

素粒子の世界

2015年4月17日

国立研究開発法人 理化学研究所 計算科学研究機構

アプリケーション開発チーム

連続系場の理論研究チーム

中村 宜文


[nakamura\[at\]riken.jp](mailto:nakamura@riken.jp)

第70回 AICS Cafe

第3回

日時: 2011年6月10日 (金), 13:00 - 15:00

場所: AICS 6階講堂

講演題目: 「[XcalableMP: a directive-based language extension for scalable and performance-aware parallel programming](#) 

講演者: 佐藤三久 (プログラミング環境研究チーム)

講演題目: 「[Modified Block BiCGSTAB for Lattice QCD](#) 

講演者: 中村宜文 (連続系場の理論研究チーム)

4年に一回

第2回

日時: 2011年5月23日 (月), 12:00 - 14:00

場所: AICS 6階見学室

講演題目: 「System Software for Supporting Self-Control Parallel Application Programming」

講演者: 石川裕 (システムソフトウェア研究チーム)

講演題目: 「[Introduction to Lattice QCD](#) 

講演者: 藏増嘉伸 (連続系場の理論研究チーム)

第1回

日時: 2011年4月15日 (金), 14:00 - 16:00

場所: AICS 6階見学室

講演題目: 「[Climate research in AICS](#) 

講演者: 富田浩文 (複合系気候科学研究チーム)

ほんとは二本立てだった

素粒子ってなに？

素粒子とは

物質(もの)を構成する(作る)最小の粒子

この世のすべてのものは目にはみえないとても小さな粒子からできてる

素粒子とは

物質(もの)を構成する(作る)最小の粒子

この世のすべてのものは目にはみえないとても小さな粒子からできてる

どれくらい小さいの？
それはいったい何？

身近なものから素粒子まで

- 大きさ
- 質量



(例)一円硬貨

一円硬貨



半径 $1\text{cm} = 0.01\text{m}$

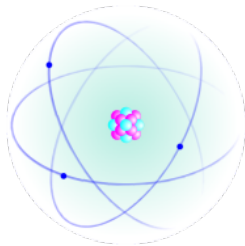
質量 1g

アルミニウム100%

大きさ



一円硬貨
半径 $1\text{cm} = 0.01\text{m}$



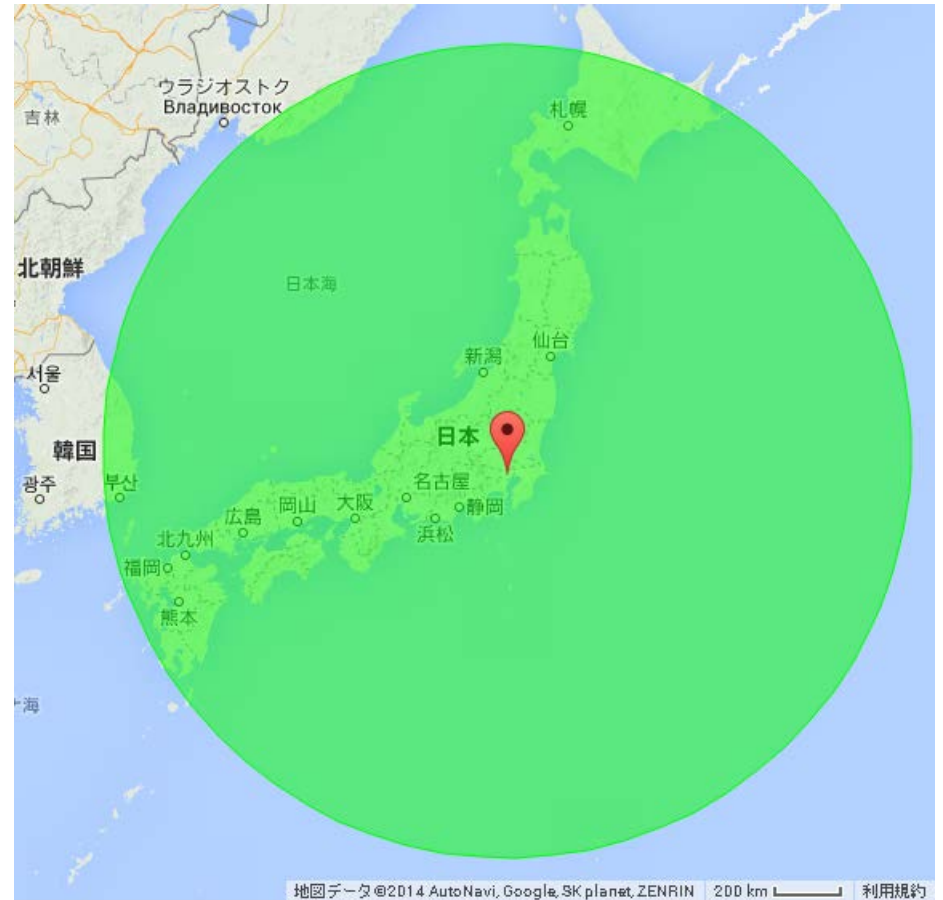
一億倍(100,000,000)倍！！

アルミニウム原子
 143 pm [ピコメートル] = 0.000000000143 m
= $1.43 \times 10^{-10}\text{ m}$ = 1.43m の100億分の1

大きさ一億倍



大きさ一億倍

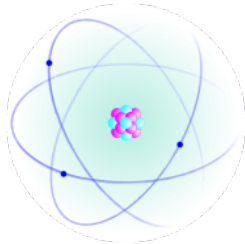


質量



一円硬貨
1g

二百垓倍(20,000,000,000,000,000,000,000)倍！！



アルミニウム原子
= 4.5×10^{-23} g

質量二百垓倍



一円硬貨千枚

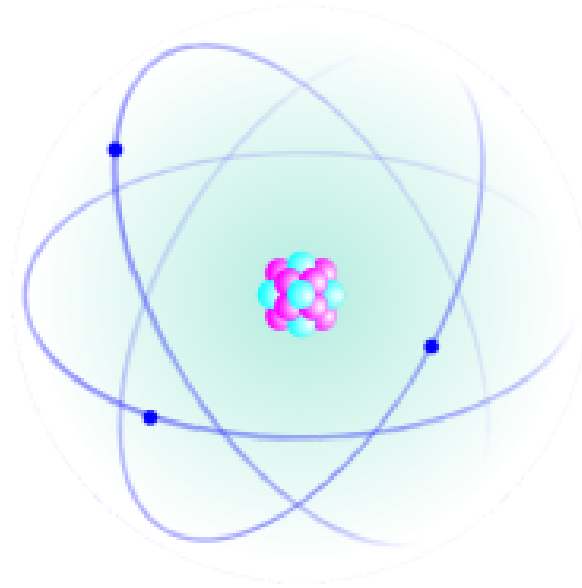
質量二百垓倍



一円硬貨千枚



原子は複合粒子



素粒子：物質を構成する最小の粒子

複合粒子：素粒子二つ以上が結合してできた粒子

原子(元素)はいろいろある

The Periodic Table of The Elements(2011)
 Edited by Chemistry Labo., Univ. of Kochi

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18			
1	1 H 1.008	The Periodic Table of The Elements(2011) Edited by Chemistry Labo., Univ. of Kochi																2 He 4.003			
2	3 Li 6.941	4 Be 9.012	atomic number Symbol atomic weight										metallic			5 B 10.81	6 C 12.01	7 N 14.01	8 O 16.00	9 F 19.00	10 Ne 20.18
3	11 Na 22.99	12 Mg 24.31											amphoteric			13 Al 26.98	14 Si 28.09	15 P 30.97	16 S 32.07	17 Cl 35.45	18 Ar 39.95
4	19 K 39.10	20 Ca 40.08	21 Sc 44.96	22 Ti 47.87	23 V 50.94	24 Cr 52.00	25 Mn 54.94	26 Fe 55.85	27 Co 58.93	28 Ni 58.69	29 Cu 63.55	30 Zn 65.38	31 Ga 69.72	32 Ge 72.63	33 As 74.92	34 Se 78.96	35 Br 79.90	36 Kr 83.80			
5	37 Rb 85.47	38 Sr 87.62	39 Y 88.91	40 Zr 91.22	41 Nb 92.91	42 Mo 95.96	43 Tc [99]	44 Ru 101.1	45 Rh 102.9	46 Pd 106.4	47 Ag 107.9	48 Cd 112.4	49 In 114.8	50 Sn 118.7	51 Sb 121.8	52 Te 127.6	53 I 126.9	54 Xe 131.3			
6	55 Cs 132.9	56 Ba 137.3	L	72 Hf 178.5	73 Ta 180.9	74 W 183.8	75 Re 186.2	76 Os 190.2	77 Ir 192.2	78 Pt 195.1	79 Au 197.0	80 Hg 200.6	81 Tl 204.4	82 Pb 207.2	83 Bi 209.0	84 Po [210]	85 At [210]	86 Rn [222]			
7	87 Fr [223]	88 Ra [226]	A	104 Rf [267]	105 Db [268]	106 Sg [271]	107 Bh [272]	108 Hs [277]	109 Mt [276]	110 Ds [281]	111 Rg [280]	112 Cn [285]	113 Uut [284]	114 Fl [289]	115 Uup [288]	116 Lv [293]	118 Uuo [294]				
			L	57 La 138.9	58 Ce 140.1	59 Pr 140.9	60 Nd 144.2	61 Pm [145]	62 Sm 150.4	63 Eu 152.0	64 Gd 157.3	65 Tb 158.9	66 Dy 162.5	67 Ho 164.9	68 Er 167.3	69 Tm 168.9	70 Yb 173.1	71 Lu 175.0			
			A	89 Ac [227]	90 Th 232.0	91 Pa 231.0	92 U 238.0	93 Np [237]	94 Pu [239]	95 Am [243]	96 Cm [247]	97 Bk [247]	98 Cf [252]	99 Es [252]	100 Fm [257]	101 Md [258]	102 No [259]	103 Lr [262]			

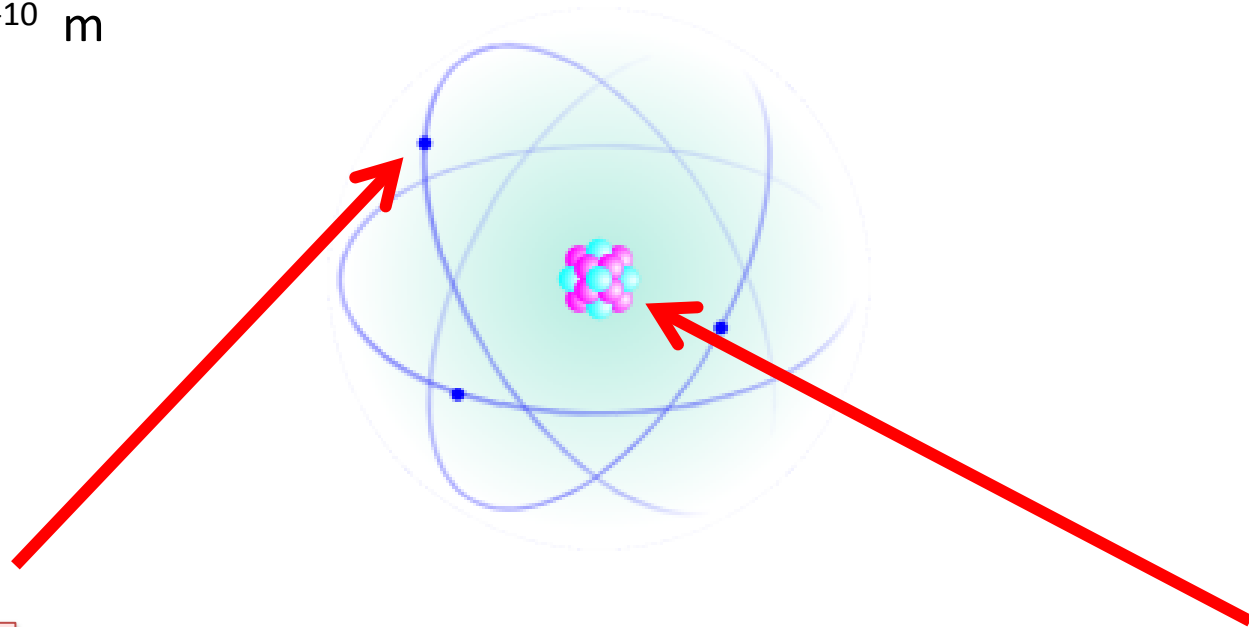
100種類以上！！

高知県立大学化学研究室製 元素周期表

たくさんあると素粒子っぽくない

原子

半径は約 10^{-10} m



電子(素粒子)

引き合う

原子核

質量:

$9.10938291(40) \times 10^{-31}$ kg

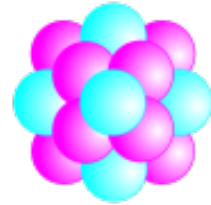
電荷: $-1.602176565(35) \times 10^{-19}$ C

マイナス電荷

電荷: **プラス電荷**



原子核



陽子と中性子からできてる
その数は原子(元素)によって異なる
半径は約 10^{-14} m

原子の1万倍小さい

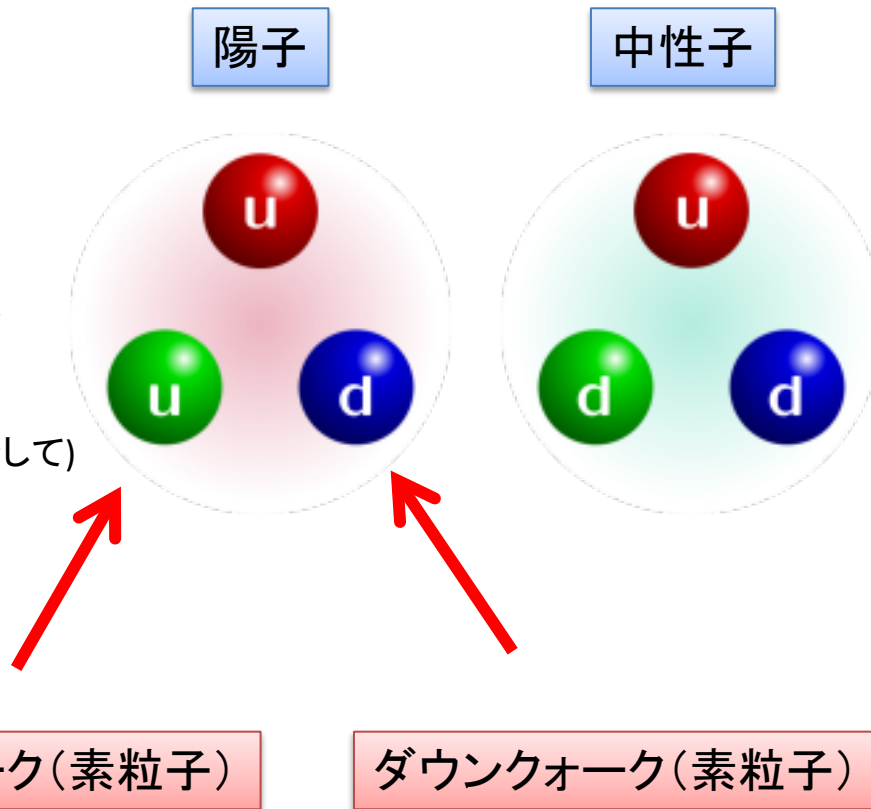
陽子 & 中性子 (核子)

半径は約 10^{-15} m

3つのクォークからできている

質量:
 $1.672621777(74) \times 10^{-27}$ kg
 $938.272046(21)$ MeV/ c^2

電荷: +1 (電子の電荷を1として)



質量:
 $1.674927351(74) \times 10^{-27}$ kg
 $939.565379(21)$ MeV/ c^2

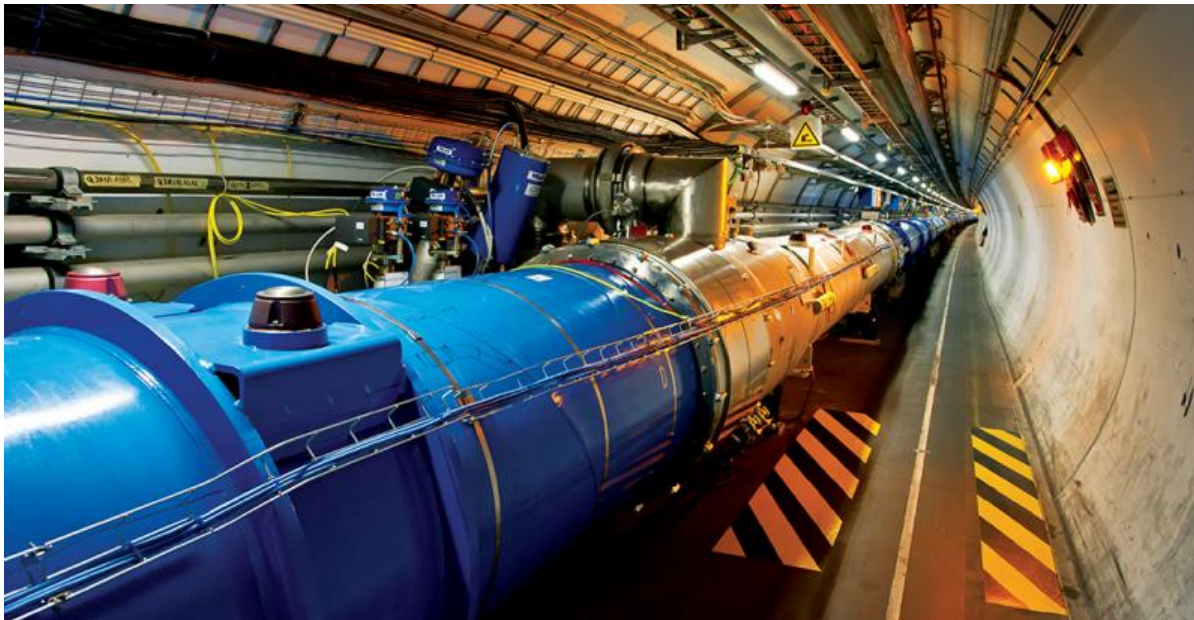
電荷: 0

電子ボルト(eV)

- エネルギーの単位
- 電子が1ボルト(V)の電圧で加速されるときのエネルギー
- $1\text{eV} = 1.602\ 176\ 565(35) \times 10^{-19}\ \text{J}$ (ジュール)
- ジュールの単位 $[\text{kg m}^2/\text{s}^2]$
- 光速 $c = 299,792,458\ [\text{m/s}]$
- $E=mc^2$ エネルギーと質量の関係 (アインシュタイン、特殊相対論)

ハドロン

- 陽子や中性子と同じくらいの大さの粒子が加速器実験でたくさん見つかった
- クォーク3つでできているバリオン(陽子、中性子、ラムダ粒子、デルタ粒子、シグマ粒子、グザイ粒子、オメガ粒子等)
- クォークと反クォークでできているメソン(パイ中間子、K中間子等)
- バリオンとメソンをあわせてハドロンとよぶ

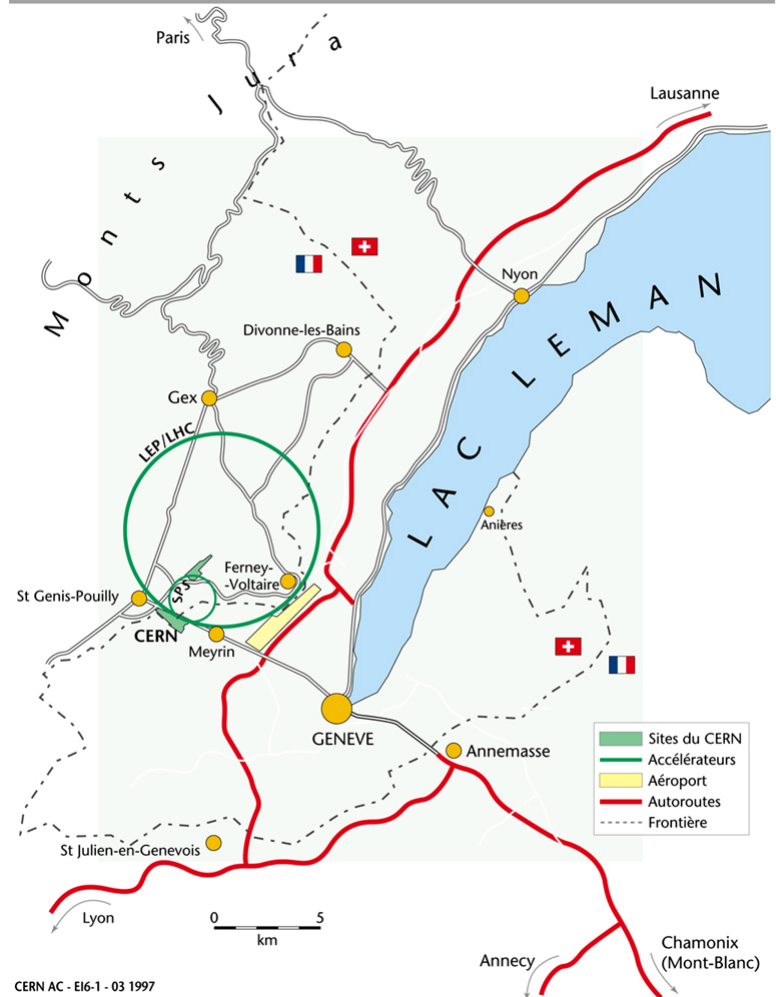


LHC (Image: CERN)

欧州原子核研究機構(CERN)

- 素粒子・原子核の共同研究所
- World Wide Web(www)発祥の地

Carte de situation



Map around CERN (Image: CERN)

クォーク(素粒子)

- ハドロンの構成要素
- 6種類
- 3色(赤、青、緑)



アップクォーク

質量: $2.3 \text{ MeV}/c^2$
電荷: $2/3$



チャームクォーク

質量: $1.275 \text{ GeV}/c^2$
電荷: $2/3$



トップクォーク

質量: $173.07 \text{ GeV}/c^2$
電荷: $2/3$



ダウンクォーク

質量: $4.8 \text{ MeV}/c^2$
電荷: $-1/3$



ストレンジクォーク

質量: $95 \text{ MeV}/c^2$
電荷: $-1/3$



ボトムクォーク

質量: $4.18 \text{ GeV}/c^2$
電荷: $-1/3$

レプトン(素粒子)

- 荷電レプトン(電子、ミュー粒子、タウ粒子)
- ニュートリノ(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)

電子ニュートリノ

質量: $<2.2 \text{ eV}/c^2$
電荷:0

ミューニュートリノ

質量: $0.17\text{MeV}/c^2$
電荷:0

タウニュートリノ

質量: $15.5 \text{ MeV}/c^2$
電荷:0

電子

質量: $0.511\text{MeV}/c^2$
電荷:-1

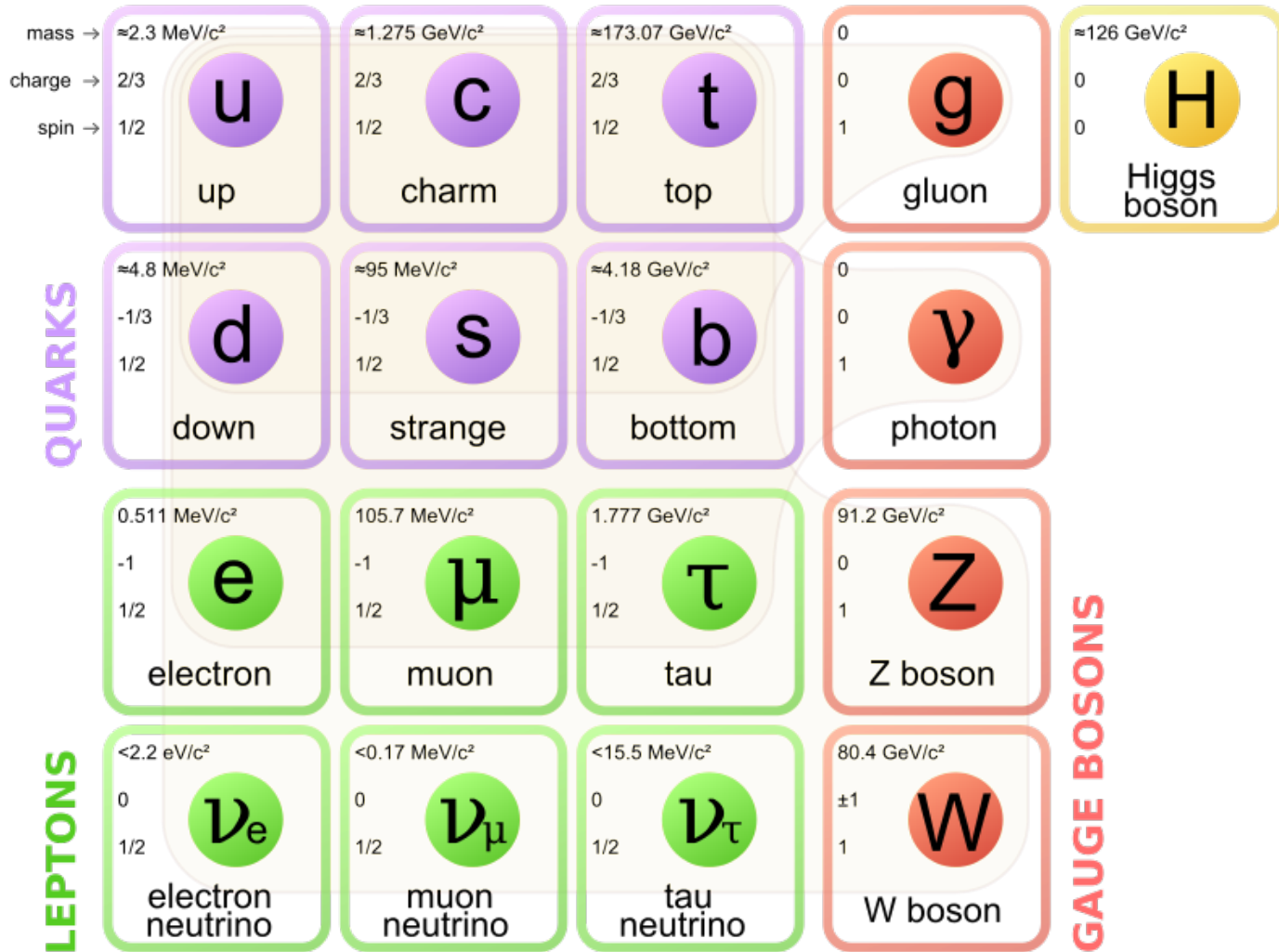
ミュー粒子

質量: $105.7\text{MeV}/c^2$
電荷:-1

タウ粒子

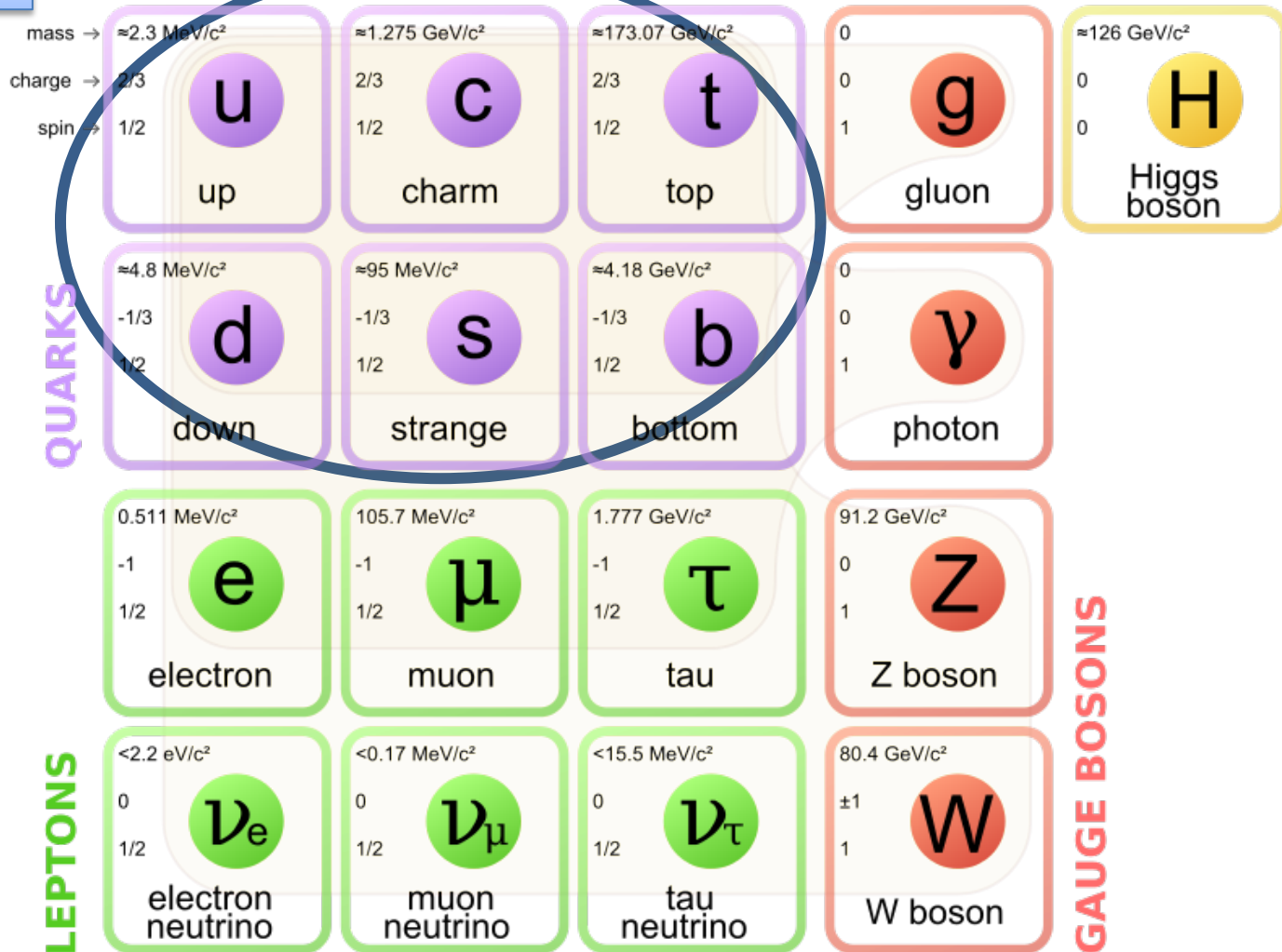
質量: $1.777\text{GeV}/c^2$
電荷:-1

素粒子

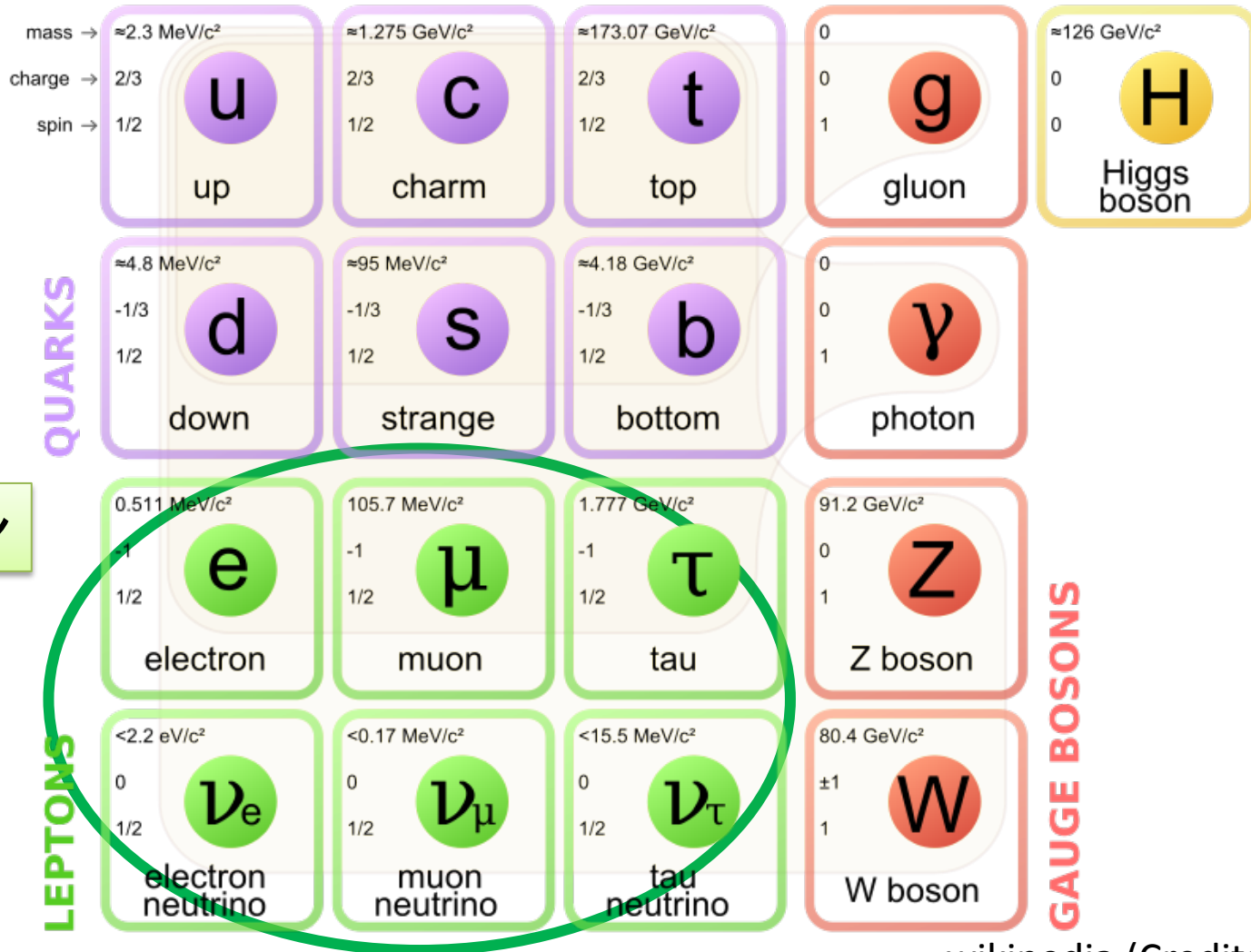


素粒子

クォーク

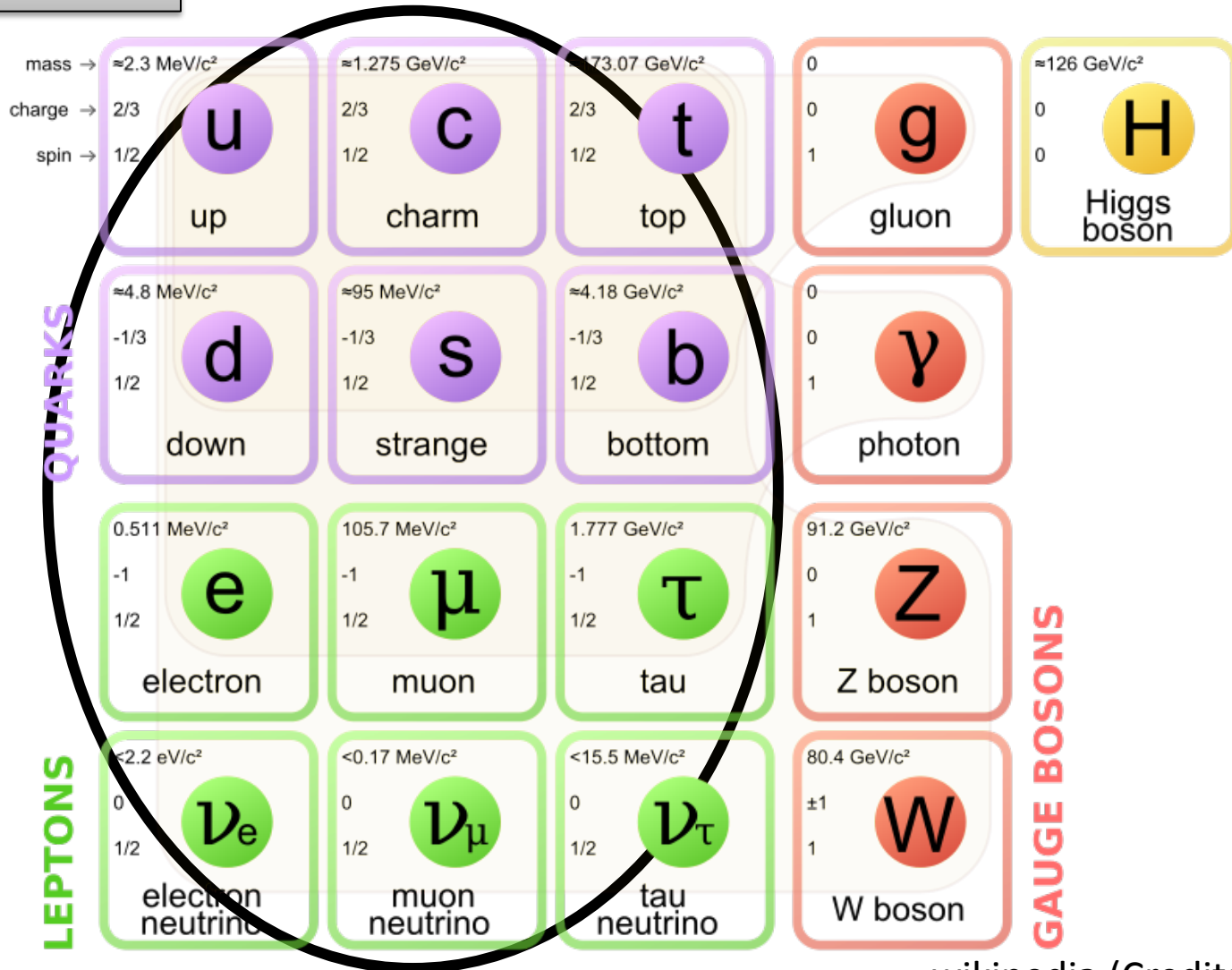


素粒子



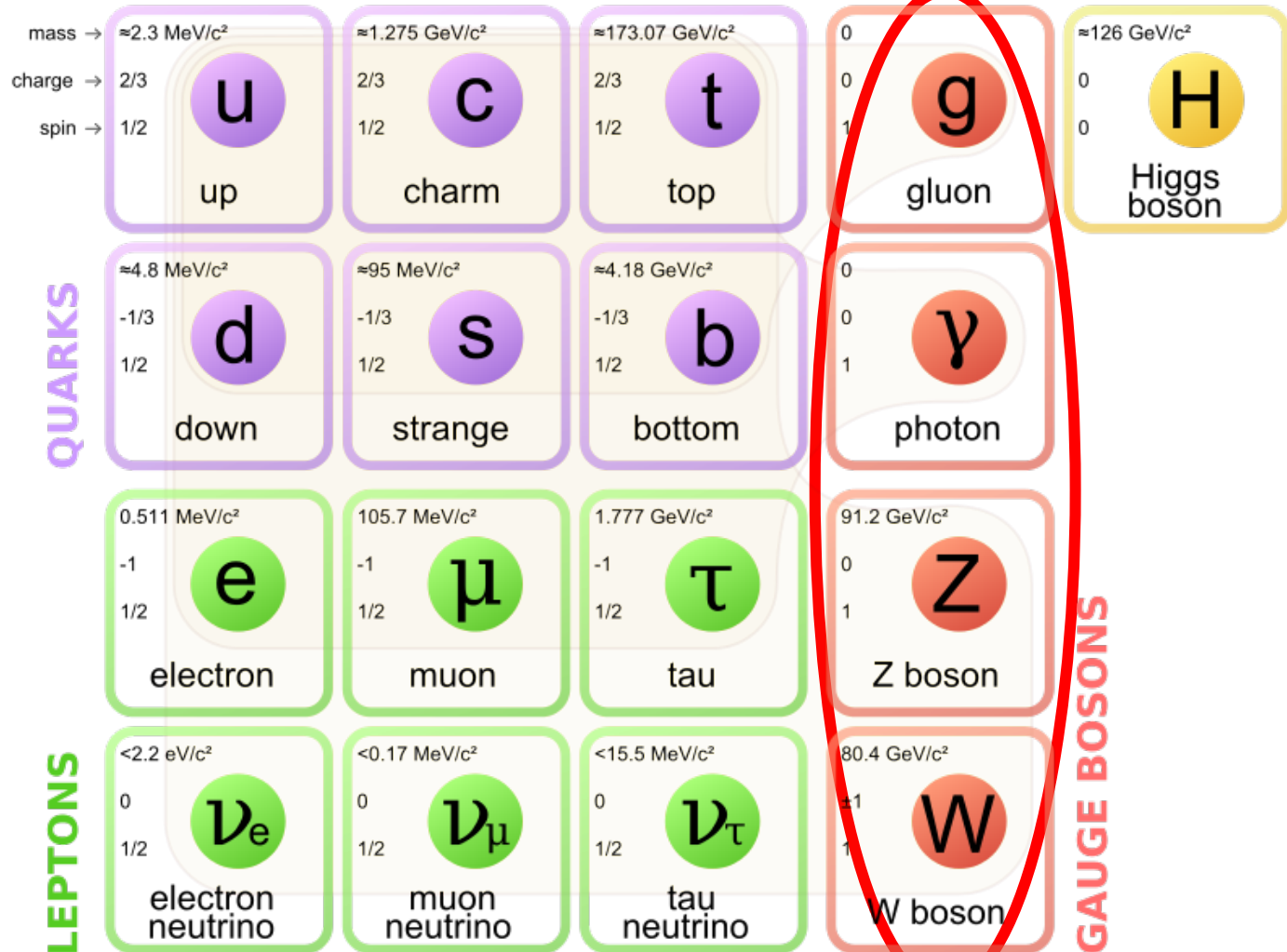
素粒子

物質粒子



素粒子

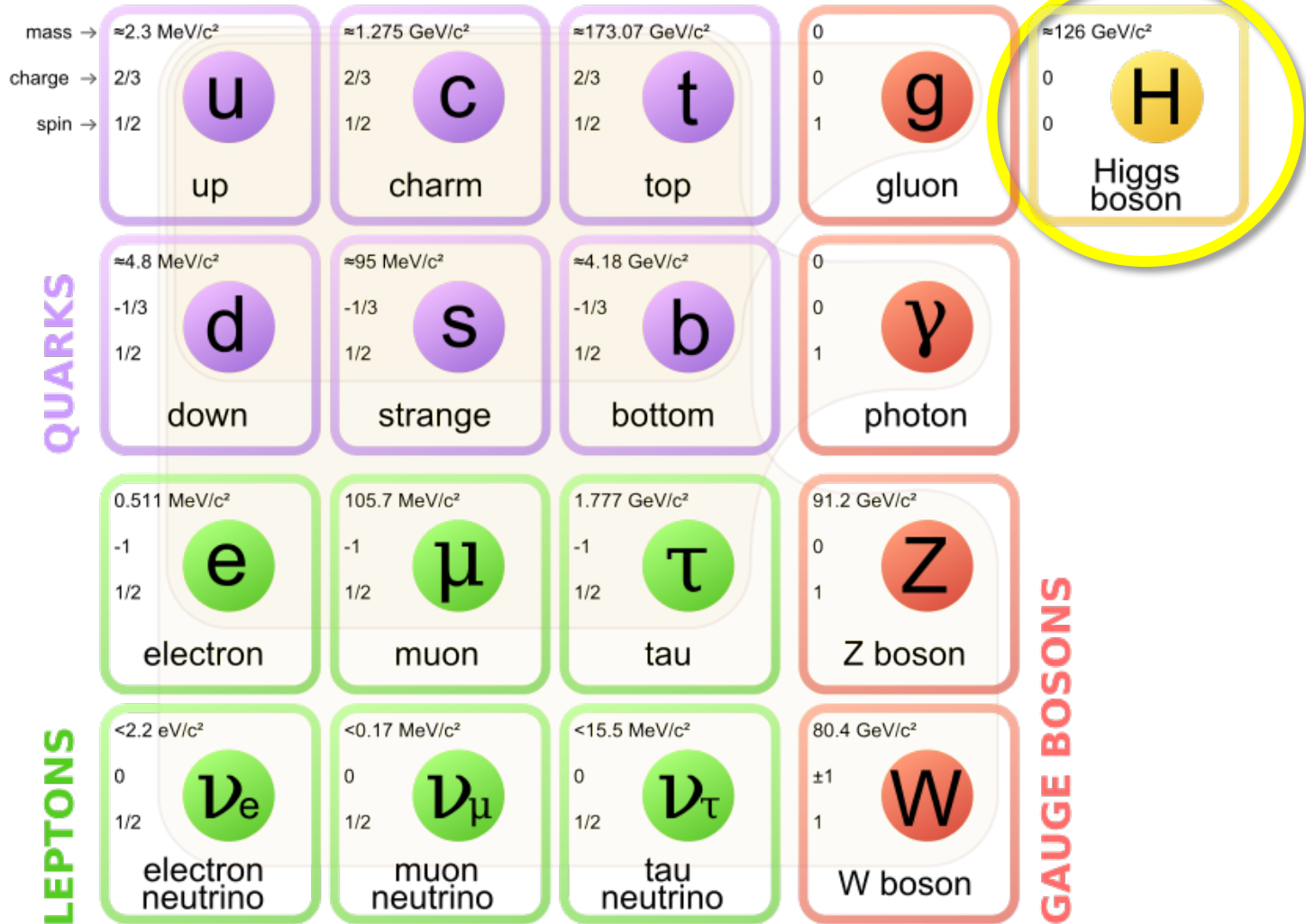
ゲージ粒子
(力を伝える粒子)



wikipedia (Credit: MissMJ)

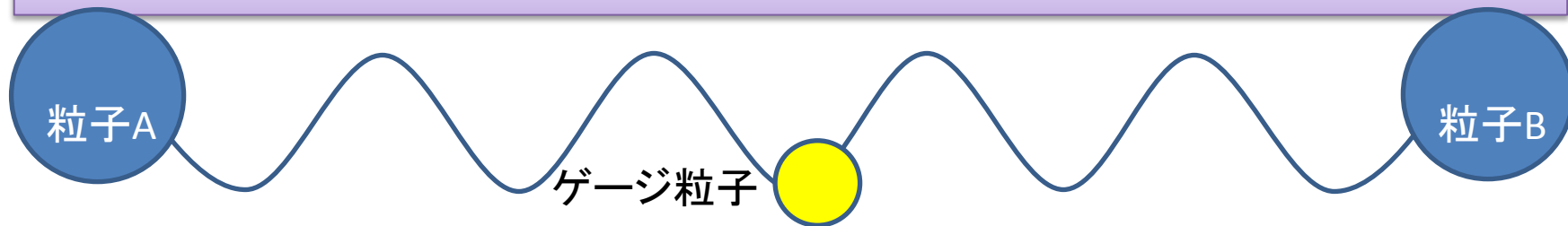
素粒子

ヒッグス粒子
(質量を与える粒子)



自然界の4つの力

二つの粒子の間の力(相互作用)はゲージ粒子によって伝わる



力の種類	電磁力	弱い力	強い力	重力
力の源	電荷 electric charge	弱荷 weak charge	色荷 color charge	質量 mass
力を伝える粒子	γ : フォトン	Z,W: ウィークボソン	g: グルーオン	(グラビトン)
古典論	電磁気学			一般相対論
量子論	量子電磁気学 (QED) ワインバーグ・サラム理論 (電弱統一理論)		量子色力学 (QCD)	未完成

量子論ができるまで

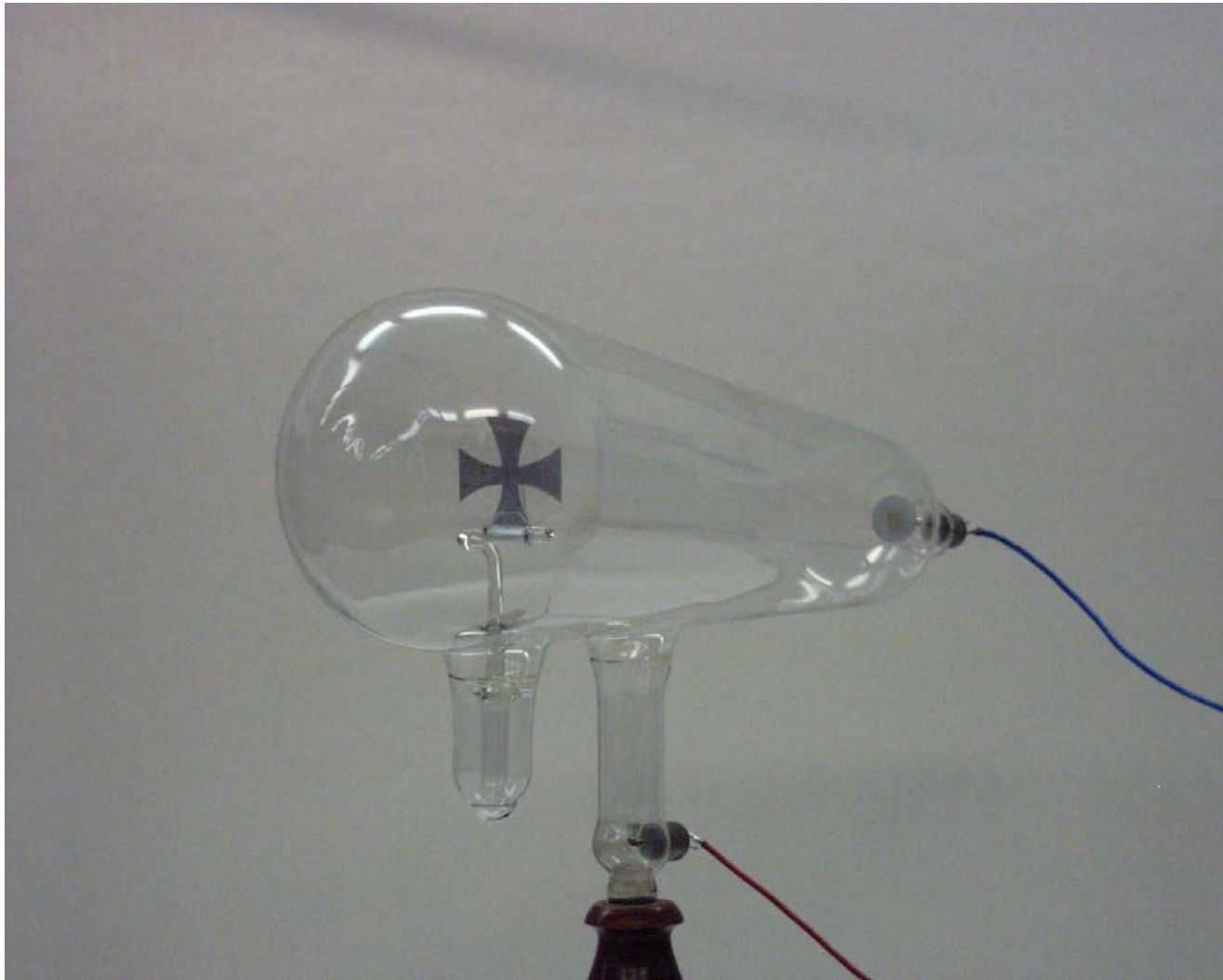
19世紀まで

- 電子の粒子性
 - 陰極線実験
- 光の波動性
 - 二重スリット実験

20世紀はじめ

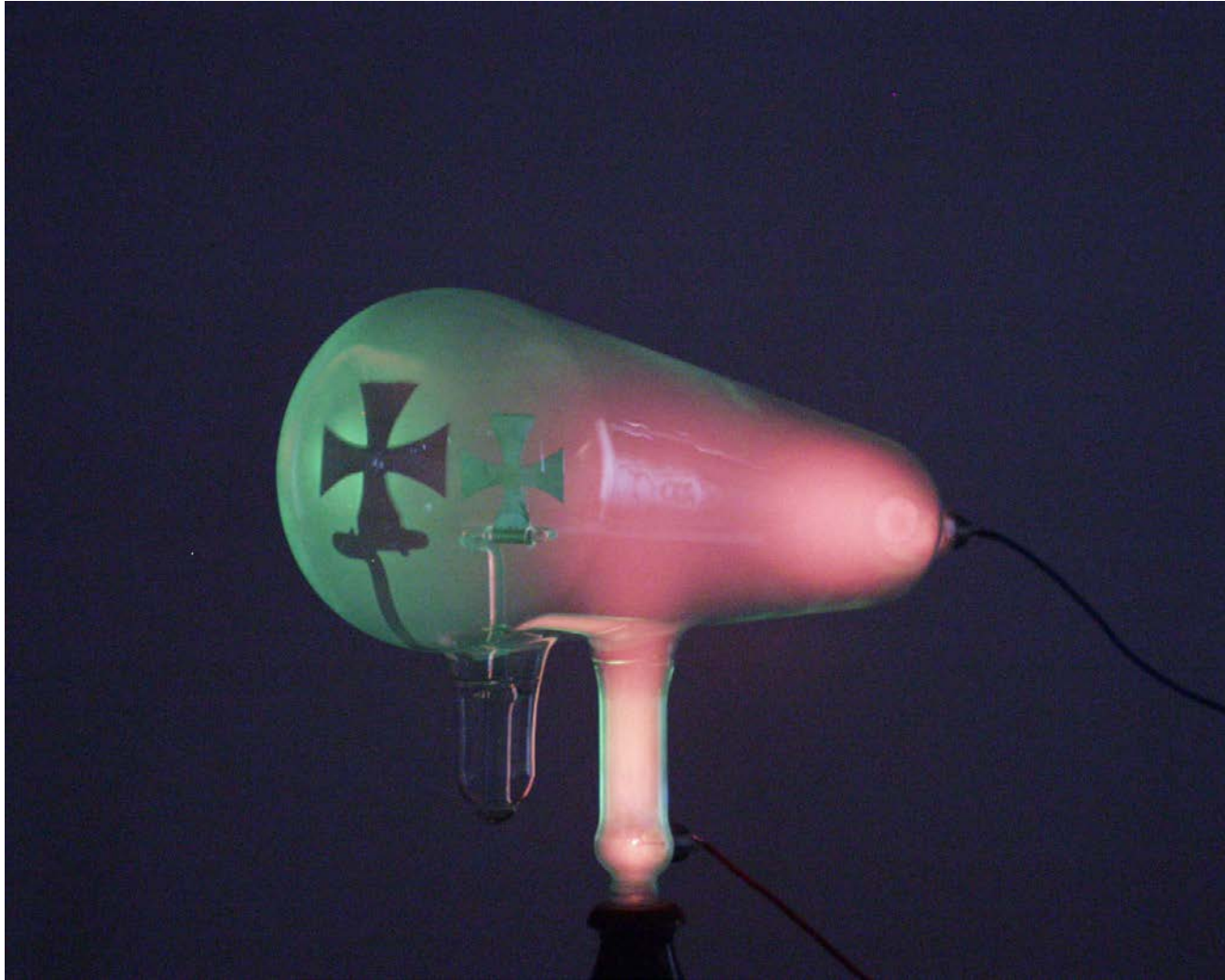
- 電子の波動性
 - 電子回析
- 光の粒子性
 - 光電効果
 - コンプトン散乱

陰極線実験



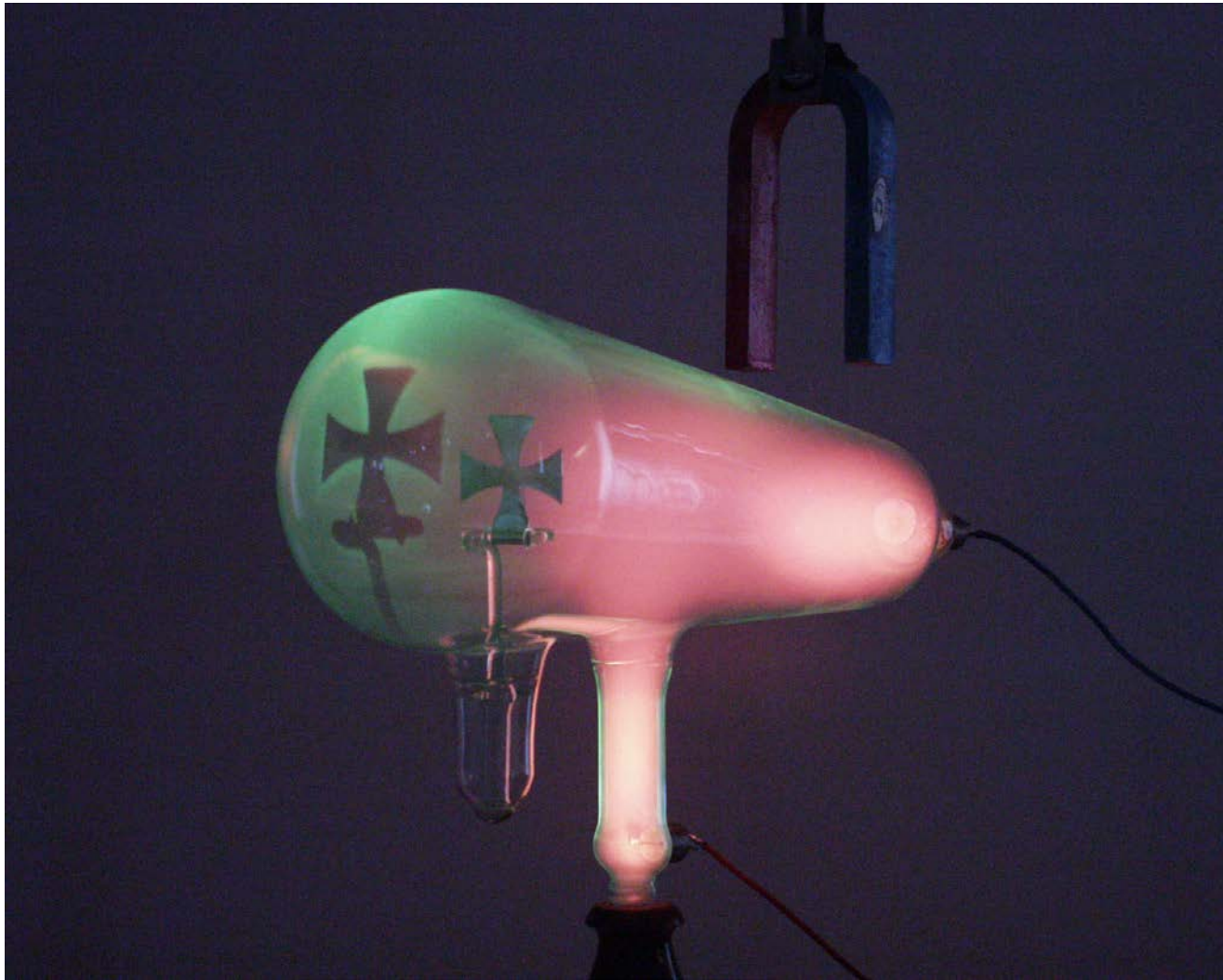
wikipedia (Credit: Zátonyi Sándor)

陰極線実験



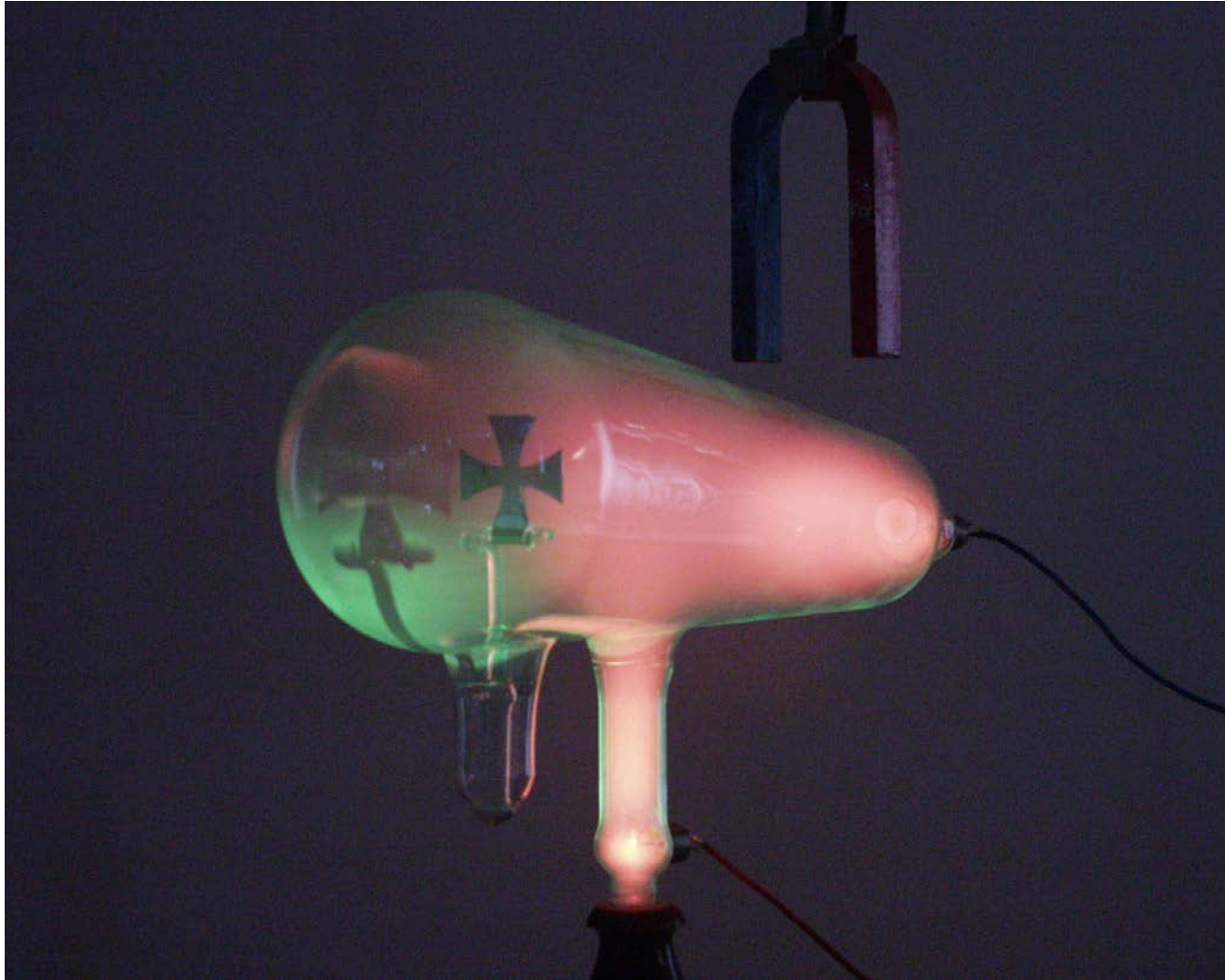
wikipedia (Credit: Zátanyi Sándor)

陰極線実験



wikipedia (Credit: Zátonyi Sándor)

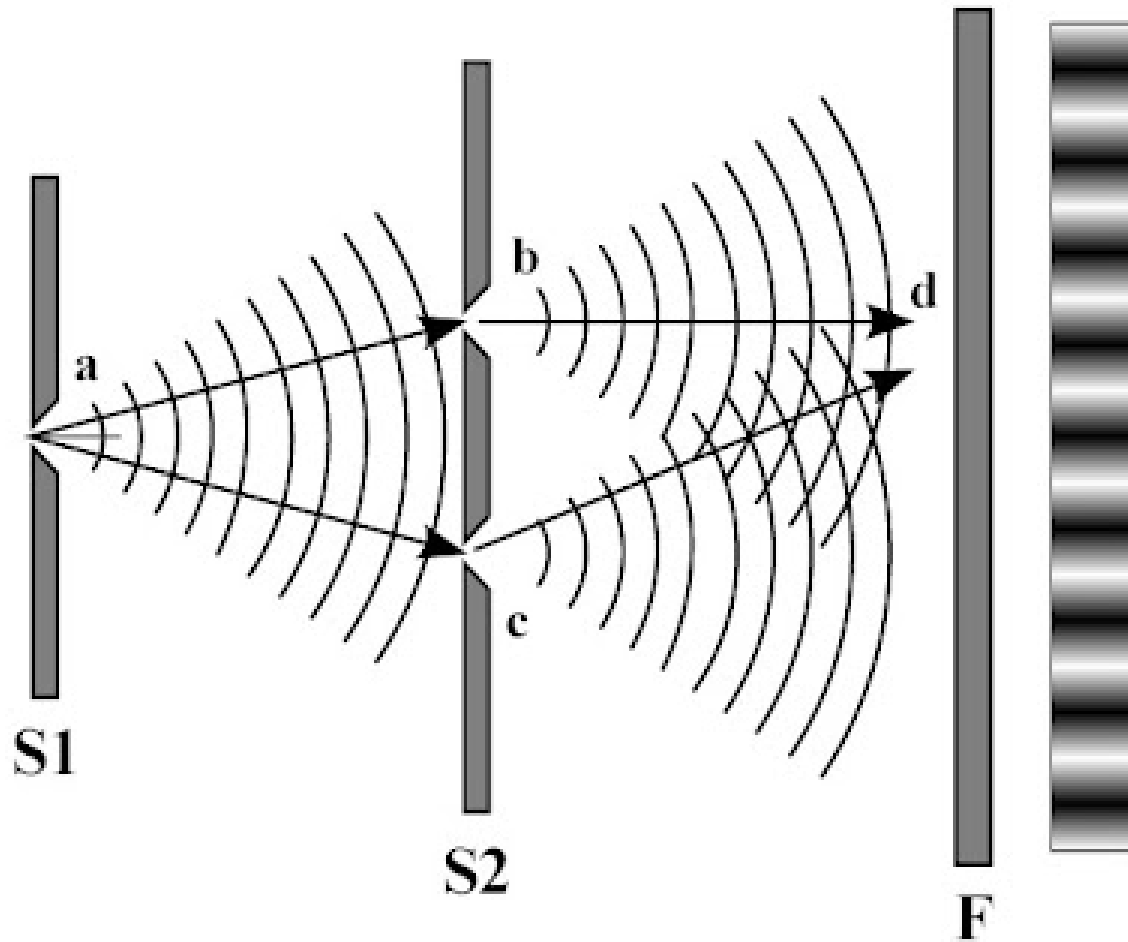
陰極線実験



wikipedia (Credit: Zátonyi Sándor)

二重スリット実験

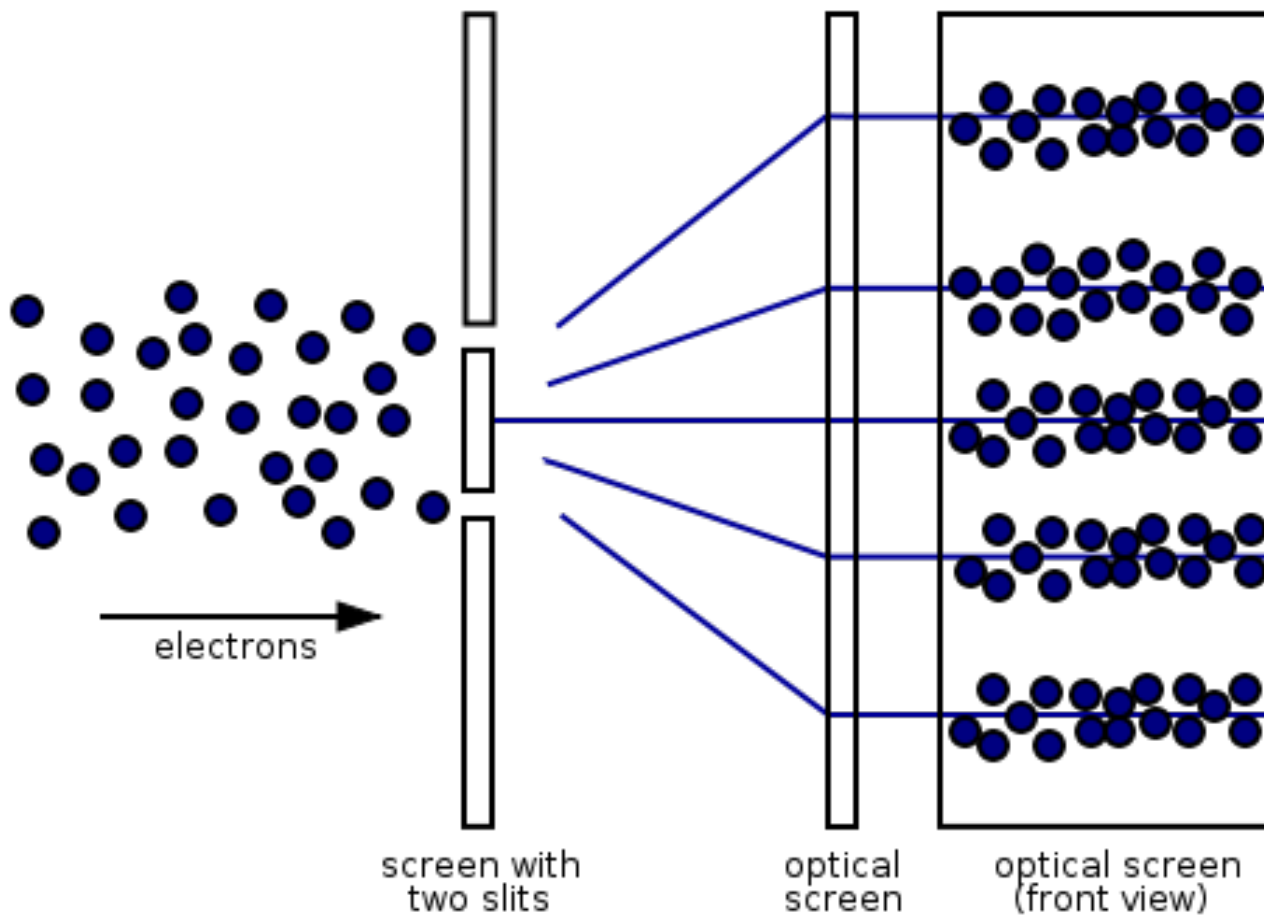
光源



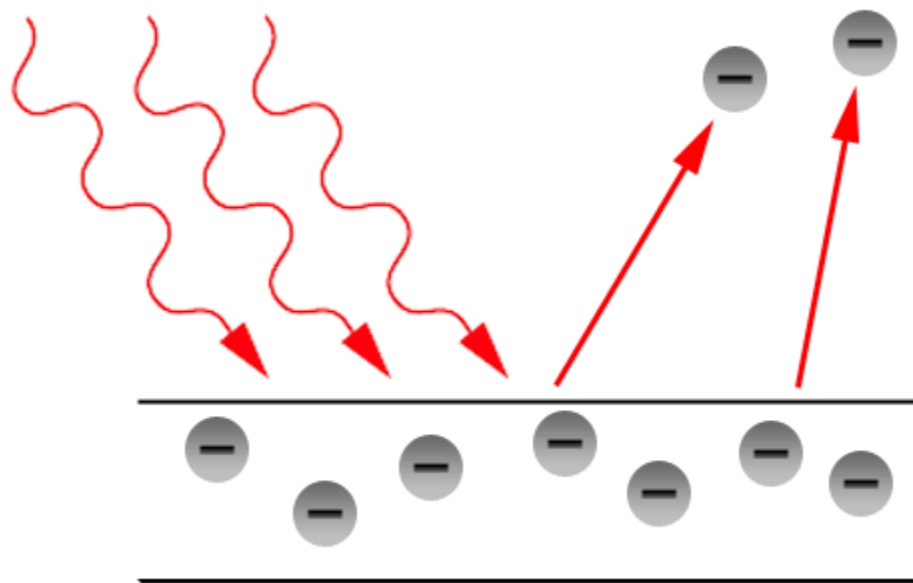
干渉縞

波の性質

電子回析



光電効果



- 振幅を大きくするとたくさん電子が飛び出す(実験結果)
->光子がたくさん(振幅大)あたって、電子がたくさん出る
- 周波数をあげると飛び出す電子のエネルギーがあがる(実験結果)
->高いエネルギーの光子ぶつかって高いエネルギーの電子がでる

量子力学

これらを矛盾なく説明

19世紀まで

- 電子の粒子性
 - 陰極線実験
- 光の波動性
 - 二重スリット実験

20世紀はじめ

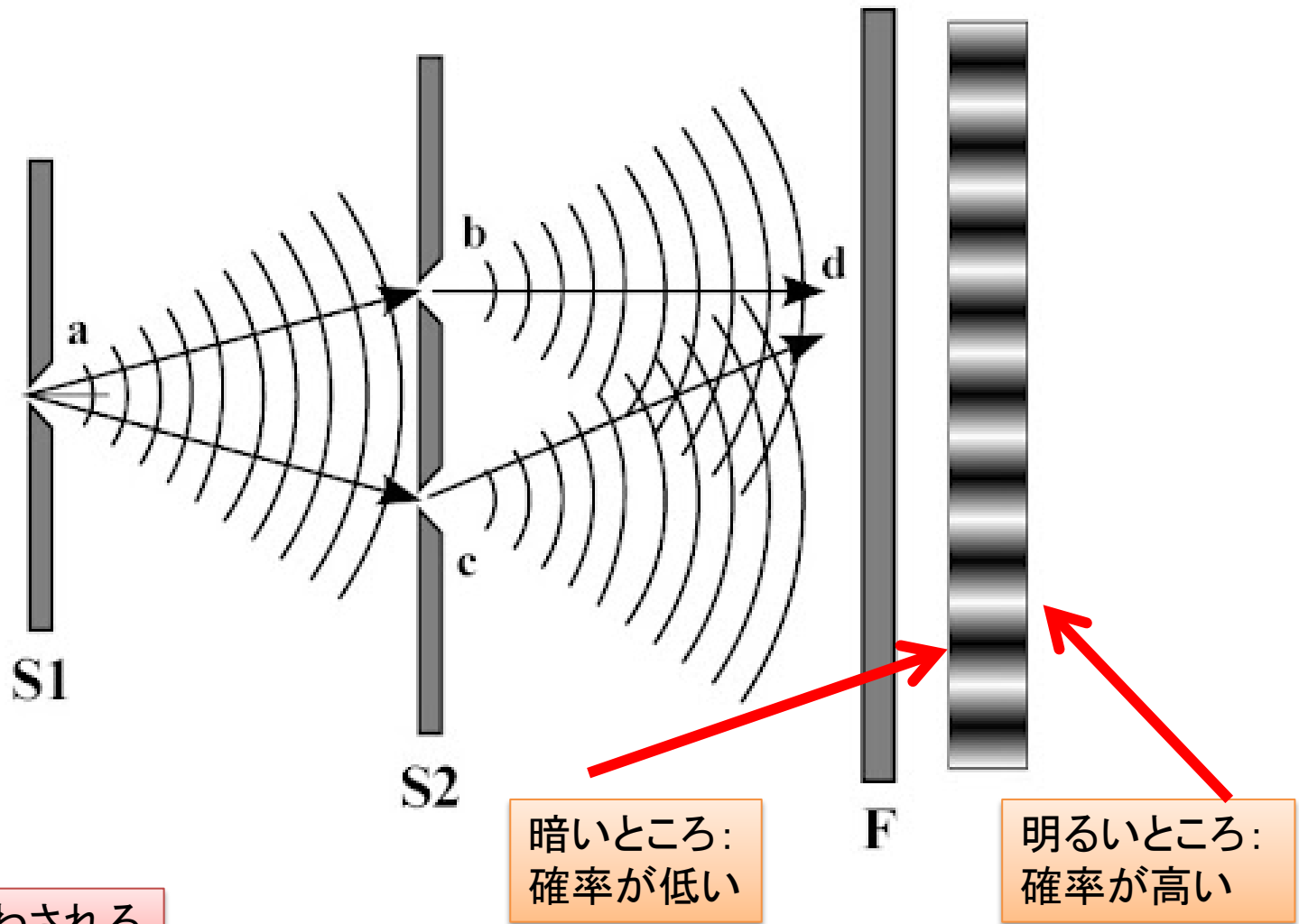
- 電子の波動性
 - 電子回析
- 光の粒子性
 - 光電効果
 - コンプトン散乱

ミクロの世界ではすべて粒子と波動の性質をもつ

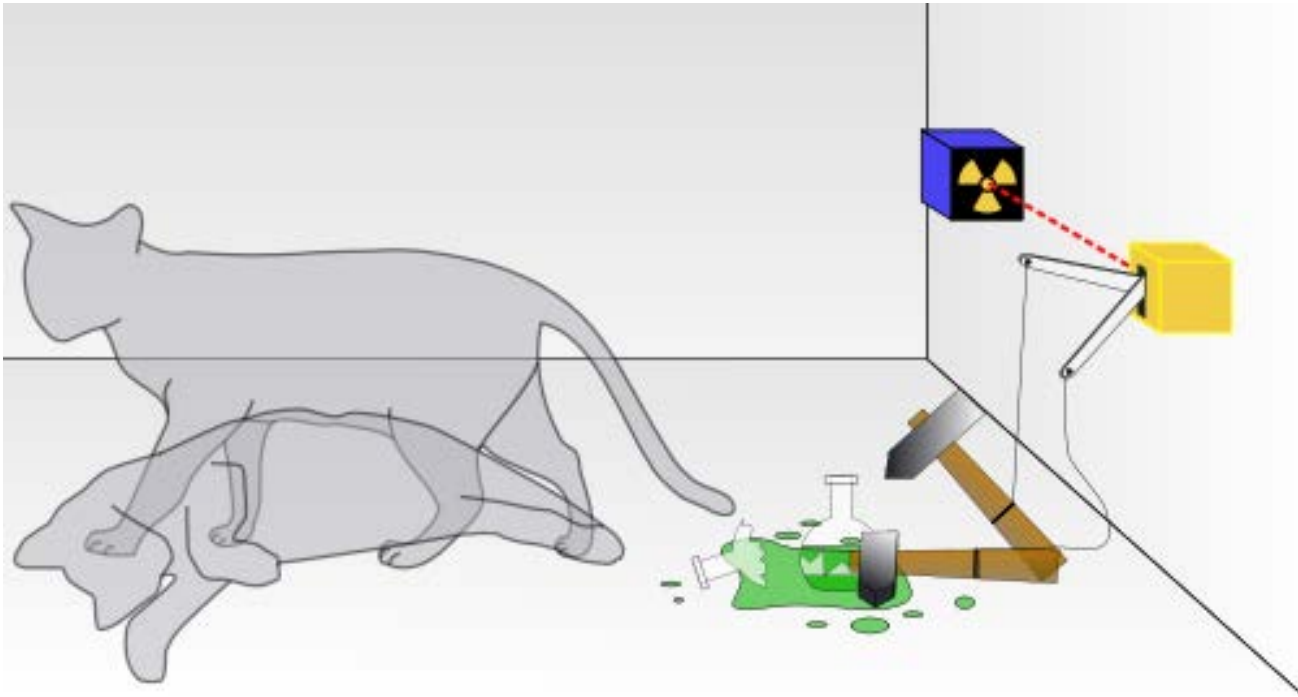
不確定性原理

- 粒子の位置を定めようと思うと、運動量が不確定になる
- 粒子の運動量を定めようと思うと、位置が不確定になる

波動性を持った粒子



シュレディンガーの猫

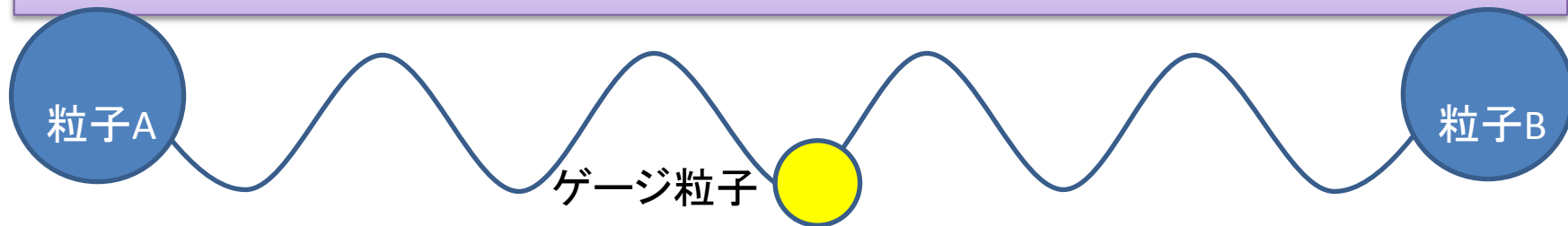


wikipedia (Credit: Dhatfield)

箱を開けてみるまで(観測するまで)猫が生きて
いる状態と死んでいる状態が重なり合った状態

自然界の4つの力

二つの粒子の間の力(相互作用)はゲージ粒子によって伝わる



力の種類	電磁力	弱い力	強い力	重力
力の源	電荷 electric charge	弱荷 weak charge	色荷 color charge	質量 mass
力を伝える粒子	γ : フォトン	Z,W: ウィークボソン	g: グルーオン	(グラビトン)
古典論	電磁気学			一般相対論
量子論	量子電磁気学 (QED) ワインバーグ・サラム理論 (電弱統一理論)		量子色力学 (QCD)	未完成

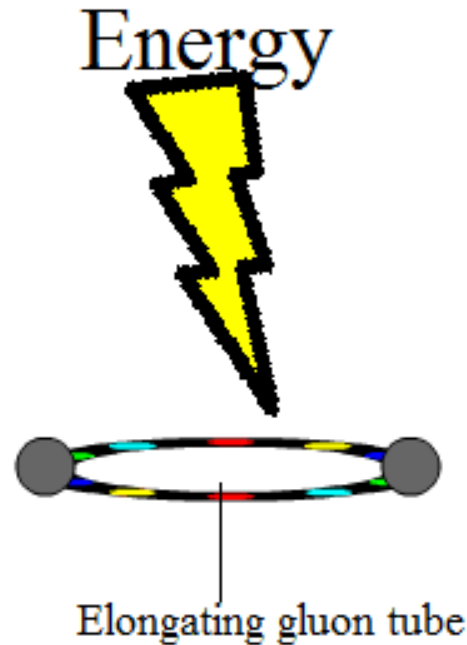
量子色力学 (Quantum chromodynamics)

- クォークとグルーオンはカラーチャージ(色荷)と呼ばれる量子数をもつ
- 色の3原色からの類推により赤、緑、青、と呼ぶ
- 色を持たない状態を白色とよび、中性子やパイ中間子等観測できる物質は白色の状態である
- 反クォークは補色に対応している(シアン、マゼンタ、イエロー)

なぜ色なの？

クォークの閉じ込め

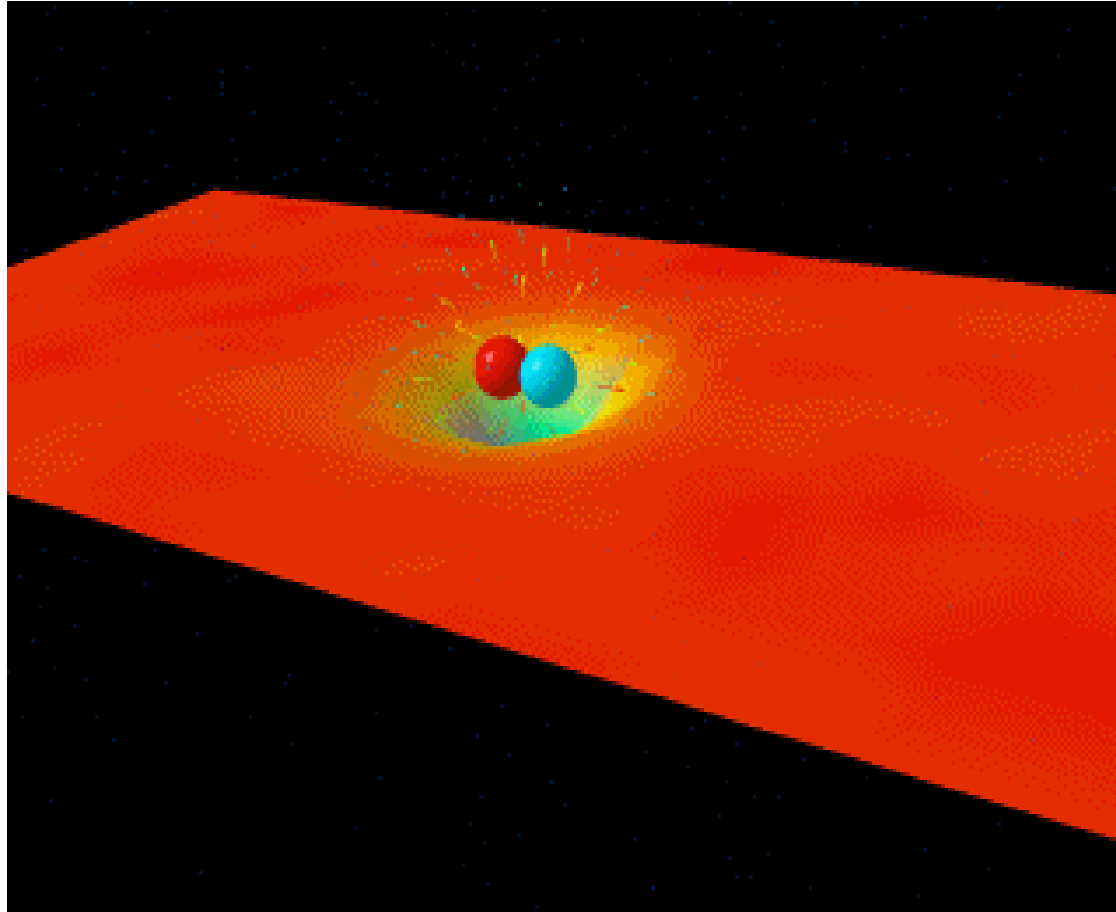
メソン(中間子)



wikipedia (Credit: Manishearth)

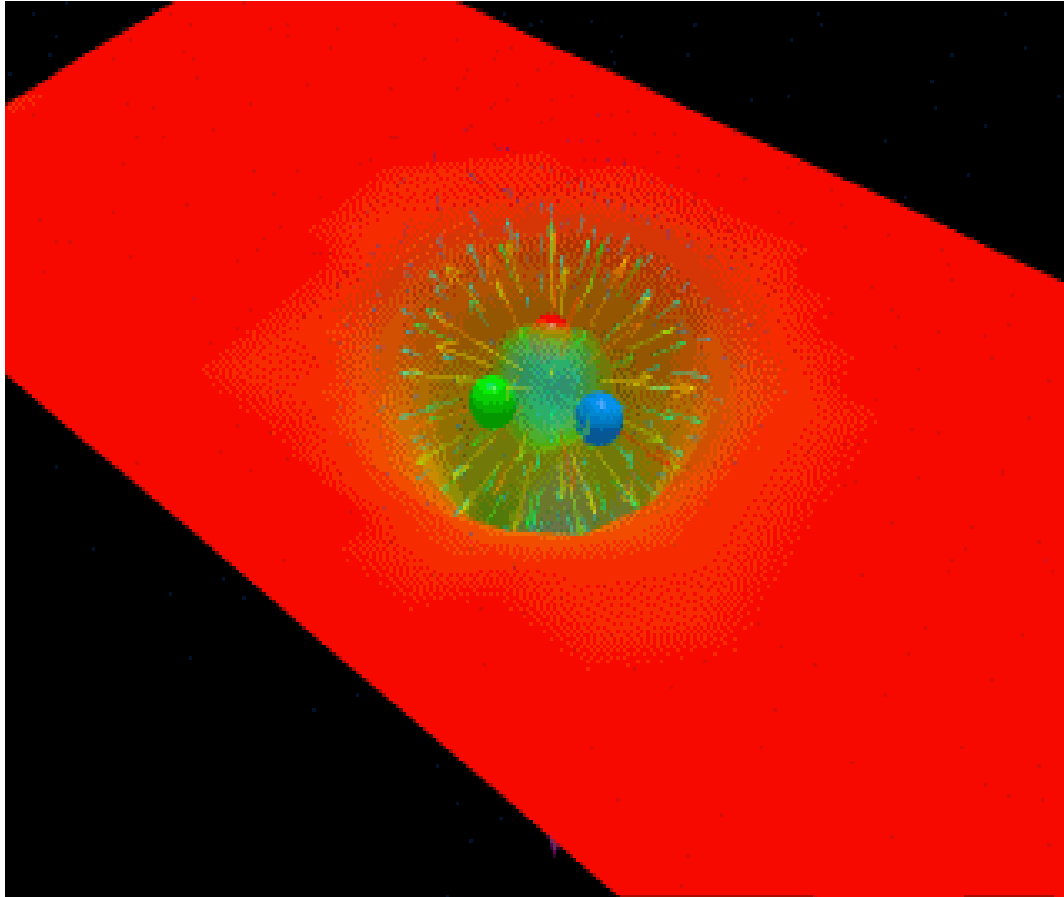
- クォーク単体は取り出せない
- 距離に比例したエネルギー
- 新しい粒子を作ったほうが得

フラックスチューブ (メソン)



Centre for the Subatomic Structure of Matter (CSSM) and Department of Physics, University of Adelaide, 5005 Australia
Copyright © 2003, 2004

フラックスチューブ (バリオン)



Centre for the Subatomic Structure of Matter (CSSM) and Department of Physics, University of Adelaide, 5005 Australia
Copyright © 2003, 2004

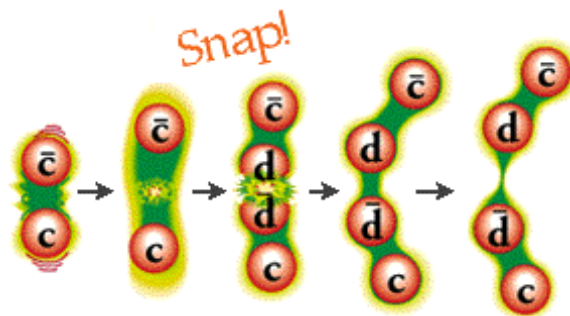
量子色力学 (Quantum chromodynamics)

漸近的自由性

ゲージ群とフレーバー数に依存、仮にクォークが16種類以上あるとこの性質はなくなる

結合定数がエネルギースケール依存
距離が小さくなると相互作用が弱くなる
距離が大きくなると相互作用が強くなる

QEDや重力の相互作用とは逆



QCD

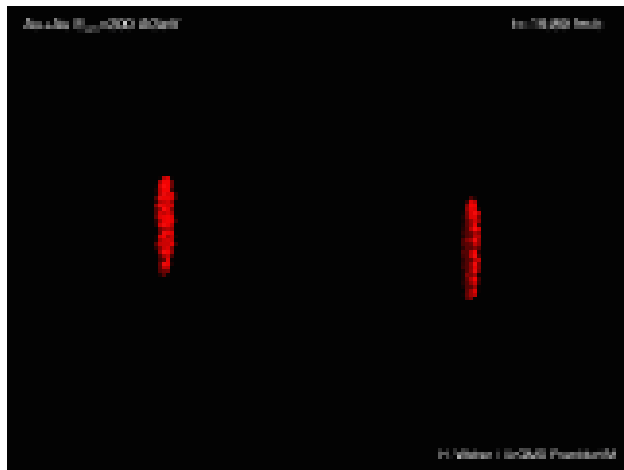
結合定数が大きくなると

解析的解法(“紙と鉛筆”)では解けない

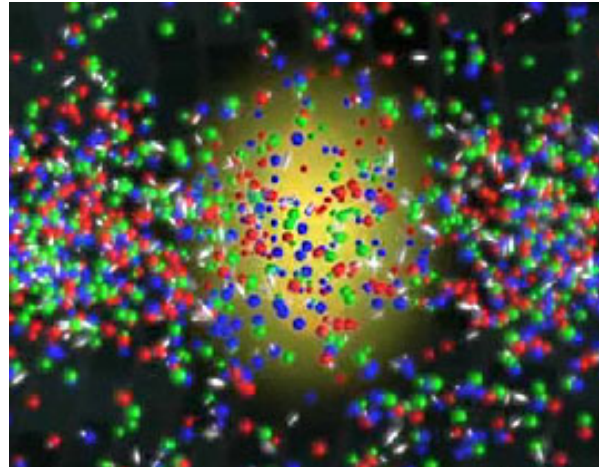


大規模シミュレーション

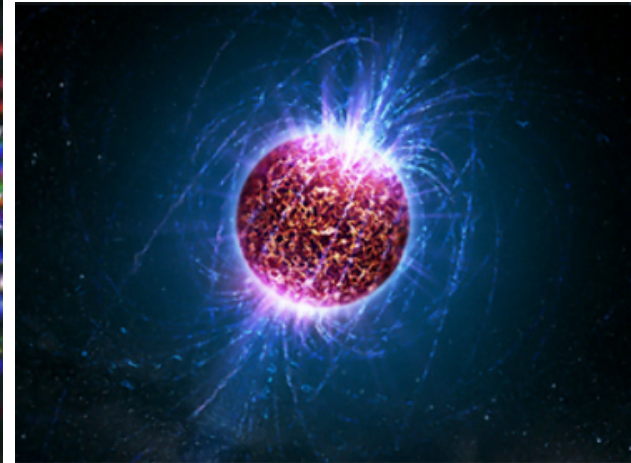
素粒子の世界をスパコン上で再現



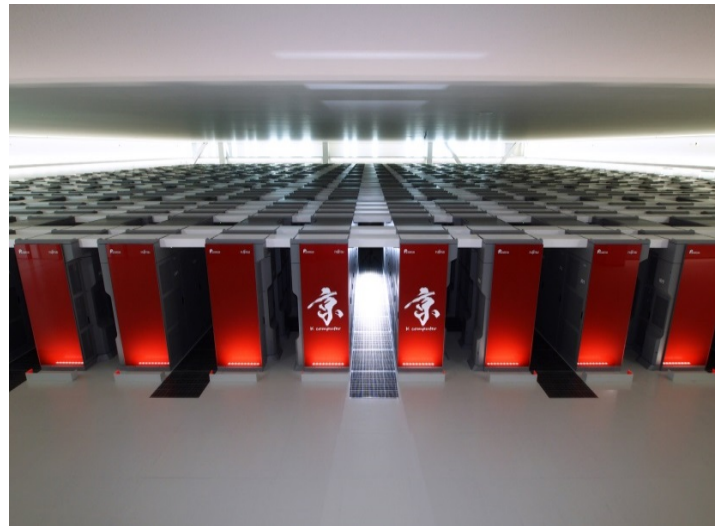
加速器実験(image:RHIC)



QGP(初期宇宙、image:BNL)

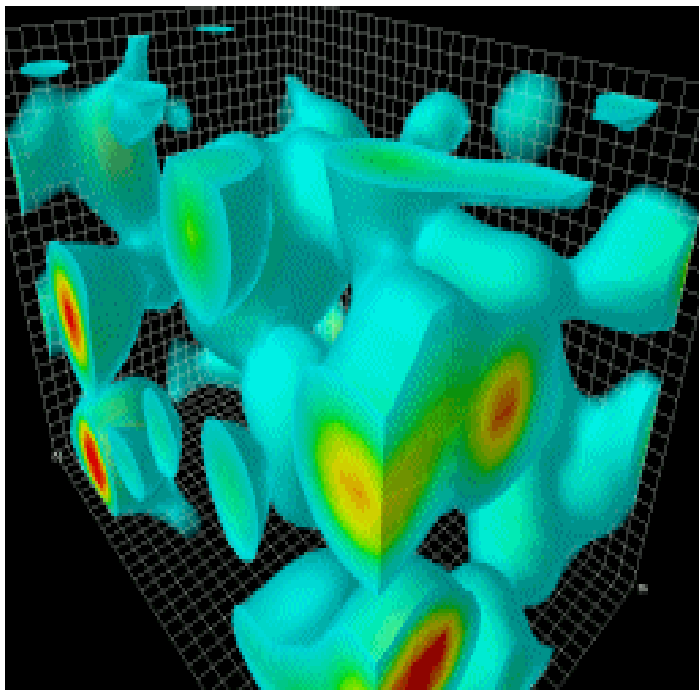


中性子星(credit: Casey Reed)

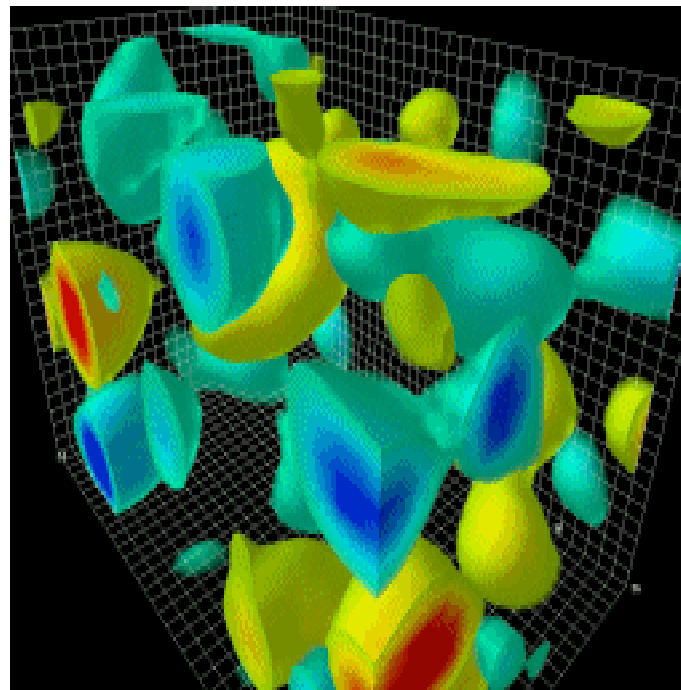


おしまい

格子QCDシミュレーションの結果



作用密度



トポロジカルチャージ密度

Centre for the Subatomic Structure of Matter (CSSM) and Department of Physics, University of Adelaide, 5005 Australia
Copyright © 2003, 2004

QCDの真空

これがそのまま物理量ではない