

Smart and Human

常翔学園

摂南大学



# 2008年度ノーベル物理学賞

南部陽一郎・小林誠・益川敏英の業績解説

—なぜ宇宙は物質で満ち満ちているのか

素朴な疑問にズバリ答える—

摂南大学工学部 数学物理学系教室

東 武大

2008年11月13日(木) 18:00-19:00

於 摂南大学10号館 プチテアトル

## 授賞理由の論文

Y. Nambu and G. Jona-Lasinio,

‘‘Dynamical model of elementary particles based on an analogy with superconductivity. I/II’’

I Phys. Rev. 122 (1961) 345、II Phys. Rev. 124 (1961) 246

総引用件数 (2008年11月13日現在) I 2976件 II 1338件

M. Kobayashi and T. Maskawa,

‘‘CP Violation In The Renormalizable Theory Of Weak Interaction, ‘’’

Prog. Theor. Phys. 49 (1973) 652

•総引用件数 5523件

世界第3位

総引用件数：論文の重要度の指標

参考：1000件以上引用された論文 288本 全体の0.12%

50件以上引用された論文 37607本 全体の16.01%

素粒子・原子核等の論文の総数：234885本(2008年11月13日現在)

<http://www.slac.stanford.edu/spires/play/citedist/>

## 素粒子物理学関連のノーベル賞

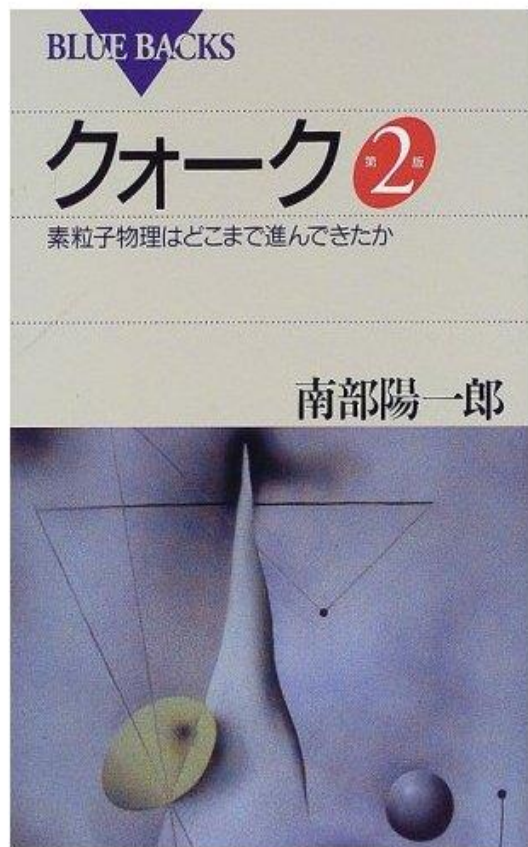
### 理論

- 1949年: 湯川秀樹 中間子論
- 1957年: Chen Ning Yang, Tsung-Dao Lee パリティ対称性の破れ
- 1965年: 朝永振一郎, Julian Schwinger, Richard Feynman 量子電磁力学の繰り込み
- 1969年: Murray Gell-Mann クォーク模型の提唱
- 1979年: Sheldon Lee Glashow, Abdus Salam, Steven Weinberg 電弱相互作用の統一
- 1999年: Gerardus 't Hooft, Martinus J. G. Veltman 電弱相互作用の繰り込み可能性
- 2004年: David Gross, David Politzer, Frank Wilczek 強い相互作用の理論の漸近的自由

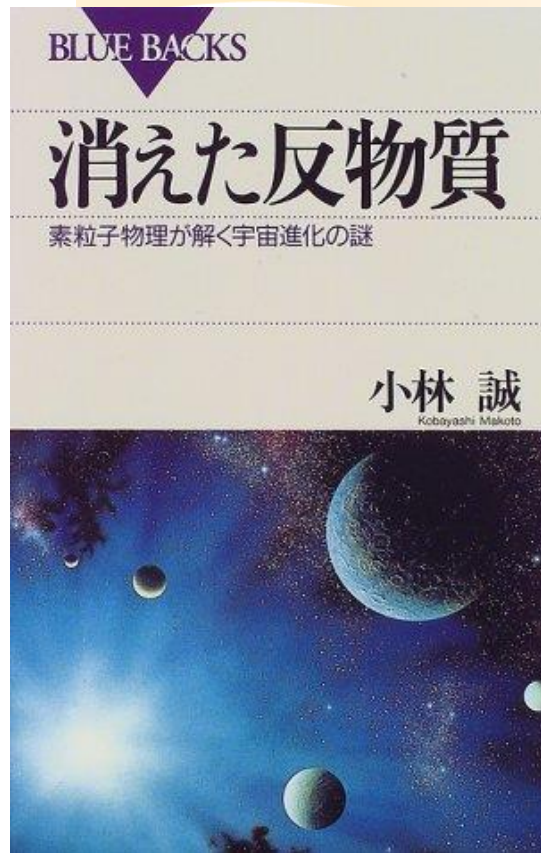
### 実験

- 1976年: Samuel Ting, Barton Richter チャームクォークの発見
- 1980年: James Watson Cronin, Val Logsdon Fitch 中性K中間子の崩壊のCP対称性の破れ
- 1984年: Carlo Rubbia, Simon van der Meel 弱い相互作用の媒介粒子の発見
- 1988年: Leon Lederman, Melvin Schwartz, Jack Steinberger ニュートリノの発見
- 1990年: Jerome Isaac Friedman, Henry W. Kendall, Richard E. Taylor 電子の深非弾性散乱
- 1995年: Martin Perl, Frederick Reines,  $\tau$  粒子、ニュートリノの検出
- 2002年: Raymond Davis, 小柴昌俊 宇宙ニュートリノの検出

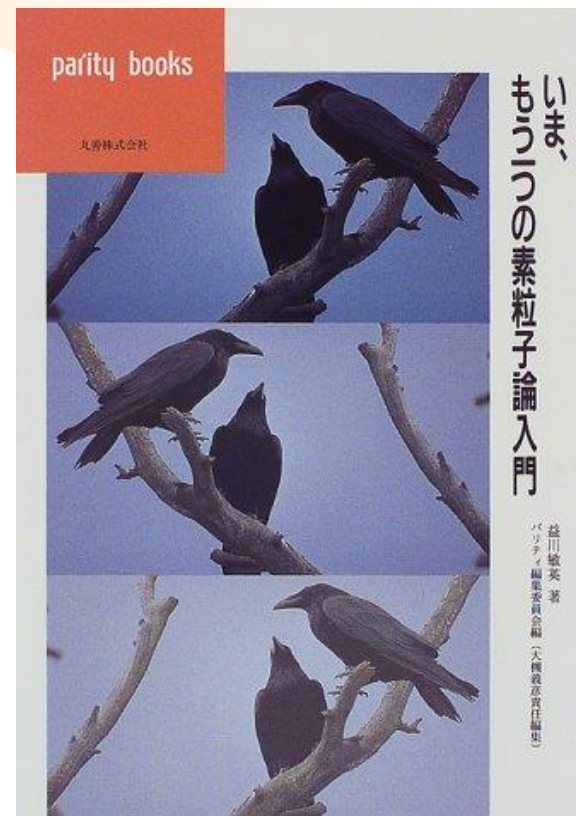
## 参考文献



南部陽一郎「クオーク」  
ISBN: 9784062572057  
(英語訳:978-9971966662 )



小林誠「消えた反物質」  
ISBN: 978-4062571746

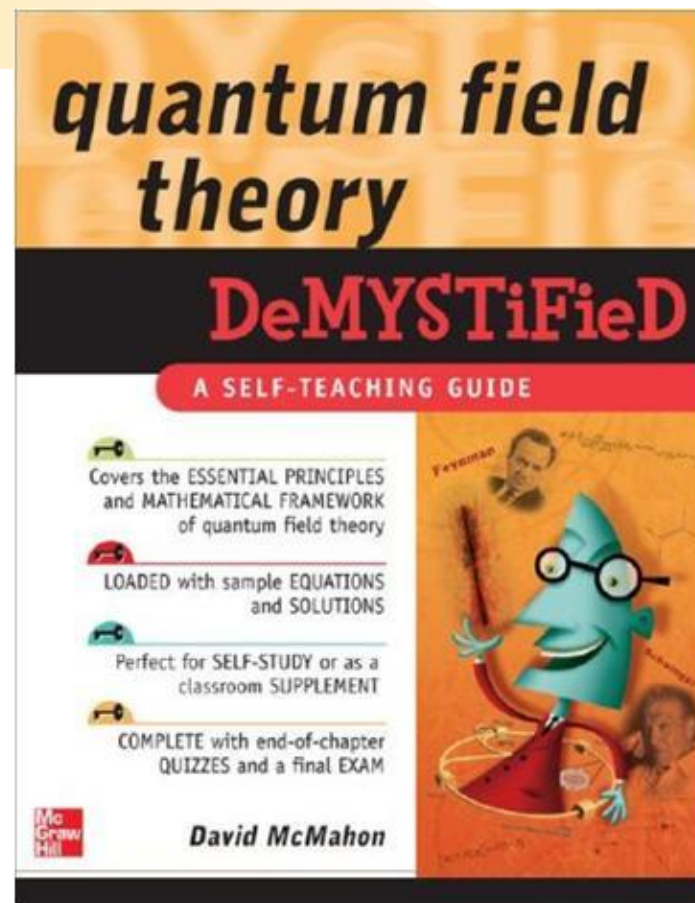


益川敏英  
「いま、もう一つの素粒子論入門」  
ISBN: 978-4621044957





横山広美  
「図解入門 よくわかる素粒子の基本と仕組み」  
ISBN: 978-4798012520



David McMahon  
“Quantum Field Theory Demystified”  
ISBN: 978-0071543828

## 2. 素粒子論研究とは？

6

素粒子論⇒物質と力を微視的に理解する学問

紀元前からの問い：物質は何から出来ているか？

ギリシア時代⇒『4元素論(four-element theory)』



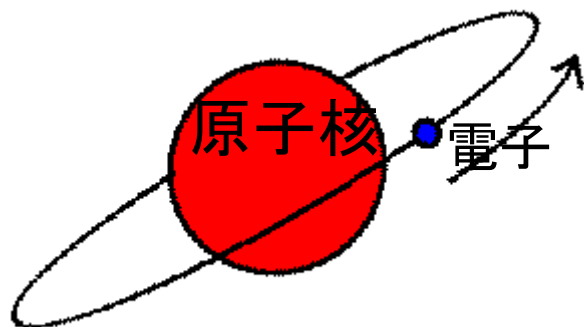
空気

火

土

水

19世紀：原子(atom)が物質を構成



# 2. 素粒子論研究とは？

## 物質の構成

クォーク(quark)

ジェームズ・ジョイス(James Joyce)の小説『フィネガンス・ウェイク』の鳥の鳴き声quarkに由来

陽子(proton)や中性子(neutron)を構成する粒子

ハドロン(hadron)ギリシア語のhadros(強い)に由来

クォークから構成される物質

- ・バリオン(baryon)

ギリシア語のbarys(重い)に由来

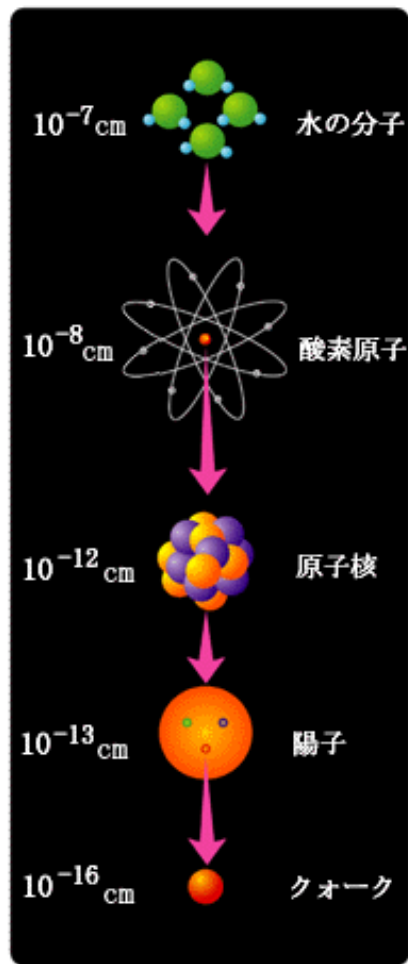
クォーク3つから成る粒子

- ・メソン(meson)

クォーク・反クォークから成る粒子

レプトン(lepton) ギリシア語のleptos(軽い)に由来

クォークから構成されず、内部構造を持たない粒子  
(電子、ニュートリノなど)



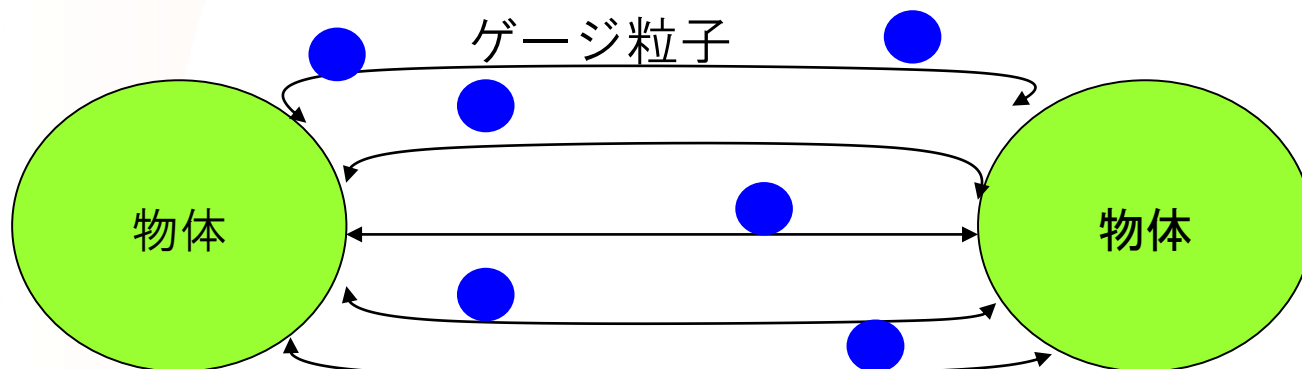
<http://www.kek.jp>

## 2. 素粒子論研究とは？

8

### 自然界の4つの相互作用

重力相互作用 (gravitational interaction)	$10^{-40}$
電磁相互作用 (electromagnetic interaction)	$10^{-2}$
弱い相互作用 (weak interaction)	$10^{-5}$
強い相互作用 (strong interaction)	1



- ・クォーク・レプトン [フェルミオン]  
⇒ 物質の最小構成要素
- ・ゲージ粒子 [ボゾン] ⇒ 力を媒介



## 2. 素粒子論研究とは？

9

重力相互作用 (gravitational interaction)

通常の方が落ちる現象、惑星間の公転運動

17世紀、ニュートン (Isaac Newton) に依る発見

重力子 (graviton) の媒介: 未発見、仮想上の粒子

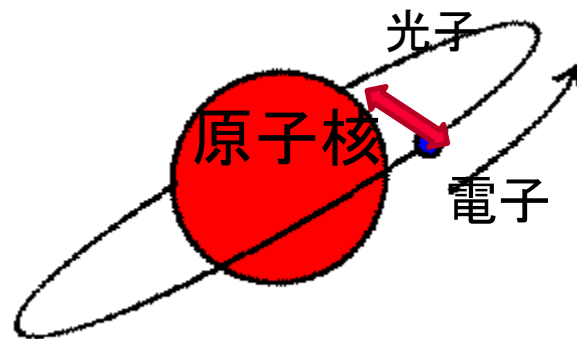


「ぐんまフラワーパーク」にあるニュートンの林檎の木の写真

## 2. 素粒子論研究とは？

電磁相互作用(electromagnetic interaction)

19世紀: マクスウェル(James Clerk Maxwell)  
に依る電気と磁気の統一的記述



光子(photon)の媒介: 発見済

<http://ppwww.phys.sci.kobe-u.ac.jp/~kurasige/lectures/OpenCourses/pamphlet/pamphlet.html>

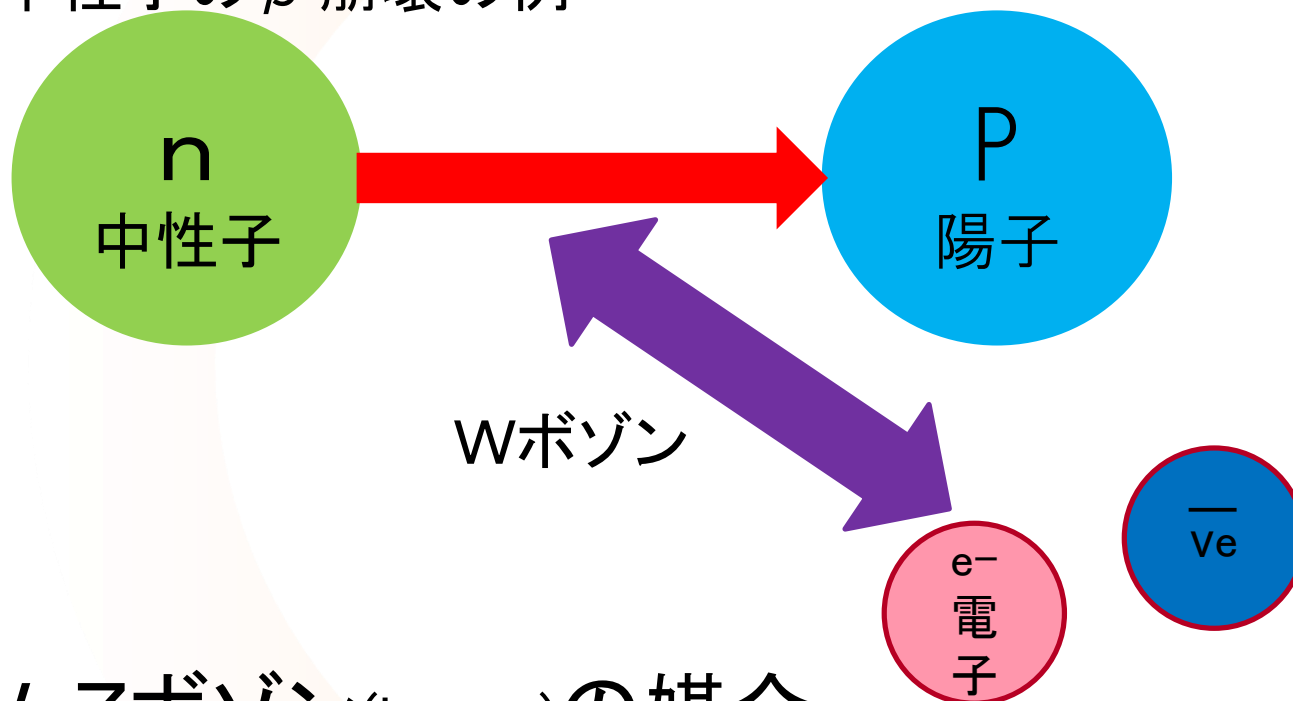
## 2. 素粒子論研究とは？

11

弱い相互作用(weak interaction)

原子核の $\beta$ 崩壊・ $\gamma$ 崩壊を引き起こす相互作用

中性子の $\beta$ 崩壊の例



W・Zボゾン(boson)の媒介:

1983年 CERNでRubbia等によって発見

## 2. 素粒子論研究とは？

強い相互作用(strong interaction)

クォークの間に働く相互作用

グルーオン(未発見)の媒介

距離が近い(交換される運動量が高い)ほど弱い



クォークを引き離すほど力が強い

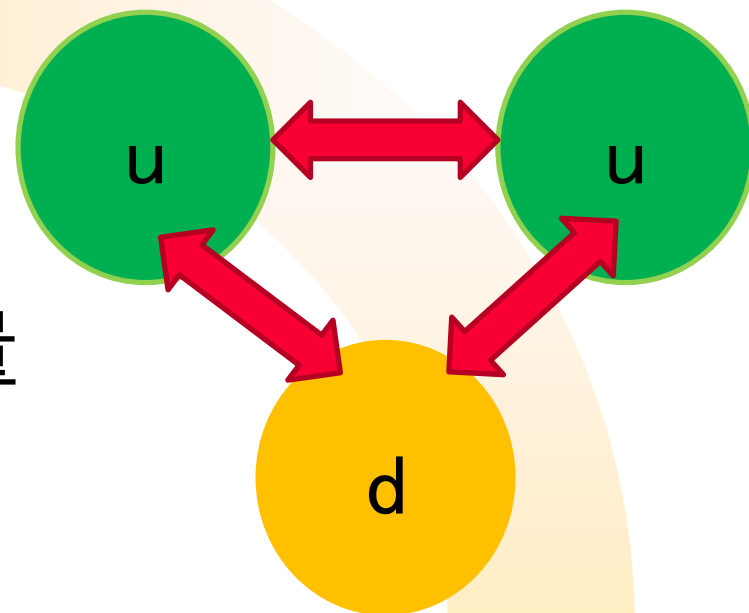


クォークは単体では取り出せない！

漸近的自由(asymptotic freedom)

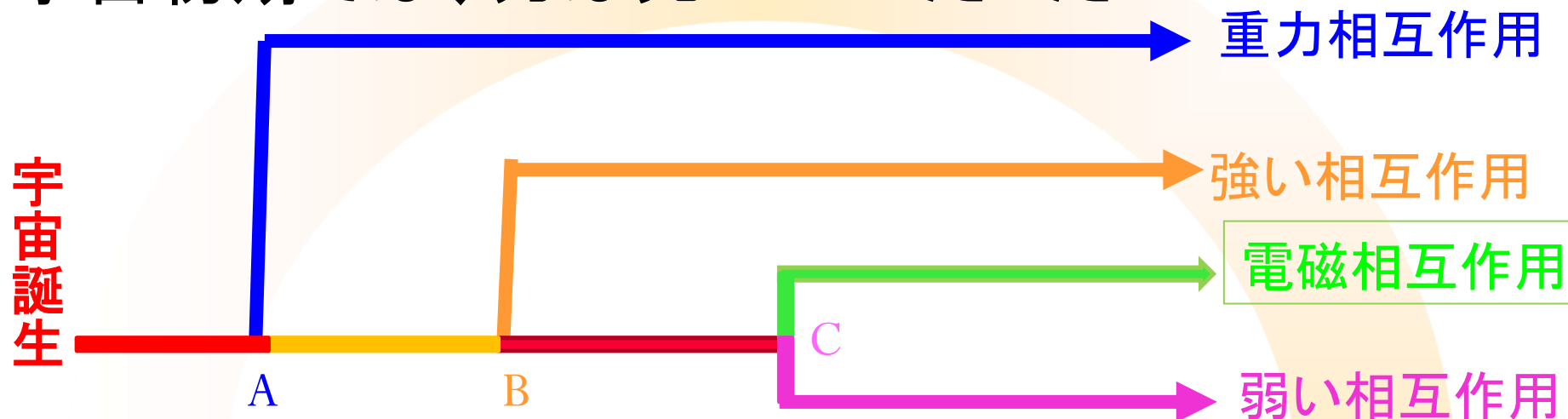
2004年ノーベル物理学賞

David Gross, David Politzer, Frank Wilczek



## 2. 素粒子論研究とは？

宇宙初期では、力は元々一つだった



	A	B	C
年齢(秒)	$10^{-43}$	$10^{-36}$	$10^{-11}$
温度(K)	$10^{32}$	$10^{28}$	$10^{15}$

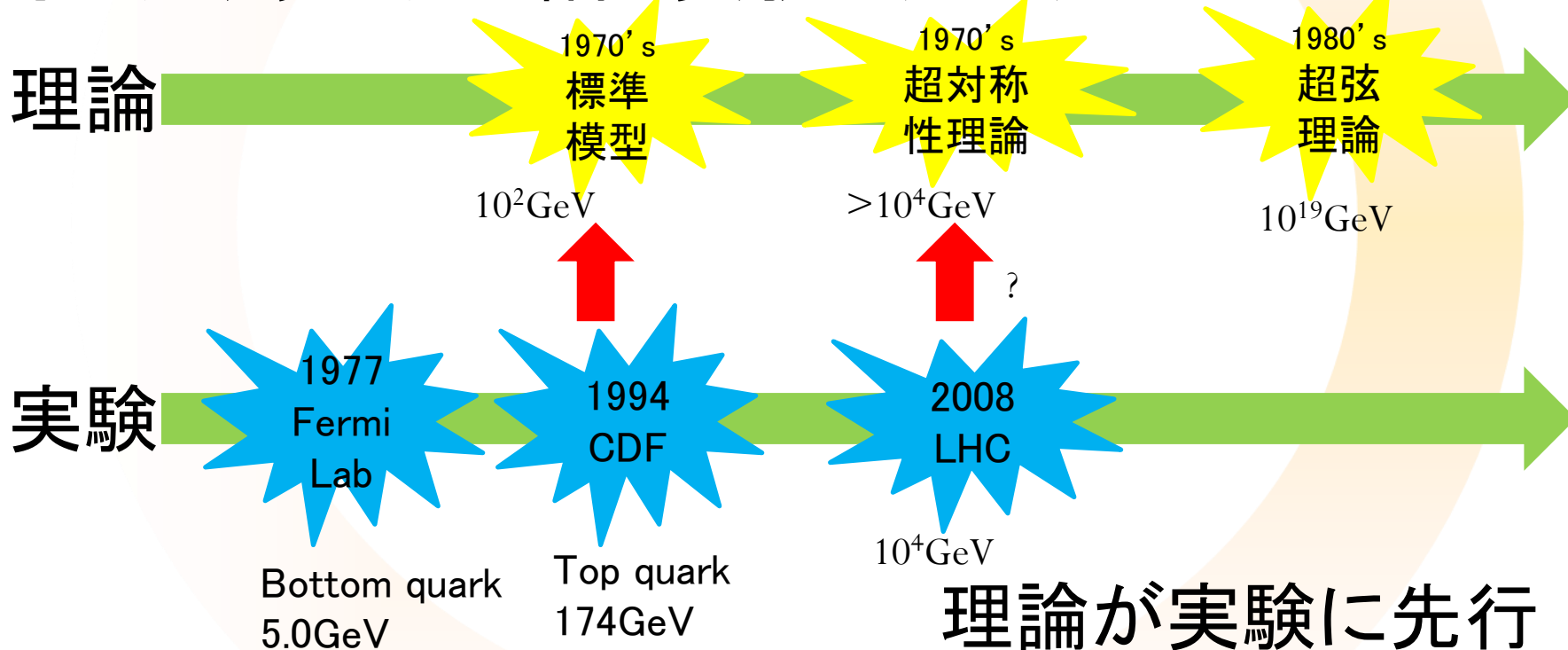
宇宙誕生の謎 ⇒ 4つの相互作用の統一理論



## 2. 素粒子論研究とは？

素粒子物理学研究の在り方⇒理論と実験の乖離  
自然科学の細分化

- 研究グループ: 理論と実験が別の研究室
- 学会・研究会: 理論と実験が別室別セッション



理論が実験に先行

## 光速( $c=3.0 \times 10^8$ [m/s])に近い速さの粒子の 微視的な運動

低速

高速

巨視的

ニュートン力学  
(Newtonian Mechanics)

特殊相対論  
(Special Relativity)

微視的

量子力学  
(Quantum Mechanics)

場の量子論  
(Quantum Field Theory)

特殊相対論 ⇒ 光速に近い速さの運動

・光速不変の原理 ⇒ 光の速度は一定

・4次元時空 ⇒ 時間と空間の絡み合った  
「時空」は4次元

・質量エネルギー ⇒

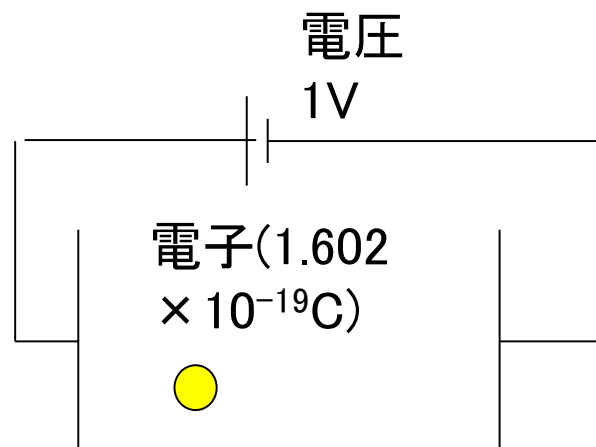
光速に近づくと加速しにくい

質量エネルギー :  $E[\text{J}] = mc^2[\text{J}]$

## エネルギーの単位

$$1\text{eV}(\text{electron volt}) = 1.602 \times 10^{-19}[\text{J}]$$

電子に1Vの電圧をかけて得られるエネルギー



電子の質量: $5.11 \times 10^5\text{eV} = 9.1 \times 10^{-31}\text{kg}$  とは？

アインシュタインの質量公式:  $E=mc^2$

換算公式:

$$1\text{eV} = 1.602 \times 10^{-19}[\text{J}] / (3.0 \times 10^8[\text{m/s}])^2 = 1.78 \times 10^{-36}[\text{kg}]$$

## ディラック方程式(Dirac Equation)に依る 物質場(フェルミオン)の記述

$$(i \sum_{\mu=0}^3 \gamma^{\mu} \partial_{\mu} - m) \psi(x) = 0$$

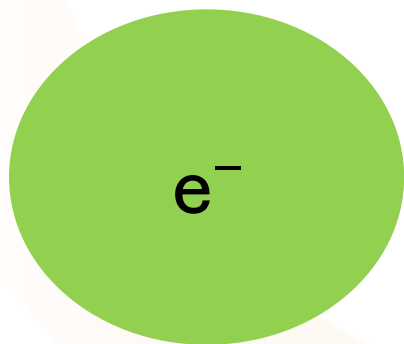
1階の微分方程式、 $\psi(x)$ は4成分

粒子(particle)と反粒子(anti-particle)が存在

反粒子: もとの粒子と電荷の正負が逆の粒子

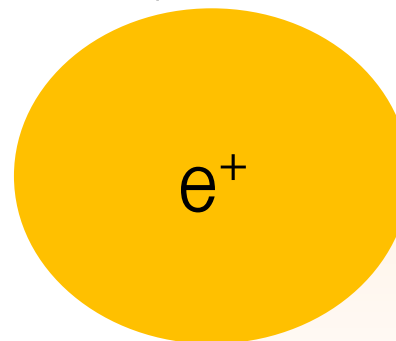
電子

(electron, 負の電荷)



陽電子

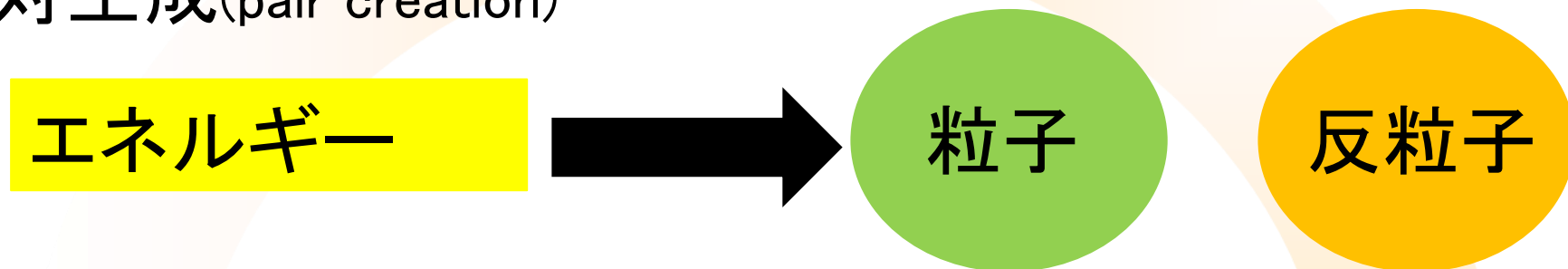
(positron, 正の電荷)



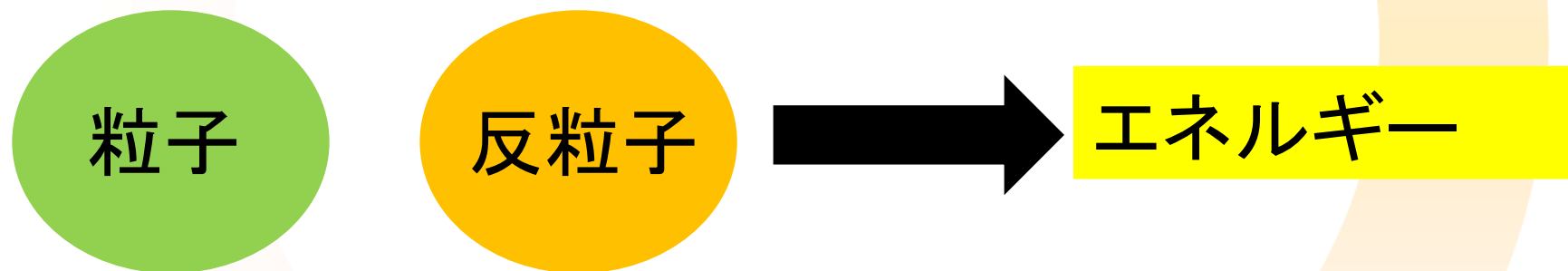


## 粒子・反粒子の対生成・対消滅

対生成(pair creation)



対消滅(pair annihilation)



宇宙初期: 粒子と反粒子の対生成

現在の宇宙: (物質) >>>>> (反物質)

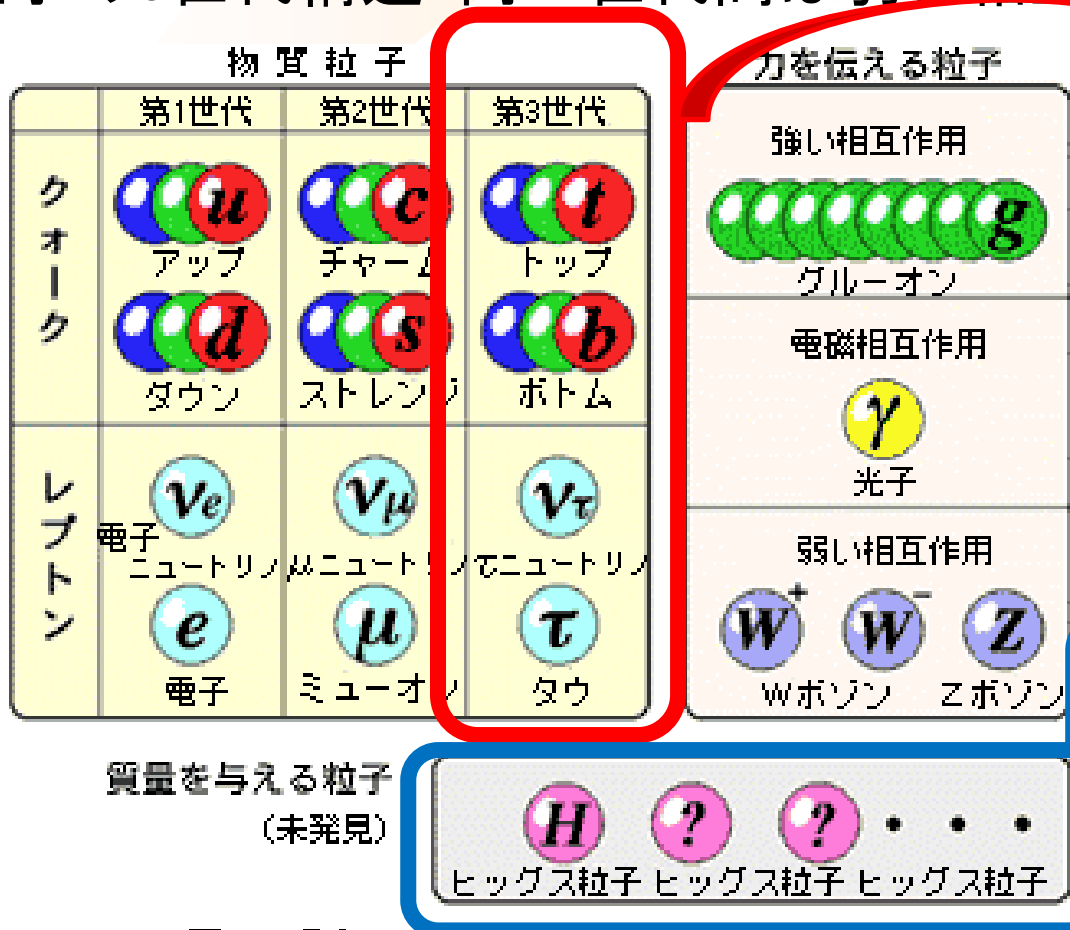
この不均衡の原因は？

# 3. 場の量子論

標準模型(Standard Model):1970年代

重力以外の3つの相互作用を記述

粒子の3世代構造:同一世代間は弱い相互作用で互いに変化する



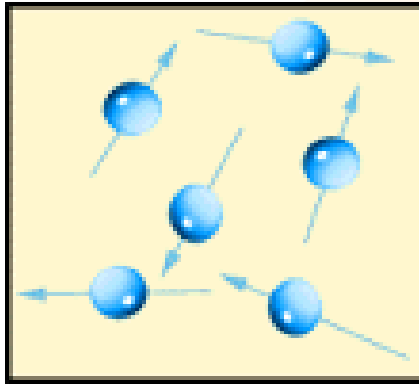
小林益川の業績  
第3世代の物質の  
存在を提唱

南部の業績  
自発的対称性の破れ  
(spontaneous  
symmetry breaking)

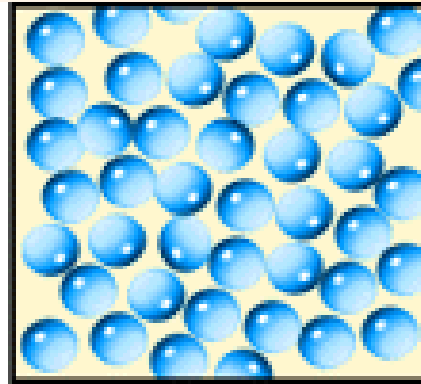
図1 現在の素粒子学「標準模型」の世界

# 4. 自発的対称性の破れ

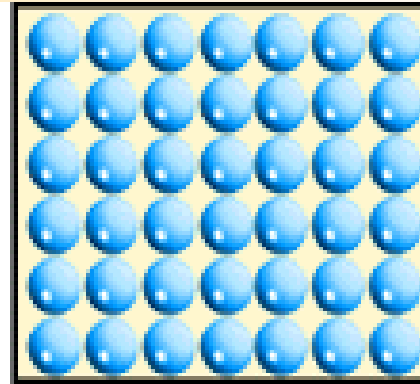
## 水の相転移



気体



液体



固体・結晶

<http://www.kek.jp>

高温、高い対称性  $\Rightarrow$  低温、低い対称性

## 宇宙における自発的対称性の破れ

宇宙初期

冷却

現在の宇宙

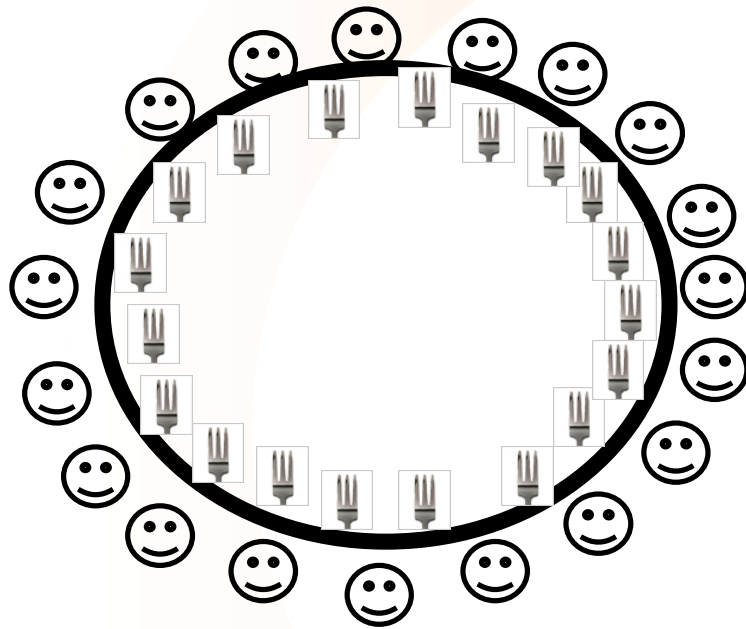
高エネルギー、高  
い対称性



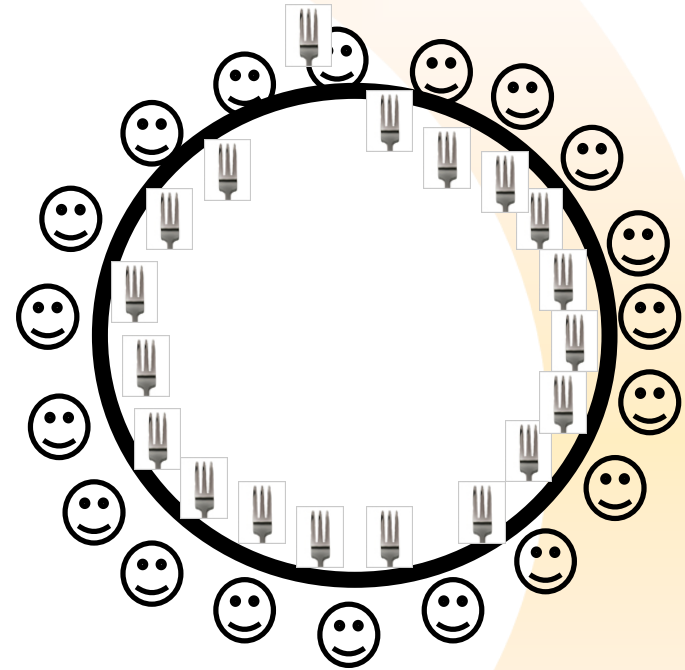
低エネルギー、低  
い対称性

# 4. 自発的対称性の破れ

## Abdus Salam(1979年ノーベル賞)による自発的対称性の破れ(spontaneous symmetry breaking)の比喩



右手、左手どちらのフォークを取ってもよい。



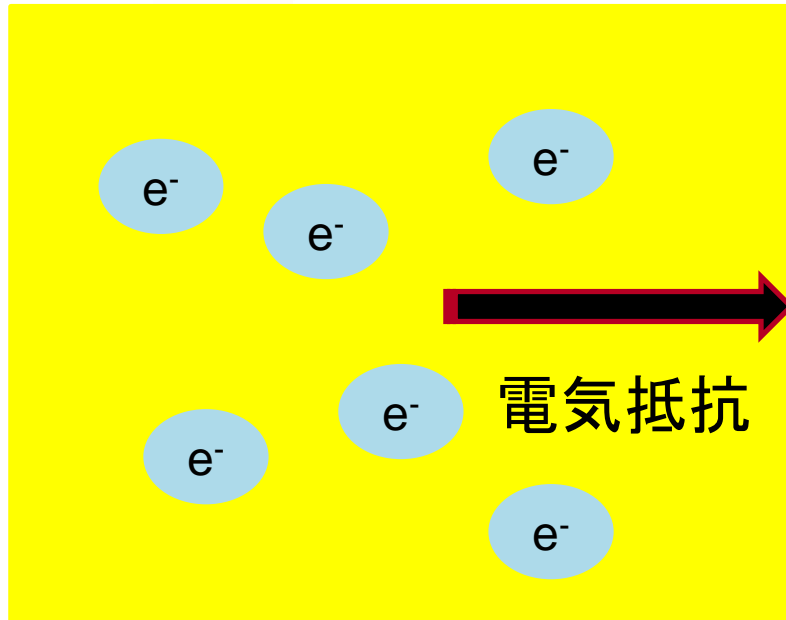
一度誰か一人が右手のフォークを取ると…  
他の人も右手のフォークを取る

# 4. 自発的対称性の破れ

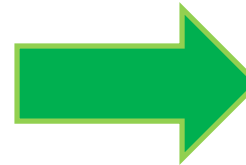
超電導(superconductivity)  $\Rightarrow$  BCS理論

John Bardeen, Leon Neil Cooper, John Robert Schrieffer  
"Theory of superconductivity," Phys. Rev. 108 (1957) 1175.  
1972年ノーベル物理学賞受賞

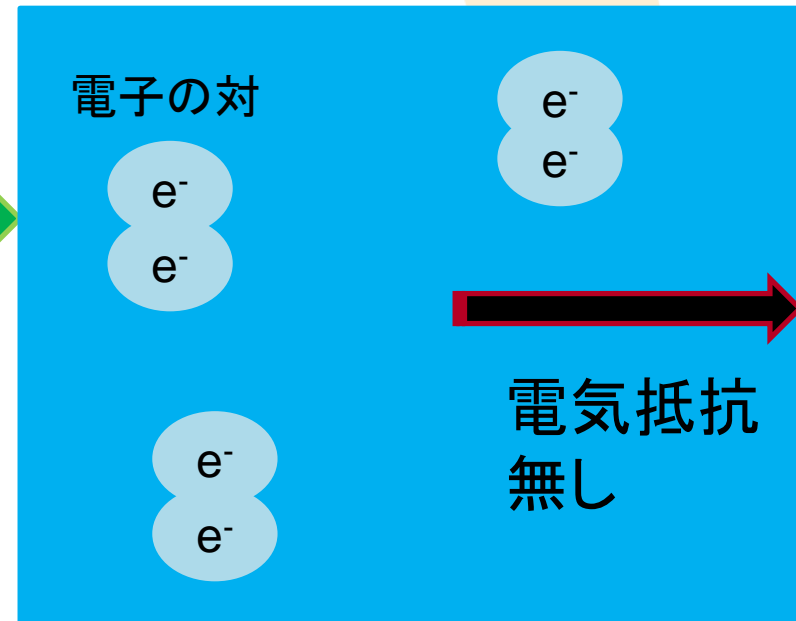
常温



冷却



低温





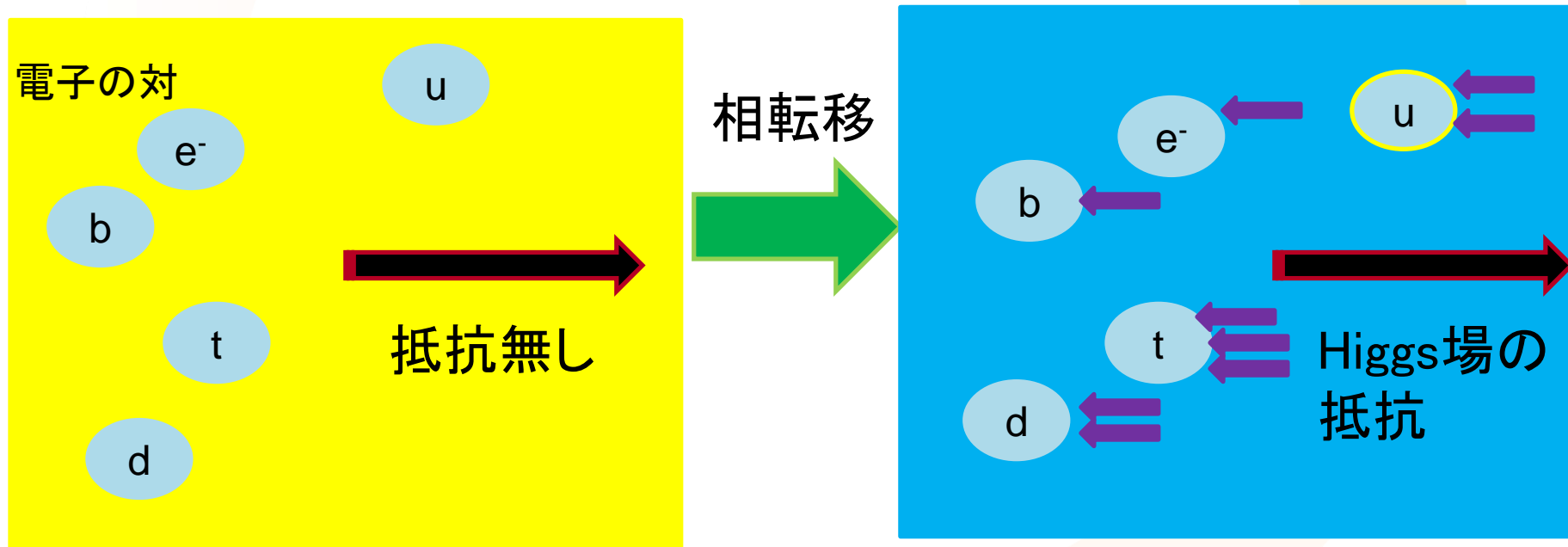
# 4. 自発的対称性の破れ

自発的対称性の破れと質量の起源

標準模型 → 物質が質量を持たない！

自発的対称性の破れ ⇒ 質量を与える

ヒッグス機構(Higgs mechanism)



# 4. 自発的対称性の破れ

ヒッグス粒子の質量:  $114\text{GeV} \sim 1000\text{GeV}$

素粒子を見るには？  $\Rightarrow$  加速器(accelerator)を使う



周長28km

<http://www.atlas.ch/photos/detector-site.html>



LHC実験(Large Hadron Collider experiment)

2008年開始、 $10\text{TeV}$ のエネルギー

ヒッグス粒子の発見？

素粒子論での離散的な対称性(discrete symmetry)

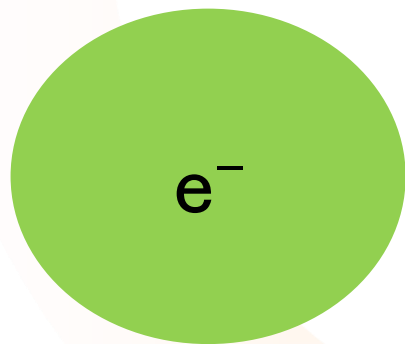
C対称性 (charge conjugation)

粒子と反粒子の間の対称性

電荷の符号の入れ替え

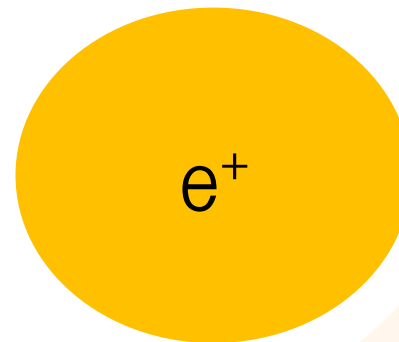
電子

(electron, 負の電荷)



陽電子

(positron, 正の電荷)



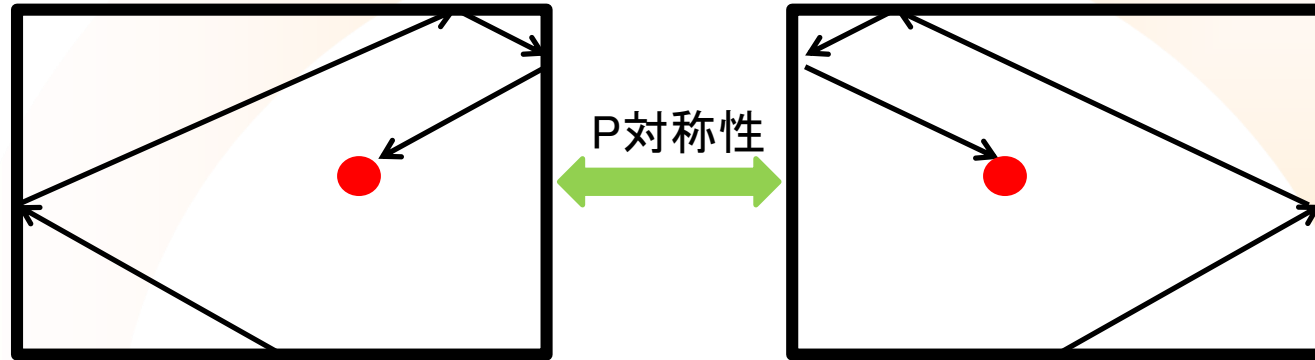
C対称性



# 5. CP対称性の破れ

P対称性 (parity)

座標の符号の入れ替えの対称性  $\vec{x} \Leftrightarrow -\vec{x}$



T対称性 (time)

時間の符号の入れ替えの対称性  $t \Leftrightarrow -t$

(例)古典力学のニュートン方程式  $F=m(d^2x/d^2t)$

P対称性:  $\vec{F} \rightarrow m(d^2(-x)/d^2t) = -\vec{F}$

T対称性:  $\vec{F} \rightarrow m(d^2x/d^2(-t)) = \vec{F}$

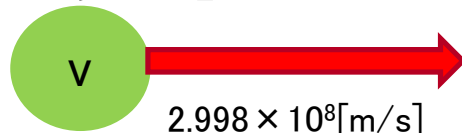
# 5. CP対称性の破れ

CP対称性 C変換とP変換を同時に行った対称性

C対称性だけだと...

左巻きのニュートリノと、  
右巻きの反ニュートリノの対称性

静止系から見て左巻きのニュートリノ



$2.998 \times 10^8 \text{ [m/s]}$

速度  $2.999 \times 10^8 \text{ [m/s]}$  の観測者から見ると...



左巻きと右巻きが逆転

CP対称性を合わせて考えると...

ニュートリノのカイラリティ(左か右巻きか)  
に関係なく反物質を考えることができる。



# 5. CP対称性の破れ

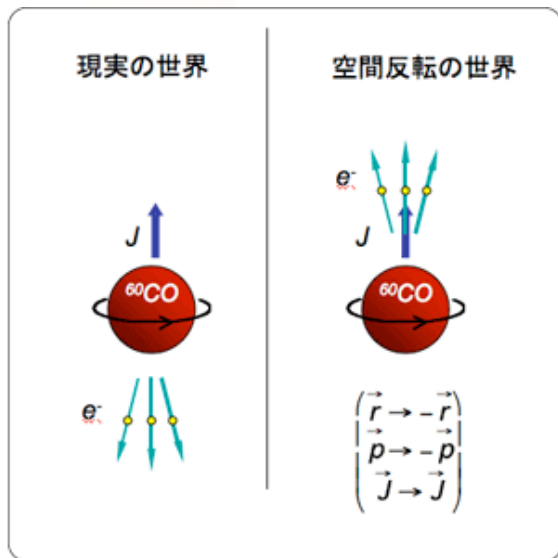
## パリティ対称性の破れの実験

C.N. Yang, T.D. Lee 1957年ノーベル物理学賞

弱い相互作用におけるパリティ対称性の破れを提唱(1956)

Wu Chien-Shiungの実験(1957)

コバルト60のベータ崩壊



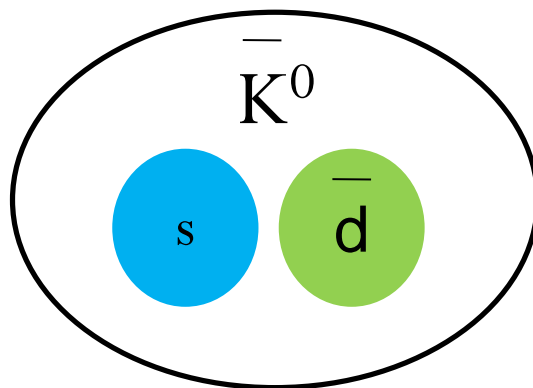
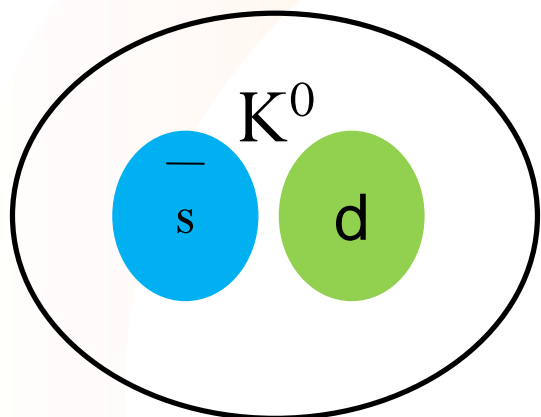
電子の放出する方向の不均衡

# 5. CP対称性の破れ

## CP対称性の破れの実験的証拠

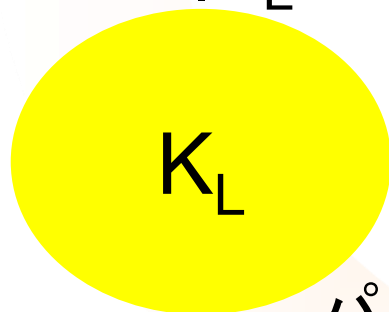
James Watson Cronin, Val Logsdon Fitch (1964) 1980年ノーベル物理学賞受賞

### 中性K中間子 (498MeV)

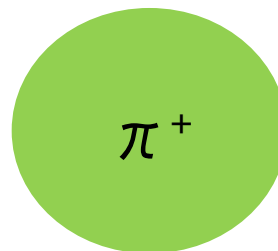


実験的に  $\epsilon \neq 0$

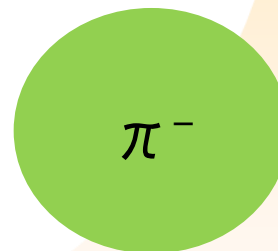
$$K_L \text{ 粒子: } |K_L\rangle = (1/\sqrt{2})[(1+\epsilon)|K^0\rangle + (1-\epsilon)|\bar{K}^0\rangle]$$



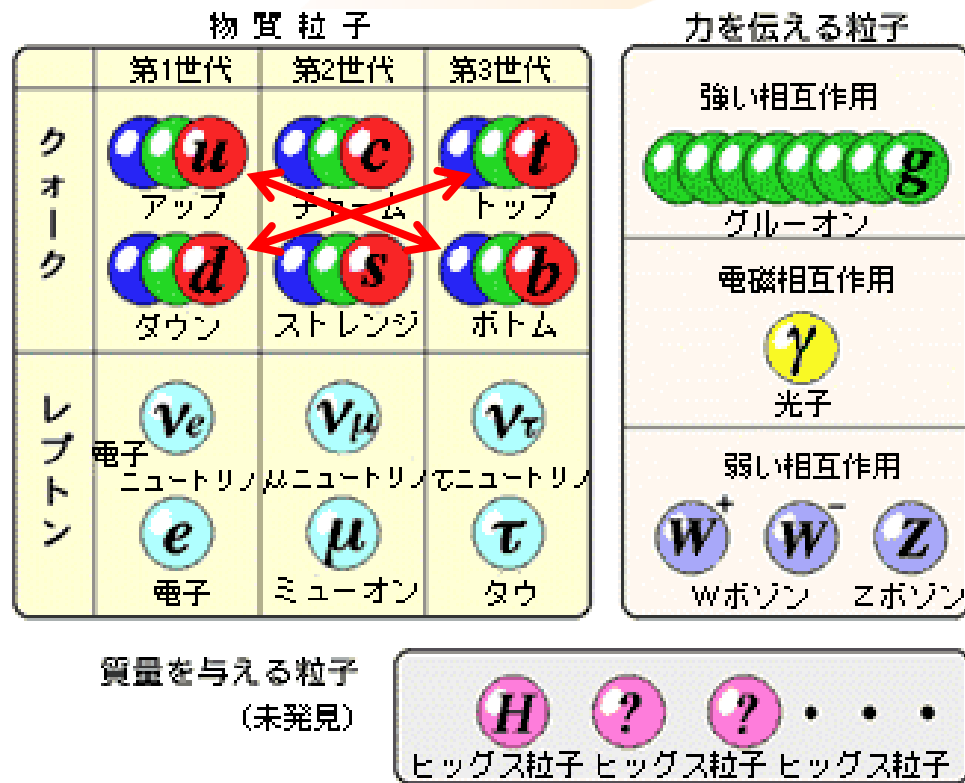
パリティ-



パリティ+



## 小林・益川の業績



3世代目の物質粒子の存在の予言

$t \leftrightarrow d$ 、 $u \leftrightarrow b$ の混合  
CP対称性の破れ

図1 現在の素粒子像「標準模型」の世界

# 5. CP対称性の破れ

小林・益川理論提唱当時(1973)

⇒u,d,sクォークしか発見されていない

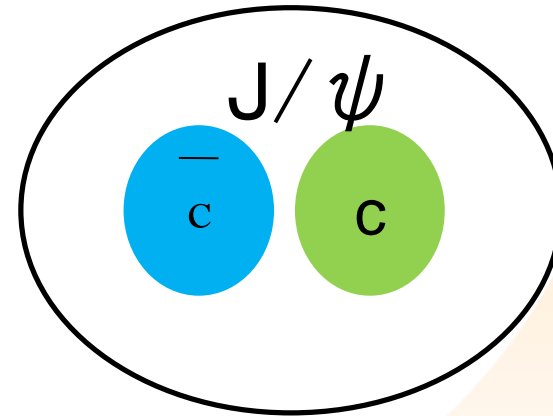
その後のc,t,bクォークの発見

チャーム(charm)クォーク (1.5GeV)

1974年:Samuel Ting, Burton Richter

J/ψ 中間子の発見

1976年ノーベル物理学賞受賞

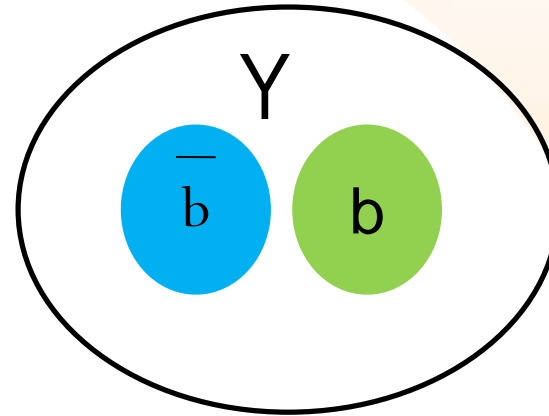


# 5. CP対称性の破れ

ボトム(bottom)クォーク (5.0GeV)

1977年:フェルミ研究所

Y (ウプシロン)中間  
子の発見



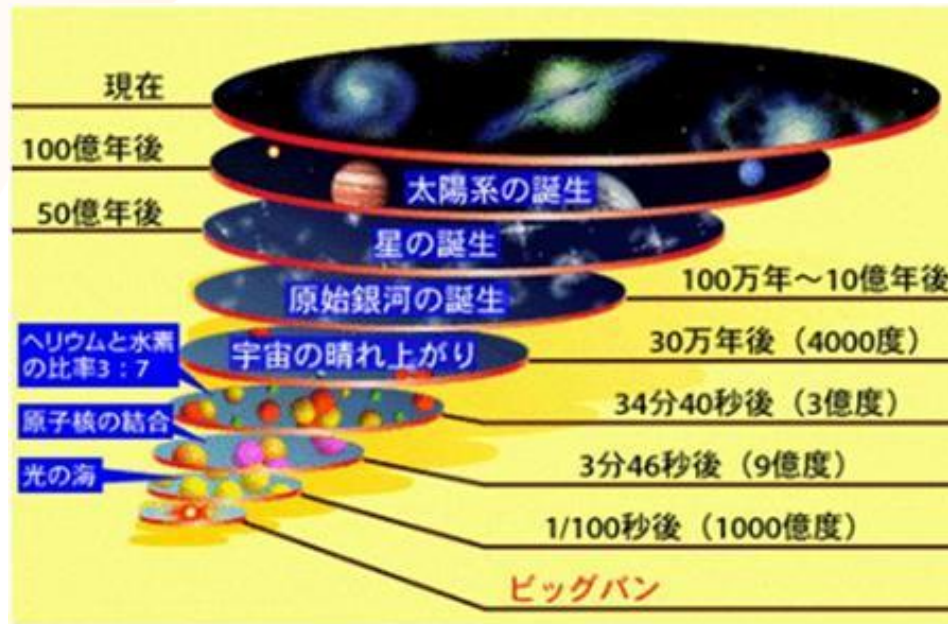
トップ(top)クォーク (174GeV)

1995年:CDF実験

# 5. CP対称性の破れ

## 反物質は何処へ消えた？

### 宇宙の起源: ビッグバン(big bang)



[http://spaceinfo.jaxa.jp/ja/shikumi\\_shi01.html](http://spaceinfo.jaxa.jp/ja/shikumi_shi01.html)

宇宙初期 ⇒ 物質と反物質は対等

宇宙の膨張の過程

⇒ 物質と反物質の均衡の破れ(CP対称性の破れ)

## 6. 終わりに



1973年、京都大学素粒子論研究室にて



2008年: 南部陽一郎、小林誠、益川敏英  
ノーベル物理学賞受賞

自発的対称性の破れ⇒物質の質量の起源

CP対称性の破れ⇒何故宇宙には反物質が  
殆ど無いのか？

宇宙生成の謎の根源的な問題