

多摩科技高校アドバイザー授業

現代物理学入門

—相対論・量子力学・素粒子—

**東京都立大学・理学研究科・物理学専攻
素粒子理論研究室 安田修**

授業のスライドのファイルは以下に置いてあります:

<http://musashi.phys.se.tmu.ac.jp/~yasuda/tamakagi2021.pdf>



1. 古典物理学

古典物理学的世界観

万物の運動は第1原理によって決定されていて、これを表す基本方程式を解けば(原理的には) 未来永劫にわたってピタリと予言できる。

古典物理学(19世紀末まで)

- ニュートン力学
- 電磁気学

ニュートン力学



ニュートン

(1) 運動方程式: **質量 x 加速度 = 力**

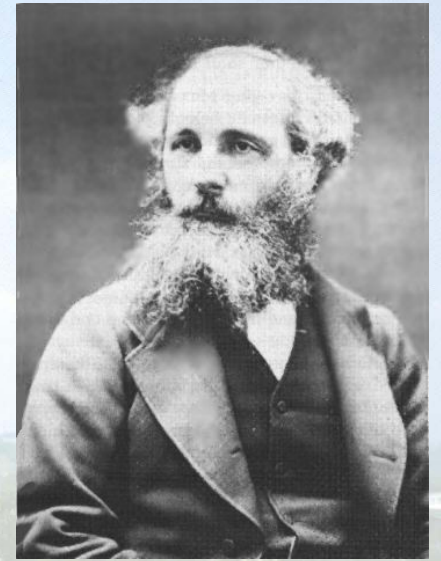
- 力が空間の位置と時間の関数として与えられた時、運動方程式 (微分方程式と呼ばれる式で表わされる) を解けば運動は一意的に決定される。
- 運動方程式を解くと打ち上げられたロケットの運動がピタリと予言できる。

(2) 万有引力の法則

- 質量のある二物体の間には、それぞれの質量に比例し、物体間の距離の二乗に反比例した引力が働く。

電磁気学

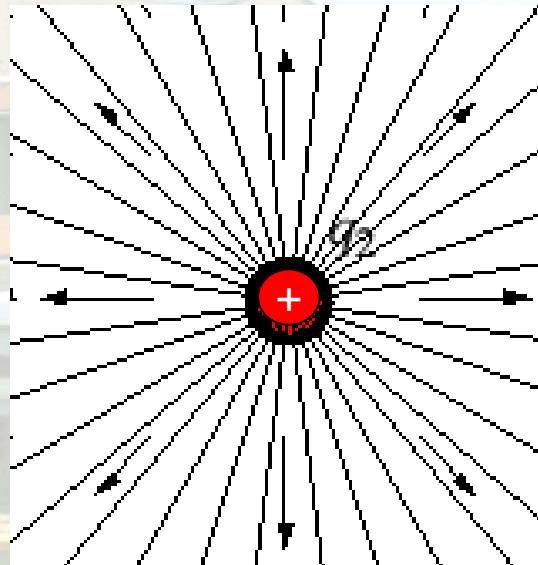
電場と磁場とよばれるものは
マックスウェル方程式と呼ば
れるものを満たす。



マックスウェル

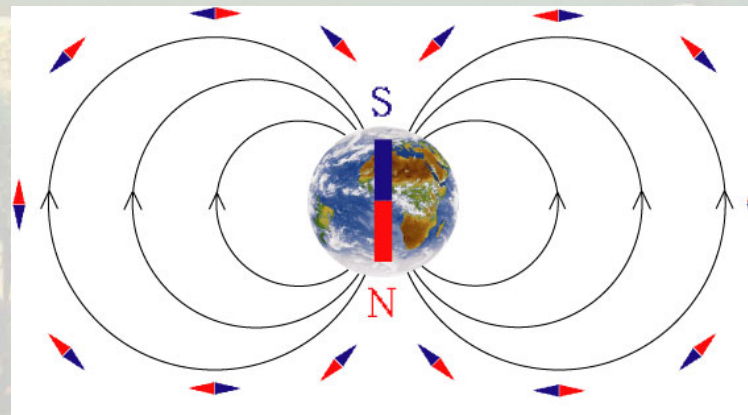
電場

正の電気を帯びた粒子か
ら放射状に電場と呼ばれ
る場が作り出される。



磁場

磁石のN極からS極に向
かって磁場と呼ばれる場
が作り出される。



古典物理学における不変性

●ニュートン力学

ニュートンの運動方程式:**ガリレイ変換**に関して不変
(空間と時間は別な自由度)

●電磁気学

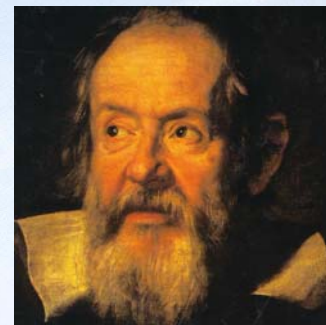
・マックスウェル方程式:**ローレンツ変換**に関して不変
(時間と空間は同じ自由度で、ローレンツ変換は時間・空間を混ぜる)

・電場、磁場は有限の速度 (=光速度) で伝播する



古典物理学の問題点(1)

●ニュートン力学と電磁気学が同じ変換のもとに不変ではない



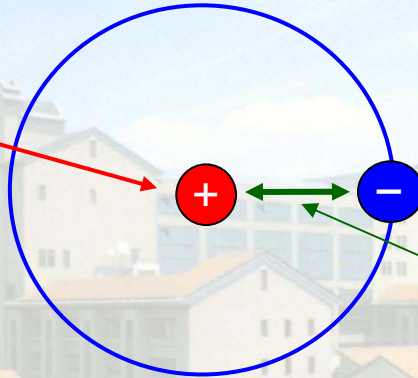
ガリレイ



ローレンツ

電磁気学とニュートン力学の応用：水素原子

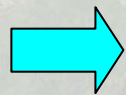
陽子(正の電気を帯びた粒子)



電子(負の電気を帯びた粒子)

電子と陽子の間には引力が働く

電磁気学とニュートン力学が自然を記述するならば、電子と陽子が限りなく近づき、水素原子の大きさ $\rightarrow 0$ となる(つぶれてしまう)



実際には、水素原子の大きさ $\sim 10^{-8}\text{cm}$:
つぶれていない



古典物理学の問題点(2)

●水素原子が安定であることが説明できない

2. 古典物理学の問題点の解決策 — 相対論・量子論 —

- ニュートン力学と電磁気学が同じ変換のもとに不変ではない

- 両者ともローレンツ変換に関する不変性を要請

- ニュートン力学は特殊相対論に移行

- 物体の速度 \ll 光速度の時、特殊相対論はニュートン力学に帰着

- 水素原子が安定であることが説明できない

- 物体の位置と運動量の間には不確定性原理の存在を要請

- ニュートン力学は量子力学に移行

- 物体の位置 \times 運動量 \gg プランク定数の時、量子力学はニュートン力学に帰着

$$\text{運動量} = \text{質量} \times \text{速度}$$

● 特殊相対論 (1904年)

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)

$$E = \sqrt{(mc^2)^2 + (pc)^2}$$

m : 粒子の質量

c : 光速 $= 3 \times 10^8 \text{ m/s}$

E : 粒子のエネルギー

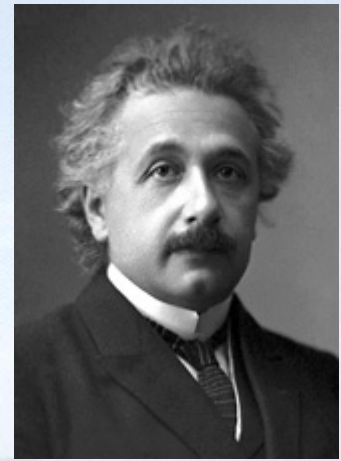
p : 粒子の運動量

(1秒間に地球7
回周半の速さ)

(= 質量 \times 速度)

$$p = mv / \sqrt{1 - v^2 / c^2}$$

v : 粒子の速度



アインシュタイン

特殊相対論の重要な帰結：

- 粒子の速度 < 光速度 （粒子の質量 ≠ 0）
粒子の速度 = 光速度 （粒子の質量 = 0）
- 粒子の上の時間 = 実験室の時間 $\times \sqrt{1 - v^2/c^2}$
→ 時間の進み方は速度に依存して変化する
→ 従来の時間の概念を根本的に覆すものとして重要
- $c \rightarrow$ 無限大の極限でニュートン力学に帰着

しかし、相対論といえども、古典物理学的世界観に従っている：

万物の運動は第1原理によって決定されていて、これを表す基本方程式を解けば(原理的には)未来永劫にわたってピタリと予言できる。

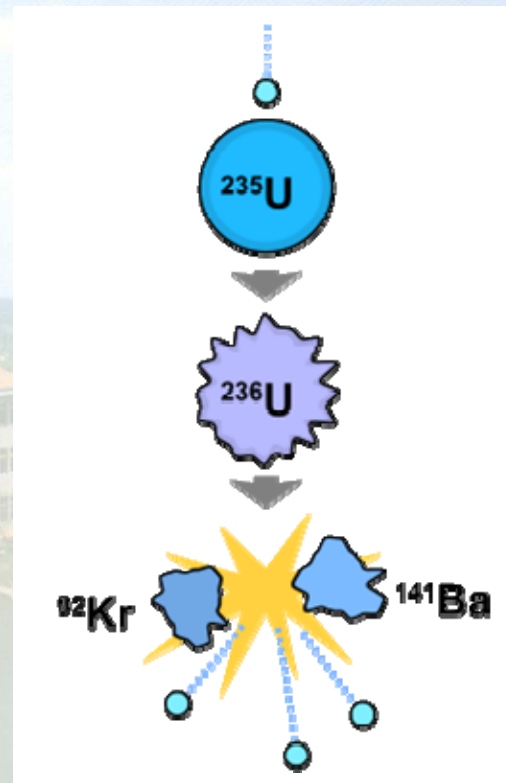
$E=mc^2$ の応用:核分裂と原子力発電

典型的な核分裂の一例



核分裂前のエネルギー
 $= ({}^{236}\text{Uの質量}) \times c^2$

核分裂後のエネルギー
 $= [({}^{92}\text{Krの質量}) + ({}^{141}\text{Baの質量}) + 3 \times (\text{中性子の質量})] \times c^2$



核分裂前後のエネルギー差 >0 :発熱
熱とは微視的には粒子の運動 (生成粒子の運動量 >0)

※粒子の反応過程では、粒子数や粒子の種類が変化することが可能(物質不滅の法則は成立しない;エネルギーは保存している)

●量子力学 (1930年頃)

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

Δp :運動量の不確定性

h :プランク定数= 7×10^{-34} J·s



ハイゼンベルグ



プランク

量子力学の重要な帰結：

- 粒子の位置と速度を同時に厳密には決定できない
 - 粒子の運動は確率的にしか予言できない
- 従来 of 古典物理学的世界観を根本的に覆すものとして重要
- h (プランク定数) $\rightarrow 0$ で古典力学に帰着

量子論と古典論の違い

古典論 (未来の厳密な予測が可能な理論)：

$$h = 0$$

ニュートン力学、電磁気学、相対論

量子論 (未来の予測は確率的にのみ可能な理論)：

$$h \neq 0$$

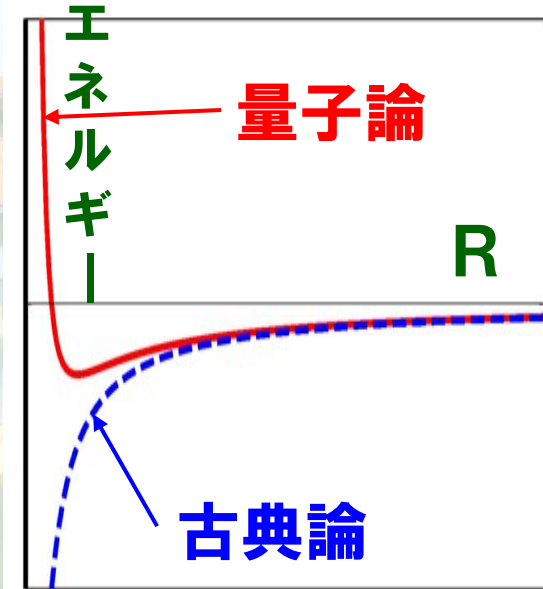
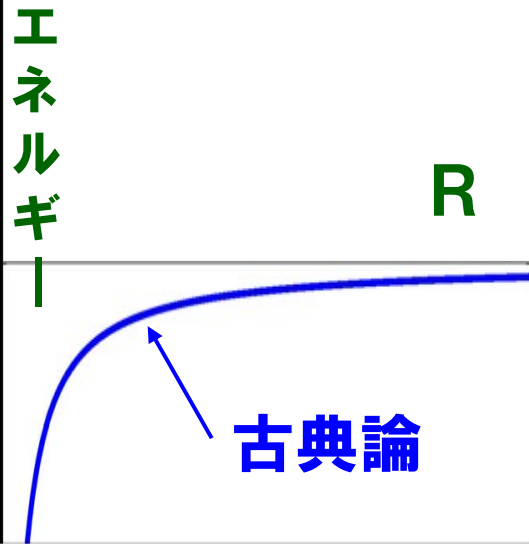
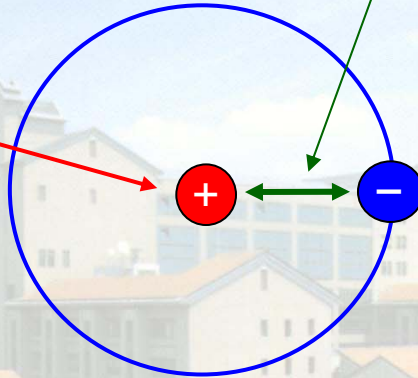
量子力学

量子力学の応用：水素原子

R: 電子と陽子の間の距離

陽子(正の電気を帯びた粒子)

電子(負の電気を帯びた粒子)



古典論では $R \rightarrow 0$ がエネルギー最小となり、安定な解なし

量子効果を入れるとエネルギー最小の解あり ($R \sim 10^{-8} \text{ cm}$)

※自然はエネルギー最小の場合を常に選択する

3. 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

(日常生活ではなじみがないが)

ニュートリノと呼ばれる**素粒子**も知られている

理論:ニュートリノの予言(1933年)

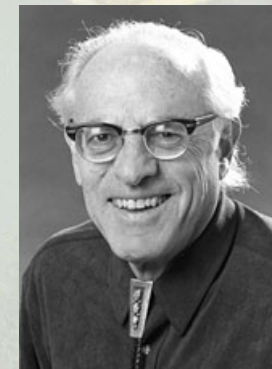
中性子→**陽子**+**電子**+ (**ニュートリノ**)
という反応でエネルギー保存則が成り立つようにするために**ニュートリノ**という**電氣的に中性な粒子**が導入された



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：素粒子

	総称	粒子	電荷
素粒子	クォーク	u(アップ)	$+\frac{2}{3}e$
		d(ダウン)	$-\frac{1}{3}e$
	レプトン	電子	$-e$
		ニュートリノ	0

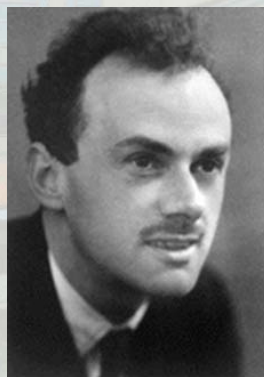
電子とニュートリノはクォークと性質が異なり、レプトンと呼ばれる

電荷の単位:

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

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
電子	$-e$
陽電子	$+e$

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
クォーク	アップ	$+2e/3$
	ダウン	$-e/3$
レプトン	電子	$-e$
	電子ニュートリノ	0

反粒子

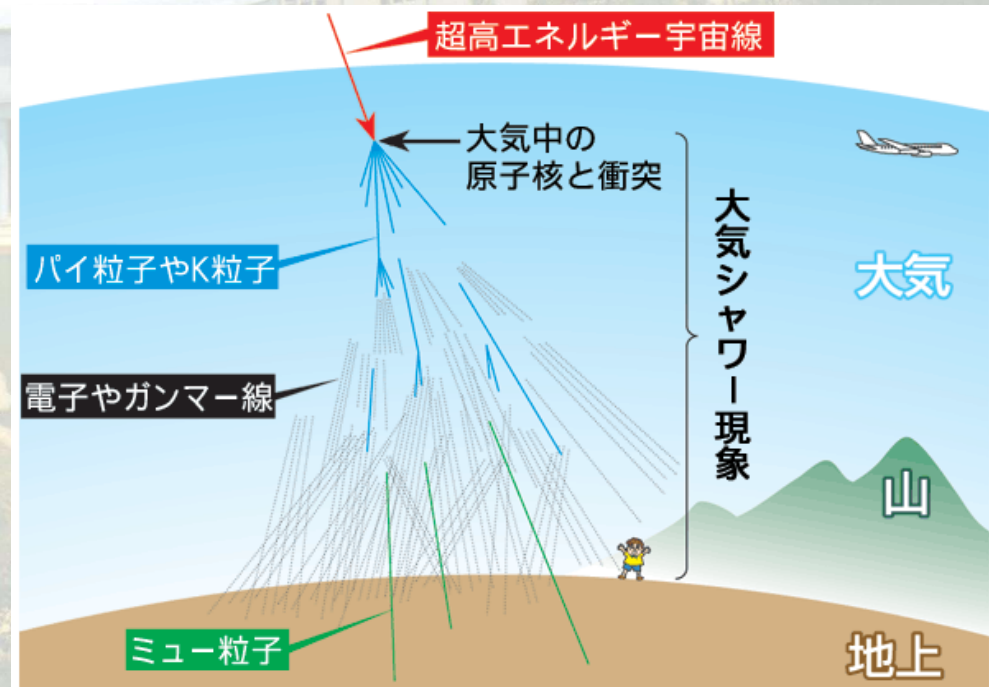
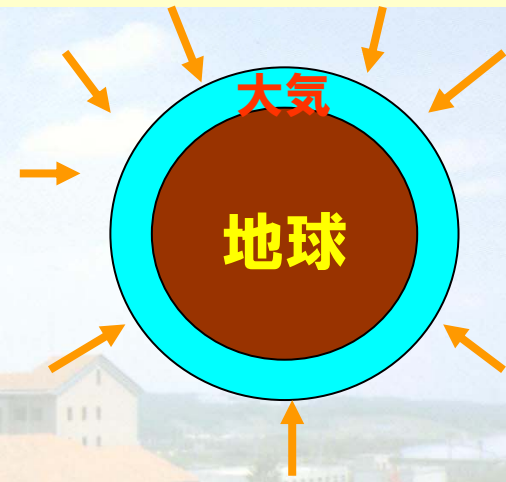
	粒子	電荷
反クォーク	反アップ	$-2e/3$
	反ダウン	$+e/3$
反レプトン	陽電子	$+e$
	反電子ニュートリノ	0

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[MeV/c ²]
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

質量の単位(粒子の質量の記述に便利): $\text{MeV}/c^2 = 1.783 \times 10^{-30} \text{kg}$

世代と共に質量が増加して行く

第二世代

	粒子	電荷	質量[MeV/c ²]
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

$E=mc^2$ 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

第三世代

	粒子	電荷	質量[MeV/c ²]
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

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

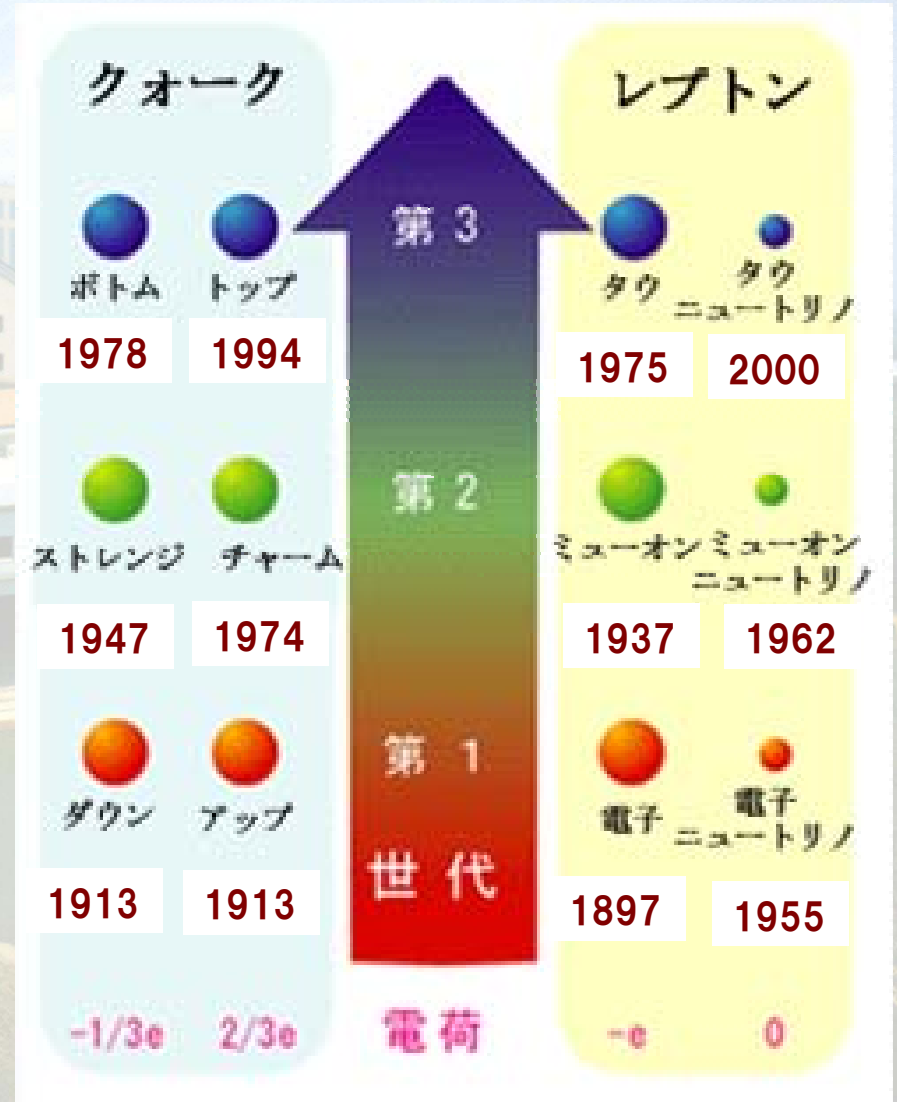


小林誠

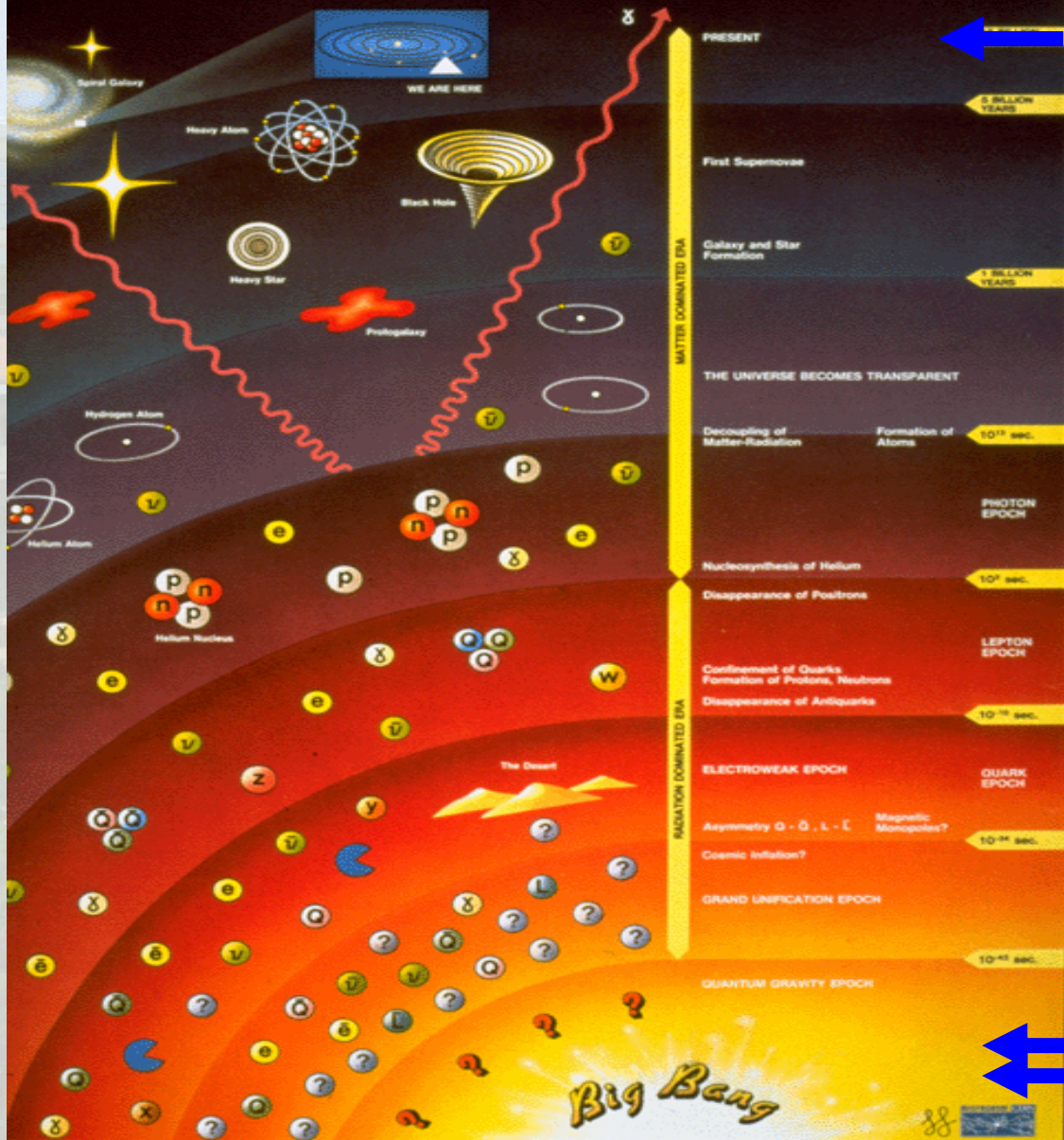


益川敏英

小林・益川：ノーベル賞（2008年）



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(CP変換を
ほどこした時の理論
の不変性)

CP変換 = C変換 x P変換

荷電共役 (**C**harge conjugation)

空間反転(**P**arity transformation)

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！

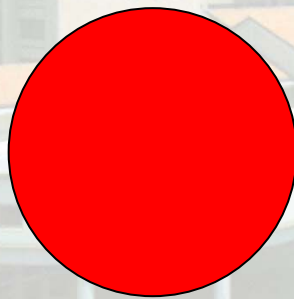
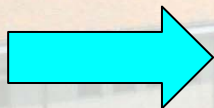
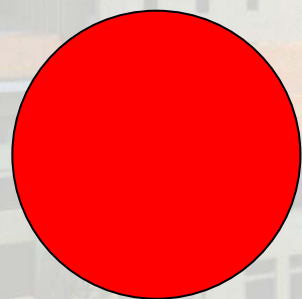
4. 対称性

(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

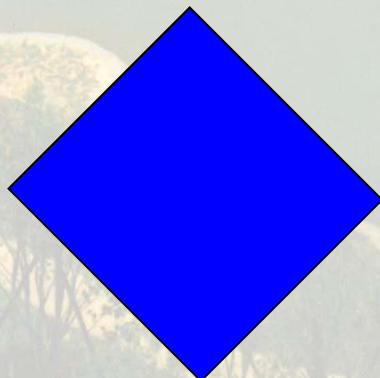
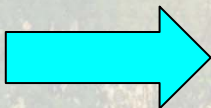
ある操作をしても結果が変わらない性質



45° 回転させても
同じ図形となる



(回転)対称性がある



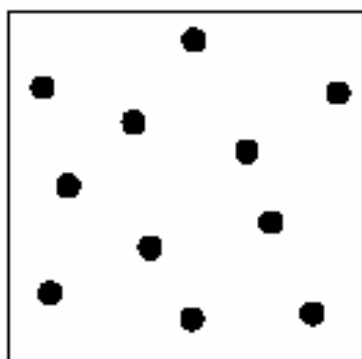
45° 回転させると同
じ図形とならない



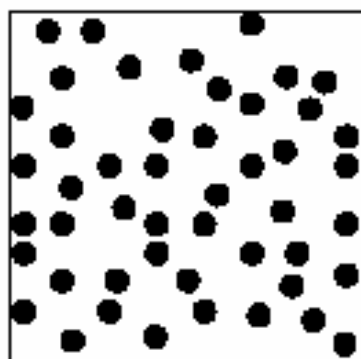
(回転)対称性がない

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)

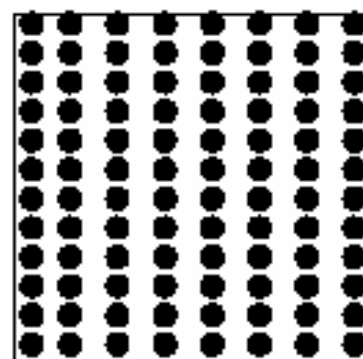
温度を下げてゆくとエネルギー的に有利な状態に落ち着く



気体



液体



固体

(回転)対称性がある

(回転)対称性がない

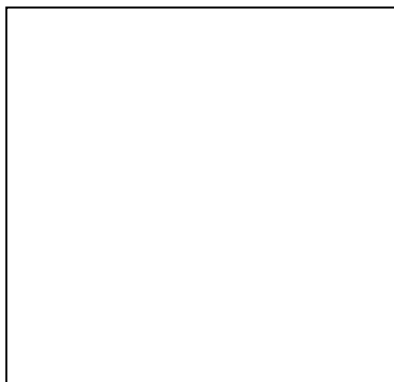
このような場合、対称性が自発的に(自然に)破れるという

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

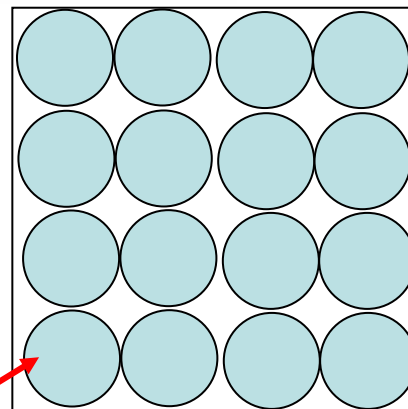
実は素粒子の世界では温度が低くなると、**ヒッグス粒子**と呼ばれる粒子が空間にびっしり詰まった状態の方がエネルギーの低い状態となり、**対称性のない状態の方が好まれる**

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

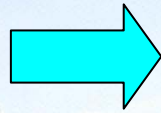


ヒッグス粒子

ヒッグス粒子のびっしり詰まった状態

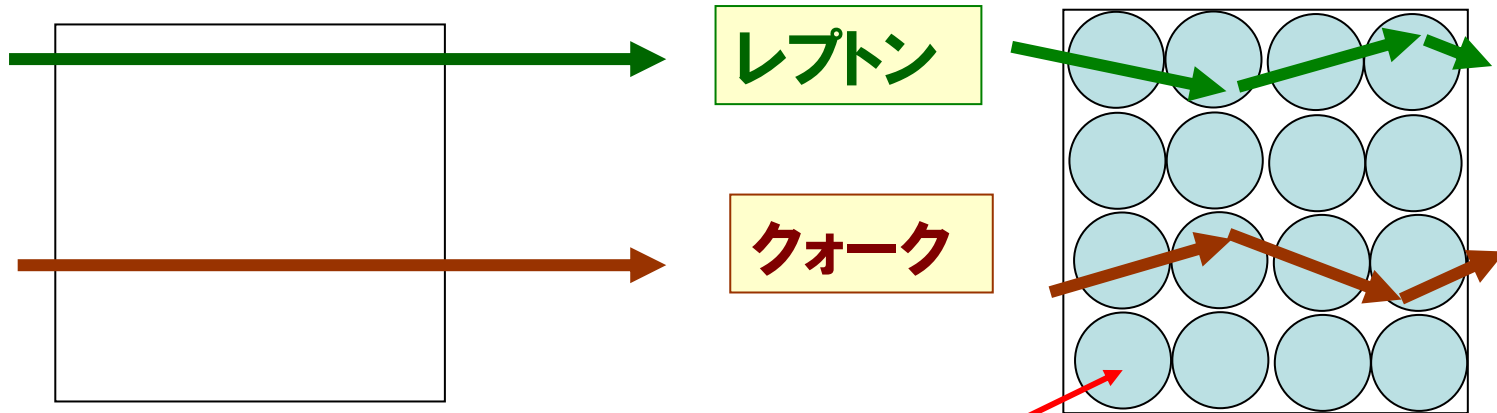
真空 = **対称性**のない状態

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
つまった状態

対称性のない状態

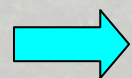
特殊相対論

$$\frac{v^2}{c^2} = \frac{(pc)^2}{(mc^2)^2 + (pc)^2} \leq 1 \quad (\text{pは運動量})$$

- 粒子が光速の速度 c で飛ぶ \Leftrightarrow 粒子の質量 m がゼロ
- 粒子が光速未満の速度 v で飛ぶ \Leftrightarrow 粒子の質量 m はゼロでない

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
 \Leftrightarrow 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

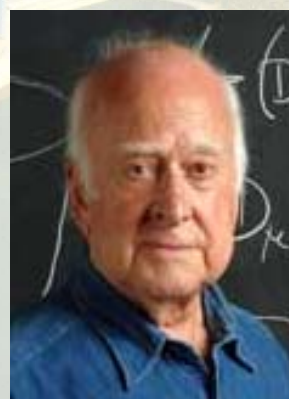
対称性の自発的破れを起こす粒子



ブラウト



アングレール



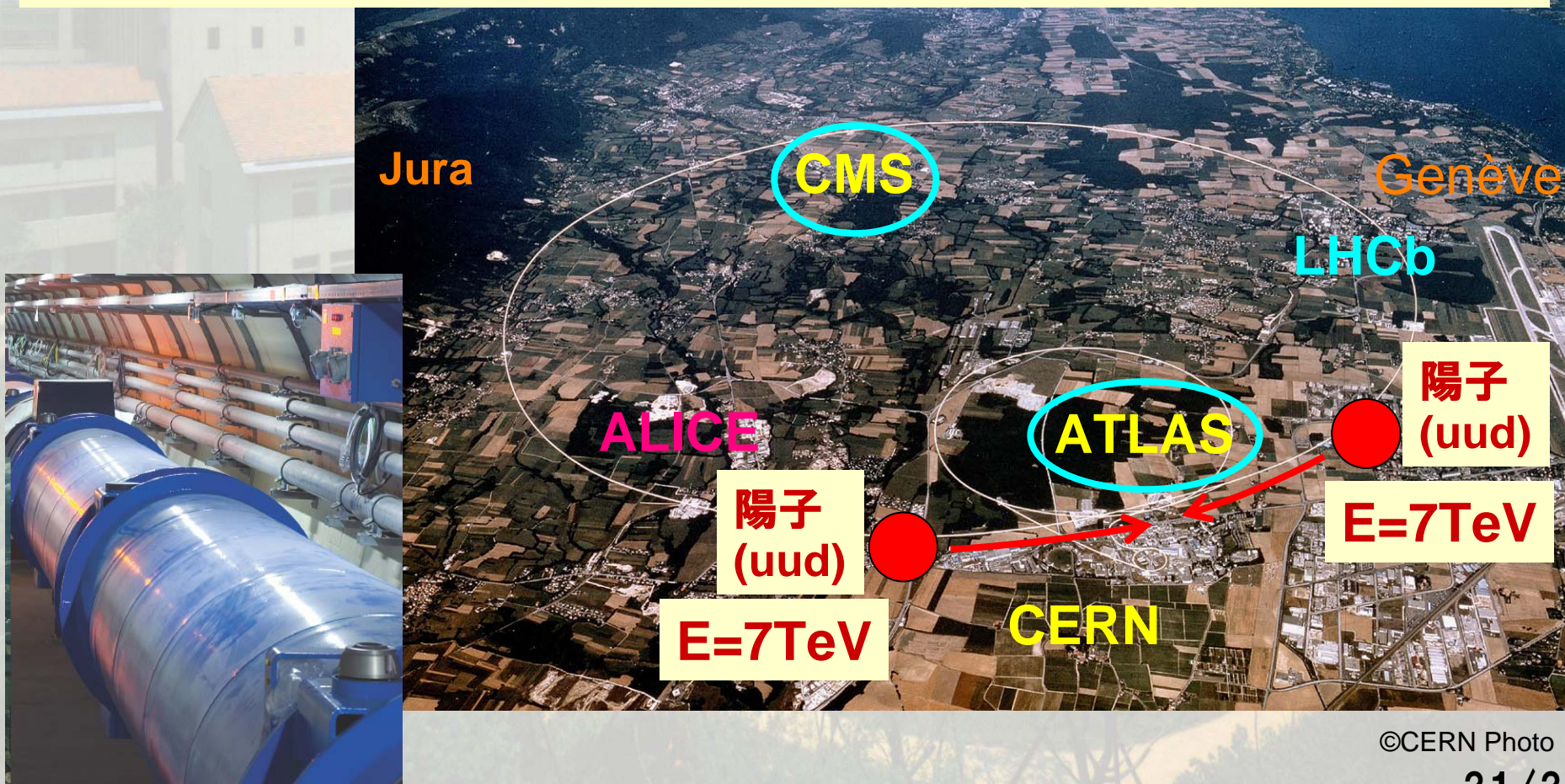
ヒッグス

→ヒッグス 粒子の発見が重要

現在の素粒子論：標準模型と呼ばれる理論で記述される

ヒッグス粒子：標準模型の構成粒子の中で最後に発見された

LHC実験（Large Hadron Collider; スイス・ジュネーブ・CERN; 周長27km; 建設費5000億円）が2008年から稼働しており、ATLASとCMSでヒッグス粒子を探索→2012年7月についてヒッグス粒子を発見



自然界には4つの相互作用(=力)があることが知られている

相互作用	強い相互 作用	電磁相互 作用	弱い相互 作用	重力相互 作用
相互作用の 大きさ	1	10^{-2}	10^{-5}	10^{-40}

核力(核子を束縛する力)など

分子、原子、エレクトロニクス、磁石

中性子の崩壊・地熱など

万有引力(重力は現在の素粒子の実験エネルギーでは無視できるため議論しない)

素粒子の感じる力

素粒子		強い相互 作用	電磁相互 作用	弱い相互 作用	重力相互 作用
クォーク	u	○	○	○	○
	d	○	○	○	○
レプトン	e	×	○	○	○
	ν_e	×	×	○	○

(重力を除くと)ニュートリノ(ν_e)は弱い力しか感じない
→観測は**ものすごく**難しい

[注] 記号の読み方

ギリシャ文字:

ν : ニュー (英語の小文字のnに相当)

現在の素粒子論研究:

標準模型を越える物理の模索

A) フォーマルな研究

(トップダウン的アプローチ)

重力を含んだ統一理論の研究
(弦理論)

B) 現象論的研究

(ボトムアップ的アプローチ)

現在・近未来の実験で検証できる
物理を研究

標準模型

