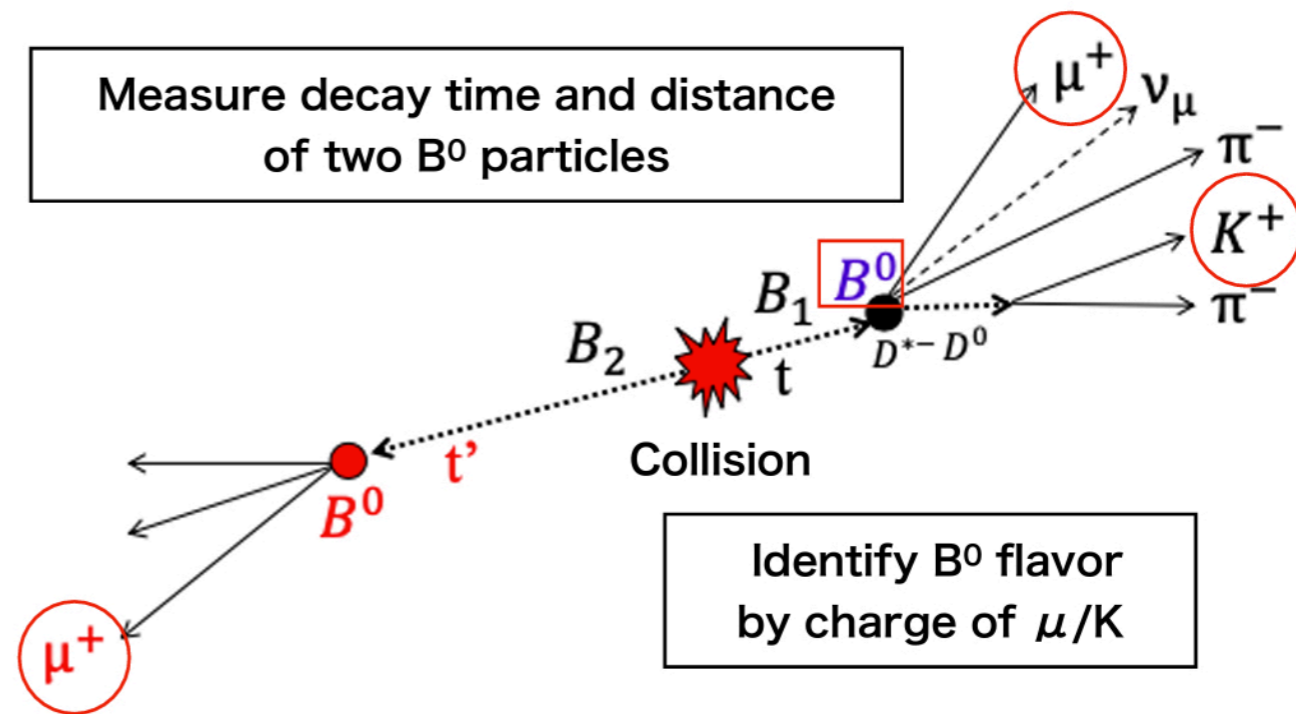


e.g. SUSYが標準理論粒子に崩壊する場合 (R-parity violation)
色々ありすぎていちいち狙ってたらきりが無い

LHCでの今の王道: 難しいけど重要な物理をやる

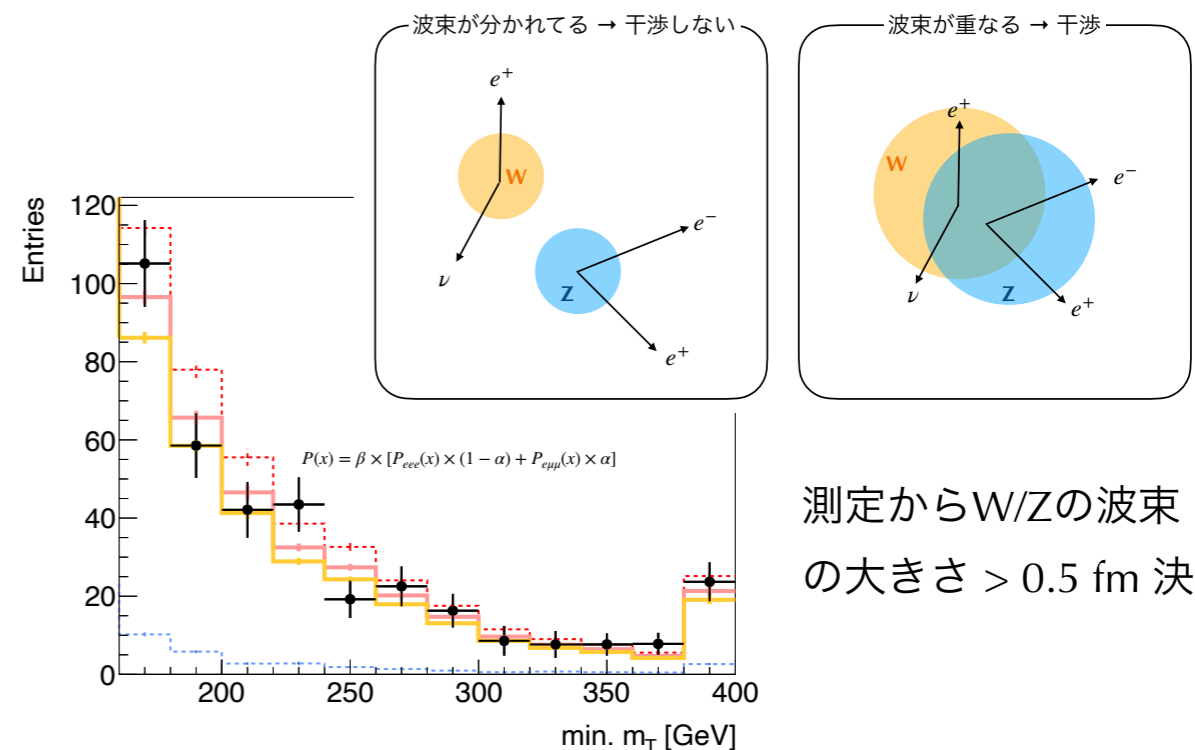
辻川 (量子): ベル不等式検証@ $B^0\bar{B}^0$ 振動

- ベル不等式: 古典と量子の判別式
- $B^0\bar{B}^0$: CP数で量子もつれ
- 重たい粒子 (局所性高い) での検証
- 未知のデコヒーレンスソースの探索
- 「崩壊」における波束の収縮の検証



陳 (量子): 不安定粒子の波束測定

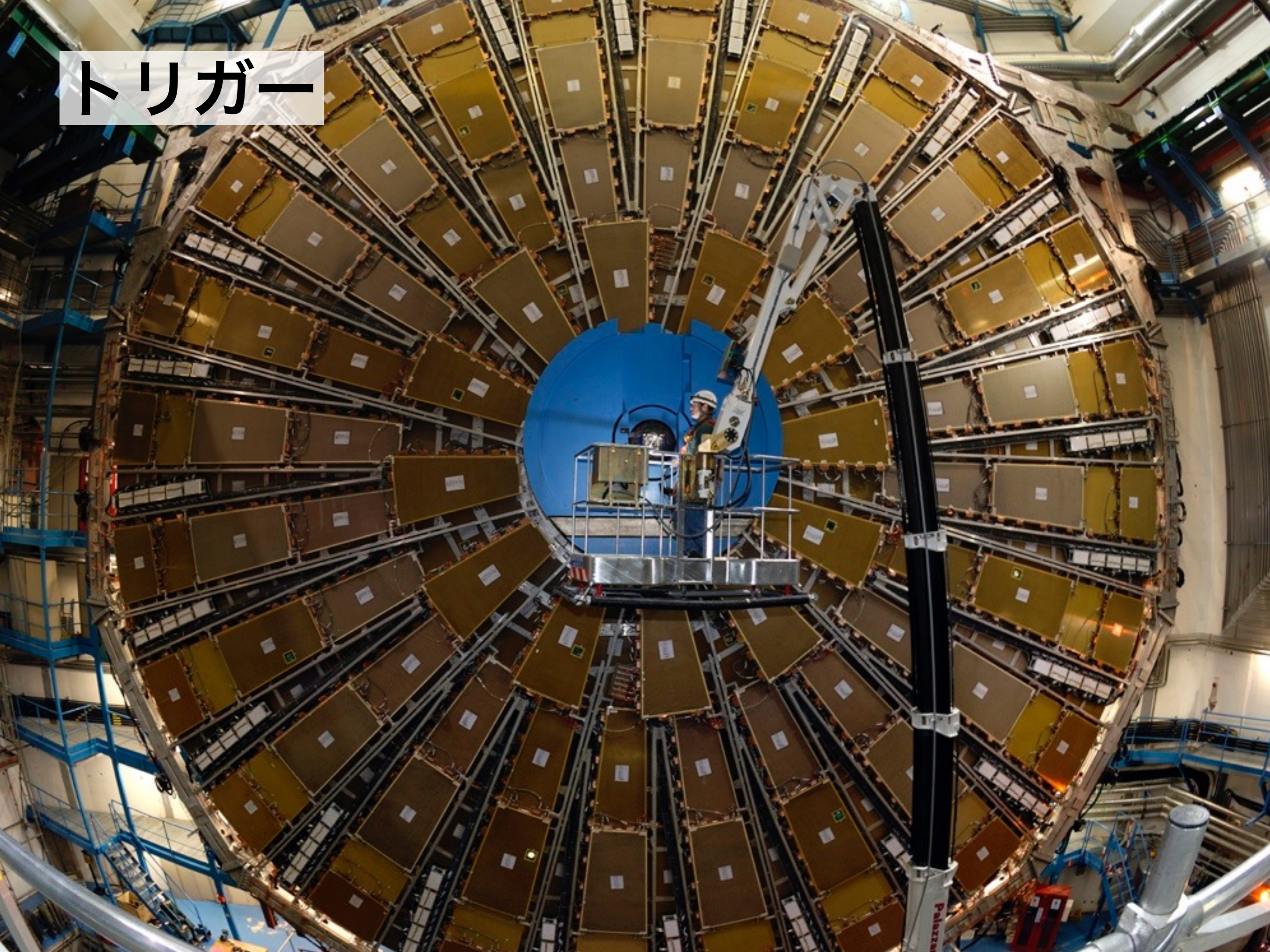
- 粒子崩壊を使った2重スリット実験
- 干渉するかどうかは位置の広がり (波束) の大きさ次第
→ 干渉の実測から波束の大きさを推定
- 何もわかってない (有限波束の場の量子論がない)
- Next step: 長寿命粒子の測定 (干渉してたら驚き)



測定からW/Zの波束の大きさ > 0.5 fm 決定

他にも光子衝突や反原子核測定とかにも手を出している

トリガー



トリガー: なぜ重要なのか

ハドロンコライダーの宿命: **ゴミの方が10桁多い**

見たい事象 (e.g. higgs粒子生成) に比べて
凡庸なQCD散乱 (di-jet生成) が多すぎる。

全て記録するのは不可能

データの書き込み速度と記憶容量による制約

全て記録する必要もない

大きい横運動量 (p_T) や、信号に特有な特徴を要求
して、興味深い事象だけ記録 ("**トリガー**")

トリガーできなかつた事象は二度と取れない

解析みたいにやり直しができない。

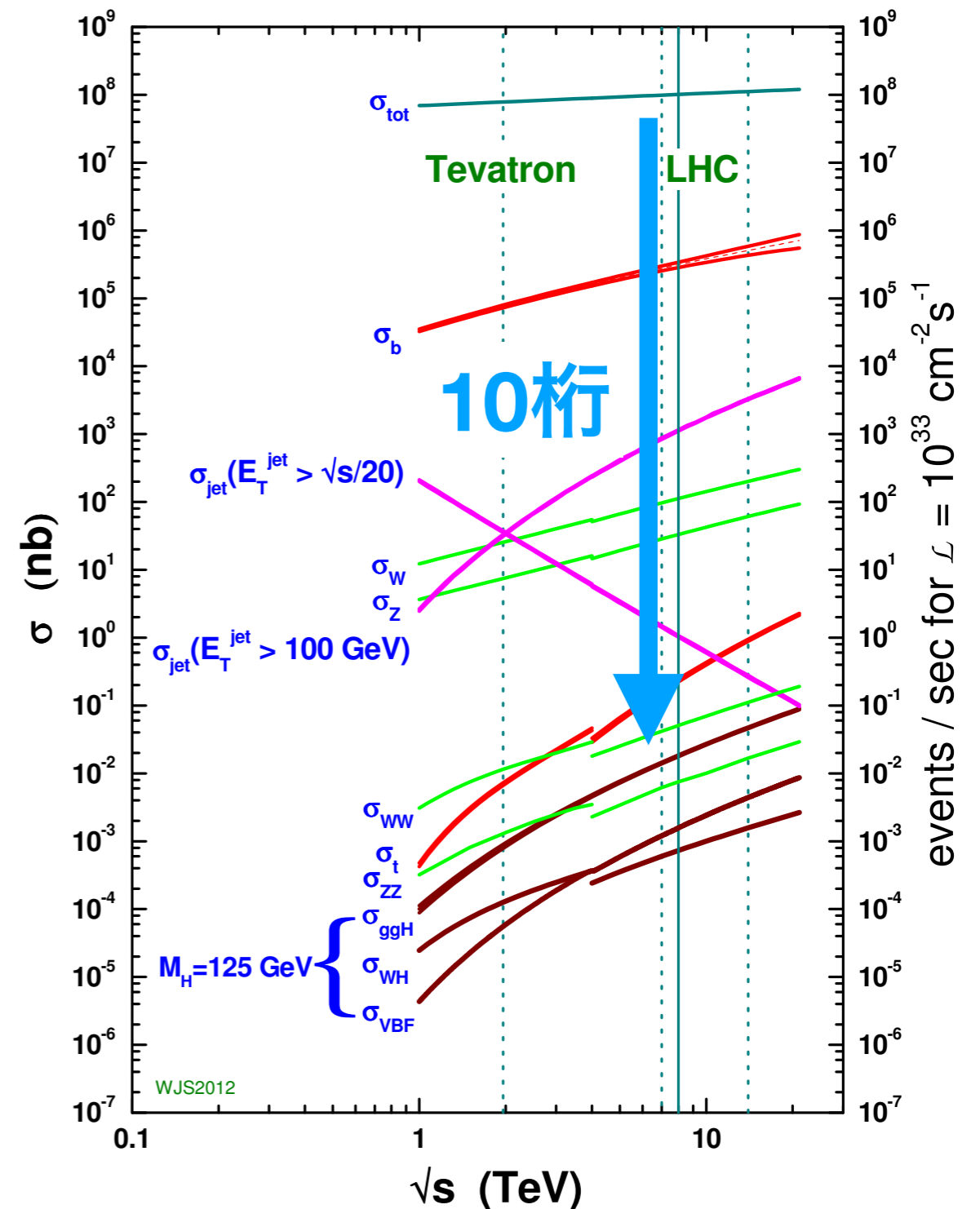
2段階のトリガー戦略

陽子衝突: 40MHz

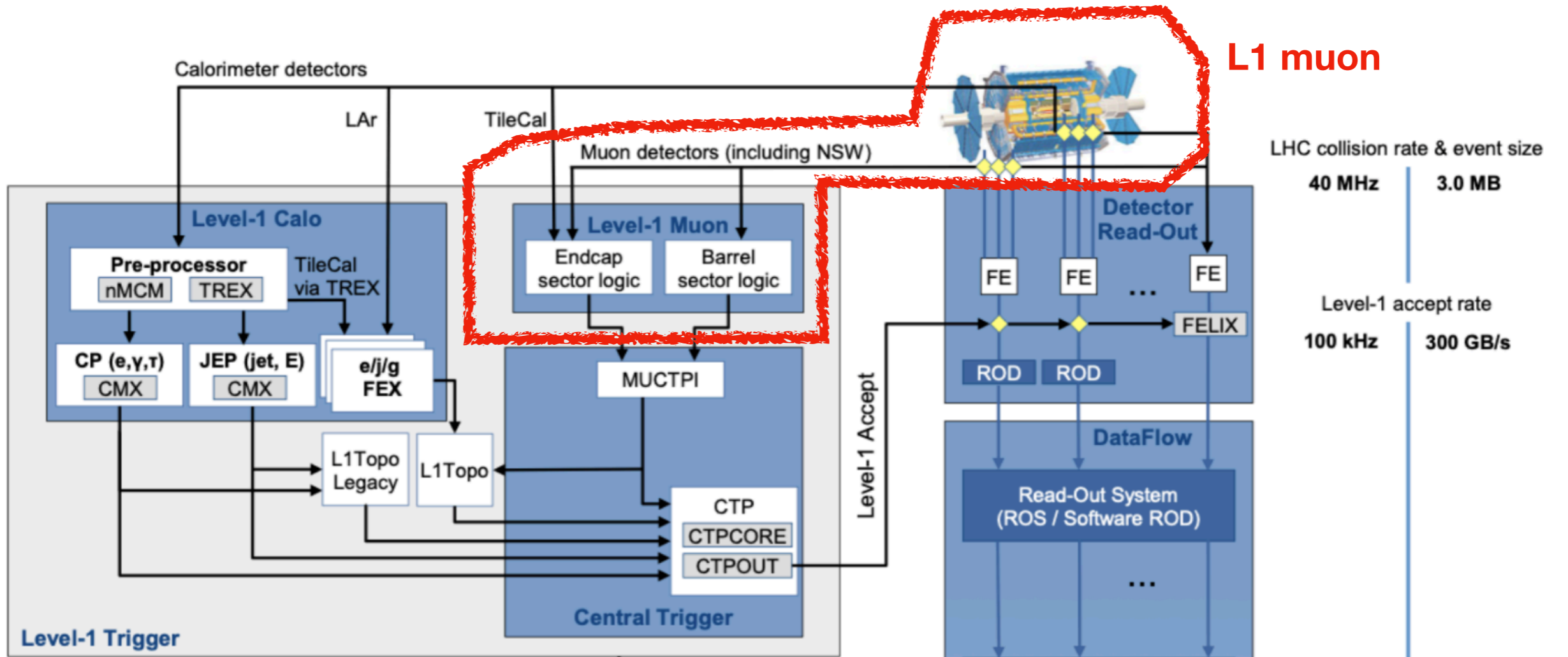
ハードウェアトリガー (Level-1): $\rightarrow 100\text{kHz}$

ソフトウェアトリガー (HLT): $\rightarrow 1\text{kHz}$

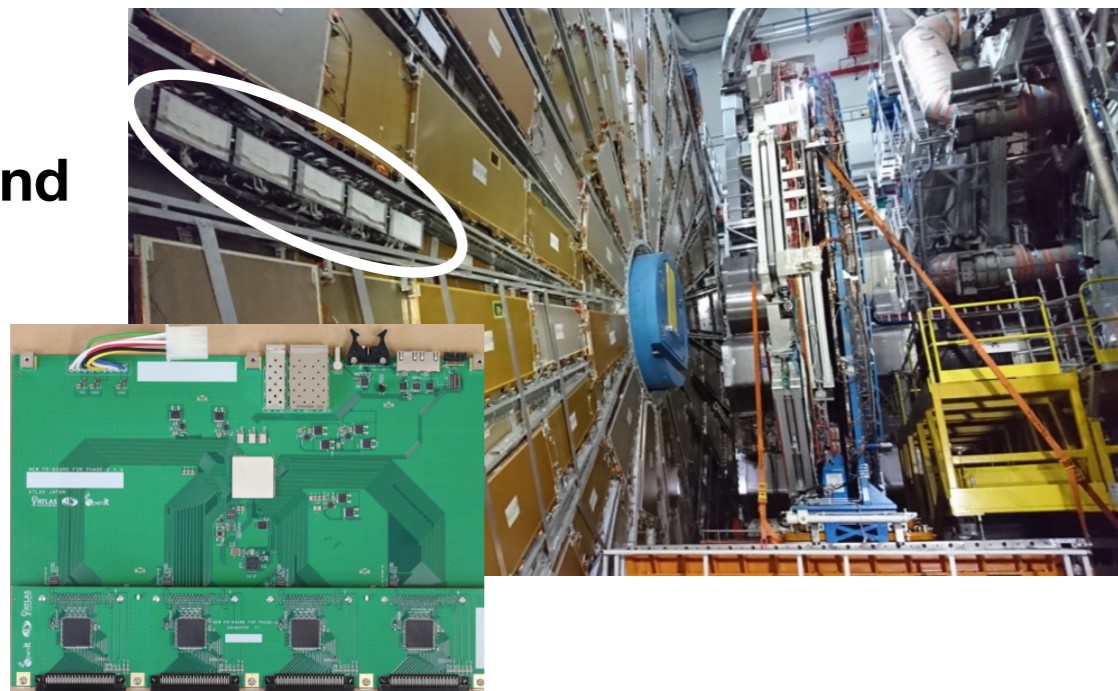
proton - (anti)proton cross sections



ハードウェアトリガー (L1): 時間との勝負 (レイテンシ~2.5 μ s) 大量のFPGAで速く・粗く処理



Front-end

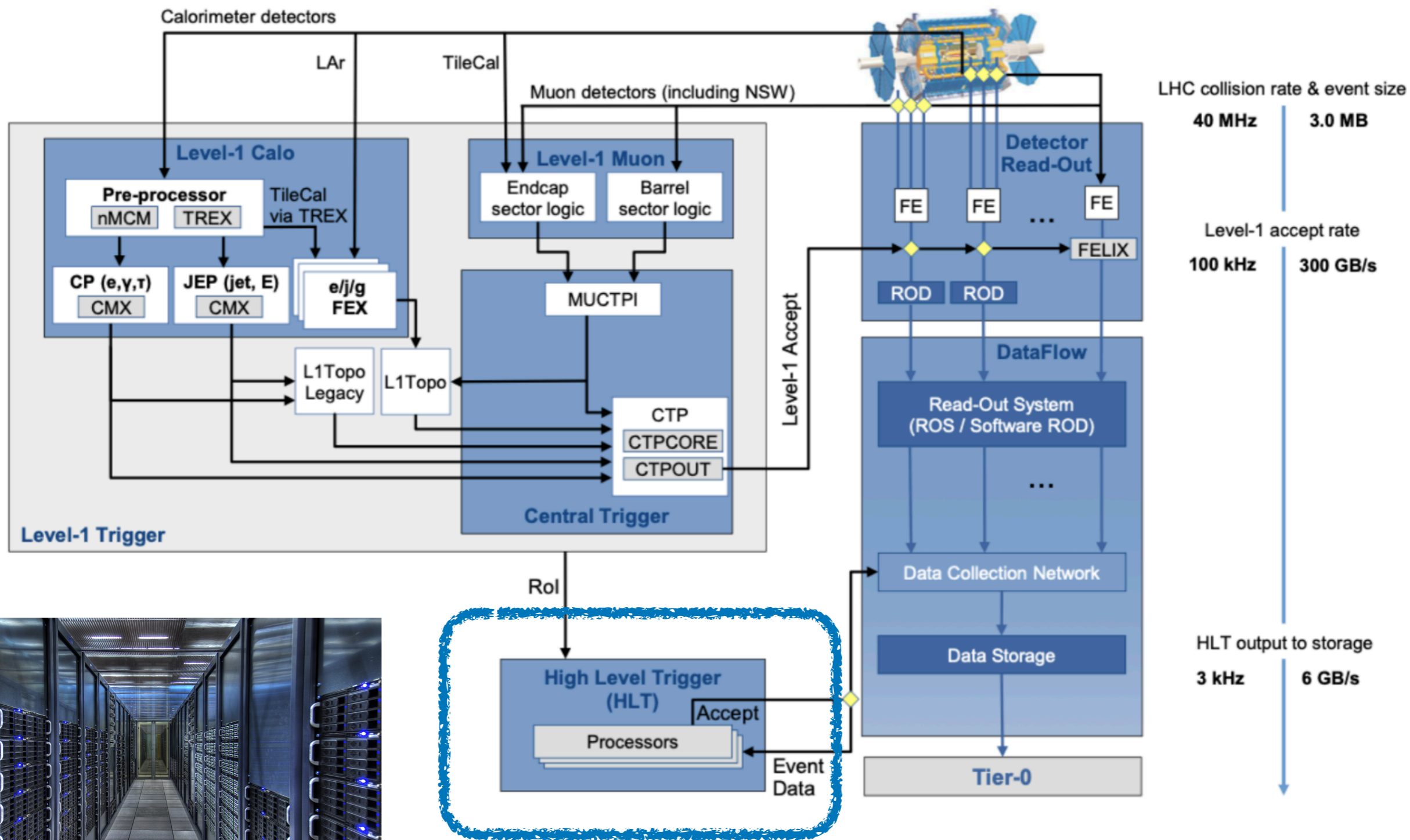


~60m

Back-end

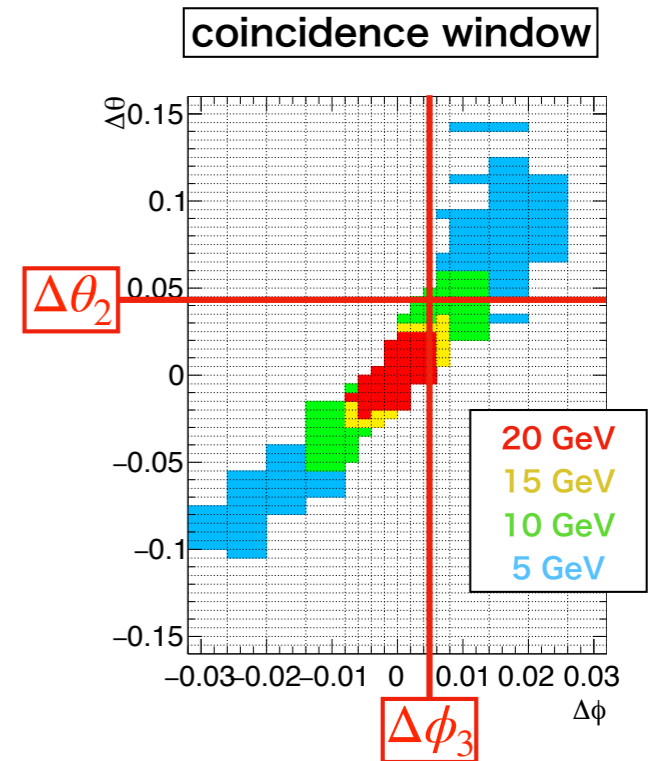
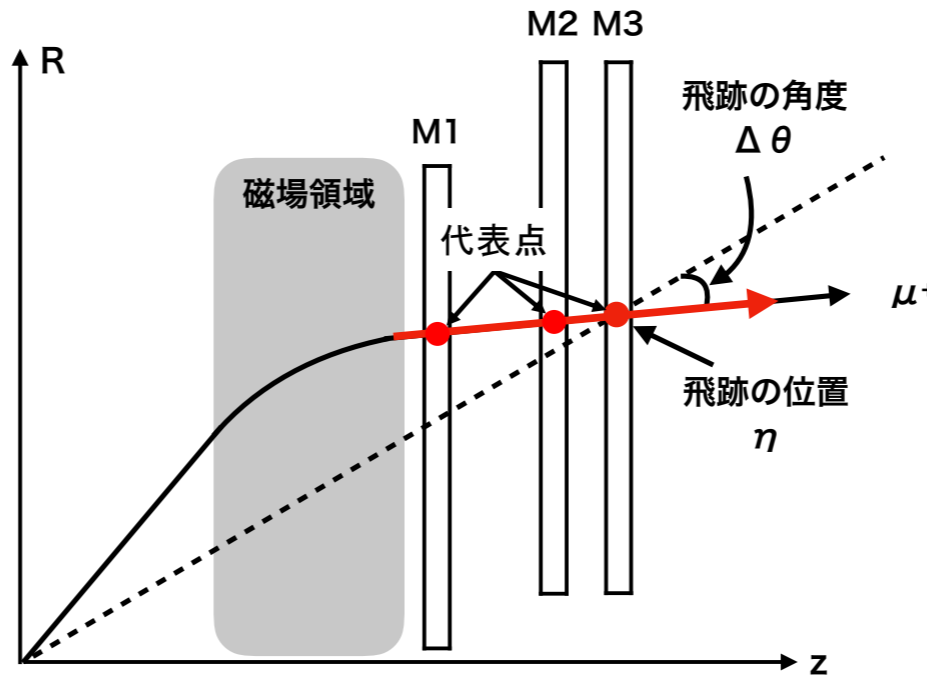
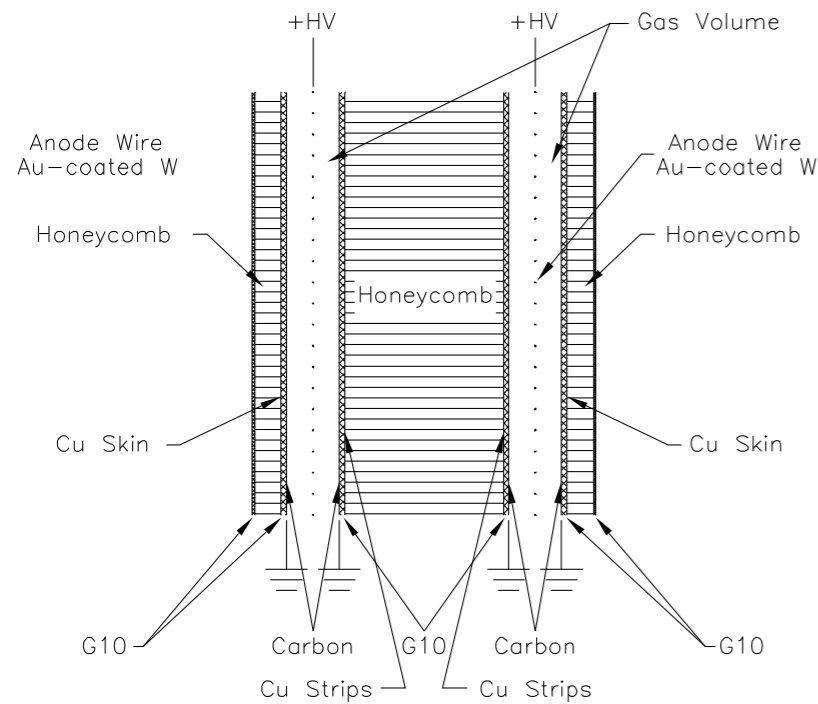


ソフトウェアドリガー (HLT): 時間に比較的余裕あり (レンテンシ~1s)。CPUでゆっくり複雑な処理



L1 ミューオントリガー : 概要

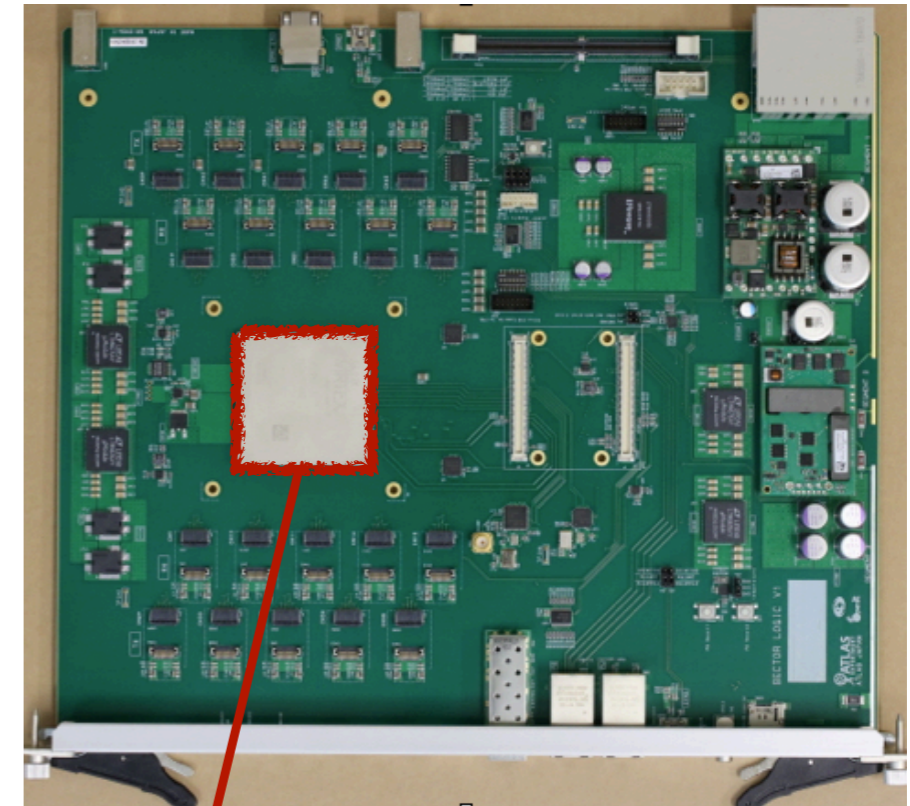
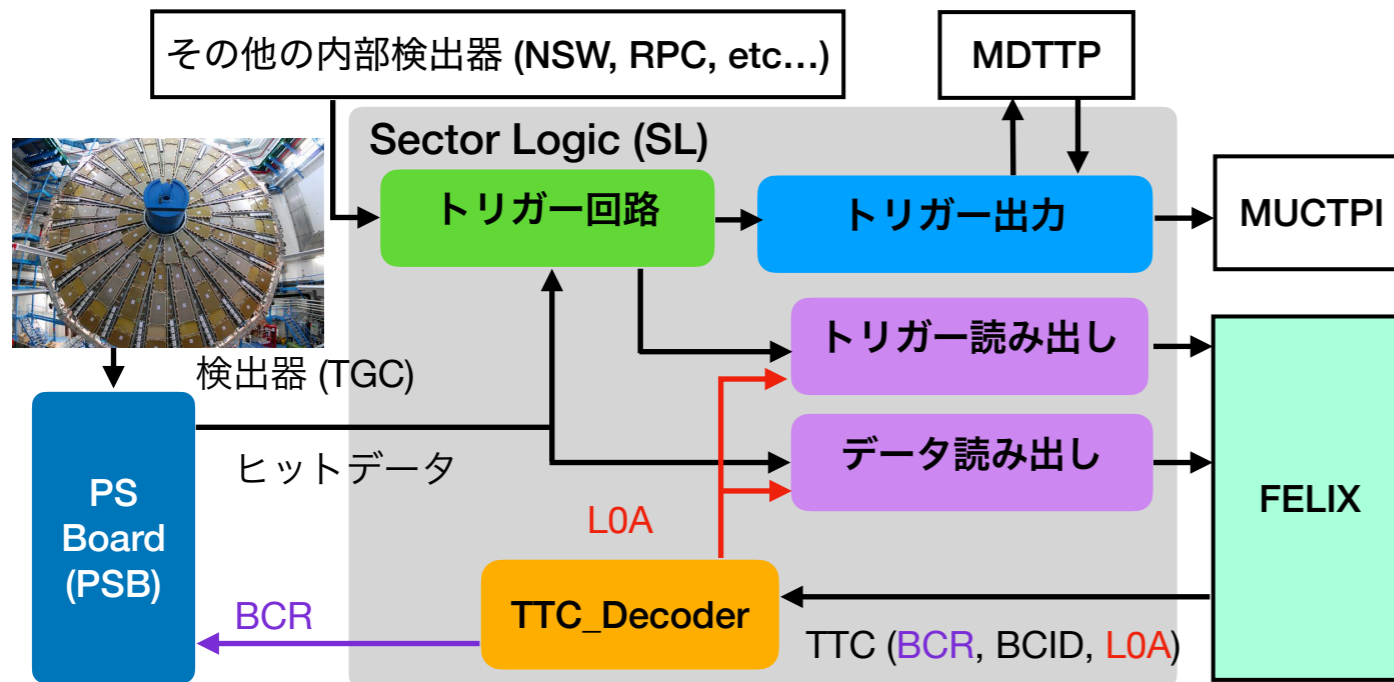
TGC (単層) の断面



- エンドキャップ部のミュオントリガー検出器 : Thin-Gap Chamber (TGC)
比例計数ワイヤーチェンバー×多層 層を薄く・ワイヤー間隔を短くすることで早い時間応答
- ミューオン飛跡を検出 → Look-up table (対応表) で直線飛跡との差分を計算
トロイダル磁場は複雑 & 早さが命 → 計算せずにFPGAに乗せた対応表で処理
- "Coincidence window" で運動量に換算
運動量が閾値を超えていたらトリガーを発行

L1 ミューオントリガー : Phase-II Upgrade

河本・中川・田中



大規模FPGA Sector Logic board

HL-LHCでは読み出し回路が一新

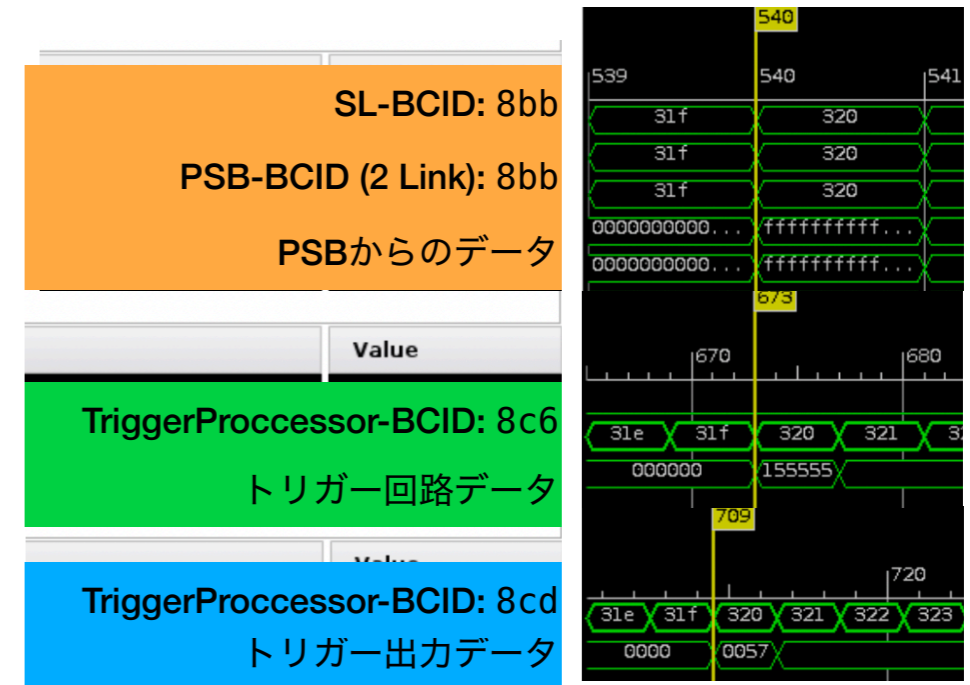
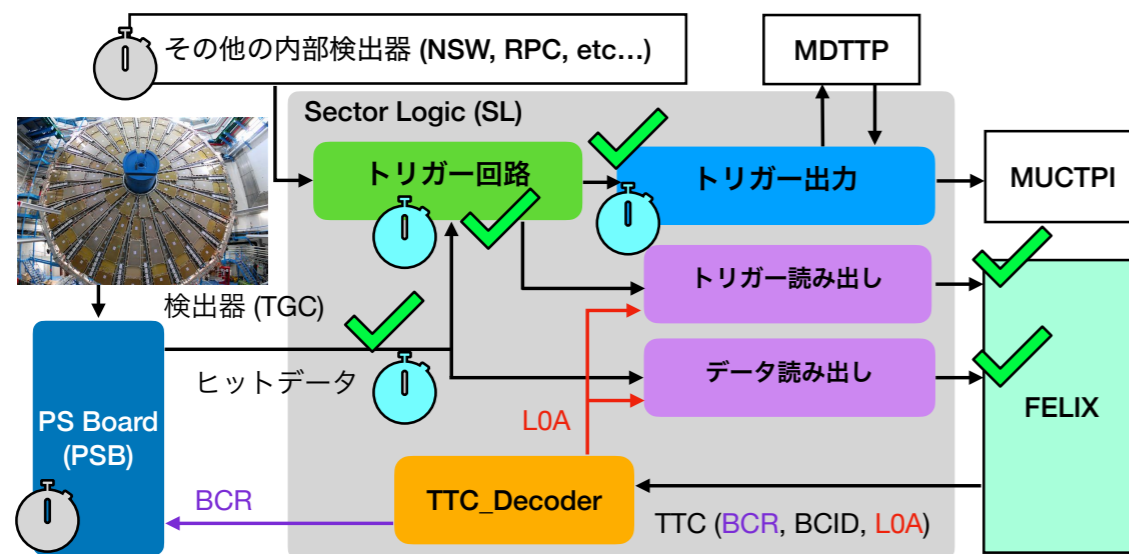
- Run3までは一部のヒットのみ → 全部のヒットが読み出される
- 新しい回路ボードは完成。量産・マステストを経て今年度中にインストール予定。

これから：動かす

- 超巨大システム >100mのケーブル×3000本
- 信号伝送・時間同期・高速信号処理・ハードウェアを自動操縦するソフトウェア etc.

L1 ミューオントリガー : Phase-II Upgrade

河本・中川・田中



- SL内のBCID Counter
- BCIDの同期を確認した箇所
- SL以外の回路にあるBCID Counter

Sector Logic board (SL) : 後段回路の心臓部

- ミューオン飛跡を高速で再構成してATLASのCentral Trigger Processor (CTP)に送る
- CTPが「これはいい」と言ったら全検出器が読み出しを行う

田中 : SLとの周辺回路も含めて上流から下流まで全部正しくデータを流す

- SLファームウェアの開発・実機テスト
- ミューオンのエキスパートとしてATLASの検出器運転の中枢で活躍予定

学生の典型的なタイムスケール

修士: 京都ベース

- ミューオントリガー or
- HE他実験のハードウェアプロジェクト
桂川さんの・ニュートリノ・CMB/DOSUE・量子 etc.
- 修士修了の場合は最初から物理解析

博士: CERNに長期滞在

- 魅力的なテーマを探して物理解析
- HL-LHCの立ち上げ
検出器インストール & 諸々のテスト



ATLAS control room



高所作業に臨む河本くん

メンバー・居室

陳 (准教授@308)	物理解析全般。粒子再構成・SUSY探索。
辻川 (D3@303)	ミューオントリガー Phase-I / ベル不等式の破れ検証
佐野 (D3@306)	HLT長寿命粒子トリガー / 弱教師学習を使った包括的共鳴探索
河本 (D3@306)	ミューオントリガー Phase-II / Binoダークマターと縮退したStau探索
中川 (D1@302/CERN)	ミューオントリガー Phase-II / 解析は考え中
田中 (M2@308)	Di-higgs探索 + Phase-IIのQC

ミーティング

- 毎週 火曜 16:30-18:00 @318 臨機応変にやっています
- 4/24(金) ATLAS Japanの物理グループの恒例ネタ出し会 @318
- Slack: [#atlas](#)

まとめ

LHCで標準模型を超える新物理を探す

- まだやられていないものを新手法で
- 低運動量再構成, 光子衝突 etc.

データも自分の手で作った検出器で取る

- ミューオントリガーの回路システムの組み立て・運転
- Phase-IIレベルのシステム作りは高エネでも20年に1度

デカイ実験でしかできない醍醐味

- 世界で最大級検出器システム
- 世界最大級のビッグデータ解析
- 世界中の優秀な (変な) 物理学者との邂逅

ローレベルからハイレベルまで全部のスキルセット

- デジタル回路, ファームウェア, プログラミング, 機械学習, 英語 (+フランス語?) etc.

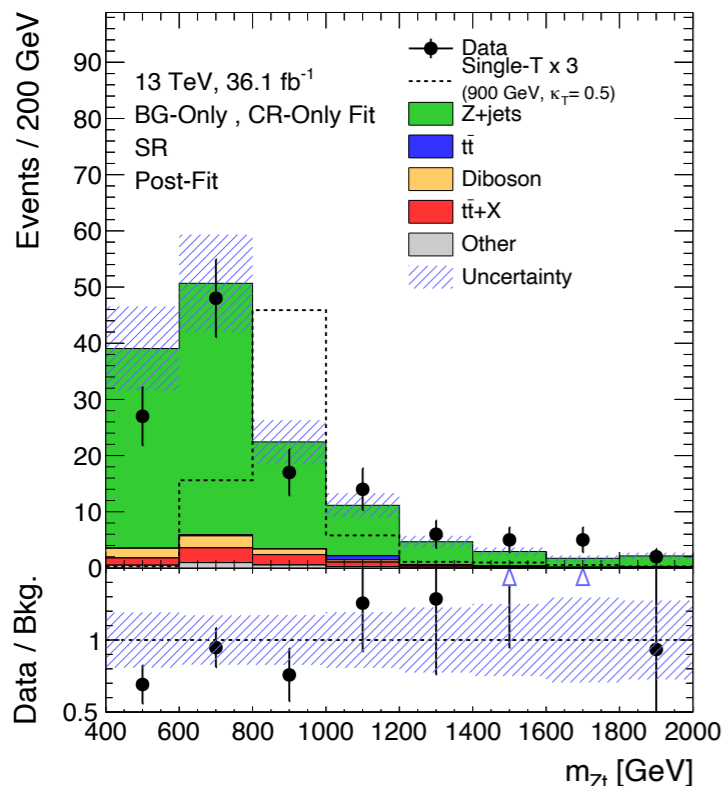
BACKUP



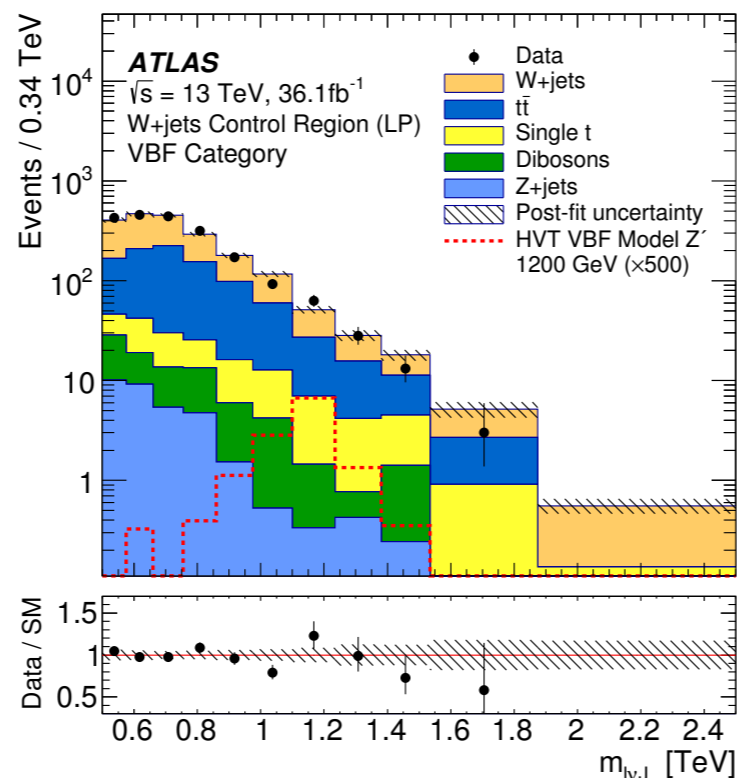
物理解析

過去に6人が京都ATLASで博士を取得。多様なテーマ。

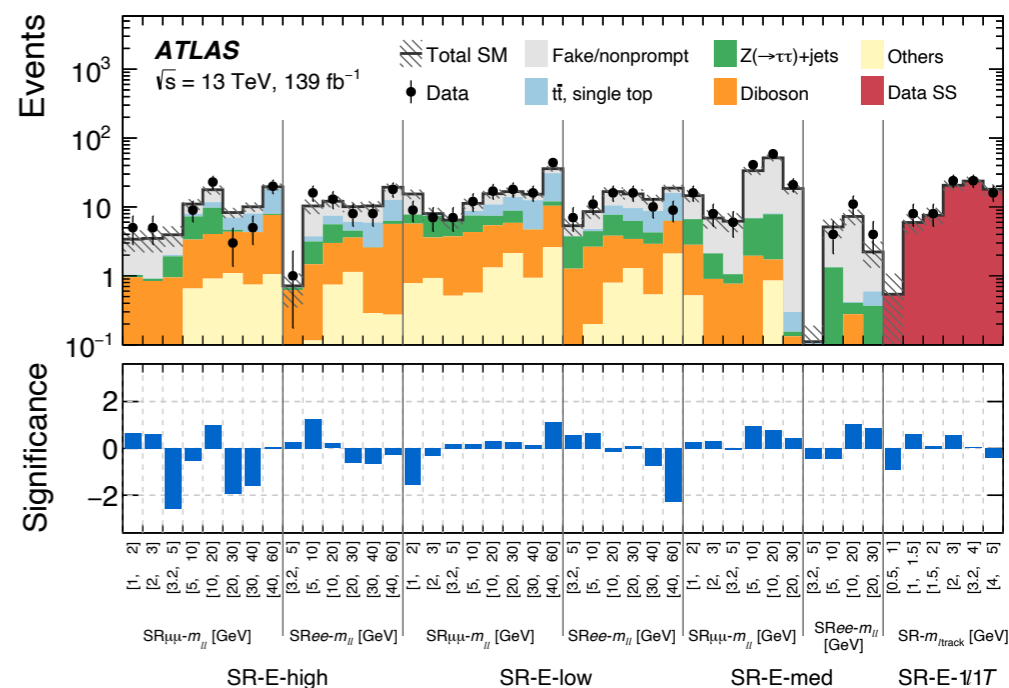
Vector-like quark探索 (田代)



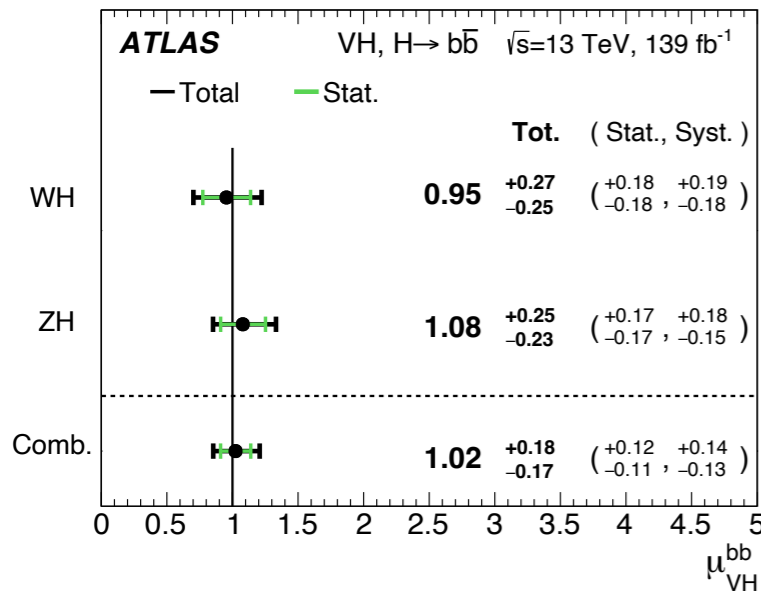
Di-boson共鳴探索 (救仁郷)



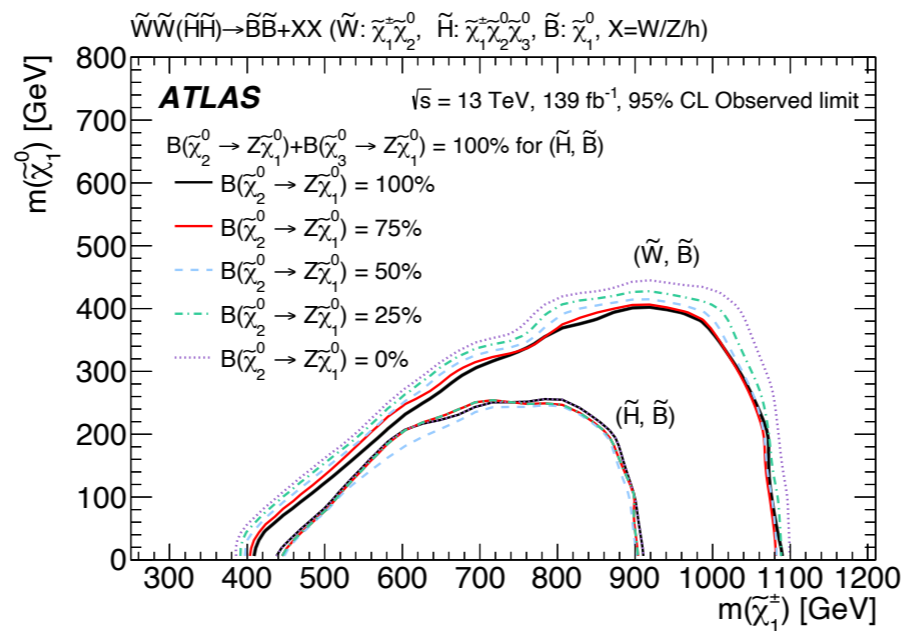
縮退higgsino探索 (赤塚)



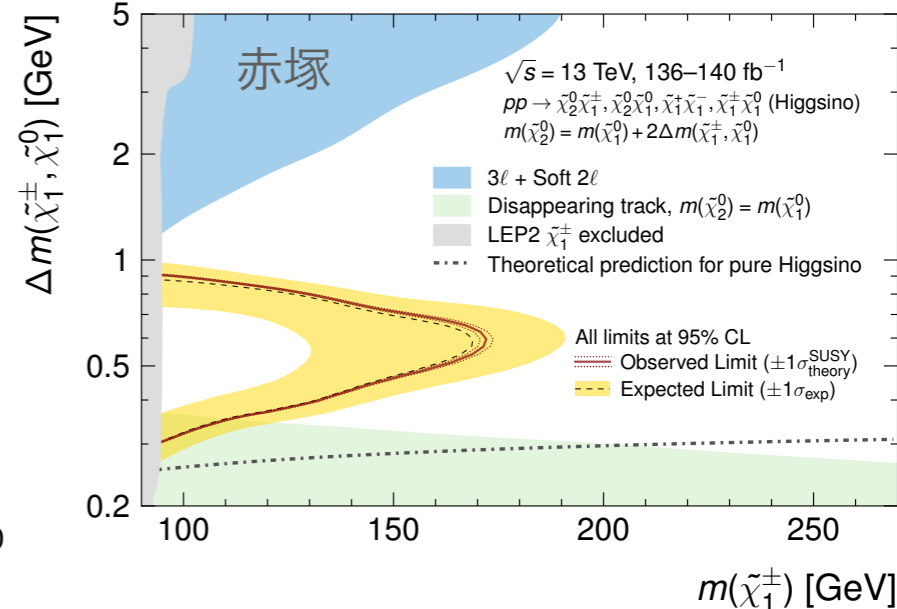
h→bbの発見 (野口)



大Δm電弱ゲージノ探索 (岡崎)

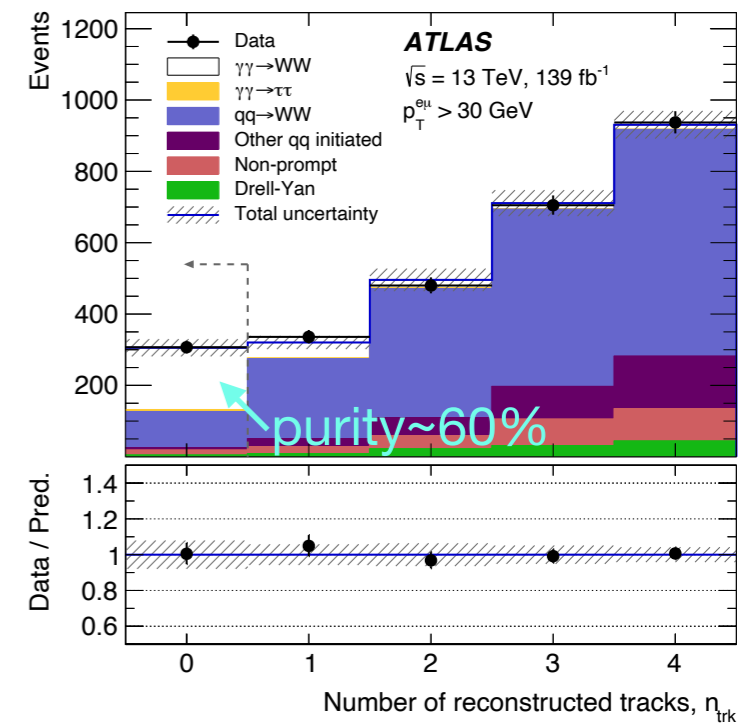
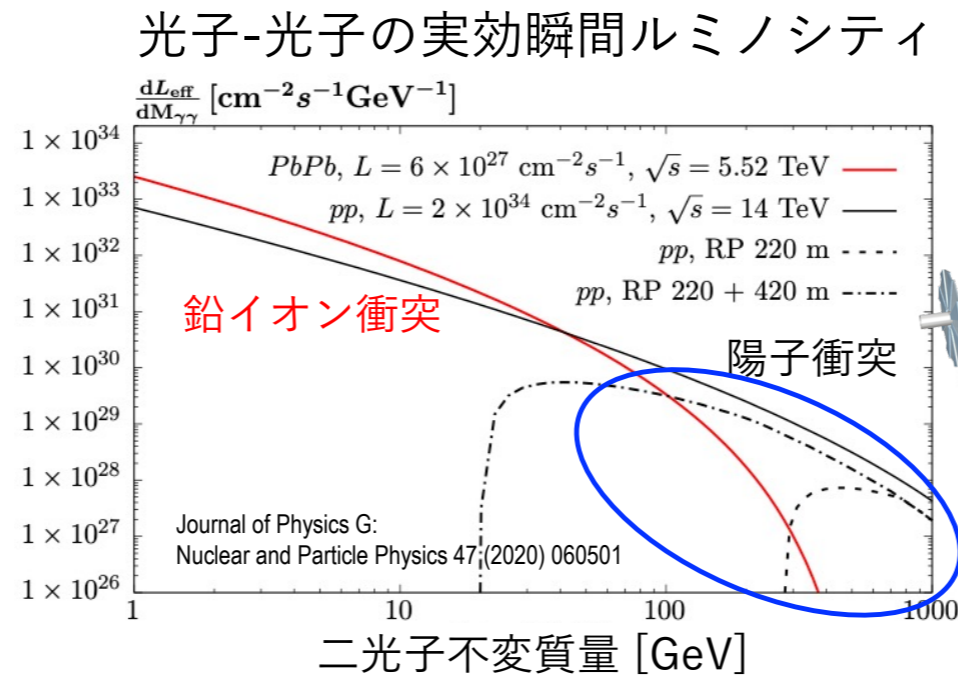
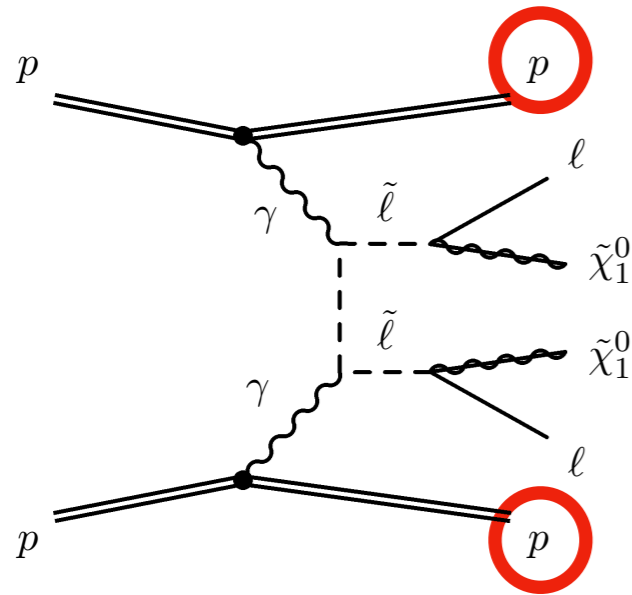


超縮退higgsino探索 (三野)



LHCはphoton colliderでもある

arXiv: 2010.04019



ビーム陽子のカスリ散乱

- ビームが7TeV近くあるとカスリでもすごいエネルギー。重心系~数100GeVくらいは割と簡単に出る。
- 「衝突点から終状態粒子以外の飛跡が出てない」という条件で陽子が壊れてない事象だけ取ってこれる

QCD由来の標準模型事象がほぼ0になる

- 光と相互作用する全ての新物理に感度
特に質量が低めものに対して強力な改善
縮退stau, $\gamma\gamma$ 共鳴 (Axion-like particle, Diraton etc., anomalies?: 95GeV, [151GeV](#))
- 標準理論の精密測定にも使える: tau g-2, BBBB4点結合

LHCの新しい使い方

ほぼ未開拓なのでこれから始めていきたい

ミュオントリガー Phase-II

今後のスケジュール (雑)

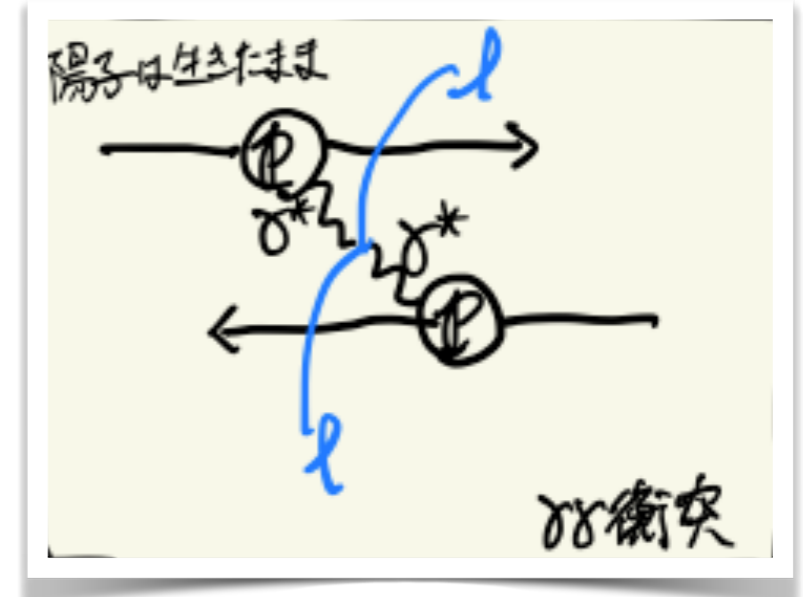
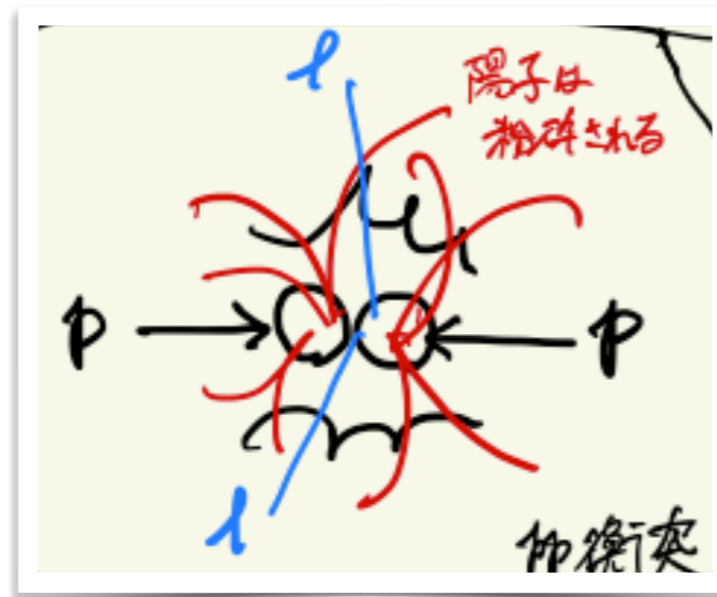
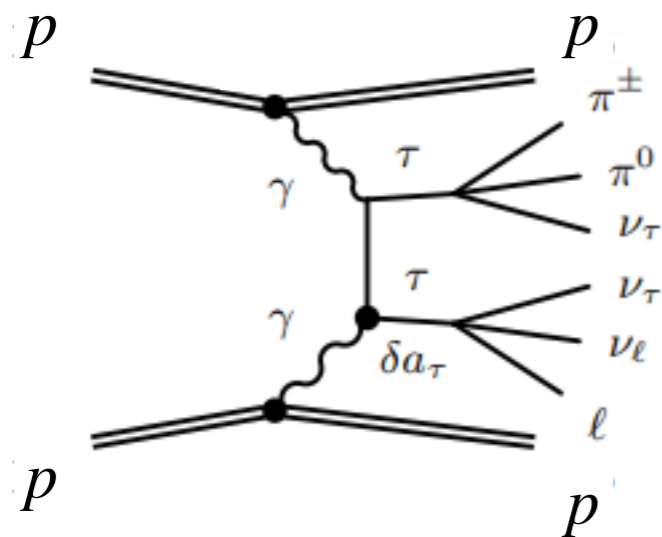
	2025年度	2026年度	2027-	
PS board	CERNへ輸送	インストール、テスト		システムレベルの コミッショニング
JATHub	CERNへ輸送	インストール、テスト		
Sector Logic	10台のプレ量産	90台量産	輸送、テスト	
Fiber, Patch Panel	調達 CERNへ輸送	インストール 敷設		
Infrastructure in USA15		ATCA、ファイバー調達	ラックセットアップ	
LV/HV in UX15			調達	インストール

next!

- 完成したフロントエンドをCERNへ輸送 → LS3開始と同時にインストール
- Sector Logicのプレ量産

ソフトウェアトリガー (HLT) : 物理特化トリガーの開発

e.g. τ の g 因子測定



○ CPUが使えるため結構凝ったことができる

- 最近のHLTは全領域で飛跡が使える
- c.f. 長寿命の新物理粒子トリガー (佐野)

○ 光子衝突トリガーを作りたい

- 光子衝突の選別：余計な飛跡がないことを要求
- 2026年の運転に間に合わせるために今から準備・2026年は実データで検証/運転
修士のプロジェクトとしてかなりカッコいい