

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)  
開講時限: 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、広く限ら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、悪魔は表面を創作した  
空気の錬金術が人類を救った  
原子・分子を観測し操作する



詳細はHPをご覧ください  
[www.gfk.c.u-tokyo.ac.jp](http://www.gfk.c.u-tokyo.ac.jp)

学術俯瞰講義



# 学術俯瞰講義

Global Focus on Knowledge

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

KOMEX  
Komaba Open Method for Educational Innovation

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

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



# 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) クォークの発見
- 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

©Robert Williams and the Hubble Deep Field Team (STScI) and NASA



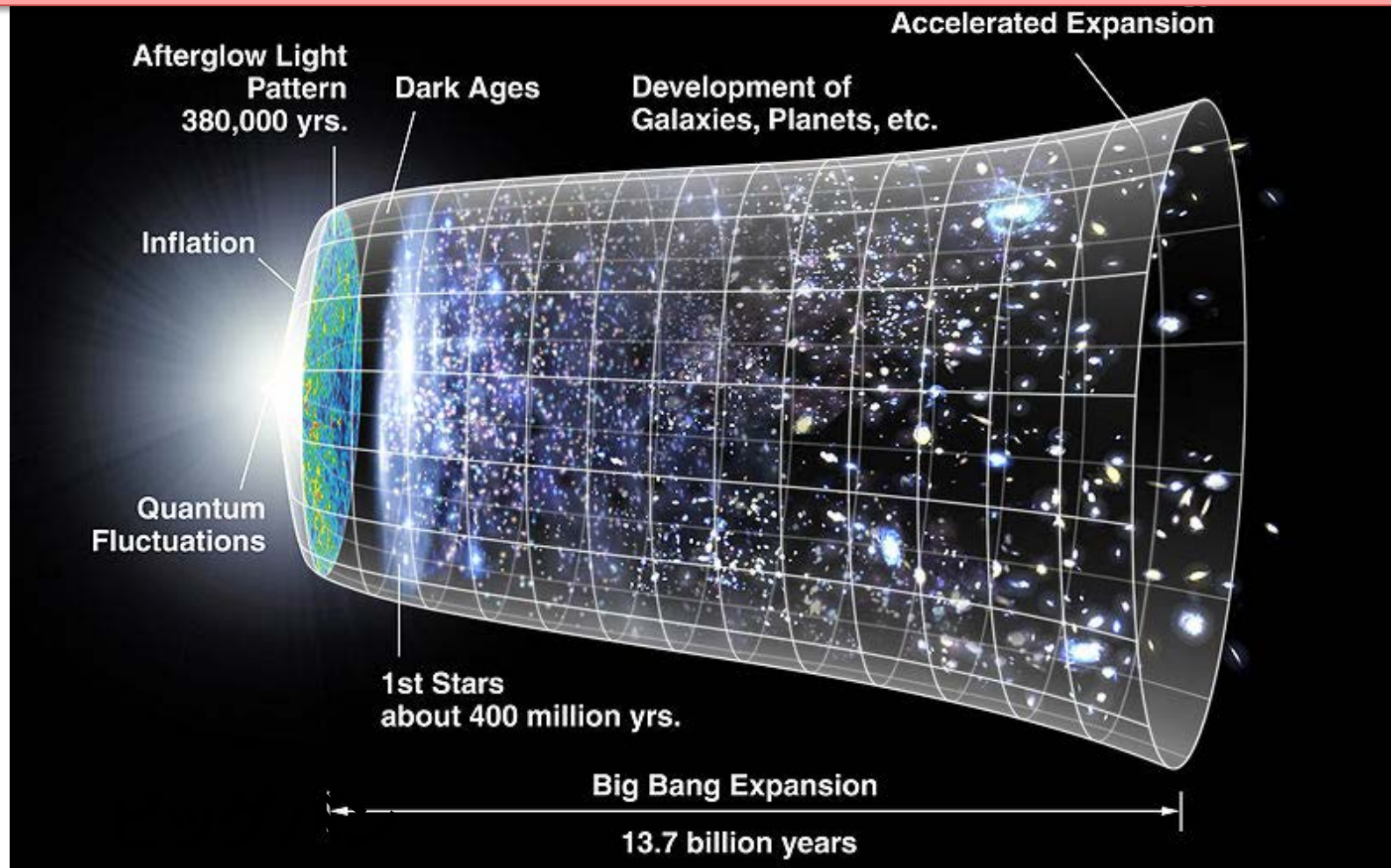
観測可能な領域で

銀河  $\sim 1000,000,000,000 (10^{12})$

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

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



©Courtesy NASA/JPL-Caltech

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

“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  
分かっていたら







# 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 <b>H</b> 水素 1.008	2 <b>He</b> ヘリウム 4.0026																
3 <b>Li</b> リチウム 6.94	4 <b>Be</b> ベリリウム 9.0122																
5 <b>Na</b> ナトリウム 22.990	6 <b>Mg</b> マグネシウム 24.305																
7 <b>K</b> カリウム 39.098	8 <b>Ca</b> カルシウム 40.078	9 <b>Sc</b> スカンジウム 44.956	10 <b>Ti</b> チタン 47.867	11 <b>V</b> バナジウム 50.942	12 <b>Cr</b> クロム 51.996	13 <b>Mn</b> マンガン 54.938	14 <b>Fe</b> 鉄 55.845	15 <b>Co</b> コバルト 58.933	16 <b>Ni</b> ニッケル 58.693	17 <b>Cu</b> 銅 63.546	18 <b>Zn</b> 亜鉛 65.38	19 <b>Ga</b> ガリウム 69.723	20 <b>Ge</b> ゲルマニウム 72.630	21 <b>As</b> ヒ素 74.922	22 <b>Se</b> セレン 78.971	23 <b>Br</b> 臭素 79.904	24 <b>Kr</b> クリプトン 83.798
25 <b>Rb</b> ルビジウム 85.468	26 <b>Sr</b> ストロンチウム 87.62	27 <b>Y</b> イットリウム 88.906	28 <b>Zr</b> ジルコニウム 91.224	29 <b>Nb</b> ニオブ 92.906	30 <b>Mo</b> モリブデン 95.95	31 <b>Tc</b> テクネチウム (98)	32 <b>Ru</b> ルテチウム 101.07	33 <b>Rh</b> ロジウム 102.91	34 <b>Pd</b> パラジウム 106.42	35 <b>Ag</b> 銀 107.87	36 <b>Cd</b> カドミウム 112.41	37 <b>In</b> インジウム 114.82	38 <b>Sn</b> スズ 118.71	39 <b>Sb</b> アンチモン 121.76	40 <b>Te</b> テルル 127.60	41 <b>I</b> ヨウ素 126.90	42 <b>Xe</b> キセノン 131.29
53 <b>Cs</b> セシウム 132.91	54 <b>Ba</b> バリウム 137.33	55-71	56 <b>Hf</b> ハフニウム 178.49	57 <b>Ta</b> タンタル 180.95	58 <b>W</b> タングステン 183.84	59 <b>Re</b> レニウム 186.21	60 <b>Os</b> オスミウム 190.23	61 <b>Ir</b> イリジウム 192.22	62 <b>Pt</b> 白金 195.08	63 <b>Au</b> 金 196.97	64 <b>Hg</b> 水銀 200.59	65 <b>Tl</b> タリウム 204.38	66 <b>Pb</b> 鉛 207.2	67 <b>Bi</b> ビスマス 208.98	68 <b>Po</b> ポロニウム (209)	69 <b>At</b> アスタチン (210)	70 <b>Rn</b> ラドン (222)
87 <b>Fr</b> フランシウム (223)	88 <b>Ra</b> ラジウム (226)	89-103	104 <b>Rf</b> ラザホージウム (267)	105 <b>Db</b> ドブニウム (268)	106 <b>Sg</b> シーボーギウム (269)	107 <b>Bh</b> ボーリウム (270)	108 <b>Hs</b> ハッシュウム (277)	109 <b>Mt</b> マイトネリウム (278)	110 <b>Ds</b> ダームスタット (281)	111 <b>Rg</b> レイトゲニウム (282)	112 <b>Cn</b> コペルニシウム (285)	113 <b>Nh</b> ニホニウム (286)	114 <b>Fl</b> フレロビウム (289)	115 <b>Mc</b> モスコヴィウム (290)	116 <b>Lv</b> リバモリウム (293)	117 <b>Ts</b> テネシウム (294)	118 <b>Og</b> オガネソン (294)

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。ニホニウム

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 <b>La</b> ランタン 138.91	58 <b>Ce</b> セリウム 140.12	59 <b>Pr</b> プラセオジウム 140.91	60 <b>Nd</b> ネオジウム 144.24	61 <b>Pm</b> プロメチウム (145)	62 <b>Sm</b> サマリウム 150.36	63 <b>Eu</b> ユウロピウム 151.96	64 <b>Gd</b> ガドリニウム 157.25	65 <b>Tb</b> テルビウム 158.93	66 <b>Dy</b> ジスプロシウム 162.50	67 <b>Ho</b> ホルミウム 164.93	68 <b>Er</b> エルビウム 167.26	69 <b>Tm</b> ツリウム 168.93	70 <b>Yb</b> イットリビウム 173.05	71 <b>Lu</b> ルテチウム 174.97
89 <b>Ac</b> アクチニウム (227)	90 <b>Th</b> トリウム 232.04	91 <b>Pa</b> プロトアクチニウム 231.04	92 <b>U</b> ウラン 238.03	93 <b>Np</b> ネプツニウム (237)	94 <b>Pu</b> プルトニウム (244)	95 <b>Am</b> アメリシウム (243)	96 <b>Cm</b> キュリウム (247)	97 <b>Bk</b> バークリウム (247)	98 <b>Cf</b> カリホルニウム (251)	99 <b>Es</b> アインシュタイン (252)	100 <b>Fm</b> フェルミウム (257)	101 <b>Md</b> メンデレフ (258)	102 <b>No</b> ノーベリウム (259)	103 <b>Lr</b> ローレンシウム (266)

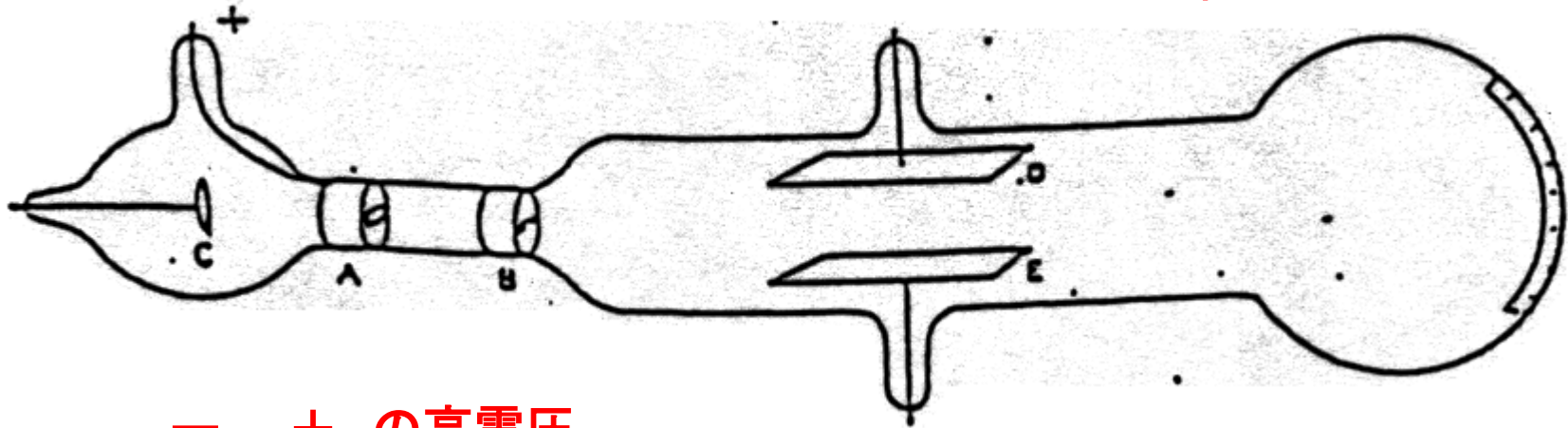
<https://www.ptable.com>



# 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)

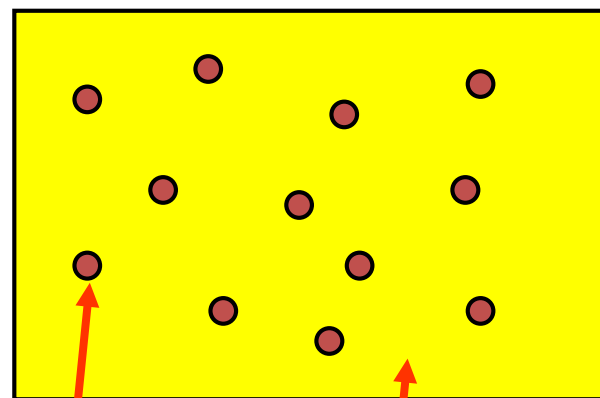
薄いガス ( $10^{-5}$  atm)

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](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



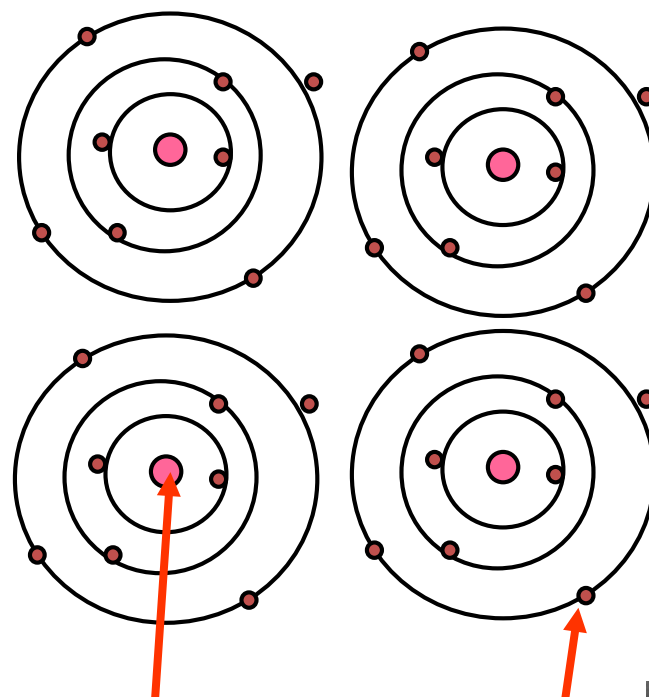
電子

均質な+電荷

ぶどうパンモデル

J. J. トムソン

原子モデル 2



硬く重い核 +電荷

電子

土星型モデル

ラザフォード や 長岡半太郎

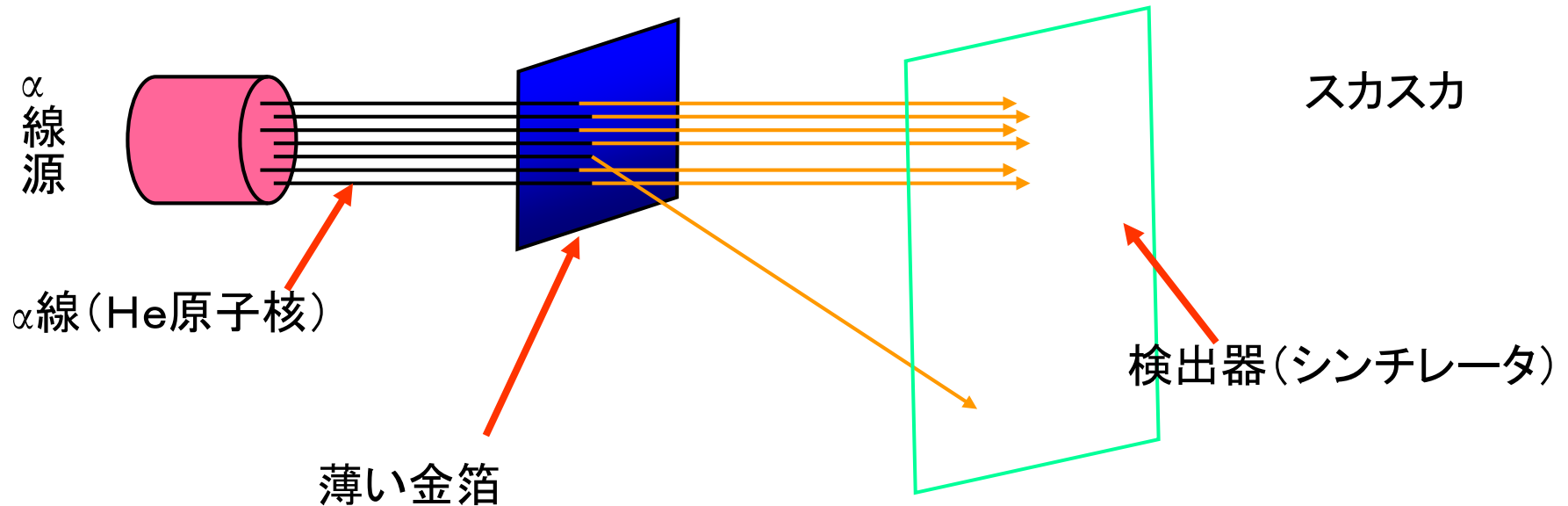


From Wikipedia Commons



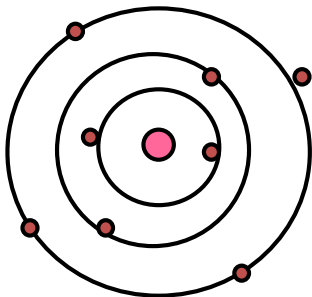
# ラザフォードの原子核の発見

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。

⇒

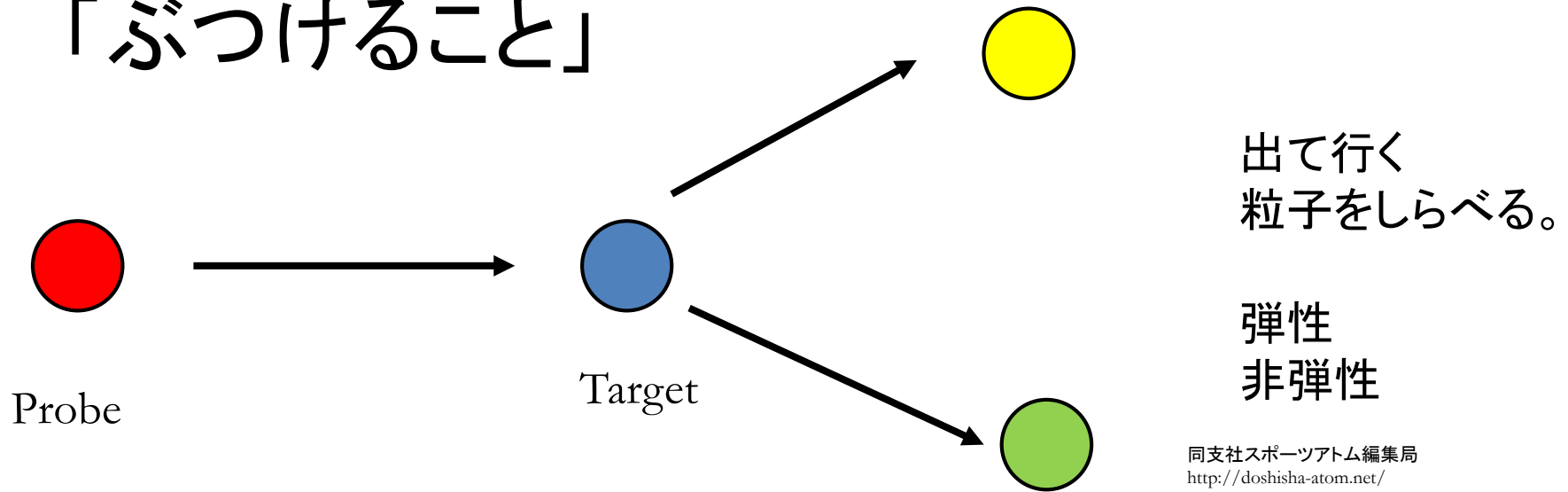


このモデルが正しい。(土星型モデル)

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」

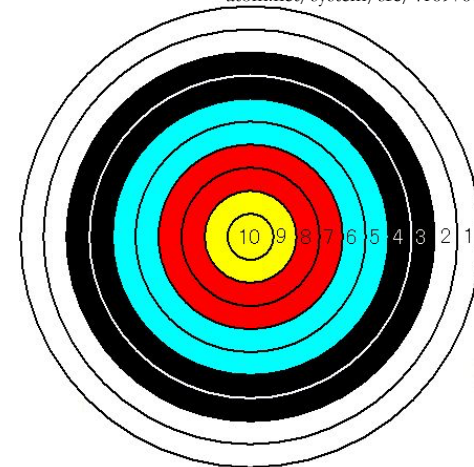


同支社スポーツアトム編集部  
<http://doshisha-atom.net/>  
[http://doshisha-atom.net/system/src/416976144c21b5532e43f2.44694149\\_.jpg](http://doshisha-atom.net/system/src/416976144c21b5532e43f2.44694149_.jpg)

反応のおこりやすさ：断面積  $\sigma$  (面積の次元)

半径  $r = \text{fm}$  幾何的断面積  $3 \times 10^{-30} \text{ m}^2$   
バーン (b)  $= 10^{-28} \text{ m}^2 = 100 \text{ fm}^2$  (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。





# 物質の階層性 (1930年代)

分子

原子

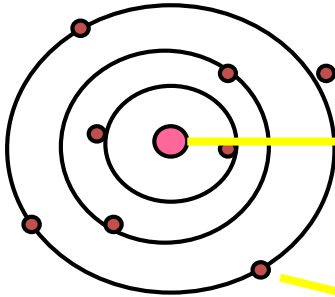
原子核

核子と電子

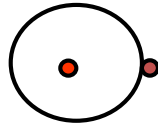
H<sub>2</sub>O  
水の分子



酸素原子

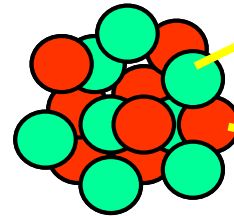


水素原子

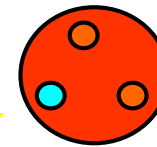


10<sup>-10</sup> m

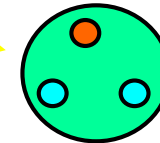
酸素原子核



陽子



中性子



原子核の大きさ

10<sup>-15</sup> m

水素の原子核  
が陽子

中性子は、  
 ${}^9_4\text{Be} + {}^4_2\text{He} \rightarrow {}^{12}_6\text{C} + {}^1_0\text{n}$   
nをパラフィンで  
とめると  
陽子が出てくる

# 1930年代の「素粒子」

電子

$e$

$-$

1897年

陽子

$p$

$+$

1911年

中性子

$n$

$0$

1932年

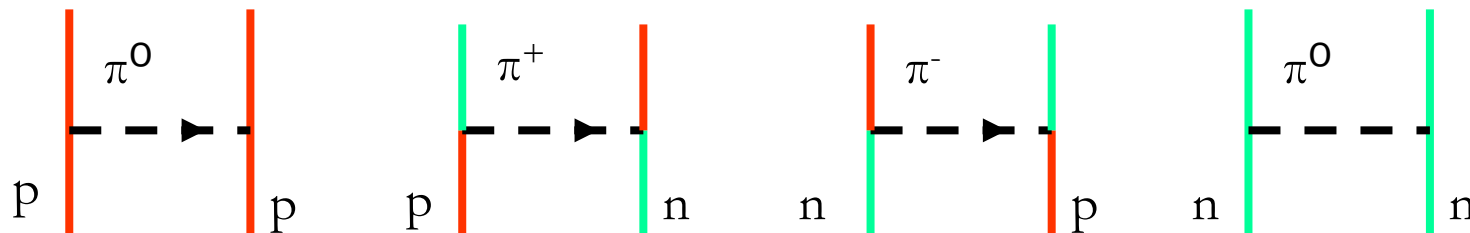
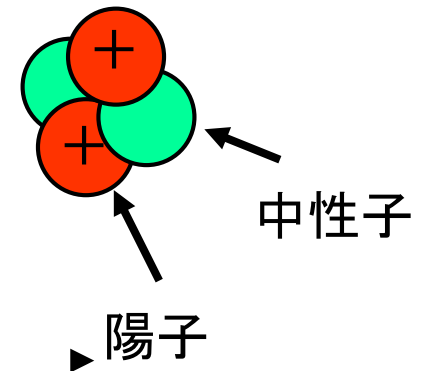
光子

$\gamma$

$0$

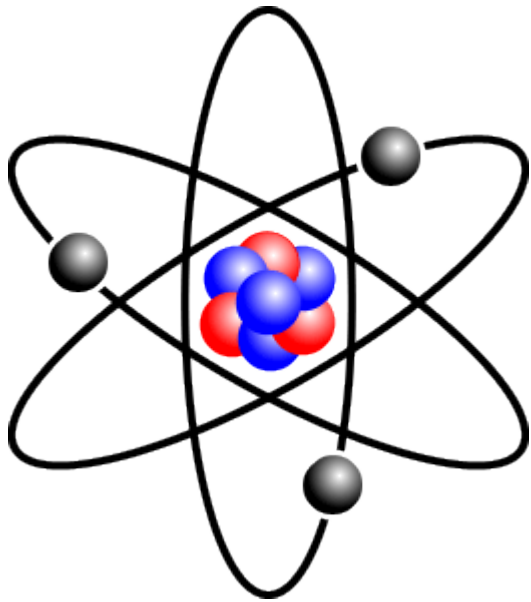
1905年

→ 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）

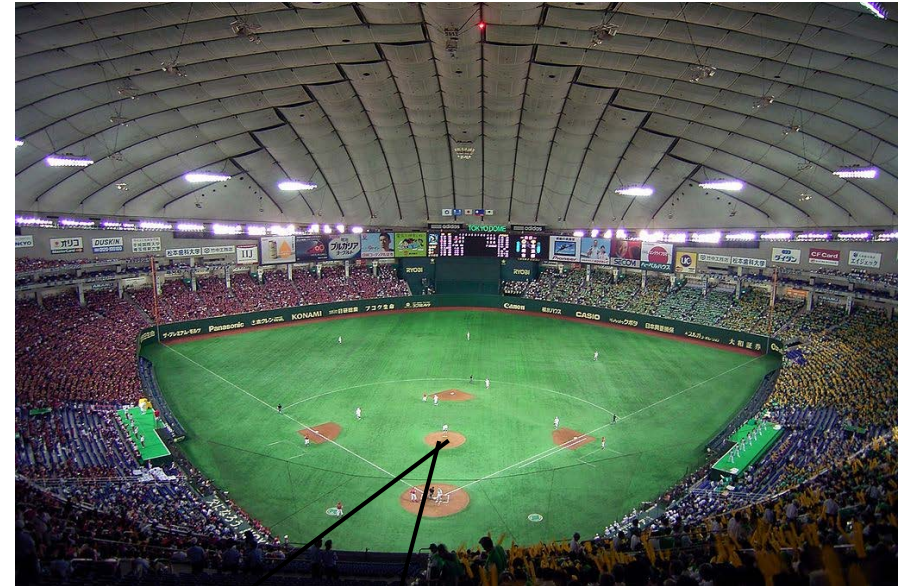


中間子

# よくこんな絵がよく教科書に



[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Stylised\\_Lithium\\_Atom.png](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](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Tokyo_Dome_2007-2.jpg)  
Image by DX Broadrec, from Wikimedia Commons  
CC BY-SA 3.0

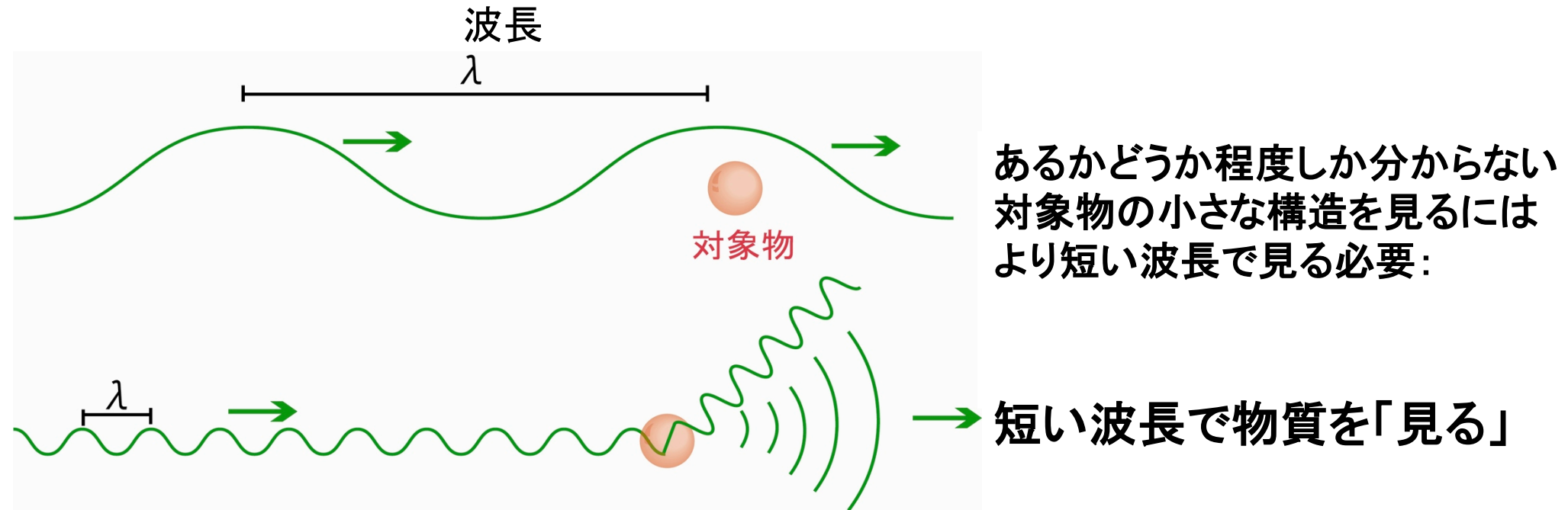


スカスカ。。  
何故つぶれない？

From wikipedia



# 小さなものをみるには、波長の短い光が不可欠



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

波の広がりの方だけ  
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

波である証拠 → 電子でも干渉

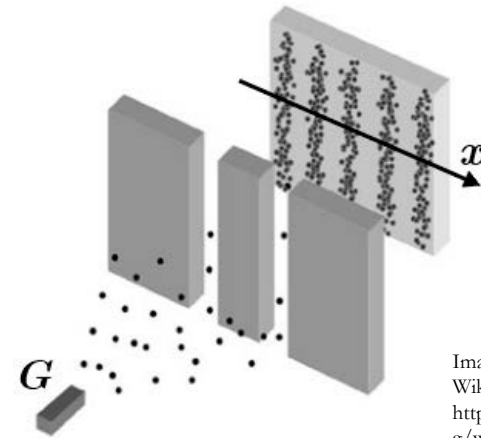
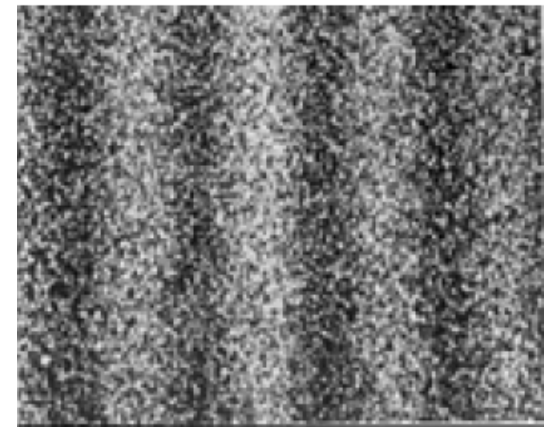


Image by Koantum, from  
Wikimedia Commons  
<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:2slits.png>  
CC BY-SA 3.0

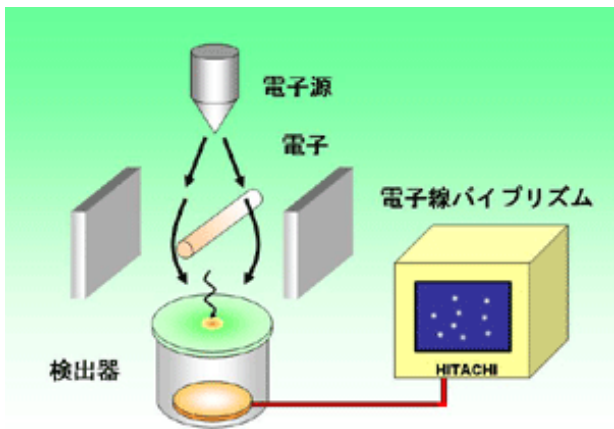


19

画像提供: 株式会社日立製作所中央研究所



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>



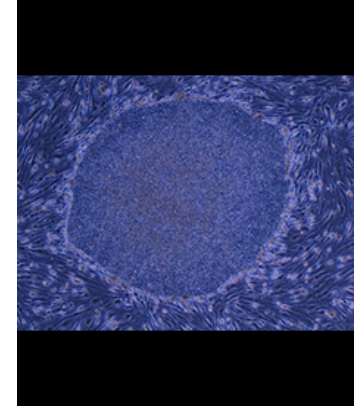
# 加速器は、 超高性能顕微鏡

倍率1000倍程度



Photo from Wikipedia

iPs細胞



©京都大学教授 山中伸弥

分解能

光学顕微鏡

光

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

電子顕微鏡

電子

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

LHC加速器

陽子

100万倍程度  $10^{-10}$  m

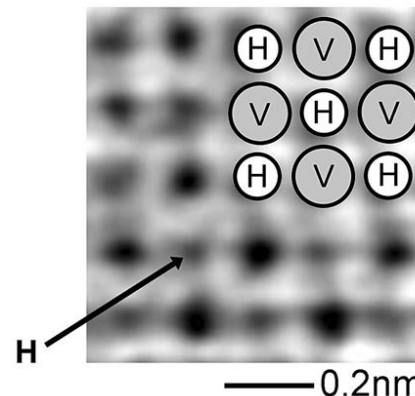
陽子の波長

$\sim 10^{-19}$  m (原子核 10万分1)

水素原子！！



画像提供: 株式会社日立ハイテクノロジーズ



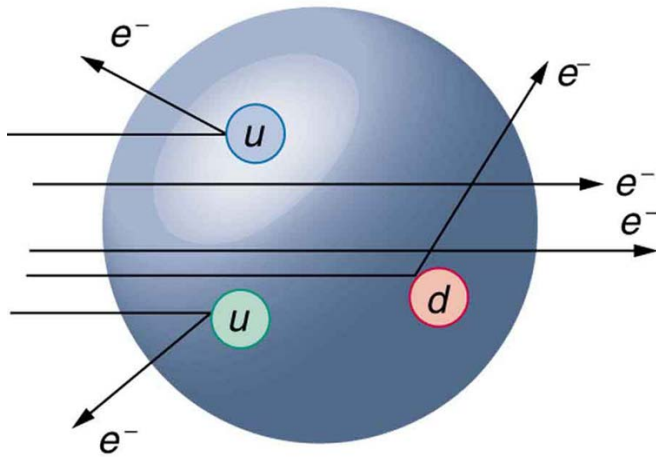
幾原雄一  
東大教授



"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

# クォークの発見

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

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)

実際、原子核のサイズ  
だと、中が見える。

$$1 \text{ fm} = 10^{-15} \text{ m}$$

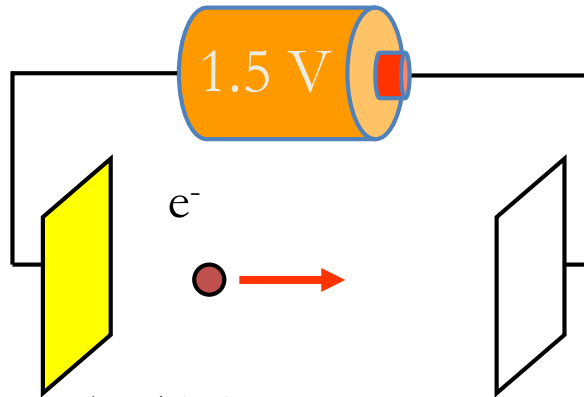
電子のエネルギー  $> 1 \text{ GeV}(10^9 \text{ eV})$

ほとんど、スカスカ。。。  
たまに、大きく散乱

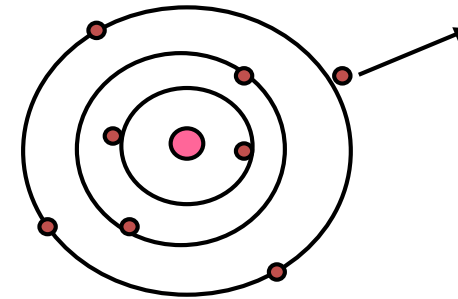
# エネルギーの単位 (1)

電子ボルト

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



キャ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](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  
って？

化学反応のエネルギー  
可視光のエネルギー、色

人間の目  
化学反応

$E=1 \text{ eV}$ くらい

600nm(赤)



リチウム

ナトリウム

カリウム

ルビジウム

セシウム

カルシウム

ストロンチウム

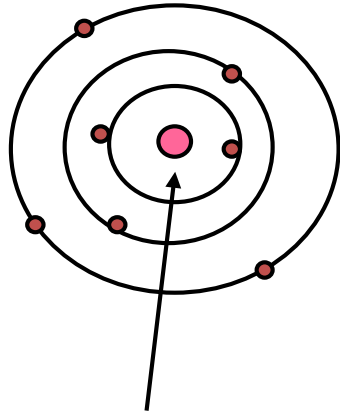
バリウム

銅

※ 下の青い炎は、バーナーの炎です。



# 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

錬金術: 化学反応のエネルギーで原子核変換をしようとした。

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

1 [GeV] =  $10^9$  [eV] (ギガ)

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

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

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

$E=Mc^2$  質量の単位もエネルギーの単位で測る。

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

# 物質の階層性

分子

原子

原子核

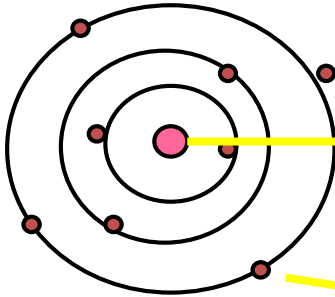
核子

素粒子

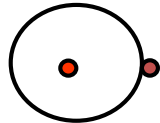
H<sub>2</sub>O  
水の分子



酸素原子

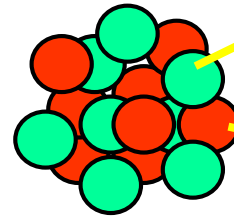


水素原子



$10^{-10}$  m

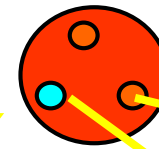
酸素原子核



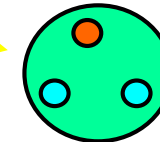
原子核の大きさ  
 $10^{-15}$  m

原子と比較すると  
10万分の1

陽子



中性子



$10^{-15}$  m

u-クォーク



d-クォーク



電子



大きさ？



# 物質の階層性

分子

原子

原子核

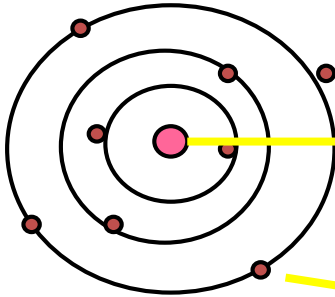
核子

素粒子

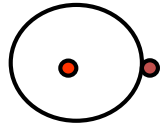
H<sub>2</sub>O  
水の分子



酸素原子

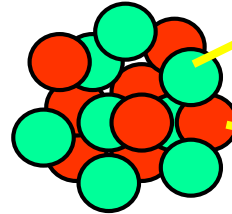


水素原子



$10^{-10}$  m

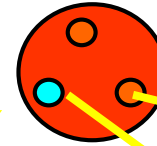
酸素原子核



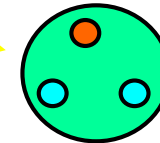
原子核の大きさ  
 $10^{-15}$  m

原子と比較すると  
10万分の1

陽子



中性子



$10^{-15}$  m

u-クォーク



d-クォーク



電子



$< 10^{-19}$  m

(大きさはない)

# 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

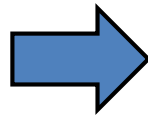
u-クォーク



d-クォーク



電子



サブクォーク  
レプトン・クォーク

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

本当に大きさが無いの？

最小の長さの単位

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

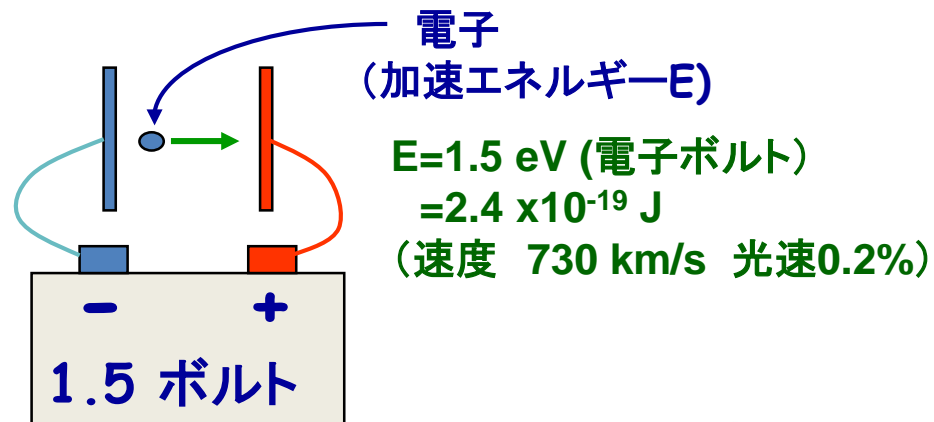
物質の広がり  $l = \hbar / mc$

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」

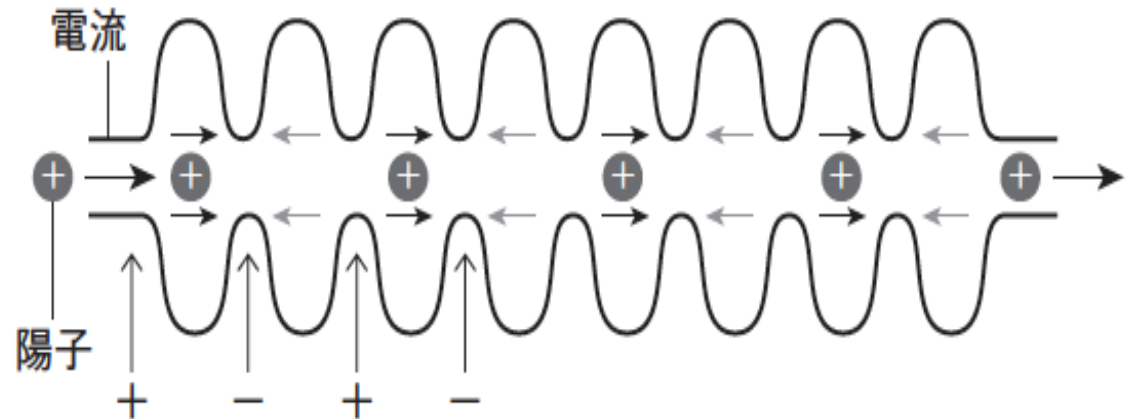
# 加速器



→ 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](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〉



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。

超伝導最新加速器





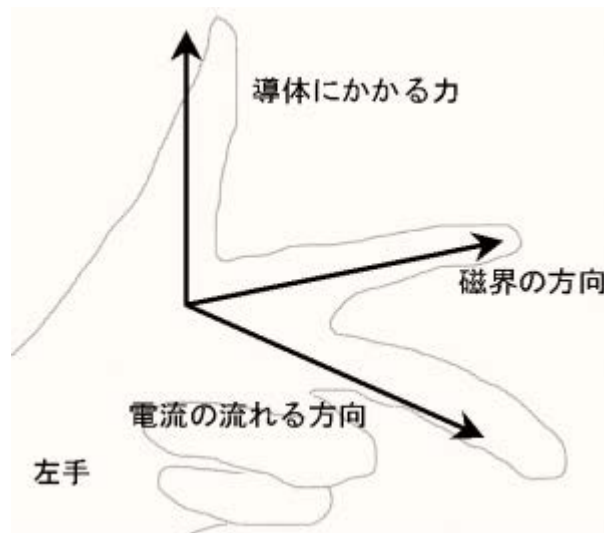
# 円形加速器なので曲げる

→ 運動量が大きくなると  
曲げるのが大変



©CERN

陽子は左に曲がっていき



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](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



よく見るとトンネルが曲がっている

曲がっていく

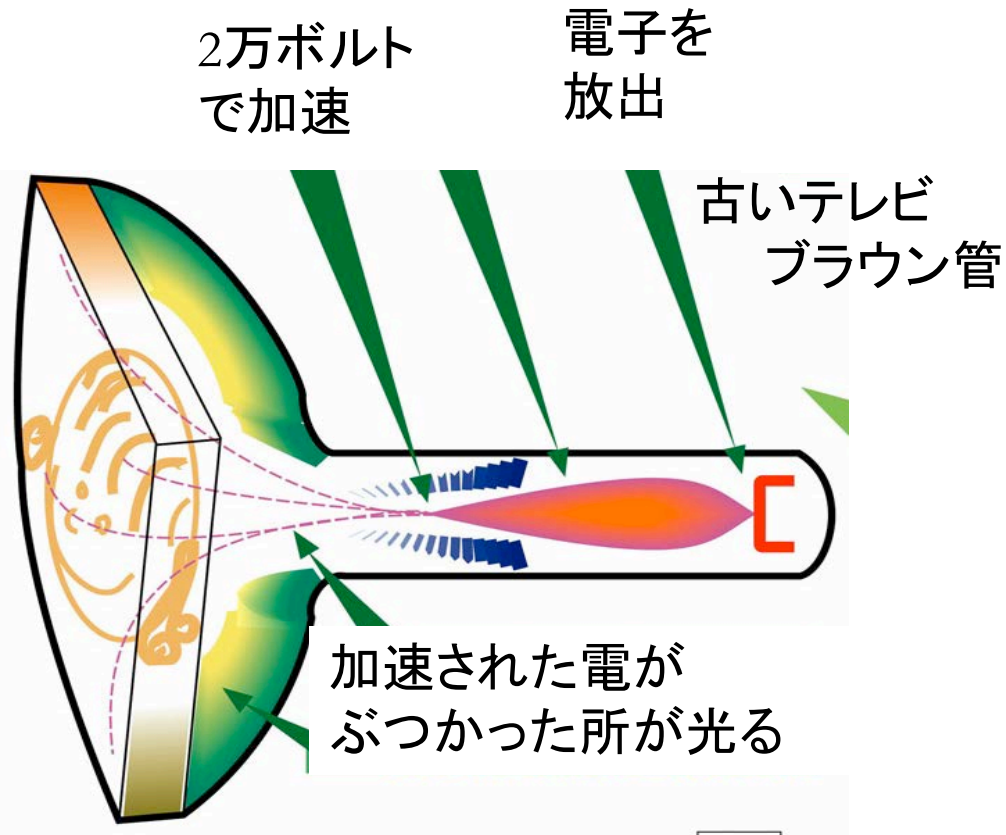
陽子

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



# 実は身近な加速器



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/c/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/14.pdf>  
2010年(初出:1996年) p5

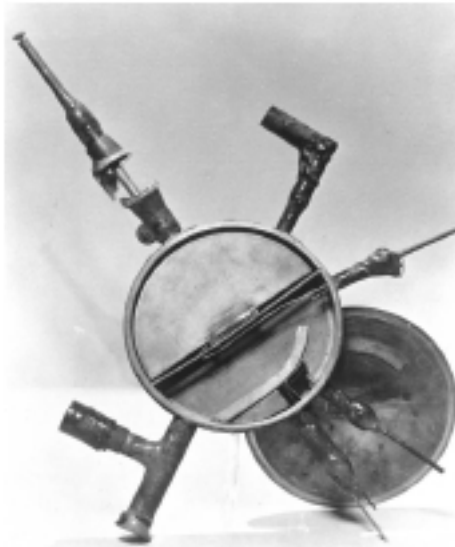
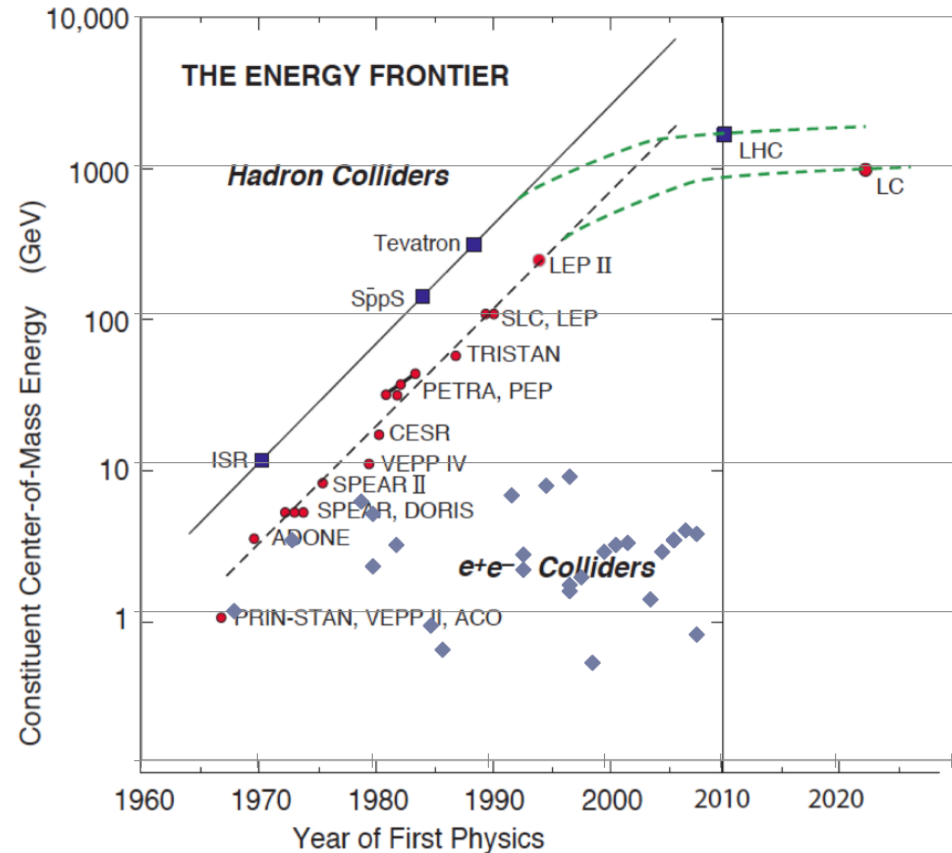
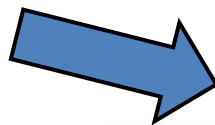


Photo courtesy of Berkeley lab

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=80keV



国家の威信をかけて基礎科学をすすめて

サイズで7万倍 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

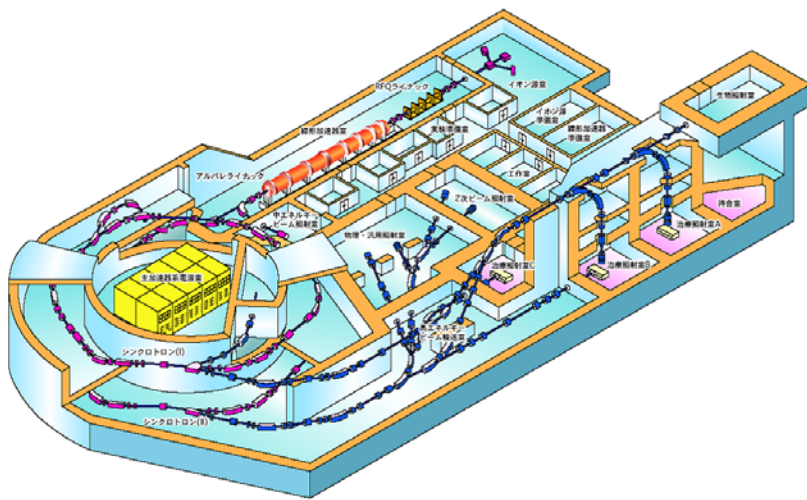
"Getting around the LHC  
Transport dans le LHC"  
(2005/10/24), CERN Document  
Server  
[http://cds.cern.ch/record/905939/  
?ln=en](http://cds.cern.ch/record/905939/?ln=en)  
CERN-AC-0510028-04

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



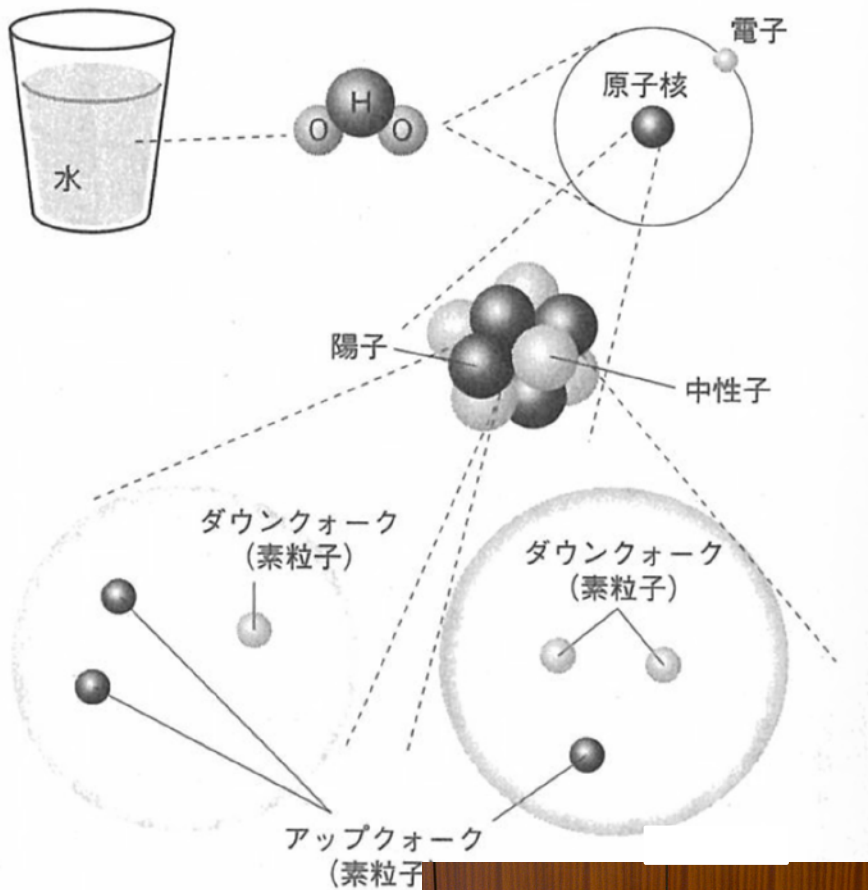
## 放射光施設

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	$s$ ストレンジ	$b$ ボトム
レプトン	$\nu_e$ 電子ニュートリノ	$\nu_\mu$ ミューニュートリノ	$\nu_\tau$ タウニュートリノ
	$e$ 電子	$\mu$ ミューオン	$\tau$ 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

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、、、

東大のお家



[https://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%B0%8F%E6%9F%B4%E6%98%8C%E4%B F%8A#/media/File:Masatoshi\\_Koshihara\\_2002.jpg](https://ja.wikipedia.org/wiki/%E5%B0%8F%E6%9F%B4%E6%98%8C%E4%B F%8A#/media/File:Masatoshi_Koshihara_2002.jpg)  
CC BY 4.0



Photo by Bengt Nyman ,from Wikipedia Commons  
[https://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%A2%B6%E7%94%B0%E9%9A%86%E7% AB%A0#/media/File:Takaaki\\_Kajita\\_5171-2015.jpg](https://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%A2%B6%E7%94%B0%E9%9A%86%E7% AB%A0#/media/File:Takaaki_Kajita_5171-2015.jpg)  
CC BY-SA 4.0



# 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

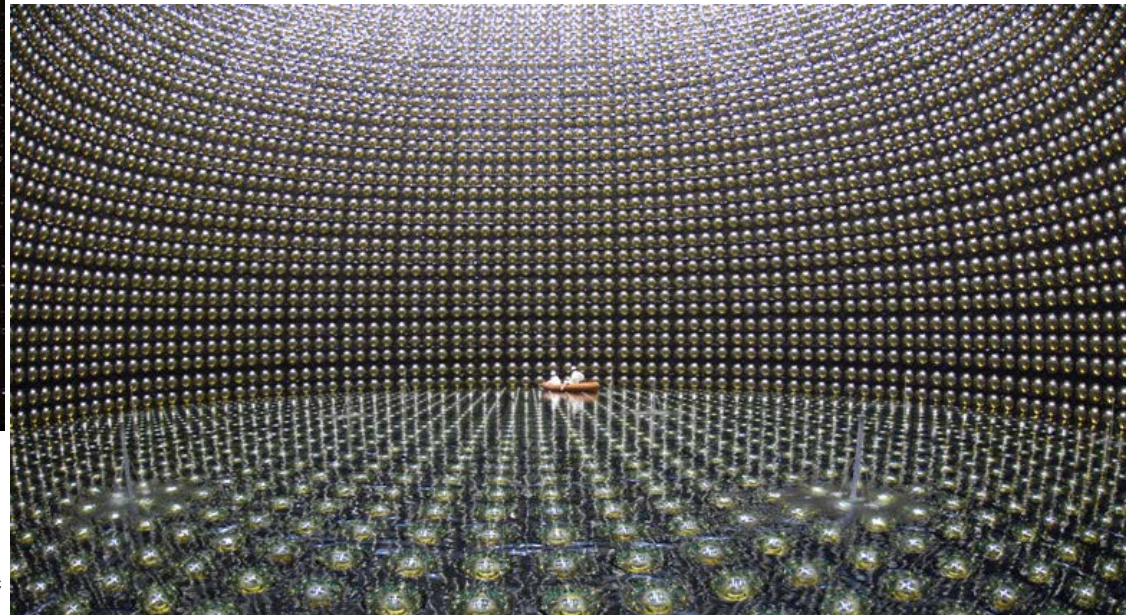
天の川 銀河のサイズ ～10万光年

←アンドロメダ銀河

(似たようなサイズで 近い 250万



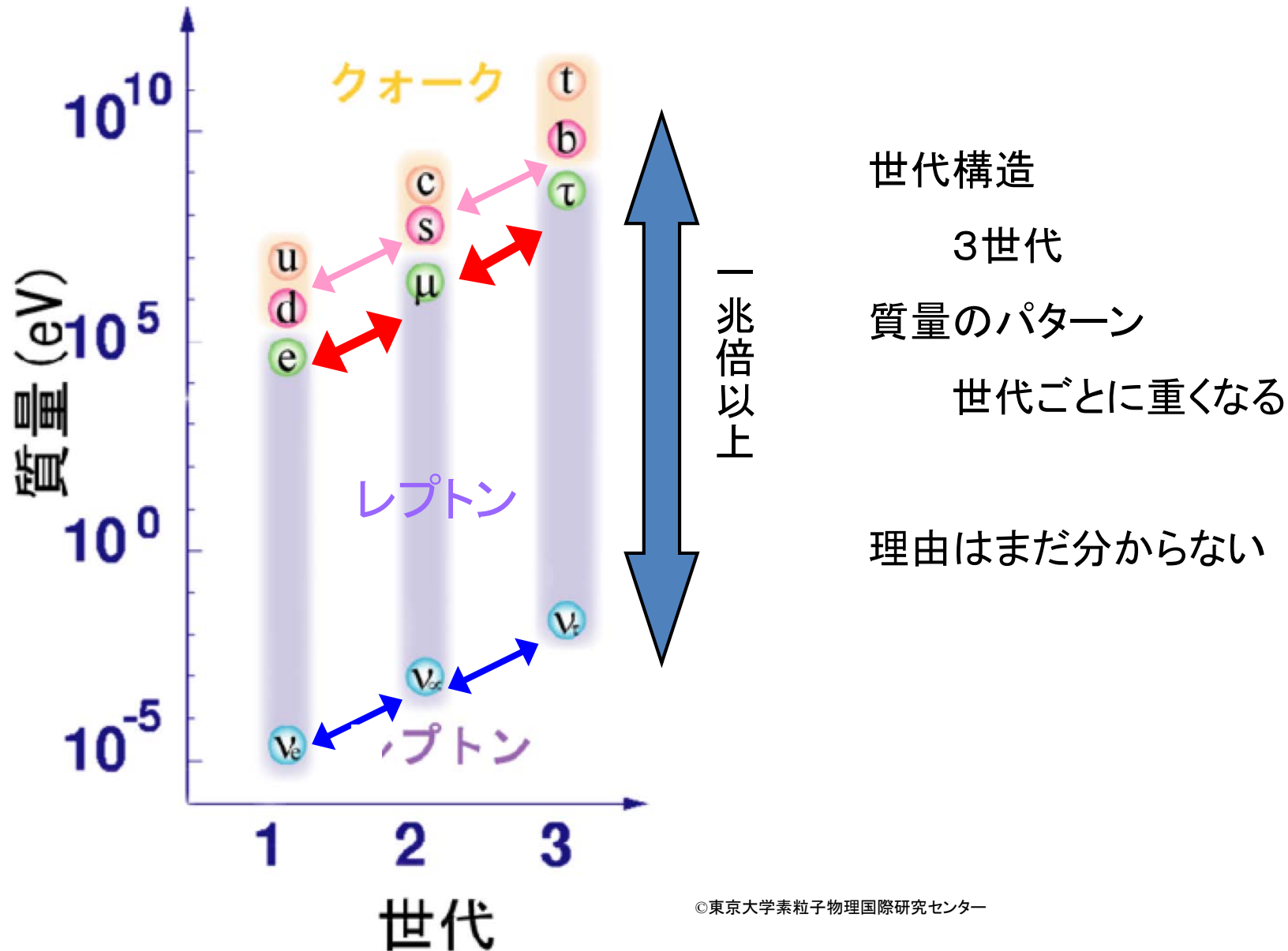
(asai作です)



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



# クォ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

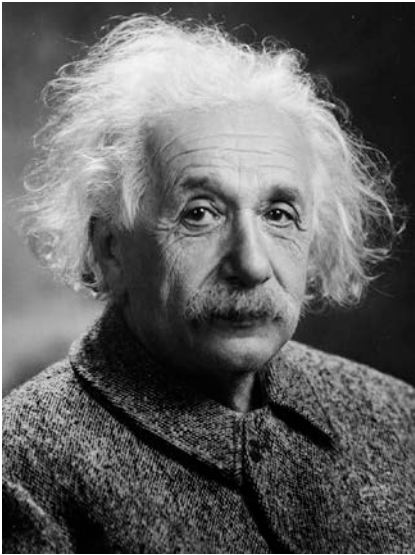
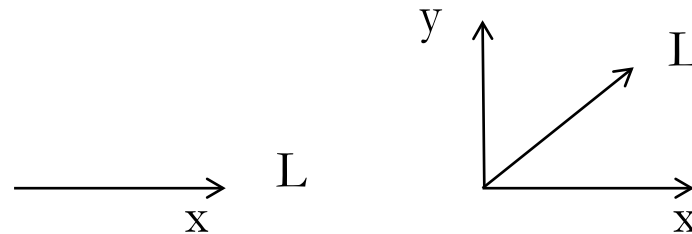


Photo from Wikipedia Commons

# 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**



回転

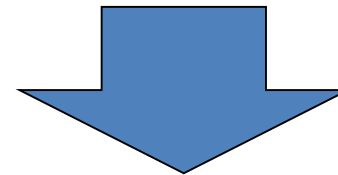
$$L = \sqrt{x^2 + y^2}$$

円や球

4次元的な長さ

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

座標軸を  
まわす



これを  
時間まで4次元に拡張

ただの回転

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

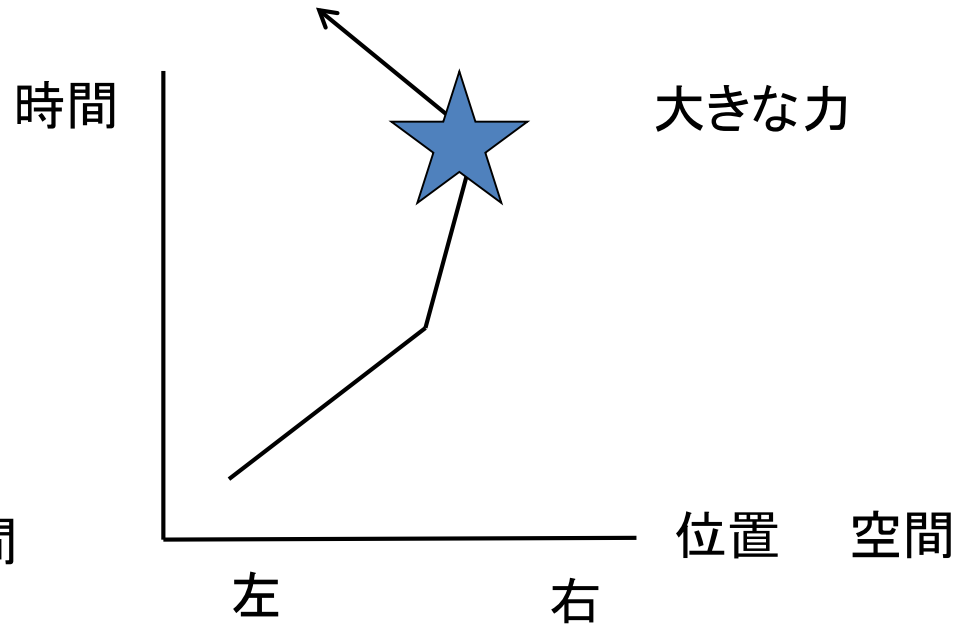
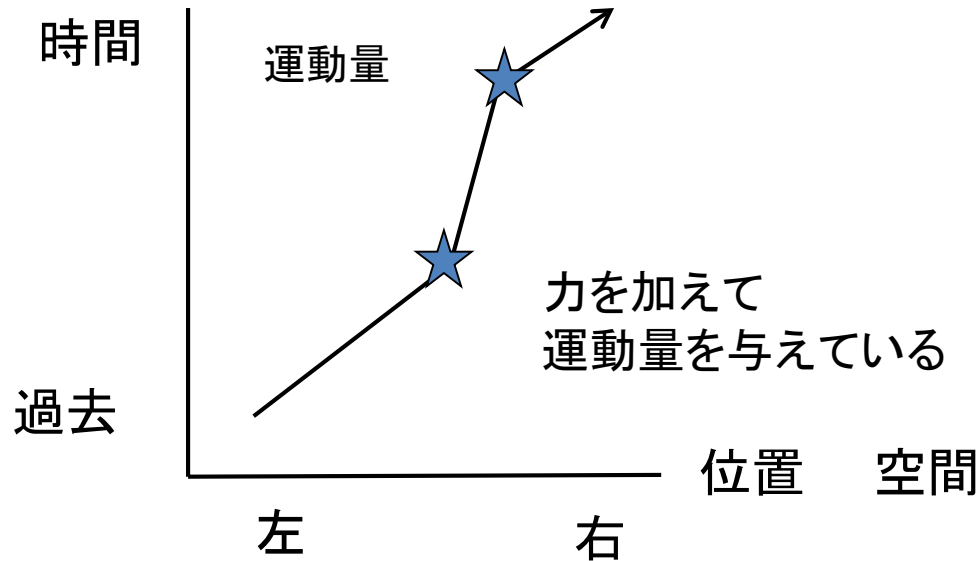
世界で最も有名な式

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

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

# 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

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

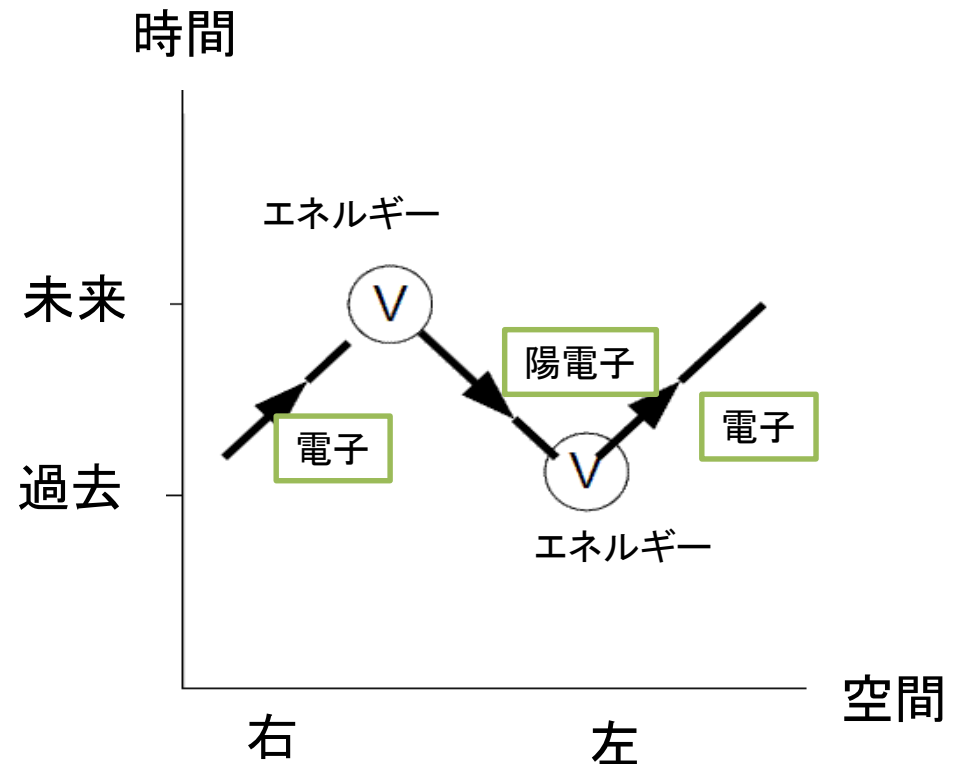
時間をさかのぼる  
粒子がいて当然  
= 反粒子

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

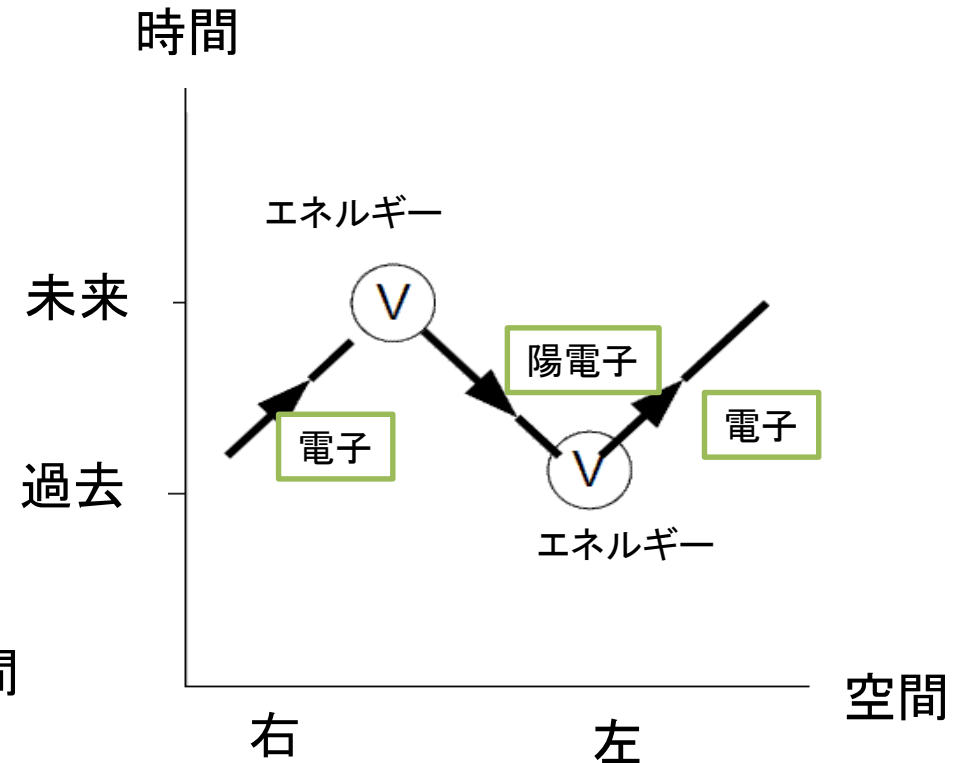
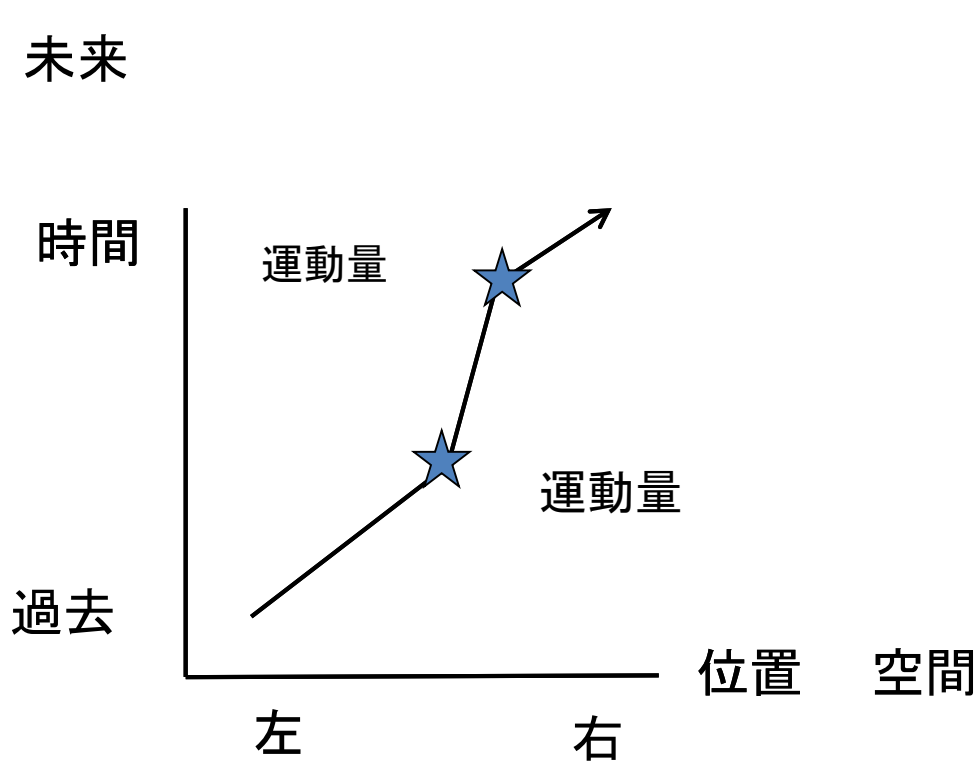
電子の反粒子 = 陽電子

粒子 + 反粒子 → エネルギー

エネルギー → 粒子 + 反粒子

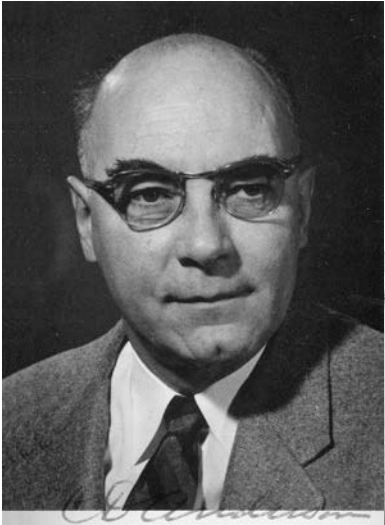


空間座標  $x, y, z \Leftrightarrow$  運動量  $P_x, P_y, P_z$   
 時間  $t \Leftrightarrow$  エネルギー  $E$



# 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)



1932 アンダーソン:  
陽電子発見

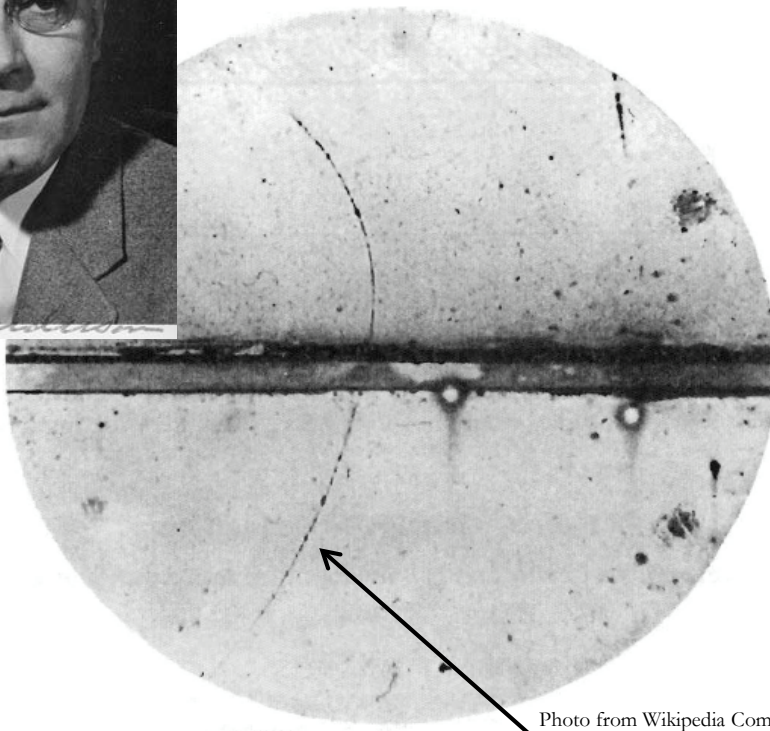
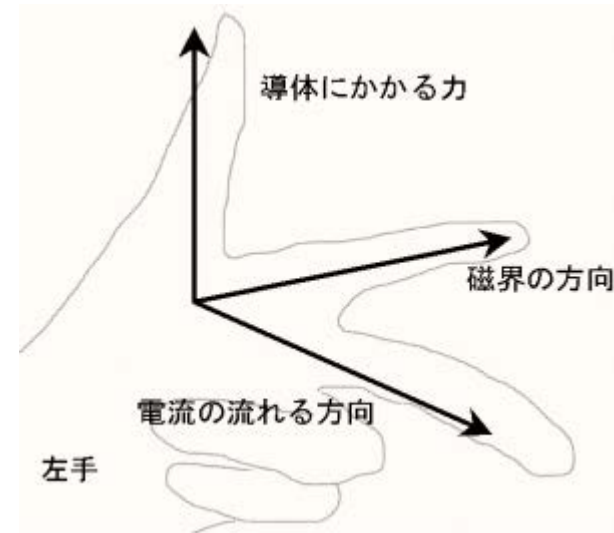


Photo from Wikipedia Commons

陽電子 下から上へ

磁石:紙面上から下

[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