The background features a dark blue gradient with a starry pattern. Overlaid on this are several white circular elements: a large scale on the left with numerical markings from 150 to 260, and several smaller circles with arrows indicating clockwise or counter-clockwise rotation. The main title is centered in a large, white, sans-serif font.

ニュートリノ

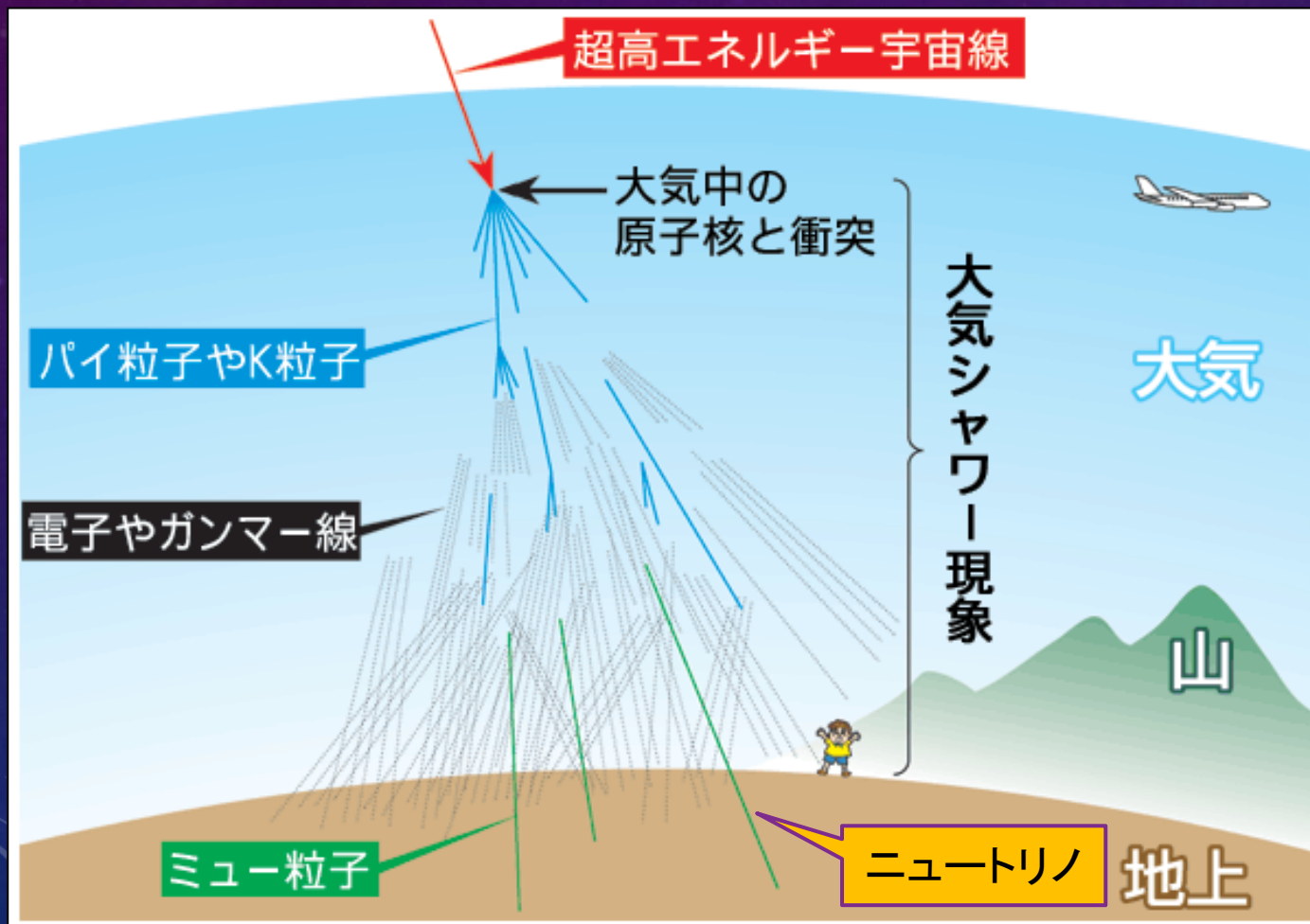
名古屋大学 宇宙地球環境研究所 / 素粒子宇宙起源研究所

教授 伊藤好孝

愛知県立岡崎高校 総合学習

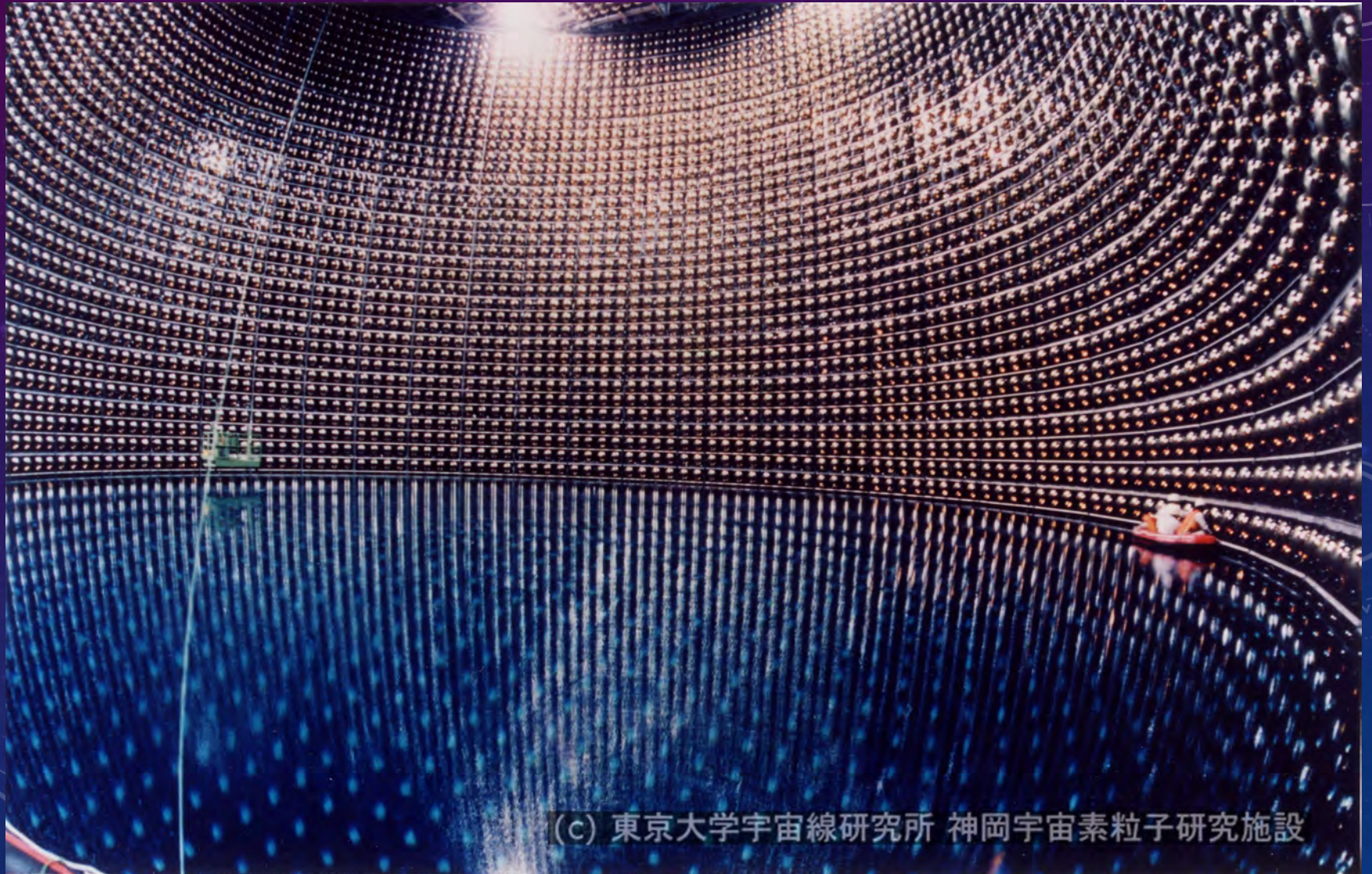
2021年8月2日(月)

宇宙線研究部の研究:「宇宙線」



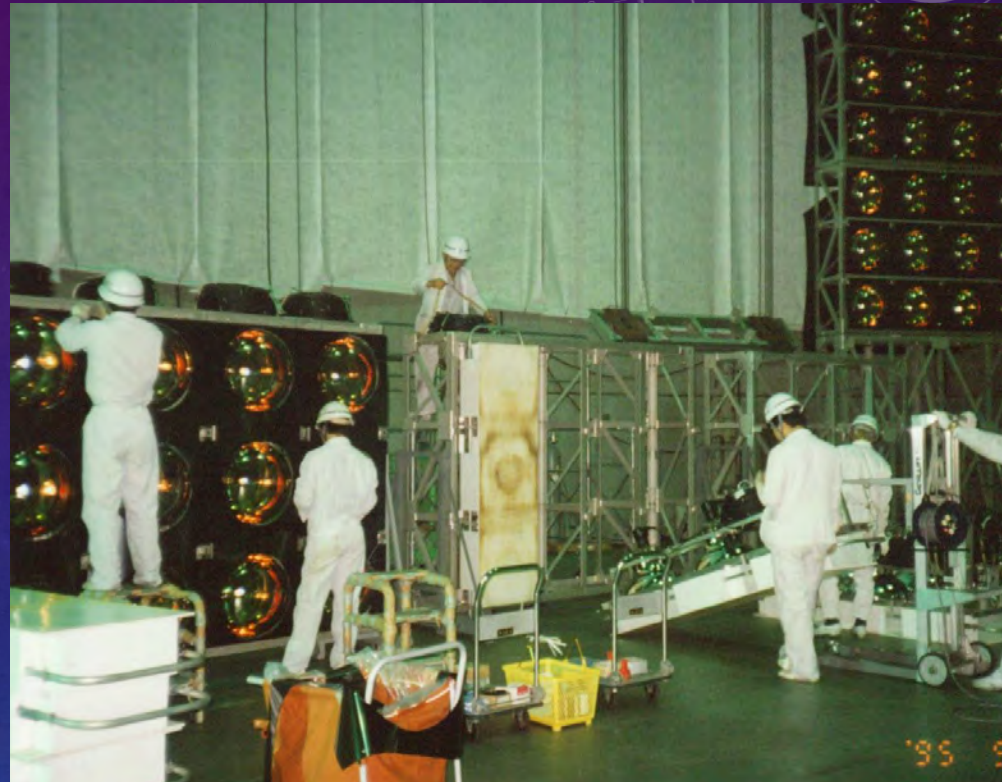
40kmの大気
(=10mの水)

スーパーカミオカンデ(岐阜県飛騨市神岡町) 直径・高さ40M水タンクと1万2千本の光センサー



(c) 東京大学宇宙線研究所 神岡宇宙素粒子研究施設

自己紹介: スーパーカミオカンデを作っていた頃(1995年)



私(伊藤): 1995-2004年

東大宇宙線研神岡宇宙素粒子研究施設に在籍

スーパーカミオカンデ建設に携わり、梶田さんと大気ニュートリノ振動を研究する。

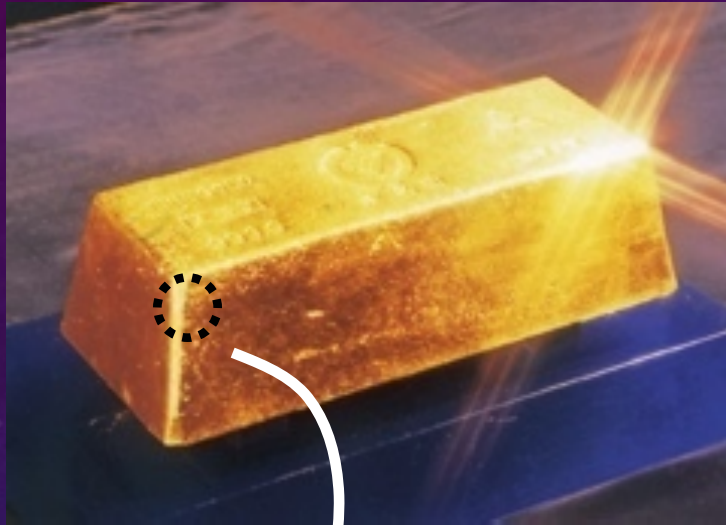
その後、加速器長基線ニュートリノ振動実験、2004年から名大へ。

ニュートリノとは？

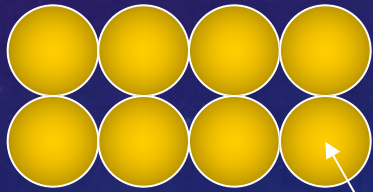
 ニュートリノ

 電子の兄弟

物質をばらばらにしていくと

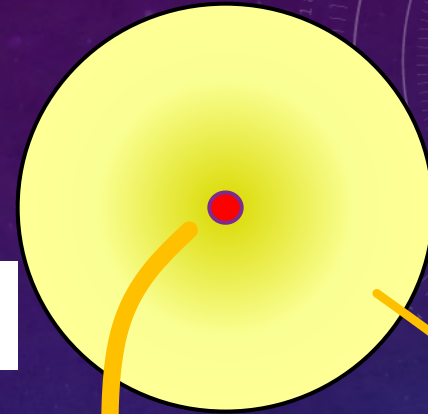


拡大すると



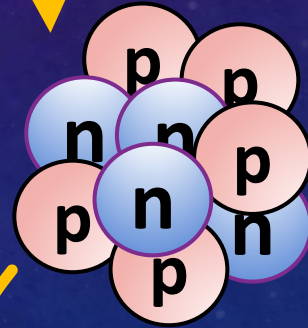
金原子

金の原子



10^{-10} m

金の原子核



10^{-14} m

陽子と
中性子



10^{-15} m

10^{-18} m 以下

最小の単位 = 素粒子

クォーク



電子



ニュートリノを予言した人、見つけた人

ヴォルフガング・パウリ



<https://mathshistory.st-andrews.ac.uk/Biographies/Pauli/>

1930年頃
ニュートリノを予言

フレデリック・ライネスと
クライド・コーワン



Physics Dept., Univ. of California, Irvine

1956年、
原子炉からのニュートリノを実験的
に検出
(1995年ノーベル物理学賞受賞)

ベータ崩壊のナゾ

飛び出すエネルギーは
いつも同じはず

親原子核



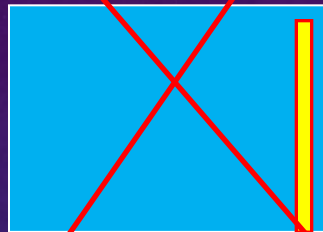
原子核



電子



電子ニュートリノエネルギー分布



親原子核



原子核



ニュートリノ



電子



パウリ



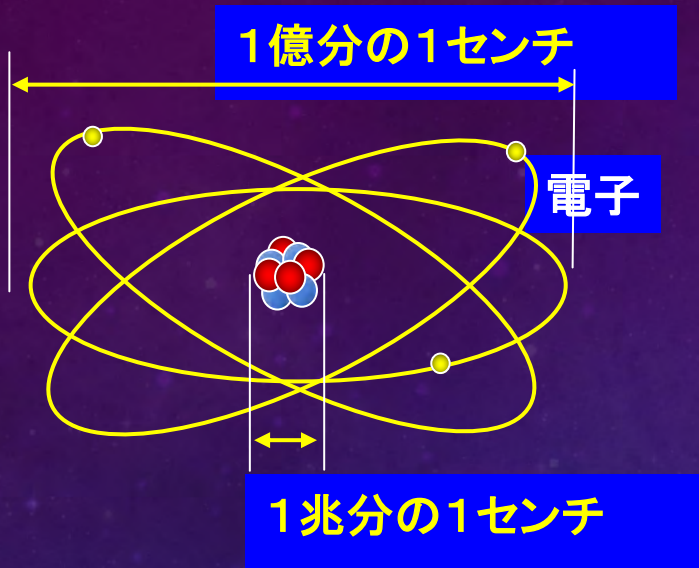
エネルギーが保存
していないのかも！

見えない粒子がもう1個
放出されてるんでは？

ボーア



ニュートリノとは



電子



ニュートリノ

- マイナスの電気を帯びる
- 電流の正体

電子の相棒

- 電気を帯びていない
- ずっと軽い
- なかなか衝突しない

なぜか3種類ある

ニュートリノにはたくさんの謎がある

① ほとんど物質と反応しない

ニュートリノは物質とめったに反応しない



地球を50億個並べる(7光年の長さ)

ニュートリノは、この間にやっと1回反応する程度

しかし、たくさんニュートリノがあれば、小さな物体でもどれかは希に反応する。

ニュートリノにはたくさんの謎がある

- ① ほとんど物質と反応し(ない)
- ② (他の素粒子と比べても)とても軽い

素粒子の“重さ”

■ 水素原子

- アボガドロ数 (6×10^{23}) 個集まると1gになる
- 大部分は陽子の重さ

■ 電子の重さ

- 陽子の2000分の1
- 比電荷の測定と電荷素量の測定

■ ニュートリノは電子の50万分の1よりさらに軽い

- 軽すぎて測定不能だった。



水素原子

ニュートリノにはたくさんの謎がある

- ① ほとんど物質と反応し(ない)
- ② (他の素粒子と比べても)とても軽い
- ③ なぜか左巻き粒子しか存在しない

物質と反物質（粒子と反粒子）



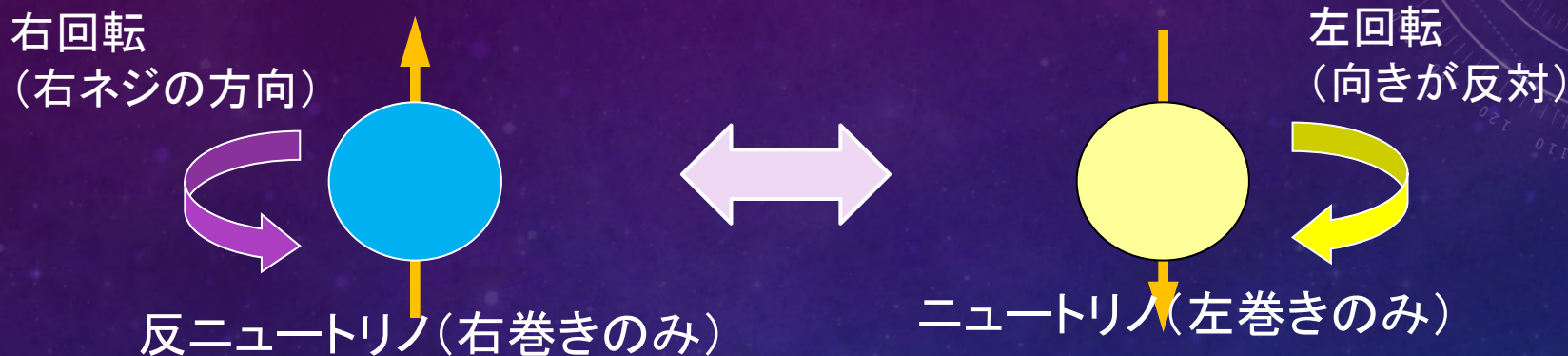
反粒子を予言したディラック



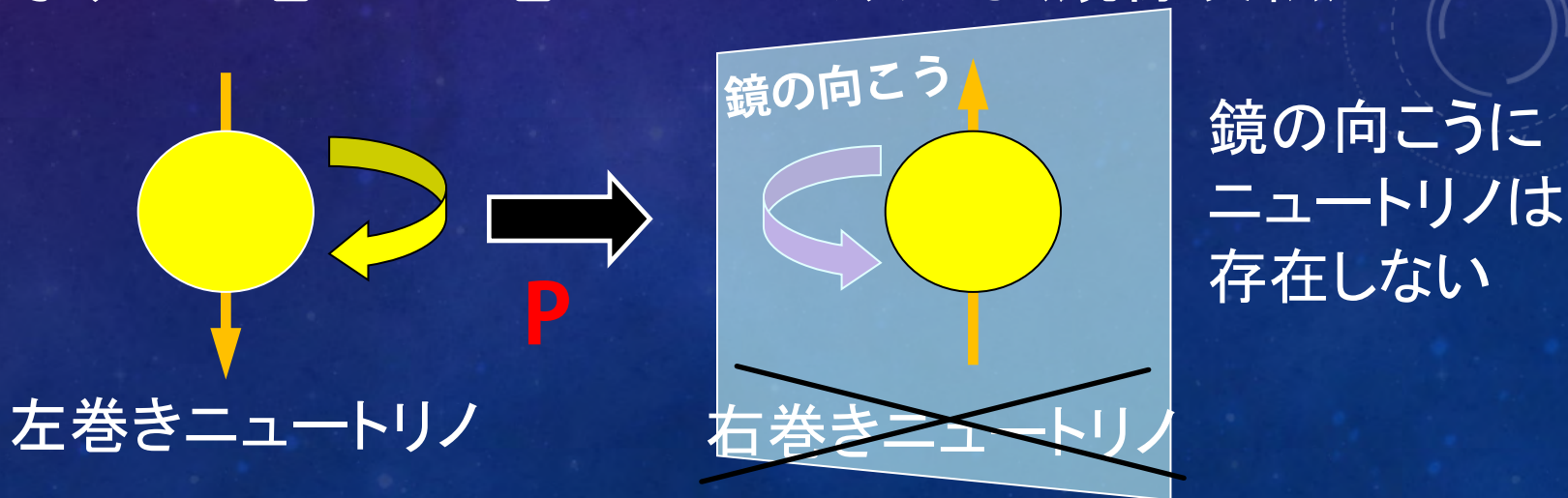
- すべての素粒子には電荷が反対な他はまったく同じ性質の「反粒子」がある
- 光から「対生成」する。
- 「対消滅」して光になる。
- 宇宙の始まり(ビッグバン)の時には、粒子と反粒子は同数生まれたはず(だが...)

右巻き、左巻き、とパリティ(鏡像)対称性

- 素粒子には“回転”の性質がある



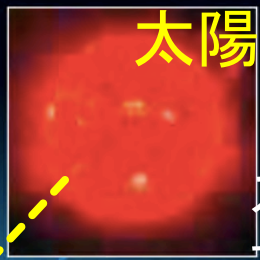
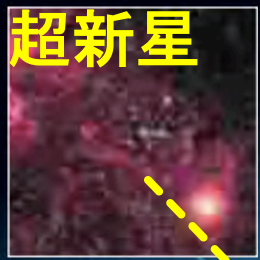
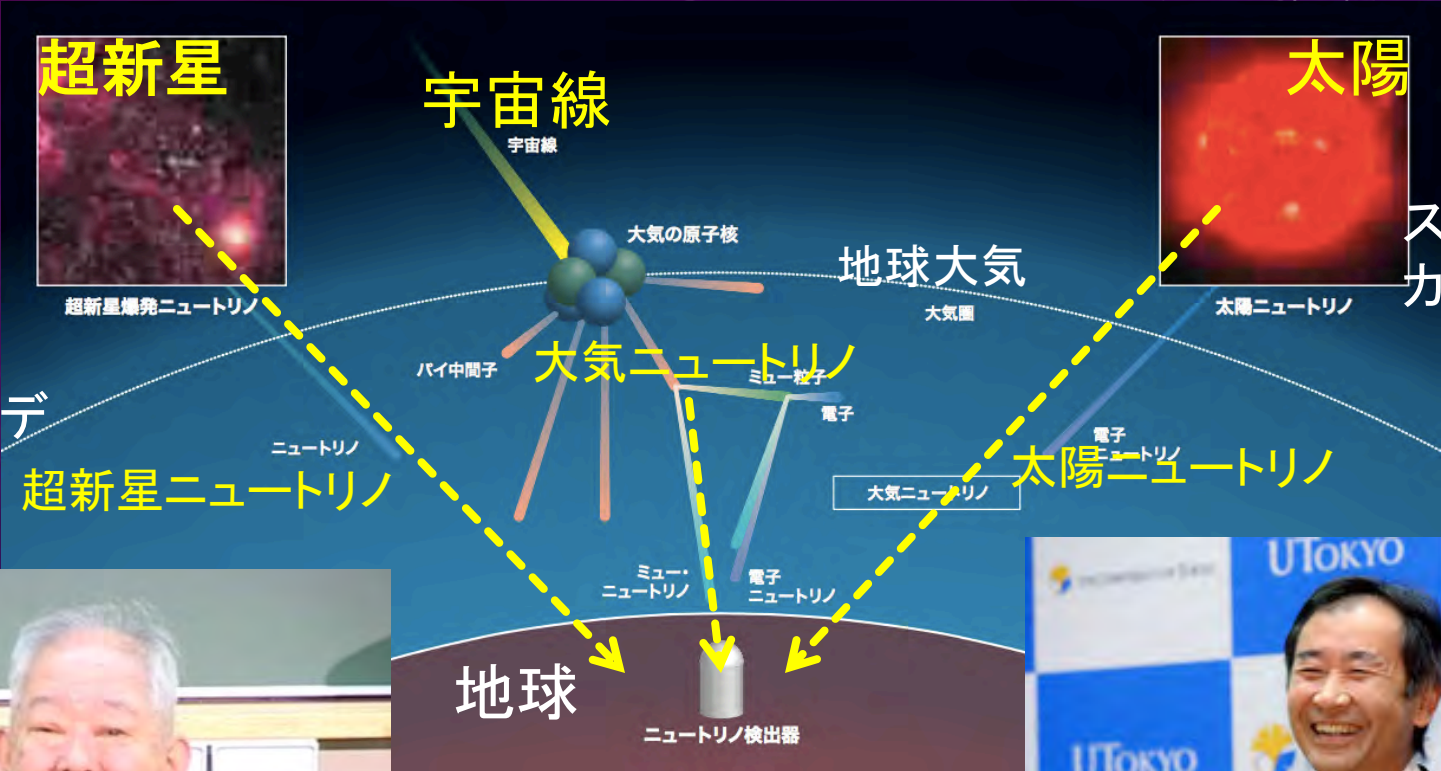
- 鏡に写すと右巻きと左巻きがひっくり返る(鏡像反転)



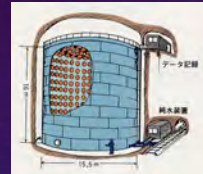
ニュートリノにはたくさんの謎がある

- ① ほとんど物質と反応し(ない)
- ② (他の素粒子と比べても)とても軽い
- ③ なぜか左巻き粒子しか存在しない
- ④ 宇宙の至る場所で生まれ、存在する

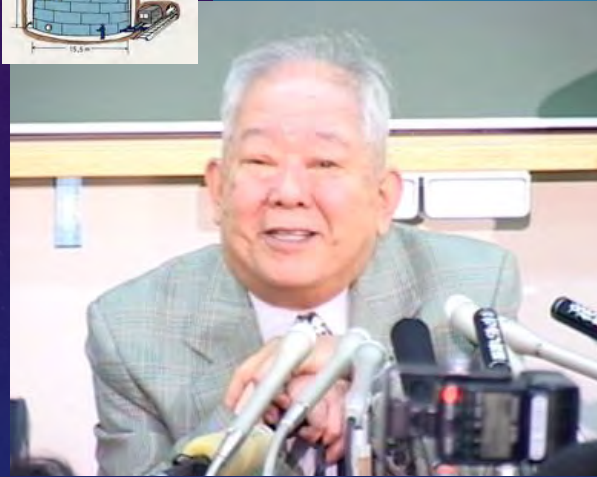
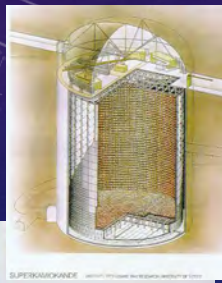
さまざまなニュートリノ観測



カミオカンデ



スーパーカミオカンデ



http://www-sk.icrr.u-tokyo.ac.jp/nobel2002/index_j.htm

小柴昌俊
2002年ノーベル物理学賞
「太陽ニュートリノ、超新星ニュートリノ」



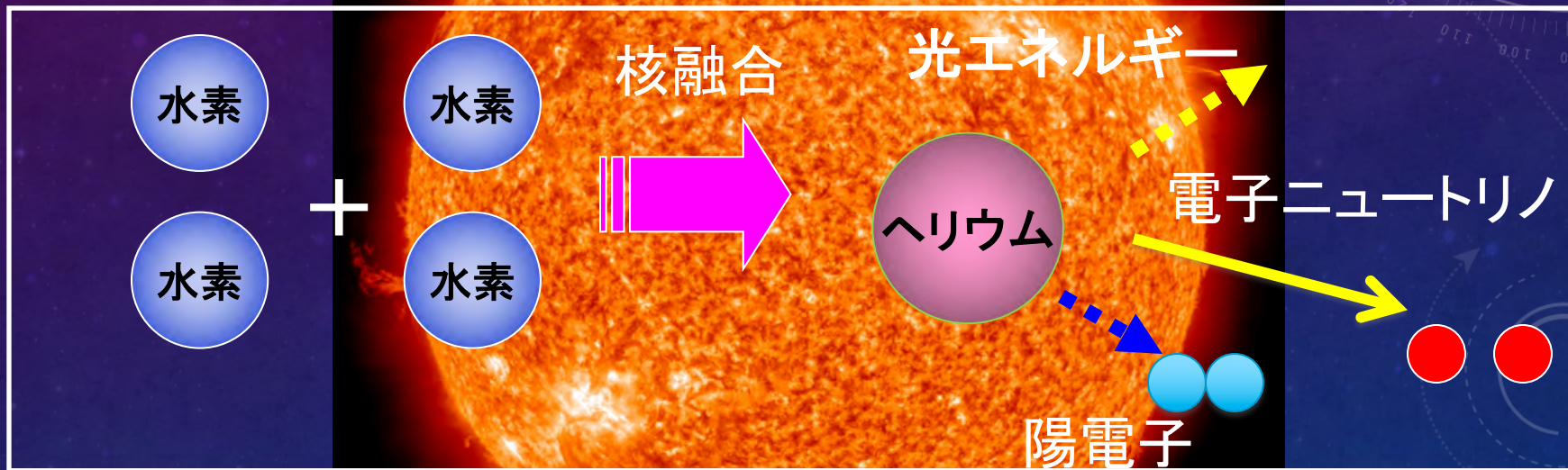
<https://www.asahi.com/articles/photo/AS20151006005040.html>

梶田隆章
2015年ノーベル物理学賞
「大気ニュートリノ振動発見とそれによるニュートリノ質量の発見」

<https://www.s.u-tokyo.ac.jp/ja/info/4512/>を改変

地球に対する最も強いニュートリノ源は？

NASA's Solar Dynamics Observatory

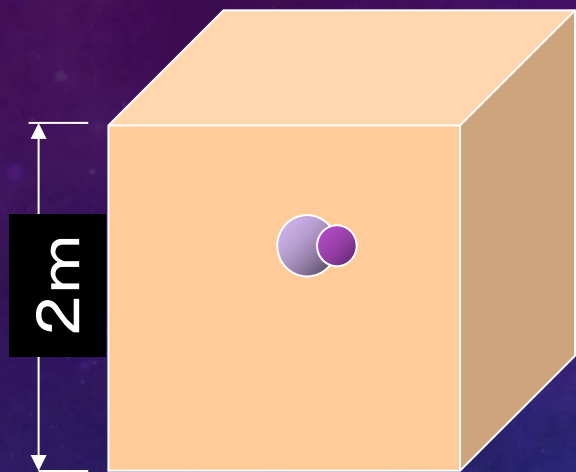


太陽からのニュートリノの数

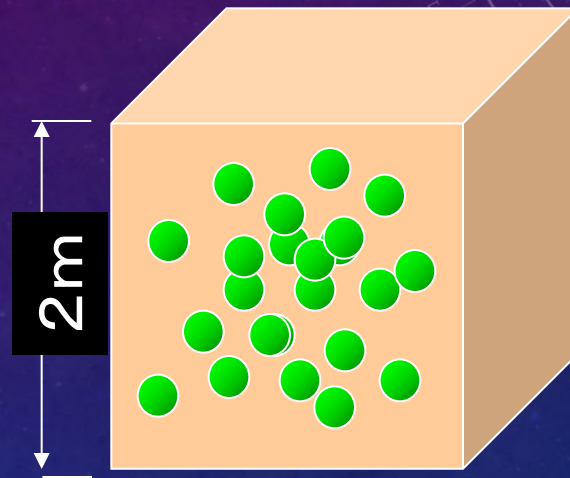
~660億 個/秒/cm²

宇宙空間にニュートリノはどれくらいあるか？

● 陽子と電子は2mの箱に1個ずつ



● ニュートリノは数10億個！

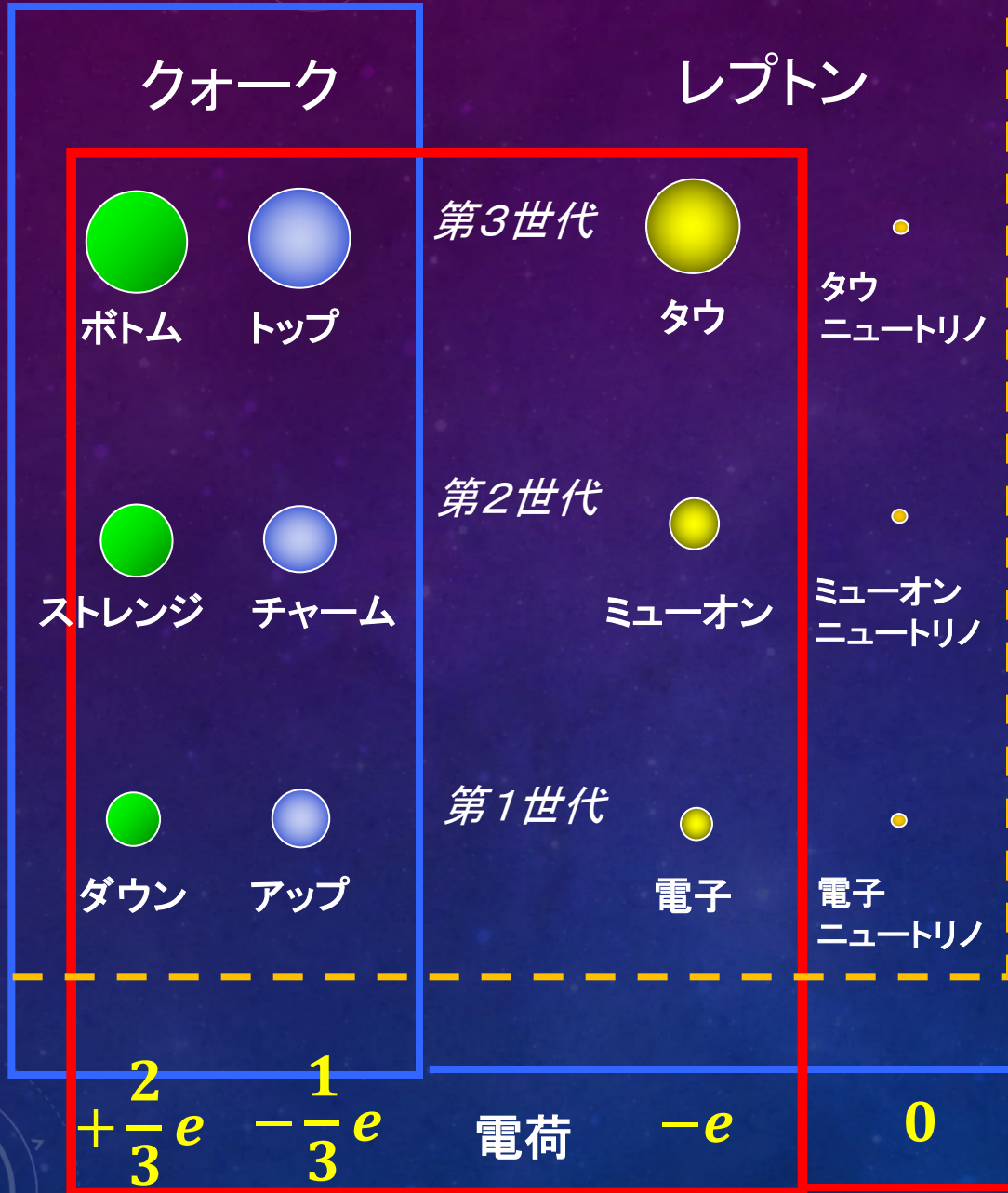


ビッグバンの時に生まれ、宇宙に満ち溢れるニュートリノ

ニュートリノにはたくさんの謎がある

- ① ほとんど物質と反応しない
- ② (他の素粒子と比べても)とても軽い
- ③ なぜか左巻き粒子しか存在しない
- ④ 宇宙の至る場所で生まれ、存在する
- ⑤ なぜか3種類あり、飛行中に互いへ変身する
(ニュートリノ振動)

物質を作る素粒子と 感じる4種類の力



重力

弱い力

β -崩壊

電磁気力

森羅万象

強い力

原子核力

弱い

強い



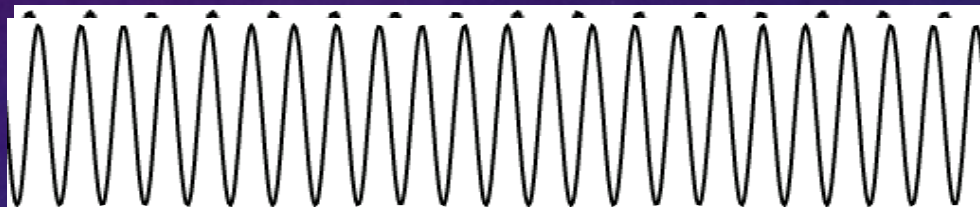
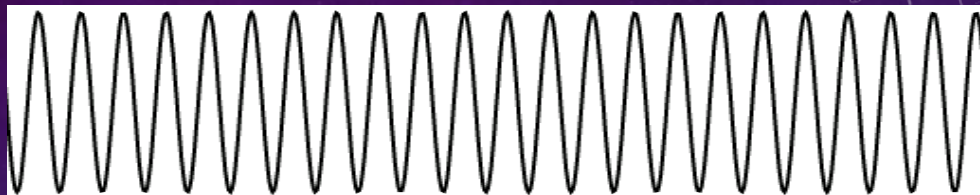
ニュートリノ振動の直感的説明(音のうなり)

● と ● の質量が 同じなら、「波長」が同じである

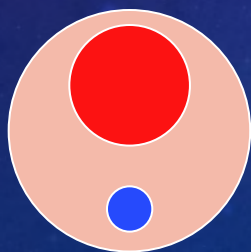
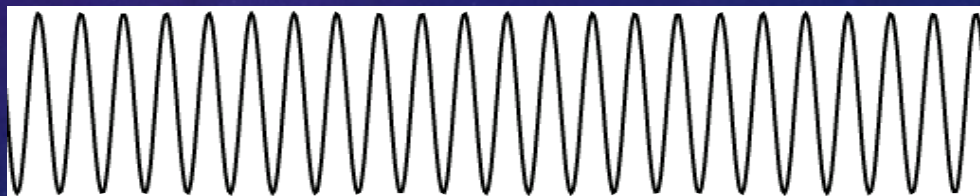
違うと、「波長」が異なる

波の伝播

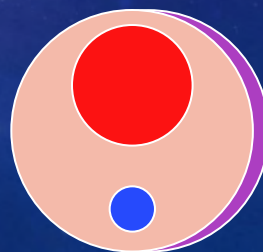
時間



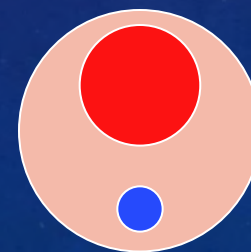
合成した波
(うなり)



ミューニュートリノ

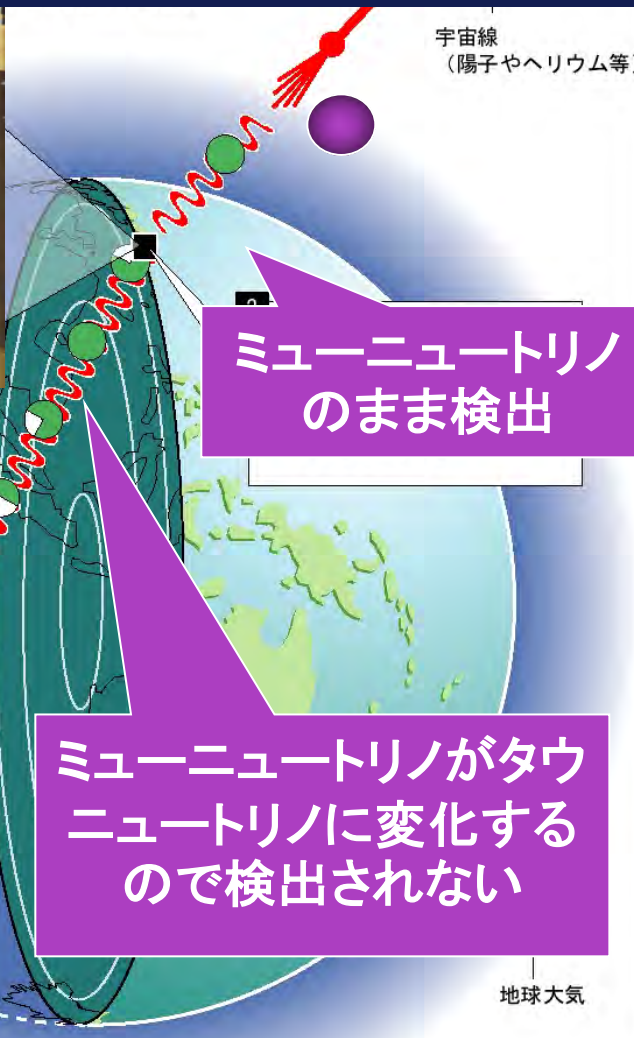


ミューニュートリノ



ミューニュートリノ

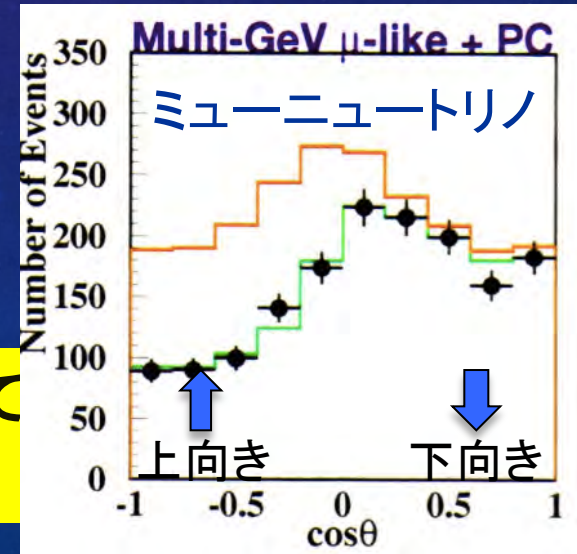
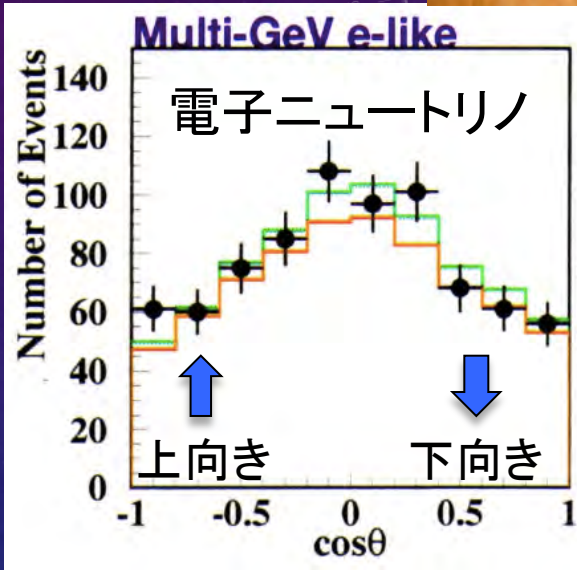
大気ニュートリノ振動の発見



ミューニュートリノのまま検出

ミューニュートリノがタウニュートリノに変化するので検出されない

ミューニュートリノが飛行距離によって反応しにくいタウニュートリノへ変化



地下でのニュートリノ観測

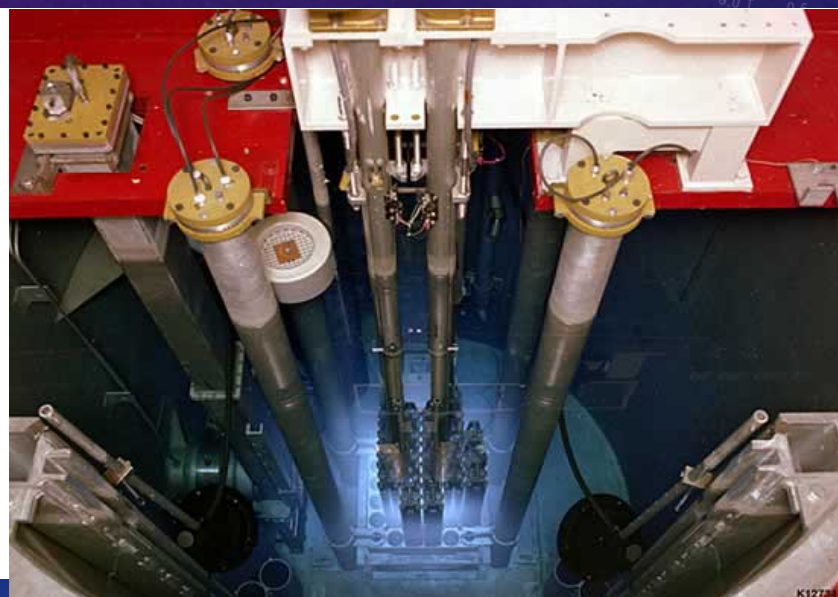


チェレンコフ光の観測

物質中を走る電荷: (物質中の)光速を超えると進行方向へ光放出
(水中での光速 = c/n , $n=1.33$:水の屈折率)

ニュートリノ自体は
直接観測できないが...

チェレンコフ光で青白く光って
見える原子炉の炉心

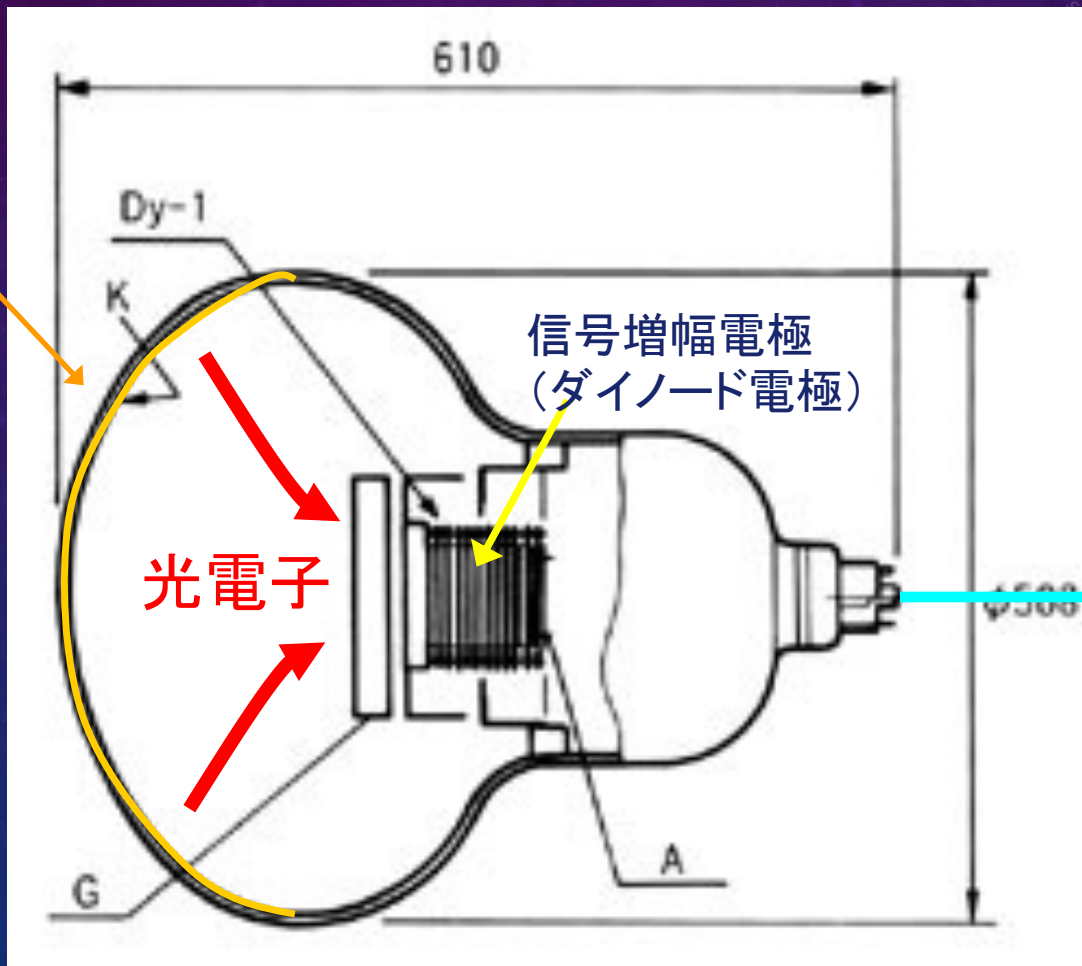


ニュートリノが水と反応して作る電荷を持った粒子は、
水中でチェレンコフ光をリング状に放出。

光電子増倍管

光電面
(光から電子へ)

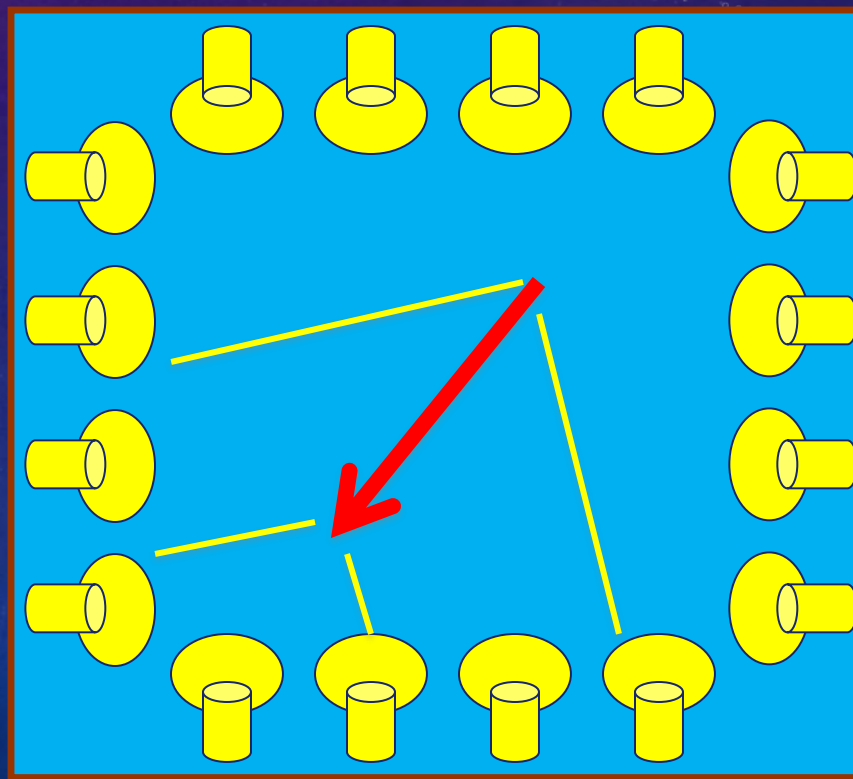
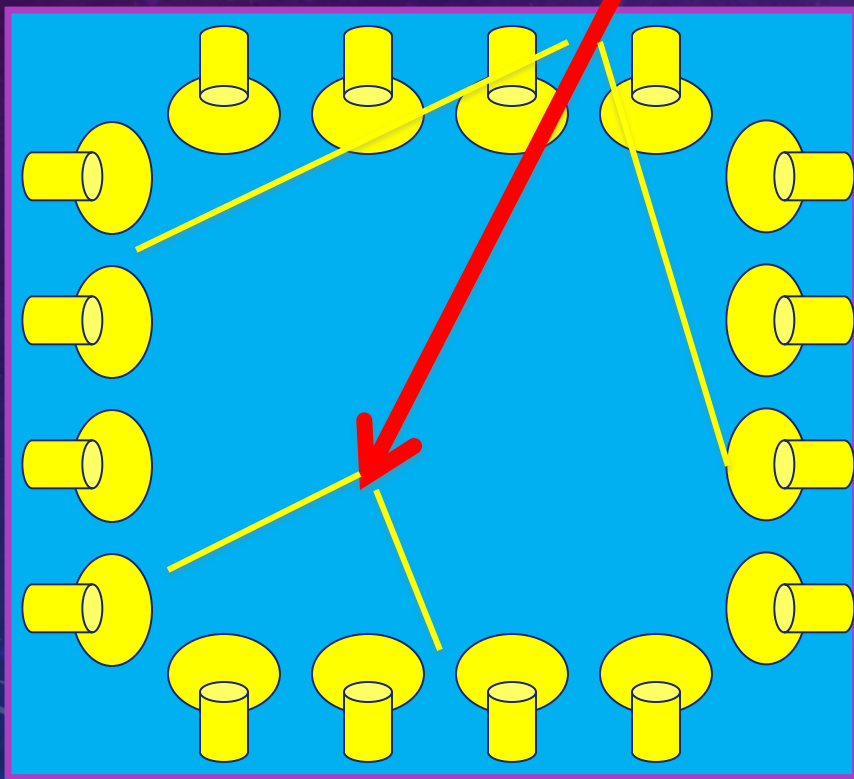
光



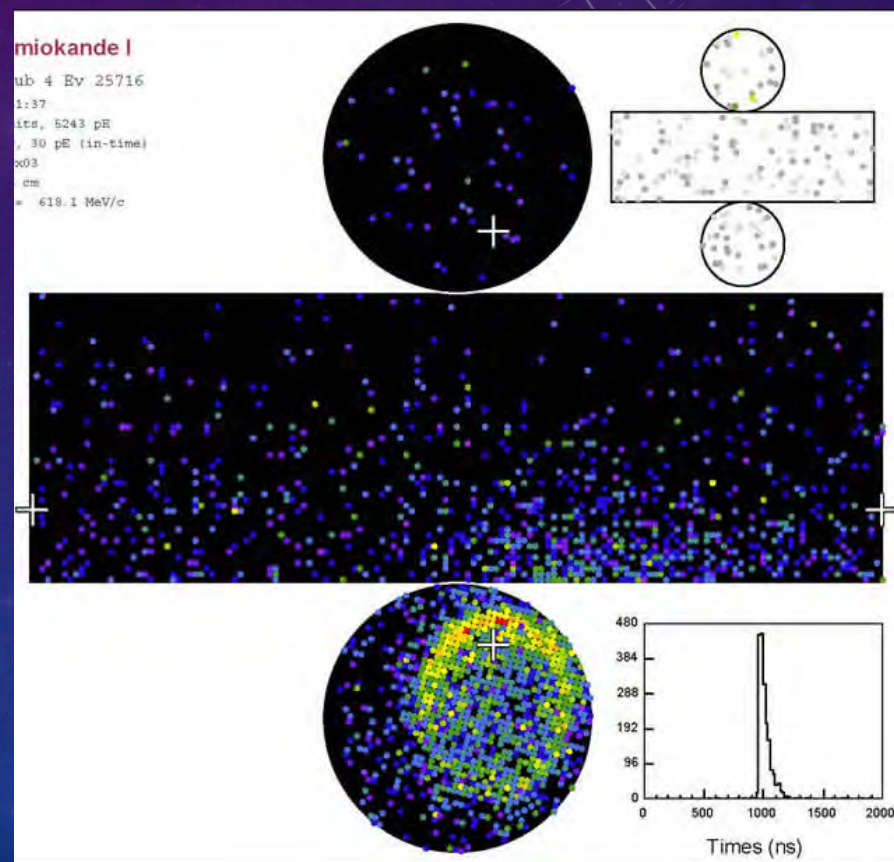
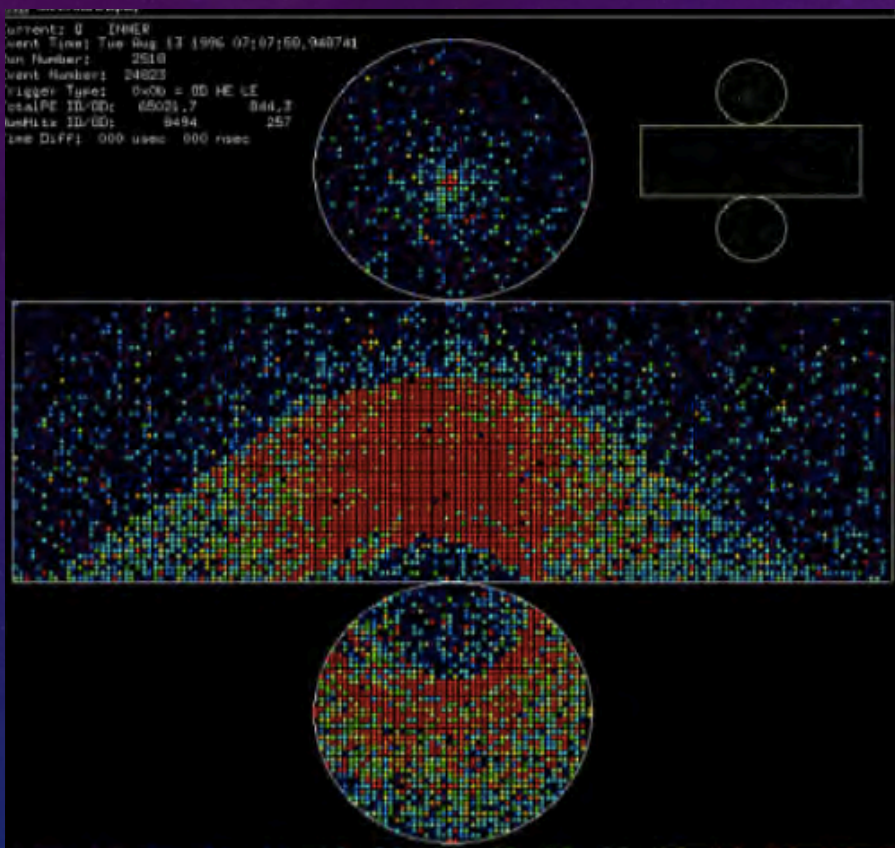
電気信号

ニュートリノと外部放射線の識別

- リングのパターンと光子の到来時刻から光の放射開始位置を識別



(外部からの)宇宙線とニュートリノの チェレンコフ光リングの違い

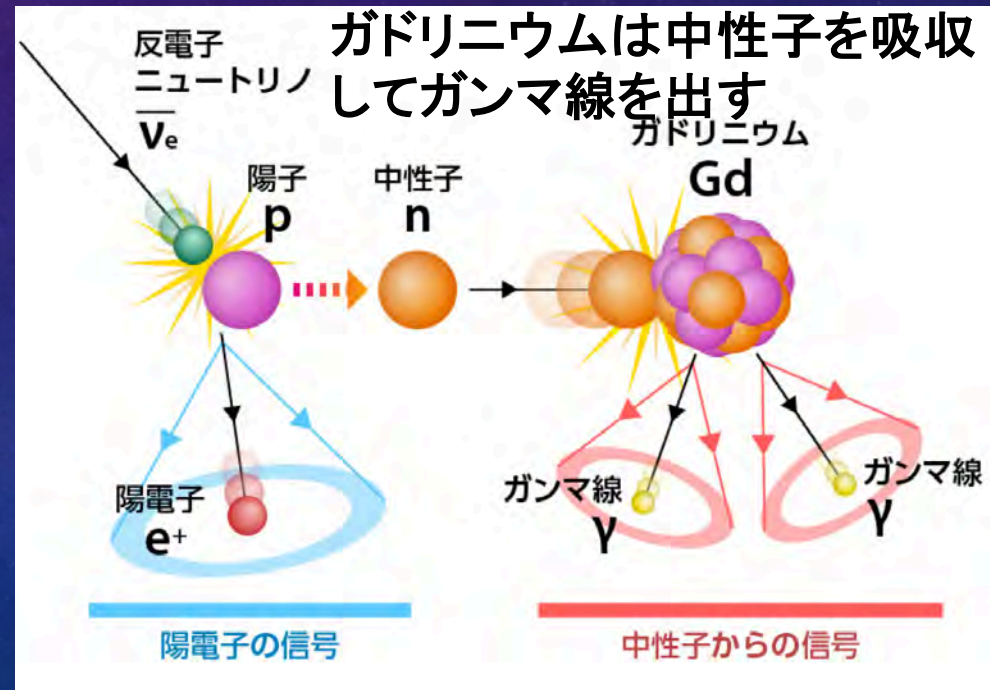
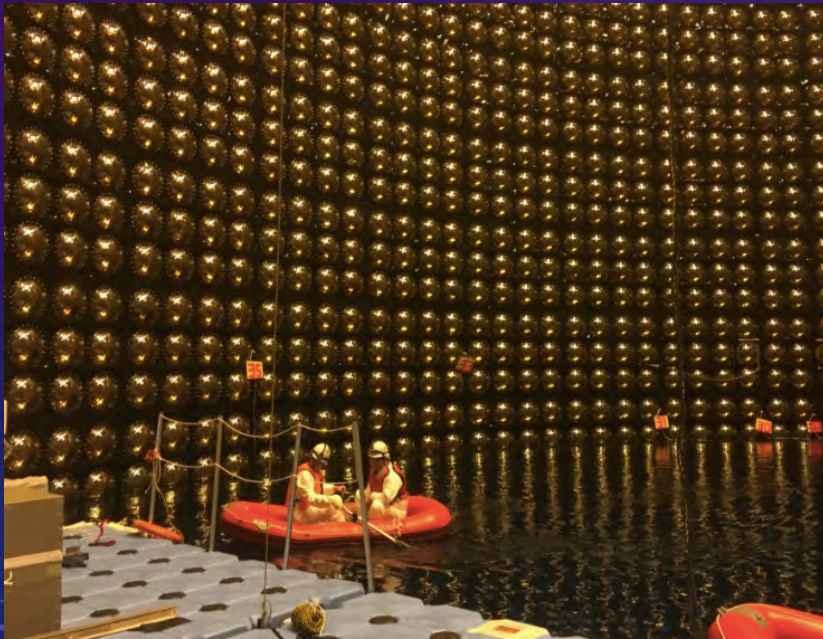


タンク外からの宇宙線ミュオン

ニュートリノによりタンク内で
作られた荷電粒子

SK-Gd計画

- スーパーカミオカンデの水に中性子捕獲断面積の大きいガドリニウム塩を溶かす ($Gd_2(SO_4)_3$ 0.01%)
- 反電子ニュートリノ反応からの中性子をもっと確実に捕まえる
- 2018夏、スーパーカミオカンデのタンク改修作業
- 2020年8月、水中にGdを添加完了！



スーパーカミオカンデホームページより

<http://www-sk.icrr.u-tokyo.ac.jp/sk/news/2020/08/sk-gd-detail.html>

未来への課題：消えた反物質のなぞ

- 光から「物質」・「反物質」が同数生まれたのなら、なぜすべて対消滅して光にもどってしなわないのか？
- 「物質」と「反物質」が宇宙の別々の場所に存在して出会わないからだろうか？
- しかし、反物質のみでできた反宇宙は見つかっていない
- 粒子と反粒子の振る舞いの差(CP非対称性)にヒント？

小林誠



益川敏英



2008年ノーベル物理学賞受賞

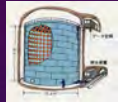
CP対称性の破れを説明するため、
素粒子が3世代あると予言した事に対して

(残念ながら益川さんは先日(7/23)亡くなりました。
謹んでご冥福をお祈りします。)

26万トンニュートリノ検出器 ハイパーカミオカンデ2020年建設開始！

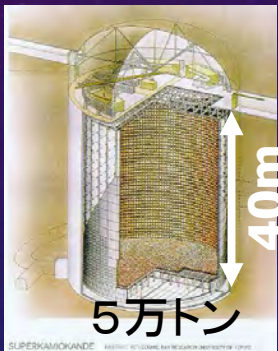
スーパーカミオカンデの8倍の有効体積

カミオカンデ



10m

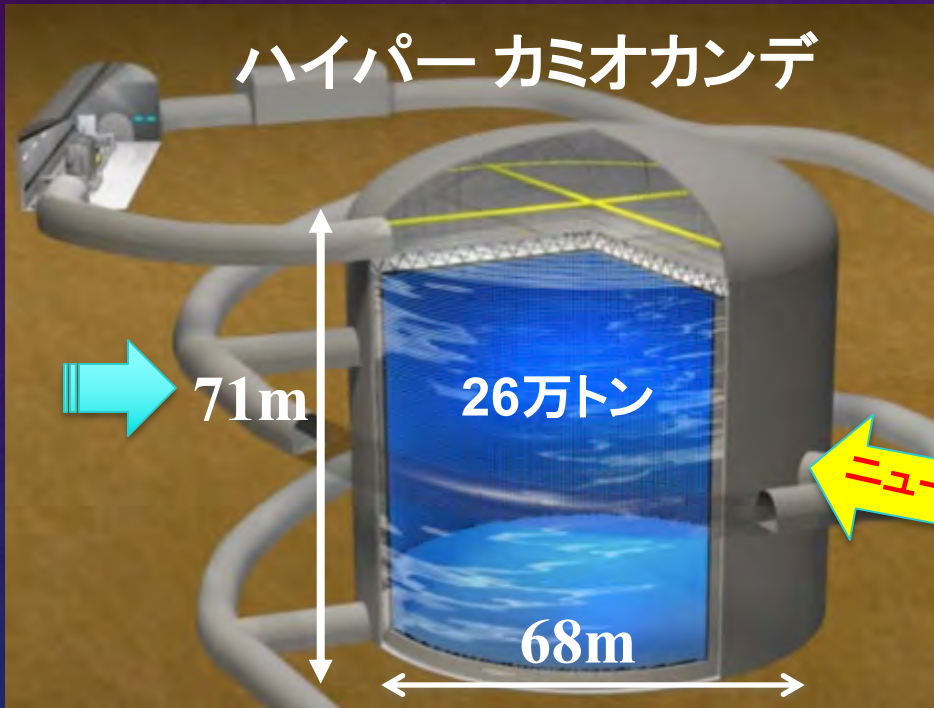
3千トン



40m

5万トン

スーパー
カミオカンデ



ハイパー カミオカンデ

71m

26万トン

68m

人工のニュートリノビーム
を打ち込む

茨城県東海村
J-Parc加速器



ニュートリノビーム

提供JAEA/KEK J-PARCセンター

→ニュートリノをつかって、
物質と反物質の謎を解き明かす



ニュートリノ振動のCP非対称性
陽子崩壊の発見

ハイパーカミオカンデ建設中

©ハイパーカミオカンデ研究グループ
(東京大学宇宙線研究所HPより)



おしまい

質問をどうぞ