

未発見の素粒子 を探せ

- 理論の予言する粒子は見つかるか？
- 理論屋から見た未だ発見されていない素粒子の探索

2009年4月11日 @科学カフェ京都
植松 恒夫

talk plan

- プロローグ
- 物質の構成要素と階層構造
- 四つの基本的な力と標準模型
- 対称性とその破れ
- 高エネルギー加速器と素粒子
- 未発見粒子を探せ
- エピローグ

祝ノーベル物理学賞受賞



Yoichiro Nambu

Photo: University of Chicago

"for the discovery of the mechanism of spontaneous broken symmetry in subatomic physics"



Makoto Kobayashi

© The Nobel Foundation Photo: U. Montan

"for the discovery of the origin of the broken symmetry which predicts the existence of at least three families of quarks in nature"



Toshihide Maskawa

“Passion for symmetry” (対称性への情熱)

???

小林博士



坂東博士

益川博士

京都大学理学部助手時代の小林(後列左端)・益川(前列左)の両氏

@KEK Home Page

プロローグ

- キーワード「対称性」とは何か？
- その対称性から予測される未発見の素粒子は？



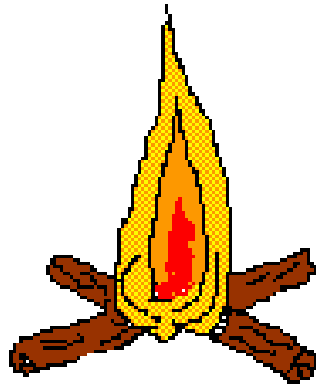
物質の構成要素と階層構造

万物の根源は何か？
それらを結びつける力は？

古代ギリシア 自然哲学

4大元素
土、水、空気、火

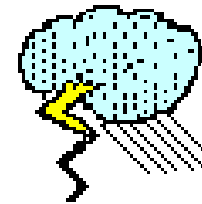
ギリシア哲学での4大元素



火



空気



水



土

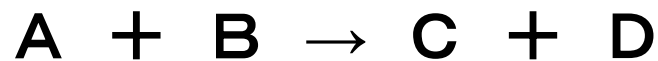
@PDG Home Page

19世紀

化学の発展



錬金術



反応で変化しないもの

原子

A-tom

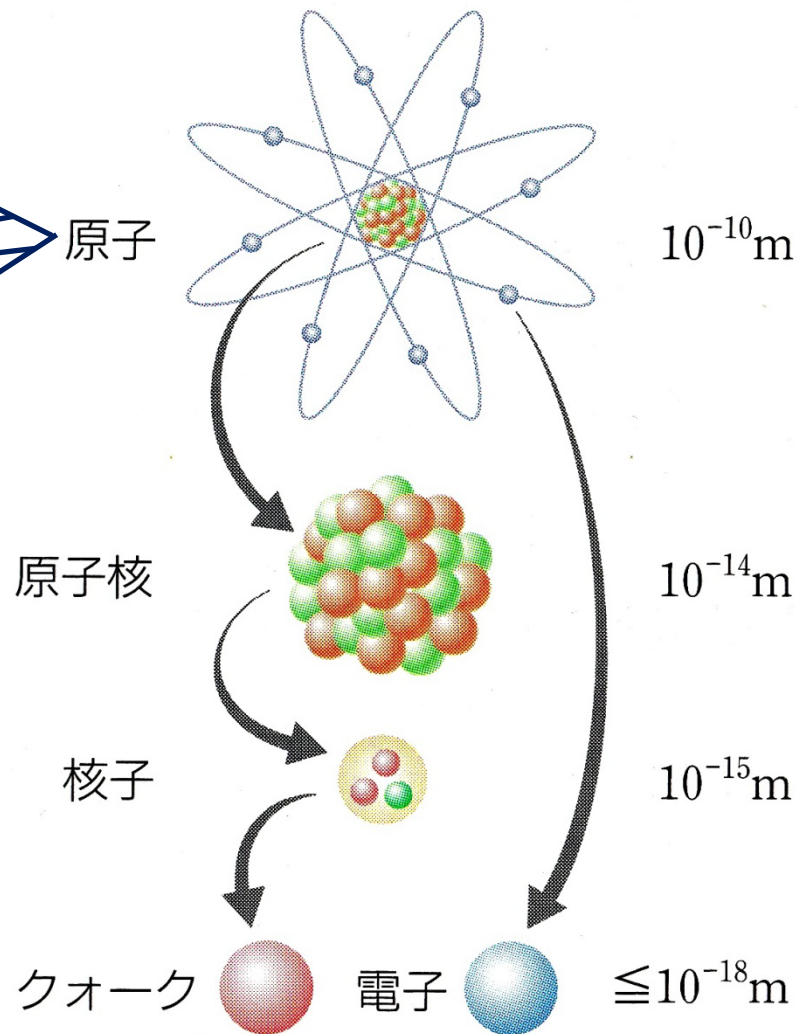
分割できないもの

あらゆる物質は原子から成る

自然界の階層性

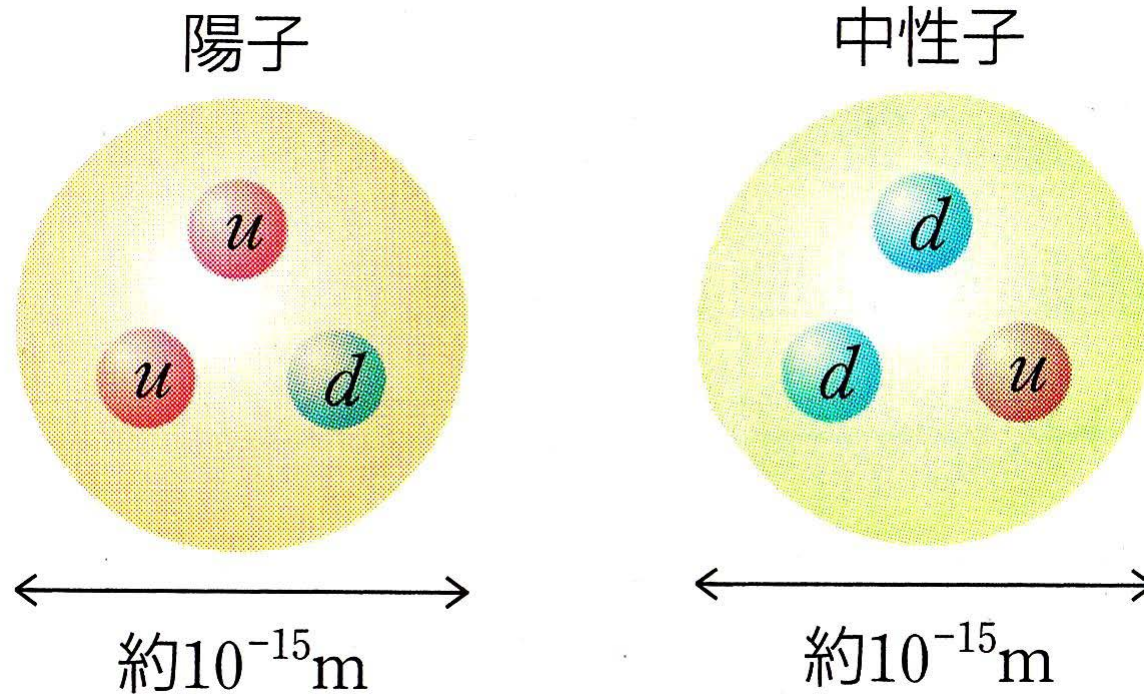


コップの水



@啓林館高校物理Ⅱ

クォーク3つからなる 核子：陽子と中性子



@啓林館高校物理Ⅱ

物質と反物質

物質を構成する粒子、
クォークとレプトン(電子の仲間)には反粒子が存在

反粒子では粒子と質量やスピンは
同じ、電荷などの量子数が逆符号

例: クォーク(q)の反粒子 $\rightarrow$ 反クォーク($\bar{q}$)

u クォーク 電荷 $+2/3$ バリオン数 $1/3$

$\bar{u}$ クォーク 電荷 $-2/3$ バリオン数 $-1/3$

電子 e^- の反粒子 $\rightarrow$ 陽電子(ポジトロン) e^+

陽子 p の反粒子 $\rightarrow$ 反陽子 $\bar{p}$

強い相互作用をする素粒子
ハドロン=クォークの複合状態

u	アップクォーク	電荷	$\frac{2}{3}e$
d	ダウクォーク	電荷	$-\frac{1}{3}e$

	バリオン	$B \sim qqq$	$p \sim uud$	$n \sim udd$
			陽子	中性子
	メソン	$M \sim q\bar{q}$	$\pi^+ \sim u\bar{d}$	$\pi^- \sim \bar{u}d$
			パイ中間子	

CP対称性の破れ

小林・益川理論

クォークは6種類(3世代)以上必要

$$\begin{array}{ccc}
 \frac{2}{3}e & \begin{bmatrix} u \\ d \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} c \\ s \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} t \\ b \end{bmatrix} \\
 -\frac{1}{3}e & & & \\
 \text{第1世代} & \text{第2世代} & \text{第3世代}
 \end{array}$$

CPの破れと小林・益川理論



「CP対称性」とは、素粒子の系にC変換(荷電共役変換, 電荷の符号を反転させる)とP変換(パリティ変換, 空間反転すなわち右手系と左手系を入れ替える)を同時に施したとき, すなわち「CP変換」に対して, 系の性質が変わらない対称性をさす。この「CP反転」は物質を反物質に変える働きをするので, CP対称性が破れていれば物質と反物質で振る舞いに違いが現れることになる。

小林誠・益川敏英両博士のCP対称性の破れに関する理論(1973年)では, クォークの種類(フレーバー)が6つ以上あれば, クォークの混合を通じて「CP対称性の破れ」が起こり得ることが示された。このときのクォークの混合を表す行列を, Cabibbo-Kobayashi-Maskawa Matrix(CKM-行列)と呼んでいる。小林・益川理論を検証すべくKEKに作られたBファクトリーで, 2001年, CP対称性の破れを示す実験結果を得た。同様の結果は米国スタンフォード加速器センターの実験でも確認された。

@KEK Home Page

クォークとレプトン

物質を構成する粒子

電荷

第1世代

第2世代

第3世代

$$\frac{2}{3}e$$

u

アップ

c

チャーム

t

トップ

$$-\frac{1}{3}e$$

d

ダウン

s

ストレンジ

b

ボトム

クォーク

$$0$$

ν_e

電子ニュートリノ

ν_μ

ミューオンニュートリノ

ν_τ

タウニュートリノ

$$-e$$

e

電子

μ

ミューオン

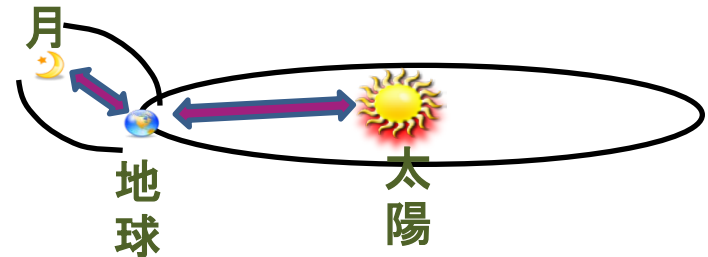
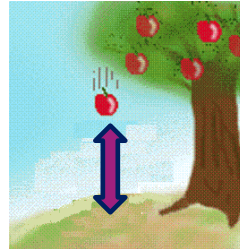
τ

タウ

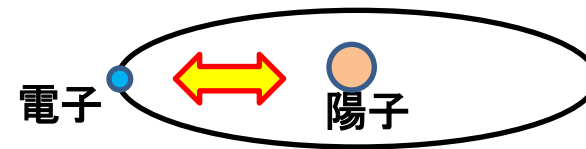
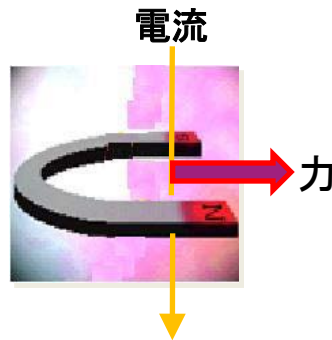
レプトン

四つの基本的な力と標準模型

万有引力=重力

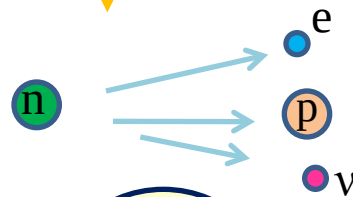


電磁気力



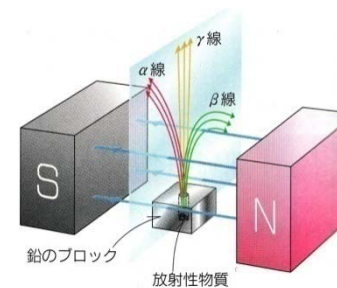
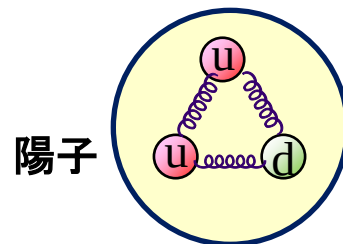
水素原子

弱い力



β崩壊

強い力



α, β, γ放射線

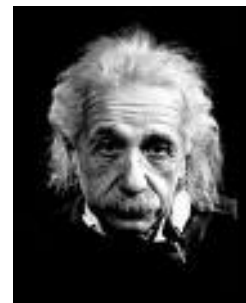
背後にある20世紀の物理



相対論

$$E=mc^2$$

エネルギーと質量の等価性



アインシュタイン



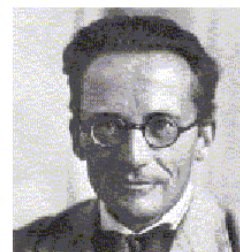
量子力学

$$\Delta x \cdot \Delta p \sim h/2\pi$$

位置と運動量の不確定性



ハイゼンベルク



シュレーディンガー



ディラック

@ The Nobel Foundation

湯川理論

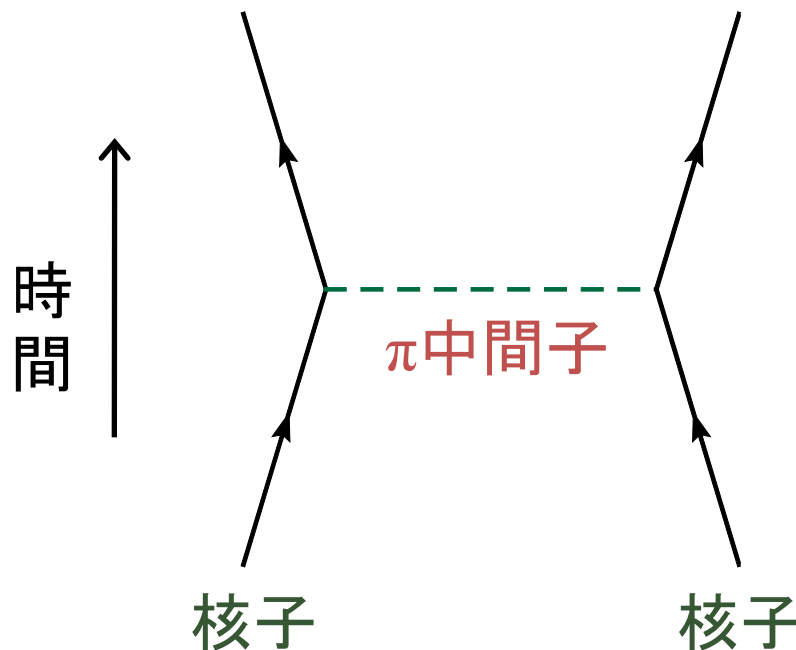


湯川博士

@YITP Home Page



核子の間にπ中間子が交換される



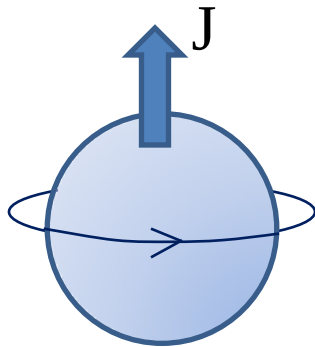
到達距離

$$\sim \frac{h}{m_{\pi}c}$$

$$\sim 10^{-15} \text{ m}$$

$$m_{\pi} \sim 200m_e$$

素粒子のスピン



素粒子は「自転」により固有の角運動量
スピン (Spin) をもつ $\hbar/2\pi$ を単位として
スピンはとびとびの値 $J=0, 1/2, 1, \dots$ をとる

整数スピン $J=0, 1, 2, \dots$ の粒子

ボソン (ボーズ粒子)

半整数スピン $J=1/2, 3/2, \dots$ の粒子

フェルミオン (フェルミ粒子)

物質を構成する基本粒子



クォークとレプトン $J=1/2$

基本粒子の間の力を媒介する粒子



ゲージ粒子 $J=1, 2$

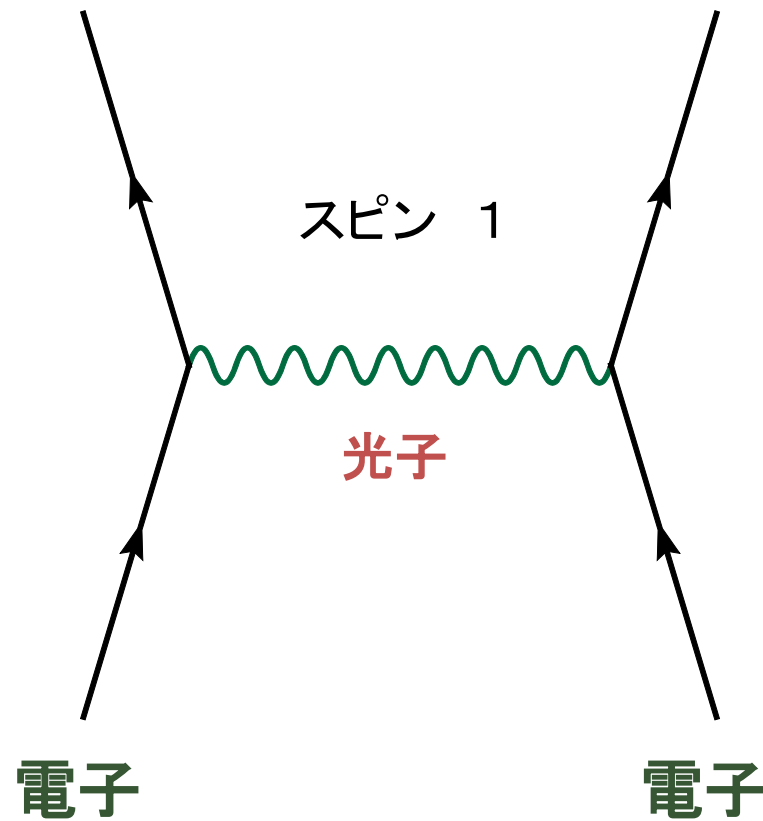
基本粒子間の相互作用はスピン1(又は2)のゲージ粒子によって媒介される

相対論と量子力学を融合した「場の量子論」で記述される。ゲージ対称性を課すことで「ゲージ理論」となる。ゲージ場の原型は電磁場 A_μ

これから電場 $\vec{E}$, 磁場 $\vec{B}$ が導かれる

A_μ をスカラー関数の微分だけずらし, かつ物質場の位相を動かしても理論が不変 **ゲージ対称性**

強い相互作用、電磁相互作用、弱い相互作用はゲージ理論で記述される。→「標準模型」

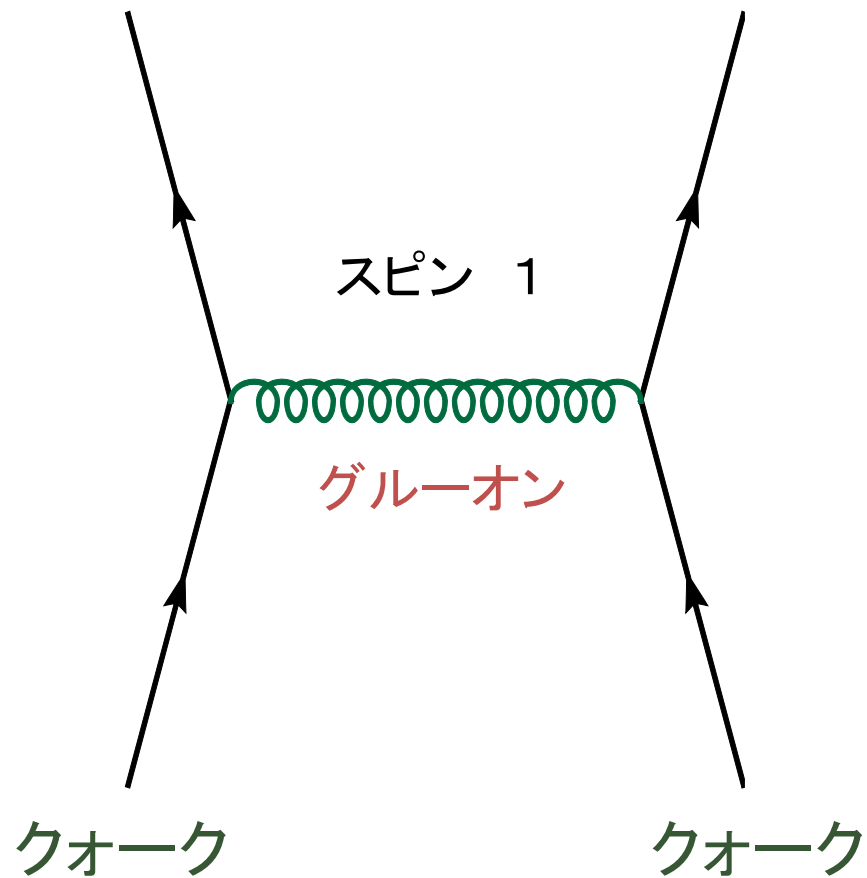


電磁気力

到達距離

$\sim \infty$

$m_\gamma \sim 0$



到達距離

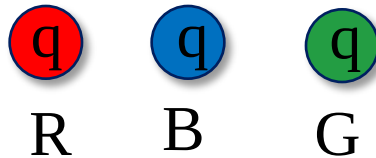
$\sim 10^{-15} \text{ m}$

強い力

クォークとグルーオンはカラー電荷を持つ

クォークのカラー荷

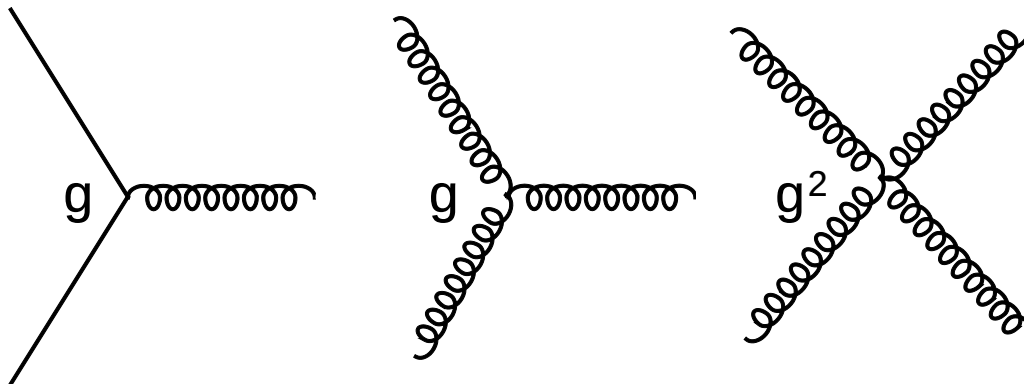
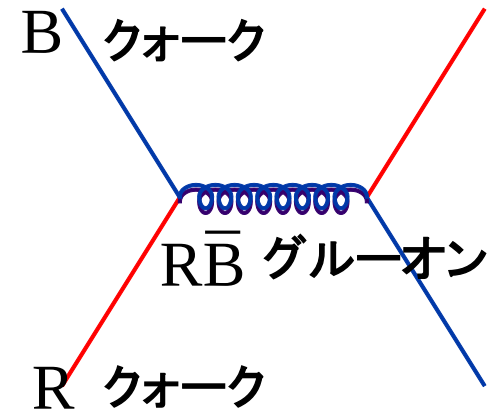
三原色(本当の色ではない)



グルーオンのカラー荷

8色

$$3(R,B,G) \times \bar{3}(\bar{R},\bar{B},\bar{G}) - 1(W) = 8$$

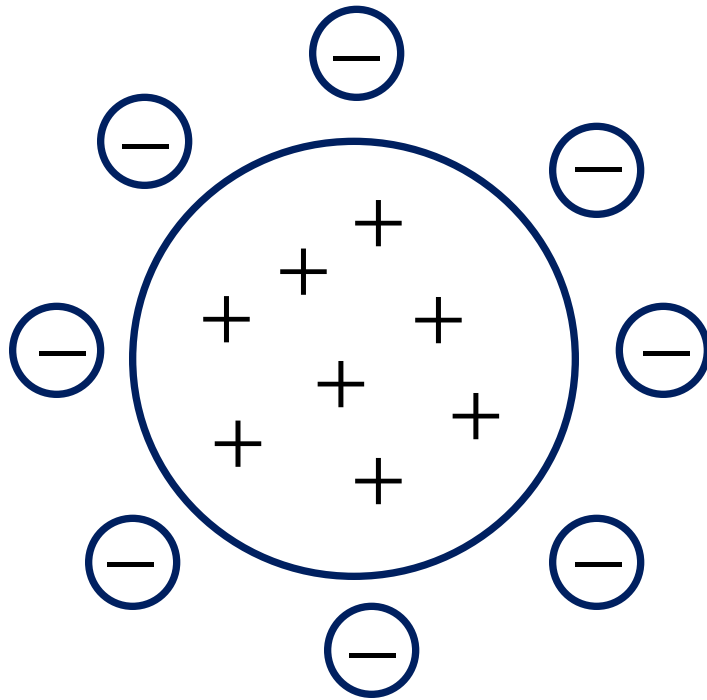


グルーオン自身が
カラー荷を持つので
自分自身と相互作用する



漸近的自由性

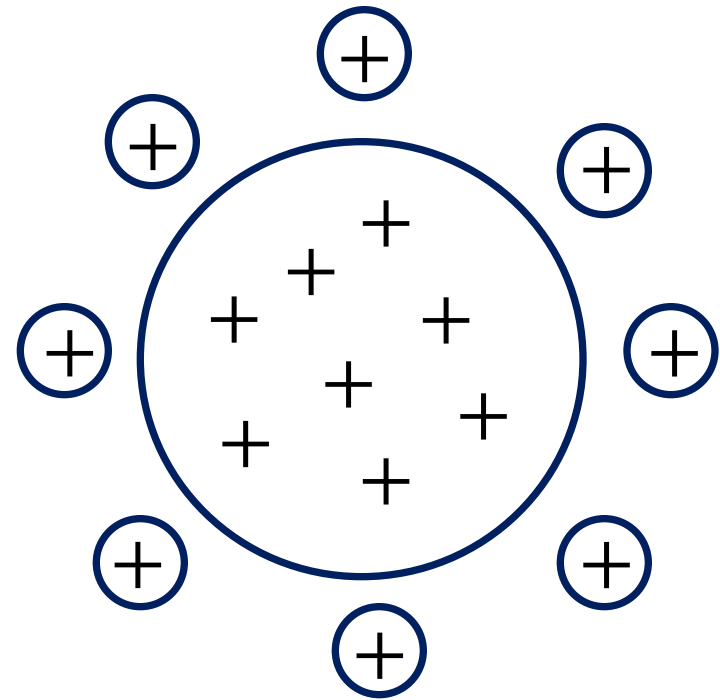
電磁相互作用 (QED)



しゃへい効果

近づくとき強い結合定数

強い相互作用 (QCD)

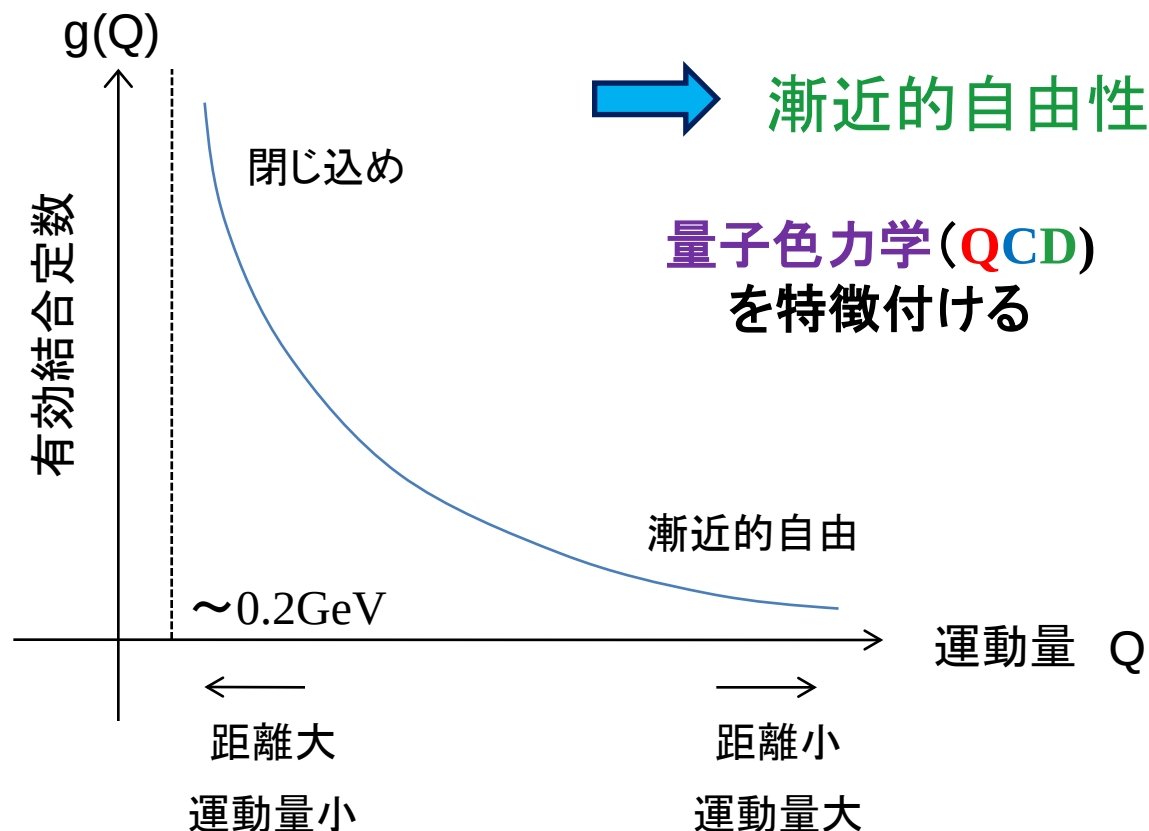


反しゃへい効果

近づくとき弱い結合定数

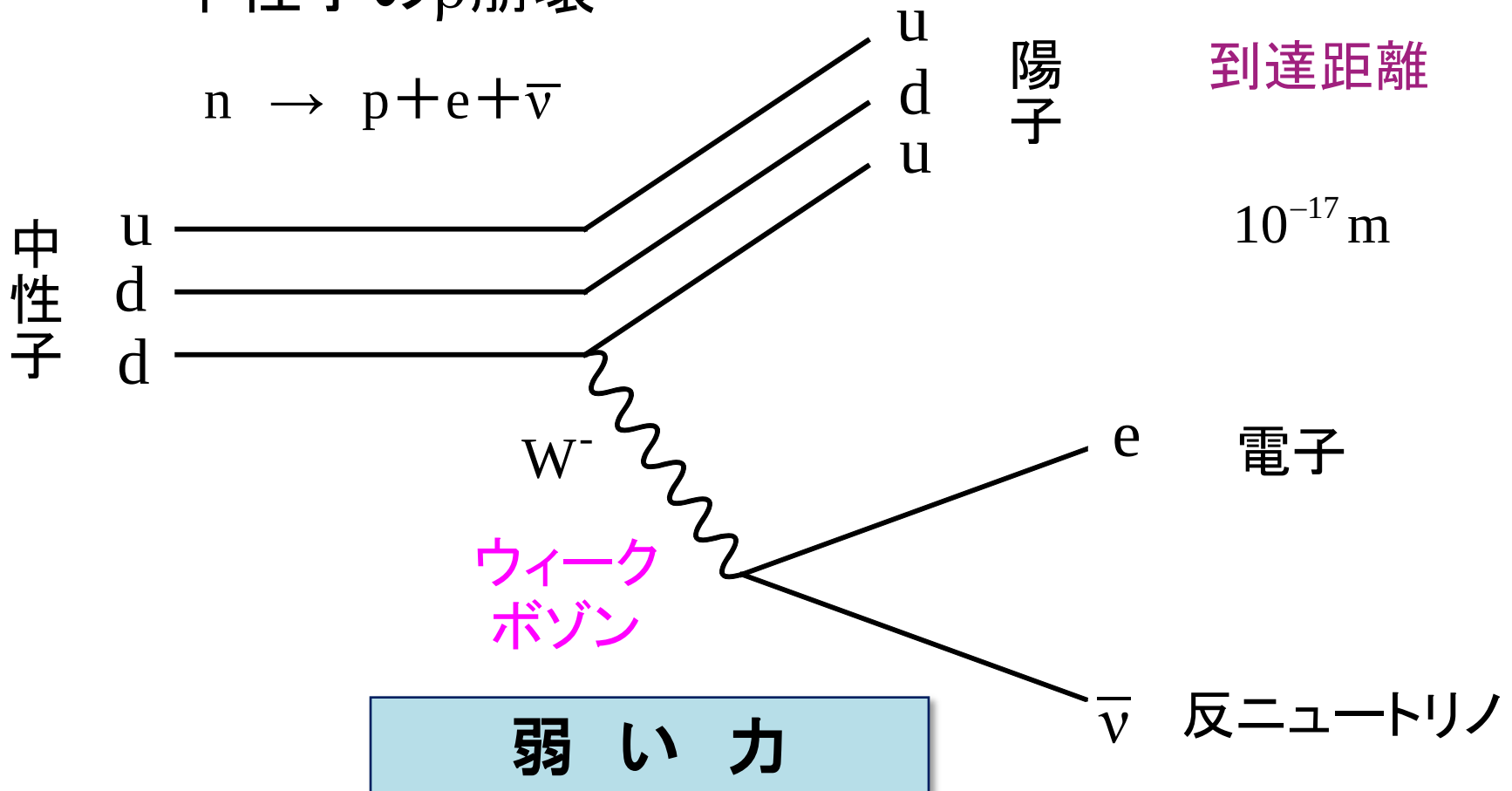
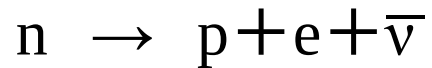
距離とQCDの有効結合定数の強さ

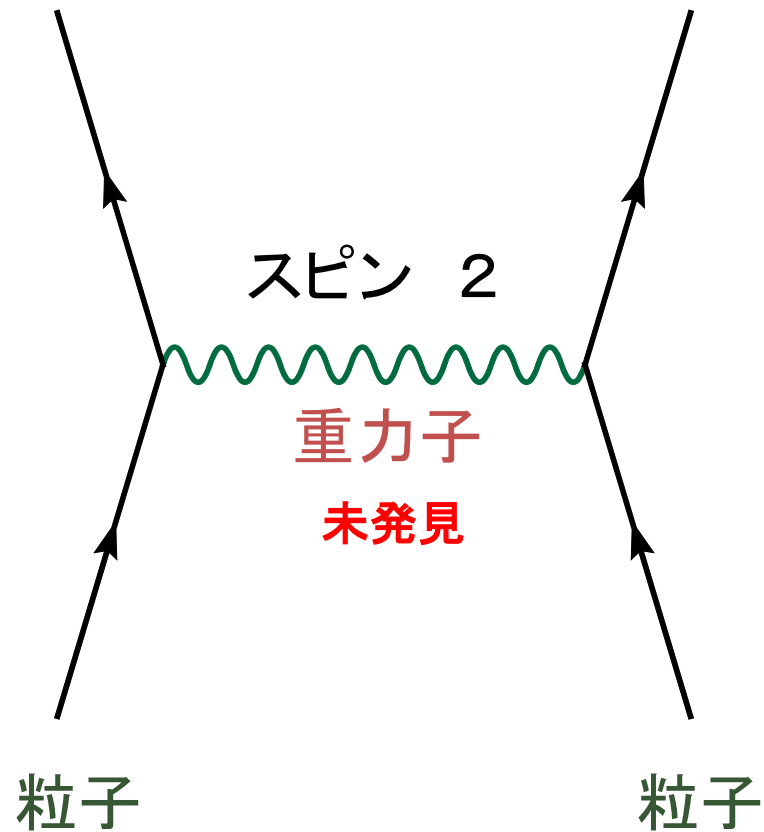
クォークどうしが近づけば近づくほど力が弱くなり
また離れれば離れるほど力が強くなる



ニュートリノを生成

中性子のβ崩壊





到達距離

~ ∞

自然界の四つの基本的な力

とそれを 媒介する粒子

相互作用	強 さ	ゲージ粒子	到達距離
重力	10^{-39}	グラヴィトン	∞
弱い力	10^{-5}	弱ボゾン $W^{\pm}$, Z	10^{-17} m
電磁気力	10^{-2}	光子(γ)	∞
強い力	1	グルーオン	10^{-15} m

標準模型は実験を極めてよく説明→これまで矛盾なし

標準模型

$SU(3) \times SU(2) \times U(1)$ ゲージ理論

強

電・弱

物質粒子

ゲージ粒子

ク
ォ
ーク



レ
プ
トン



第
一
世
代

第
二
世
代

第
三
世
代



グルーオン

強い力



光子

電磁気力



ウィークボソン

弱い力



ヒッグス粒子

未発見

重力



グラヴィトン
(未発見)

特殊相対論

すべての慣性系で物理法則は同じ

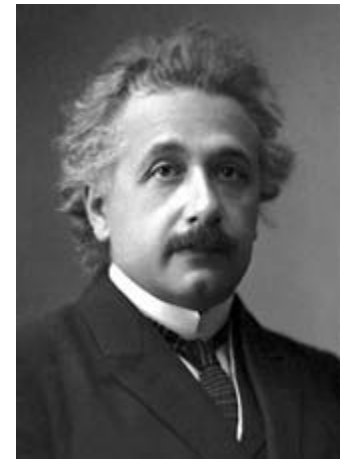
光速度不変の原理

ローレンツ変換に対する不変性

質量とエネルギーの等価性

$$E=mc^2$$

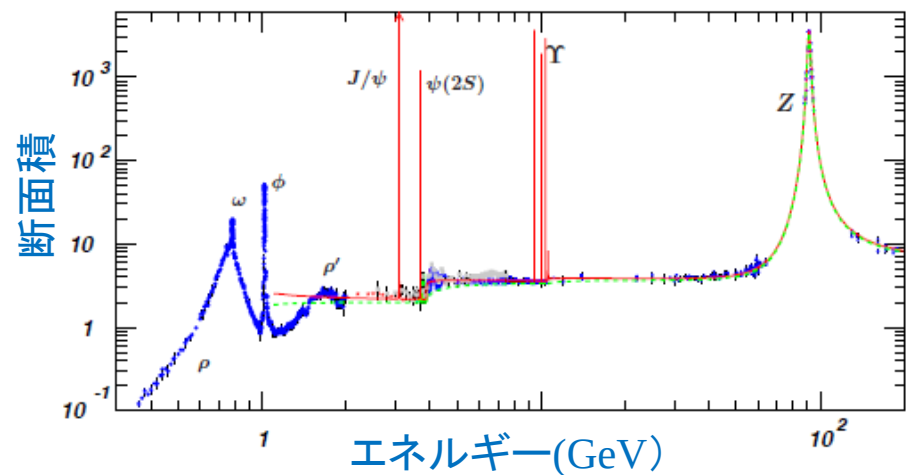
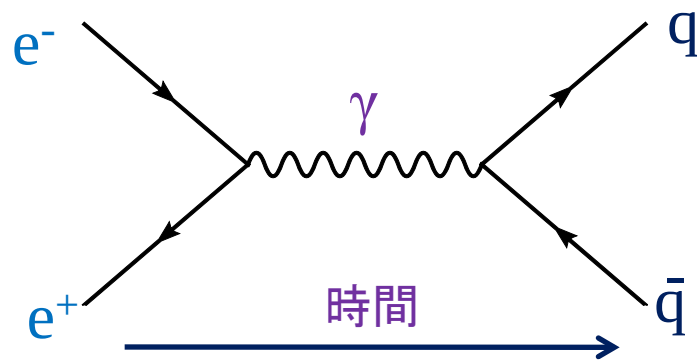
質量を(エネルギー)/ c^2 で表す



Einstein

@The Nobel Foundation

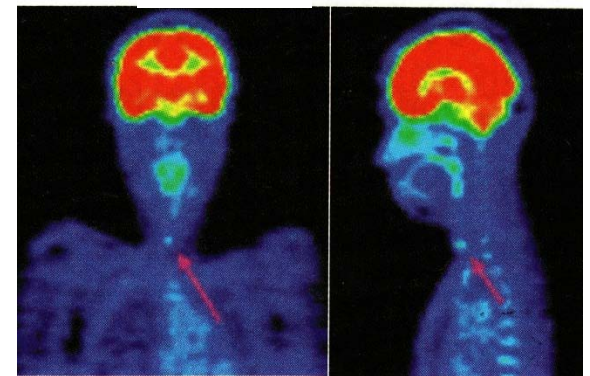
質量 m の粒子と反粒子は衝突すると合体して消滅(対消滅)し、 $2mc^2$ に等しい γ 線などのエネルギーに転化



応用例 PET 陽電子放出診断装置

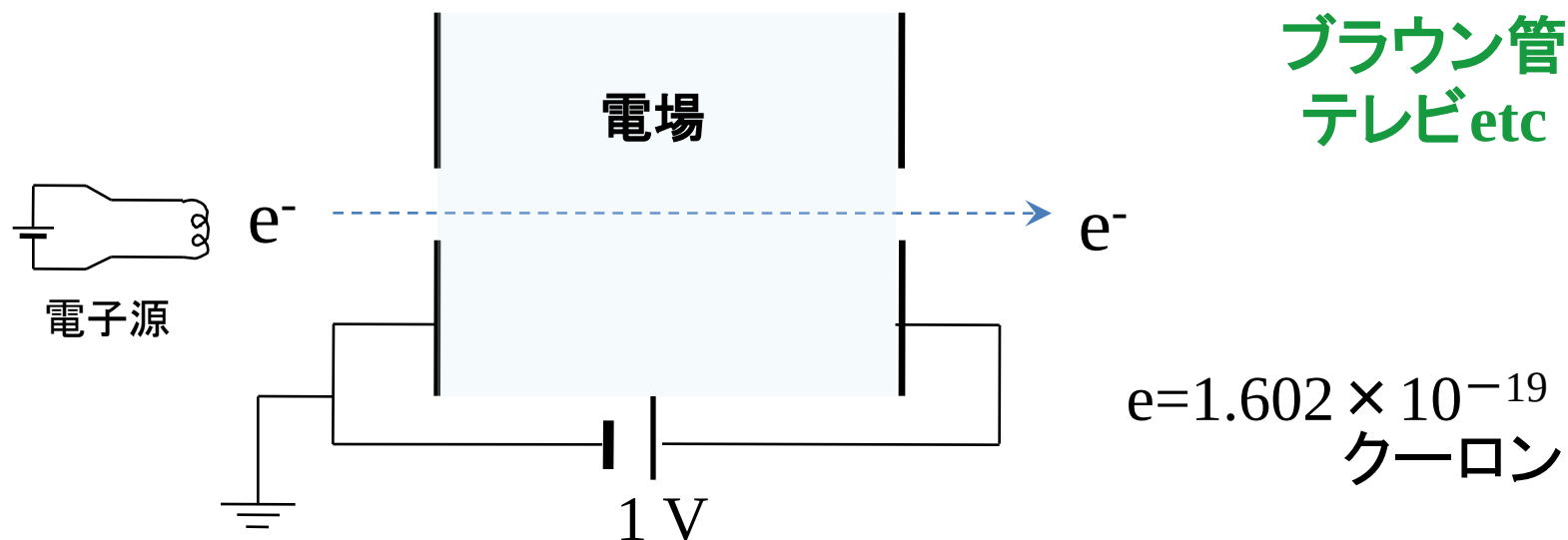
ガン細胞は、正常細胞に比べてブドウ糖を多く取り込む性質がある。ブドウ糖と非常によく似たポジトロンを放出する放射性核種であるFDGという薬剤を静脈から注射する。

活発なガン細胞から放出されるポジトロンが電子と対消滅して、互いに反対方向に出る2個の光子(放射線)をとらえ画像化して診断するのがPET装置である。



PETによる診断画像の例

エネルギーの単位を電子ボルトで表す



1 電子ボルト = 1 eV = 1.602×10^{-19} ジュール

1 ギガ電子ボルト = 1 GeV = 10^9 eV = 10億電子ボルト

クォークとレプトンの質量

u クォーク	3 MeV/c ²
d //	6 MeV/c ²
s //	120 MeV/c ²
c //	1.3 GeV/c ²
b //	4.2 GeV/c ²
t //	174 GeV/c ²
e 電子	0.51 MeV/c ²
μ ミューオン	106 MeV/c ²
τ タウ粒子	1.77 GeV/c ²
ν _e 電子ニュートリノ	< 2.5 eV/c ²
ν _μ ミューニュートリノ	< 170 keV/c ²
ν _τ タウニュートリノ	< 18 MeV/c ²

1keV = 10³ eV kilo

1MeV = 10⁶ eV Mega

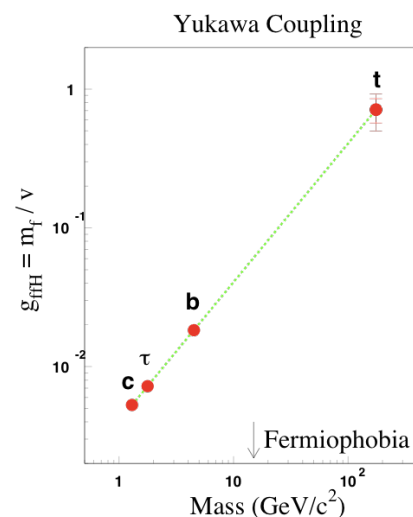
1GeV = 10⁹ eV Giga

1TeV = 10¹² eV Tera

W 80.4 GeV/c²

Z 91.2 GeV/c²

g, γ 質量ゼロ

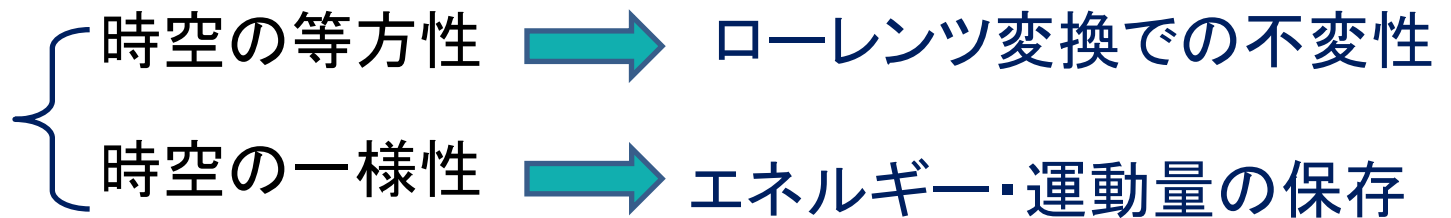


対称性とその破れ

対称性とは、素粒子の内部対称性や時空にある種の変換をほどこしたときに、系がその変換に対して不変であることをさす。例えばゲージ変換や荷電共役変換やパリティ変換がその例。

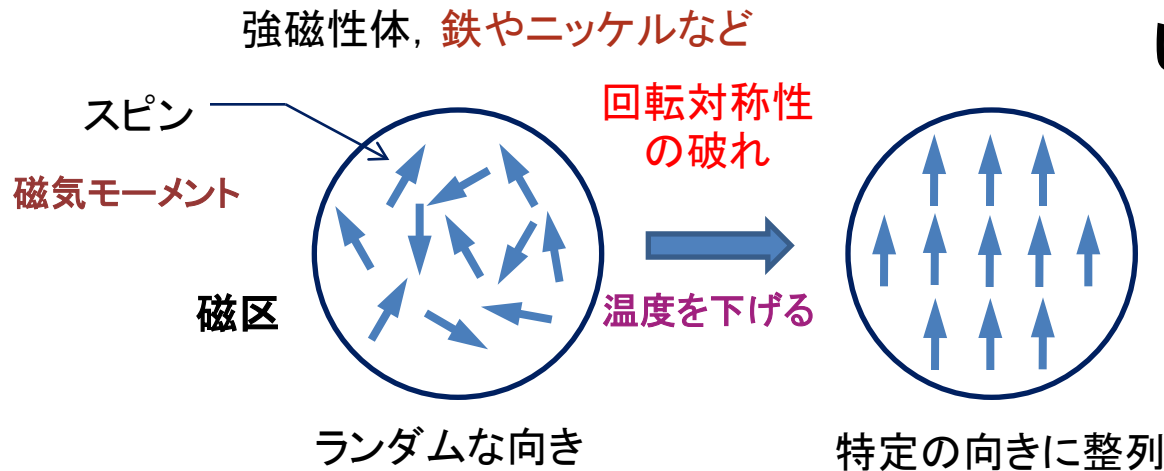
荷電共役変換 (Charge Conjugation, **C**): 粒子を反粒子へ反転する)、パリティ変換 (Parity, **P**): 物理系の鏡像を作る)を意味し、**CP**はこれら2つの演算子の積である。

相対論での時空の対称性



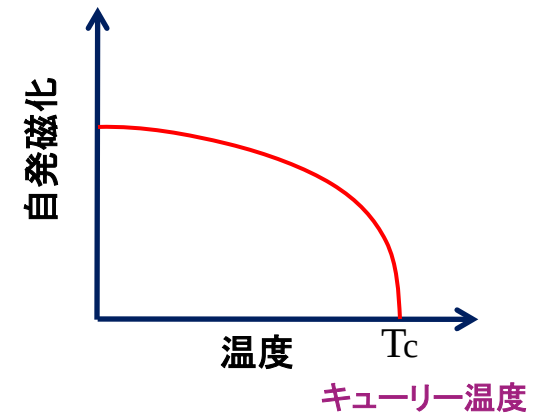
対称性の自発的破れ

磁性体の自発的磁化



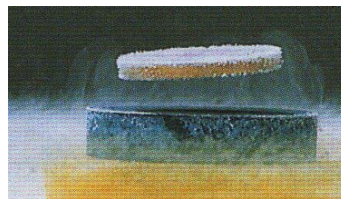
水が氷になるetc

いわゆる相転移



超伝導体

極低温で電気抵抗ゼロ



磁気浮上

マイスナー効果

未発見の素粒子を探せ

波動関数の位相(ゲージ)
の対称性の破れ

超伝導のBCS理論

カイラル対称性の自発的破れ



Photo: University of Chicago

南部理論 超伝導のBCS理論の考え
方を素粒子の世界に適用

核子が質量を持つ機構
 π 中間子がなぜ軽いか を説明

超伝導がスピンと運動量が逆向きの電子の対(クーパー対)が真空中に凝縮してエネルギーギャップが生じるのと同様に、4体のフェルミ粒子の相互作用によって、フェルミオンの対が真空中に凝縮してカイラル対称性の自発的破れが起きる



右巻きと左巻きのスピン成分
の独立な変換について不変

質量の起源

クォークやレプトン、ゲージ場などの
素粒子はなぜ質量を持ちうるか？

→ 一種のエーテル説の復活？

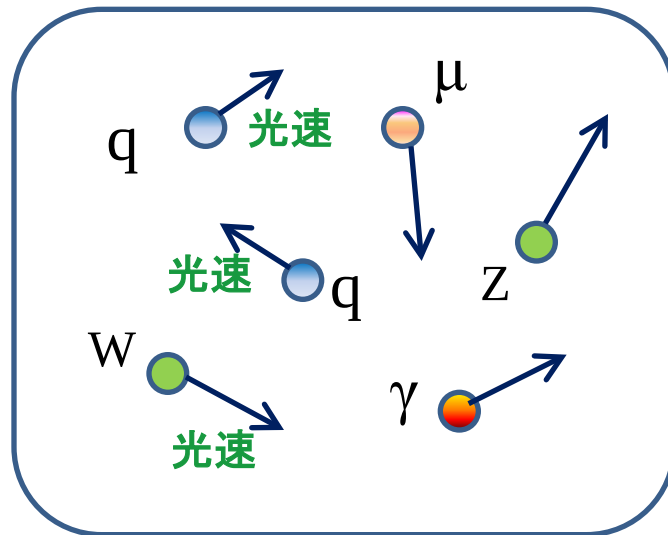
ヒッグズ粒子の場が真真空に満ちる

座標系によらないスカラー量

比喩的説明: 質量の起源

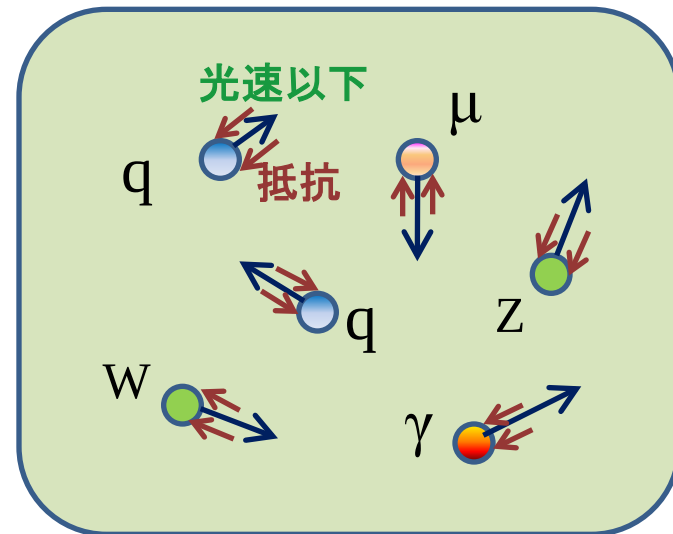
質量はヒッグスとの結合
の強さに比例する

ヒッグズ粒子が空間に満ちていると、各素粒子はこの粒子との結合の大きさに応じて、その中を通過するときに「抵抗」を受ける。この度合いに対応して質量を得ることになる。



ヒッグス場なしの場合

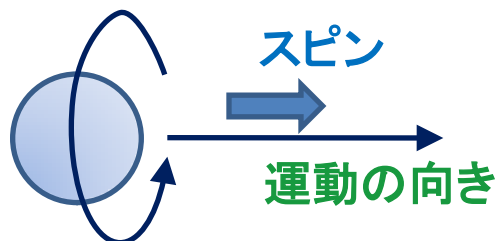
質量ゼロで光速で動く



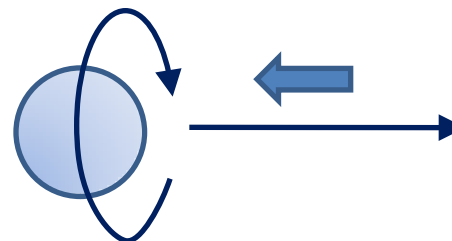
ヒッグス場が満ちている場合

質量が生じて光速以下で動く

クォーク/レプトンの 質量の起源



右巻き(ヘリシティ +)



左巻き(ヘリシティ -)

質量ゼロのニュートリノは**左巻き**しかない
質量ゼロの粒子は光速で飛んでいるので
左巻きと右巻きが混じり合うことはない

ヒッグス粒子はクォークやレプトンと
湯川相互作用をして左巻きと右巻き
を混ぜ合わせる

→ 質量を生じさせる

ゲージ粒子の 質量の起源

質量ゼロのゲージ場は横偏極のみでヘリシティ
が+, -の二つしかない(例: 電磁場)

縦偏極が現れると質量がゼロでない

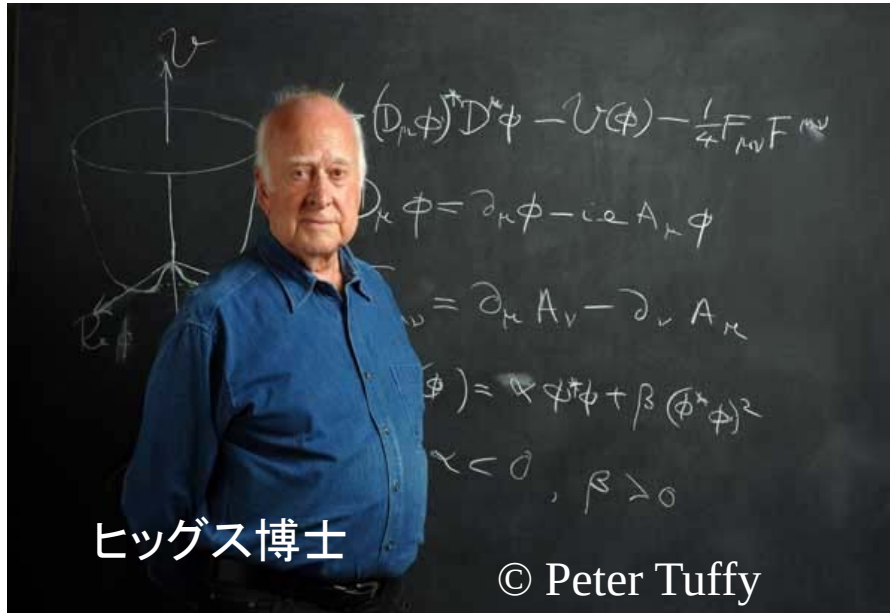
ヒッグスとゲージ場が相互作用
をしていると, ヒッグスが凝縮し
たとき, ゲージ場に吸収されて
ゲージ場の縦成分を与える

→ 質量を生じさせる

真空とは



エネルギーが最低の状態



ヒッグス博士

© Peter Tuffy



Robert Brout



François Englert

Brout-Englert-Higgs mechanism (1964)

ヒッグス場がノンゼロの値
をとって真空を満たす方が
エネルギーが低くなる



ゲージ対称性の自発的破れ

ゲージ対称性の自発的破れ
ゲージ場が質量を獲得する

ヒッグス場は複素場の2重項で
実数で数えて、4つの自由度
電・弱理論の W^+ , W^- , Z の3
つのゲージ場が質量をもち、
電磁場 γ が質量ゼロで、 $4-3=1$
の吸収されない一つの自由度
がヒッグス粒子に対応する

H 中性でスピン0, 質量
未発見 は114GeV以上

フェルミオンとボソン

フェルミ統計とボース統計

パウリの排他律



W. Pauli

フェルミ粒子(フェルミオン)は同じ状態
に粒子は一つしか入れない。



原子が形作られる

ボース粒子(ボソン)は同じ状態に粒子
は何個でも入れる。

超対称性 (Supersymmetry)

フェルミオンとボソンを結びつける対称性

もっともシンプルな超対称性では

整数スピン

半整数スピン

0, 1, 2, ...

結びつける

1/2, 3/2, ...

ボゾン



フェルミオン

B

$\tilde{F}$

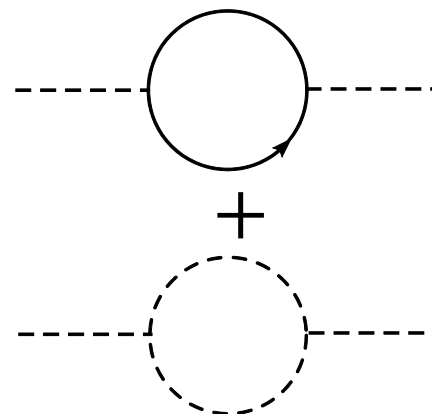
超対称変換
スピンを1/2変える

Q

$\tilde{B}$

F

量子ゆらぎを抑える



単純な超対称性では

自然界にこの超対称性があると素粒子の数は**2倍**に増える

素粒子に対しスピンの1/2だけ異なる相棒が存在

超対称性粒子(スーパー・パートナー, supersymmetric particle)

クォーク(quark) → スカラー・クォーク (squark)
 q (J=1/2) (J=0) $\tilde{q}$

電子(electron) → スカラー電子 (selectron)
 e (J=1/2) (J=0) $\tilde{e}$

光子(photon) → フォティーノ(photino)
 γ (J=1) (J=1/2) $\tilde{\gamma}$

グルーオン(gluon) → グルーイノ(gluino)
 g (J=1) (J=1/2) $\tilde{g}$

Wボソン → ウィーノ(Wino)

W (J=1) (J=1/2) $\tilde{W}$

Zボソン → ジーノ(Zino)

Z (J=1) (J=1/2) $\tilde{Z}$

グラヴィトン(重力子) → グラヴィティーノ

G (J=2) (J=3/2) $\tilde{G}$

ヒッグス → ヒグシーノ

H (J=0) (J=1/2) $\tilde{H}$

植松(uematsu) → 末松(suematsu) ???

超対称性が破れていなければ、
粒子と超対称性パートナーの質量は等しい

超対称性は破れていなければならない

なぜなら、もし超対称性が破れていなければ、**電子**のスーパーパートナーである**スカラー電子**が存在しなければならない。このような粒子は見つかっていない。

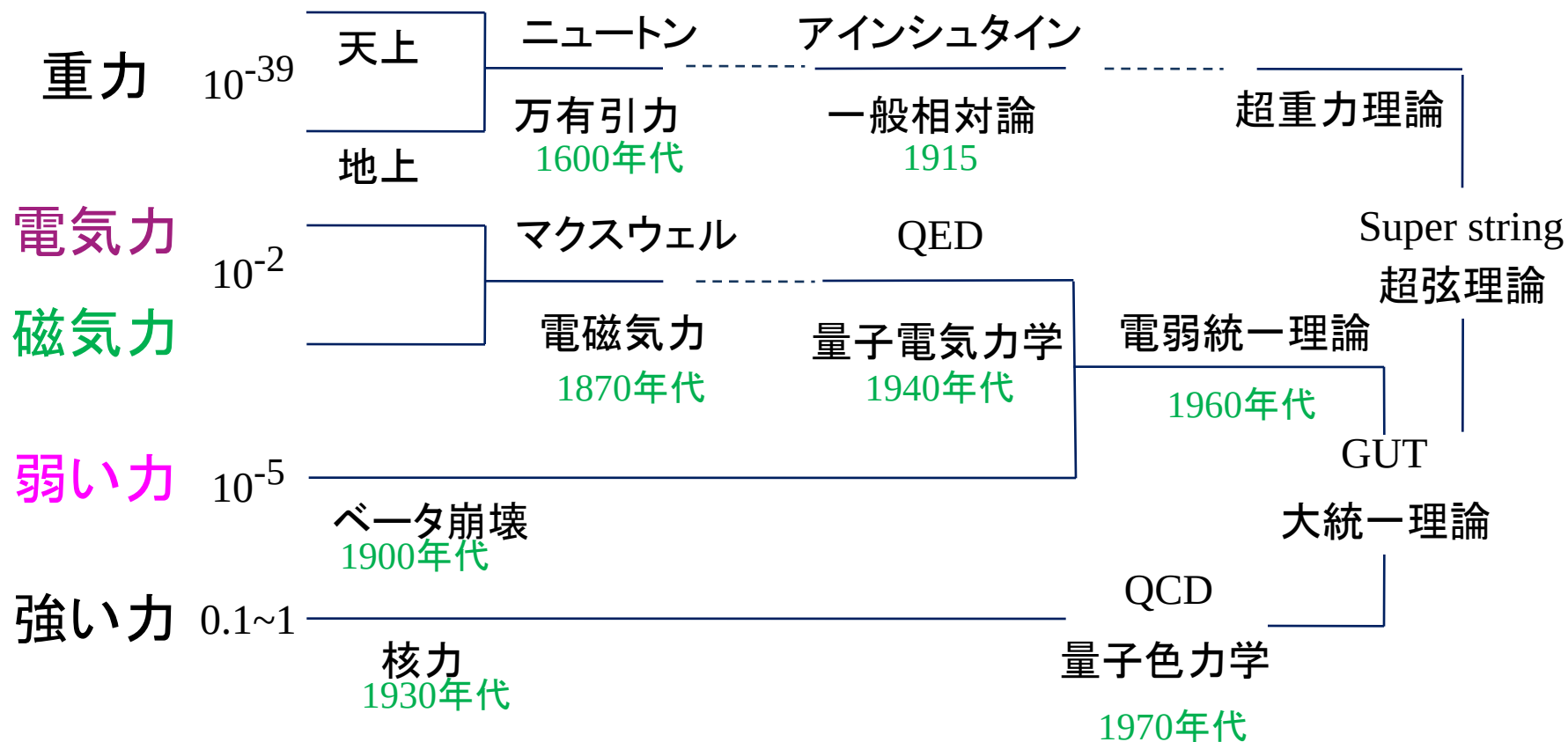
超対称性粒子(**ニュートラリーノ**:フォティーノ, ジーノ, ヒグシーノの混合)はダークマターの候補

WIMP(**ウィンプ** weakly interacting massive particle)
電磁気相互作用をせず電磁波で検出できない粒子

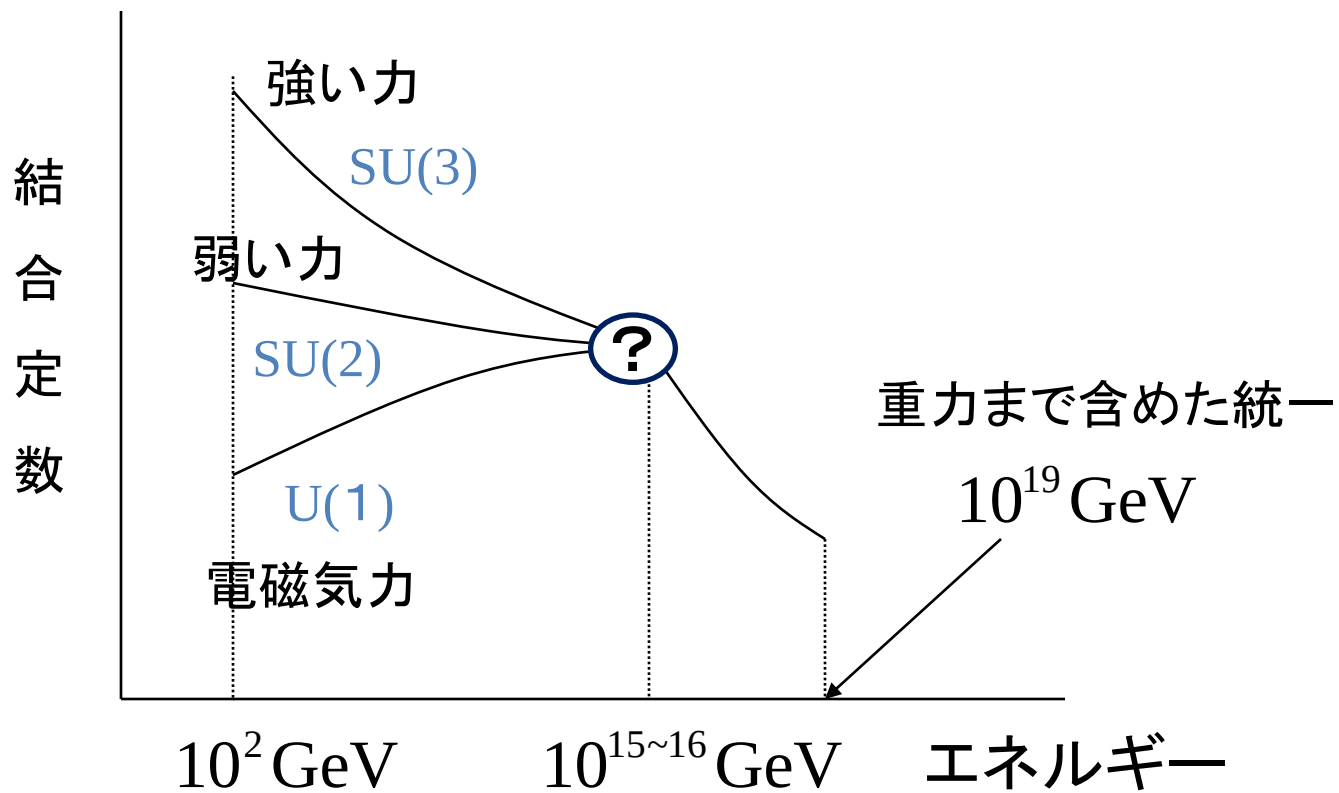
相互作用の統一に超対称性が大きな役割

相互作用と統一理論の系譜

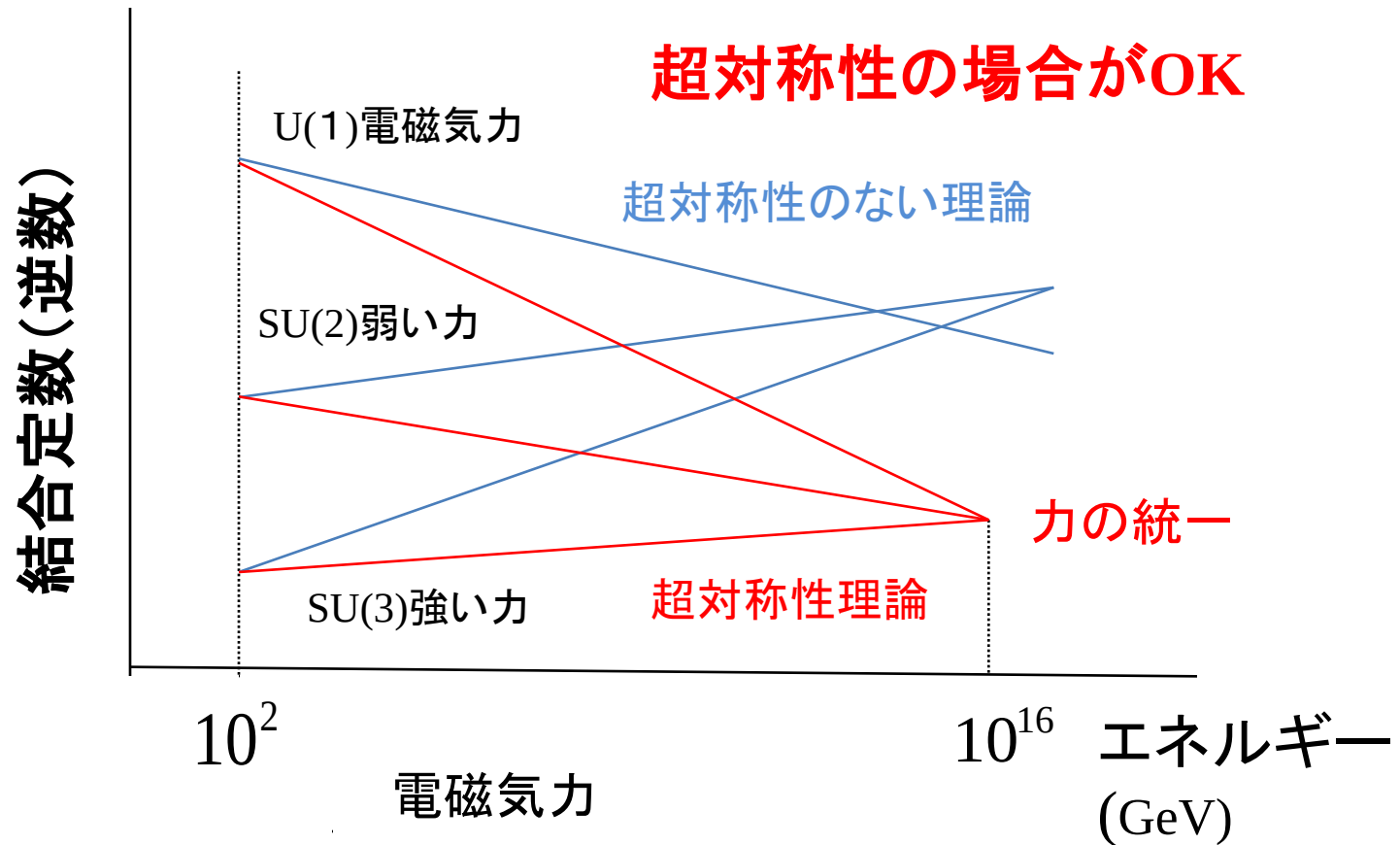
自然界の四つの力 弱, 電磁, 強, 重力



力の統一



力の統一



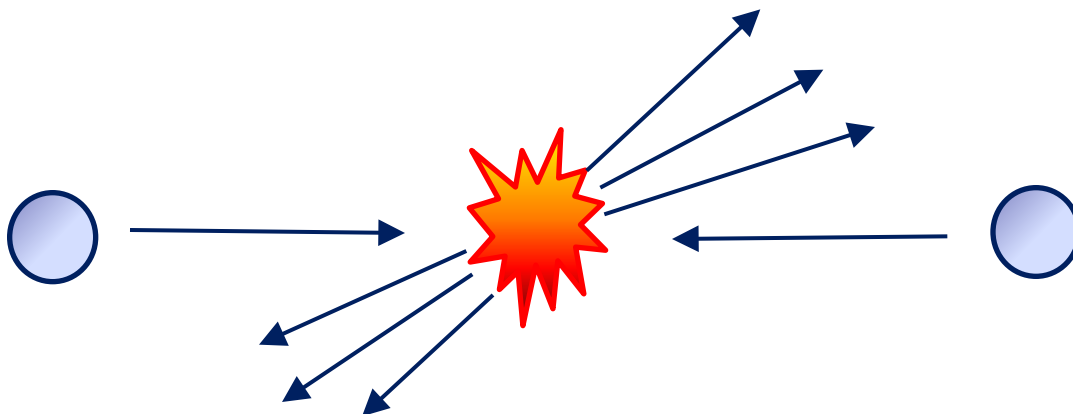
高エネルギー加速器と素粒子

ミクロの世界を探る“顕微鏡”

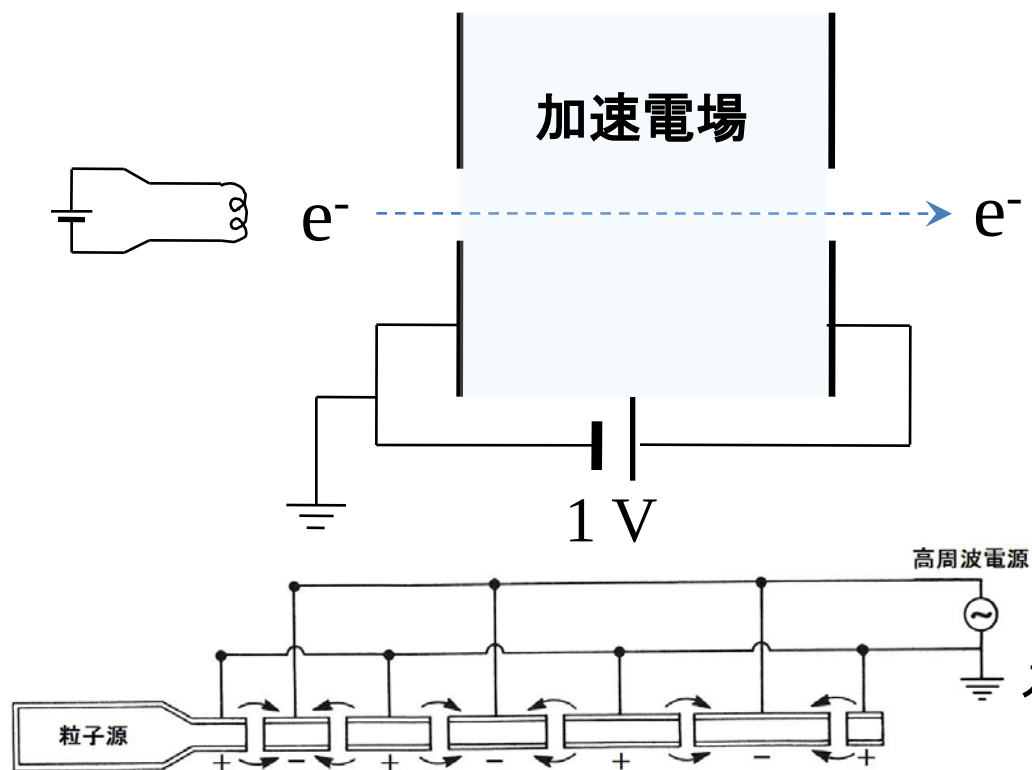


加 速 器

高エネルギーに加速した粒子どうしを衝突させてその散乱の様子を見ることで構造・相互作用を調べる

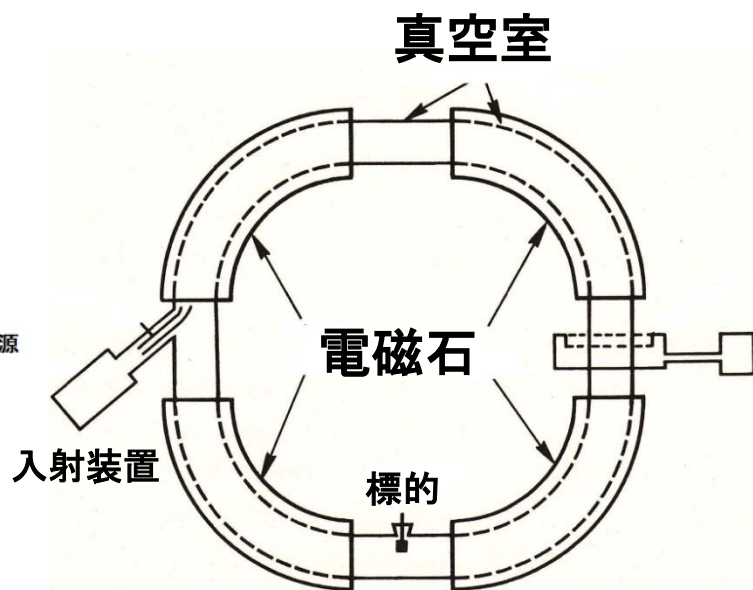


加速器の原理

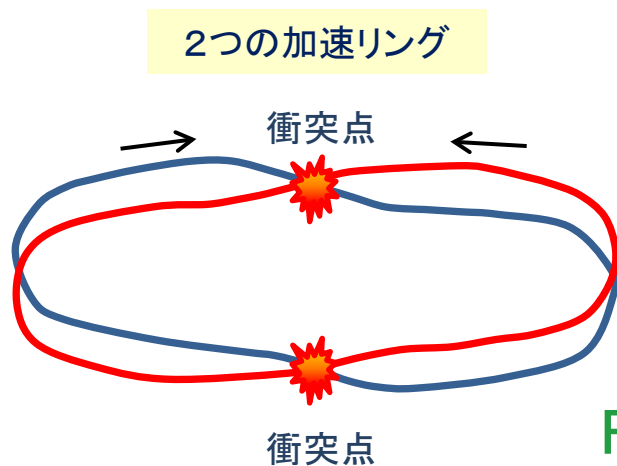


線形加速器

$$1 \text{ 電子ボルト} = 1 \text{ eV} \\ = 1.602 \times 10^{-19} \text{ ジュール}$$

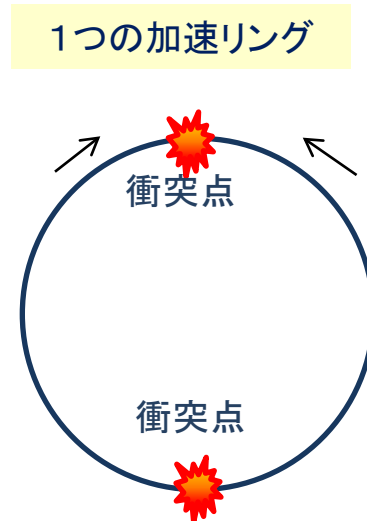


シンクロトロン



円形加速器

同一粒子:陽子-陽子、別種粒子:陽子-電子



粒子-反粒子:電子-陽電子

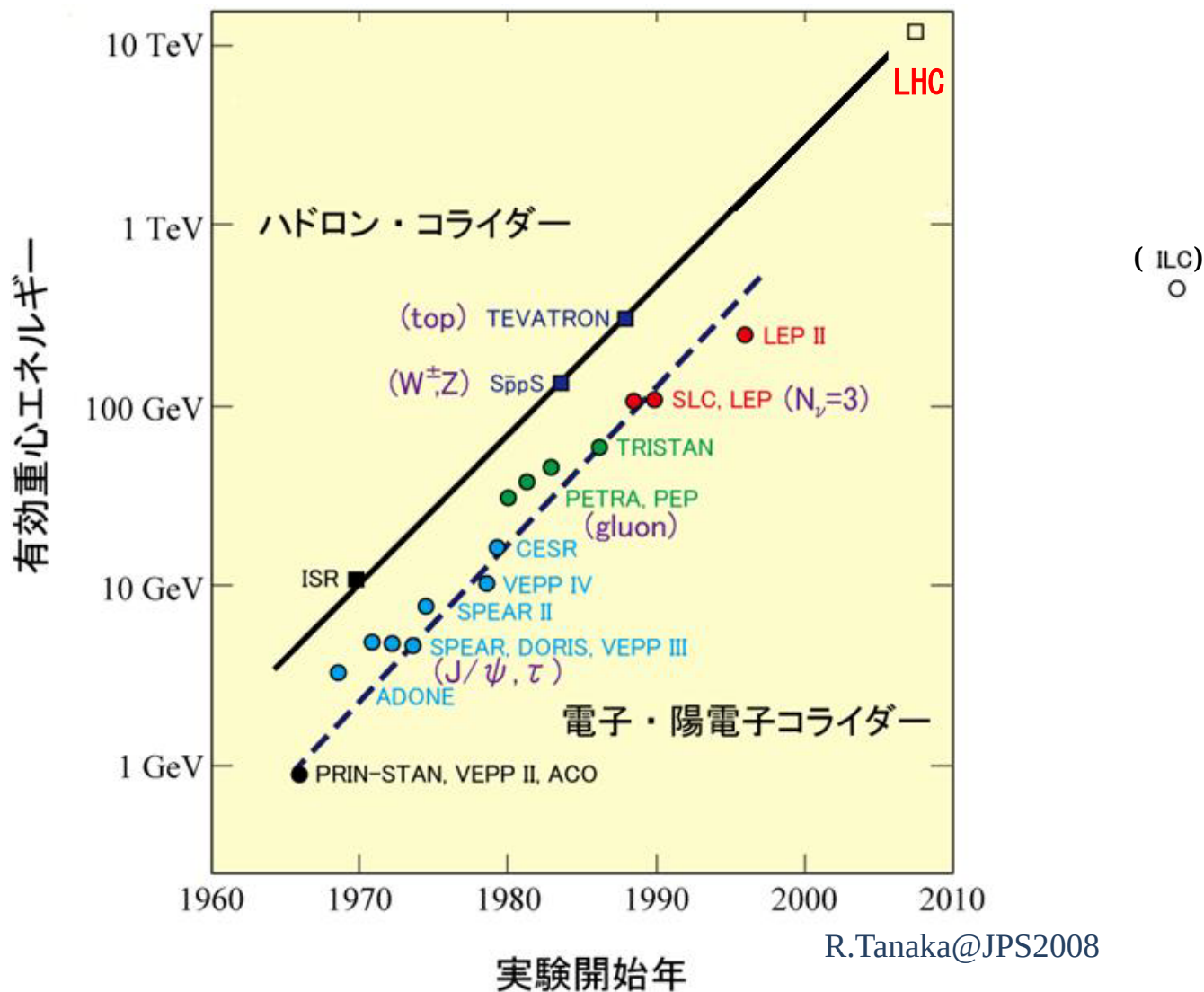


電子・陽電子 リニア・コライダー

線形加速器

リビングストーン則

加速器のエネルギーは年と共に指数関数的に増加する



加速器と発見された粒子

▶ SLAC, BNL (1974)	J/ψ (c) チャームクォーク
▶ SPEAR (SLAC) (1975)	τ タウ粒子
▶ FNAL (1977)	Υ (b) ボトムクォーク
▶ PETRA (DESY) (1979)	g グルーオン
▶ Sp̄pS (CERN) (1983)	W [±] , Z ウィークボソン
▶ TEVATRON (FNAL) (1995)	t トップクォーク
▶ LHC (CERN) (2010?)	H ヒッグス粒子
	未発見



LHC(Large Hadron Collider) CERN(ヨーロッパ 共同原子核研究所)



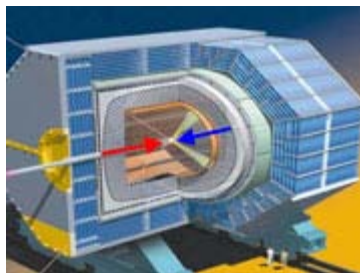
高エネルギー加速器研究機構(KEK)

Bファクトリー(KEKB)

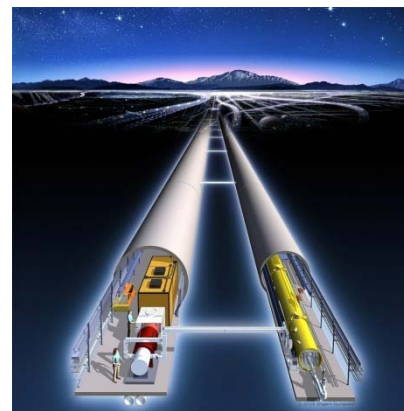
@KEK Home Page



研究キャンパスを中心に
地下に伸びる全長40Km(以上)



衝突点で反応を捉える粒子測定器



小さなトンネル2本(加速器本体用
+ 電力供給設備用)が並行

@ILC Home Page

リニア (Linear, 線形) 電子・陽電子線形加速器
重心系エネルギー $\sim 500\text{GeV}$ 総工費約5000億円
衝突点付近でのビームのサイズは5ナノメートル

ILC 国際リニア・コライダー計画

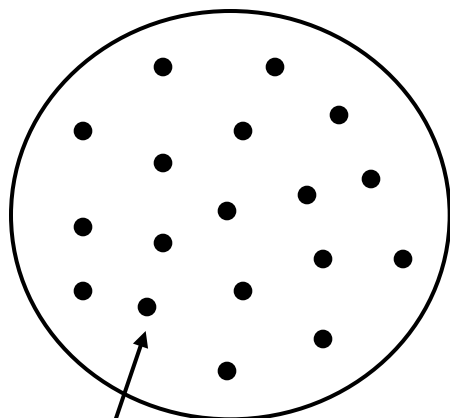
<http://www.linear-collider.org/>

未発見粒子を探せ

- ヒッグス粒子・・・標準模型の確立
- 超対称性粒子・・・標準模型を超えた理論
- ダークマターの正体は
- その他未発見粒子の探索
- LHC(陽子・陽子衝突型加速器)は発見マシン
- ILC(電子・陽電子衝突型加速器)は精密測定のためのマシン

パートン描像

核子など
ハドロン



点状構成要素

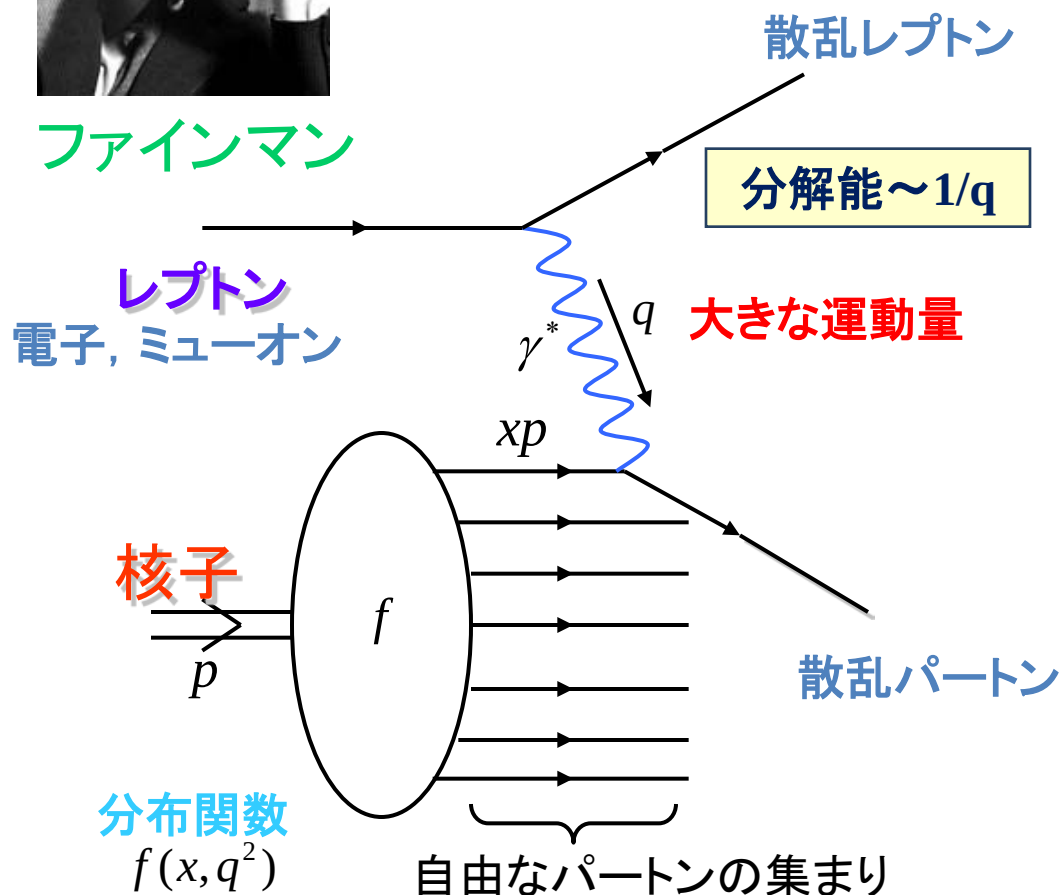
パートン



ファインマン

パートン=クォークとグルーオン

グルーオンが約半分の運動量を持つ



QCDで記述される

LHCでのヒッグス粒子生成

ヒッグスの生成機構

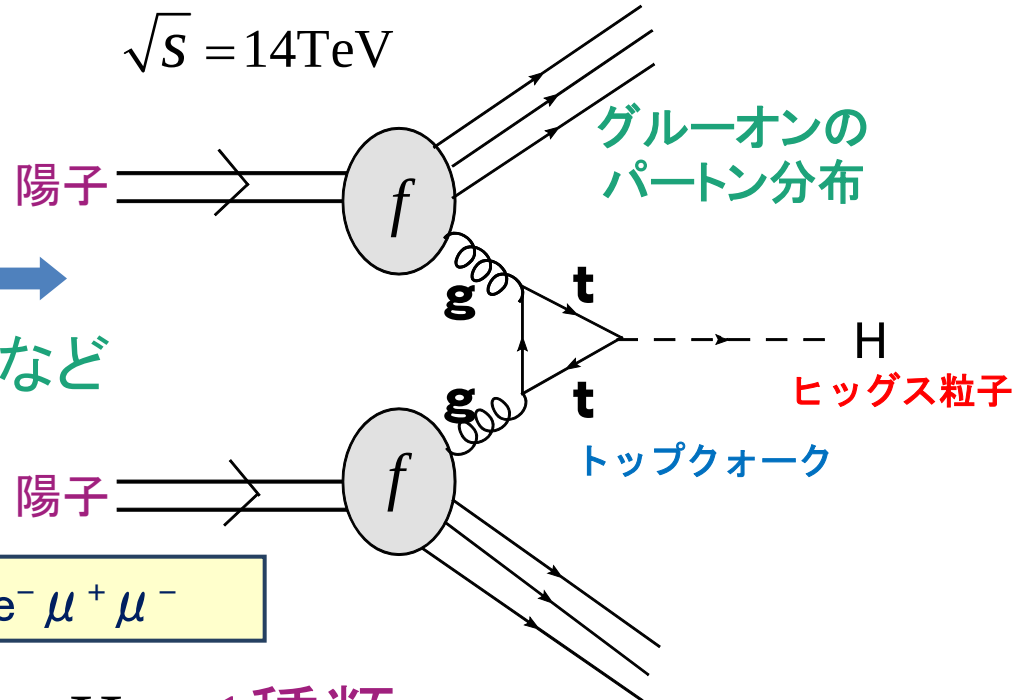


グルーオン融合過程 →
ウィークボソン融合過程など

ヒッグスの崩壊機構

$H \rightarrow 2\gamma$

$H \rightarrow ZZ \rightarrow e^+e^- \mu^+ \mu^-$



標準模型 180GeV以下

H 1種類

超対称標準模型

$h, H, A, H^\pm$ 5種類

2つのヒッグス2重項

lightest Higgs

$4 \times 2 - 3 = 5$

130GeV以下のヒッグスが見つかったら



超対称性模型が有力

LHC (Large Hadron Collider)

スイス・ジュネーブ郊外 CERN

周囲27km 地下100mのトンネル

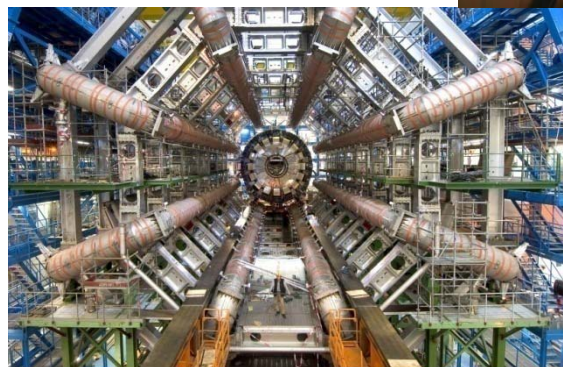
陽子・陽子衝突型加速器 約5000億円

8.3Tの超伝導磁石 1232本

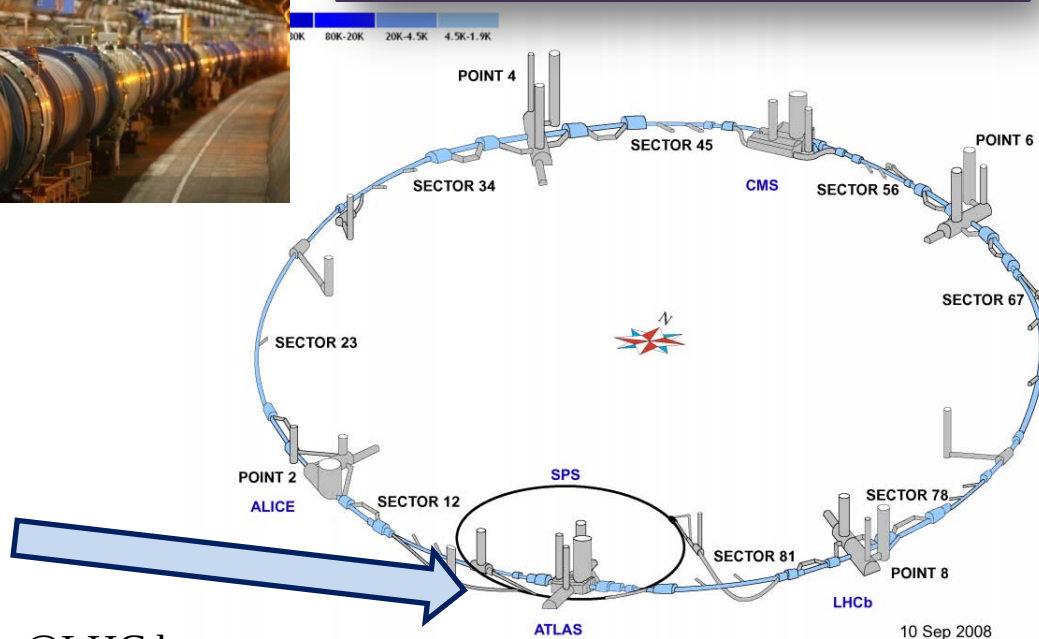
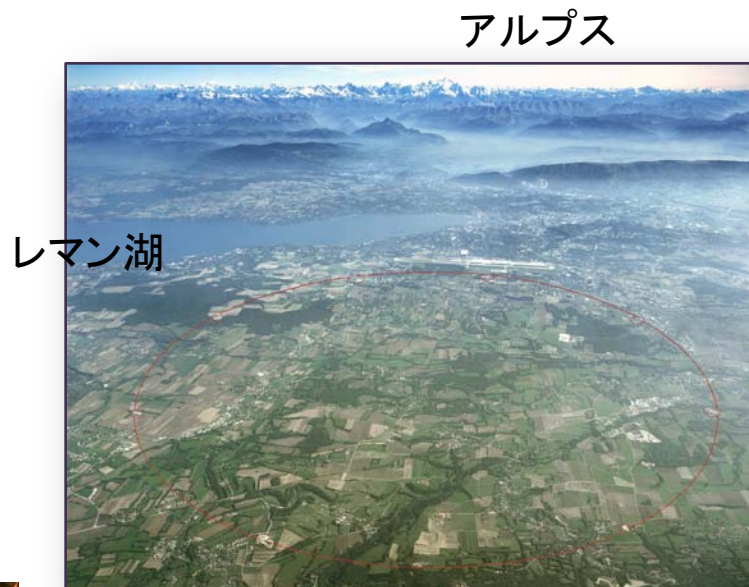
加速エネルギー ルミノシティ $10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$

7TeV+7TeV=14TeV

1TeV=1兆電子ボルト



ATLAS測定器



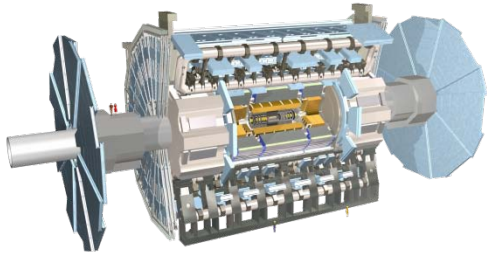
@LHC home page



ホーキング博士

2008年9月10日 に稼働始める
450GeVビーム初周回に成功
9月19日、ヘリウム漏れ事故
再開は2009年秋

A Toroidal LHC ApparatuS (ATLAS)



ATLASグループ 37 か国

167 研究機関

2200 人 科学者

ATLAS 日本

15 研究機関

92 人 科学者

ヒッグスが見つからない方に100ドル
賭ける —BBCでのラジオ番組より—



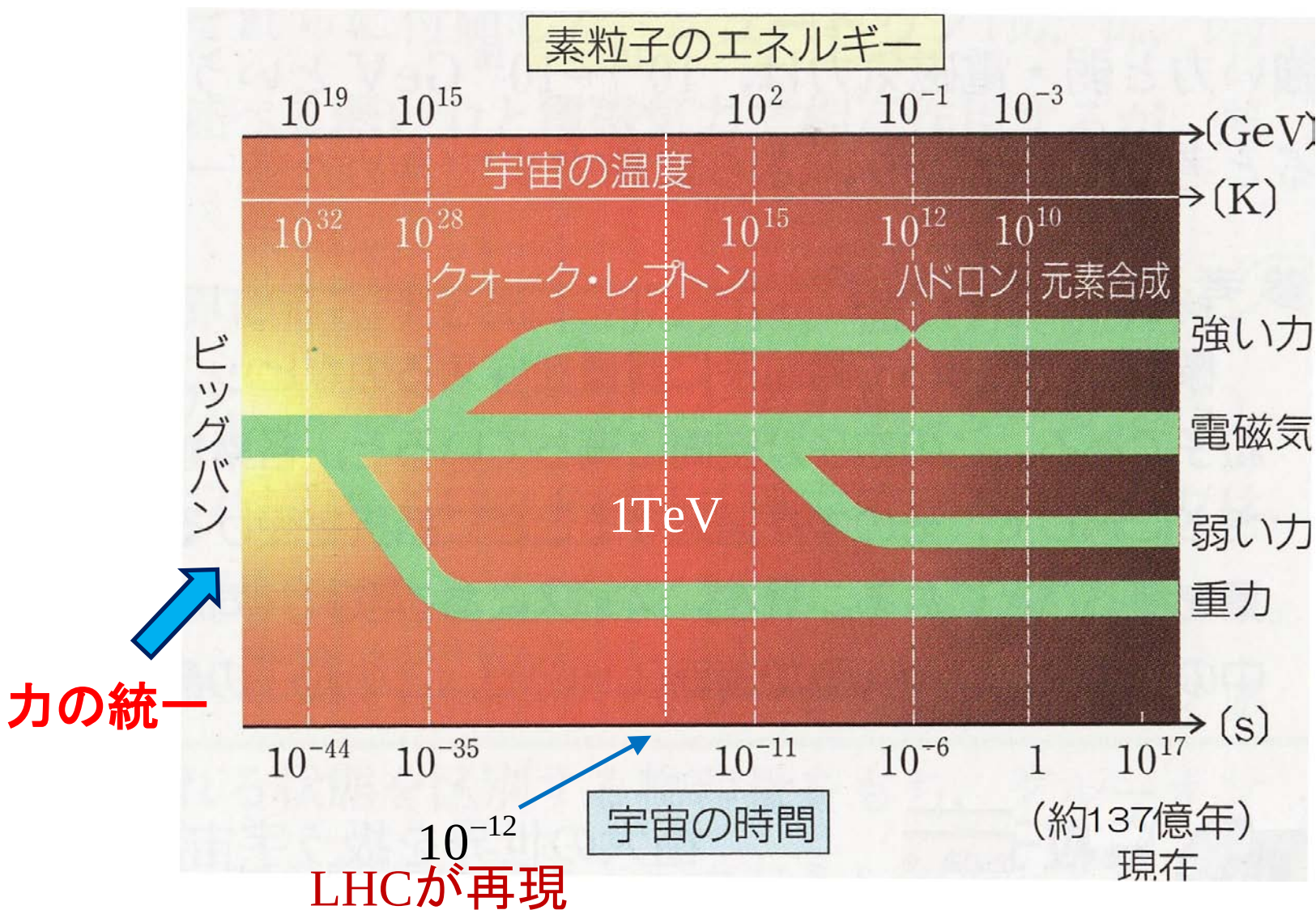
LHCとヒッグス博士

TIME紙より

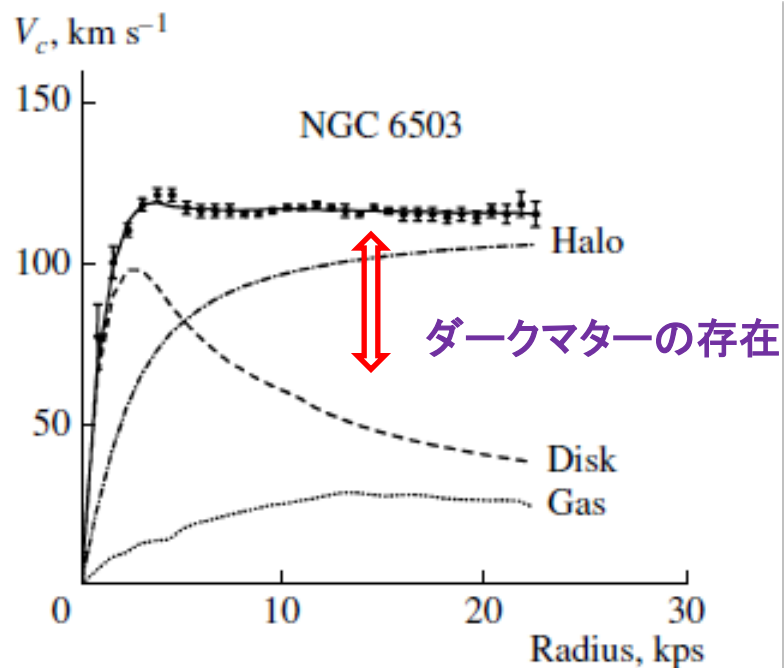
素粒子と宇宙

- 宇宙は約137億年前にビッグバンで始まり膨張を始めた
- 2.7K の宇宙背景放射
- 宇宙背景放射観測衛星(WMAP)によると宇宙は平坦で、通常物質が4%、暗黒物質(ダークマター)が23%、残り73%がダークエネルギー
- インフレーション理論と宇宙定数入りの暗黒物質モデルの理論を合わせた理論的予想と一致

自発的対称性の破れで力が分化する



渦巻き銀河の回転曲線



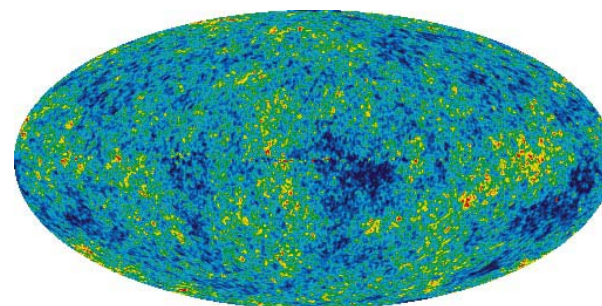
重力レンズ効果(非常に重い物質によって光が曲げられる)



ダークマターの存在



ハッブル望遠鏡がとらえた渦巻き銀河NGC4414



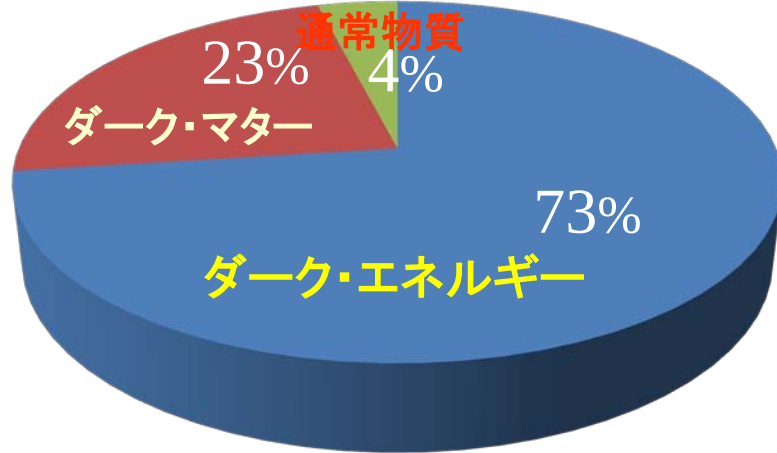
温度ゆらぎの分布 WMAP(08)

ダーク・マター(暗黒物質)

宇宙の23パーセントを占める物質

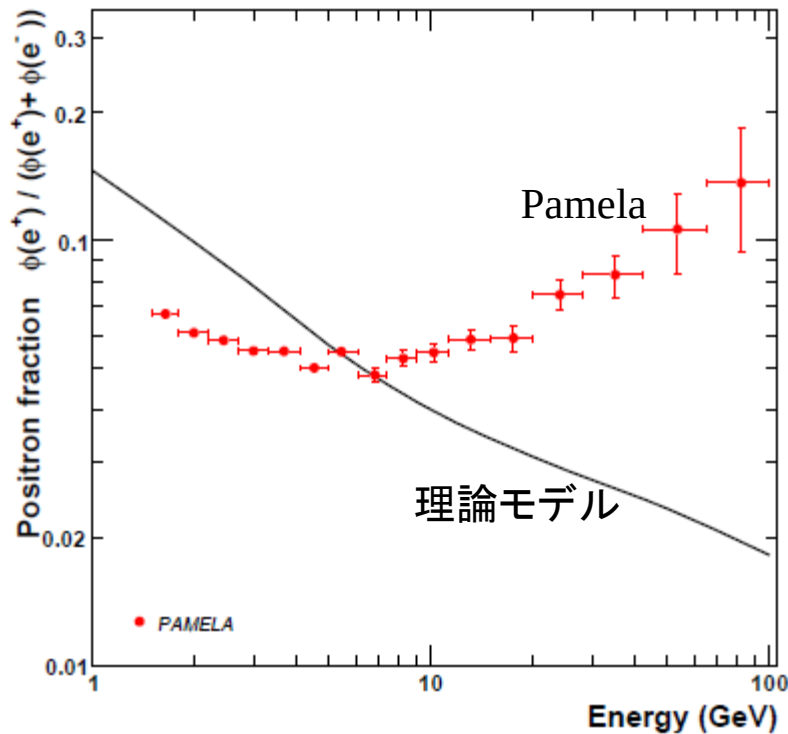
その正体は？

→超対称性粒子が候補



PAMELA

陽電子の異常な増加



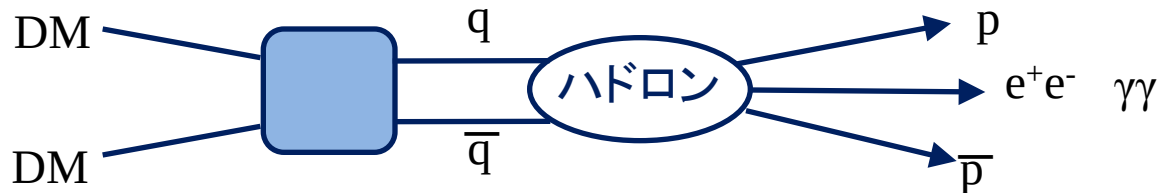
Pamelaが観測した陽電子の比率と
理論モデルの予想



銀河とハロー ニュートラリーノの散乱
による陽電子増加の過程

DM=Dark Matter=ニュートラリーノ

中性で安定、電磁波では観測できない



その他の未発見の粒子

- 強い相互作用でCPが破れないためには、ある種の対称性が自発的に破れたときに出てくる**アクシオン** (axion) と呼ばれる粒子が存在
- 重力場の量子である**グラヴィトン** (重力子)
まずは重力波を見つけることが先決か？
- その他、粒子ではないが**余剰次元** (4次元を超えた次元) や**ブラックホール** がLHCで見つかるか？

エピローグ

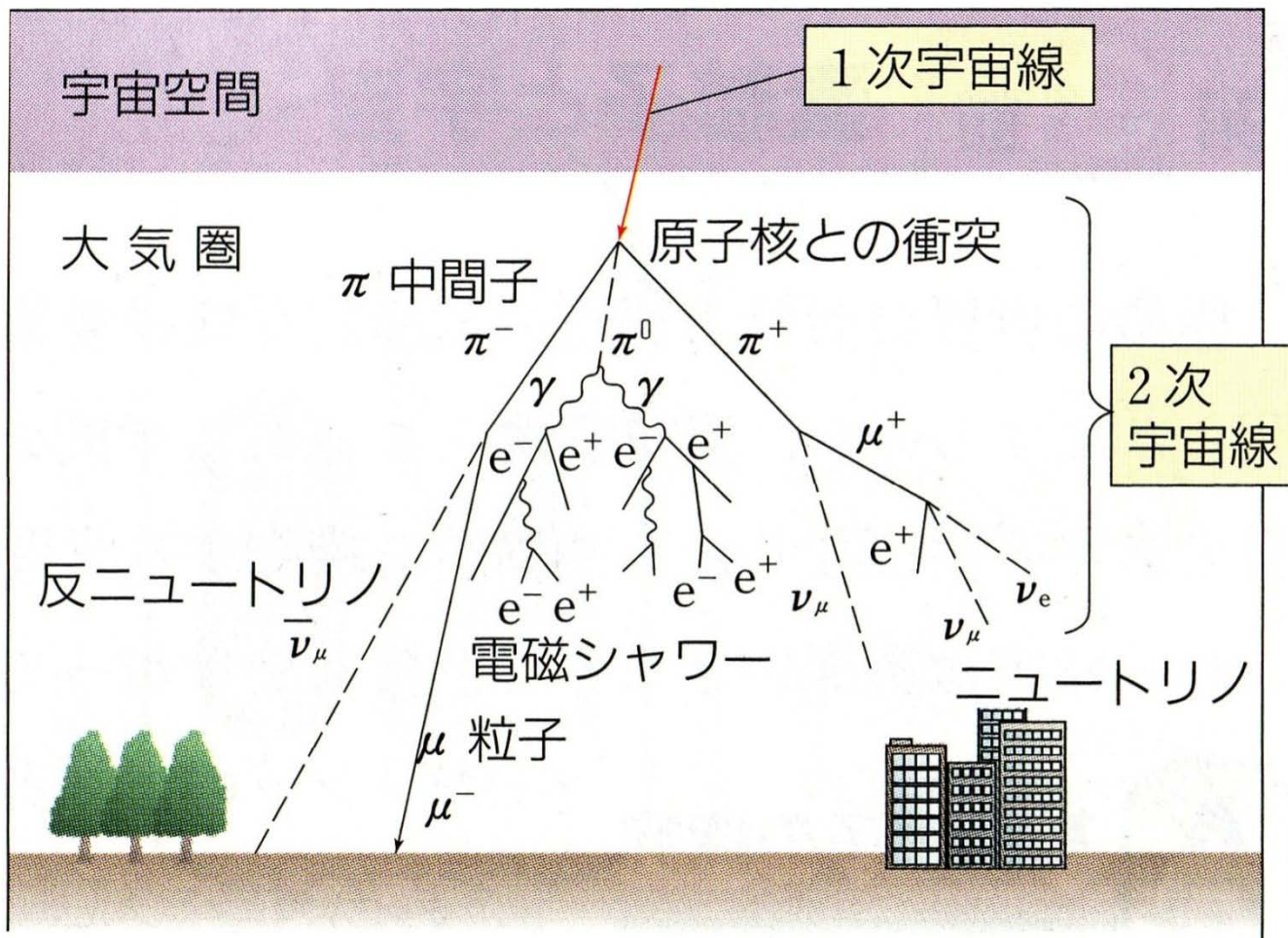
「標準模型」は最終理論とは考えられない

- 標準模型の枠内では質量を预言できない
- クォーク・レプトンの世代の起源は何か？
- なぜ、我々のまわりの世界には物質があって反物質がないのか？
- ダークマターの正体は？
- 重力を含めた素粒子の統一理論の追究→
超ひも理論　素粒子は究極的には 10^{-35}m もの小さなひも(開いた、閉じた)の振動モード

さらなる問い

- 標準模型を超えた理論の追求
- CPの破れの起源を説明できるか？
- 時空は4次元か？余剰次元が存在するか？
- ゲージ階層性問題はいかに解決されるか？
- 超ひも理論の真空は一意的に決まるか？
- クォークとレプトンは本当に基本粒子か？
- その他

バックアップ・スライド



ニュートリノ物理・天文学



小柴昌俊博士

1987 **カミオカンデ実験** 大マゼラン星雲
の超新星爆発に伴うニュートリノを観測

2002年ノーベル物理学賞

@The Nobel Foundation

1998 **スーパーカミオカンデ実験** 地球の裏側か
らくる大気ニュートリノ(ミュー・ニュートリノ)が理
論値の半分以下に減少しているのを観測

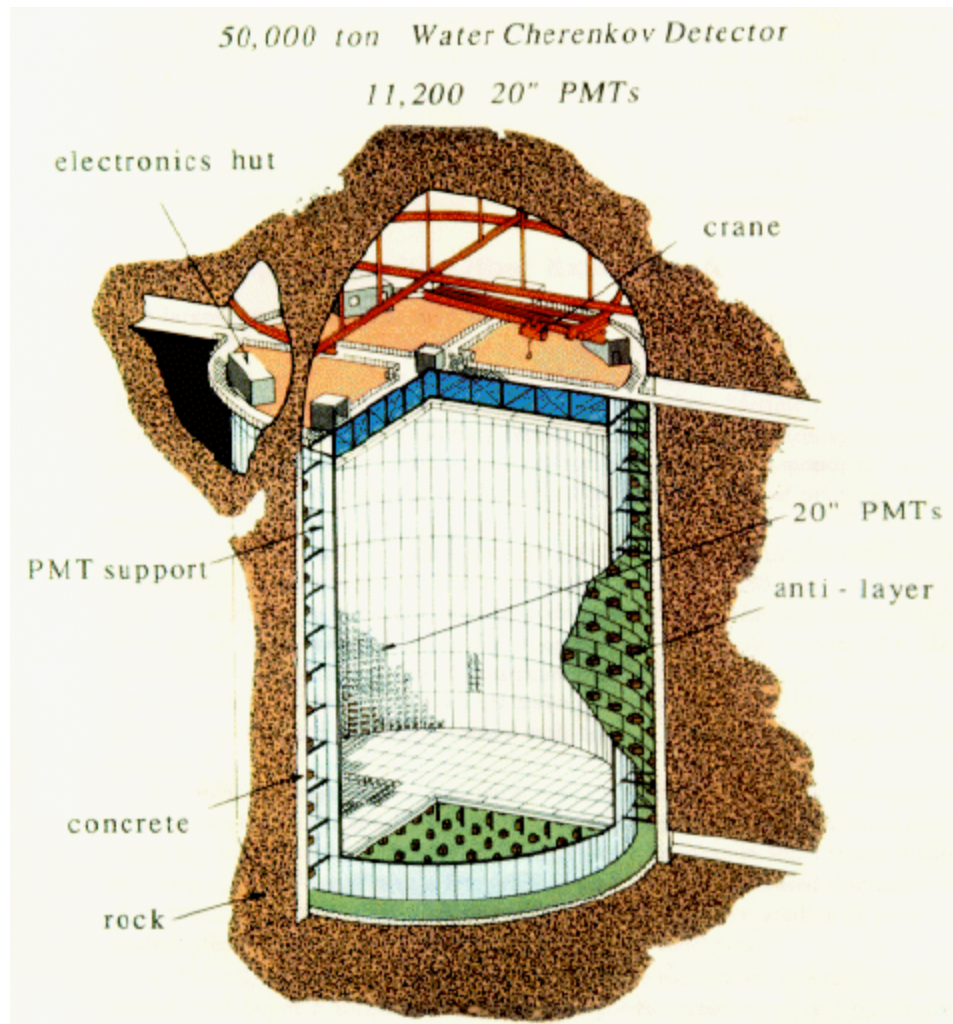


ニュートリノ振動



ニュートリノが質量を持つ

太陽ニュートリノ, 原子炉からのニュートリノでも振動が見つかる
加速器を使った振動実験 → K2K実験(KEK→神岡)
T2K(東海村→神岡)

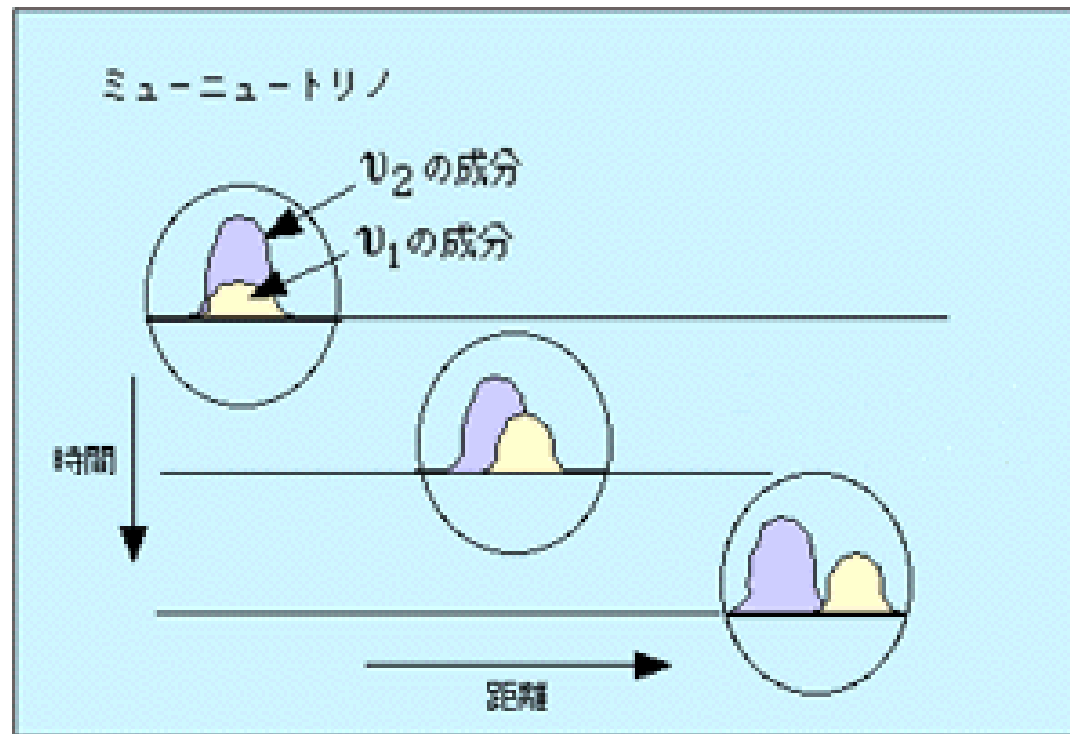


ニュートリノ 検出装置



内部に取り付けら
れた光電子増倍管

東大宇宙線研究所(神岡) スーパーカミオカンデ



$$\begin{aligned}\nu_e &= C \cdot \nu_1 + S \cdot \nu_2 \\ \nu_\mu &= -S \cdot \nu_1 + C \cdot \nu_2\end{aligned}$$

ニュートリノ振動

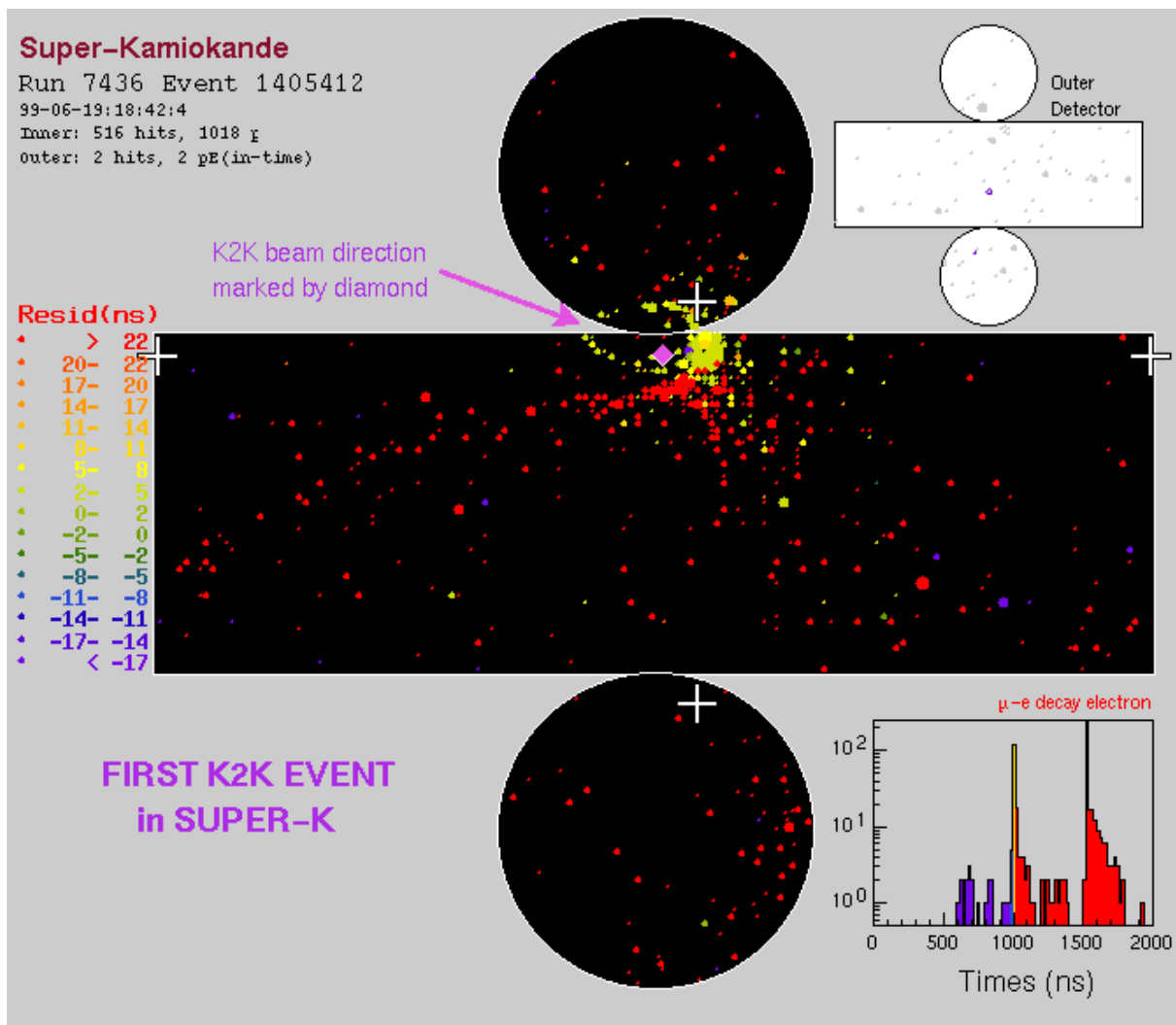
@KEK home page



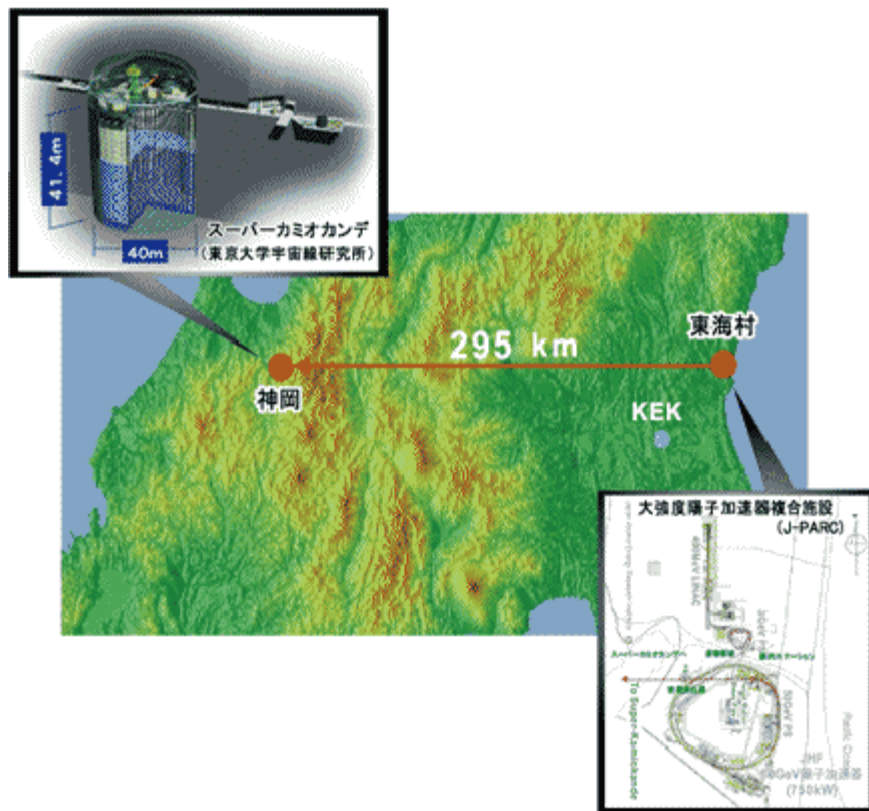
高エネルギー研
(つくば)

東大宇宙線研
(神岡)

ニュートリノの振動実験 (K2K実験)

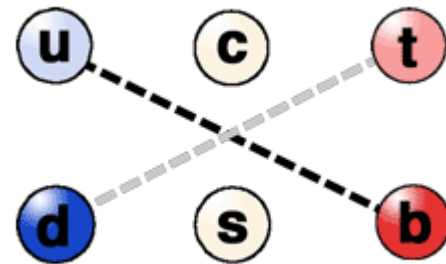


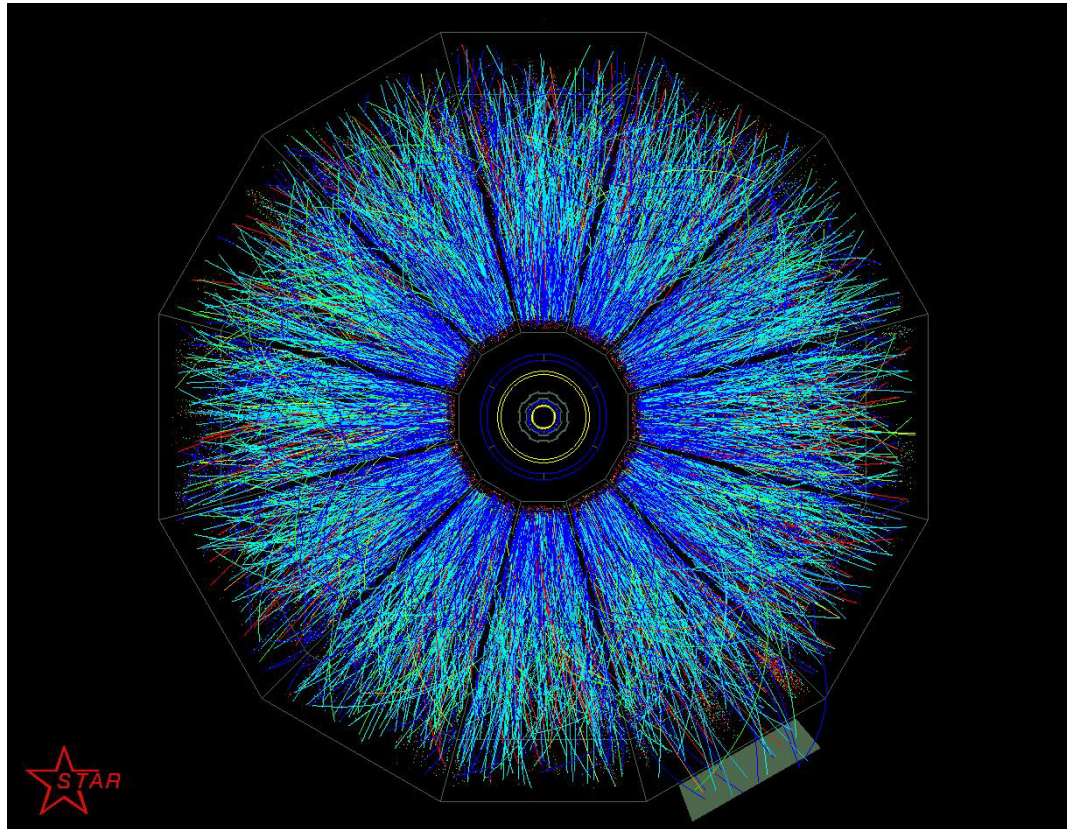
スーパーカミオカンデで観測されたK2K実験のニュートリノ



T2K実験

小林と益川の両氏は1973年、3世代のクォークを導入することで、CP対称性の破れを自然に説明できることを示しました。3次元の軸(ダウン、ストレンジ、それにボトムクォーク)の間のねじれは3つの角度で表すことができますが、混合の仕方が複素数を含むと、6つのクォーク場の位相回転では吸収しきれない複素位相が残ることがわかります。複素数というのは高校の数学で習ったことがある人もいるかもしれませんが。日常生活では「数」といえば「実数」を意味することが多いのですが、素粒子の世界では、実数と虚数を組み合わせた複素数という、不思議な性質を持った数が、方程式の中に出てきます。小林・益川理論の特徴は、クォークの状態に複素数の空間での回転を与えると、複素数の位相という自由度が出てくることを指摘したことでした。この複素位相がCP対称性の破れを与えるのです。この複素位相は2世代では残らないので、CP対称性の破れを説明するには3世代目のクォークを導入することが必要だったわけです。





RHICでの金原子どうしの衝突で発生する粒子

2009年4月11日

未発見の素粒子を探せ

科学カフェ京都

78

対称性とは何か？

例：時間・空間の対称性

空間の一様性



運動量の保存

空間の等方性



角運動量の保存

時間の一様性



エネルギーの保存

相対論での時空の対称性

時空の等方性



ローレンツ変換での不変性

時空の一様性



エネルギー・運動量の保存

ポアンカレ対称性

幾何学的対称性



西洋式庭園

左右対称



日本式庭園

対称性なし

- 場の量子論から79年

W. Heisenberg and W. Pauli

Z.Phys.56(1929)1;59(1930)168



- 中間子理論から74年

H. Yukawa

Proc.Phys.Math.Soc.Jap. 17(1935)48



Photos from Nobel
Committee Web page

- QEDくりこみ理論から65年



R.P.Feynman ~1949

J. Schwinger ~1949

S.Tomonaga ~1943

- QCDの誕生から35年

Asymptotic Freedom



D.J.Gross and F.Wilczek

Phys.Rev.Lett.30(1973)1343.

H.D.Politzer,
Phys.Rev.Lett.30(1973)1346.



Fermi加速器研究所(米) TEVATRON