

「LHC実験始まる」

2010年3月6日 名古屋大学野依記念学術交流館

神戸大学理学研究科 山崎祐司

# LHCで見つかる期待の物理 — 質量の謎, 超対称性 —

# 話の内容

- **なぜ物質は質量を持つか？**
  - 質量って何？
  - わかっていること，いま探していること
  
- **暗黒物質と超対称性**
  - 超対称性と量子重力

# 質量って？

- 質量のないものは光速でしか走れない
  - 例：光（光子） 質量ゼロ
- 質量のあるものは光速に届かない

質量は、止まる「能力」

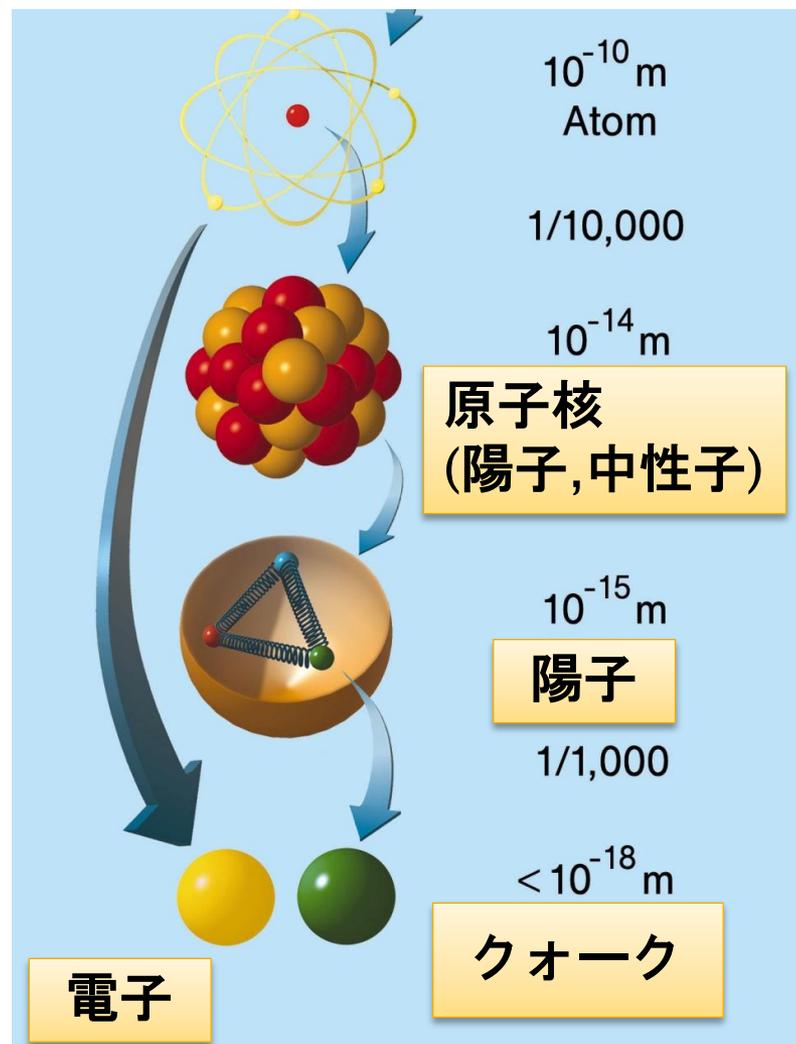
- ところが、現在の理論では  
多くの素粒子が質量を持ってない

# ものはどうやって 質量を得るか？

南部理論とヒッグス粒子

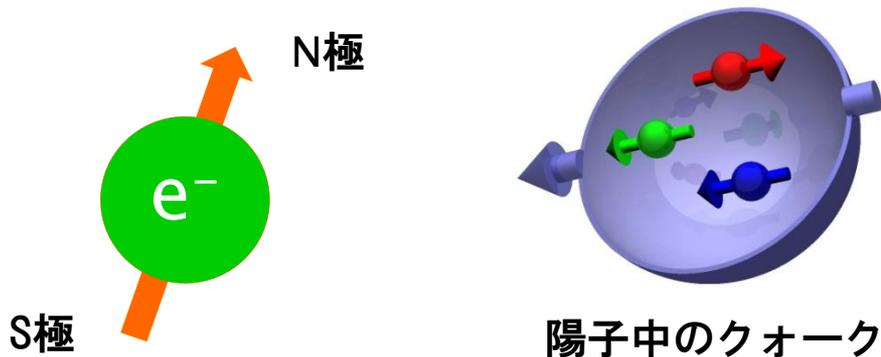
# 質量のみなもと

- 陽子の重さ  
約 1 GeV (ギガ電子ボルト)
- そのうちクォーク 3つ  
の重さは
  - $0.004 + 0.004 + 0.008 \text{ GeV}$   
 $\simeq 0.02 \text{ GeV}$
  - たった2パーセント
- 残りはどこから？



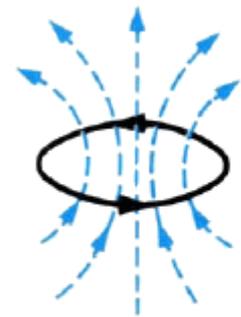
# 電子，クォークとスピン

- 電子は磁石のようにふるまう
  - 電子が回転している（ような感じ）「スピン」と呼ぶ
  - クォークも

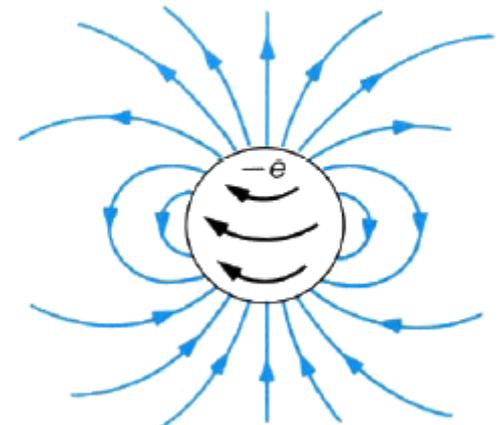


粒子はスピンを持つ

(a) 円環電流による磁場



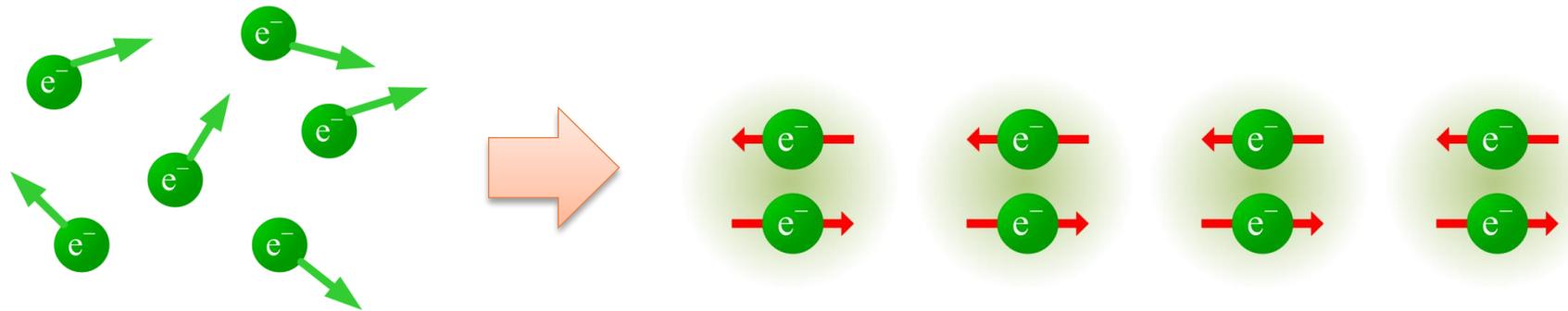
(b) 負に帯電した球体である電子の自転(スピン)による磁場



出典：パリテイ 1986年6月号

# 超伝導体内の電子

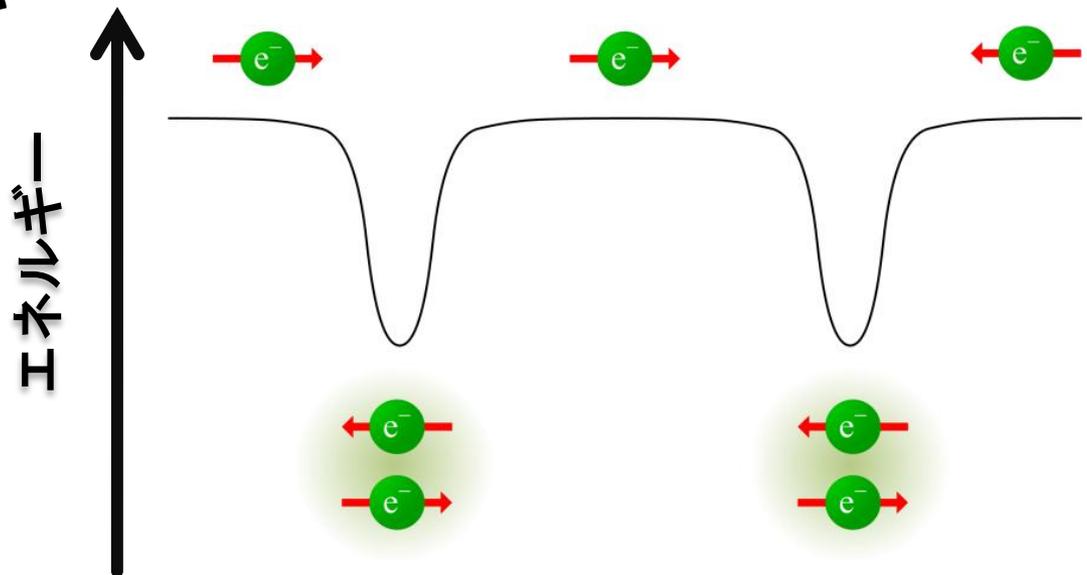
- スピン逆向きでくっつく
  - スピンのない（スピン0）状態 → 「見えなく」なる
  - 一体になって運動できる



対になって身を隠し，一体になって動く

# よそ者電子のふるまい

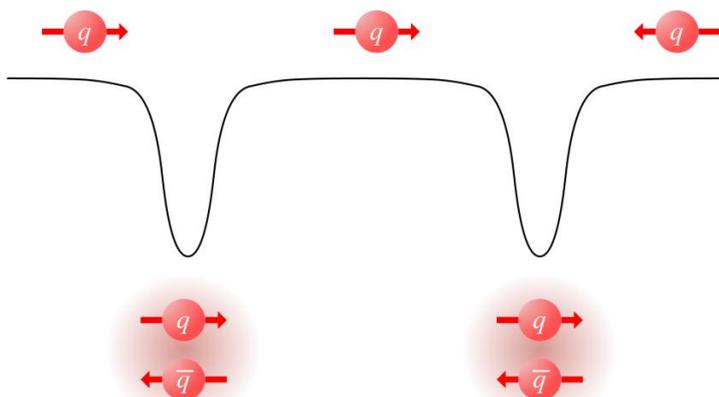
- 対でない電子が入り込むと...
  - 捕まって、落ちたりはい上がったたりして、なかなか進まない



電子は超伝導体内で重くなる

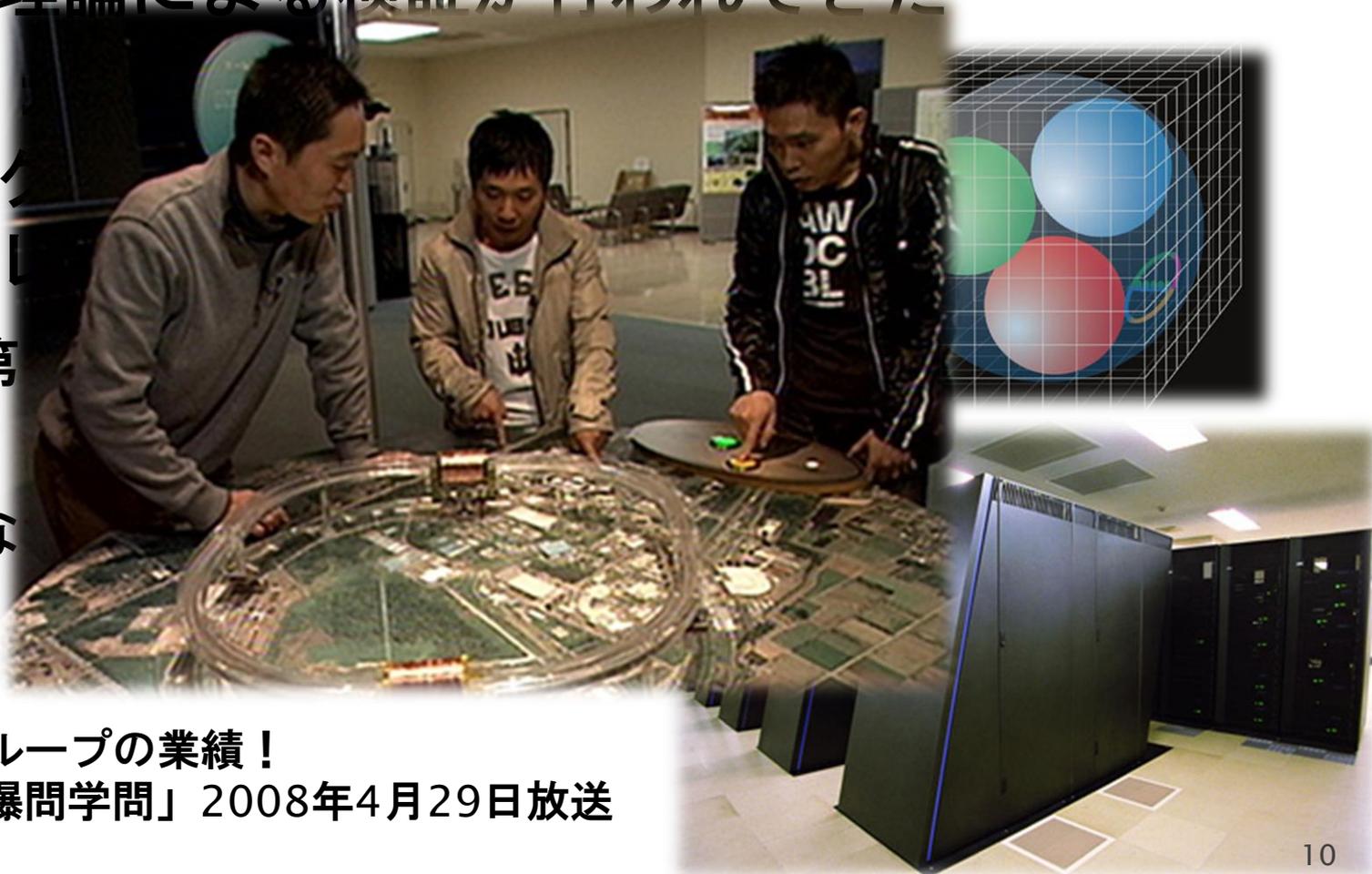
# 南部先生の大胆なアイデア

- クォークも，宇宙が超伝導体なら重くなれる
  - 宇宙はクォーク・反クォーク対 ( $q\bar{q}$ ) の海
  - クォークは対にトラップされて動きにくくなる
    - 陽子の質量を生む



# それって、本当？

- 実験，理論による検証が行われてきた
- 決定打  
クォーク  
シミュレ
- 日本第
- 「生」  
大きな



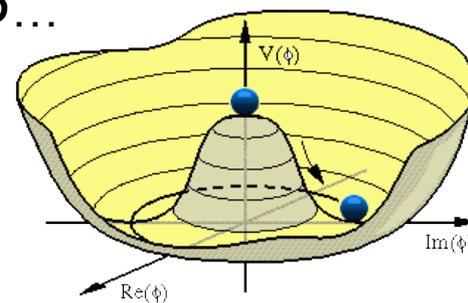
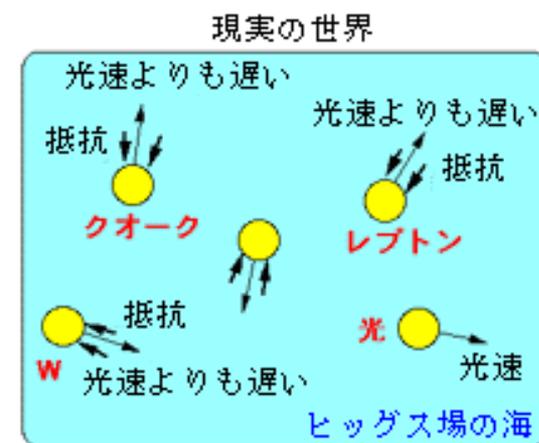
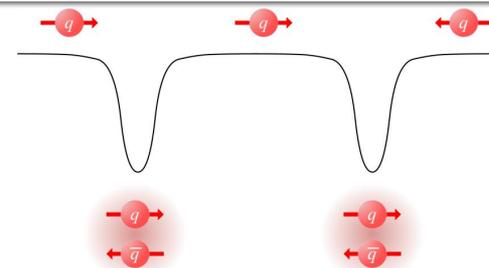
KEK 橋本グループの業績！  
NHK総合「爆問学問」2008年4月29日放送

# ならば、他の粒子にも質量を

- 宇宙全体が  
スピンのない粒子で  
埋まっていれば質量を持てる

## 「ヒッグス機構」

- もっとくわしく言うと...
  - 自発的対称性の破れにより、真空が期待値をもつ...
  - 素粒子の世界へ来て、もっと知ろう！



# 新粒子を「つくる」には

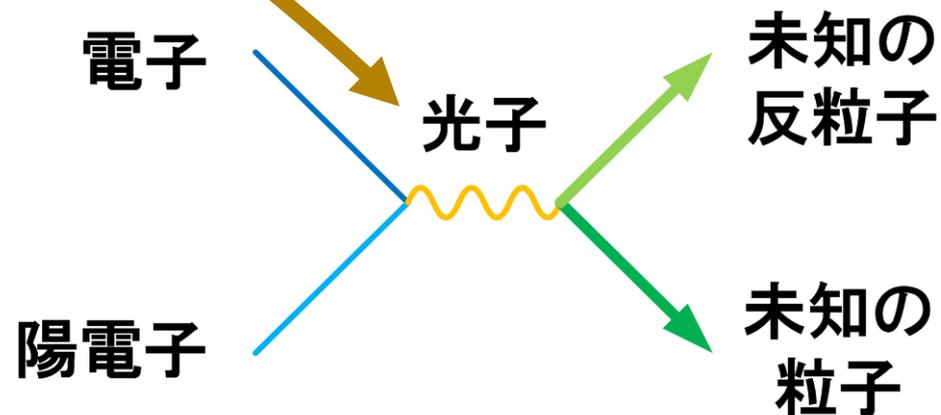
粒子・反粒子の消滅で、  
高エネルギー状態  
ができる

$$E = mc^2$$

E: エネルギー

m: 質量 c: 光速

「エネルギーと質量は等価」



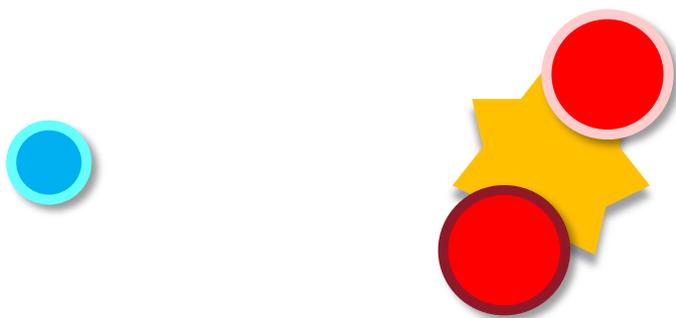
重い未知の粒子・反粒子を対生成できる

# 高エネルギー衝突実験

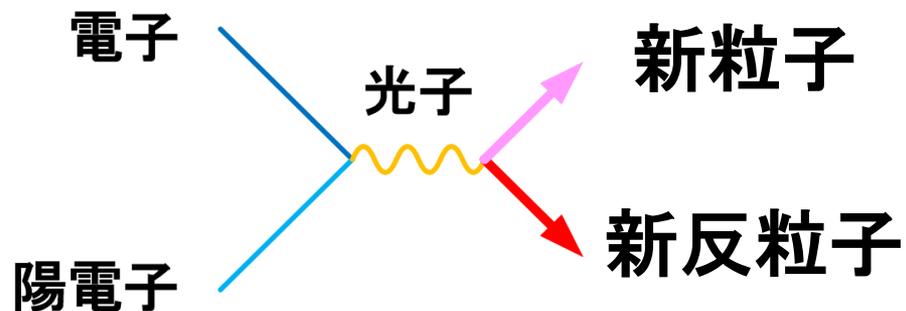
電子と陽電子が衝突

対消滅

高エネルギー状態から重い  
粒子が対生成



観測にかかる



# なぜ、LHCか

ヒッグスの質量： $> 120 \text{ GeV}$   
(陽子約130個分以上)

フェルミ研究所 (アメリカ)  
Tevatron

衝突エネルギー  $2000 \text{ GeV}$   
(ヒッグス約 18 個分)



ヒッグス探索中



CERN (スイス)

LHC

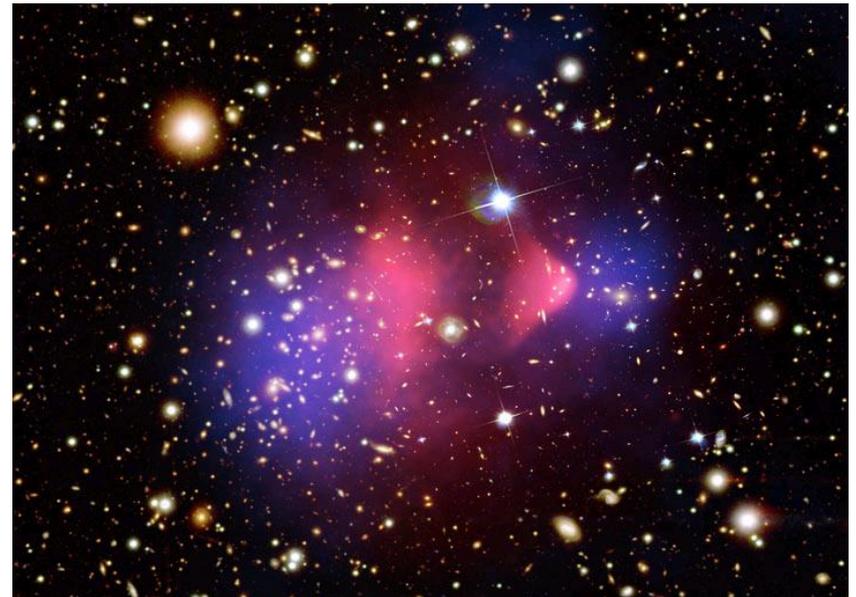
衝突エネルギー  $14000 \text{ GeV}$   
(ヒッグス120個分)

# 暗黒物質と超対称性

+ 量子重力への道

# 暗黒物質

- 星に謎の引力が働いているのは、間違いない
  - 重力が思ったとおりでない？  
そうではない
  - 未知の、電荷のない粒子が  
重力を及ぼす



銀河団が衝突し、暗黒物質（青）が先に進み、普通の物質（赤）が取り残される様子<sub>6</sub>

# この世の粒子は3種

スピンは半整数値をとる  
0, 1/2, 1... (量子力学)

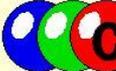
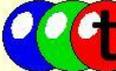
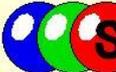
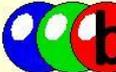
- 「もの」  
フェルミ粒子  
(スピン 1/2)

- 「ちから」  
ボーズ粒子  
(スピン 1)

- 「抵抗」 = ヒッグス  
(スピン 0) ただし未発見

## もの

物質粒子

	第1世代	第2世代	第3世代
クォーク	 アップ	 チャーム	 トップ
	 ダウン	 ストレンジ	 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

## ちから

力の場に伴う粒子

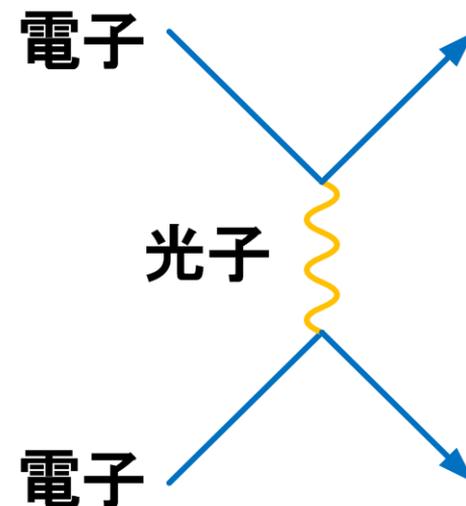
強い相互作用  グルーオン
電磁相互作用  光子
弱い相互作用  $W^+$  $W^-$  Z Wボゾン Zボゾン

ヒッグス場に伴う粒子  
(未発見)

 H ヒッグス粒子	 ? ヒッグス粒子	 ? ヒッグス粒子	...
---	---	---	-----

## 質量 (抵抗)

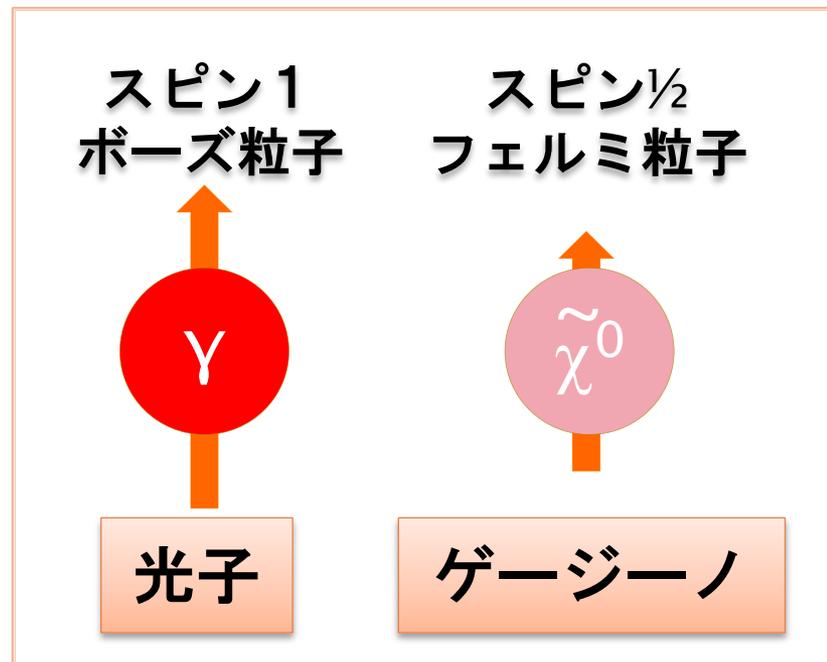
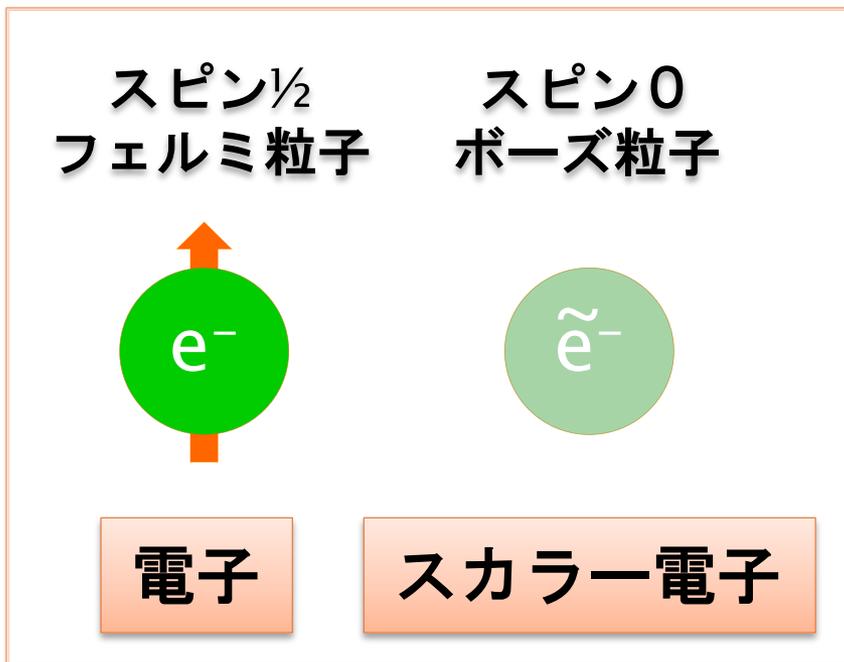
# 力を及ぼすしくみ



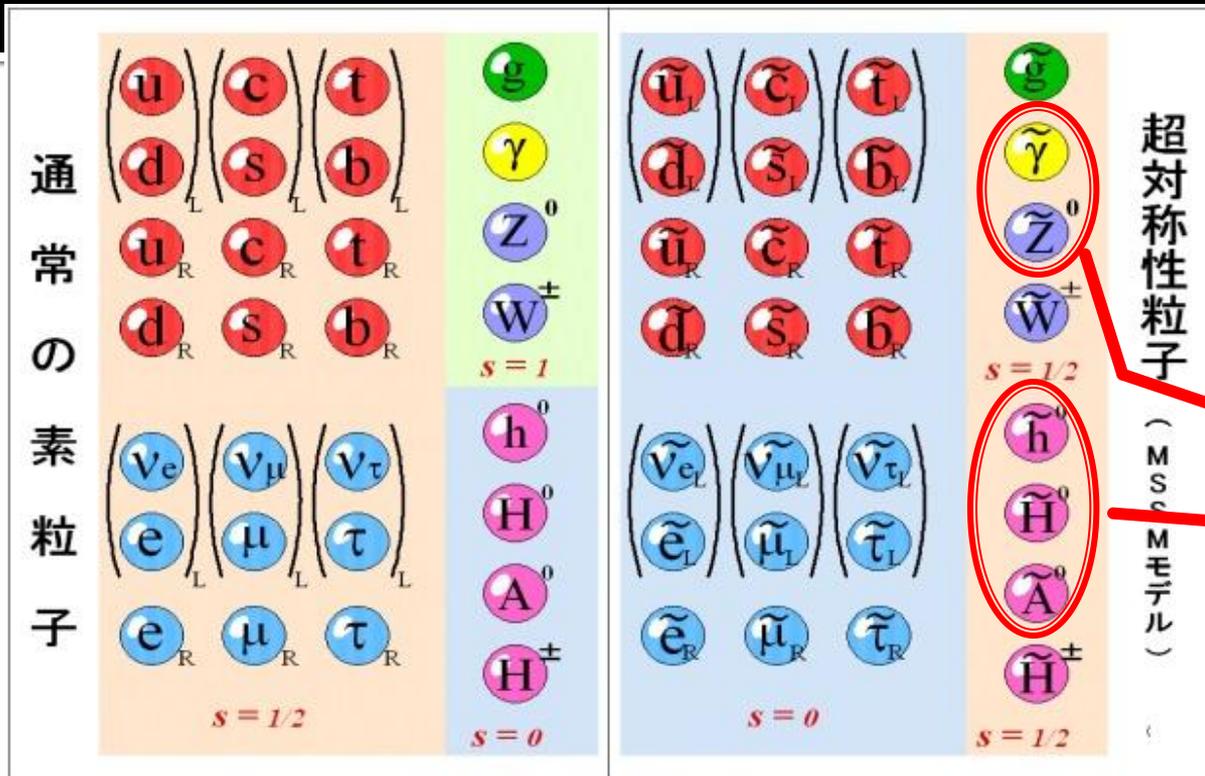
電子が走りながら電子は光子を受け取る  
→ 電磁波 (光子) が出る

# 超対称性とは

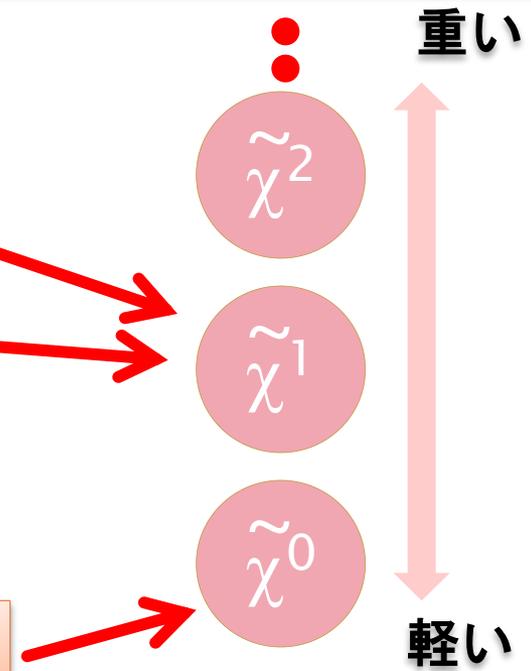
- 超対称粒子：同じ性質を持つ，違うスピンの粒子
  - スピン0の「もの」（ボーズ粒子）
  - スピン1の「ちから」（フェルミ粒子）



# 超対称性粒子たち



重い電荷のない粒子



一番軽い粒子はこれ以上崩壊できず、安定

**暗黒物質**

もし超対称性が見つければ、素粒子・宇宙のみかたが全く変わる

# なぜ超対称性が人気の理論？

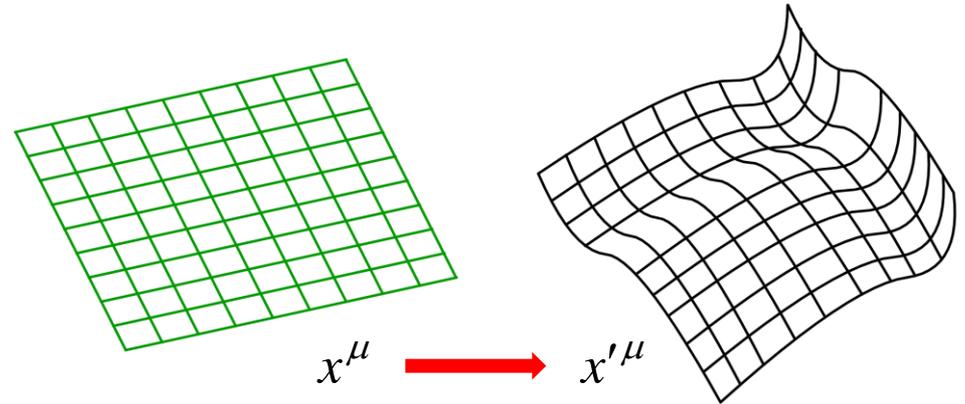
- 重力は変な力

- むちゃ弱
- エネルギーに比例  
(連続量！)

- 普通のカ：電荷 (とびとびの値) に比例

- 一般相対論：時空の曲がりとして説明

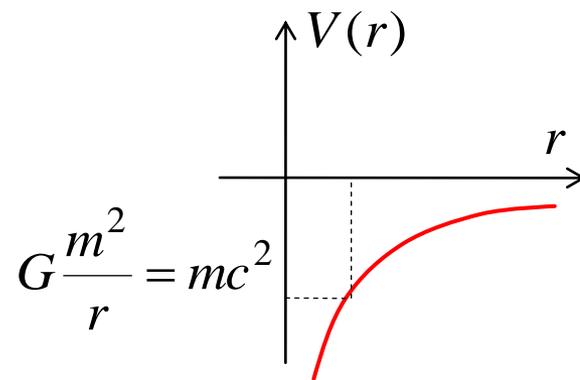
- 一般座標変換 = 時空の座標系の再定義  
に関する対称性から導かれる



# 重力だって 量子力学で説明できるはず

## ■ 重力も，超短距離で破綻

- プランクスケール：重力が，重力源の質量のもつエネルギーと等しくなる距離 or エネルギー
- 素粒子がブラックホールになったりする



おなじ問題は原子核と電子にもあった  
古典物理では，電子がまわっていると放射光を出して原子核に落ちてしまう。  
量子力学が，それが無いことを保証



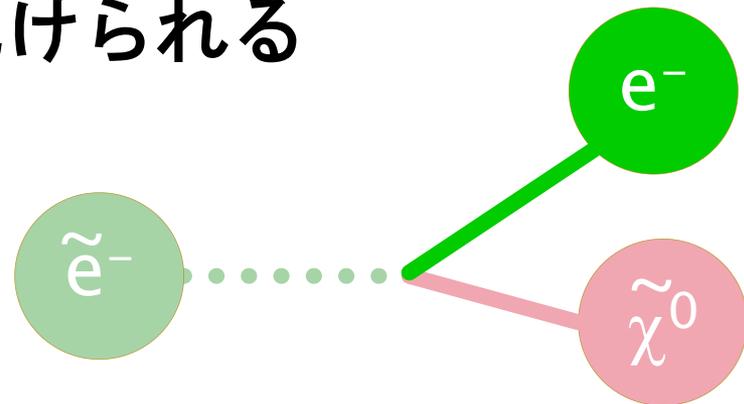
放射光

超短距離の重力理論は「量子重力」

# 超対称性変換と量子重力

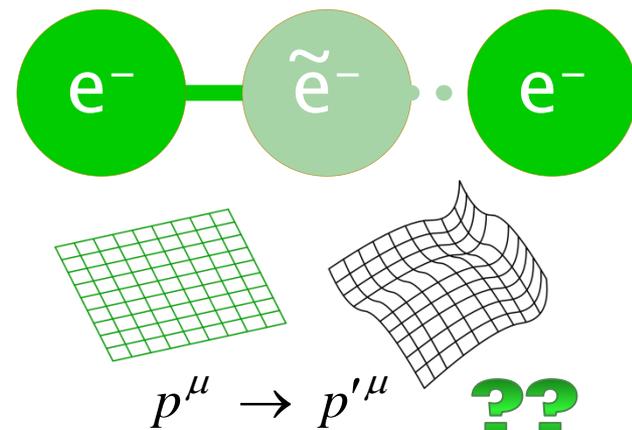
- 超対称性ペアは，お互いに化けられる

- スピンと質量以外の性質は同じ
- 例：スカラー電子  
⇔ 電子 + 中性ゲージノ



- 「超対称性変換」を起こすたび，一般座標変換が起きる

- 量子重力を説明できる？



# ということ

- 質量の謎を解く，ヒッグス粒子
- 素粒子界の革命児，超対称性

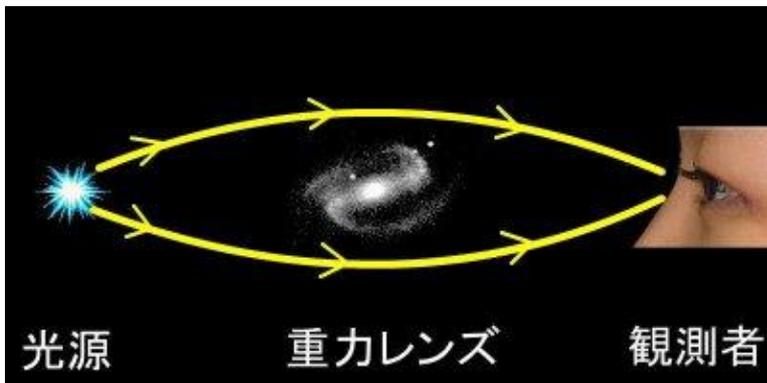
LHCで見つかるか？ → 請うご期待

どんな実験？ → 次のお話し

# 資料

# 重力と質量

- 相対論では，エネルギーと質量は等価
  - 光（質量ゼロの粒子）もエネルギーに比例して重力を受ける
    - 例：重力レンズ



# 質量の別の解釈

- スピンの進行方向成分は  
追い越すと反転
  - 速度は追い越すと逆向き  
スピンは追い越しても同じ向き
- 質量のある粒子は  
スピンの進行方向成分  
反転可能

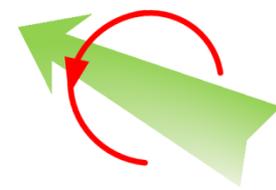


右巻き  
(進行方向向き)



自分より早く  
進んでいる粒子

左巻き  
(進行方向逆向き)

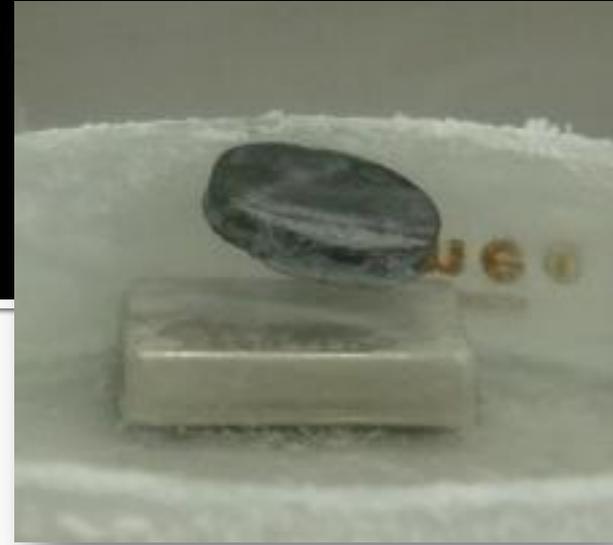


追い抜いて  
後ろへ去っていく



追い抜く!

# また，超伝導の例



- 磁場は，超伝導体内に侵入できない（マイスナー効果）
  - 磁場は，電磁相互作用→光によって伝えられている
  - 光が侵入できない = 光子が抵抗力を受けて止まる  
= 質量がある
- 巨視的には
  - 磁場を打ち消す方向に電流が流れる（レンツの法則）
  - 普通は電流が止まるが，超伝導なので流れ続ける

ミクロのレベルでは，何が起きているか？

# その前に、自発的対称性の破れ

## ■ 強磁性体の例

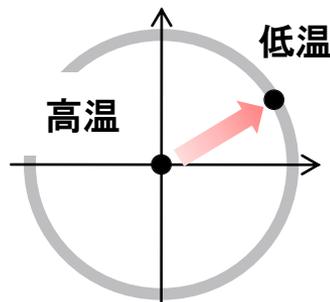
- 隣り合った原子のスピンの向きが揃ったほうがエネルギーが低くなる物質

- 高温では、分子運動によりスピンの向きはバラバラ

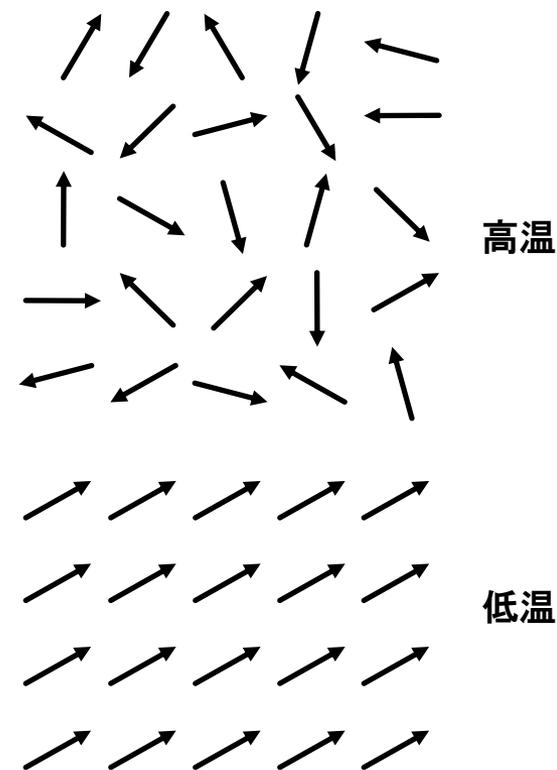
- どちらから見ても同じ（対称）

- 冷やすと、ある方向を向く磁石になる

- 対称性が破れた

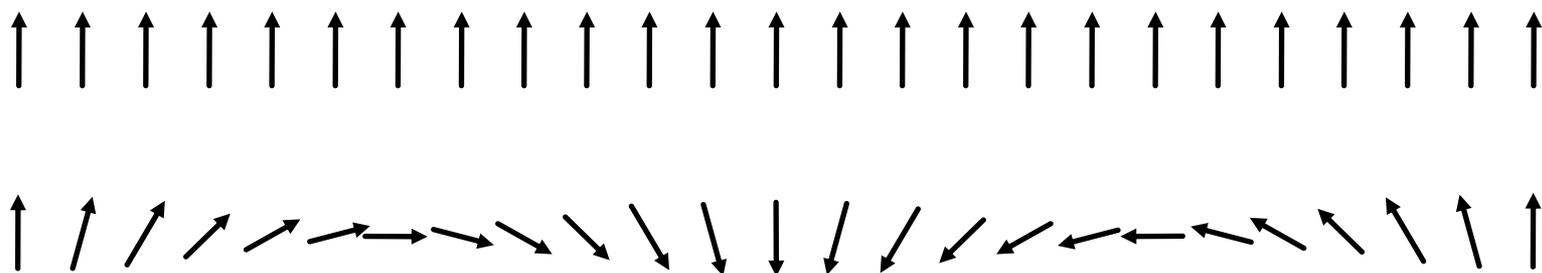


2次元平面上で、向きが揃っている度合いを表す量



# 南部-ゴールドストーンボゾン

- 例：強磁性体を伝わるスピン波（マグノン）
  - スピンが揃った（対称性が破れた）物質でのみおこる
- 対称性が破れた場合にのみできる「粒子」



# NGボゾンは力を吸収

- もしマグノンの波の伝わる速さが早い（遠くまで届く）と、スピンはほぼ同時に協同して揺れる
  - 遠くまで届く力を「いなす」ことができる  
= 力が遠くに伝わらなくなる
  - その結果、力の伝達粒子は重くなる



# 素粒子の世界では

- 「スカラー粒子」を使う ← ヒッグスです
  - 先ほどクーパー対, qq対のところで出てきた
  - 真空と同じ量子数を持ち, 気づかれずに存在
- 2つのスカラー粒子について
  - そのうち1つだけが大きな「値」を持つとき, エネルギーが最小だとする
    - 対称性が破れた状態
  - 「いなす」粒子 (NG ボゾン) 底をぐるぐる回る

