



東京大学
素粒子物理国際研究センター
International Center for Elementary Particle Physics
The University of Tokyo

学部生向け特別セミナー

最先端「加速器素粒子実験」を知ろう！

CERN における国際協力加速器実験 **LHC-ATLAS 実験** の
スペシャリストである教員による連続特別セミナー&座談会

素粒子物理、物理実験の面白さ・難しさ、加速器実験、ビッグサイエンス、計測技術、
高速データ処理回路、データ解析、計算機科学、機械学習、量子コンピューティング等
のホットピックを最前線で活躍する研究者から直接聞けるチャンスです。

学部生・大学院生・学内外問わず大歓迎

事前登録が必要です。素粒子物理国際センターのウェブページより詳細をご確認ください。

<https://www.icepp.s.u-tokyo.ac.jp/>

日時： **6月7日 (月), 6月11日 (金) 5限目** (16:50)

場所：オンラインでの開催となります。事前登録により接続方法の情報をお知らせします。

内容：

- | | | |
|-------|---------------------|--------------------------|
| 6月7日 | 「ヒッグス粒子の物理」 | 田中純一 (素粒子物理国際研究センター・教授) |
| | 「超対称性粒子と暗黒物質」 | 澤田龍 (素粒子物理国際研究センター・准教授) |
| | 「素粒子物理と量子コンピューティング」 | 寺師弘二 (素粒子物理国際研究センター・准教授) |
| 6月11日 | 「LHC で探る余剰次元」 | 奥村恭幸 (素粒子物理国際研究センター・准教授) |
| | 「加速器・検出器の最先端技術」 | 石野雅也 (素粒子物理国際研究センター・教授) |
- (6月11日は、セミナー後「座談会」としてフリーディスカッションの時間を設けます)

内容(流れ)

5限目 16:50-18:35 (105分)

- 本日 6/7
 - 16:50-17:20 田中: ヒッグス粒子の物理
 - 17:20-17:50 澤田: 超対称性粒子と暗黒物質
 - 17:50-18:20 寺師: 素粒子物理と量子コンピューティング

- 金曜日 6/11
 - 16:50-17:20 奥村: LHCで探る余剰次元
 - 17:20-17:50 石野: 加速器・検出器の最先端技術
 - 17:50-18:20 座談会

- 座談会
 - 大学院生の生活や研究など何でも聞いてください。

ヒッグス粒子の物理

MLを少しだけ

田中純一
東大・素粒子センター

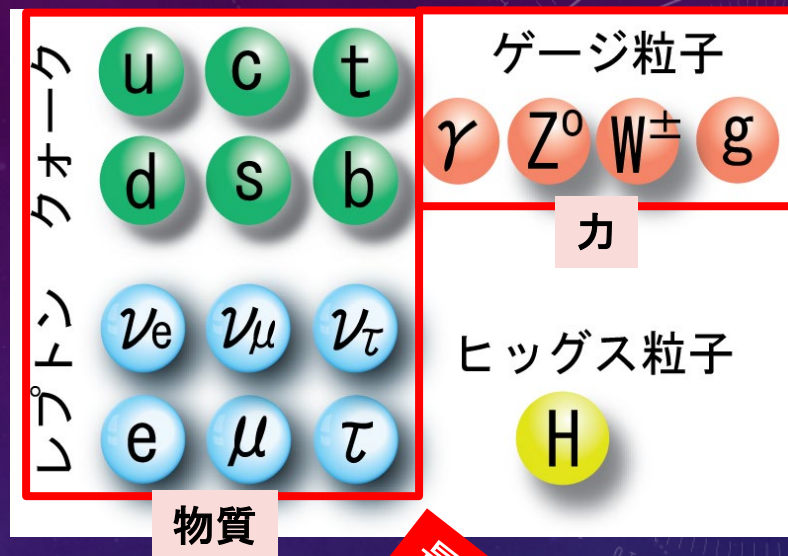
2021年6月7日

自己紹介

- 東大相原研の一期生
 - Belle実験(つくば、KEK)でD論を書きました。
 - 相原研の同期には横山先生(東大理学部物理)、樋口先生(東大IPMU)
 - 同期の東大大学院関係の先生: 濱口先生、福嶋先生、矢向先生(結構います...)
- 2002年から素粒子センターでアトラス実験をやっています。
 - 計算機センターのお仕事: Grid
 - データ解析の準備(2010年まで待った)
 - 実際のデータ解析 → 2012年7月 ヒッグス発見
 - 2013年3月 EMカロリメータの読み出しのR&Dに正式に参加
 - FPGA Firmwareの開発
 - 2018年4月 Tokyo Tier2, ビッグデータを使った計算機科学
 - 深層学習、量子コンピュータ
 - 2020年7月 Beyond AIに参画



最後の“素粒子”

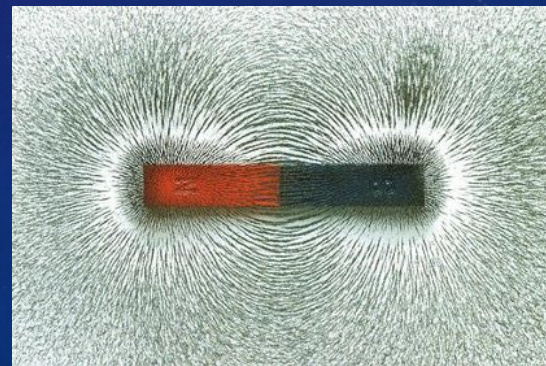


- **素粒子の標準模型**の17個の中で唯一の未発見粒子
 - 12個の“物質”のための素粒子 **フェルミオン**
 - 4個の“力”のための素粒子 **ボソン(スピン1)**
- 最後の「素粒子」の役割は非常にユニーク
 - “入れ物”のための素粒子 **ボソン(スピン0)**
 - 「真空」は空ではない → 「ヒッグス場」で満たされている
 - 素粒子の質量の起源



最後にふさわしい
ボスキャラ

入れ物に対応する「素粒子」?



「ゲージ原理」... ゲージ(ものさし)によらず物理は同じ [位相変換という“ものさし”]

質量との関係

ゲージ粒子: 質量が**ゼロ**でないと**ゲージ対称性**が破れる

クォークとレプトン: 質量が**ゼロ**でないと**カイラル(右と左)対称性**が破れる

ゲージ粒子とフェルミオンの質量は2つの対称性でがっちり守られている。

「ない」「ない」づくしなのに、現実には質量はあります！

これらの対称性を諦めるのか？

→ 「いいえ、諦めません。これらの対称性は、すばらしい。」

→ これから説明する「ヒッグス機構」が問題解決！

ゼロでない積極的な理由がなければ、代表的なスケールである
プランクエネルギー($\sim 10^{19}$ GeV)になるのが“自然”。

質量の起源

(よくあるイメージ: ヒッグス粒子(場)にコツコツ衝突するので「質量」を獲得)

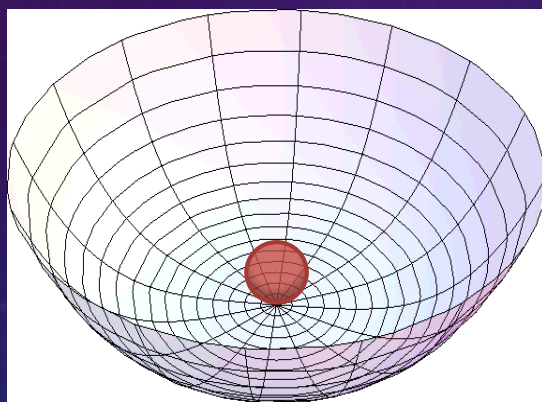


- 「標準模型 ← ゲージ原理」→ 素粒子の質量はゼロ
- 「真空」●の状態の変化(相転移)

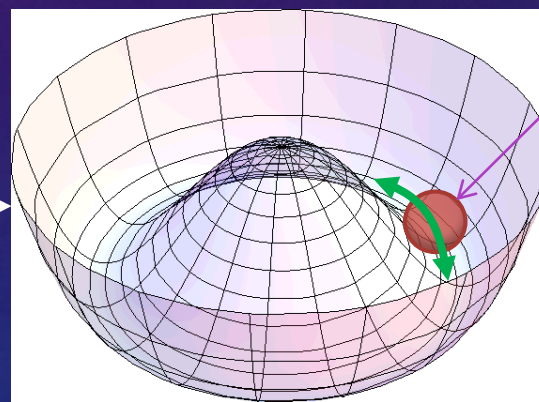
● は「安定」を好む

宇宙のはじめ

現在



相転移



どこか**特定**の場所に落ちる。

質量0のGoldstoneボソン

「真空」の居場所が中心からズレたため、「自由」(?)に動ける方向が生まれた。

実は「みせかけの自由」

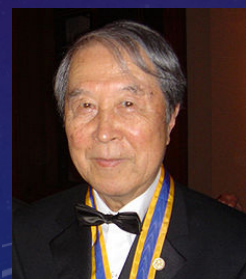
質量の誕生

W/Zボソンの縦偏極の自由度として「みせかけの自由」は吸収される。

2013年ノーベル物理学賞



「ヒッグス機構」



南部先生
2008年ノーベル物理学賞
「自発的対称性の破れ」

ヒッグス粒子(ヒッグス場)は何をやっているのか？

質量がないと光速 → 左巻きは左、右巻きは右(状態はいつも同じ)
質量があると光速より遅い → 左巻き、右巻きのどちらの状態も可能



質量の存在はLとRを結びつけてしまう。
→ 別物の粒子(LとR)が入れ替わること。

この入れ替えの手助け(元締め)をやっているのがヒッグス場

弱い力感じる粒子

弱い力感じない粒子

q_L

q_R

Weak chargeも
Hyper chargeも持つ
(ニュートリノみたい)

$\langle \phi \rangle$
ヒッグス場

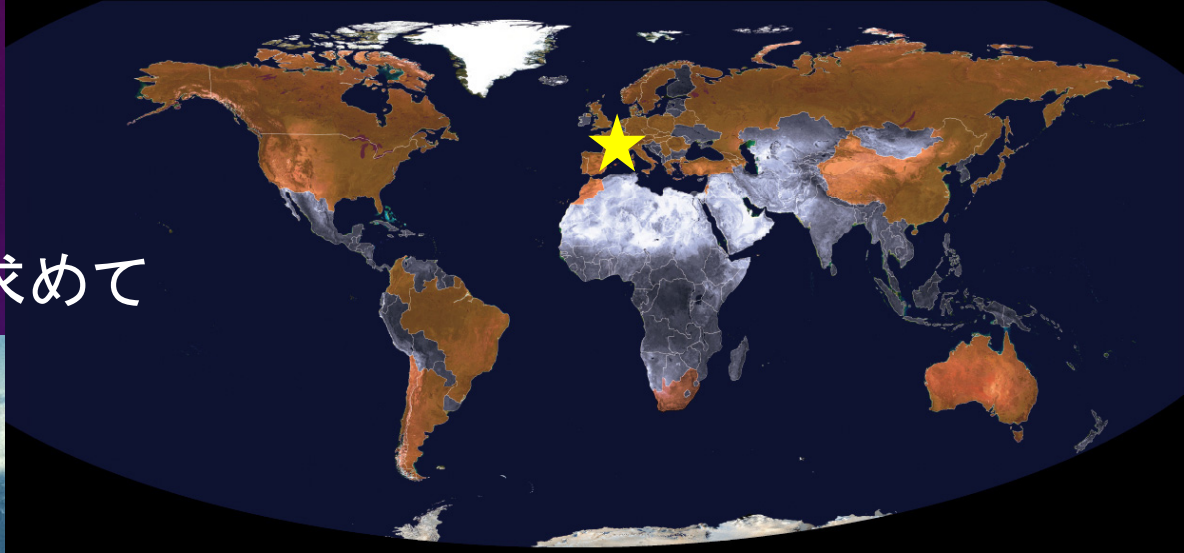
(「湯川結合」と呼ばれている)

いろいろなテキスト
眺めてみてください。
→ 「どうにかならないか...」と思う項
(「格好悪い」項)

こんな話、本当にあるのか？

→ こんなヘンテコな
見つけ出しました！

「ヒッグス粒子」を追い求めて



1周27km

LHC加速器 (CERN、スイス)

2010年～ 陽子・陽子衝突

ヒッグス、アンダール、ブラウトの論文は1964年

ジュラ山脈

Large Hadron Collider (LHC加速器)

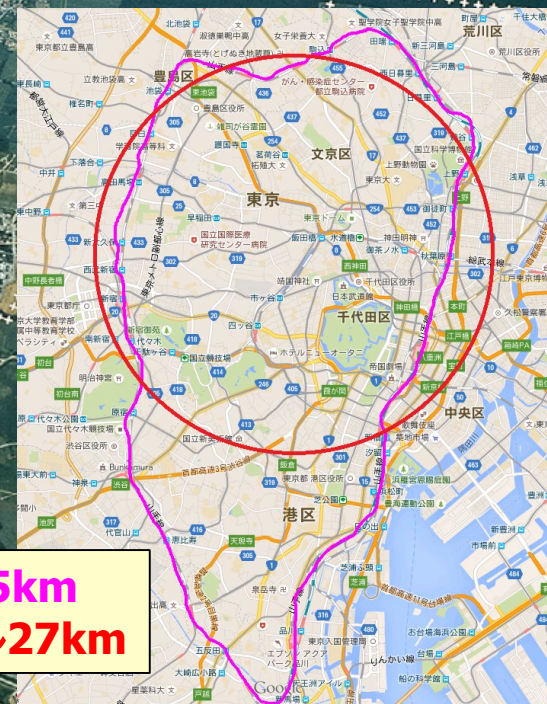
地下100m、周長27km

ATLAS実験

CERN
セルン(仏)
サーン(英)



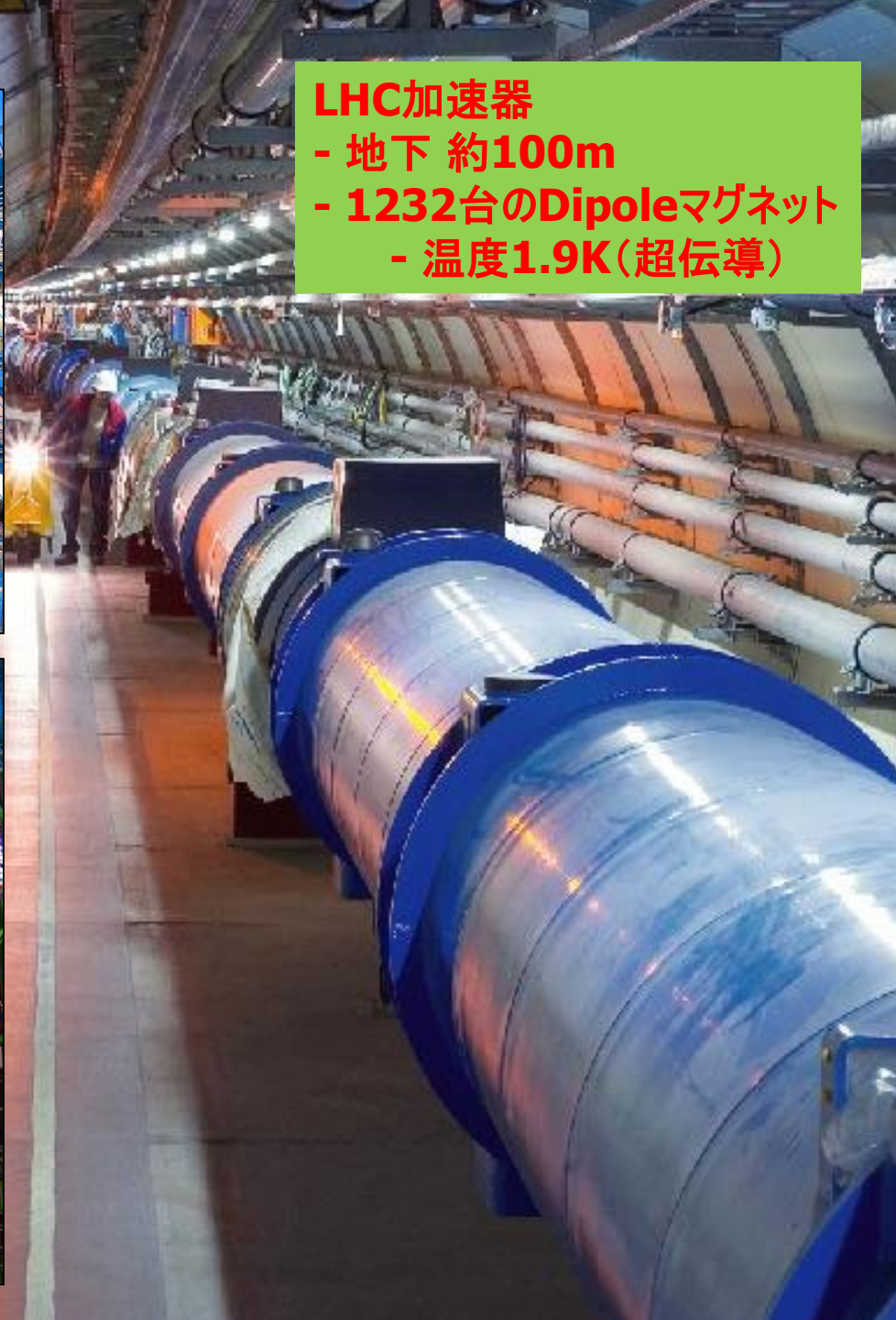
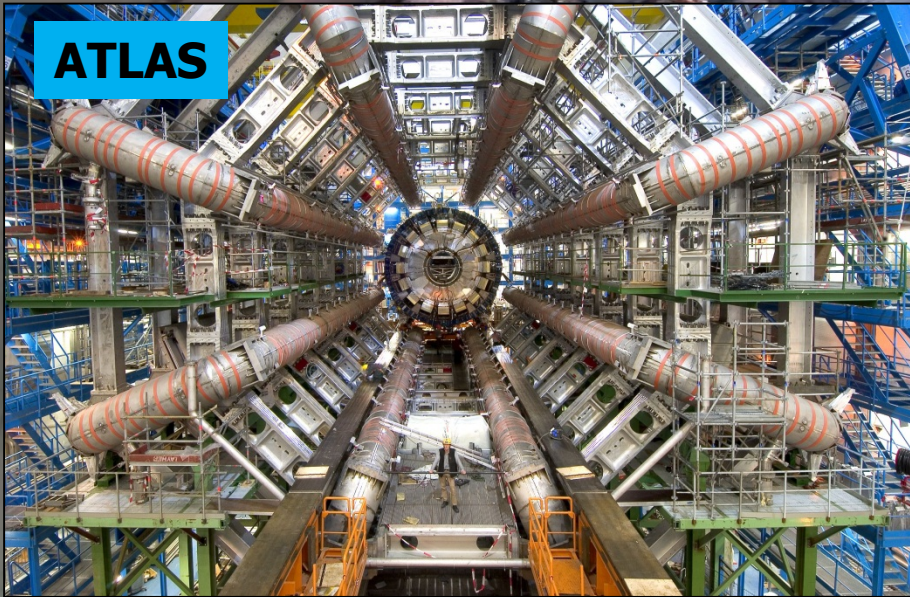
CMS実験



ジュネーブ国際空港

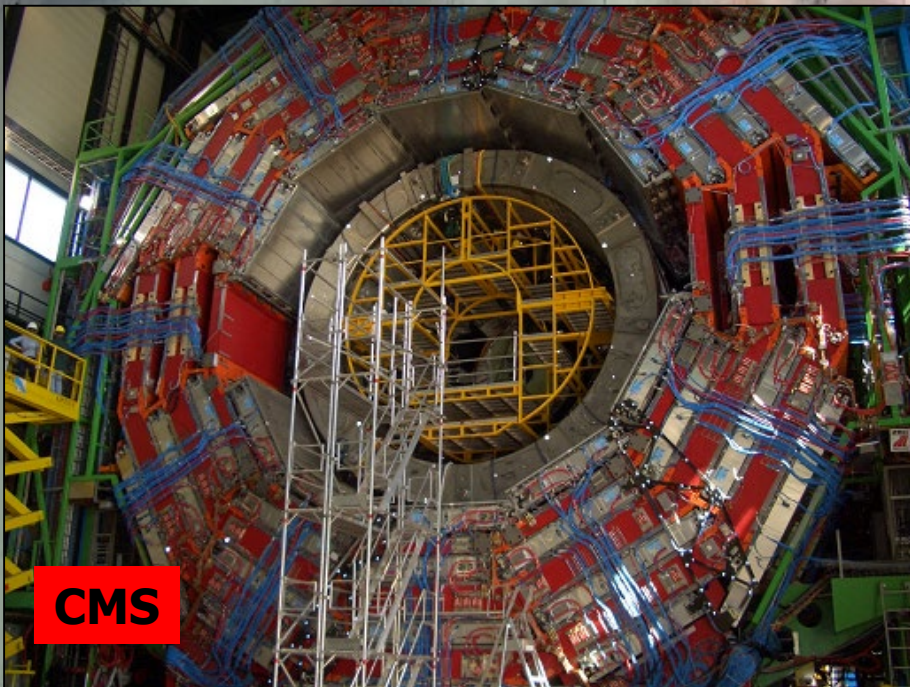


山手線34.5km
LHCトンネル27km



LHC加速器

- 地下 約100m
- 1232台のDipoleマグネット
- 温度1.9K(超伝導)

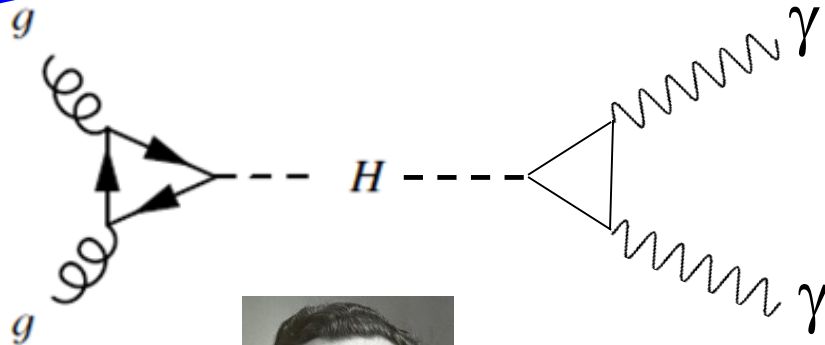
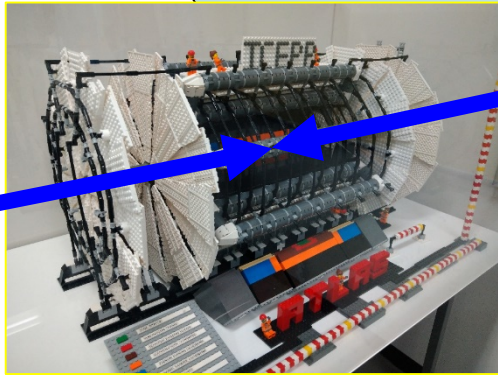


CMS

Higgs粒子の研究

クォーク	u	c	t	ゲージ粒子	γ	Z^0	W^\pm	g
レプトン	ν_e	ν_μ	ν_τ	ヒッグス粒子	H			
	e	μ	τ					

- まずは「**Higgsの生成**」: **これができるのはLHCだけ!**
 - 研究 → Higgsの“生成”と“崩壊”をうまく組み合わせる。
 - 発見のために、数を稼ぐなら
 - 生成断面積の大きい生成プロセス(生成パターン)
 - 崩壊率(BR)の大きい崩壊パターン → **これを観測する!**
- **現実にはそんなに甘くないことが分かりますが、それを検討するのも実験屋さん**

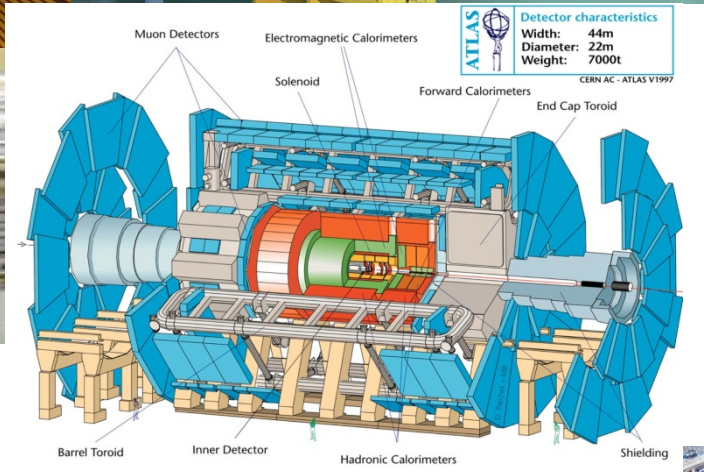
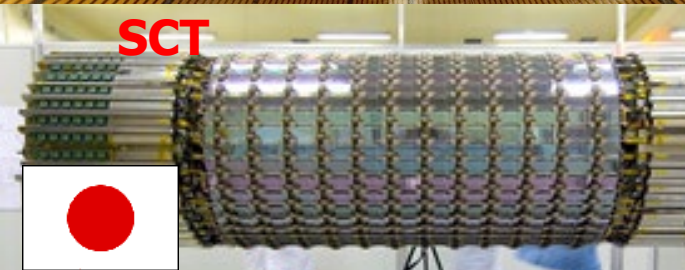
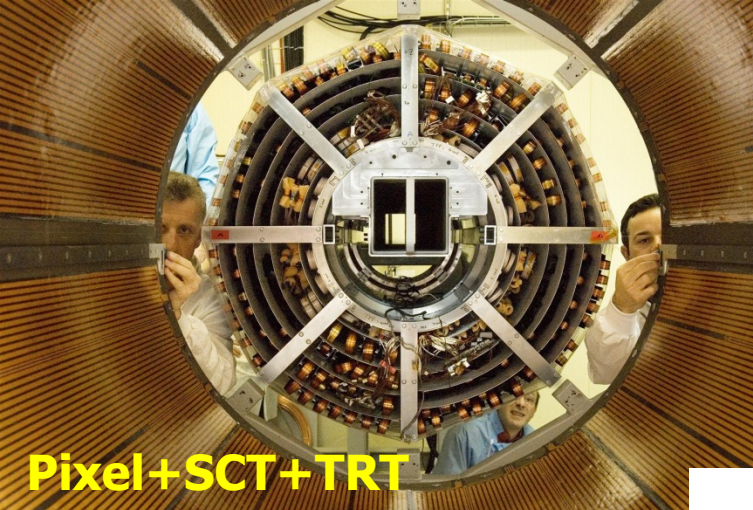


「陽子の集合体($\sim 10^{11}$)」と
「陽子の集合体($\sim 10^{11}$)」の衝突



ファインマンさん

測定する

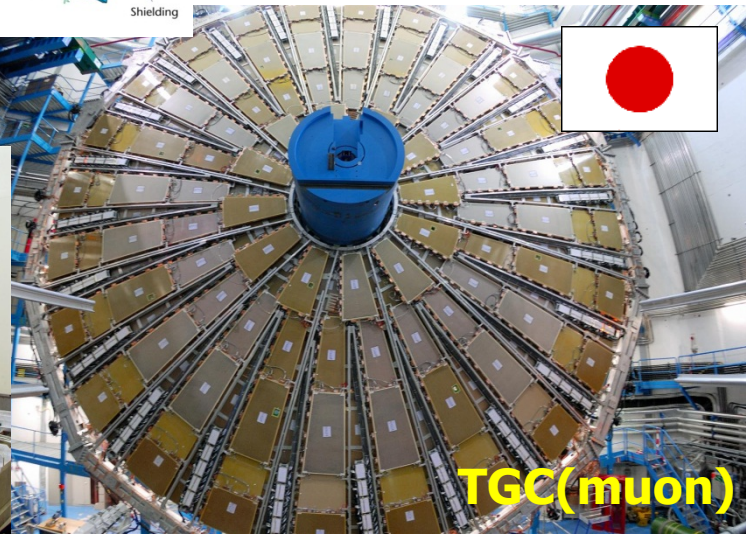
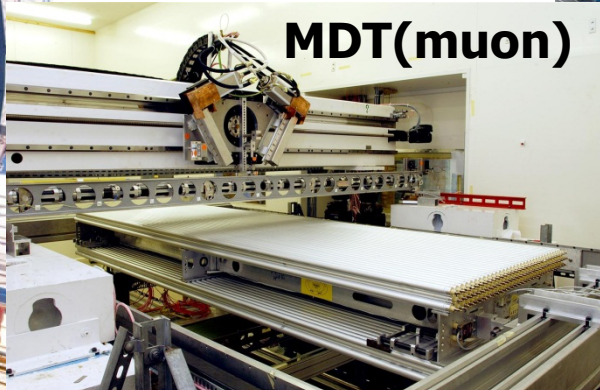


Lij Argon calorimeter (EM cal)

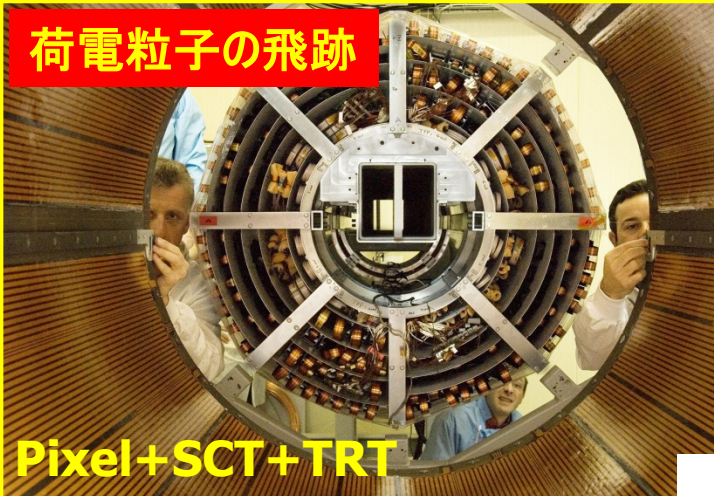


ATLAS検出器

MDT(muon)

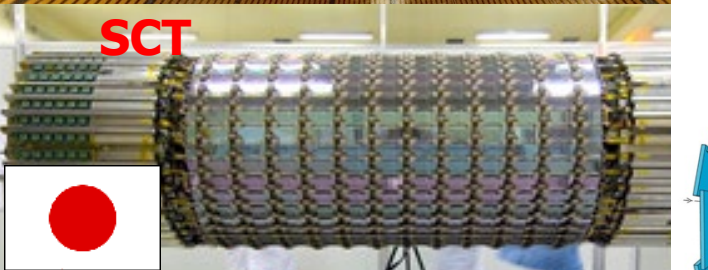


荷電粒子の飛跡



Pixel+SCT+TRT

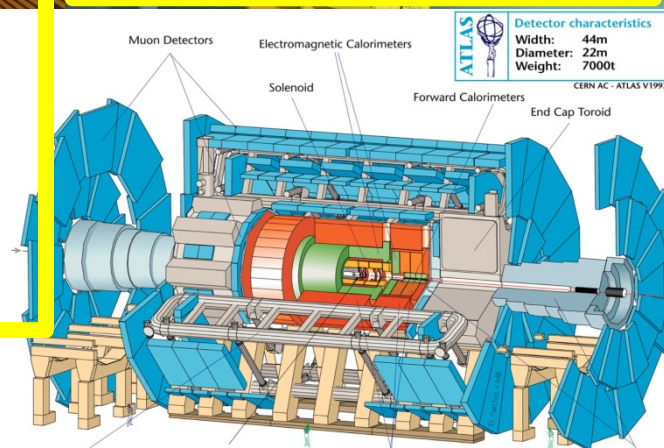
SCT



Tile calorimeter (hadron cal)



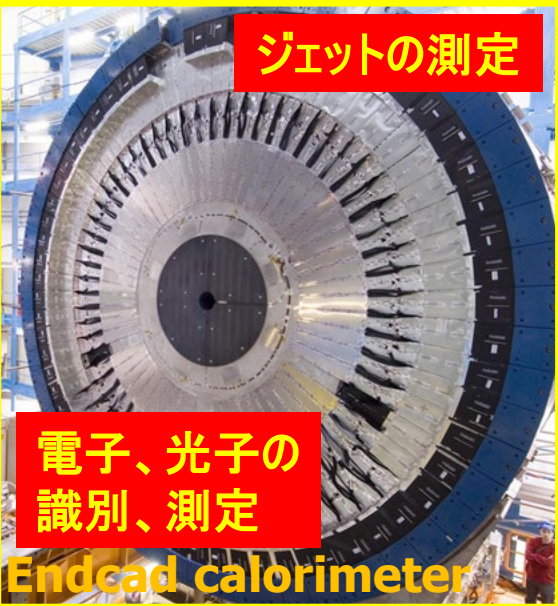
ジェットの測定



電子、光子の
識別、測定

Liq Argon calorimeter (EM cal)

ジェットの測定



電子、光子の
識別、測定

Endcap calorimeter

ATLAS検出器

MDT(muon)

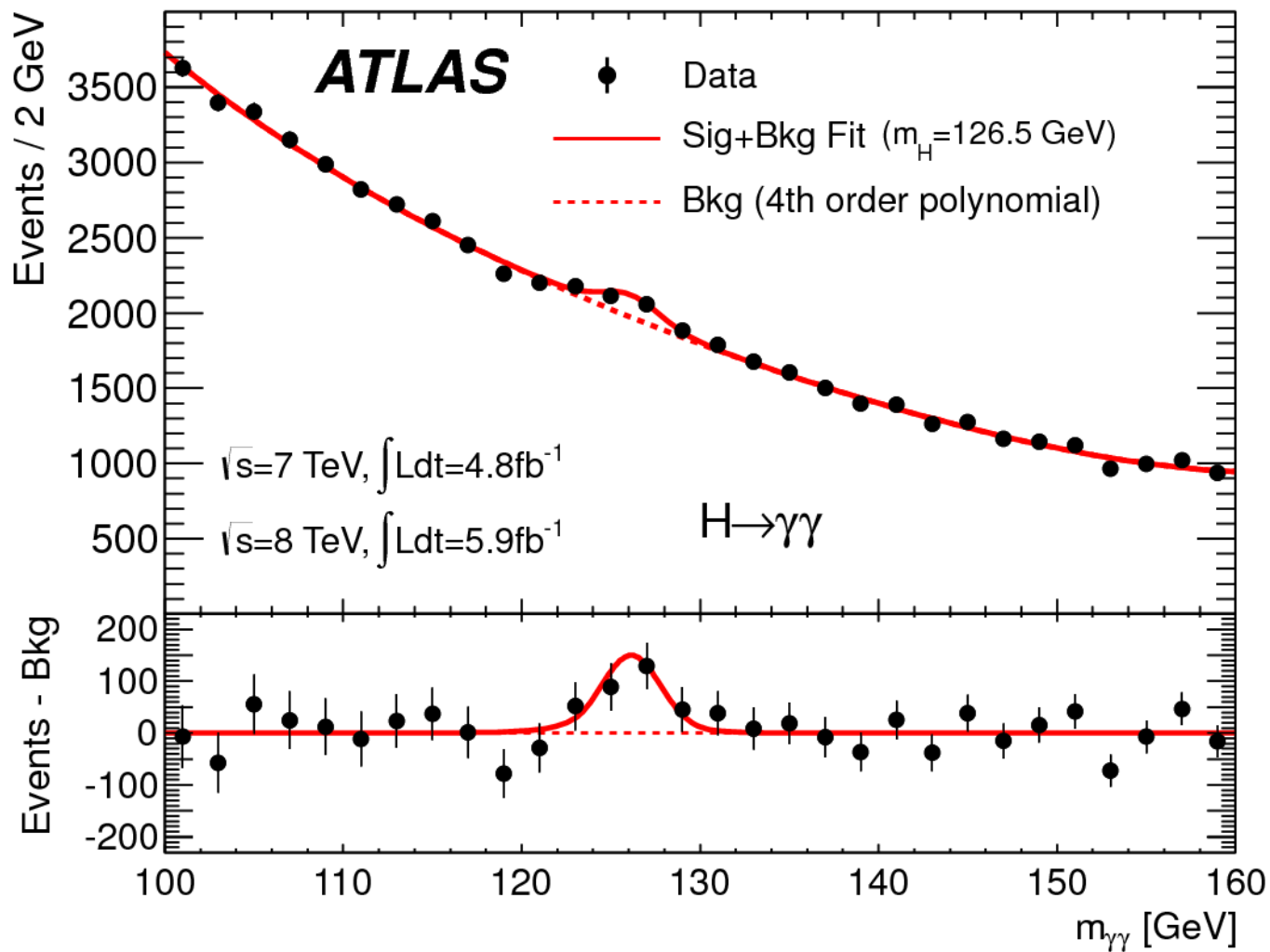


Muon粒子の識別、測定 TGC(muon)



2つの光子から計算した不変質量分布

縦軸 = 捕まえた事象の数



横軸 = 不変質量

ヒッグス粒子の探索

H

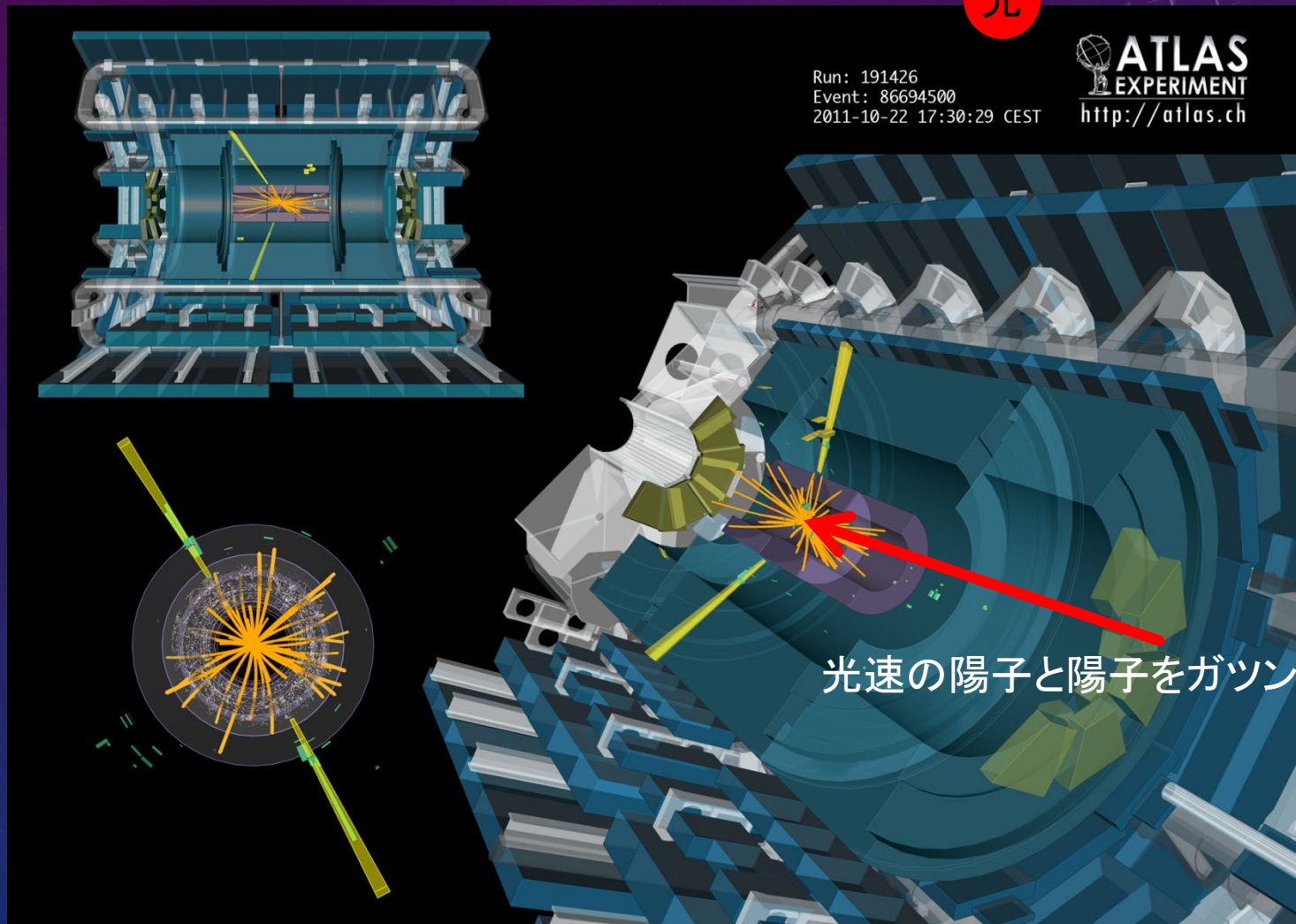


H

光

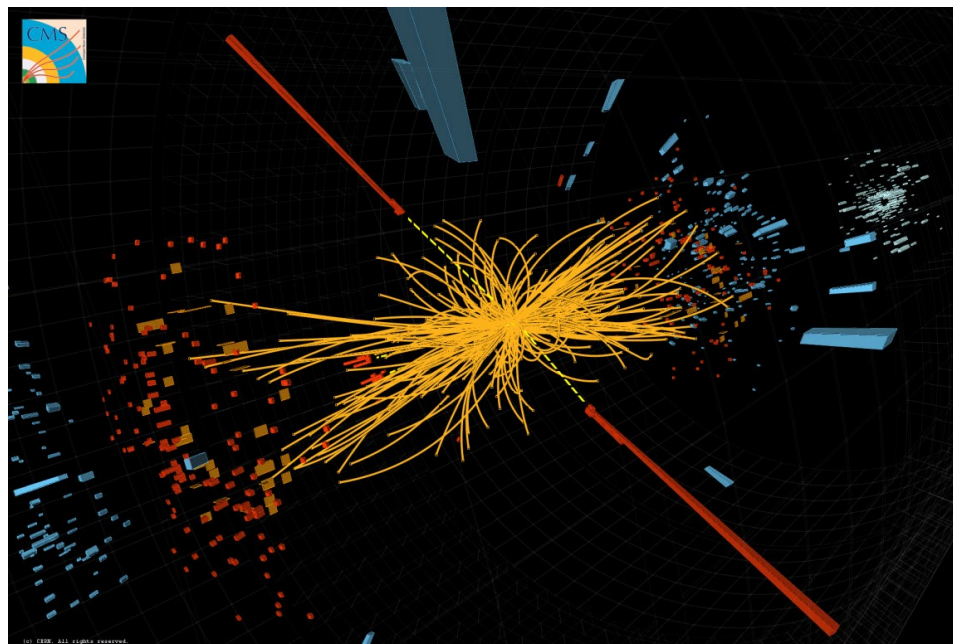
光

約1200回



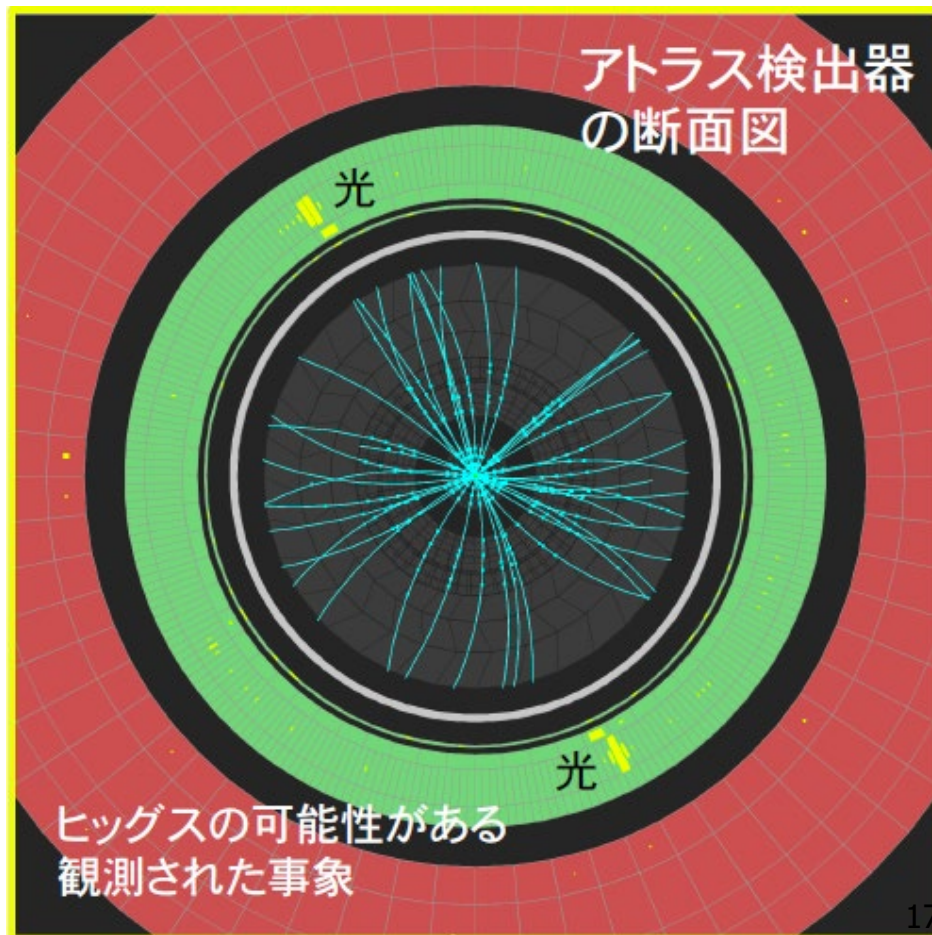
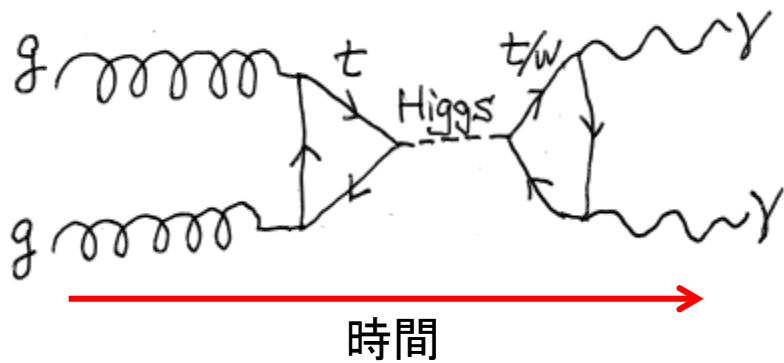
2,000,000,000,000,000 (2,000兆回) イベント->約500,000個のヒッグス粒子¹⁶

H- \rightarrow $\gamma\gamma$ どうみえるか？

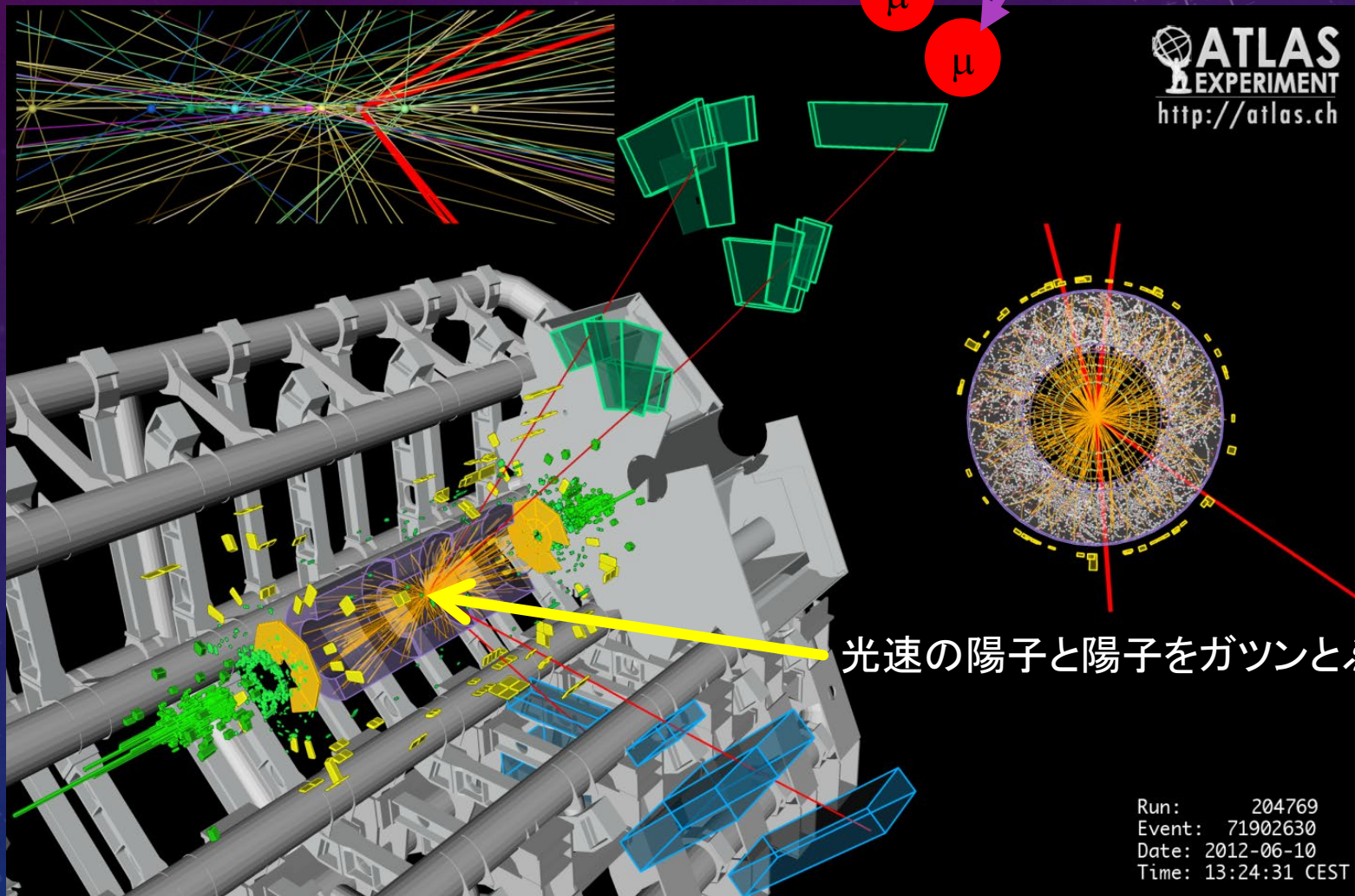


“ヒッグス粒子が2つの光子へ”

ファインマン図

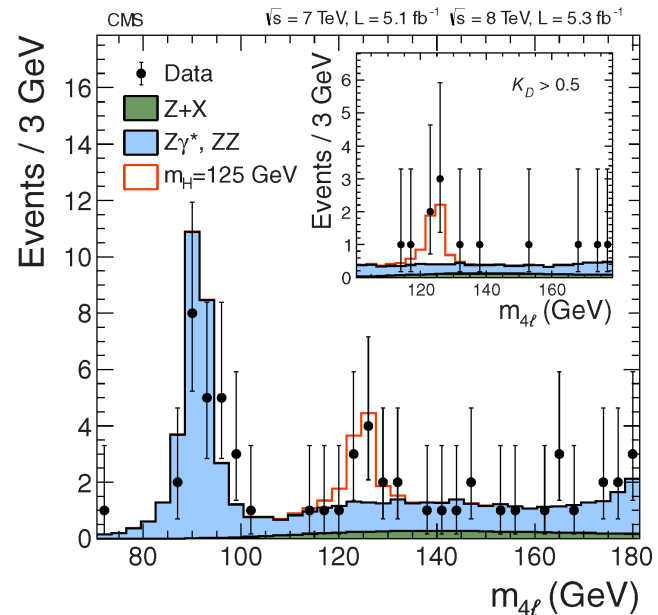
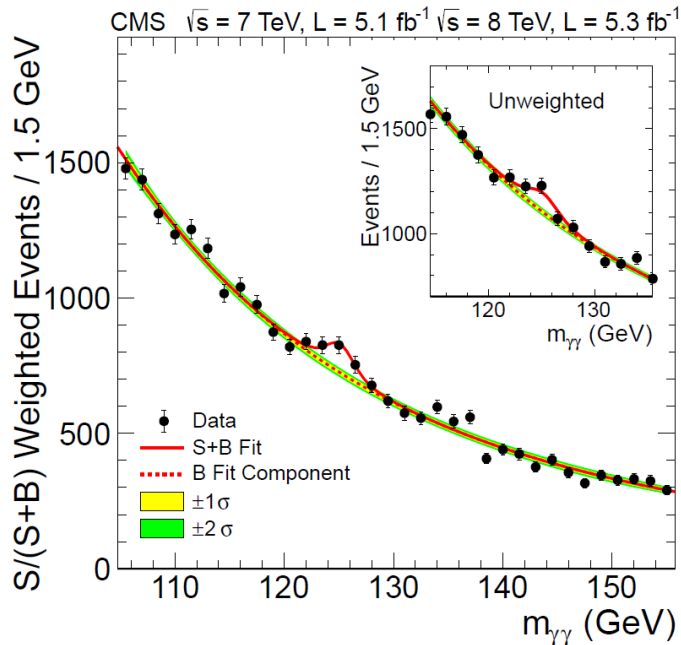
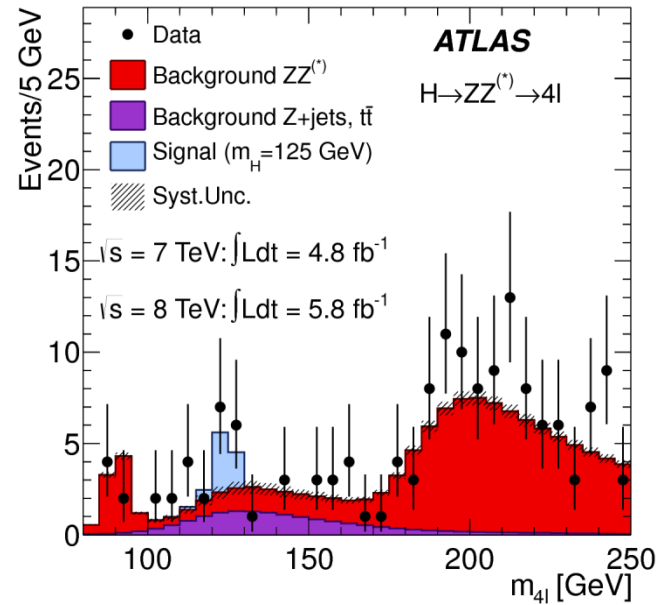
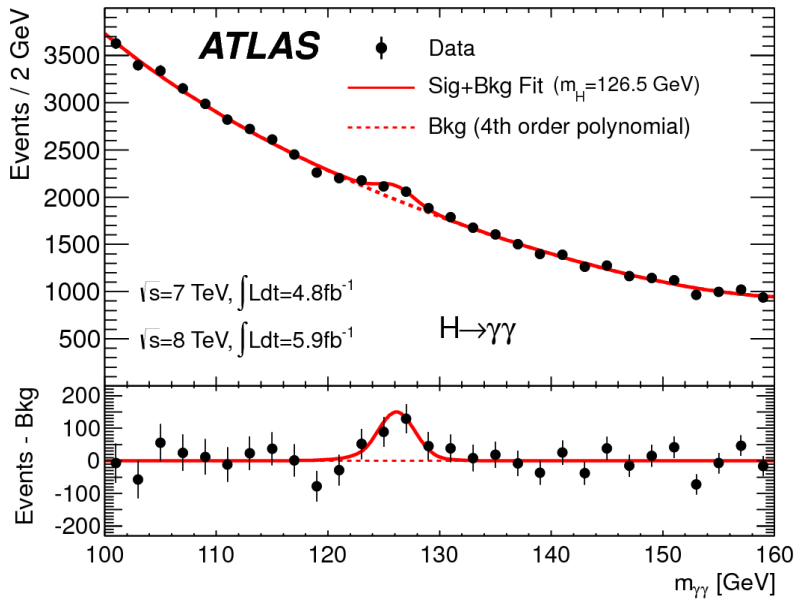


ヒッグス粒子の探索



2,000,000,000,000,000 (2,000兆回) イベント→約500,000個のヒッグス粒子¹⁸

2012年7月 ヒッグス粒子発見



データ解析

テーマの探索・選択

- 自分で研究テーマを選ぶ.
- スタッフ・先輩の話
 - 論文、Preprintの情報など

なぜ？

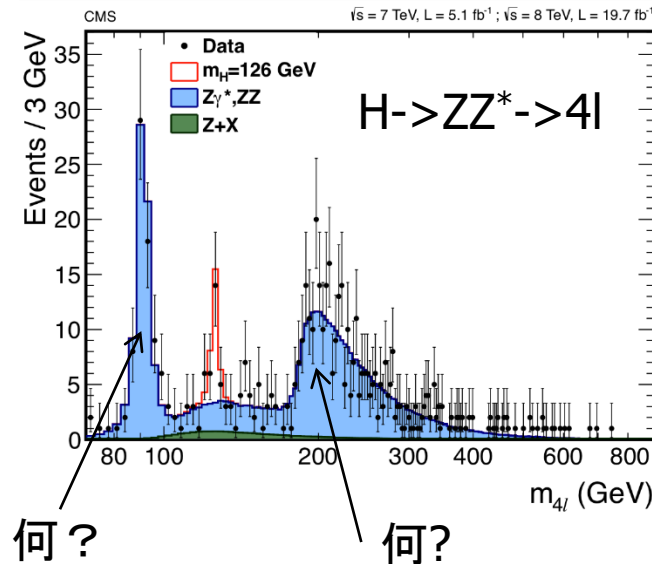
解析手法の検討

新しいアイデアを考える.
→ 流行りは機械学習、深層学習

"物理"の要素を入れたいなあ

自分の手法が確立すると、うれしい

解析を楽しむ：自然を観る

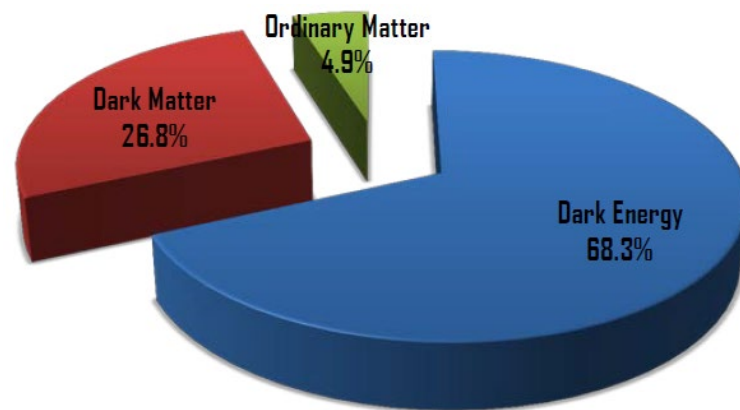


あーでもない、こーでもない、と試行錯誤するのが面白いし、
原因がきちんと説明できると、うれしい

ヒッグスの発見で「標準模型」は完成した。めでたし、めでたし？

「標準模型」で説明できないこと、不満足な点

暗黒物質、暗黒エネルギー
ニュートリノの有限質量
宇宙の「物質」優勢
階層性問題 (-> ヒッグス粒子がなぜ軽いか?)
力の統一 (GUT and GUT+重力)
世代数=3
電荷の量子化
模型の入力パラメータが多い
などなど



「Theory of everything」にはほど遠い

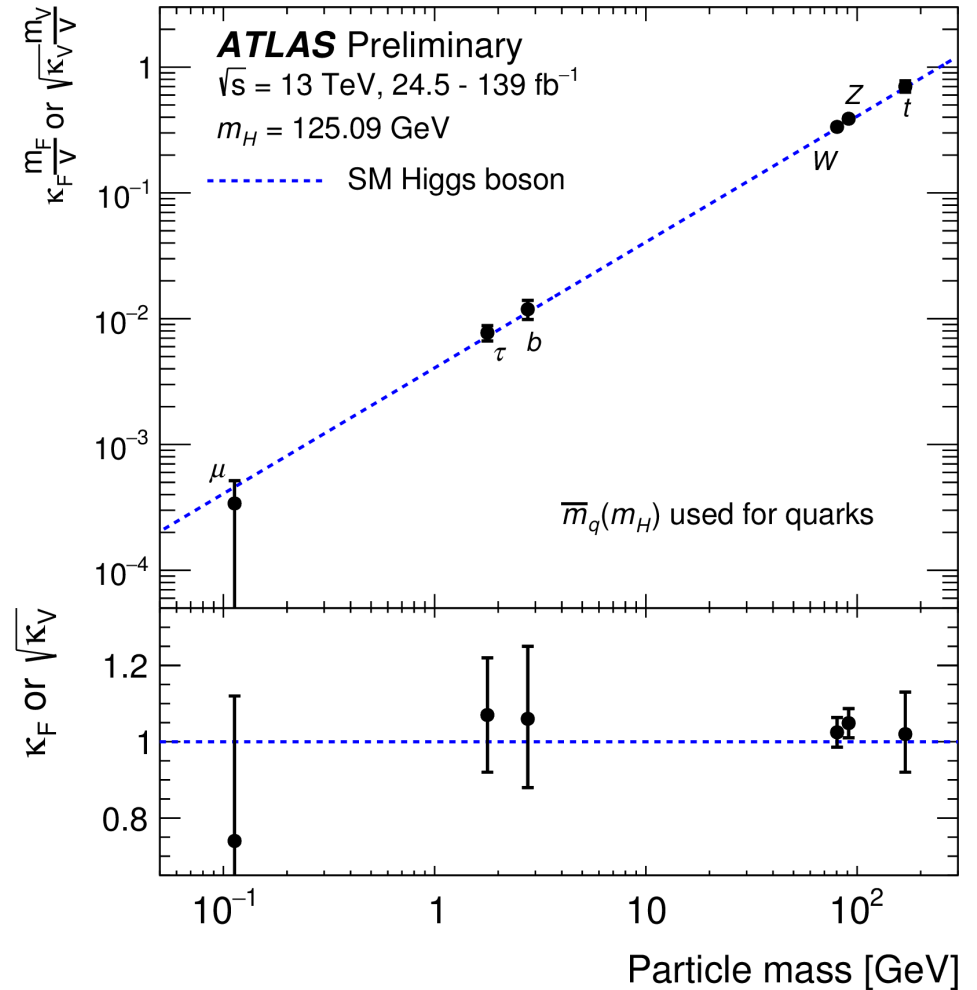
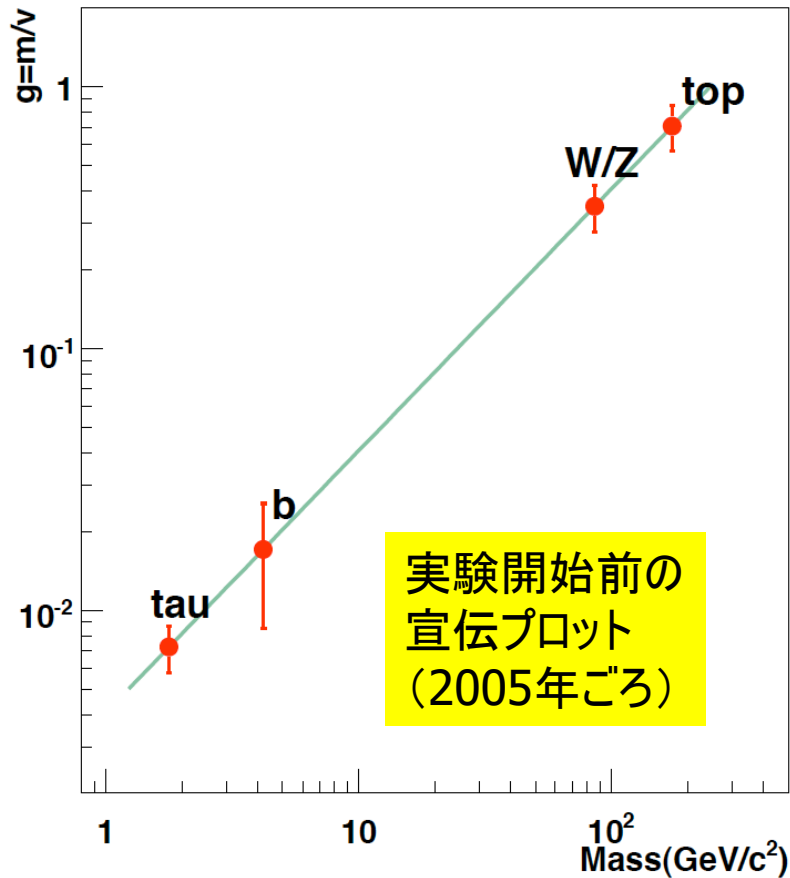
「より整合性のある標準模型を越えた物理法則」の追求

- 超対称性 (SUSY、スージー)
 - 余剰次元
- 世界最高エネルギー

- ヒッグス粒子の詳細

世界で唯一
ここでしか生成できない

ヒッグス結合定数の測定と標準模型



スピンはゼロ、CPも+でした。

ヒッグス粒子は今のところ標準模型からズレない！

標準模型は手ごわい

人類がW粒子やZ粒子(1983)を見つけて40年ぐらいたちました。
W/Z粒子はとことん調べました。ズレなし。

ヒッグス粒子は？

人類がヒッグス粒子を見つけてまだ9年。

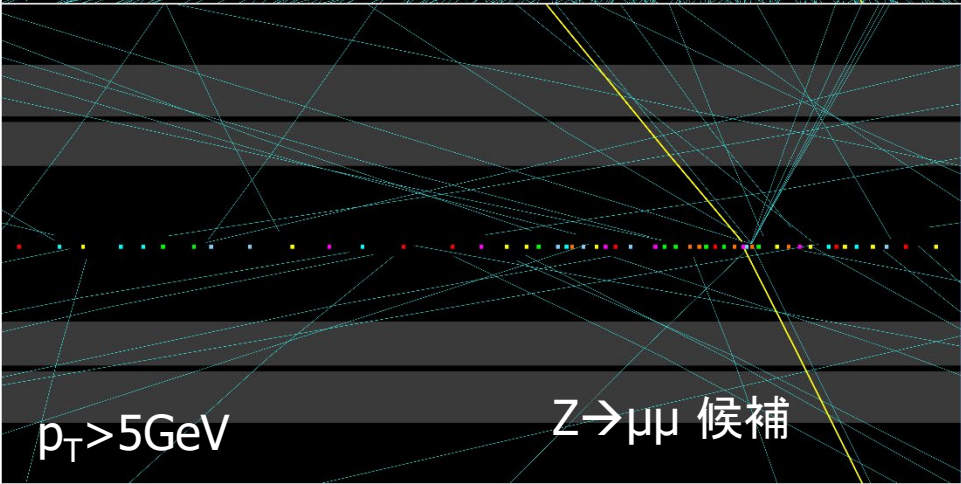
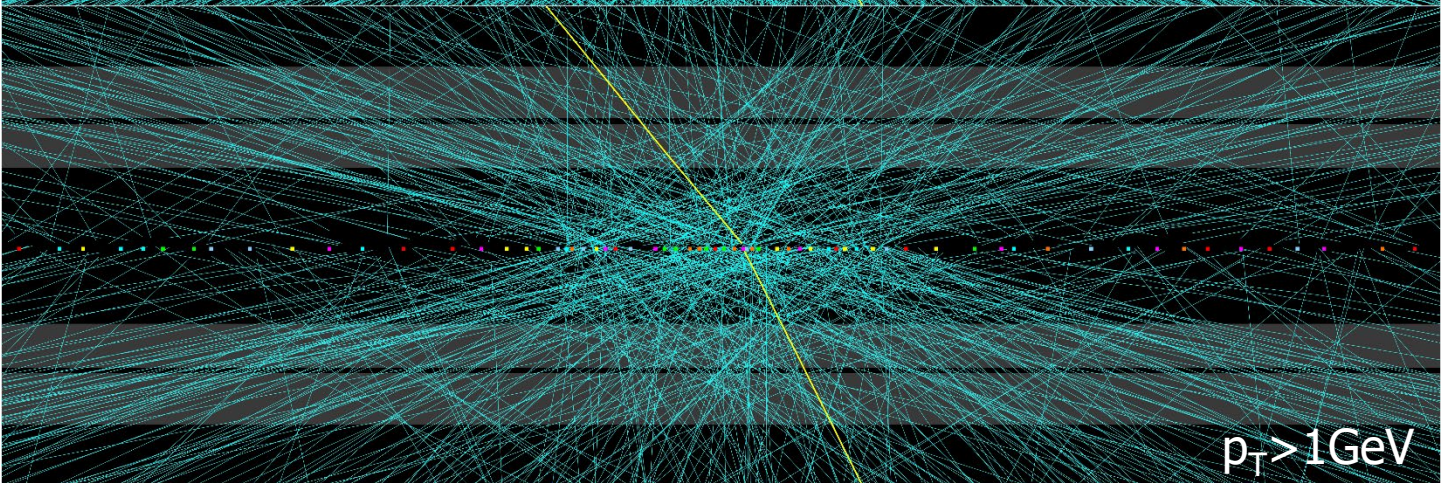
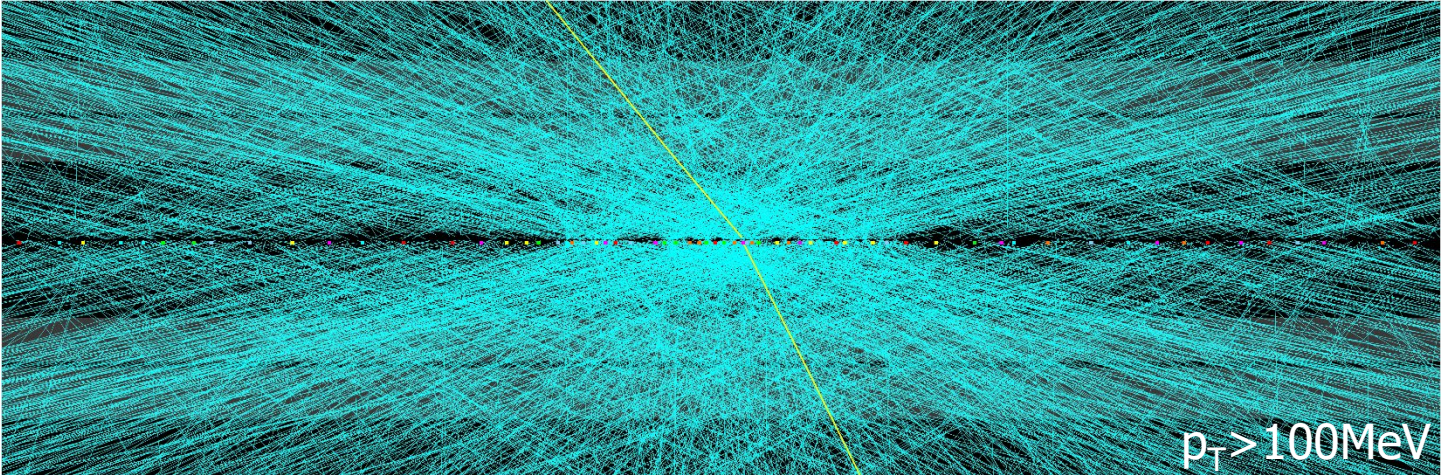
ヒッグス粒子が「新物理」への窓

125GeVのヒッグス粒子の研究

- 知っている粒子との結合のズレ
- 想定外の崩壊(結合)
- ヒッグス粒子のポテンシャルの形を調べる
etc.

125GeV以外のヒッグス粒子の探索

自分が面白い、追求したいと思う研究を探そう！



66個の陽子・陽子衝突



ATLAS
EXPERIMENT

Run Number: 336852, Event Number: 883966264

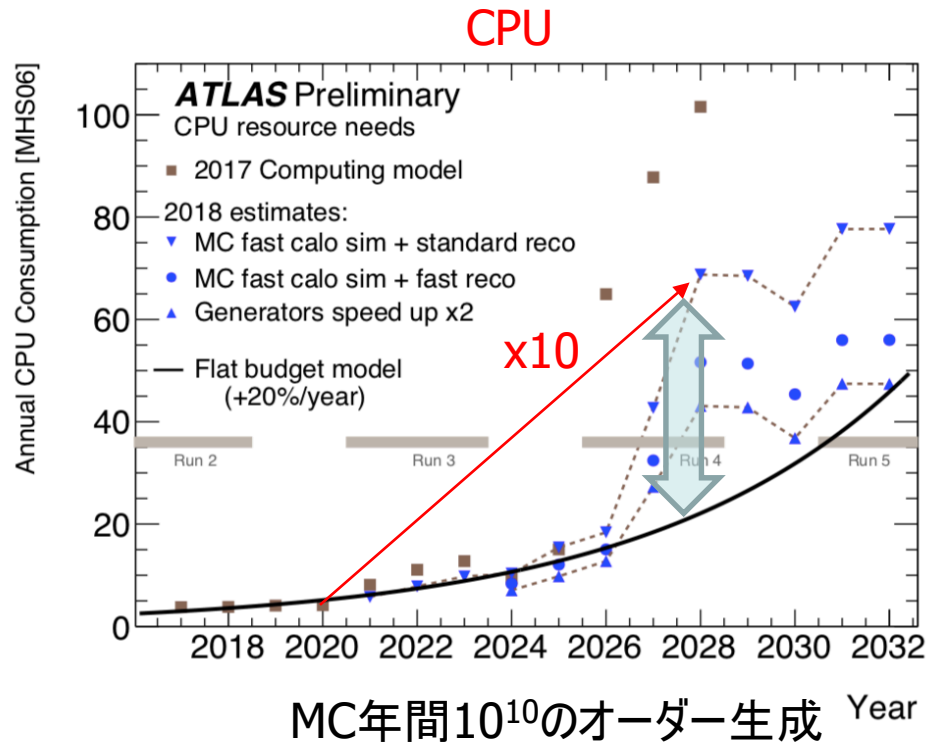
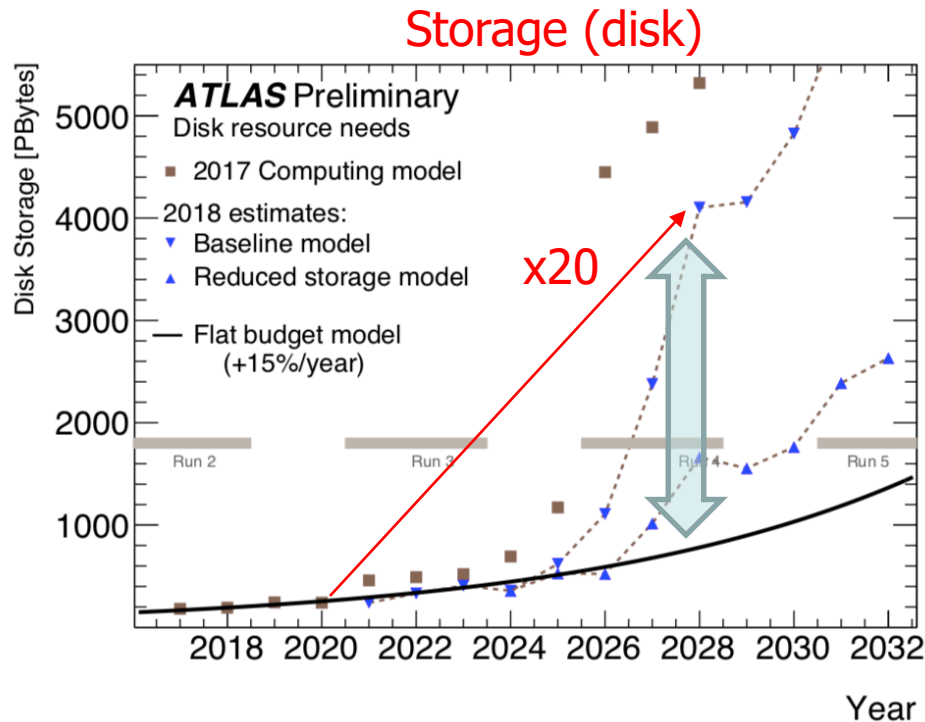
Date: 2017-09-29 09:19:23 CEST

$Z \rightarrow \mu\mu$ 候補

平均30個が200個、1000個となる

イノベーションを！

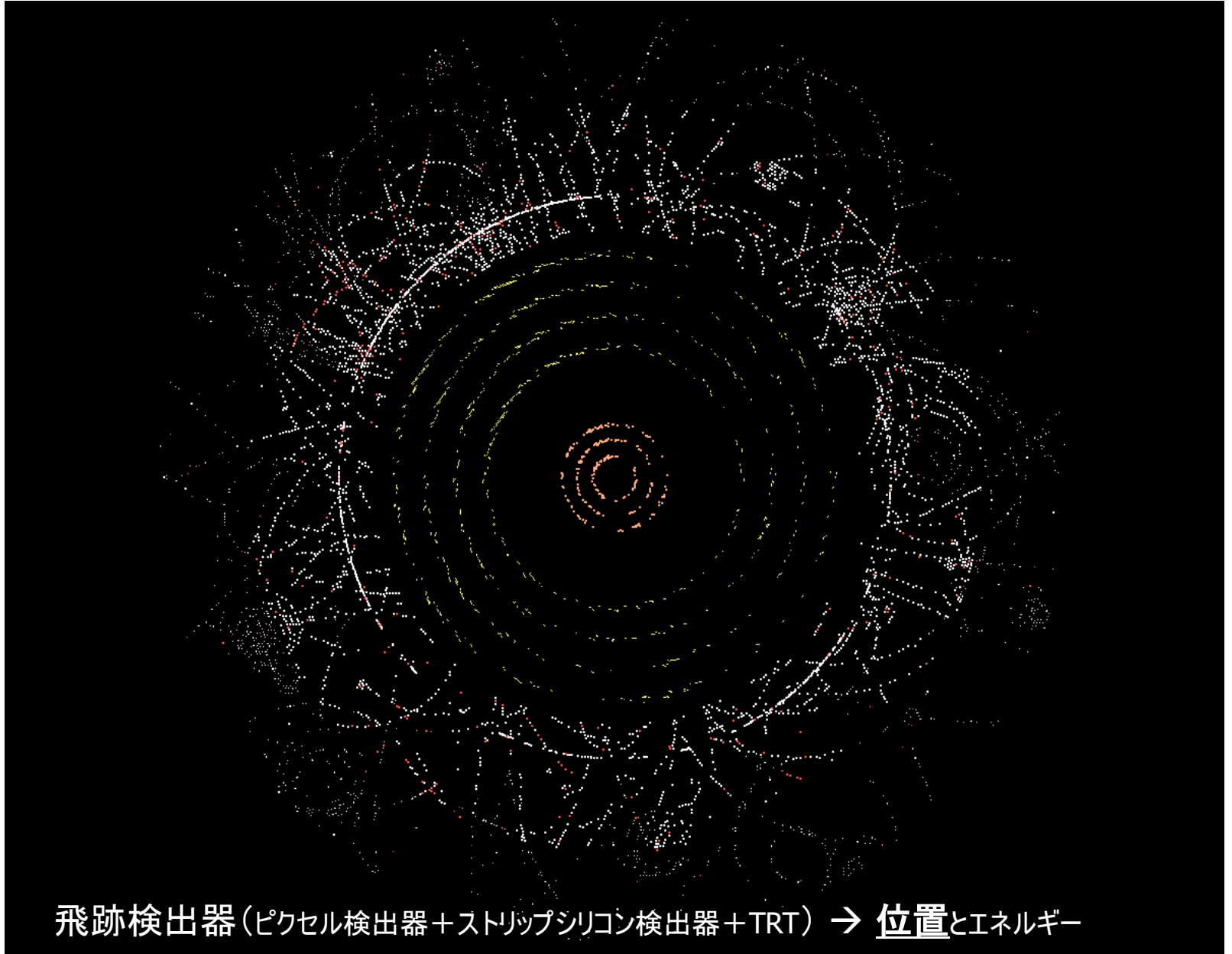
必要な計算機資源は供給量を上回る時代がすぐにそこに



1事象1分間必要なら 10^{10} 分~2万年かかる。

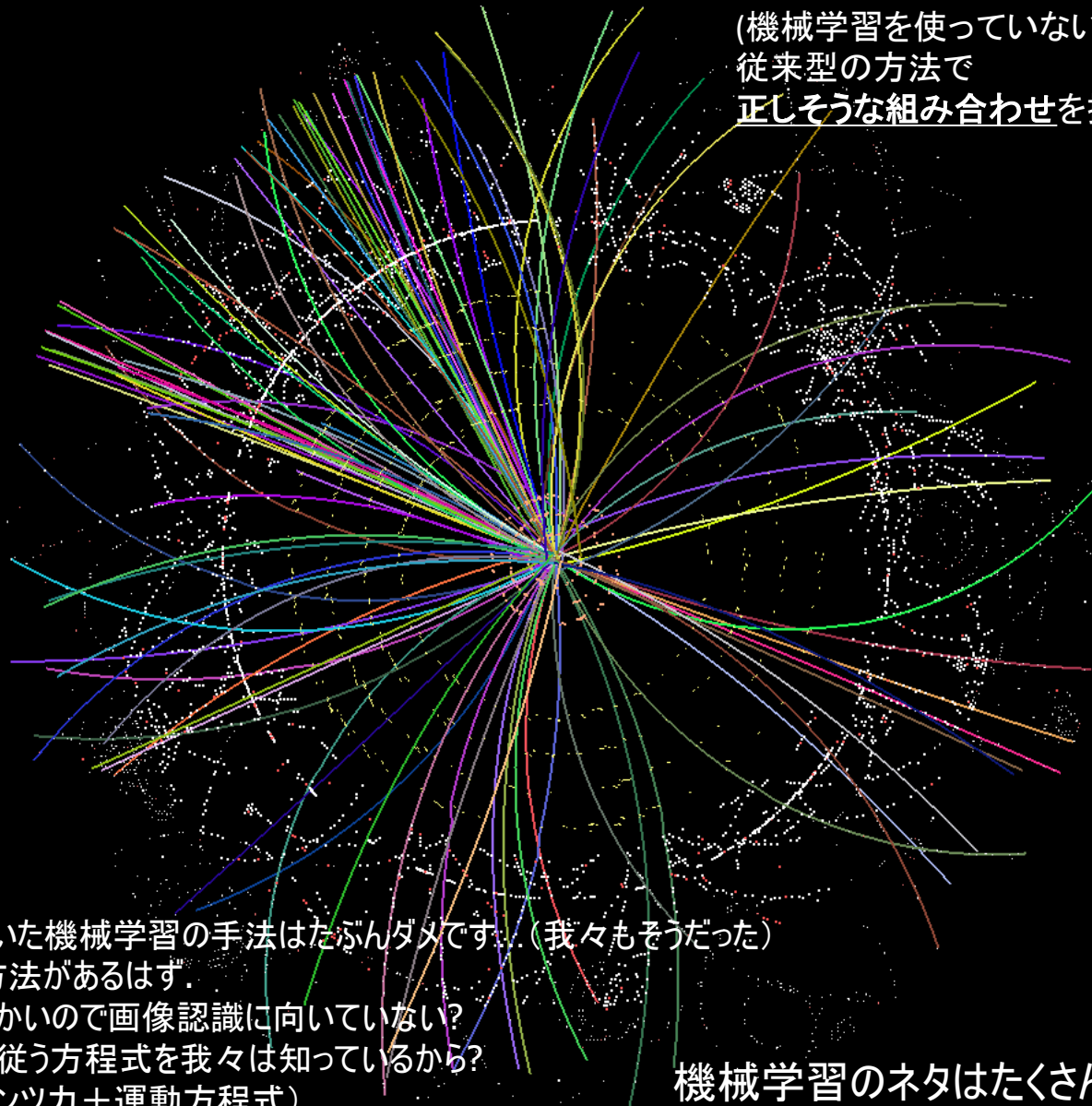
最先端ICT(Information and Communication Technology)を使って、乗り越える！
機械学習、深層学習、クラウド、スパコン、量子コンピューティングなど

磁場がかかっています → 電荷をもった粒子は曲がる(ローレンツ力)



飛跡検出器 (ピクセル検出器 + ストリップシリコン検出器 + TRT) → 位置とエネルギー

(機械学習を使っていない)
従来型の方法で
正しい組み合わせを探した結果



今、思いついた機械学習の手法はたぶんダメです...(我々もそうだった)
もっと賢い方法があるはず.

- 点が細かいので画像認識に向いていない?
- 粒子が従う方程式を我々は知っているから?
(ローレンツ力+運動方程式)

機械学習のネタはたくさんあります!