

現代の素粒子像 — 実験編 —

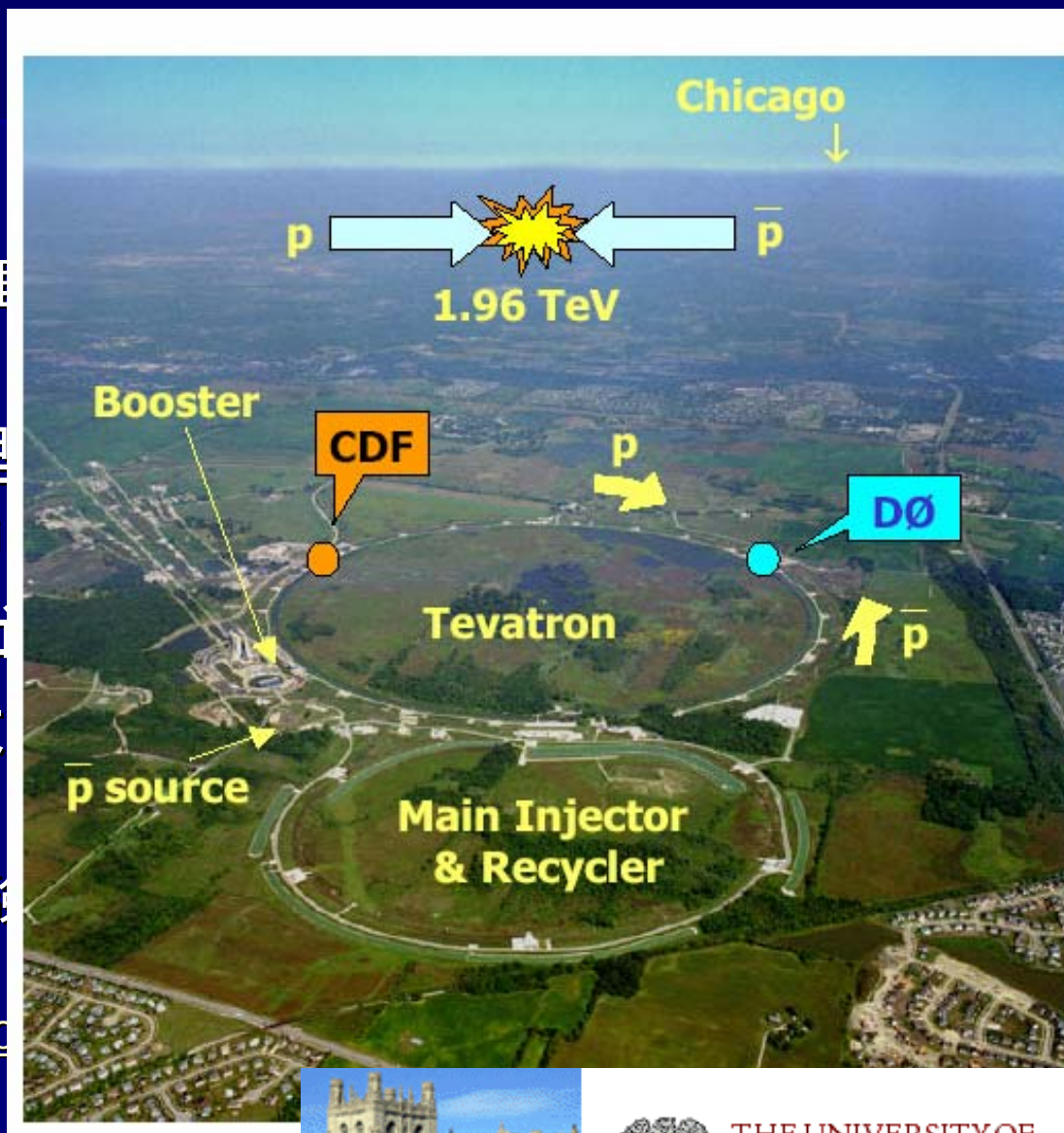
中家 剛 (専門:素粒子実験
特にニュートリノ物理学)

講義の目次

1. 素粒子を観る
2. 素粒子の基本性質と素粒子物理に関する重要な原理
3. 素粒子の相互作用
 1. 電磁力
 2. 強い力
 3. 弱い力
 4. 電弱統一、ゲージ理論紹介
4. 素粒子の種類と特性(発見物語)

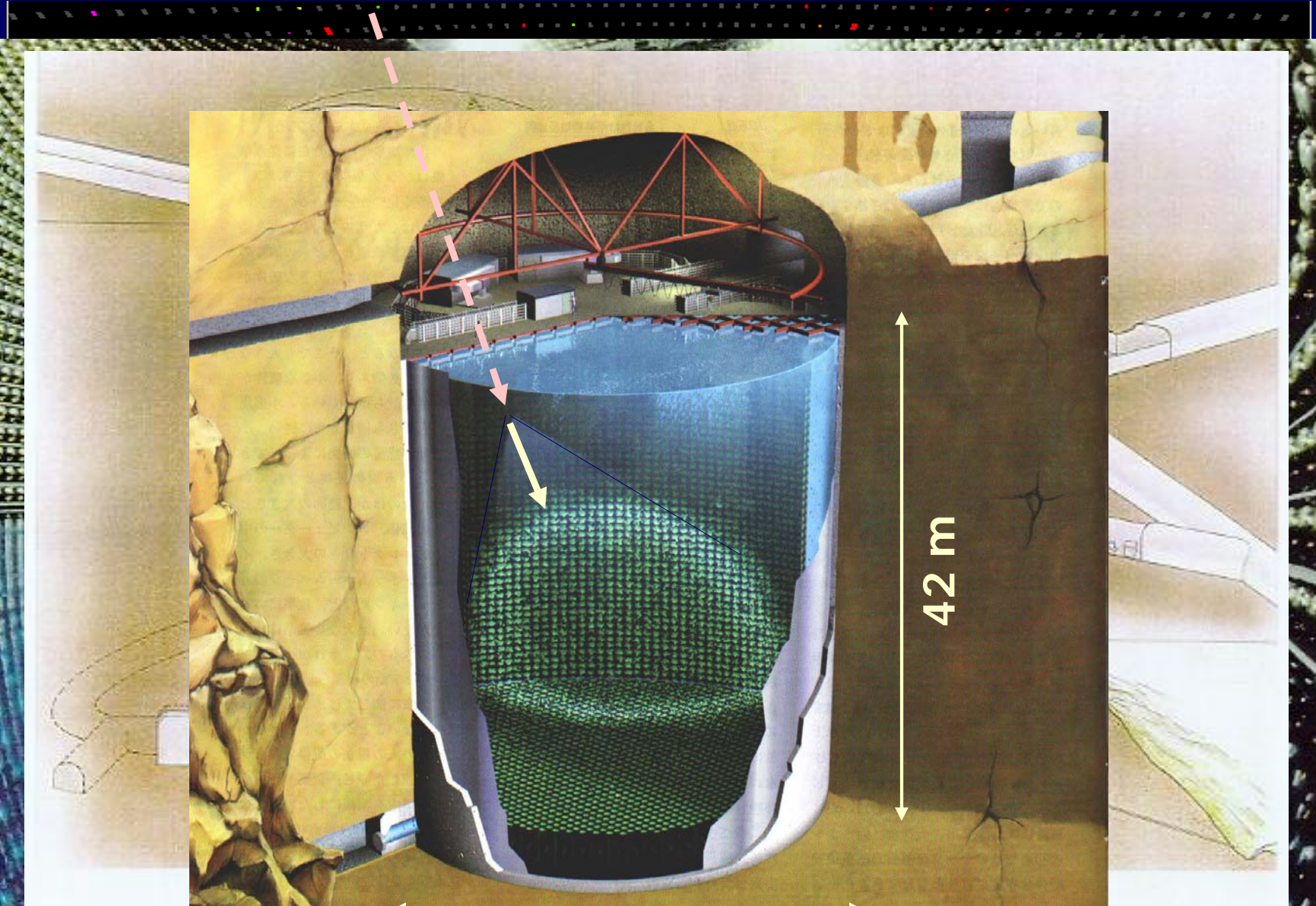
自己紹介

- 専門: 素粒子実験
 - 現在はニュートリノ物理
- 19xx生まれ(大阪)
- 1995年: 大阪大学理
- 1994-1997年: アメリ
- 1997-1999年: シカゴ
- 1999年9月-: 京都大
- 担当講義
 - 「現代の素粒子像(実験
粒子物理学1)」
- <http://www-he.scphys.kyoto>



1. 素粒子を観る

- 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(実験)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。

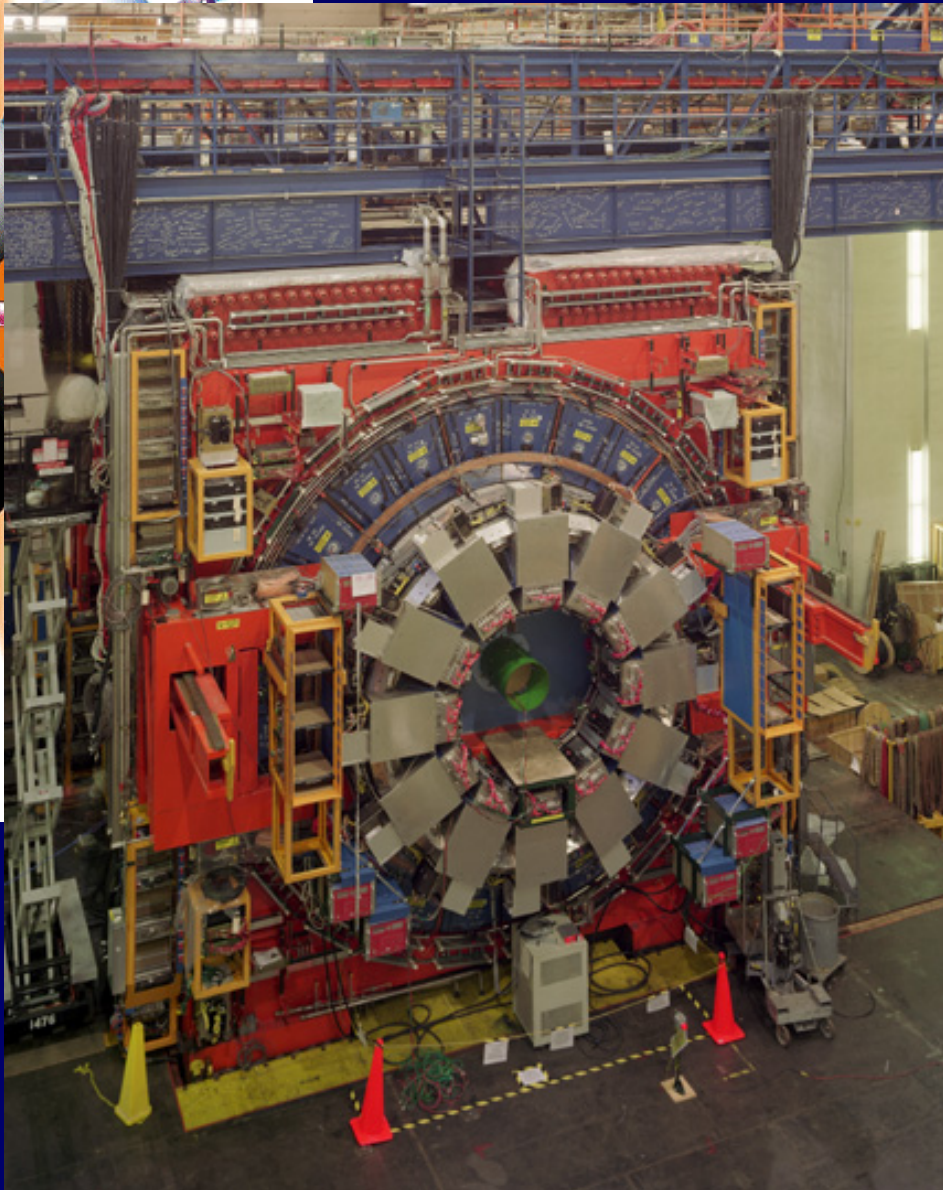
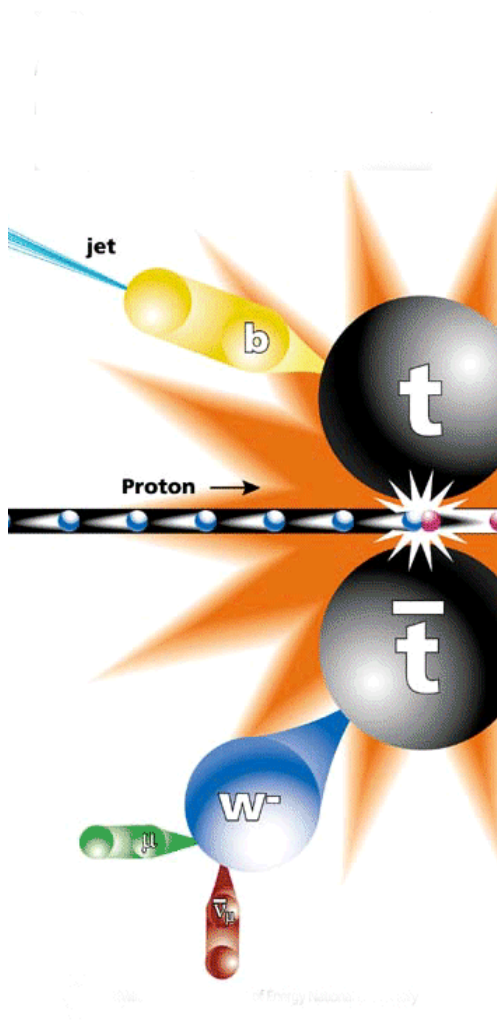


SUPERKAMIOKANDE

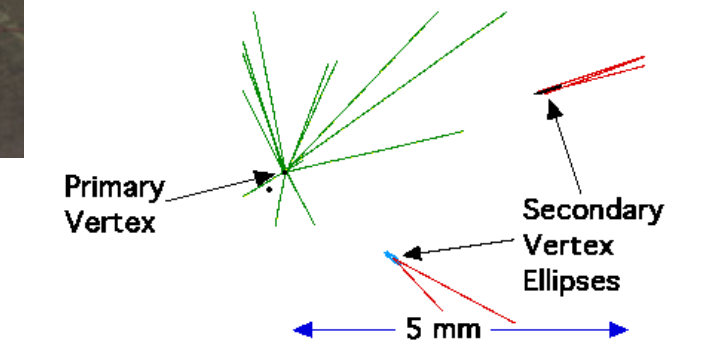
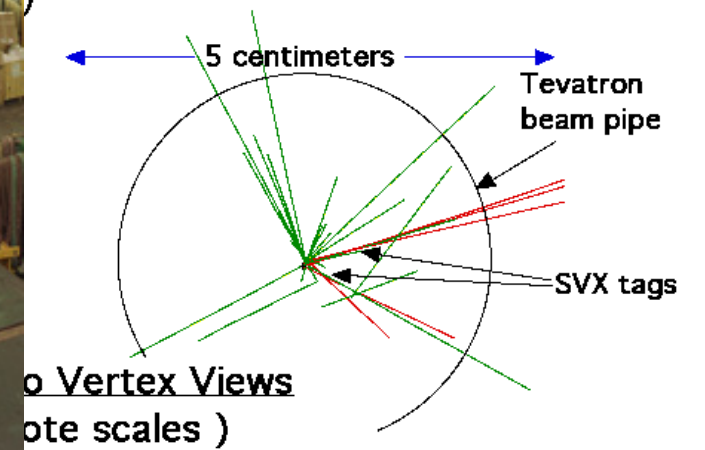
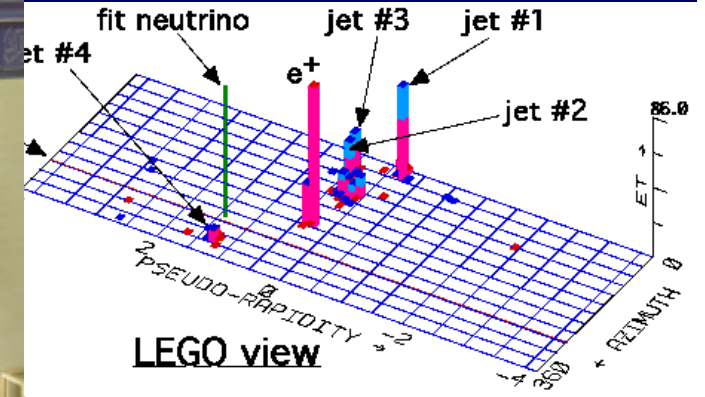
INSTITUTE FOR COSMIC RAY RESEARCH, UNIVERSITY OF TOKYO

371.3 m

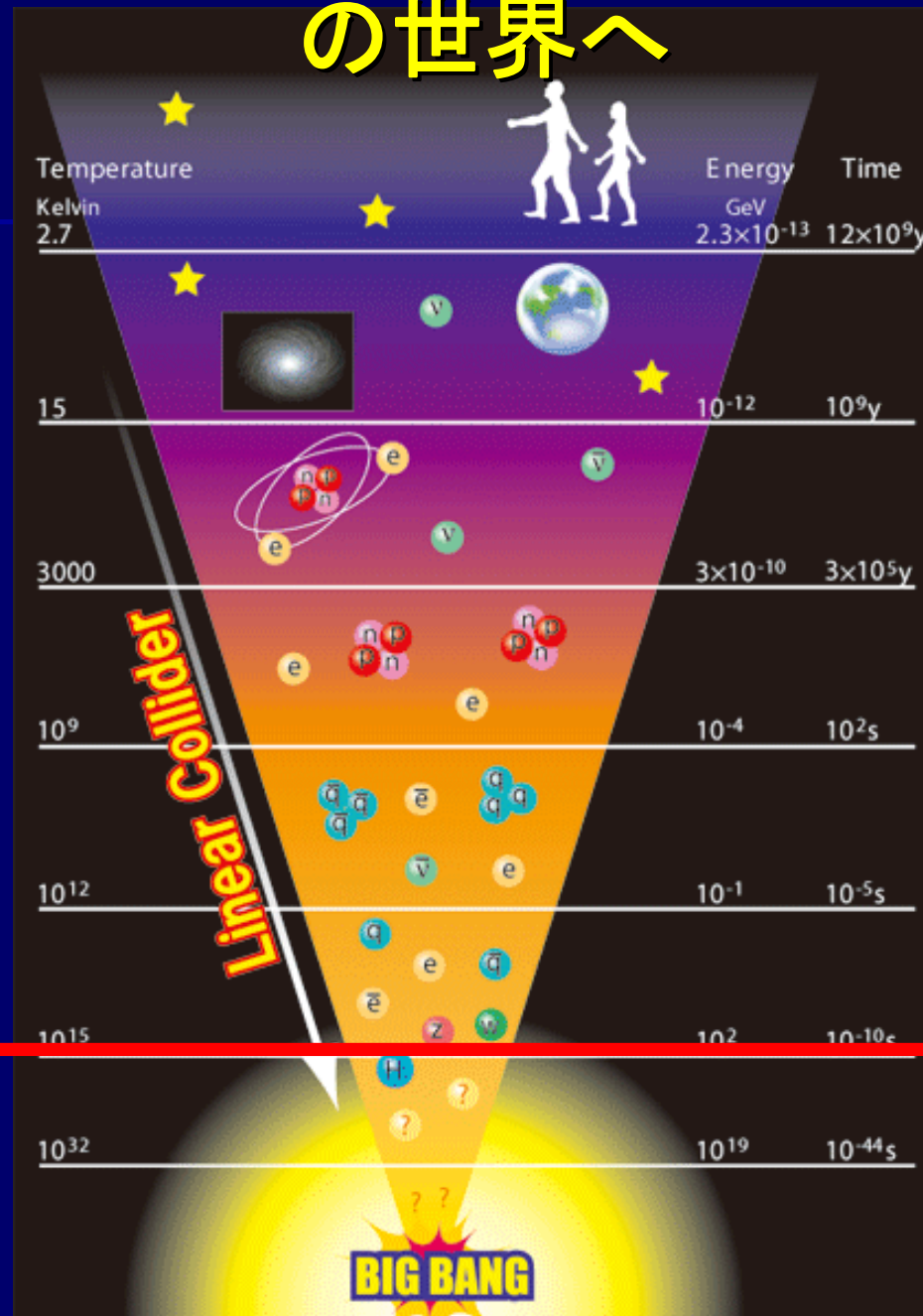
NIKEN SEKKEI



Tracking View

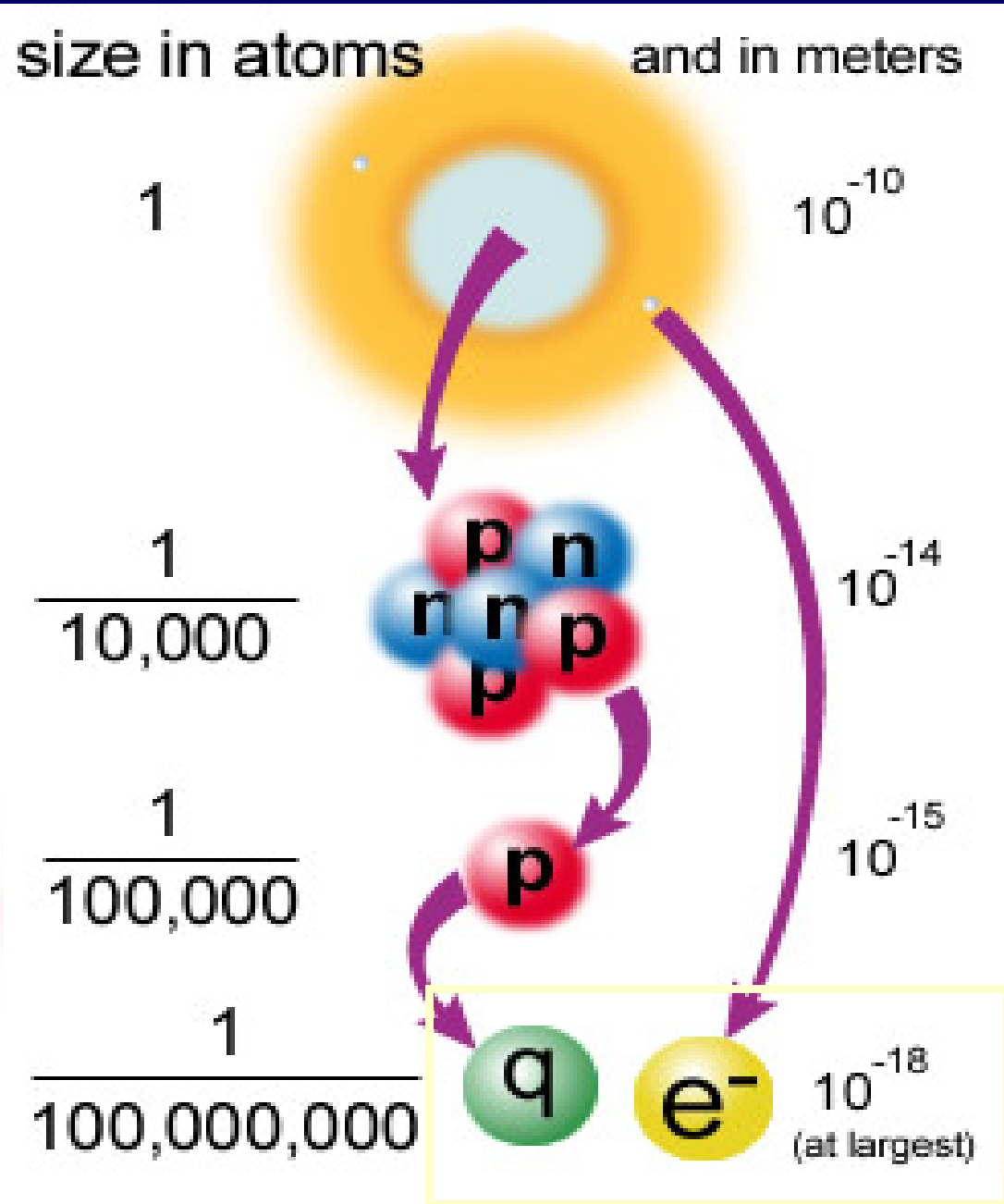
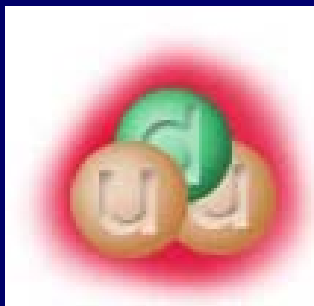


宇宙誕生後(ビッグバン後)、 10^{-10} (0.1ナノ)秒 の世界へ



素粒子物理学紹介

■ 素粒子？



原子

原子核

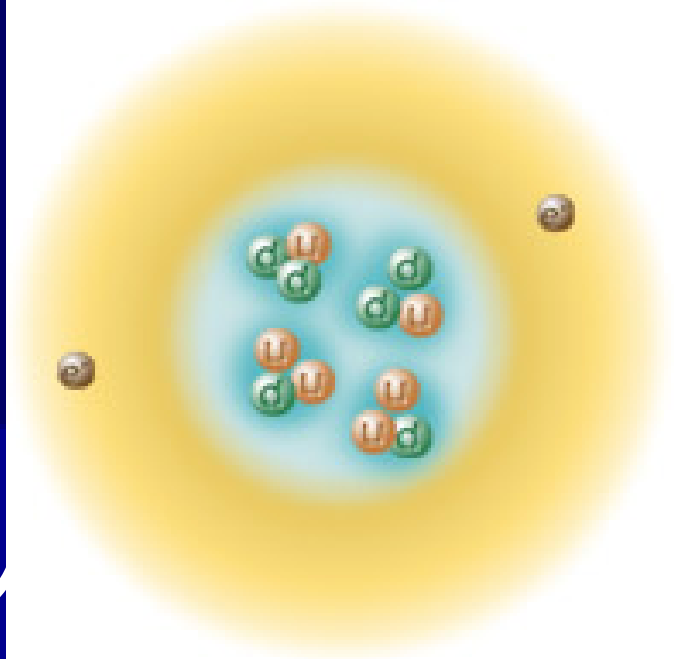
核子

素粒子

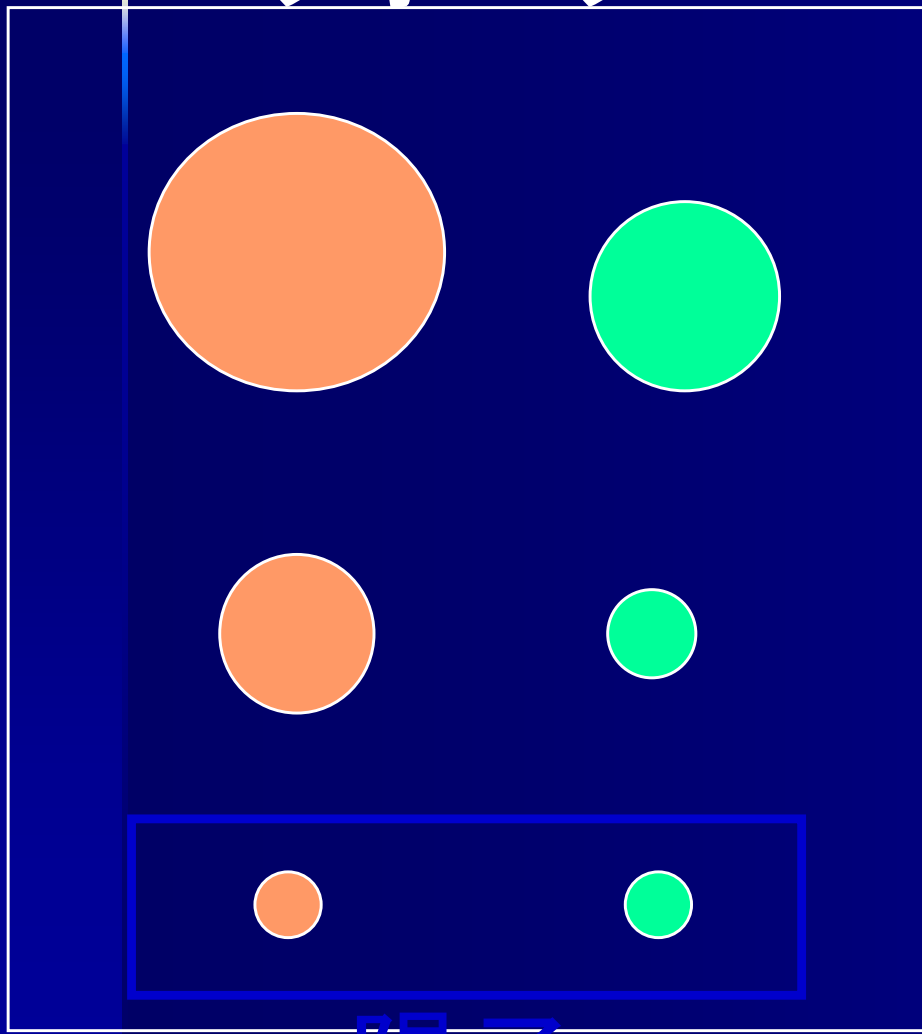
素粒子 (クォークとレプトン)

$\times 2$ (反粒子)

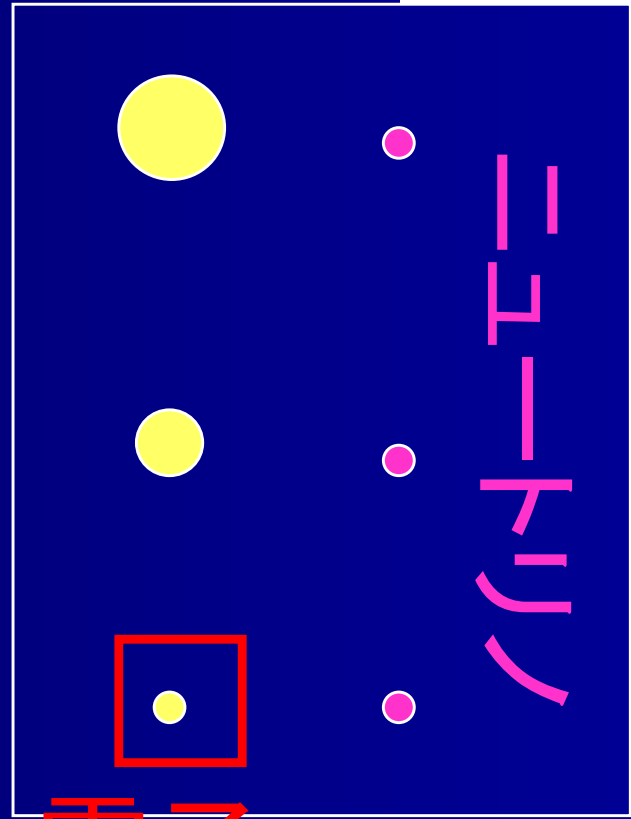
クォーク



レプトン



陽子



電子

ニュートリノ

12種類

反粒子とは？

反粒子は時間を逆行する粒子と解釈できる。

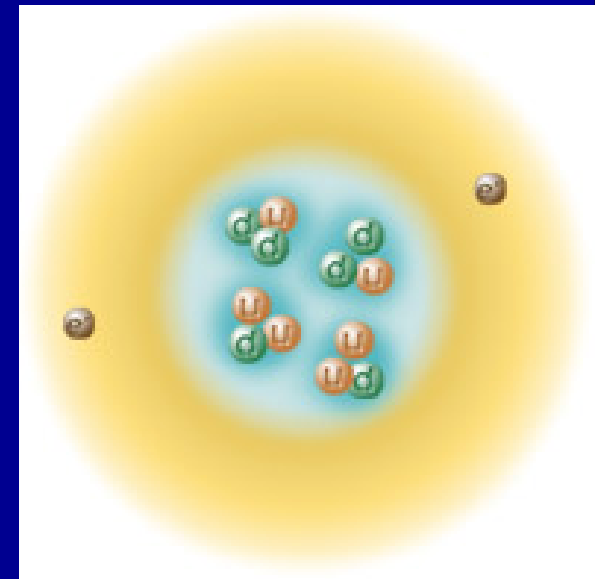
- 電子(e^-) \leftrightarrow 陽電子(e^+)
- 陽子($p: uud$) \leftrightarrow 反陽子($\bar{p}: \bar{u}\bar{u}\bar{d}$)
- 中性子($n: udd$) \leftrightarrow 反中性子($\bar{n}: \bar{u}\bar{d}\bar{d}$)
- 光子(γ) \leftrightarrow 光子(γ)

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。

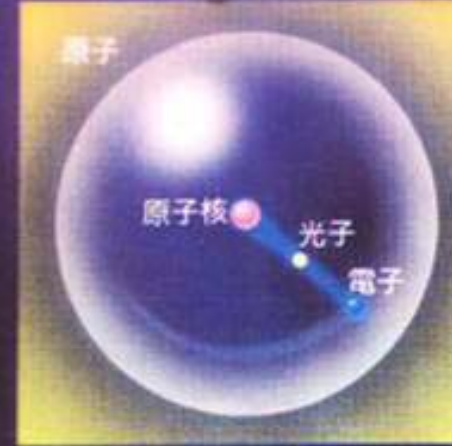
弱い力



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、陽子にかわる。

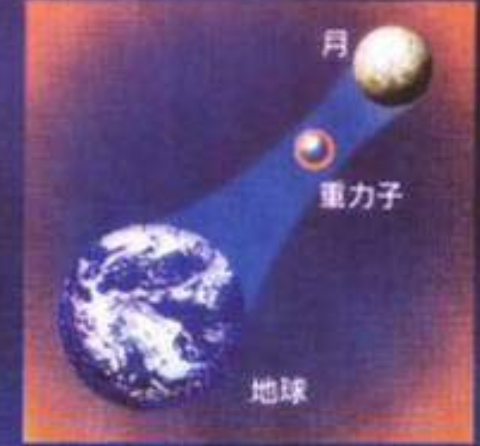
電磁気力



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。

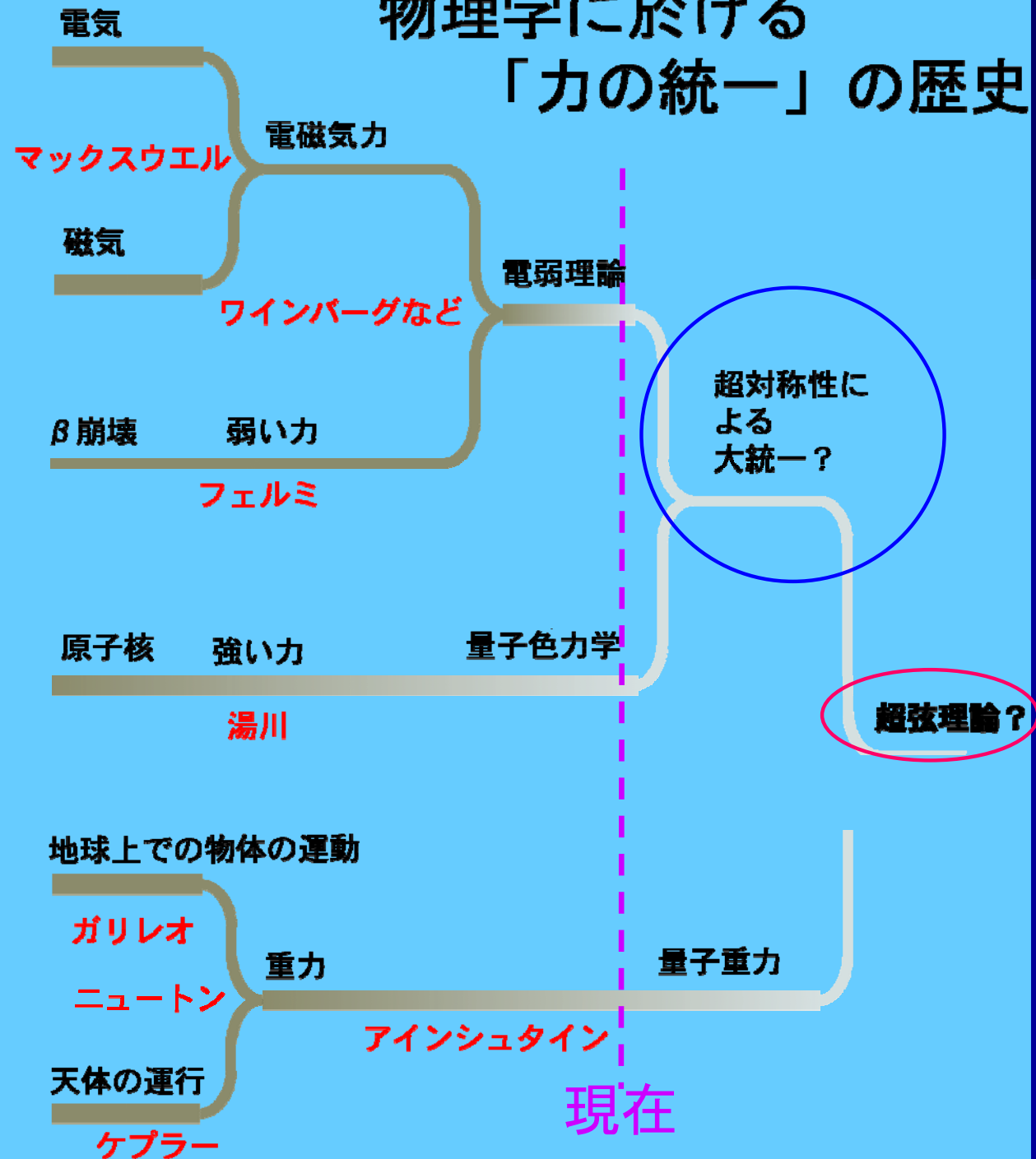
ニュートン1998年7月号

+ ヒッグス粒子 (粒子の質量の生成)

素粒子とそれらに働く力

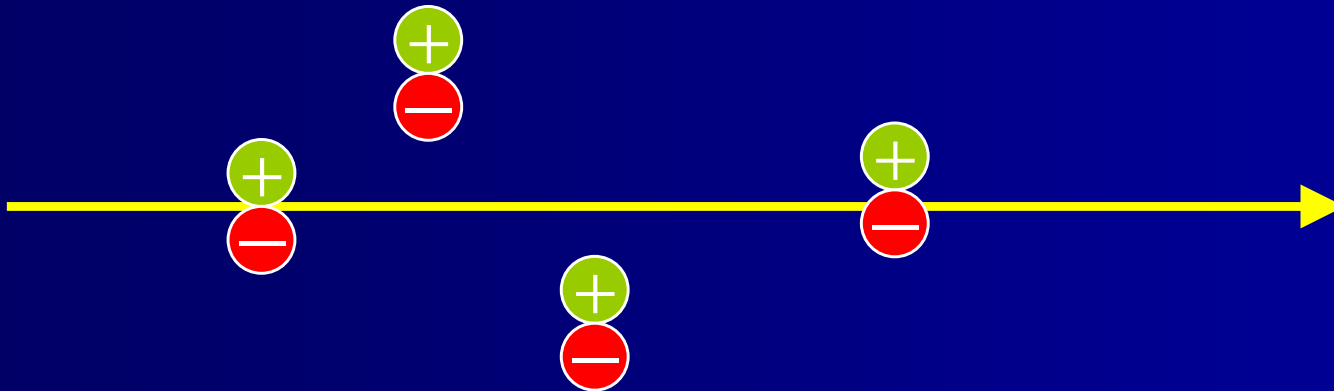
| | 電荷 | 第1世代 | 第2世代 | 第3世代 | |
|------|------|---------|-----------|------------|-----|
| レプトン | 0 | ν_e | ν_μ | ν_τ | 弱い力 |
| | -1 | e | μ | τ | |
| クォーク | 2/3 | u | c | t | 強い力 |
| | -1/3 | d | s | b | |

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)。



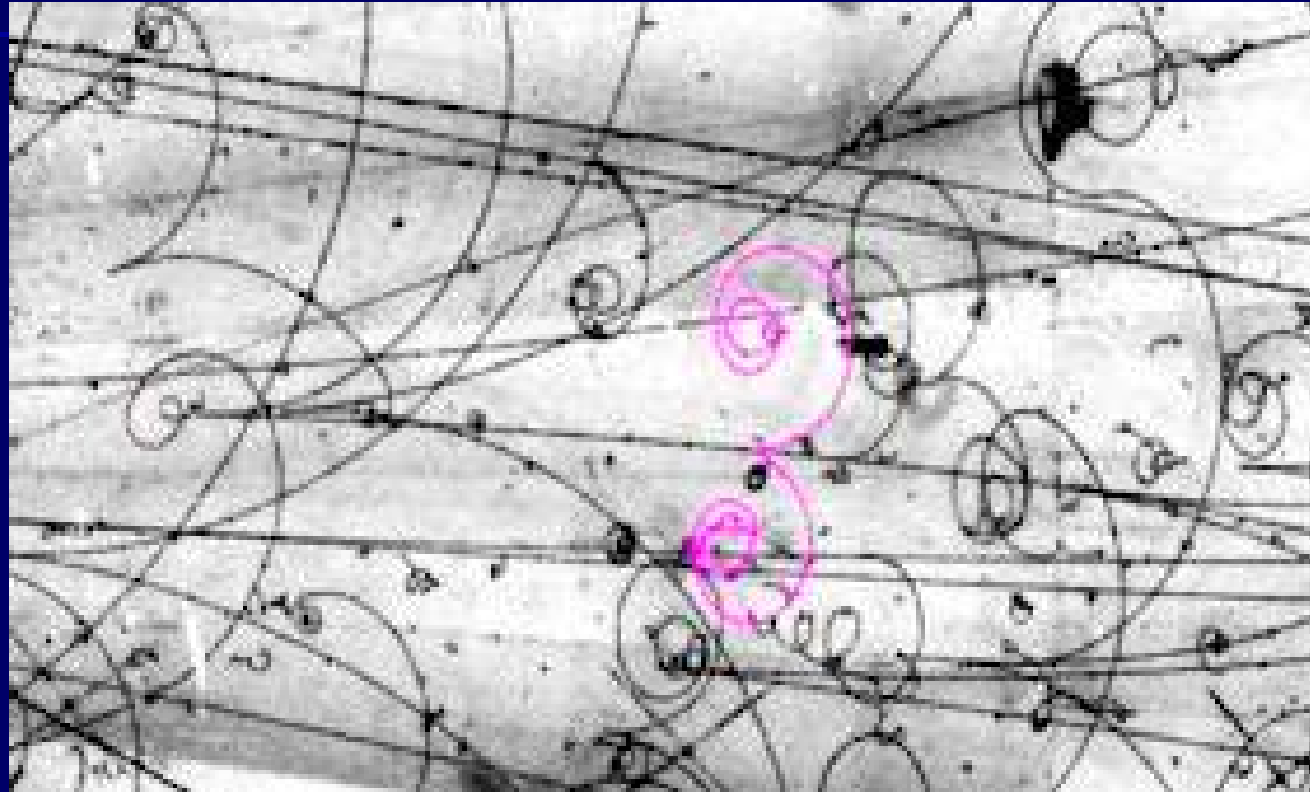
粒子が通過した際に起こること

- 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。

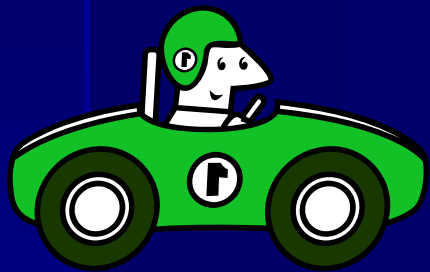
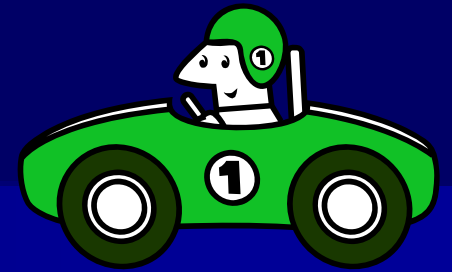
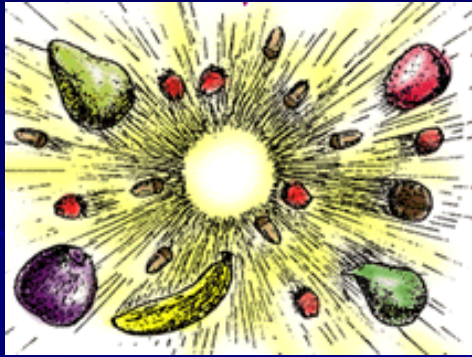
粒子について何が測定できるか？

- 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)。

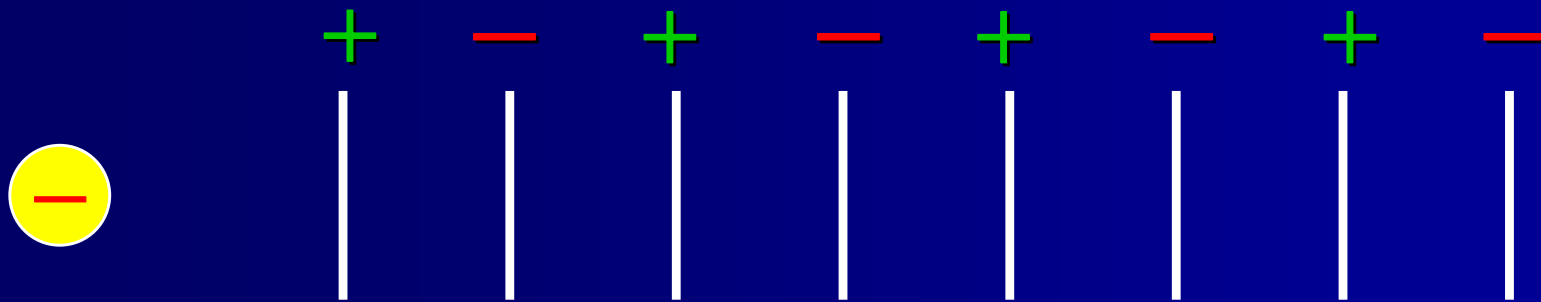


素粒子実験

- 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。



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
- 電子線をコントロール
 - よって磁石をTVに近づけると像が歪む。
- 電子線が蛍光板に当る。
 - 発光(15ページを復習)
 - この光を観測すれば、電子反応を捕らえたことになる。

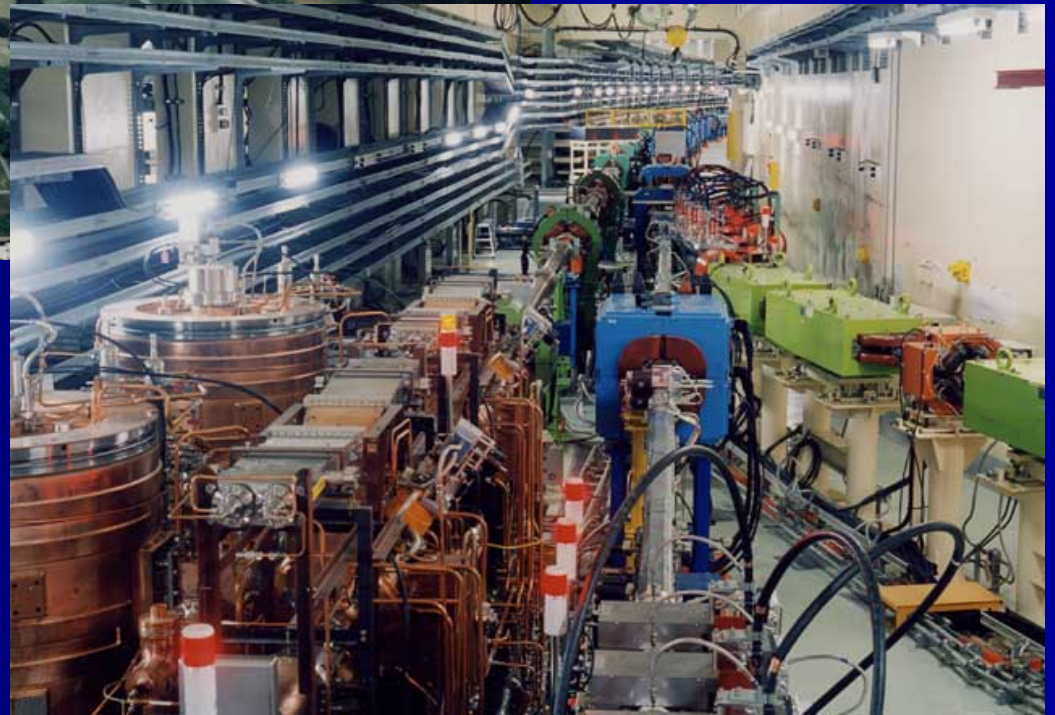
加速器

測定器

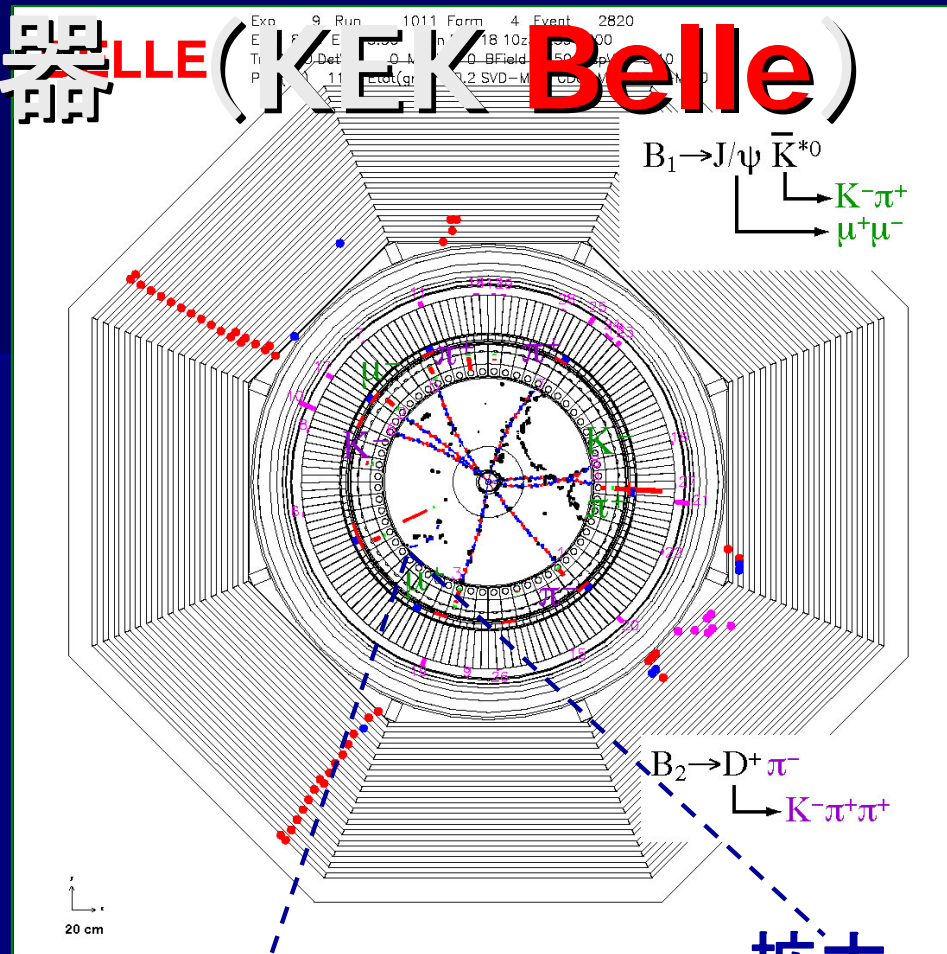
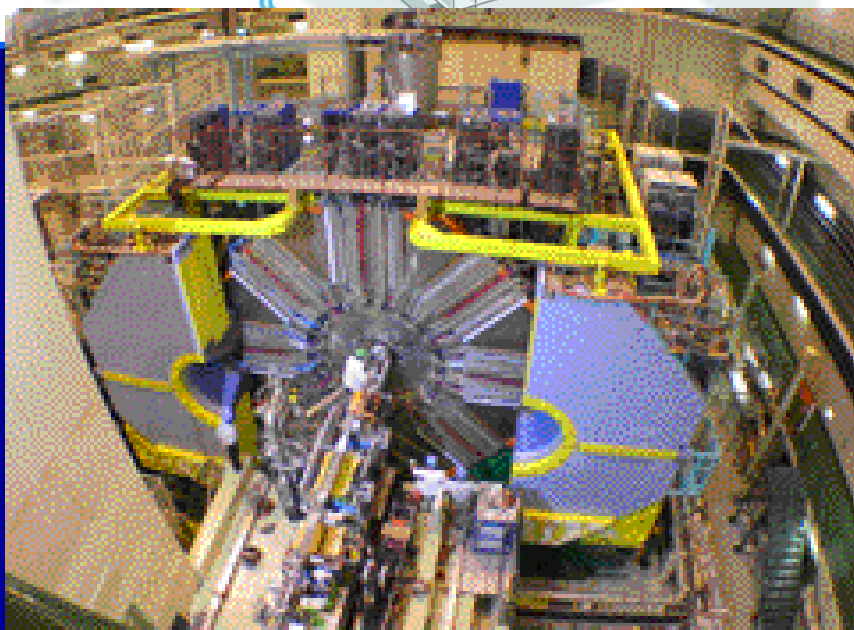
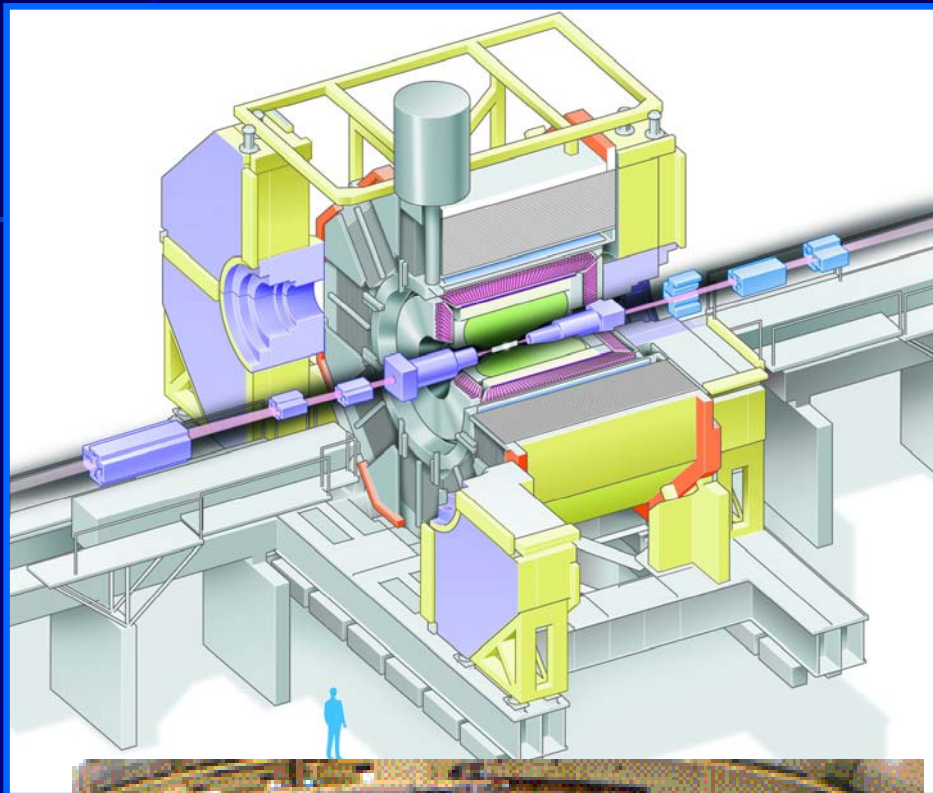
世界最高輝度の加速器： **KEKB** B-Factory (B工場)

粒子反粒子対称性の研究

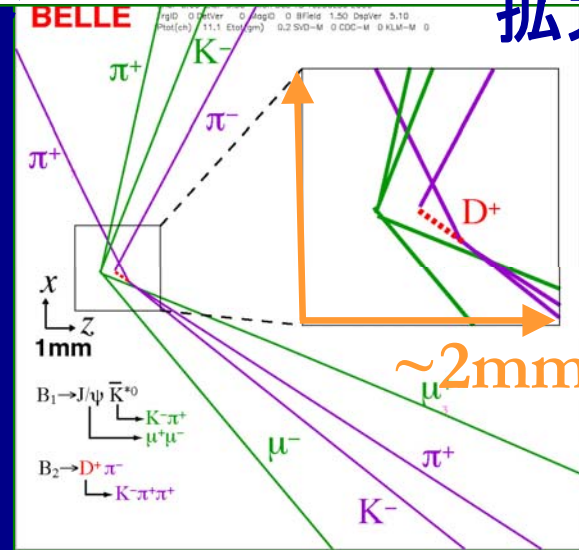
周囲3km



高性能素粒子検出器 BELLE (KEK Belle)



拡大



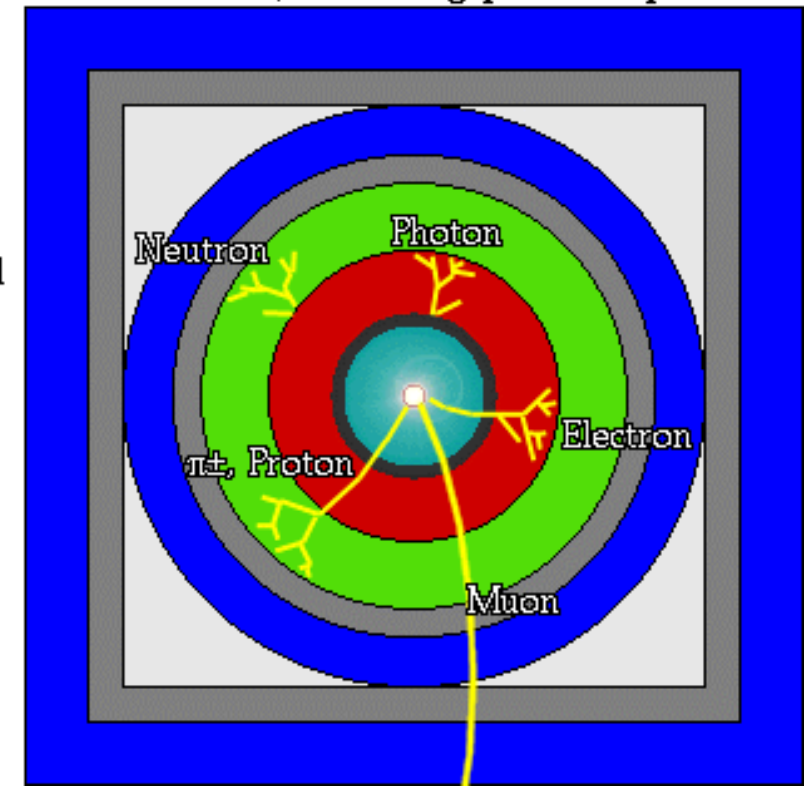
なぜ複雑な粒子測定器が必要なのか？

■ よく観測される粒子

- 電子
- 光(光子)
- 陽子(uud)、 π^+ (ud)中間子、 K^+ (us)中間子
- 中性子(udd)
- μ 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、 π 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 μ 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?)

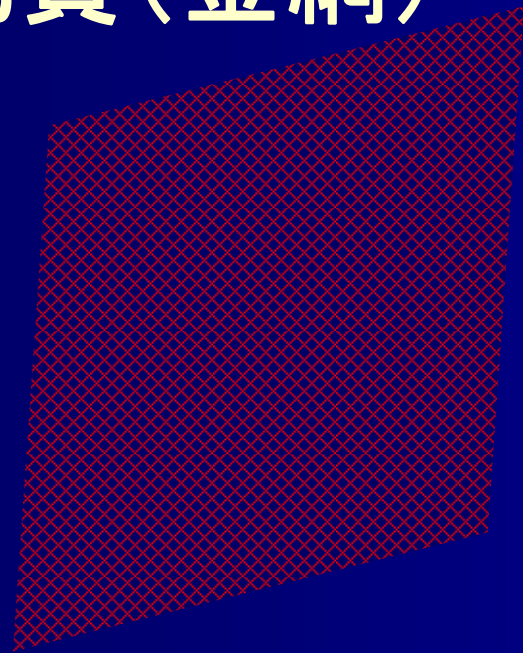
ニュートリノの測定1

- 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)

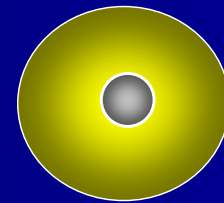
ニュートリノとは？

- 電荷を持たない電子[の仲間]。
- 宇宙にたくさんある(~ 100 個/cm³)。
- 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

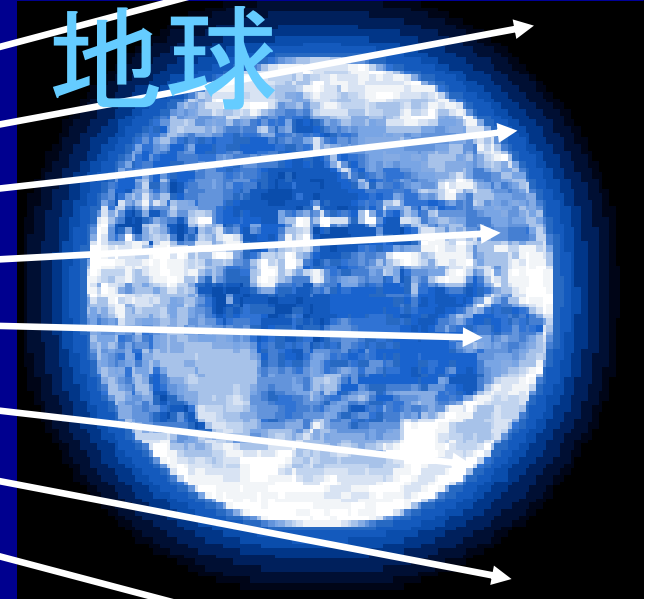
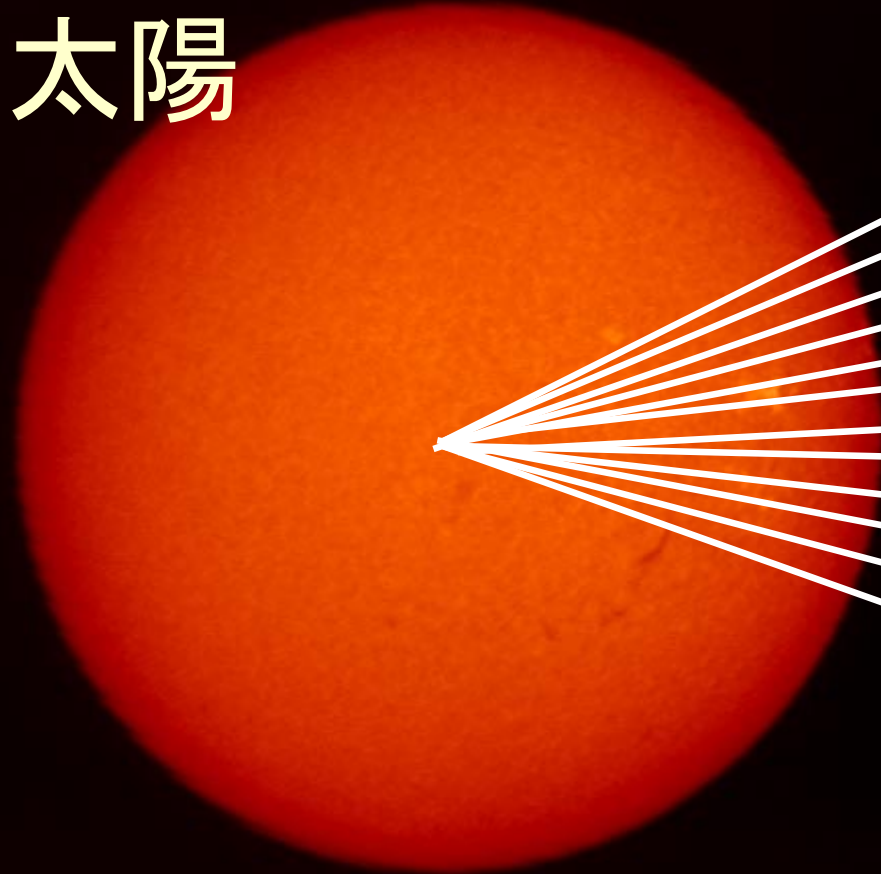
(地球に600億個/cm²秒)

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

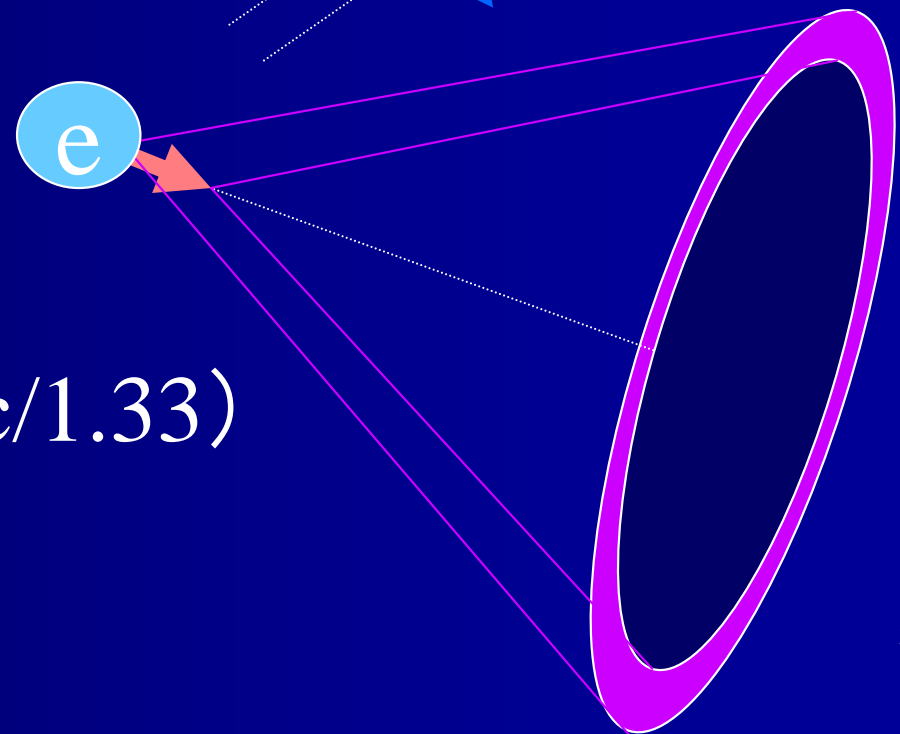
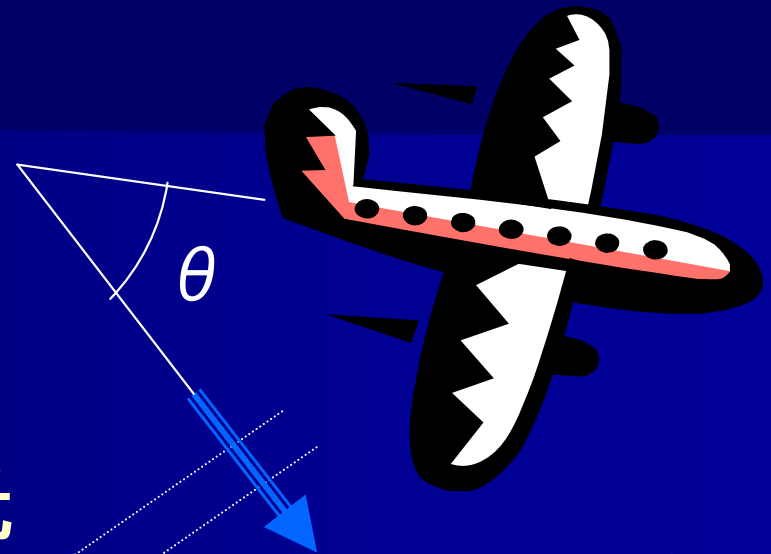


ニュートリノの測定2

- 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

- 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)

- もっとも精密な理論。

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。
- π 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 γ
- ヒッグス粒子(スピン0)

素粒子の種類と特性(発見物語)

- π 中間子
- ミューオン
- Strangeness
 - CPの破れも言うか？
- Charm
 - 11月革命
- Tau
- Bottom
- ニュートリノ(ν_e)
- ニュートリノ(ν_μ)
- ニュートリノ質量
- W、Z