

# 現代の素粒子像

中家 剛（専門：素粒子実験  
特にニュートリノ物理学）

# 講師予定

- 10/1, 8, 15: 中家 剛(実験)
- 10/22, 29, 11/5 川合 光(理論)
- 11/12, 19, 26 市川 温子(実験)
- 12/3, 10, 17 畑 浩之(理論)
- 1月以降 未定

## ■ 参考Webページ

### – 物理第2教室

- <http://www.scphys.kyoto-u.ac.jp/>

### – 高エネルギー(素粒子実験)グループ

- <http://www-he.scphys.kyoto-u.ac.jp/>

### – 素粒子論(素粒子理論)グループ

- <http://www-gauge.scphys.kyoto-u.ac.jp/>

# 講義予定(中家分)

- 素粒子の基礎と観測(10/1)
- 最新の素粒子実験について(10/8)
- 素粒子と宇宙のについて(10/15)
  
- 参考書(ぜひ読んでもらいたい本)
  - 南部陽一郎著「クォーク」
- 参考図書
  - 相原博昭著「素粒子の物理」
- 一般書
  - 二宮正夫編「現代物理学の世界11」
  - レオン・レーダーマン著「神がつくった究極の素粒子」
  - R.P.ファインマン著「ご冗談でしょう、ファインマンさん」

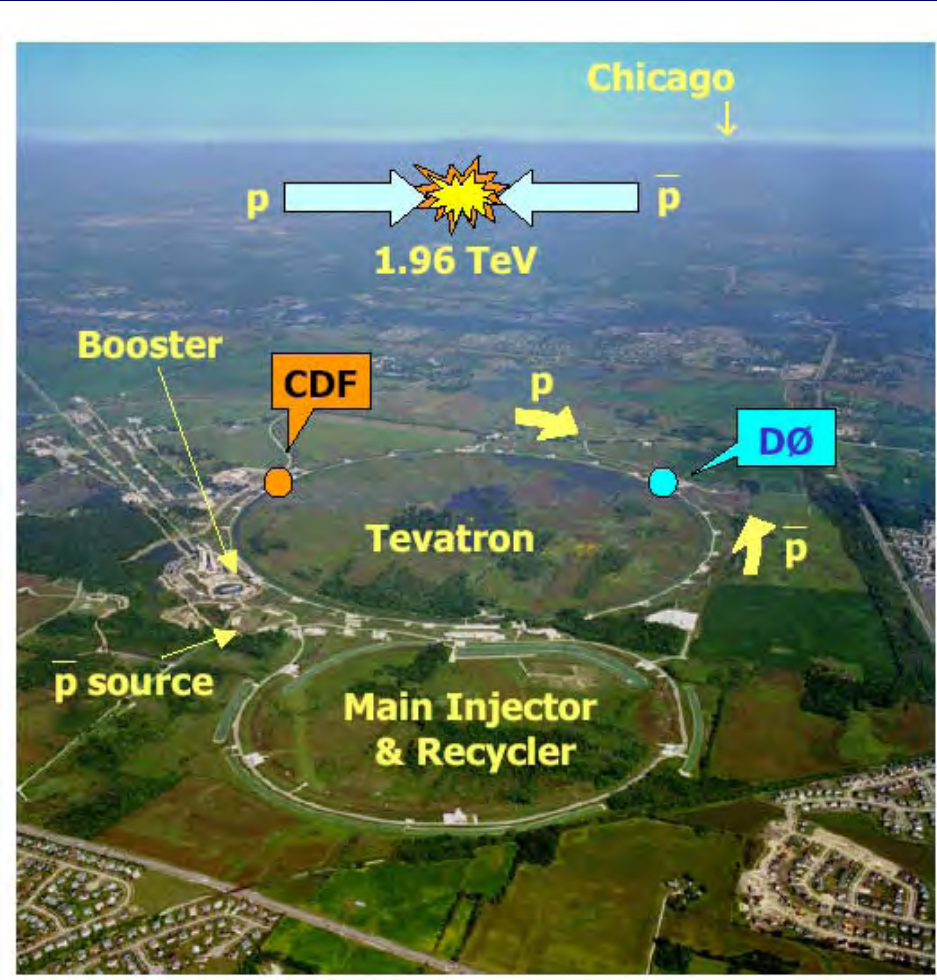
# 本日の講義の目次

1. 素粒子について
2. 素粒子と力(相互作用)
3. 素粒子を観測する



# 1. 自己紹介

- 専門: 素粒子実験
  - 現在はニュートリノ物理学
- 19xx生まれ(大阪)
- 1995年: 大阪大学理学部
- 1994-1997年: アメリカ
- 1997-1999年: シカゴ大
- 1999年9月-: 京都大学
- 担当講義
  - 「物理学基礎論A」、課題演習「素粒子像」
- <http://www-he.scphys.kyoto-u.ac.jp/>





# 1. 素粒子を観る

## ■ 素粒子

- 我々の世界(物質)を構成する基本要素

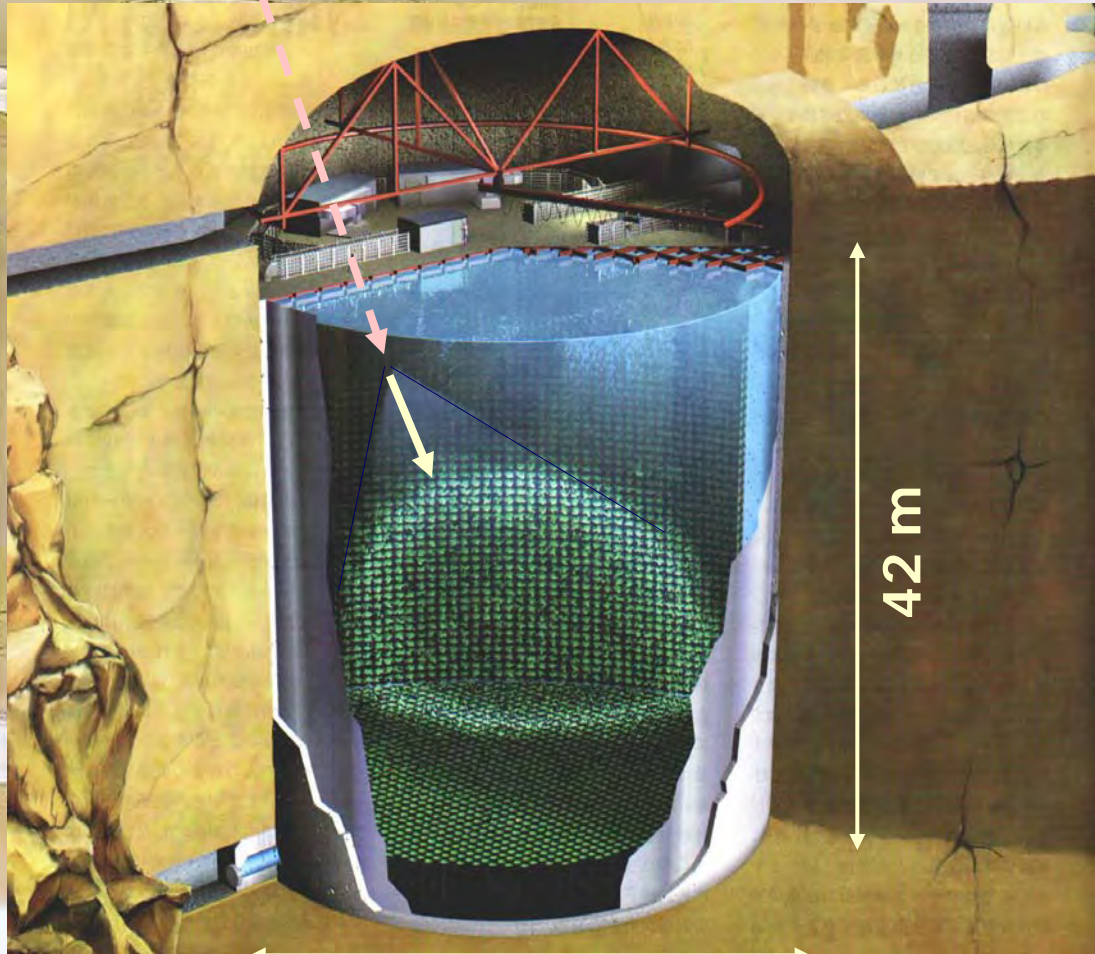
## ■ 素粒子論

- 我々の世界は何からできているか?どんな素粒子が存在するのか?
- それらは、どのような法則に従うか?どんな力が働くのか?

## ■ 素粒子の観測

- 目では決して見えない極微の世界。人はどうやってその世界を観察するのか?

素粒子の世界はドラマ(架空)の世界ではなく、実在する世界である。



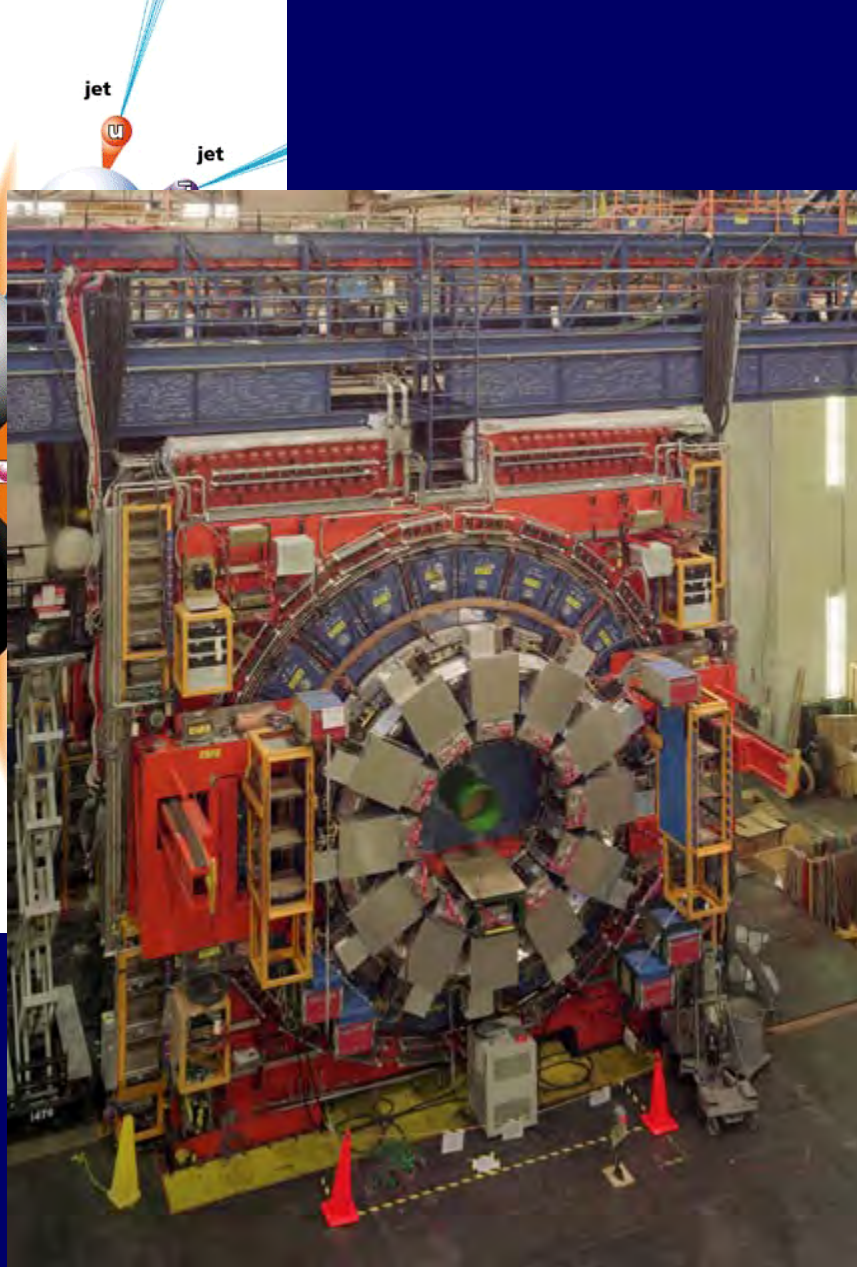
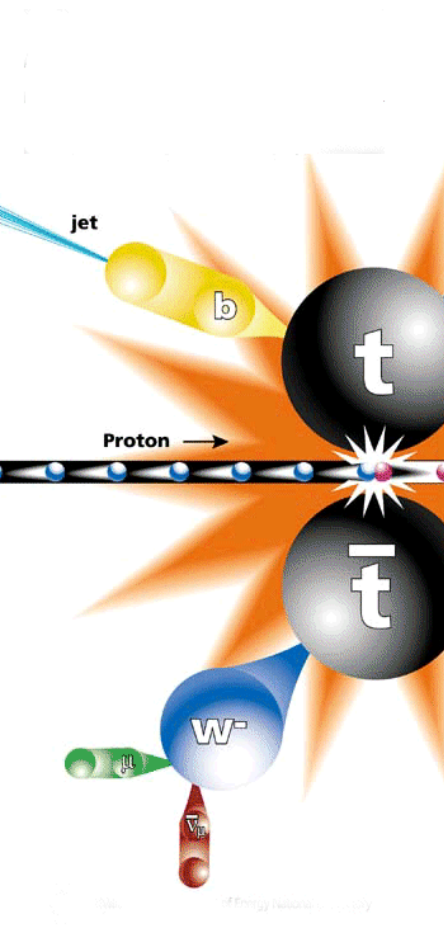
SUPERKAMIOKANDE

INSTITUTE FOR COSMIC RAY RESEARCH UNIVERSITY OF TSUKUBA

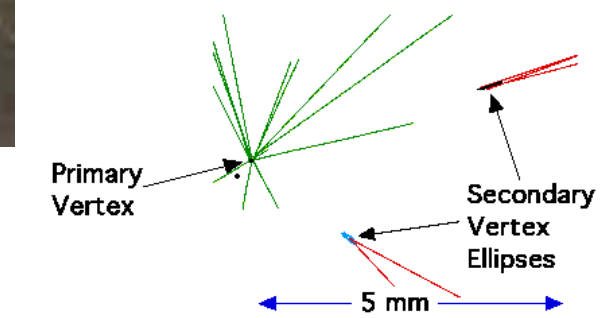
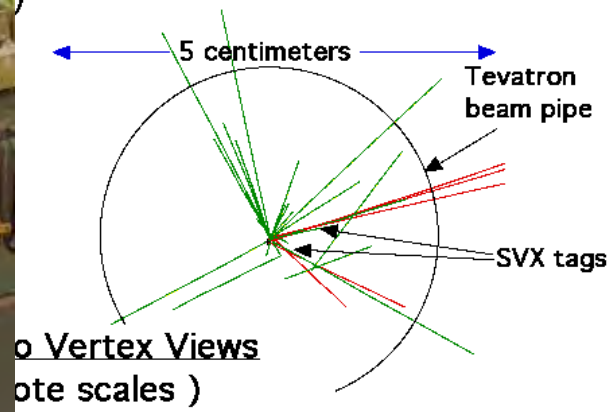
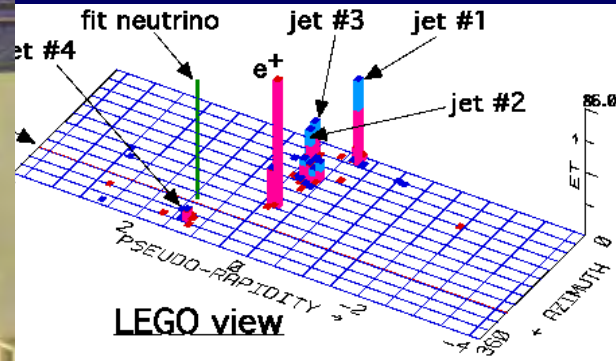
3976 m

NICKEN SEKKI



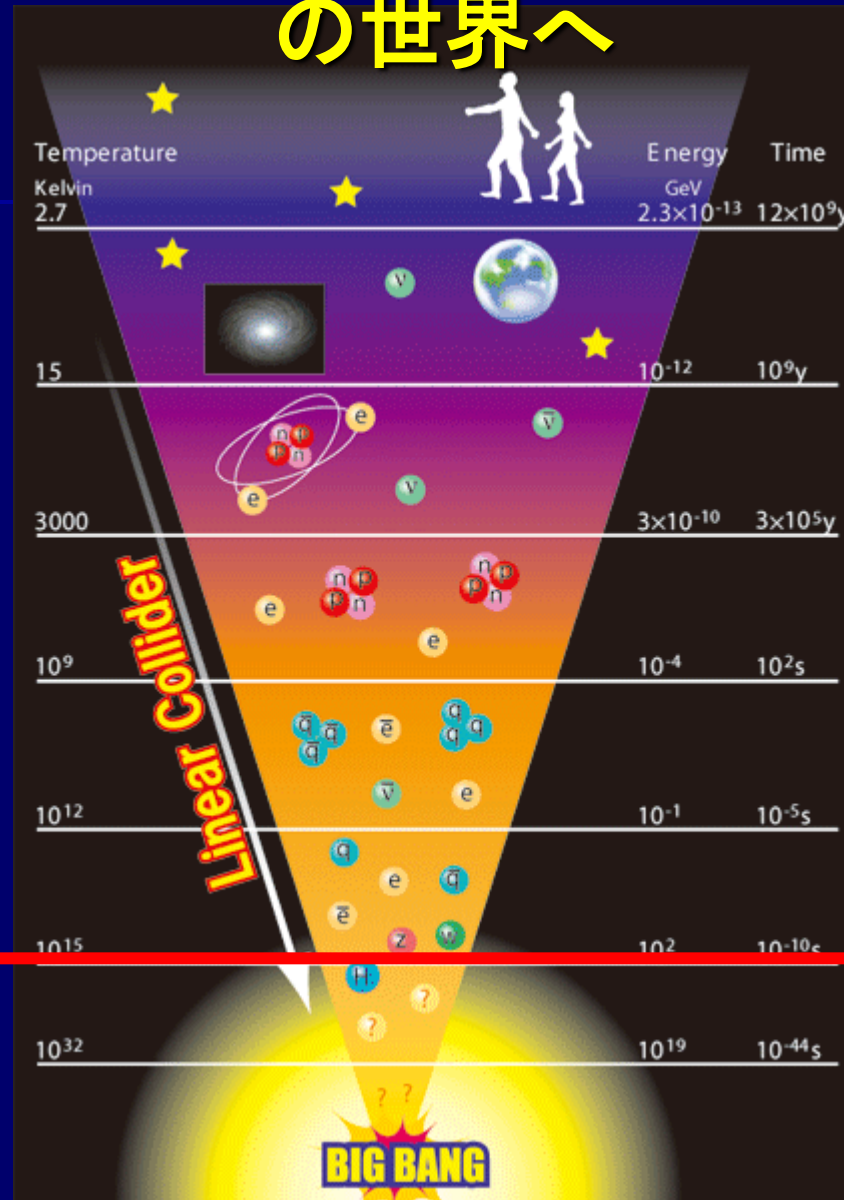


Tracking View



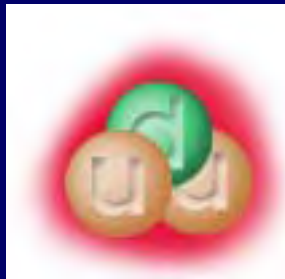


# 宇宙誕生後 (ビッグバン後)、 $10^{-10}$ (0.1ナノ) 秒 の世界へ

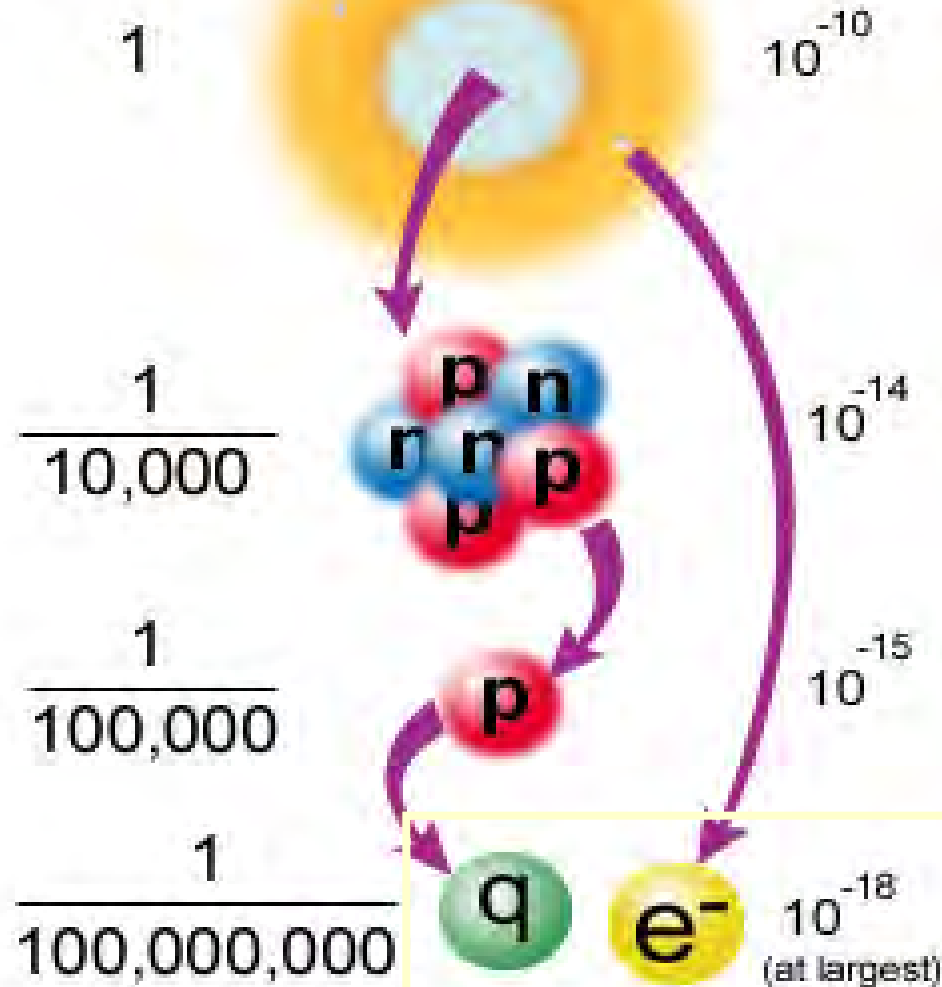


# 素粒子物理学紹介

## ■ 素粒子？



size in atoms and in meters



原子

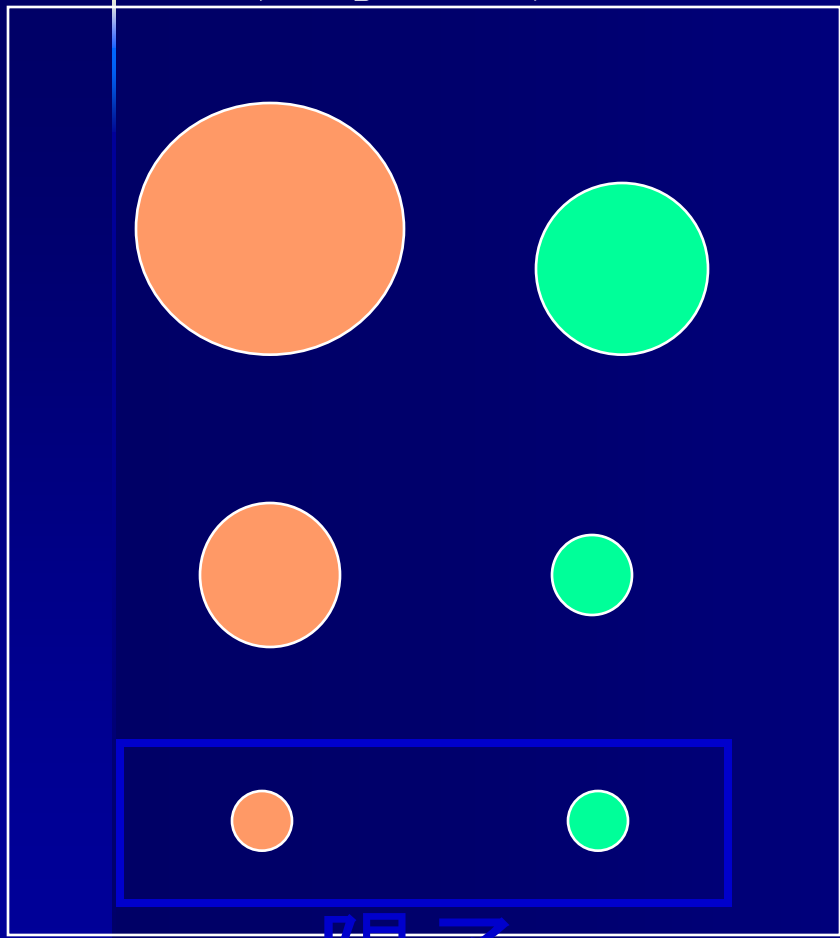
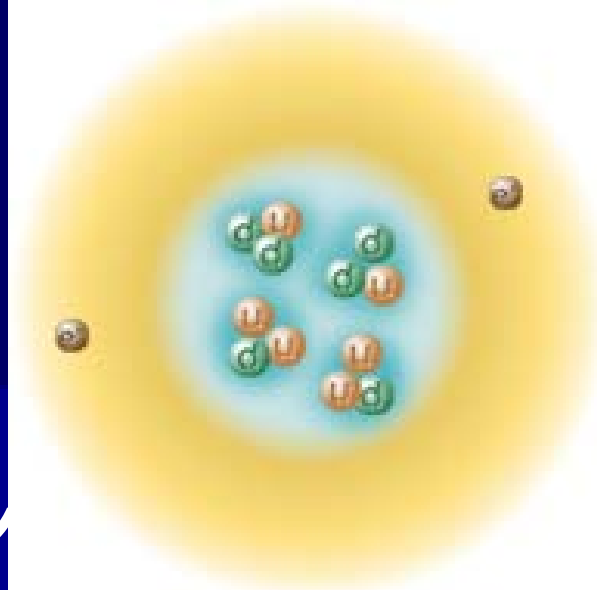
原子核

核子

素粒子

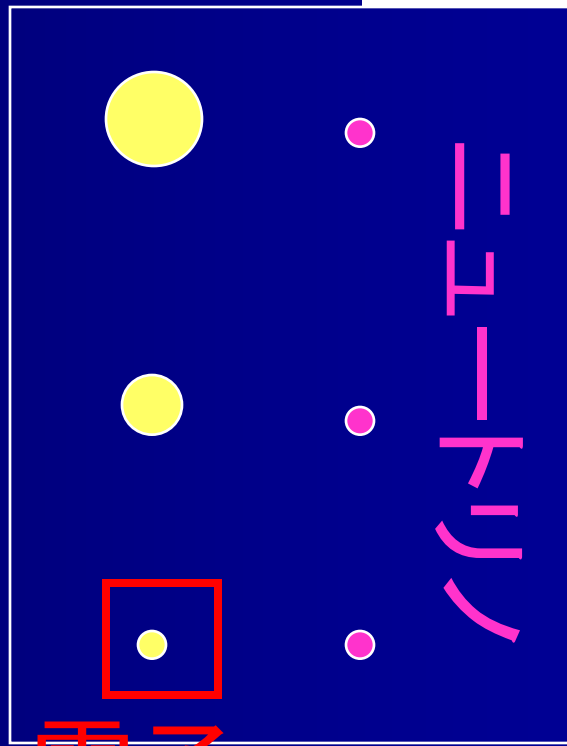
# 素粒子 (クォークとレプトン)

クォーク  $\times 2$  (反粒子)



陽子

レプトン



電子

12種類

# 素粒子とそれらに働く力

	電荷	第1世代	第2世代	第3世代
レプトン	0	$\nu_e$	$\nu_\mu$	$\nu_\tau$
	-1	$e$	$\mu$	$\tau$
クォーク	2/3	$u$	$c$	$t$
	-1/3	$d$	$s$	$b$

弱い力

電磁力

強い力



# 反粒子とは？

反粒子は時間を逆行する粒子と解釈できる。

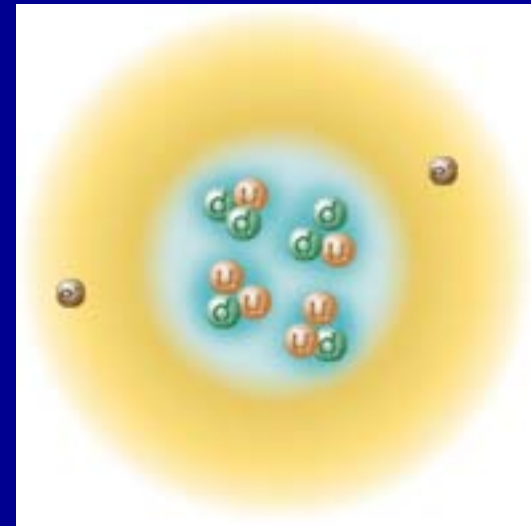
- 電子( $e^-$ )  $\leftrightarrow$  陽電子( $e^+$ )
- 陽子( $p: uud$ )  $\leftrightarrow$  反陽子( $\bar{p}: \bar{u}\bar{u}\bar{d}$ )
- 中性子( $n: udd$ )  $\leftrightarrow$  反中性子( $\bar{n}: \bar{u}\bar{d}\bar{d}$ )
- 光子( $\gamma$ )  $\leftrightarrow$  光子( $\gamma$ )

## 反粒子はどこに消えたか？

(\*)ディラックは最初

電子  $\leftrightarrow$  陽子

と考えたかった。(注: 質量が違うので無理。また現在では陽子は複合粒子であり、電子とは根本的に異なる。)



# 素粒子と力

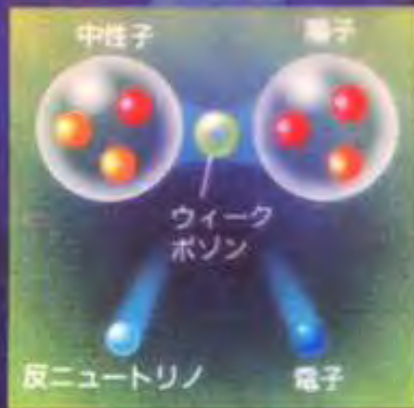
## 強い力



### 強い力

グルーオンをやりとりし、クォークを結びつけて陽子や中性子をつくり、陽子や中性子をまとめて原子核をつくる力。

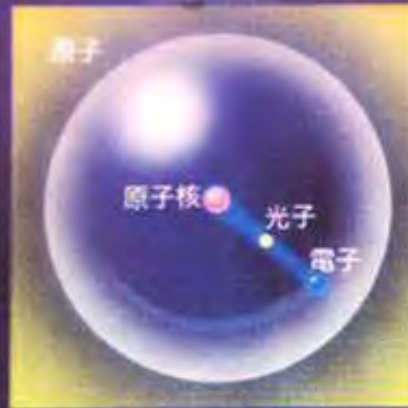
## 弱い力



### 弱い力

Wボソンをやりとりし、粒子の変化を引き起こす。たとえば中性子のダウン・クォークがアップになり、陽子に変わる。

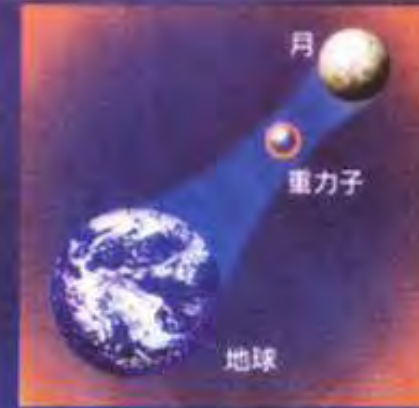
## 電磁気力



### 電磁気力

光子をやりとりし、電子と原子核を結びつけて原子をつくり、原子をまとめて物質をつくる力。電気をおびた粒子にはたらく。

## 重力



### 重力

重力は「万有引力」のことである。重力子をやりとりして、すべての物質にはたらく。物質をまとめて天体や銀河をつくる。

ニュートン1998年7月号

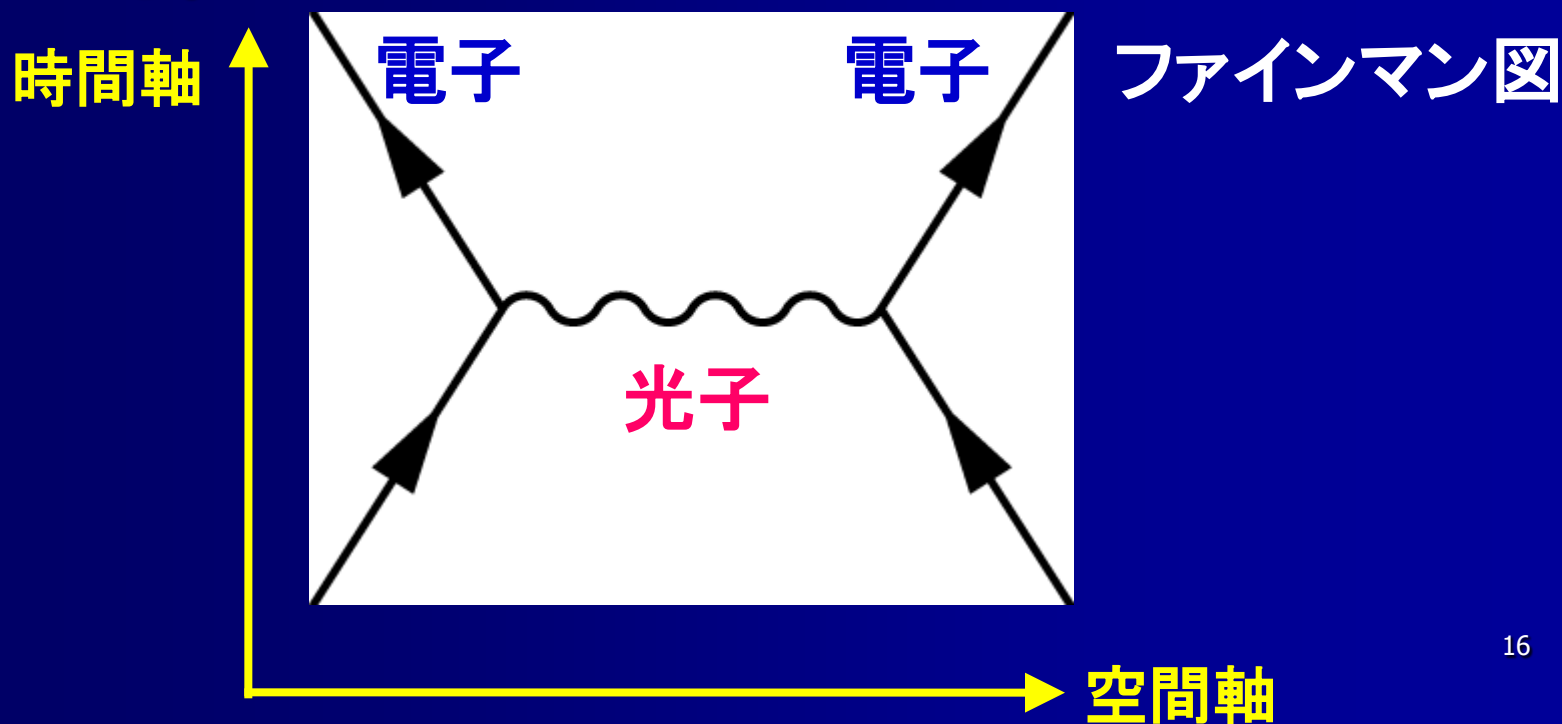
+ ヒッグス粒子 (粒子の質量の生成)

# 4つの力

- 重力(長距離力)
  - 地球の公転。ケプラーの法則。落下運動。
- 電磁力(長距離力)
  - 身の回りで感じる、重力以外のほとんどの物理現象の元。ローレンツ力。電磁波。光電効果。電場、磁場での運動。
- 強い力(短距離力)
  - 陽子、中性子、原子核を形作る力。陽子、中性子はクォークでできている。
- 弱い力(短距離力)
  - $\beta$ 崩壊。ニュートリノの反応。

# 力の伝搬

- 力は粒子が媒介する。
  - 物質を構成する粒子と力を媒介する粒子がある。





# 力を伝える粒子

- 重力
  - 重力子(グラビトン)
- 電磁力
  - 光子
- 強い力
  - グルーオン
    - 核力(原子核中で陽子、中性子をつなぐ力)は $\pi$ 中間子により媒介されると湯川が予言。
- 弱い力
  - W粒子、Z粒子(重たい:陽子の80~90倍)

電磁力、強い力、弱い力はゲージ理論で記述できる。  
。電磁力と弱い力は統一的に記述的である。

# 素粒子とそれらに働く力

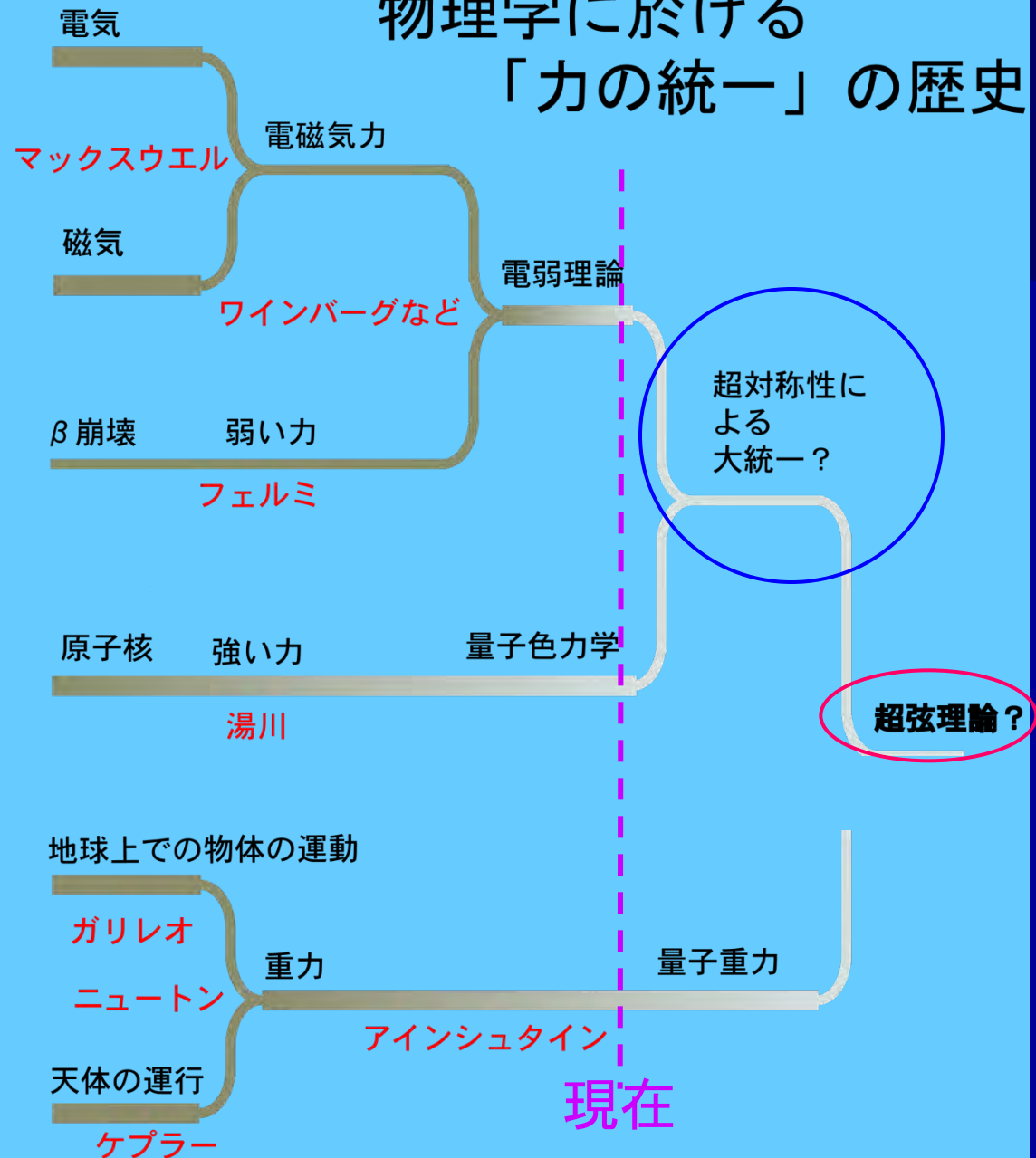
	電荷	第1世代	第2世代	第3世代
レプトン	0	$\nu_e$	$\nu_\mu$	$\nu_\tau$
	-1	$e$	$\mu$	$\tau$
クォーク	2/3	$u$	$c$	$t$
	-1/3	$d$	$s$	$b$

弱い力

電磁力

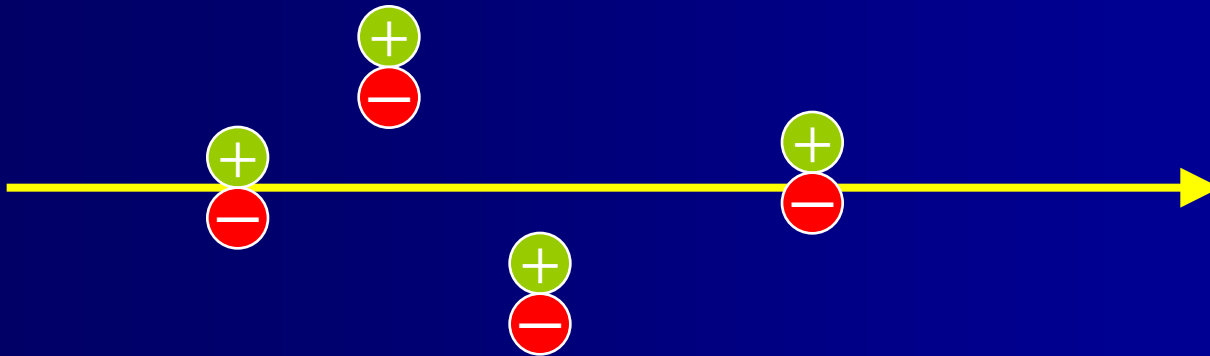
強い力

# 物理学に於ける 「力の統一」の歴史



# 粒子を観測する。

- 電気を帯びた粒子は物質を通過する際に、原子(分子)中の電子にエネルギーを与える(イオン化や励起)。





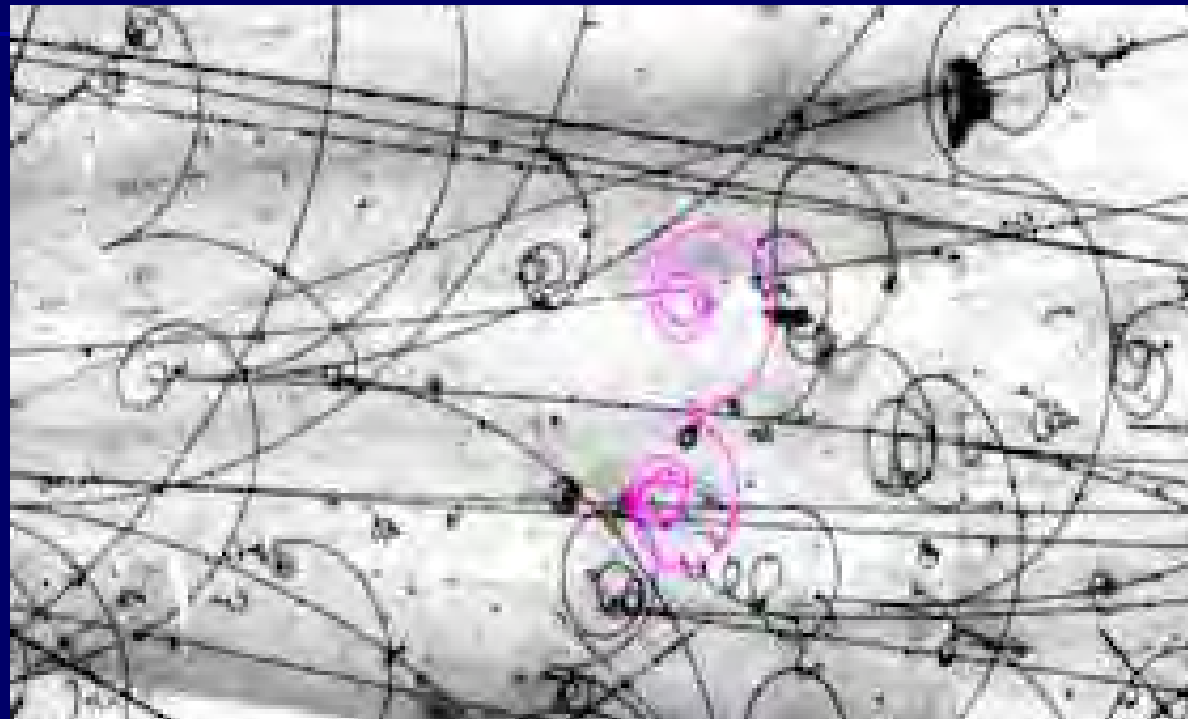
# 粒子が通過した際に起こること

- 電子・イオン対ができる
  - 電気信号として取り出せば粒子が通ったことが分かる。
- 分子にエネルギーを与える
  - 過飽和の液体なら、ある分子の周りで沸騰が起こる。
- 分子や結晶にエネルギーを与える
  - その後、光ったりする(蛍光)。

これらの信号を観測すれば粒子が通ったことがわかる。

# 粒子について何が測定できるか？

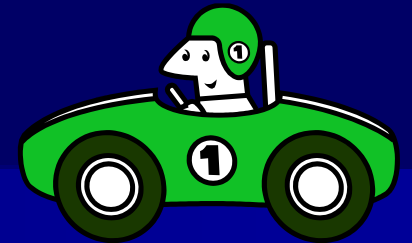
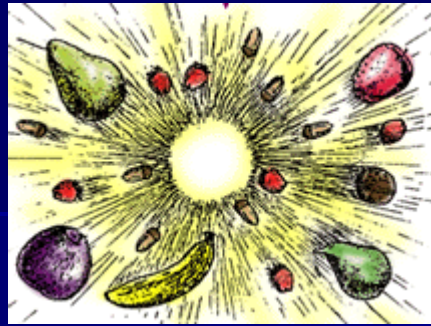
- 通過地点
- 速度
  - － 通過距離と時間から測れる場合も。でも大半の粒子は光速近い速度で飛行。
- エネルギー
  - － 粒子を止めて、その時のイオン対数や光の量からエネルギーを求める。
- 電荷
  - － 磁場で粒子を曲げれば測定可能。
- 運動量
  - － 磁場中で粒子の飛跡の曲がり具合から測定。
- 質量
  - － 古典論では $p=mv$ 。相対論では $p=m\gamma\beta$  (そのうちやります)。



# 素粒子実験

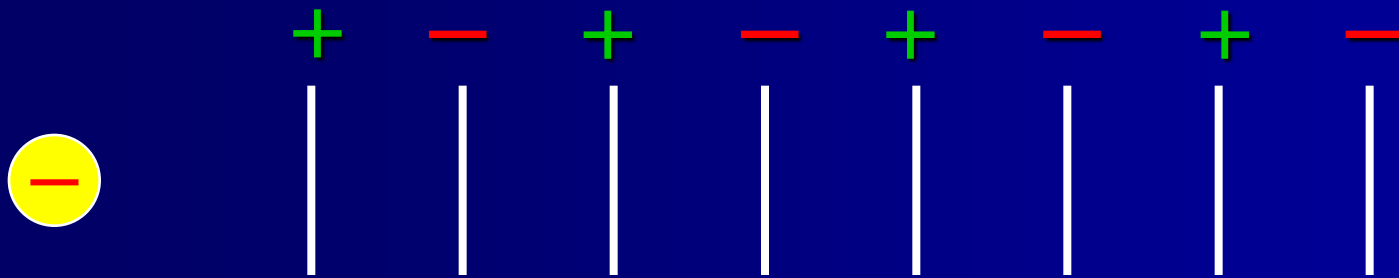
- 粒子と粒子をぶつけて、その残骸を見る。
  - 正面衝突(衝突型実験:コライダー実験)
  - 粒子を標的(壁)にぶつける(固定標的実験)
- 粒子が別の粒子に変わる(崩壊や振動する)瞬間を捕まえる。
- 南部陽一郎著「クォーク」4章「加速器のいろいろ」
  - 素粒子物理のシンボルは大加速器である。これがなくては素粒子の実験はできず、実験なしでは物理は進歩できない。





# 素粒子実験

# 粒子加速器の原理



その後、磁石で曲げたり、たくさんの粒子を集めたり(レンズの役目)して粒子のビームを作る。

# 素粒子実験の身近な例え

## ■ TVのブラウン管

- 電子を電場で加速
  - よって磁石をTVに近づけると像が歪む。
- 電子線をコントロール
  - この光を観測すれば、電子反応を捕らえたことになる。
- 電子線が蛍光板に当る。
  - 発光(18ページを復習)

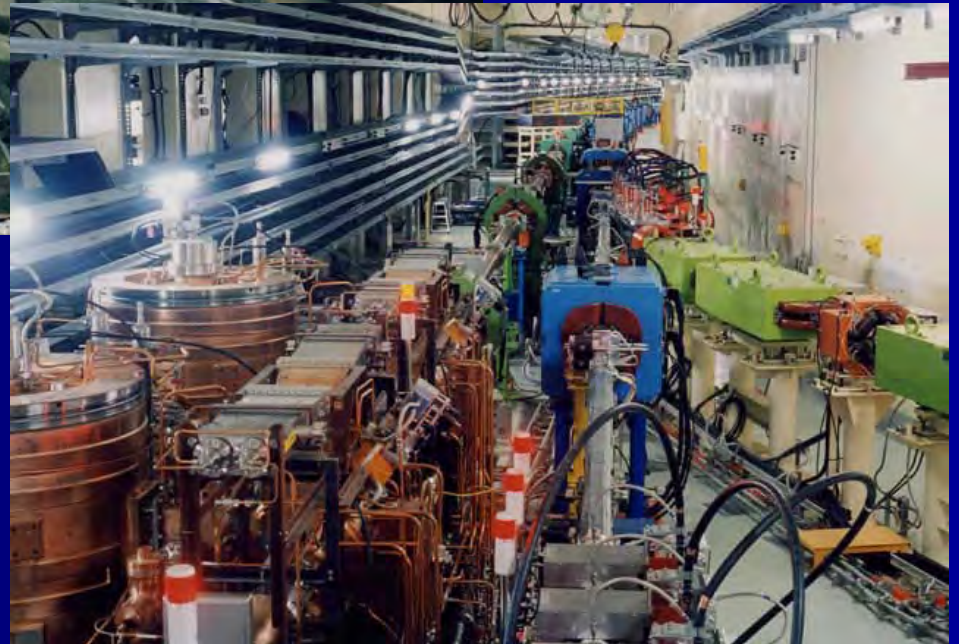
加速器

測定器

世界最高輝度の加速器： **KEKB** B-Factory (B工場)

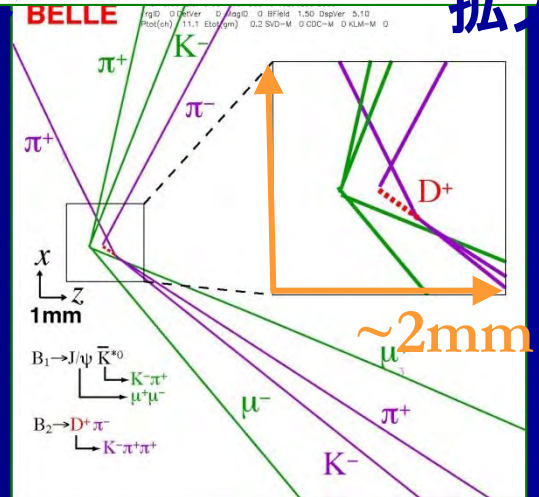
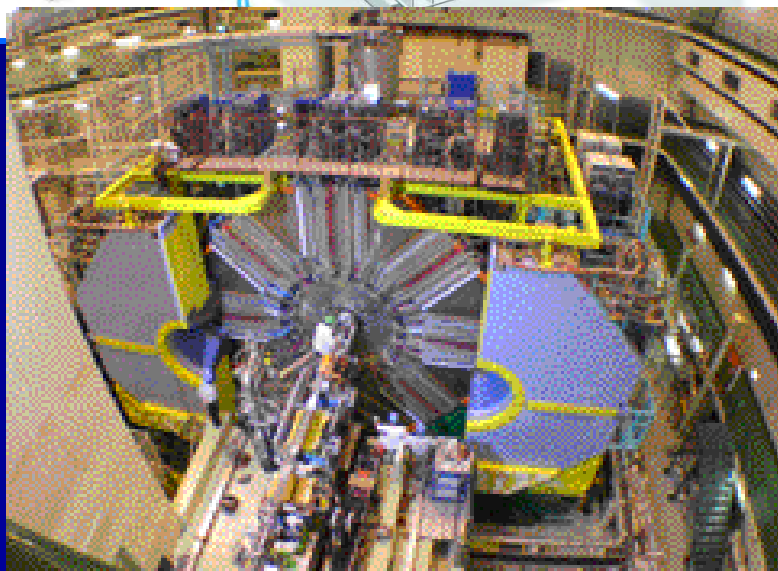
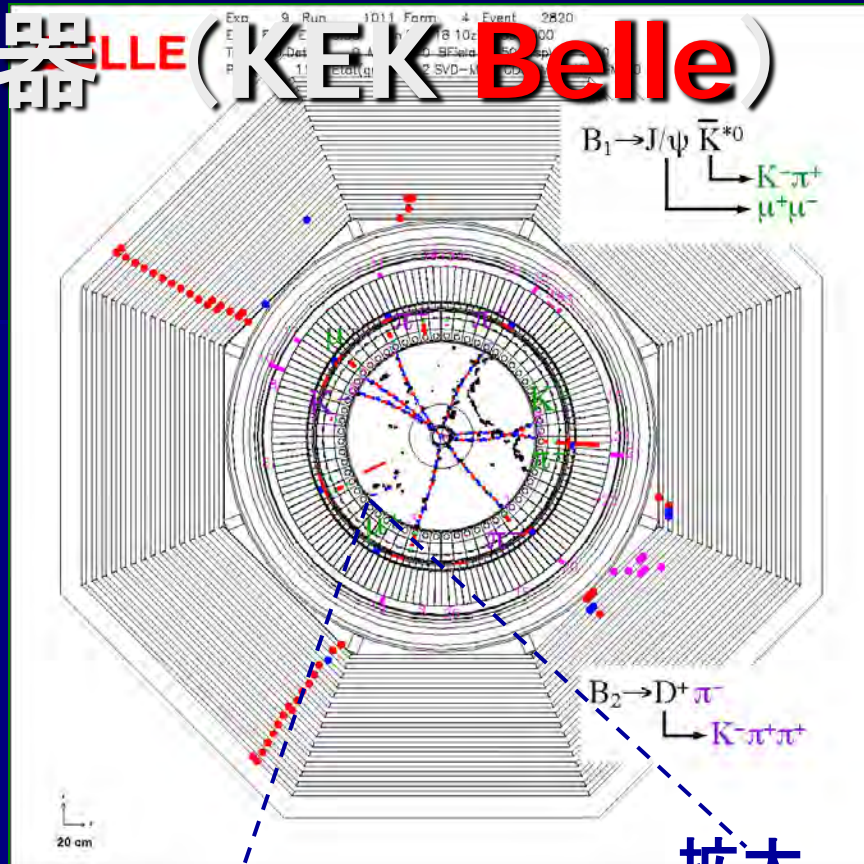
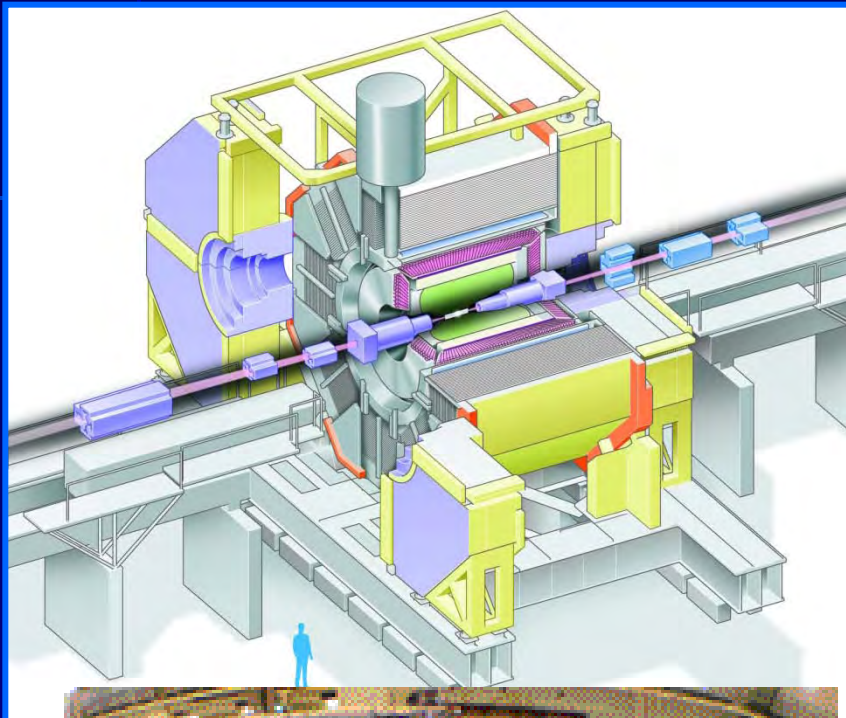
# 粒子反粒子対称性の研究

周囲3km





# 高性能素粒子検出器 BELLE (KEK Belle)



拡大

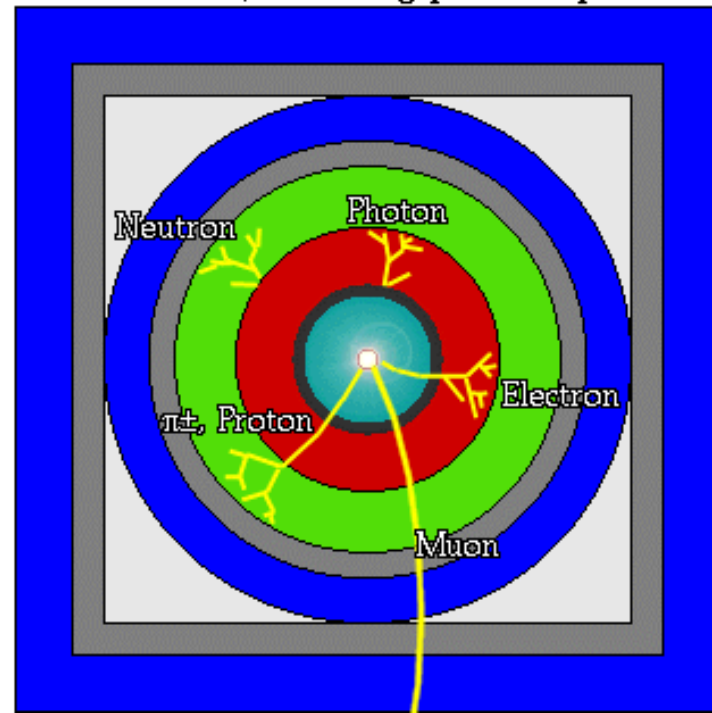
# なぜ複雑な粒子測定器が必要なのか？

## ■ よく観測される粒子

- 電子
- 光(光子)
- 陽子( $uud$ )、 $\pi^+(ud)$ 中間子、 $K^+(us)$ 中間子
- 中性子( $udd$ )
- $\mu$ 粒子

A detector cross-section, showing particle paths

- Beam Pipe (center)
- Tracking Chamber
- Magnet Coil
- E-M Calorimeter
- Hadron Calorimeter
- Magnetized Iron
- Muon Chambers



# (一般的な)素粒子測定器の構造

- まず電荷を帯びた粒子の軌跡を磁場中で測る。
  - 位置、運動量が測定できる。
- 次に電子・光子を止めて位置とエネルギーの測定。
- 次に陽子、 $n$ 中間子を止めて位置とエネルギーの測定(電子・光子より止まりにくい)。
- 最後に貫通していく荷電粒子が $\mu$ 粒子。
  - 位置と運動量は同定されている。
- 最後まで観測にかからないのがニュートリノ(幽霊粒子?)

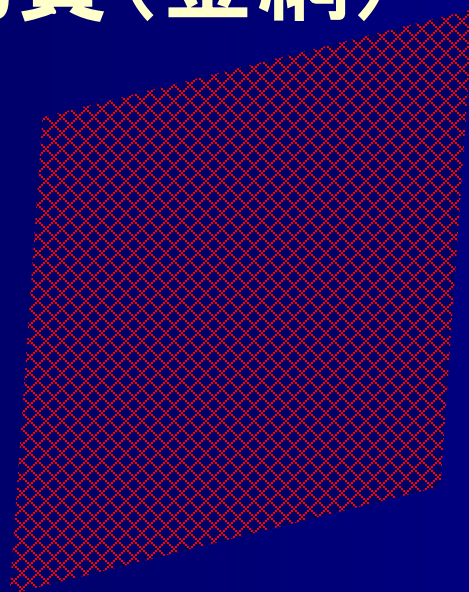
# ニュートリノの測定1

- ニュートリノの存在は、前節の測定器中で消えたエネルギーを見ればよい。始状態のエネルギーはビームから分かる。
    - エネルギー保存則
    - 運動量保存則
- ⇒ ニュートリノの運動量(～エネルギー)

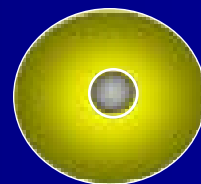
# ニュートリノとは？

- 電荷を持たない電子[の仲間]。
- 宇宙にたくさんある( $\sim 100$ 個/cm<sup>3</sup>)。
- 電荷がないのでめったに捕まらない。
- ものすごく軽い(陽子の1億分の1以下、電子の10万分の1以下)。

物質(金網)



電気の衣



電子



ニュートリノ

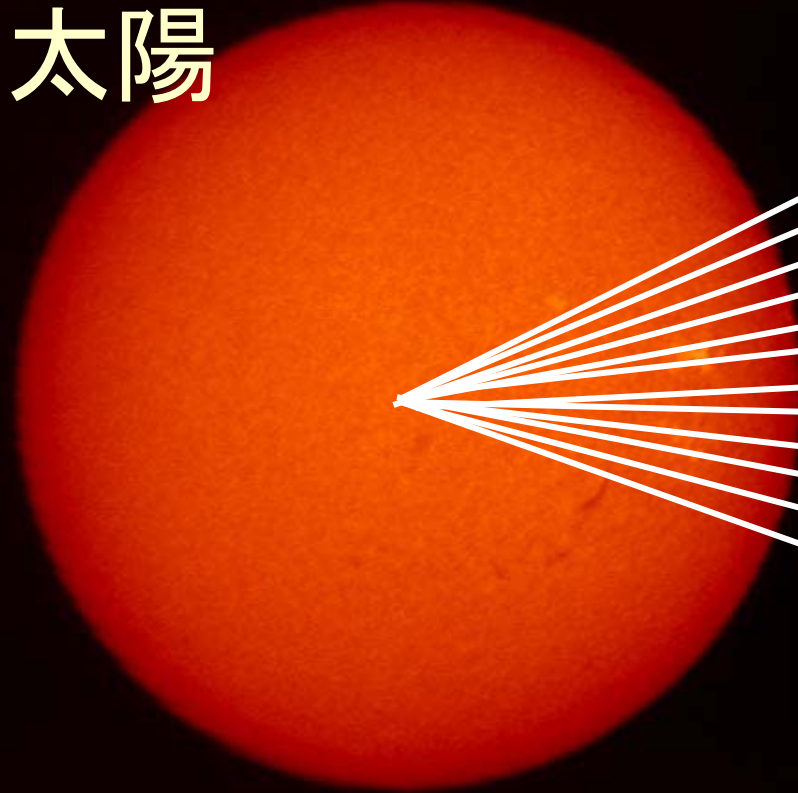


# ニュートリノは地球も突き抜ける

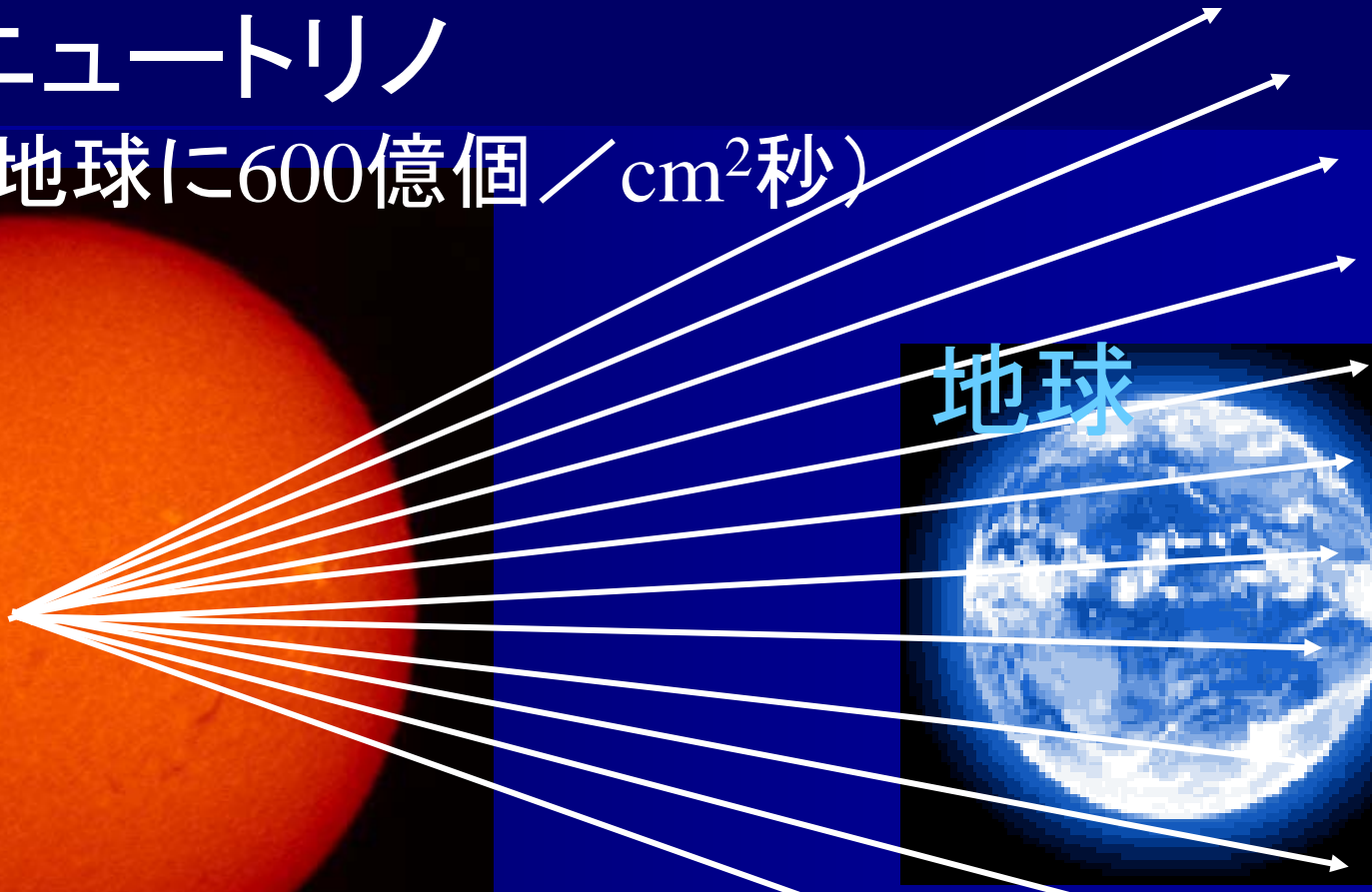
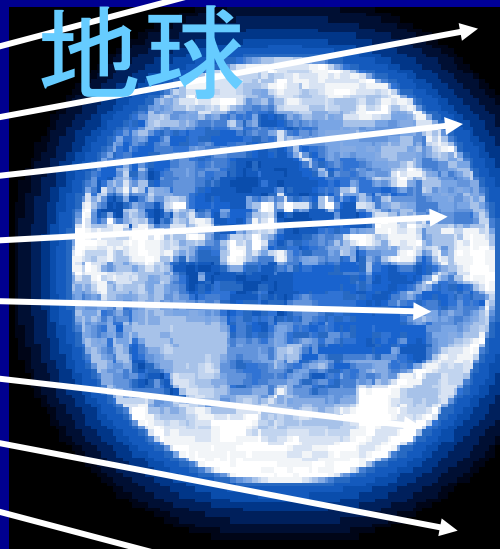
ニュートリノ

(地球に600億個 /  $\text{cm}^2\text{秒}$ )

太陽



地球



一億個に1個地球に当る

弱い相互作用という名の通り

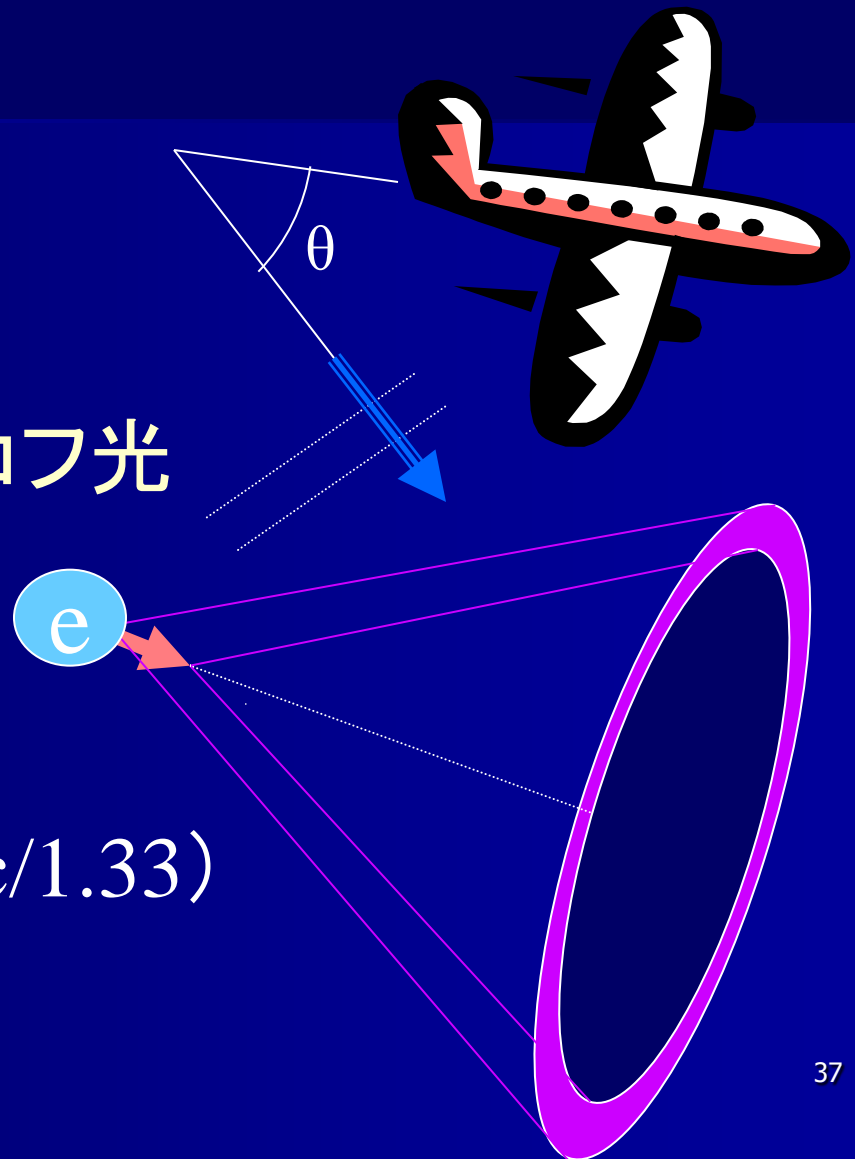


# ニュートリノの測定2

- 超大型測定器を用意してニュートリノを捕まえる。
  - スーパーカミオカンデは5万トン(戦艦大和が約6万トン)。
  - 一日約30個の太陽からのニュートリノを検出。
  - 一日約8個の大気からのニュートリノを検出。
    - ニュートリノが雨のように降っている。
  - 運がよければ超新星ニュートリノも検出可能。

# カミオカンデの動作原理

- 超音速 → 衝撃波
- 超光速 → チェレンコフ光



(水中の光速 =  $c/n = c/1.33$ )

# 次にやること

- 次週：LHC実験、ニュートリノ実験、CP対称性の実験
- 次々週：宇宙と素粒子の接点。暗黒物質探索実験、反物質探索実験。

時間があまれば

# 保存則

物理学の中で保存則は重要な役割を担っている。高校物理でも

- エネルギー保存則
- 運動量保存則
- 角運動量保存則

等を使ってきた。大学の物理ではこれらの保存則が自然界における対称性と密接に関係していることを学ぶ。

ネーターの定理: 何か一つの対称性があれば、それに伴って一つの保存則が存在する。

- 時間の等質性 → エネルギー保存則
- 空間の等質性 → 運動量保存則
- 空間の等方性 → 角運動量保存則

が導ける。

では、電荷の保存則はいかなる対称性と関係しているか。これは現在の素粒子理論の根幹であるゲージ対称性と密接に関係している(興味のある人は何か本を読んでみて下さい)。量子力学では、粒子の存在確率はその波動関数の2乗 $|\psi(x)|^2$ で与えられ、 $\psi(x)$ 自身を測定することはできない。よって $\psi(x)$ には常に $\psi(x)e^{-i\theta}$ の不定性が伴う。この $e^{-i\theta(x)}$ 変換に対しての対称性が電荷保存則を導き出す。

しかし、物理現象を観測してみると対称性を伴わない保存則が見つかったりする。例は

## ■ レプトン数

–  $\pi^- \rightarrow e^- \gamma$ 、 $\mu^- \rightarrow e^- \gamma$ 等は起こらない。電子は電子レプトン数1 ( $\nu_e$ も) で $\mu$ はミューレプトン数1 ( $\nu_\mu$ も)、他は0。ただし、ニュートリノ振動 ( $\nu_m \rightarrow \nu_t$ ) のようにレプトン数が保存していないケースも最近発見された。

## ■ バリオン数

–  $p \rightarrow e^+ \pi^0$ 、もしレプトン数を気にするなら $p \rightarrow e^+ \nu_e \pi^0$ 等は起こらない。陽子、中性子がバリオン数1を持ち、 $n$ 中間子や電子は0である。



# 素粒子の寿命

無限の寿命を持つ粒子

光子、電子、陽子(uud)

有限の寿命を持つ粒子

中性子(udd) : 886sec,  $\mu$  :  $2.2\mu(10^{-6})\text{sec}$ 、 $\pi^{\pm}$  :  $26\text{n}(10^{-9})\text{sec}$ 、

$\pi^0$  :  $8.4 \times 10^{-17}\text{sec}$  (直接測定できる限界)、

他にももっと寿命が短い粒子がわんさかいる。

例:  $\Delta$ 粒子(uuu)、

寿命とは？

時刻 $t=0$ に $N(0)$ 個であった粒子が、時刻 $t$ 秒後には $N(t)$ 個に減ったとする。その場合、粒子の減少率 $dN/dt$ は $N(t)$ 自身に比例し、その比例係数の逆数を粒子の寿命 $\tau$ と定義する。

——(1.1)

この方程式の解は

——(1.2)

と表せる。大雑把に言うと、例えば粒子は時間 $\tau$ 後にはもともとの数の37%、 $3\tau$ 後には5%しか生き残らない。

# 素粒子の寿命

粒子の寿命の長さの違い。

- 弱い相互作用 → 寿命が長い(寿命が測定できる粒子の大半。)
- 電磁相互作用 → 寿命が短い( $\pi^0$  等々)
- 強い相互作用 → 寿命が非常に短く、粒子として存在しているか確定し難い。

不確定性原理(量子力学)を使って粒子の寿命を推定する。

$$(\Delta E \Delta t \sim \hbar, \hbar: \text{プランク定数}) \quad (1.1)$$

$$\hbar = 6.6 \times 10^{-34} \text{J} \cdot \text{s} = 4.1 \times 10^{-15} \text{eV} \cdot \text{s}$$

寿命が非常に短くなると、エネルギー(=粒子の質量)を決定することが出来なくなる。質量分布の絵を書く。

例:  $\Delta^{++} \rightarrow p\pi^+$ 、 $\pi^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu$ 、 $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$



# 次にやること(古いバージョン)

- 粒子の崩壊式
  - 素粒子は崩壊する。
- 量子力学の超簡単入門
  - 量子性。プランク定数。粒子性、波動性。
  - 粒子のスピン。フェルミ粒子、ボーズ粒子
  - 力の媒介。ファインマン図
- ローレンツ変換の超簡単紹介
  - 粒子の寿命

# 素粒子の相互作用(電磁気力)

- 湯川理論
- もっとも精密な理論。
  - 電磁相互作用
  - ファインマン図
  - スピン

# 素粒子の相互作用(弱い力)

- W、Z



# 素粒子の相互作用(強い力)

- クォークモデル
- 力の閉じ込め。
- $\Pi$ 中間子、グルーオン、核力

# 素粒子の相互作用（電弱統一）

- ゲージ理論
- Zと $\gamma$
- ヒッグス粒子（スピン0）