

クレジット：

UTokyo Online Education 学術俯瞰講義 2017 浅井祥仁

ライセンス：

利用者は、本講義資料を、教育的な目的に限ってページ単位で利用することができます。特に記載のない限り、本講義資料はページ単位でクリエイティブ・コモンズ 表示-非営利-改変禁止 ライセンスの下に提供されています。

<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

本講義資料内には、東京大学が第三者より許諾を得て利用している画像等や、各種ライセンスによって提供されている画像等が含まれています。個々の画像等を本講義資料から切り離して利用することはできません。個々の画像等の利用については、それぞれの権利者の定めるところに従ってください。



物質のはじまりとはたらき —フェムト、ナノ、エクサの世界

コーディネータ:藤森 淳(理学部) ナビゲータ:堀田 知佐(教養学部)

開講時間:木曜日5時限(16:50-18:35) 教室:駒場キャンパス 21 KOMCEE West レクチャーホール

本講義では、広く限りない魅力にあふれた物質科学を、物理、化学、電子工学の第一人者が、さらに広い視野からわかりやすく解き明かす。理科I類に限らない広い分野の理系学生に加え、多くの文系学生の聴講を期待する。



講義期間:2017年9月28日 木 ~2018年1月11日 木

我々の宇宙からマルチバースへ

須藤 靖(理学部)

科学の役割と物理学的世界観

宇宙は物理法則に従っている

我々の宇宙の外の世界

大きな宇宙を生み出した小さな素粒子と
それに作用する力

浅井 祥仁(理学部)

物質を構成する素粒子

素粒子に働く力

ミクロな宇宙が作る巨大な宇宙

物質科学の基礎と工学

田中 雅明(工学部)

物質科学の基礎と現代社会

物質科学から工学へ—半導体の爆発的発展と情報化社会

物質科学と先端研究の世界

光る・覚える・駆動する

—半導体の電子の凄技

川崎 雅司(工学部)

現代社会における表面化学

吉信 淳(物性研究所)

神は固体を創造し、魔は表面を創造した

空気の鍊金術が人類を救った

原子・分子を観測し操作する



詳しいHPをご覧ください
www.gfk.c.u-tokyo.ac.jp

学術俯瞰講義



学術俯瞰講義 Global Focus on Knowledge

UTokyo Online Education 学術俯瞰講義 2017

東京大学 大学院総合文化研究科・教養学部
The University of Tokyo, Komaba
Graduate School of Arts and Sciences, College of Arts and Sciences

開 講: 東京大学 大学院総合文化研究科・教養学部附属教養教育高度化機構
運営支援: 東京大学 大学総合教育研究センター

KOMEX
Komaba Center for Educational Research

東京大学
大学総合教育研究センター
Center for Research and Development of Higher Education
The University of Tokyo

大きな宇宙を生み出した 小さな素粒子と力

ミクロな素粒子から マクロな物質・宇宙
を考える

理学部

浅井祥仁

3

講義の目次(keyword)

- 第4回 物質を構成する素粒子
- 第5回 素粒子に働く力
- 第6回 ミクロな宇宙が作る巨大な宇宙

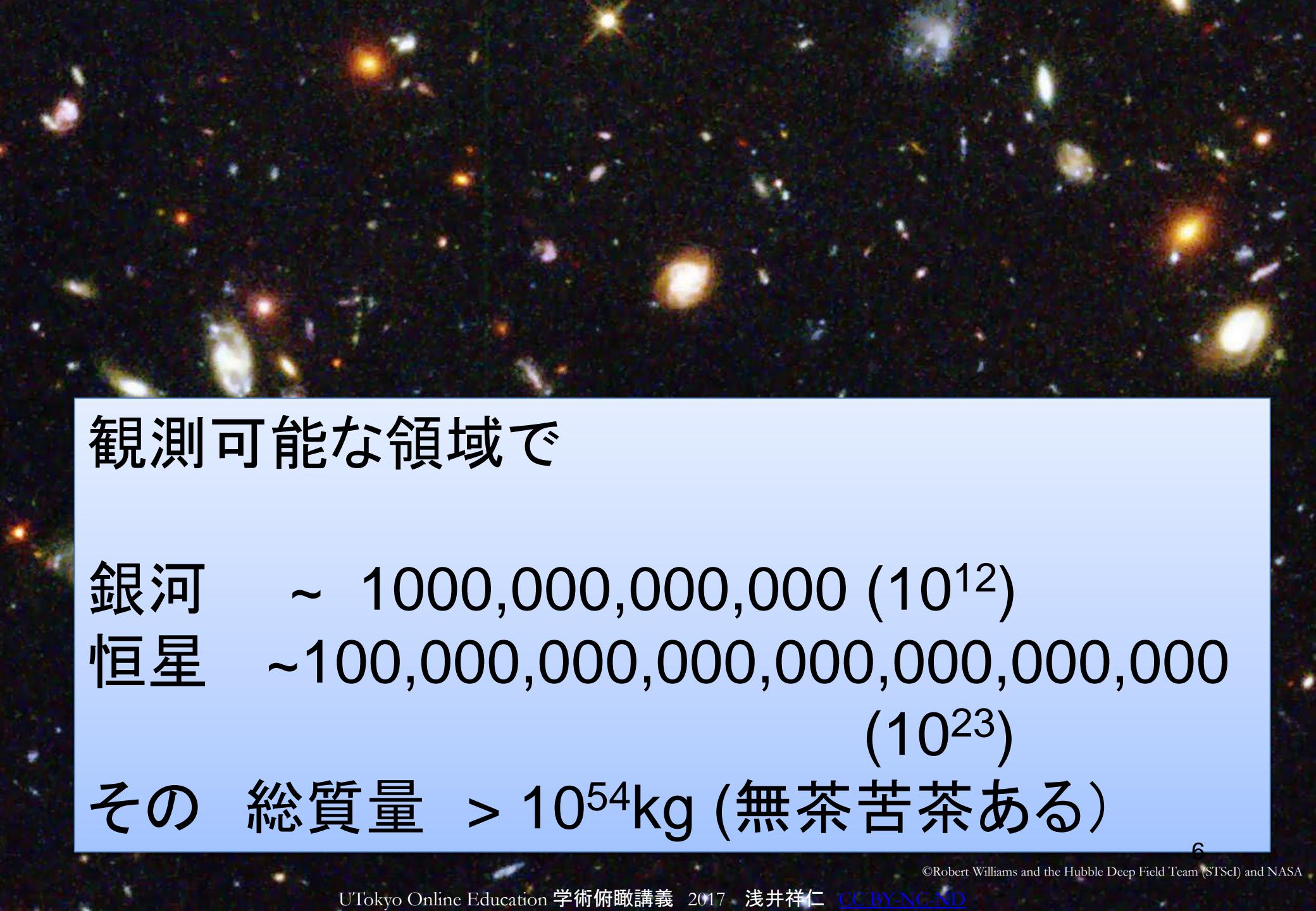
本日のお品書き

- 1) ビックバンって言うけれど。。非常識だよね。
- 2) 周期表と電子の発見
- 3) 原子核の発見と素粒子研究の基礎
- 4) 物質の階層性と80年前の素粒子
- 5) 量子力学 「加速器は顕微鏡」
- 6) クオークの発見
- 7) エネルギーの単位： サイズがエネルギーを決める
- 8) 物質の階層性と素粒子最前線
- 9) 加速器とは
- 10) 物質を形作る12種類の素粒子
- 11) ニュートリノ
- 12) 反物質（特殊相対性理論）



Hubble 望遠鏡: 無数の銀河

5



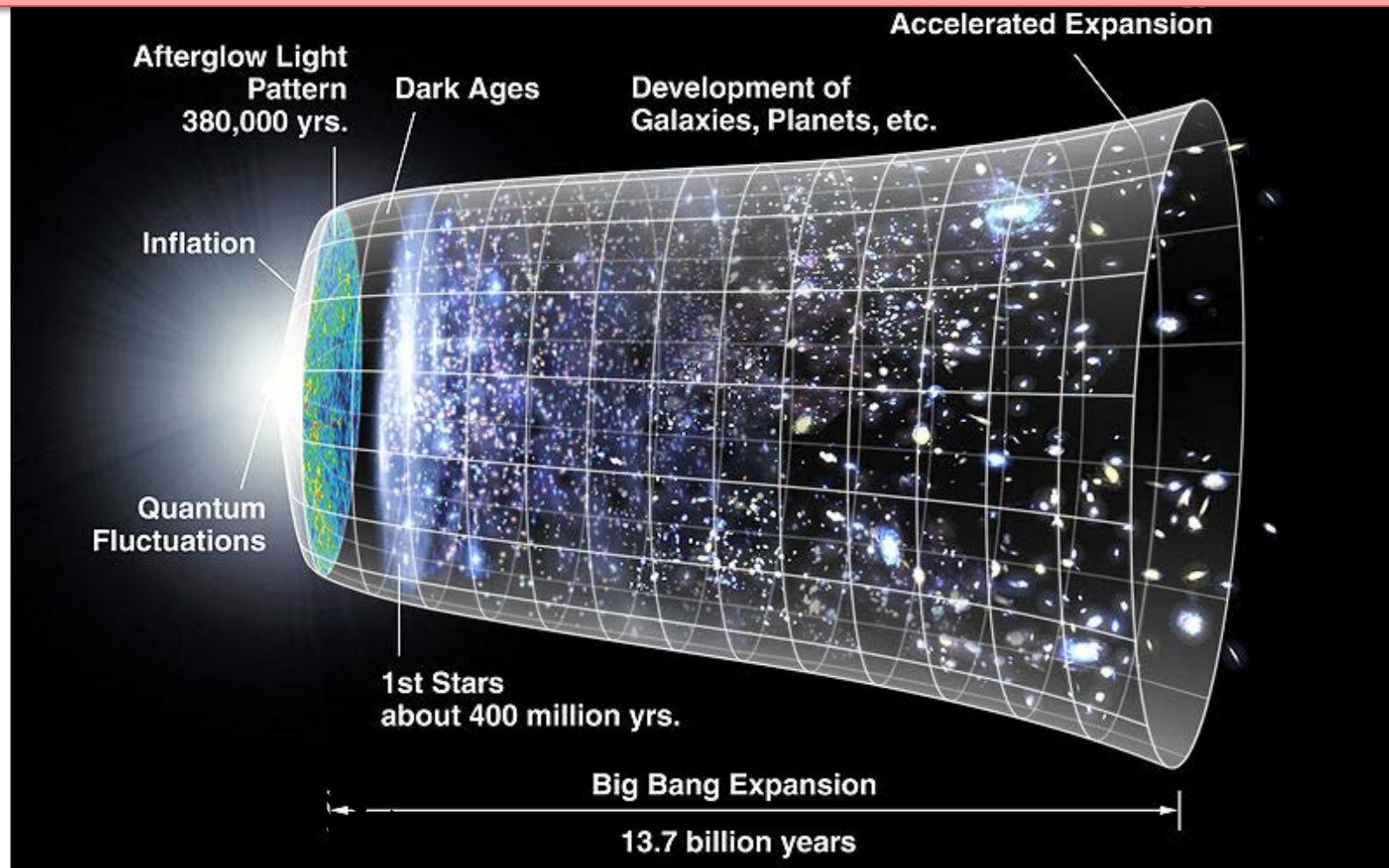
観測可能な領域で

銀河 $\sim 1000,000,000,000 (10^{12})$

恒星 $\sim 100,000,000,000,000,000,000,000 (10^{23})$

その 総質量 $> 10^{54} \text{kg}$ (無茶苦茶ある)

宇宙の始まり ビッグバン



どうやって宇宙が誕生したの？
無から作られた！？！
エネルギーは???

始まりは小さい
38万年以前は磨りガラス

©Courtesy NASA/JPL-Caltech

“素粒子”研究 7

[1] 物質を構成する粒子

実験手法と推論から、どう物質観が変わってきたか？
考え方、とらえ方が
分かっていただけたら

「化学」の発展に 錬金術 (wikipediaより)

「超伝導」



原子(アトム)

周期表

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18														
1 H 水素 1.008	2 He ヘリウム 4.0026	3 Li リチウム 6.94	4 Be ベリリウム 9.0122	5 B ボウ素 10.81	6 C 炭素 12.011	7 N 窒素 14.007	8 O 酸素 15.999	9 F フッ素 18.998	10 Ne ネオン 20.180	11 Na ナトリウム 22.990	12 Mg マグネシウム 24.305	13 Al アルミニウム 26.982	14 Si ケイ素 28.085	15 P リン 30.974	16 S 硫黄 32.06	17 Cl 塩素 35.45	18 Ar アルゴン 39.948														
23 Sc スカンジウム 44.956	24 Ti チタン 47.867	25 Cr バナジウム 50.942	26 Mn マンガン 54.938	27 Fe 鉄 55.845	28 Co コバルト 58.933	29 Ni ニッケル 58.693	30 Cu 銅 63.546	31 Zn 亜鉛 65.38	32 Ga ガリウム 69.723	33 Ge ゲルマニウム 72.630	34 As 砒素 74.922	35 Se セレン 78.971	36 Kr クリプトン 83.798	37 Rb ルビジウム 85.468	38 Sr ストロンチウム 87.62	39 Y イットリウム 88.906	40 Zr ジルコニウム 91.224	41 Nb ニオブ 92.906	42 Mo モリブデン 95.95	43 Tc テクネチウム (98)	44 Ru ルテニウム 101.07	45 Rh ロジウム 102.91	46 Pd パラジウム 106.42	47 Ag 銀 107.87	48 Cd カドミウム 112.41	49 In インジウム 114.82	50 Sn スズ 118.71	51 Sb アンチモン 121.76	52 Te テルル 127.60	53 I ヨウ素 126.90	54 Xe キセノン 131.29
55 Cs セシウム 132.91	56 Ba バリウム 137.33	57-71	72 Hf ハフニウム 178.49	73 Ta タンタル 180.95	74 W タングステン 183.84	75 Re タングステン 186.21	76 Os オスミウム 190.23	77 Ir イリジウム 192.22	78 Pt オスマニウム 195.08	79 Au 白金 196.97	80 Hg 水銀 200.59	81 Tl タリウム 204.38	82 Pb 鉛 207.2	83 Bi ビスマス 208.98	84 Po ポロニウム (209)	85 At アスタチン (210)	86 Rn ラドン (222)	87 Fr フランシウム (223)	88 Ra ラジウム (226)	89-103											

不安定な同位体を持つ元素については、最も半減期の長い同位体の質量数を括弧で示す。二ホニウム

周期表 デザインとインターフェイス著作権 © 1997 Michael Dayah, Ptable.com 最新の更新した事 2017/06/16

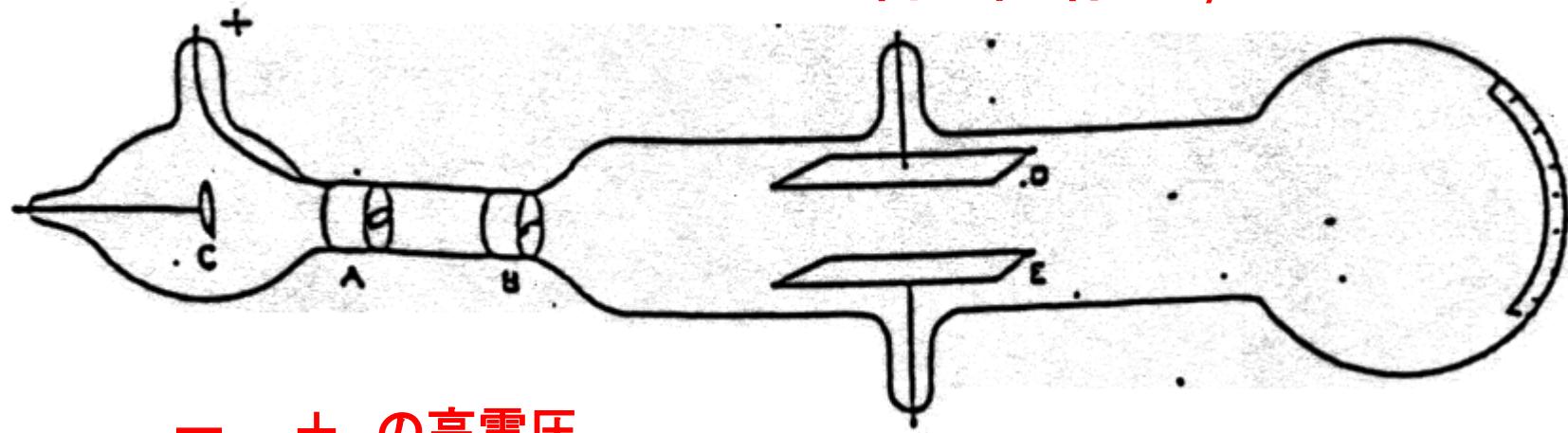
57 La ランタン 138.91	58 Ce セリウム 140.12	59 Pr セラセオジ 140.91	60 Nd ネオジム 144.24	61 Pm プロメチウム (145)	62 Sm サマリウム 150.36	63 Eu ユワロビウム 151.96	64 Gd ガドリニウム 157.25	65 Tb テルビウム 158.93	66 Dy ジスプロシウム 162.50	67 Ho ホルミウム 164.93	68 Er エルビウム 167.26	69 Tm ツリウム 168.93	70 Yb イツテルビウム 173.05	71 Lu ルテチウム 174.97
89 Ac アクチニウム (227)	90 Th トリウム 232.04	91 Pa プロトアクチニウム 231.04	92 U ウラン 238.03	93 Np ネオツニウム (237)	94 Pu ブルトニウム (244)	95 Am アメリシウム (243)	96 Cm カーリウム (247)	97 Bk バークリウム (247)	98 Cf カリホルニウム (251)	99 Es カイリウム (251)	100 Fm カーリルニウム (252)	101 Md メンデレビウム (258)	102 No ノーベリウム (259)	103 Lr ローレンシウム (266)

<https://www.ptable.com>

最初の素粒子「電子」発見

1897

比電荷 e/M の測定->
何か固有の e/M



— + の高電圧
(kV)

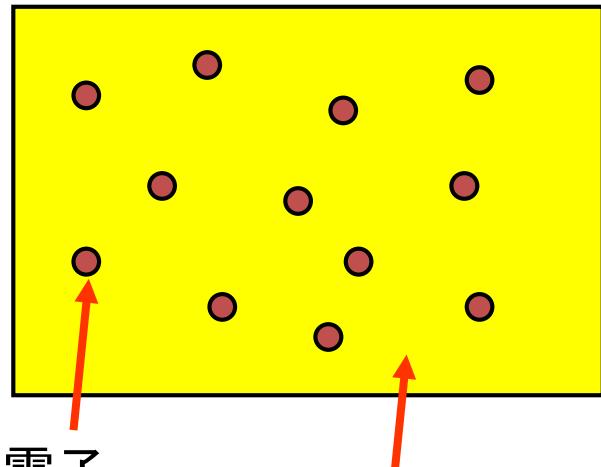
薄いガス (10^{-5} atm)

J.J.Thomson

J.J. Thomson - Philosophical Magazine, 44, 293 (1897)
https://en.wikipedia.org/wiki/J._J._Thomson#/media/File:JJ_Thomson_Cathode_Ray_2.png

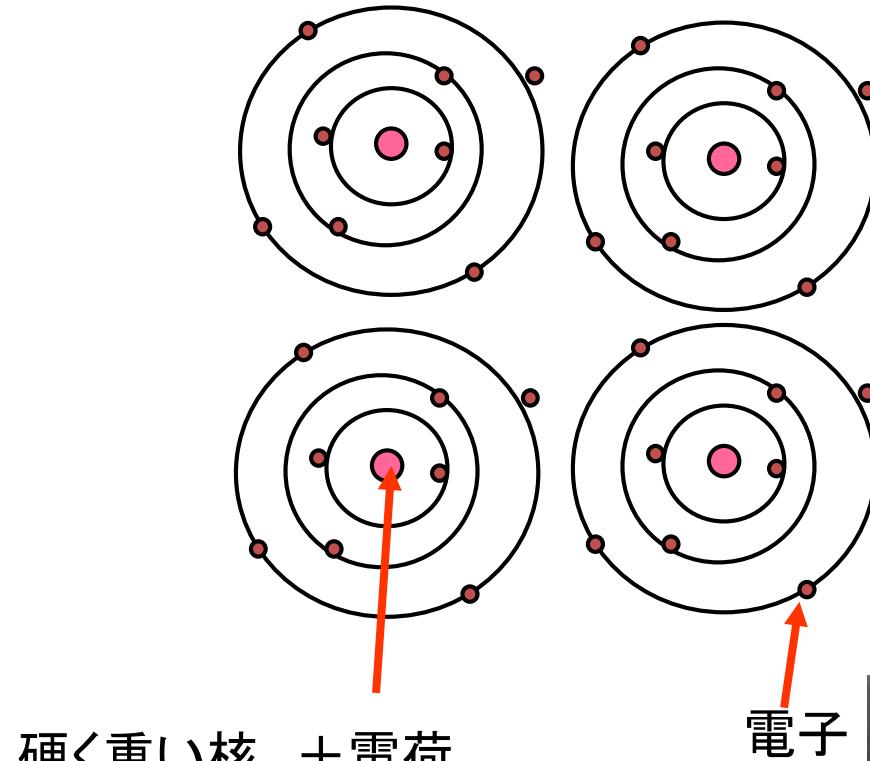
電子発見後の新しい物質像

原子モデル 1



ぶどうパンモデル
J. J. トムソン

原子モデル 2

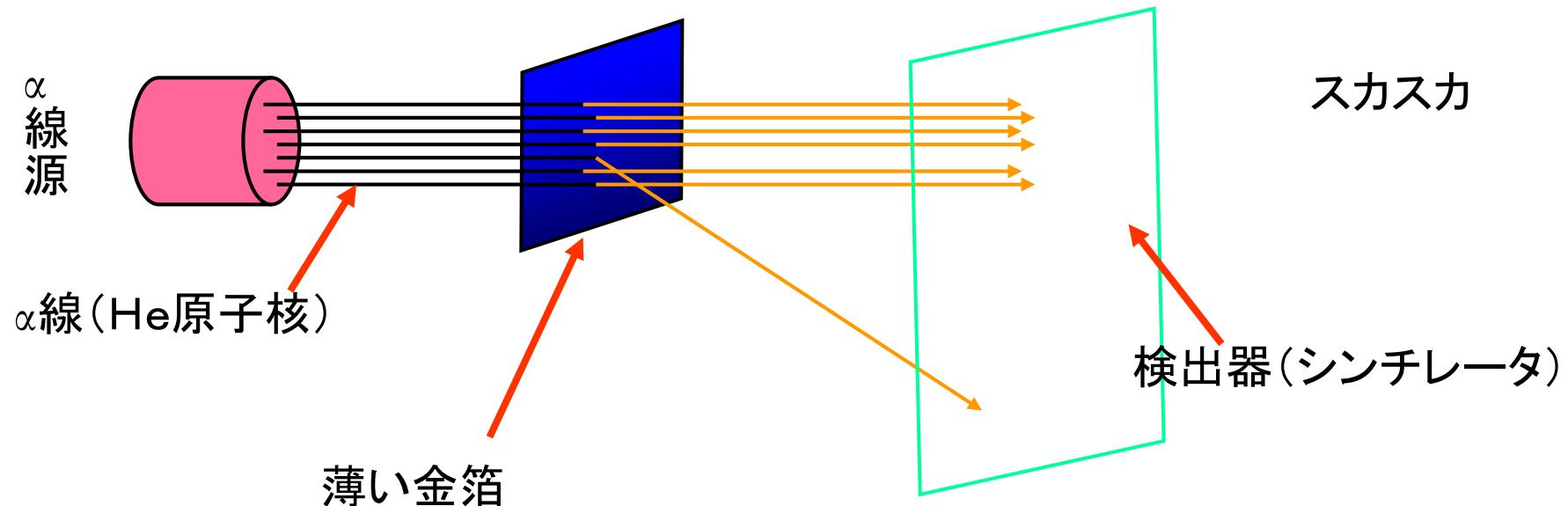


土星型モデル
ラザフォード や 長岡半太郎



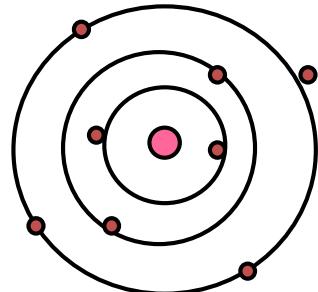
ラザフォードの原子核の発見

1911年 弟子のガイガーとマースデンの実験で決着



ほとんどすり抜ける。たまに大角度に散乱される。

⇒

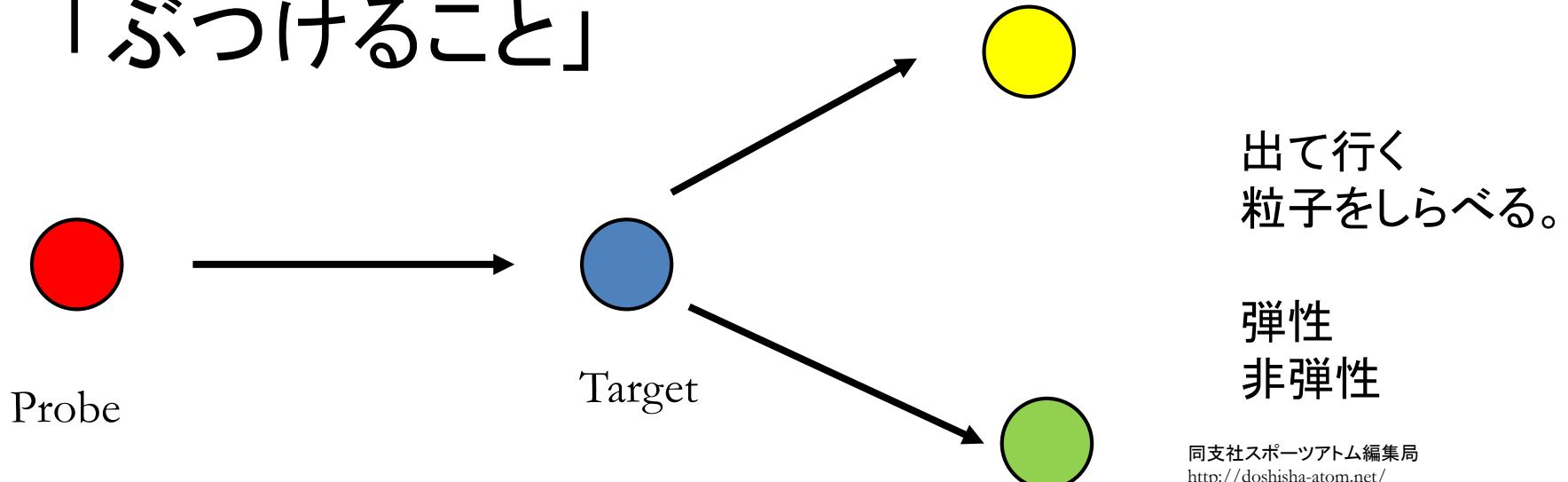


このモデルが正しい。(土星型モデル)

素粒子実験の基礎手段の確立

素粒子実験の基礎手段

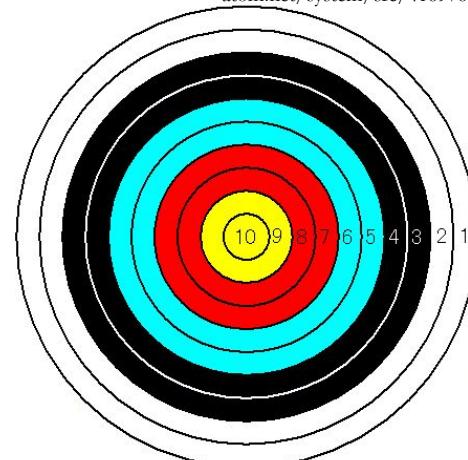
「ぶつけること」



反応のおこりやすさ: 断面積 σ (面積の次元)

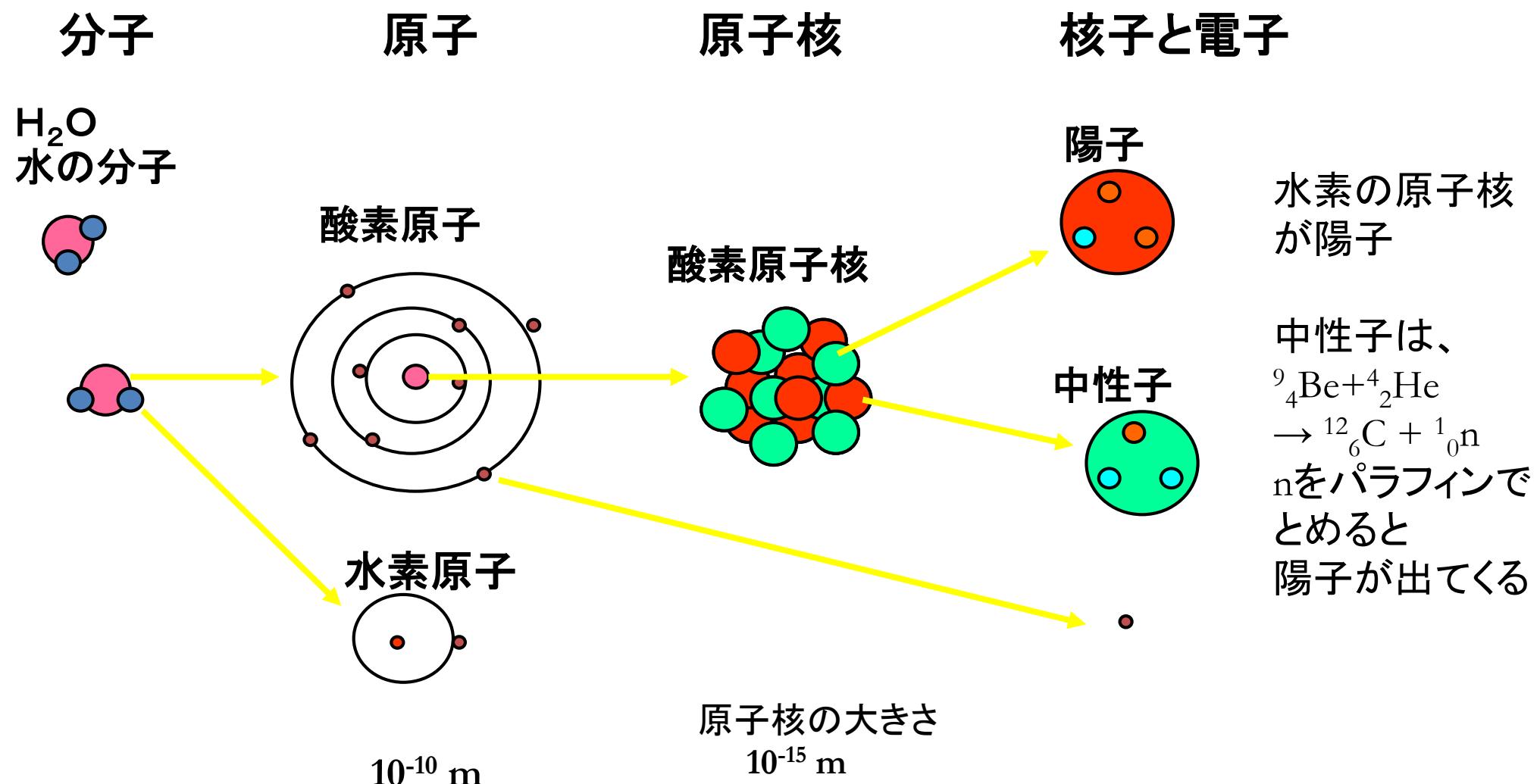
半径 $r=fm$ 幾何的面積 $3 * 10^{-30} m^2$
バーン (b) $= 10^{-28} m^2 = 100 fm^2$ (納屋)

$d\sigma/d\cos\theta$ など 微分断面積をはかると反応の詳細
が分かる。



同社社員による編集局
<http://doshisha-atom.net/>
<http://doshisha-atom.net/system/src/416976144c21b5532e43f2.44694149.jpg>

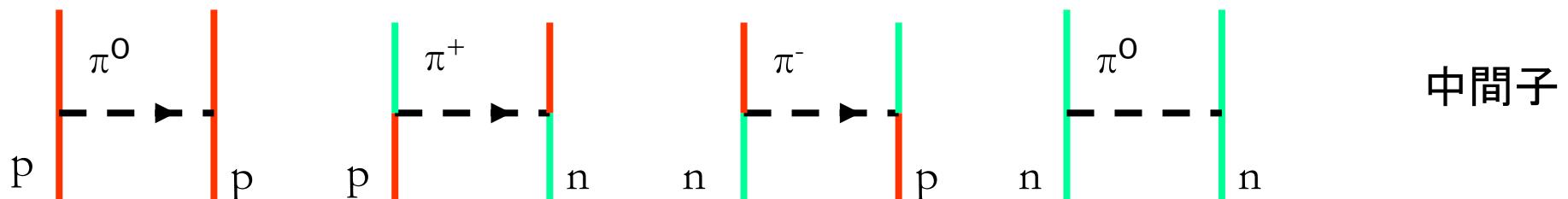
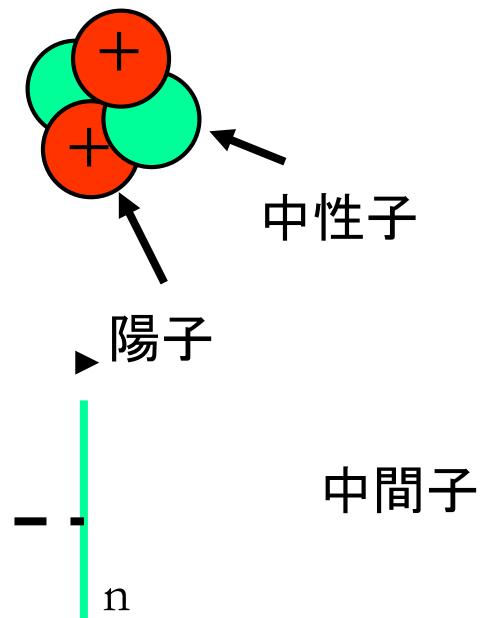
物質の階層性 (1930年代)



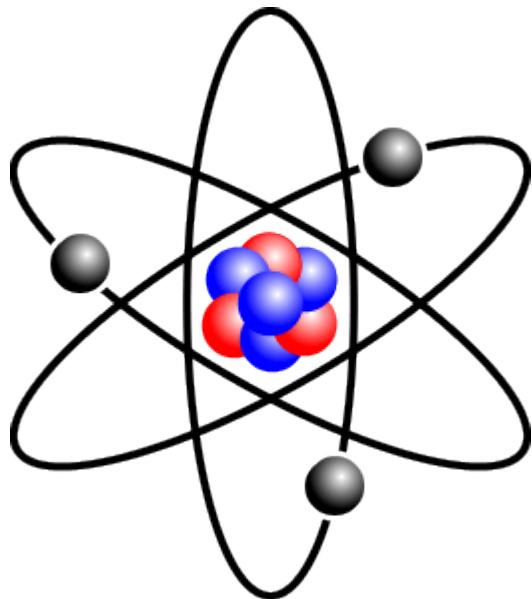
1930年代の「素粒子」

電子	e	-	1897年
陽子	p	+	1911年
中性子	n	0	1932年
光子	γ	0	1905年

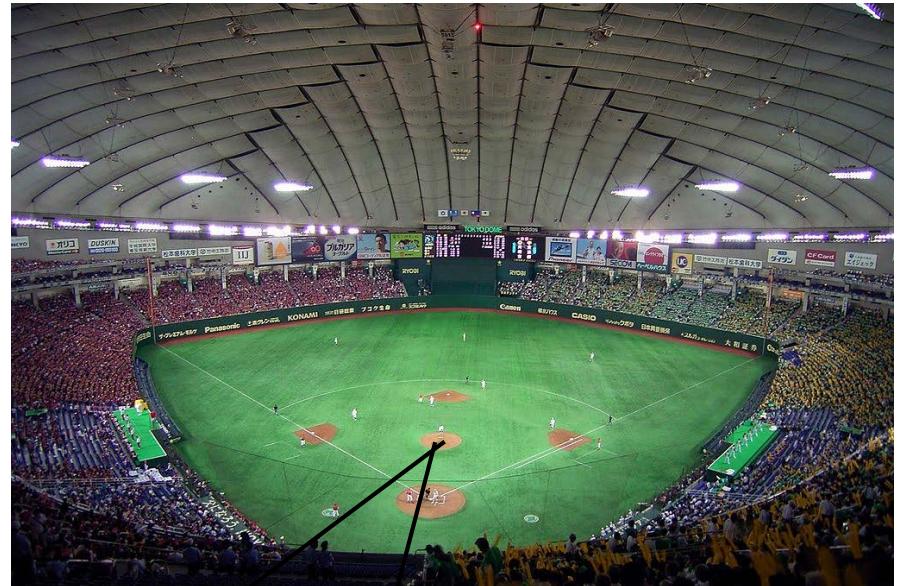
→ 湯川さんが活躍したころの素粒子像：
湯川さんが 陽子と中性子に働く力（粒子を交換→力）



よくこんな絵がよく教科書に



https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Stylised_Lithium_Atom.png
Image by Liquid_2003/Halfdan, from Wikimedia Commons
CC BY-SA 3.0

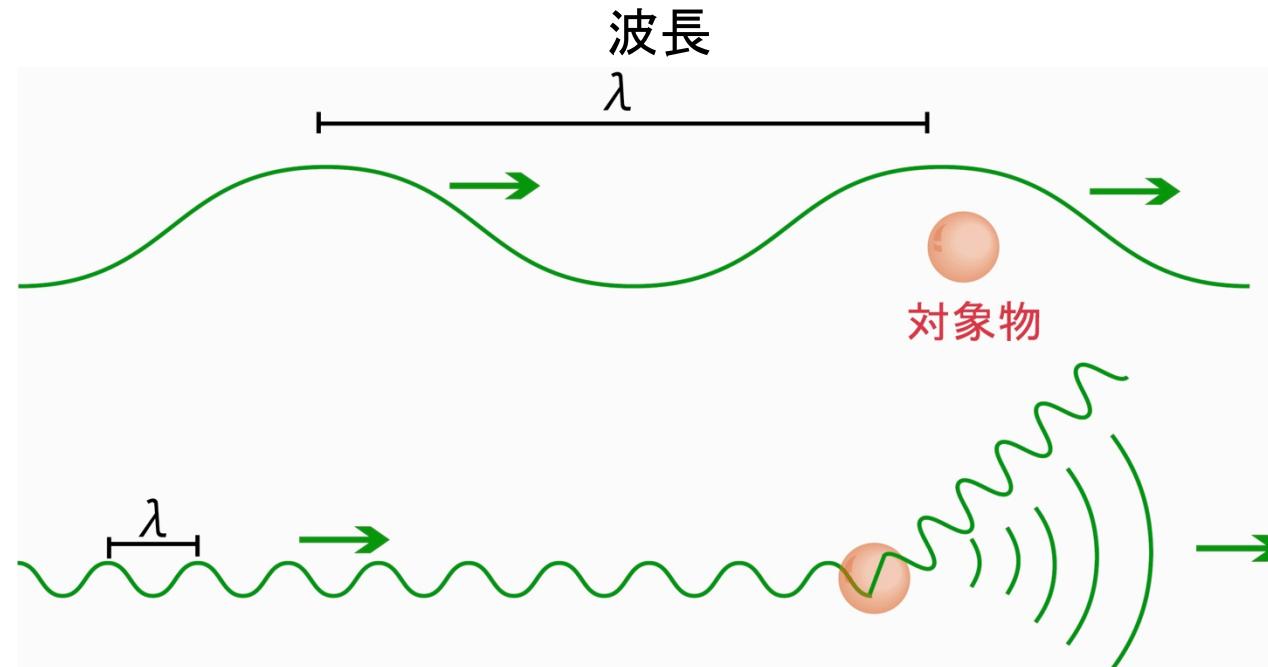


https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Tokyo_Dome_2007-2.jpg
Image by DX Broadrec, from Wikimedia Commons
CC BY-SA 3.0

スカスカ。。。
何故つぶれない？

From wikipedia

小さな物を見るには、波長の短い光が不可欠



あるかどうか程度しか分からぬ
対象物の小さな構造を見るには
より短い波長で見る必要:

→ 短い波長で物質を「見る」

使う波長によって、測定出来る限界が決まっている

小さな世界は

量子力学

が支配

小さく視ると、粒子と波の両方の性質が見えてくる。(2重性)

素粒子 = 粒 + 波

波の広がりの分だけ
ぼやける

ハイゼンベルグ
不確定性原理
 $\Delta P \Delta x > h/2\pi$

波である証拠 → 電子でも干渉

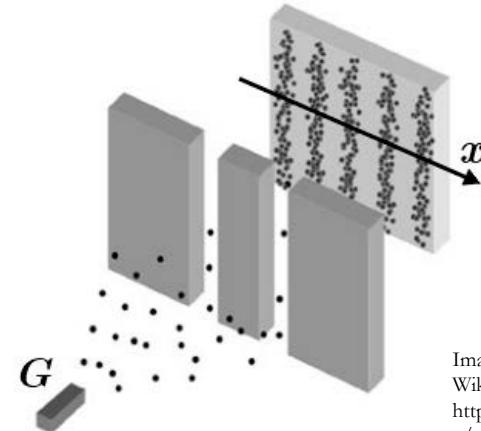


Image by Koantum, from
Wikimedia Commons
<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:2slits.png>
CC BY-SA 3.0

波長

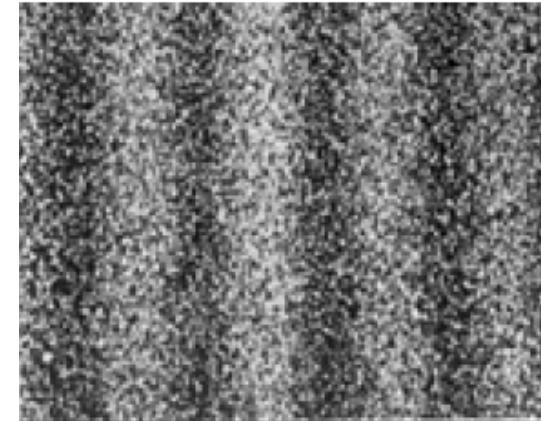
$$\lambda = \frac{h}{p}$$

プランク定数
運動量～エネルギー

短い波長



高いエネルギー

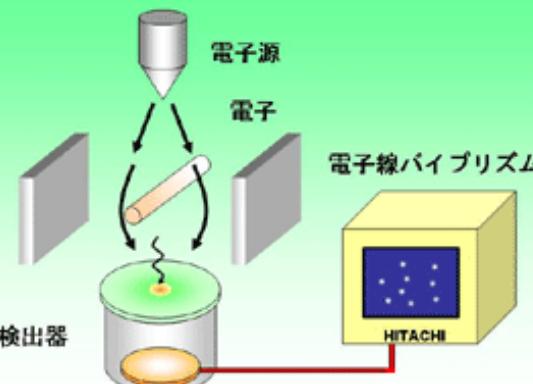


19

日立製作所フェロー
外村 彰さん
Akira Tonomura



株式会社日立製作所研究開発グループ



株式会社日立製作所研究開発グループ



(c) 1989 Hitachi, Ltd. All rights reserved.

提供: 株式会社日立製作所中央研究所

<http://www.hitachi.co.jp/rd/portal/highlight/quantum/doubleslit/index.html>

倍率1000倍程度

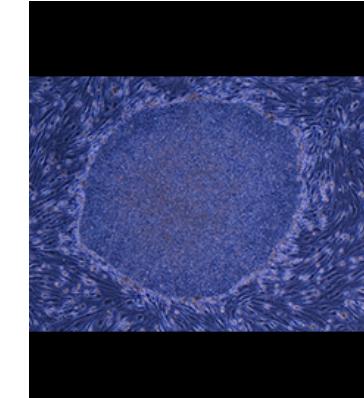
iPs細胞

加速器は、 超高性能 顕微鏡

分解能



Photo from Wikipedia



©京都大学教授 山中伸弥

光学顕微鏡

光

光の波長 $\sim 0.1\text{ミクロン}$ ($=10^{-7}\text{ m}$)

電子顕微鏡

電子

電子の波長 $\sim 1\text{オングストローム}$ ($=10^{-10}\text{ m}$)

LHC加速器

陽子

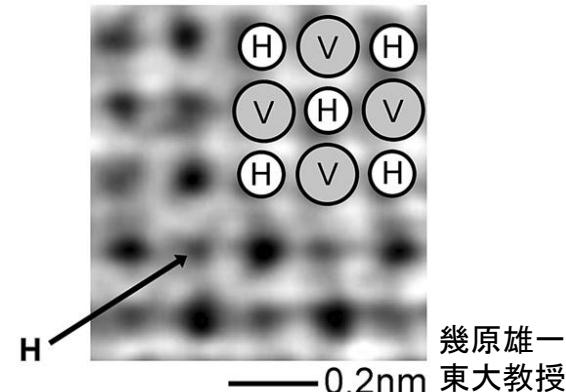
100万倍程度 10^{-10}m

陽子の波長

水素原子！！



画像提供:株式会社日立ハイテクノロジーズ

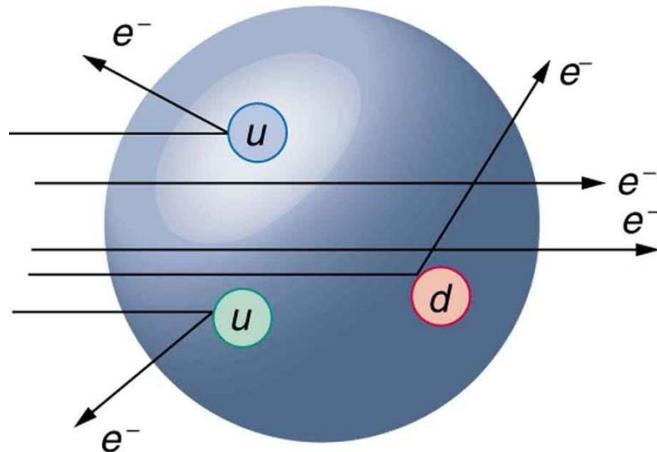


"First LHC magnets installed
Installation du premier
aimant du LHC" (26 Apr.
2005), CERN Document
Server
<http://cds.cern.ch/record/834351?ln=en>
CERN-AC-0504028-10



クオークの発見

高速の
電子



Proton 陽子にあてる

Quarks: Is That All There Is?
<http://voer.edu.vn/m/quarks-is-that-all-there-is/089f0eb6>
Proton
CC BY-3.0

実際、原子核のサイズ
だと、中がみえる。

もし、陽子が「素粒子」だったら、
大きさがない

点と点の反応(点といってエネルギー
に応じて波の広がり)

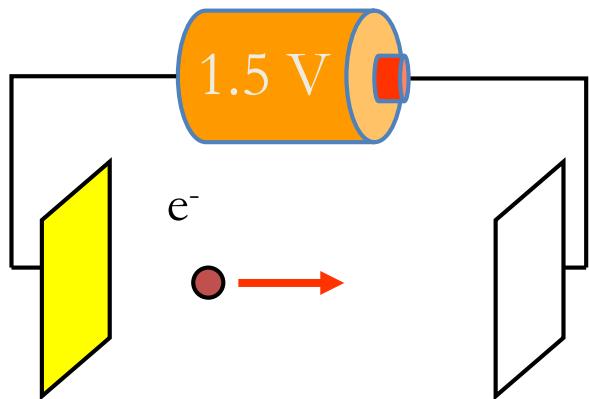
ほとんど、スカスカ。。。
たまに、大きく散乱

電子のエネルギー > 1 GeV(10^9 eV)

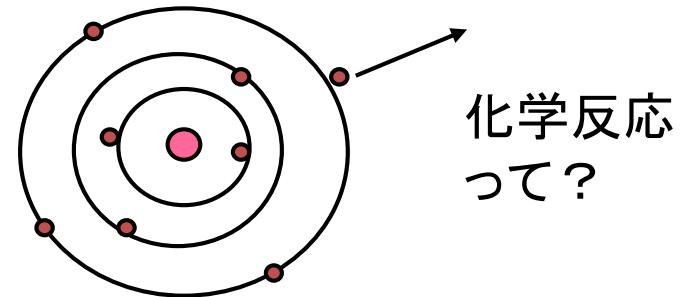
エネルギーの単位 (1)

電子ボルト

$$1 [\text{eV}] = 1.6 \times 10^{-19} [\text{J}]$$



キヤノンサイエンスラボ・キッズ 色と光
http://web.canon.jp/technology/kids/mystery/m_04_11.html
金属の炎色反応 写真提供:中條 敏



化学反応のエネルギー
可視光のエネルギー、色

$E=1 \text{ eV} \text{くらい}$

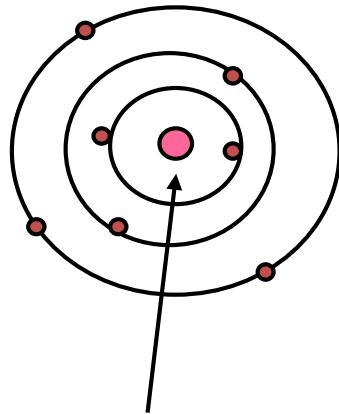
600nm(赤)

化学反応
って?

人間の目
化学反応



エネルギーの単位(2)



化学反応 1-10 eV 程度

サイズが10万分の1

鍊金術：化学反応のエネルギーで原子核
変換をしようとした。

$1 \text{ [MeV]} = 10^6 \text{ [eV]}$ (メガ) 原子核反応のエネルギー

$$\Delta P \Delta x > h/2\pi$$

$1 \text{ [GeV]} = 10^9 \text{ [eV]}$ (ギガ)

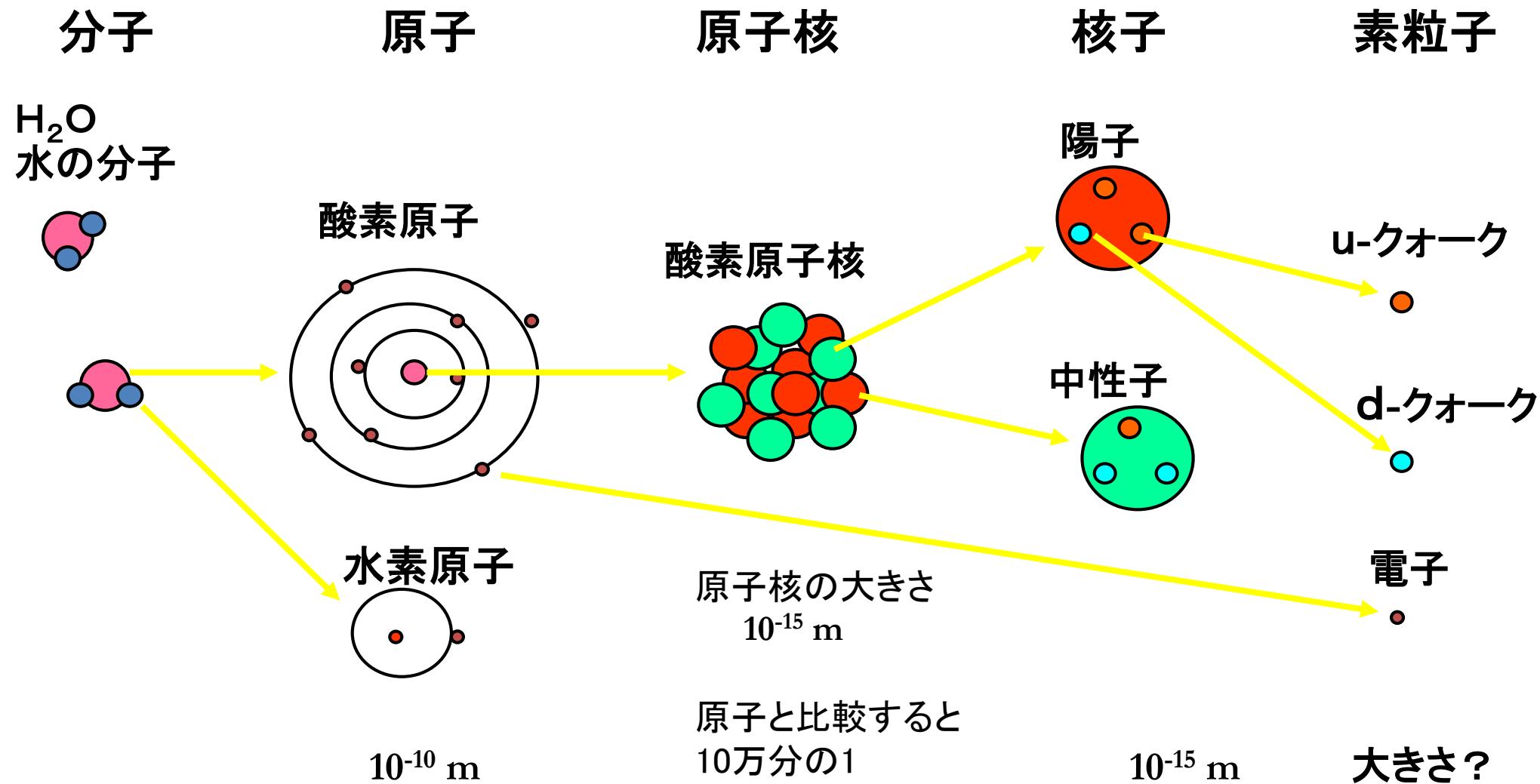
$1 \text{ [TeV]} = 10^{12} \text{ [eV]}$ (テラ) 素粒子反応のエネルギー

$E=mc^2$ 質量の単位もエネルギーの単位で測る。

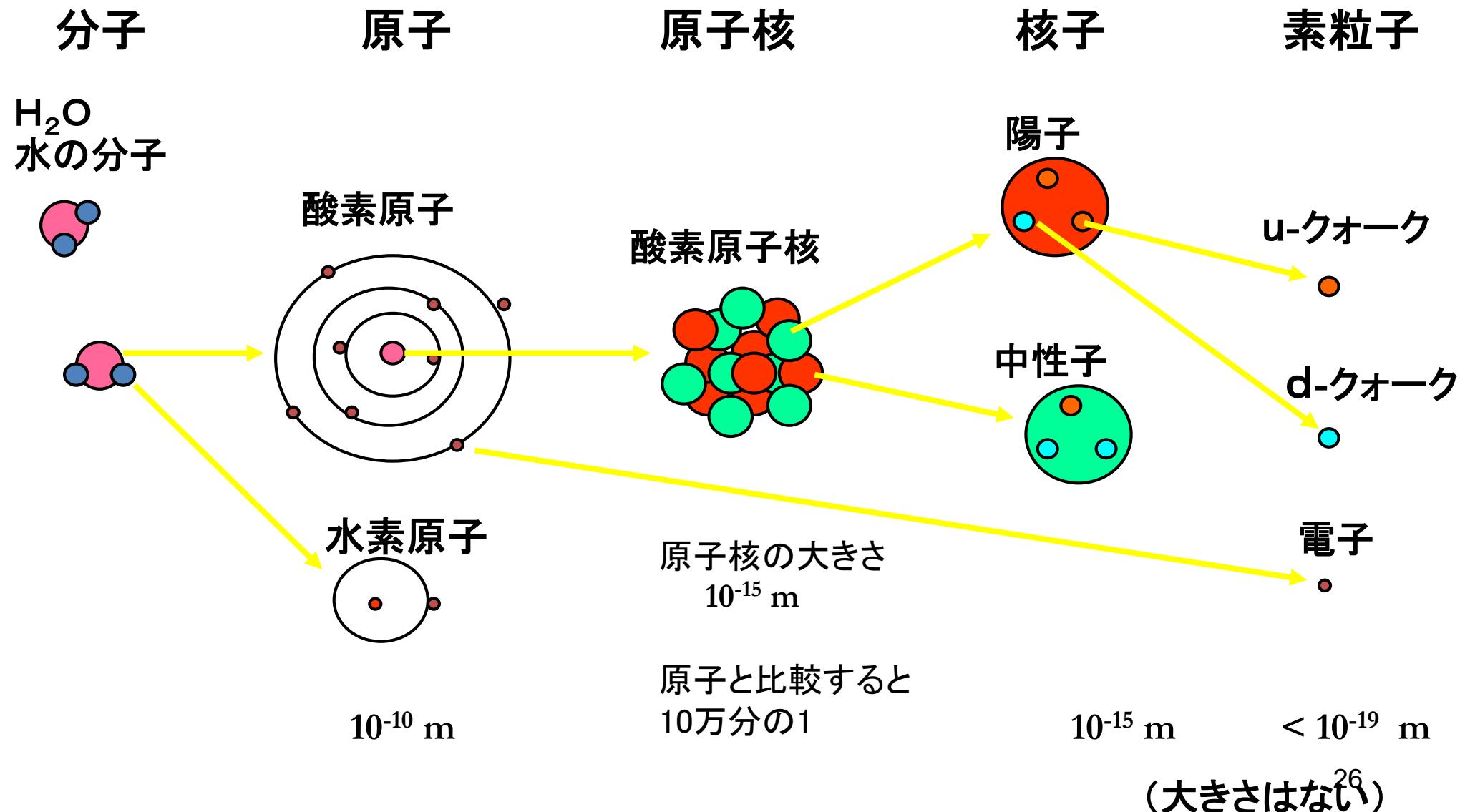
例：電子の質量 $M_e = 9.1 \times 10^{-31} \text{ kg} = 0.511 \text{ MeV}$

ミクロの世界では
サイズとエネルギー
が関係ついている

物質の階層性



物質の階層性



物質の階層性の将来

素粒子の座から引きずりおろされ
て、可能性も高い

u-クオーク



d-クオーク



電子

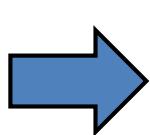


加速器のエネルギーが高く
なると 10^{-19}m より小さい構造が
見える。
「歴史は繰り返す」

本当に大きさがないの？

最小の長さの単位

$$L_p = \sqrt{\hbar \cdot G / c^3} = 1.6 * 10^{-35}\text{m}$$



サブクオーク
レプトン・クオーク

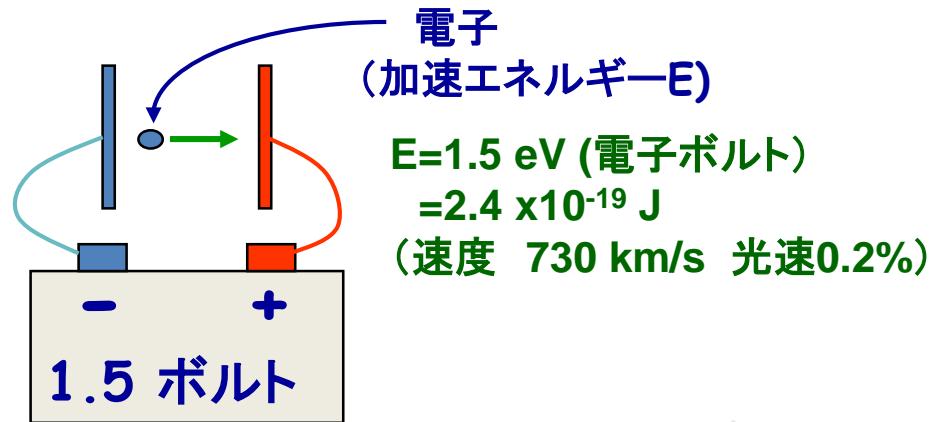
物質の広がり $l = \hbar / mc$

ブラックホールになってしまう
距離 シュバルツシルト半径
 $R = 2Gm/c^2$

$R = l$ としてとくと

→ 「ひも理論」

加速器

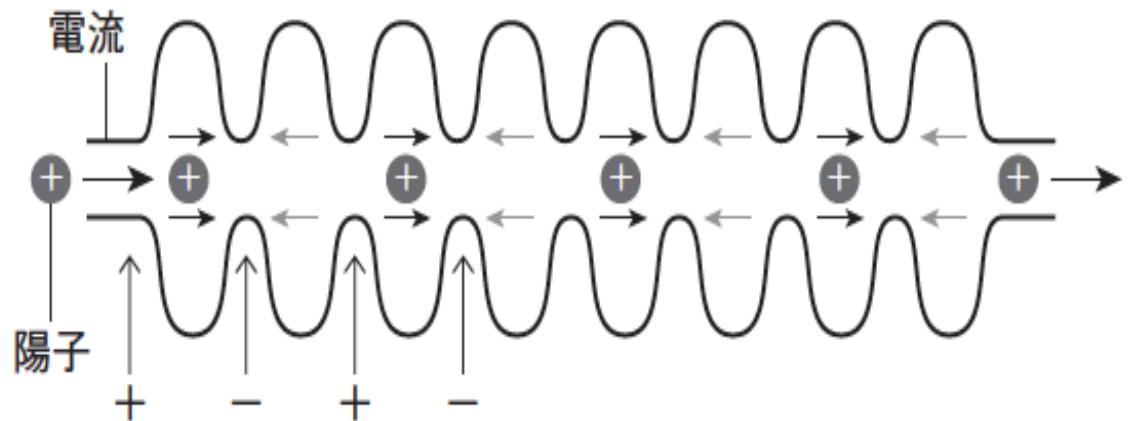


→これを12桁高いところまで

浅井祥仁『ヒッグス粒子の謎』(祥伝社、2012年)
http://www.s-book.net/plsql/slib_detail?isbn=9784396112905
P89図15 LHCの加速装置

〈加速のしくみ〉

超伝導最新加速器



プラスとマイナスの電極が交互に並んでおり、交流で電荷が入れ替わることで繰り返し加速されていく。

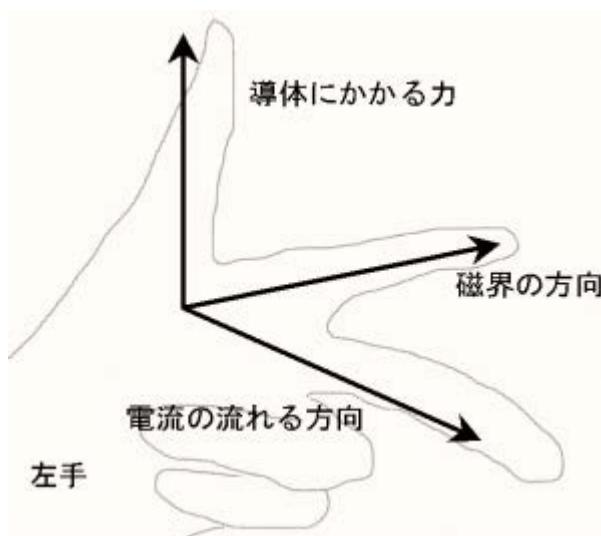
円形加速器なので曲げる

→ 運動量が大きくなると
曲げるのが大変

陽子は左に曲がっていき



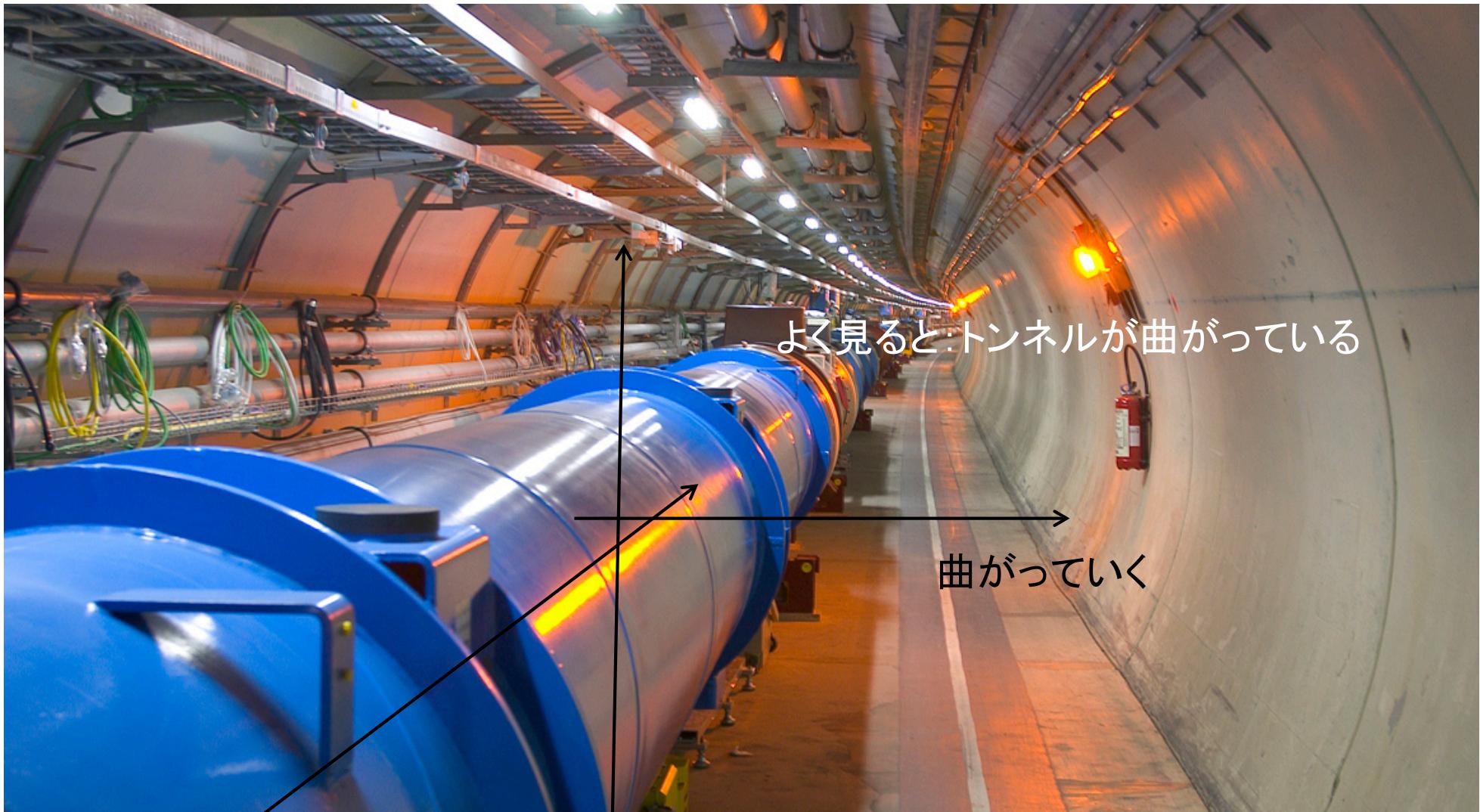
©CERN



上向きの強力な磁場

陽子の方向

https://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%95%E3%83%AC%E3%83%9F%E3%83%B3%E3%82%B0%E3%81%AE%E5%B7%A6%E6%89%8B%E3%81%AE%E6%B3%95%E5%89%87#/media/File:Fleming%27s_Left_Hand_Rule.png
GFDL



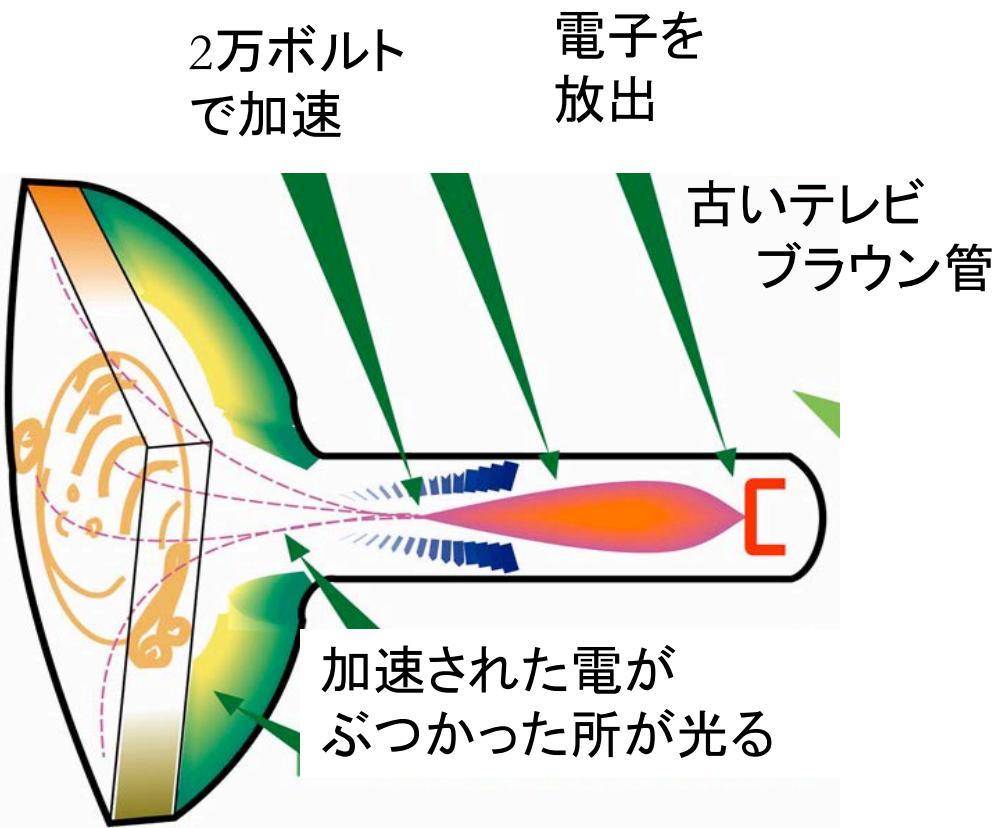
陽子

磁場

超伝導で約1万アンペアの
電流ながして 強力な磁石

30

実は身近な加速器



"Did you know your television set is an accelerator?", CERN Document Server

<http://cds.cern.ch/record/841500>

Photo by Jean-Luc Caron ©1993-2015 CERN

テレビ修理-頑固親父の修理日記

<http://blog.goo.ne.jp/vrc-tezuka/c/83597c7aadf21ff832298367ba328dc1>

2016年2月15日 日立 CT-150 (昭和35年7月) + 松下 TK-91D (昭和40年5月)

<http://blog.goo.ne.jp/vrc-tezuka/e/292ac429f35dd380d6a7abf7ce258a55>

分解してみるって、楽しいよ

加速器の進化

Jordan Nash, Imperial College London
Current and Future Developments
in Accelerator Facilities
<http://www.hep.ucl.ac.uk/iop2010/talks/4.pdf>
2010年(初出:1996年) p5

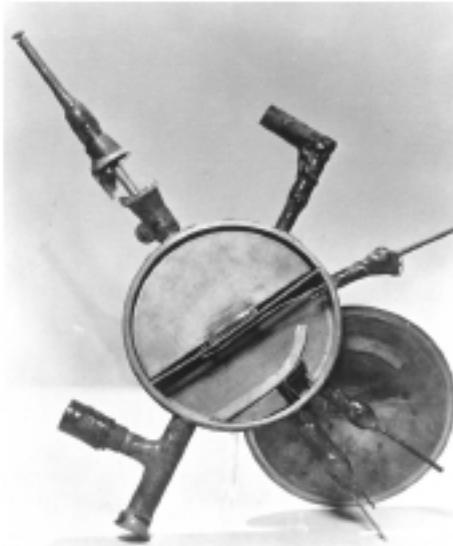


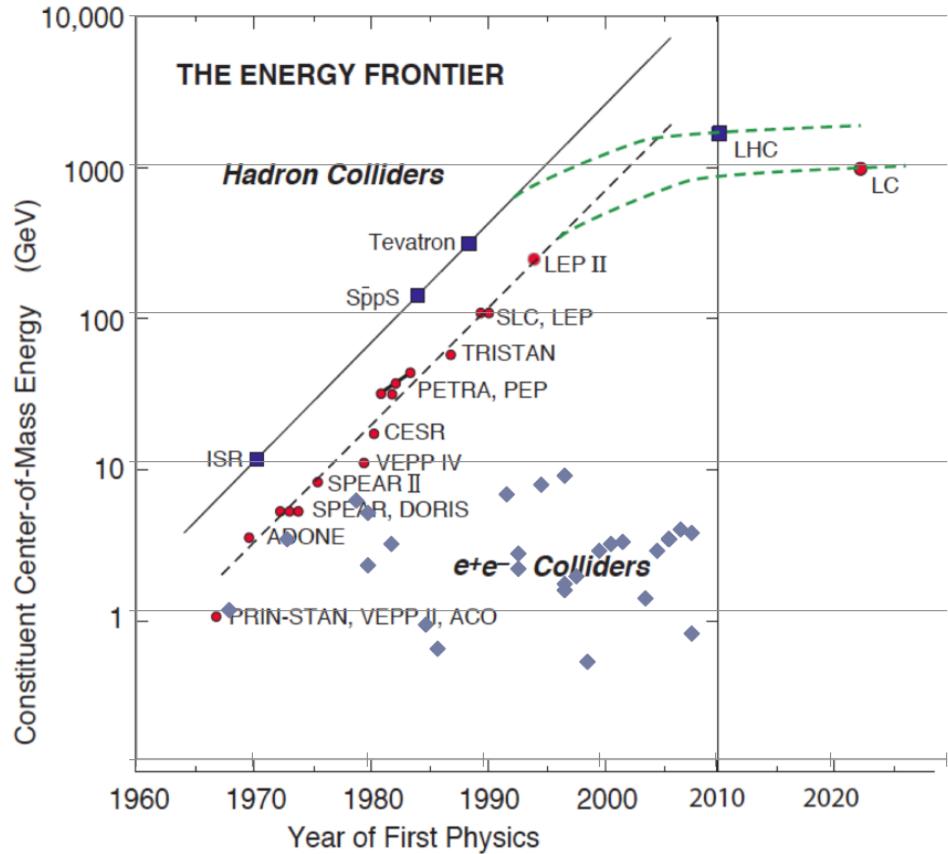
Photo courtesy of Berkeley lab

1932年 ローレンスが初めて作った
加速器(サイクロトロン)

直径 13cm
 $E=80\text{keV}$

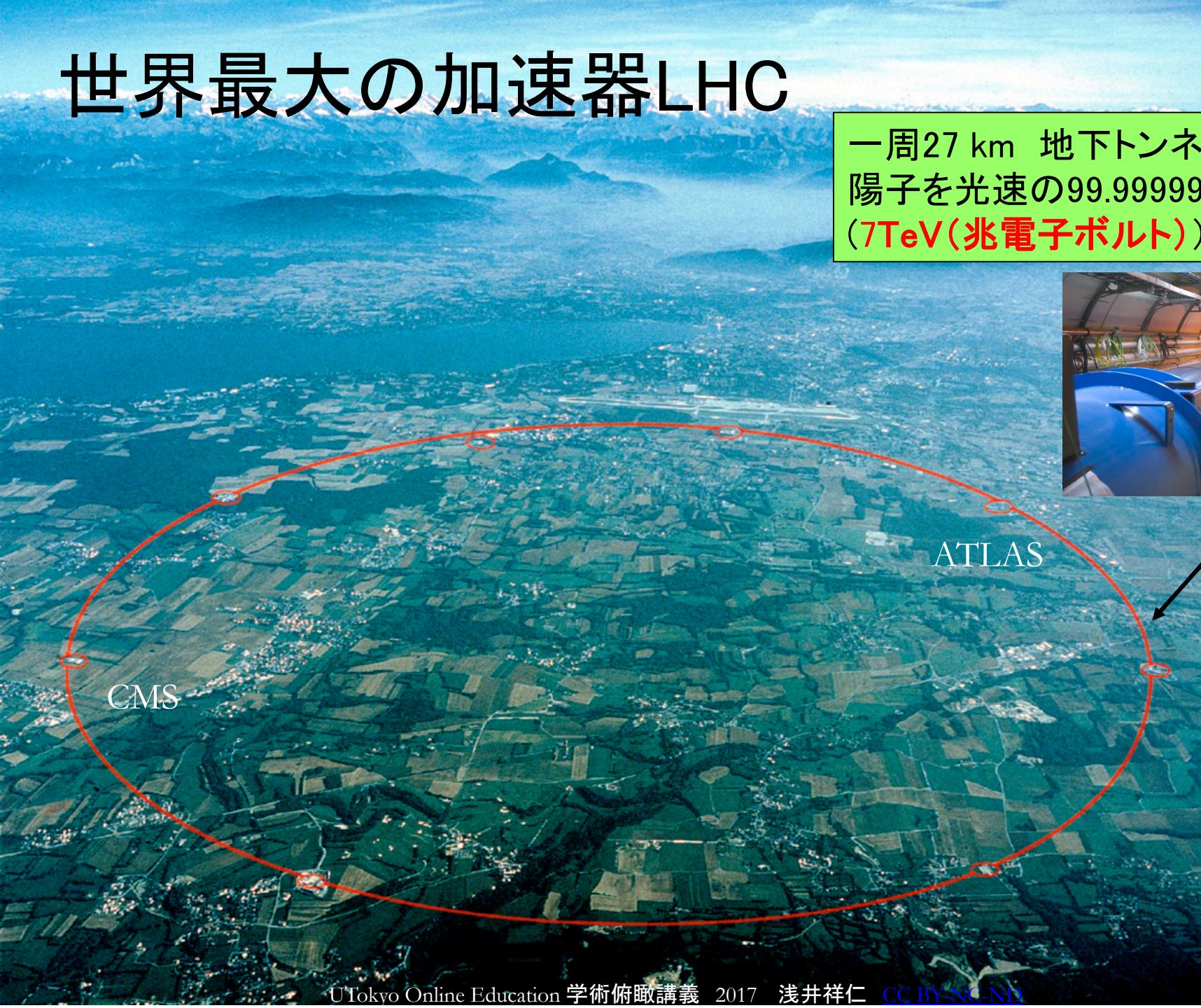
サイズで7万倍

国家の威信をかけて基礎科学をすすめて
エネルギーで9000万倍



世界最大の加速器LHC

一周27 km 地下トンネル
陽子を光速の99.999999 % まで加速
(**7TeV(兆電子ボルト)**)



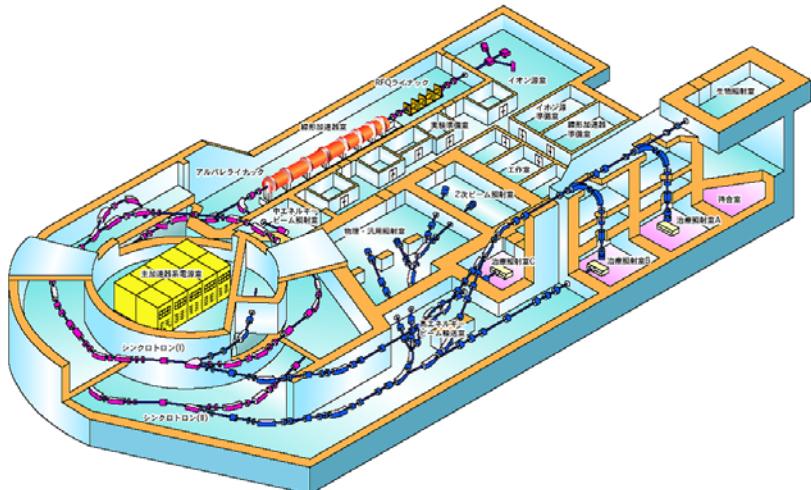
トンネル内部

"Getting around the LHC
Transport dans le LHC"
(2005/10/24), CERN Document
Server
<http://cds.cern.ch/record/905939/?ln=en>
CERN-AC-0510028-04

ビデオ

33

加速器は、基礎科学だけでなく役にたっている



画像提供: 国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構

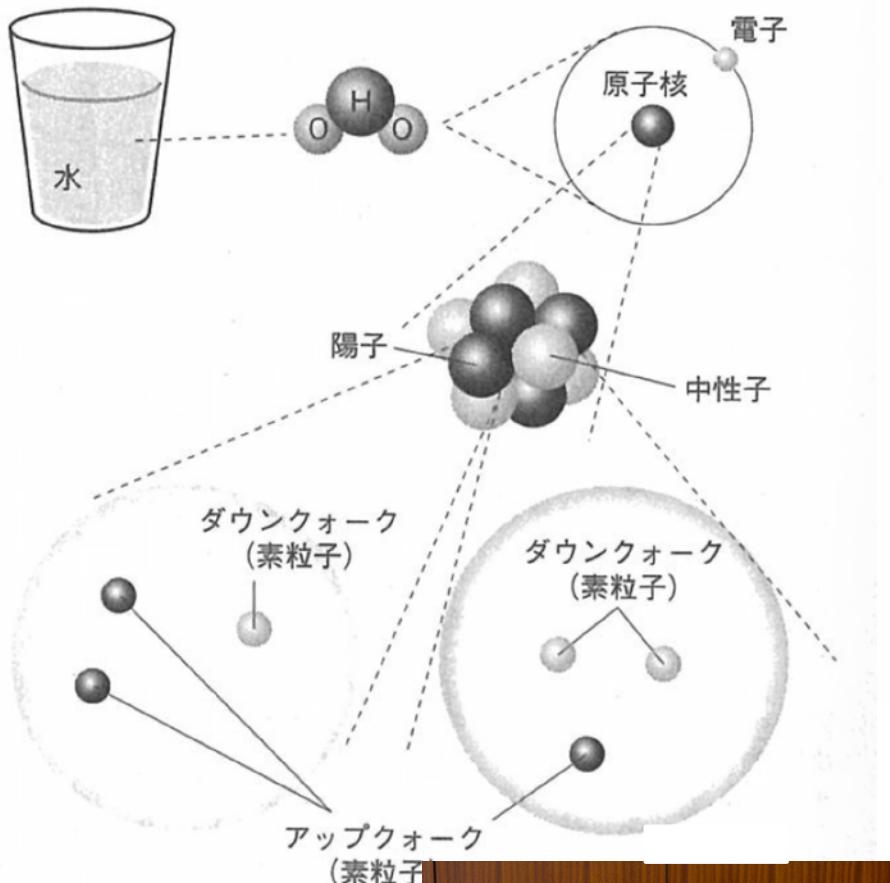


放射光施設

Photo by Koji101, from Wikipedia Commons
<https://ja.wikipedia.org/wiki/SACLA#/media/File:SPring-8.JPG>
CC BY 3.0

物質を形づくる素粒子

浅井祥仁『ヒッグス粒子の謎』(祥伝社、2012年)
P23図4素粒子の「標準モデル」、P35図5物質はどこまで
「細かく」できるか？



	第Ⅰ世代	第Ⅱ世代	第Ⅲ世代
クォーク	u アップ	c チャーム	t トップ
	d ダウン	s ストレング	b ボトム
レプトン	U _e 電子 ニュートリノ	U _μ ミュー ニュートリノ	U _τ タウ ニュートリノ
	e 電子	μ ミューオン	τ タウ

陽子・中性子の核子は、2種類のクォークで構成
それ以外に電子とニュートリノ

このセットがちょうど3セットある



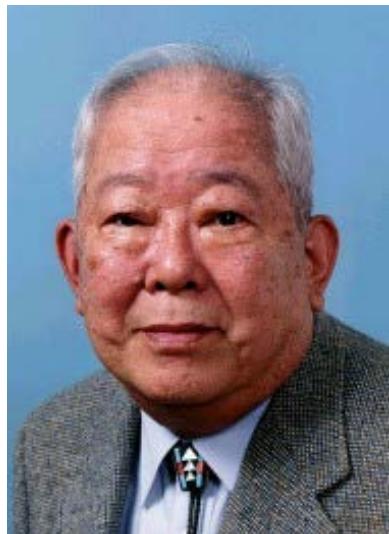
Courtesy of KEK

益川・小林先生

ニュートリノは幽霊粒子



Image from GATAG



https://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%B0%8F%E6%9F%B4%E6%98%8C%E4%BF%8A#/media/File:Masatoshi_Koshiba_2002.jpg
CC BY 4.0



Photo by Bengt Nyman ,from Wikipedia Commons
https://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%A2%BF6%94%B0%E9%9A%86%E7%AB%A0#/media/File:Takaaki_Kajita_5171-2015.jpg
CC BY-SA 4.0

東大のお家芸

ニュートリノは幽霊粒子



Image from GATAG

原子核の反応で出てきたニュートリノが
水の中をすすむと、..

10^{21}m 進まないとぶつからない。

10万光年

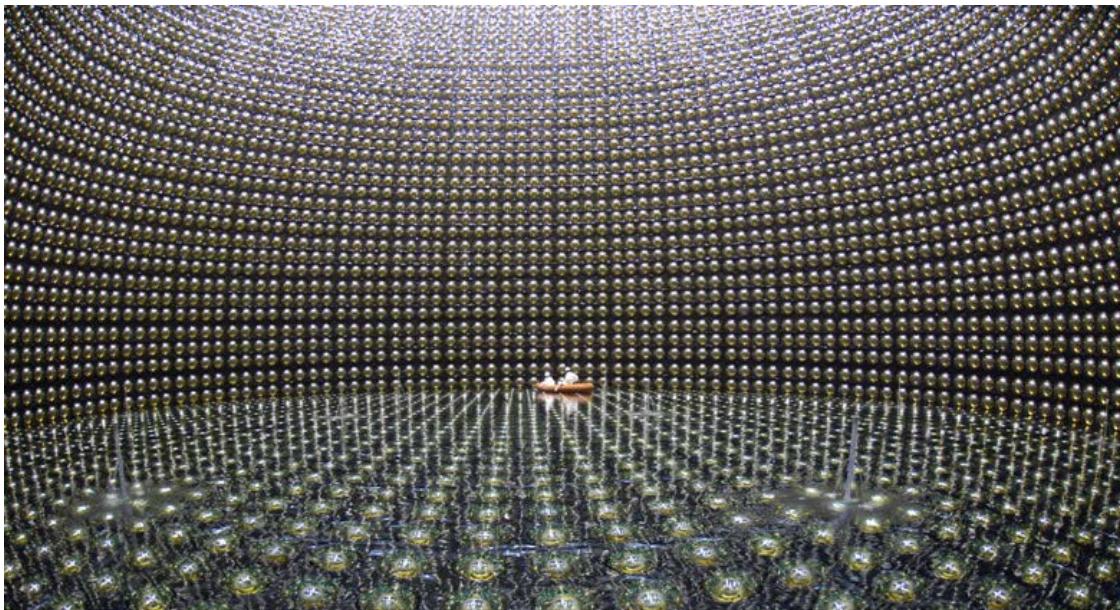


(asai作です)

天の川 銀河のサイズ ~10万光年

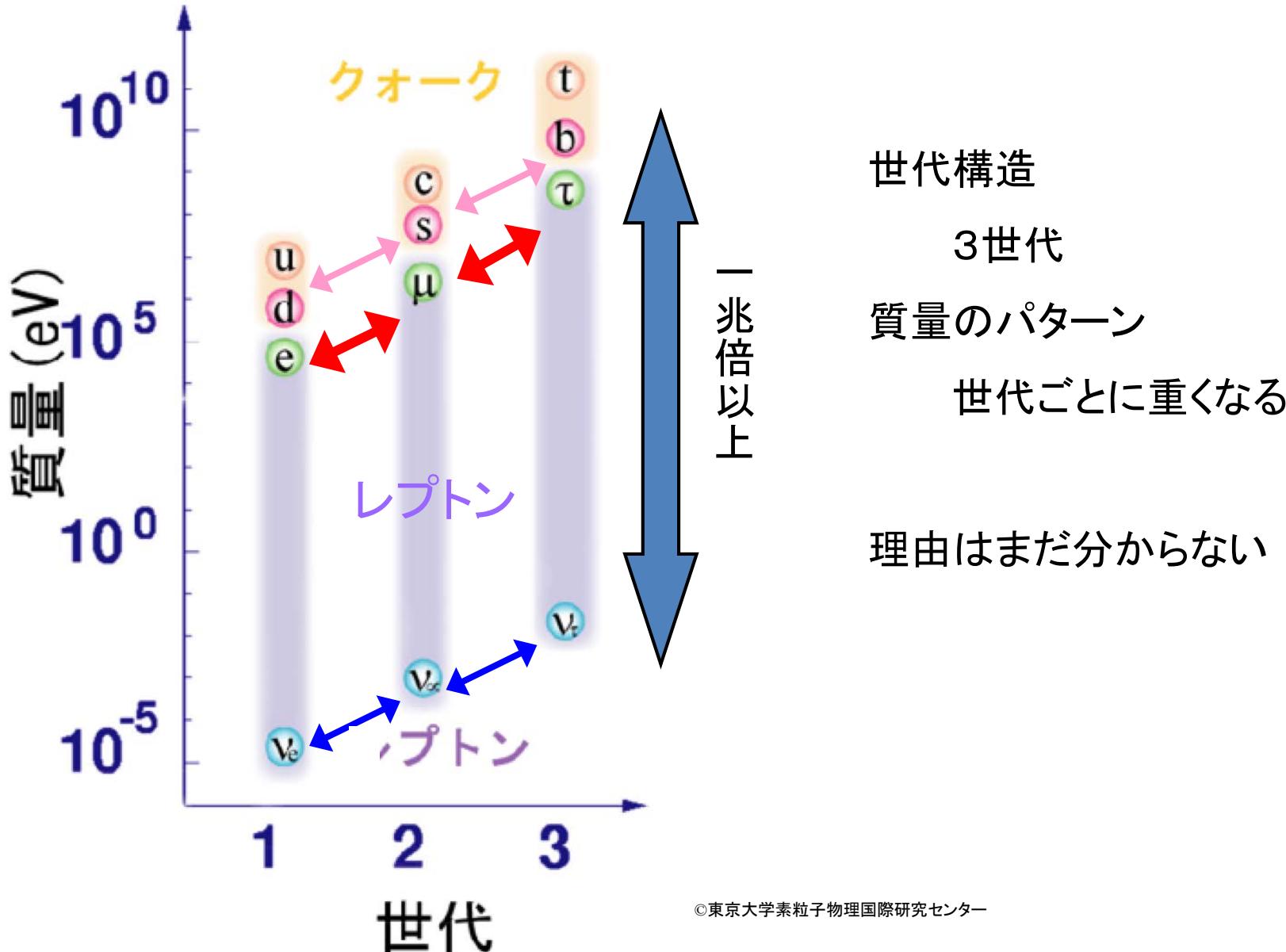
←アンドロメダ銀河

(似たようなサイズで 近い 250万



(c) Kamioka Observatory, ICRR (Institute for Cosmic Ray Research), The University of Tokyo

クオークとレプトンの世代って



©東京大学素粒子物理国際研究センター

反物質って？

著作権等の都合により、
ここに挿入されていた画像を
削除しました

映画『天使と悪魔』ポスター

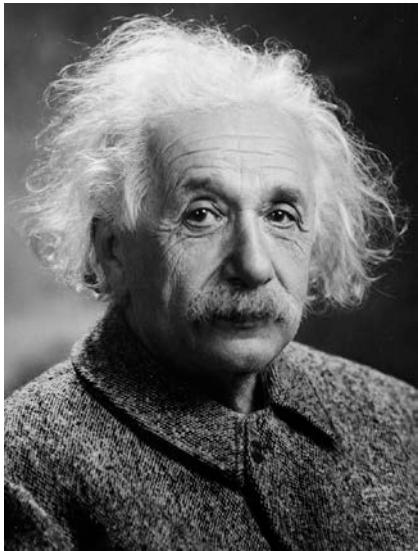
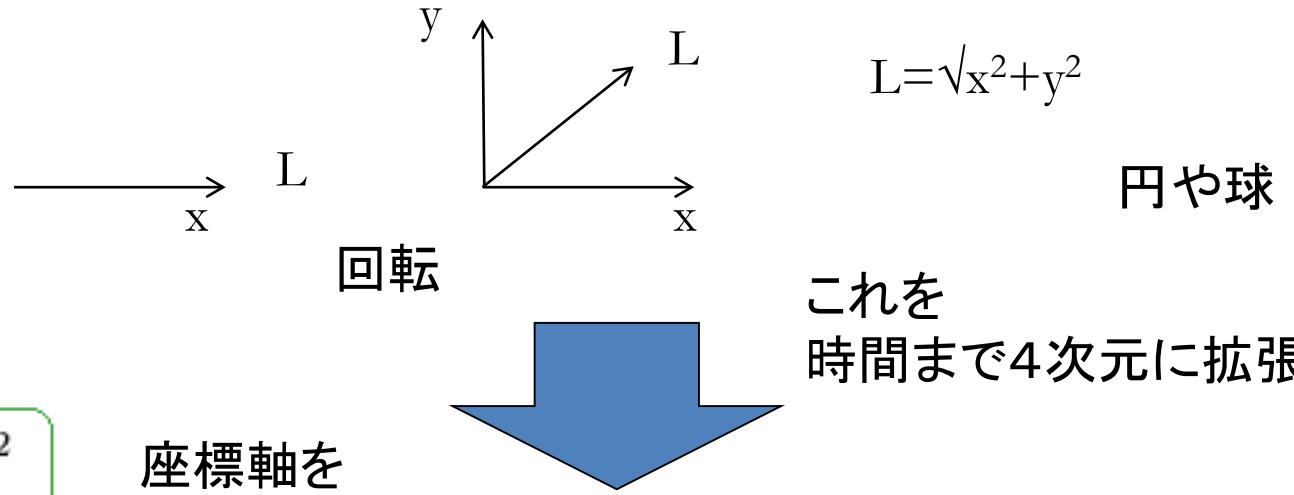


Photo from Wikipedia Commons

相対性理論

時間と空間を区別しない

時間と空間の統一 → 時空



4次元的な長さ

$$x'^2 + y'^2 + z'^2 - c^2 t'^2$$

座標軸をまわす

ただの回転

$$t' = \frac{t - vx/c^2}{\sqrt{1 - \beta^2}} \quad x' = \frac{x - vt}{\sqrt{1 - \beta^2}} \quad y' = y \quad z' = z$$

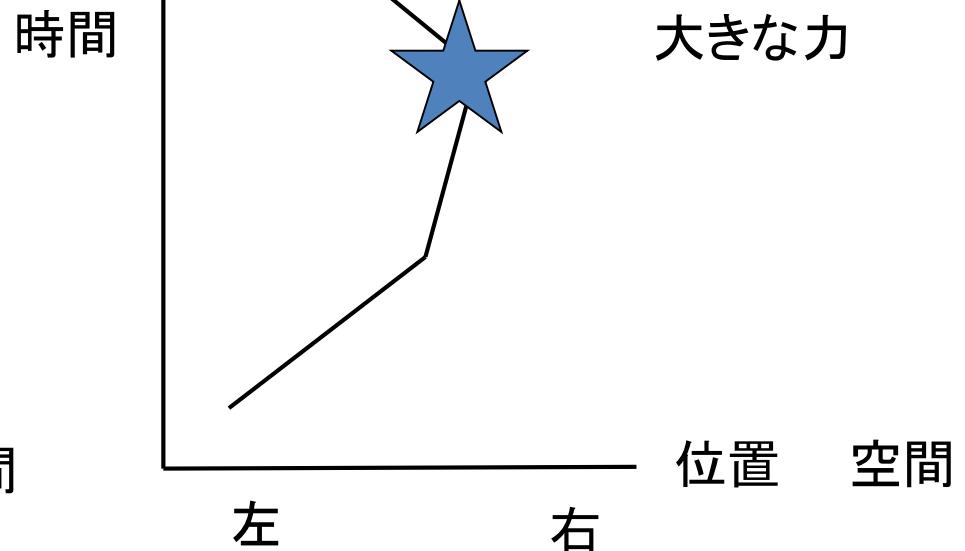
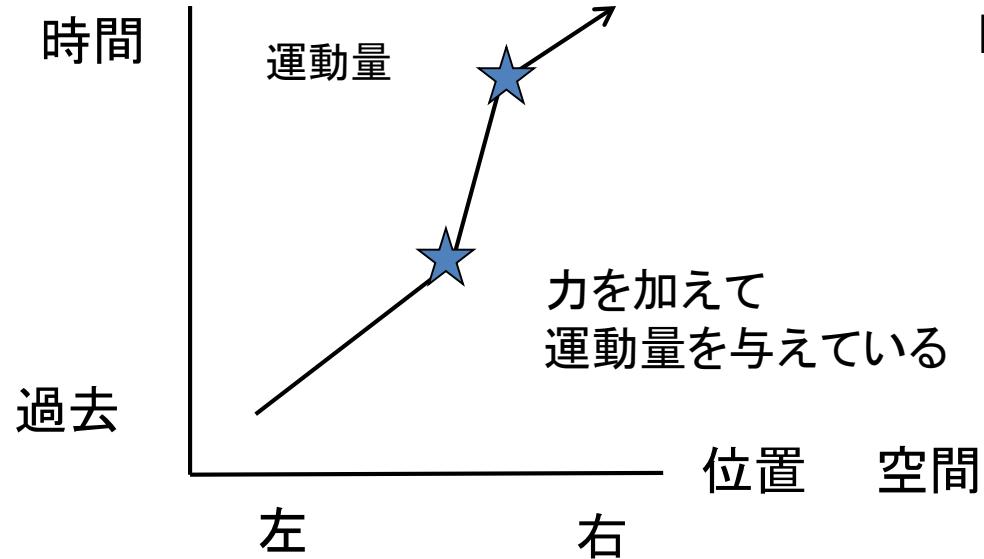
世界で最も有名な式

$$= x^2 + y^2 + z^2 - c^2 t^2$$

$$P_x^2 + P_y^2 + P_z^2 - E^2 = -m^2$$

粒子の運動を「空間と時間」のグラフ用紙の上で考える

未来



相対性理論をとりこんだ粒子の動き

時空の中の粒子の運動

$$\exp(-iEt)\exp(-iPx)$$

時間をさかのぼる
粒子がいて当然
= 反粒子

$$E < 0 \quad \exp(-iEt) = \exp(-i(-E)(-t))$$

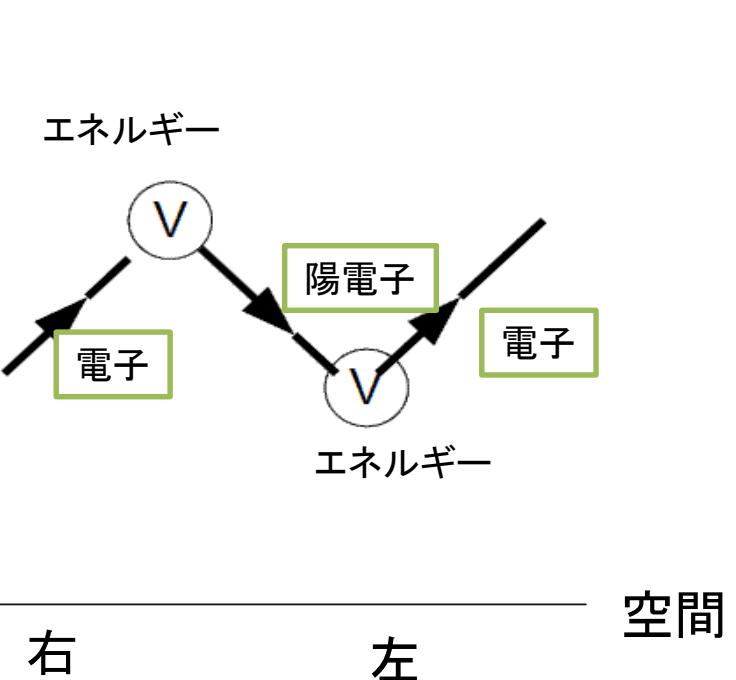
電子の反粒子 = 陽電子

粒子 + 反粒子 → エネルギー

エネルギー → 粒子 + 反粒子

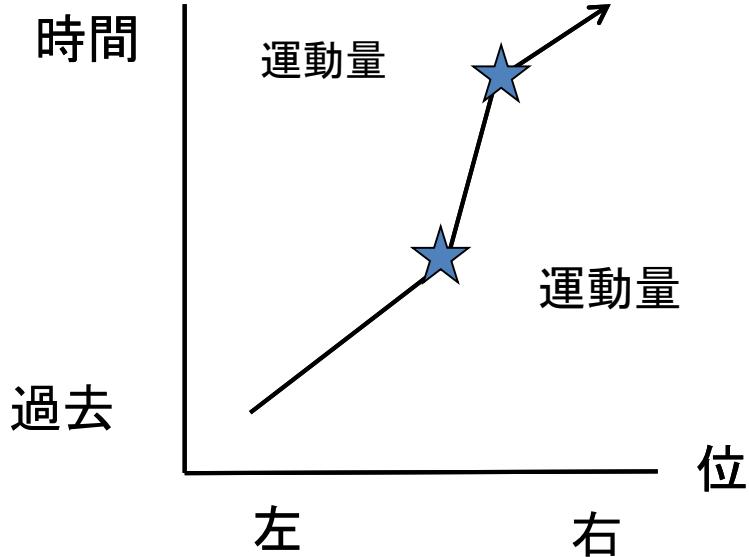
時間

未来
過去



空間座標 x, y, z \Leftrightarrow 運動量 P_x, P_y, P_z
時間 t \Leftrightarrow エネルギー E

未来



時間

未来
過去

空間

右
左

空間

反物質の発見(実証されて物理学になる)

Smithsonian Institution from Wikipedia Commons
[https://en.wikipedia.org/wiki/Carl_David_Anderson#/media/
File:Carl_David_Anderson.jpg](https://en.wikipedia.org/wiki/Carl_David_Anderson#/media/File:Carl_David_Anderson.jpg)

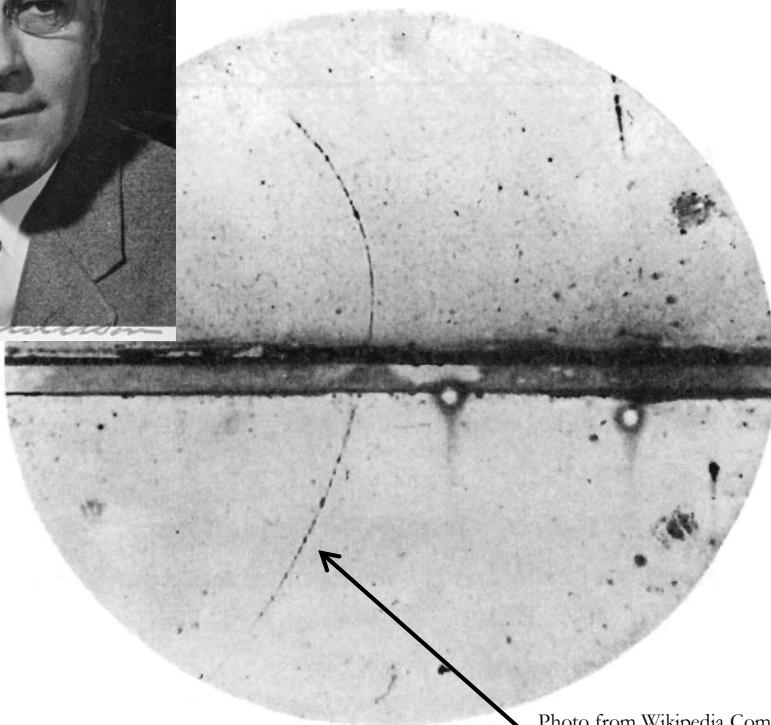
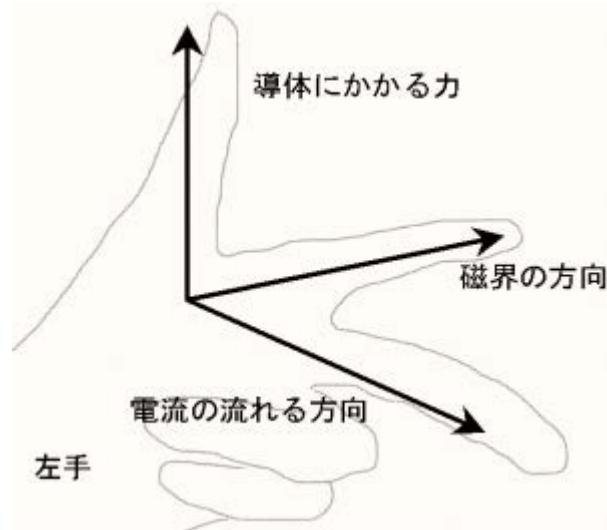


Photo from Wikipedia Commons

1932 アンダーソン:
陽電子発見

[https://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%95%E3%83%AC%E3%83%9F%E3%83%B3%
E3%82%B0%E3%81%AE%E5%B7%A6%E6%89%8B%E3%81%AE%E6%B3%
95%E5%89%87#/media/File:Fleming%27s_Left_Hand_Rule.png](https://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%95%E3%83%AC%E3%83%9F%E3%83%B3%E3%82%B0%E3%81%AE%E5%B7%A6%E6%89%8B%E3%81%AE%E6%B3%95%E5%89%87#/media/File:Fleming%27s_Left_Hand_Rule.png)
GFDL



どうして進んでいる
方向がわかるの？

これがノーベル賞の鍵

磁石:紙面上から下