



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8日 (月), 6月12日 (金) 5限目** (16:50-18:35)

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8日	「ヒッグス粒子の物理」 「超対称性粒子と暗黒物質」	田中純一 (素粒子物理国際研究センター・教授) 澤田龍 (素粒子物理国際研究センター・准教授)
6月12日	「加速器・検出器の最先端技術」 「LHC で探る余剰次元」	石野雅也 (素粒子物理国際研究センター・教授) 奥村恭幸 (素粒子物理国際研究センター・准教授)

内容(流れ)

- 本日
 - 16:50-17:30 田中: ヒッグス粒子の物理
 - 17:30-18:10 澤田: 超対称性粒子と暗黒物質
 - 18:10-18:40 座談会: 澤田、石野、奥村、田中

- 金曜日 6/12
 - 16:50-17:30 石野: 加速器・検出器の最先端技術
 - 17:30-18:10 奥村: LHCで探る余剰次元
 - 18:10-18:40 座談会: 澤田、石野、奥村、田中

- 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/QC

田中純一
東大・素粒子センター

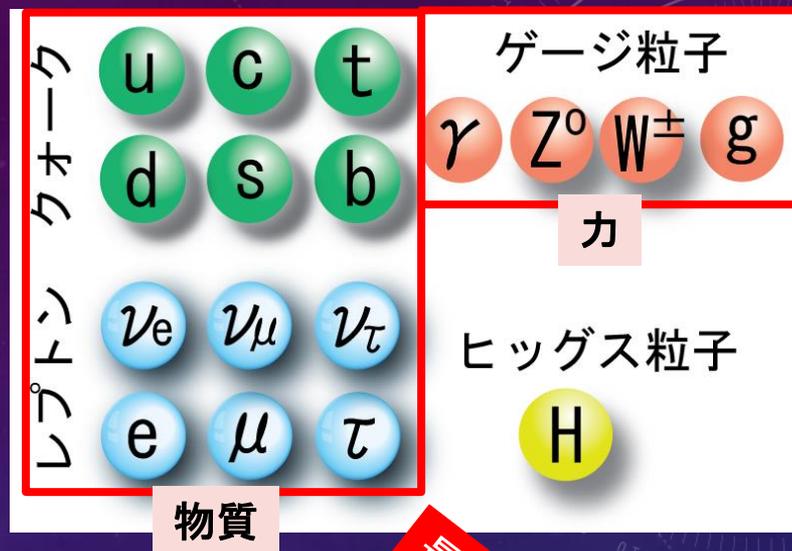
2020年6月8日

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)
- 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



最後の“素粒子”

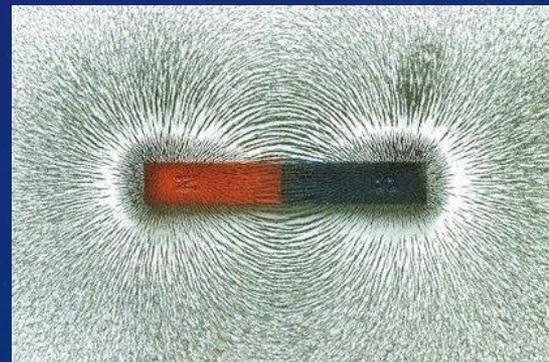


- **素粒子の標準模型**の17個の中で唯一の未発見粒子
 - 12個の“物質”のための素粒子 **フェルミオン**
 - 4個の“力”のための素粒子 **ボソン(スピン1)**
- 最後の「素粒子」の役割は非常にユニーク
 - “入れ物”のための素粒子 **ボソン(スピン0)**
 - 「真空」は空ではない -> 「ヒッグス場」で満たされている
 - 素粒子の質量の起源



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”。

修士課程で勉強するので
わからなくても問題なし

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)

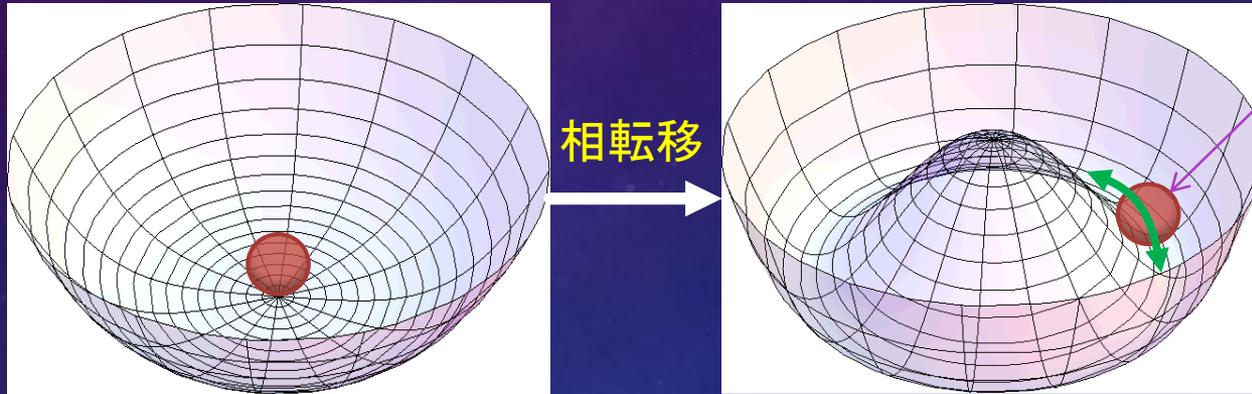


- 「標準模型 ← ゲージ原理」→ 素粒子の質量はゼロ
- 「真空」●の状態の変化(相転移)

● は安定を好む

宇宙のはじめ

現在



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。

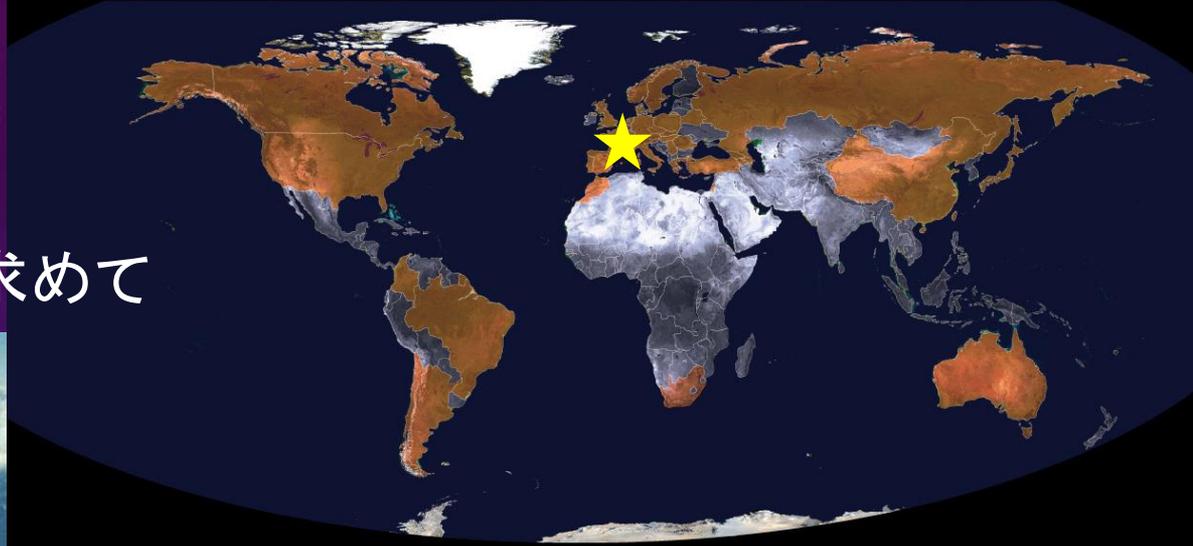
この入れ替えの手助け(元締め)をやっているのがヒッグス場



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)

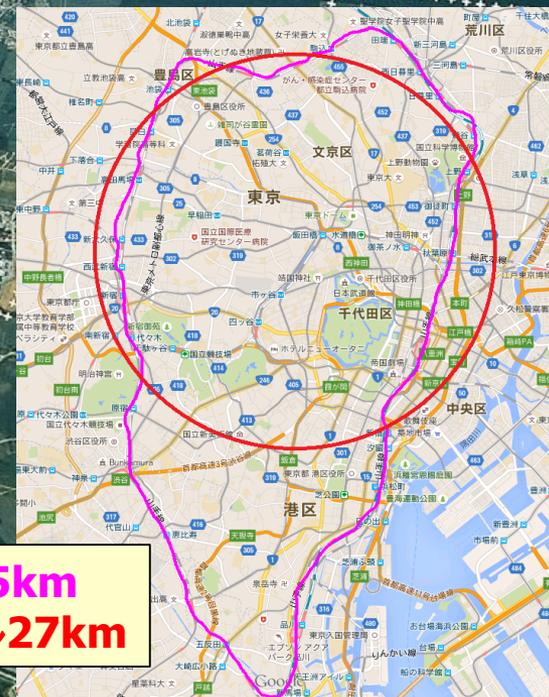
地下100m、周長27km

ATLAS実験

CERN
セルン(仏)
サーン(英)



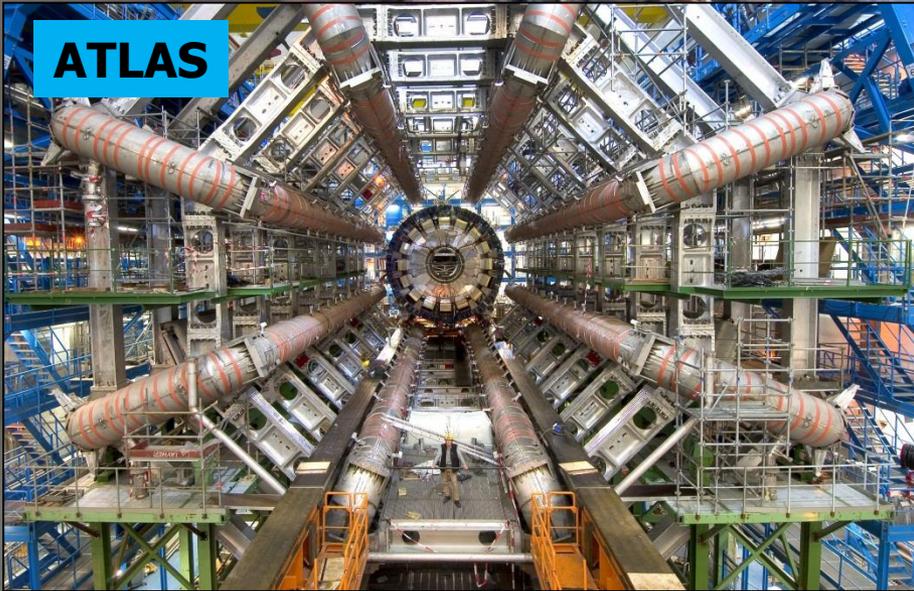
CMS実験



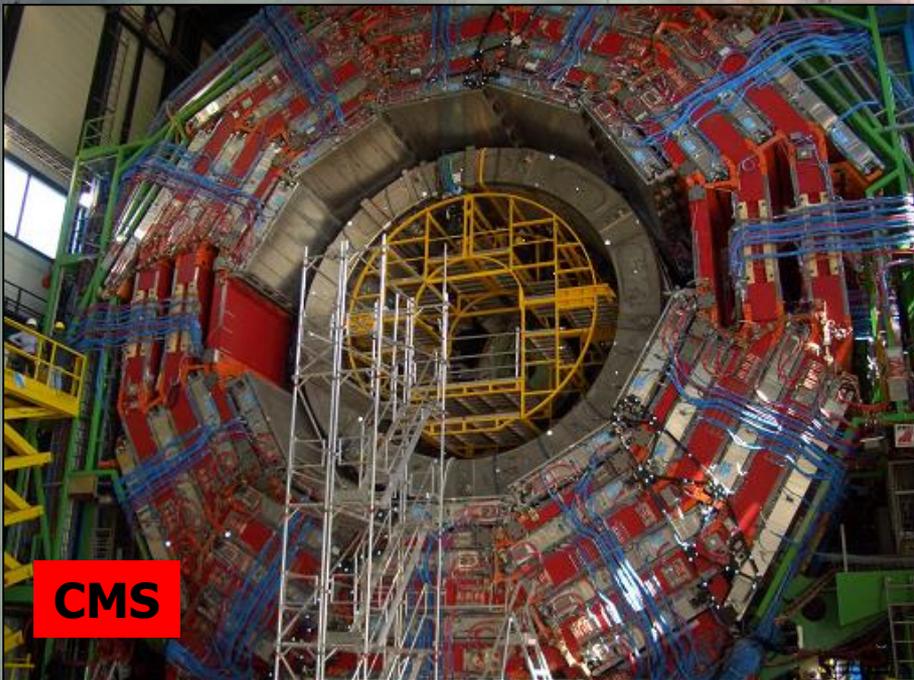
ジュネーブ国際空港



山手線34.5km
LHCトンネル27km



ATLAS



CMS



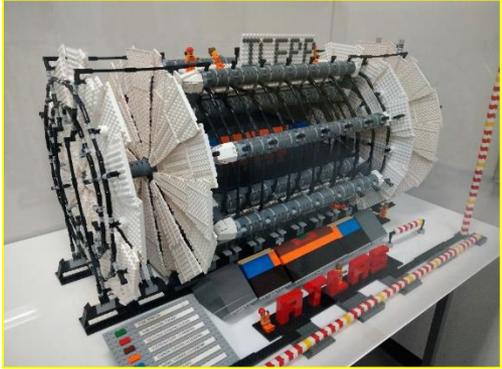
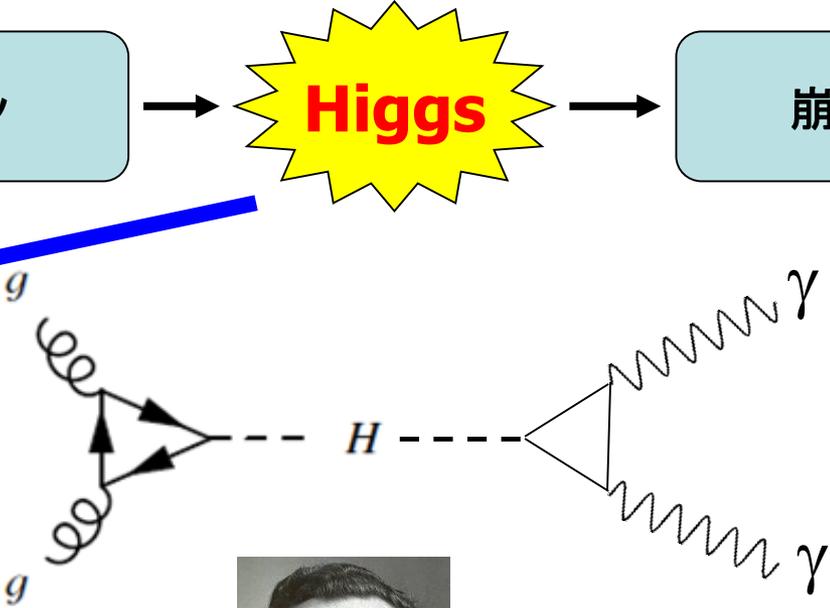
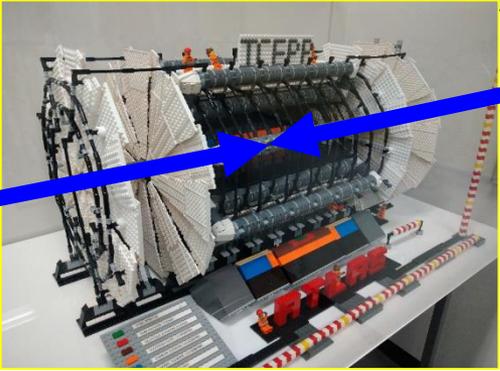
LHC加速器

- 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

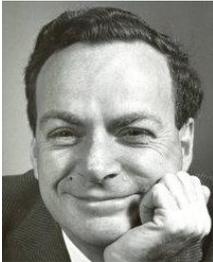
- Higgsの“生成”と“崩壊”をうまく組み合わせる。
 - 発見のために、数を稼ぐなら
 - 生成断面積の大きい生成プロセス(生成パターン)
 - 崩壊率(BR)の大きい崩壊パターン
- 現実にはそんなに甘くないことが分かりますが、それを検討するのも実験屋さん

新粒子が誕生しても、それを直接見ることはたぶん無理

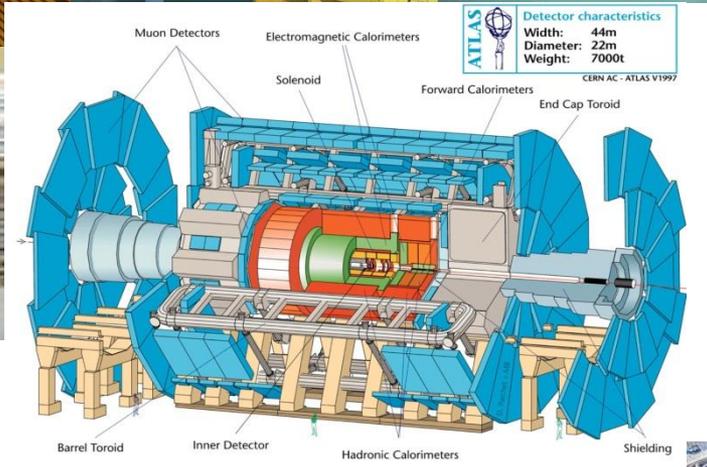
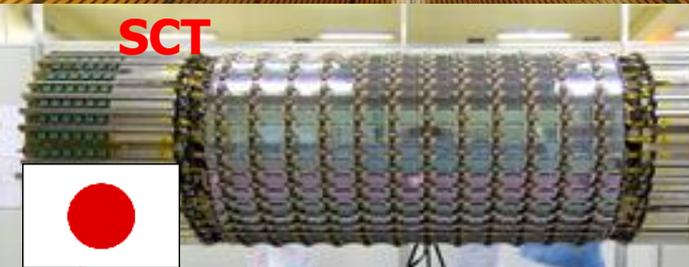


「陽子の集合体 ($\sim 10^{11}$)」と
「陽子の集合体 ($\sim 10^{11}$)」の衝突

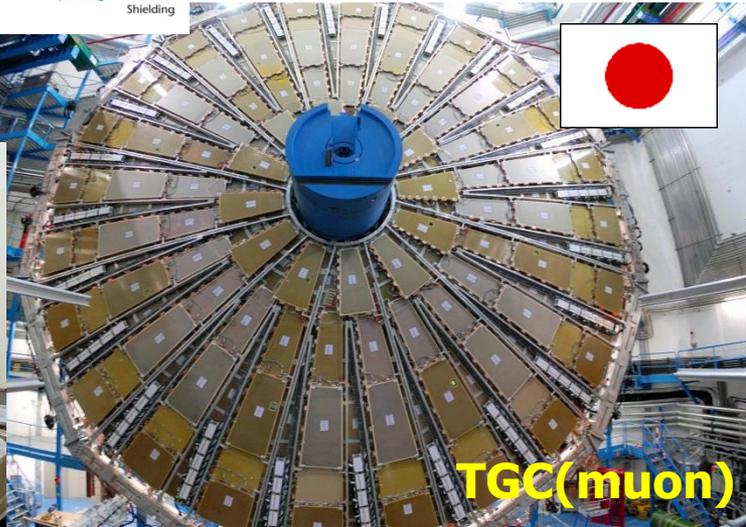
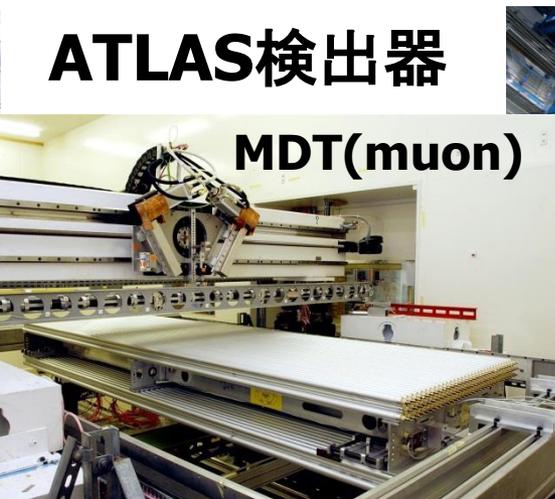
測定する



ファインマンさん



Lij Argon calorimeter (EM cal)



荷電粒子の飛跡



Pixel+SCT+TRT

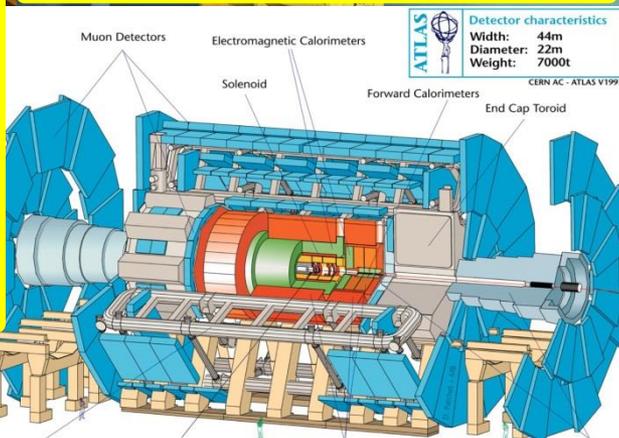
SCT



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)

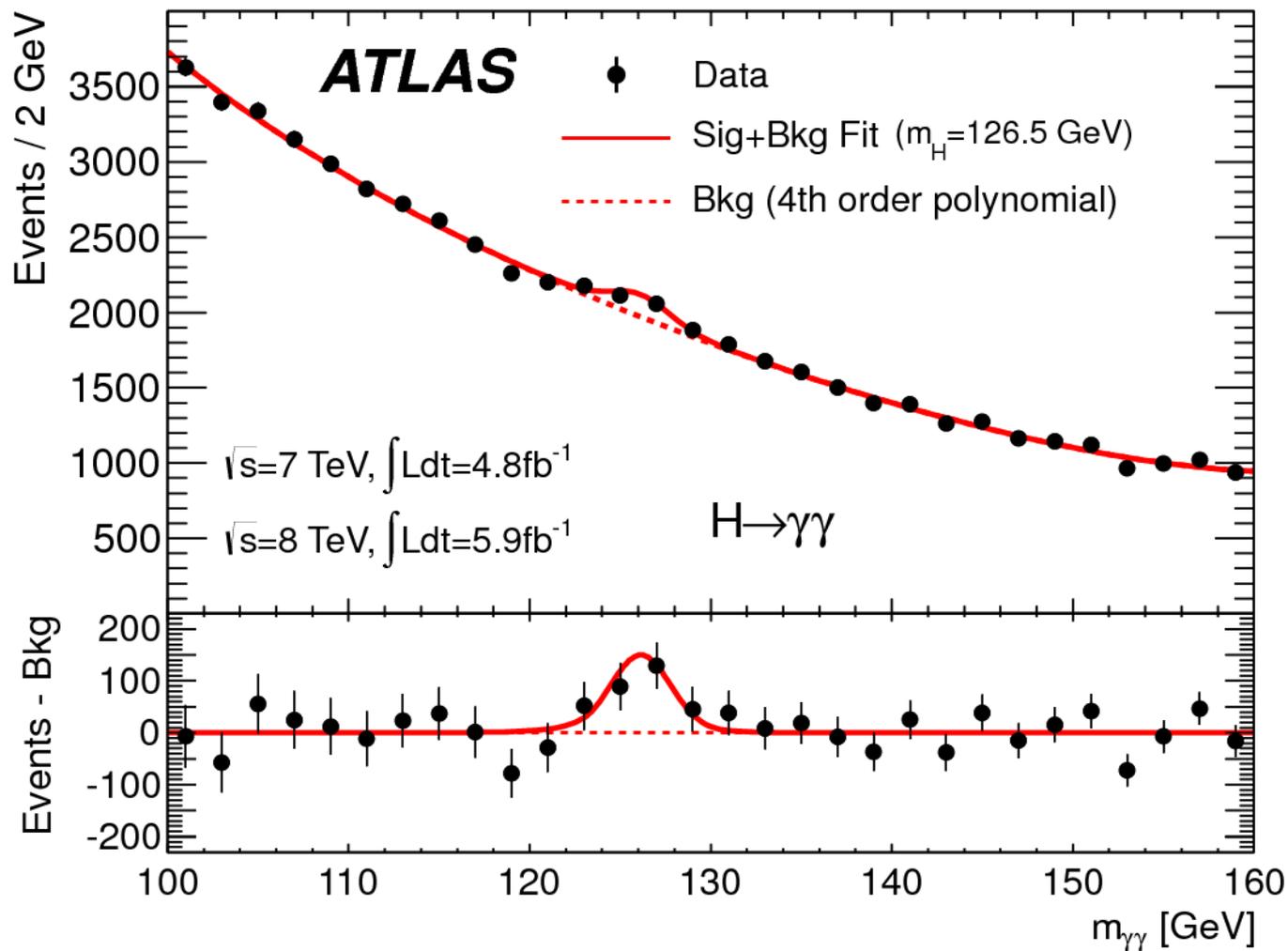


Muon粒子の識別、測定 TGC(muon)



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

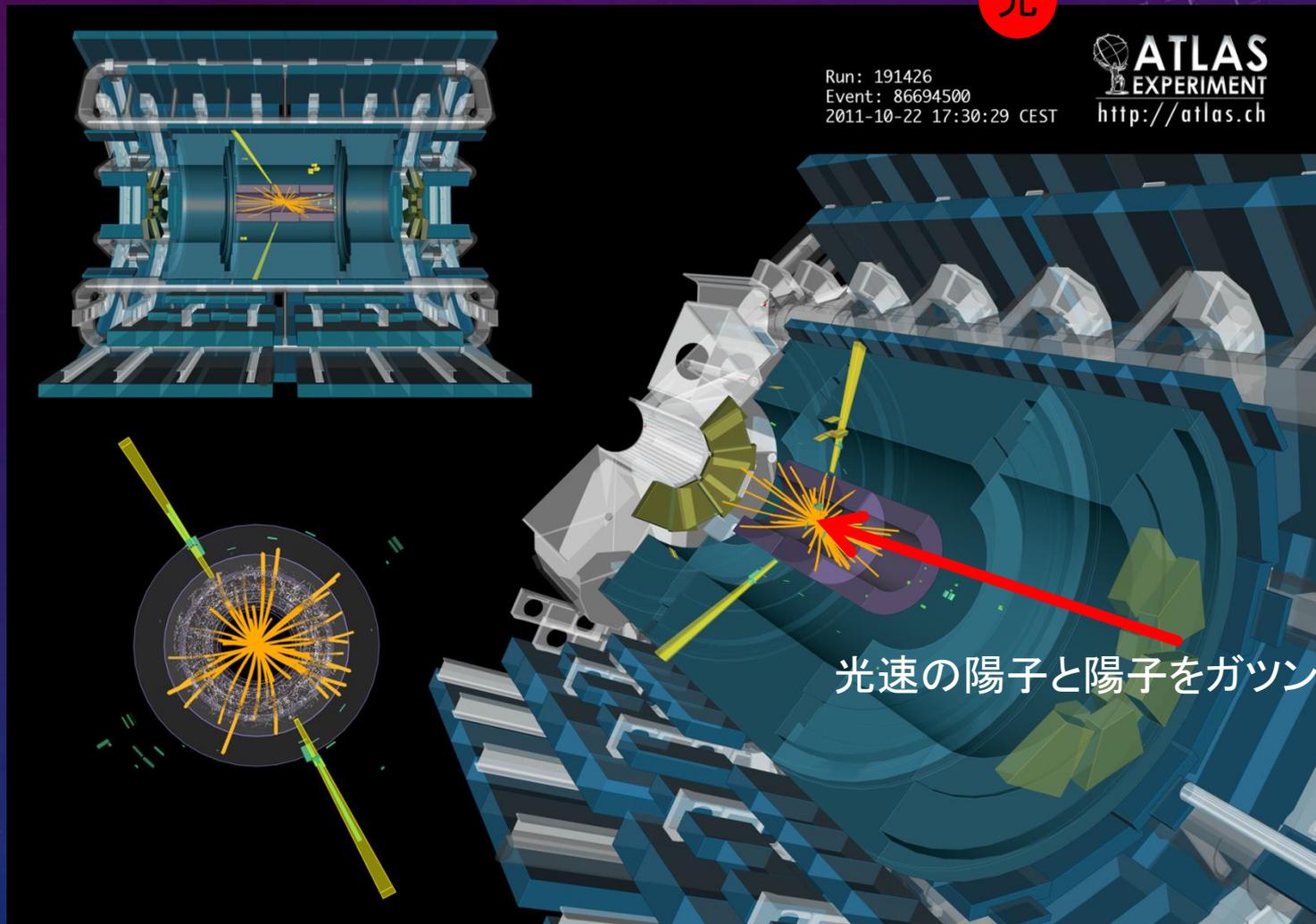


H

光

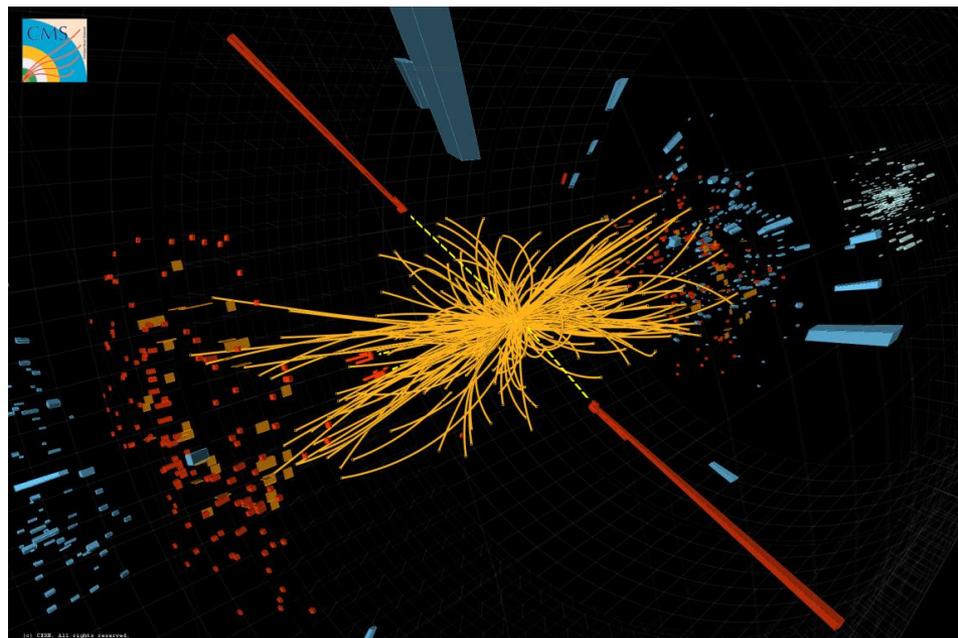
光

約1200回



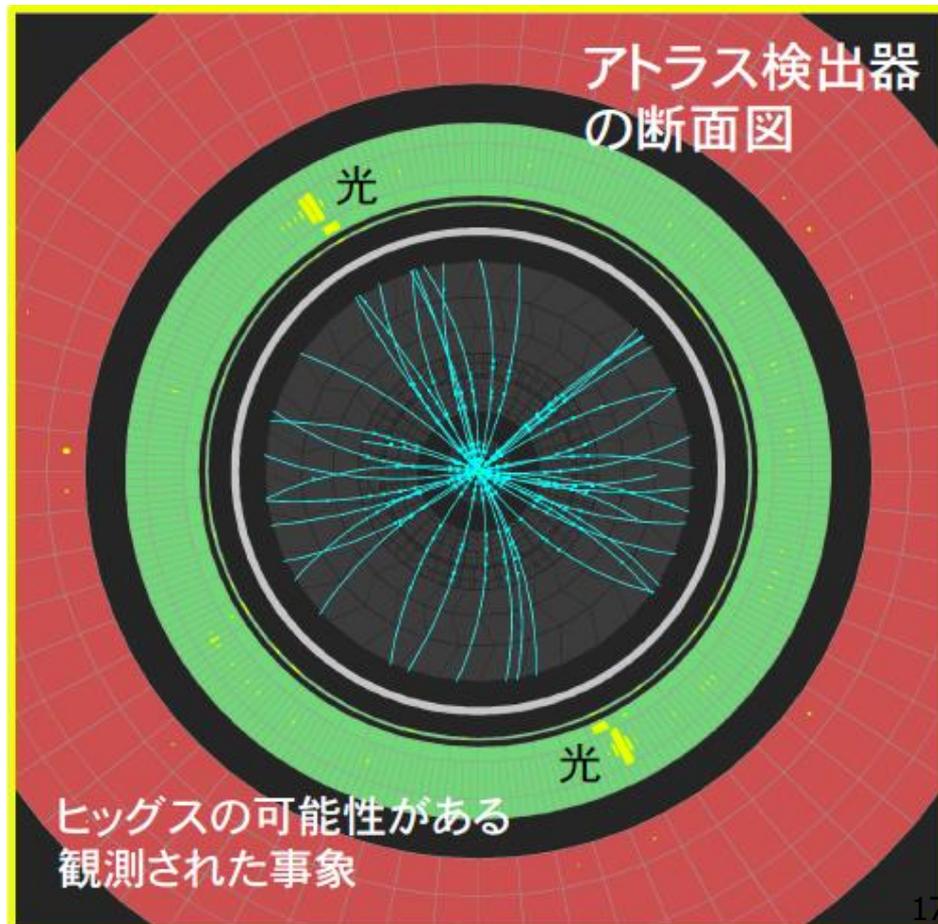
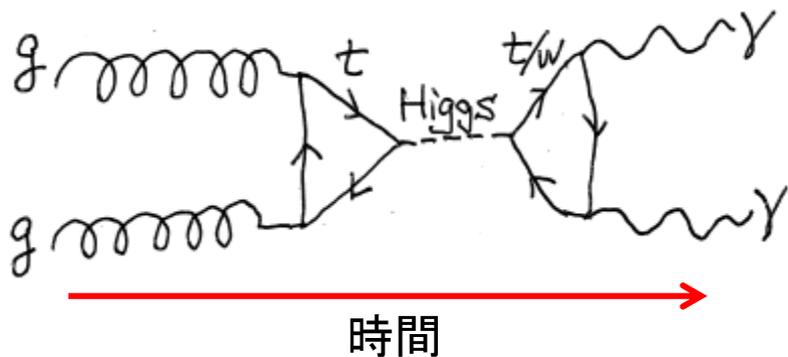
2,000,000,000,000,000 (2,000兆回) イベント -> 約500,000個のヒッグス粒子¹⁶

H- \rightarrow $\gamma\gamma$ どうみえるか？

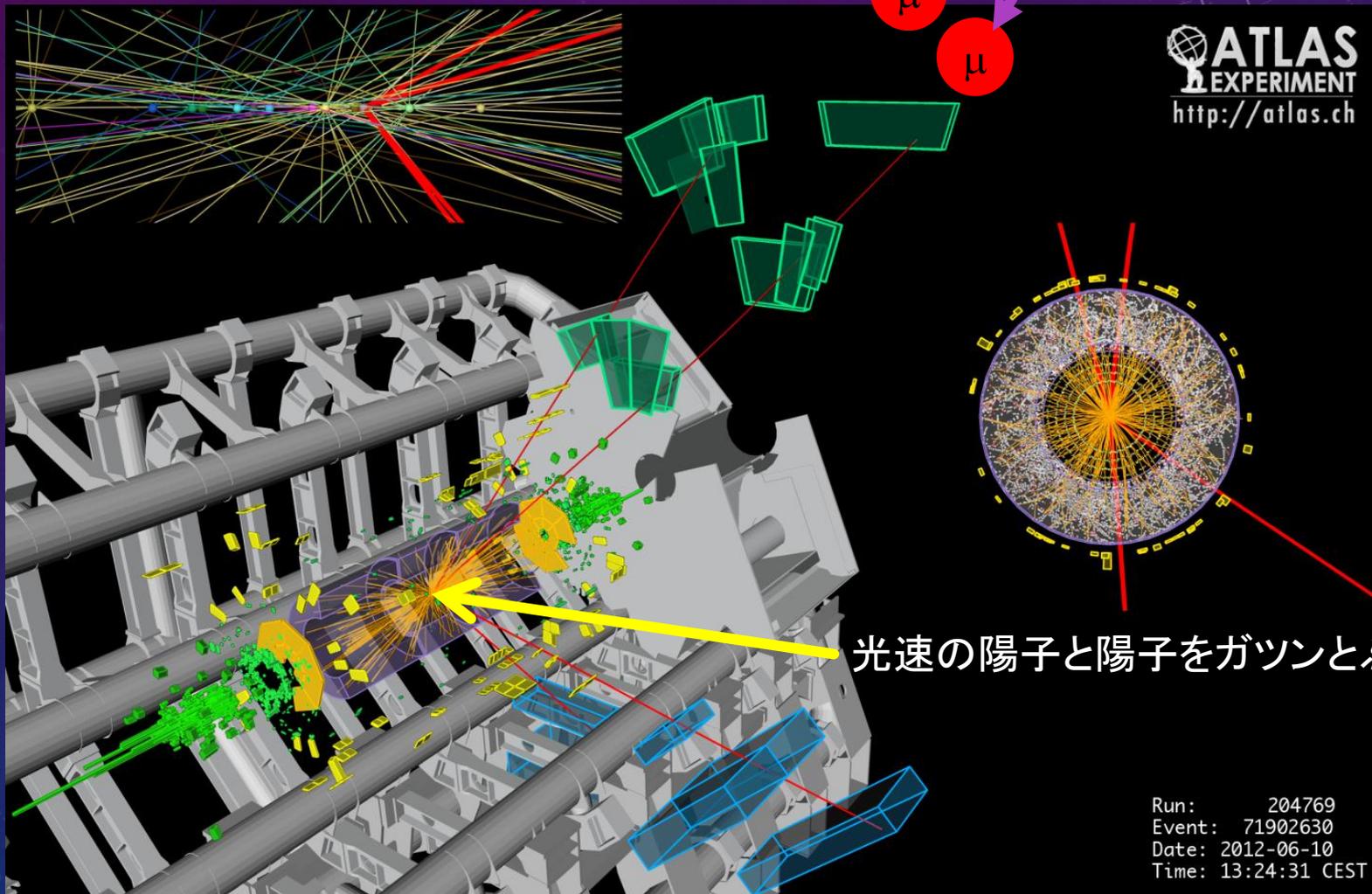


“ヒッグス粒子が2つの光子へ”

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



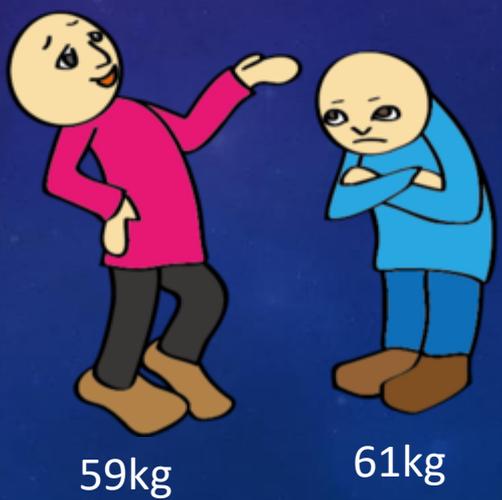
Let's try histogram?



“ヒッグス”さんは同じ体重
しかも複数います。

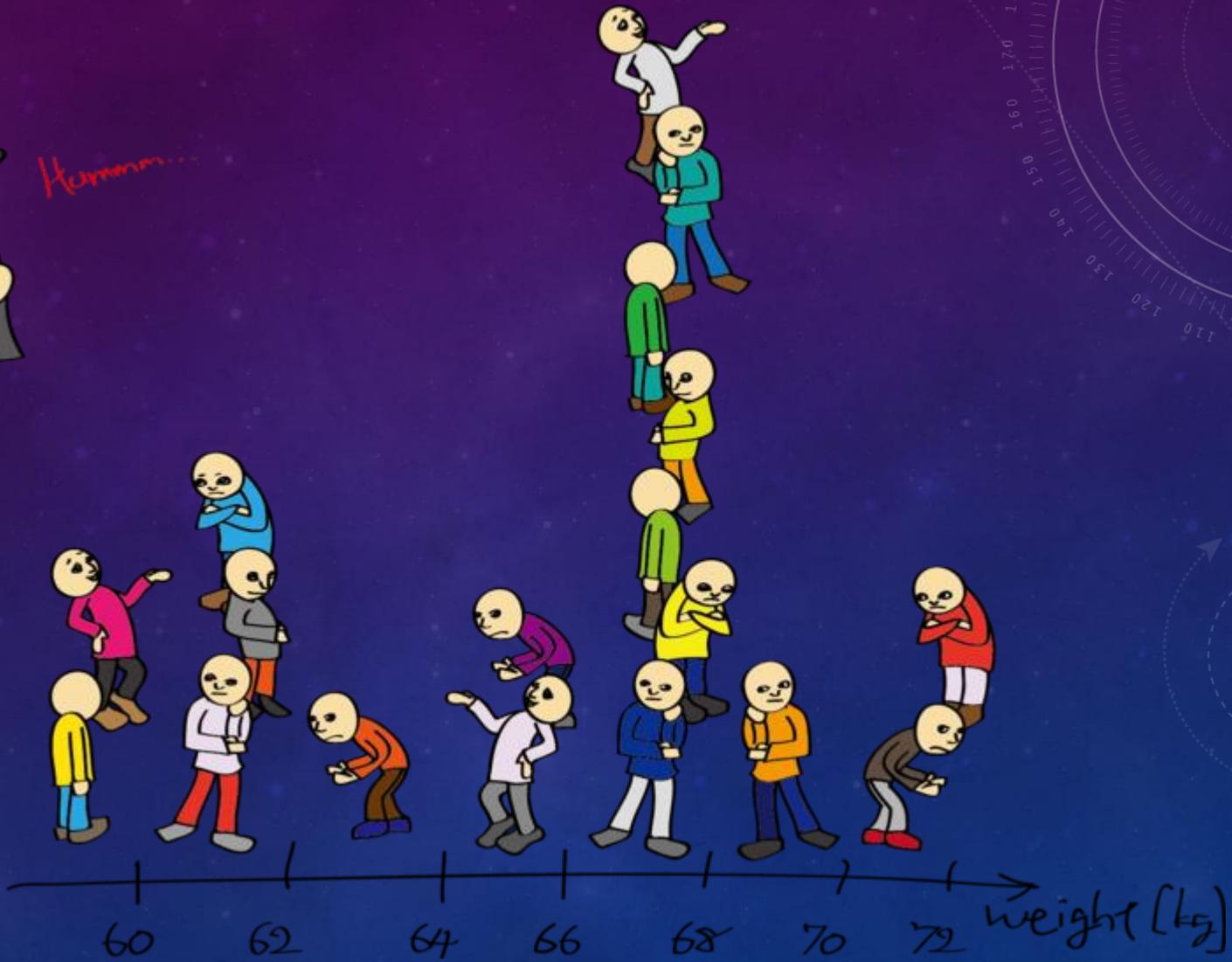


Let's try histogram?





Hmmm...

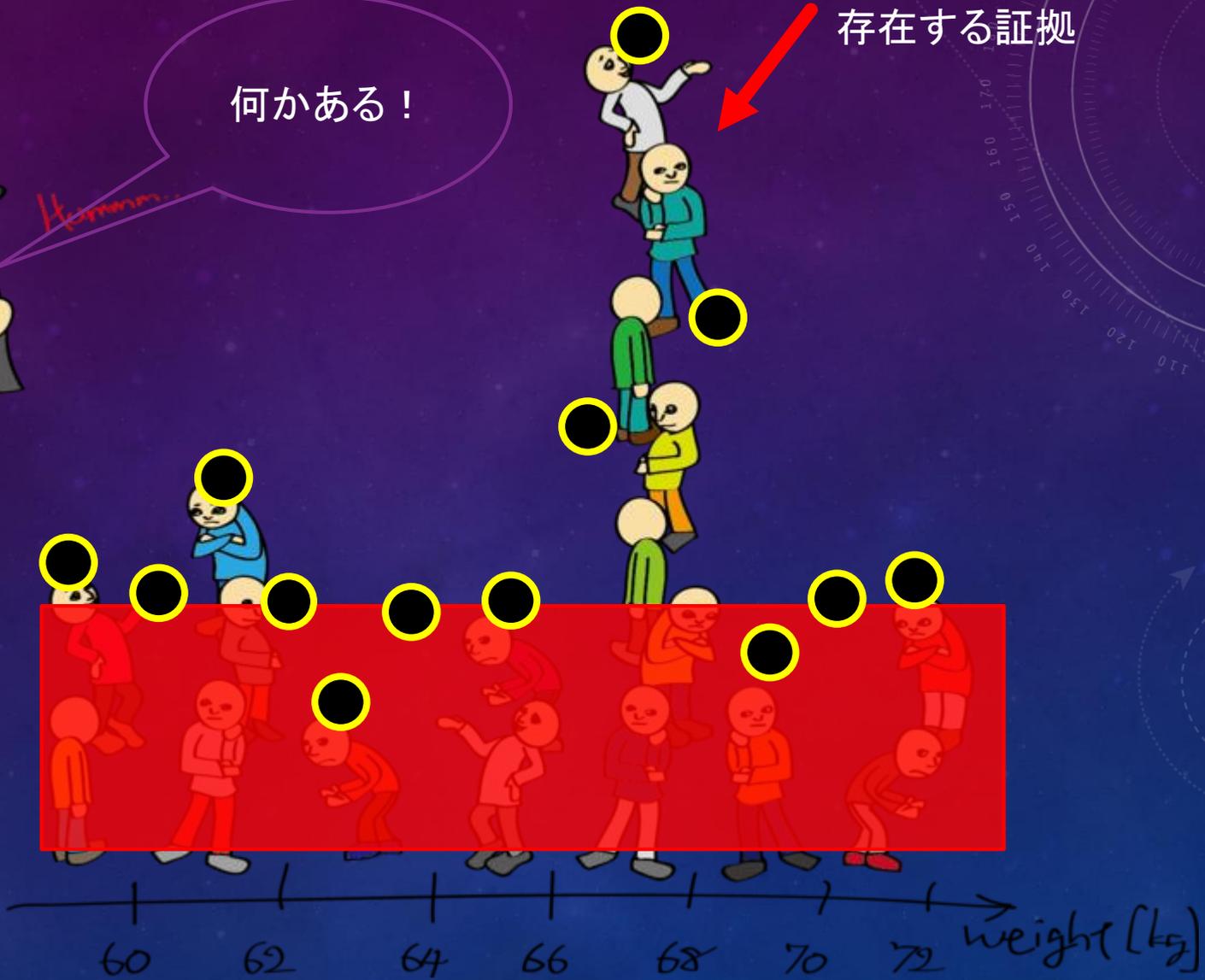




Hmmm...

何かある！

この山が“ヒッグス”さんが存在する証拠



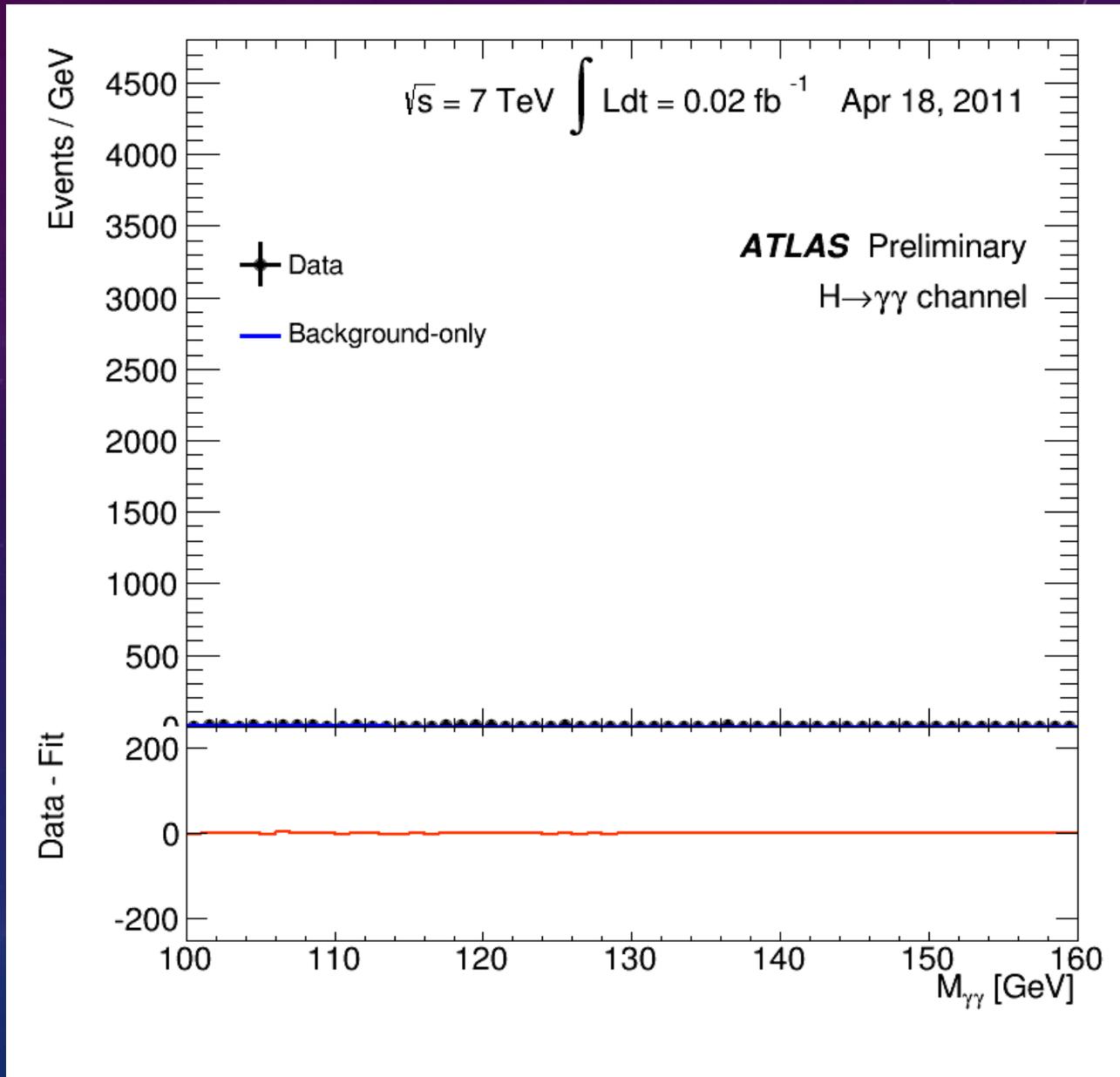


Hummm

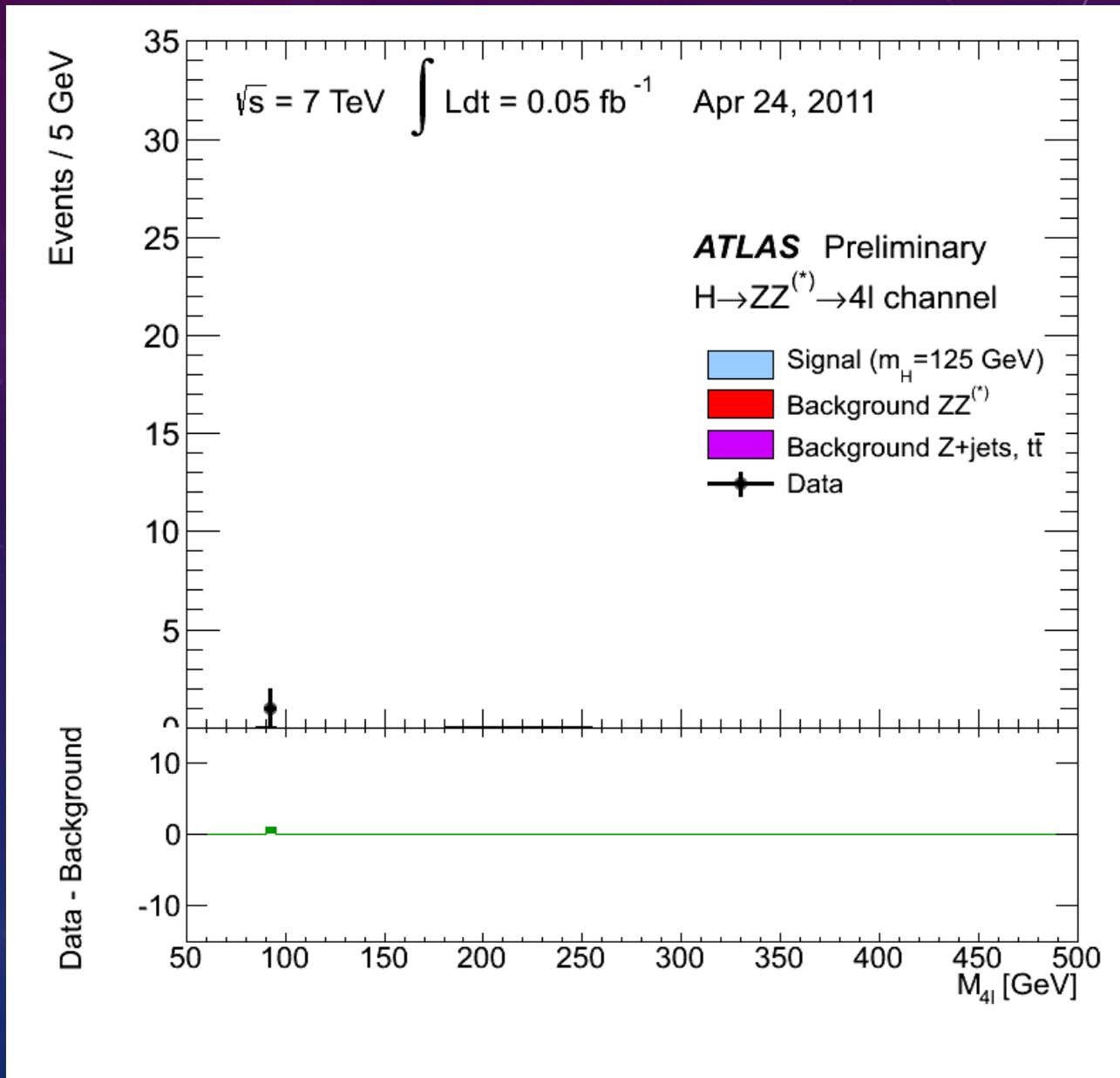
何もいないなあ



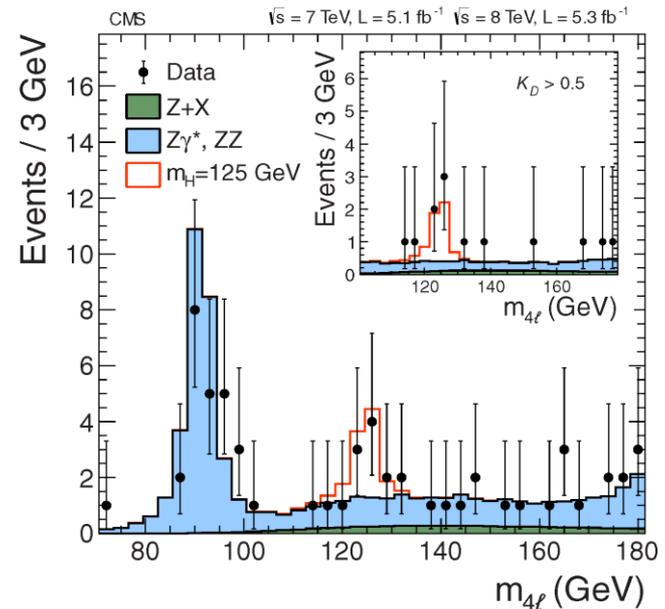
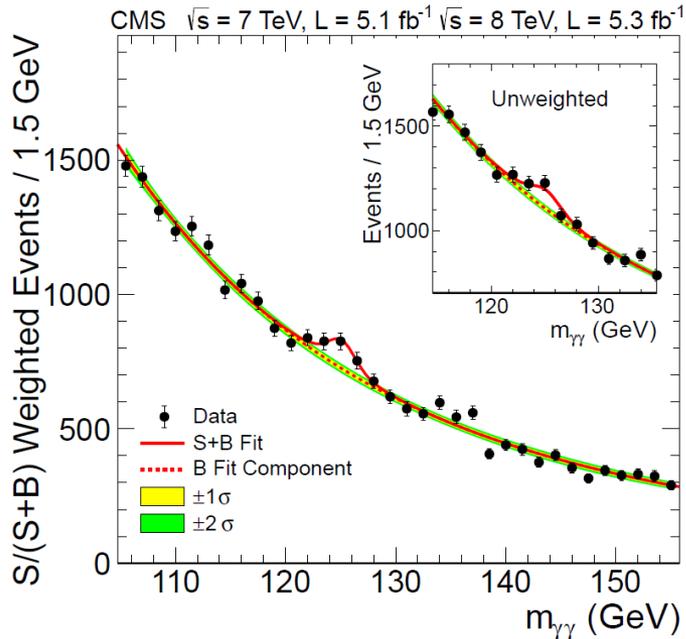
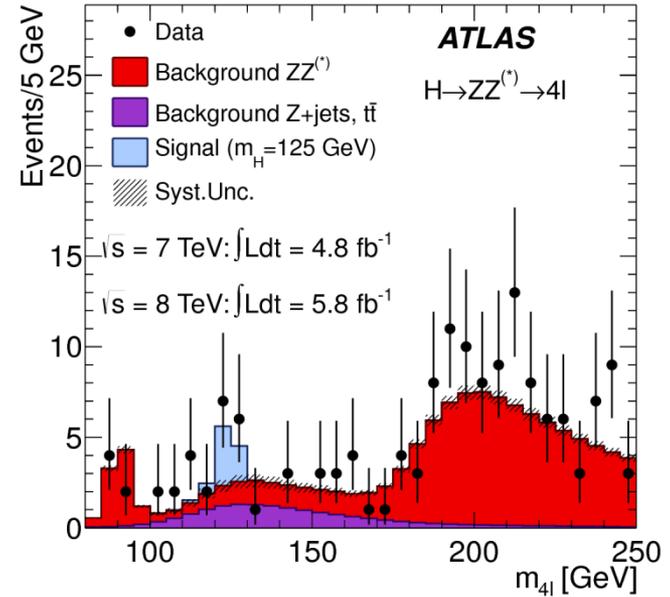
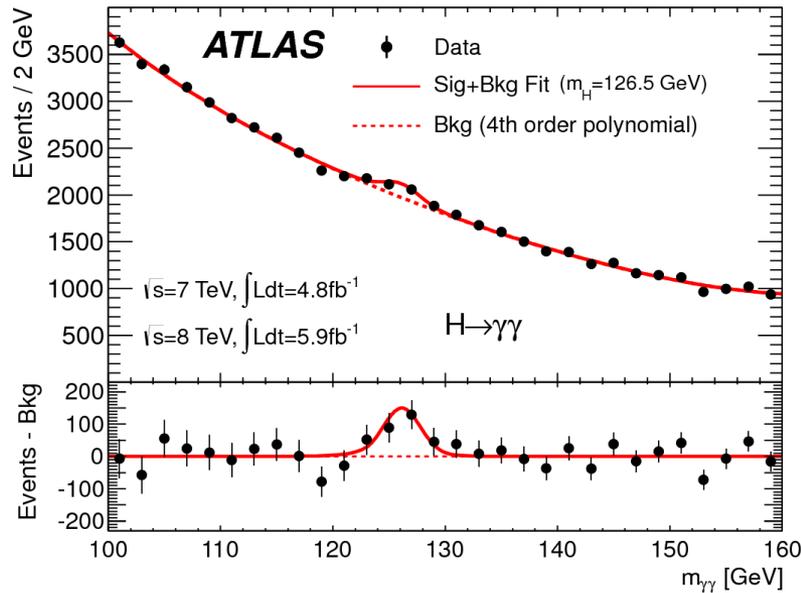
1200個のヒッグス粒子 -> 2つの光



70個のヒッグス粒子 → 2つのZ粒子 → 4つの電子やμ粒子

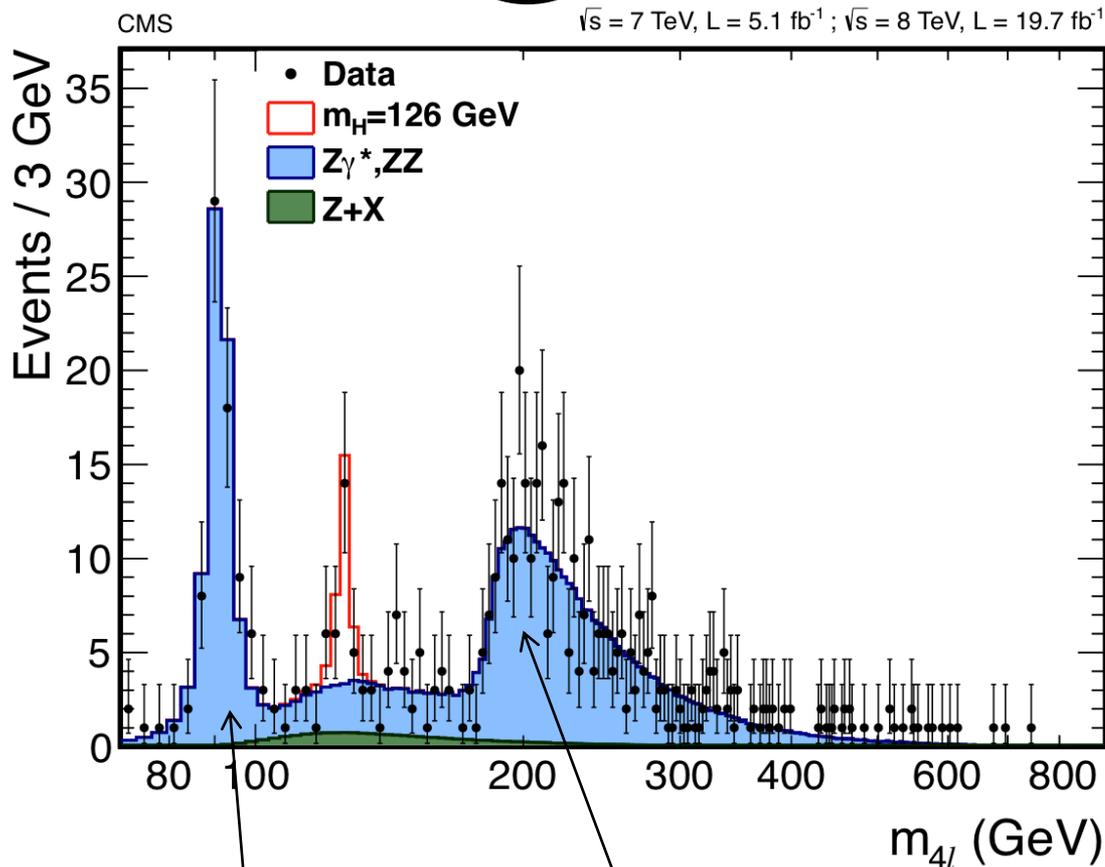


2012年7月 ヒッグス粒子発見



分布の吟味: $H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4l$

分布をみて**自分の頭で考える!** → いろいろ分布を作る。数字を見る。



何?

何?

答えは大学院の授業、先輩、...に聞く

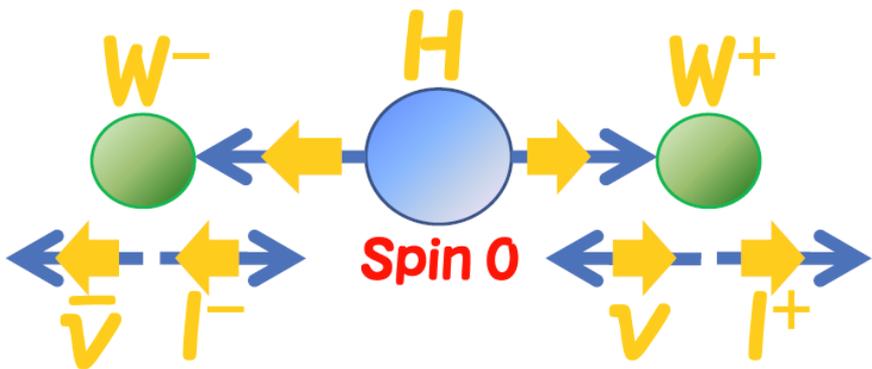
解析のお仕事: $H \rightarrow WW \rightarrow l\nu l\nu$

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

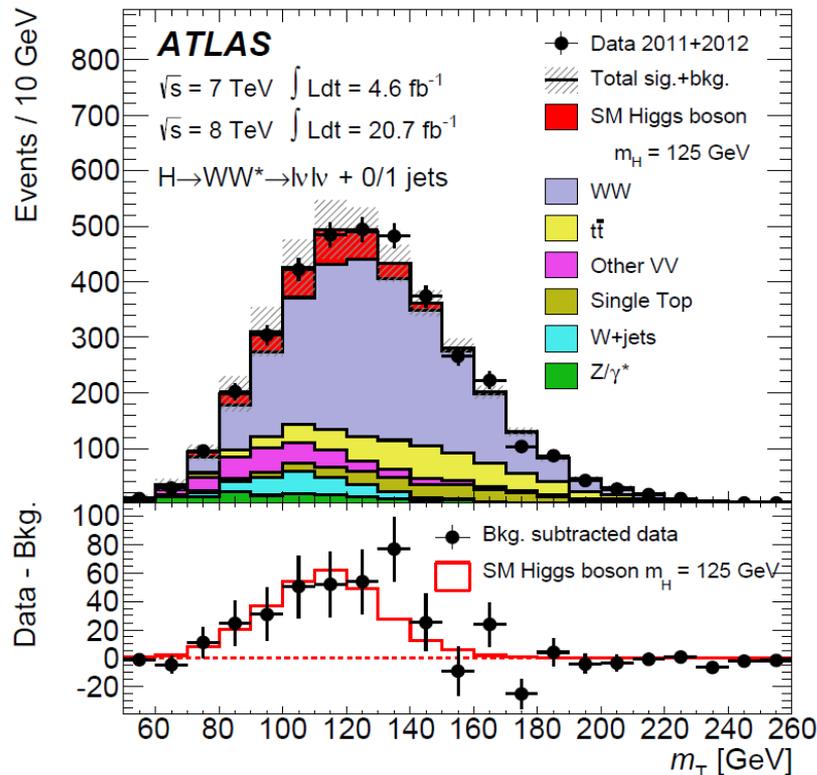
イベントの選択方法の検討



$H \rightarrow WW \rightarrow l\nu l\nu$ 解析では2つのレプトンの飛んでいく方向が揃っている、という条件を課します。
なぜでしょう?

(1年後でいいです)

最難関: バックグラウンドの見積り



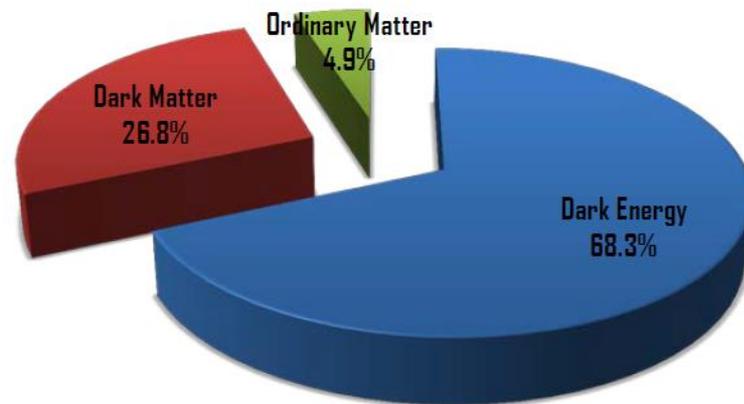
シグナルとバックグラウンドの形が似ている場合
少しのミス(過小評価)は**命取り**

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

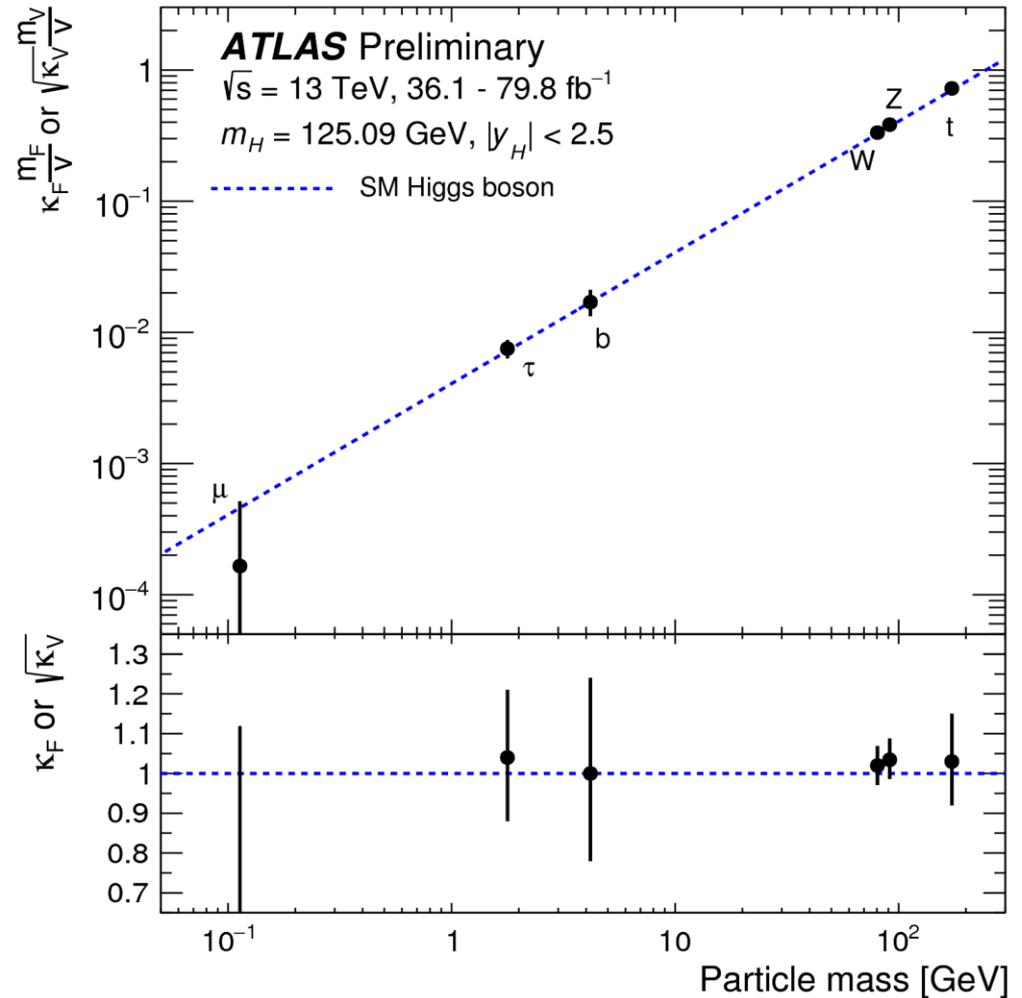
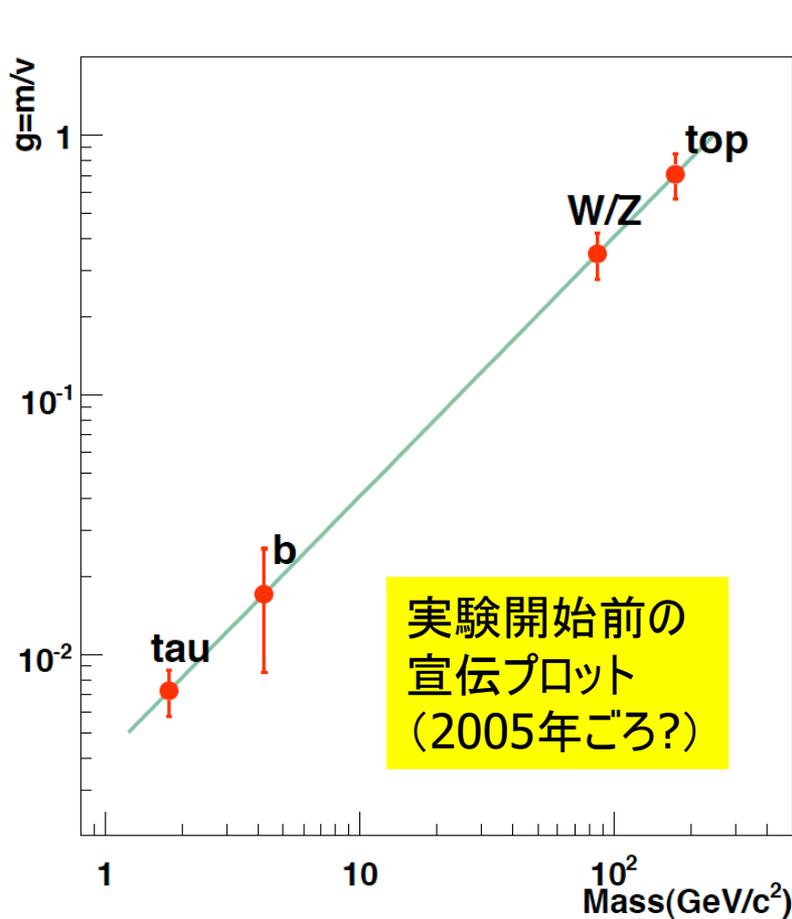
「より整合性のある標準模型を越えた物理法則」の追求

- 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！

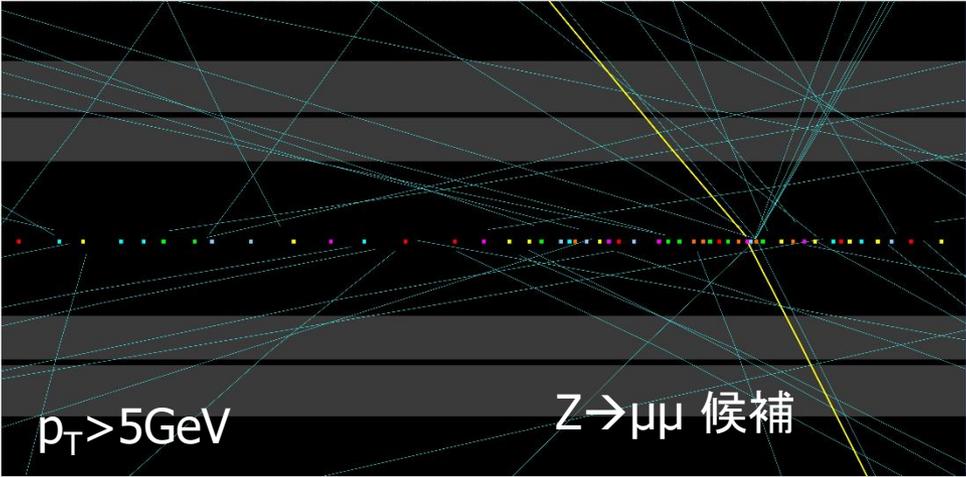
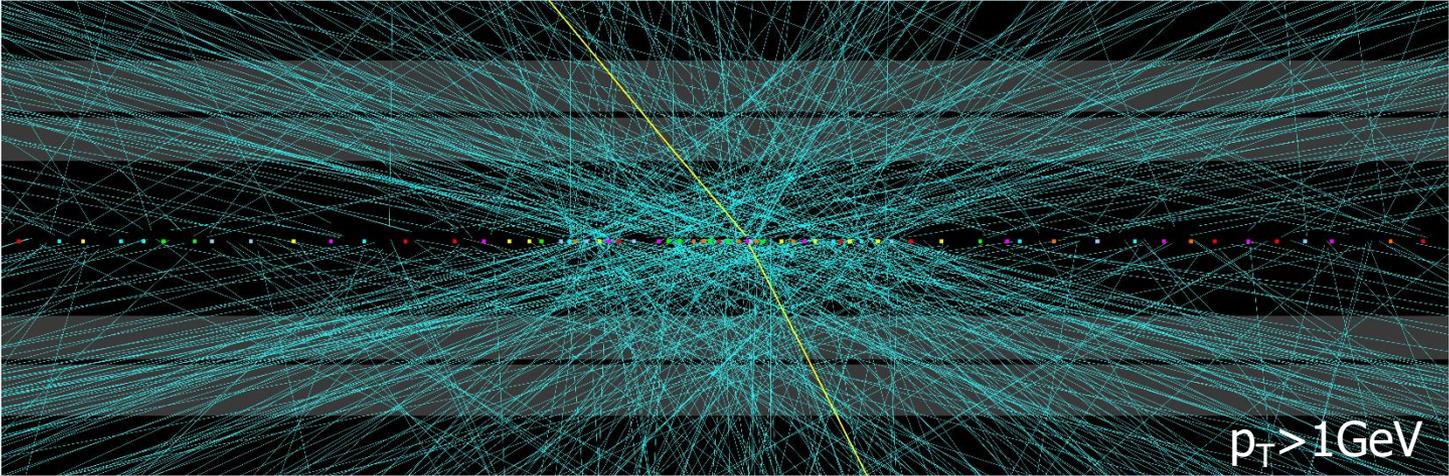
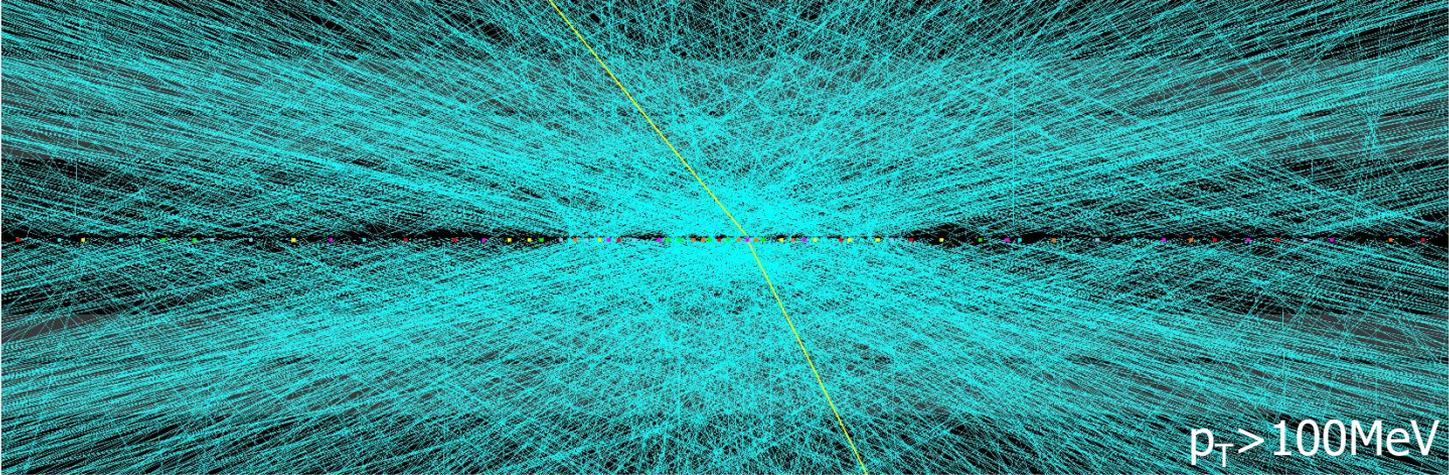
標準模型は手ごわい

人類がW粒子やZ粒子(1983)を見つけて35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8年。

ヒッグス粒子が「新物理」への窓



66個の陽子・陽子衝突



Run Number: 336852, Event Number: 883966264

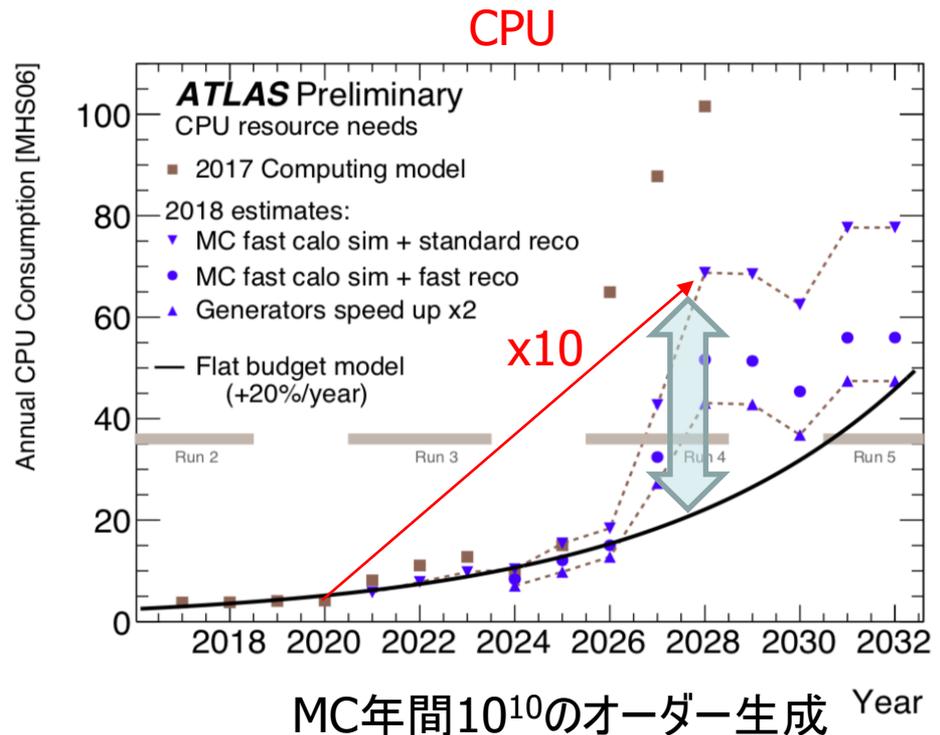
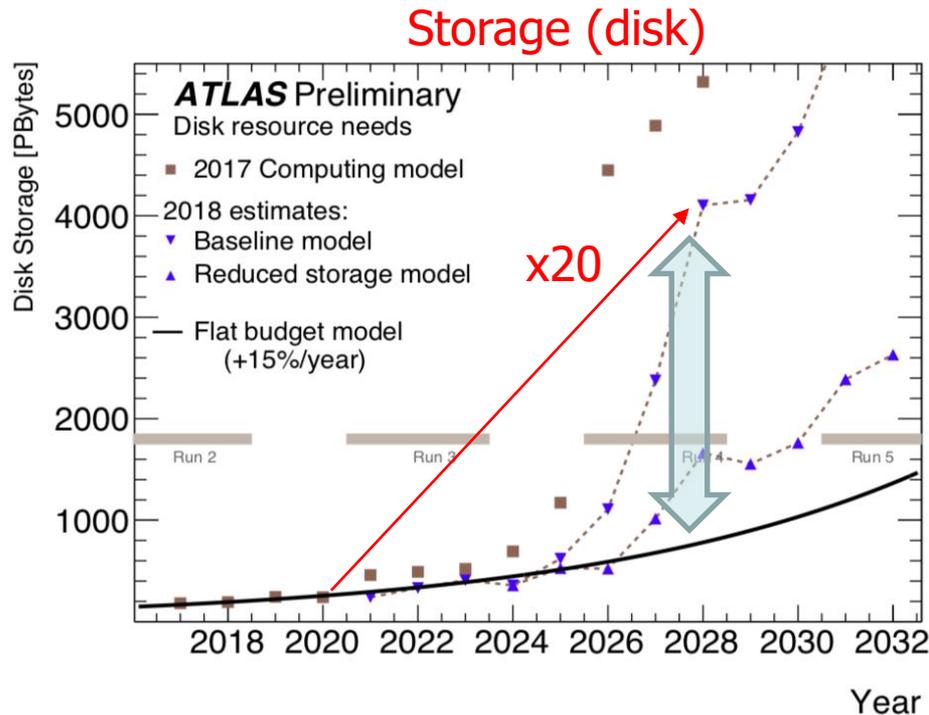
Date: 2017-09-29 09:19:23 CEST

$Z \rightarrow \mu\mu$ 候補

平均30個が200個、1000個となる

これからの計算機資源

必要な計算機資源は供給量を上回る時代がすぐに



- 現実的な解

Storage ... コピーの削減、保存する変数の数の削減など
 CPU ... Trackingの高速化など

- 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(HPC)、量子コンピューティングなど

HPC=High Performance Computing

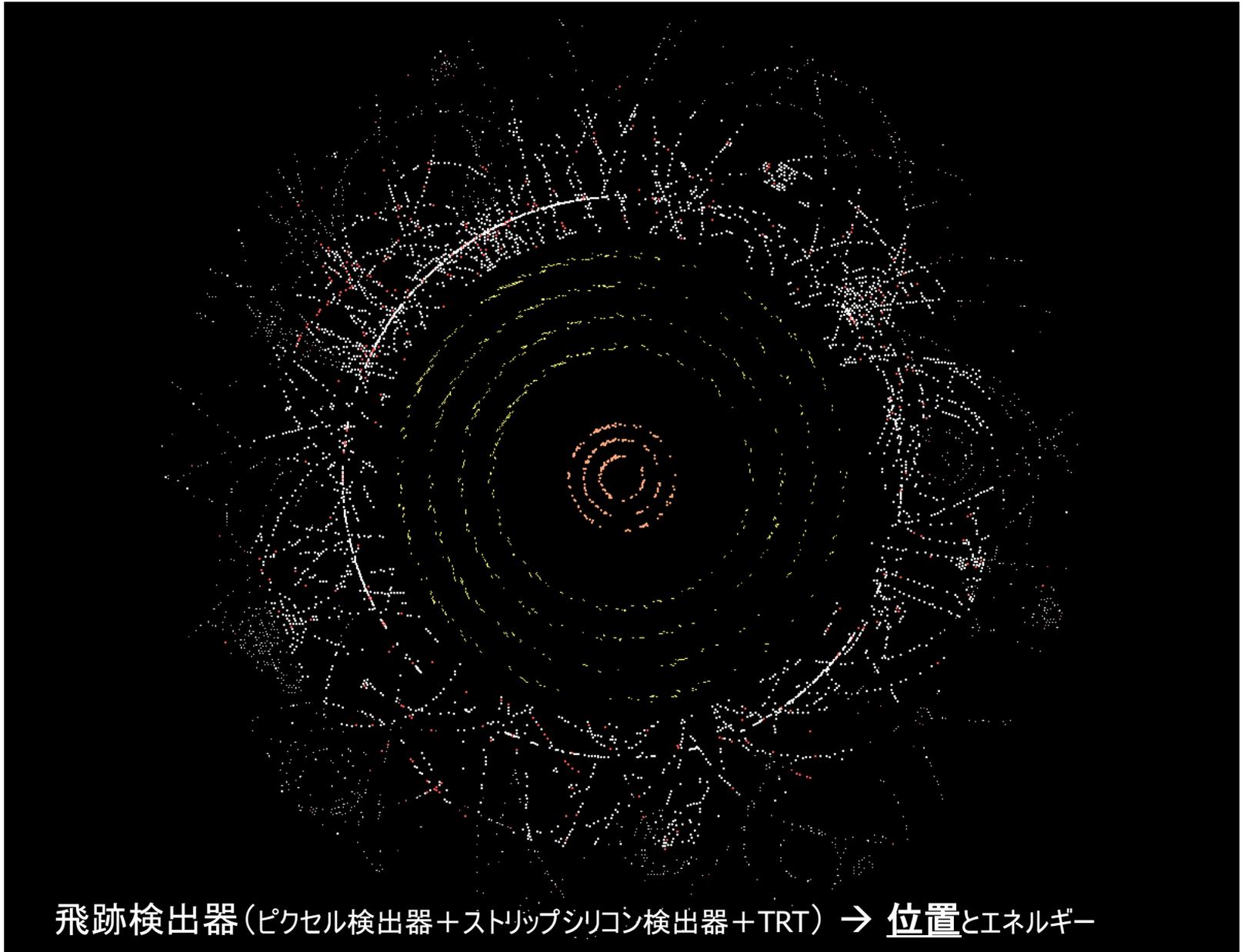
「素粒子の研究」と「コンピュータ」

WLCGモニター: データの流れ

- **切っても切り離せない関係**
 - 物理法則から導き出される「現象」を計算する。
例) モンテカルロ・シミュレーション ... 年間数10億事象
- **WWW**はCERNで誕生 → 研究者間の情報交換目的
- 実験データは「**ビッグデータ**」
 - ATLAS実験
 - **約450PB**
 - 実験データ ... 200PB程度 (物理解析の一次データは約30PB~ 3×10^{10} 事象)
 - モンテカルロ・シミュレーションデータ ... 250PB程度
- 「**GRID**」の実用化 → 世界中の高エネルギー物理学の計算機センターを一体化
 - Worldwide LHC Computing Grid (WLCG) <https://wlcg.web.cern.ch>
 - **常時30~40万CPUコア**を利用
 - 日本は東京大学素粒子物理国際研究センターが計算機資源を提供
 - 学術情報ネットワークSINET5の国際回線のヘビーユーザー (欧州100Gbps、米国100Gbps)



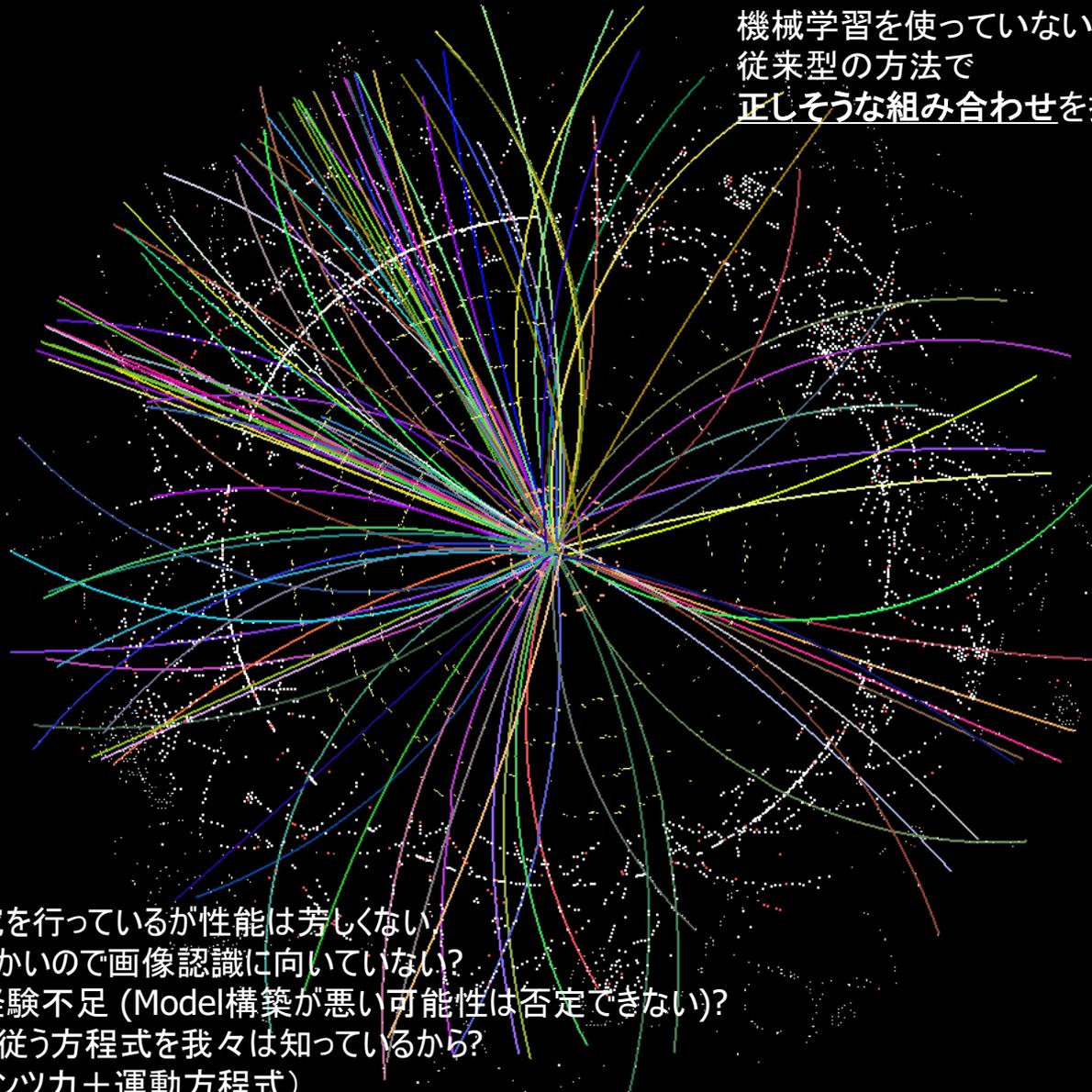
磁場がかかっています → 電荷をもった粒子は曲がる(ローレンツ力)



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

機械学習でトラッキングできないのか？

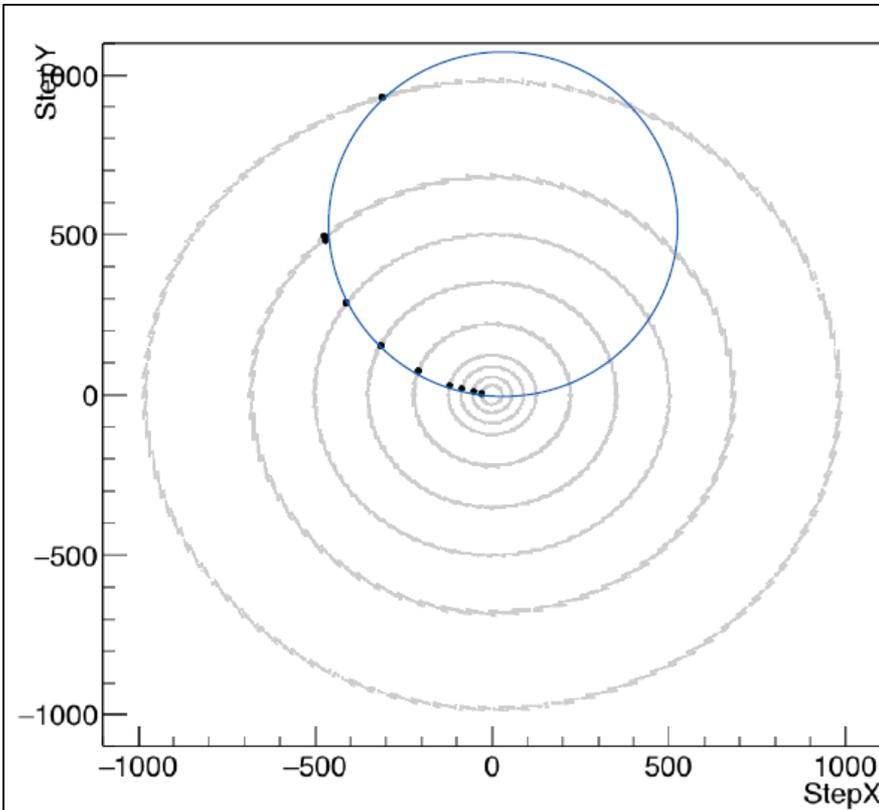
機械学習を使っていない
従来型の方法で
正しそうな組み合わせを探した結果



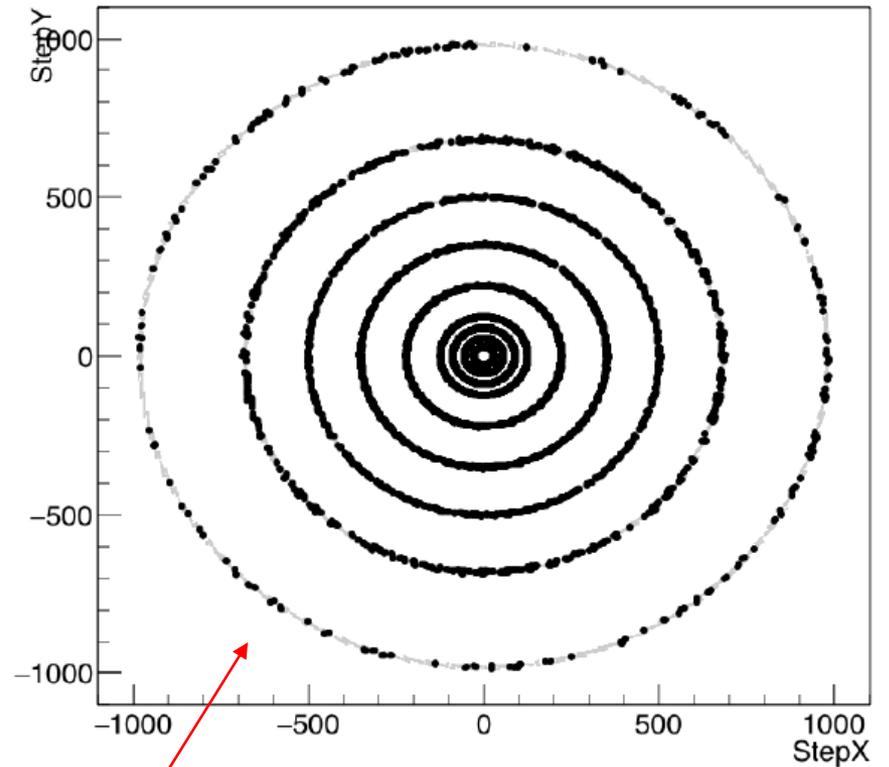
我々も研究を行っているが性能は芳しくない

- 点が細かいので画像認識に向いていない?
or 経験不足 (Model構築が悪い可能性は否定できない)?
- 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)

(TRTがあるのでできそうに思ってしまうのかも. HL-LHCではTRTありません.)



hits from 1 particle



fraction of hits
from particles
in 200 pile-up events

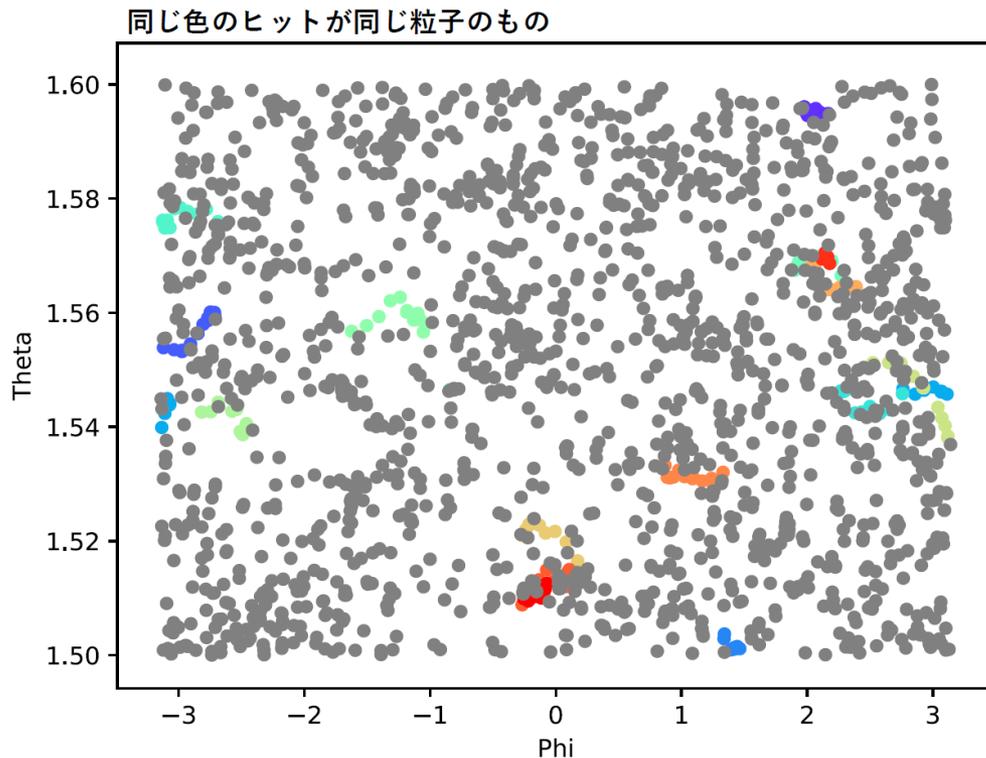
ピクセル、シリコンの検出器だと人間の「目」で区別できない

A.Salzburger(CERN)

機械学習でのTracking方法

荷電粒子のヒット点は同じような (η, ϕ) を通過する。

Theta-Phi map (Barrel)

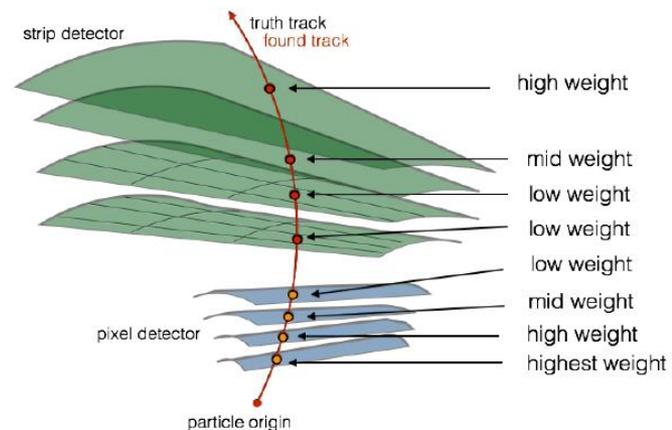


Color : $|p_T| > 1 \text{ GeV}$

- Barrel部では多くのヒットが重なってしまっている。
- 半径方向の情報も使わなくては正しく再構成できない

ある程度は動きますが、
現状のものと置き換える「もの」になるか、という...

機械学習の欠点である解釈性の問題で、性能が出ないとき
どう改善させるべきかという方向性が掴めない。



Trackingというのは我々にとってCPUが必要な**象徴的な問題** → どうにかしたい

Quantum Computer



再び登場: ファイマンさん



**“Nature is quantum, goddamn it!
So if we want to simulate it,
we need a quantum computer.”
R.Feynman, 1981, Endicott House, MIT**



Physics of Computation Conference Endicott House MIT May 6-8, 1981

- | | | | |
|---------------------|---------------------|------------------|--------------------|
| 1 Freeman Dyson | 13 Frederick Kantor | 25 Robert Suaya | 37 George Michael |
| 2 Gregory Chaitin | 14 David Levinweber | 26 Stan Kogell | 38 Richard Feynman |
| 3 James Crutchfield | 15 Konrad Zuse | 27 Bill Gosper | 39 Laurie Lingham |
| 4 Norman Packard | 16 Bernard Ziegler | 28 Lutz Preise | 40 Thangarajan |
| 5 Panos Ligonides | 17 Carl Adam Petri | 29 Madhu Gupta | 41 > |
| 6 Jerome Rothstein | 18 Anatol Holt | 30 Paul Benioff | 42 Gerard Vichniac |
| 7 Cad Hewitt | 19 Roland Vollmar | 31 Hans Moravec | 43 Leonid Levin |
| 8 Norman Hardy | 20 Hans Beernerman | 32 Ian Richards | 44 Lev Levitin |
| 9 Edward Fredkin | 21 Donald Greenspan | 33 Manan Pour-El | 45 Peter Gacs |
| 10 Tom Toffoli | 22 Markus Buettiker | 34 Danny Hillis | 46 Dan Greenberger |
| 11 Rolf Landauer | 23 Otto Flobergh | 35 Arthur Burks | |
| 12 John Wheeler | 24 Robert Lewis | 36 John Cocke | |

<https://mitendicottouse.org/physics-computation-conference/>



David Deutsch

イギリスの理論物理学者

1985年 量子チューリングマシン

1989年 量子回路

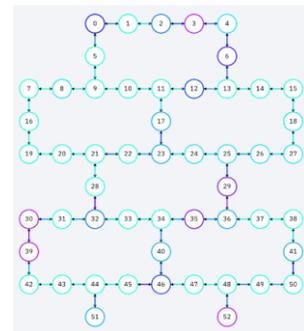
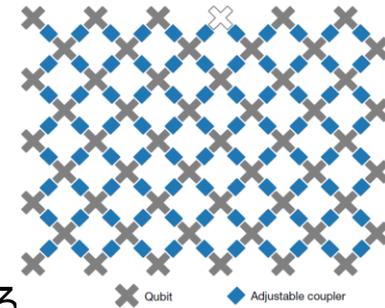
<https://www.economist.com/technology-quarterly/2017/03/09/david-deutsch-father-of-quantum-computing>

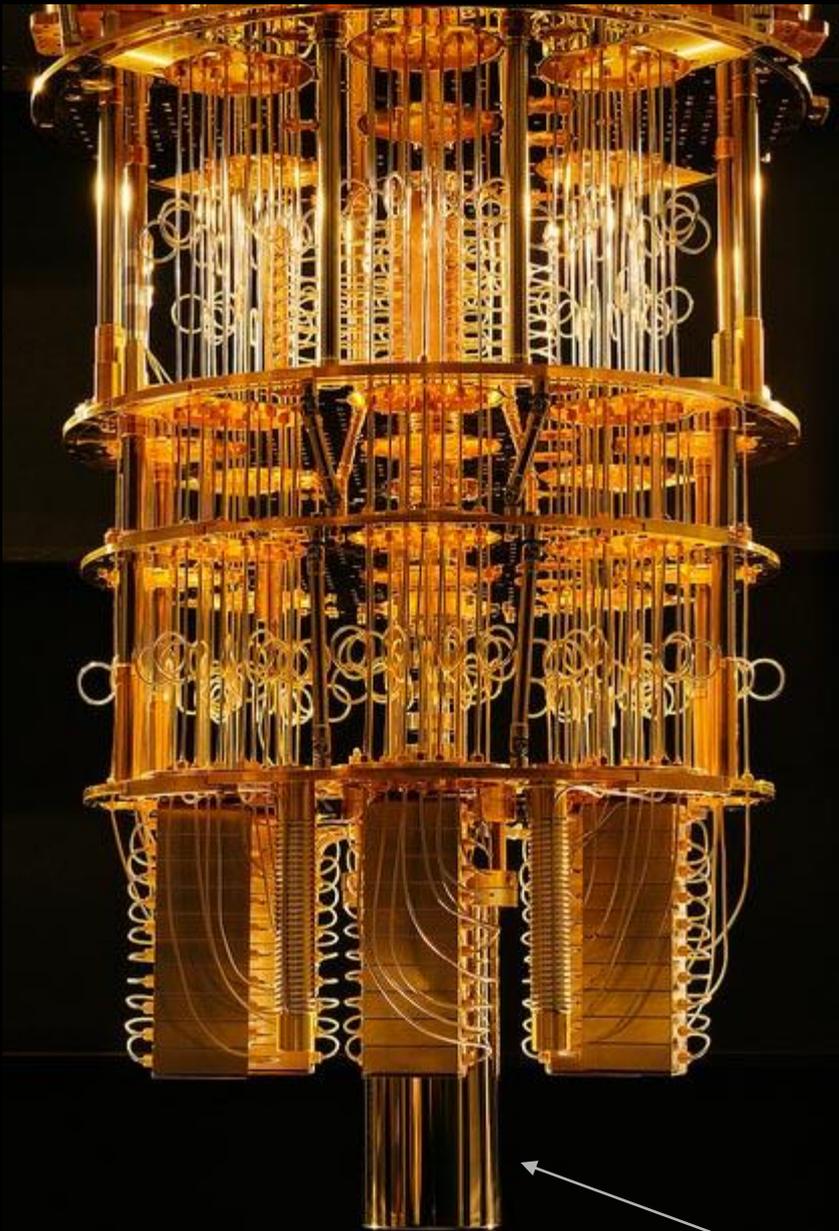
「重ね合わせを用いることで、
膨大な計算を並列して行うことができる」と気づいたのは
ファインマンではなくドイチュでは、と言われている。
（「速さ」的な考え方で量子コンピュータを考案した）

量子コンピュータ 超並列計算のからくり(竹内繁樹、講談社)

量子コンピュータ

- 従来のコンピュータ(「古典コンピュータ」と呼びます)では、情報を0か1でしか扱うことができない。1ビット = 0 or 1
 - 10ビットあれば $2^{10}=1024$ の情報を取り扱うことができるが、**同時にはその中の1個のみ**。
- 量子コンピュータは0でも1でもない状態、0と1が重ね合わさった状態の情報を取り扱うことができる。1qubitという。
 - 10qubitあれば、**同時に $2^{10}=1024$ の状態**を表現できる。
 - 測定は1つのみ。→ **答えとなるべきものが高い確率になっている**こと。
- 量子コンピュータには2つのタイプが存在
 - 量子ゲート方式
 - 古典コンピュータのように汎用的な計算ができる手法として注目されている。
 - 今のチップのことをNISQ=Noisy Intermediate-Scale Quantumと呼ぶ。
 - Google (Bristlecone ... 72ビット)、Sycamore ... 53ビット
 - IBM 53ビット
 - 量子アニーリング
 - 組み合わせ最適化問題やサンプリング問題に特化した手法。
 - D-wave ... 2048ビット



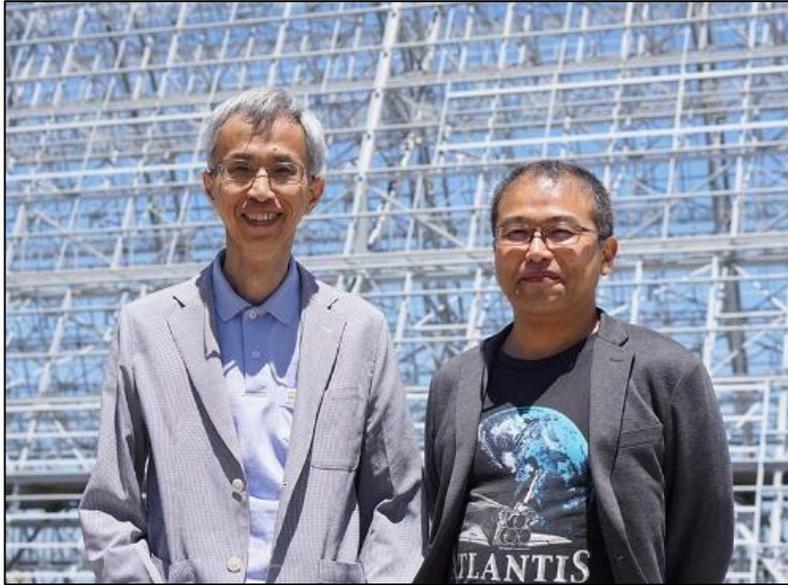


IBM, Google etc

→ Gate式量子コンピュータ

大手米国IT企業では超伝導回路 etc
日本では光 etc

← O(10)mK



<https://tech.nikkeibp.co.jp/atcl/nxt/column/18/00419/090200006/>

左 ... 西森さん、右 ... 門脇さん

量子焼きなまし法、量子アニーリング

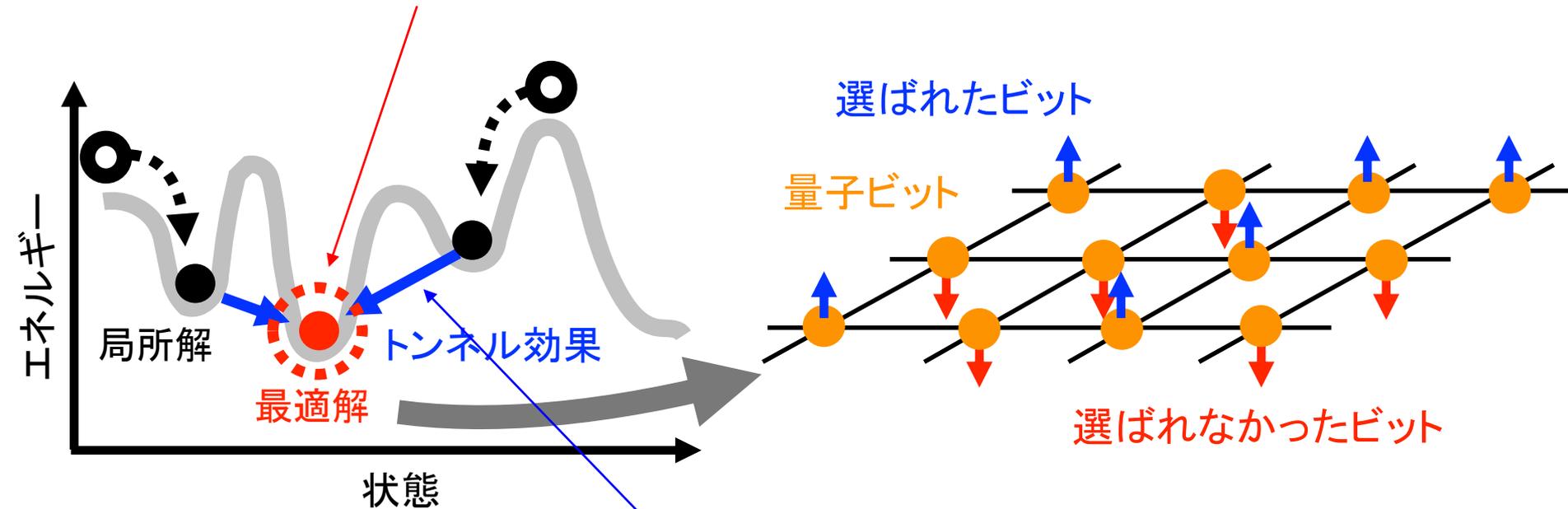
西森秀稔氏、門脇正史氏が1998年に考案

カナダ D-wave社で商用化



量子アニーリング

最適な組み合わせを持つ状態が最も小さいエネルギーを持つ。



量子アニーリングの場合、**トンネル効果**で局所解から抜け出すことができる。
→ 最適解(基底状態)を見つける(と期待)

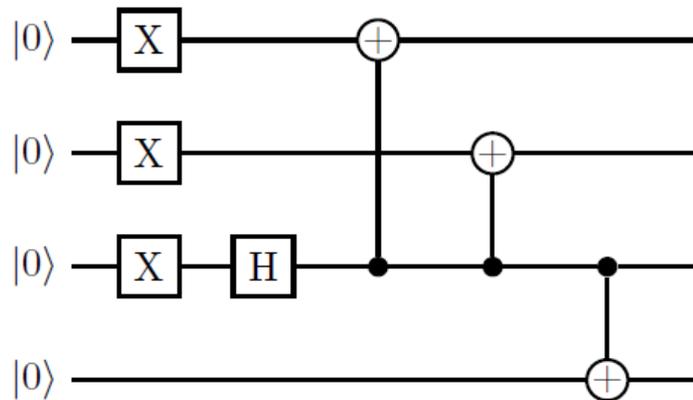
逆に、量子アニーリングを使うなら、上記のような問題設定にする。

- 何をqubitにするか?
- どのように相互作用を決めるか?

量子ゲート式

- イメージ: Qubitを「自由に」操作して回路を作り、答えを得る手法
 - 古典コンピュータ(チューリングマシン)
 - AND, OR, NOTなどのゲートの組み合わせ
 - 決定性
 - 汎用化: NOTとANDがあればどんな回路でも作れる.
 - 量子コンピュータ(量子チューリングマシン?)
 - アダマールゲート、回転ゲート、制御ノットゲートなどの組み合わせ
 - 確率性、原理的に状態をコピーできない.
 - 汎用化: RotationとCNOTがあればOK.
- つまり、汎用的な計算を目指した量子コンピュータ

- 量子回路ダイアグラムの例



X ... x軸周りに180度回転させるゲート

H ... アダマールゲート

2量子のもの(+と黒丸) ... CNOTゲート(制御ノットゲート)

せっかくなので
- 量子もつれ
- 足し算
を紹介

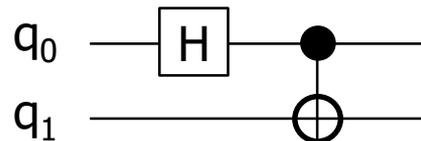
量子もつれ

- たとえば2つのqubitがあったとき、その状態が独立に表現できないときを「量子もつれ」(entanglement)と言う。

- $(|0\rangle + |1\rangle)(|0\rangle + |1\rangle) = |0\rangle|0\rangle + |0\rangle|1\rangle + |1\rangle|0\rangle + |1\rangle|1\rangle$
- $|0\rangle(|0\rangle + |1\rangle) = |0\rangle|0\rangle + |0\rangle|1\rangle$
などは重ね合わせ状態だが、もつれてはいない。

ここで後者にCNOTをかけると

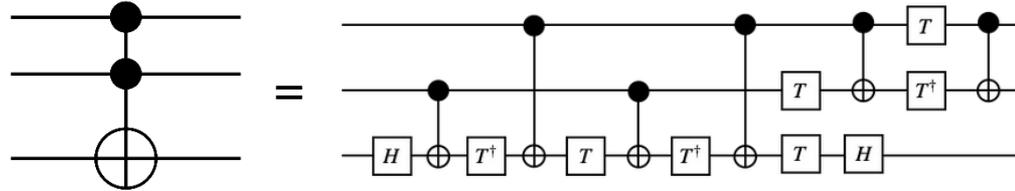
- $|0\rangle|0\rangle + |1\rangle|1\rangle$
これは独立したqubitに書き表すことができない。



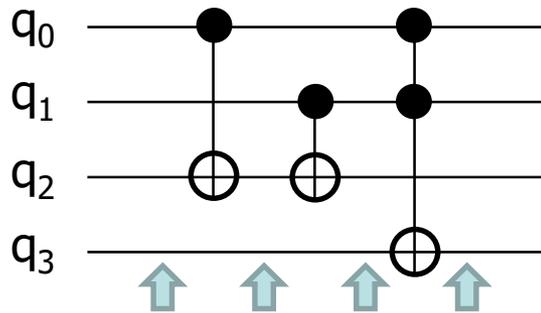
足し算の量子ゲート

- トフォリゲート(Toffoli gate)があれば、それなりに簡単
 - CNOTの2個版(CCNOTと書くことも)

- 制御コントロールがどちらも1なら、出力は反転する。
- 実装はそこそこ面倒

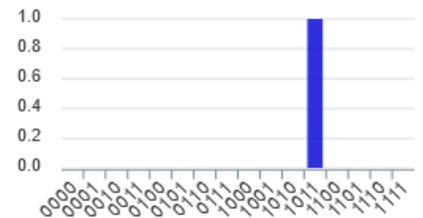
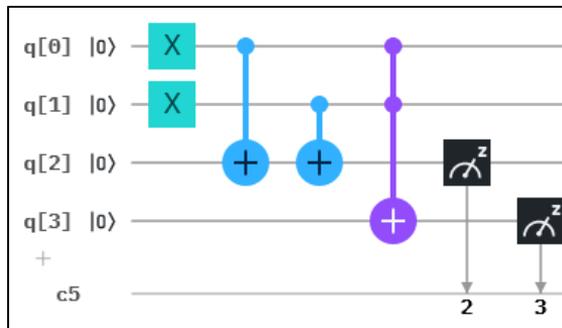


- 足し算: $q_0, q_1 \rightarrow q_2$ (1桁目)、 q_3 (2桁目=繰り上がり) 「重ね合わせ」は一切使っていません。

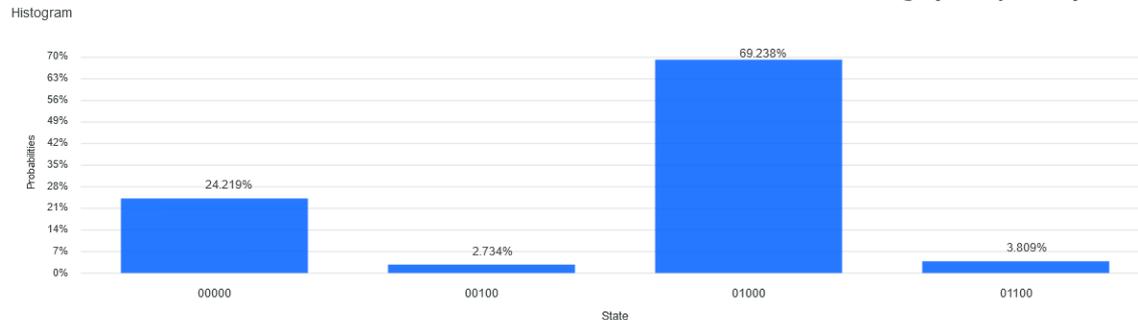


q_0	1	1	1	1
q_1	1	1	1	1
q_2	0	1	0	0
q_3	0	0	0	1

IBM Q



Johannesburg (20 qubits)



実機だと70%ぐらい正しい

Googleの論文: 量子超越性

- Quantum Supremacyを達成したと宣言(2019年10月)

ビットコインが値下がりにしたとか

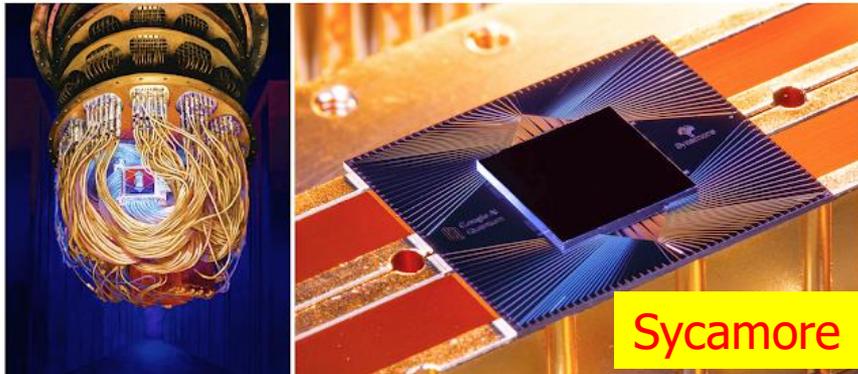
Quantum Supremacy Using a Programmable Superconducting Processor

Wednesday, October 23, 2019

Posted by John Martinis, Chief Scientist Quantum Hardware and Sergio Boixo, Chief Scientist Quantum Computing Theory, Google AI Quantum

Physicists have been talking about the power of [quantum computing](#) for over 30 years, but the questions have always been: will it ever do something useful and is it worth investing in? For such large-scale endeavors it is good engineering practice to formulate decisive short-term goals that demonstrate whether the designs are going in the right direction. So, we devised an experiment as an important milestone to help answer these questions. This experiment, referred to as a [quantum supremacy](#) experiment, provided direction for our team to overcome the many technical challenges inherent in quantum systems engineering to make a computer that is both programmable and powerful. To test the total system performance we selected a sensitive computational benchmark that fails if just a single component of the computer is not good enough.

Today we published the results of this quantum supremacy experiment in the Nature article, "[Quantum Supremacy Using a Programmable Superconducting Processor](#)". We developed a new 54-qubit processor, named "Sycamore", that is comprised of fast, high-fidelity [quantum logic gates](#), in order to perform the benchmark testing. Our machine performed the target computation in 200 seconds, and from measurements in our experiment we determined that it would take the world's fastest supercomputer 10,000 years to produce a similar output.



乱数発生問題

- QC 200秒
- スーパーコンピュータ 10,000年
- 約15億倍速い!

Googleの戦略

QCが得意で古典計算機が苦手な問題を選択し、それでスピード競争
→ ずるいという見方もあるが、超越性を証明する目的としては適切
(Googleがこの問題に着目していたのはarXivをみればはっきりとする.)

IBMは2.5日でできると反論.

(arXiv:1910.09534) →50倍程度

QCの歴史にとって重要なマイルストーン

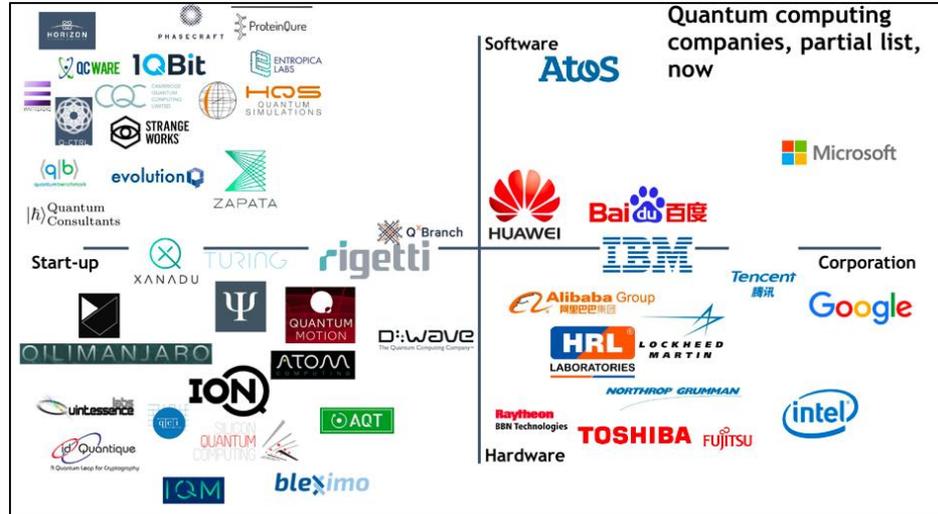
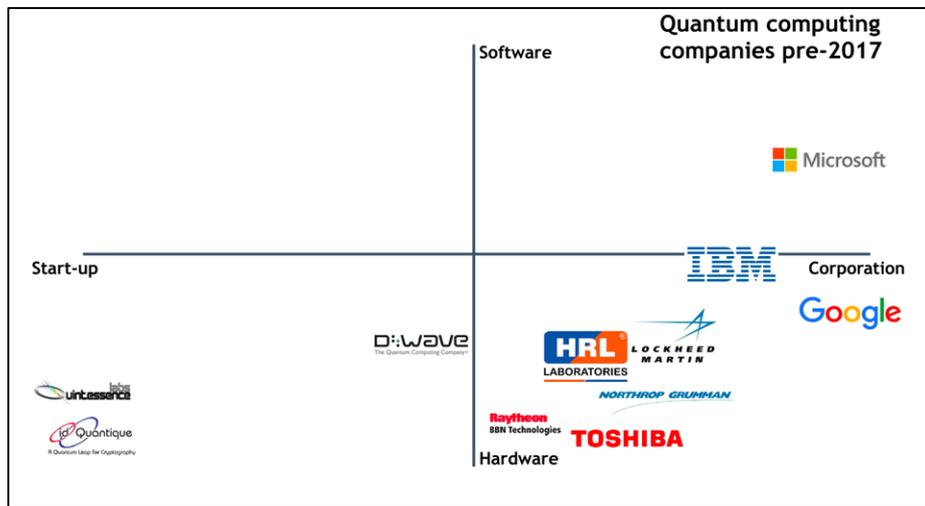
(理屈でしか分かっていなかったことを実証)

今後の挑戦: Quantum Advantage

実世界で意味のある問題で超越性を示す.

量子コンピュータの未来

- ブーム的な雰囲気もあるが、実機が伴った深層学習のような状態ではない。
 - 超伝導にしても、光にしても、真の量子コンピュータができるには、まだ時間がかかりそう。
 - 10年～と言われている。しかし、何が起こるかは誰も予想できない。
 - 米国、ユーロ、中国は国レベルでO(1000)億の投資を開始
 - 日本もそろそろ
 - ベンチャー企業も含めてまだまだブームは続く？

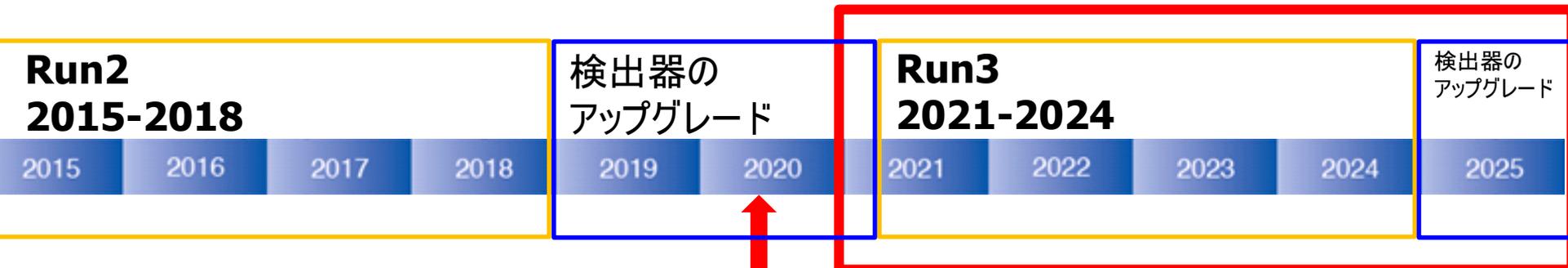


(2017のイラストなのですでに古い)

- これから目指すこと: **Quantum Advantage**
 - NISQでできる面白いアルゴリズムの発見、実用的なアルゴリズムの発見
 - (物理実験の視点) NISQでできる面白い実験の発見
 - 教育としては面白いツール(量子力学を実感できる！)
- MLは今から開始してもかなり出遅れ感がありますが、QCはこれから十分に合います。

「LHC-アトラス実験」の予定と大学院課程の研究

大学院：修士2年＋博士3年



現在

- 修士課程：2021-2022
 - 検出器のコミッショニング、運転
 - 物理データ解析(約 140fb^{-1})
 - 実験・検出器の研究開発
- 博士課程：2023-2025
 - 物理データ解析(約 $140+300\text{fb}^{-1}$)
 - 検出器の運転、メンテナンス、改善
 - 実験・検出器の研究開発
- コンピューター科学(深層学習)の道もWelcome！

石野



浅井



田中



奥村



澤田



研究、M論、D論には困りません。

この5名がATLAS実験の大学院生をとれます。

物理が好きな方、実験が好きな方、計算機好きな方、泥臭いことが好きな方、挑戦が好きな方を募集しています。