



ひらめき☆ときめきサイエンス

対称性とその破れ —自然における美の形—

素粒子と対称性

2009年11月1日

**首都大学東京・理工学研究科・物理学専攻
素粒子理論サブグループ 安田修**

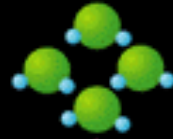
An aerial photograph of a university campus. In the foreground, a large, modern building with a curved facade and a prominent entrance is situated on a hillside. A large, irregularly shaped pond is located in front of the building. The campus is surrounded by greenery and other buildings in the background under a blue sky with scattered clouds.

1. 素粒子

素粒子とは：
それ以上細かくできな
いもの

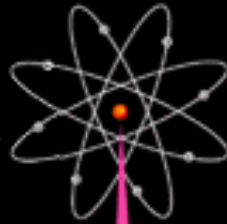
結論から言うと、今の所、物質中の**電子・クォーク**が**素粒子**と考えられている

10^{-7} cm



水の分子(水素・酸素)

10^{-8} cm



酸素原子(原子核・**電子**)

10^{-12} cm



原子核(陽子・中性子)

核子

10^{-13} cm



陽子(uud) u:**アップクォーク**

中性子(udd) d:**ダウンクォーク**

10^{-16} cm以下



クォーク

[注] 数の表し方

大きな数の表示方法:

$$1 \text{ 万} = 10,000 = 10^4 \text{ (10の4乗)}$$

$$1 \text{ 億} = 100,000,000 = 10^8 \text{ (10の8乗)}$$

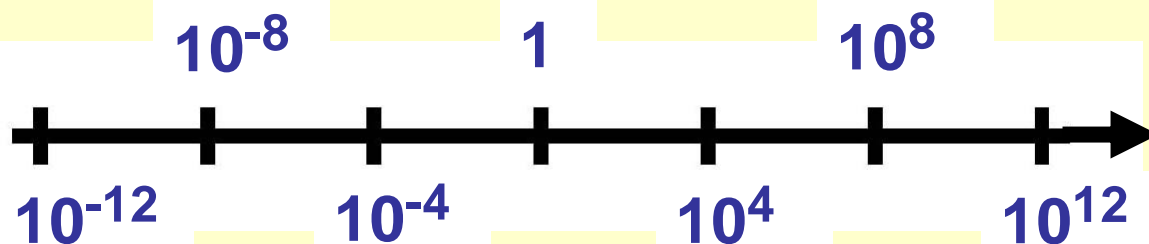
$$1 \text{ 兆} = 1,000,000,000,000 = 10^{12} \text{ (10の12乗)}$$

小さな数の表示方法:

$$1 \text{ 万分の1} = 0.0001 = 10^{-4} \text{ (10のマイナス4乗)}$$

$$1 \text{ 億分の1} = 0.00000001 = 10^{-8} \text{ (10のマイナス8乗)}$$

$$1 \text{ 兆分の1} = 0.00000000000001 = 10^{-12} \text{ (10のマイナス12乗)}$$



[注]電荷(電気)を帯びた粒子の性質

陽子

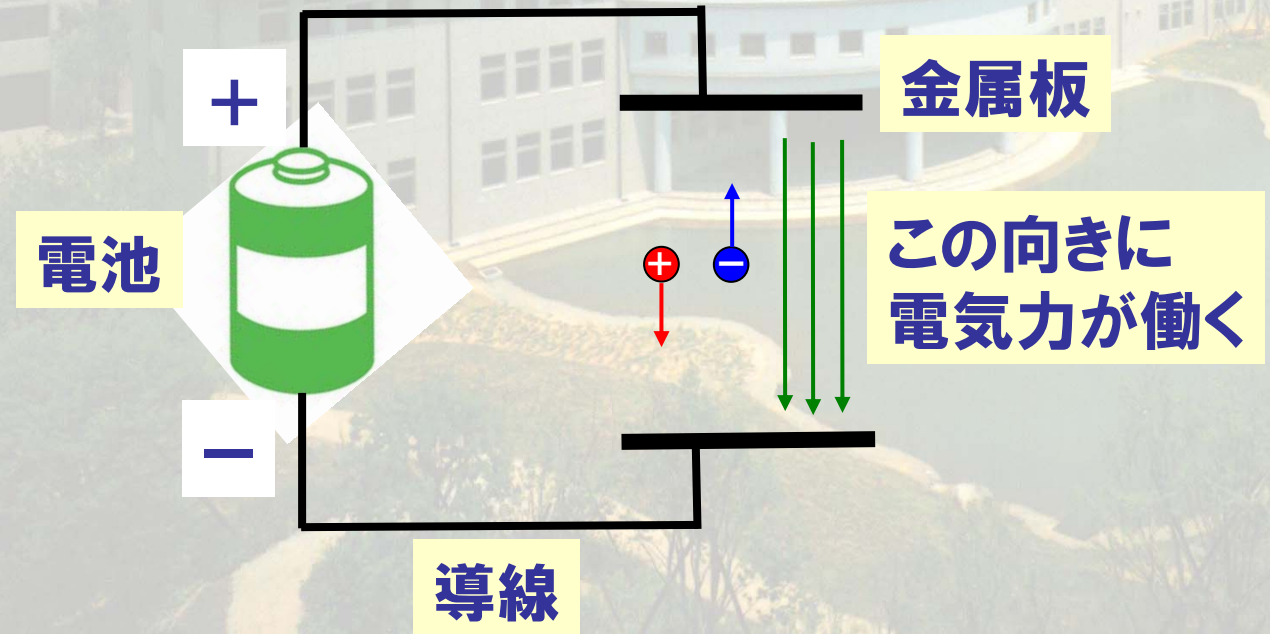
正の電荷(電気)を帯びた粒子

⊕ 電気力の方向 ↓ に力が働く

負の電荷(電気)を帯びた粒子

⊖ 電気力の方向 ↓ とは逆に力が働く

電子



ニュートリノ：素粒子の一種(日常生活ではなじみがない)

理論：ニュートリノの予言(1933年)

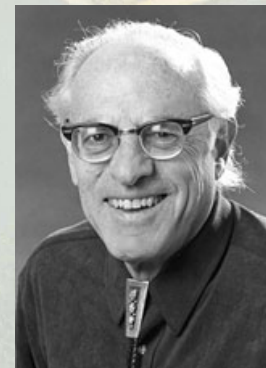
中性子→陽子+電子+ (ニュートリノ)
という反応でエネルギー保存則が成り立つようにするために**ニュートリノ**という電氣的に中性な粒子が導入された



パウリ

実験：ニュートリノの発見(1955年)

原子炉の中では
中性子→陽子+電子+ニュートリノ
という反応が起こっており、多量の
ニュートリノが作られている→このニュートリノを検出することに成功



ライネス



コーワン

ここまでのまとめ：色々な粒子

| | 総称 | 粒子 | 電荷 | 質量 |
|------|------|----------|-----------------|-----|
| 複合粒子 | 核子 | 陽子(uud) | +e | 938 |
| | | 中性子(udd) | 0 | 940 |
| 素粒子 | クォーク | u(アップ) | $+\frac{2}{3}e$ | 約3 |
| | | d(ダウン) | $-\frac{1}{3}e$ | 約6 |
| | レプトン | 電子 | -e | 0.5 |
| | | ニュートリノ | 0 | 0 |

電子とニュートリノはクォークと性質が異なり、レプトンと呼ばれる

電荷の単位:

$$e = 1.6 \times 10^{-19} \text{C (クーロン)}$$

質量の単位(粒子の質量の記述に便利):

$$\text{MeV}/c^2 = 1.783 \times 10^{-30} \text{kg}$$

反粒子: 質量は同じで電荷が逆符号の粒子
粒子には一般に**反粒子**が存在

1930年:ディラック方程式(相対性理論+量子力学)



ディラック

陽電子(電子の“**反粒子**”と呼ばれる粒子)
の存在を理論的に予言

1932年:陽電子の発見



アンダーソン

霧箱とよばれる測定器
で発見

| | 電荷 | 質量 |
|-----|------|-----|
| 電子 | $-e$ | 0.5 |
| 陽電子 | $+e$ | 0.5 |

素粒子 = クォーク + レプトン + 反クォーク + 反レプトン

粒子

| | 粒子 | 電荷 | 質量 |
|------|----------|---------|-----|
| クォーク | アップ | $+2e/3$ | 約3 |
| | ダウン | $-e/3$ | 約6 |
| レプトン | 電子 | $-e$ | 0.5 |
| | 電子ニュートリノ | 0 | 0 |

反粒子

| | 粒子 | 電荷 | 質量 |
|-------|-----------|---------|-----|
| 反クォーク | 反アップ | $-2e/3$ | 約3 |
| | 反ダウン | $+e/3$ | 約6 |
| 反レプトン | 陽電子 | $+e$ | 0.5 |
| | 反電子ニュートリノ | 0 | 0 |

粒子と反粒子の系：ポジトロニウム

水素原子

=陽子+電子

:正の電荷と負の電荷の間に
引力が働いてくっついている

ポジトロニウム

=陽電子+電子

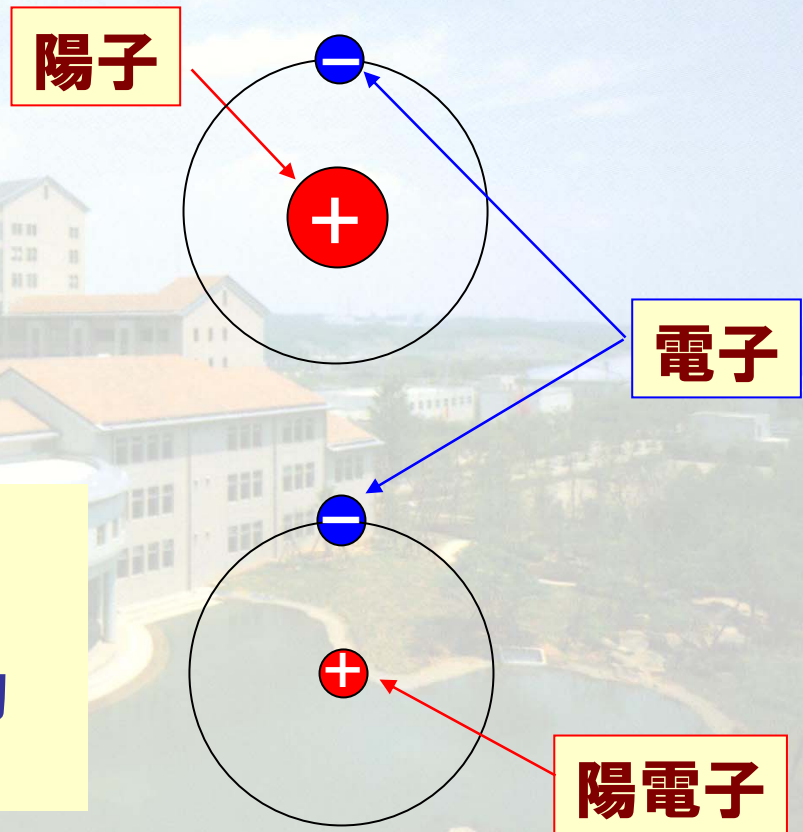
:正の電荷と負の電荷の間に引力
が働いてくっついている

水素原子との違い

アツという間に消滅して複数の光子となる:

陽電子+電子→光子+光子+光子+...

→午後の実験（ポジトロニウムからの光子の観測）

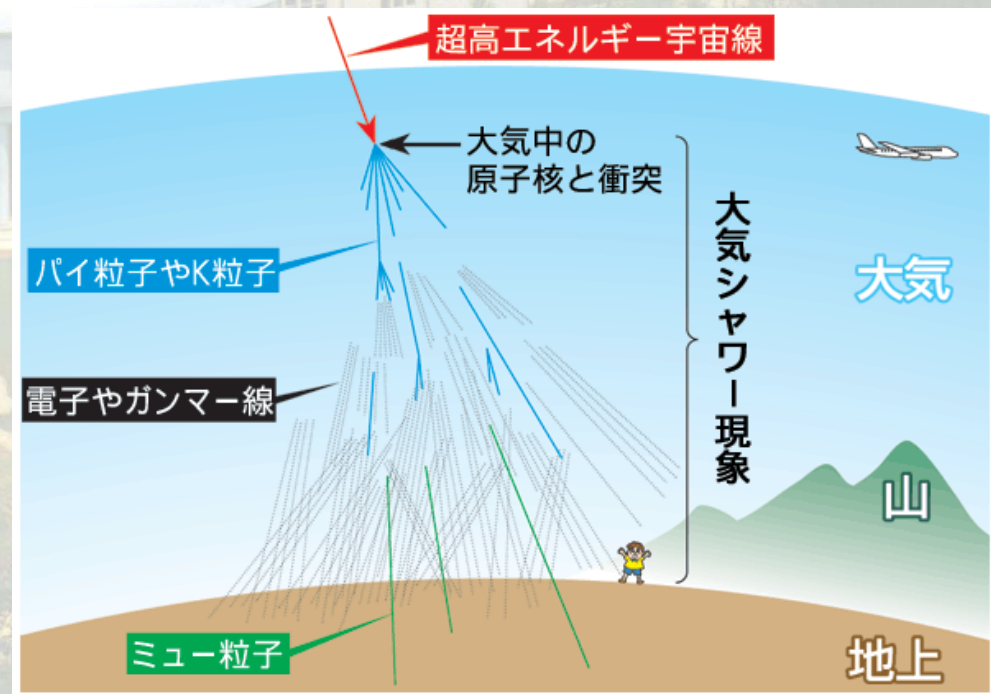
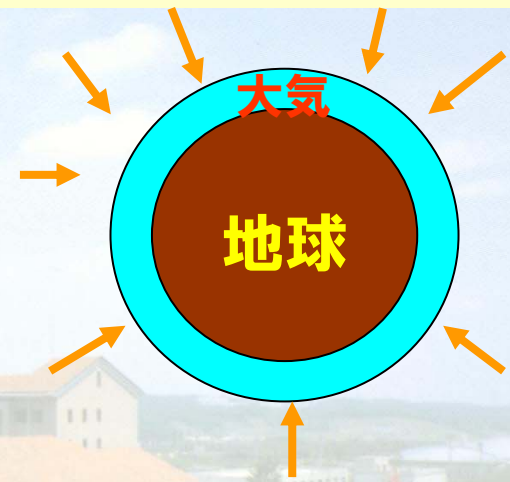


宇宙線

- 地球には宇宙から1次宇宙線と呼ばれる粒子がつねに降り注いでいる
- それらが大気中の核子と衝突して2次宇宙線と呼ばれる粒子が生成される
- 2次宇宙線の主なものは**ミュー粒子**(電子とほとんど性質が同じで質量が電子の200倍)

ミュー粒子：第二世代の素粒子

1次宇宙線(陽子、ヘリウム原子核)



素粒子 = 三世代のクォーク + レプトン (反クォーク + 反レプトンもあるが省略)

第一世代

| | 粒子 | 電荷 | 質量 |
|------|----------|-------|-----|
| クォーク | u (アップ) | +2e/3 | 約3 |
| | d (ダウン) | -e/3 | 約6 |
| レプトン | 電子 | -e | 0.5 |
| | 電子ニュートリノ | 0 | 0 |

第二世代

| | 粒子 | 電荷 | 質量 |
|------|-----------|-------|--------|
| クォーク | c (チャーム) | +2e/3 | 約1,200 |
| | s (ストレンジ) | -e/3 | 約120 |
| レプトン | ミュー | -e | 106 |
| | ミューニュートリノ | 0 | 0 |

第三世代

| | 粒子 | 電荷 | 質量 |
|------|----------|-------|---------|
| クォーク | t (トップ) | +2e/3 | 174,300 |
| | b (ボトム) | -e/3 | 約4,000 |
| レプトン | タウ | -e | 1777 |
| | タウニュートリノ | 0 | 0 |

世代と共に
質量が増加
して行く

$E=mc^2$ より、
重い粒子を作る
には多くのエネ
ルギーが必要
→特別な工夫が
なければ第二・
第三世代は作
れない

実は三代目のクォークは理論的に予言されていた！

1972年：小林-益川理論

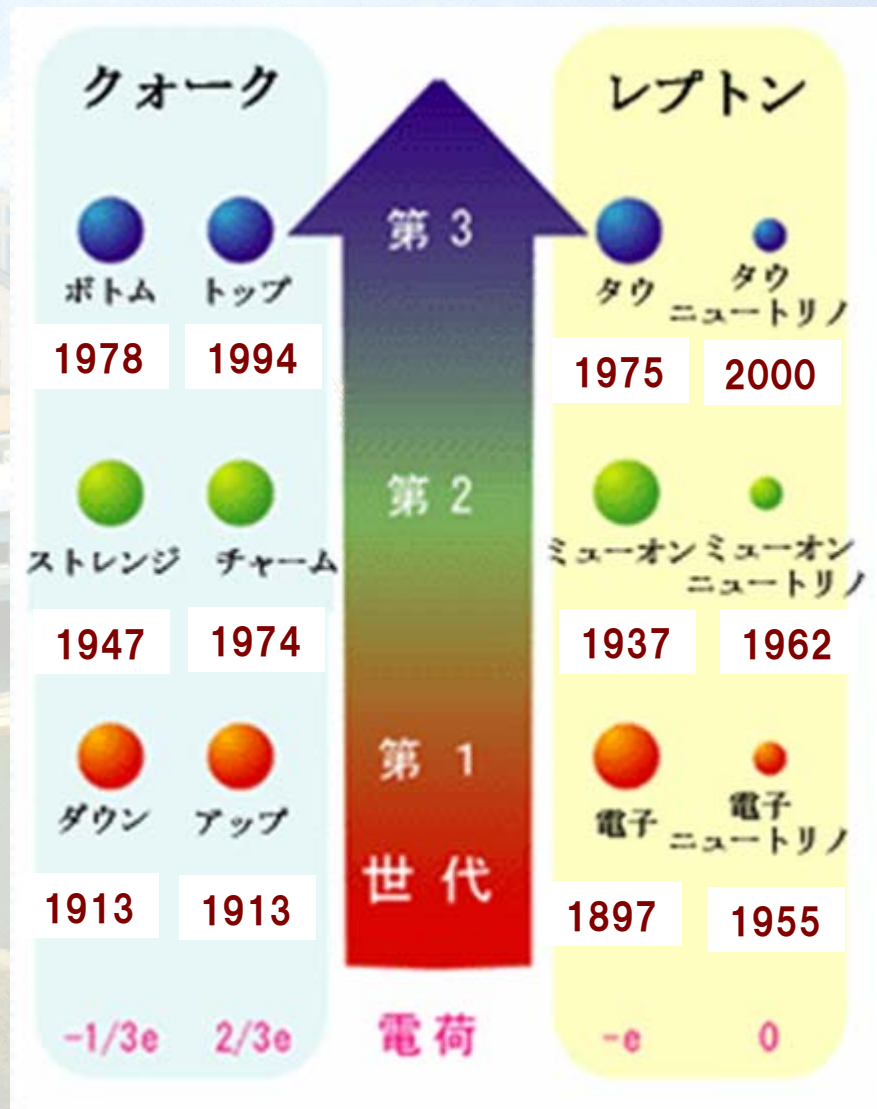
CPと呼ばれる対称性の破れを説明したいという動機から、3世代クォークの存在は予言されていた



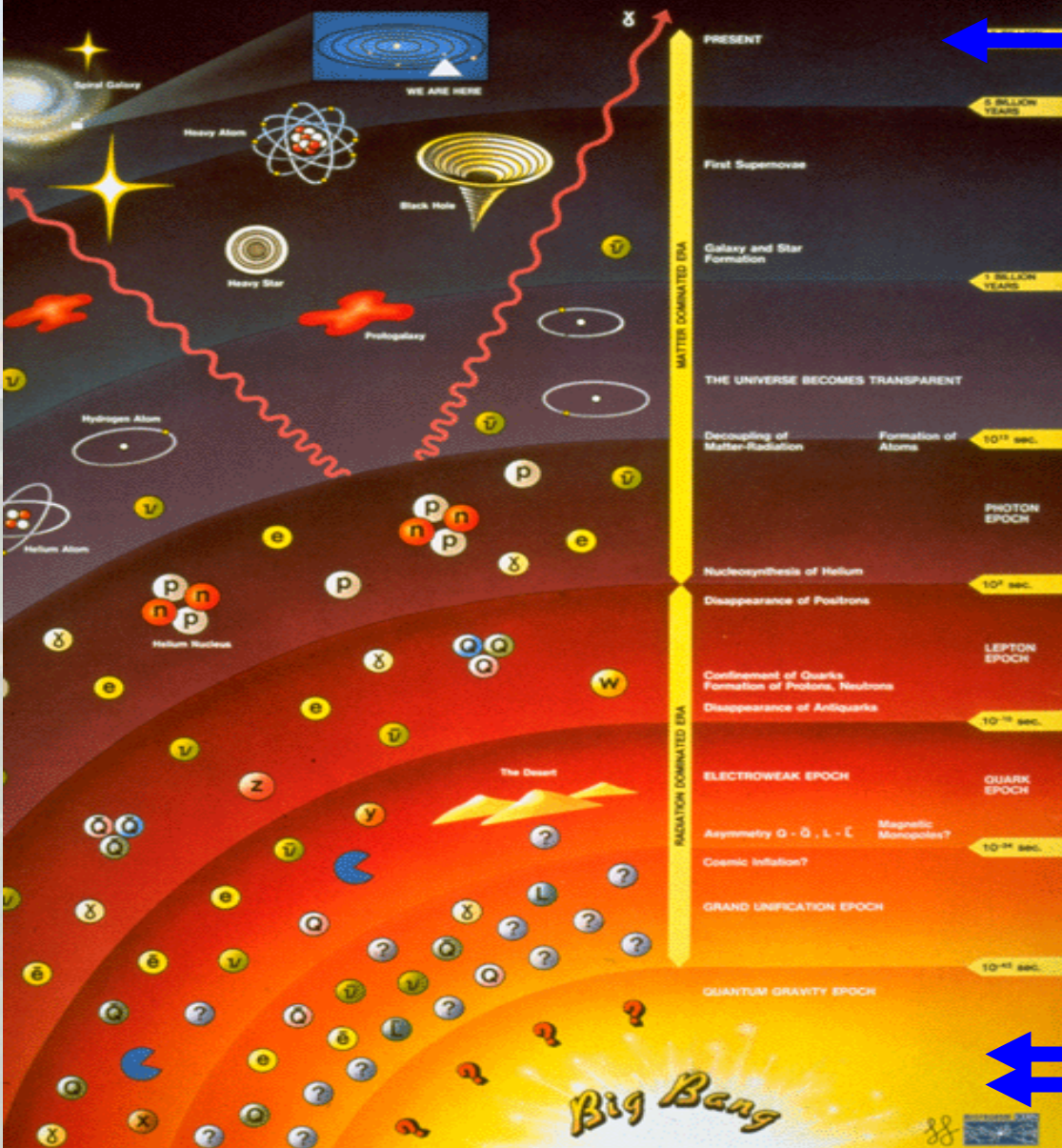
小林誠



益川敏英



History of the Universe



温度 = 3度 (= 摂氏 -270度)
 現在の宇宙は**粒子(物質)の世界**であることが知られている

宇宙が膨張し、宇宙の温度が下がる

ある時期に、粒子と反粒子の非対称性が作られたに違いない!

温度 = 10^{32} 度
 宇宙誕生初期、粒子と反粒子は同じ数だけ創られた
 →物質・反物質は同数だけあるはず

宇宙はビッグバンで誕生した

C P 対称性の性質

C P 対称性の破れがあると

重い粒子 → 軽い粒子 + . . .
重い反粒子 → 軽い反粒子 + . . .

という崩壊反応の頻度に違いが出る事が知られている

したがって、**C P 対称性の破れ**があると
→ 宇宙における物質・反物質の非対称性を
宇宙論 + 素粒子論で説明できるかもしれ
ない！

**宇宙の現在の温度 = 3度 (摂氏マイナス270度) は
宇宙マイクロ波背景放射というものの観測で裏付
けされている**

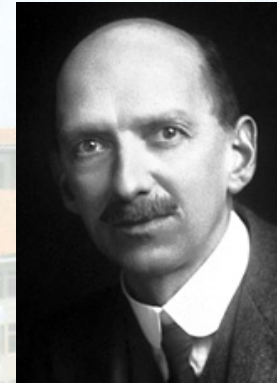
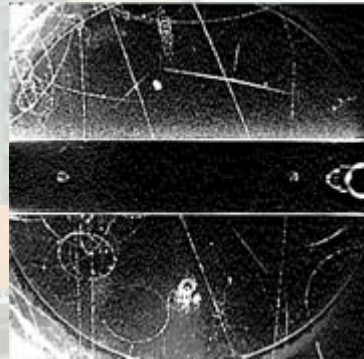
→午後の実験 (宇宙マイクロ波背景放射の観測)

荷電粒子の検出器：電荷を持つ粒子の軌跡を目で見えるようにする装置

→午後の実験（放射線・ミュー粒子(2次宇宙線)の観測)

霧箱

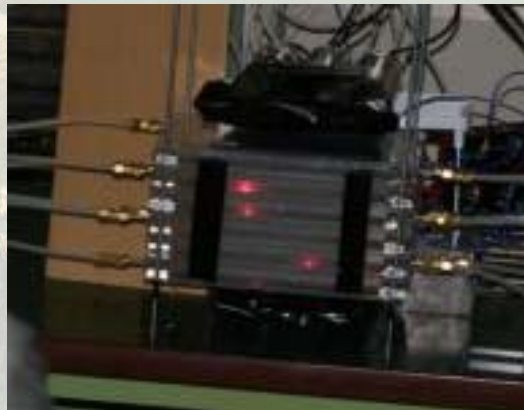
1897年に発明



ウィルソン

放電箱(スパークチェンバー)

1970年代に活躍



福井崇時



宮本重徳



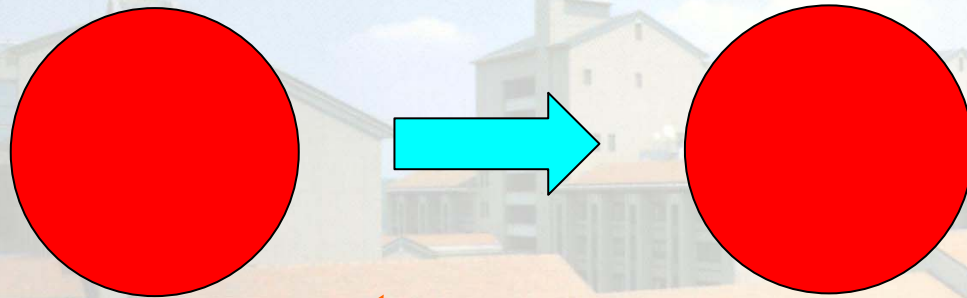
2. 対称性

(注意)

**ここでの説明は直観的理解を重んじるため、
数学的・物理的にはかなり正確さを欠いた
ものになっています**

対称性とは

ある操作をしても結果が変わらない性質



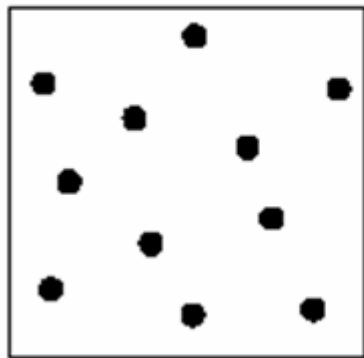
45° 回転させても
同じ図形となる
→
(回転)対称性がある



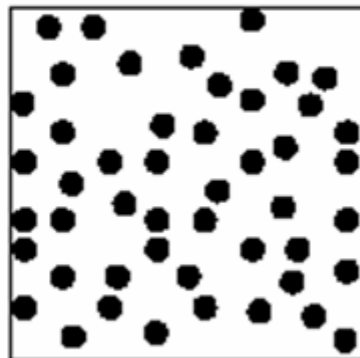
45° 回転させると同
じ図形とならない
→
(回転)対称性がない

自然界には条件が変わることにより対称性がなくなっていく例が見つかる(相転移)

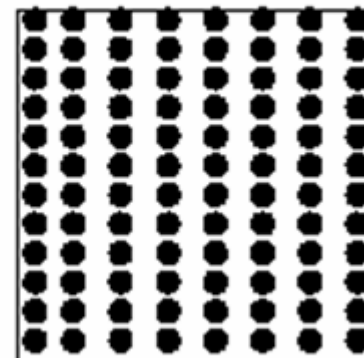
温度を下げてゆくとエネルギー的に有利な状態に落ち着く



気体



液体



固体

(回転)対称性がある

(回転)対称性がない

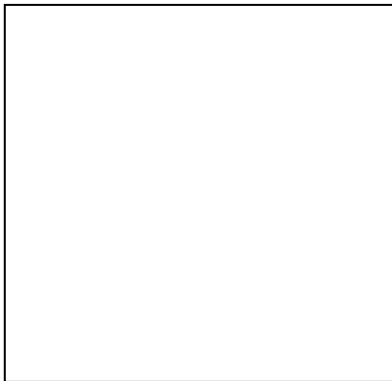
このような場合、対称性が自発的に(自然に)破れるという

素粒子物理における**真空**

真空とは何もない状態ではなく、
エネルギーの最も低い状態のこと

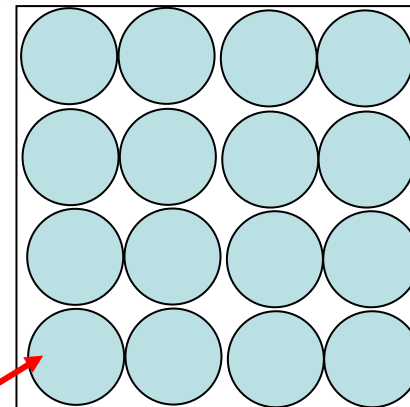
実は素粒子の世界では温度が低くなると、**ヒッグス粒子**と呼ばれる粒子が空間にびっしり詰まった状態の方がエネルギーの低い状態となり、**対称性のない状態の方が好まれる**

宇宙の温度が下ってゆく



ヒッグス粒子のない状態

真空 = **対称性**がある状態



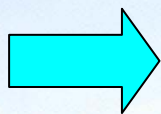
ヒッグス粒子

ヒッグス粒子のびっしり詰まった状態

真空 = **対称性のない状態**

対称性がある状態

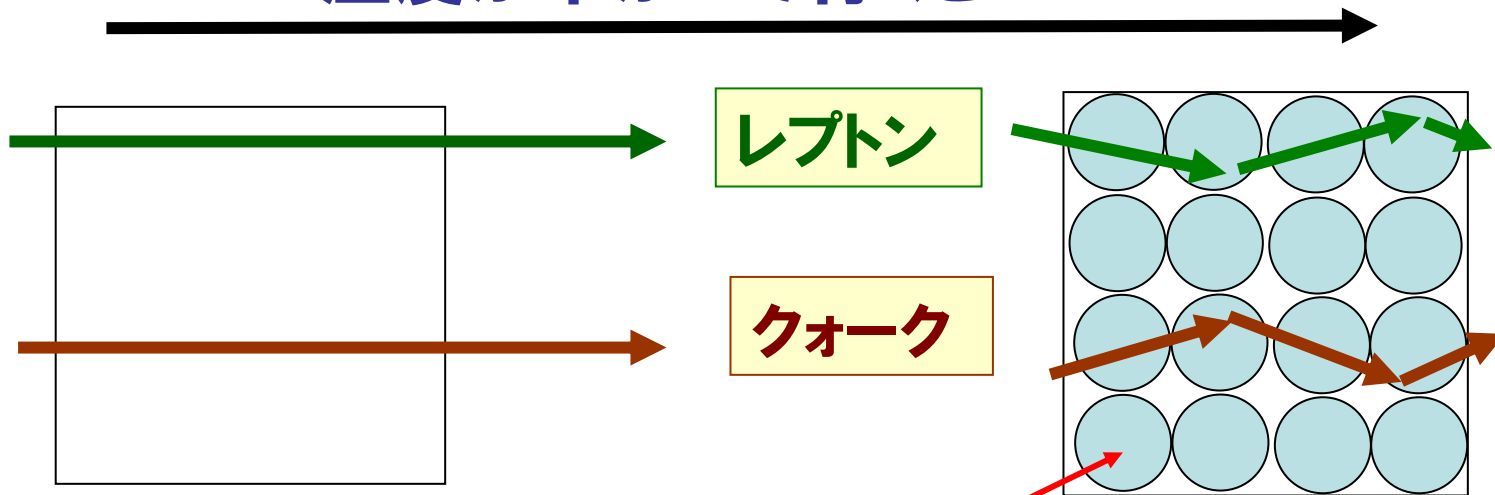
ヒッグス粒子が空間にない場合には、クォーク・レプトンは光速で自由に飛べる



対称性のない状態

ヒッグス粒子が空間にびっしり詰まっていると、クォーク・レプトンはヒッグス粒子とぶつかって光速では飛べなくなる

温度が下がって行くと



ヒッグス粒子のない状態

対称性がある状態

ヒッグス粒子

ヒッグス粒子のびっしり詰まった状態

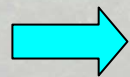
対称性のない状態

相対性理論

- 粒子が光速で飛ぶ \Leftrightarrow 粒子の質量がゼロ
- 粒子が光速未満の速度で飛ぶ \Leftrightarrow 粒子の質量はゼロでない

ヒッグス粒子の効果を感じる粒子は光速より遅くしか飛べない
→ヒッグス粒子の効果を感じる粒子には質量が生じる

つまり、宇宙の温度が下がってきて、ヒッグス粒子が空間に詰まった状態になると、クォーク・レプトンに質量が生じる



対称性の自発的破れによる質量の生成

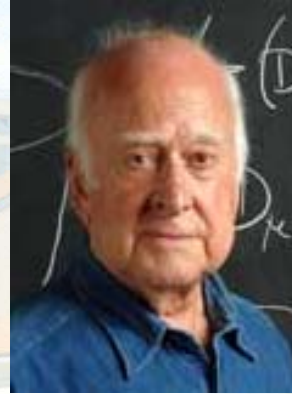
対称性の自発的破れによる質量の生成



南部陽一郎



ゴールドストーン



ヒッグス

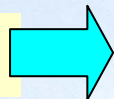


キップル

対称性の自発的破れを起こす粒子:ヒッグス粒子

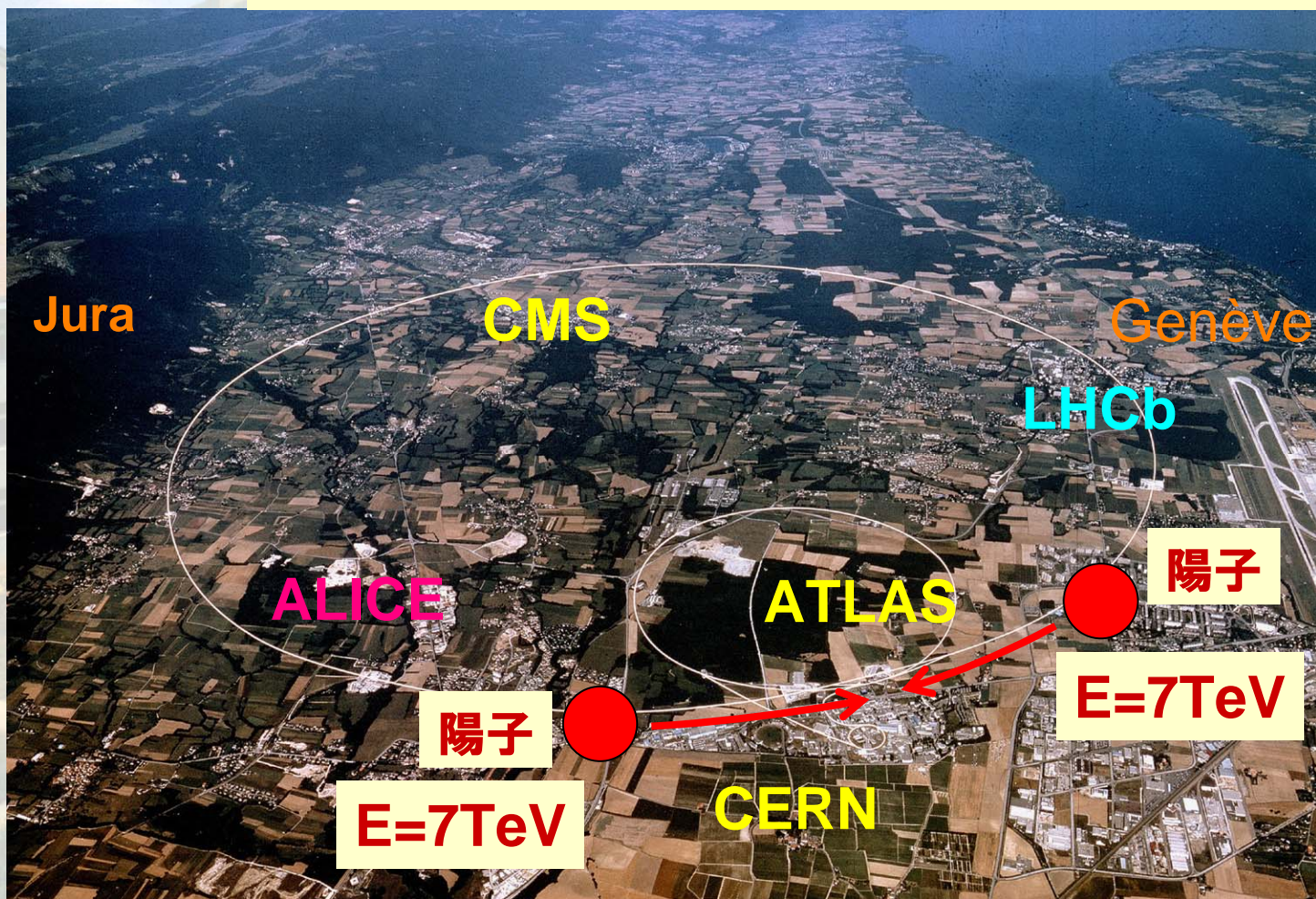
ヒッグス粒子は未発見で、質量も未定

ヒッグス粒子が未発見



LHC実験 (Large Hadron Collider; スイス・ジュネーブ・CERN) が2008年から稼働しており、探索中

ヒッグス粒子や未知の粒子を探るのが目的



周長=27km

©CERN Photo

まとめ

- 物質は三世代のクォーク・レプトンから構成される
- 対称性の自発的破れがあるために、クォーク・レプトンに質量が生じる

| 物質粒子 | | | |
|------|--------------|-------------|-------------|
| | 第1世代 | 第2世代 | 第3世代 |
| クォーク | アップ | チャーム | トップ |
| | ダウン | ストレンジ | ボトム |
| レプトン | 電子ニュートリノ | μニュートリノ | τニュートリノ |
| | 電子 | ミューオン | タウ |

質量を与える粒子
(未発見)

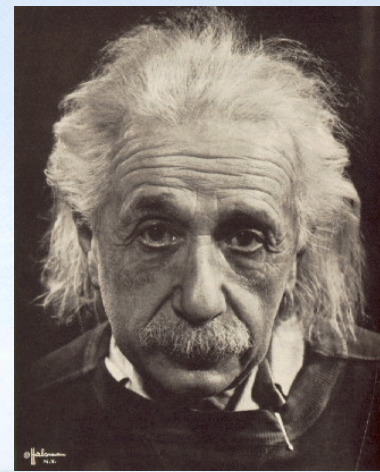


An aerial photograph of a university campus. The central focus is a large, light-colored building with a prominent circular section featuring several columns. In front of this building is a large, irregularly shaped pond. The campus is surrounded by greenery and other buildings in the background under a blue sky with scattered clouds. A semi-transparent yellow rectangular box is overlaid on the central building, containing the Japanese characters '付録' (Appendix) in a bold, dark blue font.

付録

● 特殊相対論 (1904年)

(大学3年で学習)



アインシュタイン

アインシュタインの関係式($E=mc^2$ を、粒子が運動している場合に拡張)

$$E^2 = (mc^2)^2 + (pc)^2$$

m : 粒子の質量

c : 光速 $= 3 \times 10^8 \text{ m/s}$

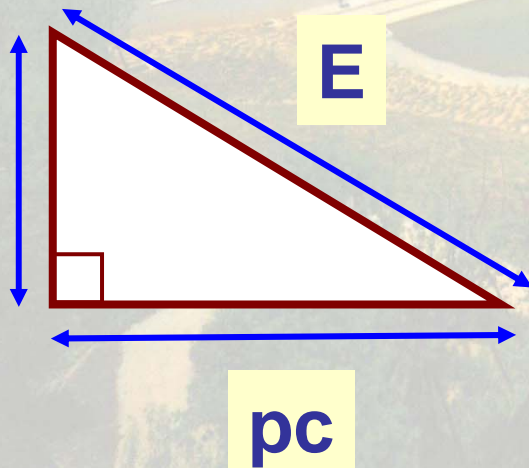
(1秒間に地球7回周半の速さ)

E : 粒子のエネルギー

p : 粒子の運動量
(= 質量 \times 速度)

$$\left(= \frac{mv}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \right)$$

v : 粒子の速度



●量子力学 (1930年頃)

(大学2年後半から学習)



ハイゼンベルグ

ハイゼンベルグの不確定性原理

(粒子の位置と運動量は原理的に同時に正確には測定できない)

$$\Delta x \times \Delta p \geq h / (4\pi)$$

Δx :座標の不確定性

h :プランク定数= 7×10^{-34} J·s

Δp :運動量の不確定性

実際には $\Delta x \rightarrow x$ 、 $\Delta p \rightarrow p$ として一番良い条件の測定を考えると

$$x \cdot pc \cong hc / (4\pi) \cong 10^{-5} \text{ cm} \cdot \text{eV}$$

※1eV (電子ボルト) = 1.6×10^{-19} J (ジュール) はエネルギーの単位(粒子の質量の記述に便利)

1keV (キロ・エレクトロンボルト、ケブ) = 10^3 eV

1MeV (メガ・エレクトロンボルト、メブ) = 10^6 eV

1GeV (ギガ・エレクトロンボルト、ジェブ) = 10^9 eV