



# ニュートリノ： 小さな質量の大きな意味

理学部地球惑星科学科1年

北大地球科学サークルGROUND/北大天文同好会

牧野望

# はじめに

友人とカミオカンデのパズル  
カミオカンデって名前は知ってる  
けど、よく知らない  
ニュートリノって何なのだろう？



by 友人

# 目次

- ニュートリノとは
- ニュートリノに質量はないのか
- これからのニュートリノ振動研究



第1章

ニュートリノとは

# この世の物質は何でできているのか

古代ギリシア

• デモクリトス

物質の根源には、目に見えない、それ以上分割することのできない原子(アトム)が存在する

この考えはあまり評価されたとはいえなかったし、根拠となる観測事実もなかった

# この世の物質は何でできているのか

19世紀末

あらゆる物質は、元素からできており、元素は「原子」でできている

では、「原子」はさらに分割可能なのか？

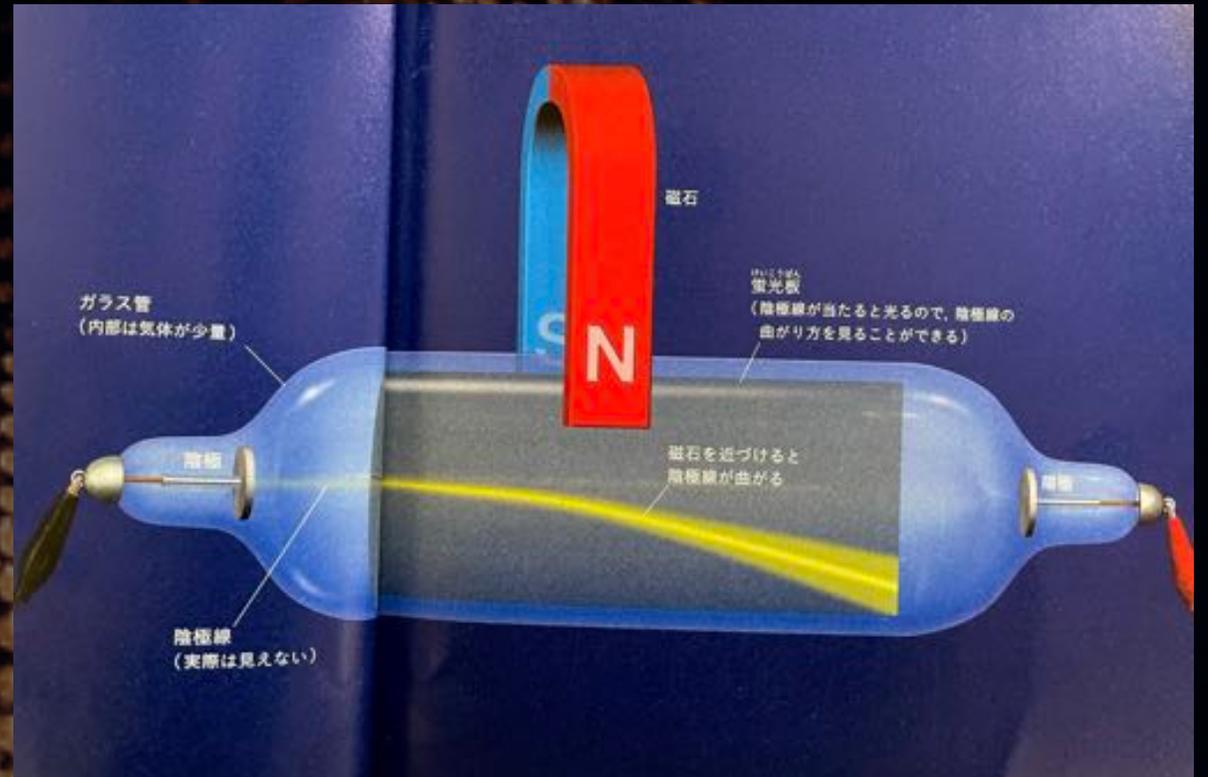
# 放電現象

## ・陰極線

真空なガラス管内の一对の電極に高電圧をかけたとき、電極間に流れるもののこと

## ・J.J.トムソン

陰極線は、負の電荷を帯びた同一粒子(電子)の集まり



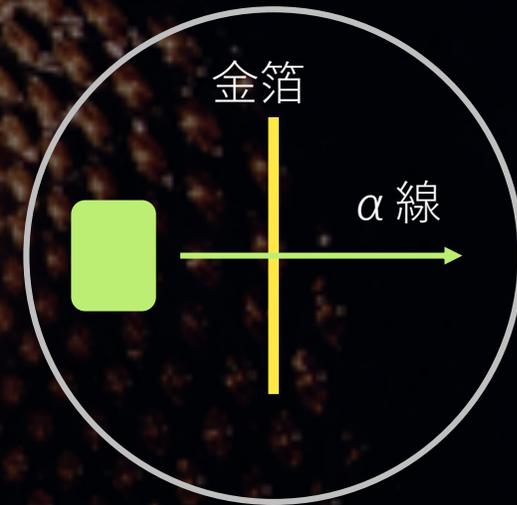
Newton ライト 『素粒子』

→原子の中には、負の電荷を帯びた電子があることがわかった

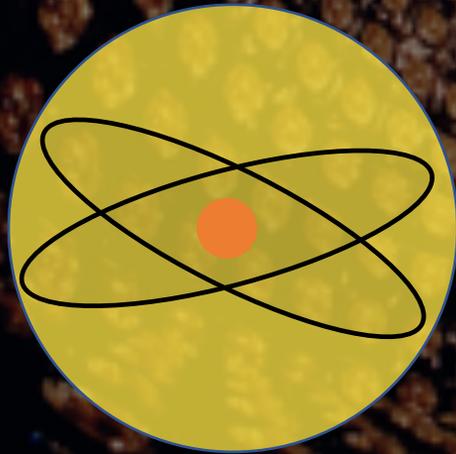
# ガイガーとマースデンの実験

金箔に $\alpha$ 線を照射

- たいていの $\alpha$ 粒子は素通り
- 8000個に1個の割合で後方に跳ね返る



→



ラザフォードの  
原子模型

正電荷は原子内で局所的にかたまって存在していて、 $\alpha$ 線の正電荷との斥力により、 $\alpha$ 線の大角度の散乱が起きる

→原子は、正の電荷を持つ原子核と電子からなる

# 原子核

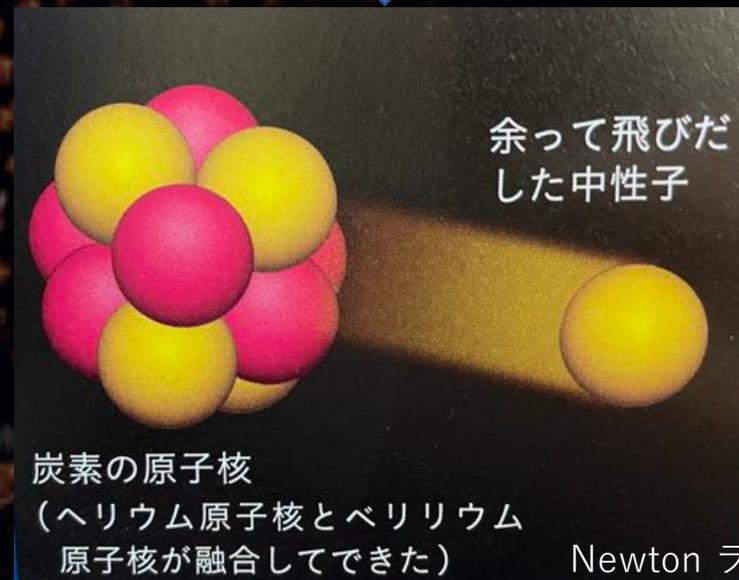
• J.チャドウィック

ベリリウムに $\alpha$ 線をぶつける実験  
で電氣的に中性な放射線が発生

→放射線の正体は金属の“原子核の破片”

→原子核は陽子と中性子からなる

⇒電子、陽子、中性子は、それ以上分割できない「素粒子」



# 多すぎる「素粒子」

1950年頃から宇宙線の観測や加速器での実験によって、中性子や陽子によく似た粒子が100種以上見つかる

→自然の基本的な構成要素であるはずの素粒子が、こんなにたくさん見つかってよいものなのか？

→もっと根源的な構成要素があるのではないか？

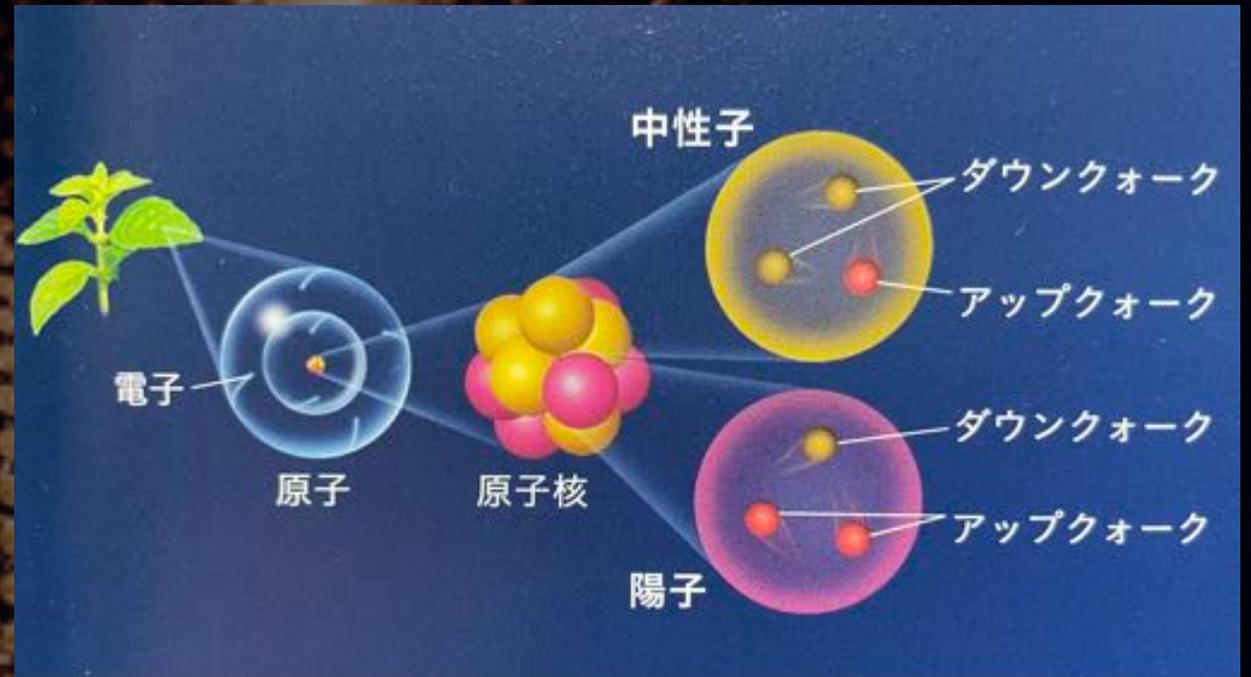
# クォークモデル

• M.ゲルマン J.ツワイク

「クォーク」という未知の基本粒子を想定

中性子や陽子、それらによく似た粒子は、クォークが3つ集まってできているとする説を提唱

6種類ある

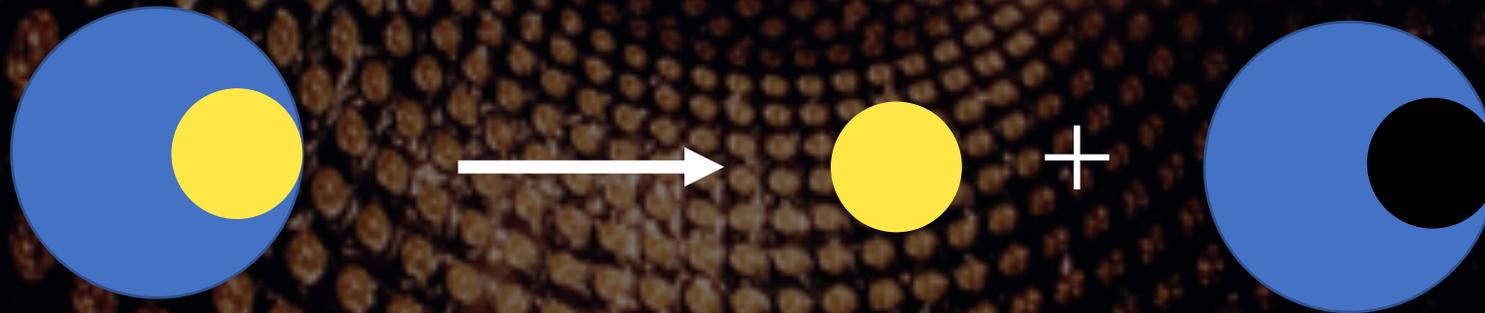


Newton ライト 『素粒子』

# β崩壊の謎

- 原子核のβ崩壊

止まっている原子核が電子を放出して別の原子核に変化すること



- J.チャドウィック

β崩壊する原子核の崩壊前と崩壊後のエネルギーの収支が合わないことに気がつく

# エネルギー収支

元の原子核をA, 変化した先の原子核をBとする

$$\text{Aの持つエネルギー} = \text{Bの持つエネルギー} + \text{電子の持つエネルギー}$$

実際は

$$\text{Aの持つエネルギー} > \text{Bの持つエネルギー} + \text{電子の持つエネルギー}$$

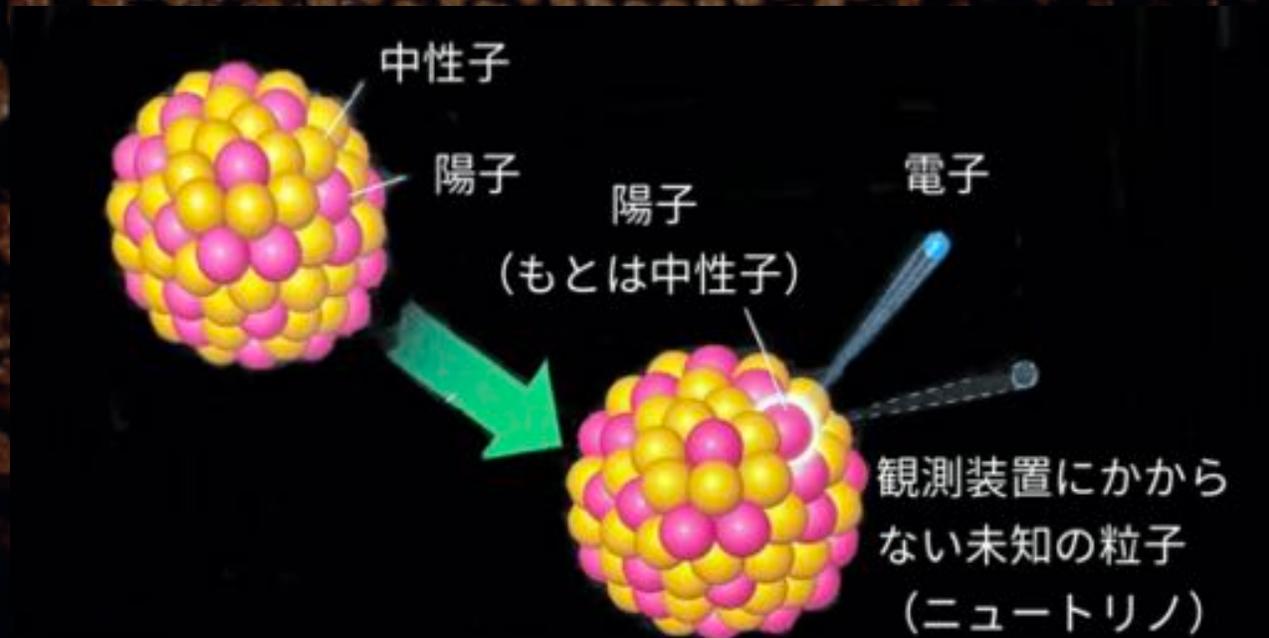
原子核では、エネルギー保存の法則が成り立たない…?

# ニュートリノ

• W.パウリ

未知の、質量を持たないあるいは極めて軽い、電荷を持たない粒子(ニュートリノ)を仮定

原子核は「電子e、別な原子核、ニュートリノの3つに崩壊する」



# F.ライネスとC.コーワンの実験

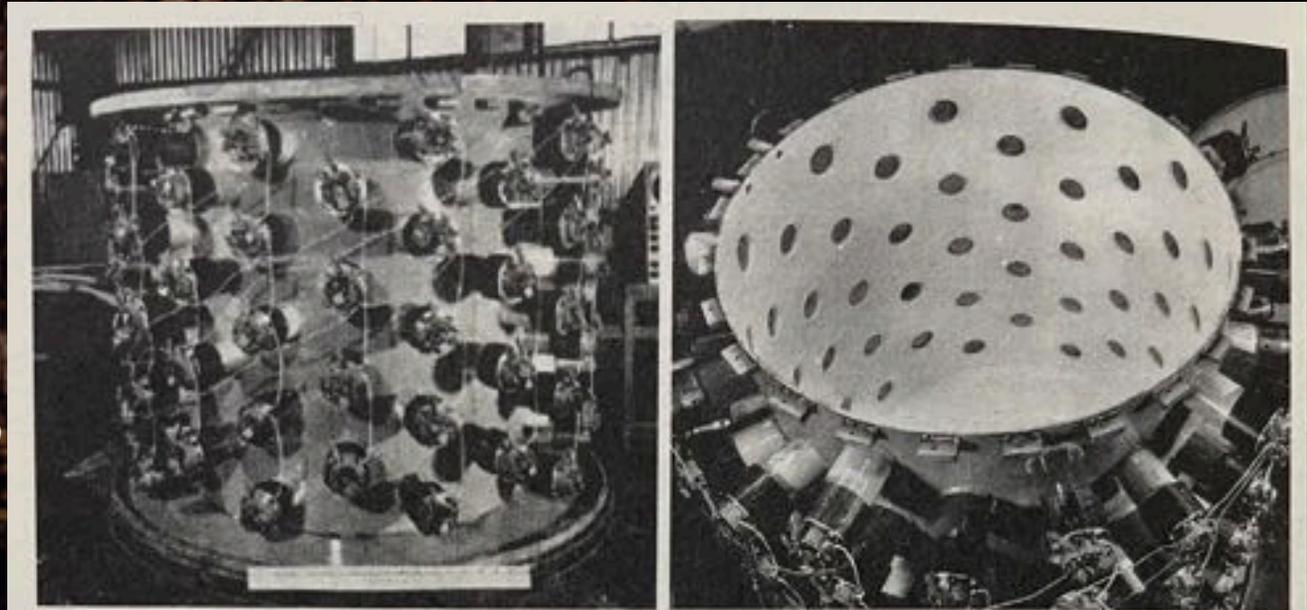
- 原子炉内

ウラン原子核が中性子を吸収して不安定な状態になり、その結果分裂(核分裂)し、エネルギーを放出する。核分裂した原子核は不安定なので $\beta$ 崩壊する。

原子炉の近くに「液体シンチレータ」を置き、ニュートリノを観測

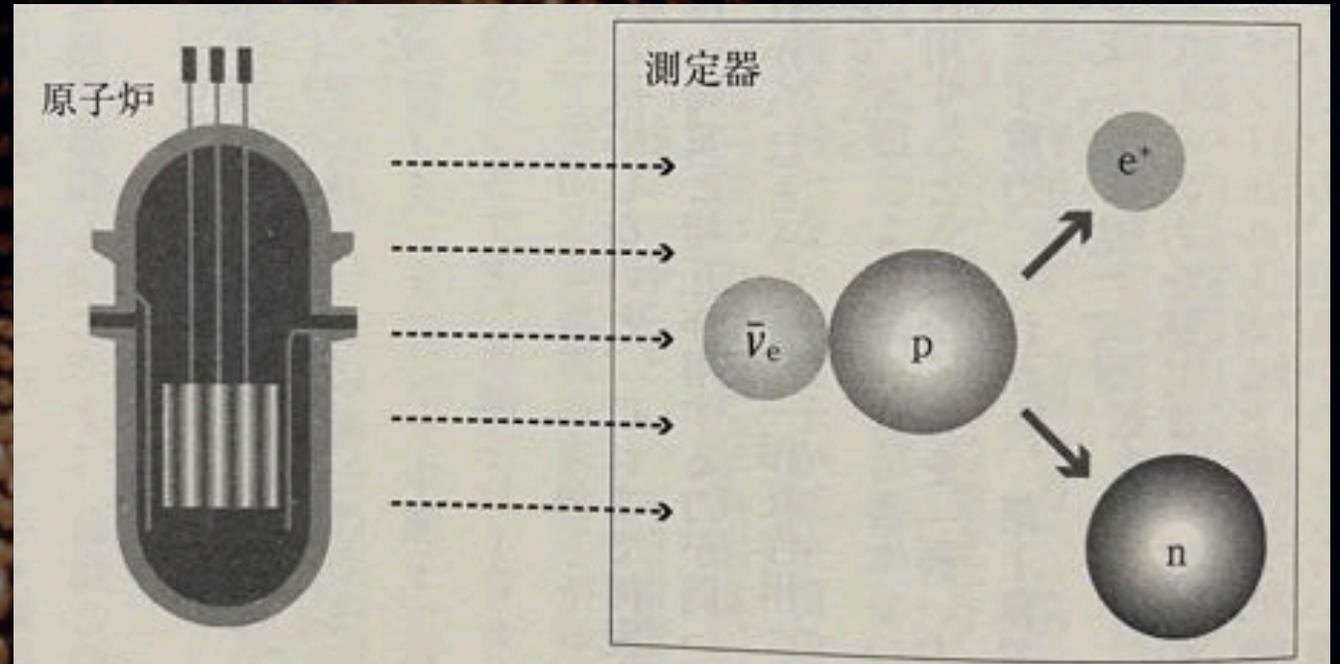
- 液体シンチレータ

エネルギーを受け取ると光る物質を溶かし込んだ液体



# F.ライネスとC.コーワンの実験

原子炉で大量に作られるニュートリノ(正確には反電子ニュートリノ)のうちいくつかは測定器に入ってきたときに物質(正確には陽子)と反応するはず。反電子ニュートリノと陽子が反応し、中性子と陽電子が作られそれが検出される。



出典:『ニュートリノで探る宇宙と素粒子』

→ニュートリノの存在が理論だけでなく実験からも保証された

# 自然界にあふれるニュートリノ

バナナやナッツ

私たちの体      5000個/s

地球内部から      20万個/s・cm<sup>2</sup>

太陽から      660億個/s・cm<sup>2</sup>

# 4つの力

- 重力

質量を持つ物が相手を引きつける力

- 電磁力

電気や磁気を持つ物が相手を引きつけたり遠ざけたりする力

- 強い力

原子核内の陽子と中性子が互いに引きつけ合う力

- 弱い力

変化を引き起こす力(中性子がひとりでに陽子に変わるとか)

# 弱い力

ニュートリノが物質と相互作用するときに働く力は「弱い力」

→物質とほとんど反応しない

→検出しにくい

ニュートリノの水中での平均自由行程は、10光年

地球でも30億個並べてようやく反応するレベル



# なぜニュートリノ?

- 光

太陽中心から表面に出るまで数10万年(情報を失っている)

- ニュートリノ

太陽中心から表面に出るまで2秒

太陽内部の様子を光よりもずっと早く、情報を失わずに伝えてくれるメッセンジャー

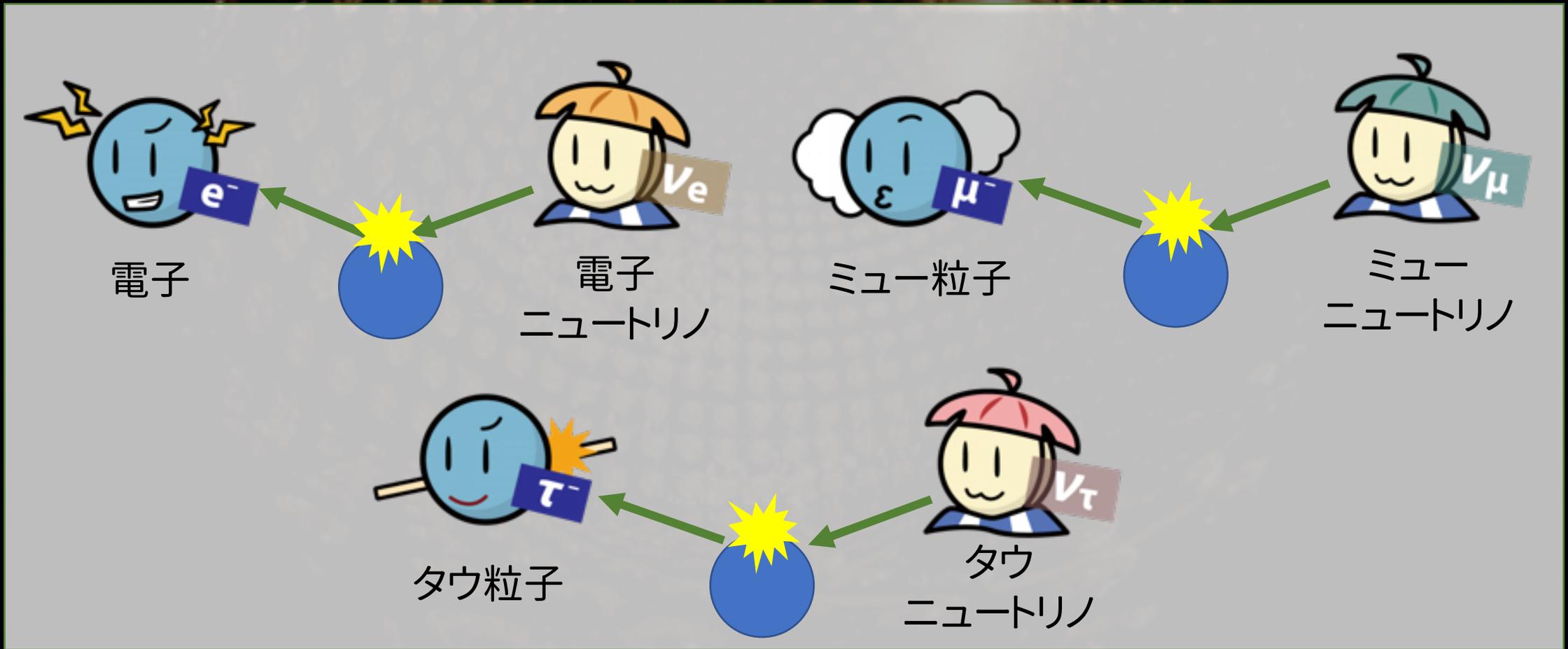
超新星爆発やビッグバンでも同様

# ニュートリノまとめ

- 素粒子の一種
- 質量がないか、極めて軽い
- 電気を帯びておらず中性
- 電磁力は働かず、物質と相互作用するときには「弱い力」のみ
- なかなか反応しない＝検出しにくい
- ごく稀に検出器内で反応したものが観測できる
- 宇宙の古い記憶を持つ

# 3種類のニュートリノ

反応したときにどの粒子に変化するかで見分ける



# 素粒子の標準理論

6種類のクォークと6種類のレプトンを、重力を除く3種類の相互作用で記述し、ミクロの世界を説明するもの  
ニュートリノの質量はゼロとして扱う

	第一世代 (first)	第二世代 (second)	第三世代 (third)
レプトン (LEPTON)	 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
	 電子	 ミューオン	 タウ
クォーク (QUARK)	 アップ	 チャーム	 トップ
	 ダウン	 ストレンジ	 ボトム



第2章

ニュートリノに質量はないのか？

# 太陽ニュートリノ

$4p \rightarrow \text{He} + 2e^+ + 2\nu_e + \text{核融合エネルギー}$

4つの水素原子核(陽子)が融合して1つのヘリウム4原子核(陽子2つ中性子2つ)が作られる際に、核融合エネルギーと同時に2つの陽電子と2つの電子ニュートリノが生成される。この電子ニュートリノのことを太陽ニュートリノという。

太陽中心で生まれたニュートリノは、光学的観測では得られない太陽深部の情報を持っている。また、太陽ニュートリノが観測されれば、

太陽中心で核融合反応が起こっていることの証明  
=「標準太陽モデル」が正しいことの証明 になる

# ホームステイク実験

・R.デイヴィス

約600tの塩素化合物(C<sub>2</sub>Cl<sub>4</sub>)を使用



生成されたアルゴンの数を数えれば、  
ニュートリノの反応数がわかる

→観測に成功

しかし、理論予想値の3分の1



# 太陽ニュートリノ問題

- 本当に太陽からのニュートリノを捉えているのか？
- 理論は正しいのか？
- アルゴンの数を数え間違えているのでは？
- 太陽内部に何か異変が起きている？

デイヴィスの実験は難しすぎて、誰もその結果が正しいのか  
確かめられなかった

本当に太陽ニュートリノが少ないのかを確定させる必要

# カミオカンデ

- 直径約16m 高さ約16m
- 鉄製の水槽に純水3000t
- もともとは陽子崩壊の観測
- 1000個の光電子増倍管

水中で発生した光が光電子倍增管にあたると電子が発生  
→電子を倍々に増幅



# ホームステイク実験との違い

- ホームステイク実験

ニュートリノがやってきた時刻や方向が不明

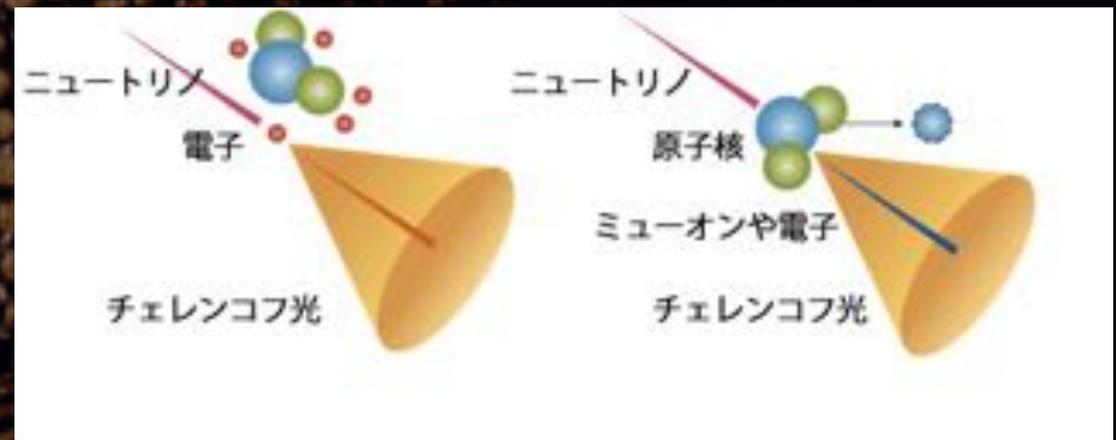
- カミオカンデ

反応のたびにデータ取得

→時刻や太陽ニュートリノの推定

チェレンコフ光

→ニュートリノの方向推定



出典：<http://www.hyper-k.org/cherenkov.html>

# ニュートリノ検出原理

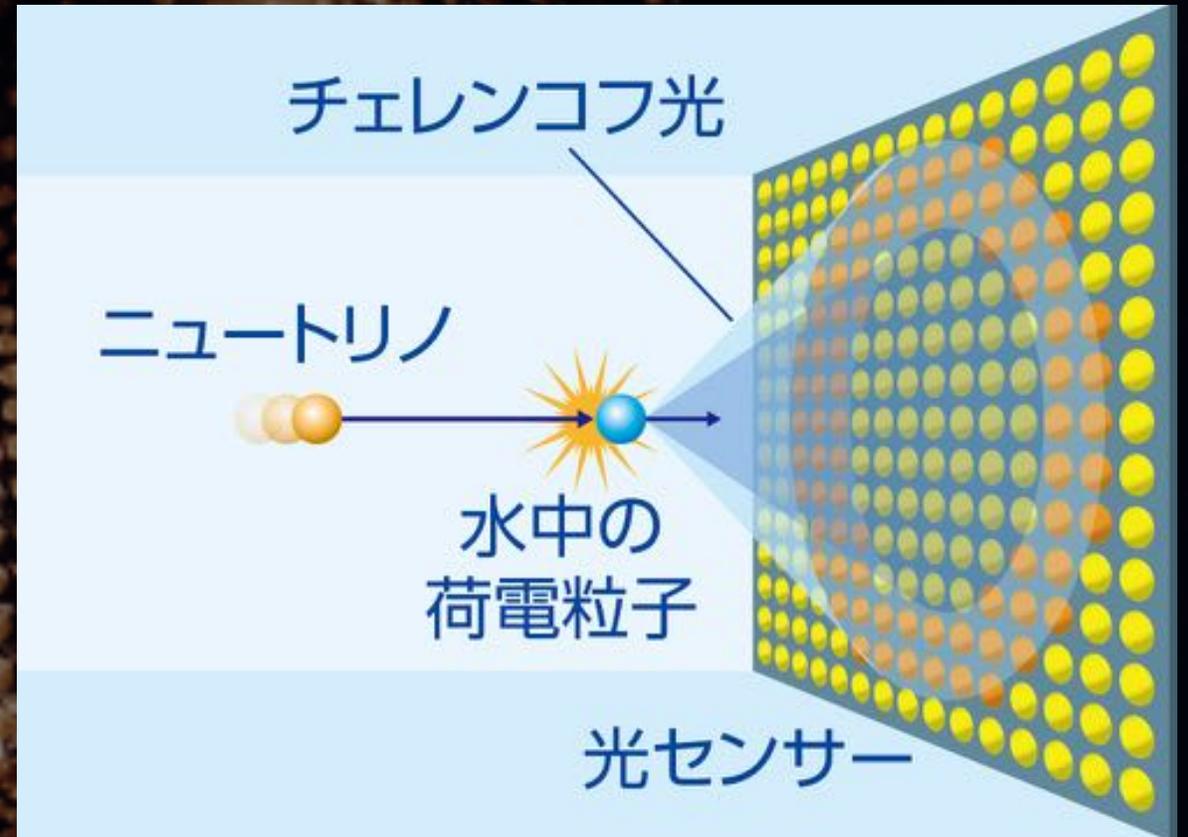
水中の原子と衝突し、電子と  
ミュー粒子をたたき出す

電子ニュートリノ→電子

ミューニュートリノ→ミュー粒子

荷電粒子が超光速で走る

→衝撃波が発生し青白く発光



# カミオカンデでの結果

観測された太陽ニュートリノの数:

理論予想値の半分

ホームステイク実験とカミオカンデで観測できるニュートリノの種類に違いがあることが肝

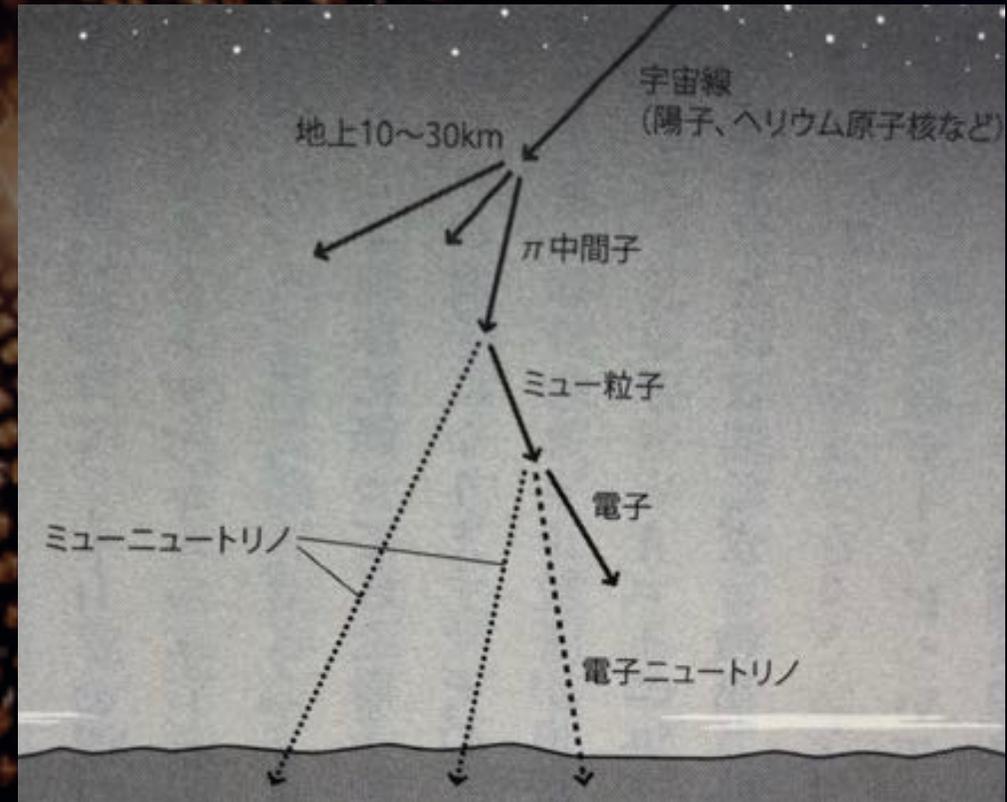
→太陽ニュートリノ問題は現実のものだった

→太陽はニュートリノを放出している

→太陽は核融合反応している

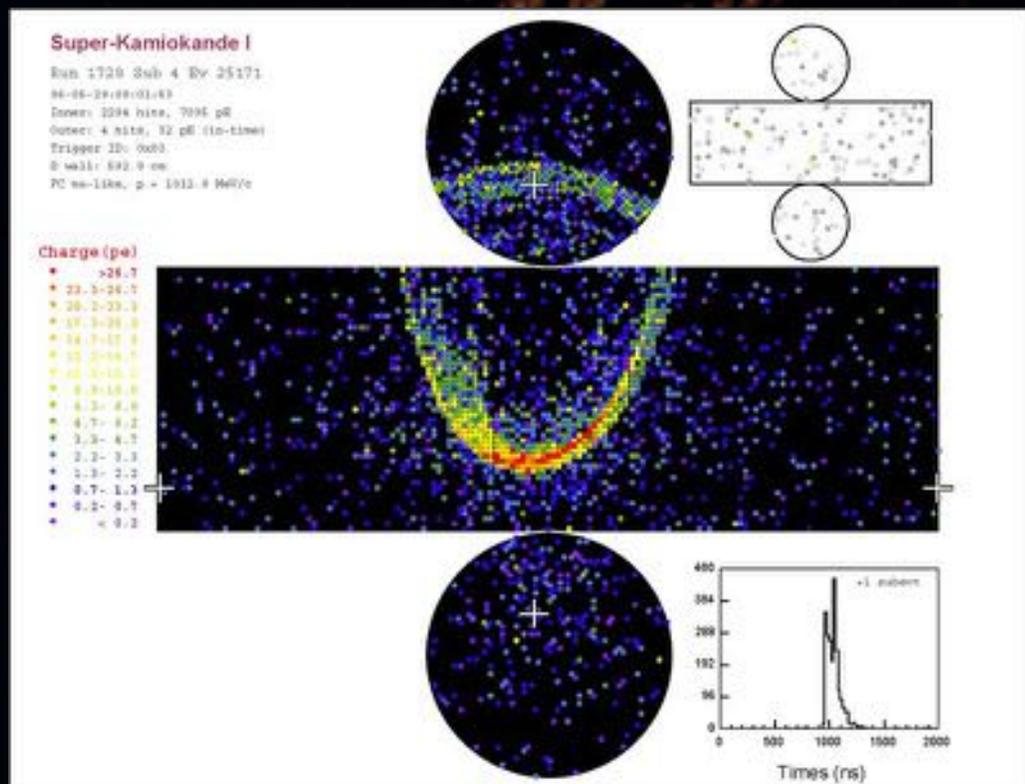
# 大気ニュートリノ

- 一次宇宙線が地球大気と衝突
- $\pi$ 中間子生成
- ミューニュートリノとミュー粒子
- ミュー粒子から電子ニュートリノ、電子、ミューニュートリノ
- 電子ニュートリノ、ミューニュートリノが  
カミオカンデへ

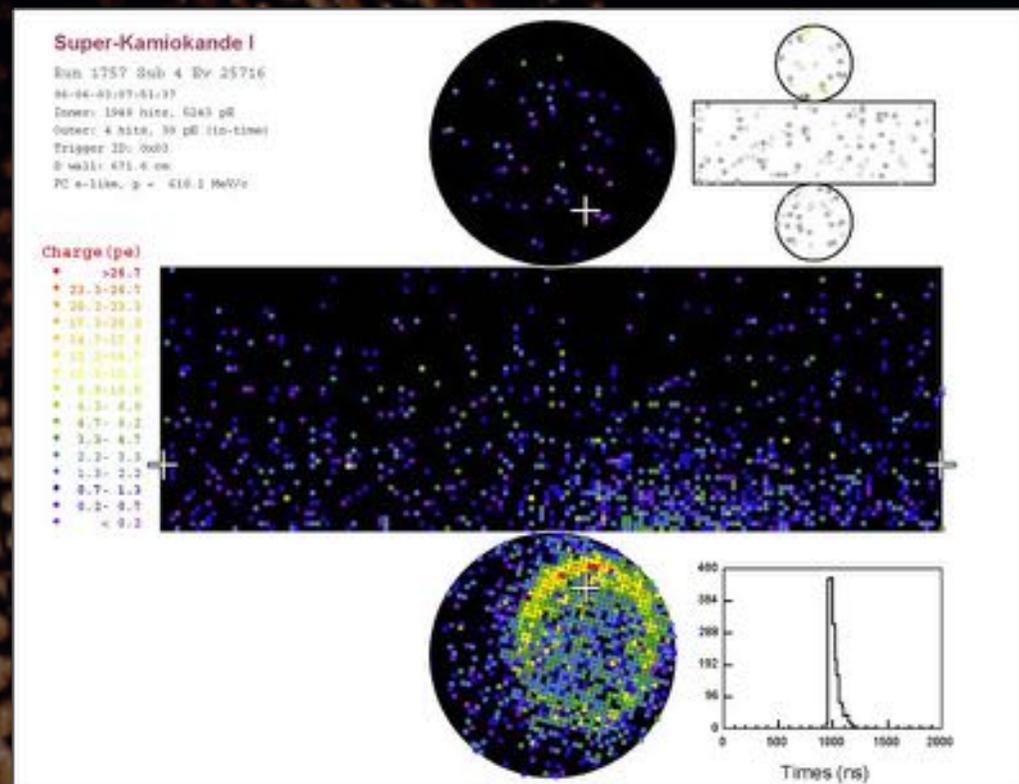


『ニュートリノでわかる宇宙・素粒子の謎』

# チェレンコフ光のリング



ミュー型



電子型

# 大気ニュートリノ問題

- 電子ニュートリノ

理論予想値通り検出

- ミューニュートリノ

理論予想値の半分程度

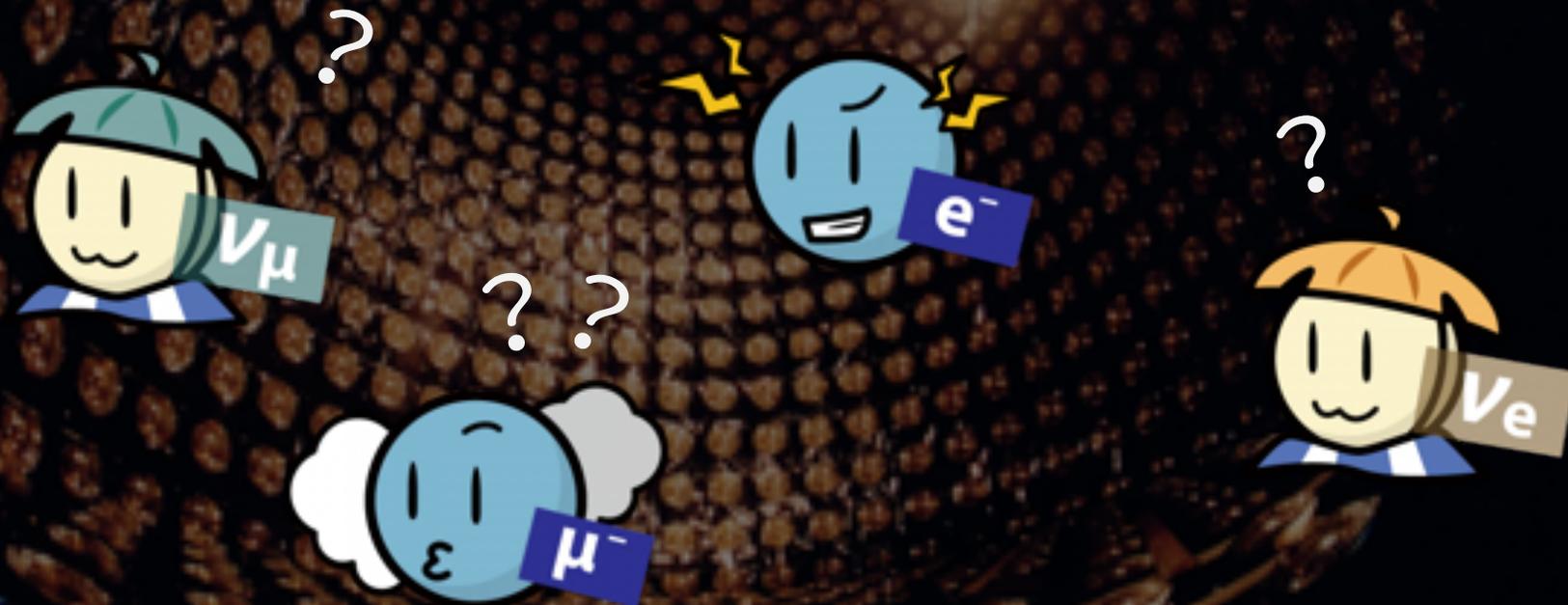
カミオカンデに飛び込んでくる角度によって減り方が違う

角度が違う

→ ミューニュートリノが作られた場所が違う

→ 飛行距離が違う

なぜ太陽ニュートリノも大気ニュートリノも、理論予想値と異なるのか？



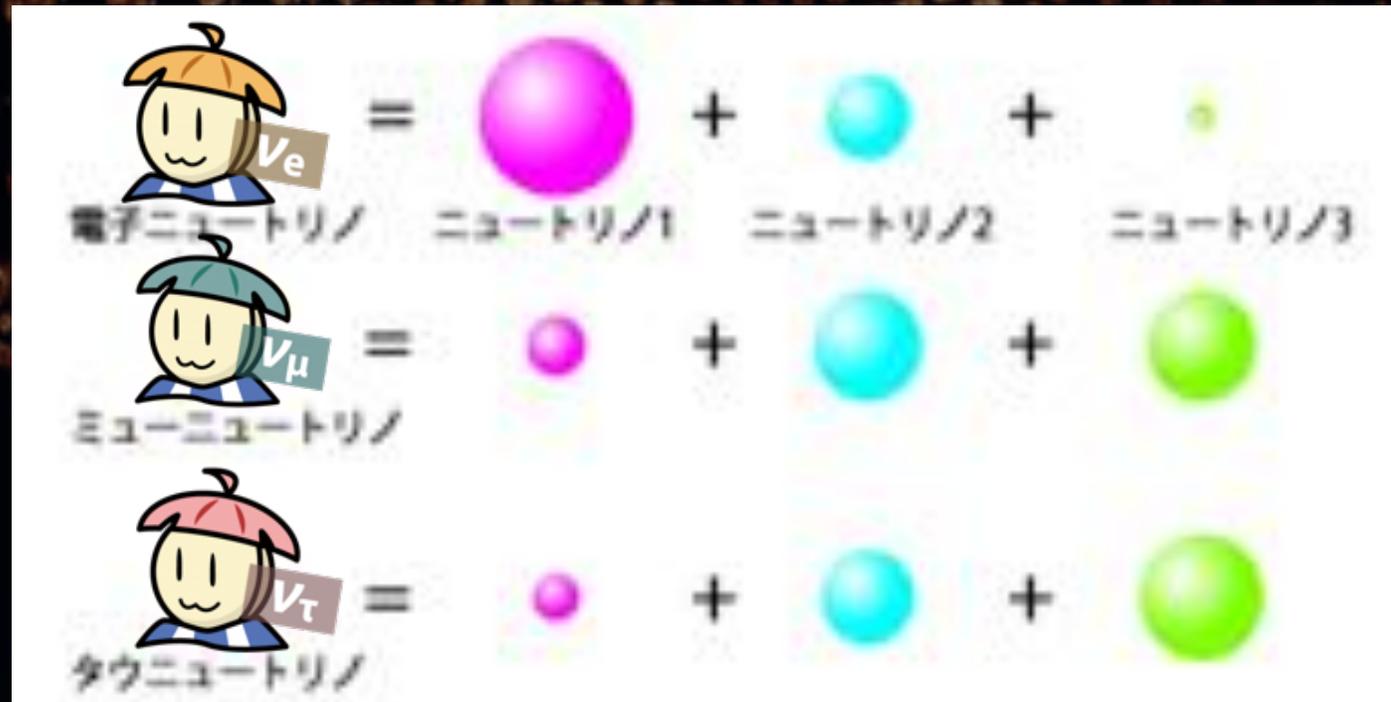
# ニュートリノ振動

- 牧二郎・中川昌美・坂田昌一が1962年に提唱
  - ニュートリノが飛行中に別の種類に変わる
  - 飛行距離が長いほど変わる確率が高くなる
- ニュートリノの数が理論値より少ないことと合致



# ニュートリノ振動

- 質量の異なる3種類の状態(ニュートリノ1,2,3)が混合したものの
- 混合割合によって電子型、ミュー型、タウ型が決まる
- 混合割合などは実験により決定

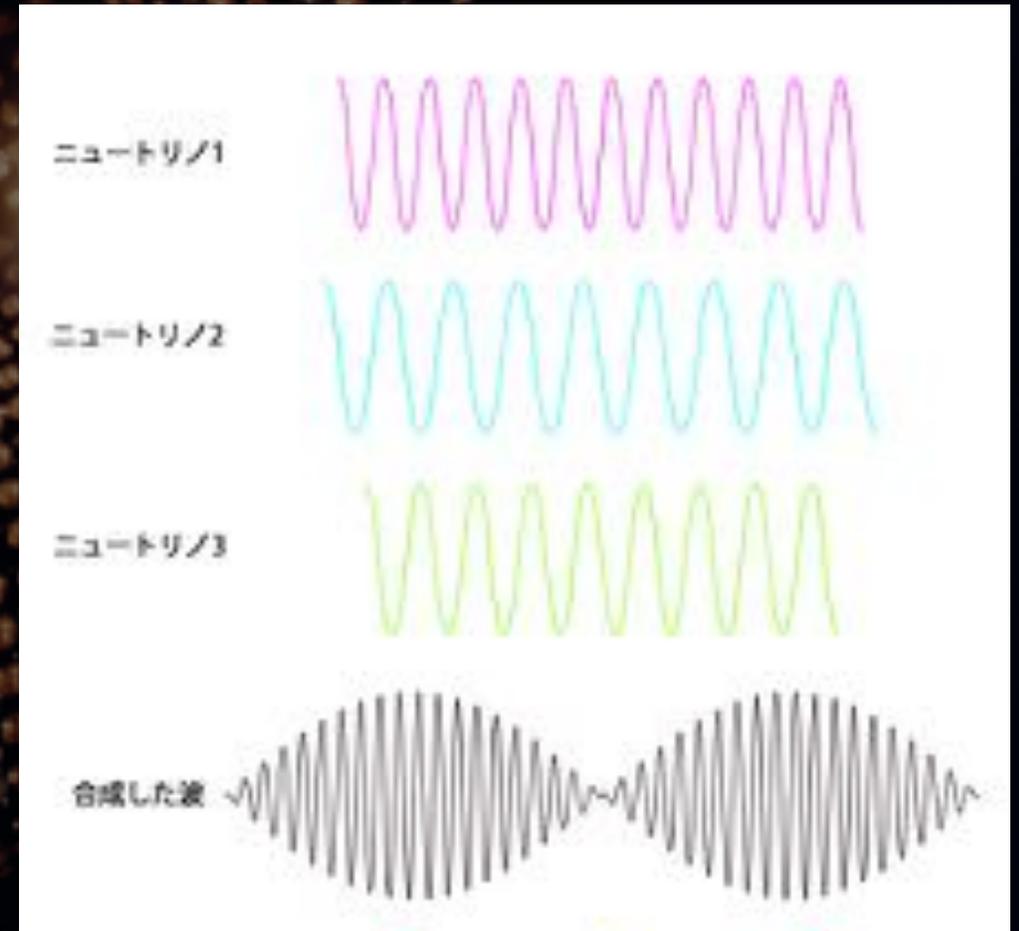


出典: <http://www.hyperk.org/neutrino.html>

# ニュートリノ振動

- 質量に応じた波の性質を持つ
- 3つの波が重なり合う
  - うなりが生じ、混合比が変化
  - 時間と共に電子型、ミュー型、タウ型と変化

ニュートリノ問題がニュートリノ振動によるとすると、辻褃が合う



# 標準理論との矛盾

- 素粒子の標準理論

ニュートリノの質量はゼロ

→「3つの異なる質量の状態」はあり得ない

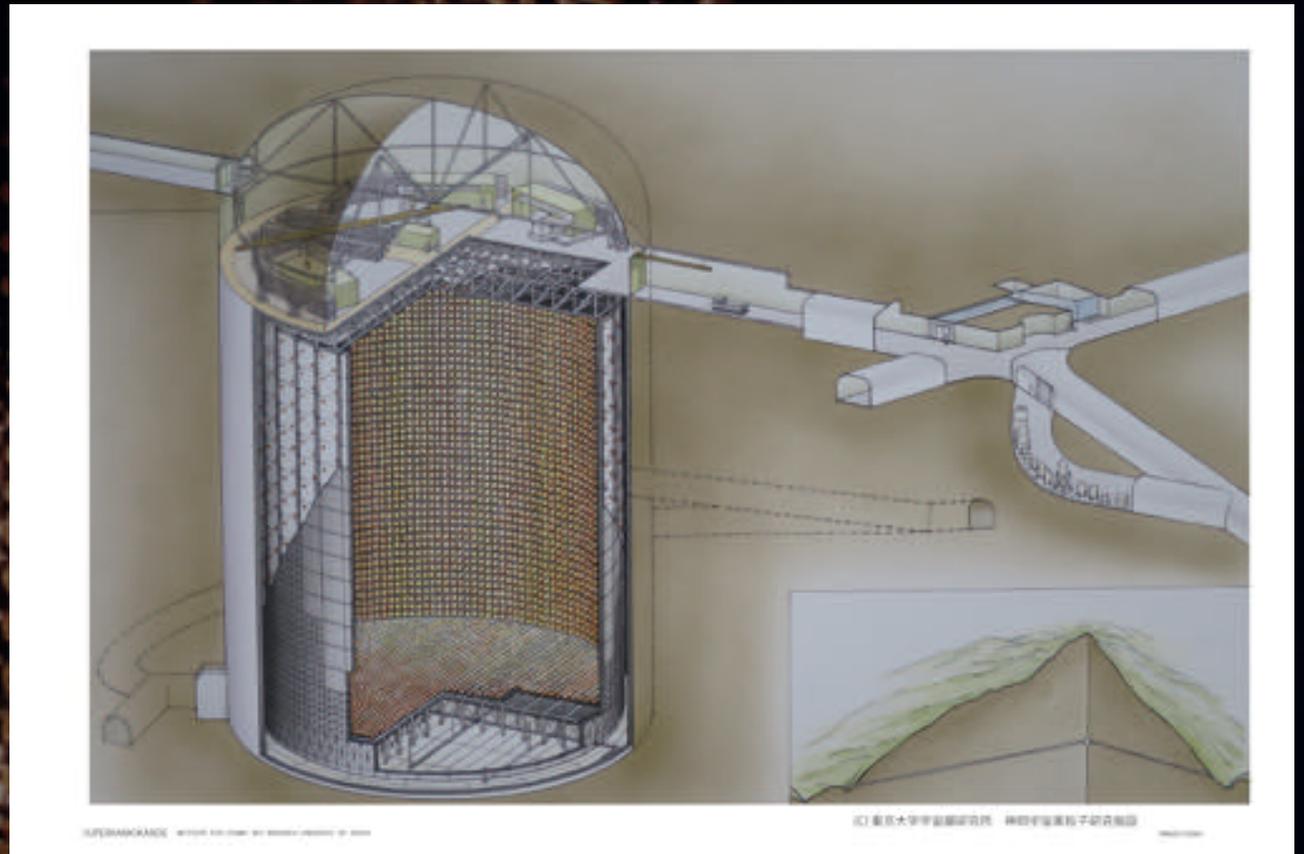
→ニュートリノ振動は起こらない

本当にニュートリノ振動が起こっているのかを調べる必要

→スーパーカミオカンデ建設

# スーパーカミオカンデ

- 直径39.3m 深さ41.4m
- 5万トンの超純水
- 11000本以上の光電子増倍管
- 最初の仕事は、大気ニュートリノ問題の解決  
→ 電子ニュートリノとミューニュートリノの検出



# ニュートリノ振動の発見

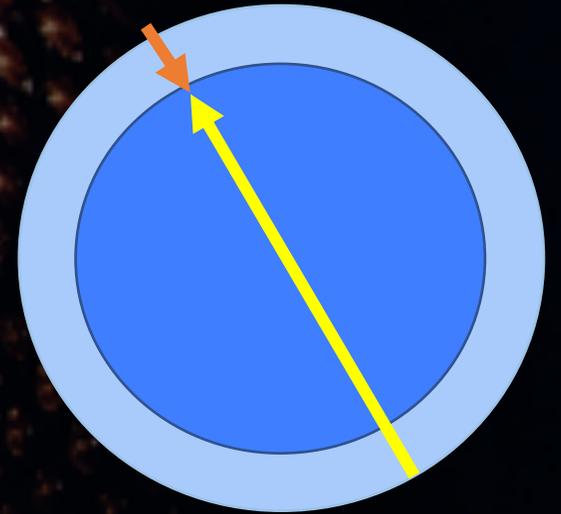
大気ニュートリノはあらゆる方向から飛来  
→角度によって飛行距離が違ふ

真上から来る**ミューニュートリノ**

→飛行距離短い

地球の裏側の上空で作られた**ミューニュートリノ**

→飛行距離長い



# ニュートリノ振動の発見

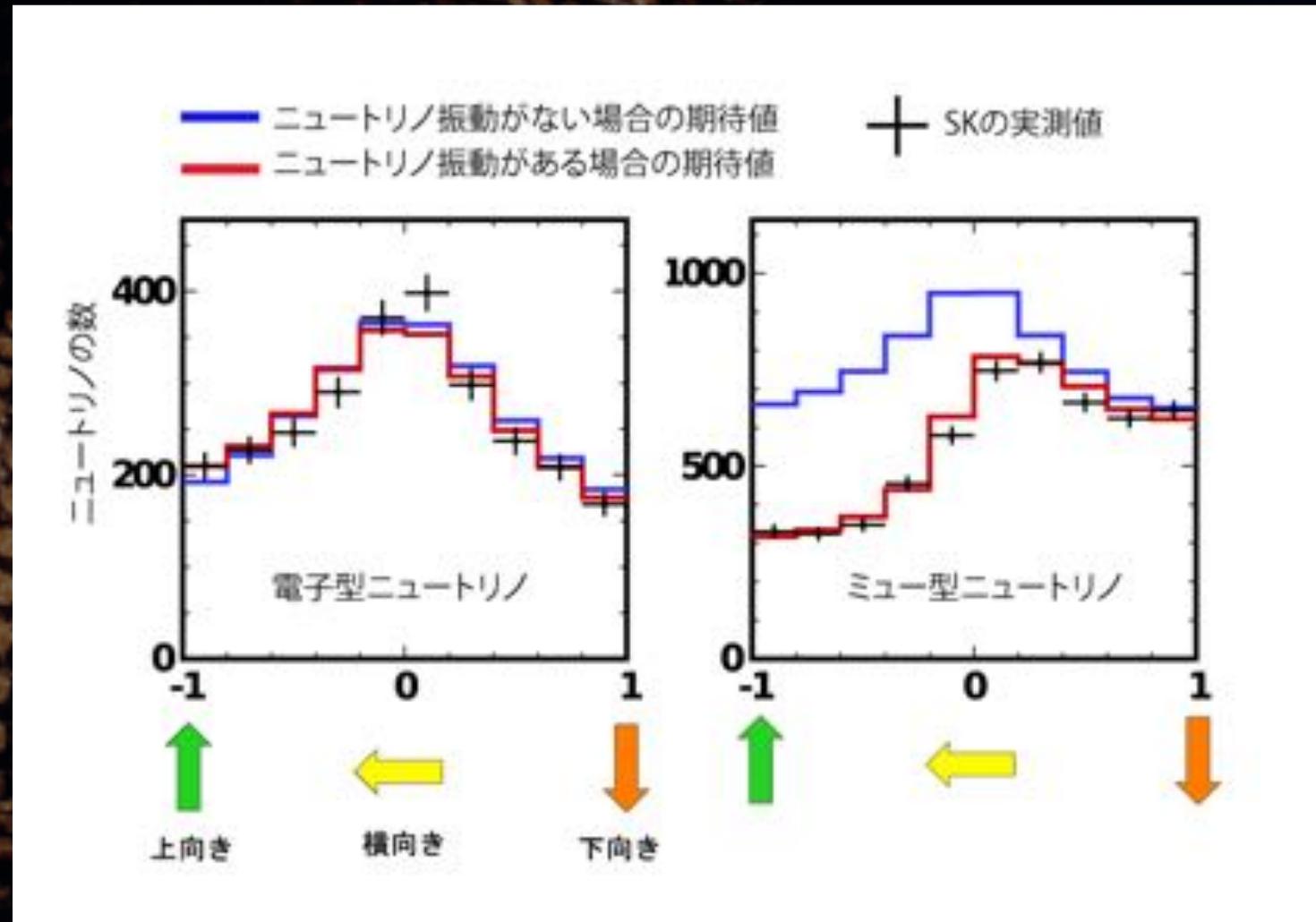
•地球の裏側から来る  
ミューニュートリノ:

理論値の半分

ニュートリノ振動を考慮  
した予想値と一致

•電子型:理論値通り

ミュー型→タウ型と変化



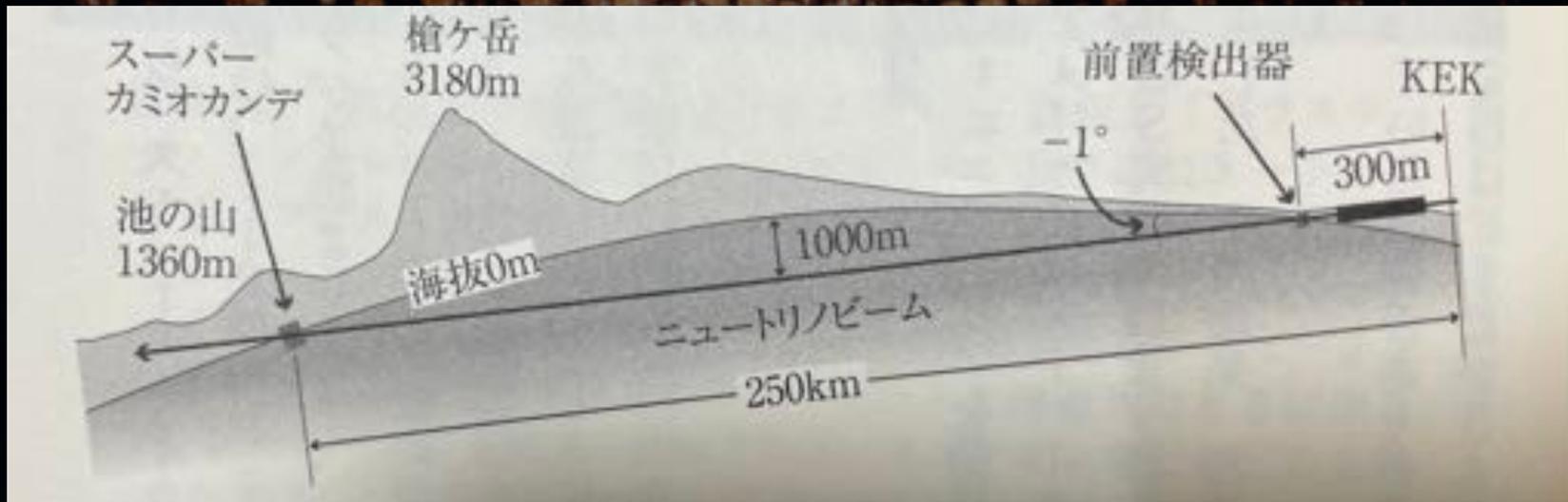
# K2K

ミュー型→タウ型をさらに検証

KEKで人工ニュートリノを生成

予想値:158個

観測値:112個



# T2K

大気ニュートリノ振動: ミュー型 → タウ型

太陽ニュートリノ振動: 電子型 → ミュー型 / タウ型

ミュー型 → 電子型の観測を目指す

東海村からミューニュートリノを飛ばす

予想値: 5個 観測値: 28個

→ 電子ニュートリノの出現を捉えた!

# OPERA実験

CERN(スイス)→グランサッソ地下実験所(イタリア)

ミューニュートリノ→タウニュートリノ

本当にタウ型に変化しているのか?

タウニュートリノを捕まえることに成功



第3章

これからのニュートリノ振動研究

# 消えた反物質

- 反粒子

粒子と質量が同じで、電荷が反対のもの

反陽子 + 反中性子 + 陽電子 → 反物質

粒子と出会うと対消滅 → 光子 (γ線)

宇宙進化の過程で全て消えた



反銀河?

# 消えた反物質

初めから反粒子が少なかった？

粒子と反粒子は同数だった

物質だけが残るためには

→壊れ方に違い

→粒子の数が上回った

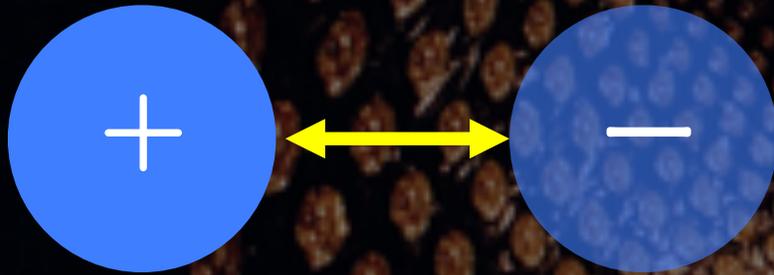
壊れ方の違いがCP対称性の破れによって引き起こされる

では、CP対称性とは？

# CP対称性

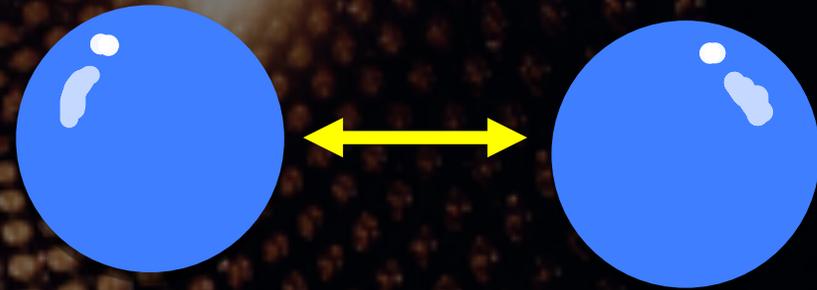
- C対称性

電荷を反対にする対称性



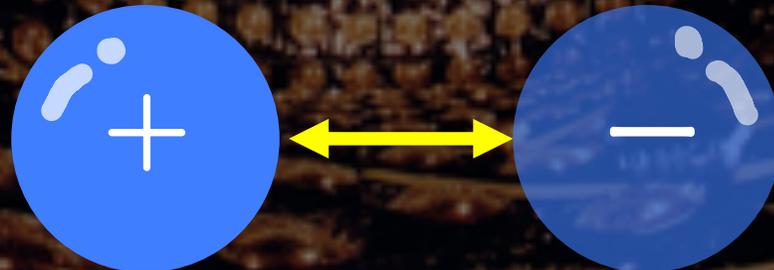
- P対称性

鏡写しにする対称性



- CP対称性

電荷を反対にし、鏡写しにする対称性



# CP対称性の破れ

- ある粒子でCP対称性が破れていることが発見
- 小林・益川理論

クォークが6種類以上あれば、破れが理論的に説明できる

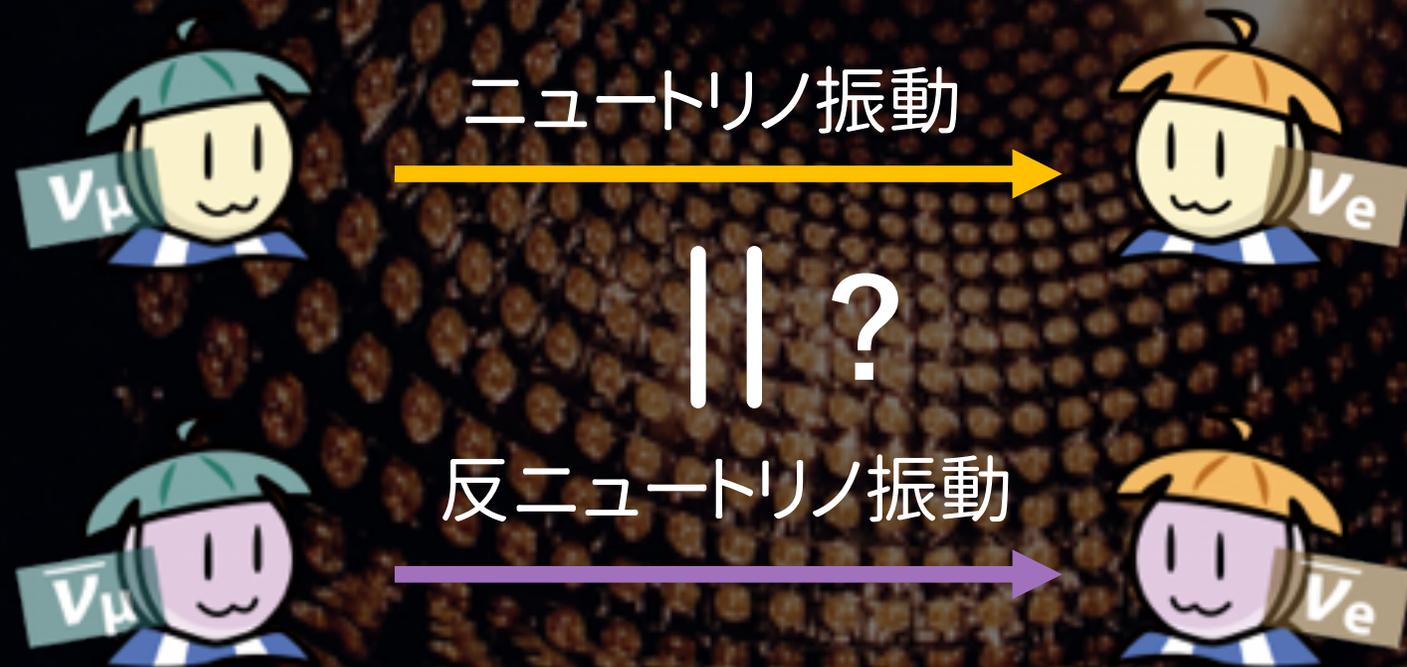
破れのせいで粒子と反粒子の寿命に差

→物質しかない現在の宇宙を説明できる？

→クォークの非対称性だけでは無理がある

# ニュートリノのCP対称性の破れ

- ニュートリノと反ニュートリノに違いはあるか



# 反ニュートリノ実験

・T2K

2016年10月から2017年4月に実験

@スーパーカミオカンデ

電子ニュートリノ 89個

「破れがない」予想値 67個

反電子ニュートリノ 7個

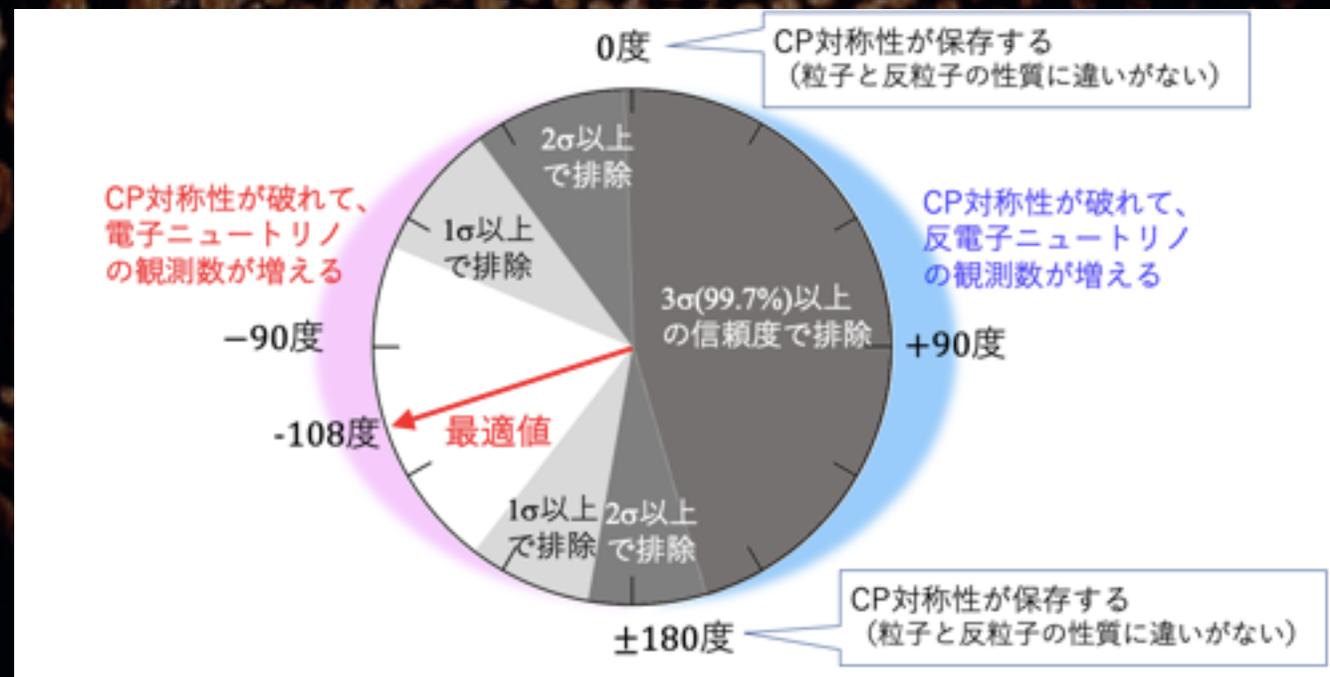
「破れがない」予想値 9個

→ニュートリノでCP対称性が破れている可能性

# CP位相角

## • CP位相角

CP対称性の破れの大きさを決める値。 $-180$ 度 $\sim 180$ 度の値をとり、 $0$ 度と $180$ 度の場合は、CP対称性が保存され、それ以外では破れている。



出典:<http://www.icrr.u-tokyo.ac.jp/news/8798/>

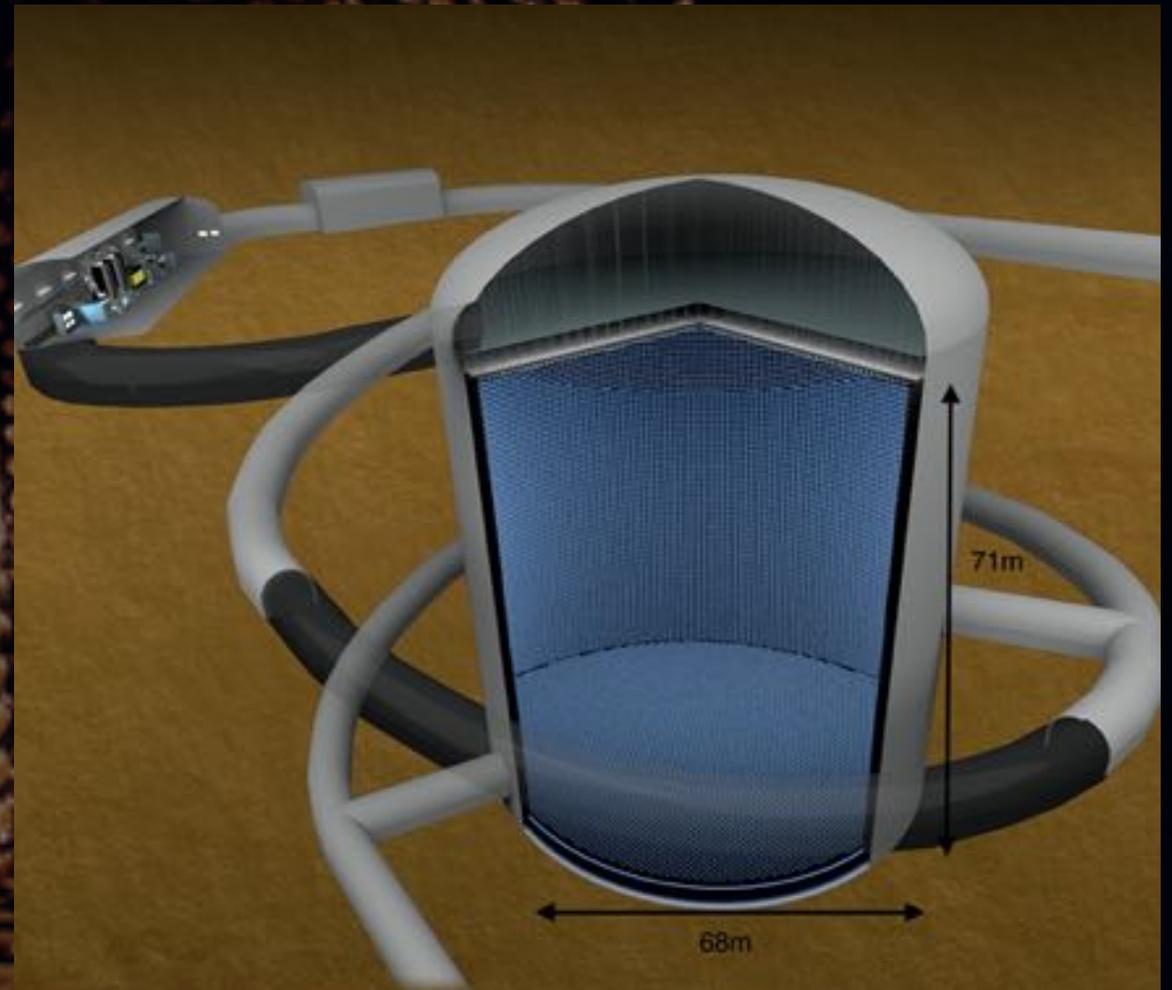
# ハイパーカミオカンデ

直径68m 深さ71m

19万tの超純水

スーパーカミオカンデの約  
10倍の有効体積

破れの発見とメカニズム解  
明への期待



# 参考文献

- 梶田隆章『ニュートリノで探る宇宙と素粒子』2015年 平凡社
- 青野由利『ニュートリノって何?』2016年 ちくまプリマー新書
- 鈴木厚人『ニュートリノでわかる宇宙・素粒子の謎』2013年 集英社
- 『Newtonライト2.0 ゼロからわかる素粒子の超入門書 素粒子』2020年 ニュートンプレス
- 『Newton別冊 クォークから超ひも理論まで 素粒子とは何か』2009年 ニュートンプレス

# 参考文献

- 東京大学宇宙線研究所HP <http://www.icrr.u-tokyo.ac.jp/>  
(最終閲覧日 2021.3.21)
- スーパーカミオカンデHP <http://www-sk.icrr.u-tokyo.ac.jp/sk/index.html>(最終閲覧日 2021.3.21)
- ハイパーカミオカンデHP <http://www.hyper-k.org/index.html>(最終閲覧日 2021.3.21)
- ひっぐすたん <https://higgstan.com/>
- 「原子の構造」 <https://ne.phys.kyushu-u.ac.jp/seminar/MicroWorld/Part2/Part2.htm> (最終閲覧日 2021.3.10)
- 浜松ホトニクス <https://www.hamamatsu.com/jp/ja/index.html> (最終閲覧日 2021.3.21)