

首都大学オープンユニバーシティ



ニュートリノ物理学へのいざない

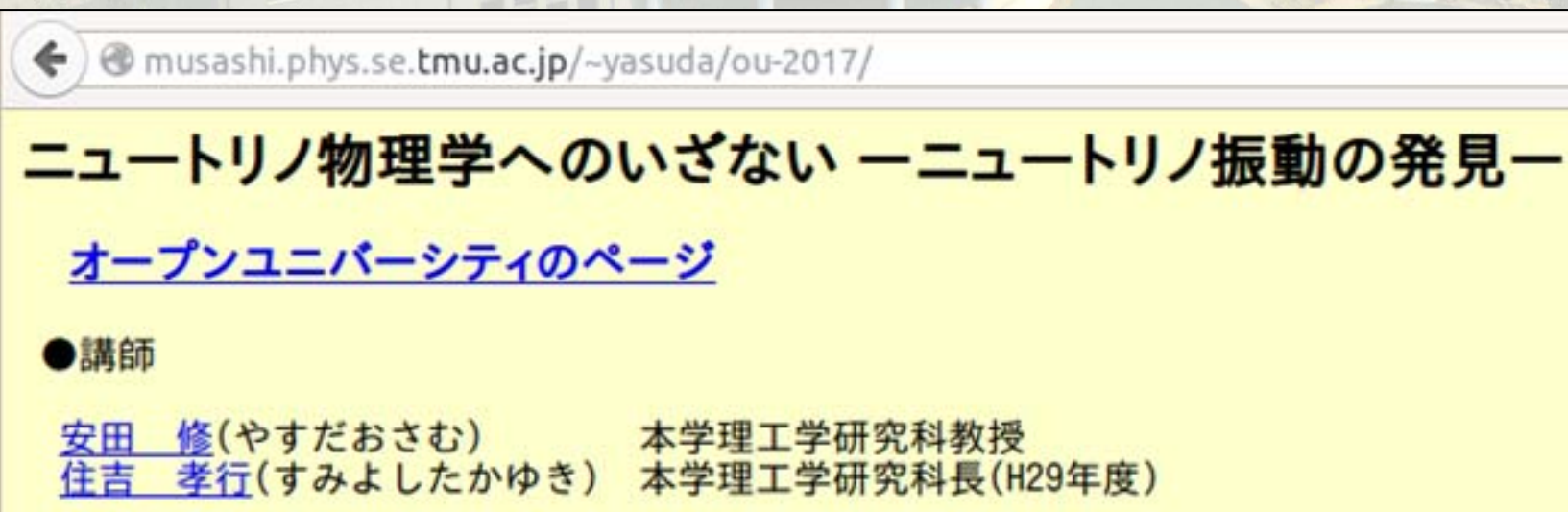
- 1. 素粒子物理学の初歩 (安田)**
- 2. ニュートリノと素粒子物理学 (安田)**
- 3. ニュートリノ観測の実際 (住吉)**
- 4. ニュートリノ研究の将来 (安田)**

首都大学東京・理工学研究科・物理学専攻
素粒子理論研究室 **安田修**
高エネルギー実験研究室 **住吉孝行**

はじめに

- アンケートのお願い(一回目のみ)
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
- 講義のホームページ(外部からのリンクはありませんので、お手数ですが最初は手で御入力をお願いします)

<http://musashi.phys.se.tmu.ac.jp/~yasuda/ou-2017/>



← musashi.phys.se.tmu.ac.jp/~yasuda/ou-2017/

ニュートリノ物理学へのいざないーニュートリノ振動の発見ー

[オープンユニバーシティのページ](#)

● 講師

安田 修 (やすだおさむ)	本学理工学研究科教授
住吉 孝行 (すみよしたかゆき)	本学理工学研究科長(H29年度)

● 講義のwebページには参考図書をあげてありますので、興味のある方は適宜参考にされてください

● 講義予定

(講義の数日前頃までには講義のスライドをこのページにアップロードする予定です。)

- 5/13 第1回 [素粒子物理学の初歩](#) (安田)
- 5/20 第2回 ニュートリノと素粒子物理学 (安田)
- 5/27 第3回 ニュートリノ観測の実際 (住吉)
- 6/03 第4回 ニュートリノ研究の将来 (安田)

● 参考文献

首都大図書館の[利用案内](#)にありますように、本学オープンユニバーシティの会員の方は、図書を5冊まで2週間の期間、借りることができます(新規会員の方は第1回に会員カードをお渡しするのでそれ以降借りることができるということです)。講義では特に参考文献を読むことを推奨する訳ではありませんが、興味のある方のために、首都大図書館の図書の中で、ニュートリノ・素粒子に関係があり、それほど専門知識を必要としない図書を[こちら](#)に何冊かあげておきます。こちらで全ての内容を把握している訳ではなく、図書によって難易度が違うと思いますが、適宜参考にさせて頂ければと思います。

●最終回のスケジュールに関する御相談

最終回(6月3日(土))のスケジュールは基本的には14:40~16:10ですが、当日は大学院説明会で安田が16:20から8号館で業務に従事するため、**13:40~15:10**とするよう提案させて頂きたいと思います。→通常講義のあと30分程度は質疑応答で延長することが多いですが、15:10に講義が終了すれば16:20の業務には間に合います。

首都大学オープンユニバーシティ

2017年5月13日

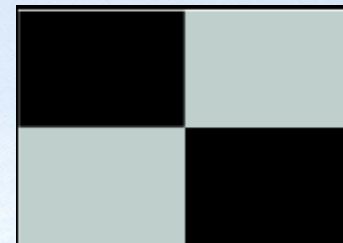
ニュートリノ物理学へのいざない

第一回

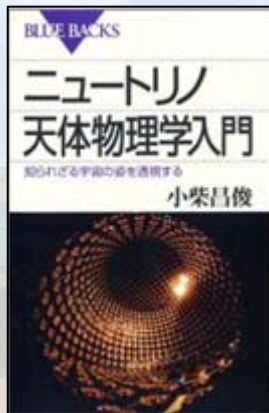
素粒子物理学の初歩

このスライドは以下この講義のHPに置いてあります：
<http://musashi.phys.se.tmu.ac.jp/~yasuda/ou-2017/>

首都大学東京・理工学研究科・物理学専攻
素粒子理論研究室 **安田修**



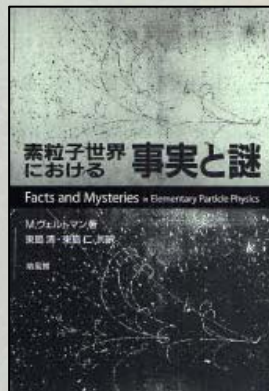
参考書(より詳しいことを知りたい方は読んで下さい;この講義のHPにもさらなる参考書をあげてあります)



- (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
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
講談社: 第2版版 (1998/02)



- (3) 素粒子世界における事実と謎
M. ヴェルトマン (著), 東島 清 (翻訳), 東島 仁 (翻訳)
培風館 (2007.7)

“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

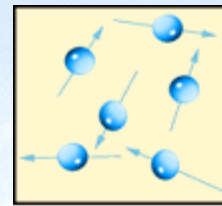


その水の分子は、**酸素**一個と**水素**二個の**原子**と呼ばれるものから成り立っている

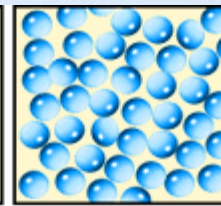


その**原子**=**元素**も100種類ほどあり、基本粒子とは考えられていない

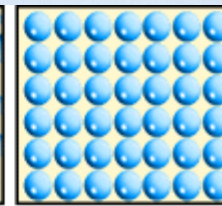
物質



気体

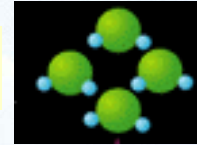


液体



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	H															He		
2	Li	Be									B	C	N	O	F	Ne		
3	Na	Mg									Al	Si	P	S	Cl	Ar		
4	K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
5	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe
6	Cs	Ba	L	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn
7	Fr	Ra	A															
	L	La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu		
	A	Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	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



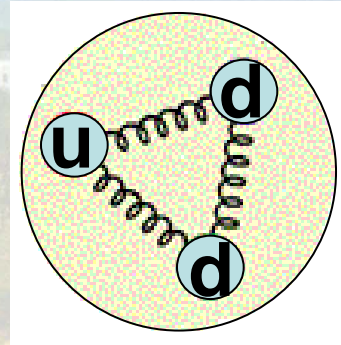
酸素原子(原子核・**電子**)

核子

10^{-12} cm



原子核(陽子・中性子)

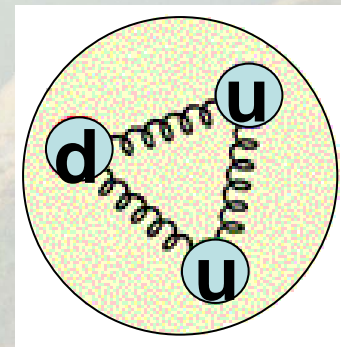


中性子

10^{-13} cm



核子(u**クォーク**・d**クォーク**)



陽子

$<10^{-16}$ cm



クォーク

[注] 数の表示方法

大きな数の表示方法:

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

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

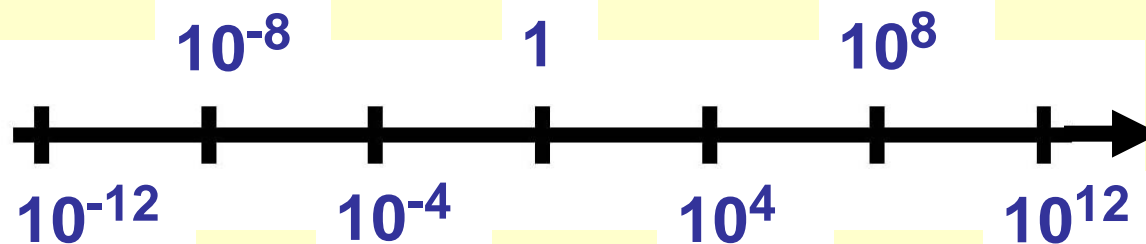
$$1 \text{ 兆} = 1,000,000,000,000 = 10^{12} \text{ (10の12乗)}$$

小さな数の表示方法:

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

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

$$1 \text{ 兆分の1} = 0.0000000000001 = 10^{-12} \text{ (10のマイナス12乗)}$$



ニュートリノ

1933年に理論的に予言された素粒子

nobelprize.org

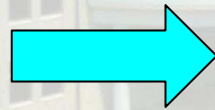


パウリ

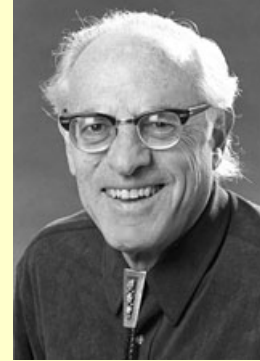
中性子→陽子+電子

という反応(ベータ崩壊と呼ばれる)で運動量・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

ちなみに最初に
ニュートリノが発見されたのは
1955年のこと
である



nobelprize.org



ライネス

www.aps.org



コーワン

1998年まではニュートリノの質量はゼロと考えられていた

1955年:ニュートリノの発見
(原子炉からのニュートリノの観測)

核分裂と原子力発電： 基本的に中性子の崩壊と同じ現象

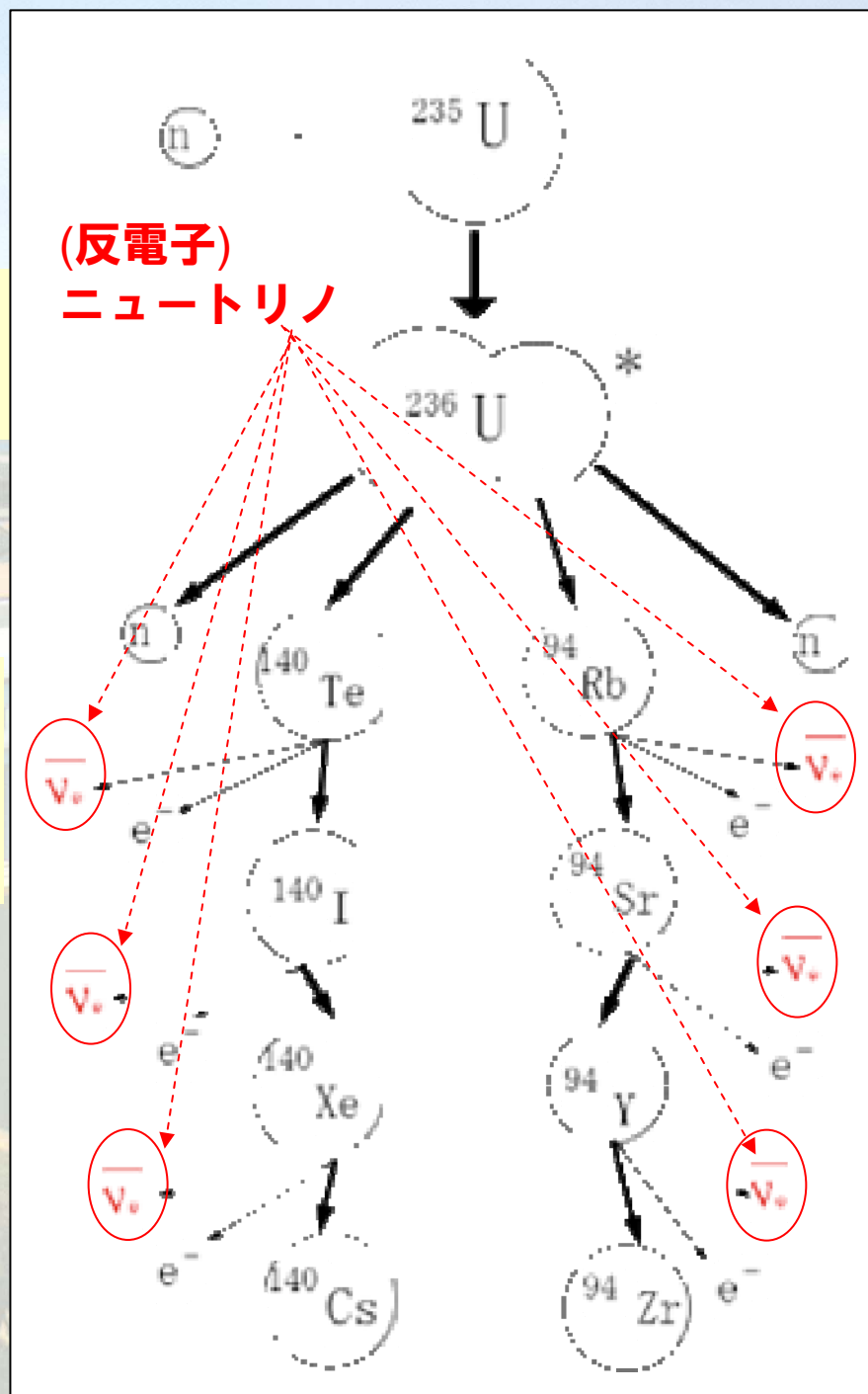
典型的な核分裂の一例



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

核分裂後の静止エネルギーの和
 $= [({}^{140}\text{Teの質量}) + ({}^{94}\text{Rbの質量}) + 2 \times (\text{中性子の質量})] \times c^2$

核分裂前後の静止エネルギー差 > 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)



[注] 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

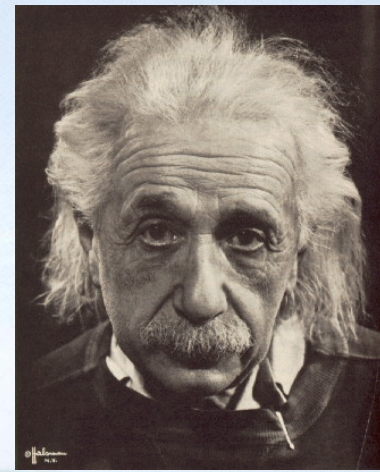
c:光速 $=3 \times 10^8 \text{m/s}$

E:粒子のエネルギー

p:粒子の運動量 (=質量×速度)

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

v:粒子の速度



アインシュタイン

- 質量×(光速)²もエネルギーの別な姿であり、どちらも別な姿に変わることが可能
- 物質不滅の法則は粒子レベルの反応では成立せず、粒子数や粒子の種類が変化することは可能
- エネルギー保存則と運動量保存則だけが成立

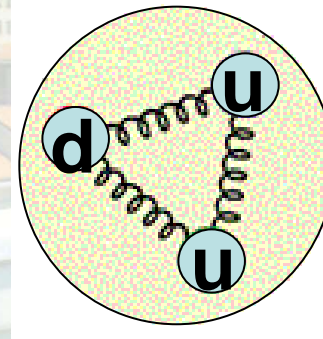
素粒子のまとめ(1)

- 物質はクォーク・レプトンから構成されている

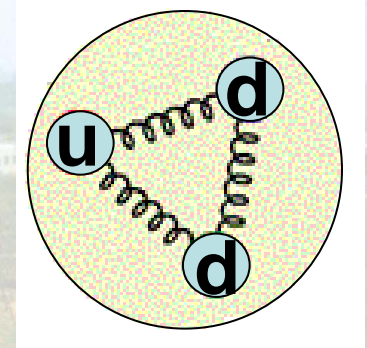
クォークは複数で束縛し合い、陽子・中性子のような複合粒子を構成する

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

クォーク	アップ ダウ
レプトン	電子 ニュートリノ 電子



陽子



中性子

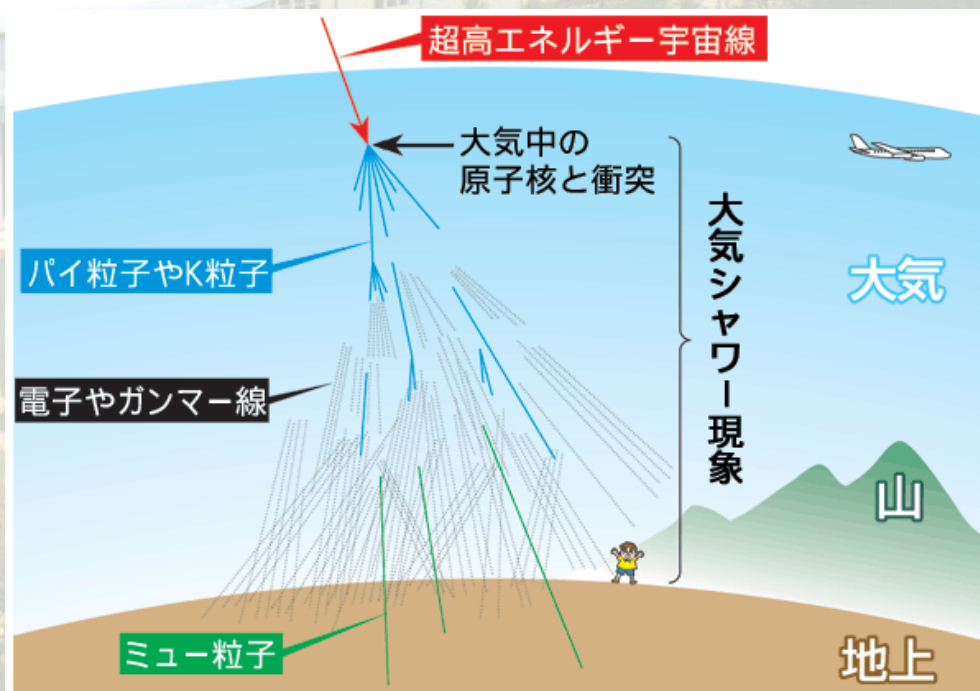
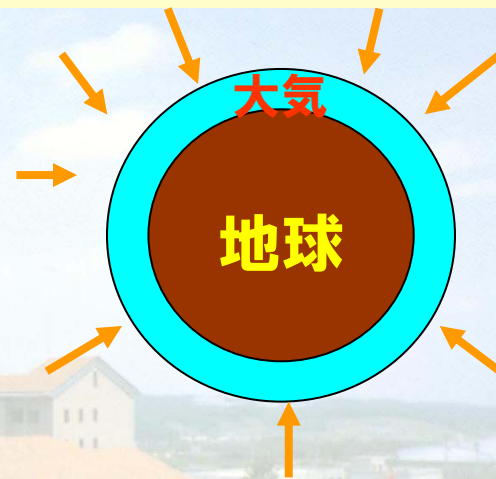
一方、世の中には宇宙線というものが降って来ていることが知られている

1次宇宙線(陽子、ヘリウム原子核)

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



素粒子のまとめ(2)

- 結論から言うと、素粒子には**第三世代**までであることが知られている
- ニュートリノの質量は**標準模型**では**ゼロ**

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	 ミューオンニュートリノ	 タウニュートリノ
	 電子	 ミューオン	 タウ

	粒子	質量 [MeV]
クォーク	u	約3
	d	約6
レプトン	e	0.5
	ν_e	0

	粒子	質量 [MeV]
クォーク	c	約1,200
	s	約120
レプトン	μ	106
	ν_μ	0

	粒子	質量 [MeV]
クォーク	t	174,300
	b	約4,000
レプトン	τ	1777
	ν_τ	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

[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)

[注] エネルギーの単位

※ 1eV (電子ボルト) = $1.6 \times 10^{-19}\text{J}$ (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) = 10^3eV

1MeV (メガ・エレクトロンボルト、メブ) = 10^6eV

1GeV (ギガ・エレクトロンボルト、ジェブ) = 10^9eV

[注] 質量の単位

$E=mc^2$ の公式から質量 m はエネルギー E により
 $m=E/c^2$ と表せるので、質量の単位は MeV/c^2 と書けるが、素粒子物理学では通常 $c=1$ としてしまつて質量の単位を**MeV**と書く(自然単位と呼ばれる)。

粒子には一般に反粒子と呼ばれるものが存在することが知られている

反粒子：質量は同じで電荷が逆符号の粒子

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

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

	電荷	質量 [MeV]
電子	-e	0.5
陽電子	+e	0.5

1932年：陽電子の発見



アンダーソン













その後他の粒子にも反粒子
が存在することが実験的に
証明されている

素粒子のまとめ(3)













- 素粒子には**第三世代**までの粒子と反粒子があることが知られている
- 我々の宇宙には**安定的に存在しているのは粒子から構成される物質のみで、反粒子から構成される反物質は安定的に存在していない**

物質-反物質の非対称性は現在も素粒子論・宇宙論の研究課題

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	 ミューニュートリノ	 タウニュートリノ
	 電子	 ミューオン	 タウ

反物質粒子

	第1世代	第2世代	第3世代
反クォーク	 反アップ	 反チャーム	 反トップ
	 反ダウン	 反ストレンジ	 反ボトム
反レプトン	 反電子ニュートリノ	 反ミューニュートリノ	 反タウニュートリノ
	 陽電子	 ミュープラス	 タウプラス

バリオン数とレプトン数

バリオン:クォーク3個からなる粒子

例:陽子 $p=(uud)$

中間子:クォーク1個と反クォーク1個からなる粒子

例: π 中間子 $\pi^+=(u\bar{d})$

バリオン数:バリオンに付与された数で、バリオン数の和は**標準模型**ではそれぞれ反応の前後で変わらない
→陽子のバリオン数=+1、 π 中間子のバリオン数=0

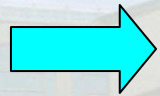
レプトン数:レプトンに付与された数で、レプトン数の和は**標準模型**ではそれぞれ反応の前後で変わらない

	粒子	バリオン数	レプトン数
クォーク	u	+1/3	0
	d	+1/3	0
レプトン	e^-	0	+1
	ν_e	0	+1

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

ここで若干脇道に脱線。。。

反物質(=反原子核 + 陽電子)は作れるか？



答: 作れるが、技術的にごく微量のみ可能

1995年 反水素原子(11個)の生成
CERNでの研究



エラート

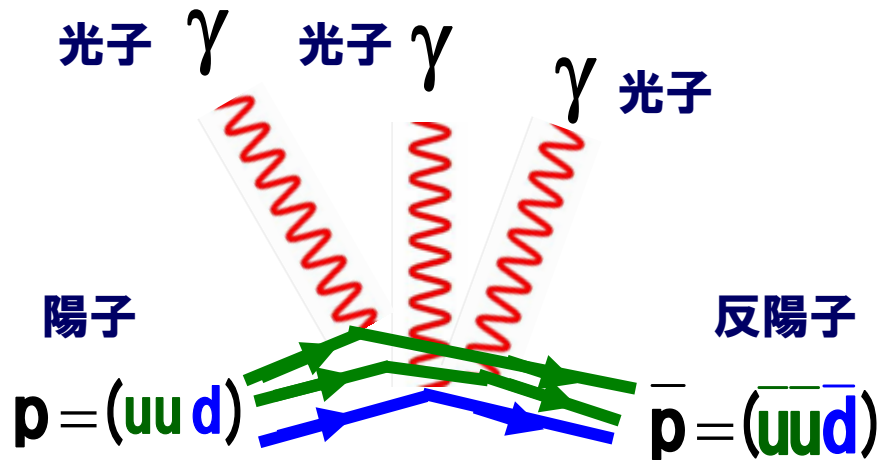
2001年 (準静止状態の)反水素原子の生成
(約50000個)
CERNでの研究



早野龍五

0.25gの反物質が物質と対消滅すると？

→ 「天使と悪魔」の虚と実



物理学者とともに読む

東京大学教授 早野龍五

「天使と悪魔」の虚と実 50のポイント

CERN研究所における
反物質研究グループのリーダー
<http://nucl.phys.s.u-tokyo.ac.jp/hayano/>

本サイト公開後の追記はこちら。



「天使と悪魔」上巻に登場する主な科学者
ロバート・ラングドン
ハーヴァード大学教授 宗教学専攻
マクシミリアン・コーラー
セルン（欧州原子核研究機構）所長
レオナルド・ヴェトラ
セルンの科学者 カトリック司祭
ヴィットリア・ヴェトラ
セルンの科学者 レオナルドの娘

In collaboration with

角川文庫 14276, 14277, 14278 準拠

ソニーピクチャーズ 2009.5.15封切

上巻扉の直後には、CERN研究所が反物質の生成に成功し、新型の反陽子減速器の開発に着手したこと、反物質1グラムが有するエネルギーはヒロシマに投下された核爆弾に相当すること、などが「事実」として記されている。これらは本当だろうか？

1. 「スイスのセルンが、反物質粒子の生成に先ごろ初めて成功した」これは、1996年の「Physics Letters」誌に、CERNで実験していた研究チームが Production of Antihydrogen（反水素の生成）という論文を発表した事実を踏まえて書かれています。この時生成された反水素原子の個数は約10個でした。反水素原子は、反物質の最小基本単位です。

「天使と悪魔」でダン・ブラウンが反物質という用語を使う場合、多くの場合は反水素原子を指すものと考えられますが（「化学的痕跡は純粋な水素と同じ」上巻231頁）、「反物質の陽電子（上巻134頁）」のように、反物質を反粒子の意味に使っている箇所もあります。

0.25gの反物質は同じ量(0.25g)の物質と

対消滅して光子 γ 等になるので、全体のエネルギーは

アインシュタインの公式 $E = mc^2$ において $m = 0.25g \times 2 = 0.5g$ とおいて

$$E = 0.5g \times (3 \times 10^8 m/s)^2$$

$$= 4.5 \times 10^{13} J (\text{ジュール})$$

= 広島型原爆と同じエネルギー

→ 映画の設定の0.25gという数値は正しい

素粒子に働く力

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}

核力など

粒子の測定に利用

中性子の崩壊など

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

クォーク・レプトンに働く力

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	×	×	○	○

クォーク・レプトンに働くこの3つの力を記述する理論を**標準模型**と呼んでいる

→ニュートリノの質量は標準模型では0だと仮定されている

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-益川理論

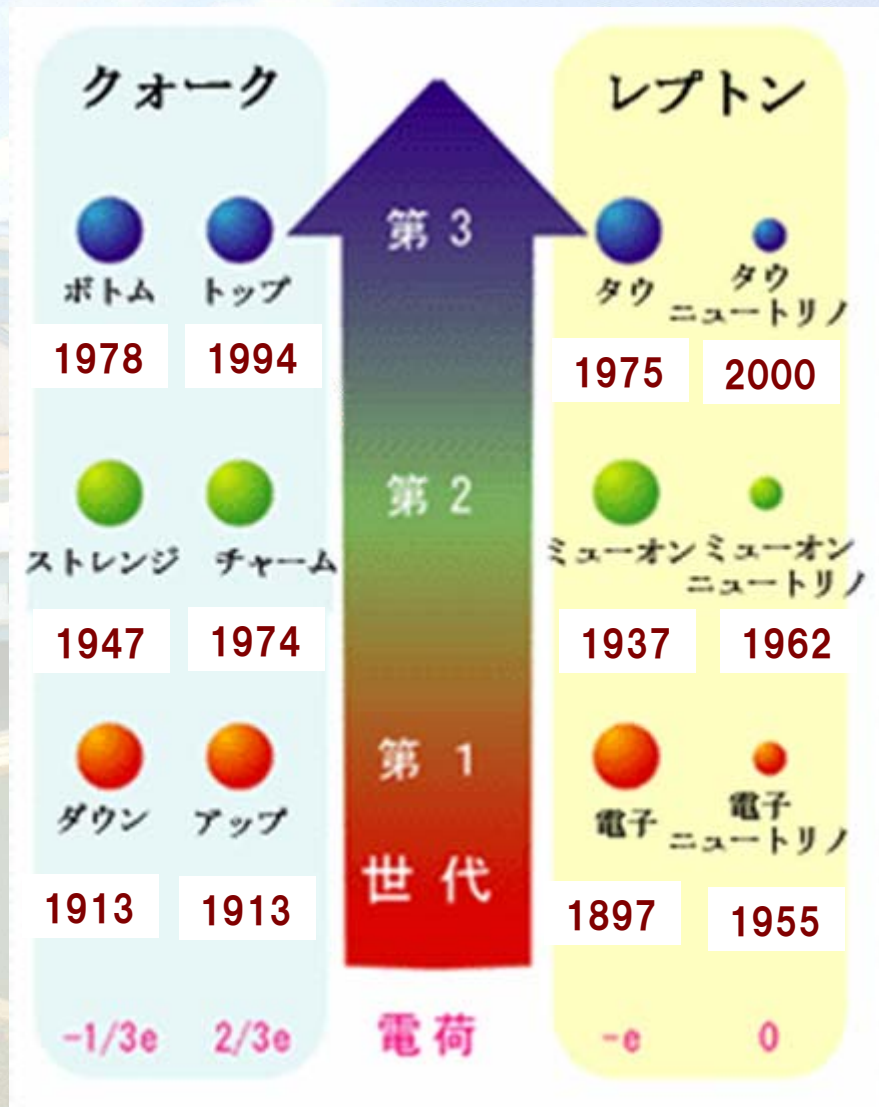
cクォーク（4番目のクォーク）が実験的に発見される以前に、**CP対称性の破れ**を説明したいという動機から3世代クォークの存在は予言されていた



小林誠

益川敏英

2002年にはB中間子と呼ばれる第3世代の粒子におけるCPの破れが測定され、小林・益川理論の正しさが証明された



2008年 小林・益川両氏ノーベル賞授賞

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

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

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

$$x=10^{-7} \text{ cm} \Leftrightarrow E=100\text{eV} \text{ (分子)}$$

$$x=10^{-8} \text{ cm} \Leftrightarrow E=1\text{keV} \text{ (原子)}$$

$$x=10^{-12}\text{cm} \Leftrightarrow E=10\text{MeV} \text{ (原子核)}$$

$$x=10^{-13}\text{cm} \Leftrightarrow E=100\text{MeV} \text{ (核子)}$$

$$x<10^{-16}\text{cm} \Leftrightarrow E>100\text{GeV} \text{ (クォーク)}$$

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

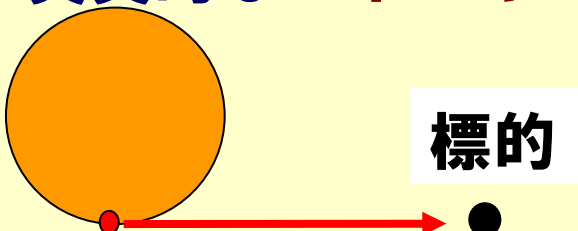
微細構造を見るにはエネルギーを高くする必要がある

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）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

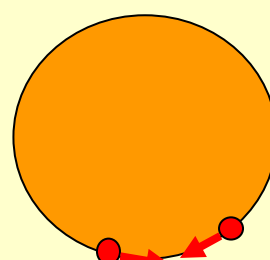
相対論→ 実質的なエネルギー = $\sqrt{2\text{GeV} \times E}$ ← エネルギーを高くするには不利



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

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

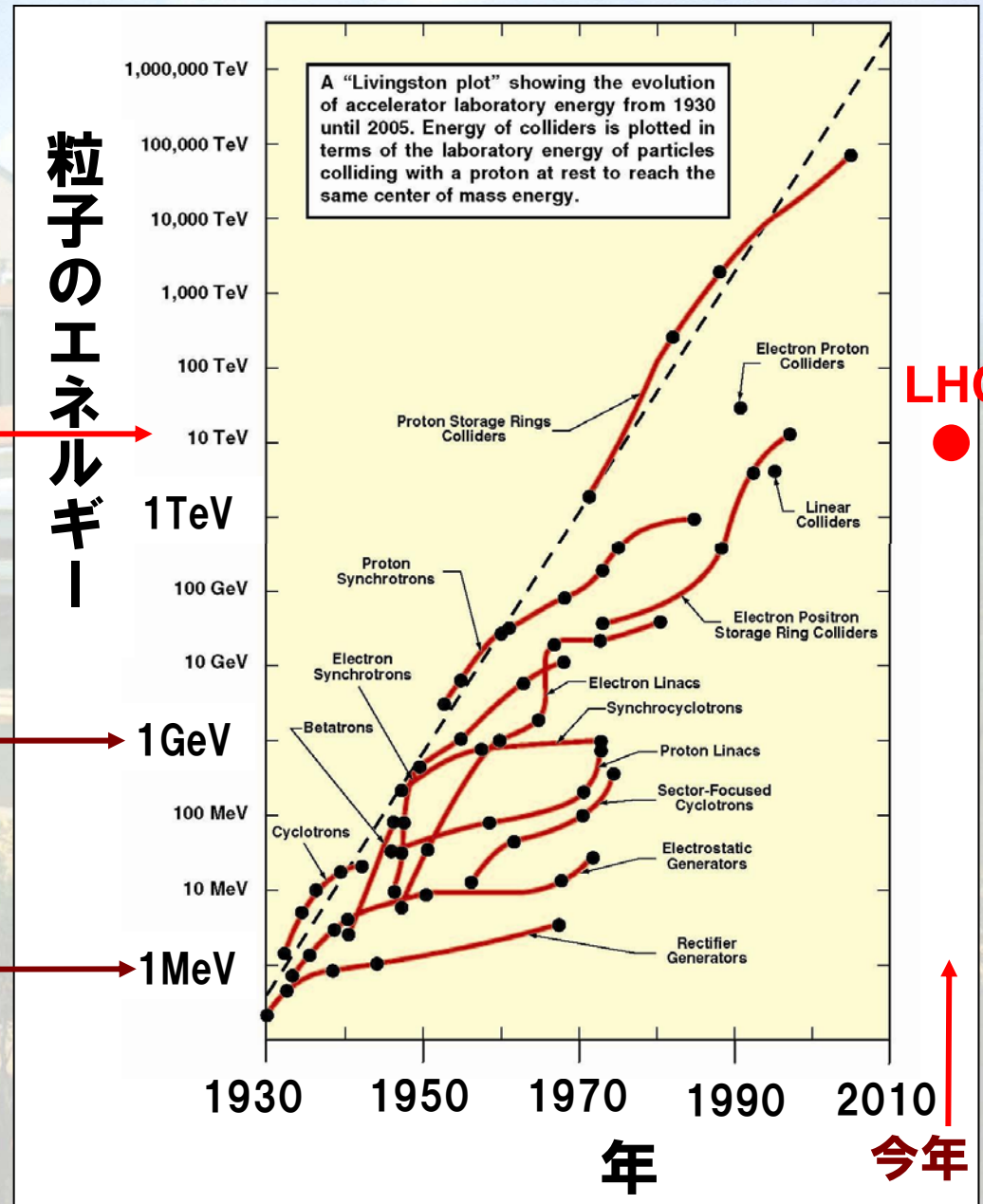
→”高エネルギー物理学”とも呼ばれている

現在の最高エネルギー

陽子の質量エネルギー
(陽子を光速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
(電子を光速に近く加速するのに必要なエネルギー)

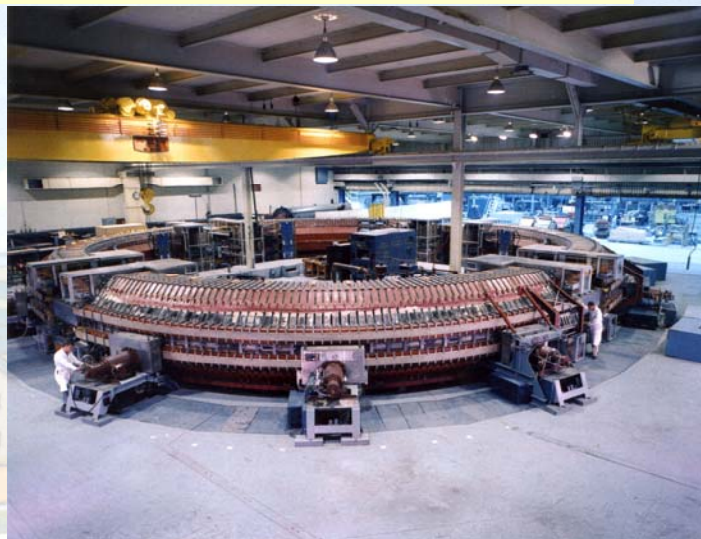
“リビングストーン図”と呼ばれる表
(実際よりも楽観的)



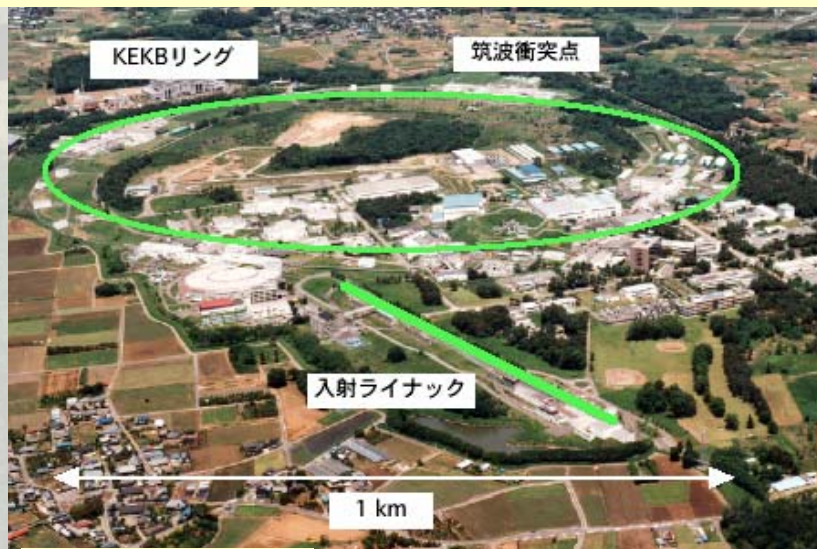
サイクロトロン(1930年代)



シンクロトロン(1950年代)

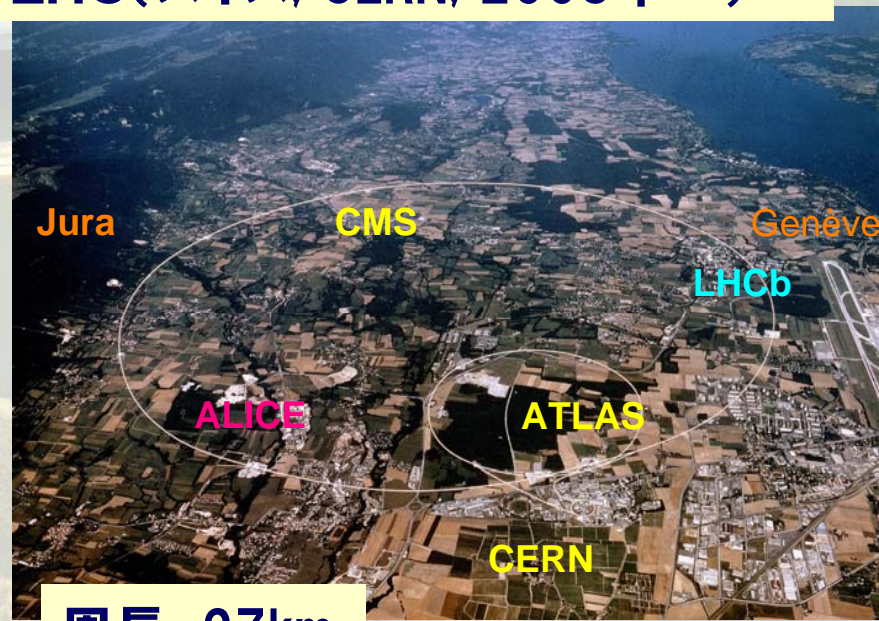


Bファクトリー(日本, KEK, 1998年~)



周長=3km

LHC(スイス, CERN, 2008年~)



周長=27km

顕著な成果の出ている世界の高エネルギー物理学の加速器研究所

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

@BNL

1964年: K中間子におけるCP非保存の発見

クローニン



フィッチ

@BNL

1974年: cクォークの発見

リヒター



ティン

@SLAC

@BNL

1976年: タウ粒子の発見



パール

@SLAC

1977年: bクォークの発見



レーダーマン

@FNAL

2012年: ヒッグス粒子の発見



ジャンツティ

@CERN

インカンデラ

1983年: W, Zボゾンの発見

ルビア



ファン・デル・メーア



@CERN

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

@FNAL

2000年: タウニュートリノの発見

ランドバーク



丹羽公雄

@FNAL

1999年~2008年: B中間子におけるCP非保存の発見

@KEK



@SLAC

BABAR

2011年: 電子ニュートリノ出現の発見

小林隆



中家剛



@JPARC

米国

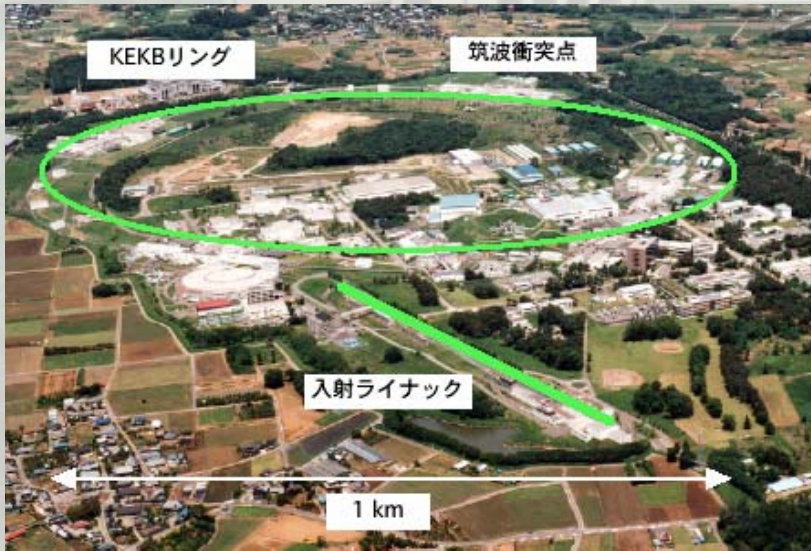
欧州

日本

日本の高エネルギー物理学の主な加速器研究所



JPARC(KEK東海キャンパス)



KEK (高エネルギー加速器研究機構)



アメリカの高エネルギー物理学の主な加速器研究所



Stanford Linear Accelerator Center



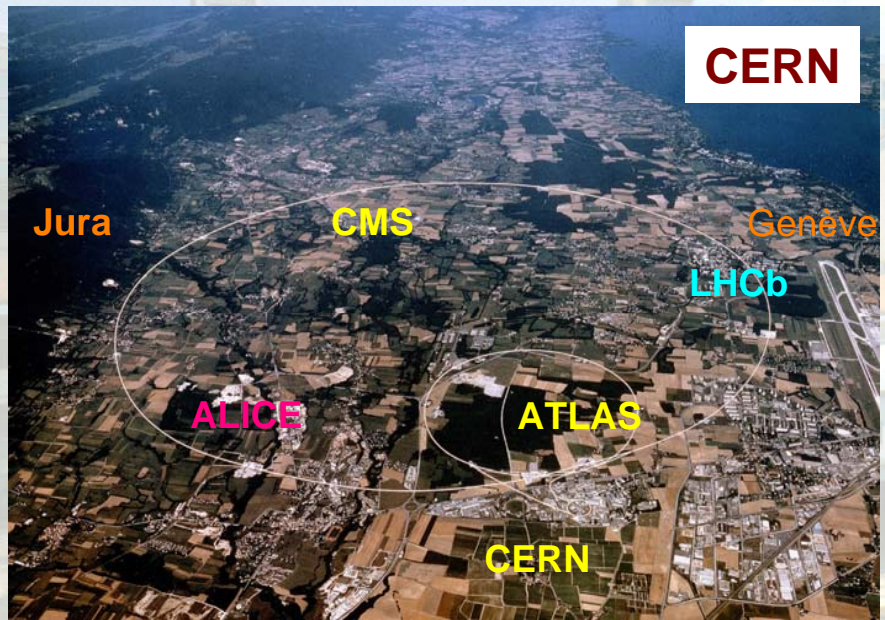
Brookhaven National Laboratory



Fermi National Laboratory

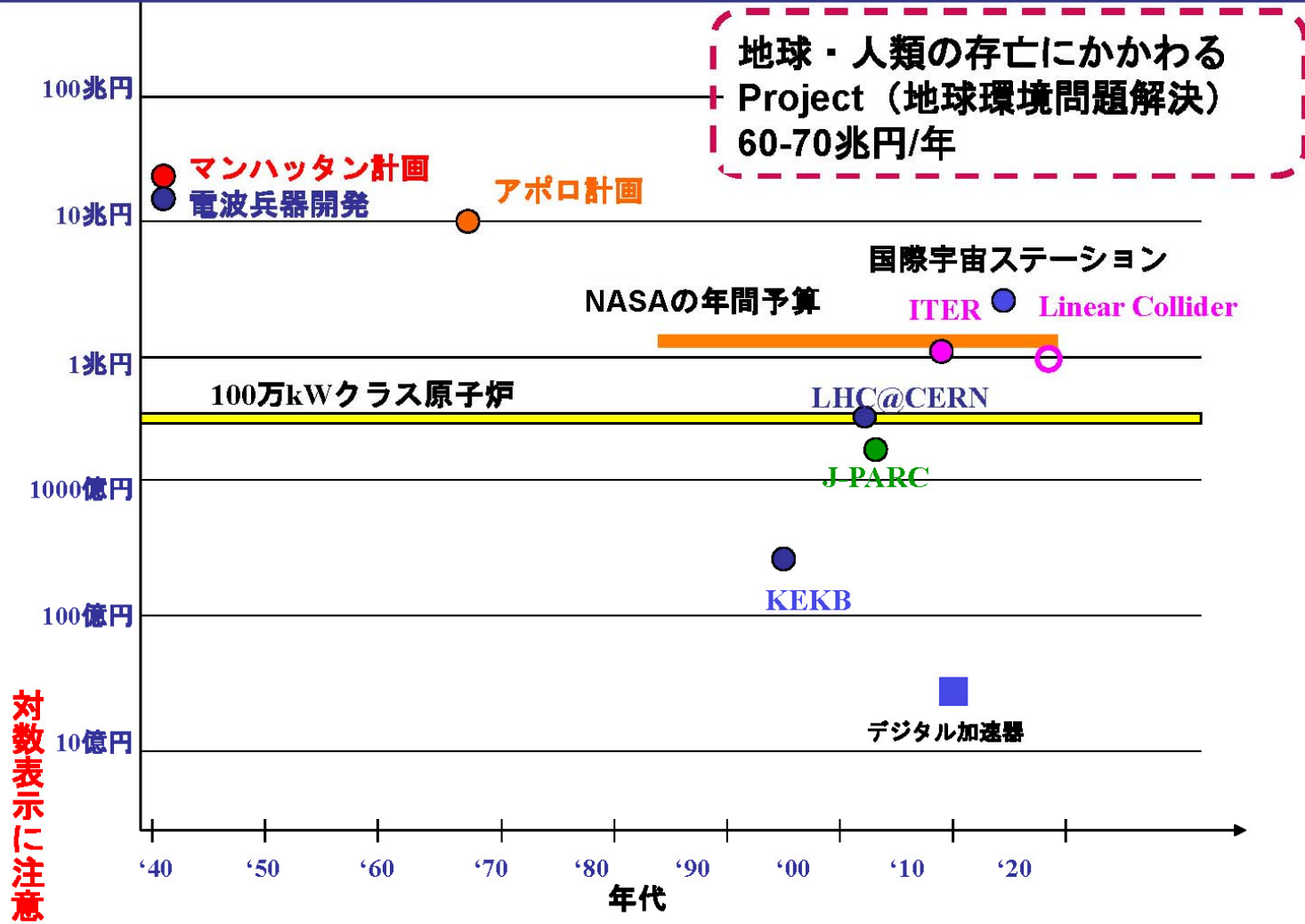


ヨーロッパの高エネルギー物理学の主な加速器研究所



高エネルギー物理学は巨大科学となっている

近代のBig Science & 国家事業の比較



KEK高山健先生2009年公開講座より借用

An aerial photograph of a university campus. In the center, there is a large, irregularly shaped pond surrounded by a paved walkway. A prominent building with a curved facade and several columns is situated on the left side of the pond. Other multi-story buildings with red-tiled roofs are visible in the background. The sky is blue with scattered white clouds. The overall scene is bright and clear.

付録

●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

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、ジエブ) = 10^9 eV



ハイゼンベルグ