

# 素粒子の常識と 非常識

日笠健一

# 素粒子物理学のテーマ



# 素粒子とは

物質はいくらでも細かく分けることができるか

あるいはそれ以上分けられない  
構成要素があるか(原子論)

Atom

Ancient Greek ατομος (indivisible)

# 素粒子

物質含め自然界の最も基本的な構成要素

(20世紀初めより原子はさらに  
分割可能であることが判明)

# 素粒子物理学のテーマ

## ◇ 素粒子は何か

素粒子 = 万物の究極的な構成要素

## ◇ 我々の世界を構成している素粒子はどのようなものか

# 素粒子の没個性

## 自然の多様性の起源



# 自然界の多様性

- ◇ ヒトの遺伝子は皆異なる
  - ◇ ヒトの DNA は 99.9% 共通。
  - ◇ 残り 0.1% の違いでも, 80億人(+ 過去)同じ遺伝子はない
  - ◇ 4種の塩基 ATCG の並び方の違いから多様性が生ずる
- ◇ 異なる分子の種類は実際上無数に存在する
  - ◇ 80種類程度の安定元素の原子配列の並び方の数は膨大
- ◇ 元素の違いは, 原子を構成する電子の配列(電子配置)から来る
  - ◇ 同位体は原子核中の中性子数が異なるが, 電子配置は同じで, 化学的にはほぼ同じ性質

# Pauli の排他律

- ◇ 元素の化学的性質の違いは、原子の持つ電子数の違いによる
  - ◇ 原子内の各電子は、それぞれが異なる電子軌道にいる
  - ◇ 各電子軌道には、1つ(2つ)の電子しか存在できない
  - ◇ これを Pauli の排他律(排他原理)と呼ぶ
- 
- ◇ 排他律のおかげで、元素の化学的性質の違いが生ずる

# 元素の周期律表

列は外殻の電子数の違いに対応

Group	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Period 1	1 H																	2 He
Period 2	3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
Period 3	11 Na	12 Mg											13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
Period 4	19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
Period 5	37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe
Period 6	55 Cs	56 Ba	* 71 Lu	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn
Period 7	87 Fr	88 Ra	* 103 Lr	104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Ds	111 Rg	112 Cn	113 Nh	114 Fl	115 Mc	116 Lv	117 Ts	118 Og
			* 57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb		
			* 89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No		



# Pauli の排他律がなければ

電子は全部 1s 軌道に落ちる





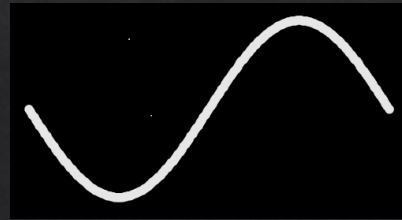
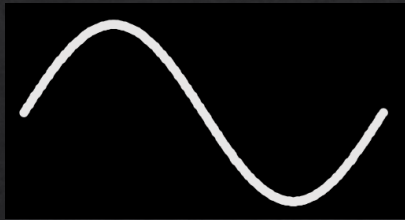
# Bose 統計・Fermi 統計

- ◇ 2つの同種粒子の入れ替えに対し、数学的には対称な状態と反対称な状態のどちらもありうる
- ◇ 現実には、対称、反対称の**どちらか**に限られる
  - ◇ Bose 粒子： 入れ替えで対称(光子など)
  - ◇ Fermi 粒子： 入れ替えで反対称(電子など)
- ◇ 電子のような Fermi 粒子は、1つの状態(軌道)には1つしか存在できない
- ◇ (光子はいくつでも存在できる)

# 反対称性

◇ 反対称  $AB - BA$

◇ 一つめと二つめの入れ替えで  $BA - AB = -(AB - BA)$



◇  $AA - AA = 0$

# 素粒子の同一性

- ◇ 同じ種類の素粒子は、すべて同じ性質を持つ
  - ◇ 質量、電荷など、実数値を取る物理量は完全に同じ値
  - ◇ マクロな物体なら、2つが完全に同じことは実際上起こらない
- ◇ 2つの同種素粒子を区別することは不可能
  - ◇ 電子と電子が衝突して散乱されたとき、衝突前のどちらの電子が衝突後のどちらの電子であるかは、原理的に答えられない
- ◇ 完全同一であるからこそ、排他原理が成立可能
  - ◇ 性質が異なれば、対称・反対称は意味を持たない
  - ◇ 反対称状態から出発しても、一般に対称な状態が混ざってくる
- ◇ **自然界の多様性は素粒子の完全同一性によって成立している**



# 相互作用



# 素粒子物理学のテーマ

- ◇ **素粒子**は何か

素粒子 = 万物の究極的な構成要素

- ◇ 我々の世界を構成している素粒子はどのようなものか

- ◇ 自然界の**基本相互作用**は何か

- ◇ 万物の変化はどのようにして起こっているか

# 変化

- ◇ 世界は時間の経過とともに変わっていく
- ◇ その変化は周囲からの影響により起こっている
- ◇ 影響は「力」(古典力学) or 「相互作用」(現代的)により表される

# 自然の法則

- ◇ 自然法則は「運動の法則」と「力の法則」に分けられる
- ◇ 例えば Newton 力学(古典力学)では
  - ◇ 運動の法則: Newton の運動方程式
    - ◇ 物体の運動の変化(加速度)は力によって決まる
    - ◇ 力が知れば, 運動がわかる
  - ◇ 力の法則: 自然界に実際にどのような力が存在するか
    - ◇ Newton の発見した力: **万有引力**(重力)



# 自然界の力

- ◇ 力は「基本力」と「複合力」(有効力)に分けられる
  - ◇ 力学で出てくる多くの力は複合力
    - ◇ バネの力, 抗力, 摩擦力, 抵抗力, ...
    - ◇ 多数の構成要素の間の基本力が組み合わさって起こる複雑な効果をうまく単純化して複合力として記述
    - ◇ あくまで近似的だが, 物理学の大半の分野で利用
- ◇ 素粒子の間の力は基本力(基本相互作用)
  - ◇ 最初に知られた基本力は Newton の万有引力
  - ◇ 他にどんな基本相互作用があるのか



# 2つめの相互作用

# 電磁気力

- ◇ 電気による現象を感じることはそれほど頻繁でないが、自然現象を奥深くで支配しているのは電磁気力(重力に加えて)
  - ◇ 光・電磁波
  - ◇ 固体の弾性
  - ◇ 化学反応
  - ◇ 分子・原子の性質

# 電磁気がすべての奥に

- ◇ 物質は原子から成り立っているが、原子の構造を決めているものは、原子核と電子の間に働く電磁力
  - ◇ (中性)原子の間の力(原子間力)も核と電子の電磁力から生ずる二次的な力
  - ◇ 化学反応は基本的に電子のやり取りによって起こるので電磁力が起源



# 水素原子

- ◇ 原子核(陽子)と電子からなる系。
  - ◇ 陽子: 大きさは  $10^{-15} \text{ m} = 1 \text{ fm}$       質量は電子の2千倍
  - ◇ 電子: 広がり未検出( $10^{-18} \text{ m}$ 以下)
- ◇ 電磁力による引力で構造が決まる
  - ◇ 原子の大きさは, 電磁力の大きさと電子の質量で決まる
  - ◇ 引力のため, 電子軌道の半径は小さい方が得
  - ◇ 不確定性関係のため, あまり小さいと損

# 水素原子の大きさ

- ◇ 原子の大きさは、電磁力の大きさと電子の質量で決まる
- ◇ 電子の質量を長さに換算：

$$\text{Compton 波長 } \lambda_e = \frac{\hbar}{m_e c} \sim 10^{-12} \text{ m} = 1 \text{ pm}$$

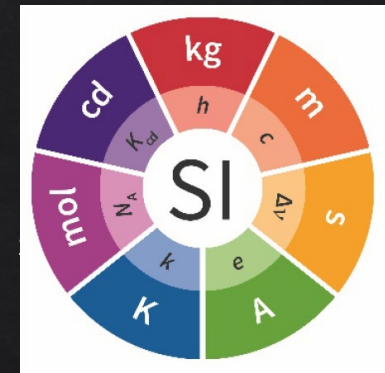
- ◇ 電磁相互作用の強さ：

$$\text{微細構造定数 } \alpha = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 \hbar c} \cong \frac{1}{137}$$

単位のない  
無次元量

- ◇ 原子の大きさ: Bohr 半径  $a_0 = \frac{1}{\alpha} \lambda_e \sim 10^{-10} \text{ m}$

現在の国際単位系 SI では、  
 $c, \hbar, e$  は誤差のない定数(換算定数)



# 重力は途方もなく微弱

- ◇ 陽子と電子の間の万有引力は、電磁力より40桁小さい

$$\frac{G_N m_p m_e \frac{1}{r^2}}{\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0} \frac{1}{r^2}} \cong 4.4 \times 10^{-40}$$

- ◇ 電磁力の代わりに重力で水素原子を作ったとしたら、原子の大きさは宇宙の大きさよりはるかに大きくなる
- ◇ 素粒子の間の力としては、重力は全く無視できる



# 素粒子を記述する理論

# 理論的枠組み

(特殊)相対性理論 + 量子力学 + 粒子の同一性から導かれる理論

## 相対論的量子場理論

(長くてあまりよい名前ではないが)

どのような相互作用が可能かは厳しく制限される

# 力の形

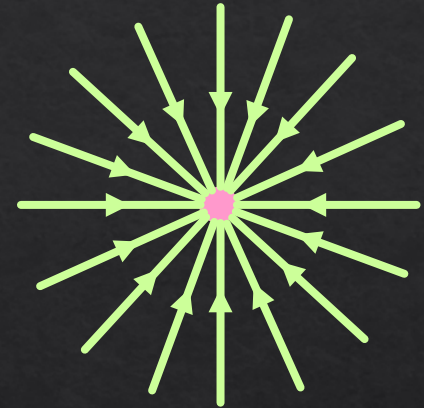
- ◇ 古典力学や(非相対論的)量子力学では, ポテンシャルはさまざまな関数形が可能(応用範囲が広い)
- ◇ 相対論的量子場理論から導かれるポテンシャルは, かなり限られる
  - ◇ 電磁場(光子, 質量0)によって生ずるポテンシャルは  $1/r$  に比例  
(力は  $1/r^2$ ) 万有引力も同様



# なぜ $1/r^2$ か

## ◇ 力線

- ◇ 電荷を持つ粒子から電気力線が周囲に広がる
- ◇ 力の大きさは電気力線の密度に比例
- ◇ 半径  $r$  の球の表面積は  $4\pi r^2 \rightarrow$  力は  $1/r^2$



## ◇ 空間の次元による

- ◇ 3次元空間では力線の広がり方は距離の2乗
- ◇ 空間が2次元なら力は  $1/r$
- ◇ 空間が1次元なら力の大きさは距離によらない

# 力の形

- ◇ 古典力学や(非相対論的)量子力学では, ポテンシャルはさまざまな関数形が可能(応用範囲が広い)
- ◇ 相対論的量子場理論から導かれるポテンシャルは, かなり限られる
  - ◇ 電磁場(光子, 質量0)によって生ずるポテンシャルは  $1/r$  に比例  
(力は  $1/r^2$ ) 万有引力も同様
  - ◇ 湯川秀樹: 質量を持つ粒子によって生ずるポテンシャルは  
 $\frac{e^{-\mu r}}{r}$  に比例(湯川ポテンシャル)

$$r \gg \frac{1}{\mu} = \frac{\hbar}{mc} \text{ (到達距離の外) では力は実際上 } 0$$

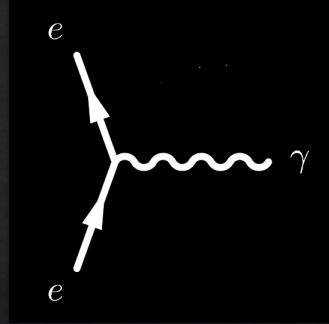
質量があると力線が途中で消える

# QED



# 電磁気の理論 (相対論的量子場理論)

- ◇ 量子電気力学 (Quantum Electrodynamics, QED)
  - ◇ 電子と光子(電磁場)の相互作用を記述する
  - ◇ 電子の質量と電荷だけですべての物理量が計算できる
  - ◇ 理論は Feynman グラフで書くと, 単に



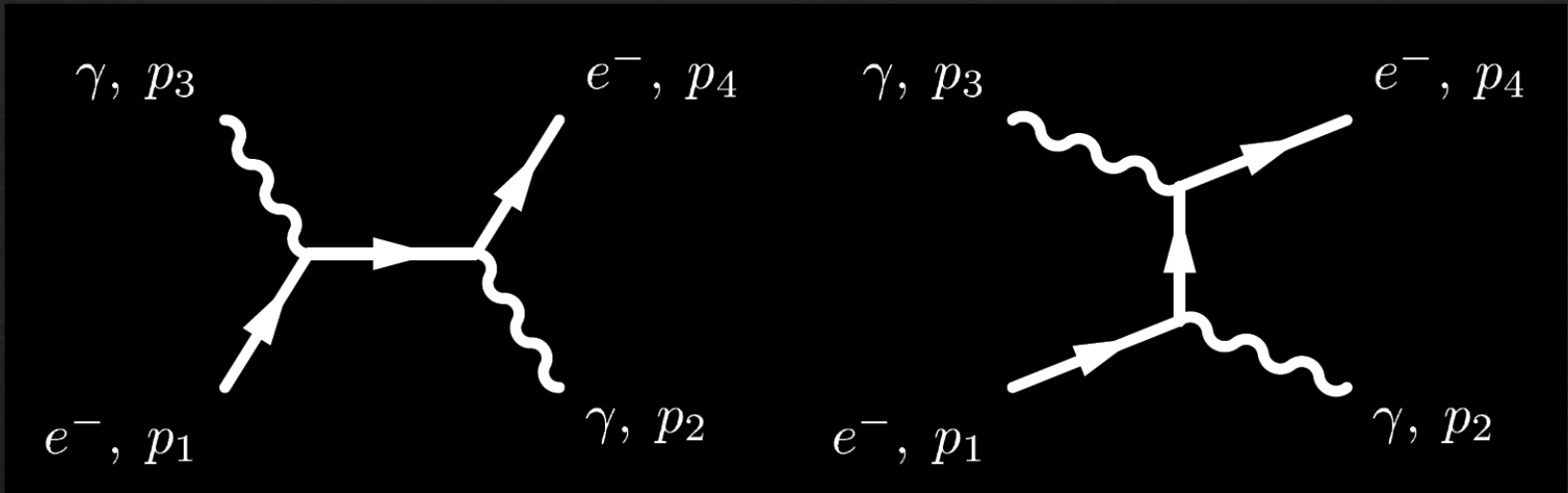
$$= -ie\gamma_\alpha$$

$e$ : 電子の電荷  
 $\gamma_\alpha$ : Dirac のガンマ行列

に尽きる(!!!)

# Compton 散乱

$$\gamma + e^- \rightarrow \gamma + e^-$$



Feynman グラフから Feynman 規則を用いて、  
散乱振幅  $\Rightarrow$  散乱確率が書き下せる。

# Klein-仁科 (1928)

- ◇ Compton 散乱 (光子・電子散乱) の相対論的な断面積の公式

$$\gamma + e^- \rightarrow \gamma + e^-$$

- ◇ Dirac 方程式 (電子の相対論的波動方程式) の提案と同じ年

853

## Über die Streuung von Strahlung durch freie Elektronen nach der neuen relativistischen Quantendynamik von Dirac.

Von O. Klein und Y. Nishina in Kopenhagen.

(Eingegangen am 30. Oktober 1928.)

Auf Grund der neuen, von Dirac entwickelten relativistischen Quantendynamik wird die Intensität der Comptonstreuung berechnet. Das Resultat zeigt Abweichungen von den entsprechenden Dirac-Gordonschen Formeln, die von der zweiten Größenordnung hinsichtlich des Verhältnisses der Energie des primären Lichtquants zu der Ruheenergie des Elektrons sind.

Einleitung. Auf Grundlage der älteren Form der relativistischen Quantenmechanik haben Dirac\* und Gordon\*\* eine Theorie der Intensität und Polarisation der Comptonstreuung entwickelt, die für nicht zu kurzwellige Strahlung in guter Übereinstimmung mit der Erfahrung zu sein scheint. Nach der kürzlich von Dirac\*\*\* entwickelten neuen relativistischen Quantendynamik, bei der die mit der Eigenrotation des Elektrons zusammenhängenden Erscheinungen von selbst berücksichtigt werden, hat sich die Grundlage für eine Theorie der Streuung des Lichtes an freien Elektronen geändert, und man kann erwarten, daß auch die Ergebnisse der Dirac-Gordonschen Theorie des Comptoneffekts hiervon beeinflußt werden. In der vorliegenden Arbeit haben wir versucht, das

869

## Die Polarisation der Comptonstreuung nach der Diracschen Theorie des Elektrons.

Von Y. Nishina in Kopenhagen.

(Eingegangen am 30. Oktober 1928.)

In Fortsetzung der voranstehenden Arbeit von Klein und dem Verfasser\* ist der Polarisationszustand des Lichtes, das von einem freien ruhenden Elektron gestreut wird, nach der Diracschen Theorie des Elektrons näher untersucht worden. Es zeigt sich, daß für eine gegebene Anfangsrichtung des magnetischen Moments des Elektrons die gestreuten Strahlen bei linear polarisiertem einfallenden Lichte im allgemeinen durch zwei inkohärente elliptisch polarisierte Strahlungen dargestellt werden können, was mit den Übergängen zu den beiden nach der Theorie des Magnetelektrons möglichen Endzuständen zusammenhängt. Es wird ein Ausdruck für die Intensität des zweimal rechtwinklig gestreuten Lichtes gegeben, der einen direkten Vergleich mit den experimentellen Untersuchungen des Polarisationszustandes der Comptonstreuung gestattet.

Nach der Theorie von Dirac\*\* und Gordon\*\*\* ist der Polarisationszustand des Lichtes, das durch freie Elektronen gestreut wird, genau derselbe, wie er nach der klassischen Theorie zu erwarten wäre. Dieses Resultat scheint in Übereinstimmung zu sein mit den experimentellen Ergebnissen von Kallmann und Mark\*\*\*\* und Lukirsky†. Im Gegensatz zu diesem Resultat ergibt die hier entwickelte Theorie eine Polarisation, die bei kurzwelliger Strahlung beträchtlich von der klassisch zu erwartenden Polarisation abweicht.



# 時代

- ◇ 1925: Heisenberg 行列力学
  - ◇ 1926: Schrodinger 方程式
- } 量子力学
- ◇ 1928: Dirac 方程式
    - ◇ 相対論的な電子の波動方程式
    - ◇ 反粒子(陽電子)の存在
  - ◇ 1929: Heisenberg-Pauli 量子場理論

# Klein-仁科 (1928)

- ◇ Compton 散乱 (光子・電子散乱) の相対論的な断面積の公式

$$\gamma + e^- \rightarrow \gamma + e^-$$

- ◇ Dirac 方程式 (電子の相対論的波動方程式) の提案と同じ年

853

## Über die Streuung von Strahlung durch freie Elektronen nach der neuen relativistischen Quantendynamik von Dirac.

Von O. Klein und Y. Nishina in Kopenhagen.

(Eingegangen am 30. Oktober 1928.)

Auf Grund der neuen, von Dirac entwickelten relativistischen Quantendynamik wird die Intensität der Comptonstreuung berechnet. Das Resultat zeigt Abweichungen von den entsprechenden Dirac-Gordonschen Formeln, die von der zweiten Größenordnung hinsichtlich des Verhältnisses der Energie des primären Lichtquants zu der Ruheenergie des Elektrons sind.

Einleitung. Auf Grundlage der älteren Form der relativistischen Quantenmechanik haben Dirac\* und Gordon\*\* eine Theorie der Intensität und Polarisation der Comptonstreuung entwickelt, die für nicht zu kurzwellige Strahlung in guter Übereinstimmung mit der Erfahrung zu sein scheint. Nach der kürzlich von Dirac\*\*\* entwickelten neuen relativistischen Quantendynamik, bei der die mit der Eigenrotation des Elektrons zusammenhängenden Erscheinungen von selbst berücksichtigt werden, hat sich die Grundlage für eine Theorie der Streuung des Lichtes an freien Elektronen geändert, und man kann erwarten, daß auch die Endresultate der Dirac-Gordonschen Theorie des Comptoneffekts hiervon beeinflußt werden. In der vorliegenden Arbeit haben wir versucht, das

869

## Die Polarisation der Comptonstreuung nach der Diracschen Theorie des Elektrons.

Von Y. Nishina in Kopenhagen.

(Eingegangen am 30. Oktober 1928.)

In Fortsetzung der voranstehenden Arbeit von Klein und dem Verfasser\* ist der Polarisationszustand des Lichtes, das von einem freien ruhenden Elektron gestreut wird, nach der Diracschen Theorie des Elektrons näher untersucht worden. Es zeigt sich, daß für eine gegebene Anfangsrichtung des magnetischen Moments des Elektrons die gestreuten Strahlen bei linear polarisiertem einfallenden Lichte im allgemeinen durch zwei inkohärente elliptisch polarisierte Strahlungen dargestellt werden können, was mit den Übergängen zu den beiden nach der Theorie des Magnetelektrons möglichen Endzuständen zusammenhängt. Es wird ein Ausdruck für die Intensität des zweimal rechtwinklig gestreuten Lichtes gegeben, der einen direkten Vergleich mit den experimentellen Untersuchungen des Polarisationszustandes der Comptonstreuung gestattet.

Nach der Theorie von Dirac\*\* und Gordon\*\*\* ist der Polarisationszustand des Lichtes, das durch freie Elektronen gestreut wird, genau derselbe, wie er nach der klassischen Theorie zu erwarten wäre. Dieses Resultat scheint in Übereinstimmung zu sein mit den experimentellen Ergebnissen von Kallmann und Mark\*\*\*\* und Lukirsky†. Im Gegensatz zu diesem Resultat ergibt die hier entwickelte Theorie eine Polarisation, die bei kurzwelliger Strahlung beträchtlich von der klassisch zu erwartenden Polarisation abweicht.

**The Scattering of Light by Free Electrons  
according to Dirac's New Relativistic Dynamics.**

DIRAC and Gordon have given a quantum-dynamical treatment of the problem of the scattering of light by free electrons which seems to be in good agreement with experimental results. Since the development due to Dirac of a more rational relativistic dynamics of the electron, which automatically takes the so-called 'spin' phenomena into account, the basis of the theory of the intensity and polarisation of the Compton scattering is, however, somewhat modified. We have undertaken a calculation, based on the new theory, of the intensity of the light scattered by an electron under the influence of a plane monochromatic wave train. When the incident radiation is unpolarised—a case where the least deviation from the former theory would be expected—our result can be expressed by the following formula:

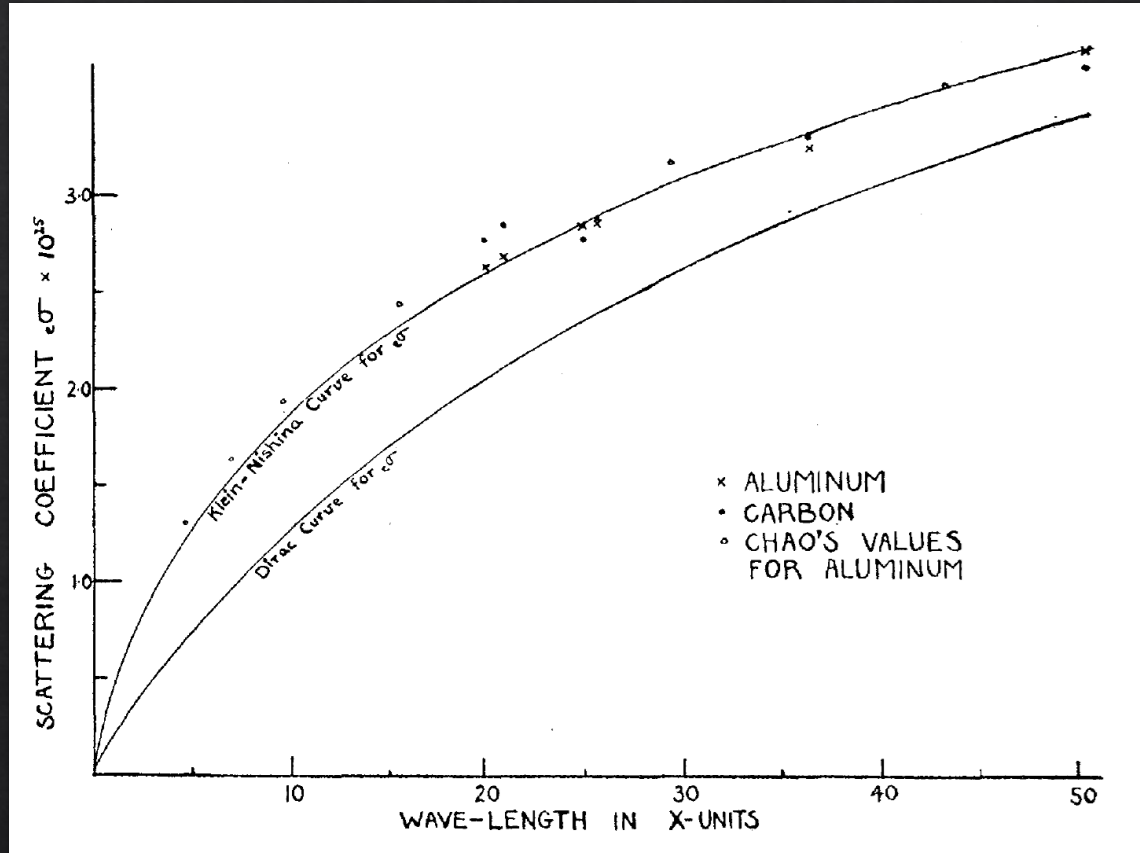
$$I = I_0 \frac{e^4}{2m^2c^4r^2} \frac{(1 + \cos^2 \theta)}{\left\{ 1 + \frac{h\nu}{mc^2}(1 - \cos \theta) \right\}^3} \left( 1 + \left( \frac{h\nu}{mc^2} \right)^2 \frac{(1 - \cos \theta)^2}{(1 + \cos^2 \theta) \left( 1 + \frac{h\nu}{mc^2}(1 - \cos \theta) \right)} \right) \quad (1)$$

O. KLEIN.  
Y. NISHINA.

Universitetets Institut for teoretisk Fysik,  
Copenhagen, Aug. 3.



# 実験との一致



Read, Lauritsen 1934

# QED: 発散の問題

- ◇ Klein-仁科の公式は実験とよく一致
- ◇ 微細構造定数  $\alpha \cong \frac{1}{137}$  について最低次 ( $\alpha^2$ ) の近似式
- ◇ 理論の精度をさらに高めよう(高次補正の計算)とすると, 答が無量大になるという問題が生ずる (1934-)

# くりこみ理論

- ◇ 朝永振一郎, Schwinger, Feynman, Dyson, ... (1947-)
  - ◇ 朝永・Schwinger・Feynman: ノーベル物理学賞(1965)
- ◇ QED の高次の計算で現れる無限大は, 電子の質量と電荷にうまく押し込めることができる
- ◇ 無限大を隠した後はすべて有限の答が得られる

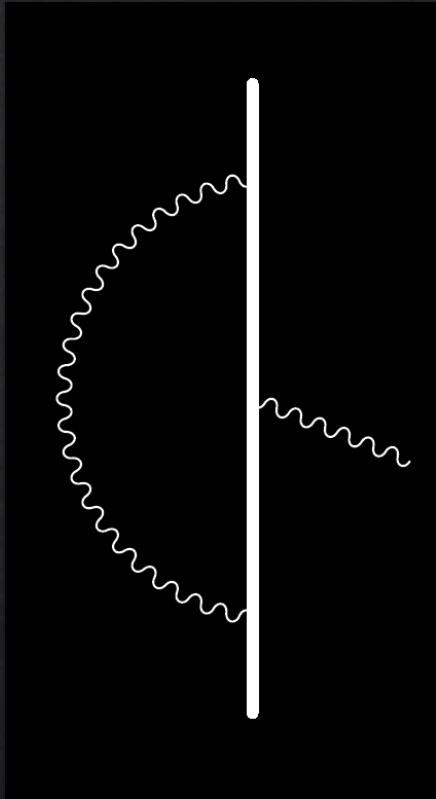
発散を消す処方



# くりこみ理論の成功

- ◇ 電子の磁気モーメントの Dirac 理論からのずれ(異常磁気モーメント)の測定値(1947)がくりこみ理論による計算(1948)と一致
- ◇ 水素原子のスペクトルの分裂(Lamb シフト)の測定値(1947)も, 理論と一致(1947/48)

# 電子・光子相互作用への補正



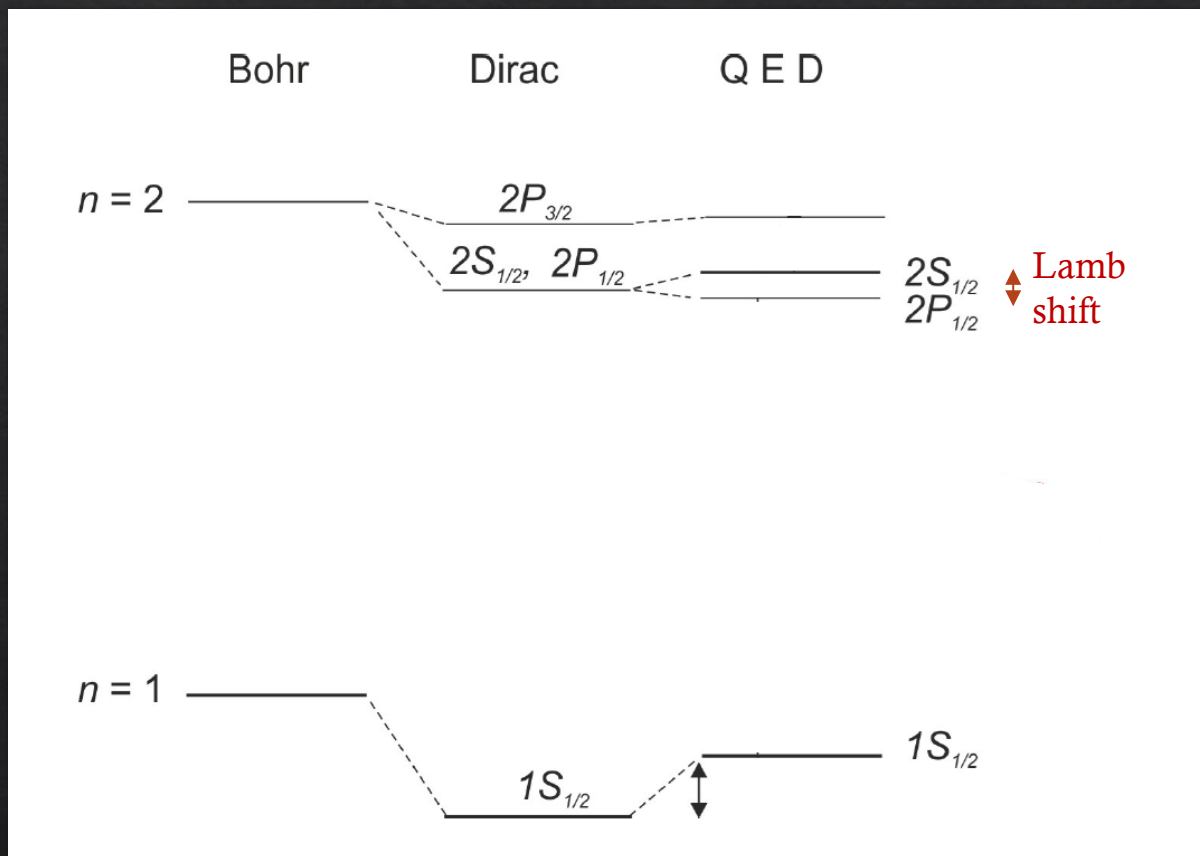
この効果により, 電子の磁気双極子モーメント  $g_e$  の値が,

2 (Dirac の値) から

$2 + \alpha/\pi$  に変化

(Schwinger, 1948)

# Lamb シフト



Based on Angeli



# QEDの進展

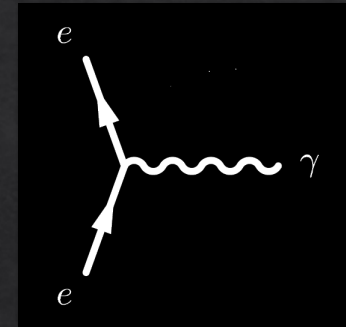
- ◇ 実験的に最も精密な検証がされている理論
- ◇ 電子の磁気モーメント
  - ◇ 電子は小さい磁石で, その強さは(ある単位で)
  - ◇ 実験値

$$g_e/2 = 1.001\ 159\ 652\ 180\ 590\ (130)$$

- ◇ 理論値(+  $\alpha$  の測定値)

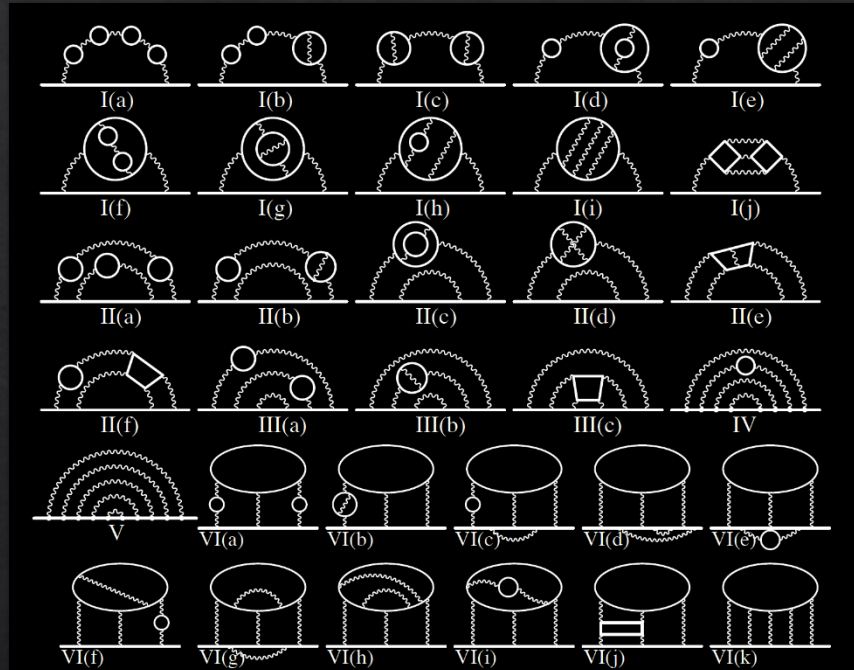
$$g_e/2 = 1.001\ 159\ 652\ 180\ 252\ (95)$$

- ◇ この理論は  $\alpha^5$  の高次の項まで計算されたもの



カッコ内は最後の桁の誤差

# 最先端の理論計算



**Figure 5.** Tenth-order vertex diagrams. There are 12,672 diagrams in total, and they are divided into 32 gauge-invariant subsets over six super sets. Typical diagrams of each subsets are shown as I(a–j), II(a–f), III(a–c), IV, V, and VI(a–k). There are Set I 208 diagrams (I(a) 1, I(b) 9, I(c) 9, I(d) 6, I(e) 30, I(f) 3, I(g) 9, I(h) 30, I(i) 105, I(j) 6), Set II 600 diagrams (II(a) 24, II(b) 108, II(c) 36, II(d) 180, II(e) 180, II(f) 72), Set III 1140 diagrams (III(a) 300, III(b) 450, III(c) 390), Set IV 2072 diagrams, Set V 6354 diagrams, Set VI 2298 diagrams (VI(a) 36, VI(b) 54, VI(c) 144, VI(d) 492, VI(e) 48, VI(f) 180, VI(g) 480, VI(h) 630, VI(i) 60, VI(j) 54, VI(k) 120). The straight and wavy lines represent electron and photon propagators,

青山・早川・木下東一郎・仁尾

# くりこみ



# 現代的なくりこみの理解

謙虚

- ◇ 発散が生ずるのは、短距離(高エネルギー)の寄与の積み重ね
- ◇ ミクロな理論(QED)が、どんな短距離(いかなる高エネルギー)でも成立するとの前提(信念)による。
- ◇ 理論に適用限界があれば、そこから先の寄与はなく、真の発散は現れない

# 現代的なくりこみの理解

「ミクロ」の理論を知らなくても、「マクロ」な理論を構築可能

- ◇ ミクロな理論のさらに根底に「超ミクロ」な理論があったとする
- ◇ それが何かをよく知らなくても、ミクロな理論を一定程度構築できる
  - ◇ 知っている例：素粒子標準理論 ⊃ QED
  - ◇ 必ずしも知らない例：超弦理論？ ⊃ 素粒子標準理論

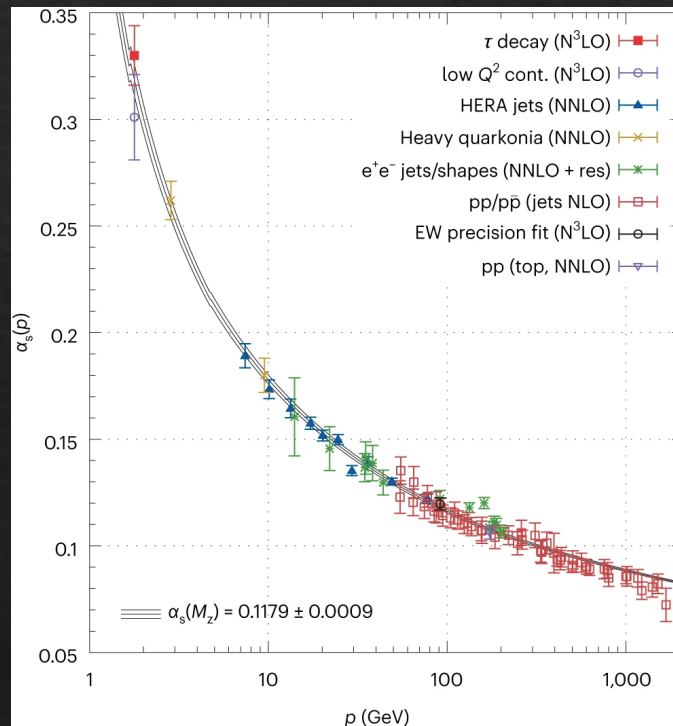
# 現代的なくりこみの理解

- ◇ 超マイクロな理論から出発して、マイクロな理論を導出すると、くりこみ可能な理論が得られる
  - ◇ くりこみ不可能な部分があっても、超マイクロのスケール  $\rightarrow 0$  で消える
- ◇ 超マイクロな理論が未知であることは、マイクロな理論に実験で決めるべき定数が含まれることに反映



# 連続的くりこみ

- ◇ 超マイクロな(スケール小)理論とマイクロな(スケール大)理論をつなぐだけでなく, 理論のスケールを連続的に変化させることも可能
- ◇ 「くりこみ群」の名で知られる



素粒子の常識と非常識

強い相互作用(QCD)の  
結合定数のスケール依存性

2024/12/5 仁科記念講演会

# くりこみ可能な理論は限られる

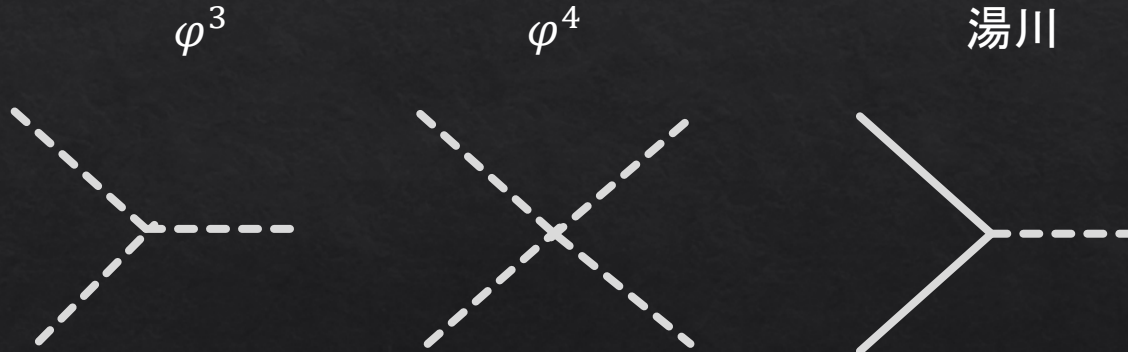
◇ 量子電気力学(QED):

朝永, Schwinger, Feynman, Dyson (1948-)

ノーベル賞 1965

◇  $\varphi^3, \varphi^4$ , 湯川相互作用

坂田・梅沢・亀淵(1951)



----- スピン 0 (スカラー)

————— スピン 1/2

# くりこみ可能な理論

◇ 量子電気力学(QED):

朝永, Schwinger, Feynman, Dyson (1948-) ノーベル賞 1965

◇  $\varphi^3, \varphi^4$ , 湯川相互作用

坂田・梅沢・亀淵(1951)

←このタイプの相互作用の存在が  
実験で示されたのはごく最近

◇ QED を拡張一般化した理論(ゲージ理論)

't Hooft (1971) ⇒ 強い相互作用・弱い相互作用 ノーベル賞 1999

◇ 粒子のスピンは 0(スカラー),  $1/2$ , 1 (ゲージ場)に限られる

◇ スピン 1 は光子のような質量のない粒子に限られる



# 相互作用の可能な形は 理論により大きく制約

# 自然界の基本相互作用

## 残りの2つ

# 自然界の基本相互作用

- ◇ 身の回りの現象は、根本的には
  - ◇ 重力
  - ◇ 電磁相互作用に基づくものとして理解できる。
- ◇ これ以外に、2種類の相互作用
  - ◇ 強い相互作用
  - ◇ 弱い相互作用(固有名詞)が知られている。



# 強い相互作用

# 核力

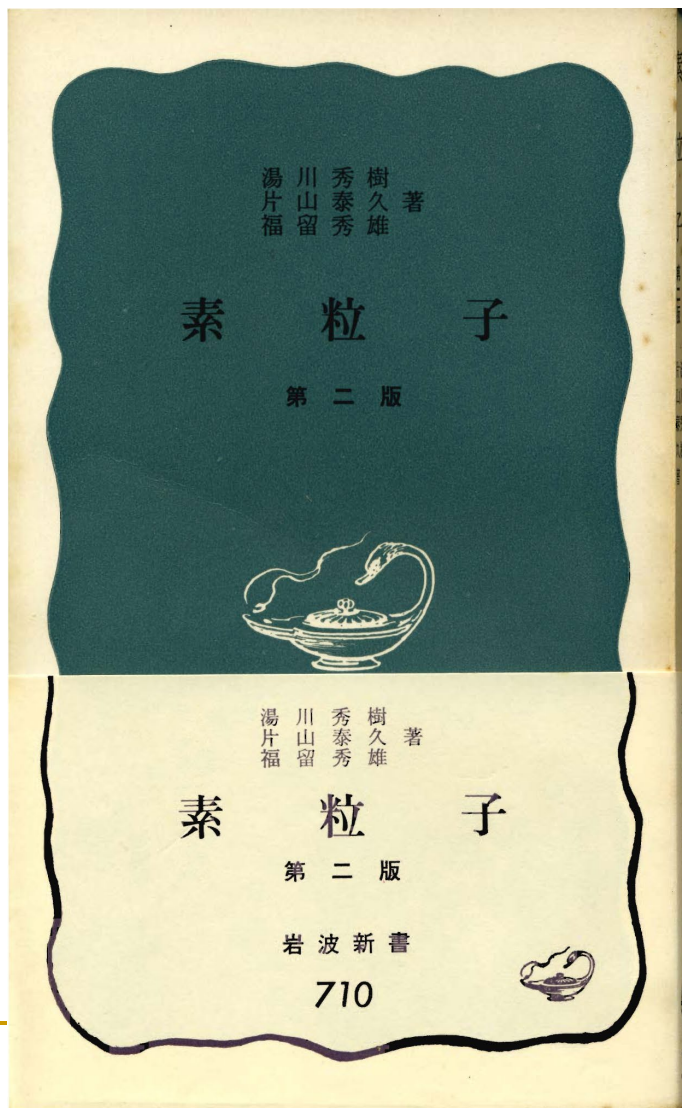
- ◇ 原子核は陽子と中性子から構成される(原子番号 = 陽子の数)
- ◇ 陽子・陽子間には電磁力が斥力として働く
- ◇ 原子核が安定に存在できるためには、電磁力より強い引力が必要
- ◇ これを「核力」と呼ぶ
- ◇ 湯川秀樹は核力の起源として、未知の粒子「中間子」の存在を仮定し、核力の到達距離を  $10^{-15}$  m として、その質量が陽子の5分の1であると予測した(1935)。
- ◇ 湯川中間子に相当する粒子 ( $\pi$ , pion) が後に発見された。

# 陽子は素粒子でない

- ◇ 陽子, 中性子は 1 fm 程度の広がりをもつ
- ◇ 陽子, 中性子,  $\pi$  に加えて, その仲間の粒子(ハドロン)が非常に多数発見された
- ◇ ハドロンがもっと基本的な構成要素からできているとして, これらを系統的に説明できるモデル(クォーク・モデル)が提案された



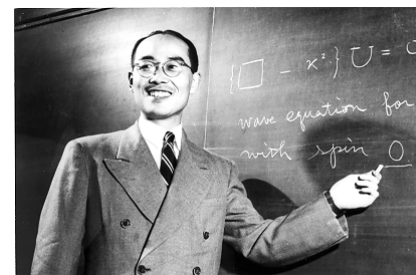
# 昔の素粒子



素粒子 第二版

(湯川・片山・福留)

1969年3月



# 素粒子の表 (1969)

素粒子の表 I

分類	名称	アイソスピン (奇妙さ)*	スピン	偶奇性	質量(Mev)	幅(Mev)		
核子	$N \begin{Bmatrix} p \\ n \end{Bmatrix}$	1/2(0)	1/2	+	938.3 939.6	— —		
	$N'(1470)$		1/2	+	1470	210		
	$N(1518)$		3/2	—	1525	115		
	$N(1550)$		1/2	—	1550	130		
	$N(1680)$		5/2	—	1680	170		
	$N(1688)$		5/2	+	1690	130		
	$N'(1710)$		1/2	—	1710	300		
	$N(2190)$		7/2	—	2200	250		
	$N(2650)$		11/2	—	2650	360		
	$N(3030)$		?	?	3030	400		
デルタ粒子	$\Delta(1236)$	3/2(0)	3/2	+	1236	120		
	$\Delta(1640)$		1/2	—	1640	180		
	$\Delta(1920)$		7/2	+	1950	220		
	$\Delta(2420)$		11/2	+	2420	310		
	$\Delta(2850)$		15/2	+	2850	400		
	$\Delta(3230)$		?	?	3230	440		
ジイ粒子	$Z(1865)$	0(+1)	?	?	1865	180		
ラムダ粒子	$\Lambda$	0(-1)	1/2	+	1115.5	—		
	$\Lambda(1405)$		1/2	—	1405	50		
	$\Lambda(1520)$		3/2	—	1519	16		
	$\Lambda'(1670)$		1/2	—	1670	18		
	$\Lambda'(1690)$		3/2	—	1690	45		
	$\Lambda(1750)$		1/2	+	1750	—		
	$\Lambda(1815)$		5/2	+	1816	74		
	$\Lambda(1830)$		5/2	—	1827	76		
	$\Lambda(1870)$		7/2	+	1870	—		
	$\Lambda(2100)$		7/2	—	2100	140		
$\Lambda(2350)$	?	?	2350	210				
シグマ粒子	$\Sigma \begin{Bmatrix} \Sigma^+ \\ \Sigma^0 \\ \Sigma^- \end{Bmatrix}$	1(-1)	1/2	+	1189.5 1192.5 1197.4	— — —		
	$\Sigma(1385)$		3/2	+	1382	37		
	$\Sigma(1610)$		1/2	+	1610	—		
	$\Sigma(1660)$		1/2	—	1660	50		
	$\Sigma(1690)$		3/2	+	1690	120		
	$\Sigma(1770)$		5/2	—	1767	95		
	$\Sigma(1910)$		5/2	+	1910	60		
	$\Sigma(2030)$		7/2	+	2030	120		
	$\Sigma(2250)$		?	?	2250	200		
	$\Sigma(2455)$		?	?	2455	140		
	$\Sigma(2595)$		?	?	2595	140		
	グザイ粒子		$\Xi \begin{Bmatrix} \Xi^0 \\ \Xi^- \end{Bmatrix}$	1/2(-2)	1/2	+	1314.9 1321.3	— —
			$\Xi(1530)$		3/2	+	1530	7

素粒子の表 II

分類	名称	アイソスピン (奇妙さ)	スピン	偶奇性	質量(Mev)	幅(Mev)
	$\Xi(1815)$		3/2	—	1815±3	16
	$\Xi(1930)$		?	?	1930	140
オメガ粒子	$\Omega^-$	0(-3)	3/2	+	1672	—
パイ中間子	$\pi \begin{Bmatrix} \pi^+ \\ \pi^0 \\ \pi^- \end{Bmatrix}$	1(0)	0	—	139.6 135.0	— —
	$\rho \begin{Bmatrix} \rho^+ \\ \rho^0 \\ \rho^- \end{Bmatrix}$		1	—	755~775 760~780	110~140 90~150
	$\delta$		?	?	962	<5
	$\pi_v$		0	+	1016	25
	$A_1$		1	+	1070	80
	$B$		1	+	1220	129
	$A_2$		2	+	1270~1370	30
	$F_1$		?	?	1650	~70
	$\pi_A$		?	?	1654	109
	$\rho_v$		?(3)	?(—)	1660	169
	$R_1 R_2 R_3 R_4$		?	?	1650~1850	—
	$S$		?	?	1929±14	≤35
	$T$		?	?	2195±15	≤13
	$U$		?	?	2382±24	≤30
イータ中間子	$\eta$	0(0)	0	—	549	$2.3 \cdot 10^{-3}$
	$\omega$		1	—	783	12
	$\eta^0(\eta')$		0	—	958	<4
	$H$		1	+	990	80
	$\phi$		1	—	1019	3
	$\eta_v$		0	+	1069	80
	$f$		2	+	1263	141
	$D$		1	+	1285	32
	$E$		0	—	1424	71
	$f'$		2	+	1514	73
ケイ中間子	$K \begin{Bmatrix} K^+(K^-) \\ K^0(\bar{K}^0) \end{Bmatrix}$	1/2(+1)	0	—	493.8 497.8	— —
	$K^*$		1	—	893	49
	$K_v$		1	+	1100	~400
	$C(K_A)$		1	+	1230	60
	$K_A$		1	+	1320	60
	$K_v'$		2	+	1419	89
	$L(K_A)$		?	?	1781	72
	軽粒子		$\nu \begin{Bmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \end{Bmatrix}$	—	1/2	+
$e$		1/2	+		<2.1	—
$\mu$		1/2	+		105.7	—
光子	$\gamma$	0,1(0)	1	—	0	—

\* 反粒子の奇妙さは反対符号

# クォークモデル

- ◇ ハドロンは素粒子ではなく、クォークという構成要素からなる。(Gell-Mann 1964, Zweig 1964)
- ◇ バリオンはクォーク3個，メソンはクォークと反クォークからなる。
- ◇ 陽子・中性子・ $\pi$ をつくるクォークは  $u$  (up) と  $d$  (down) クォーク
  - ◇ 陽子は  $p = (uud)$ ，中性子は  $n = (udd)$ ， $\pi^+ = (u\bar{d})$
- ◇ クォークの電荷は半端な値： $u$  は  $+\frac{2}{3}e$ ； $d$  は  $-\frac{1}{3}e$
- ◇ クォークはスピン  $\frac{1}{2}$  を持つ。



# クォークの単離

- ◇ クォークモデルの提案以後、ハドロンからクォークを取り出す、あるいは半端の電荷を探す試みが数多くなされたが、失敗に終わった。
- ◇ 一時はクォークの実在性に疑問が投げかけられた。
- ◇ しかし、電子・陽子の非弾性衝突反応の**実験**の解析により、陽子内部に点状の構成要素があれば説明可能な現象が明らかになった。
- ◇ クォークの相互作用の従来知られていない性質が**理論的**に解明され、単独のクォークを分離することができないという著しい性質が見えてきた。

# 強い相互作用の理論

- ◇ 電磁相互作用と同種の(より一般化した)理論(ゲージ理論)

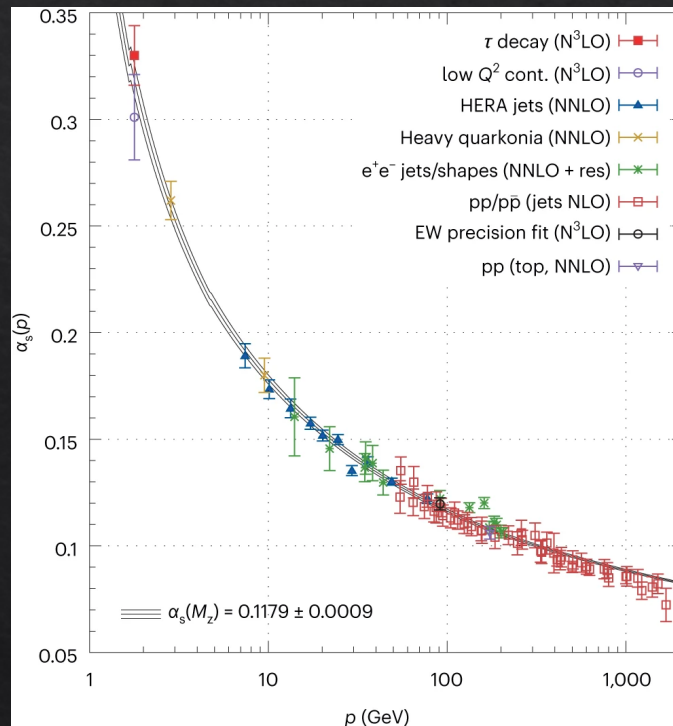
電磁相互作用	強い相互作用
電子など(電荷を持つ粒子)	クォーク(カラーを持つ粒子)
光子(電磁場)	グルオン(カラーの場)

- ◇ クォークは3種類の「色」(カラー)を持つ 「色」は比喩
- ◇ グルオンは8種類の色
- ◇ この理論は QCD (Quantum Chromodynamics) と呼ばれる

# 漸近自由性

Gross-Wilczek, Politzer (1973)

- ◇ QCD の持つ他の理論にない性質
- ◇ 短距離, 高エネルギーになるほど結合の強さが小さくなる
- ◇ 逆に長距離, 低エネルギーではどんどん強く

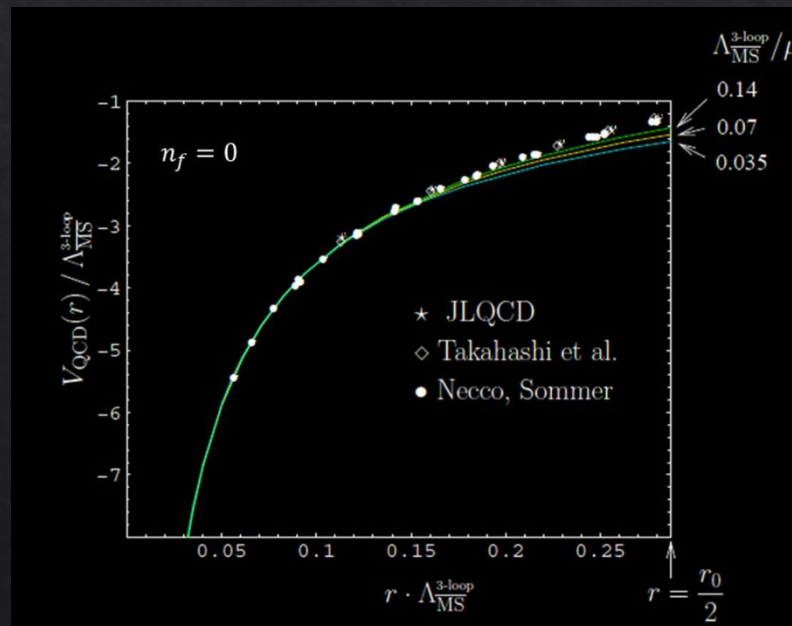


強い相互作用(QCD)の  
結合定数のスケール依存性



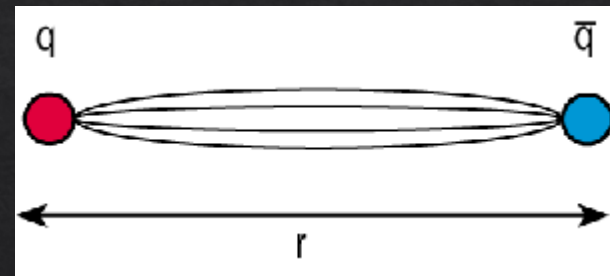
# クォーク・反クォーク間の力

- ◇ クォーク・反クォーク間のポテンシャルを、「格子QCD」という定式化を用いて、スーパーコンピュータによる数値シミュレーションで求めた
- ◇ 相互の距離が 1 fm よりずっと短いときは、電磁力と同様の  $1/r$  ポテンシャルのふるまいを示すが、長距離では、ポテンシャルが  $r$  に比例して増大



# カラーの閉じ込め

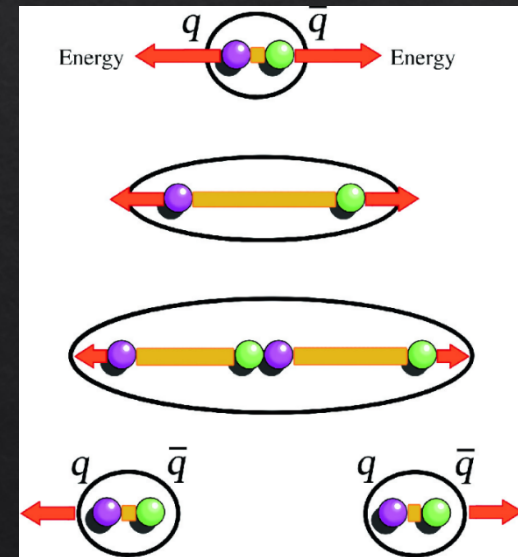
- ◇ 真空は、カラーの場を排斥する性質を持つ。カラーの場は3次元空間に広がれず、太さ 1 fm 程度のチューブ状の領域に閉じ込められる。
- ◇ カラー力線の本数はクォーク・反クォーク間の距離によらないので、力の大きさは距離によらず一定
- ◇ ポテンシャルは  $r$  に比例



- ◇ チューブの太さよりも短距離では、カラーの場は3次元的に広がるので、 $1/r$  のポテンシャルになる

# カラーの閉じ込め

- ◇ クォークに力を加えて取り出そうとするとどうなるか
- ◇ 加えたエネルギーはクォーク・反クォークをつなぐカラーの場のエネルギーとなる(距離に比例して増加)
- ◇ そのうち、クォーク・反クォーク対を生成する方がエネルギー的に有利になる。
- ◇ 単独のクォークでなく、全体としてカラーを持たないメソンやバリオンが出てくる





# 単離できる状態

## ◇ 素粒子(単離できない)

### ◇ クォーク

3色



### ◇ 反クォーク



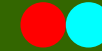
### ◇ グルオン

8色

## ◇ ハドロン(単独で取り出せる)

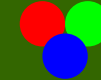
### ◇ カラーを持たない(無色の)状態

#### ◇ メソン



赤と反赤(等)で無色

#### ◇ バリオン



3色で無色

#### ◇ 反バリオン



# 取り出せない素粒子：クォーク

クォークは陽子・中性子など(ハドロン)を

構成する素粒子

であるにもかかわらず、

ハドロン中に「閉じ込め」られ、

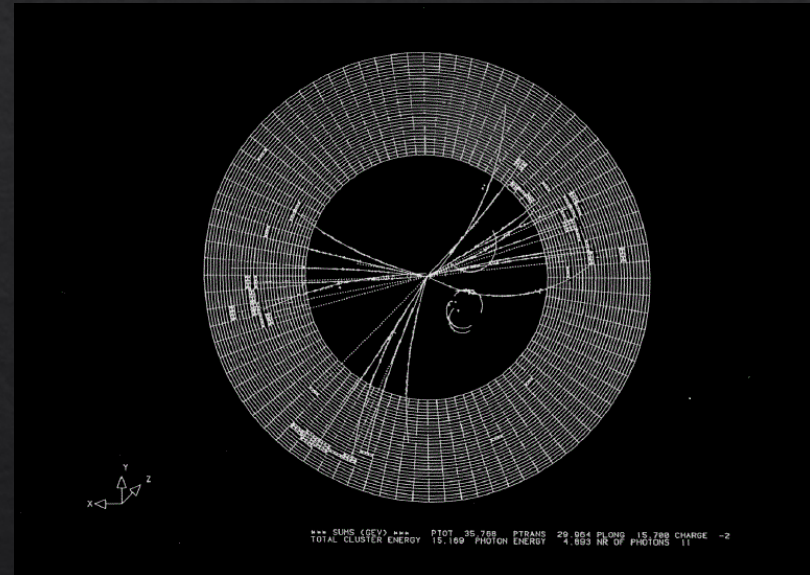
単独で取り出すことができない

# ハドロンジェット

- ◇ 高エネルギーのクォーク(・グルーオン)が生成されると、多数のハドロンからなる「ジェット」に転化する。
- ◇ 電子・陽電子衝突で、3つのジェットが生成した例

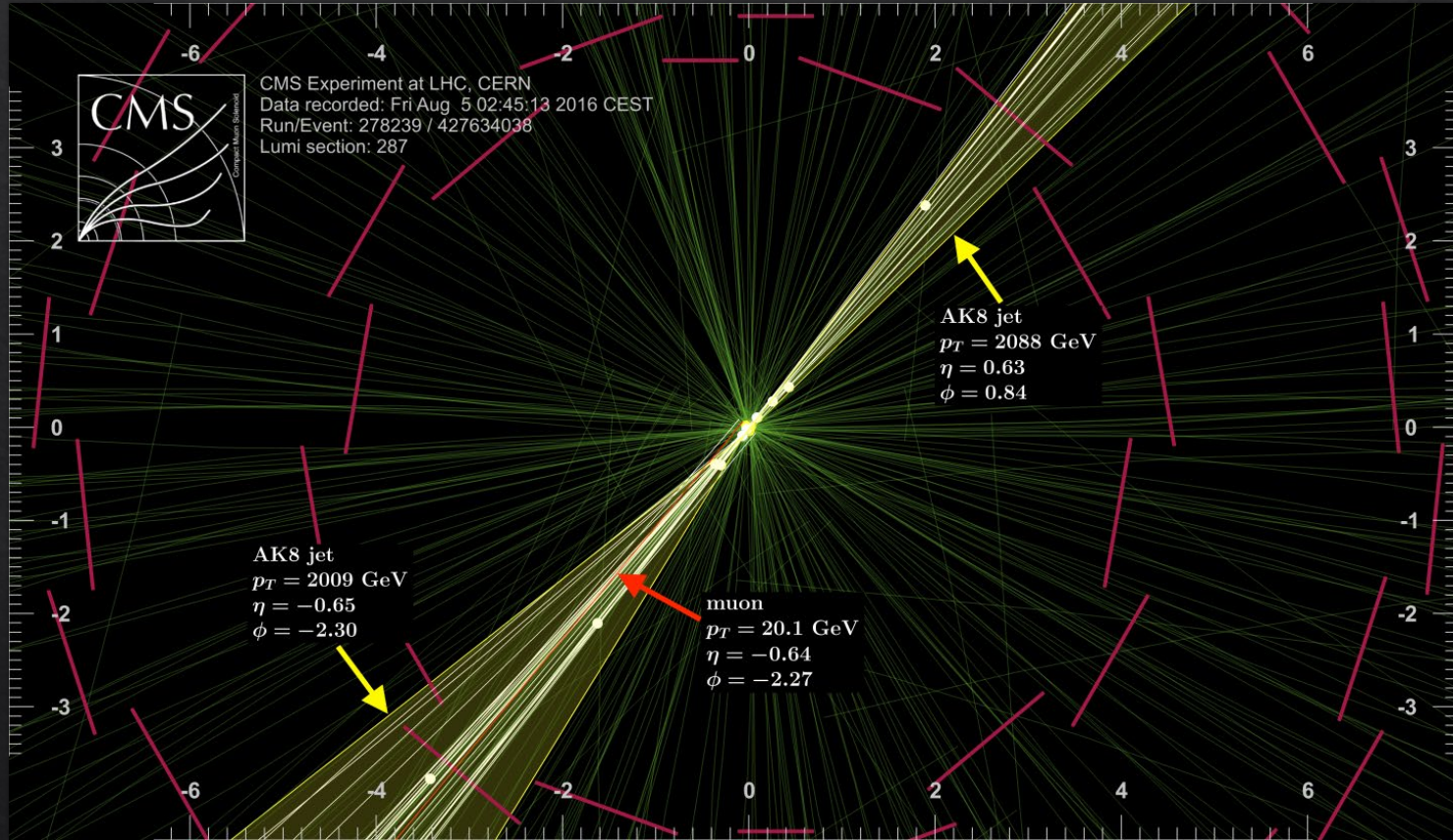
重心系エネルギー 35 GeV

JADE 実験, DESY (Hamburg)





# LHC 陽子・陽子衝突



# 弱い相互作用



# 弱い相互作用

- ◇ 素粒子の種類を変える唯一の相互作用
  - ◇ 弱い相互作用がなければ素粒子はみな安定な粒子
  - ◇ 実際には大半の素粒子は不安定で、作られても急速に崩壊
    - ◇ 寿命  $\mu^\pm$ :  $10^{-6}$  秒,  $\dots\dots\dots$ ,  $t, W^\pm, Z$ :  $10^{-25}$  秒
  - ◇ このことが、我々が古くから(放射能の発見)弱い相互作用の存在を知っていたことの原因



# 素粒子の表 (2012)

## ◇ クォーク

$u$	$c$	$t$	安定
$d$	$s$	$b$	不安定

## ◇ レプトン

$\nu_1$	$\nu_2$	$\nu_3$	状況により 不安定
$e$	$\mu$	$\tau$	

不安定なはず

## ◇ ボソン

$\gamma$	$g$	$W$	$Z$	$H$
----------	-----	-----	-----	-----

# 弱い相互作用

## ◇ 弱い

- ◇ 太陽から放出されるニュートリノが地球を通過する際、地球のどこかで反応を起こすのは100億個のうち1個
- ◇ 単独の中性子は不安定で陽子にベータ崩壊： 寿命  $10^3$  秒
- ◇ 一方  $\Delta^{++} \rightarrow p\pi^+$  (強い相互作用で崩壊)の寿命は  $10^{-24}$  秒

## ◇ 実は弱くない

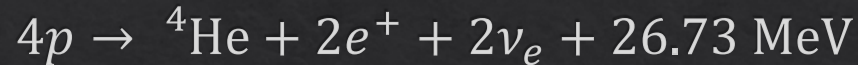
# 太陽のエネルギー源

恒星はいかにして輝くか



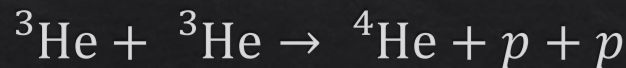
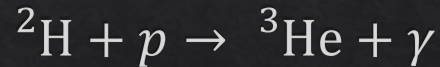
# 太陽エネルギー

- ◇ 太陽中心での核融合反応: 陽子→ヘリウム



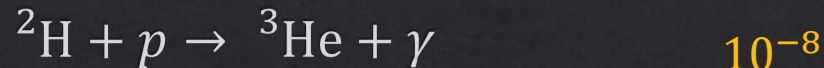
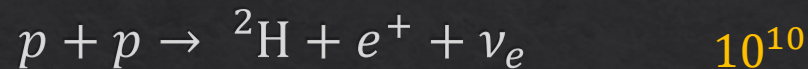
水素原子の  
束縛エネルギー  
より6桁大きい

- ◇ これは一気に起こるのではなく、いくつかの反応の組み合わせ
- ◇ *pp* chain I (太陽の核融合反応の85%)



# 反応率

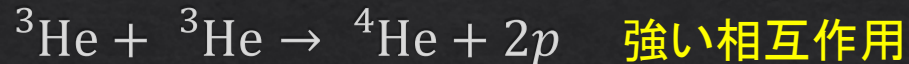
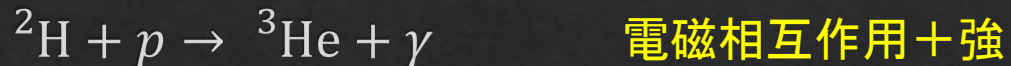
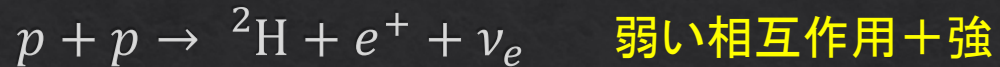
- ◇ *pp* chain I 太陽中心の原子1個あたり反応の起こるまでの時間 (年)



- ◇ 全体の反応速度を決めているのは最も遅い反応である  $p + p$  の反応
- ◇ これはなぜ遅いか
- ◇ 太陽中の水素原子の数は  $10^{56} \Rightarrow$  1秒に  $10^{38.5}$  個の  $p$  が反応

# 3種の相互作用

## ◇ $pp$ chain I



- ◇ 3つの反応はすべて、原子核の種類が変化しているから、強い相互作用がかかわる。
- ◇ 第1の反応は、ニュートリノが生成していることから、弱い相互作用がかかわる必要。
- ◇ 第2の反応は、光子が生成していることから、電磁相互作用が必要



# 弱い相互作用の役割

- ◇ 核融合反応には、強・弱・電磁相互作用の3つがすべてかかわる。
- ◇ 特に、弱い相互作用が存在して、陽子を中性子に変えることにより、はじめて核融合反応が進行できる。
- ◇ つまり、日常と全く関係ないように思える弱い相互作用がなかったとしたら、太陽は輝かず、我々の存在はない。
- ◇ ガスから恒星が生まれるのは、重力により収縮するためなので、重力も必須。

弱い相互作用が存在すること, そして  
それがとても弱いこと, によって  
我々の存在が成り立っている。

もう一つは  
太陽中心温度の低さ

# 弱い相互作用の真実

弱くない相互作用

見かけの世界と本来の世界



# 弱い相互作用は弱くない

- ◇ 弱い相互作用は粒子  $W^\pm, Z$  によって媒介
- ◇ これらは大きな質量(陽子より2桁, 電子より5桁大きい)を持っている
- ◇ そのため弱い相互作用の到達距離は  $10^{-18}$  m と非常に短く, 反応を起こす確率が非常に小さくなるのが**弱い理由**。
- ◇  $W^\pm, Z$  粒子の質量エネルギーに匹敵するエネルギーでの反応は, そもそも本質的に  $10^{-18}$  m のスケールで起こる
- ◇ 高エネルギー実験で測ると, 実際に電磁相互作用と同程度強い。

# 弱い相互作用の理論

(Glashow – Weinberg – Salam, 1961/67/68)

- ◇ 電磁相互作用・強い相互作用と同種の理論(ゲージ理論)で記述可能, さらに
- ◇ 電磁相互作用と弱い相互作用は共通の起源を持つ, が
- ◇ 弱い相互作用を伝える  $W, Z$  は, 本来光子と同様に質量を持たない
- ◇ 質量を持っていることを理解するには, 新しい粒子と相互作用が必要:

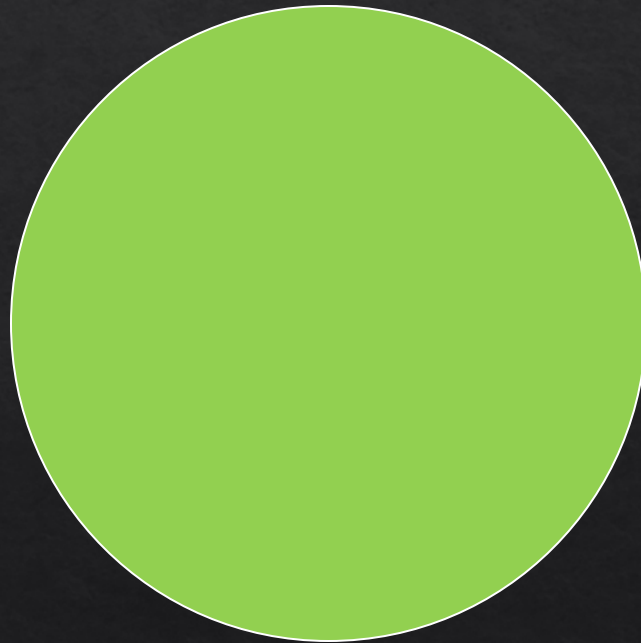
Higgs 場・対称性の見かけの破れ

南部陽一郎

Englert・Brout, Higgs, ...

# 対称性とは

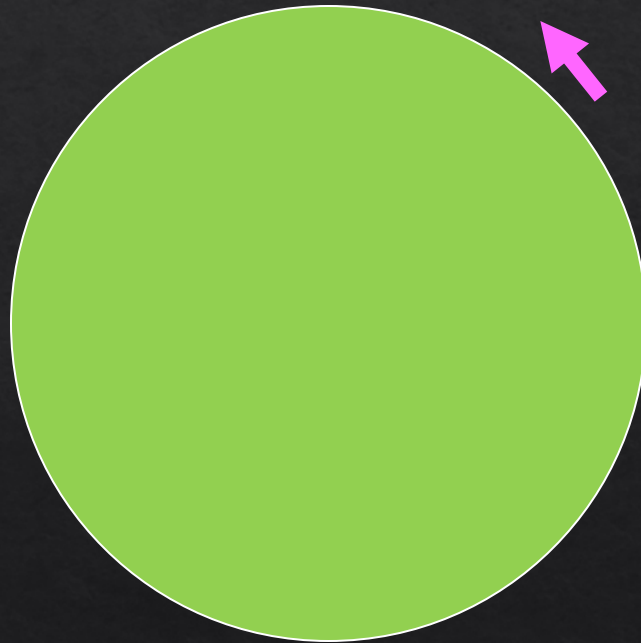
◇ 円は「対称性の高い」図形





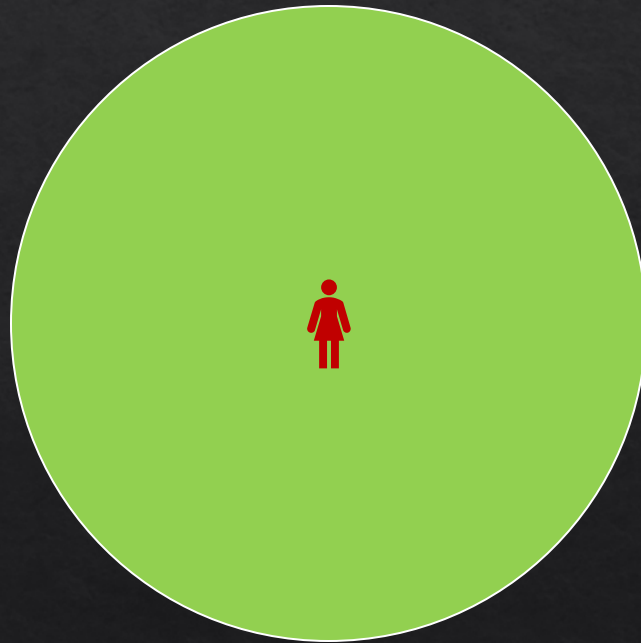
# 対称性

- ◇ 円を中心のまわりに回転しても形は変わらない



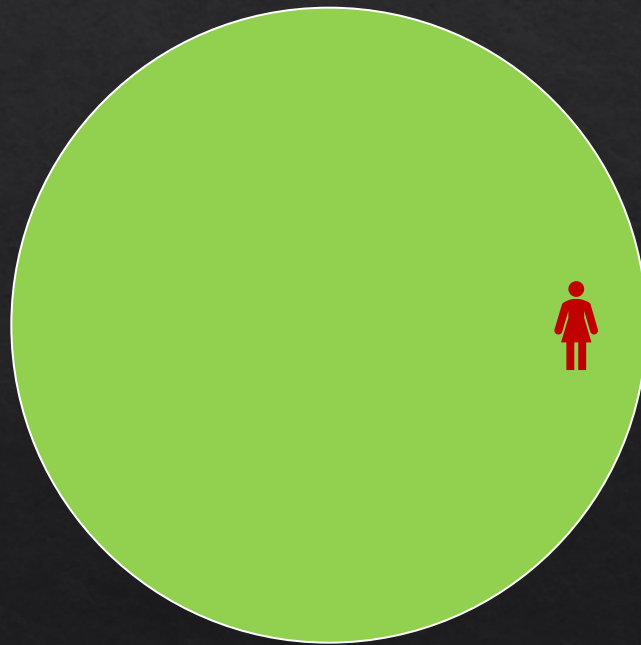
# 対称性

◇ 中心から見るとどの方向も同じに見える



# 対称性の見かけの破れ

- ◇ 周縁から見ると方向によって見え方が違う

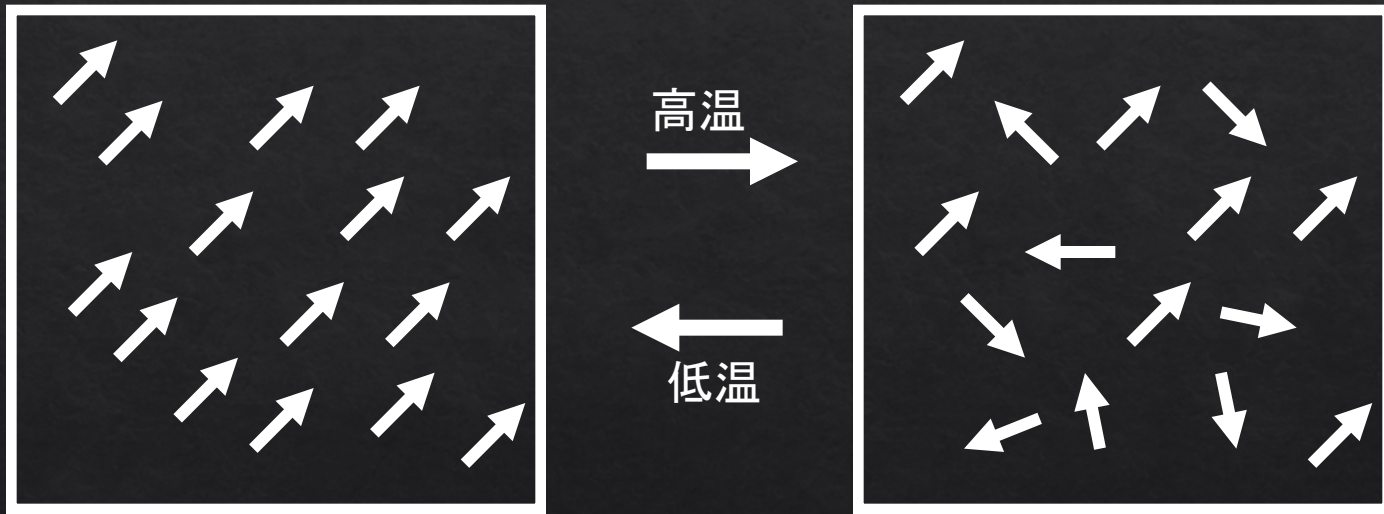




# 対称性の破れの例（磁性）

◇ 強磁性体：スピンの向き揃う：特定方向を選択

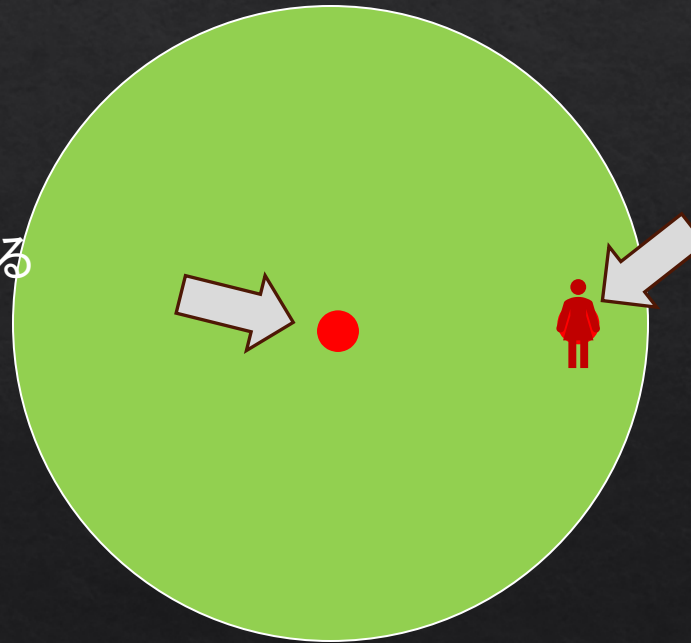
◇ 常磁性体：スピンの向きがランダム



物理法則自体には特定の向きを優遇する要素はない

# 対称性

ビッグバン直後  
(宇宙の温度が今より  
15桁以上高い)には  
ここにいたと考えられる



我々はこちらにいる

# 本来の世界

- ◇ 我々の見ている世界は、本来の世界とは異なる片寄った世界
  - ◇ 我々は「対称性の破れ」た後に住んでいる
  - ◇ 本来の世界はより高い対称性を持つ
- ◇ 本来の世界には、4つの光(原光)が存在
  - ◇ 3つ子と一匹狼で4つ
  - ◇ 我々の光は3つ子の1つと一匹狼が結びついたもの
  - ◇ 対称性の破れた後、残りの3つは光速を持てなくなり、 $10^{-18}$  mしか届かない(弱い相互作用を伝える粒子)



# 対称性の自発的破れ

- ◇ 我々の世界では、電子とニュートリノは全く異なる性質を示す。
- ◇ 弱い相互作用の性質の理解から、本来の世界では、電子の2つのスピン状態の片方(左巻き)とニュートリノは双子のように同じ性質を持ち、電子のもう片方(右巻き)は異なる性質を持つ。
- ◇ **Higgs 場**に起因する「対称性の自発的破れ」により、本来の世界から我々の世界に変化する
- ◇ 高エネルギーで起こる過程を見ると、もともとの性質に近づく。

# 本来の世界

- ◇ 本来の世界では、電子は質量を持たず、つねに光速で運動  
(他のクォーク, レプトンも同様に質量なし)
- ◇ 質量を持たない電子は、右巻き電子と左巻き電子に分離
- ◇ ニュートリノと左巻き電子は、同じ性質を持つ双子
- ◇ 右巻き電子は違う性質を持つ他人

# 我々の世界(みかけの姿)

- ◇ 電子: スピン  $\uparrow$  と  $\downarrow$
- ◇ 電荷を持つ
- ◇ 物質の重要な構成要素
- ◇ ニュートリノ: 左巻きのみ
- ◇ 電氣的に中性
- ◇ 地球を容易に貫通
- ◇ 物質に束縛されない





# 元の世界(本来の姿)

- ◇ 右巻き電子
- ◇ W ボソンと相互作用なし
- ◇ 左巻きレプトン
- ◇ W と相互作用
- ◇ 2つは同じ性質を示す

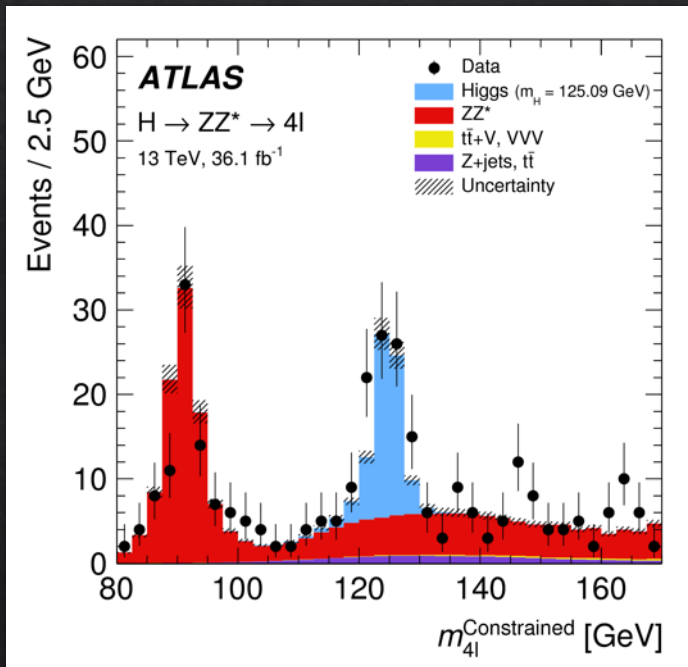


我々の住んでいる世界は、  
本来の世界とは見かけが異なる

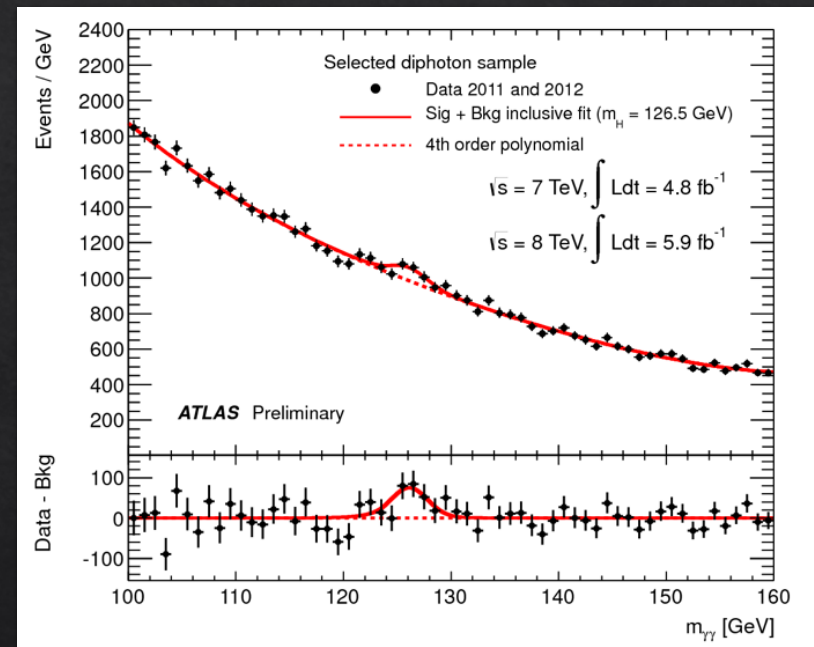
高いエネルギーの過程や、  
宇宙のごく初期では  
本来の世界が見えてくる

# Higgs 粒子の発見 (2012)

$$H \rightarrow e^+e^-\mu^+\mu^- \text{ etc}$$

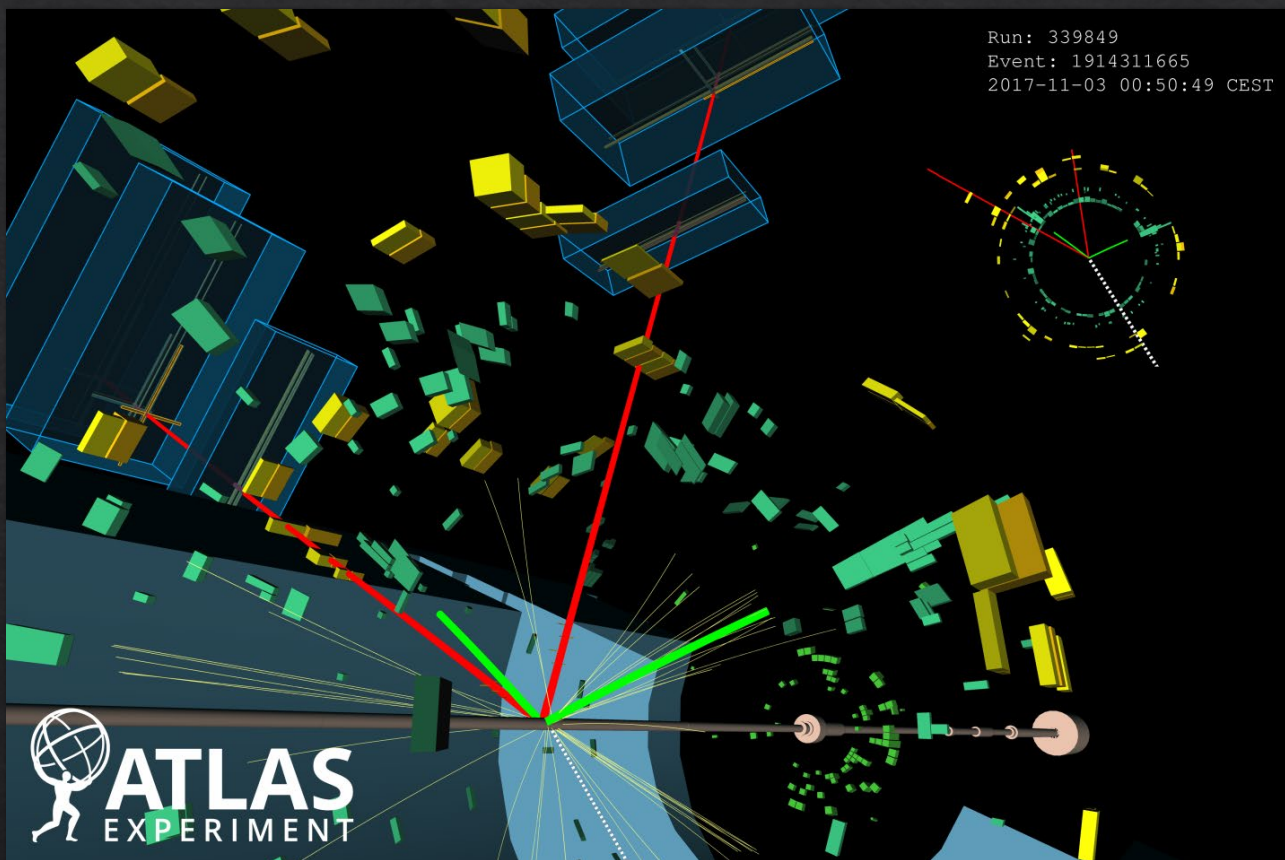


$$H \rightarrow \gamma\gamma$$





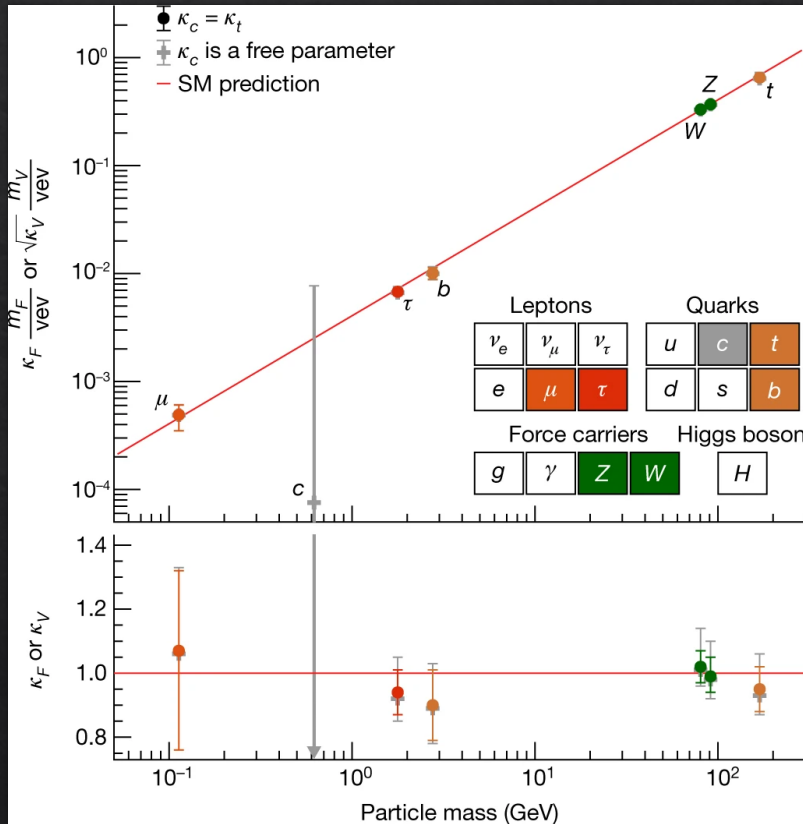
# Higgs 粒子 $H^0 \rightarrow e^+ e^- \mu^+ \mu^-$



# 質量の起源：新しい相互作用

- ◇ 電子やクォーク(フェルミオン)の質量は本来 0
- ◇ 対称性の自発的破れの後, Higgs 場を通じて生ずる
- ◇ これが起こるのは, フェルミオンと Higgs 場の「湯川相互作用」による
- ◇ 湯川相互作用の**大きさ**によって**質量**が決まる
- ◇ 湯川相互作用は, 素粒子の相互作用としては, 従来知られていなかった型(坂田・梅沢・亀渕)の新しいもの

# 質量起源の単一性



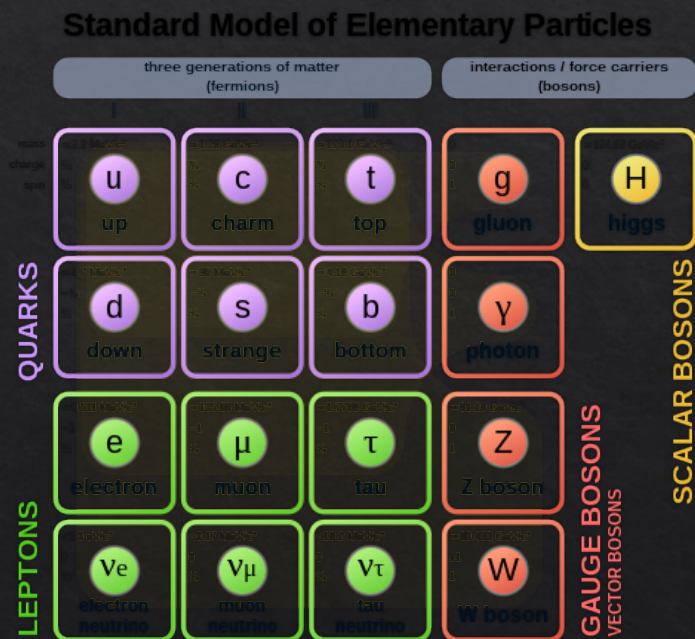
Nature **607**, 52 (2022)

- ◇ いろいろな素粒子と Higgs 粒子の結合の強さは、素粒子の質量に比例
- ◇ Higgs 粒子が質量の起源であることを示している。
- ◇ 電子,  $u, d$  クォーク(第1世代)については測定できていない



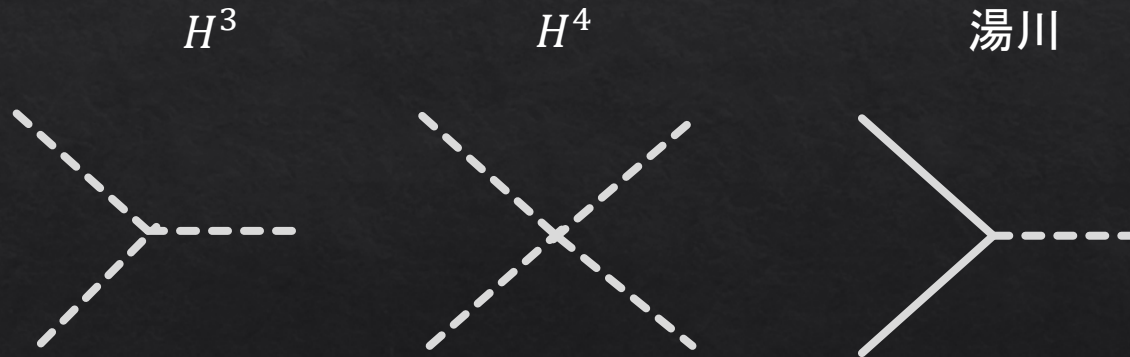
# 素粒子標準理論

- ◆ 慣習的に標準模型 (Standard Model) と呼ばれるが、現在では標準理論と呼ぶのがふさわしい。



# 新しいタイプの相互作用

- ◇ 湯川相互作用(クォーク・レプトンがヒッグスと)
  - ◇ ヒッグス粒子の生成・崩壊で部分的に検証されている
- ◇ ヒッグス  $H^3$ ,  $H^4$  相互作用
  - ◇ 今後を待つ



# 世代の問題

- ◇ 我々をつくる素粒子： 第1世代クォーク・レプトン

$$u, d, e^-, \nu_e$$

- ◇ 第2世代, 第3世代(不安定)の役割?

- ◇ 質量の階層性, 世代間の混合

- ◇ 湯川相互作用の構造に由来

小林, 益川

- ◇ 空間反転, 時間反転, 粒子反粒子対称性の破れ

小柴, 梶田

- ◇ 理解はまだこれから



# 保存則の破れ

- ◇ 保存則を破る未発見の過程:

もしあれば標準理論に含まれない相互作用が存在

- ◇ バリオン数(クォーク数)非保存

陽子崩壊

- ◇ レプトン数非保存

非ニュートリノ・ダブルベータ崩壊

- ◇ レプトンフレーバー非保存

$\mu \rightarrow e\gamma$  など

# 標準理論の取りこぼし

- ◇ (ニュートリノの質量)
- ◇ 宇宙の暗黒物質
- ◇ 宇宙の粒子・反粒子(バリオン数)非対称性
- ◇ 宇宙の暗黒エネルギー
- ◇ 初期宇宙のインフレーションの起源

# 基本相互作用のまとめ

- ◇ 重力相互作用
- ◇ ゲージ相互作用
  - ◇ 強い相互作用
  - ◇ 弱い相互作用
  - ◇ 電磁相互作用
- ◇ 湯川相互作用
- ◇ ヒッグス自己相互作用
- ◇ 未知の相互作用



素粒子標準理論



# これからの百年に期待