

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。



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

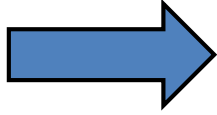
理学部

浅井祥仁

2

講義の目次(keyword)

2回目



- 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

流れは、こんな感じ(区切りは適当に)

- 1) 力と言うと
- 2) 自然界の4つの力
- 3) 力を伝える素粒子
- 4) 光を考える
- 5) 光が、どう粒子に作用する？
- 6) ゲージ原理
- 7) 力とは？
- 8) 16種類の素粒子が発見

- 9) 特殊相対性理論 重大な問題 「止まらない」
- 10) 質量とは
- 11) 真空中にエネルギーを与える

復習予定

- * 反物質
- * 長さの最小単位

力と言うと

接触力(押す力、摩擦力)

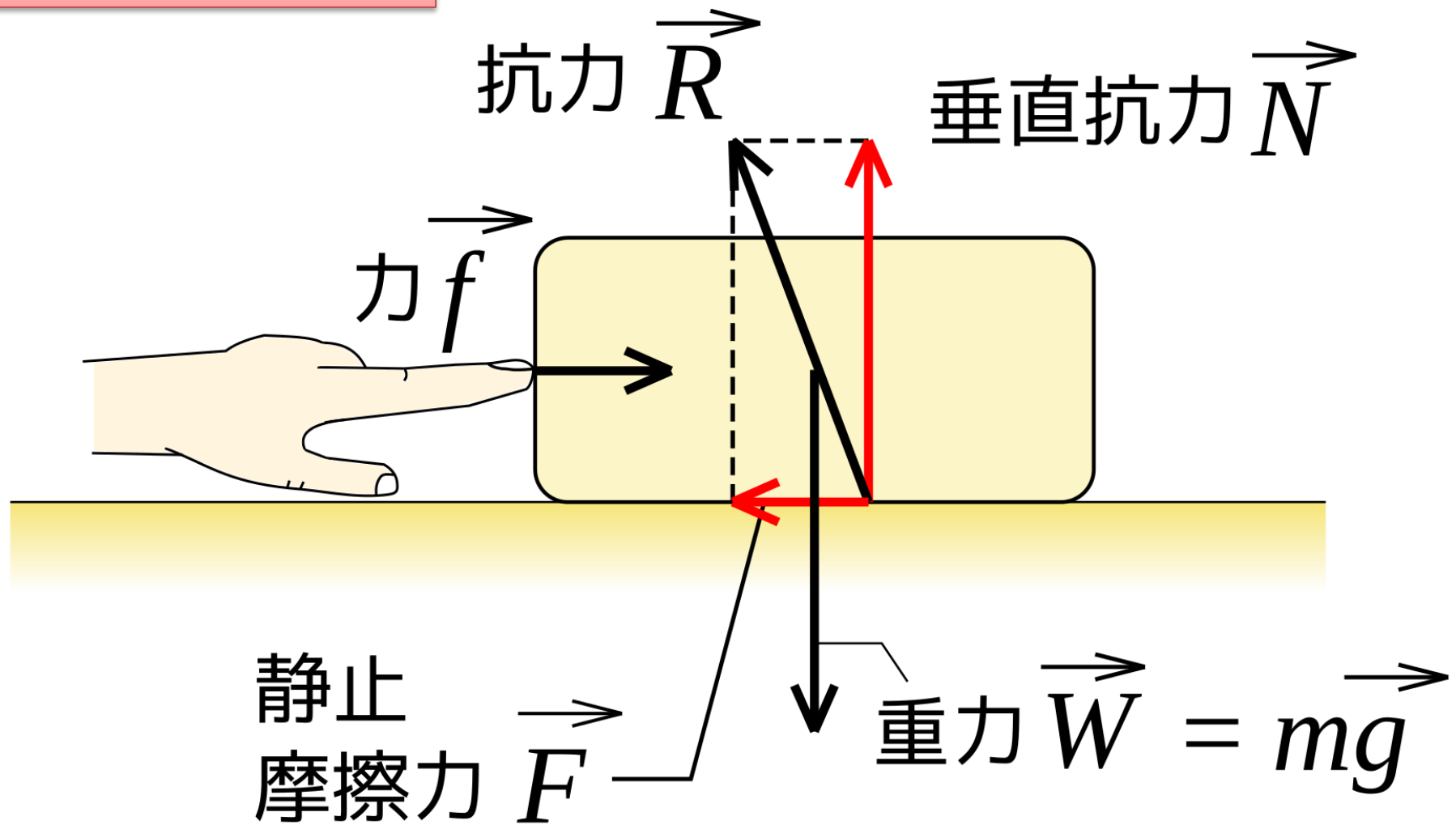
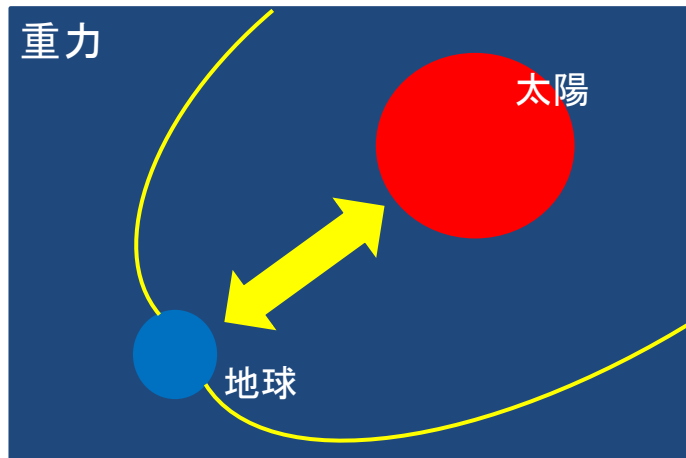


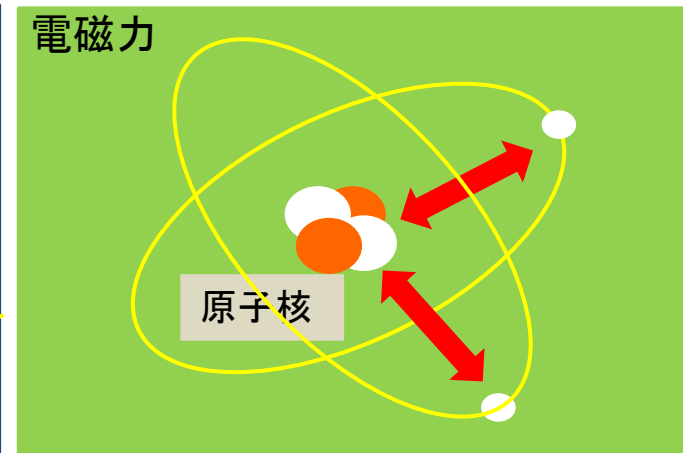
Image by すじにくシチュー From Wikimedia Commons ref. 20171115
<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:静止摩擦の初等力学.svg>
CC0 1.0

自然界の4つの力（遠隔力）

ニュートン



電磁力



マックスウエル

強い力

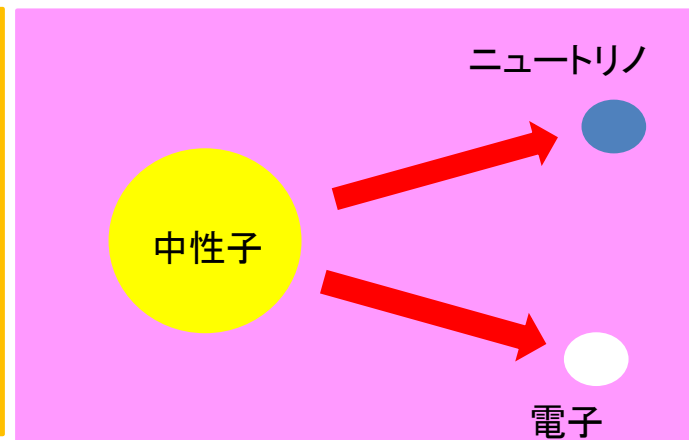


Photo from Wikipedia
Commons

原子核をまとめる力→ クォークをまとめる力 中性子が陽子と電子などにこわれる

いろいろな力が生活に結びついている

電磁気力:

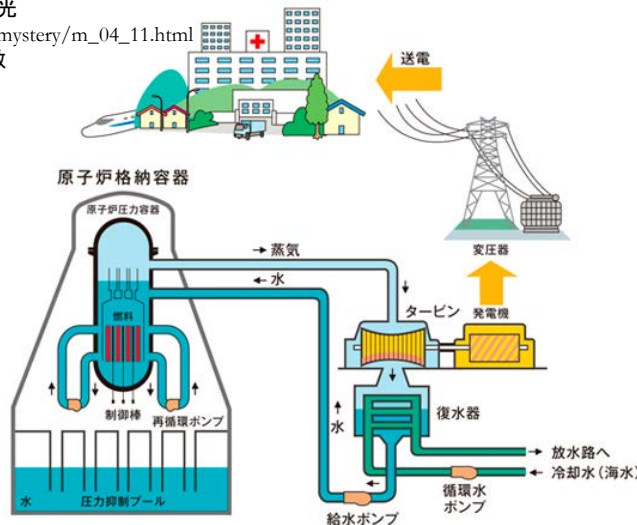


化学反応や火力発電
電気回路や電波

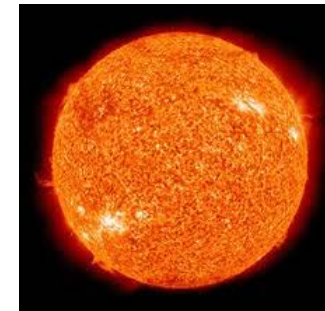
目の前の
現象を
物理で考える

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

強い力



一般財団法人日本原子力文化財団
原子力・エネルギー図面集2014



核融合と分裂
チェレンコフ光

Photo from Wikipedia Commons

太陽、原子力発電
地熱、温泉

重力 水力発電

Photo by Masa, from flickr
<https://www.flickr.com/photos/masairama/5046890000/in/photolist-8FYCyQ-8FYChs-9KmfBr-8FYBHG-8FYAys-9KmfBv-9KmfBk-8FVrRg-8FVrjv-5ip1nW-9KmfBt-5ijGCZ-5ip15C-8FVqWp-8FVrGi-D8KvE5-D8Ksco-GjVkwF-5AaUmv-cFtPa5-9ezwJf-cFtP2s-cFtPdC-cFtNXG-cFtP63-cFtNEo-cFtPgJ-c6zmc-cFtNzy-cFtNjN-cFtD4q-cFtCj9-6i41Fp-cFtNSQ-D8KsNy-cFtCBE-21gxT62-gVQLJb-cFtDaj-dJmHlj-6i8aij-psTLtK-c6yTA-5AflLS-5Aazen-5AaYFk-5AeQS1-5AaY8P-5Ab6ui-5AfoD1>
CC BY-NC-ND 2.0

弱い力

^{137}Cs

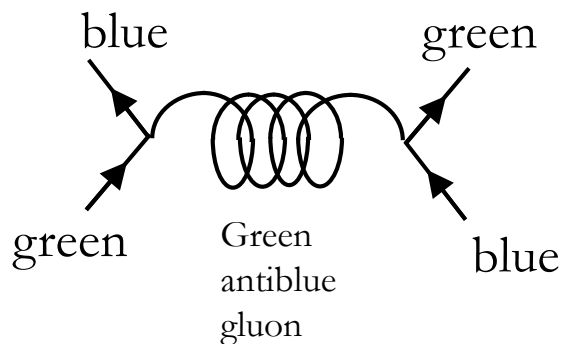
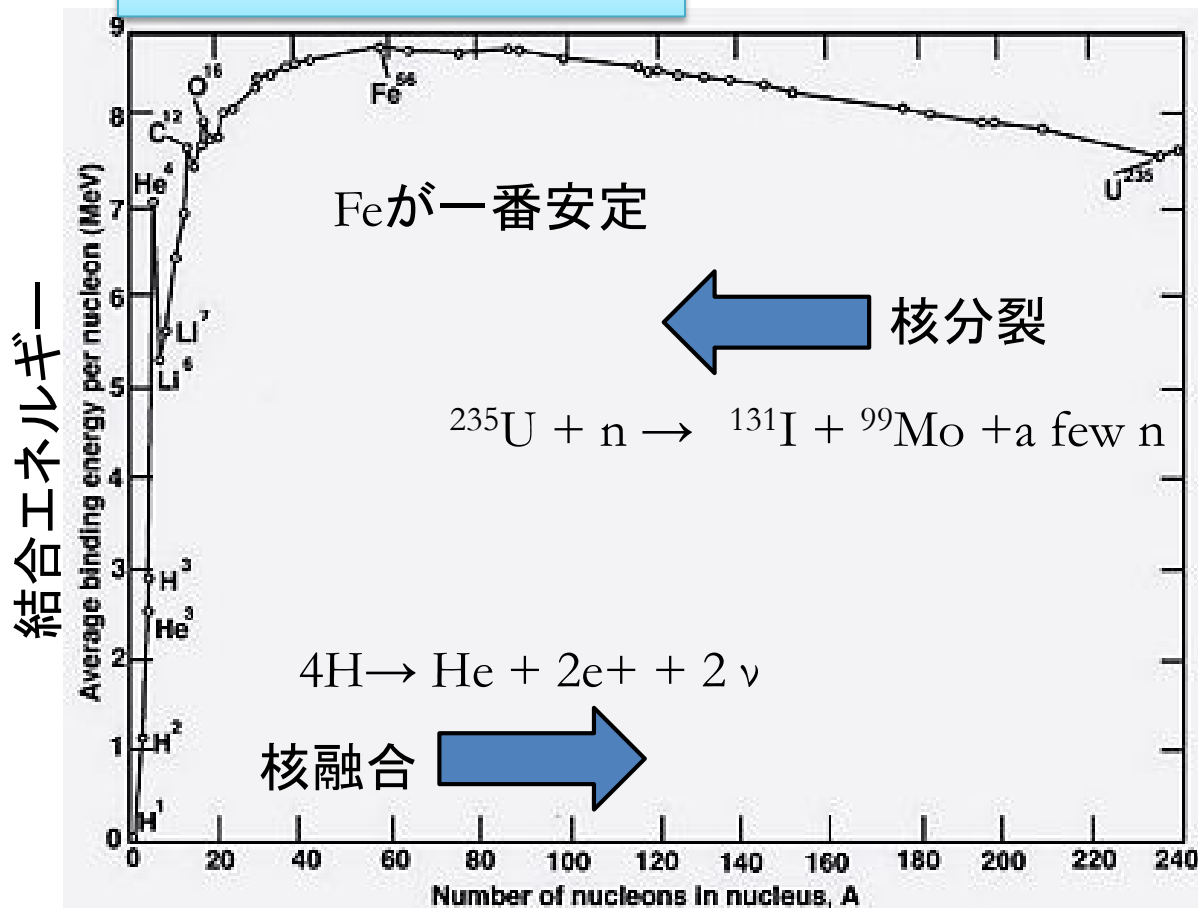


Photo by
ppukucho from
Wikimedia
Commons
CC BY 3.0
<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:KurobeDam.JPG>
ref. 20171115



NASA
https://www.nasa.gov/centers/goddard/images/content/96922main_ngc4261_hubble_m.jpg
ref. 20171115

強い力(核子のレベル)



弱い力(核子のレベル)

核子の中で

$$n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}$$

$$p \rightarrow n + e^+ + \nu$$



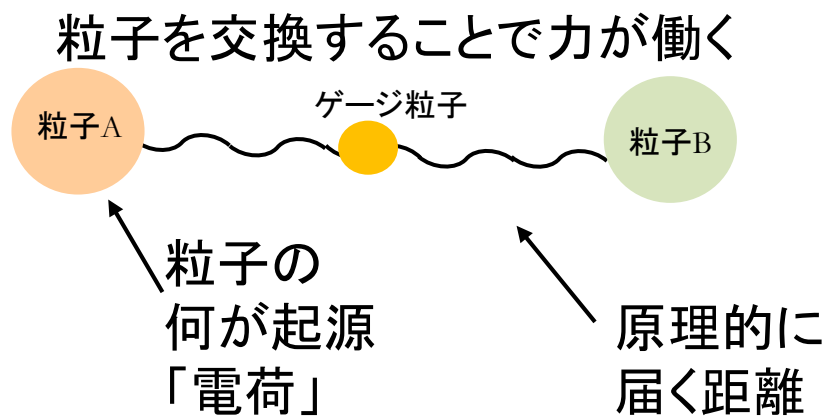
NASA

Imagine the Universe!

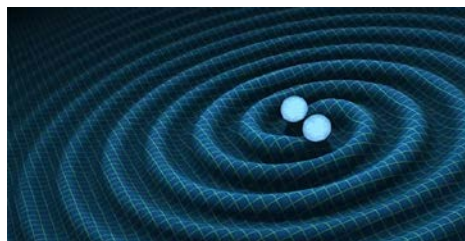
Figure 4: The average binding energy per nucleon as a function of number of nucleons in the atomic nucleus. Energy is released when nuclei with smaller binding energies combine or split to form nuclei with larger binding energies. This happens via fusion for elements below iron, and via fission for elements above iron. <https://imagine.gsfc.nasa.gov/educators/elements/imagine/05.html> ref. 20171115

Photo by Argonne National Laboratory from Wikimedia Commons
CC BY-SA 2.0
https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Advanced_Test_Reactor.jpg
ref. 20171115

力を伝える素粒子

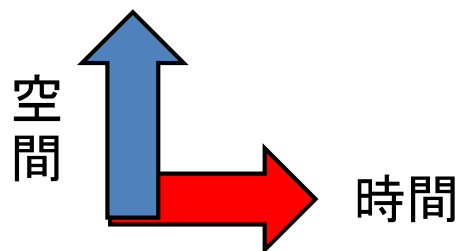
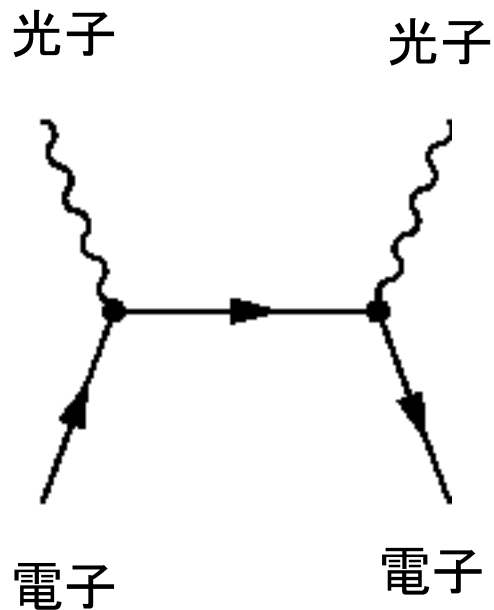


力	伝える素粒子	電荷	巨視的	届く距離	発見
電磁気	光子	電気の電荷	光	無限	1923 コンプトン
強い力	グルオン	色電荷		10^{-15} m	1979 DESY(東大も)
弱い力	W/Z粒子	弱い電荷		10^{-18} m	1983 CERN
重力	グラビトン	エネルギー・P	重力波	無限	まだ



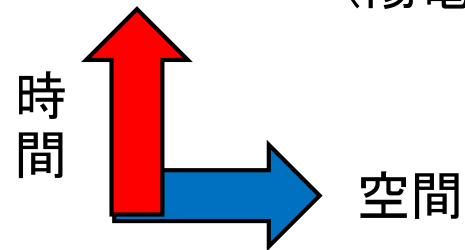
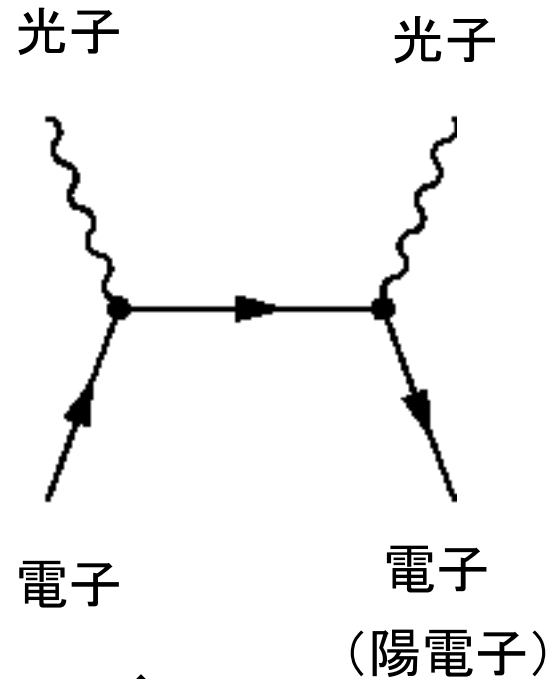
NASA ref.20171121
 Gravitational Waves Detected 100 Years After
 Einstein's Prediction
 An artist's impression of gravitational waves
 generated by binary neutron stars. Credits: R.
 Hurt/Caltech-JPL
<https://www.jpl.nasa.gov/news/news.php?feature=5137>

コンプトン散乱



時間と空間は
同じ

電子・陽電子消滅

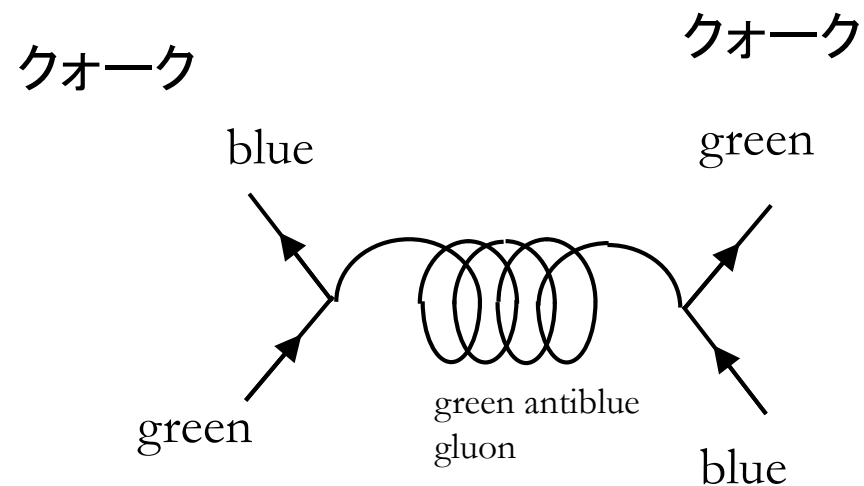


電子がきて
光子をだして
時間を逆方向
に進んだ。

時間逆方向に
進む電子??

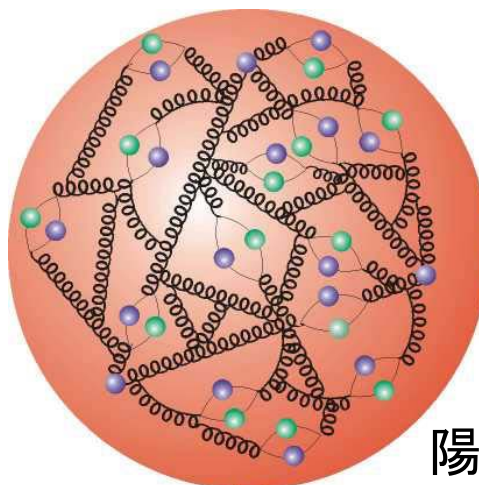
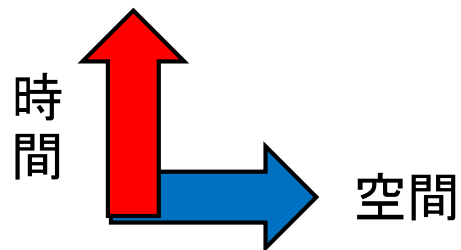
陽電子
と電子が衝突
消えて
光が二つ

クォークのレベル強い力



クォーク

クォーク



クォークレベルの弱い力

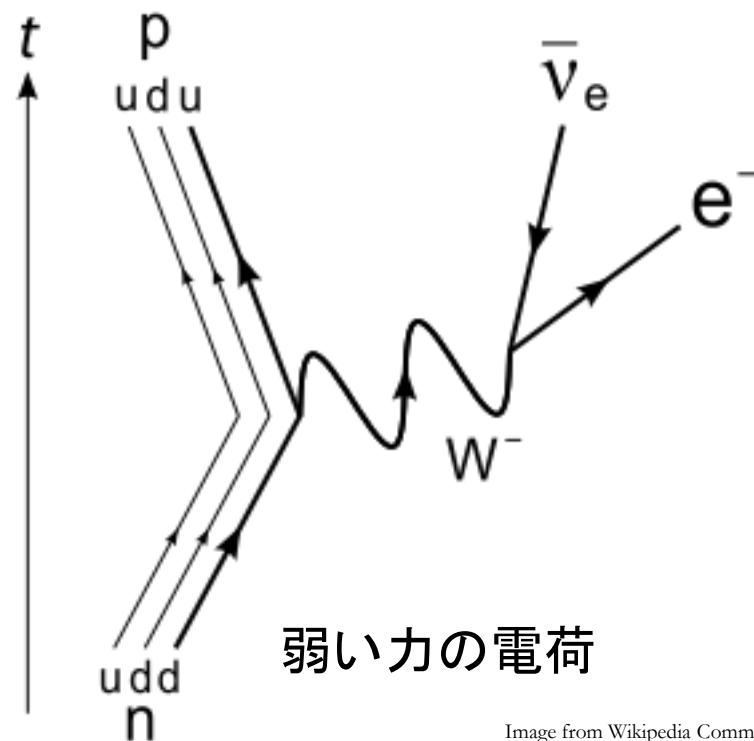


Image from Wikipedia Commons

Deutsches Elektronen-Synchrotron
DESY congratulates this Year's Nobel Laureates, David Gross, David Politzer and Frank Wilczek

Fig. 1

The inside of the proton when seen with the sharp eyes of HERA – a "dense soup" of quarks and gluons.

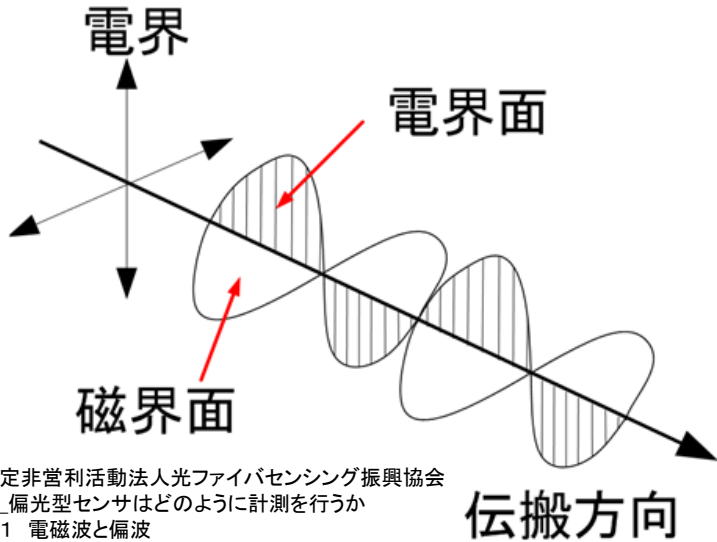
http://www.desy.de/news/news/archive_before_2010/2004/partphys_0710/index_eng.html

ref. 20171115

陽子の中

光(電波)を例に考える

横波 自由度2
(縦波成分はない「ゲージ条件」)
電場と磁場
波長
電波



特定非営利活動法人光ファイバセンシング振興協会
28_偏光型センサはどのように計測を行うか
図1 電磁波と偏波
<http://www.phosc.jp/cms/article/000048.html>
ref. 20171115

光速 3×10^8 m/sec

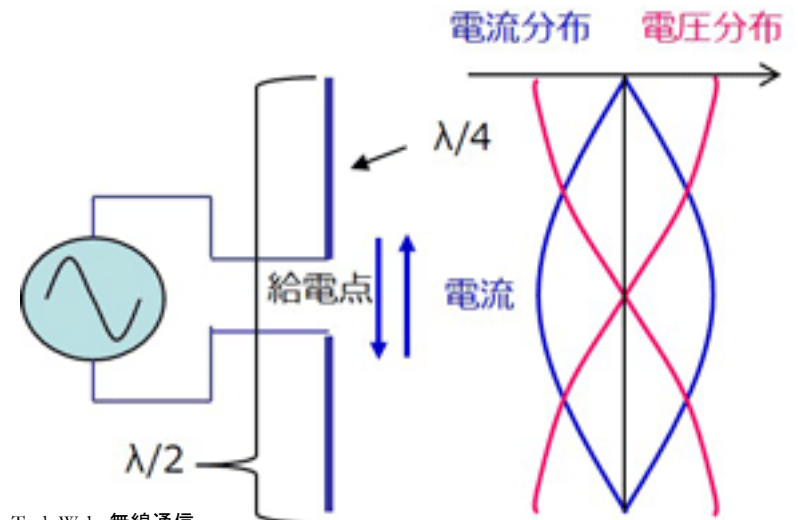
テレビ放送 UHF 500MHz ~ 波長 $\lambda = c/v = 60\text{cm}$

波長の半分



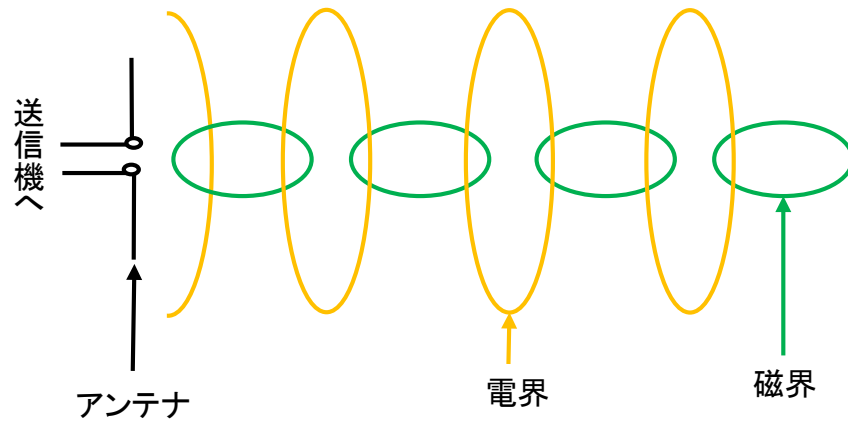
Photo by Tennen-Gas From
Wikimedia Commons
CC BY-SA 3.0
https://commons.wikimedia.org/wiki/File:UHF_TV_Antenna_001.JPG
ref. 20171115

半波長ダイポールアンテナ



Tech Web 無線通信
半波長ダイポールアンテナ
http://micro.rohm.com/jp/techweb_iot/knowledge/iot01/s-iot01/01-s-iot01/1932
ref. 20171115

何を媒介に伝わっている？ エーテルでなく、真空



電場 E
 磁場 H があつた時
 何も反応するものがなかったら
 (真空だからないんだけど)
 D や B が生まれない。

$$\text{rot} \vec{E} = - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

磁場の変化が
起電力 電界 E
ファラデーの
法則 レンツ

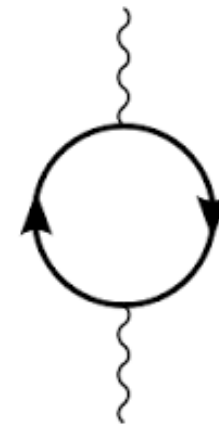
$$V = -N d\varphi / dt$$

$$\text{rot} \vec{H} = - \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$$

電流が流れることで
生まれる 磁場 H

アンペールの法則

$$2\pi r H = I$$



$e^+ e^-$ が
存在

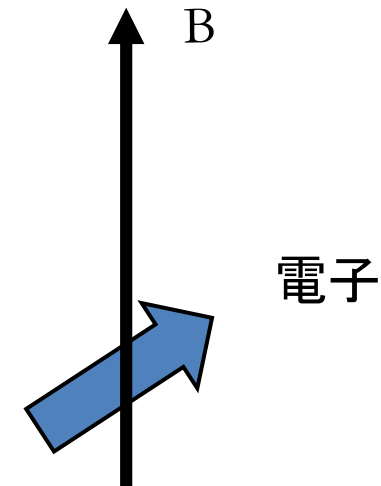
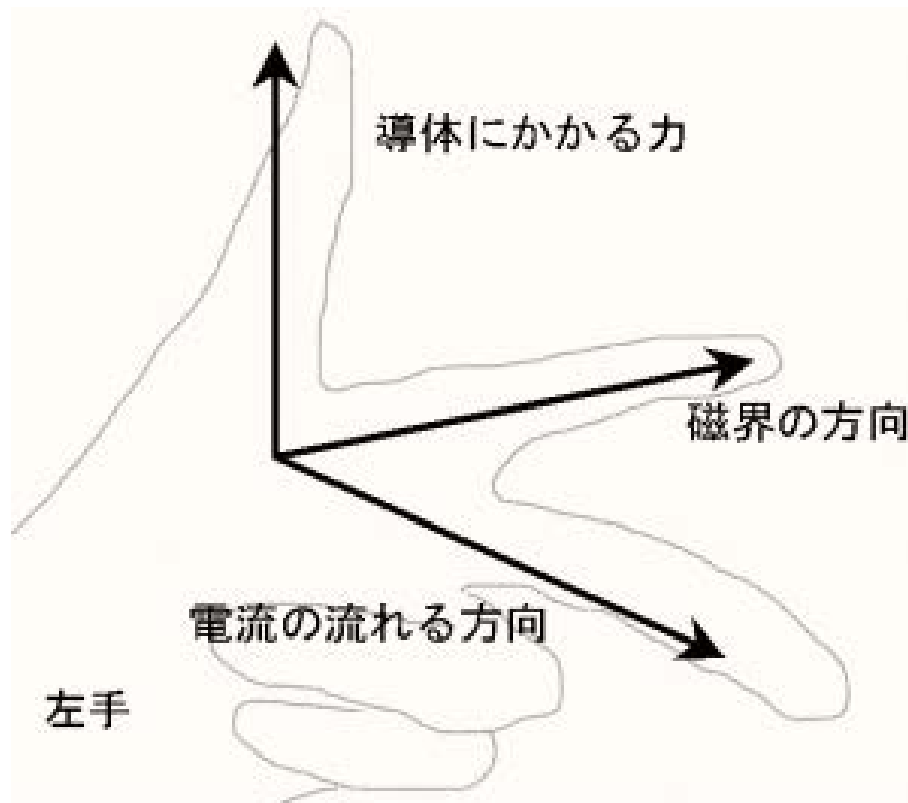
$$D = \epsilon E$$

$$B = \mu H$$

$$A = \pi r^2 C = 1 / \sqrt{\epsilon \mu} = \text{定数}$$

光が どう素粒子に作用する？

電場や磁場があるのだから、



止まっていたら？
(とまっている？)

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

アハラノフ・ボーム効果

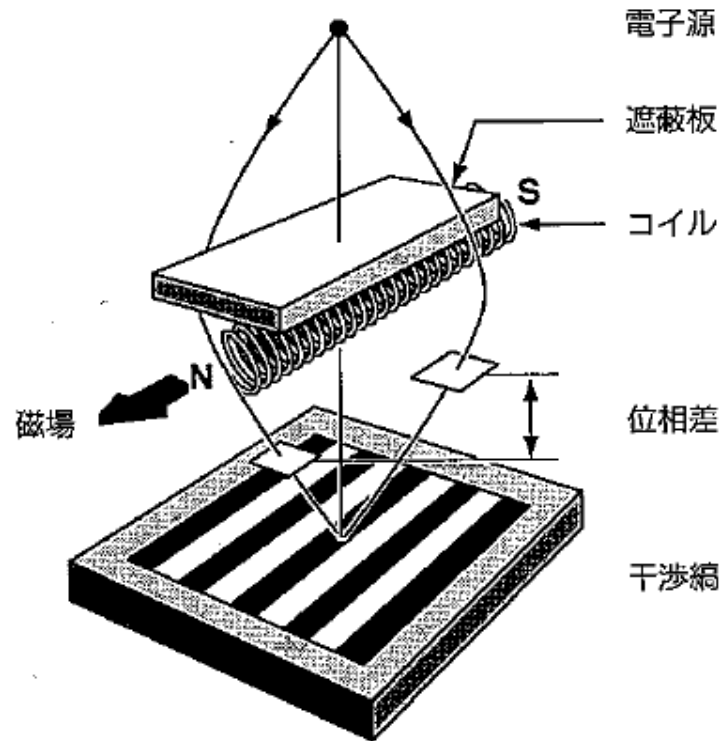


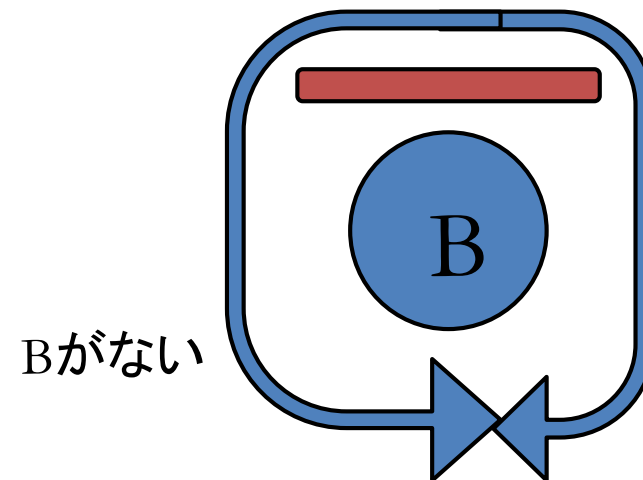
図33 アハラノフ・ボーム効果。

外村彰『ゲージ場を見る 電子波が拓くミクロの世界』(講談社、1997年)
P129図33アハラノフ・ボーム効果

無限に長いコイル

磁場がなくても
曲がる？！

横から見ると



「磁場や電場が本質でない！」

素粒子の波としての位相とその自由度

$$\Psi = u(p) \exp(-ix^\mu p_\mu)$$

$$\exp(-i\alpha) = \cos(\alpha) - i\sin(\alpha) \quad (\text{オイラーの公式}) \quad \alpha = kz - Et \quad (\text{位相が一定の面})$$

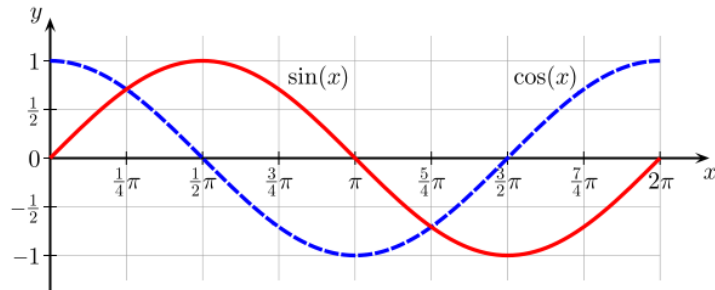


Image by Geek3 from Wikimedia Commons

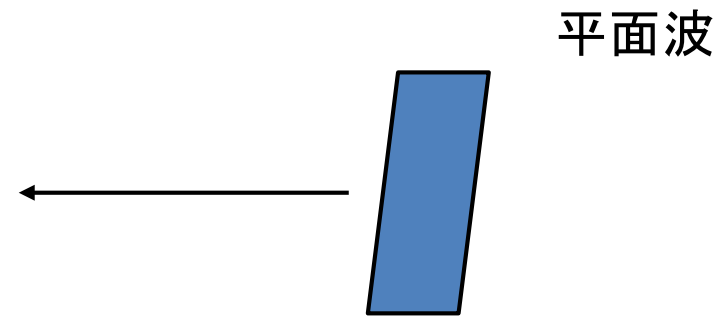
https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Sine_cosine_one_period.svg

CC BY 3.0

ref. 20171115

$$U(\theta) = \exp(-ie\theta)$$

位相の原点の自由度 勝手に足してもいい



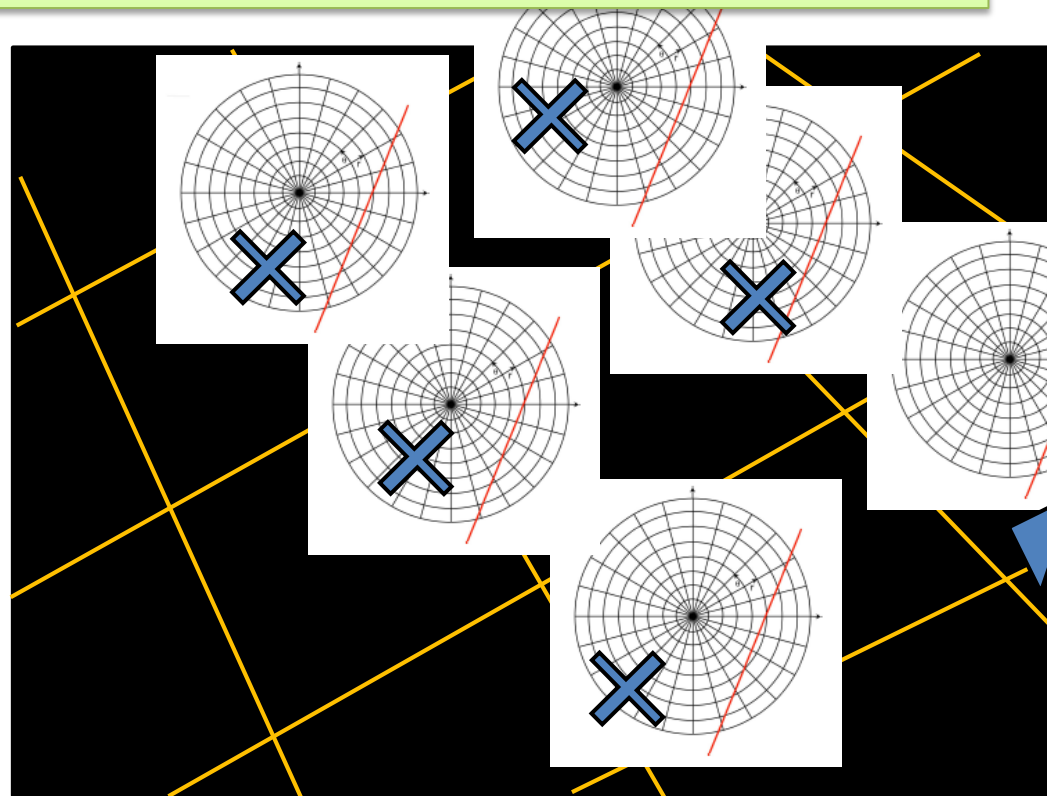
Ψ と $U\psi$ は実体は同じ。 量子力学 $|\psi|^2$

ψ と $U\psi \rightarrow$ 変わらない

幾何的なイメージでは？

波動関数 Ψ の表すもの

空間で粒子の居るそれぞれの点で
“別の座標”を考える



“別の座標”は、普通の空間とは「**全く**」関係ない素粒子の状態を表す「**内部空間**」

ψ って、この内部空間の点に対応している。
電子の状態などを表している。



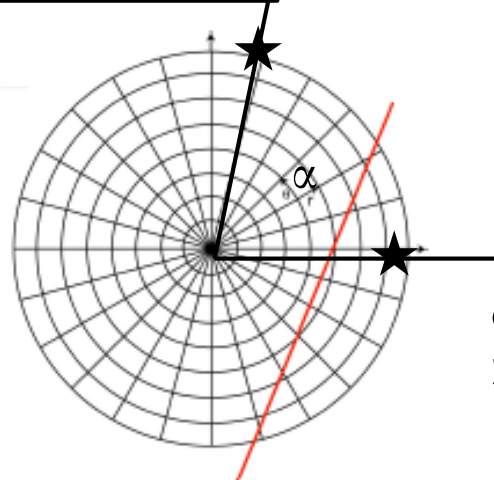
空間の各点

波動関数 ψ は 複素数

$e^{i\alpha}\psi$ しても

$|\psi|^2$ には影響しない

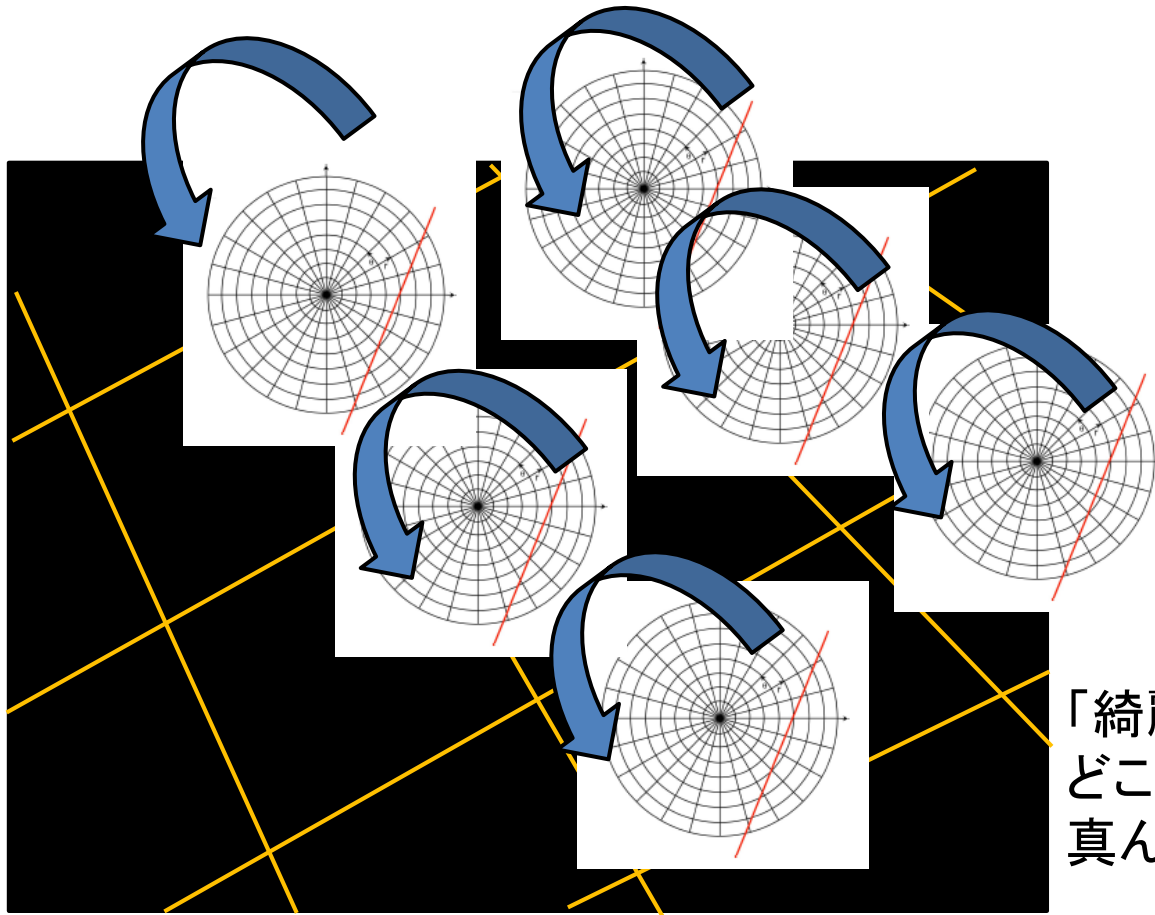
$$e^{i\alpha} = \cos\alpha + i \sin\alpha$$



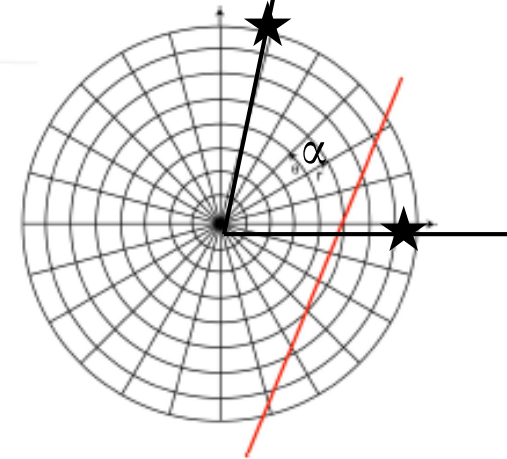
位相の自由度

$e^{i\alpha}$ は α の回転したことになる

大局的回転（宇宙全体）



宇宙全体で 内部座標を
一様に α だけ回してみる



「綺麗な同心円になっている」
どこでも同じ同心円
真ん中に 電荷が ある。

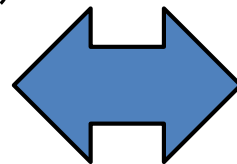


Photo from Wikipedia
Commons

ネーター(Noether)の定理

連続的な対称性がある場合、
保存量が存在する

保存する量(電気の電荷ばかりでなく)
があれば、それに対応して、自由に
回転していい!!!



局所的回転

ちょっと
待った！

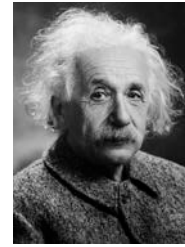


Photo from Wikipedia Commons

宇宙全体で一様に回す
相対論的精神に反する。
絶対的な基準はない

でも、勝手にまわすと、
直線がずれてしまう。

このズレを「**帳尻あわせ**」する。
(数学のことば「接続」)

$x \rightarrow x+dx$ へ少し移動した時、
まっすぐ進んだつもりでも

$$\psi(x+dx) \rightarrow \psi(x) - ieA_\mu dx^\mu \psi(x)$$

曲がっているのは、普通の4次元で
なく、**素粒子の内部空間**。その曲がり
具合をあらわしているのが A_μ

ずれができる。ずれを $ieA_\mu dx^\mu \psi$

ゲージ原理

幾何的なイメージから数式へ

位相の θ が宇宙で一定でなく、空間の各点の関数

量子化(波→粒子)

$$j_\mu = \partial_\mu \Psi(x) = \exp(-ie\theta) [\partial_\mu - ie\partial_\mu \theta] \Psi(x)$$

おつりがでてる

$$\partial_\mu \rightarrow D_\mu = \partial_\mu - ieA_\mu$$

$$A_\mu \rightarrow A_\mu - \partial_\mu \theta$$

$$P_\mu \rightarrow P_\mu + e A_\mu$$

光子

なんか変な A が必要となり

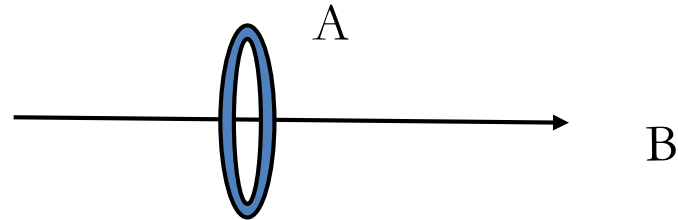
A は 運動する粒としての電子と 同じように振る舞う
おまけに、 A は ずれた位相だけ調整している

力とは、(位相の)「帳尻合わせ」

A_μって何？ ベクトルポテンシャル

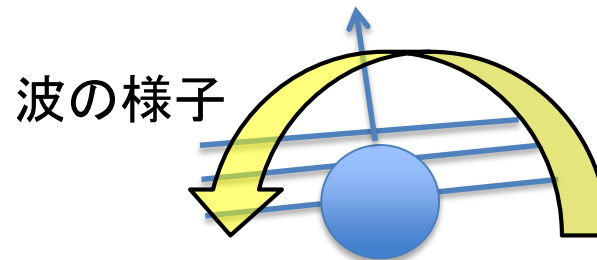
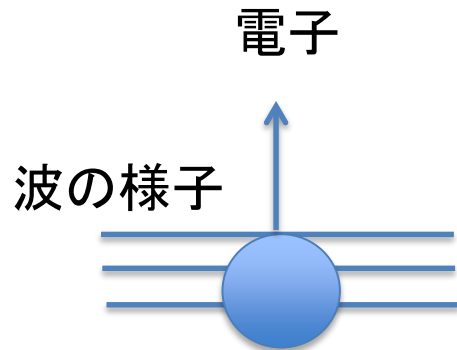
$$\mathbf{E} = -\nabla\phi - \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t}$$

$$\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A}$$



<http://www.icepp.s.u-tokyo.ac.jp/~asai/Lecture/kisohouteishiki3.pdf> (後ろに抜粋)
又は 電磁気学の授業 でならう「補助場」

A:ベクトルポテンシャル
これが光の実態



B:こっち向き

進める

アハラノフ・ボーム効果(もう一度)

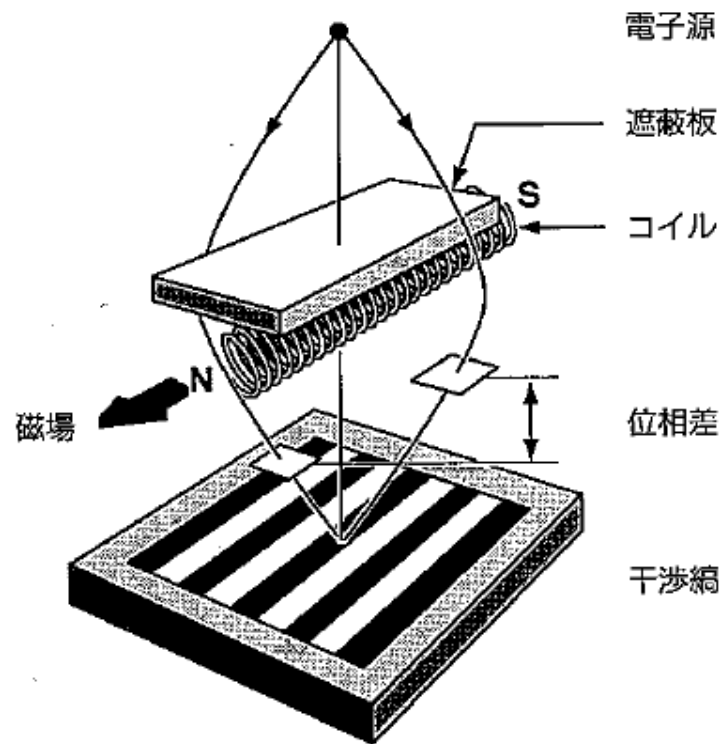
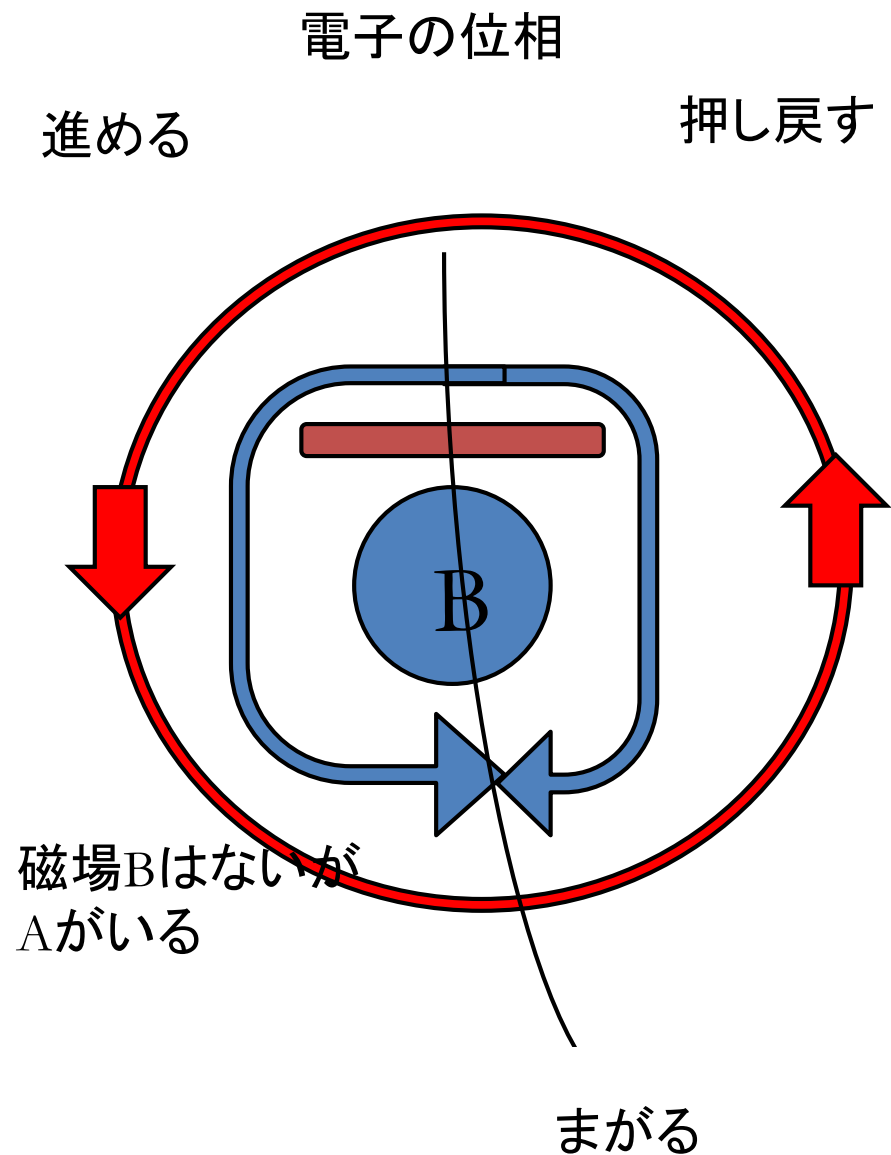


図33 アハラノフ・ボーム効果。

外村彰『ゲージ場を見る 電子波が拓くミクロの世界』(講談社、1997年)
P129図33アハラノフ・ボーム効果



力 = ゲージ原理

力の種類 保存する電荷の違い

伝搬する距離 基本 ∞

力	伝える素粒子	電荷	どこ空間	距離
電磁気	光子	電気の電荷	内部空間の曲がりを A_μ で	∞
強い力	グルオン	色電荷	内部空間の曲がりを $g_\mu(\lambda=1-8)$ で	閉じこめ
弱い力	W/Z粒子	弱い電荷	内部空間の曲がりを $W_\mu(+0)$ で	質量
重力	グラビトン	エネルギー・P	実空間の曲がりを $\Gamma^\lambda_{\mu\nu}$	∞

重力だけ:この世界の曲がりに関係 + 保存量がvector + 無茶苦茶弱い

重力もゲージ原理だ！！

空間の各点でまっすぐ
すすんでいるけど、地球がまがってる
分、平らな座標で見ると曲がっている。
でも、地球の極座標上では
直線（最短距離）

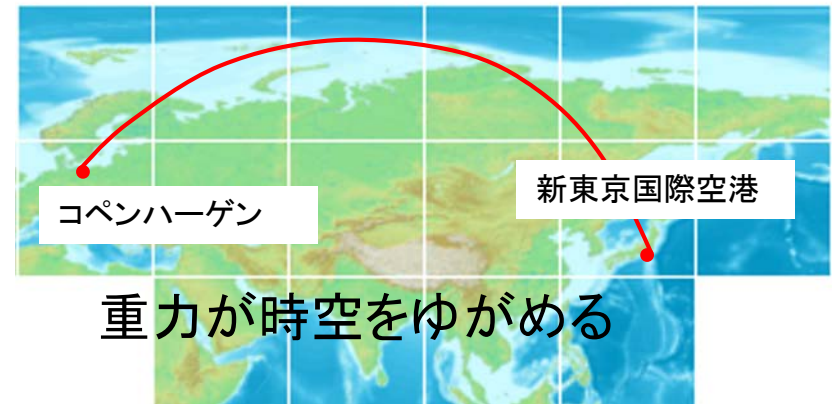


Image from Wikipedia Commons ref.20171121
<https://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%A6%E3%83%BC%E3%83%A9%E3%82%B7%E3%82%A2>
CC BY-SA 3.0

光はまっすぐ進む

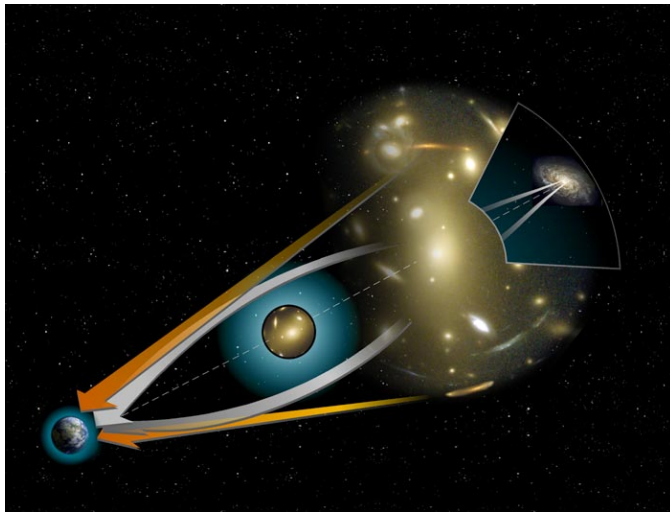


Image from Wikipedia Commons

光は、いつでも、まっすぐ進んでいる。時空が歪んでいるときは、まっすぐ進んでいる
(平行移動)けど $p^\lambda(x+dx) \rightarrow p^\lambda(x) - \Gamma^\lambda_{\mu\nu} dx^\mu P_\nu$ ($\Gamma^\lambda_{\mu\nu} dx^\mu P_\nu$) だけずれる。
それが曲がった様に見える。平行移動の補正分(接続) $\Gamma^\lambda_{\mu\nu}$ が 重力

重力は無茶苦茶弱い

4つの力のうち、重力が弱すぎる。他の力と比較して 10^{-40}

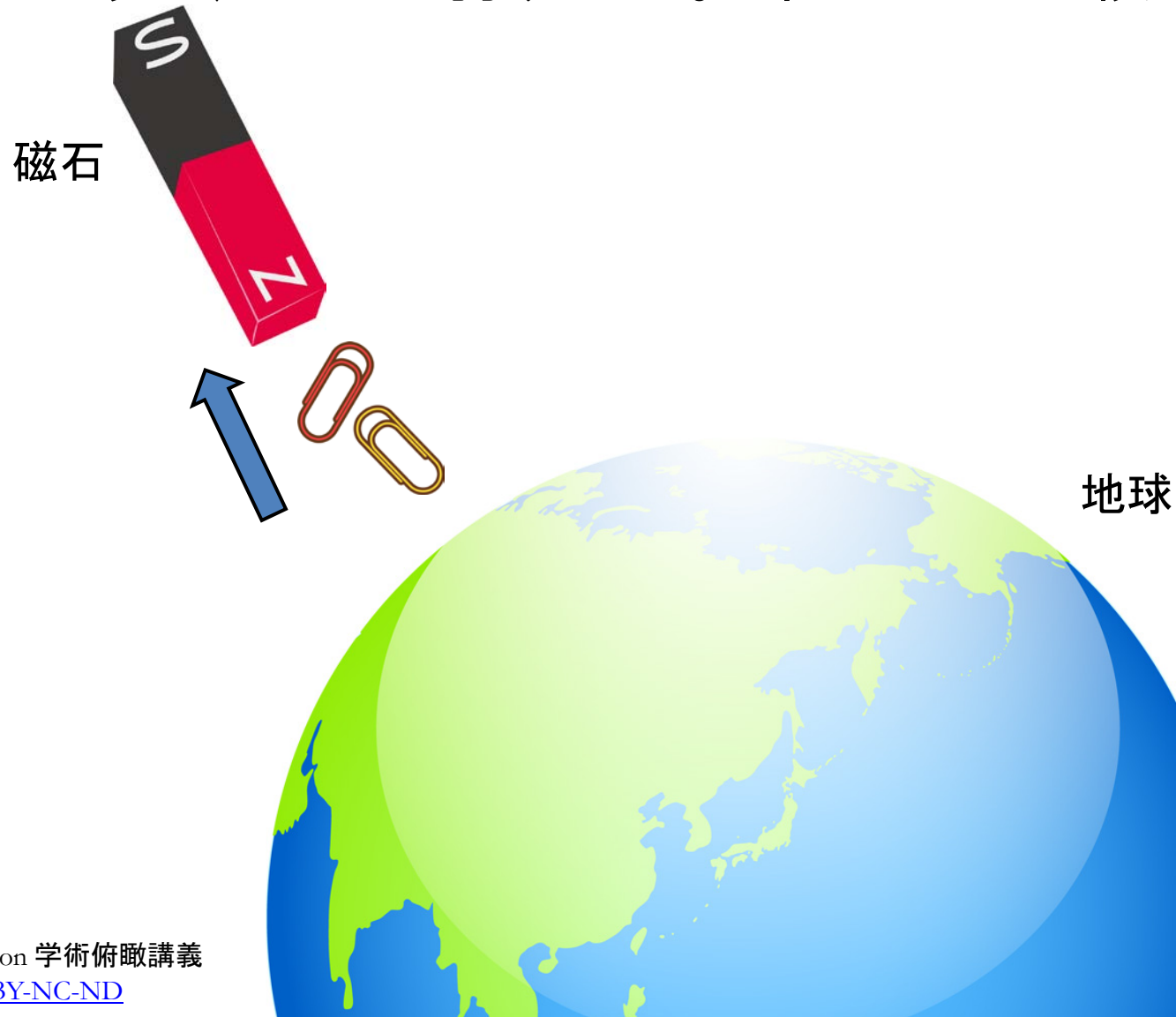
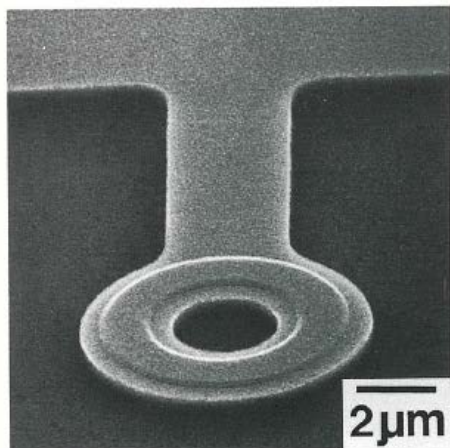


Image from GATAG

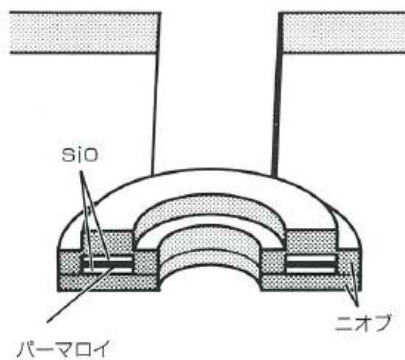
24

AB効果

(無限に長いコイルでなくて検証)

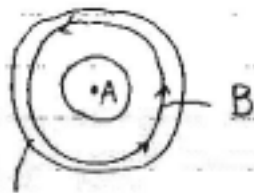


(a)走査電子顕微鏡写真

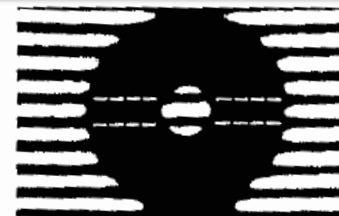


(b)模式図

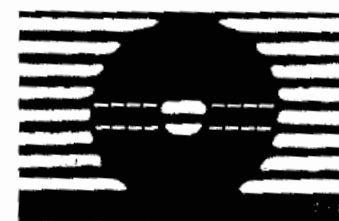
図43 超伝導体で取り囲んだドーナツ状磁石。



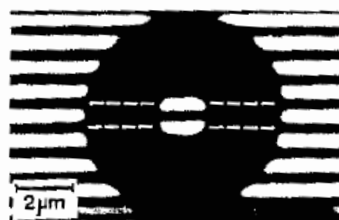
外側 Nb (ニオブ) → マイスナー効果
で B が外に出ない



(a)室温



(b)絶対温度15度



(c)絶対温度5度

図61 超伝導体で囲んだドーナツ状磁石の干渉顕微鏡像。

電子線の位相差はサンプルの温度によって変化する。室温(a)から絶対温度15度(b)まで冷やすと、磁石内のスピンのゆらぎが減少して磁束が増える。このため位相差が0.15波長から0.4波長に変化する。絶対温度5度以下になると(c)、突然位相差が0.5波長に変化する。これは、ニオブが超伝導状態になって磁束が量子化されたためである。

外村彰『ゲージ場を見る 電子波が拓くミクロの世界』(講談社、1997年)

左) P159、図43超伝導体で取り囲んだドーナツ状磁石。

右) p227、図61超伝導体で囲んだドーナツ状磁石の干渉顕微鏡像

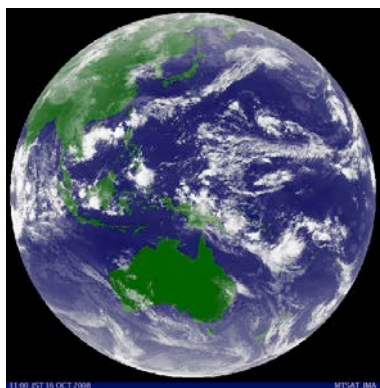
これまで16種類の素粒子が見つかった

物質を形作る素粒子
クォーク・レプトン

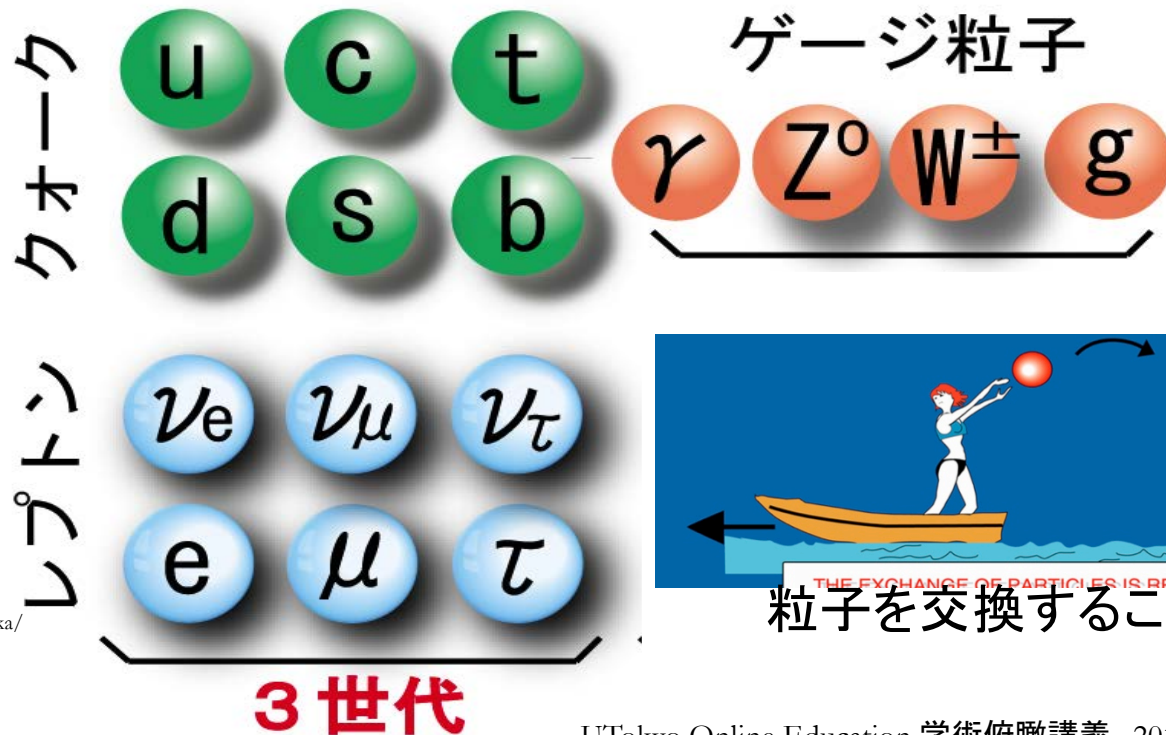
力を伝える素粒子
ゲージ粒子

標準模型

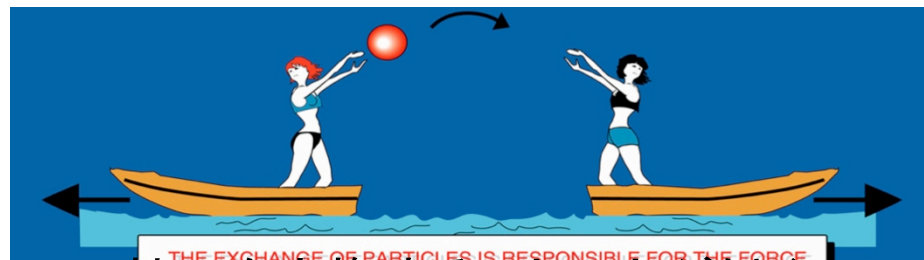
地球も皆さんも
すべて



気象庁
「ひまわり6号が撮影した地球」
http://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/chishiki_ondanka/p01.html



©CERN
「The forces in Nature」
<http://cds.cern.ch/record/39722>



粒子を交換することで力が働く

特殊相対性理論

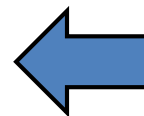
Photo by 伯理璽天德, from Wikimedia Commons
<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Laser.jpeg>
CC BY-SA 3.0



光

普通の感覚

100km/h



50km/h

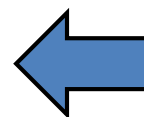


Photo by Toyota Motor Europe, from GATAG
<http://free-photos.gatag.net/tag/%E3%83%88%E3%83%A8%E3%82%BF%E3%83%97%E3%83%AA%E3%82%A6%E3%82%B9>
CC BY 4.0

光には
こんな
不思議なことが
起きている。

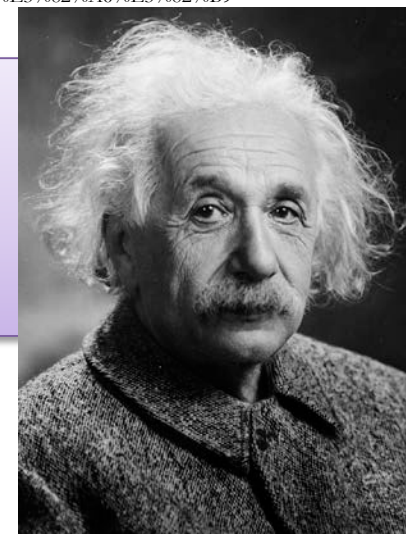
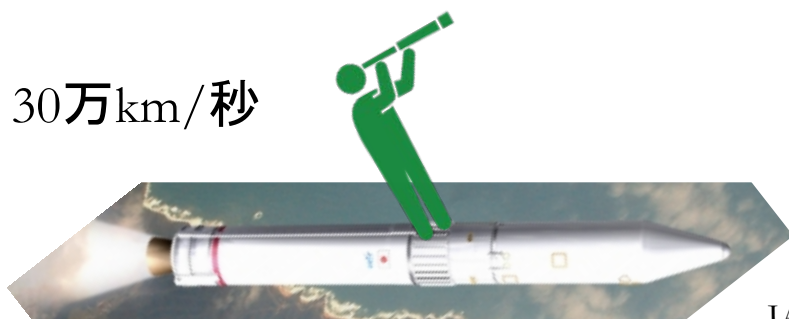


Photo from Wikipedia
Commons

27



30万km/秒

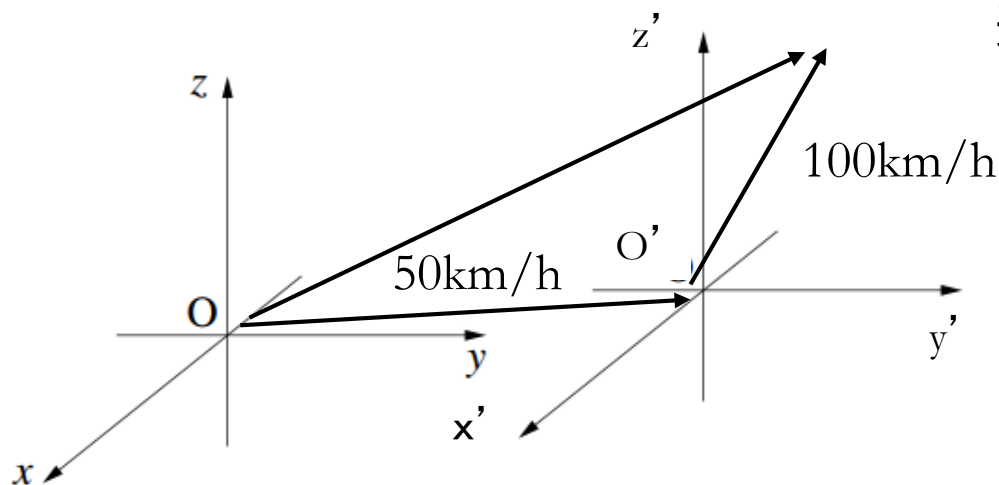
30万km/秒

止まっている

©JAXA
<http://jda.jaxa.jp/result.php?lang=j&cid=79d12311b52f6e6a97a34bbff93e2e8a>

JAXA

共通の時間(ガリレイ変換)



$$t' = \gamma(1 - \beta^2)t = \sqrt{1 - \beta^2} t$$

右図 5秒→4秒になってる

時間が遅れる γ -factor

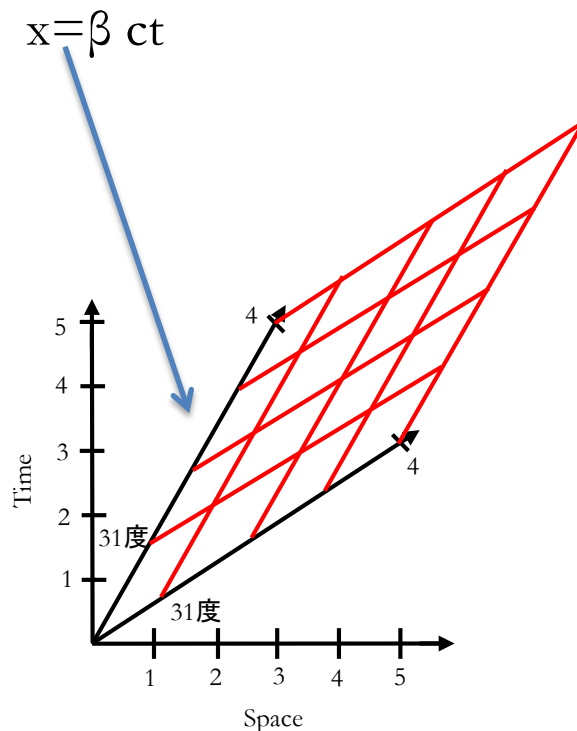
$$t=0$$

$L=5$ だった棒は

$L' = L\sqrt{1 - \beta^2}$ 短くなる(ローレンツ収縮)

時間と空間は同等(ローレンツ変換)

運動する座標系の原点にいる人 $x'=0$



直角が偉い?

素粒子の質量って？

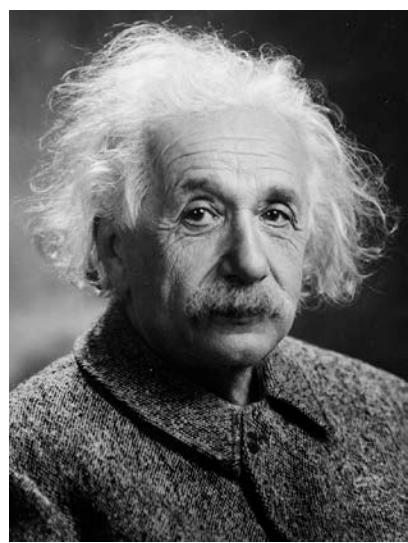
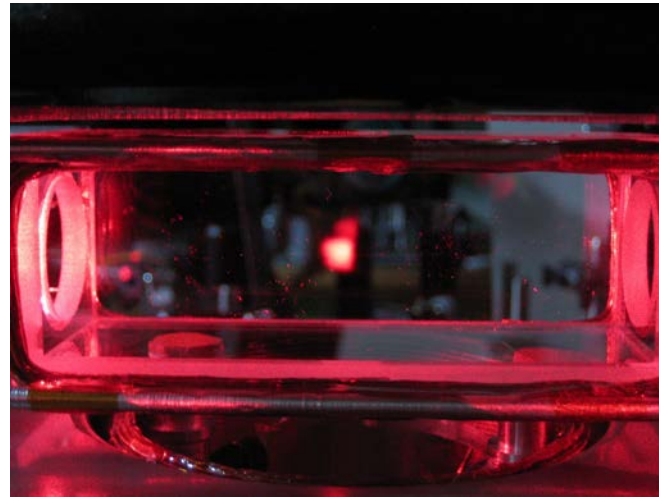


Photo from Wikipedia Commons

「止まった光??」
光は止まらない。
どんな人が、どうみても
秒速30万kmで
動いてる。

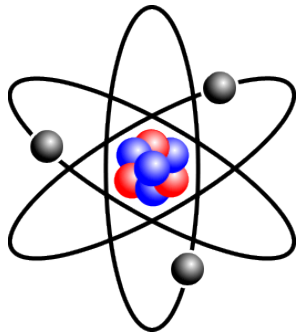


止まった原子
の写真(Li)

五神・湯本・井手口研究室

「原子や電子」も
とめることが
出来る。

この違いは何故？



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

とまったから、原子核や
原子ができた。
とまらなかったら
この宇宙はできていなかった

「質量」

ニュートン方程式 $F = m_l a$

速度の変化(加速度)を阻害 (慣性質量)

質量があると、減速できて止めることができる

$m_l = 0$ だと、いつも一定速度 c

重さは $F_g = m_g g$ (重力質量)

$m_g = m_l$??? (等価原理)