



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

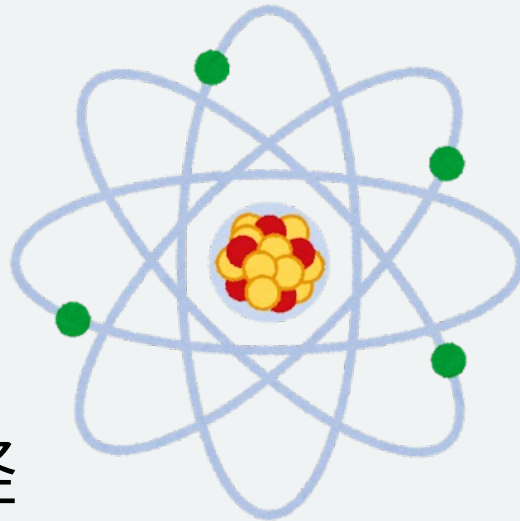
10^{10} m

1 fm

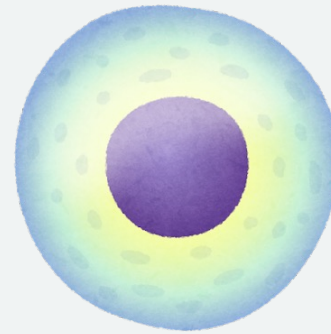
0.1 nm



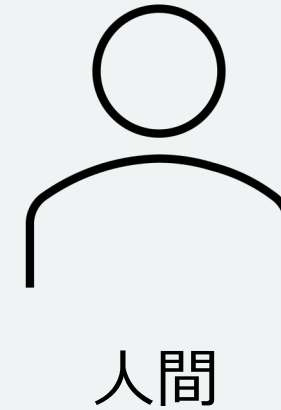
原子核の直径
陽子・中性子



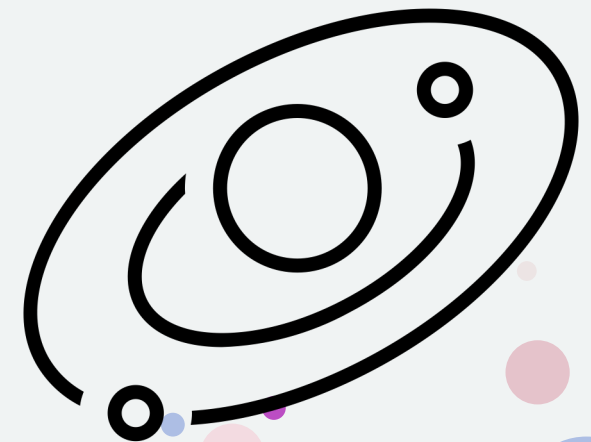
原子の直径



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

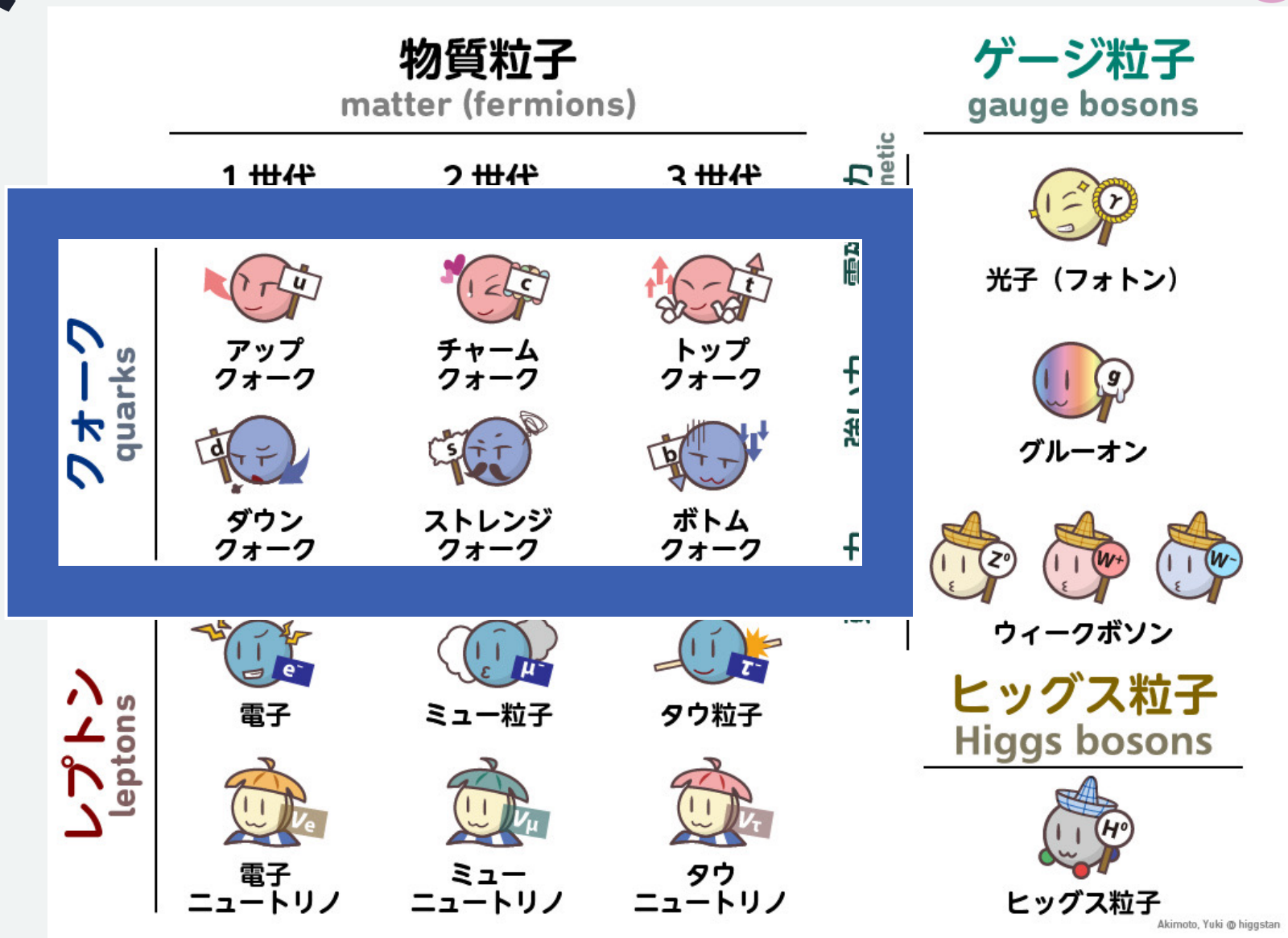
• 右の表の
16種類
が最小要素！

• …誰??

| | | 物質粒子 matter (fermions) | | | ゲージ粒子 gauge bosons | | |
|----------------|--------------|---------------------------|---------------|------|-------------------------|------------------------|---------|
| | | 1 世代 | 2 世代 | 3 世代 | 電磁気力 electromagnetic | 光子 (フォトン) | |
| 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 | | |
| | 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 | | |
| | | | | | | 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 Higgs bosons | |
| | | | | | | ヒッグス粒子 | |

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 | | |
|----------------|-------------------------|---------------------------|---------------|--------------|-----------------------|------------------------|-----------|
| | | 1 世代 | 2 世代 | 3 世代 | | | |
| クォーク quarks | 電磁気力 electromagnetic | | | | 強い力 strong | | 光子 (フォトン) |
| | | アップ クォーク | チャーム クォーク | トップ クォーク | | | グルーオン |
| | | | | | | | ウィークボソン |
| | ダウン クォーク | ストレンジ クォーク | ボトム クォーク | | | ヒッグス粒子 Higgs bosons | |
| | | | | | | | ヒッグス粒子 |
| | 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 | | | |

素粒子の紹介

• 力を媒介

どう振る舞うの？

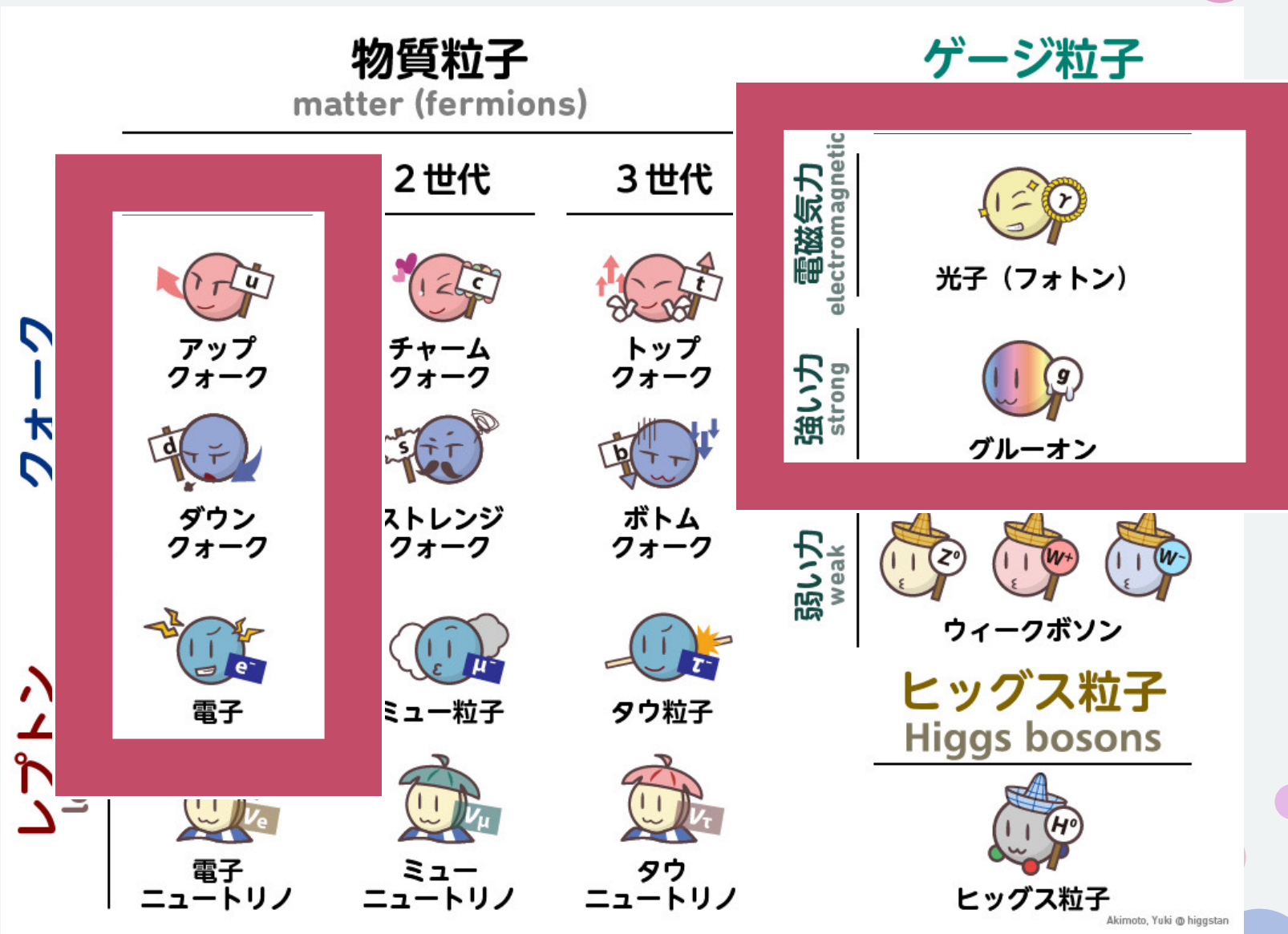
| | | 物質粒子 matter (fermions) | | |
|----------------|-----------------|---|---|---|
| | | 1 世代 | 2 世代 | 3 世代 |
| クォーク quarks | アップ クォーク |  |  |  |
| | ダウン クォーク |  |  |  |
| | レプトン leptons |  |  |  |
| | |  |  |  |
| | | 電子 ニュートリノ | ミュー ニュートリノ | タウ ニュートリノ |

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

| |
|---|
|  |
| 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 |
|  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



光子 (フォトン)



グルーオン



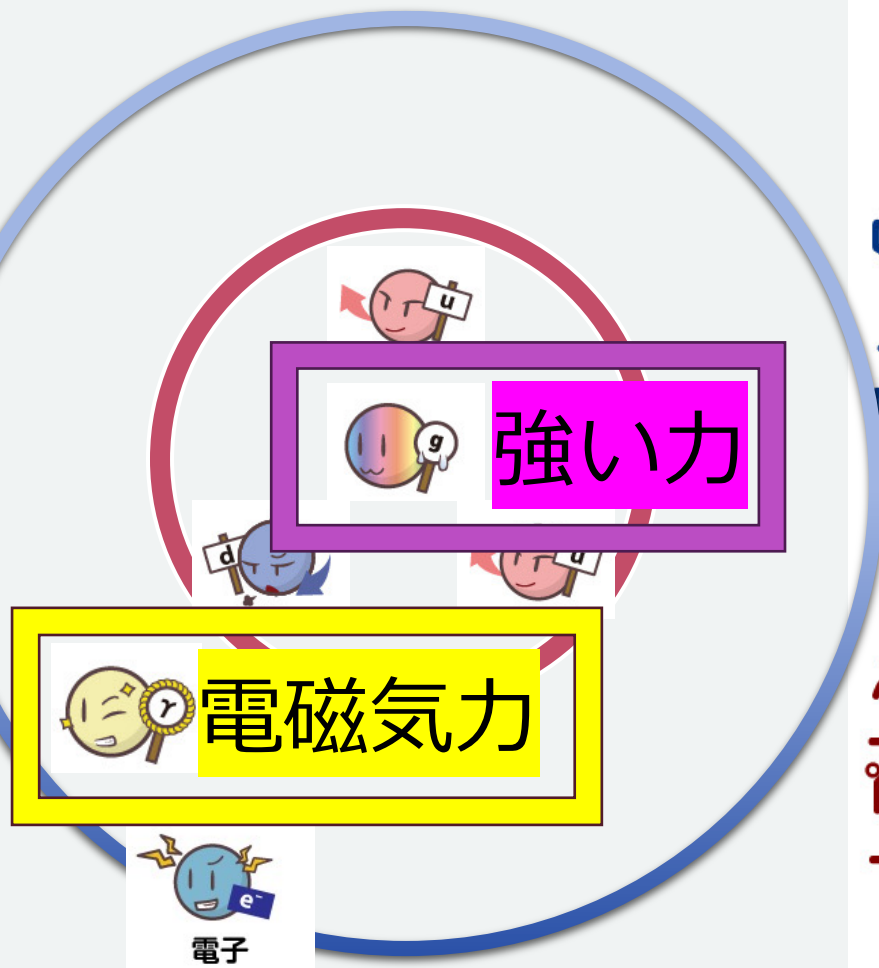
ウィークボソン

ヒッグス粒子
Higgs bosons



ヒッグス粒子

水素原子の例



物質粒子 matter (fermions)

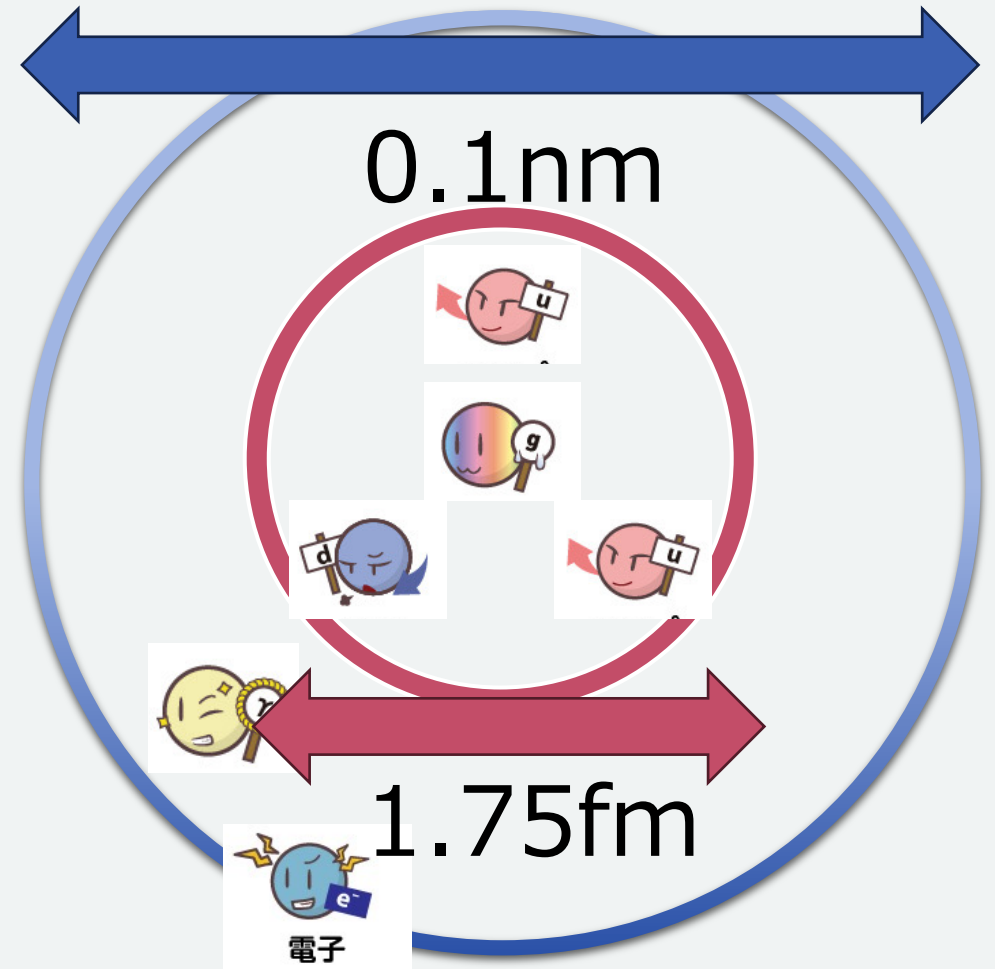
| 1 世代 | 2 世代 | 3 世代 |
|----------------------|-----------------------|----------------------|
| <p>アップ クォーク</p> | <p>チャーム クォーク</p> | <p>トップ クォーク</p> |
| <p>ダウン クォーク</p> | <p>ストレンジ クォーク</p> | <p>ボトム クォーク</p> |
| <p>電子</p> | <p>ミュー粒子</p> | <p>タウ粒子</p> |
| <p>電子 ニュートリノ</p> | <p>ミュー ニュートリノ</p> | <p>タウ 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

ゲージ粒子 gauge bosons

| |
|--|
| <p>電磁気力 electromagnetic</p> <p>光子 (フォトン)</p> |
| <p>強い力 strong</p> <p>グルーオン</p> |
| <p>弱い力 weak</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> |

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!!



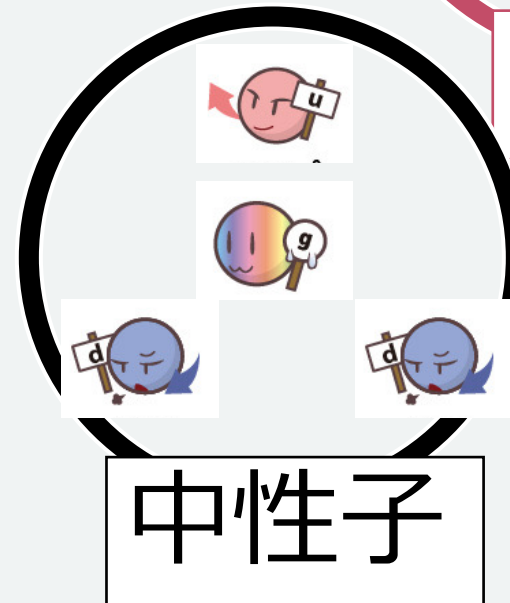
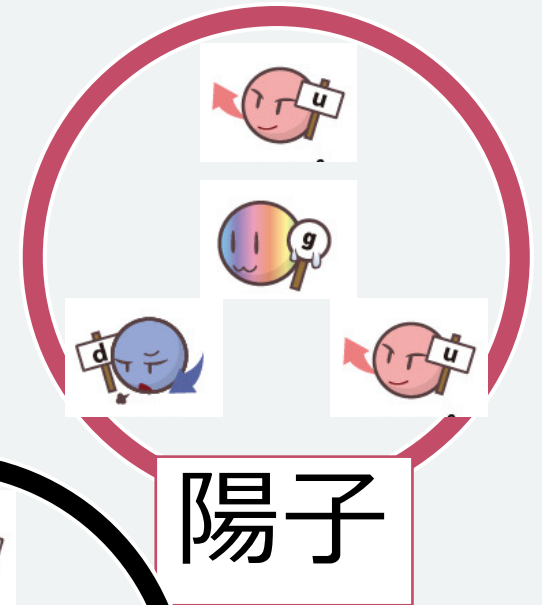
水素原子

原子核の中 ~1fm=10⁻¹⁵mの世界~

- 原子核の密度…200テラg/cm³

- 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！！

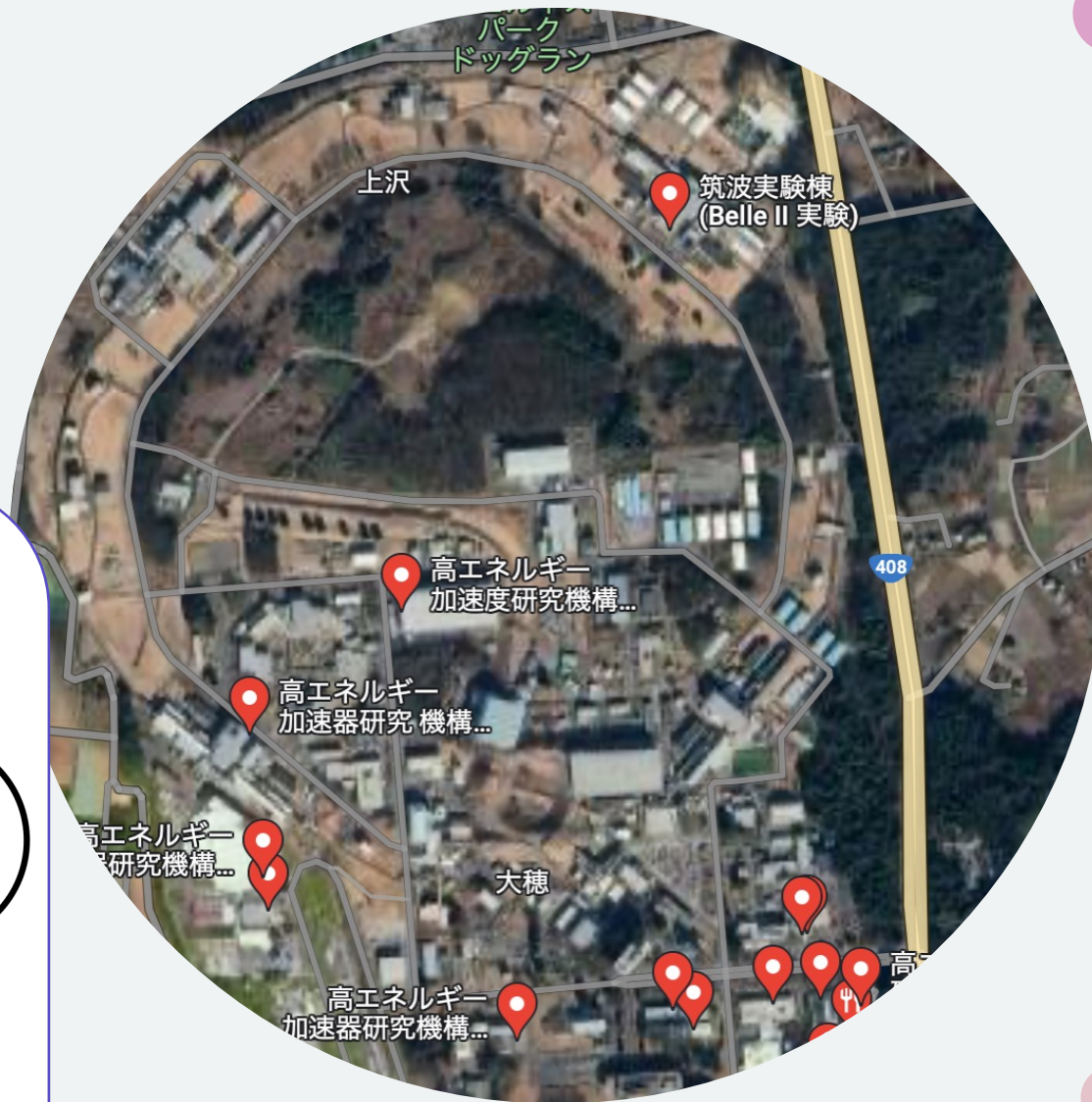
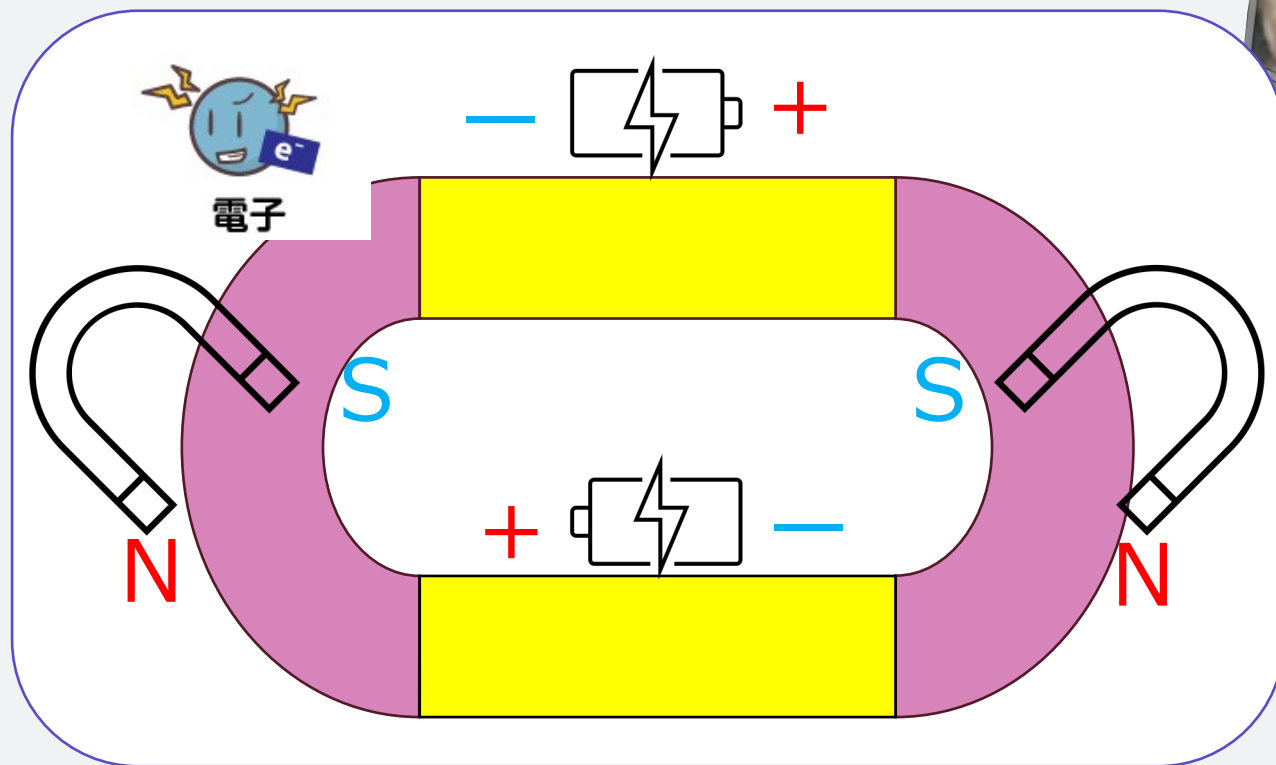
加速器



出典:Google Map(茨城県つくば市大穂付近)

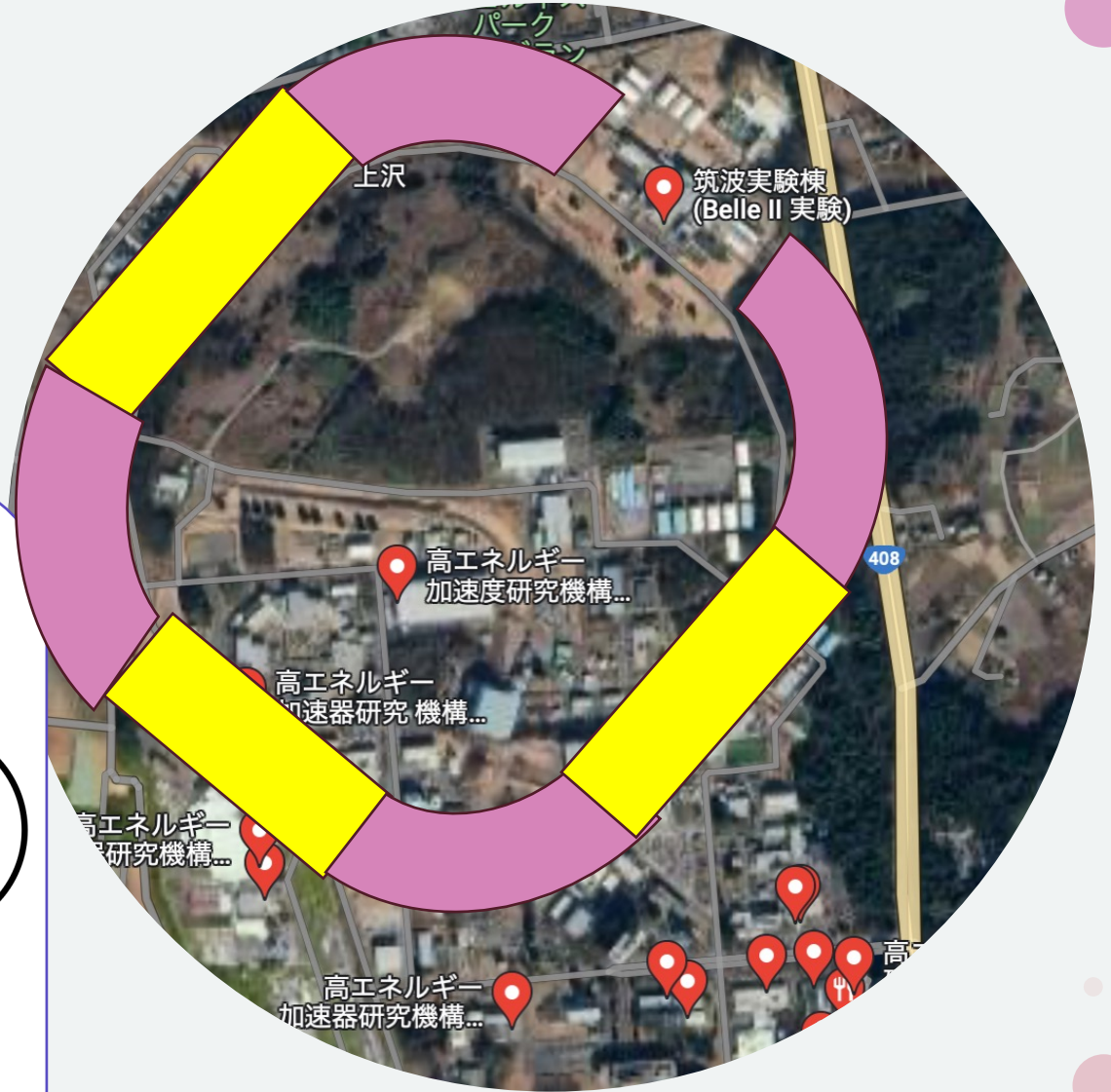
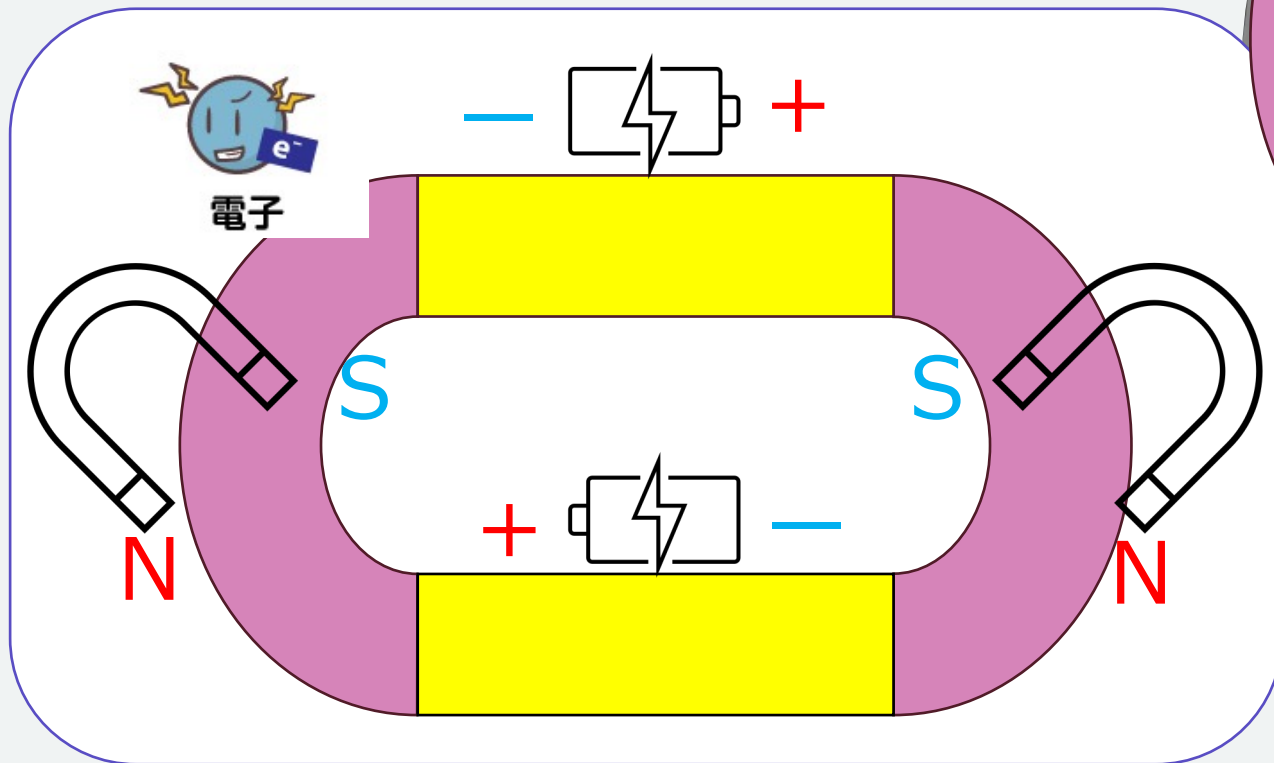
加速器の原理

1. 電場をかけて加速
2. 磁場をかけて方向転換



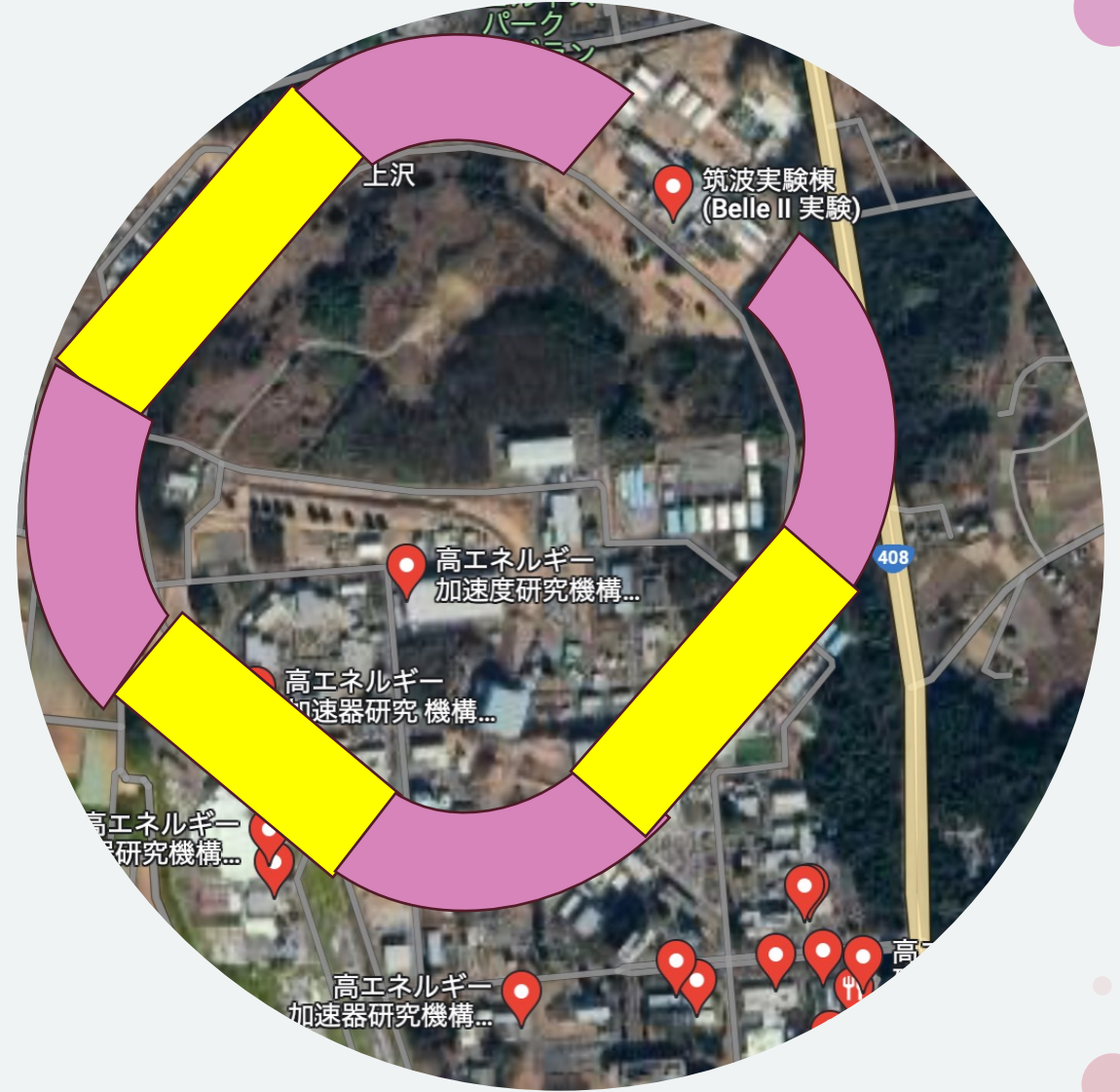
出典:Google Map(茨城県つくば市大穂付近)

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

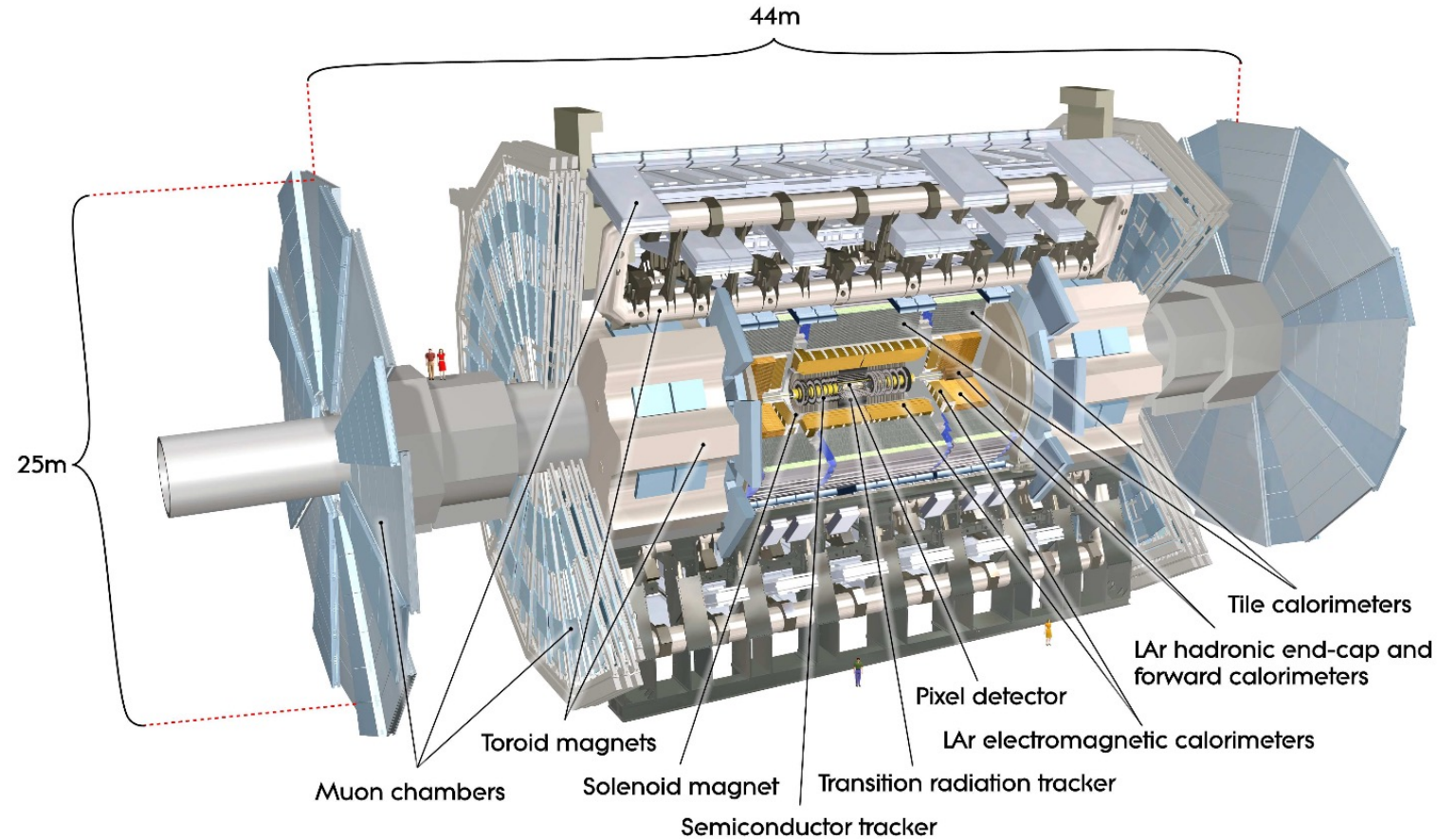


Figure 1.1: Cut-away view of the ATLAS detector. The dimensions of the detector are 25 m in height and 44 m in length. The overall weight of the detector is approximately 7000 tonnes.

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, γ)
3. ハドロンカロリメーター
(π^\pm, p, n)
4. ミューオン検出器

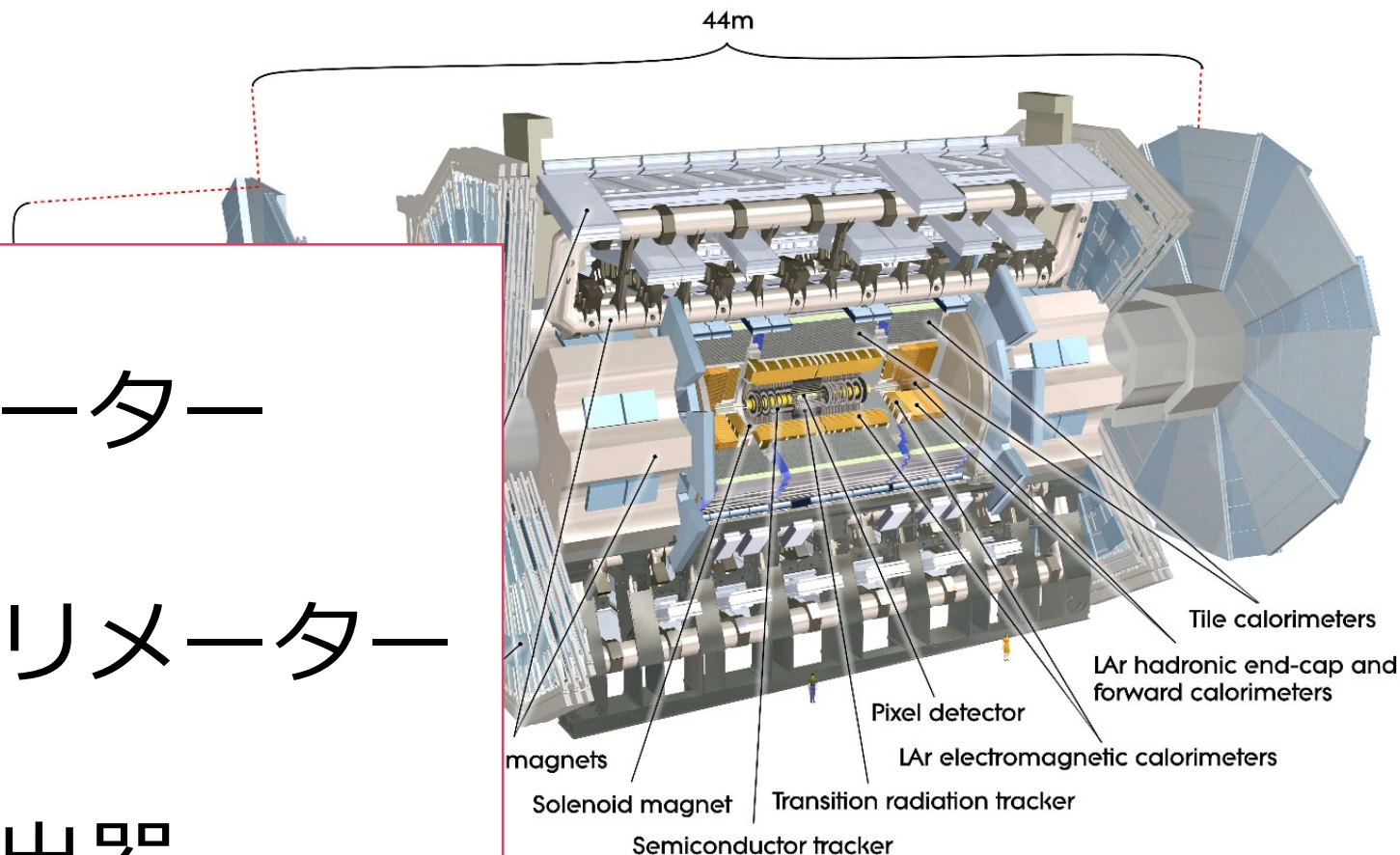


Figure 1.1: Cut-away view of the ATLAS detector. The dimensions of the detector are 25 m in height and 44 m in length. The overall weight of the detector is approximately 7000 tonnes.

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 | ----- |
| π 中間子(π^+) | 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 ² |
| π 中間子(π^+) | 140 MeV/c ² |
| 陽子 (p) | 938 MeV/c ² |

- 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 ² |
| π 中間子(π^+) | 140 MeV/c ² |
| 陽子 (p) | 938 MeV/c ² |

- 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

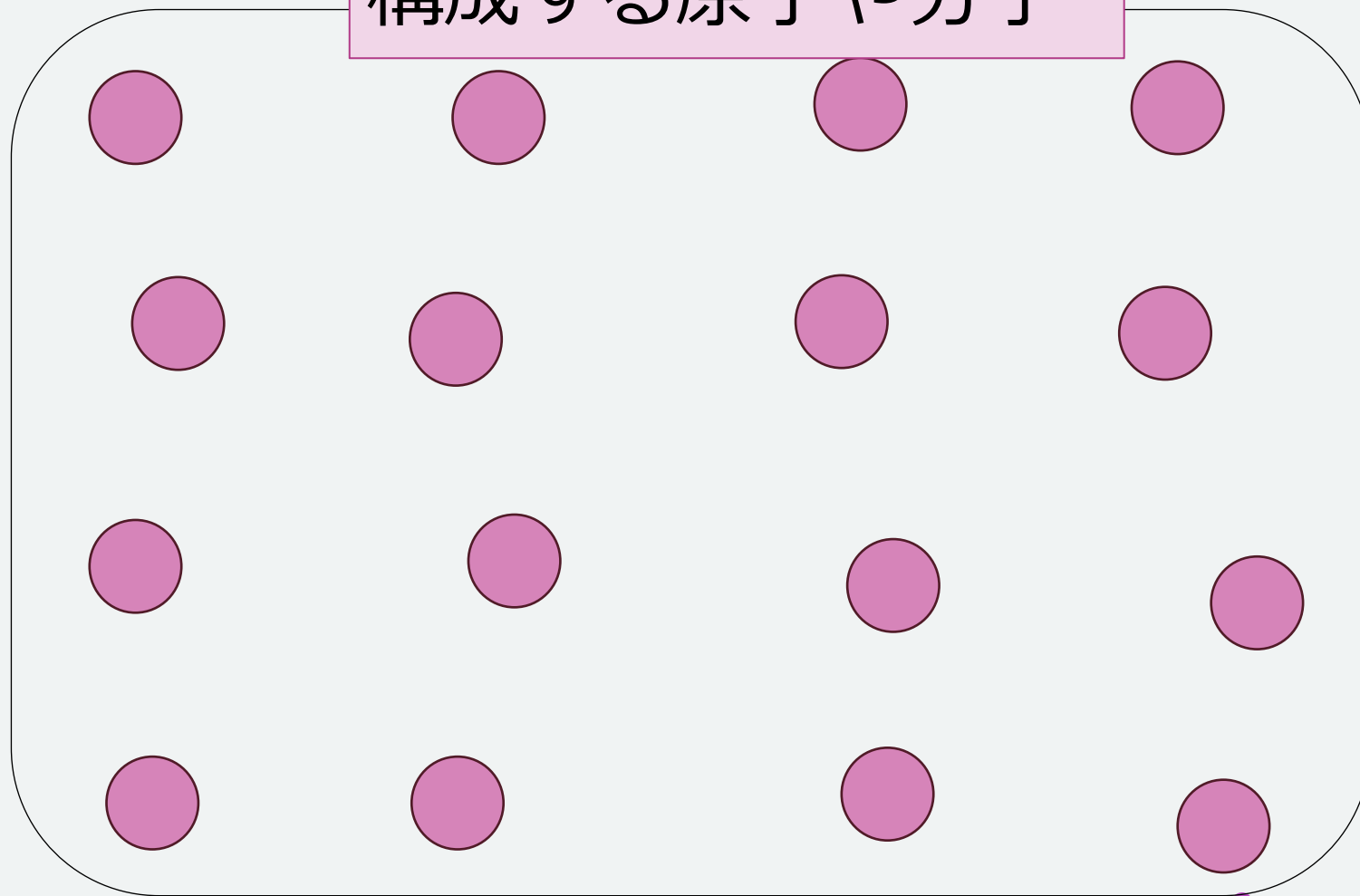
検出器の原理



検出器

検出器の原理

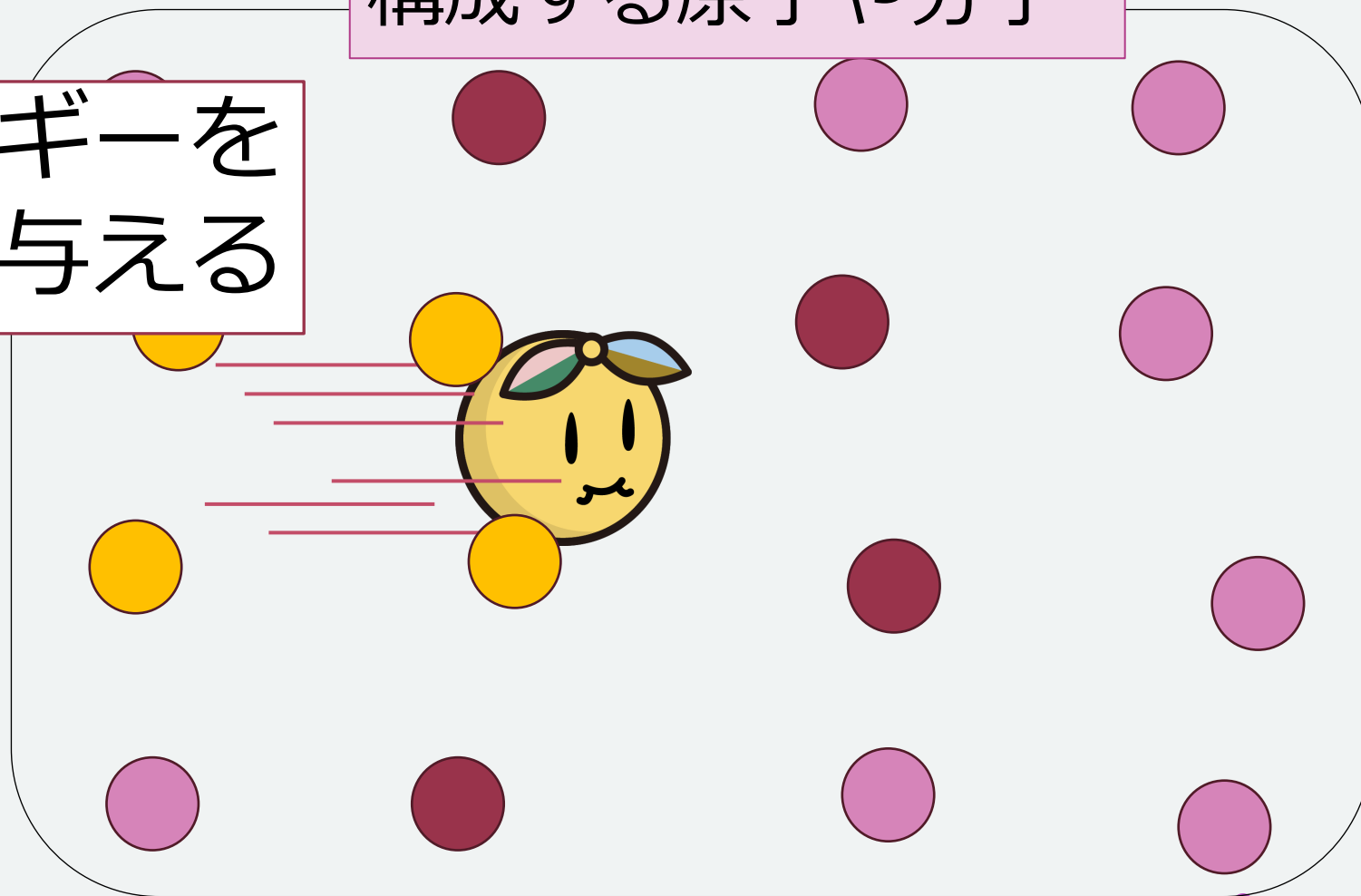
構成する原子や分子



検出器の原理

粒子のエネルギーを
原子や分子に与える

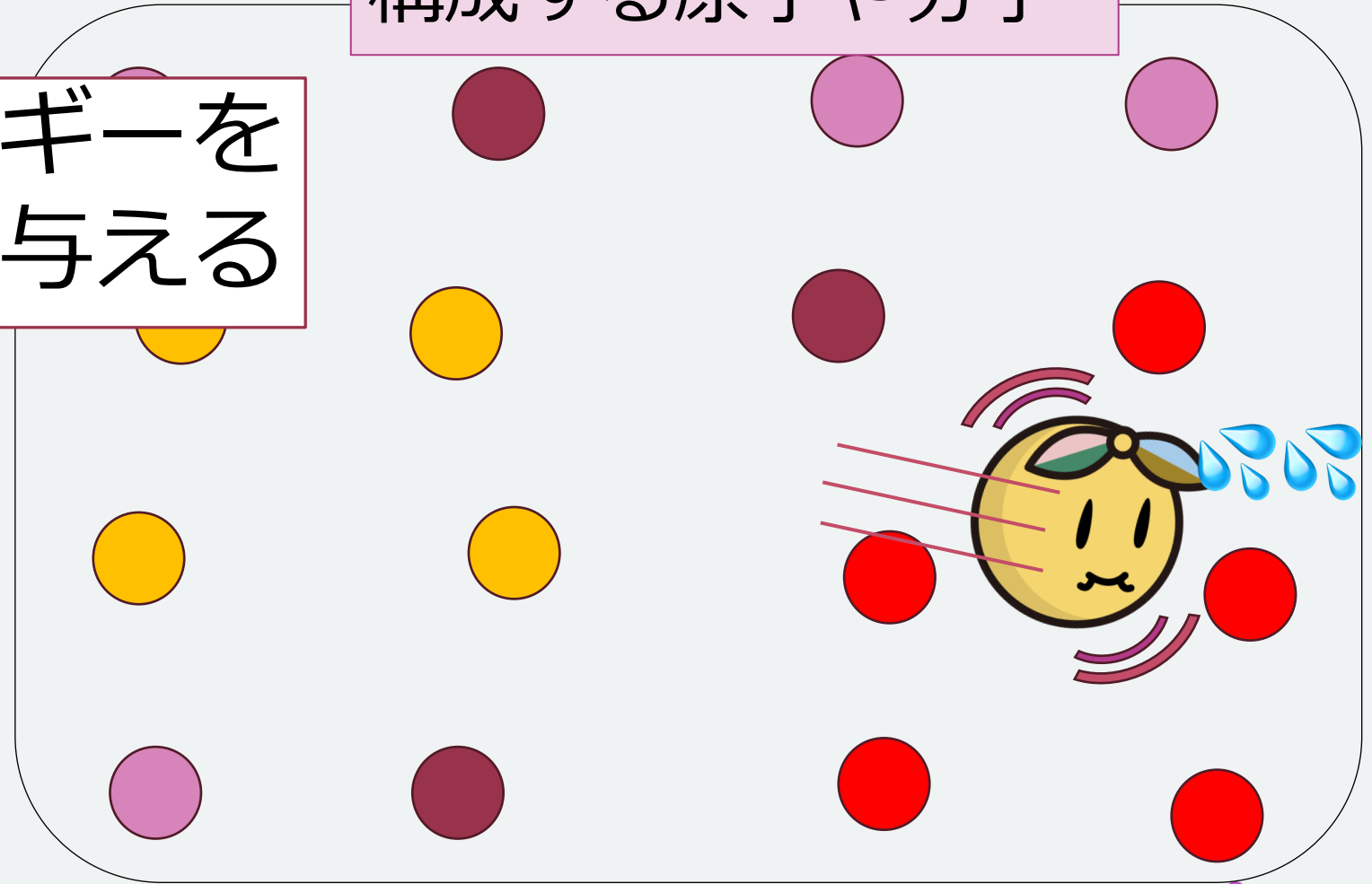
構成する原子や分子



検出器の原理

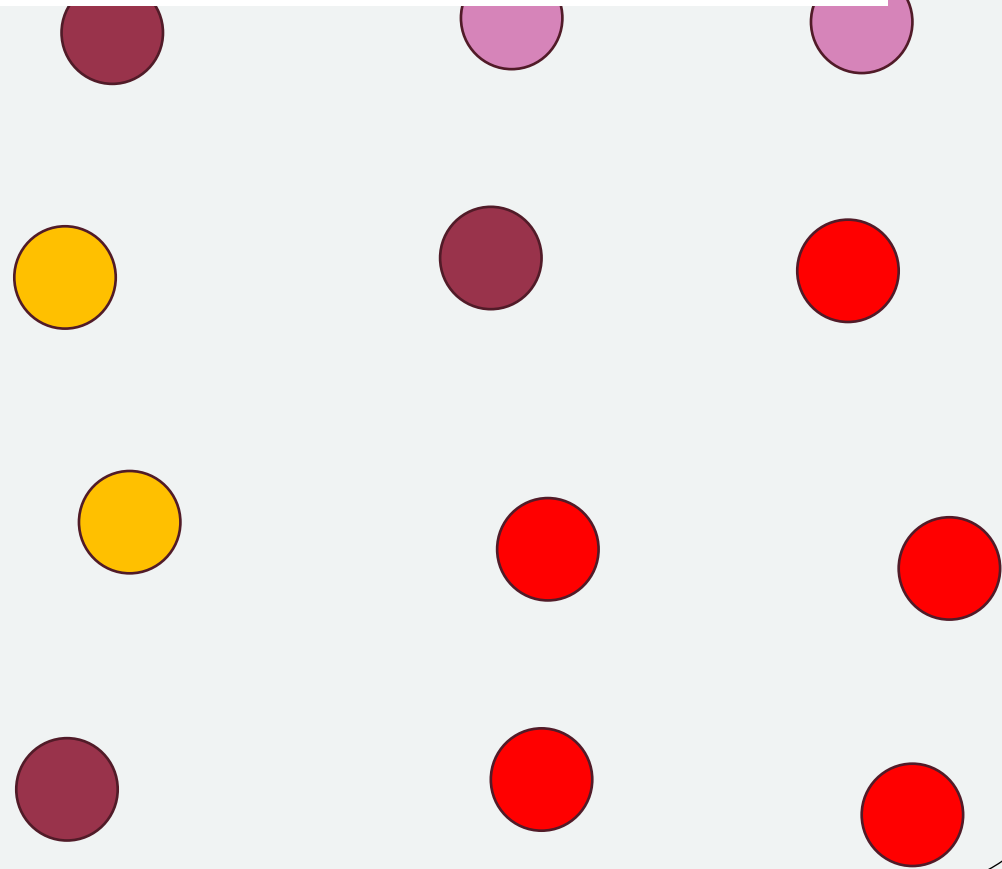
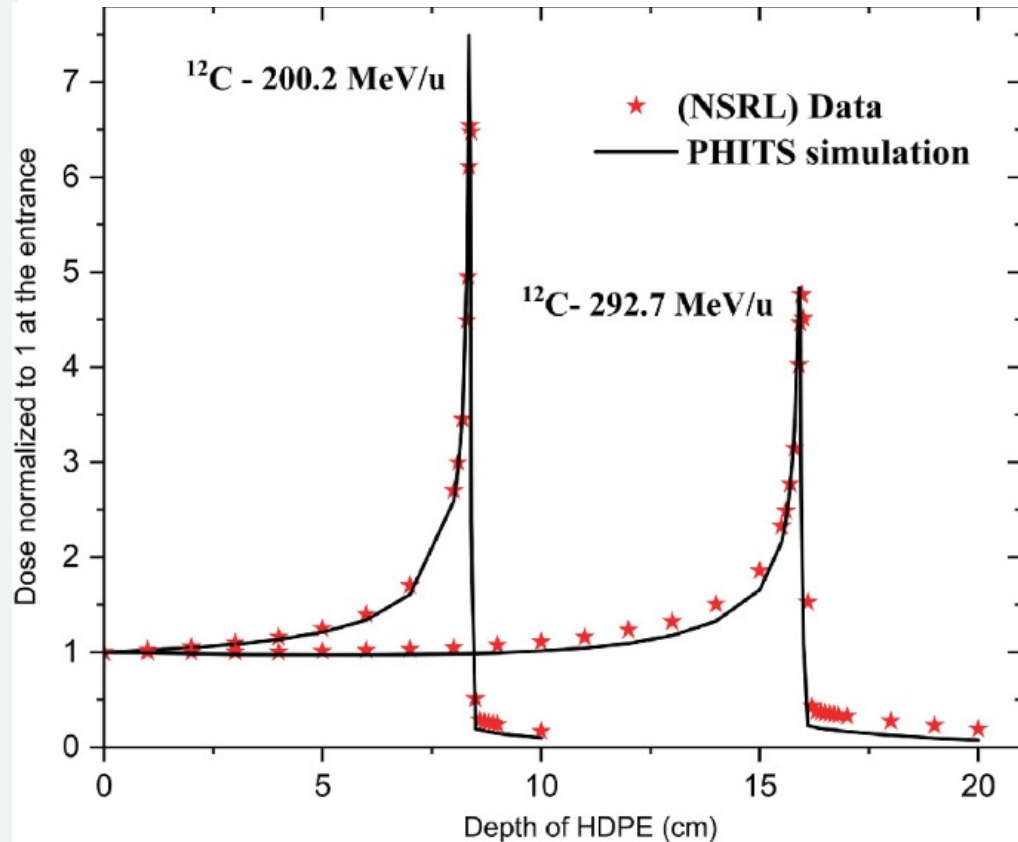
粒子のエネルギーを
原子や分子に与える

構成する原子や分子



どのようにエネルギーを失うか？

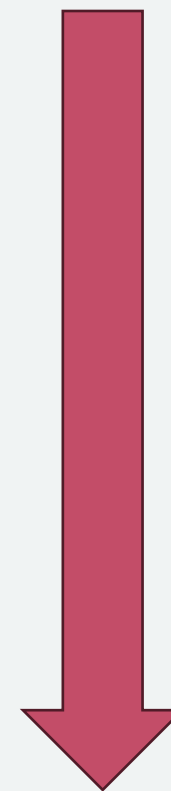
特に止まる直前にエネルギーを放出する！！



出典: El Bekkouri, H. et al. (2024). A New Study of Bragg Curve of the ^{12}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 ² |
| π 中間子(π^+) | 140 MeV/c ² |
| 陽子 (p) | 938 MeV/c ² |



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, γ)
3. ハドロンカロリメーター
(π^\pm, p, n)
4. ミューオン検出器

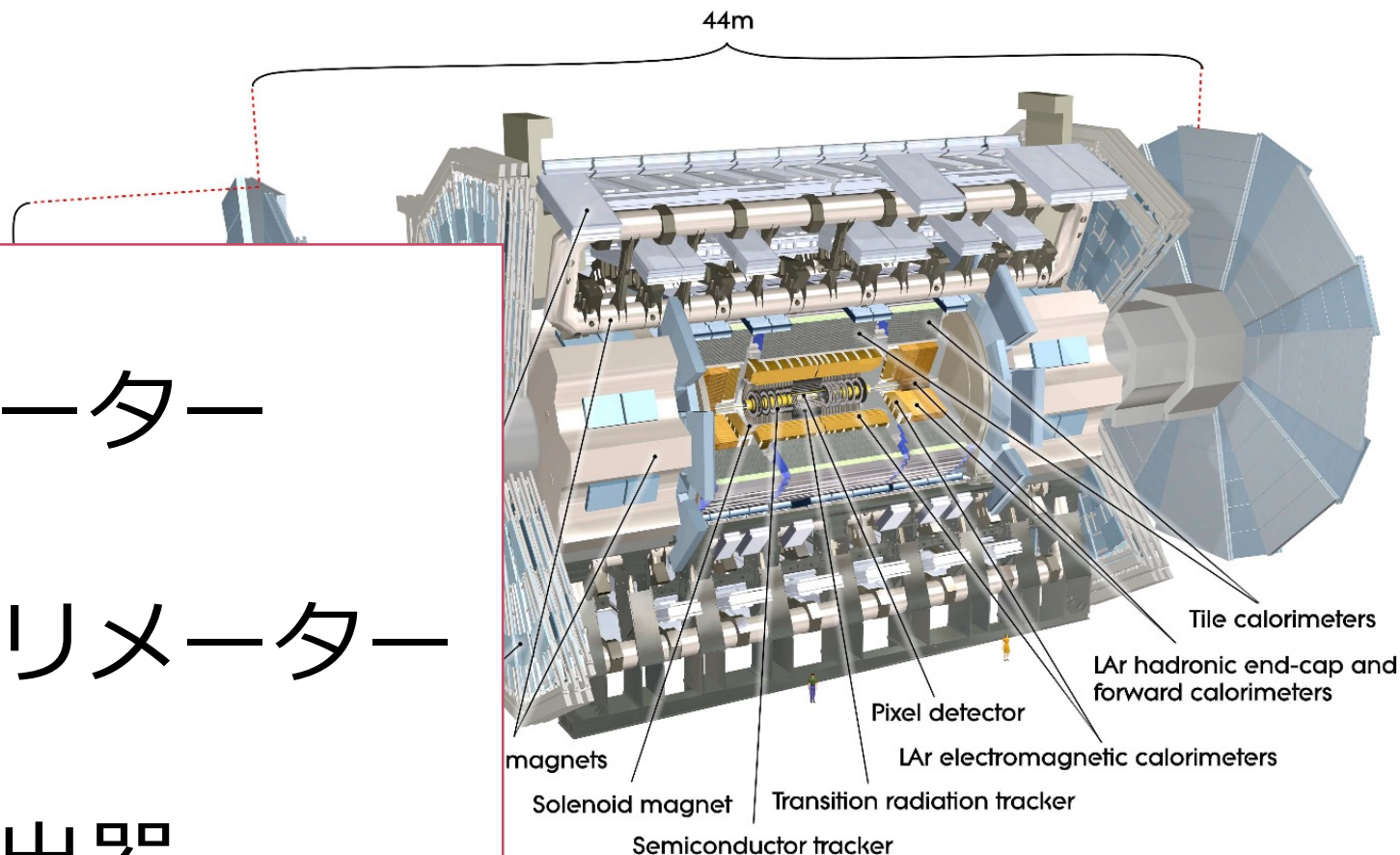


Figure 1.1: Cut-away view of the ATLAS detector. The dimensions of the detector are 25 m in height and 44 m in length. The overall weight of the detector is approximately 7000 tonnes.

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

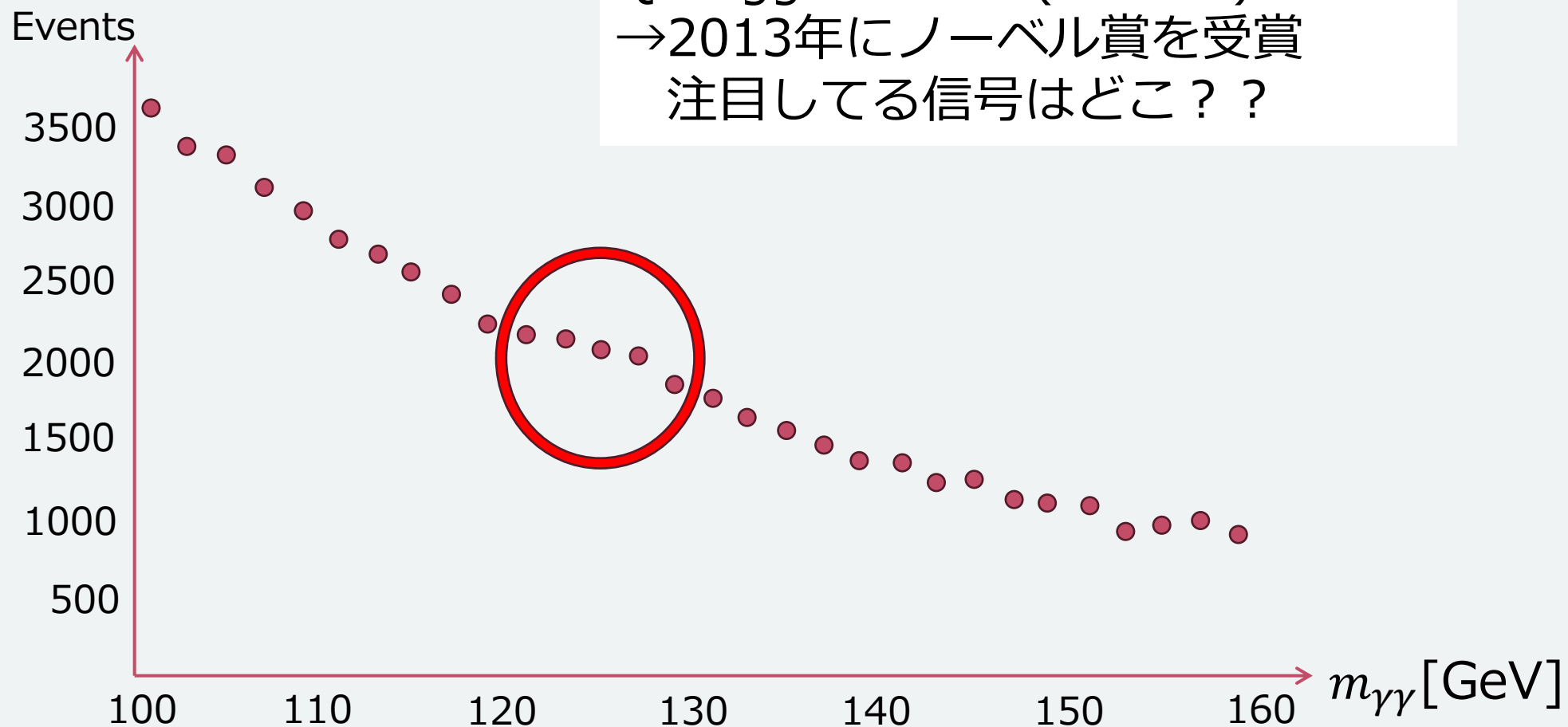
- 粒子をすごい加速して衝突させる実験
 - 大きなエネルギーで破壊！！
 - 残骸を検出！！
 - **反応を解析！！**

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

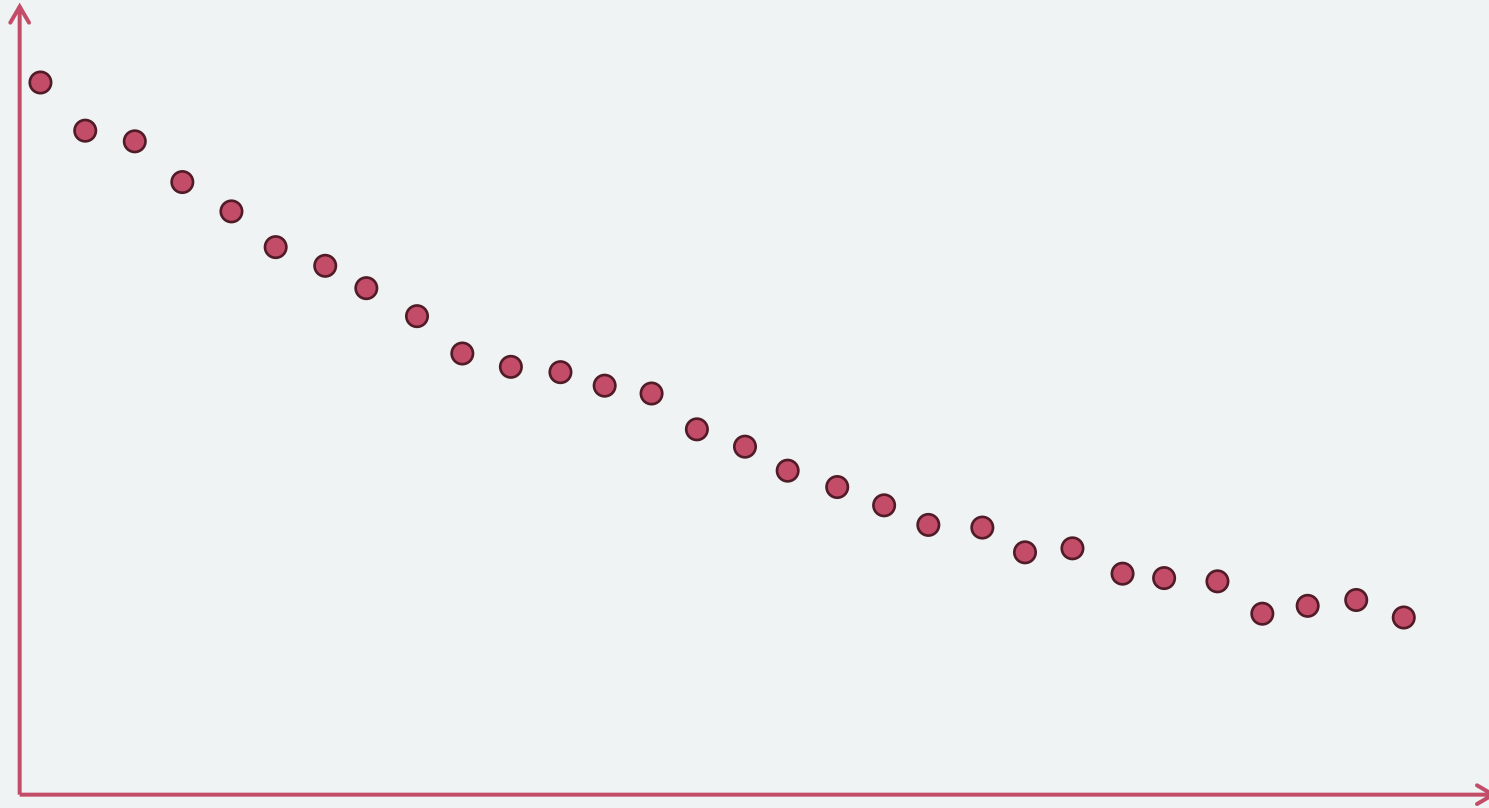
解析

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??



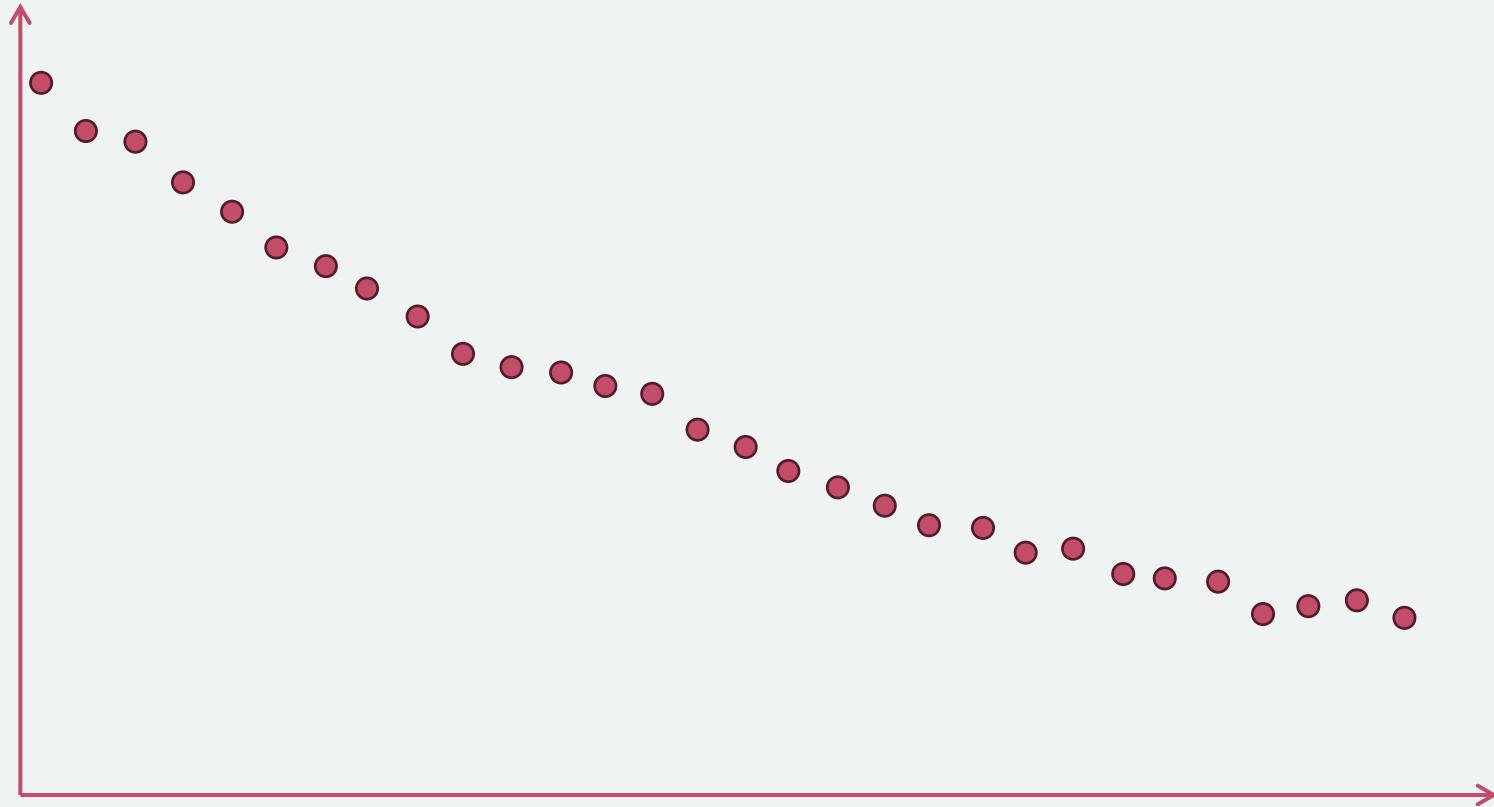
出典: G. Aad et al. (2008). "The ATLAS Experiment at the CERN Large Hadron Collider"

解析



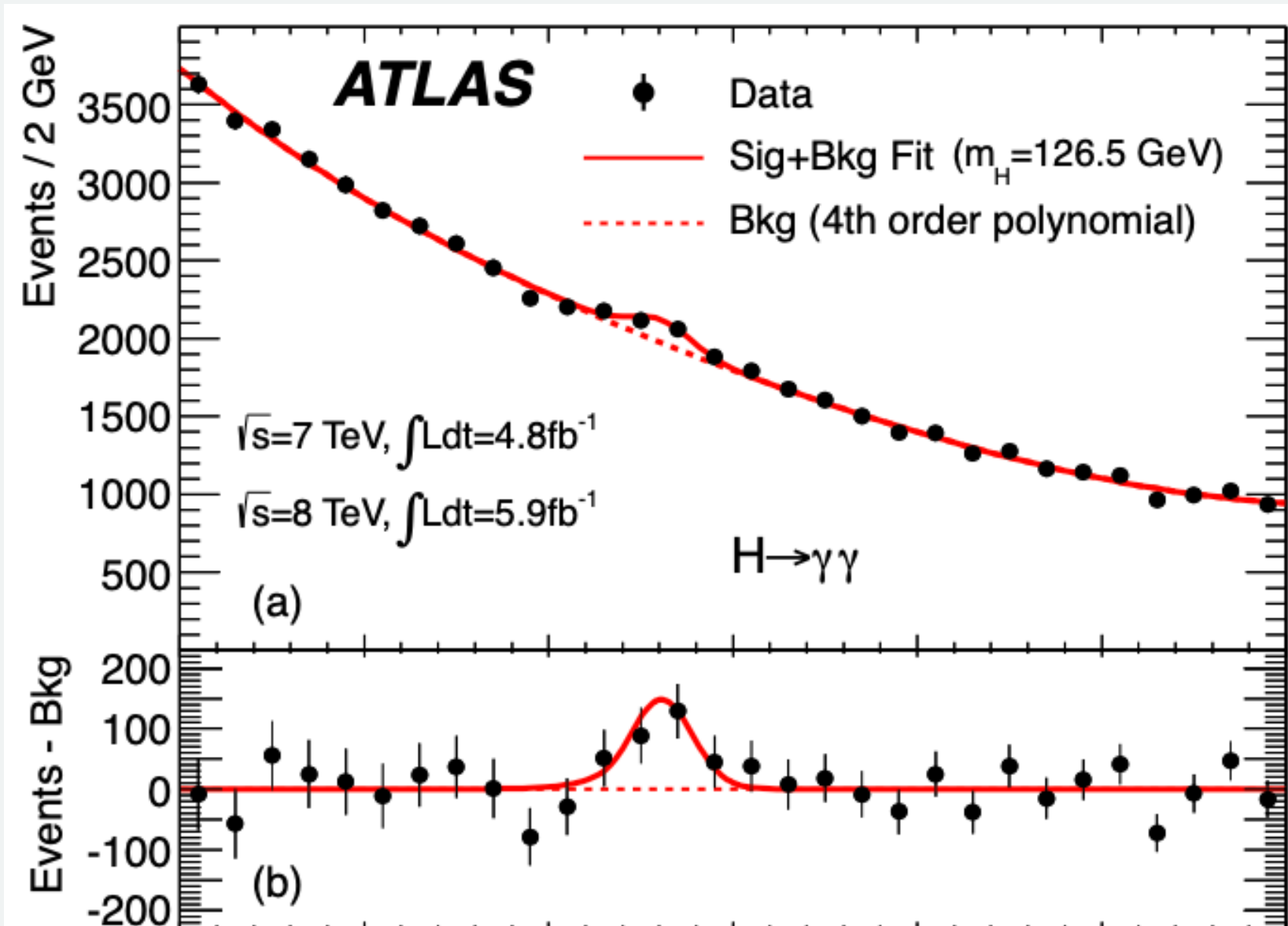
出典: G. Aad et al. (2008). "The ATLAS Experiment at the CERN Large Hadron Collider"

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！！

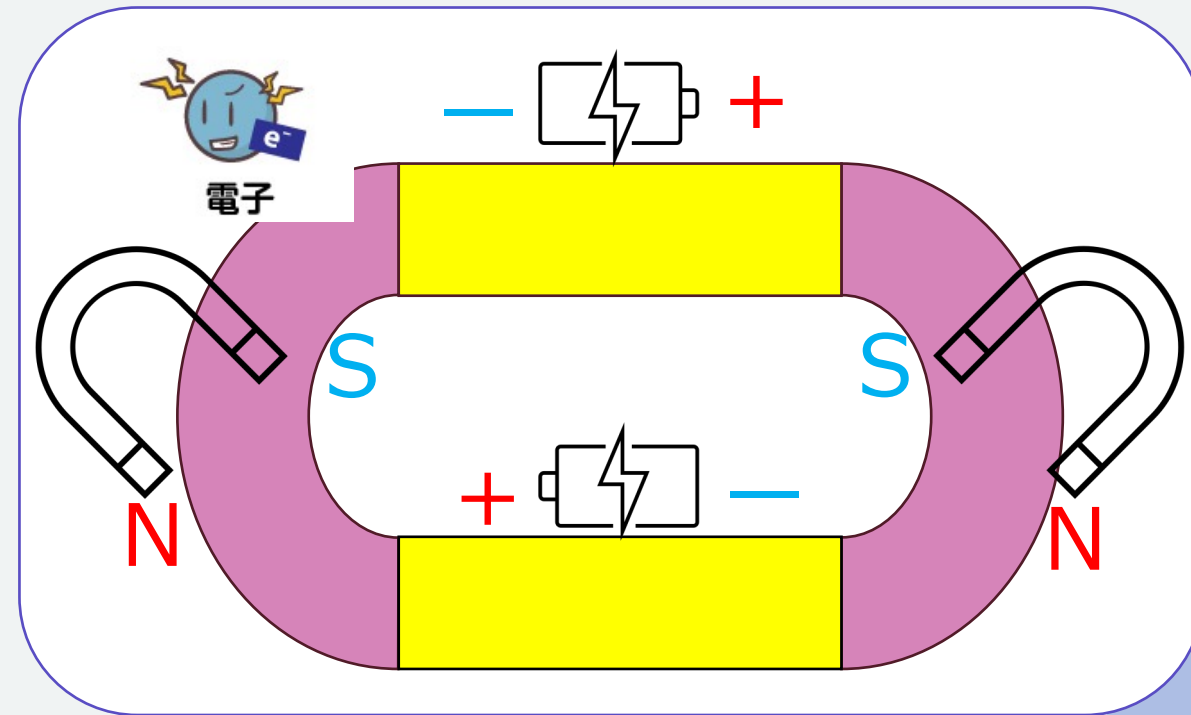
まとめ 高エネルギー加速器実験

• 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！！



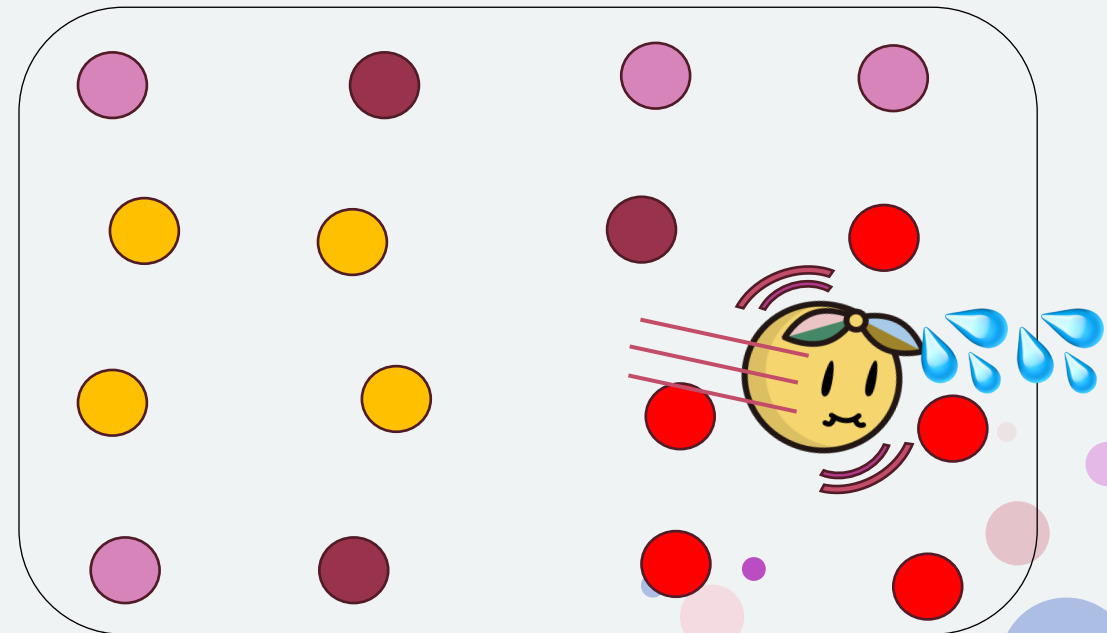
まとめ 高エネルギー加速器実験

• 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

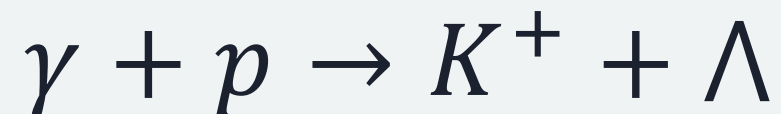
- 粒子をすごい加速して衝突させる実験
 - 大きなエネルギーで破壊！！
 - 残骸を検出！！
 - 反応を解析！！

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！！

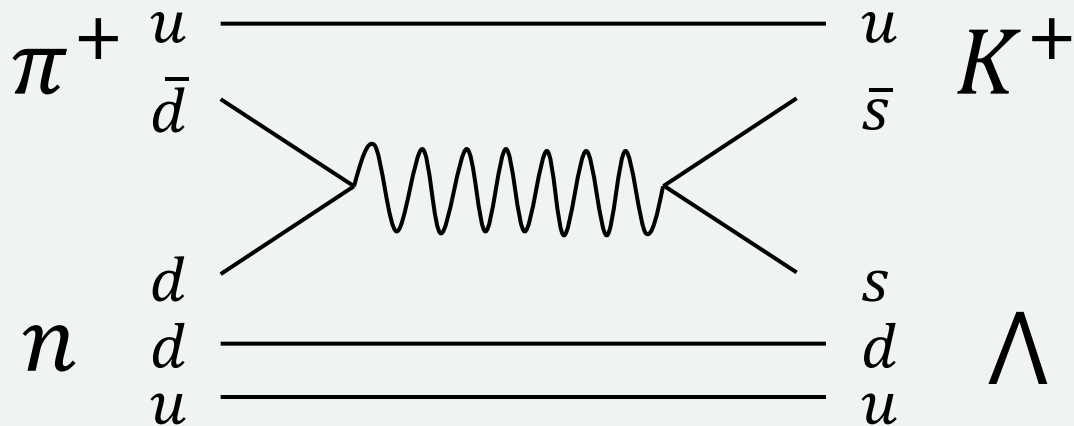
おまけ 高エネルギー加速器実験

- 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

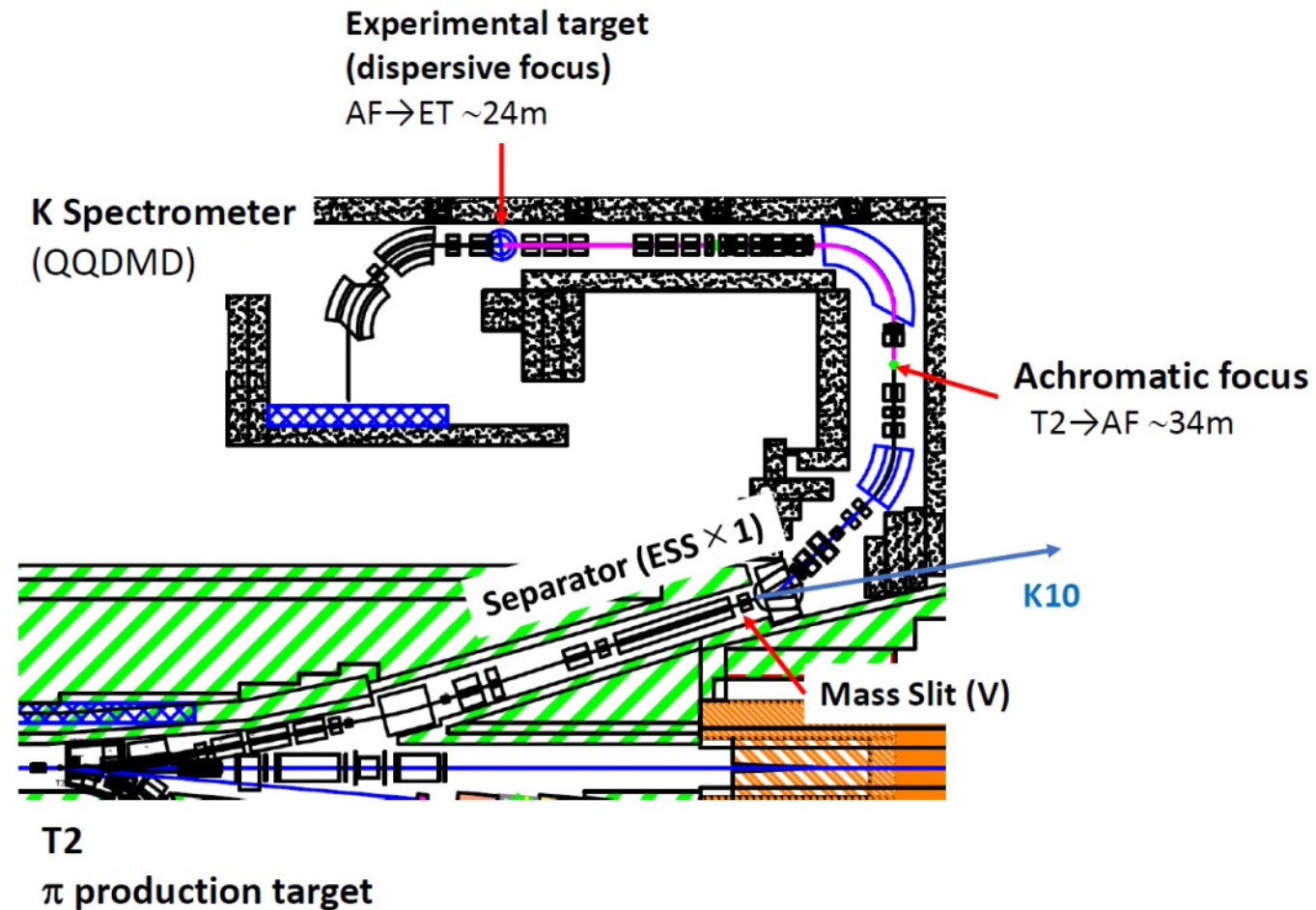
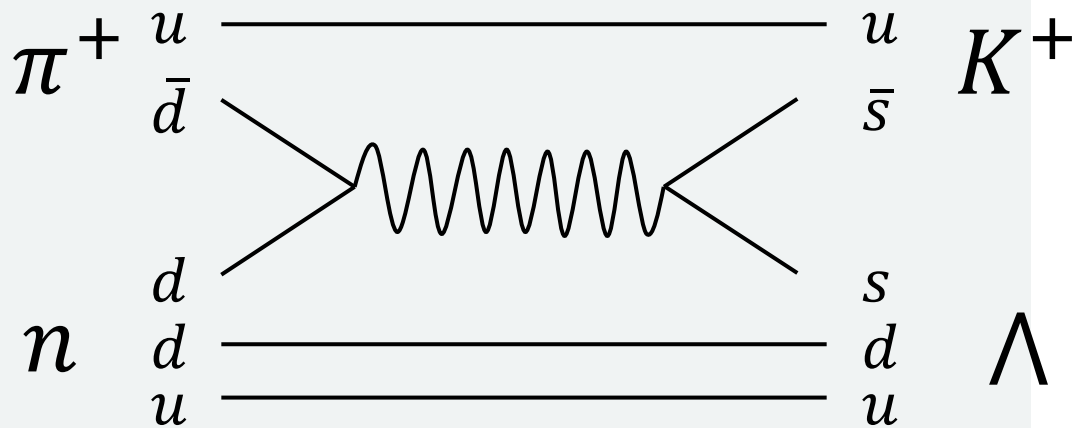


Figure 3-1: Schematic illustration of the High Intensity High Resolution beamline with a kaon spectrometer.

出典: Satoshi N. Nakamura et. al. (2021). "High precision spectroscopy of Λ hypernuclei with the (π^+, 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！！