

# 1fmの世界 を見るために

Physics Lab. 2024 学生講演  
東京大学理学部物理学科 高橋 仁

# 今日の目標

- 1fmのミクロな世界の覗き方を知ろう
- 高エネルギー加速器実験の概要を知ろう

# 注目するスケール

$10^{-15}$  m

$10^{-10}$  m

$10^{-5}$  m

1 m

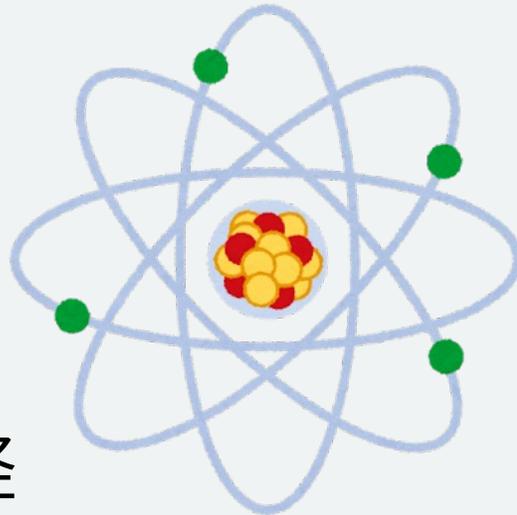
$10^{10}$  m

1 fm

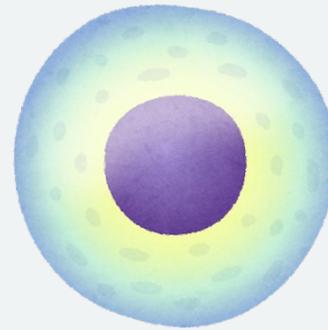
0.1 nm



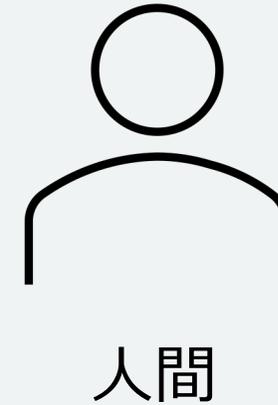
原子核の直径  
陽子・中性子



原子の直径



細胞の直径



人間



地球の公転半径

# それを見て、どうするの？

- 新粒子の発見、ミクロな統一理論
- 放射線関係
- 医療や構造分析にも応用が？

→具体的に何を見るの??

# 素粒子の紹介

• 右の表の  
16種類  
が最小要素！

• …誰??

		物質粒子 matter (fermions)			ゲージ粒子 gauge bosons			
		1 世代	2 世代	3 世代	電磁力 electromagnetic			
クォーク quarks	アップ クォーク		チャーム クォーク		トップ クォーク		光子 (フォトン)	
	ダウン クォーク		ストレンジ クォーク		ボトム クォーク		グルーオン	
	電子		ミュー粒子		タウ粒子		ウィークボソン	
	電子 ニュートリノ		ミュー ニュートリノ		タウ ニュートリノ		ヒッグス粒子 Higgs bosons	

# 素粒子の紹介

- 陽子や中性子等を構成



# 素粒子の紹介

- 電子の仲間

物質粒子 matter (fermions)			ゲージ粒子 gauge bosons		
クォーク quarks			電磁気力 electromagnetic		
1 世代	2 世代	3 世代	強い力 strong		
 アップ クォーク	 チャーム クォーク	 トップ クォーク	 光子 (フォトン)		
 ダウン クォーク	 ストレンジ クォーク	 ボトム クォーク			
レプトン leptons			ウィークボソン weak bosons		
 電子	 ミュー粒子	 タウ粒子	   ウィークボソン		
 電子 ニュートリノ	 ミュー ニュートリノ	 タウ ニュートリノ			
			 ヒッグス粒子		

# 素粒子の紹介

• 力を媒介

どう振る舞うの？

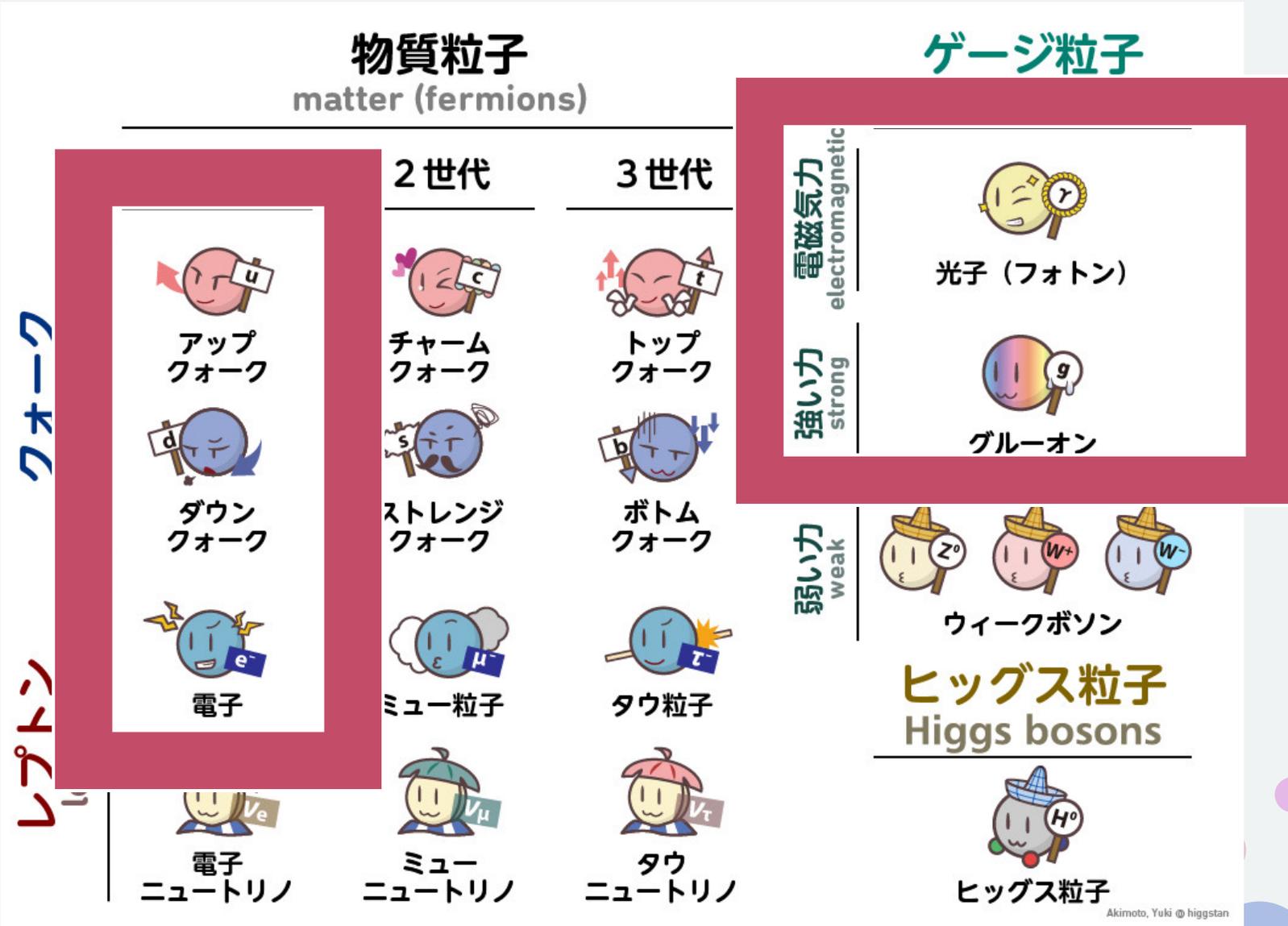
		物質粒子 matter (fermions)		
		1 世代	2 世代	3 世代
クォーク quarks	アップ クォーク		チャーム クォーク	トップ クォーク
	ダウン クォーク		ストレンジ クォーク	ボトム クォーク
	電子 ニュートリノ		ミュー ニュートリノ	タウ ニュートリノ
レプトン leptons	電子		ミュー 粒子	タウ 粒子
	電子 ニュートリノ		ミュー ニュートリノ	タウ ニュートリノ
	電子 ニュートリノ		ミュー ニュートリノ	タウ ニュートリノ

		ゲージ粒子 gauge bosons
電磁気力 electromagnetic		光子 (フォトン)
強い力 strong		グルーオン
弱い力 weak		ウィークボソン

		ヒッグス粒子
		ヒッグス粒子

# 水素原子の例

右の5種類を  
使います！！



# 水素原子の例

水素原子

クォーク  
quarks

レプトン  
leptons

## 物質粒子 matter (fermions)

1 世代	2 世代	3 世代
 アップ クォーク	 チャーム クォーク	 トップ クォーク
 ダウン クォーク	 ストレンジ クォーク	 ボトム クォーク
 電子	 ミュー粒子	 タウ粒子
 電子 ニュートリノ	 ミュー ニュートリノ	 タウ ニュートリノ

電磁気力  
electromagnetic

強い力  
strong

弱い力  
weak

## ゲージ粒子 gauge bosons

 光子 (フォトン)
 グルーオン
 ウィークボソン
<b>ヒッグス粒子</b> Higgs bosons
 ヒッグス粒子

# 水素原子の例

原子核  
(陽子)



+



電子

クォーク  
quarks

レプトン  
leptons

## 物質粒子 matter (fermions)

1 世代	2 世代	3 世代
<p>アップ クォーク</p>	<p>チャーム クォーク</p>	<p>トップ クォーク</p>
<p>ダウン クォーク</p>	<p>ストレンジ クォーク</p>	<p>ボトム クォーク</p>
<p>電子</p>	<p>ミュー粒子</p>	<p>タウ粒子</p>
<p>電子 ニュートリノ</p>	<p>ミュー ニュートリノ</p>	<p>タウ ニュートリノ</p>

電磁気力  
electromagnetic

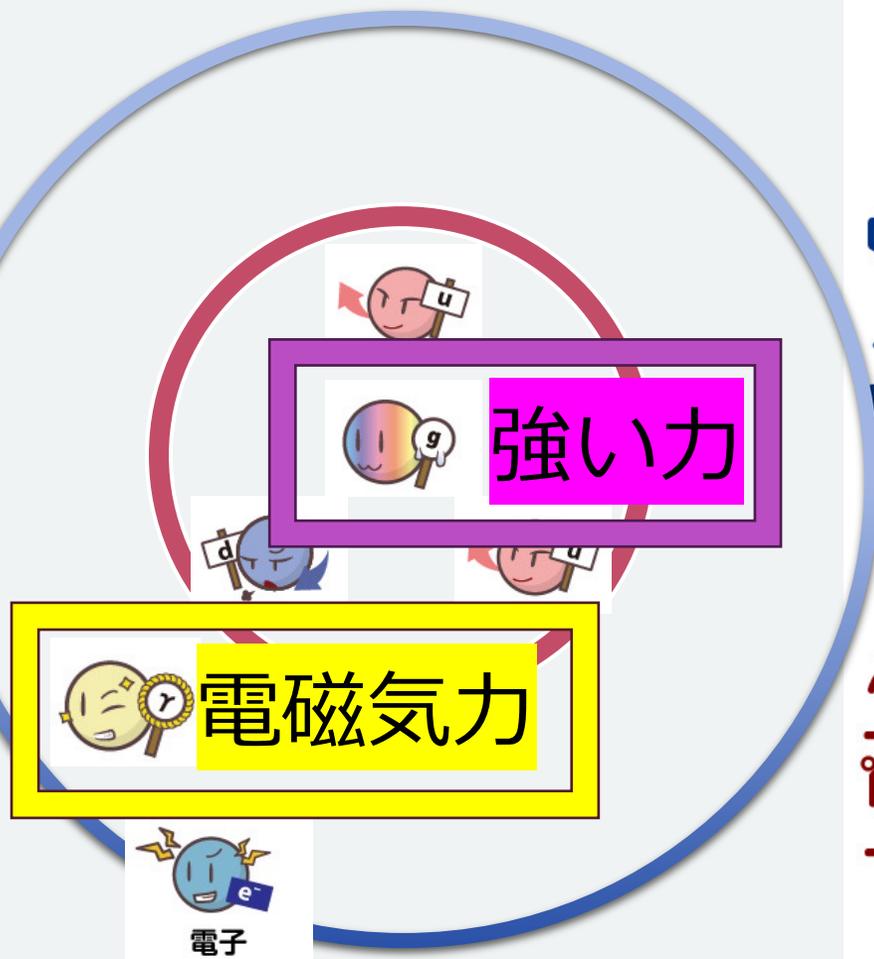
強い力  
strong

弱い力  
weak

## ゲージ粒子 gauge bosons

<p>光子 (フォトン)</p>
<p>グルーオン</p>
<p>ウィークボソン</p>
<p>ヒッグス粒子 Higgs bosons</p>
<p>ヒッグス粒子</p>

# 水素原子の例



## 物質粒子 matter (fermions)

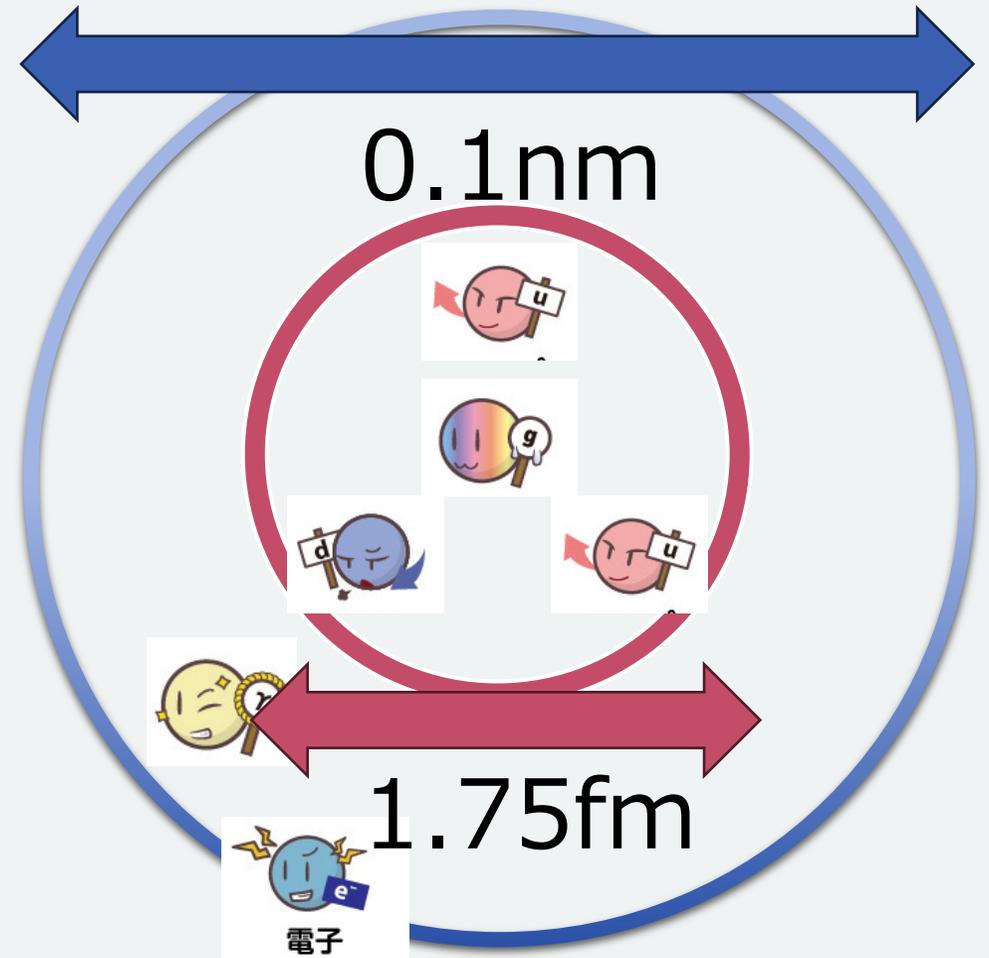
	1 世代	2 世代	3 世代
クォーク quarks	アップ クォーク 	チャーム クォーク 	トップ クォーク 
	ダウン クォーク 	ストレンジ クォーク 	ボトム クォーク 
	電子 	ミュー粒子 	タウ粒子 
レプトン leptons	電子 ニュートリノ 	ミュー ニュートリノ 	タウ ニュートリノ 

## ゲージ粒子 gauge bosons

電磁気力 electromagnetic	光子 (フォトン) 
	強い力 strong
弱い力 weak	ウィークボソン 
	ヒッグス粒子 Higgs bosons 

# 1fm = $10^{-15}$ mの世界での現象

- ハドロンの形成
- 強い力が  
電磁気力の137倍の力  
原子の10万分の1の領域  
にはたらく!!



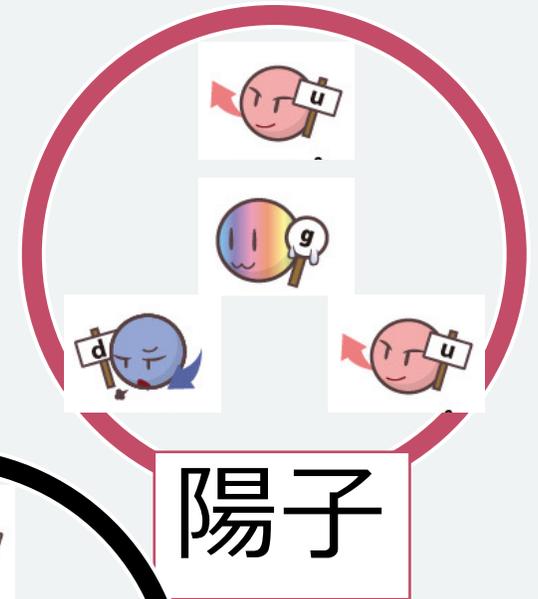
水素原子

# 原子核の中 ～1fm=10<sup>-15</sup>mの世界～

- 原子核の密度…200テラg/cm<sup>3</sup>

- 電氣的な反発より強く  
パイ中間子を通じて結合

→結合を切るには??



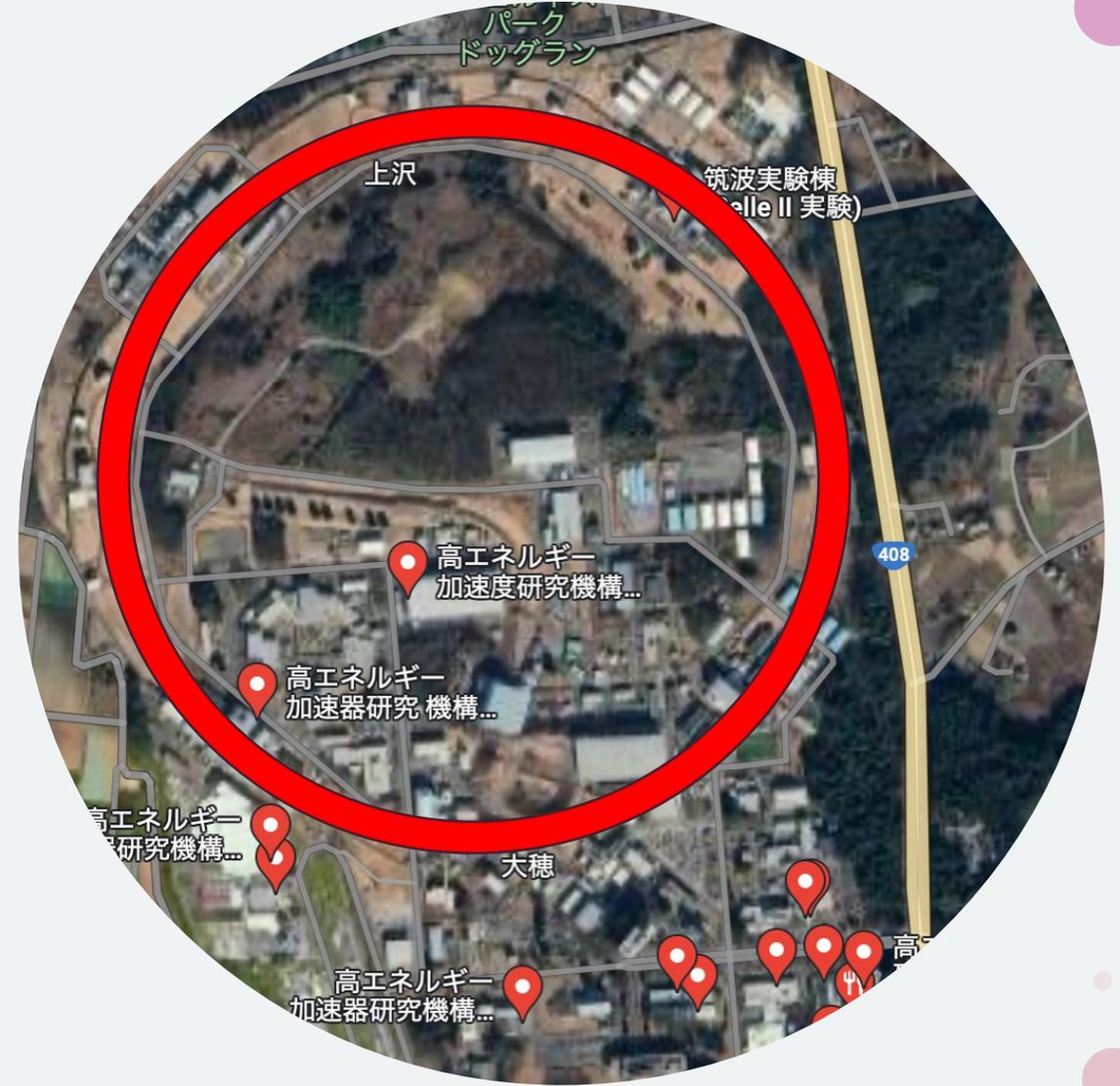
# 高エネルギー加速器実験

- 粒子をすごい加速して衝突させる実験
  - 大きなエネルギーで破壊！！
  - 残骸を検出！！
  - 反応を解析！！

# 高エネルギー加速器実験

- 粒子をすごい加速して衝突させる実験
  - 大きなエネルギーで破壊！！
  - 残骸を検出！！
  - 反応を解析！！

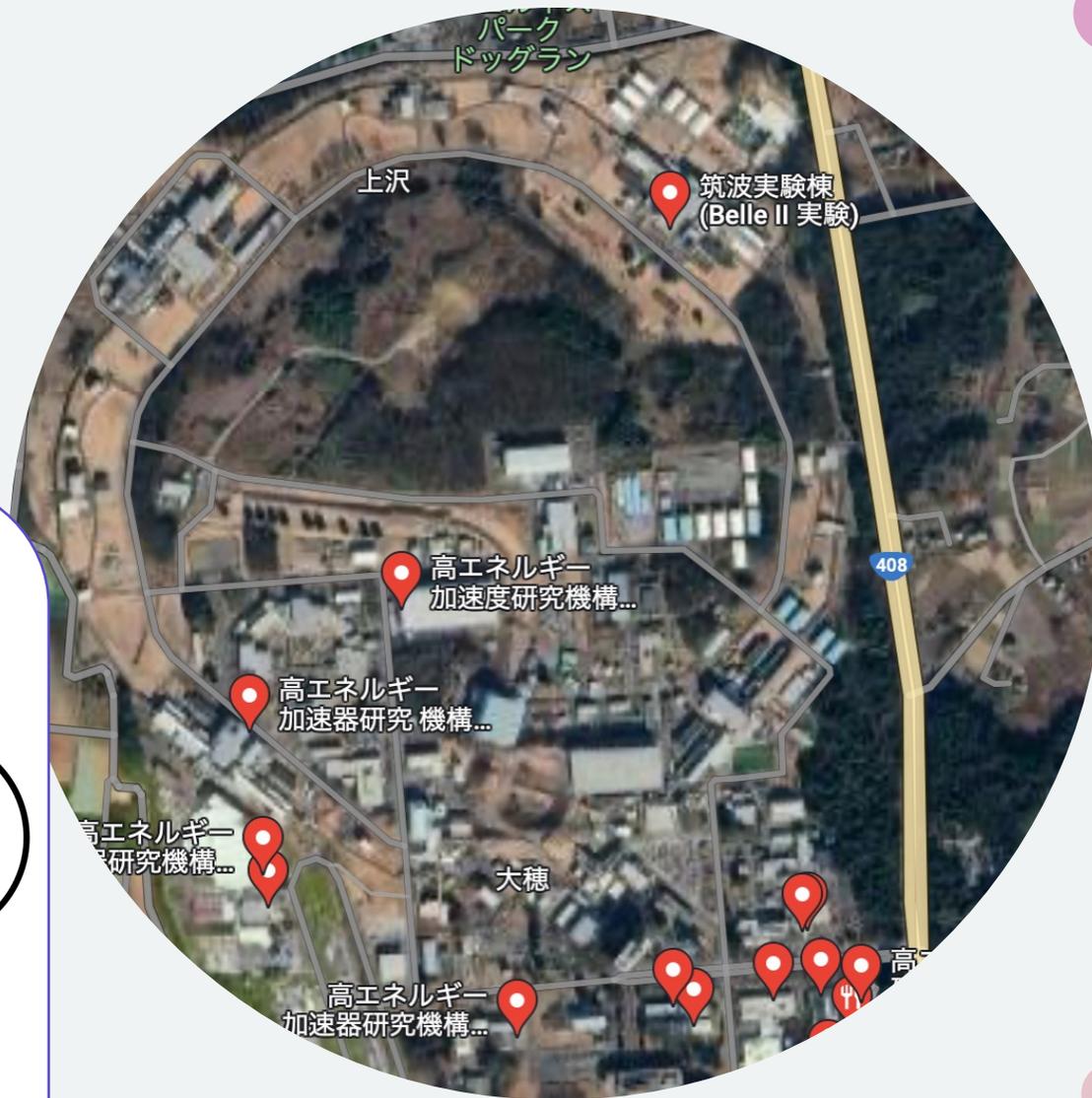
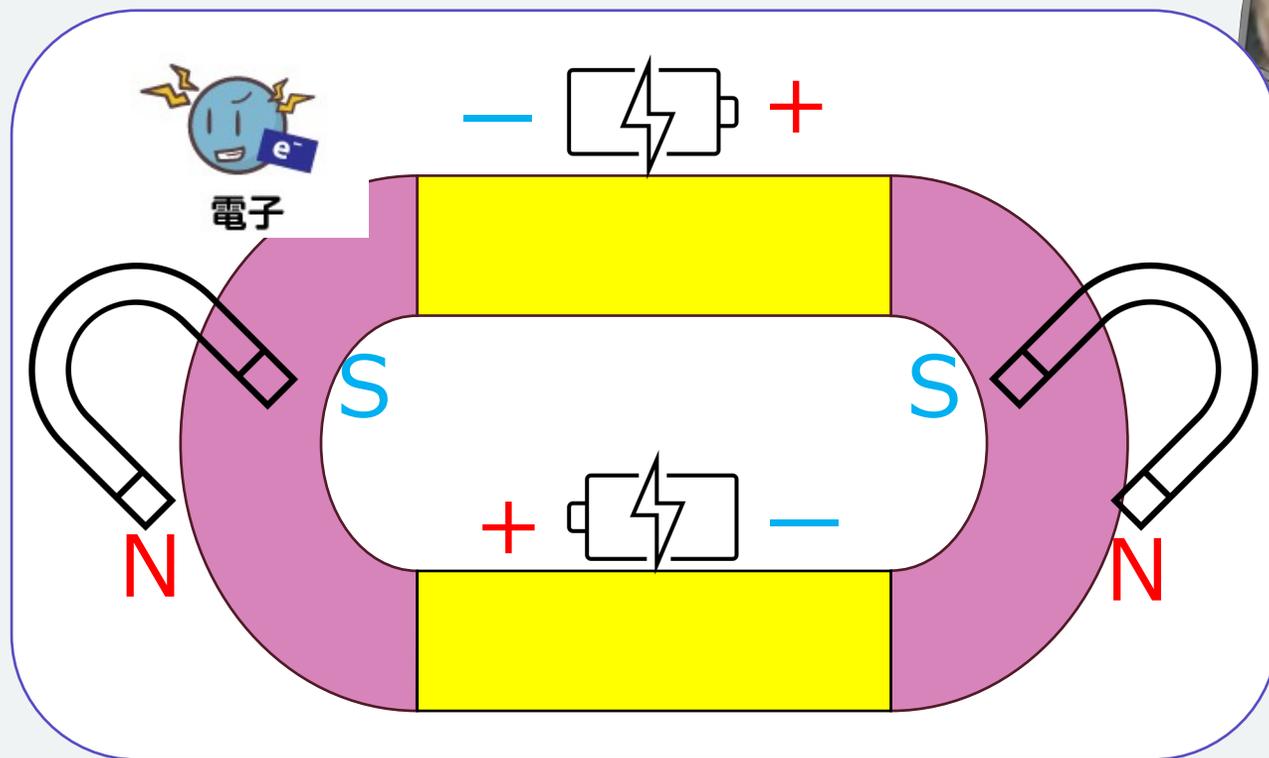
# 加速器



出典:Google Map(茨城県つくば市大穂付近)

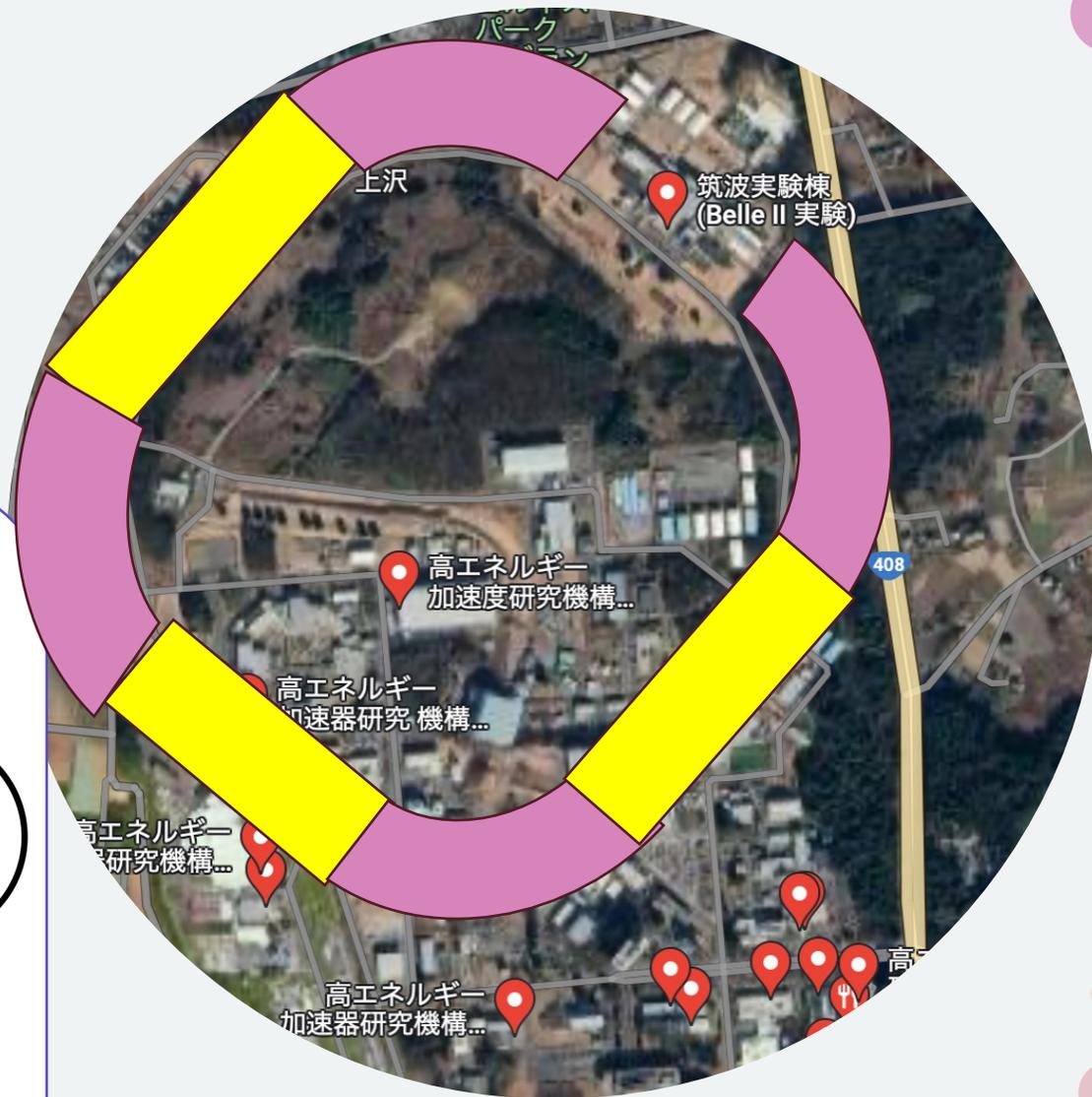
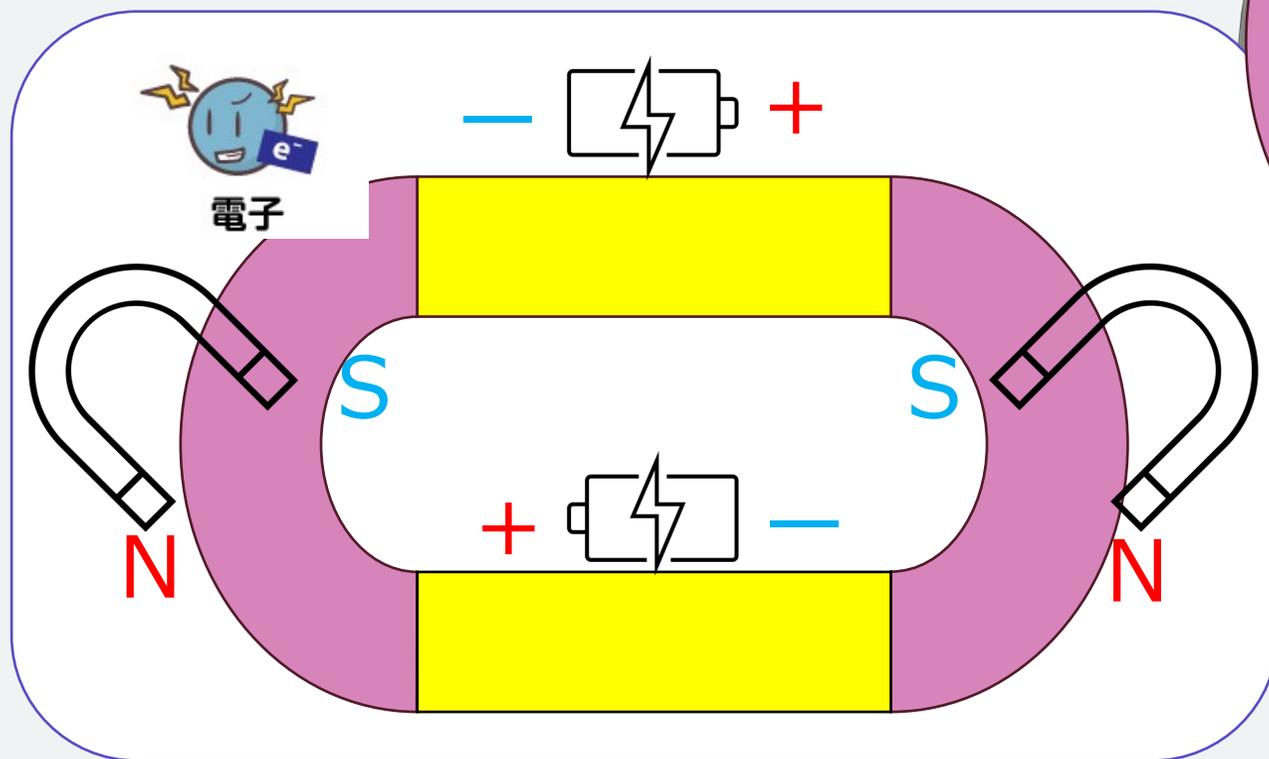
# 加速器の原理

1. 電場をかけて加速
2. 磁場をかけて方向転換



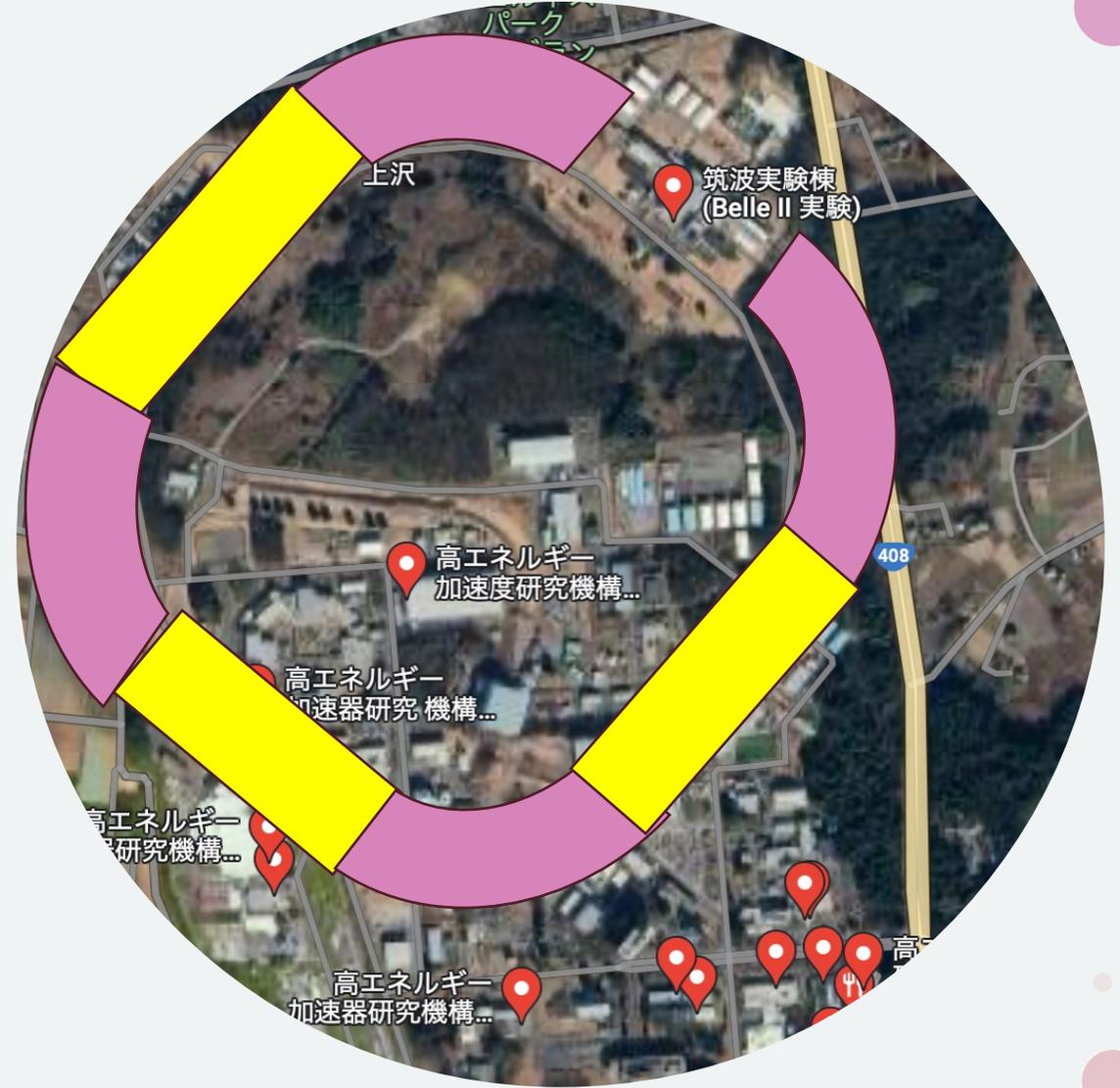
出典:Google Map(茨城県つくば市大穂付近)

# 加速器



出典:Google Map(茨城県つくば市大穂付近)

# 加速器



出典:Google Map(茨城県つくば市大穂付近)

# 高エネルギー加速器実験

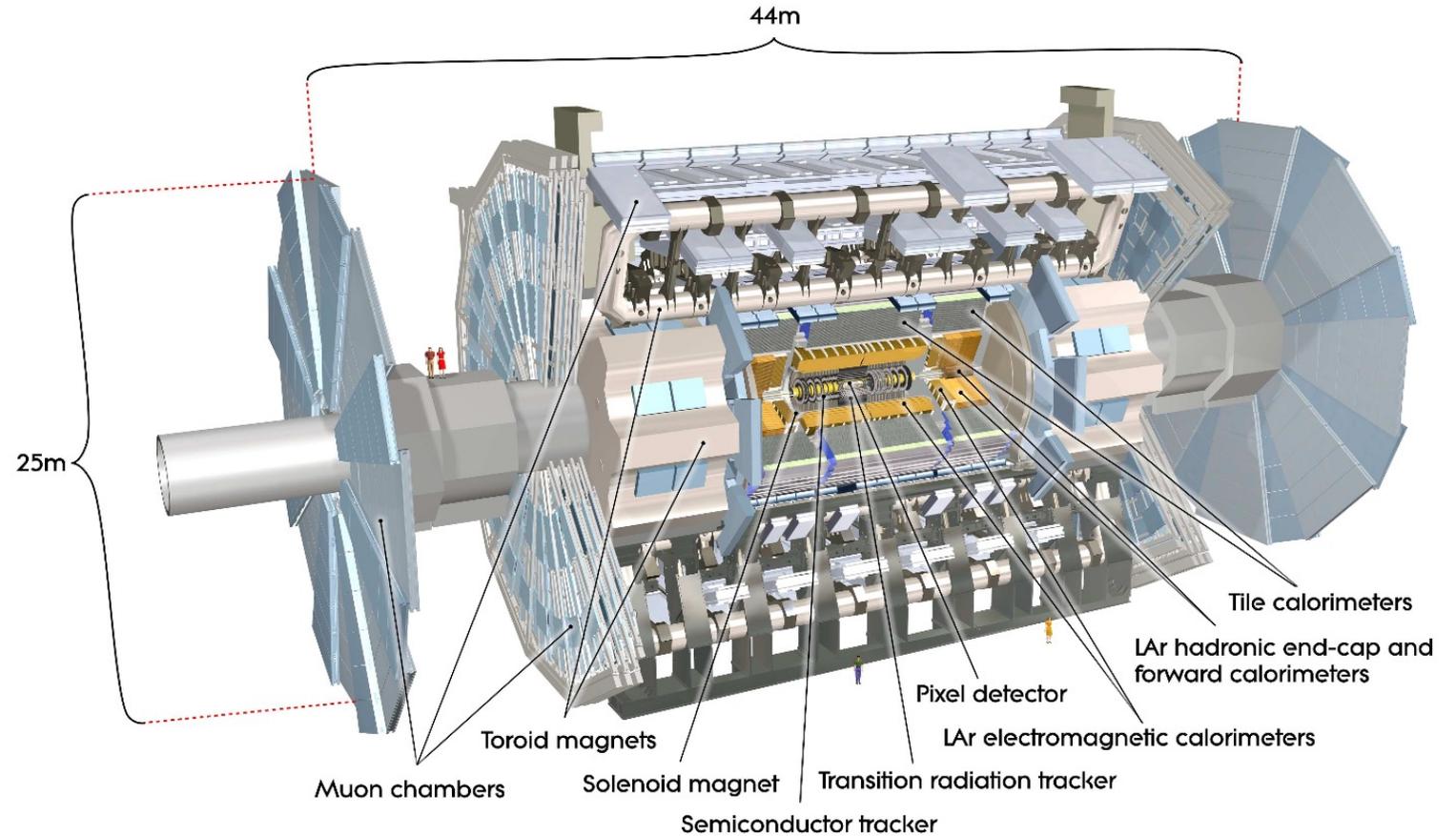
- 粒子をすごい加速して衝突させる実験
  - 大きなエネルギーで破壊！！
  - **残骸を検出！！**
  - 反応を解析！！

# 検出器

- 網とかザルのようなもので捕まえれば良い

# 検出器

## • 網とかザル



**Figure 1.1:** Cut-away view of the ATLAS detector. The dimensions of the detector are 25 m in height and 44 m in length. The overall weight of the detector is approximately 7000 tonnes.

出典: G. Aad et al. (2008). "The ATLAS Experiment at the CERN Large Hadron Collider"

# 検出器

1. 飛跡検出器
2. 電磁カロリメーター  
( $e^\pm, \gamma$ )
3. ハドロンカロリメーター  
( $\pi^\pm, p, n$ )
4. ミューオン検出器

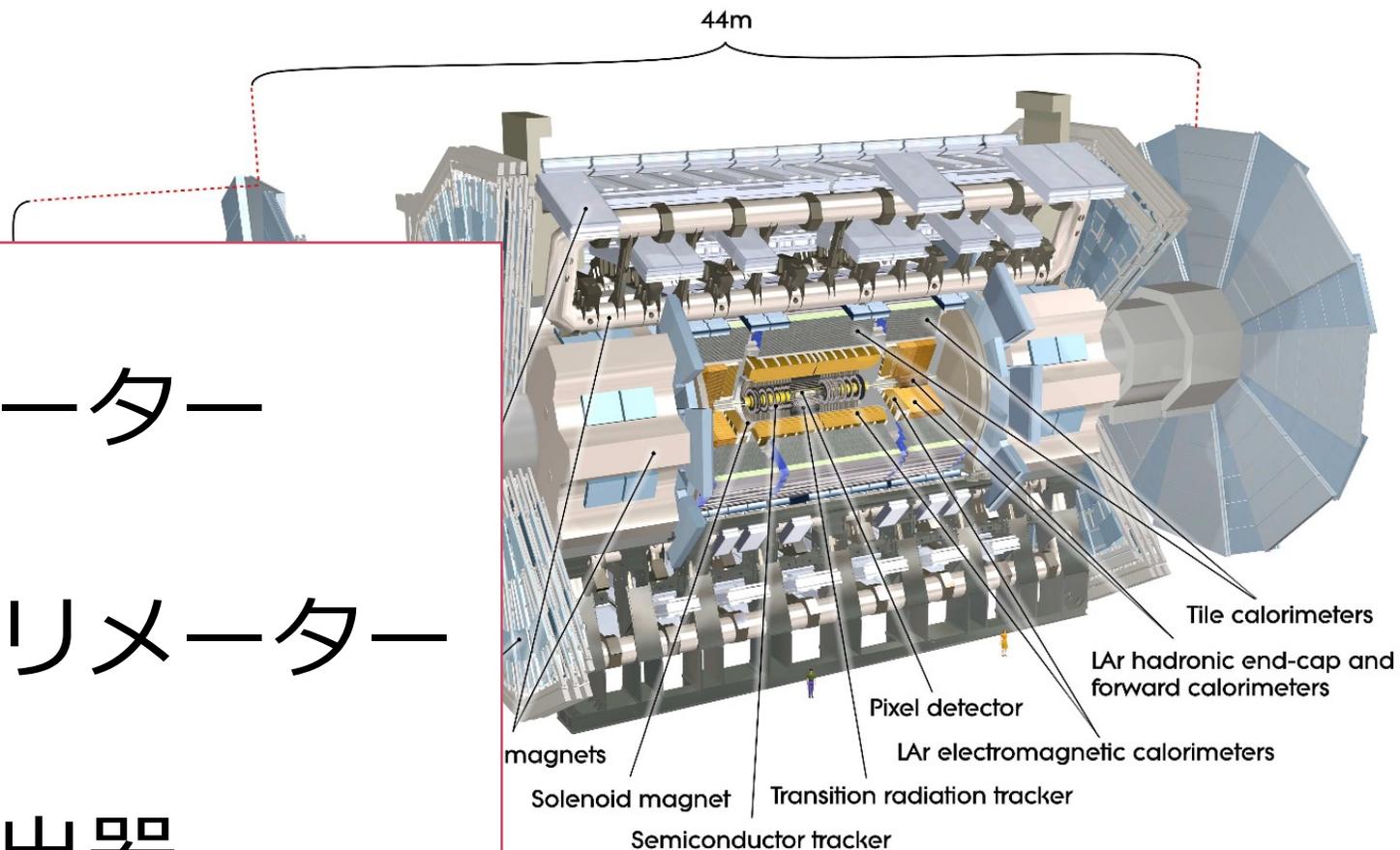


Figure 1.1: Cut-away view of the ATLAS detector. The dimensions of the detector are 25 m in height and 44 m in length. The overall weight of the detector is approximately 7000 tonnes.

出典: G. Aad et al. (2008). "The ATLAS Experiment at the CERN Large Hadron Collider"

# 検出器

- 網とかザルのようなもので捕まえれば良い
- 粒子を区別して捕獲しないといけない  
→そもそも、どんな粒子がいるんだ??

# 飛来する粒子たちの例

$$1\text{keV}/c^2 = 1.782 \times 10^{-36} \text{kg}$$

名前	質量	特徴
光子	0	
電子 ( $e^-$ )	511 keV/ $c^2$	-----
$\pi$ 中間子( $\pi^+$ )	140 MeV/ $c^2$	上の280倍
陽子 ( $p$ )	938 MeV/ $c^2$	上の7倍

# 飛来する粒子たちの例

名前	質量
光子	0
電子 ( $e^-$ )	511 keV/c <sup>2</sup>
$\pi$ 中間子( $\pi^+$ )	140 MeV/c <sup>2</sup>
陽子 ( $p$ )	938 MeV/c <sup>2</sup>

- 基本的な関係式

$$E^2 = m^2 c^4 + p^2 c^2$$

$E$  : 粒子のエネルギー

$m$  : 粒子の質量

$p$  : 粒子の運動量

$c$  : 光の速度

# 飛来する粒子たちの例

名前	質量
光子	0
電子 ( $e^-$ )	511 keV/c <sup>2</sup>
$\pi$ 中間子( $\pi^+$ )	140 MeV/c <sup>2</sup>
陽子 ( $p$ )	938 MeV/c <sup>2</sup>

- 基本的な関係式

$$E^2 = m^2 c^4 + p^2 c^2$$

$E$  : 粒子のエネルギー

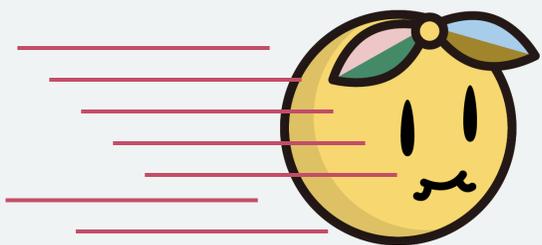
$m$  : 粒子の質量

$p$  : 粒子の運動量

$c$  : 光の速度

= 299792458 m/s

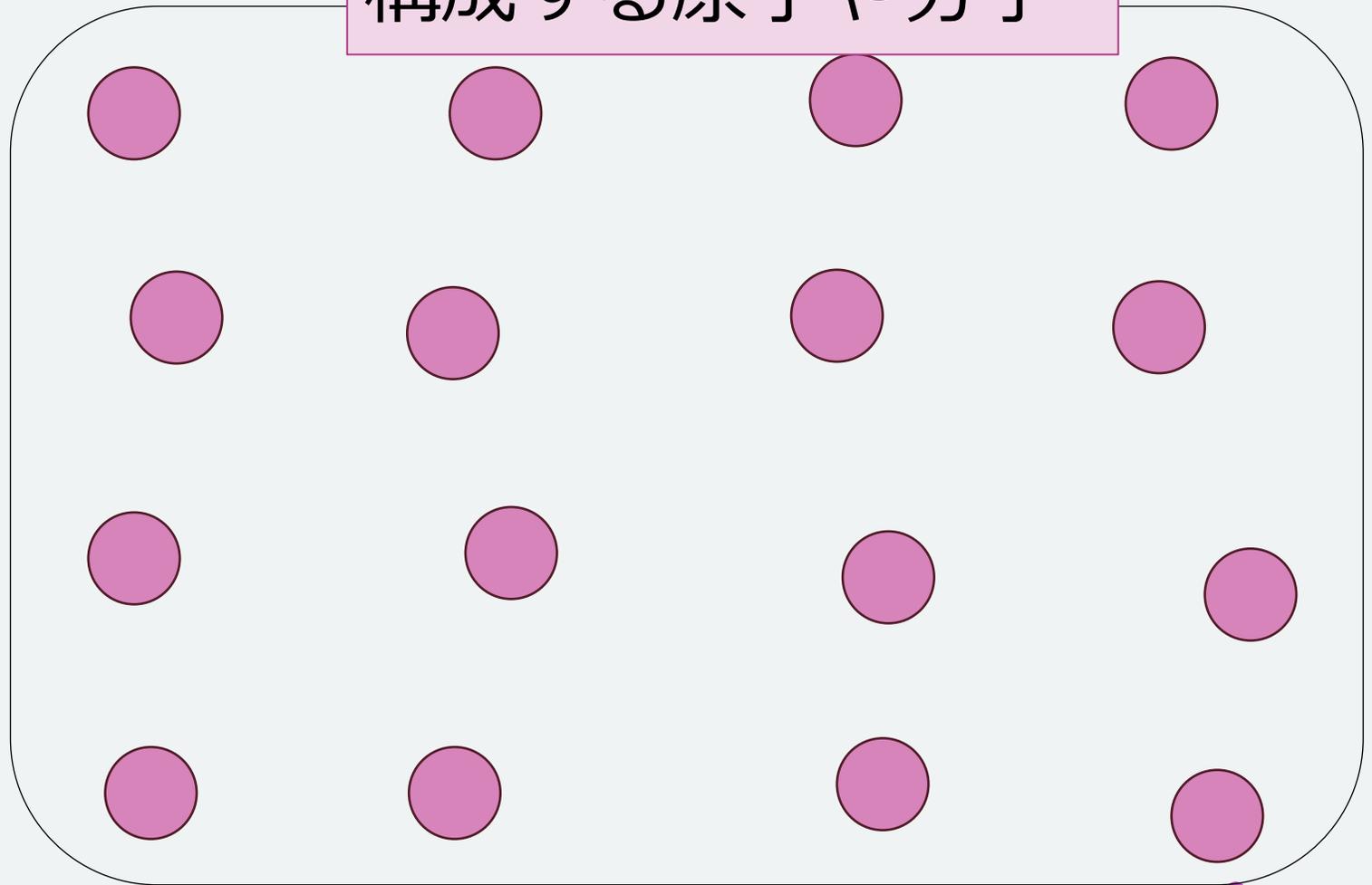
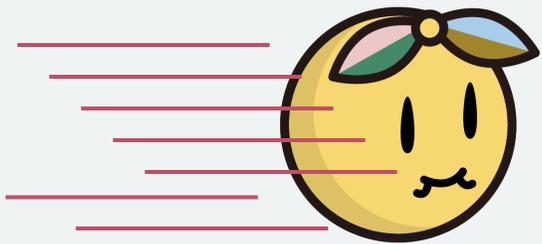
# 検出器の原理



検出器

# 検出器の原理

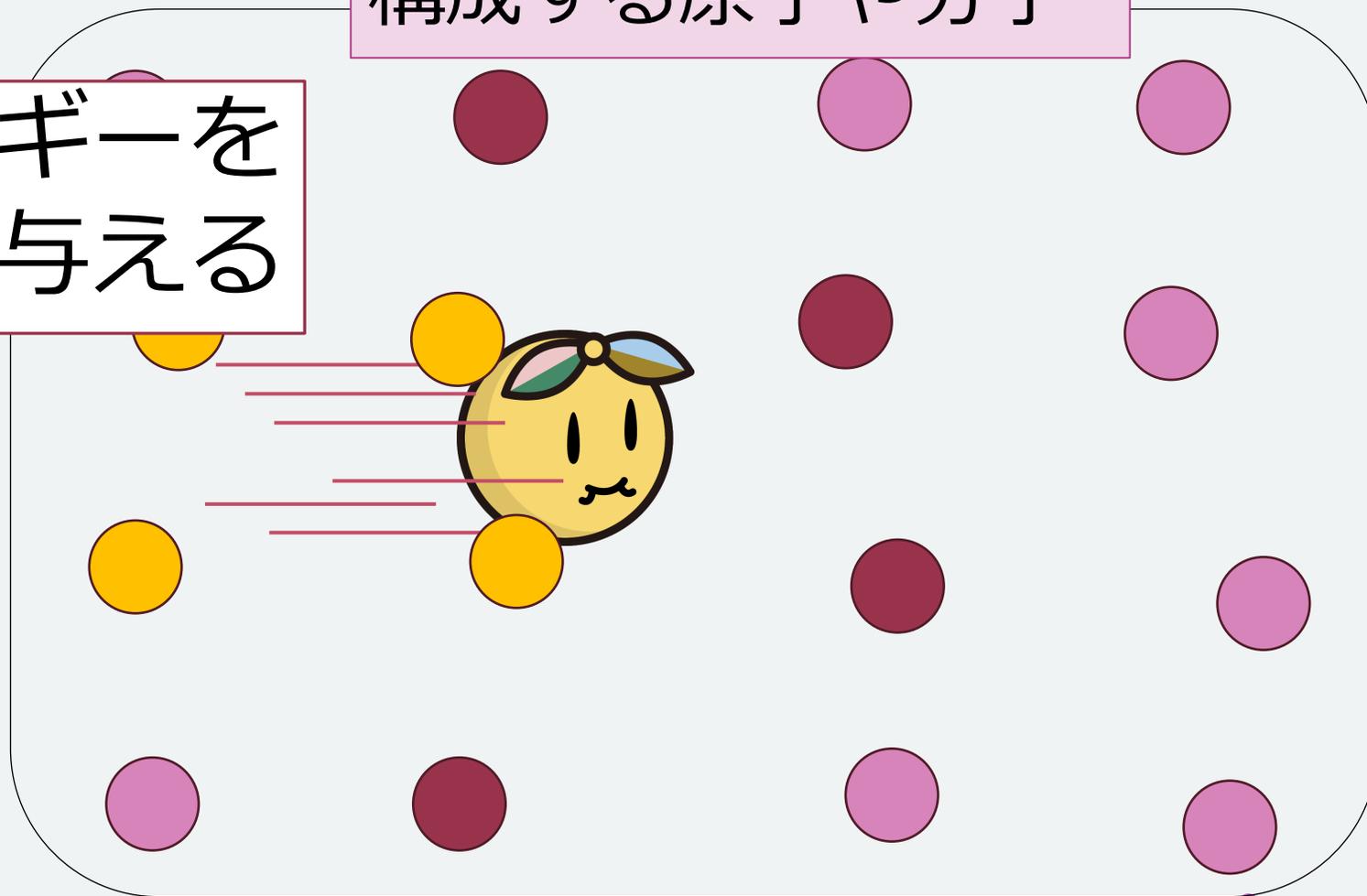
構成する原子や分子



# 検出器の原理

粒子のエネルギーを  
原子や分子に与える

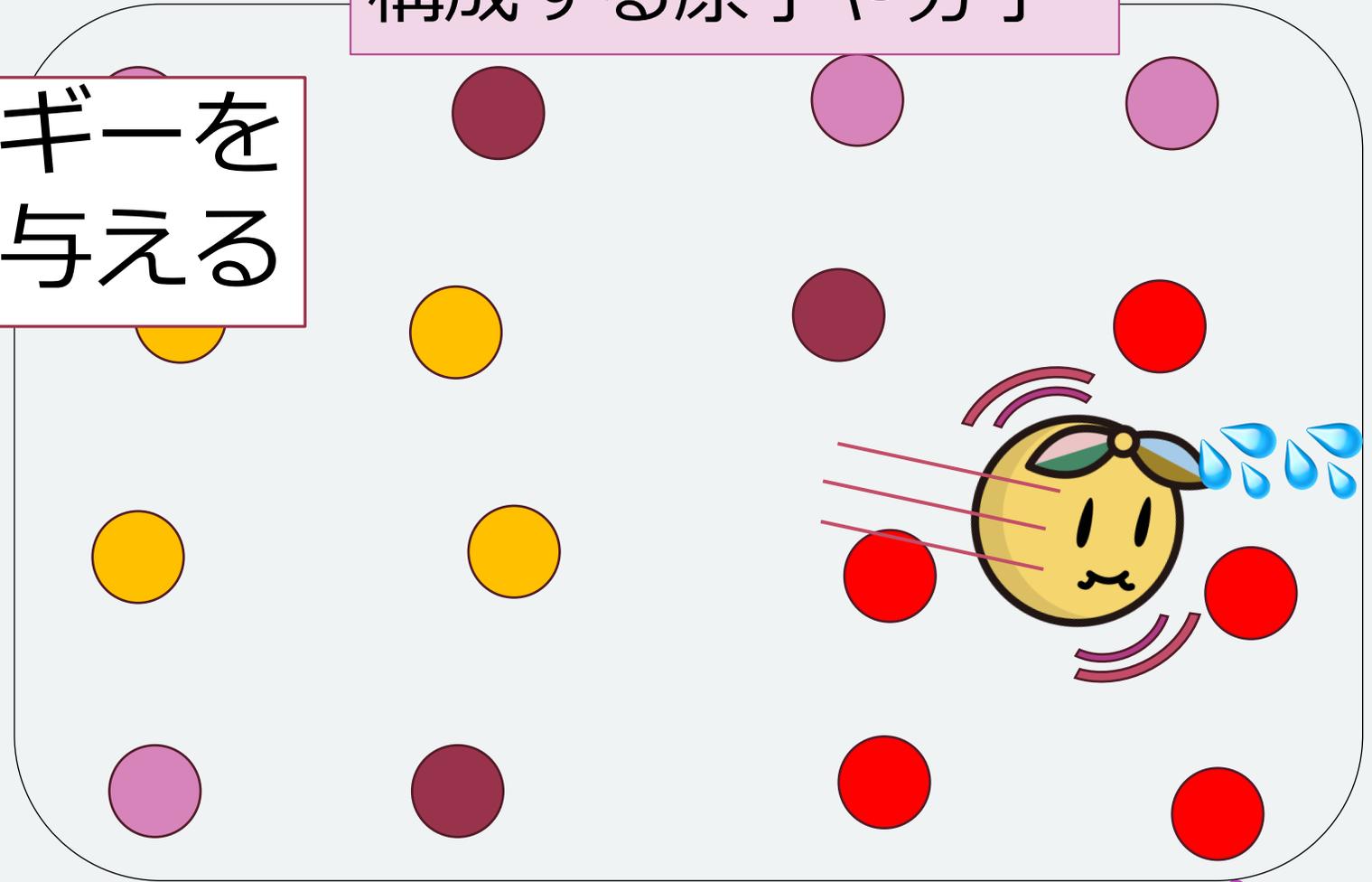
構成する原子や分子



# 検出器の原理

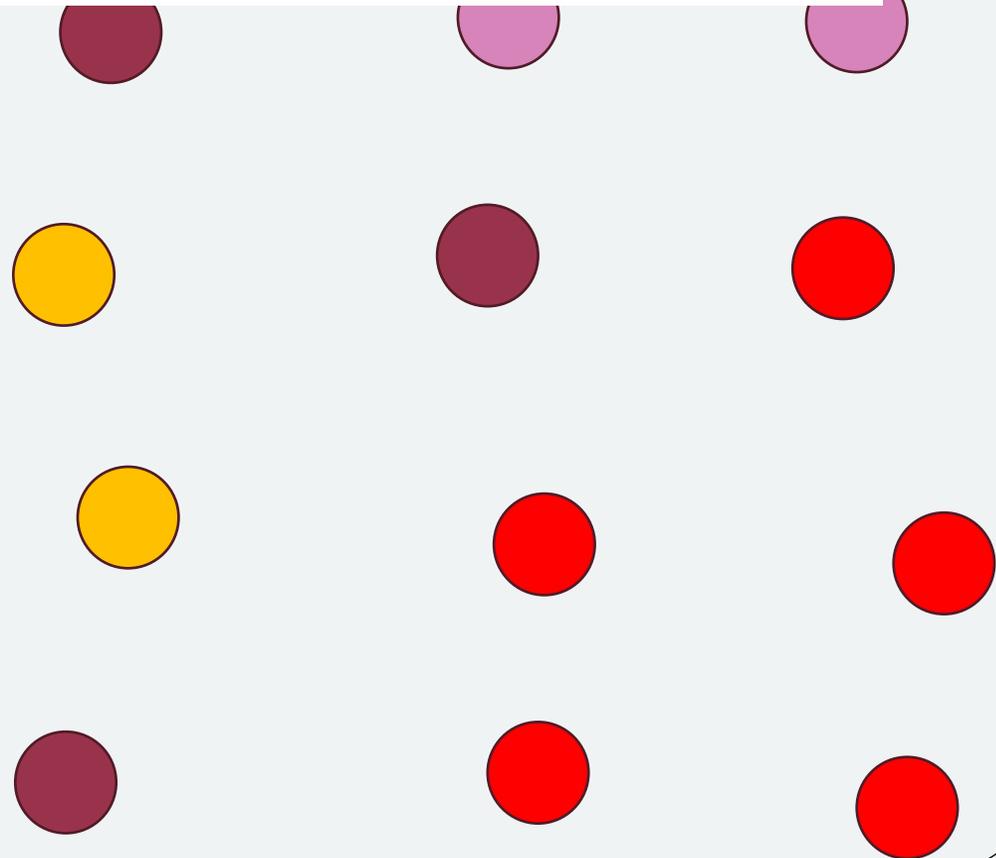
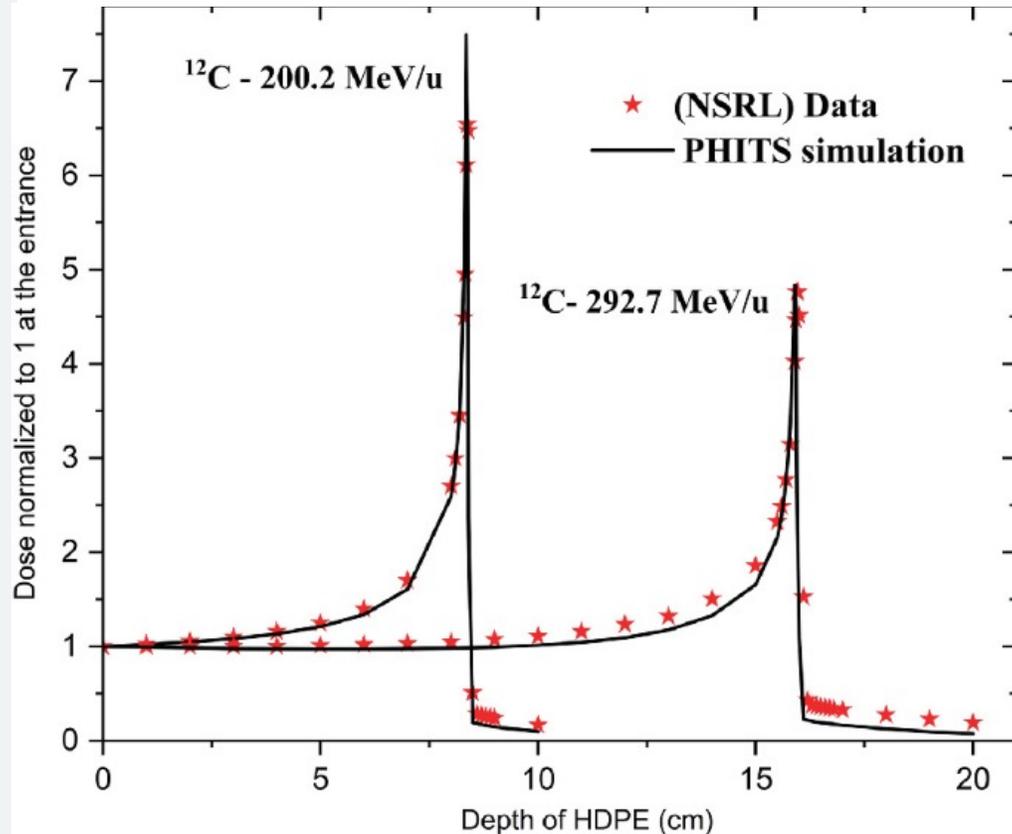
粒子のエネルギーを  
原子や分子に与える

構成する原子や分子



# どのようにエネルギーを失うか？

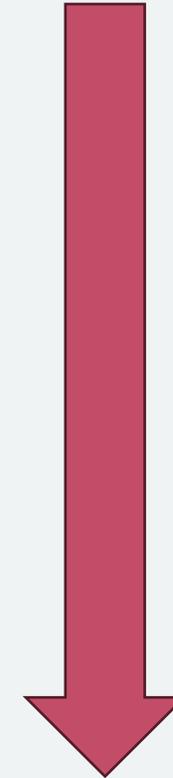
特に止まる直前にエネルギーを放出する！！



出典: El Bekkouri, H. et al. (2024). A New Study of Bragg Curve of the  $^{12}\text{C}$  Ion at Energies Ranging 200–400 MeV/u with the Contribution of Secondary Fragments in Hadrontherapy Using the PHITS Monte Carlo Code

# 飛来する粒子たちの例

名前	質量
光子	0
電子 ( $e^-$ )	511 keV/c <sup>2</sup>
$\pi$ 中間子( $\pi^+$ )	140 MeV/c <sup>2</sup>
陽子 ( $p$ )	938 MeV/c <sup>2</sup>



検出する順番

# 検出器

1. 飛跡検出器
2. 電磁カロリメーター  
( $e^\pm, \gamma$ )
3. ハドロンカロリメーター  
( $\pi^\pm, p, n$ )
4. ミューオン検出器

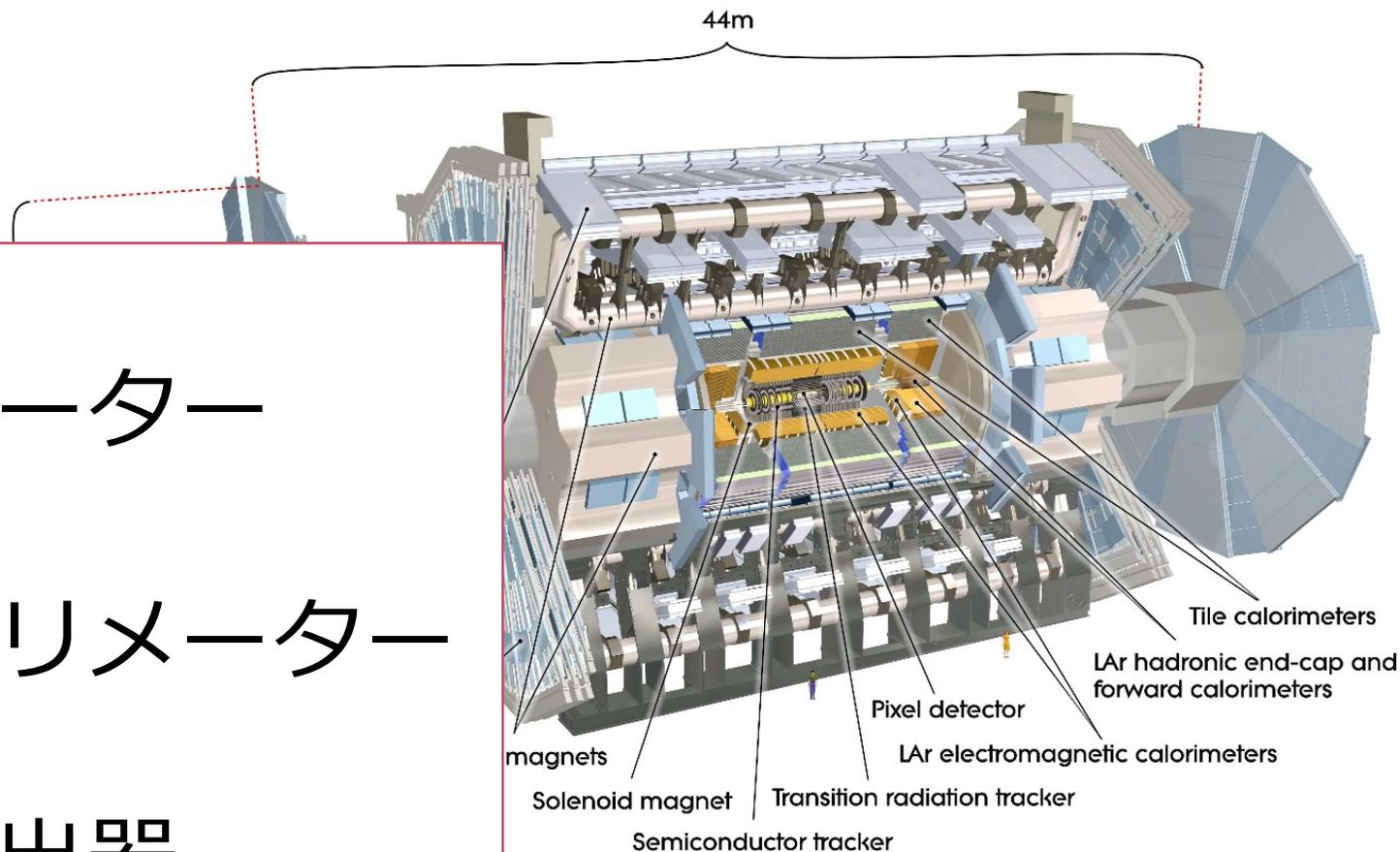


Figure 1.1: Cut-away view of the ATLAS detector. The dimensions of the detector are 25 m in height and 44 m in length. The overall weight of the detector is approximately 7000 tonnes.

出典: G. Aad et al. (2008). "The ATLAS Experiment at the CERN Large Hadron Collider"

# 高エネルギー加速器実験

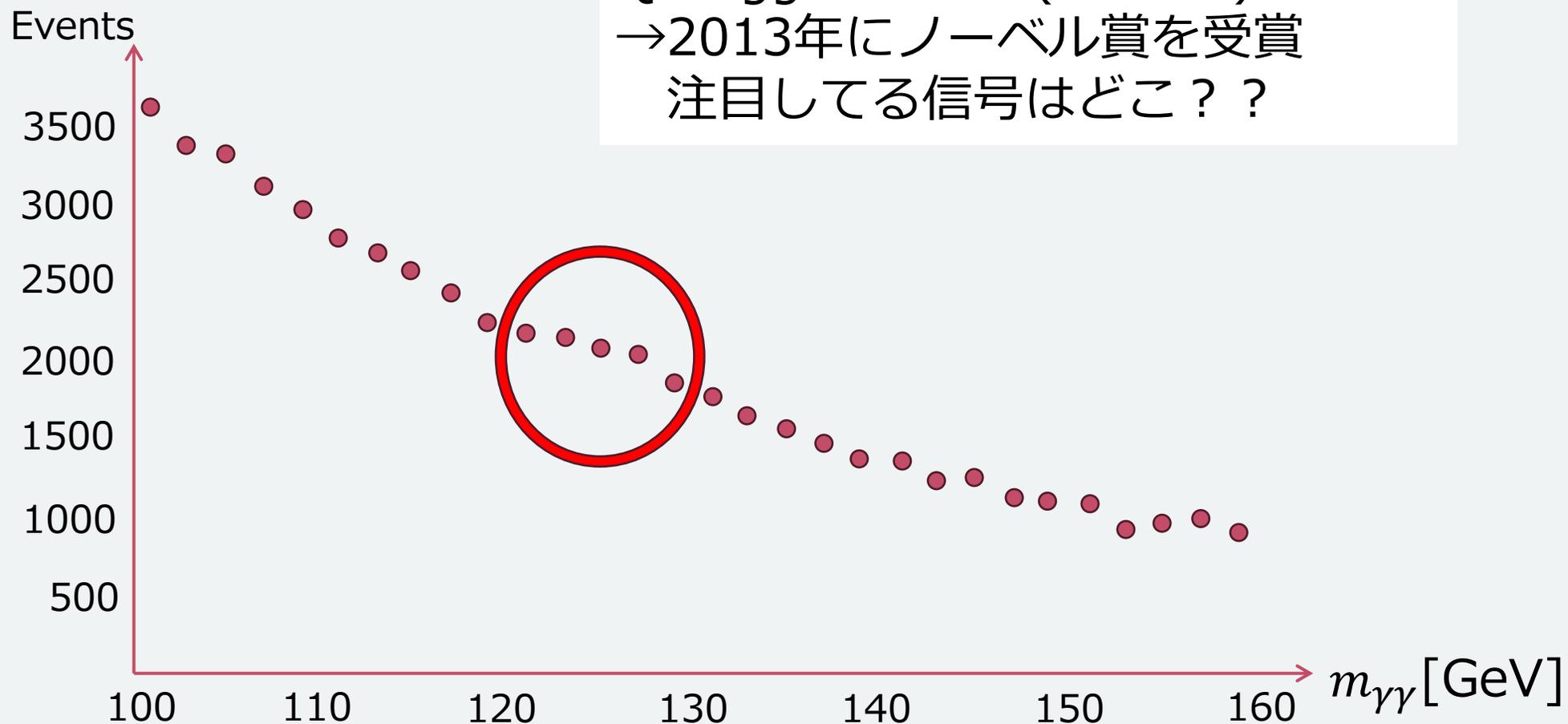
- 粒子をすごい加速して衝突させる実験
  - 大きなエネルギーで破壊！！
  - 残骸を検出！！
  - **反応を解析！！**

# 解析

- 注目したい反応だけを見たい！！
- バックグラウンド(関係のない信号)と衝突でできた信号を分離
- 衝突でできた信号から注目してる信号を取得

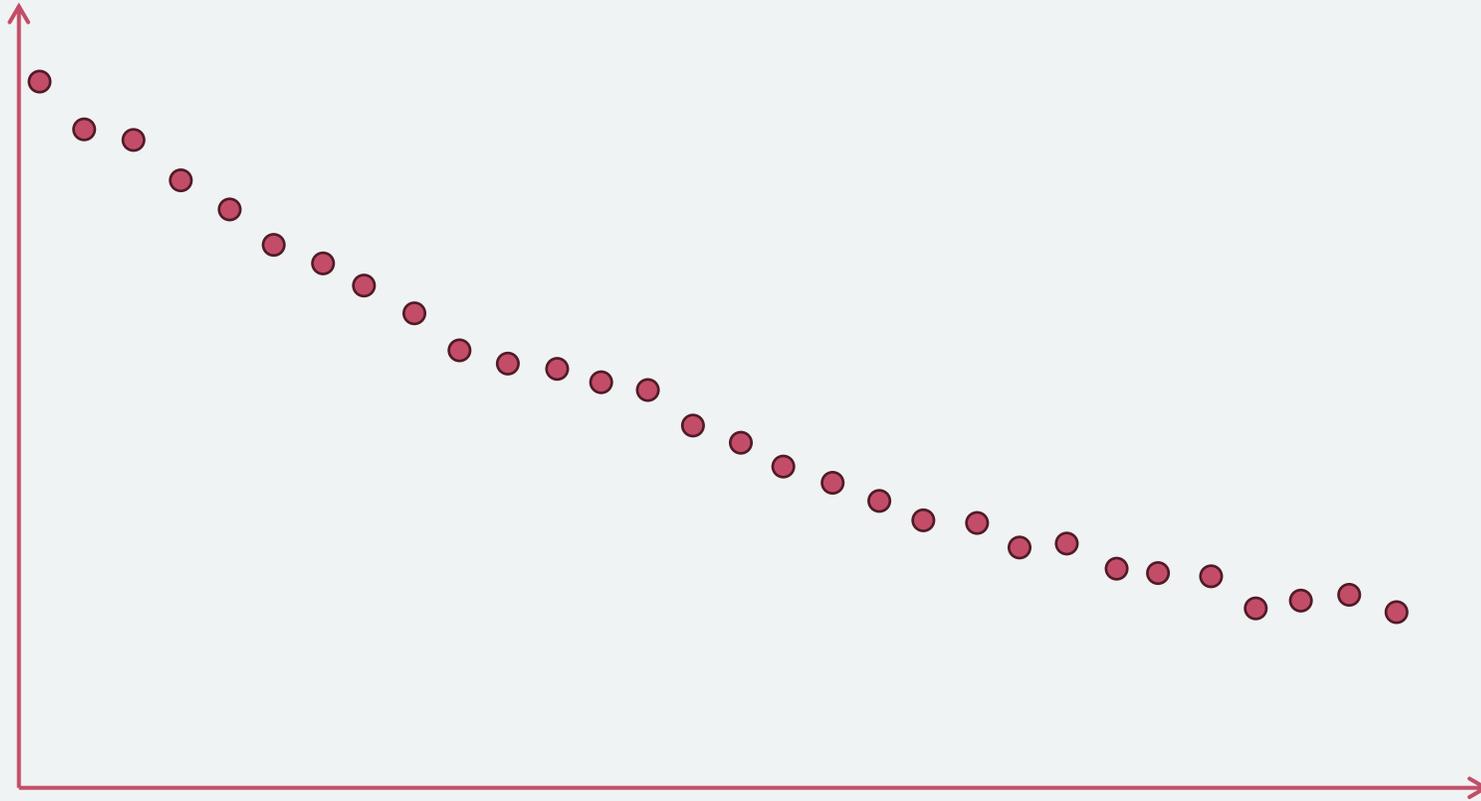
# 解析

Q. Higgs粒子発見(2008年)の論文  
→2013年にノーベル賞を受賞  
注目してる信号はどこ??



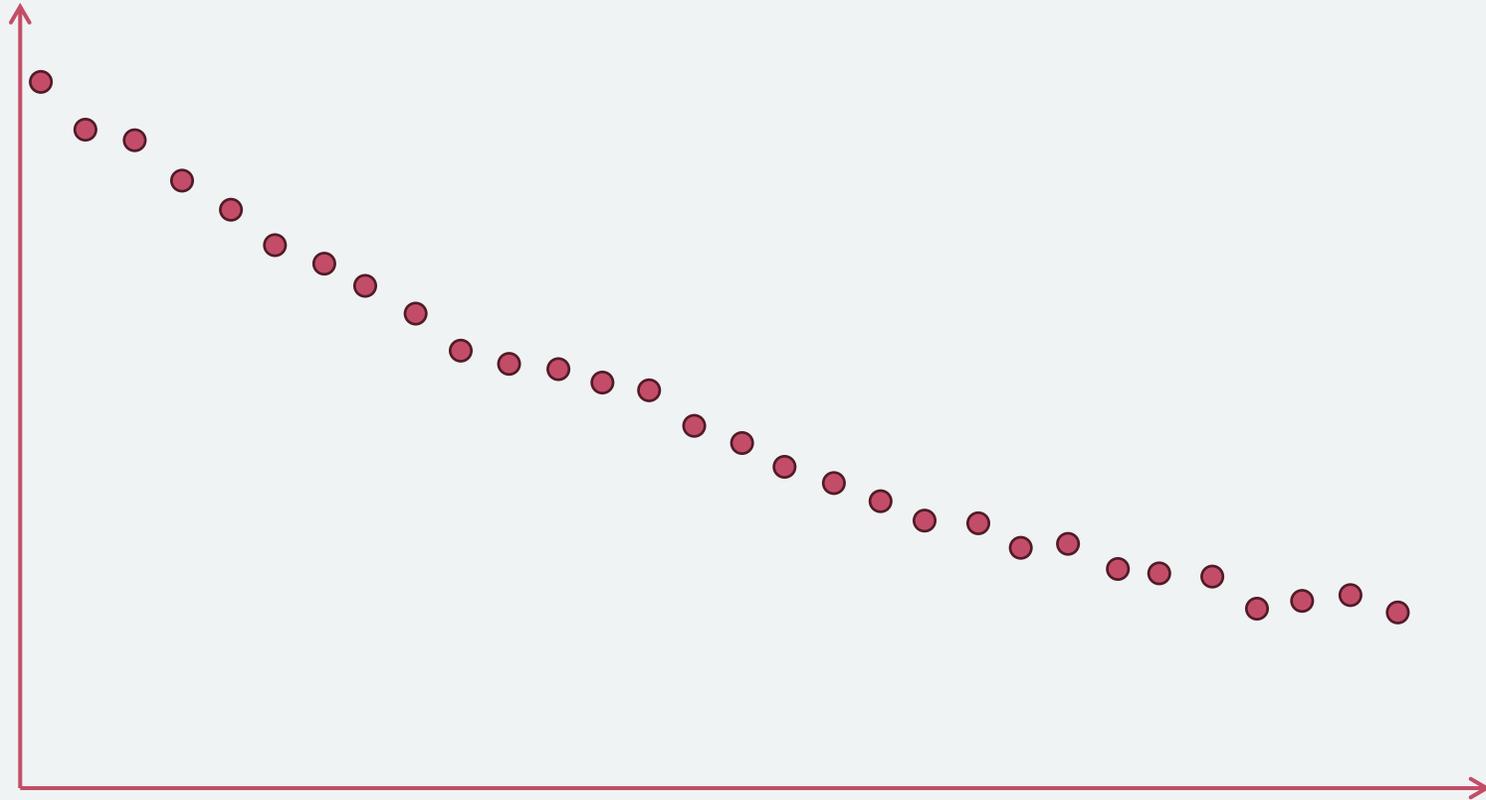
出典: G. Aad et al. (2008). "The ATLAS Experiment at the CERN Large Hadron Collider"

# 解析



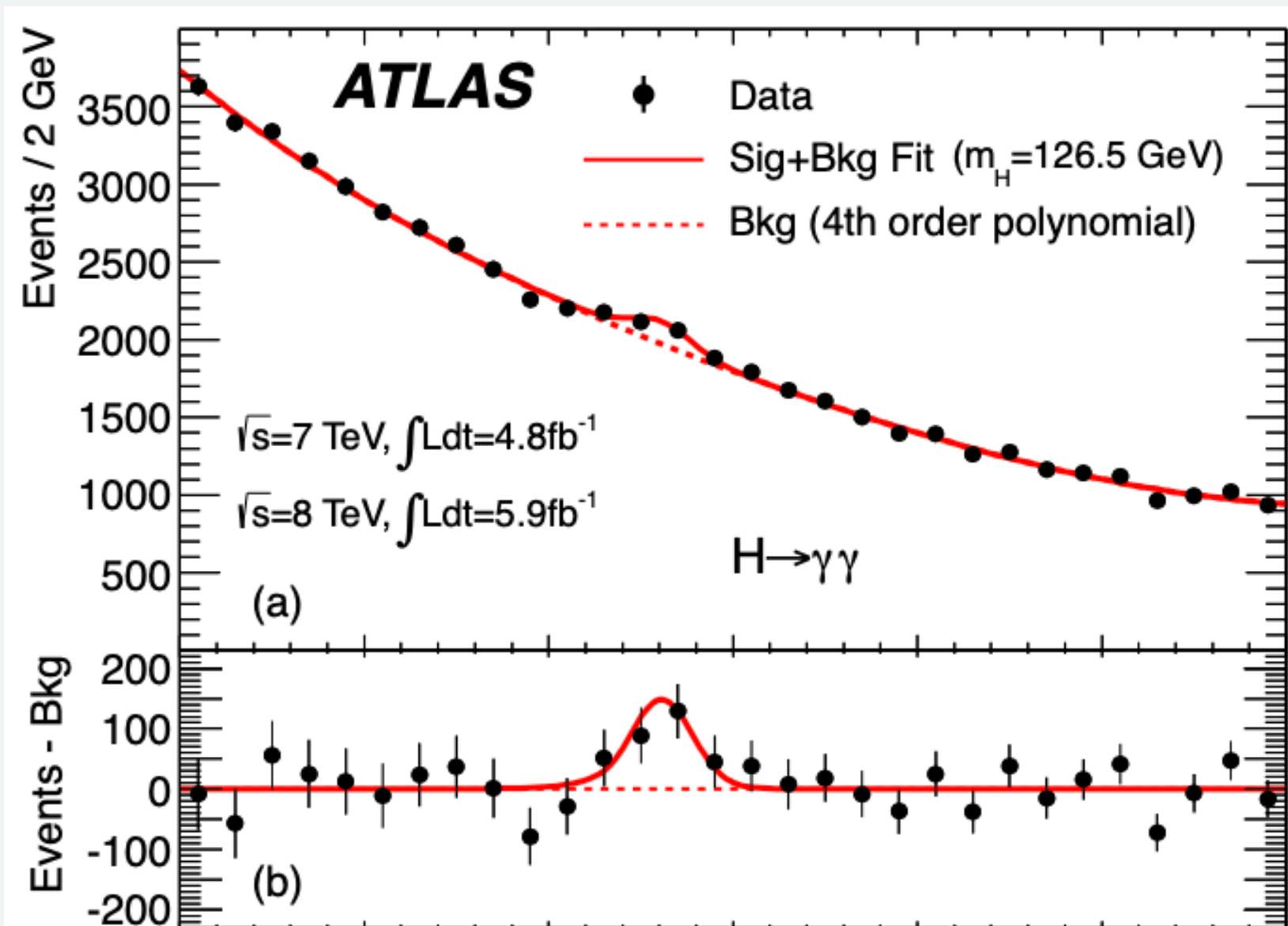
出典: G. Aad et al. (2008). "The ATLAS Experiment at the CERN Large Hadron Collider"

# 解析



出典: G. Aad et al. (2008). "The ATLAS Experiment at the CERN Large Hadron Collider"

# 解析



出典: G. Aad et al. (2008). "The ATLAS Experiment at the CERN Large Hadron Collider"

# 解析

- 衝突の頻度→1秒あたり数千万~数億回
- 検出器の回路で上の事象をカット
- あらかじめROOTやGeant4でシミュレーション
- ↑の結果とバックグラウンド関数で、  
実際に得た信号をフィッティング
- 解析を行う機械(計算機)の発展

# まとめ 高エネルギー加速器実験

- 粒子をすごい加速して衝突させる実験
  - 大きなエネルギーで破壊！！
  - 残骸を検出！！
  - 反応を解析！！

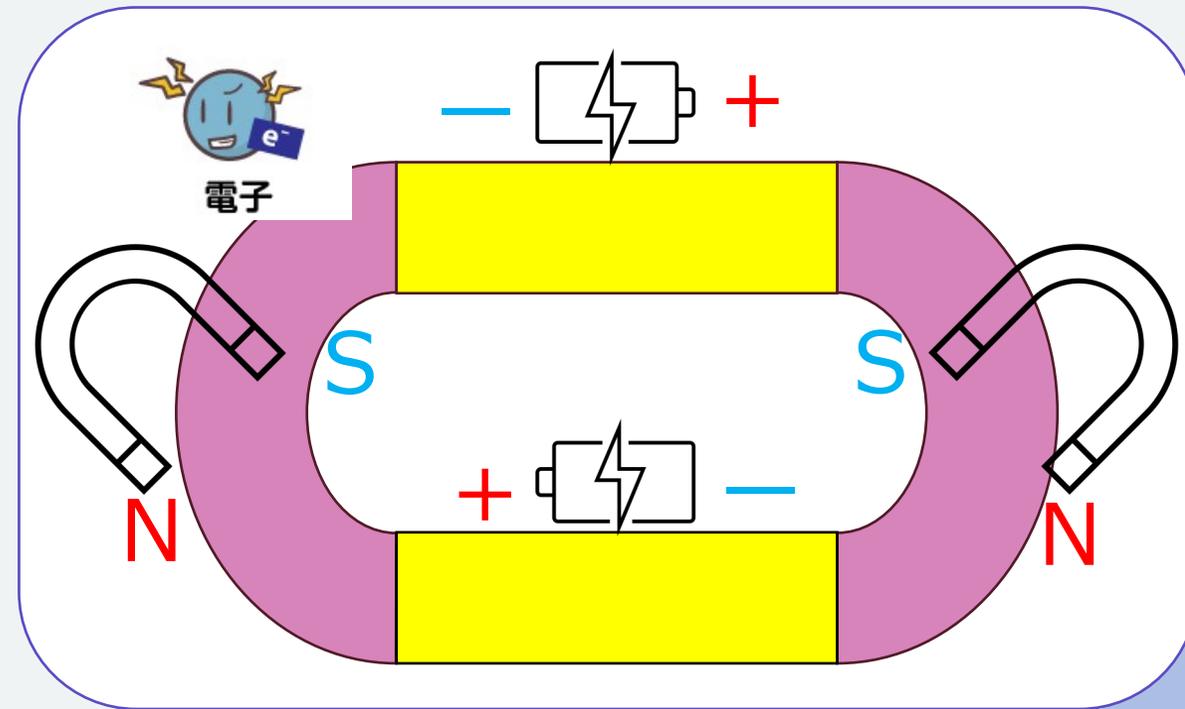
# まとめ 高エネルギー加速器実験

• 粒子をすごい加速して衝突させる実験

→ 大きなエネルギーで破壊！！

→ 残骸を検出！！

→ 反応を解析！！



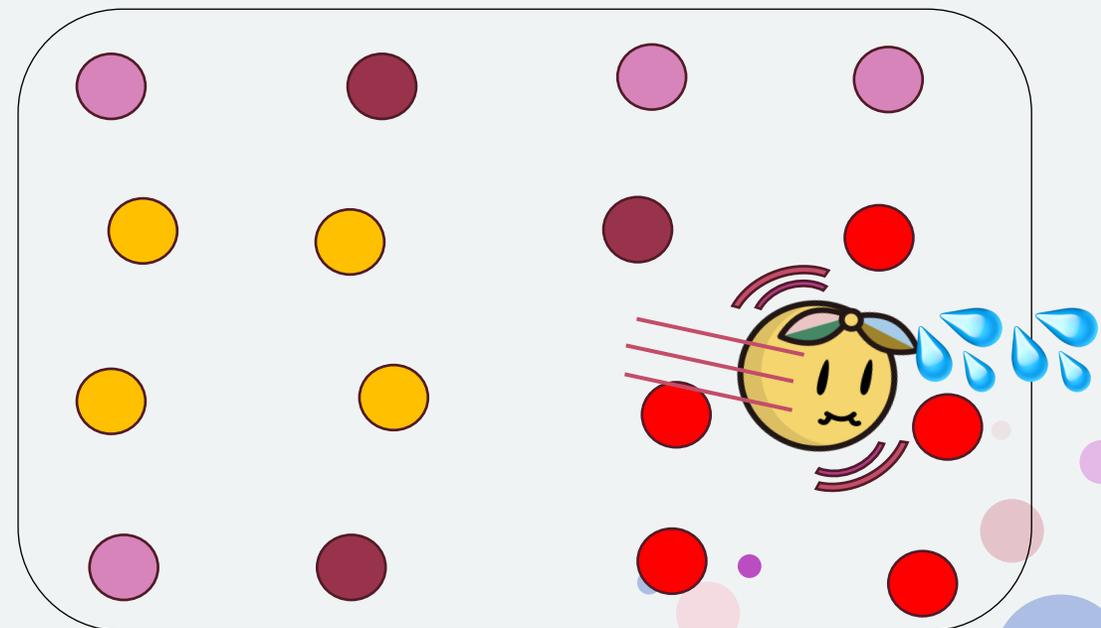
# まとめ 高エネルギー加速器実験

• 粒子をすごい加速して衝突させる実験

→ 大きなエネルギーで破壊！！

→ **残骸を検出！！**

→ 反応を解析！！



# まとめ 高エネルギー加速器実験

- 粒子をすごい加速して衝突させる実験
  - 大きなエネルギーで破壊！！
  - 残骸を検出！！
  - 反応を解析！！

# おまけ 高エネルギー加速器実験

- 粒子をすごい加速して衝突させる実験
  - 大きなエネルギーで破壊！！創造！！
  - 残骸を検出！！
  - 反応を解析！！

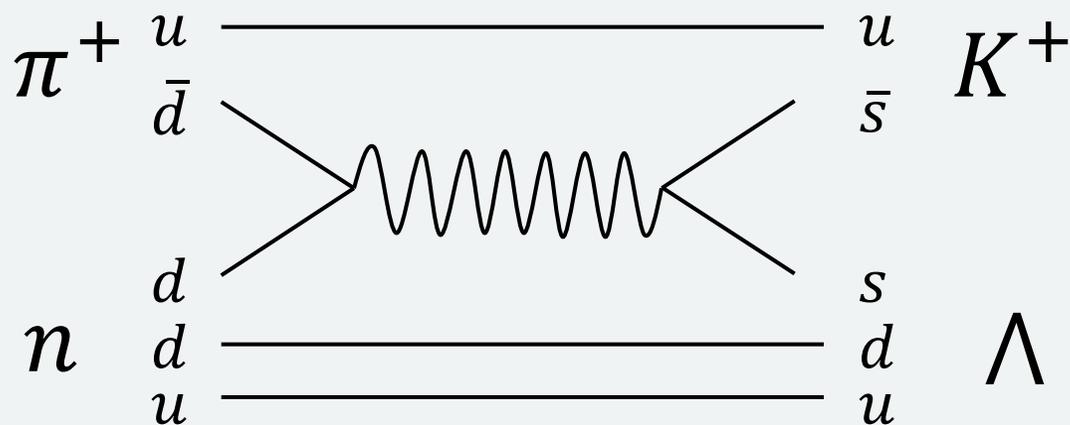
# おまけ 高エネルギー加速器実験

- 粒子をすごい加速して衝突させる実験  
→ 大きなエネルギーで破壊！！創造！！



# おまけ 高エネルギー加速器実験

- 粒子をすごい加速して衝突させる実験  
→ 大きなエネルギーで破壊！！創造！！



	1世代	2世代	3世代	
電磁気力 electromagnetic	アップ クォーク	チャーム	トップ クォーク	光子 (フォトン)
強い力 strong	ダウン クォーク	ストレンジ クォーク	ボトム クォーク	グルーオン
弱い力 weak	電子	ミュー粒子	タウ粒子	ウィークボソン
	電子 ニュートリノ	ミュー ニュートリノ	タウ ニュートリノ	ヒッグス粒子 Higgs bosons
				ヒッグス粒子

# おまけ 高エネルギー加速器実験

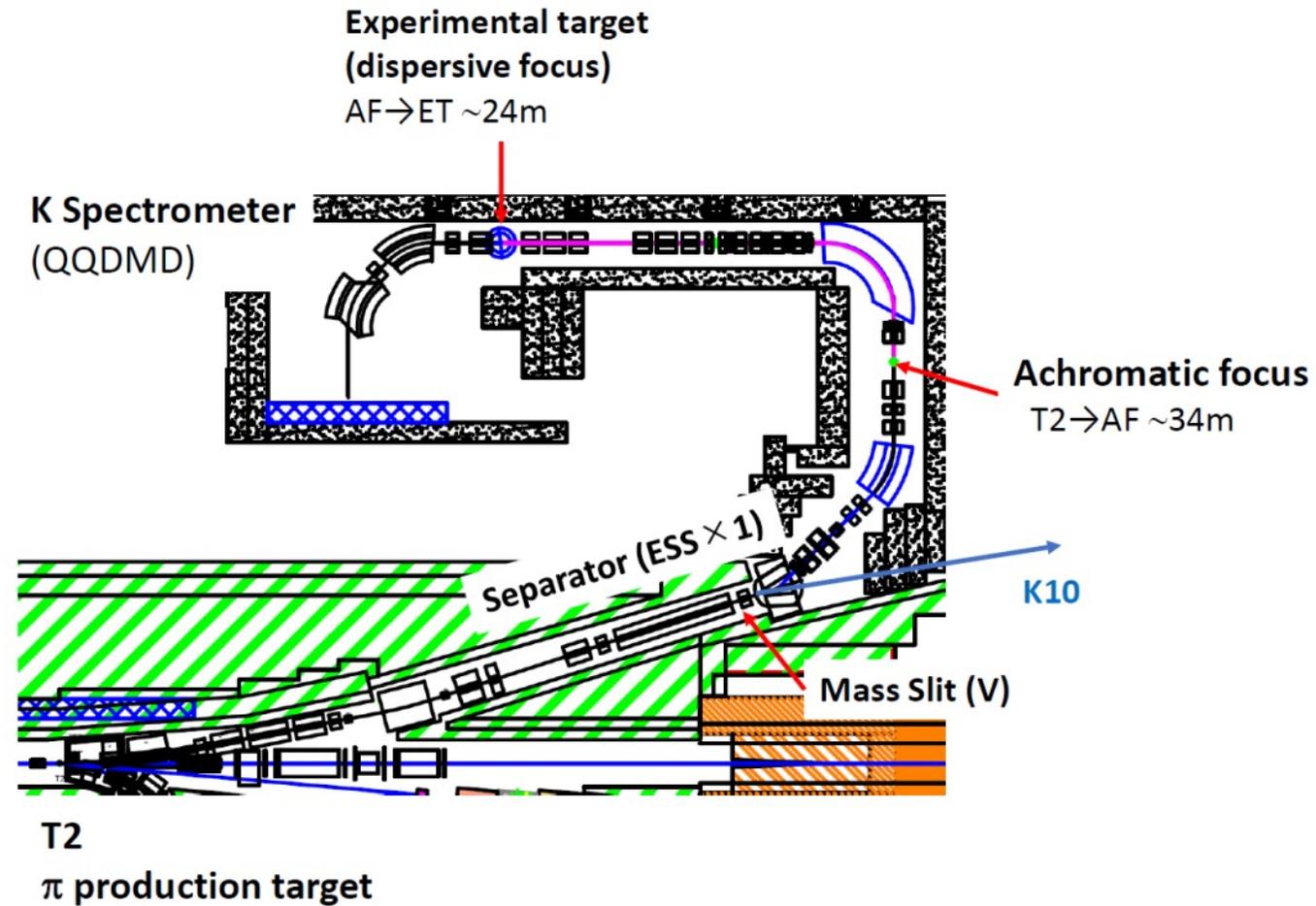
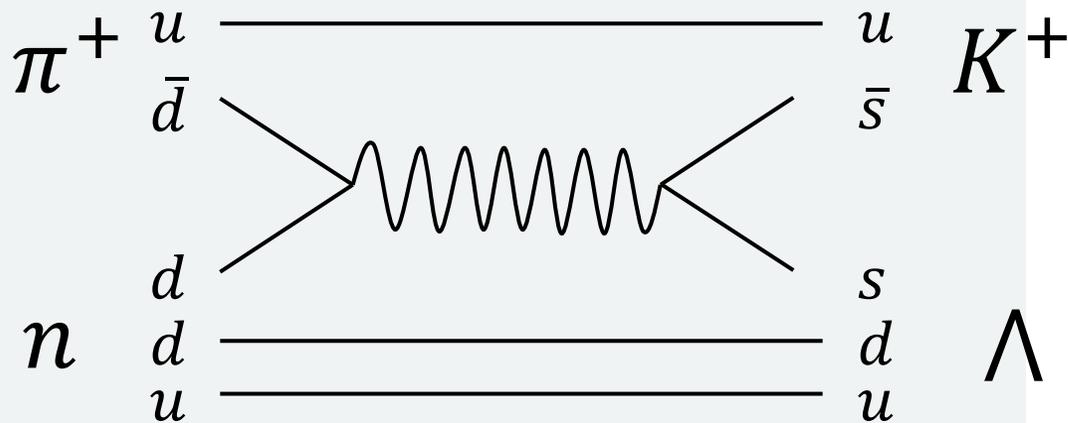


Figure 3-1: Schematic illustration of the High Intensity High Resolution beamline with a kaon spectrometer.

出典: Satoshi N. Nakamura et. al. (2021). "High precision spectroscopy of  $\Lambda$  hypernuclei with the  $(\pi^+, K^+)$  reaction at the High Intensity High Resolution beamline"

# まとめ 高エネルギー加速器実験

- 粒子をすごい加速して衝突させる実験
  - 大きなエネルギーで破壊！！+創造！！
  - 残骸を検出！！
  - 反応を解析！！