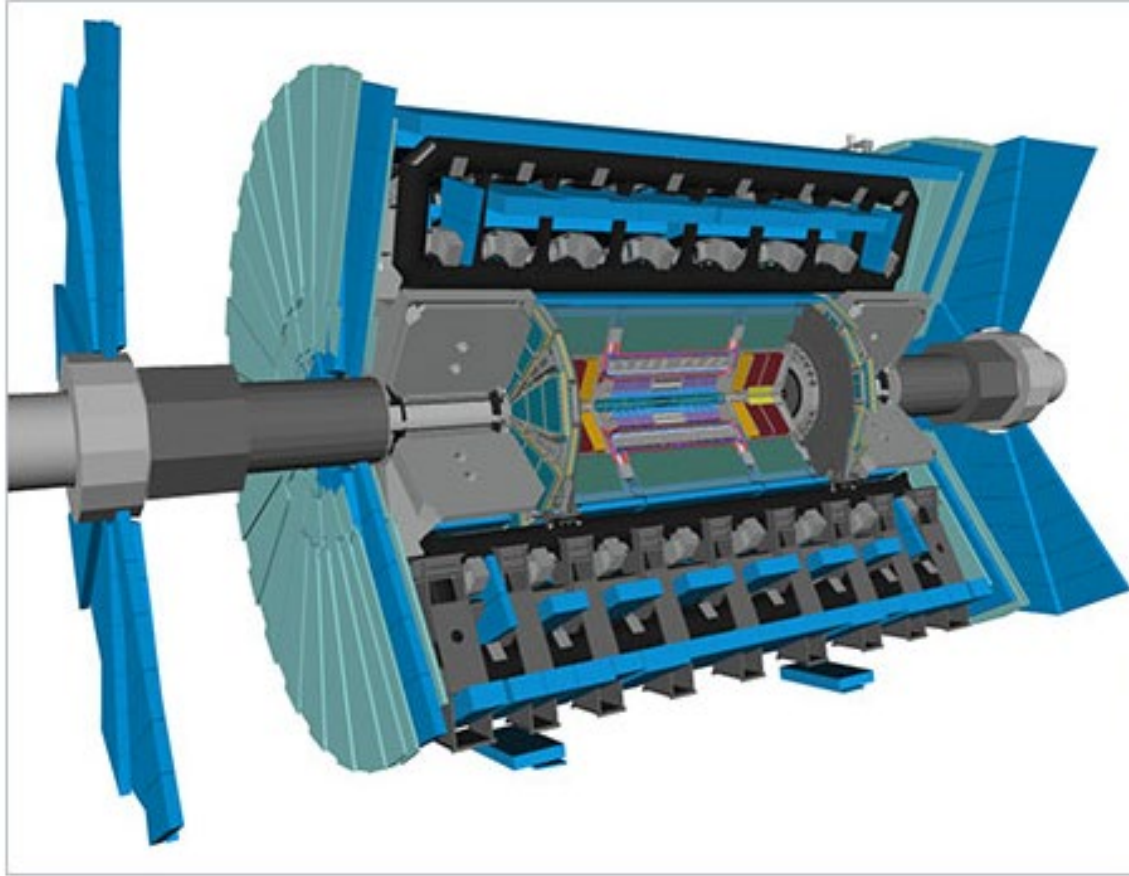


ATLAS実験 学部生向け特別セミナー 2023
～最先端「加速器素粒子実験」を知ろう！～
＜学部生・大学院生・学内外問わず大歓迎＞



6月5日(月)と6月9日(金) 16:50～18:20 (5時限目)

ヒッグス粒子の物理 人工知能を使った研究

田中純一
東大・素粒子センター

2023年6月5日

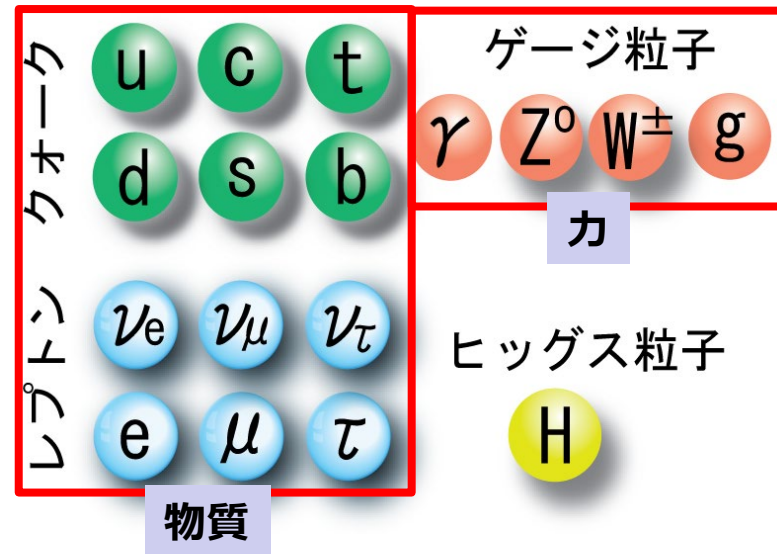
自己紹介

- 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（現行Run3で終了）
 - 2018年4月 Tokyo Tier2, ビッグデータを使った計算機科学
 - 計算機センター（グリッド、クラウド、スパコン）
 - 深層学習、量子コンピュータ
 - 2020年7月 Beyond AIに参画（昨年度終了）



田中研：アトラス以外もOKです！

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

これまでとは異なるタイプの素粒子



ヒッグス粒子

入れ物に対応する「素粒子」?

真空って何…空ではない?

素粒子の標準模型 「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。

→ **対称性を仮定するなら、素粒子の質量はゼロ！**

「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。これらの対称性は素晴らしい、信じたい！」

→ 「ヒッグス機構」が問題解決！

余談

実は、ヒッグスの質量はまた別問題を引き起こす…

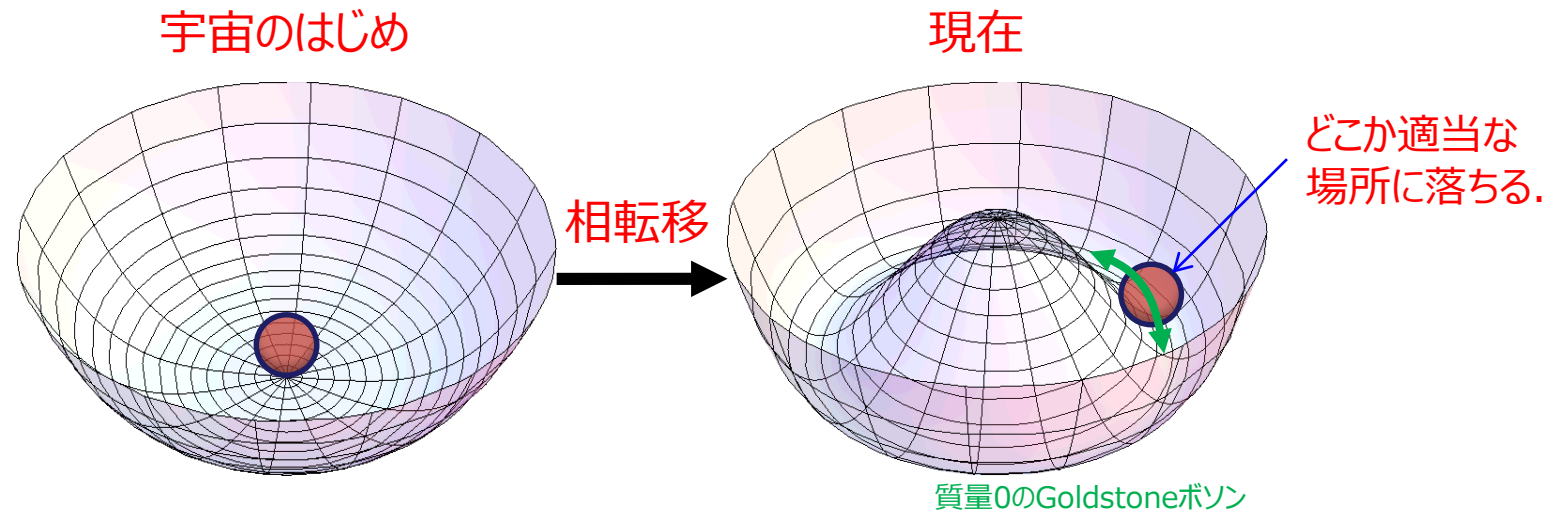
ゼロになる積極的な理由がなければ、代表的なスケールである
プランクエネルギー（ $\sim 10^{19}$ GeV）になるのが“自然”。

質量の起源



- 「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



南部先生
2008年ノーベル物理学賞
「自発的対称性の破れ」

「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」

ゲージボソンの質量の誕生

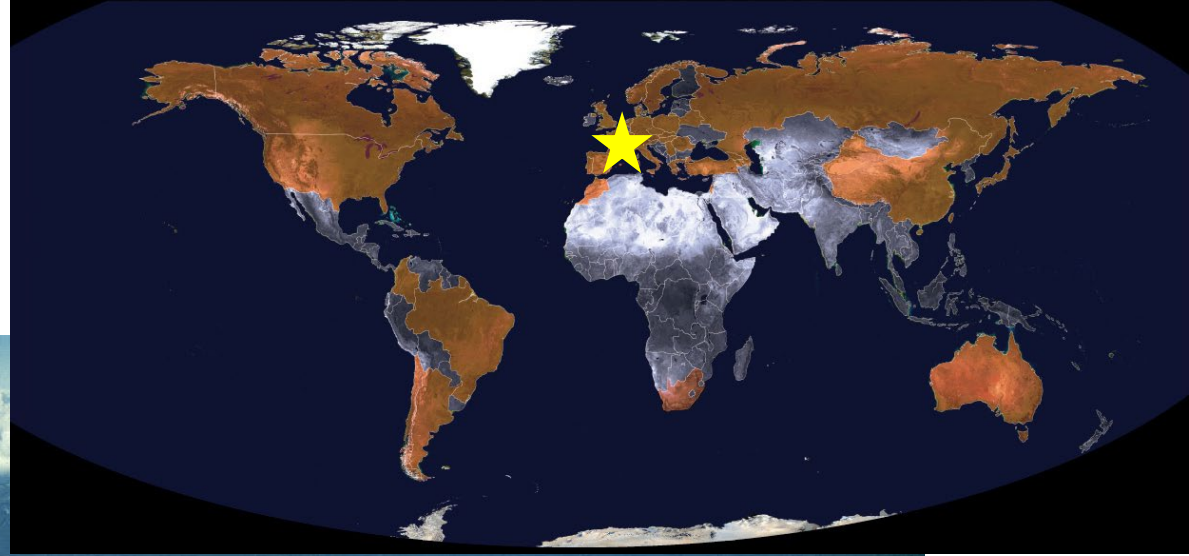
これが「ヒッグス機構」

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



「ヒッグス粒子」を追い求めて



ヒッグス、アングレー、ブラウアの論文は1964年

LHC加速器 (CERN、スイス)
2010年～ 陽子・陽子衝突

ジュラ山脈

Large Hadron Collider (LHC加速器)

地下100m、周長27km

ATLAS実験

CMS実験

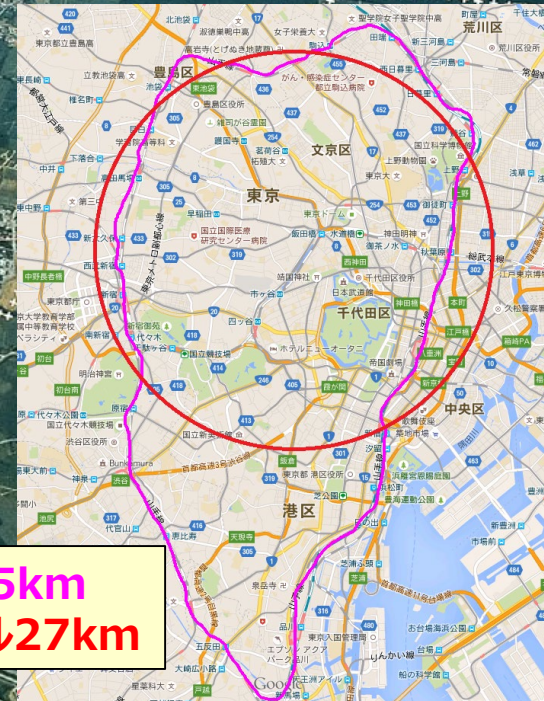
CERN

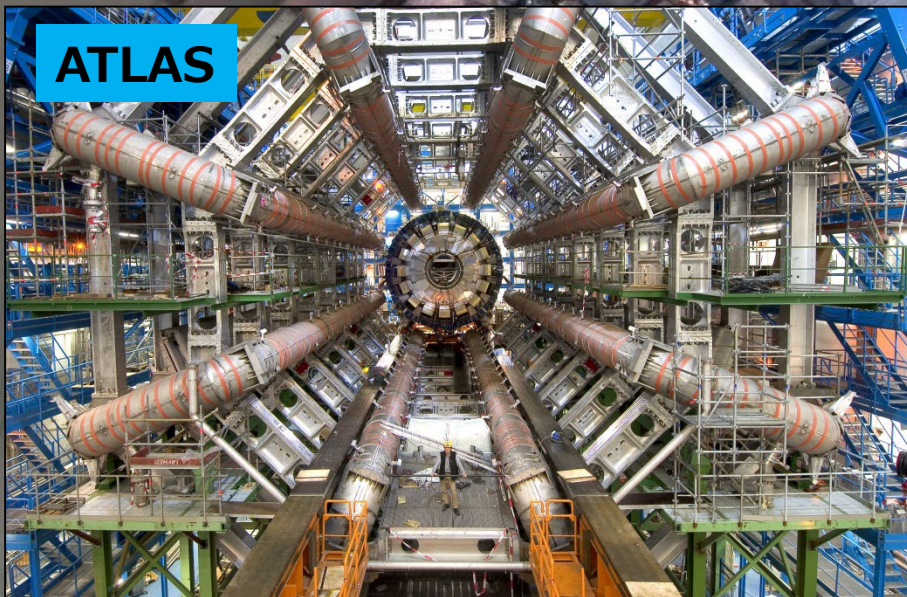


ジュネーブ国際空港

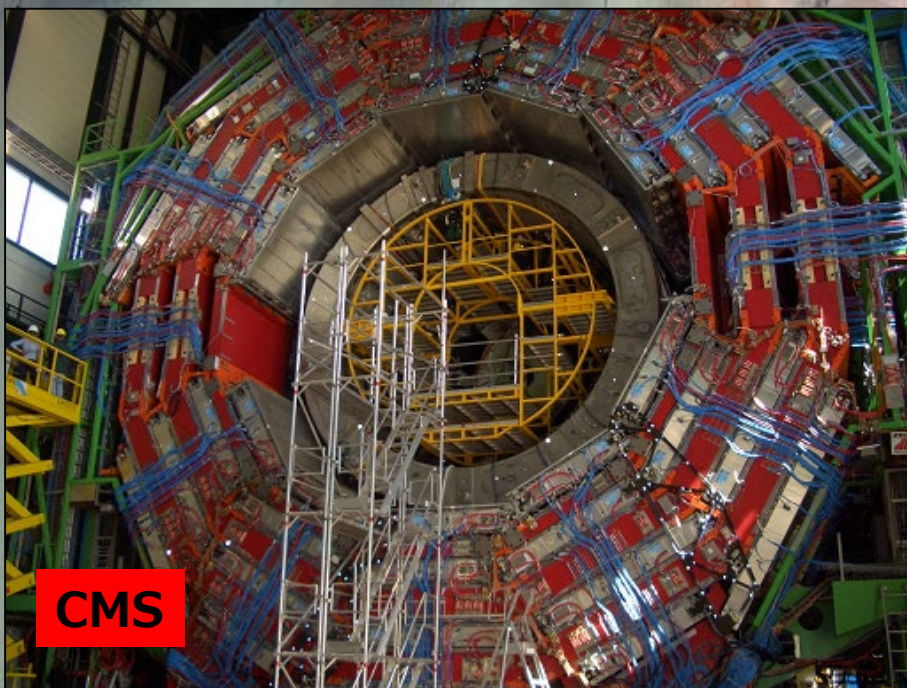


山手線34.5km
LHCトンネル27km





ATLAS

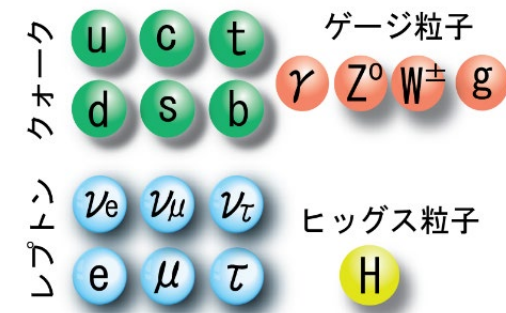


CMS

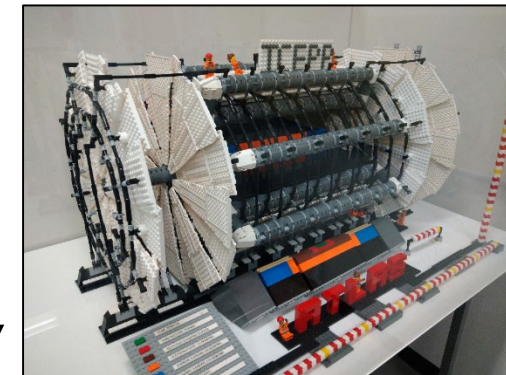
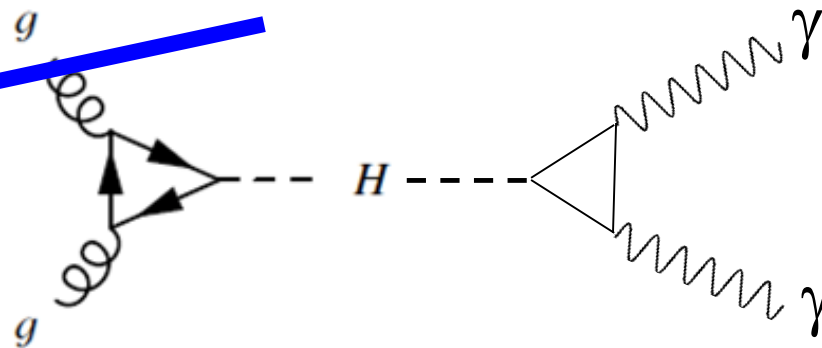
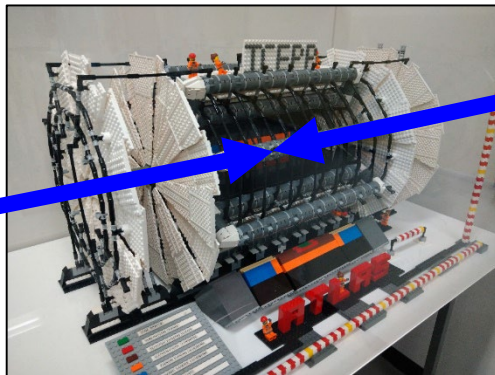


LHC加速器
- 地下 約100m
- 1232台のDipoleマグネット
- 温度1.9K (超伝導)

Higgs粒子の研究



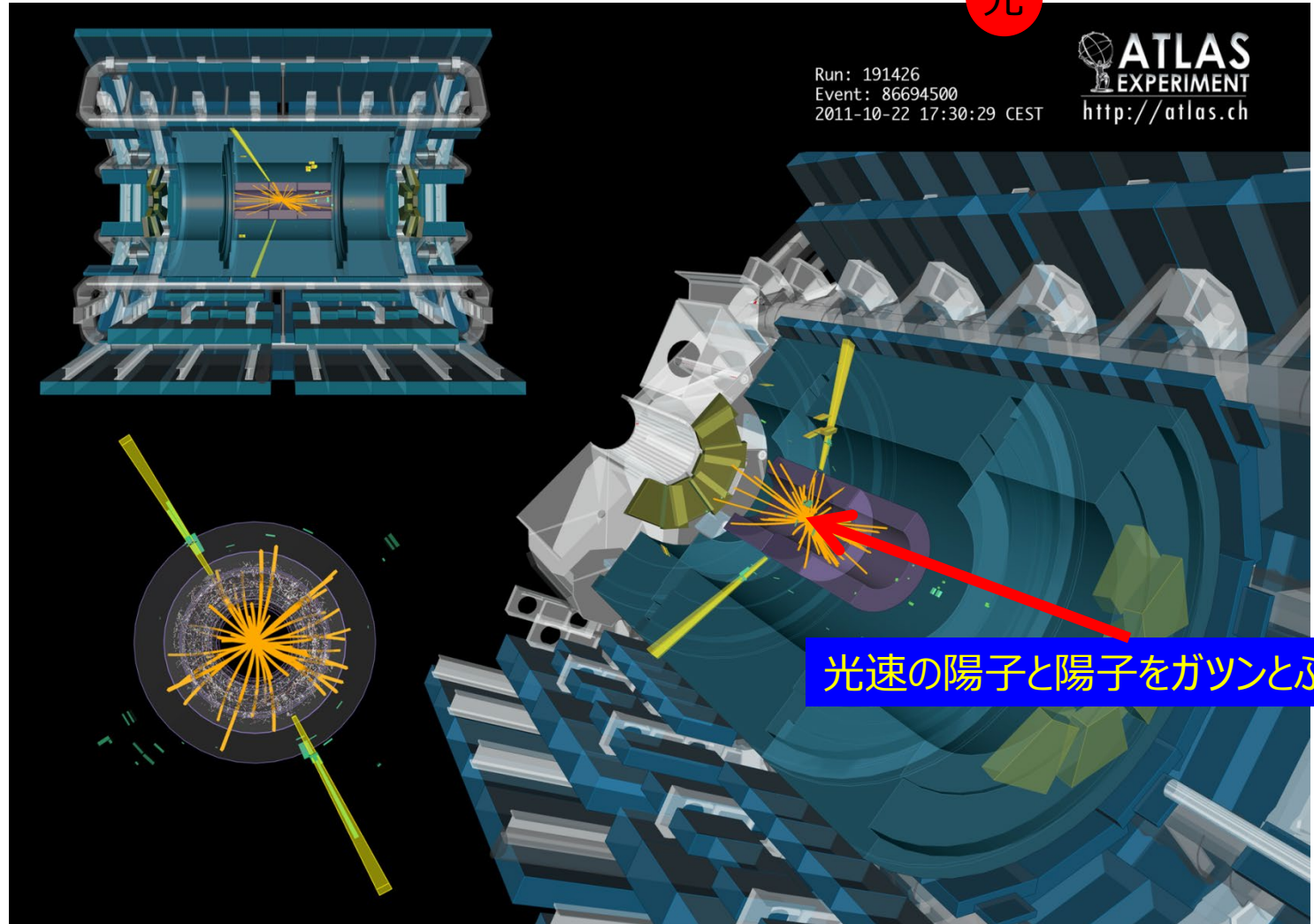
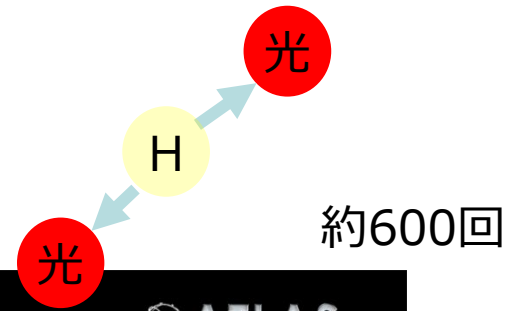
- 「Higgsの生成」：これができるのはLHCだけ！
- 研究 → Higgsの“生成”と“崩壊”をうまく組み合わせる。
 - 発見のために、数を稼ぐなら
 - 生成断面積の大きい生成プロセス（生成パターン）
 - 崩壊率（BR）の大きい崩壊パターン → **これを観測する！**



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

測定する

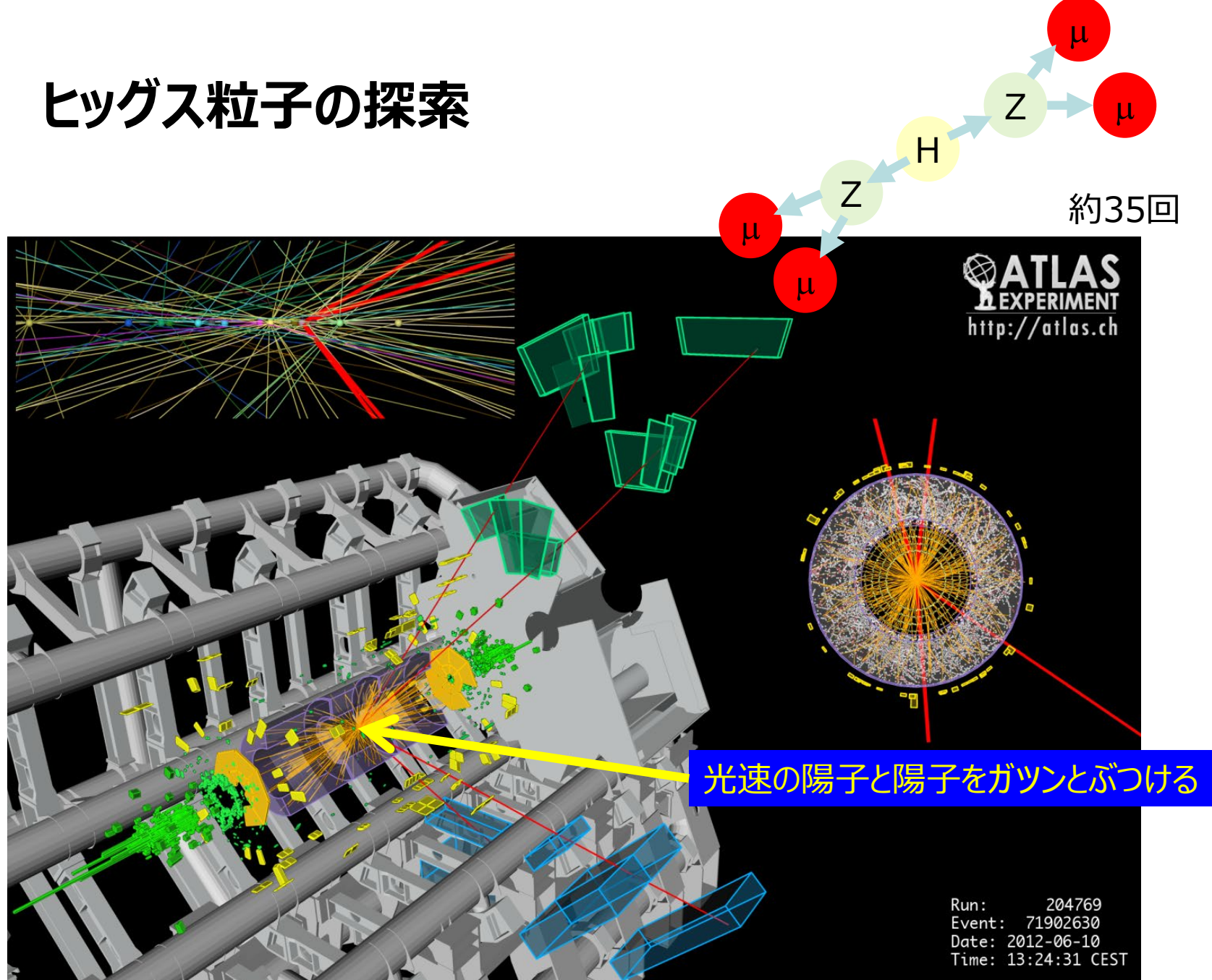
ヒッグス粒子の探索



たぶん発見した
当時の数

1,000,000,000,000,000 (1,000兆回) イベント → 約250,000個のヒッグス粒子

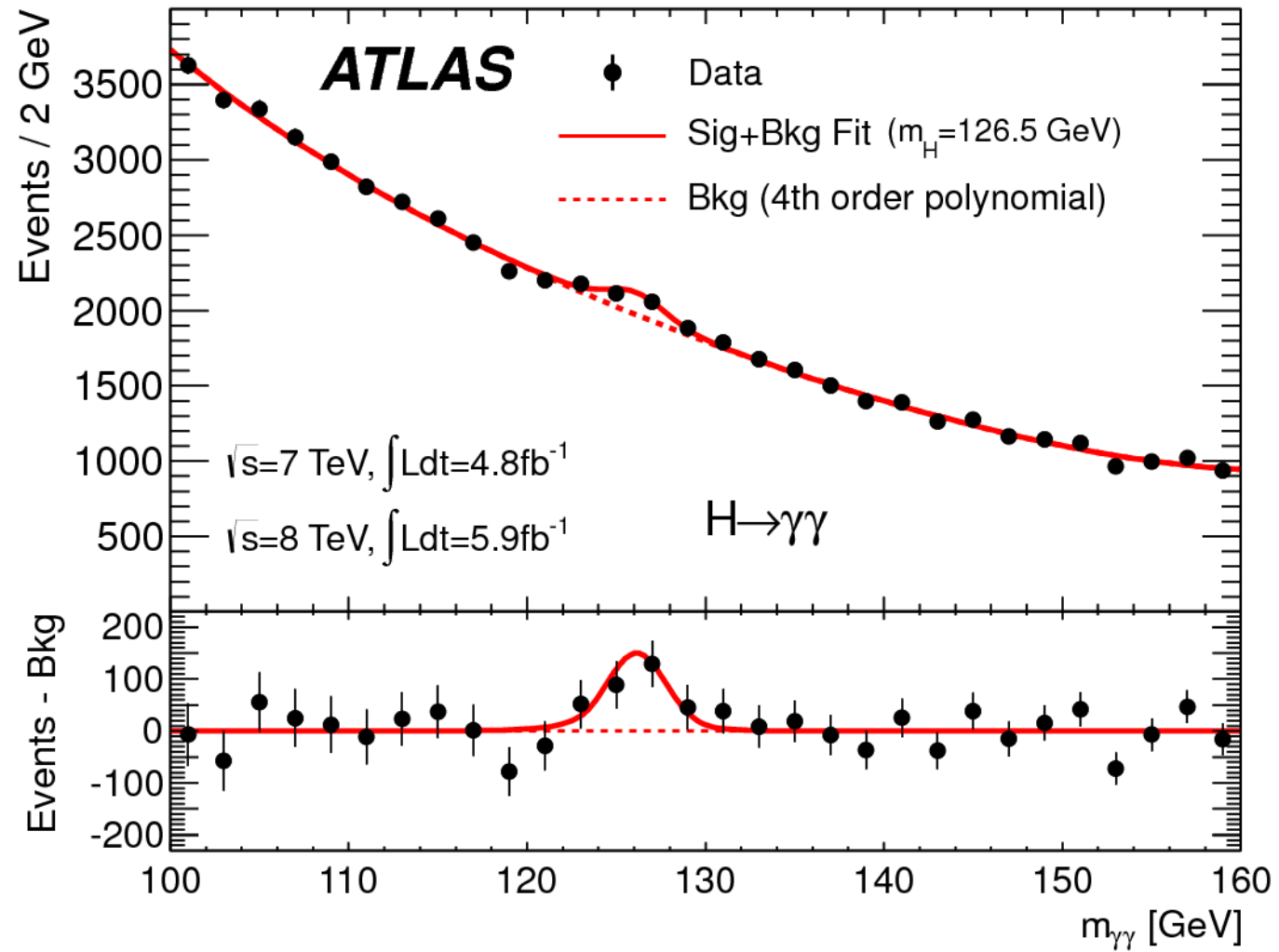
ヒッグス粒子の探索



1,000,000,000,000,000 (1,000兆回) イベント→約250,000個のヒッグス粒子

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

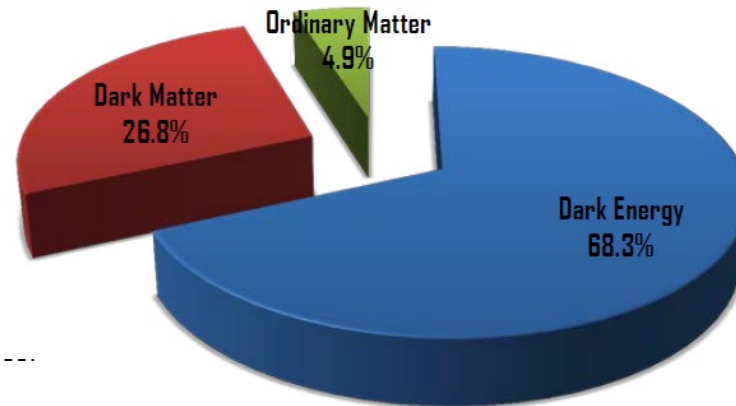


横軸 = 不変質量

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
世代数=3
電荷の量子化
階層性問題 (→ ヒッグス粒子がなぜ軽いかな？)
力の統一 (GUT and GUT+重力)
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

「標準模型を越えた物理法則」の追求

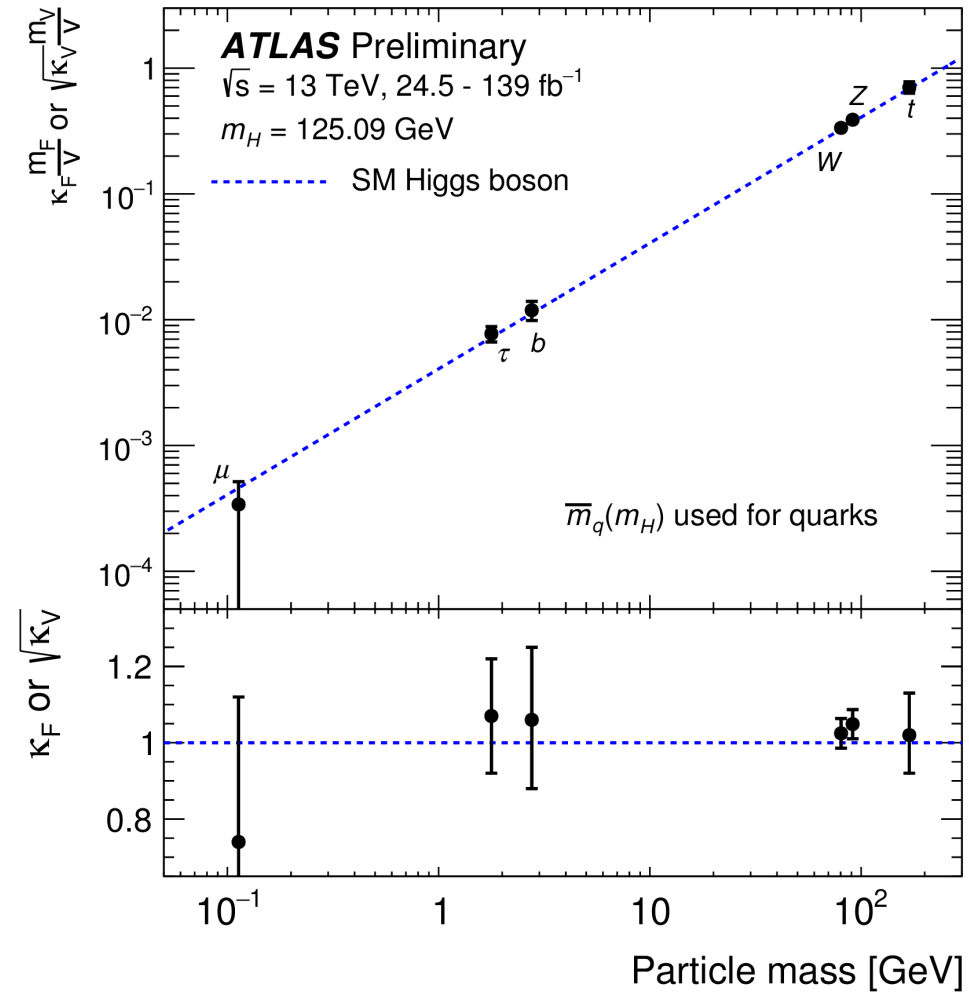
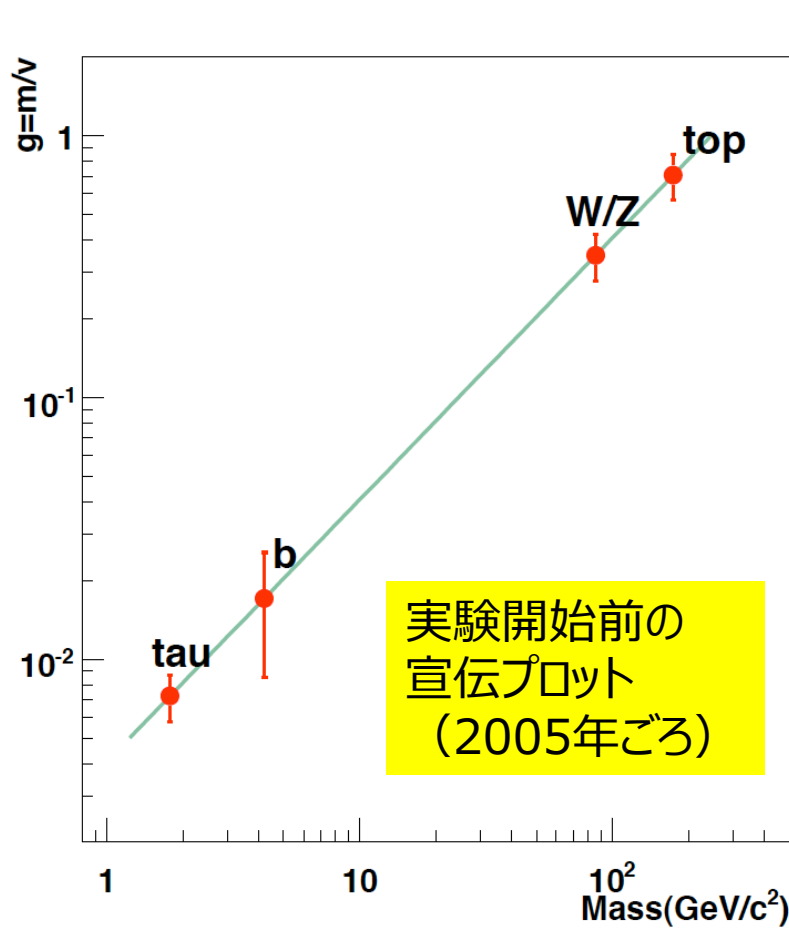
- 超対称性 (SUSY)
- 余剰次元

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。

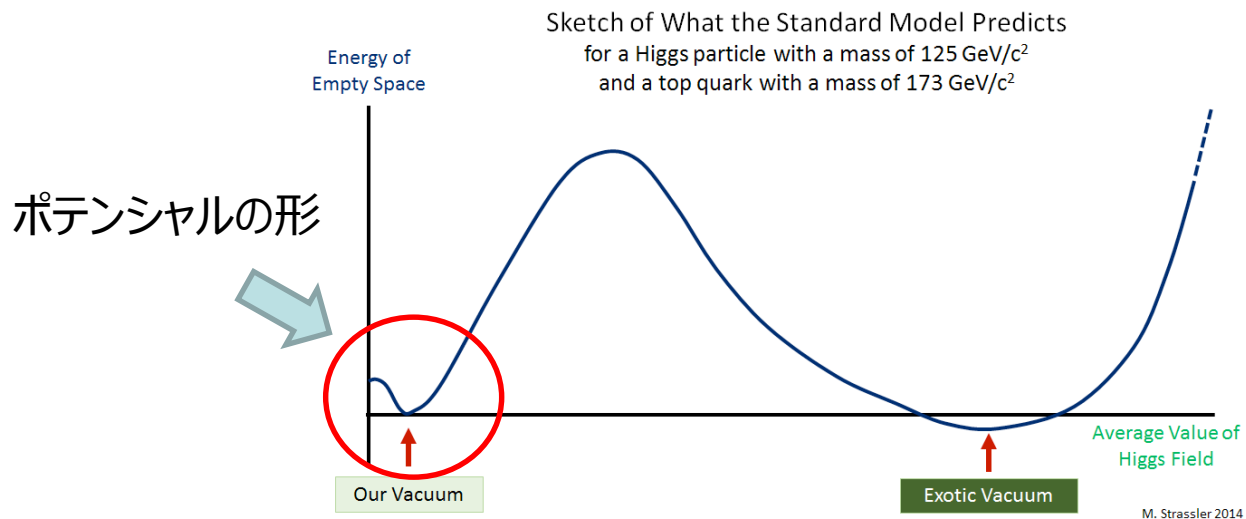
ヒッグス粒子は今のところ標準模型からズレない！

標準模型は手ごわい

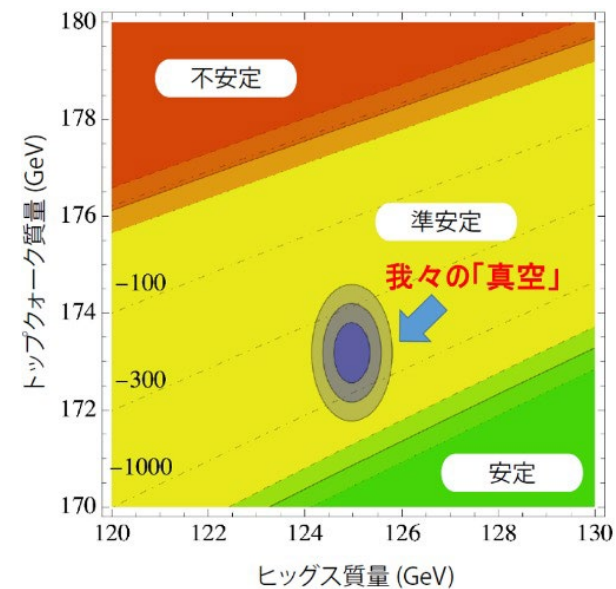
人類がW粒子やZ粒子(1983)を見つけて40年ぐらいたちました。
W/Z粒子はとことん調べました。ズレなし。

ヒッグス粒子は？
人類がヒッグス粒子を見つけてまだ10年。

ヒッグス粒子が「新物理」への窓



今の「真空」って不安定？



現在も謎が多い

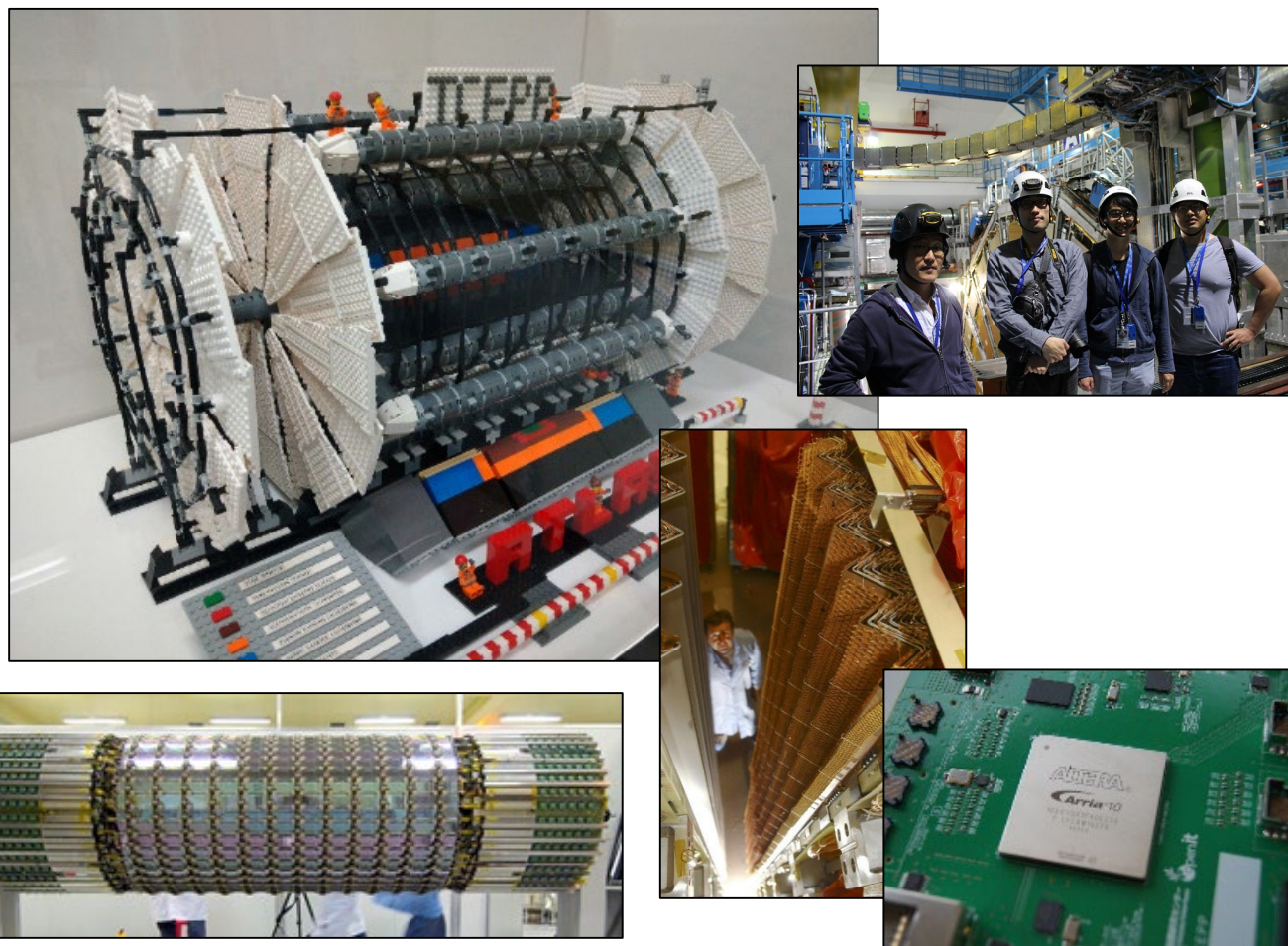
宇宙・自然が相手 → 素粒子センターでは「実験」で攻める

個人的には標準模型の大きな大きな壁を超えたい

素粒子「実験」の研究

みなさんにはたくさんの選択肢があります！

ハードウェア開発・オペレーションの仕事



計算機上での仕事

検出器データ

再構成

再構成データ

粒子識別

解析データ

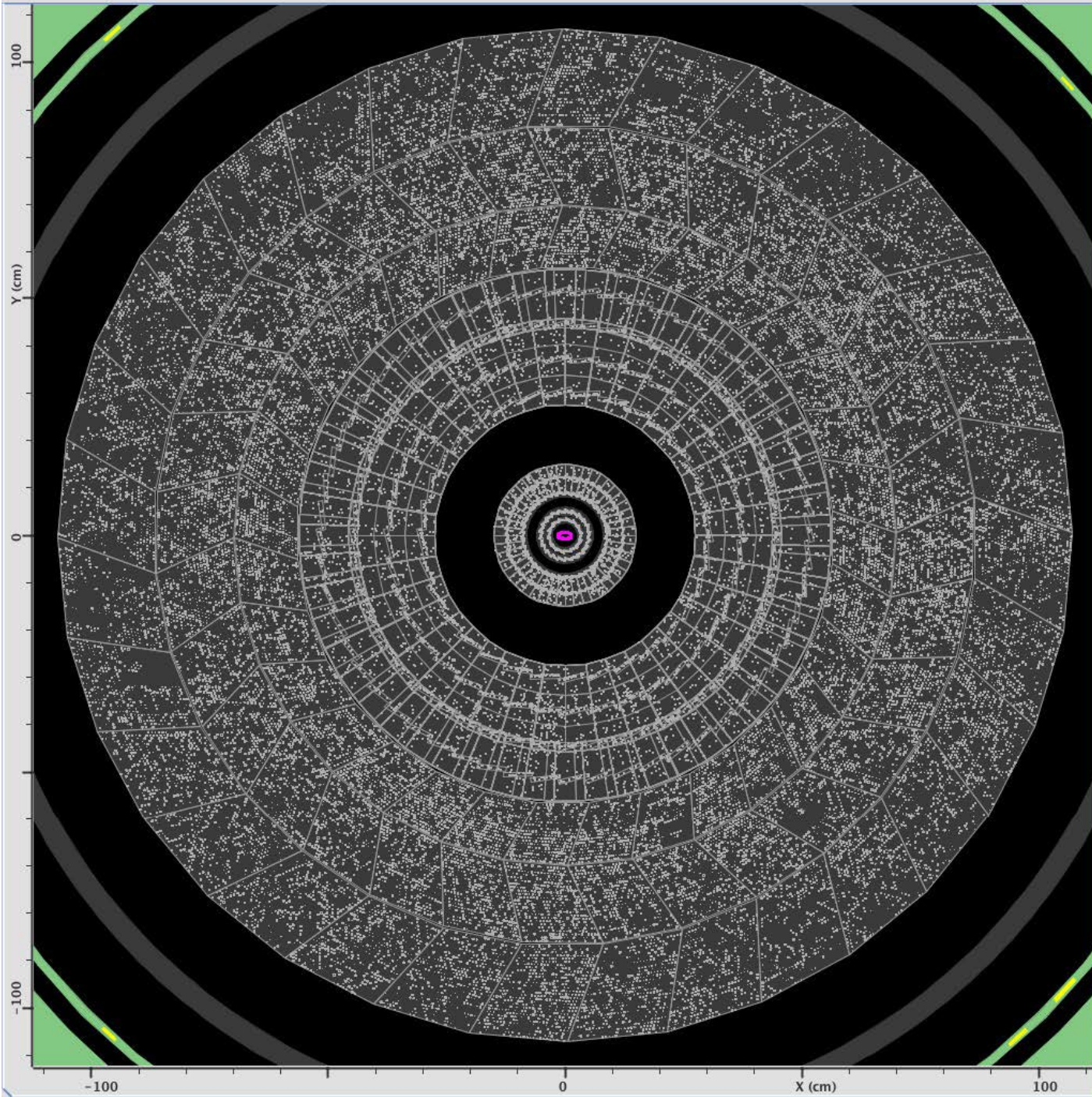
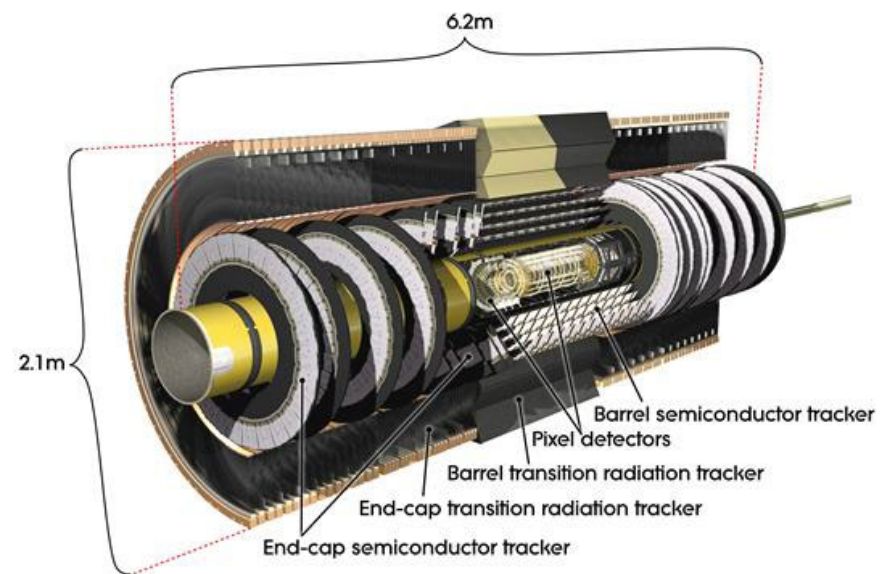
解析・検定

学術データ

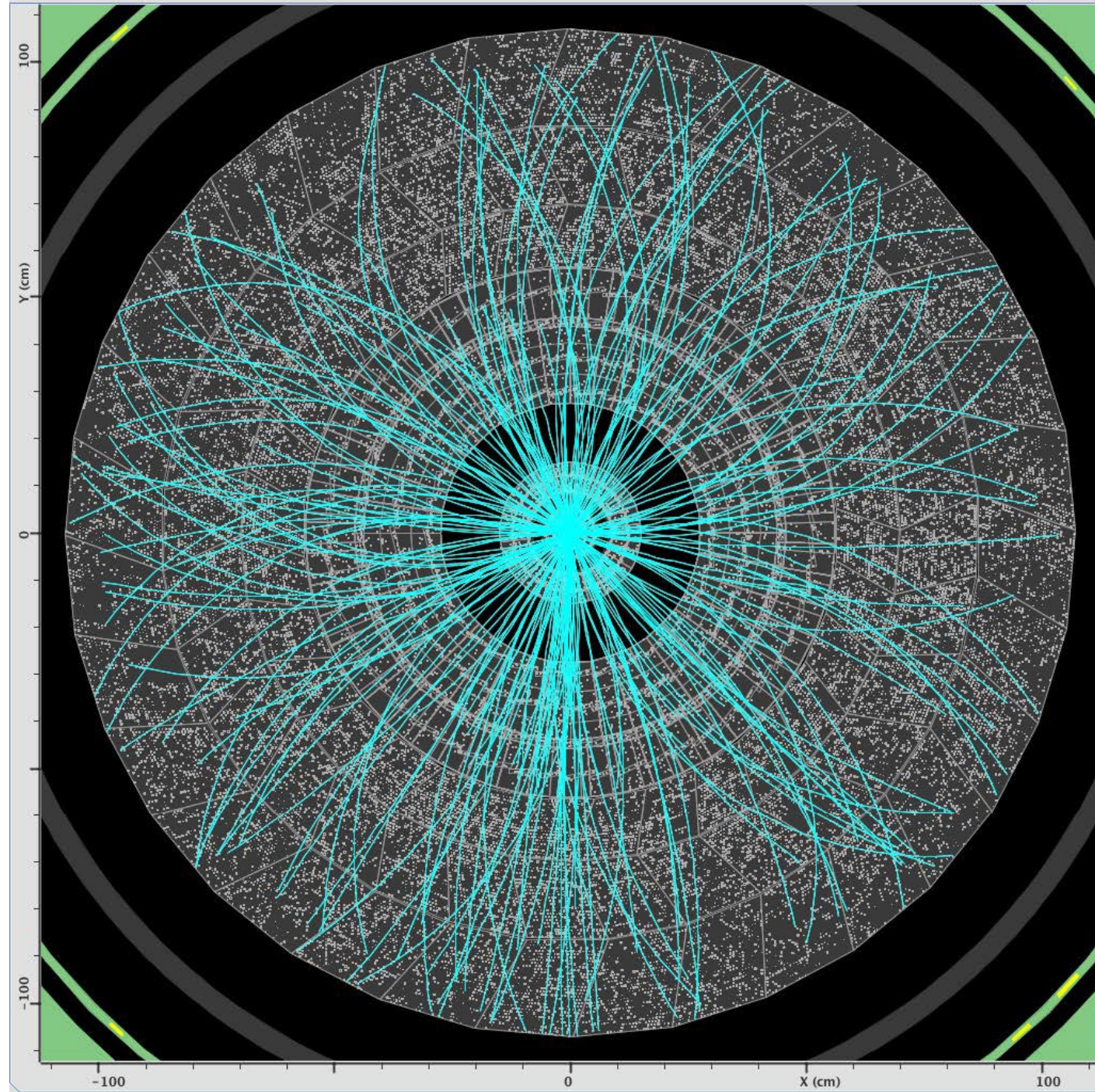
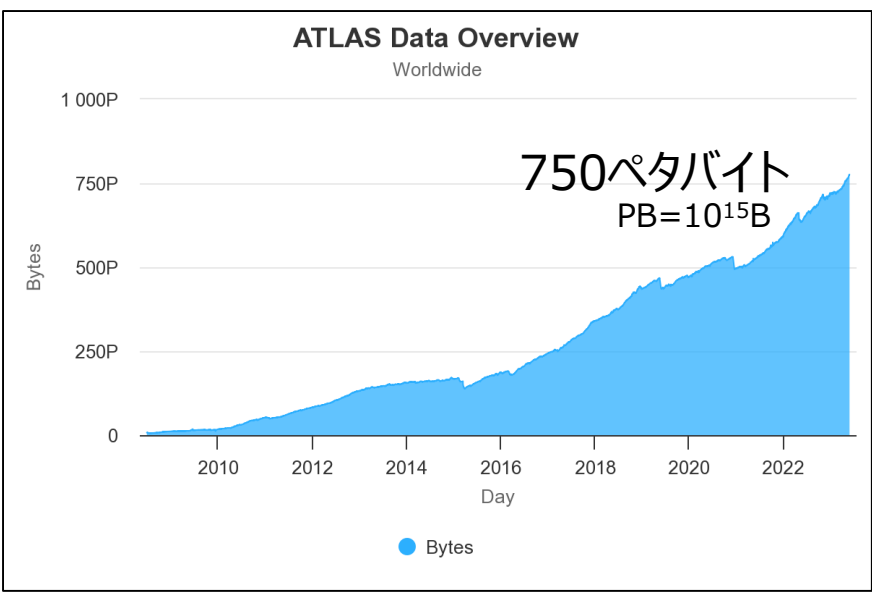
今日は人工知能を使った研究の紹介！

内部飛跡検出器のデータ

- 電荷を持った粒子が「点」を残していく.
- 磁場のため、粒子は曲がる.

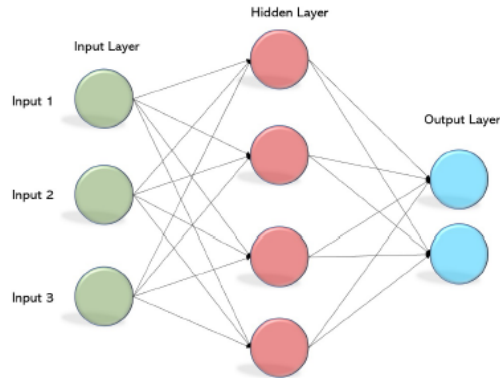


人工知能の出番！
- 画像系の機械学習？
- 物理法則は？



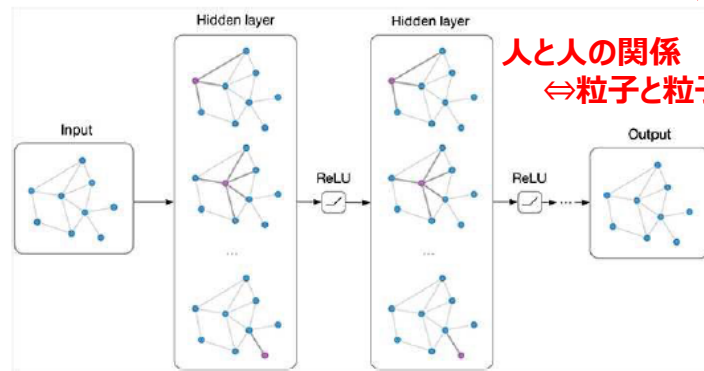
「人工知能」の分野では日々新しいアイデアが生まれている → 素粒子物理への応用

Multi-layer perceptron (MLP)



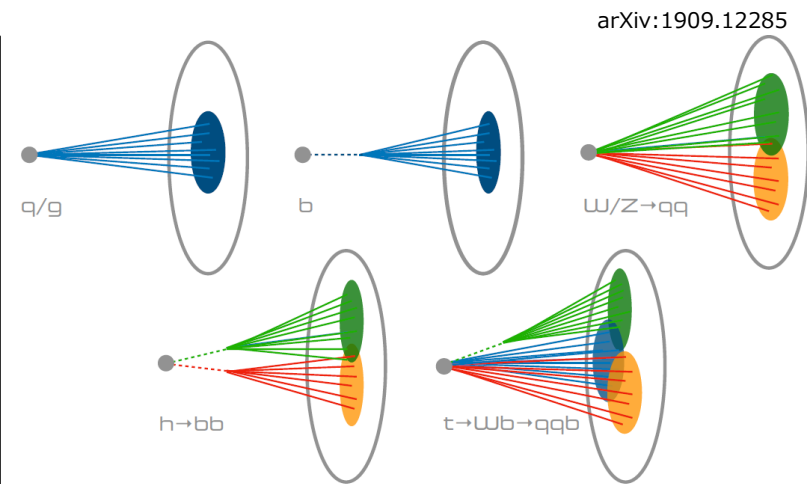
From: <https://becominghuman.ai/multi-layer-perceptron-mlp-models-on-real-world-banking-data-f6dd3d7e998f>

Graph neural networks (GNNs)



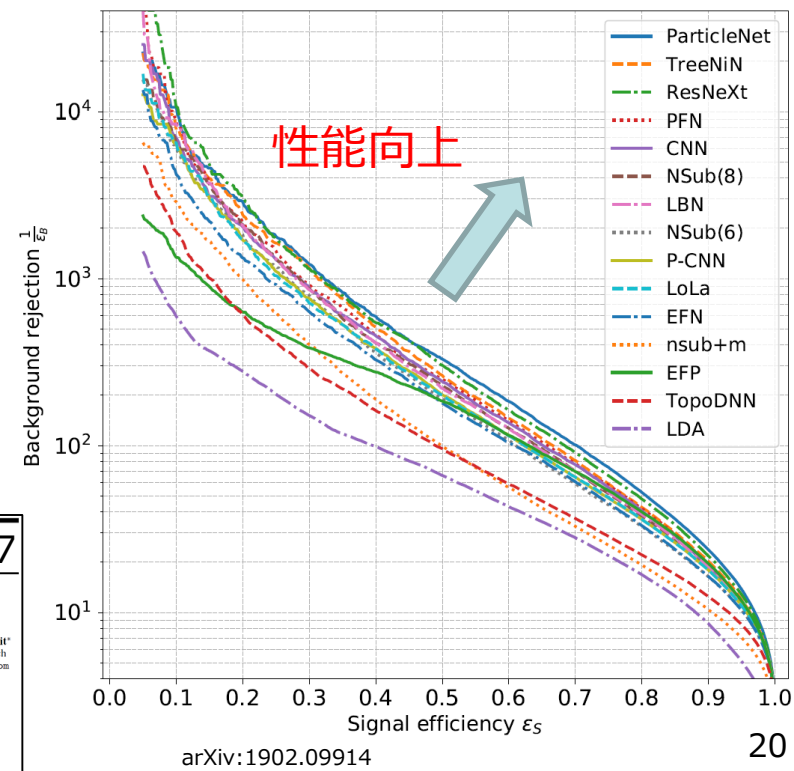
人と人の関係
⇔ 粒子と粒子の関係

From: https://theaisummer.com/Graph_Neural_Networks/
 “Scaling law”に従う
 (パラメータ数、データセットサイズ、予算に対してべき乗則)

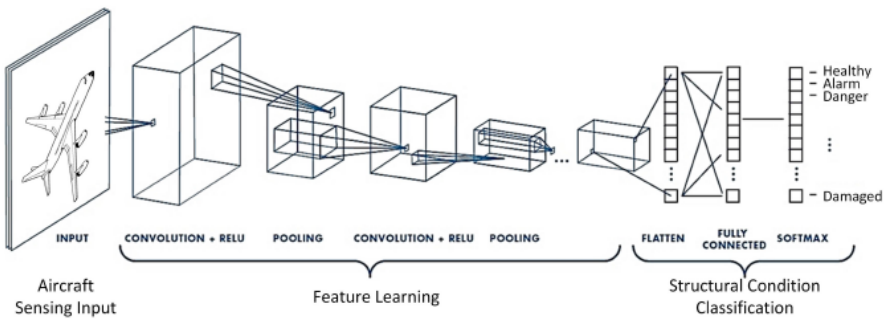


arXiv:1909.12285

トップクォークの識別性能



Convolutional neural networks (CNNs)

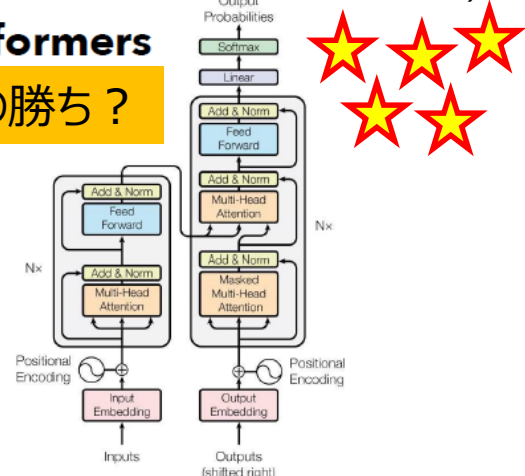


From: [Tabian et al., “A Convolutional Neural Network for Impact Detection and Characterization of Complex Composite Structures,” Sensors 19(22), 2019]

AlexNet (2012) by Hinton’s team From: <https://pytorch.org/tutorials>

Transformers

金持ちの勝ち?



Attention Is All You Need 2017

Ashish Vaswani* Google Brain
 Noam Shazeer* Google Brain
 Niki Parmar* Google Research
 Jakob Uszkoreit* Google Research
 Llion Jones* Google Research
 Aidan N. Gomez*¹ University of Toronto
 Lukasz Kaiser* Google Brain
 Illia Polosukhin*¹

阪大IDS : 中島悠太先生のスライドから

2012年「ヒッグス発見」と「AIブーム再燃」
 2022年「生成AI元年?」

JU では、東京大学にある研究センターのひとつである素粒子物理国際研究センターを知っていますか？

 はい、素粒子物理国際研究センター（International Center for Elementary Particle Physics, ICEPP）について知っています。ICEPPは東京大学の研究センターの一つであり、素粒子物理学に関する研究を行っています。

ICEPPは、高エネルギー物理学、素粒子物理学、宇宙物理学などの分野における基礎的な研究に焦点を当てています。センターには、実験グループと理論グループがあり、それぞれの研究者が協力してさまざまなプロジェクトに取り組んでいます。


ICEPPは国際的な研究センターであり、多くの国内外の研究機関や大学との共同研究プロジェクトを推進しています。また、国際的な研究者や学生との交流を促進するために、国際会議やワークショップなどの学術イベントも開催しています。

ICEPPの研究テーマには、素粒子の性質や相互作用、素粒子物理学の理論的な側面、加速器実験、宇宙線物理学、ニュートリノ物理学などが含まれます。センターは、大型加速器実験や国際共同実験にも積極的に参加しており、素粒子物理学の最前線で活動しています。

ICEPPは、東京大学の中でも素粒子物理学の研究を中心に行っているため、国内外の研究者や学生にとって重要な拠点となっています。その研究成果は、素粒子物理学の分野における理解の深化や新たな発見に寄与しています。

JU 素粒子物理国際研究センターで大学院生が研究するにはどうすればいいでしょうか？

JU 複数のepsファイルを1つのpdfファイルにするためのスクリプトを教えてください。

 複数のEPSファイルを1つのPDFファイルに結合するには、Ghostscriptと呼ばれるオープンソースのプログラムを使用することができます。Ghostscriptをインストールしていない場合は、まずGhostscriptをインストールしてください。

以下のスクリプトは、EPSファイルが含まれるディレクトリからすべてのEPSファイルを取得し、それらを1つのPDFファイルに結合します。出力されるPDFファイルは、元のEPSファイルの名前に "_merged.pdf" を追加したことになります。

```
bash Copy code  
  
#!/bin/bash  
  
# 変換元EPSファイルが存在するディレクトリを指定  
EPS_DIR="path/to/eps/files"  
  
# 変換後のPDFファイル名を指定  
OUTPUT_PDF="output_merged.pdf"  
  
# EPSファイルを変換してPDFファイルに結合  
gs -dBATCH -dNOPAUSE -q -sDEVICE=pdfwrite -sOutputFile=$OUTPUT_PDF $(find $EPS_DIR -type f -name *.eps)
```

上記のスクリプトを実行する前に、EPSファイルが存在するディレクトリを指定する必要があります。また、変換後のPDFファイル名も指定する必要があります。スクリプトを実行すると、EPSファイルが1つのPDFファイルに結合された、指定した出力PDFファイルが生成されます。

内容の吟味は必要

粒子識別等の性能改善（識別問題）

- **b-tagging, c-tagging**, tau-ID, q/g tagger
- W/Z, **Top**, Higgs tagger
- **(Low p_T) electron**, (low p_T) muon etc.
- **信号事象と背景事象の分類**
- **Particle flow** (“粒子”と“測定データ”をマッチさせることでより正確に識別)



AIって：
- Artificial intelligence？
- Assistant intelligence？

シンギュラリティってあるの？

シミュレーション

- 検出器シミュレータ (Geant4の代替)
- 物理現象のシミュレータ：**ジェット生成**

ビッグデータから新粒子を発見できるのか？

- **異常検知**

科学するAI・オートメーション化（自動運転） etc.

- 説明責任 (Explainable AI) , 解釈可能 (Interpretability)
- 物理法則、対称性などの抽出
- 素粒子実験の一連の流れを（半）自動化するようなシステム：人と人の連携 → AIとAIの連携
(→**微分可能なプログラム**を作る)

“ChatGPT 3.5”の出現 (2022年11月)

Foundation model

LLM (Large Language Model)

まずは**データ解析のFM**のPoC

素粒子物理で**人工知能**（**データサイエンス**）を研究しましょう！