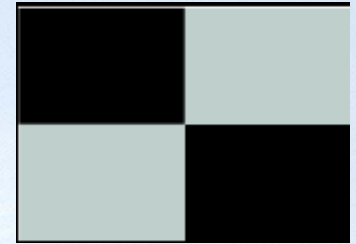


首都大学オープンユニバーシティ



素粒子物理学へのいざない

1. 素粒子とは
2. 対称性の自発的破れと標準理論
3. 小林・益川理論とCPの破れ
4. ニュートリノと素粒子物理学

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

はじめに

- アンケートのお願い
次回以降の参考にするために講義の最後に提出をお願いします
- 質問について
わからないことがあった場合には、その場で随時質問をして下さい

首都大学オープンユニバーシティ

2009年5月16日

素粒子物理学へのいざない

第一回

素粒子とは

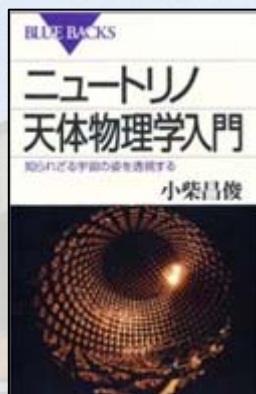
このスライドのファイルは以下に置いてあります：
<http://musashi.phys.metro-u.ac.jp/~yasuda/ou2009-1.pdf>

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



参考書(より詳しいことを知りたい方は読んで下さい:

1→3の順にむずかしくなってゆくかもしれません)



- (1) ニュートリノ天体物理学入門
— 知られざる宇宙の姿を透視する (ブルーバックス)
小柴 昌俊 (著)
単行本(ソフトカバー): 190ページ
出版社: 講談社 (2002/11/21)



- (2) クォーク
— 素粒子物理はどこまで進んできたか (ブルーバックス)
南部 陽一郎 (著)
新書: 316ページ
出版社: 講談社: 第2版版 (1998/02)



- (3) 消えた反物質
— 素粒子物理が解く宇宙進化の謎 (ブルーバックス)
小林 誠 (著)
新書: 205ページ
出版社: 講談社 (1997/06)

“新しい単語が次々と出てきて、これはかなわんと感じられる方が多いと思いますが、これらはただ物事を記述するための道具に過ぎないので、はっきりと理解できなくても気にしないで先に読み進んでください。何遍か出会ううちに、ああ、こういうことだったのか、と納得がゆくことでしょう。”

「ニュートリノ天体物理学入門」(小柴先生)

素粒子とは？

物質の構造:たとえば水の場合、気体(水蒸気)・液体(水)・固体(氷)の違いはあるが、その微細構造は水の**分子**というものから成り立っている

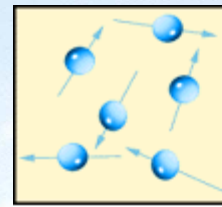


その水の分子は、**酸素**一個と**水素**二個の**原子**と呼ばれるものから成り立っている

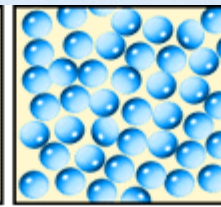


その**原子**=**元素**も100種類ほどあり、基本粒子とは考えられていない

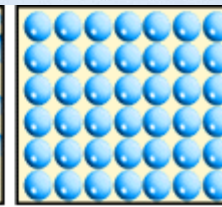
物質



気体

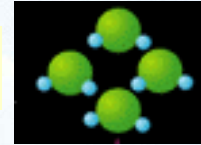


液体

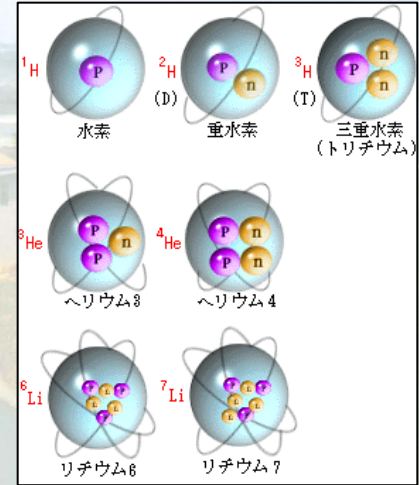


固体・結晶

分子



原子



元素

元素周期表

	1A	2A	3A	4A	5A	6A	7A	8	1B	2B	3B	4B	5B	6B	7B	0		
1	¹ H															² He		
2	³ Li	⁴ Be									⁵ B	⁶ C	⁷ N	⁸ O	⁹ F	¹⁰ Ne		
3	¹¹ Na	¹² Mg									¹³ Al	¹⁴ Si	¹⁵ P	¹⁶ S	¹⁷ Cl	¹⁸ Ar		
4	¹⁹ K	²⁰ Ca	²¹ Sc	²² Ti	²³ V	²⁴ Cr	²⁵ Mn	²⁶ Fe	²⁷ Co	²⁸ Ni	²⁹ Cu	³⁰ Zn	³¹ Ga	³² Ge	³³ As	³⁴ Se	³⁵ Br	³⁶ Kr
5	³⁷ Rb	³⁸ Sr	³⁹ Y	⁴⁰ Zr	⁴¹ Nb	⁴² Mo	⁴³ Tc	⁴⁴ Ru	⁴⁵ Rh	⁴⁶ Pd	⁴⁷ Ag	⁴⁸ Cd	⁴⁹ In	⁵⁰ Sn	⁵¹ Sb	⁵² Te	⁵³ I	⁵⁴ Xe
6	⁵⁵ Cs	⁵⁶ Ba	⁵⁷ L	⁷² Hf	⁷³ Ta	⁷⁴ W	⁷⁵ Re	⁷⁶ Os	⁷⁷ Ir	⁷⁸ Pt	⁷⁹ Au	⁸⁰ Hg	⁸¹ Tl	⁸² Pb	⁸³ Bi	⁸⁴ Po	⁸⁵ At	⁸⁶ Rn
7	⁸⁷ Fr	⁸⁸ Ra	⁸⁹ A															
			⁵⁷ L	⁵⁸ La	⁵⁹ Ce	⁶⁰ Pr	⁶¹ Nd	⁶² Pm	⁶³ Sm	⁶⁴ Eu	⁶⁵ Gd	⁶⁶ Tb	⁶⁷ Dy	⁶⁸ Ho	⁶⁹ Er	⁷⁰ Tm	⁷¹ Yb	⁷² Lu
			⁸⁹ A	⁹⁰ Ac	⁹¹ Th	⁹² Pa	⁹³ U	⁹⁴ Np	⁹⁵ Pu	⁹⁶ Am	⁹⁷ Cm	⁹⁸ Bk	⁹⁹ Cf	¹⁰⁰ Es	¹⁰¹ Fm	¹⁰² Md	¹⁰³ No	¹⁰⁴ Lr

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



核子(u**クォーク**・d**クォーク**)

$<10^{-16}$ cm



クォーク

[注] 数の表示方法

大きな数の表示方法:

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

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

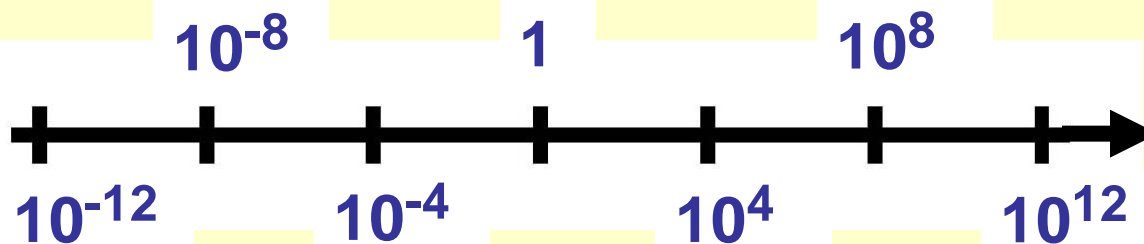
$$1 \text{ 兆} = 1,000,000,000,000 = 10^{12} \text{ (10の12乗)}$$

小さな数の表示方法:

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

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

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



素粒子物理学では主に以下の問題を明かにする:

A)素粒子の分類(どのような素粒子があるか)

→今回の講義

**B)素粒子間の相互作用(どのような相互作用をして、
どのような複合粒子をつくるか)**

→次回の講義

今回の講義で説明したいこと

- 素粒子の種類は表の通りである(似たような粒子のコピーが3つ)
- 各粒子の説明
- 素粒子の種類が決められてきた歴史的経緯を説明する

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

素粒子研究の歴史 (20世紀の歴史を通して素粒子を説明)

1897年:電子の発見

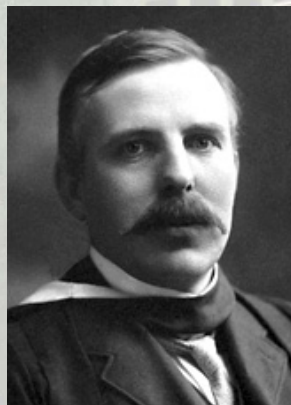
電子:負の電気を帯びた粒子



トムソン

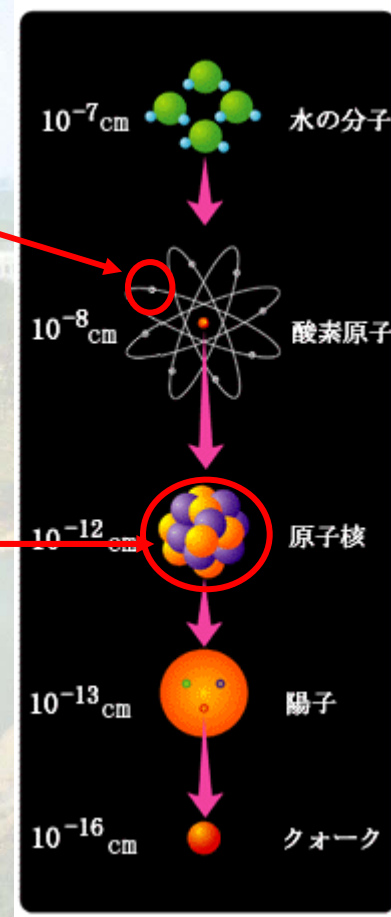
この段階では
素粒子=原子

1911年:原子の構造の発見



ラザフォード

この段階で
素粒子=原子核



[注] 電気を帯びた粒子の性質

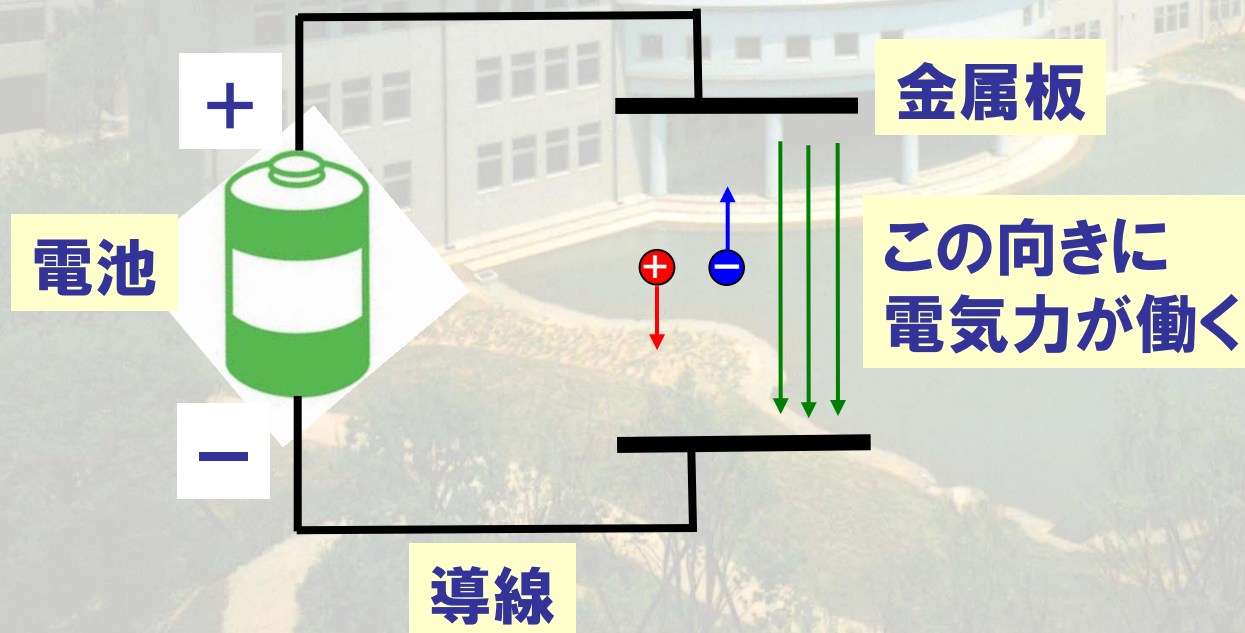
正の電気を帯びた粒子 \oplus

電気力の方向 \downarrow に力が働く

負の電気を帯びた粒子 \ominus

電気力の方向 \downarrow とは逆に力が働く

電子



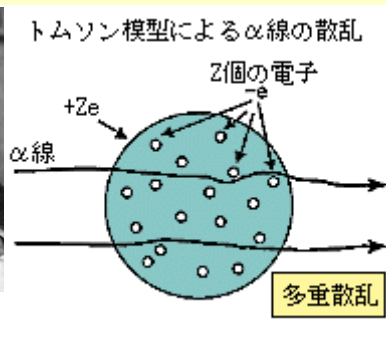
原子の構造: 1911年以前にはよくわかっておらず、2つの模型があった

トムソン模型

原子内部に一様に電荷が分布していれば粒子はほとんど曲がらずに通過



トムソン

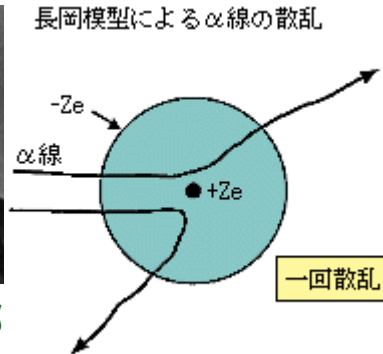


長岡模型

原子内部に「核」があれば条件によって粒子は大きな角度で散乱される



長岡半太郎



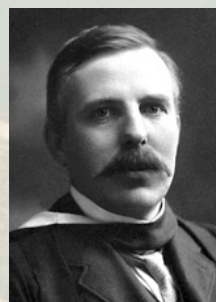
実験の結果、大きな角度で散乱される粒子が観測



原子 = 原子核 + 電子

1911年: 原子の構造の発見

α (アルファ) 粒子と呼ばれる放射線を金の原子に当て、 α 粒子の散乱される様子を観測

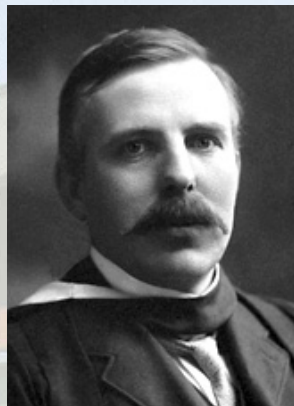


ラザフォード

素粒子の種類は少しずつ増えて行く

1913年:陽子の発見

陽子:正の電荷を持つ粒子



ラザフォード

この段階では原子核が陽子だけから構成されているのかが不明だった

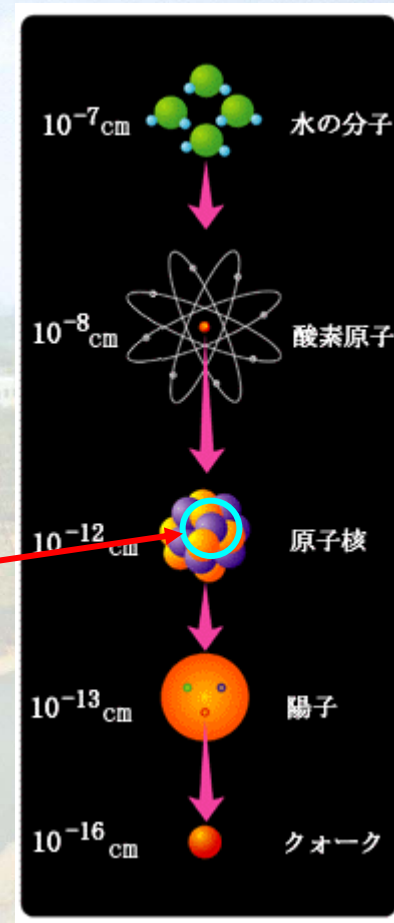
1932年:中性子の発見

中性子:電荷を持たない粒子



チャドウィック

この段階で素粒子=核子(核子=陽子、中性子)



1932年当時の”素粒子”

電荷: 粒子の帯びている電気の量で、**正**と**負**がある

		電荷	質量	安定性
核子	陽子	+e	938	○
	中性子	0	940	×
電子		-e	0.5	○

電子に比べて
約2000倍ほどの
重い粒子

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):

$$\begin{aligned} \text{MeV}/c^2 &= 10^6 \text{eV (電子ボルト)} / c^2 \\ &= 1.6 \times 10^{-13} \text{J (ジュール)} / c^2 \end{aligned}$$

アインシュタインの式 ($E = mc^2$) を使うと

$$m = E/c^2 \quad (c = 3 \times 10^8 \text{m/s は光速 (1秒間に地球7回半を走る速さ)})$$

[注] エネルギーの単位

※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

[注] 粒子の安定性

●素粒子であっても一般に安定である必要はない

→重い粒子は軽い粒子に崩壊するのが普通

(例) 中性子 → 陽子 + 電子 + ニュートリノ

という反応はエネルギー保存則等と矛盾

しないので可能 (ニュートリノについては後述)

一方、陽子は (今の所) 他の粒子に崩壊できず、安定

●それ以上軽い粒子に崩壊ができない粒子は安定

[注] 記号の読み方

ギリシャ文字:

- Δ : デルタ (英語の大文字のDに相当)
- γ : ガンマ (英語の小文字のgに相当)
- μ : ミュー (英語の小文字のmに相当)
- ν : ニュー (英語の小文字のnに相当)
- τ : タウ (英語の小文字のtに相当)
- π : パイ (英語の小文字のpに相当)
- θ : シータ (英語の小文字のqに相当)
- ϕ : ファイ (英語の小文字のfに相当)

1930年:ディラック方程式(相対論的電子の方程式)



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

反粒子: 質量は同じで電荷が逆符号の粒子

1932年:陽電子の発見



アンダーソン

		電荷	質量	安定性
核子	陽子 (pと略記)	+e	938	○
	中性子 (nと略記)	0	940	×
電子 (e ⁻ と略記)		-e	0.5	○
陽電子 (e ⁺ と略記)		+e	0.5	○

粒子と反粒子

(大学4年～大学院修士課程1年で学習)

反粒子: 質量は同じで電荷が逆符号の粒子

		電荷	質量	安定性	バリオン数	レプトン数	
バリオン	核子	陽子	+e	938	○	+1	0
		中性子	0	940	×	+1	0
	レプトン	電子	-e	0.5	○	0	+1
反粒子	反核子	反陽子	-e	938	○	-1	0
		反中性子	0	0.5	×	-1	0
	レプトン	陽電子	+e	0.5	○	0	-1

陽子・中性子は強い相互作用 (→第二回目の講義) を作用する粒子で、**バリオン**と呼ばれる

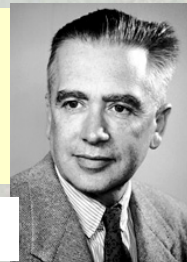
電子は強い相互作用をしない粒子で**レプトン**と呼ばれる

中性子と反中性子は共に電荷は0だが**バリオン数**で区別される

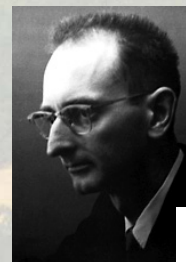
バリオンに定義された数で、**バリオン数**の和はそれぞれ反応の前後で変わらない

レプトンに定義された数で、**レプトン数**の和はそれぞれ反応の前後で変わらない

1955年には陽子の反粒子である反陽子も発見された



セグレ



チェンバレン

1933年：ニュートリノの予言

中性子→陽子+電子

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中性粒子が導入された:

中性子→陽子+電子+ (反電子) ニュートリノ



パウリ

ν_e : 電子ニュートリノ

$\bar{\nu}_e$: 反電子ニュートリノ

1955年：(反電子) ニュートリノの発見

(原子炉からのニュートリノの観測)



ライネス



コーワン

粒子		電荷	質量	安定性	バリオン数	レプトン数
核子	陽子 (p)	+e	938	○	+1	0
	中性子 (n)	0	940	×	+1	0
電子 (e ⁻)		-e	0.5	○	0	+1
陽電子 (e ⁺)		+e	0.5	○	0	-1
ν_e		0	0	○	0	+1
$\bar{\nu}_e$		0	0	○	0	-1

バリオン

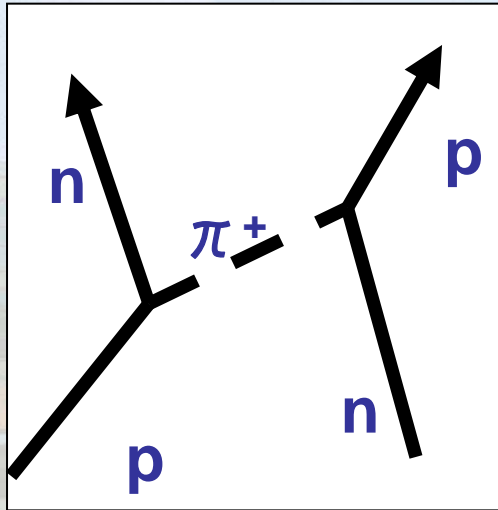
レプトン

1935年:中間子論

核子は π 中間子を媒介して引きつけ合う



湯川秀樹



湯川の中間子論は π 中間子の存在を予言

1947年: パイ中間子の発見

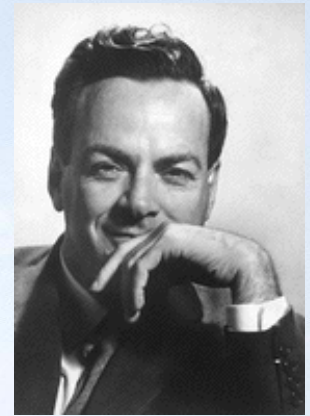


パウエル

粒子		電荷	質量	安定性	バリオン数	レプトン数
核子	陽子	+e	938	○	+1	0
	中性子	0	940	×	+1	0
e^-, e^+		-e, +e	0.5	○	0	+1, -1
$\nu_e, \bar{\nu}_e$		0	0	○	0	+1, -1
π^-, π^+		-e, +e	140	×	0	0

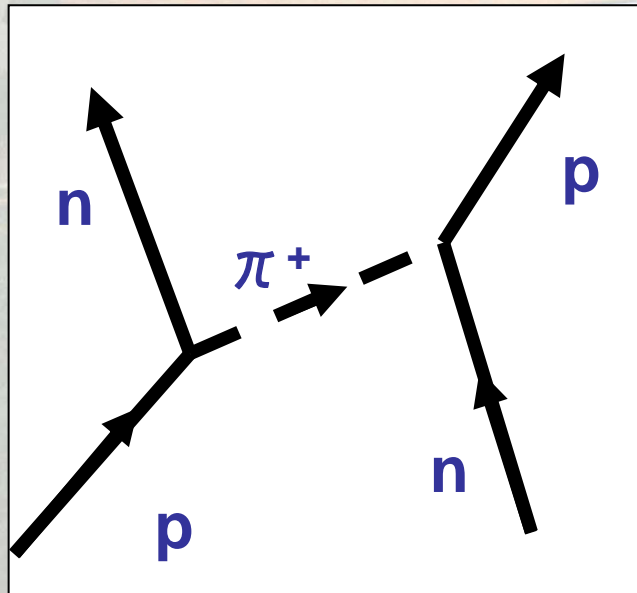
[注] ファインマン図形

- 粒子の反応過程を表す図形
- 本来は数学的に厳密な定式化がされている図形であるが、直観的にもわかりやすい



ファインマン

時間方向



● 左側：p (陽子) が n (中性子) に変換すると同時に π^+ 中間子を放出する

● 右側：n (中性子) が π 中間子を吸収して p (陽子) に変換される

空間方向

素粒子の種類はどんどん増えて行く:第二世代の登場

1937年:ミュー粒子の発見

μ^- :質量が電子の約200倍であること以外は電子と同じ性質を持つ粒子 (“**第二世代**”粒子の最初の発見)



パウエル

		電荷	質量	安定性	バリオン数	電子粒子数	ミュー粒子数
核子	陽子	+e	938	○	+1	0	0
	中性子	0	940	×	+1	0	0
電子 (e^-)		-e	0.5	○	0	+1	0
陽電子 (e^+)		+e	0.5	○	0	-1	0
ν_e		0	0	○	0	+1	0
$\bar{\nu}_e$		0	0	○	0	-1	0
μ^-		-e	106	×	0	0	+1
μ^+		+e	106	×	0	0	-1

レプトン数の概念は電子数、ミュー粒子数に拡張され、それぞれ反応の前後で変わらない(保存する)

第二世代クォークの登場

ストレンジネスは生成反応では保存し、崩壊反応では保存しない

1947年:
ストレンジ粒子の発見



バトラー

ロチェスター

粒子		電荷	質量	安定性	バリオン数	ストレンジネス	電子粒子数	ミュー粒子数
核子	陽子	+e	938	○	+1	0	0	0
	中性子	0	940	×	+1	0	0	0
e^-, e^+		-e, +e	0.5	○	0	0	+1, -1	0
$\nu_e, \bar{\nu}_e$		0	0	○	0	0	+1, -1	0
μ^-, μ^+		-e, +e	106	×	0	0	0	+1, -1
π^-, π^+		-e, +e	140	×	0	0	0	0
K^-, K^+		-e, +e	約 500	×	0	+1, -1	0	0
Λ		0	1116	×	+1	+1	0	0

“第二世代”のπ中間子に相当する粒子

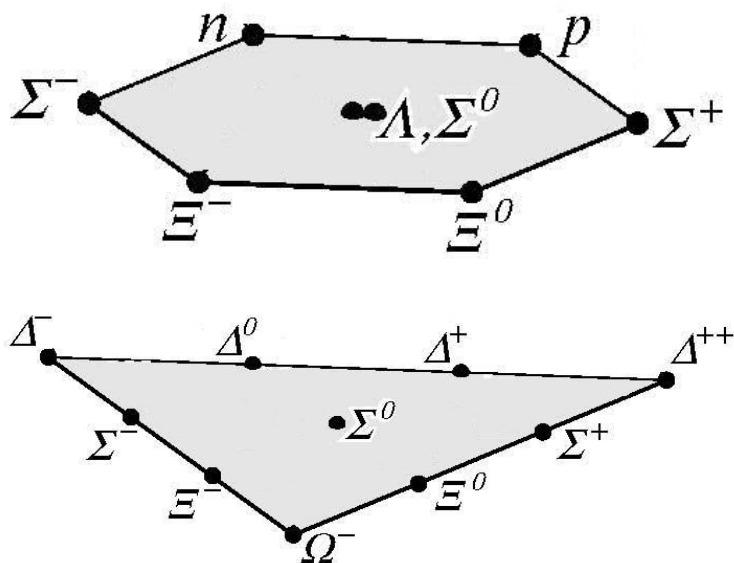
“第二世代”の核子に相当する粒子

誤植でした（申し訳ありません）

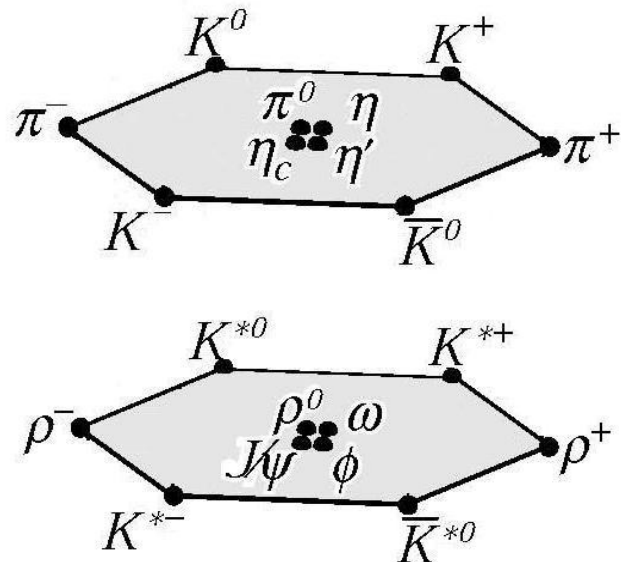
1950~55年:

加速器による一連のストレンジ粒子群の生成(従来は宇宙線の観測中)

バリオン(核子の仲間;バリオン数=+1)



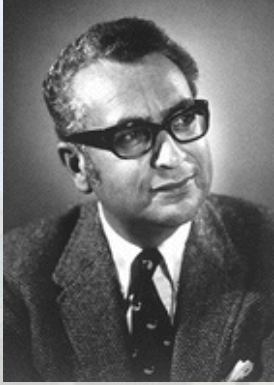
中間子(π の仲間;バリオン数=0)



これだけ多くの粒子が出現すると、“素粒子”とは言えなくなってきた

これらを、より種類の少ない素粒子で説明する試み(クォーク模型)が現れた

1964年:クォーク模型



ゲルマン



ツヴァイク

粒子 電荷

陽子 $p = (uud)$ $+e$

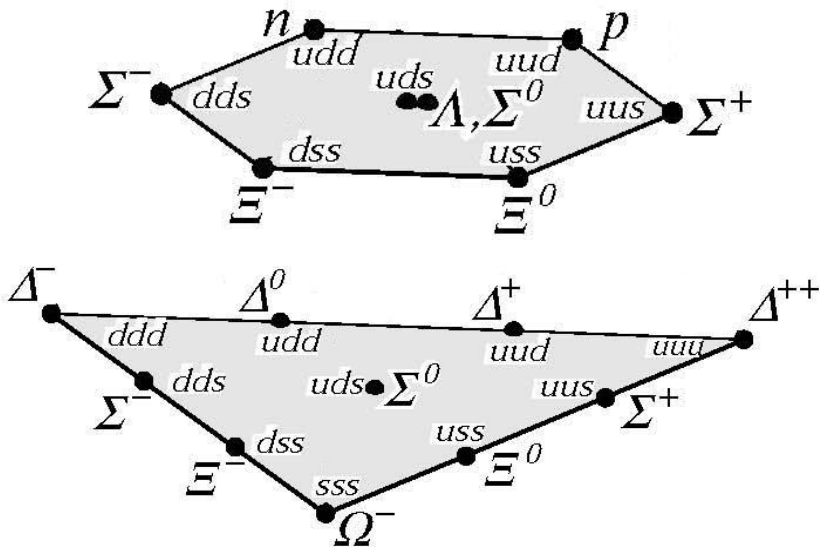
中性子 $n = (udd)$ 0

π 中間子 $\pi^+ = (u\bar{d}) + e$

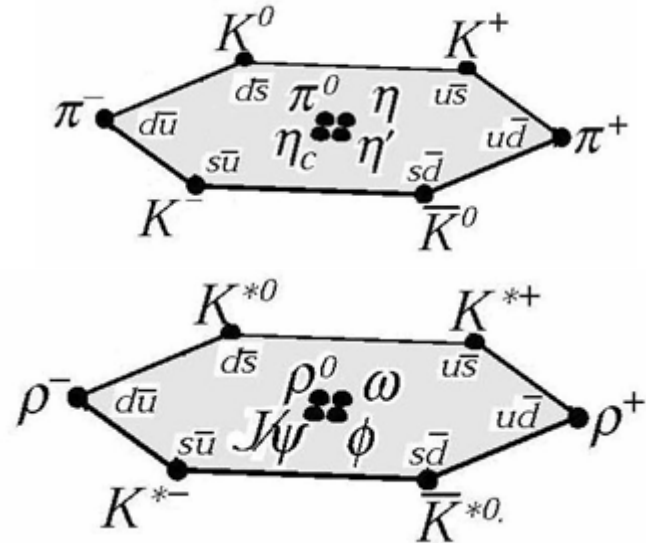
3種類のクォークでハドロン
(=バリオン+中間子)が説明できる

	電荷	バリオン数
uクォーク	$+2e/3$	$+1/3$
dクォーク	$-e/3$	$+1/3$
sクォーク	$-e/3$	$+1/3$
反uクォーク	$-2e/3$	$-1/3$
反dクォーク	$+e/3$	$-1/3$
反sクォーク	$+e/3$	$-1/3$

バリオン



中間子

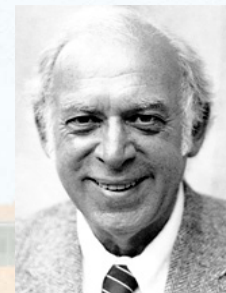


誤植でした(申し訳ありません)

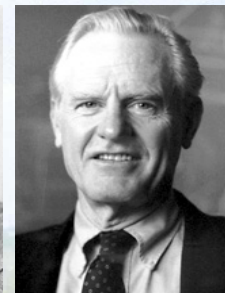
そこでクォークを実験的に発見できるかが問題となったが。。。

1969年：電子陽子深非弾性散乱(→陽子のパートン構造の確立)

1911年のラザフォードの実験と同様に、陽子に電子を衝突させて、電子の散乱される様子を観測



フリードマン



ケンドール



テイラー

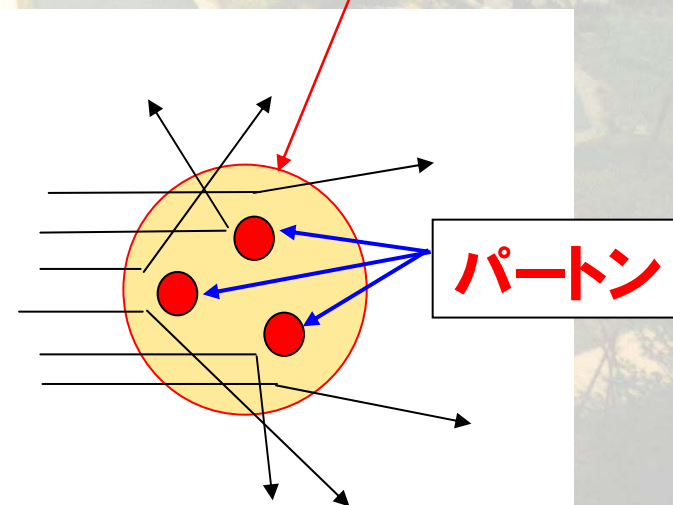
電子が大きな角度で散乱された

陽子の中に、「核」となるものの存在を示唆
→**パートン**と呼ぶ

かくして
パートン(←実験) = クォーク(←理論)
であることが推論され、クォーク模型が
確立された。

しかし、クォークは単独では発見されて
いない(それには深い理由がある→
第二回目の講義(量子色力学))

陽子



ということで1969年以降は
素粒子=クォーク+レプトン
 という描像が確立している

粒子
 (第一世代)

	粒子	電荷	質量	バリオン数	レプトン数
クォーク	u	$+2e/3$	約3?	$+1/3$	0
	d	$-e/3$	約6?	$+1/3$	0
レプトン	e^-	$-e$	0.5	0	+1
	ν_e	0	0	0	+1

反粒子
 (第一世代)

	粒子	電荷	質量	バリオン数	レプトン数
反クォーク	\bar{u}	$-2e/3$	約3?	$-1/3$	0
	\bar{d}	$+e/3$	約6?	$-1/3$	0
反レプトン	e^+	$+e$	0.5	0	-1
	$\bar{\nu}_e$	0	0	0	-1

その後現在のクォーク+レプトンが全て検出されるには2000年までかかった

クォーク

1974年:cクォークの発見



リヒター

ティン

1977年:bクォークの発見



レーダーマン

1994年:tクォークの発見



ショケット

グラニス

モンゴメリー

レプトン

1962年:ミューニュートリノの発見



レーダーマン

シュワルツ

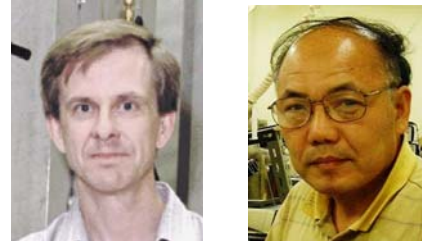
スタインバーガー

1976年:タウ粒子の発見



パール

2000年:タウニュートリノの発見



ランドバーグ

丹羽公雄

第二世代
(4番目)

第三世代
(5番目)

第三世代
(6番目)

現在:素粒子=三世代のクォーク+レプトン

第一世代

	粒子	電荷	質量	バリオン数	レプトン数
クォーク	u (アップ)	$+2e/3$	約3?	$+1/3$	0
	d (ダウン)	$-e/3$	約6?	$+1/3$	0
レプトン	e^-	$-e$	0.5	0	+1
	ν_e	0	0	0	+1

第二世代

	粒子	電荷	質量	バリオン数	レプトン数
クォーク	c (チャーム)	$+2e/3$	約1,200?	$+1/3$	0
	s (ストレンジ)	$-e/3$	約120?	$+1/3$	0
レプトン	μ^-	$-e$	106	0	+1
	ν_μ	0	0	0	+1

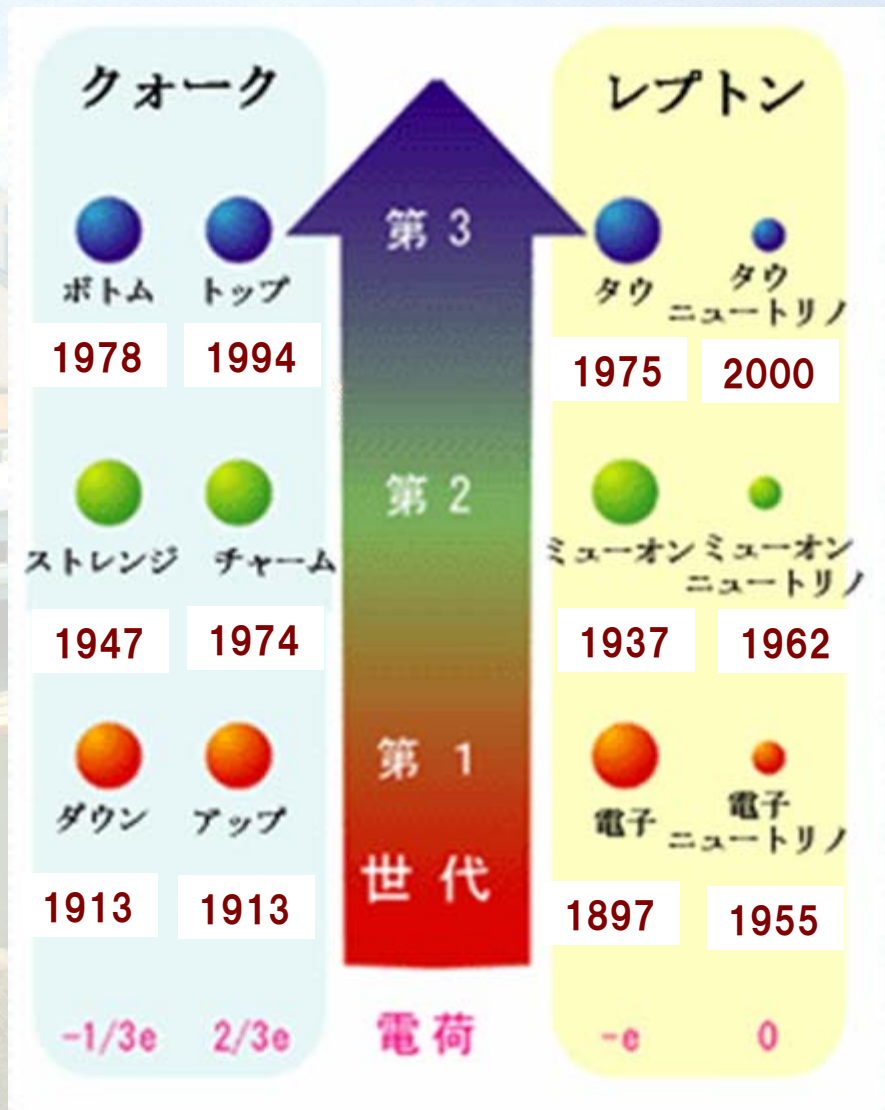
第三世代

	粒子	電荷	質量	バリオン数	レプトン数
クォーク	t (トップ)	$+2e/3$	174,300	$+1/3$	0
	b (ボトム)	$-e/3$	約4,000?	$+1/3$	0
レプトン	τ^-	$-e$	1777	0	+1
	ν_τ	0	0	0	+1

実は三世代のクォークは理論的に予言されていた！

1972年：小林一益川理論

cクォーク（4番目のクォーク）が実験的に発見される以前に、**CP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（→第三回目の講義）



小林誠

益川敏英

微細構造を探求するにはどれだけのエネルギー(=お金)がかかるか？

粒子の拡がり 粒子を探るエネルギーE≒物体の結合エネルギー

テスト粒子

物体(結合状態)

Eが結合エネルギーより大きければ物体をバラバラに出来るはず

粒子のエネルギーE

バラバラにするエネルギーEと、探索できる粒子の大きさxの関係は不確定性原理と呼ばれる量子力学の原理から求められる

たとえば、時計同士を軽くぶつけると、ちょっと蓋が取れる程度だが思い切りぶつけると、小さな部品までバラバラになる

$x=10^{-7}$ cm ⇔ E=100eV (分子)

$x=10^{-8}$ cm ⇔ E=1keV (原子)

$x=10^{-12}$ cm ⇔ E=10MeV (原子核)

$x=10^{-13}$ cm ⇔ E=100MeV (核子)

$x<10^{-16}$ cm ⇔ E>100GeV (クォーク)

$$E = \frac{10^{-5} \text{ cm} \cdot \text{eV}}{x}$$

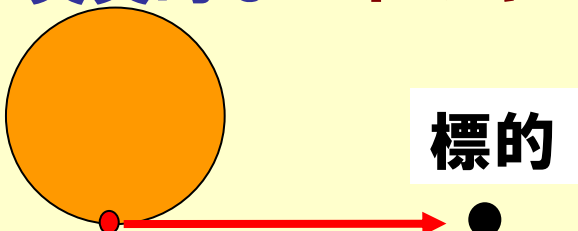
微細構造を見るにはエネルギーを高くする必要がある

素粒子実験の歴史

- 1950年以前：実験に用いる粒子は主に放射同位元素（アイソトープ）や宇宙線（大気中で作られるミュー粒子等→第四回目の講義）だった

- 1950年～1960年代：円形加速器からの粒子を静止標的である原子核に当てて実験した

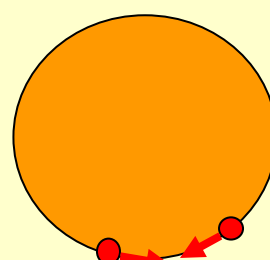
相対論→ 実質的なエネルギー = $\sqrt{2\text{GeV} \times E}$ ← エネルギーを高くするには不利



標的

- 1970年代～：円形加速器で逆向きに加速した粒子同士を衝突させるコライダー実験が主体となっている（両方の粒子自身が標的）

相対論→ 実質的なエネルギー = $2E$ ← エネルギーを高くするのに有利



加速器のエネルギーの履歴

“リビングストーン図”と呼ばれる表
(実際よりも楽観的)

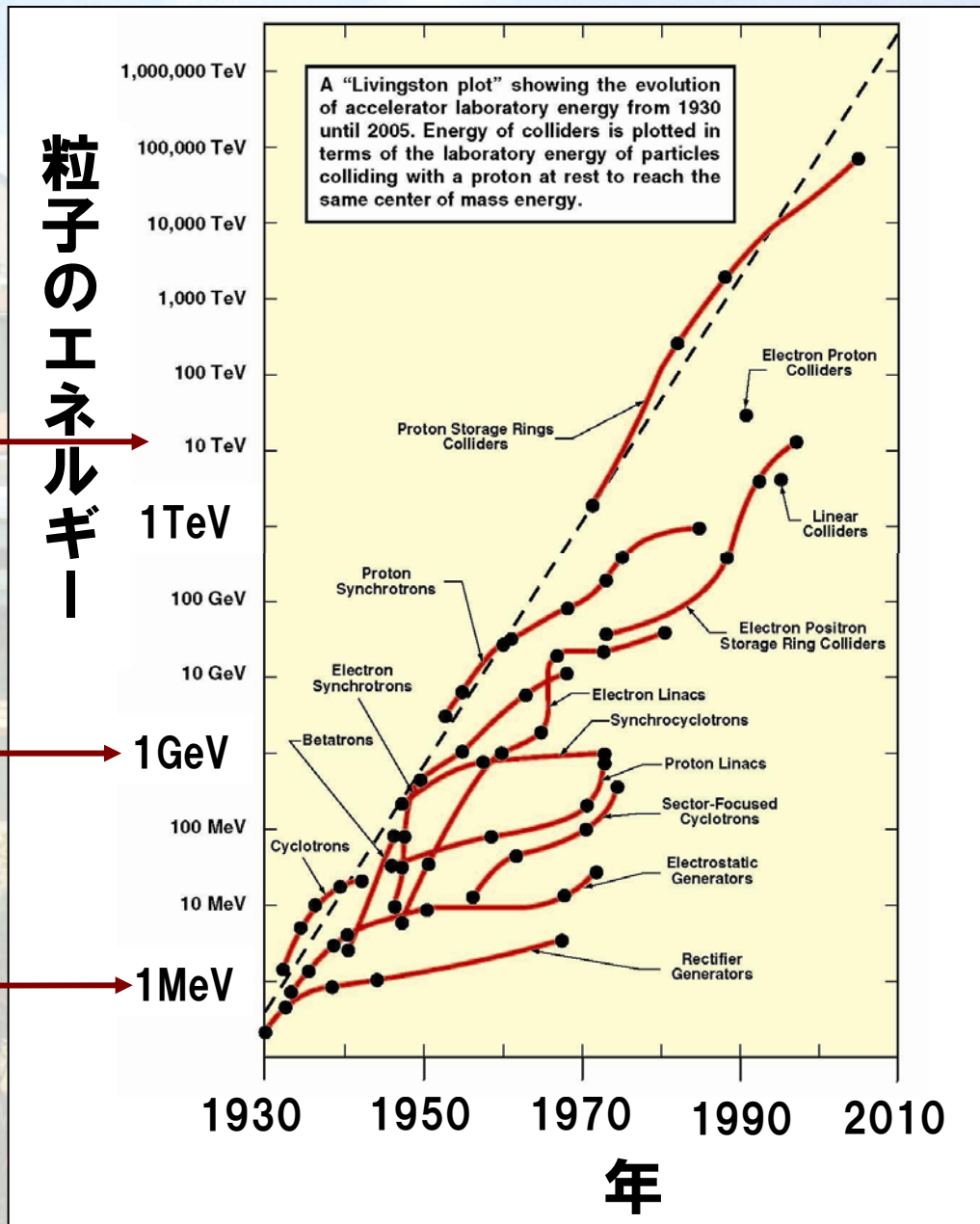
素粒子実験は、エネルギーを上げるために巨大科学化の一途をたどってきた

→“高エネルギー物理学”とも呼ばれている

現在の最高エネルギー(予定)

陽子の質量エネルギー
(陽子を光速度に近く加速するのに必要なエネルギー)

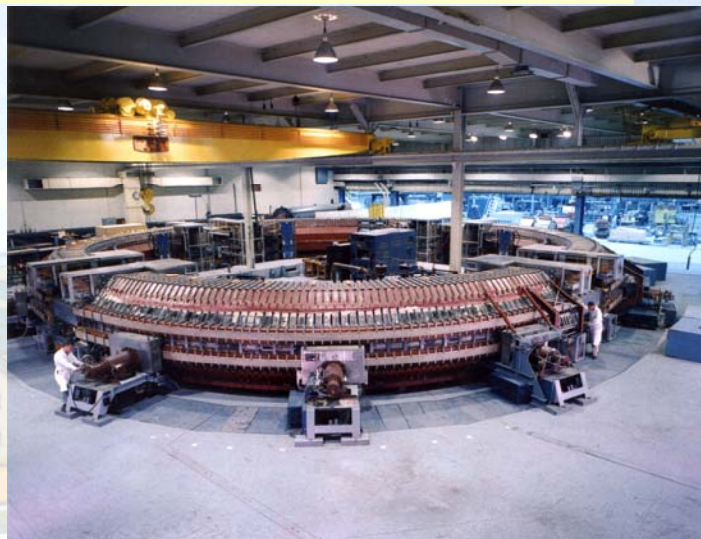
電子の質量エネルギー
(電子を光速度に近く加速するのに必要なエネルギー)



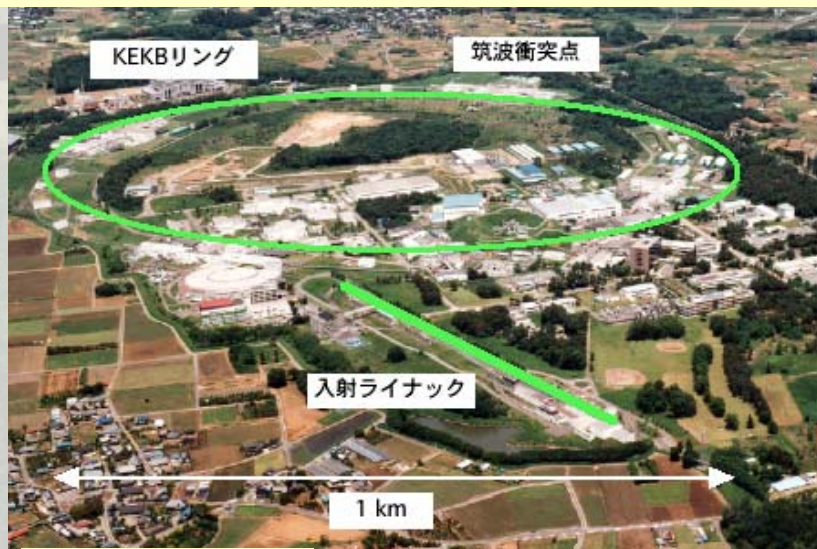
サイクロトロン(1930年代)



シンクロトロン(1950年代)



Bファクトリー(日本, KEK, 1998年~)



周長=3km

LHC(スイス, CERN, 2008年~)



周長=27km

An aerial photograph of a university campus. The central focus is a large, light-colored building with a prominent circular section supported by columns, situated on a raised platform overlooking a large, irregularly shaped pond. The pond is surrounded by greenery and a winding path. In the background, several other multi-story buildings with red-tiled roofs are visible under a blue sky with scattered clouds. The overall scene is bright and clear.

付録

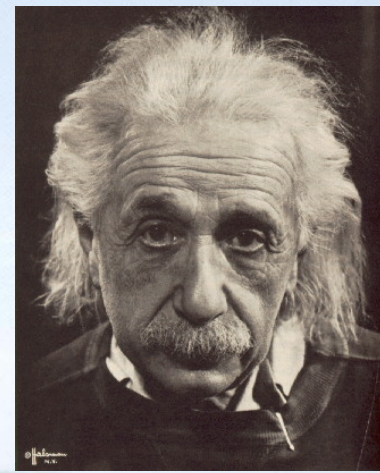
素粒子を記述するための基礎的道具：

- 特殊相対論（次ページ）
- 量子力学（次々ページ）



● 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)

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

m: 粒子の質量

c: 光速 $= 3 \times 10^8 \text{ m/s}$

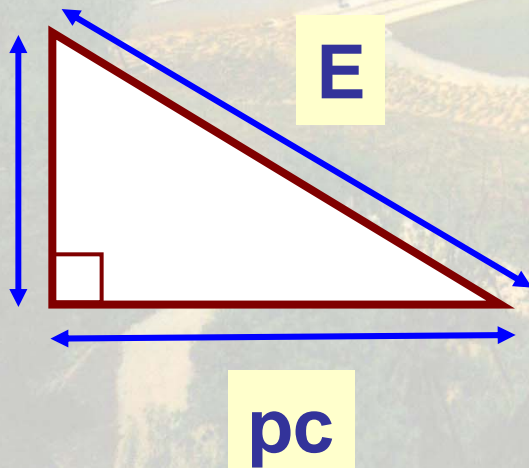
(1秒間に地球7
回周半の速さ)

E: 粒子のエネルギー

p: 粒子の運動量
(= 質量 × 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