

大強度陽子加速器を用いた実験で 発見された新しいニュートリノ振動

なかだいら たけし
中平 武

高エネルギー加速器研究機構(KEK)
素粒子原子核研究所 / J-PARCセンター

本日の内容

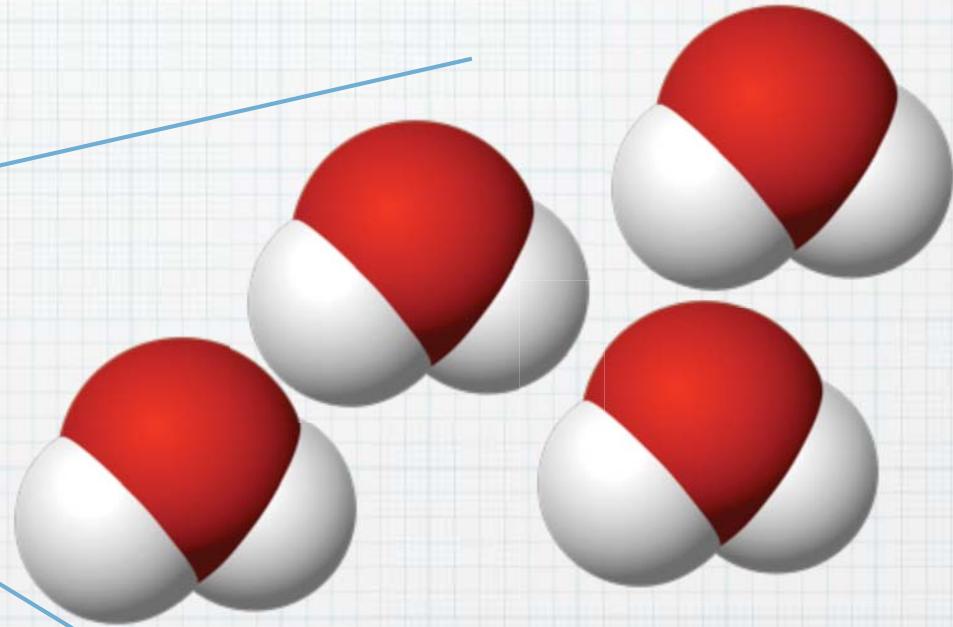
- * 素粒子実験が観ようとする“世界”
 - * どうやって極小の世界に迫るか？
- * ニュートリノ振動とは？
 - * 量子力学の不思議な世界
 - * どうやって実験的に測定するか？
- * 2013年に“発見”された新しいニュートリノ振動とは？
 - * 最新のT2K実験の成果
 - * その意義と今後の展望

素粒子実験が見ようとする世界

- * 素粒子=物質を構成する基本的な要素。実験=これを観る！
- * 何を明らかにしたいのか？
 - * 何種類あるのか？ どうして種類があるのか？
 - * **質量(重さ)は？** なぜ質量があるのか？
 - * どういう力(相互作用)を感じるか？
 - * 電荷、スピン(電氣的、磁氣的な性質)
 - * どのような法則にしたがっているのか？
- * どうやって観るのか？ ... もちろん、肉眼では見えません。
 - * 素粒子が起こす反応によって生じる光や電荷をとらえる装置をつくる！ ... 検出器
 - * 素粒子を取り出し、反応させる装置を作る！ ... 加速器

素粒子実験が観ようとするスケール

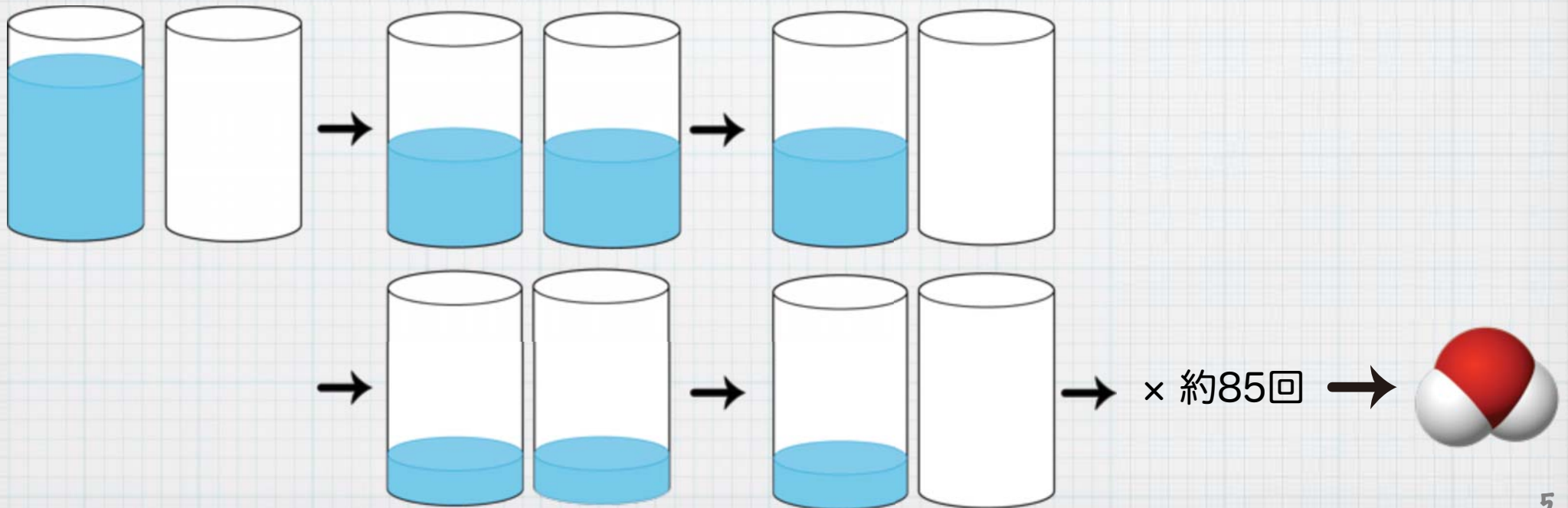
- * まず素粒子より一段大きな階層である原子/分子の世界
- * Q. 500 [ml] のPETボトルの水(H_2O)には、いくつの水分子があるのでしょうか？



- * A. 水分子: 1.7×10^{25} 個
= 17,000,000,000,000,000,000,000,000個

一段大きな階層の原子・分子のスケール

- * 水分子: 1.7×10^{25} 個
- * 全人類(72億人)で等分配しても、一人約2400兆個!
- * つまり、500mlのPETボトルの水を、これだけの数に分けると、1つの分子に分けられる。
- * 2分割を84~85回くりかえすと分子に分割できる。(原理的には)



原子・分子の大きさ

- * 水分子=水素原子2個と酸素原子1個
- * 原子の大きさ： 10^{-10} [m] = 100億分の1 [m]
- * 仮に、原子が米粒くらい(2~3[mm])のサイズなら、人の身長は東京ーオーストラリア間の距離くらいになる。



なぜ、そんな小さなスケールの事がわかるのか？

- * 原子核、素粒子の反応でやりとりされるエネルギーは、原子・分子の反応(化学反応)にくらべて、1反応あたりのエネルギーが何桁も大きい。

- * 化学反応: eVの世界

百万倍、十億倍

エネルギーの高い反応
= 素粒子・原子核の反応

- * 原子核反応, 素粒子反応: MeV, GeV

- * 素粒子が物質を通過するとき、
周りの原子分子をイオン化(電離)させ、
飛跡を残していく。
- * 強磁場中での飛跡から運動量を計算
すると、MeV, GeVといったものがある。
- * 原子核反応から生じる光は、
大量の電子(陽電子)を発生させる。

- * 人工的に原子核・素粒子を取り出すには、
化学反応より格段に大きなエネルギーが必要
- * 素粒子物理は、高エネルギー物理学ともよばれる。



素粒子の世界

- * 日常感覚とは多少違う見方が必要
- * 微小な世界 → 量子力学
- * 高エネルギー → 相対性理論 & 4つの相互作用
- * 登場人物 = これまでに見つかっている素粒子

クォーク		レプトン		ゲージボゾン
u (アップ)	d (ダウン)	e (電子)	ν_e (電子ニュートリノ)	γ (光子)
c (チャーム)	s (ストレンジ)	μ (ミュー)	ν_μ (ミューニュートリノ)	W^\pm, Z (弱い相互作用)
t (トップ)	b (ボトム)	τ (タウ)	ν_τ (タウニュートリノ)	g : グルーオン (強い相互作用)

反粒子: 電荷, 左右が逆のもう1セット

陽電子(e^+)、反電子ニュートリノ ($\bar{\nu}_e$) など

よく用いる単位

- * 素粒子の世界で、kg, J, Wという単位でやっているとうちがあかない。
- * エネルギーの単位: eV (電子ボルト)
 - * eV ... 電子1つを1ボルトの電圧で加速したときの運動エネルギー
 - * Kilo (千) と組み合わせた keV(ケブ)
 - * Mega (百万)と組み合わせた MeV(メブ)
 - * Giga(十億)と組み合わせた GeV(ジェブ)
- * 質量の単位: eV/c^2 , keV/c^2 , MeV/c^2 , GeV/c^2
 - * 電子の質量が、 $0.5 [MeV/c^2]$ です。
 - * 陽子や中性子の質量が 約 $1 [GeV/c^2]$ です。
- * ニュートリノの質量は? 本講義のメインテーマ

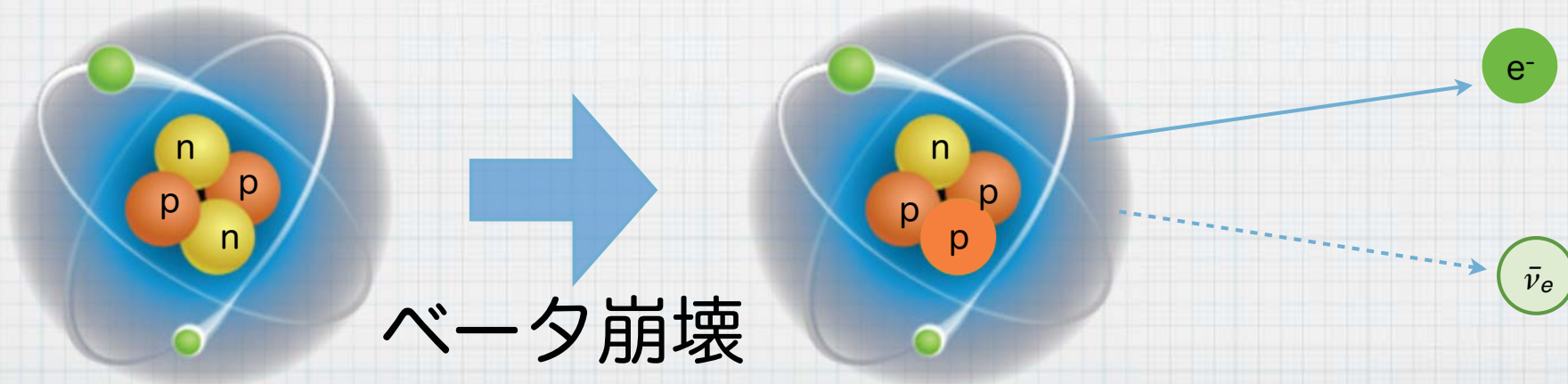
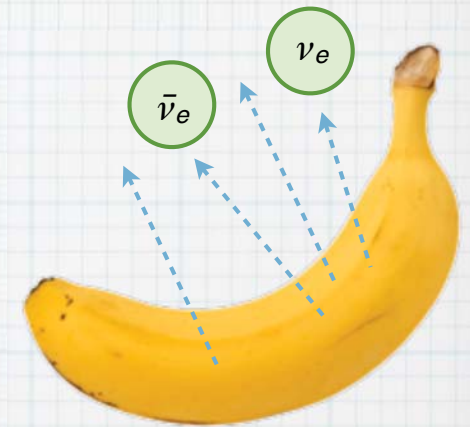
相対論では、
 $E=mc^2$

ニュートリノを観るには？

- * そろそろ、本題に...
- * どうやったら、ニュートリノをとらえることができるのでしょうか？
- * ニュートリノが起こす反応とは？

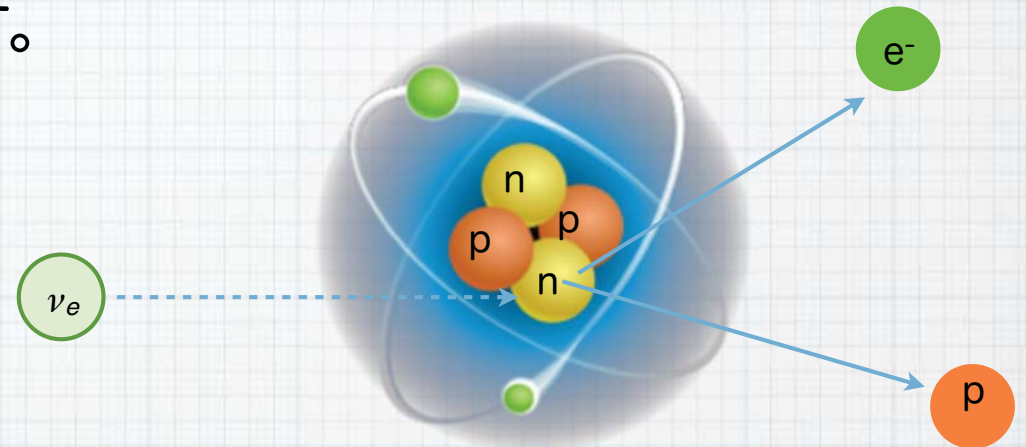
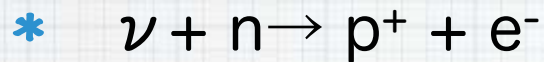
ニュートリノは弱い相互作用で生まれる

- * ニュートリノは電荷がないので、電磁相互作用はしない
- * ニュートリノは、原子核の β 崩壊から生じる
： β 崩壊の原因となる力＝”弱い相互作用”
- * 例：カリウムの同位体 ^{40}K (天然存在比0.0117 %)
 - * $^{40}\text{K} \rightarrow ^{40}\text{Ca} + e^- + \bar{\nu}_e$: 反ニュートリノが生成
 - * $^{40}\text{K} + e^- \rightarrow ^{40}\text{Ar} + \nu_e$: ニュートリノも生成
 - * カリウムを含むもの（たとえばバナナ）はニュートリノ源
 - * 一本あたり、毎秒15個の(反)ニュートリノが発生



ニュートリノ自身も弱い相互作用をひきおこす

- * 太陽での反応、宇宙線が作り出すニュートリノが、物質中の原子核と、弱い相互作用で反応を起こす。



- * β 崩壊 $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}$ の逆反応

ニュートリノの検出器のコンセプト (例)

- * 始めの状態: 電氣的に中性: 観測が難しい。
- * 実際に観ることのできる現象
- * 外からはなにも荷電粒子が飛んできていないのに、突然ある一点から、高いエネルギーの電子と陽子が飛び出してくる

外から何も飛来していないのに一点から粒子が発生する飛跡を捉える。



粒子の飛跡検出器

外から飛来する粒子を検出する検出器

どれくらいの頻度で、ニュートリノは反応するか？

- * 反応断面積: 単位時間・単位面積あたりの反応の起きやすさを、“的の大きさ”で示す。

- * 反応数 = “的の大きさ” × (的の数) × (矢の数)

- * 1 [GeV]のエネルギーのニュートリノから見た反応相手としての核子の大きさ = 反応断面積 : 約 1×10^{-38} [cm²]

- * [Q] 25mプールをエネルギーが1GeVのニュートリノが通過するとき反応を起こす確率は？

- * [A] だいたい 10^{-11} ... 一千億分の1

- * 「ジャンボ宝くじを2枚だけ買って1等と2等の両方があたる」くらいの確率

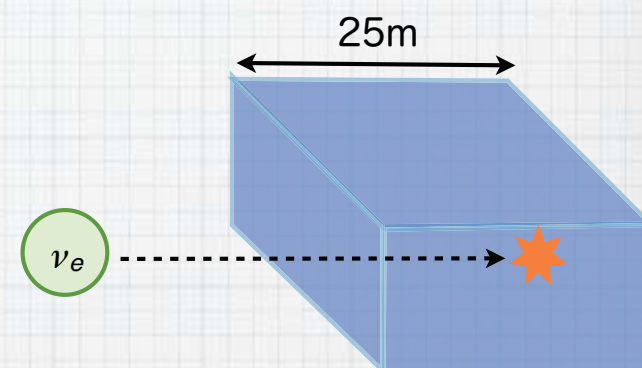
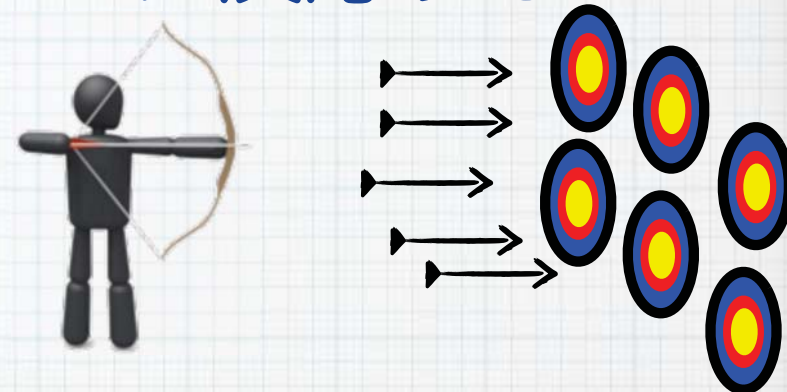
- * ニュートリノ反応を観て実験を行なうためには、

 - 「たくさんの矢(ニュートリノ)を用意する」

 - 「たくさんの的(測定器の大きさ/重要)を用意する」

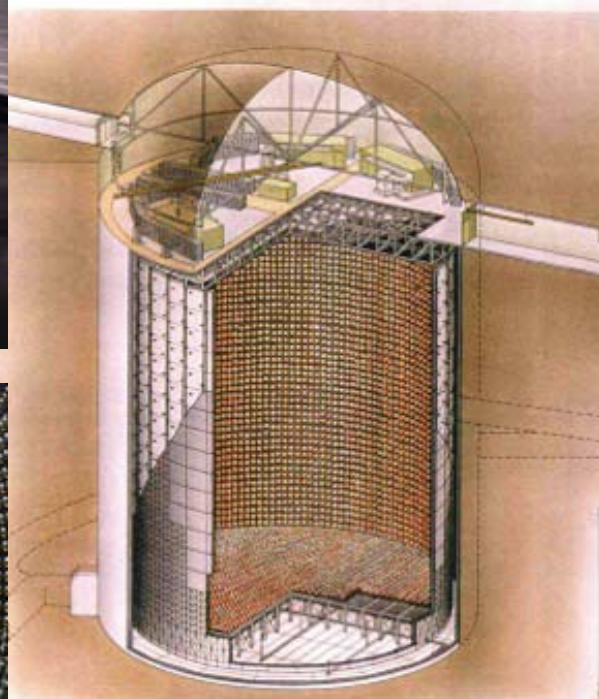
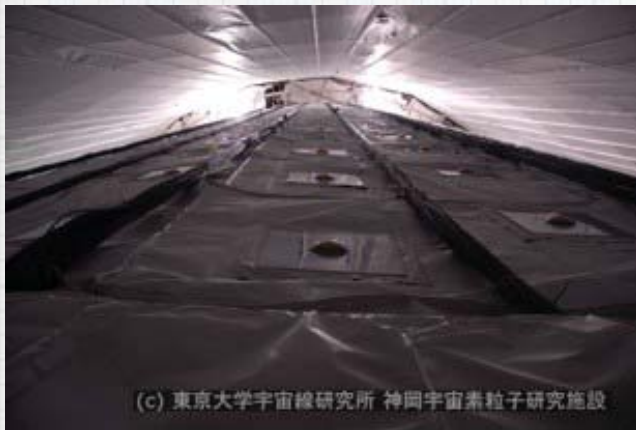
この2点が本質的に重要。

- * 上のジャンボ宝くじを例にかんしては.....、ノーコメントです。

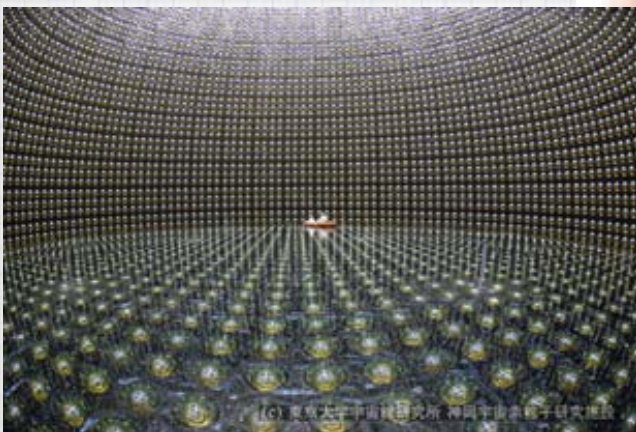
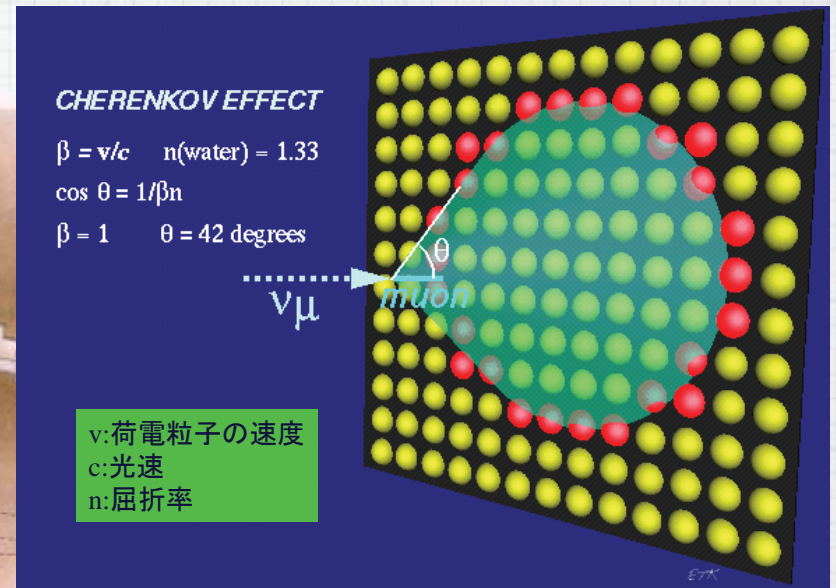


的をたくさん用意する：巨大な測定器

- * 巨大水チェレンコフ検出器：スーパーカミオカンデ
- * 5万トンの超純水で起こる反応を、約1万1千本の20インチ光電子増倍管(PMT)で捉える。
- * 約1900本の8インチPMTで、外来粒子の飛来を検出。
- * ニュートリノ反応で出てくる荷電粒子が出すチェレンコフ光を検出することができる。



ERKAMIOKANDE INSTITUTE FOR COSMIC RAY RESEARCH UNIVERSITY OF TOKYO



ニュートリノは三種類ある

- * ニュートリノが起こす弱い相互作用には3種類ある。

- * 陽子と電子が発生する。

- * 電子の質量: $0.51 \text{ [MeV/c}^2\text{]}$

- * 陽子とミュー粒子が発生する。

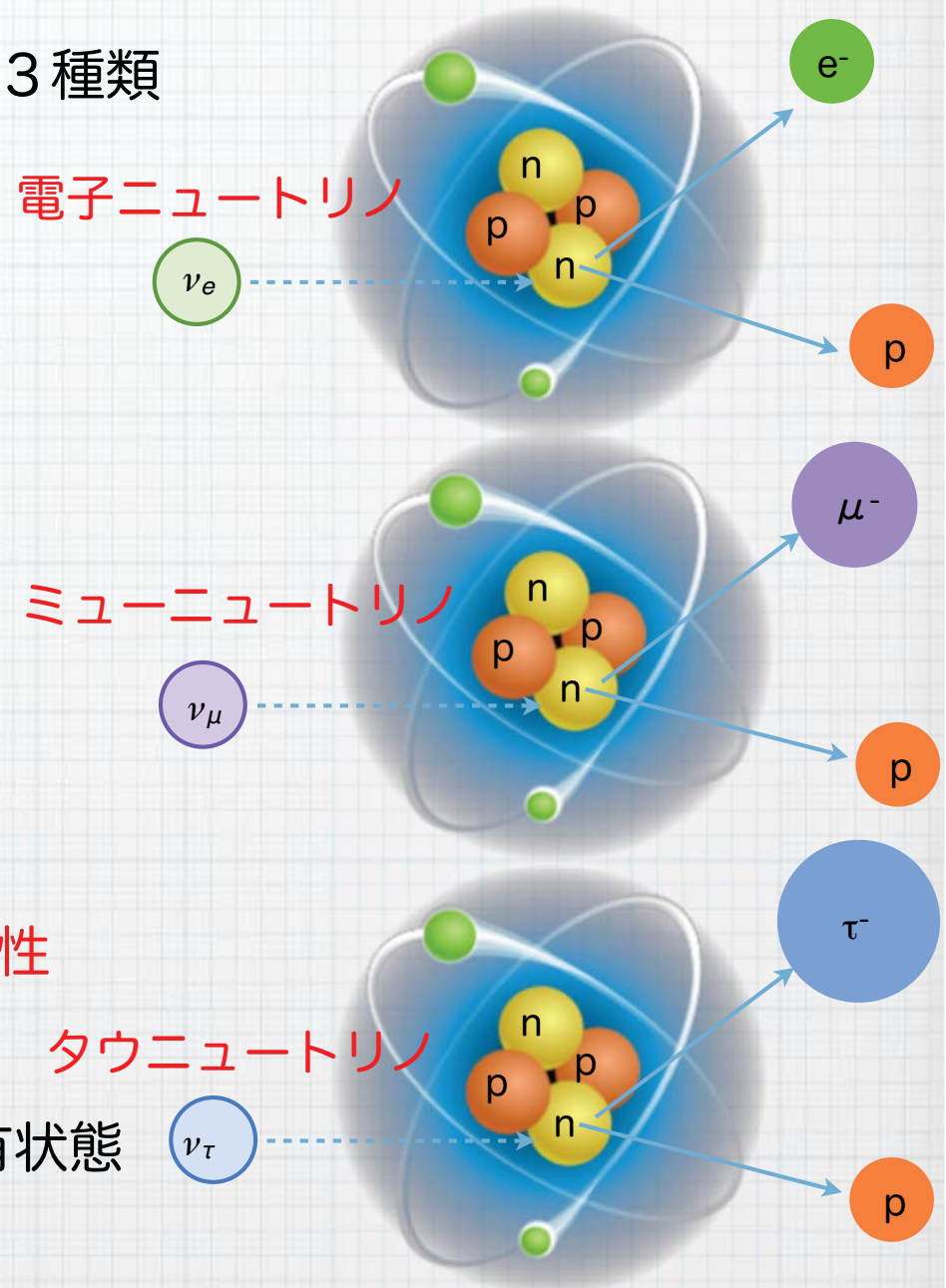
- * ミュー粒子の質量: $106 \text{ [MeV/c}^2\text{]}$ ミューニュートリノ

- * 陽子とタウ粒子が発生する。

- * タウ粒子の質量: $1776 \text{ [MeV/c}^2\text{]}$

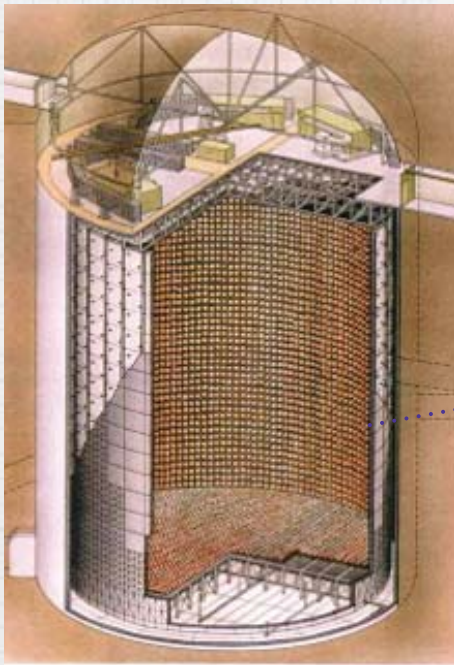
- * ニュートリノには、弱い相互作用の反応性で分類できる3種類が存在する。

- * 量子力学的には、「フレーバーの固有状態が3つある」という言い方をする。

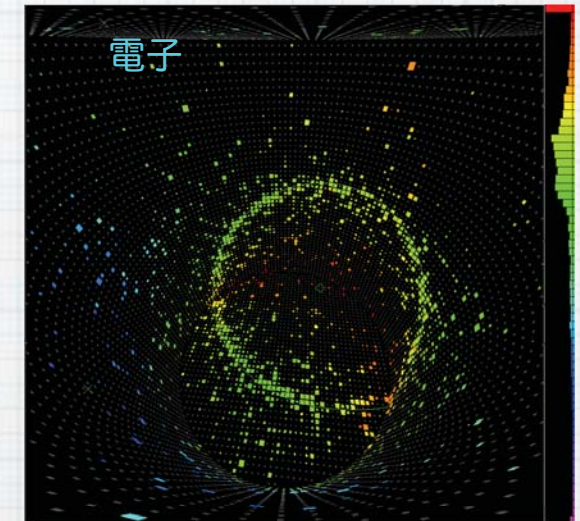
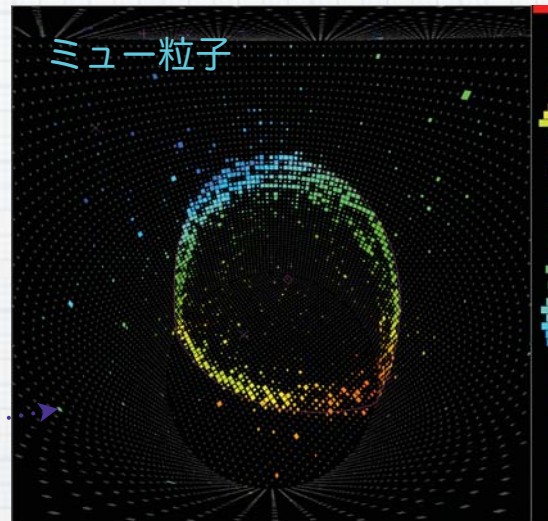


ニュートリノの種類の見分け方

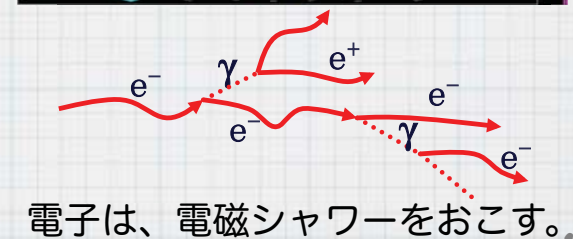
- * スーパーカミオカンデ検出器は、電子とミュー粒子を見分けられるので、電子ニュートリノとミューニュートリノを見分けることが可能。
- * 電子：“ぼやけた”リング
- * ミュー粒子：“くっきりとした”リング
- * タウ粒子を見つける事は難しいですが、1.8[GeV]以下のエネルギーのタウニュートリノは、エネルギーが足りないためにタウ粒子を生成させる反応がそもそも起こり得ません。



それぞれのPMTで
捉えた光の強さを
カラーで表現



ミュー粒子は、電磁シャワーをおこさない。
→ 一定方向にチェレンコフ光が出る。



ニュートリノの質量は何種類？

- * 反応性による分類では、ニュートリノは三種類ですが、全部同じ質量でしょうか？
- * なるべく広い可能性を考えてみる、という観点に立つと質量も3種類あってよい。

- * ν_{m1} : 質量の値が m_1 [eV] であるニュートリノ

- * ν_{m2} : 質量の値が m_2 [eV] であるニュートリノ

- * ν_{m3} : 質量の値が m_3 [eV] であるニュートリノ

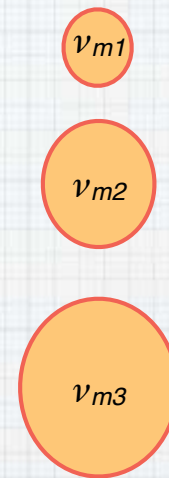
- * 量子力学的には、
「質量固有状態が3つある」ともいいます。

- * もし、「ニュートリノには質量がない！」という場合は、
この表現では、「 $m_1=0, m_2=0, m_3=0$ 」

- * どうすれば、質量の違いを区別できるでしょうか？

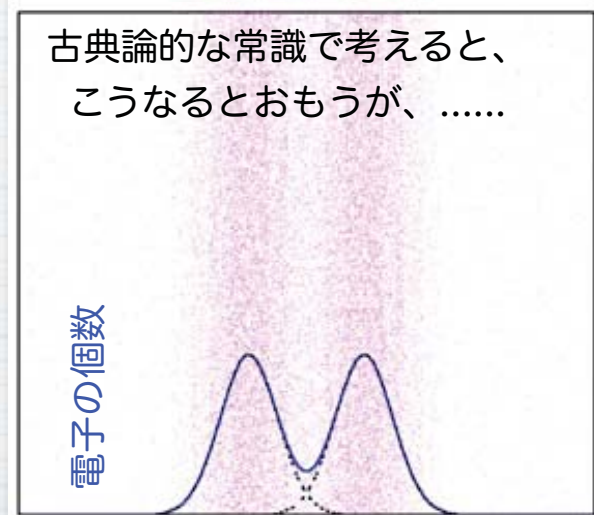
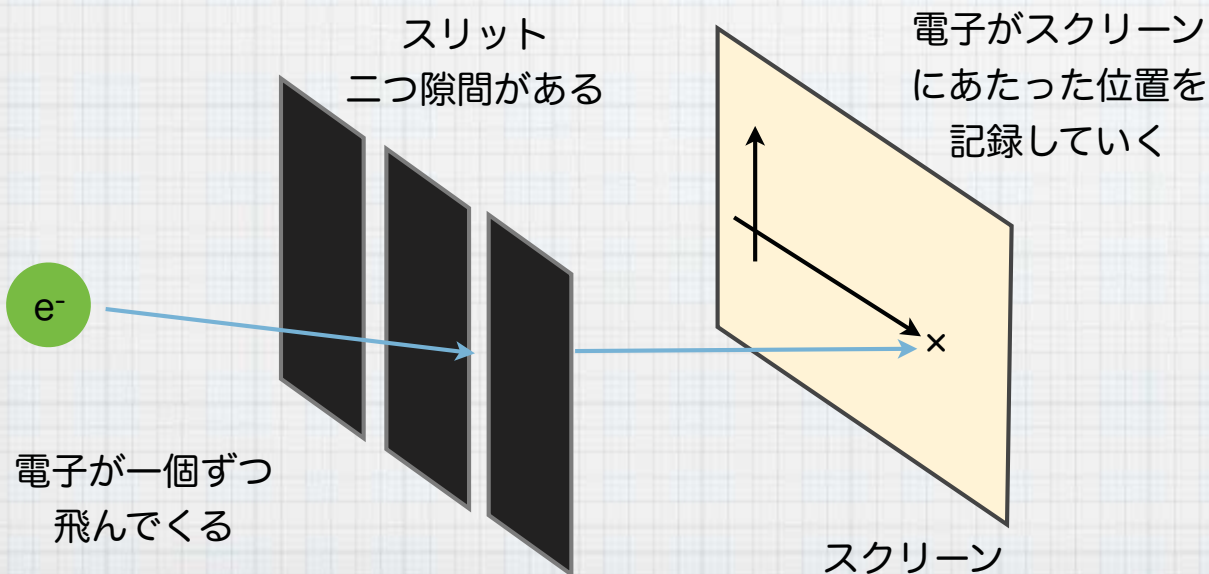
- * 質量の違いが現れる現象：物体の運動

- * 同じエネルギー(運動量)でも、質量によって運動量(速度)が異なる。



ニュートリノ振動とは？

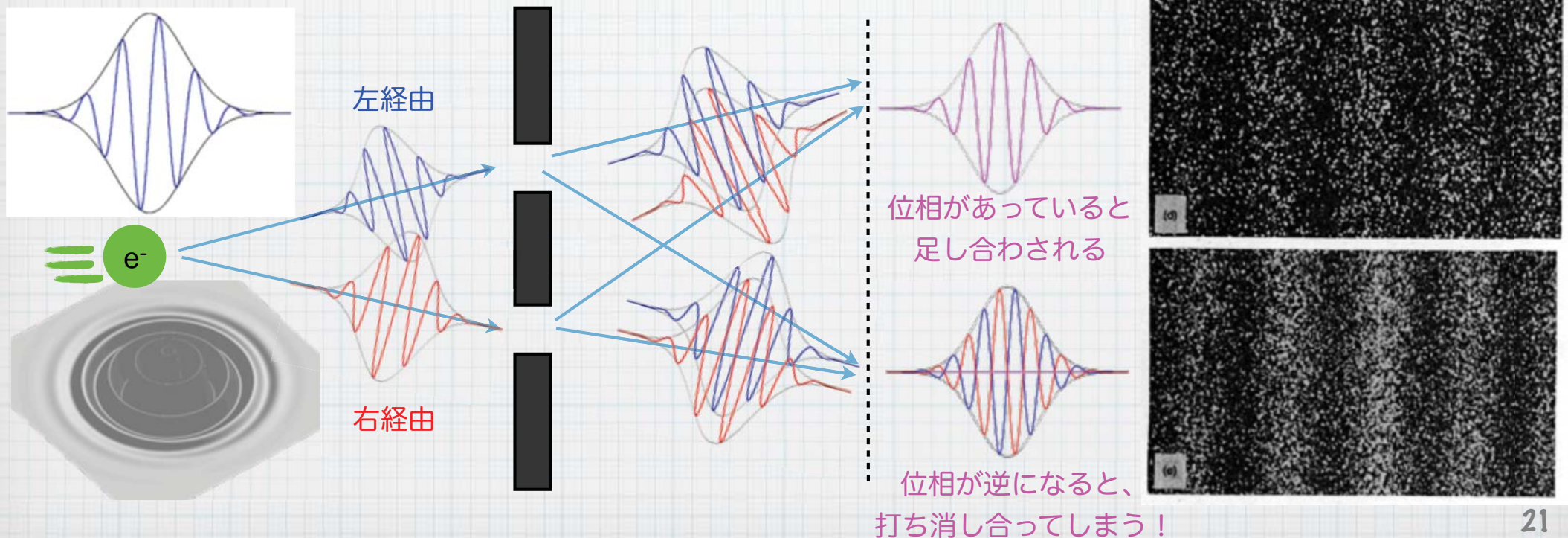
- * ニュートリノ振動は量子力学的な効果でおきる。
- * 量子力学とは？：有名かつ象徴的な例 = 二重スリットを通過する電子
 - * 左から電子が、**一個ずつ**飛んでくる。[始状態]
 - * 真ん中に、2点穴があいたスリットがあり、どちらかを通る。[中間状態]
 - * スリットを通り抜けた電子は、右側のスクリーンにあたる。[終状態]
- * 電子はスクリーンのどこに多くあたるか？どのような分布になるか？



量子力学の不思議な世界

- * 実際に実験すると、スクリーンでの電子の位置分布は縞状になる。
- * 波が伝搬するときに“干渉”をおこすのと同じ分布。
- * まるで、一つの電子が波としての性質も持って伝搬しているようだ。
- * 2つの異なる中間状態がある場合には、二通りの可能性が“干渉”をおこす。
- * “波”の位相が互いに逆になると、打ち消し合ってしまう！

A.Tonomura, et.al, Am. J. Phys. 57, 117, (1989)



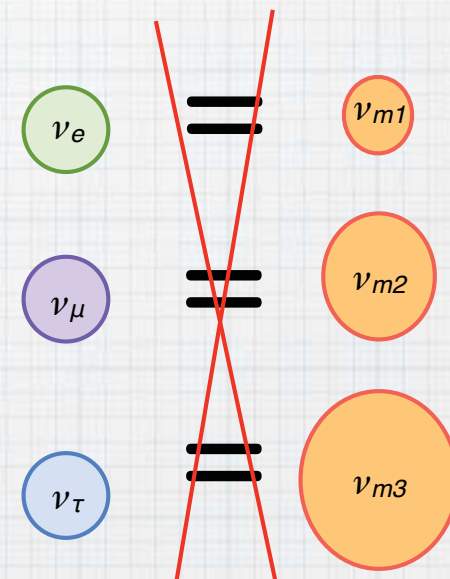
量子力学の不思議な点、その2

- * 弱い相互作用で分類したニュートリノの三種類
- * 質量での分類したニュートリノの三種類
- * これらが一対一の対応関係であるとは限らない。
- * つまり、

* 電子ニュートリノの質量は、 m_1

* ミューニュートリノの質量は、 m_2

* タウニュートリノの質量は、 m_3



というようにきめることができるとはかぎらない。

量子力学の不思議な性質、その2

* 電子ニュートリノの質量、

* あるときには、 m_1

* あるときには、 m_2

* あるときには、 m_3

* 電子ニュートリノは、質量として
3つの可能性をもっています。

* 量子力学的には、「3つの質量固有状態の重ね合わせ」と言います。

* ミューニュートリノ、タウニュートリノも同様。

* 逆に、質量が m_1 のニュートリノがあったとする。このニュートリノを観測すると、

* あるときには電子ニュートリノ

* あるときにはミューニュートリノ

* あるときにはタウニュートリノ

* 質量が m_2 のニュートリノ、質量が m_3 のニュートリノも同様。

$$\begin{aligned} \nu_e &= \nu_{m1} + \nu_{m2} + \nu_{m3} \\ \nu_\mu &= \nu_{m1} + \nu_{m2} + \nu_{m3} \\ \nu_\tau &= \nu_{m1} + \nu_{m2} + \nu_{m3} \end{aligned}$$

それぞれの成分によって、ある割合がかかった足し算

$$\nu_{m1} = \nu_e + \nu_\mu + \nu_\tau$$

それぞれの成分によって、ある割合がかかった足し算

ニュートリノで見える量子力学の世界

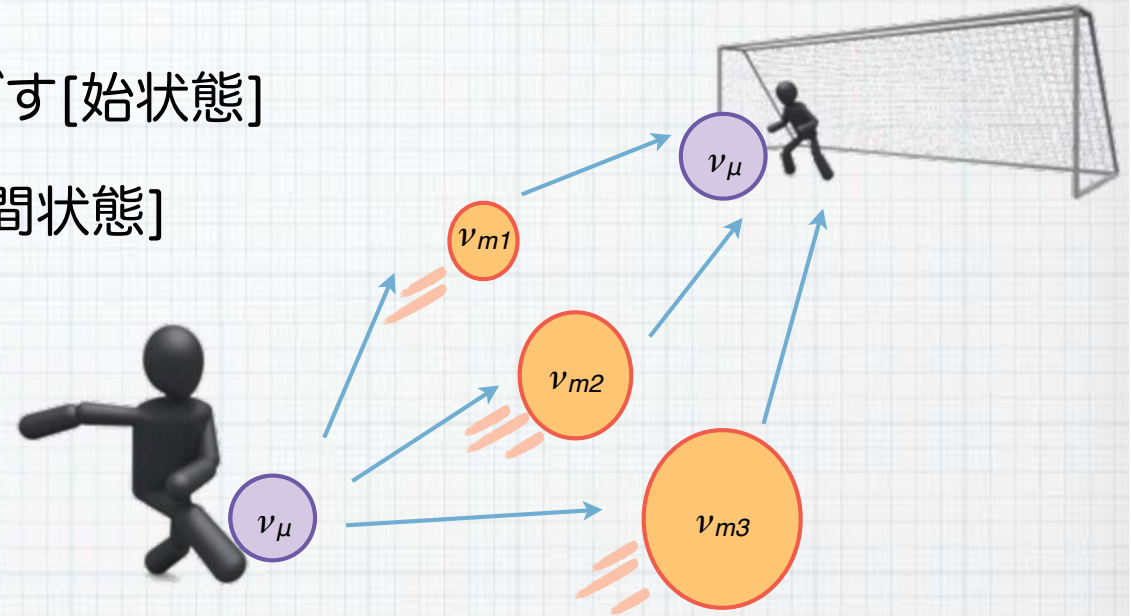
- * ミューニュートリノを作って飛ばす[始状態]

- * ある程度の距離を飛行させる[中間状態]

- * m_1 の質量で飛んでいる。

- * m_2 の質量で飛んでいる。

- * m_3 の質量で飛んでいる。



- * ミューニュートリノを観測する。[終状態]

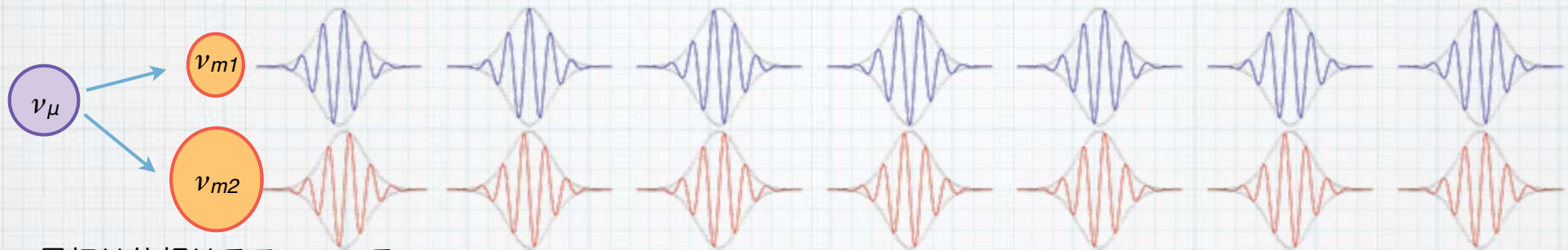
- * 「 $m_1=m_2=m_3$ の場合」をのぞき、2つ以上の異なる中間状態がある。

- * 二重スリットを通過する電子の実験でおきたような、“干渉”がおきる可能性がある。

- * あるエネルギーのミューニュートリノは観測され、別のあるエネルギーのミューニュートリノはぜんぜん観測されなくなる。

= “ニュートリノ振動”

ニュートリノ振動=ニュートリノ観測数の振動

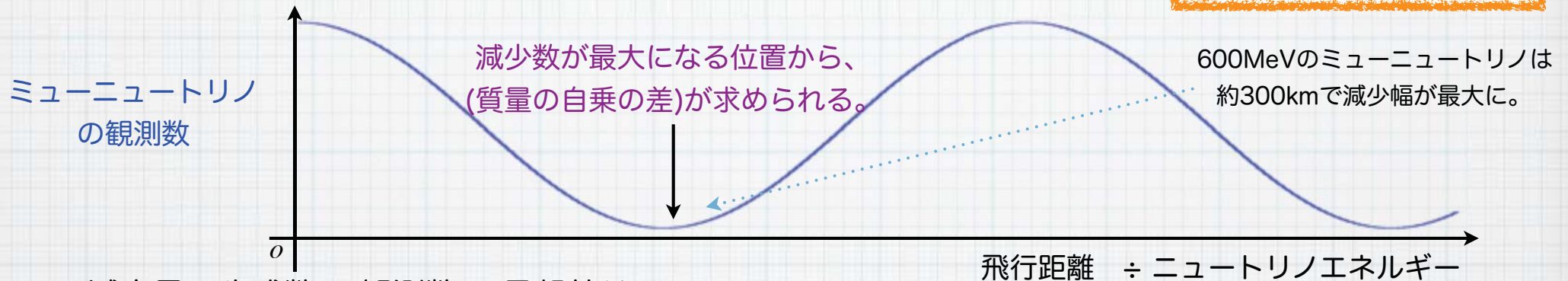


最初は位相はそろっている。
波長に差があり、徐々にずれていく

打ち消し合う

再び観測され
るようになる

2つの波の”うねり”に相当



* 減少量=(生成数 - 観測数)の予想値は、

$\sin^2(1.27 \times \text{質量の二乗の差}[\text{eV}^2] \times \text{飛行距離} [\text{km}] \div \text{エネルギー} [\text{GeV}])$ に比例

* ニュートリノの観測数は、

質量の自乗の差: $\Delta m^2_{12} = m_1^2 - m_2^2$ や $\Delta m^2_{23} = m_2^2 - m_3^2$ など。

* ある一定のエネルギーのニュートリノに着目 → 飛行距離にしたがって周期的に変化

* 一定の距離の場所で観測 → ニュートリノのエネルギーに従って周期的に変化。

* 距離を決めてエネルギー毎の観測数を測定すると、質量の二乗の差が求められる。

* 質量に差がない場合には起こらない! → ニュートリノ振動があれば、質量に差がある!

ここまでのまとめ

- * ニュートリノは、
 - * 反応性から、電子ニュートリノ、ミューニュートリノ、タウニュートリノの三種類
 - * この反応性の違いの事を、おしゃれに”フレーバー”と呼ぶ場合もある。
 - * 質量で分類した場合には、3種類あってもよい。
 - * 質量の違いは、ニュートリノのエネルギーと運動量の関係の違いに現れる。
- * 量子力学の不思議な性質
 - * ニュートリノのフレーバーでの分類と、質量での分類は、同一ではない。
(状態の重ね合わせ)
 - * ”粒子一波の二重性”があり、異なる中間状態があるような過程では、”干渉”がおきる。
 - * ニュートリノを発生させてある程度の距離を離れて観測する場合を考える。
質量が全て同一ではない場合、異なる中間状態を経て観測することになる。
あるエネルギーのニュートリノは観測されなくなるニュートリノ振動がおきる。
- * もしニュートリノ振動があったとすると、ニュートリノは異なる質量をもつ事が実証される。
すると、すくなくとも一種類のニュートリノはゼロではない！
ニュートリノ振動の観測は、ニュートリノが質量をもつことの実験的な証明となる。

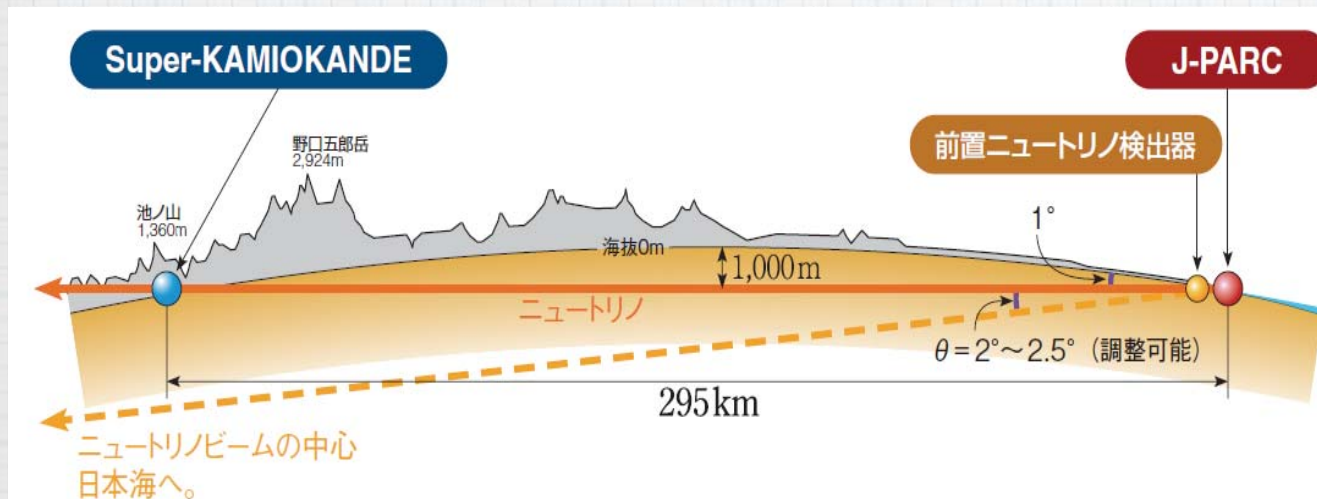
ニュートリノ振動を実験的に確かめるには？

- * 発生するニュートリノの量が分っているニュートリノ源が大量に必要。
- * 太陽ニュートリノ ... 電子ニュートリノ
- * 原子炉ニュートリノ ... 反電子ニュートリノ
- * 大気ニュートリノ(宇宙線起源) ... ミューニュートリノと電子ニュートリノの混合
→ 1998年に、大気ニュートリノでニュートリノ振動が発見される。
- * 加速器ニュートリノ ... 今日のテーマ
 - * ほぼ100%ミューニュートリノ
もしくは
ほぼ100% 反ミューニュートリノ

→ ニュートリノと反ニュートリノの両方の性質が調べられる。
 - * 実験者が、ニュートリノのエネルギーを自由に選べる！
→ より精度よいニュートリノ振動の測定が期待できる。
 - * ただし、いかにニュートリノをたくさん生成できるか、が実験の正否を決める

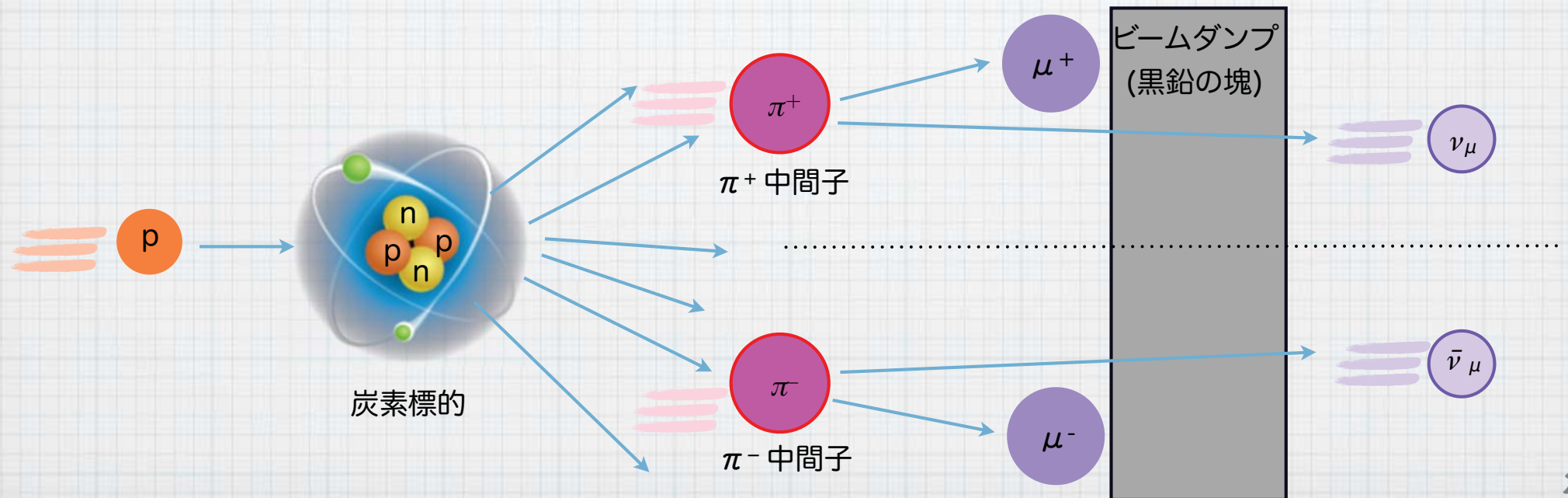
加速器をつかったニュートリノ振動実験: T2K

- * 国際共同実験 T2K: 茨城県東海村 To 岐阜県飛騨市神岡町
- * 11カ国の59の研究機関から約500人の研究者が参加。
- * 大強度陽子加速器施設: J-PARC で、ニュートリノビームを作る
- * 300km先のスーパーカミオカンデで捉える。
- * 送ったニュートリノの数から期待される反応数と、実際の観測数を比較
その差から、約300km飛行した間のニュートリノ振動の大きさを実測する。
- * 300kmの岩盤を通る間に、 $\sim 1\text{GeV}$ のニュートリノが反応を起こす確率: $\text{約}3 \times 10^{-7}$
- * ジャンボ宝くじを3枚だけ買って、どれか1枚が1等が当たる確率



加速器でニュートリノを作る！

- * 高エネルギーの陽子ビームを黒鉛(炭素)にあてる。
- * たくさんの π 中間子が発生する。これを集める。
- * π 中間子(寿命 2.6×10^{-8} [s])は、崩壊してミュー粒子とミューニュートリノになる。
- * ミュー粒子はビームダンプでとまり、ニュートリノだけがすり抜けていく。
- * 正電荷の π 中間子を集めると、ニュートリノビーム
- * 負電荷の π 中間子を集めると、反ニュートリノビーム
- * 加速器ニュートリノは、生成するニュートリノのエネルギーを設定できる！



J-PARC 加速器／ニュートリノ実験施設



リニアック
長さ300m
181MeV

RCS
周長300m
3GeV



MR 周長1600m 30GeV



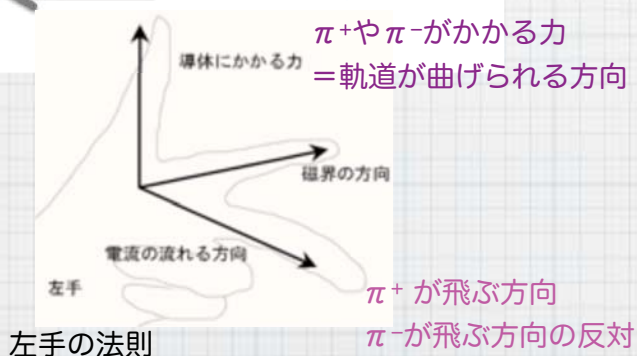
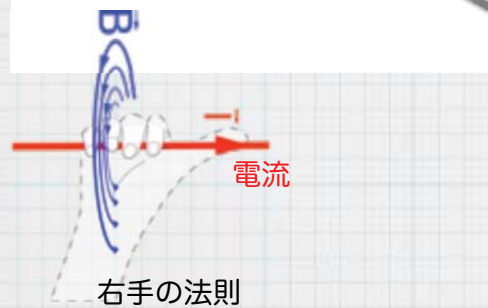
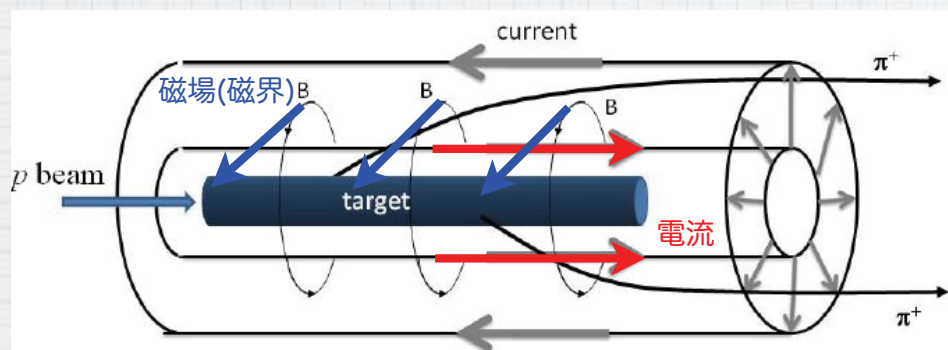
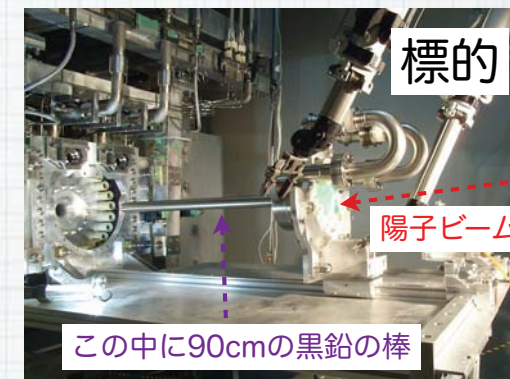
ニュートリノビームライン
30GeV 早い取り出し



- * 約2.5秒ごとに、 1.2×10^{14} 個(設計値 3×10^{14} 個)個の陽子を加速器から取り出す。
- * 加速器(MR)では、陽子ビームは8つの塊(バンチ)の時間構造をもつ。
- * 電磁石で陽子ビームをほぼ神岡方向に向けた後、黒鉛の標的にあてる。

ニュートリノ生成機器： π 中間子の生成と収束

- * 標的：ひたすら陽子ビームの照射に耐える
- * 三台の電磁ホーン：磁場で荷電パイ中間子を収束する。
- * 原理は有名な法則に従っています。
 - * アンペールの右手の法則(右ネジの法則)：電流を流すと、周りに磁場(磁界)が発生する。
 - * フレミングの左手の法則：荷電パイ中間子の流れ(=電流)は磁場(磁界)から力を受け、曲がる。
- * **32万アンペア**という大電流で最大2.4Tの磁場を発生させる(数百分の1秒の間ですが....)



ニュートリノビームの生成と生成数の計測

- * 崩壊領域: 約110m: パイ中間子が飛びながらニュートリノを生成
- * ビームダンプ(ハドロン吸収体):ニュートリノ以外の粒子をストップ
- * ミュー粒子検出器: 副産物のミュー粒子のうち、ビームダンプをすり抜けた一部を観測して、ニュートリノビームの方向や安定性をチェック。
- * 前置ニュートリノ検出器:
- * ニュートリノを実際に観測して、ニュートリノの生成量とビーム方向をチェック

崩壊領域トンネルとビームダンプ



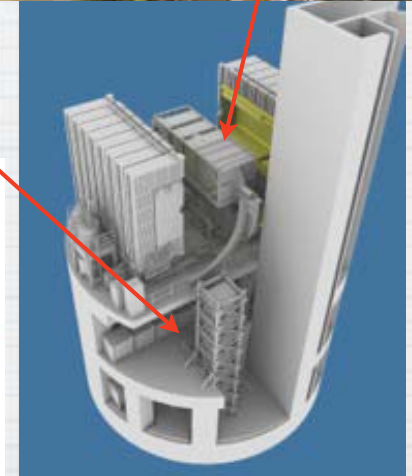
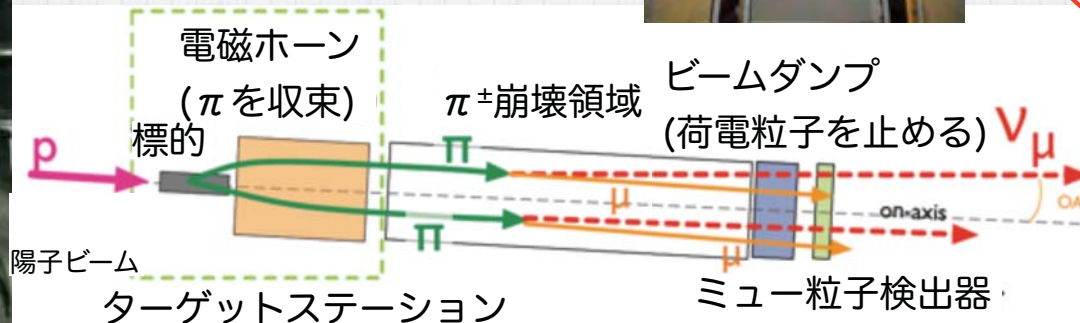
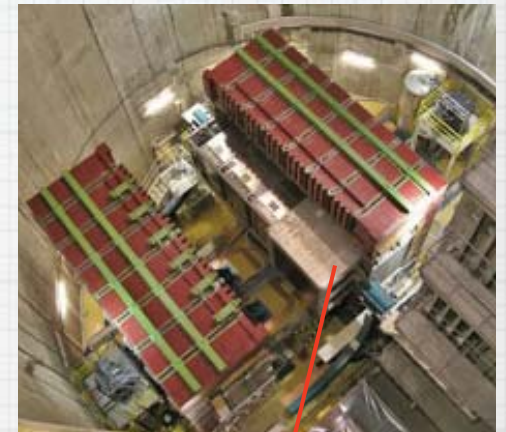
ミューオン粒子検出器



前置ニュートリノ検出器



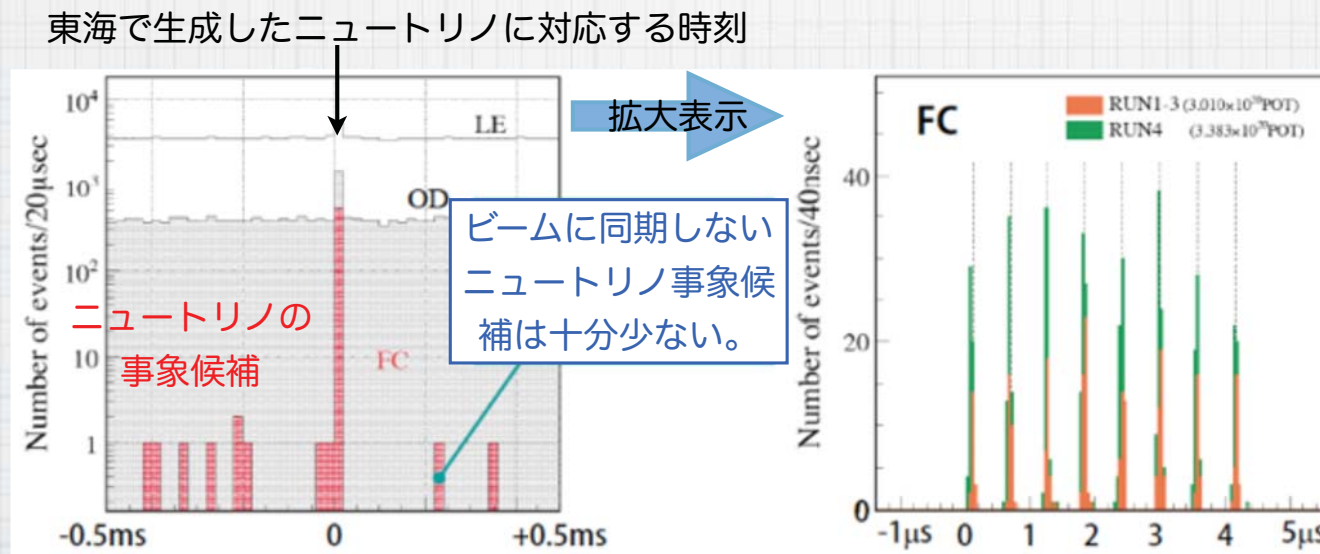
前置ニュートリノ検出器



なぜ神岡でJ-PARCで生成されたニュートリノとわかるのか？

- * GPSを使って、東海と神岡で時刻合わせして、加速器でニュートリノを生成した時刻に合わせてスーパーカミオカンデで検出する。
- * 約2.5秒ごとに、約 1.2×10^{14} 個(120兆個)の陽子から
約 4×10^{14} 個 (400兆個) のニュートリノが生成される
- * そのうち、約 1.5×10^7 個(一千五百万個)のニュートリノがスーパーカミオカンデを通過する。
一日あたりだと、約 8×10^{11} 個(800億個)
- * そのうち、スーパーカミオカンデと反応するのが、1日に3個程度

スーパーカミオカンデ
でえた信号数



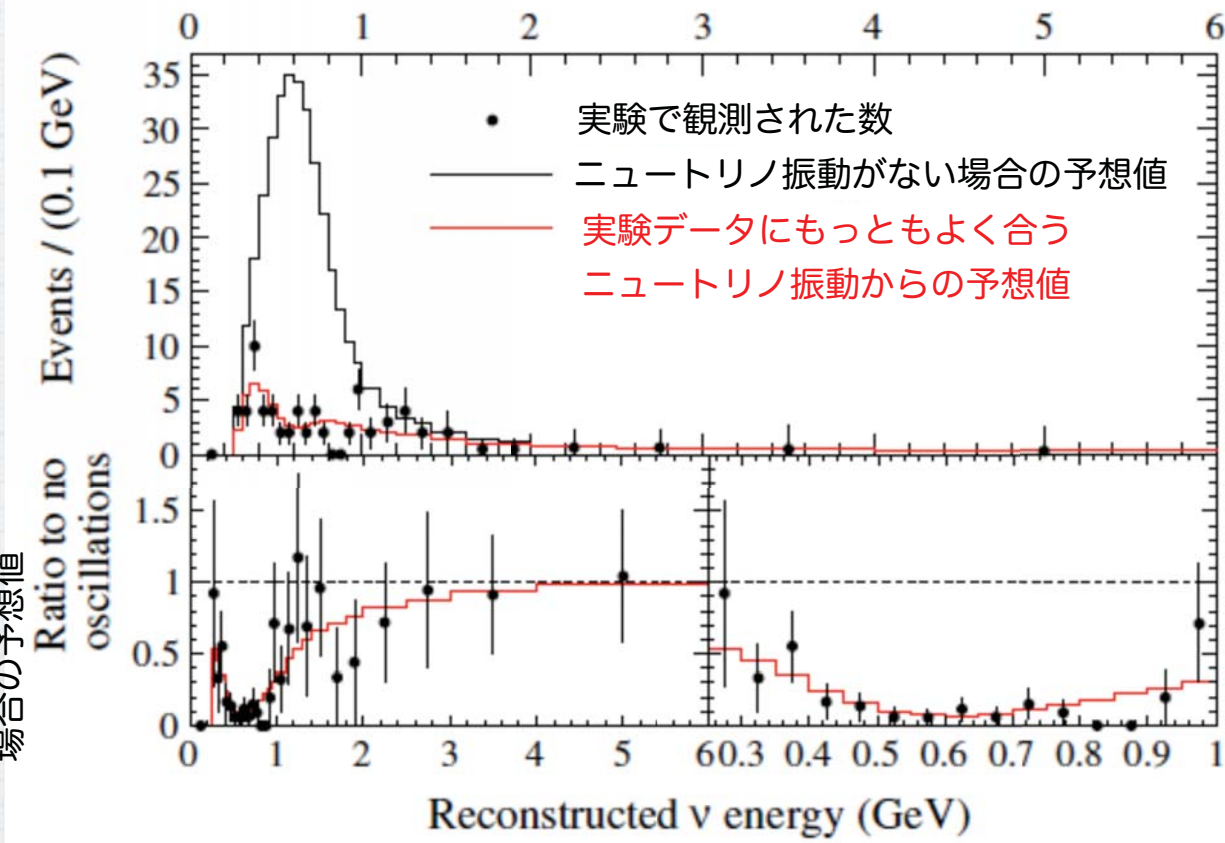
陽子ビームと同じ8バッチ
の時間構造をもつ
=
J-PARCの加速器ニュートリノ
由来である証拠

T2K実験で観測されたニュートリノ振動

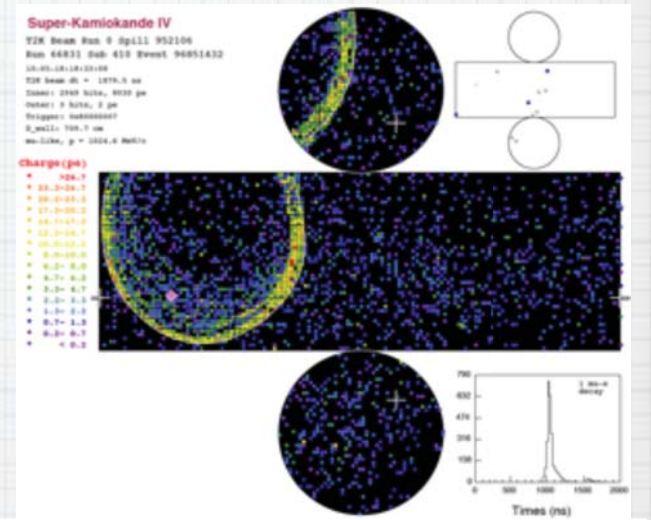
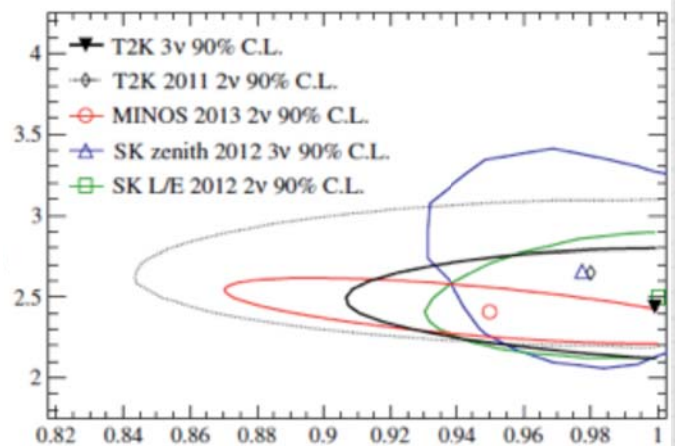
- * ミューニュートリノの減少が確認された。ニュートリノ振動のパターンによく合っている。
- * ニュートリノ振動の振幅がとりうる最大に近い
=あるエネルギーでは、ほとんど全てのミューニュートリノが消失
- * 今後さらにデータ蓄積すれば、まだまだ測定誤差は小さくできる。スーパーカミオカンデで検出されたミューニュートリノ反応

観測数 ÷ ニュートリノ振動がない場合の予想値

スーパーカミオカンデでミューニュートリノの事象数

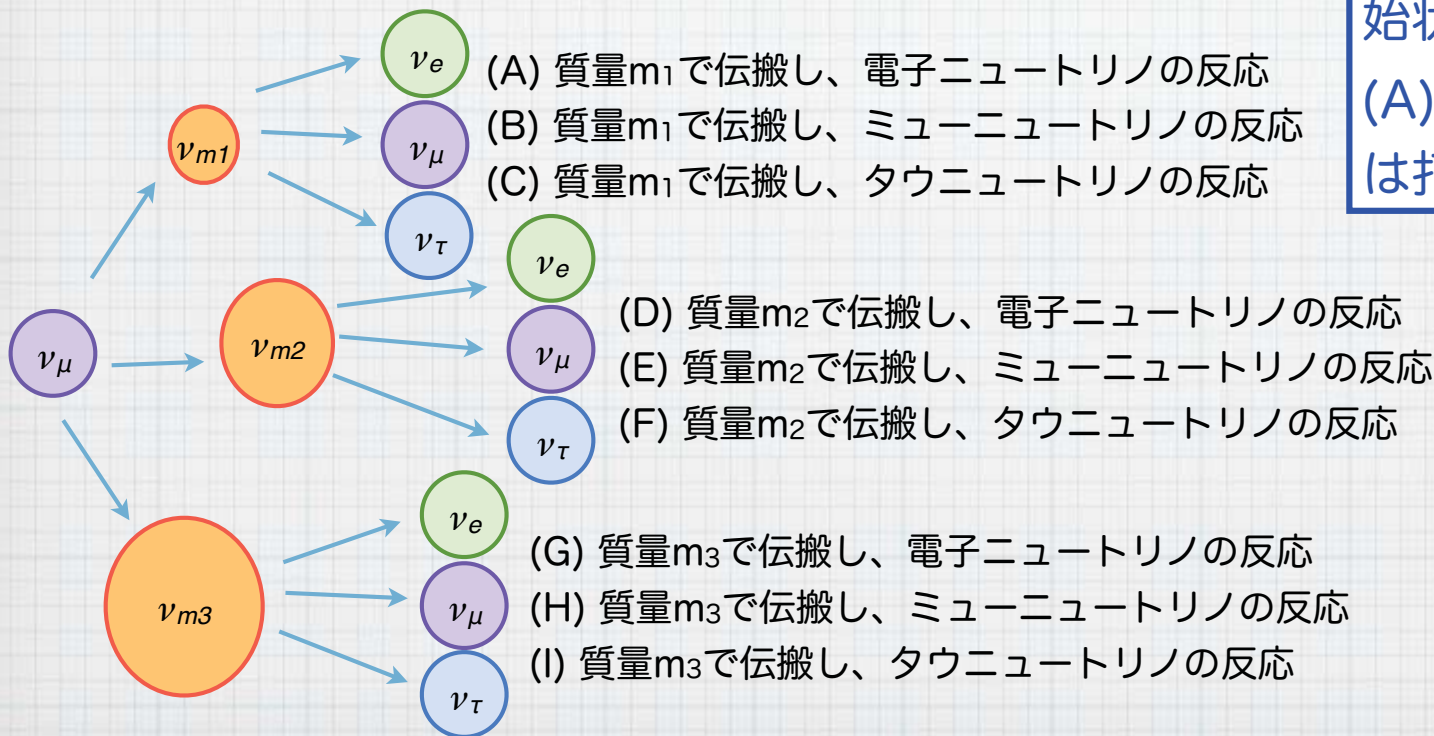


ニュートリノ質量の差: Δm^2_{32} [eV²]



新しいニュートリノ振動

- * 消えてしまったミューニュートリノはどこへ？ → 別の二種類のニュートリノに変わった。
 - * 質量で分類した三種類は、弱い相互作用で分類した三種類の重ね合わせ
 - * 9通りの可能性が”干渉”する。
- * 大気ニュートリノや、T2K以前の加速器ニュートリノ実験では、電子ニュートリノは見つからなかった → ほとんどは、タウニュートリノに変わったと考えられる。
- * ミューニュートリノ → 電子ニュートリノの変化(“電子ニュートリノ出現”)は存在しないのか？
: T2K実験のメインターゲット



始状態の $\nu_{m1}, \nu_{m2}, \nu_{m3}$ で割合では、
(A)と(D)と(G)、(C)と(F)と(I)
は打ち消し合う。

長距離飛行している間に
 $\nu_{m1}, \nu_{m2}, \nu_{m3}$ の重ね合わせが変化

(A)と(D)と(G)
(C)と(F)と(I)
は、打ち消し合わなくなる。

ν_e や ν_τ が出現する。 35

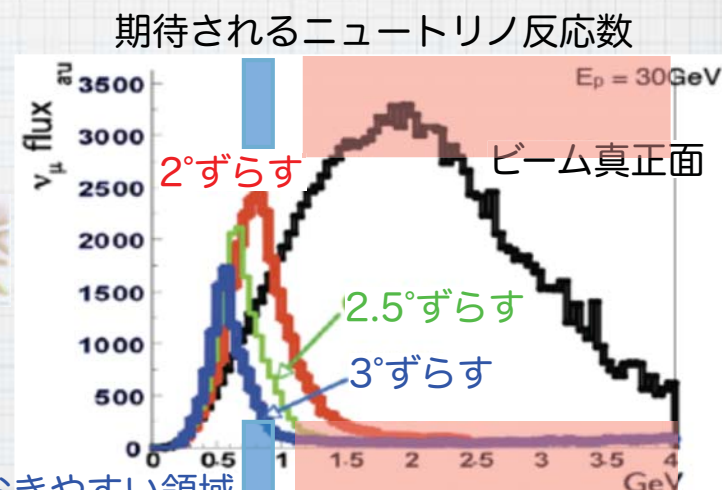
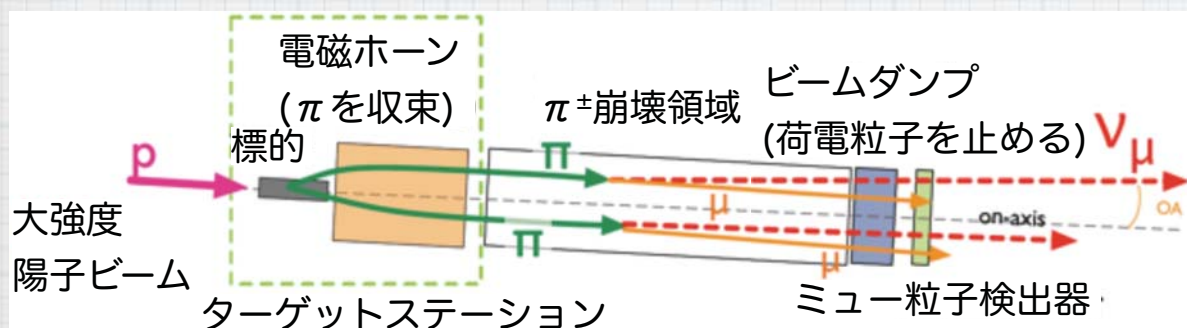
“電子ニュートリノ出現”は、ニュートリノ実験の突破口

- * なぜ、T2K実験は“電子ニュートリノ出現”の発見をめざすのか？
 - * まだだれも観測していないから
 - * 三種類のニュートリノがどうに重なり合っているかを解く最後のピースだから
 - * もし、“電子ニュートリノ出現”があるならば、レプトンにおけるCP対称性の破れが実験的に研究できる可能性がでてくるから。
 - * CP対称性の破れ：粒子と反粒子の違い。
 - * クォークでのCP対称性の破れは見つかっており、KEK Bファクトリー実験などの実証により、2008年に小林先生・益川先生にノーベル物理学賞。レプトンでは未発見。
 - * “電子ニュートリノ出現” (= ミューニュートリノ→電子ニュートリノ)
“反電子ニュートリノ出現” (=反ミューニュートリノ→反電子ニュートリノ)
レプトンのCP対称性の破れは、この2つの振動の大きさの差に現れる。
 - * CP対称性の破れを探すには、ニュートリノ／反ニュートリノの両方を生成できる加速器ニュートリノ実験がうってつけ。
- * “電子ニュートリノ出現”は、新たな粒子－反粒子の違いを探す突破口

これまでの実験で未発見なのは、まれにしかおきないから

- * まれにしかおきない事象を捉えるためにT2K実験がとった方法
 - * とにかく大強度陽子ビームを用いる
 - * 前身のK2K実験: 5kW → 230kW (設計値750kW)
 - * まぎらわしい事象(バックグラウンド/背景事象)を減らす。
 - * ニュートリノのエネルギーが1 [GeV]を超えると、スーパーカミオカンデで電子ニュートリノによく似た信号を出すミュオンニュートリノ起因の反応が増えてくる。
 - * ニュートリノ振動が顕著にあらわれる、0.7 [GeV]あたりにエネルギーがそろったニュートリノビームを作る。
 - * オフアクシス法：あえてスーパーカミオカンデからビーム方向をずらす！

ビームライン全体を傾け、角度を付ける。



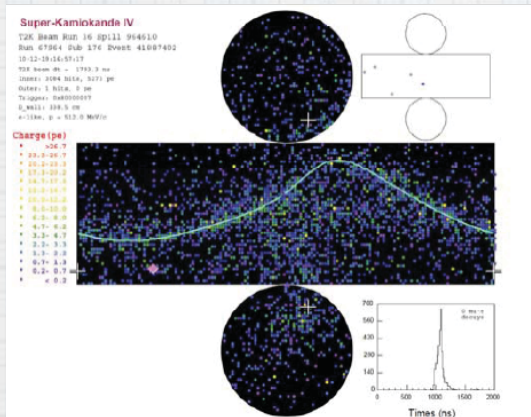
ニュートリノ振動がおきやすい領域

まぎらわしい反応がおきやすい領域

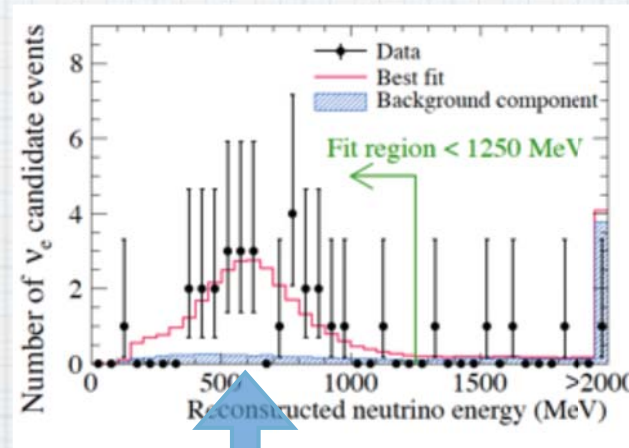
2013年に“電子ニュートリノ出現”を発見！

- * 2010年から2013年4月まで間に、計 6.6×10^{20} 個の陽子からミュニュートリノを生成した。
- * その中から電子ニュートリノに変化したと思われる事象が**28イベント**観測された。
- * バックグラウンド(紛らわしい事象)が混入していたとしても、 4.92 ± 0.55 個と積算。
- * 間違い(28個全てがバックグラウンド)の可能性は、 3×10^{-13} (10兆分の3)以下: 7.3σ の有意性
- * ジャンボ宝くじを8枚だけ買って、そのうち2枚一等があたる確率に相当
- * 観測された電子ニュートリノの数が、原子炉ニュートリノ実験からの予想(22個)より少し大きい。
- * 今後精度を向上して比較することで、CP対称性の破れのヒントがえられるかも。

スーパーカミオカンデで検出された
J-PARCからのニュートリノビーム
に由来する電子ニュートリノ反応

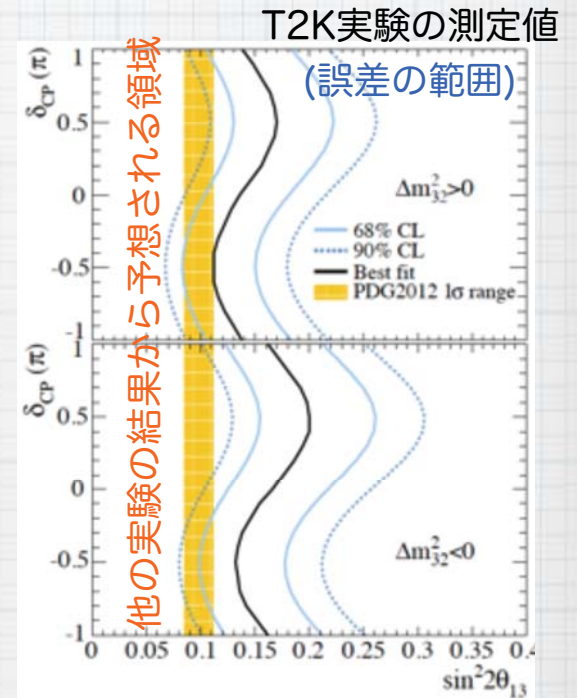


スーパーカミオカンデで検出された
“電子ニュートリノ出現”事象候補の
ニュートリノエネルギー分布



J-PARCのビームのエネルギー、
ニュートリノ振動から予想される領域に一致

ニュートリノでのCP対称性の破れのパラメータ



“電子ニュートリノ出現”の
ニュートリノ振動の振幅

まとめ

- * 素粒子実験が観る微小なスケールを紹介しました。
- * ニュートリノまれにしか反応しないので、検出するには巨大な検出器を用いる。
- * ニュートリノ振動は、量子論的効果でおこる。ニュートリノ振動から、ニュートリノ振動の発見から、質量がゼロではないという事が実証されている。
- * 大強度陽子加速器J-PARCによって生成した大強度ニュートリノビームを用いるT2K実験は、2013年までに、新しいニュートリノ振動＝“電子ニュートリノ出現”を世界ではじめて発見しました。
- * この新しい“電子ニュートリノ出現”は、ニュートリノ物理におけるブレークスルーで、加速器ニュートリノ実験によって「レプトンにおける粒子-反粒子(CP)対称性の破れ」を探す道が開かれた。

ご清聴ありがとうございました。
ございました。