

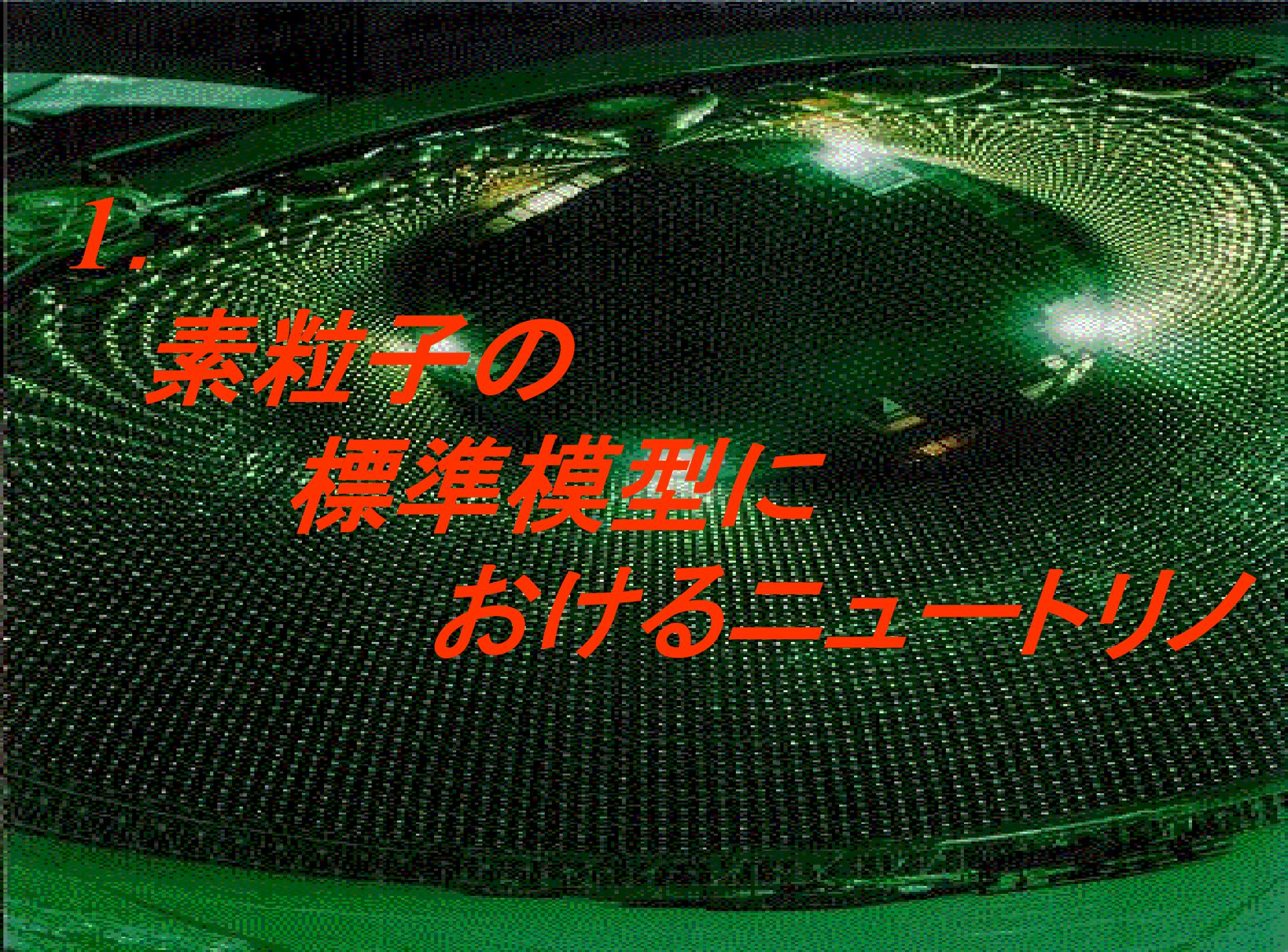
新しい素粒子像へ開かれた窓

— ニュートリノ振動から見えてくるもの —

金沢大学自然科学研究科
物質構造科学専攻
末松大二郎

内容

1. 素粒子の標準模型におけるニュートリノ
2. ニュートリノ振動とは何か
3. スーパーカミオカンデでの観測
4. 新しい素粒子像へ向けて

An aerial night photograph of a city, likely Tokyo, with a large circular arena in the center illuminated in green. The arena is surrounded by a dense grid of lights, and the surrounding city lights are visible in the background.

1.

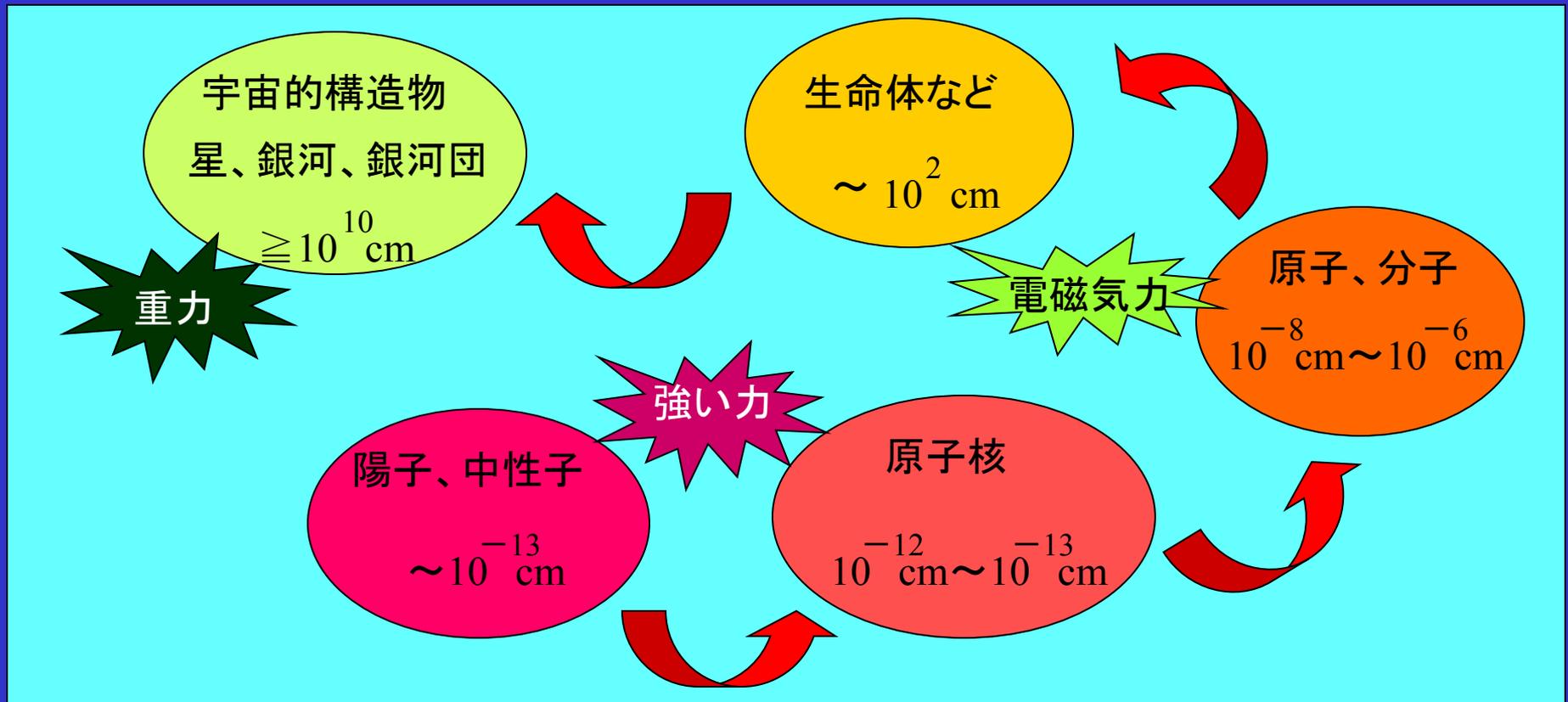
素粒子の

標準模型に

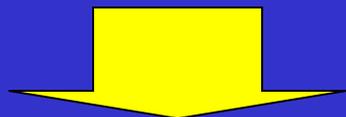
おけるニュートリノ

19世紀から20世紀にかけての物理学の研究 物質の究極構造の解明

階層構造をなす自然界



物質の究極構造 への分解



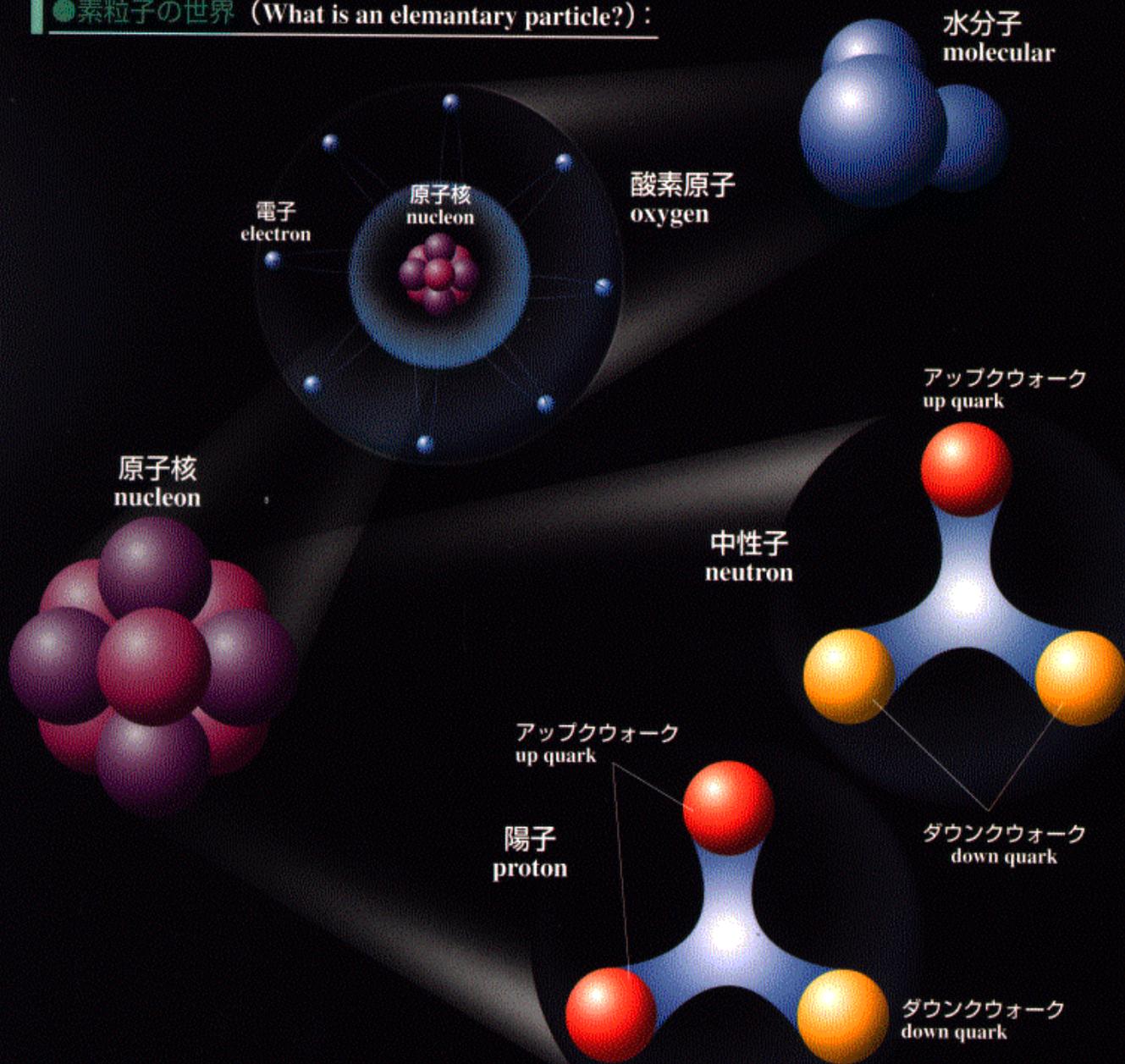
素粒子の世界

粒子が
常時
生成、消滅を
繰り返す世界

そこで

どんな構成要素が？
どんな力が？

●素粒子の世界 (What is an elementary particle?):



階層構造の理解

重力、電磁気力、強い力

束縛力

銀河、星、生命体、
分子、原子、原子核...

構造形成

自然界に存在する4つの力の理解

- ★ 物質の究極構造の解明
- ★ 力の性質の解明

素粒子物理学の研究対象

初期宇宙

高温高密度
素粒子のスープ

ビッグバンと宇宙膨張
力と物質構造の進化

現在の宇宙
150億年

宇宙的構造物
星、銀河、銀河団
 $\geq 10^{10}$ cm

生命体など
 $\sim 10^2$ cm

原子、分子
 10^{-8} cm \sim 10^{-6} cm

陽子、中性子
 $\sim 10^{-13}$ cm

原子核
 10^{-12} cm \sim 10^{-13} cm

素粒子の研究は現在の宇宙の構造解明にもつながる

現在の素粒子像 標準模型

素粒子の分類: 質量、スピン、内部量子数

ゲージ粒子 (スピン 1)

物質粒子 (スピン 1/2)

相互作用	束縛力?	力を媒介する 粒子	物質粒子		
			クォーク	レプトン	
			u c t d s b	e μτ	$\nu_e \nu_\mu \nu_\tau$
強い力	○	グルオン	○	×	×
電磁気力	○	光子	○	○	×
弱い力	×	ウィークボゾン	○	○	○
重力	○	重力子	○	○	○

ヒッグス粒子 (スピン 0)

重力子 (スピン 2)

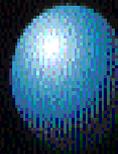
物質粒子の家族構成

第一世代 (first)

第二世代 (second)

第三世代 (third)

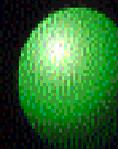
レプトン
LEPTON



電子ニュートリノ
electron neutrino



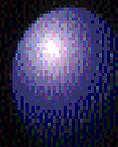
ミューニュートリノ
muon neutrino



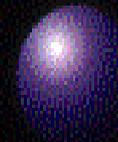
タウニュートリノ
tau neutrino



電子
electron



ミューオン
muon



タウオン
tauon

クォーク
QUARK



ダウン
down



ストレンジ
strange



ボトム
bottom



アップ
up



チャーム
charm

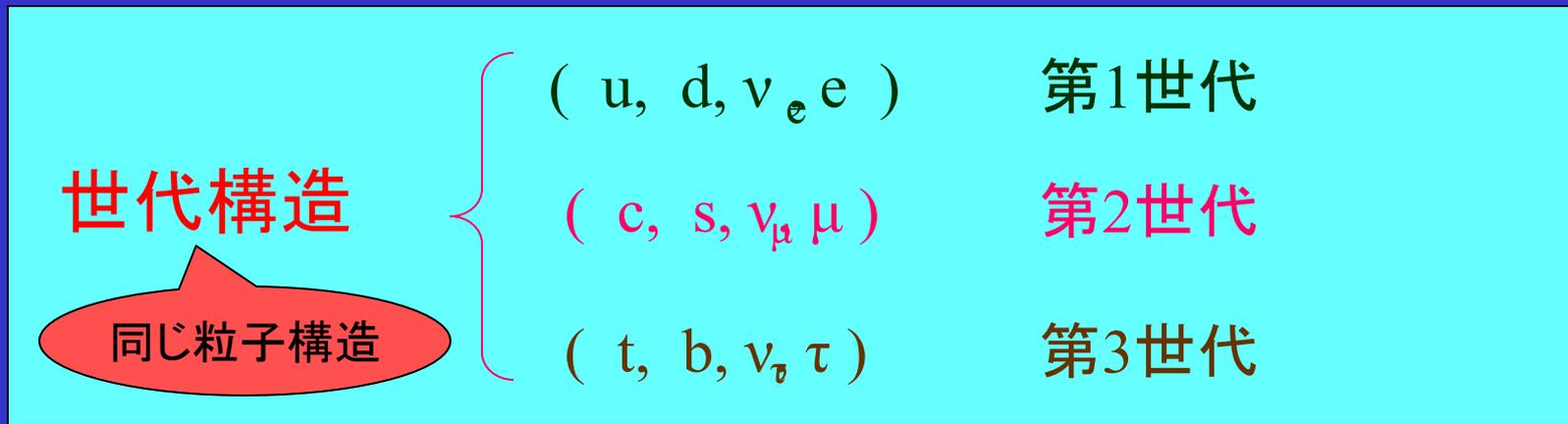


トップ
top

「物質を細かく分割していくと最終的にはクォークとレプトンからなる素粒子に行きつきます。ニュートリノはレプトンの仲間であり、三種類存在します。」

物質粒子の構造

同じ電荷の粒子群 (u, c, t) (d, s, b) $(\nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau)$ (e, μ, τ)



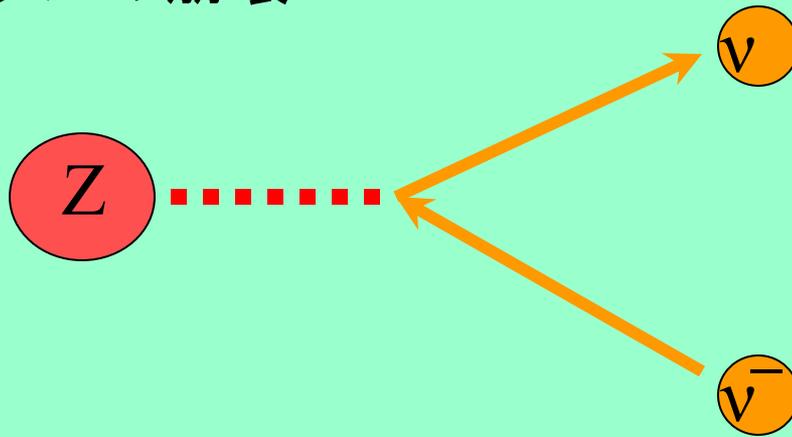
世代構造に関わる謎

世代数は？

世代間の違いは？？

世代構造の起源は？？？

Zボゾンの崩壊



ν の数は
3種類

「Zボゾンの質量の半分より軽い質量のニュートリノは
 $\nu_e \nu_\mu \nu_\tau$ の3種類に限られる。」

クォーク、レプトンの世代数は3

世代間の違い 質量の大きさ

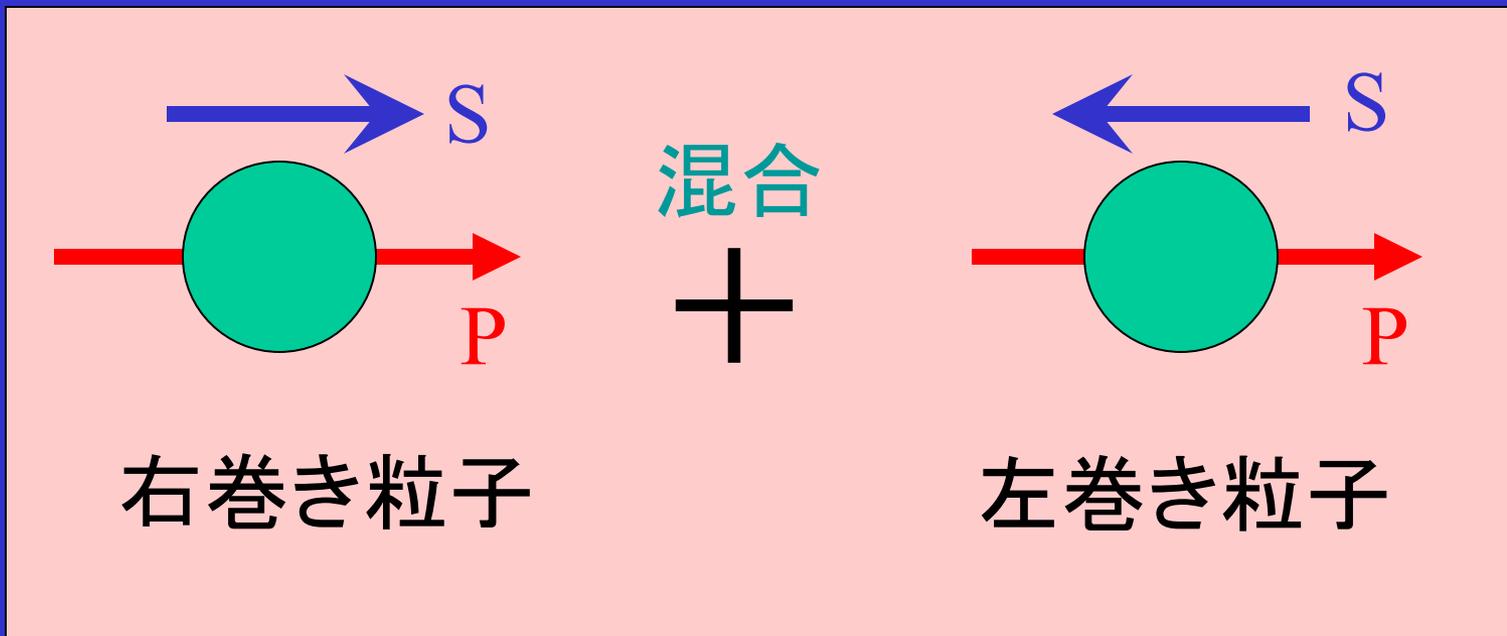
第1世代	第2世代	第3世代
$m_u (5\text{MeV})$	$m_c (1.2\text{GeV})$	$m_t (174\text{GeV})$
$m_d (9\text{MeV})$	$m_s (120\text{MeV})$	$m_b (4.4\text{GeV})$
$m_e (0.5\text{MeV})$	$m_\mu (105\text{MeV})$	$m_\tau (1.8\text{GeV})$

 ~ 20 倍程度  ~ 20 倍程度

物質粒子の世代間階層構造の起源は???

ニュートリノの質量は？

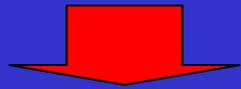
物質粒子の質量



標準模型には右巻きニュートリノが含まれない！！

ニュートリノは質量ゼロ

ニュートリノ質量についての実験的制限



ニュートリノは弱い相互作用しかしない

上限値のみが知られている

直接観測は難しい



★ ν_e β 崩壊

$$n \rightarrow p + e + \nu_e$$

電子質量の 10^{-5} 倍以下

エネルギー分布を調べる

★ ν_μ, ν_τ

π, μ 

ν

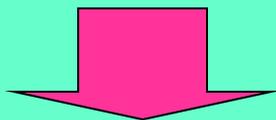
ニュートリノ以外の粒子のエネルギーなどを調べる

電子質量の0.3倍、36倍以下



ニュートリノの質量はきわめて小さい

もし、ニュートリノが質量を持つならば？



標準模型の拡張が不可欠 

新しい素粒子像への窓となる

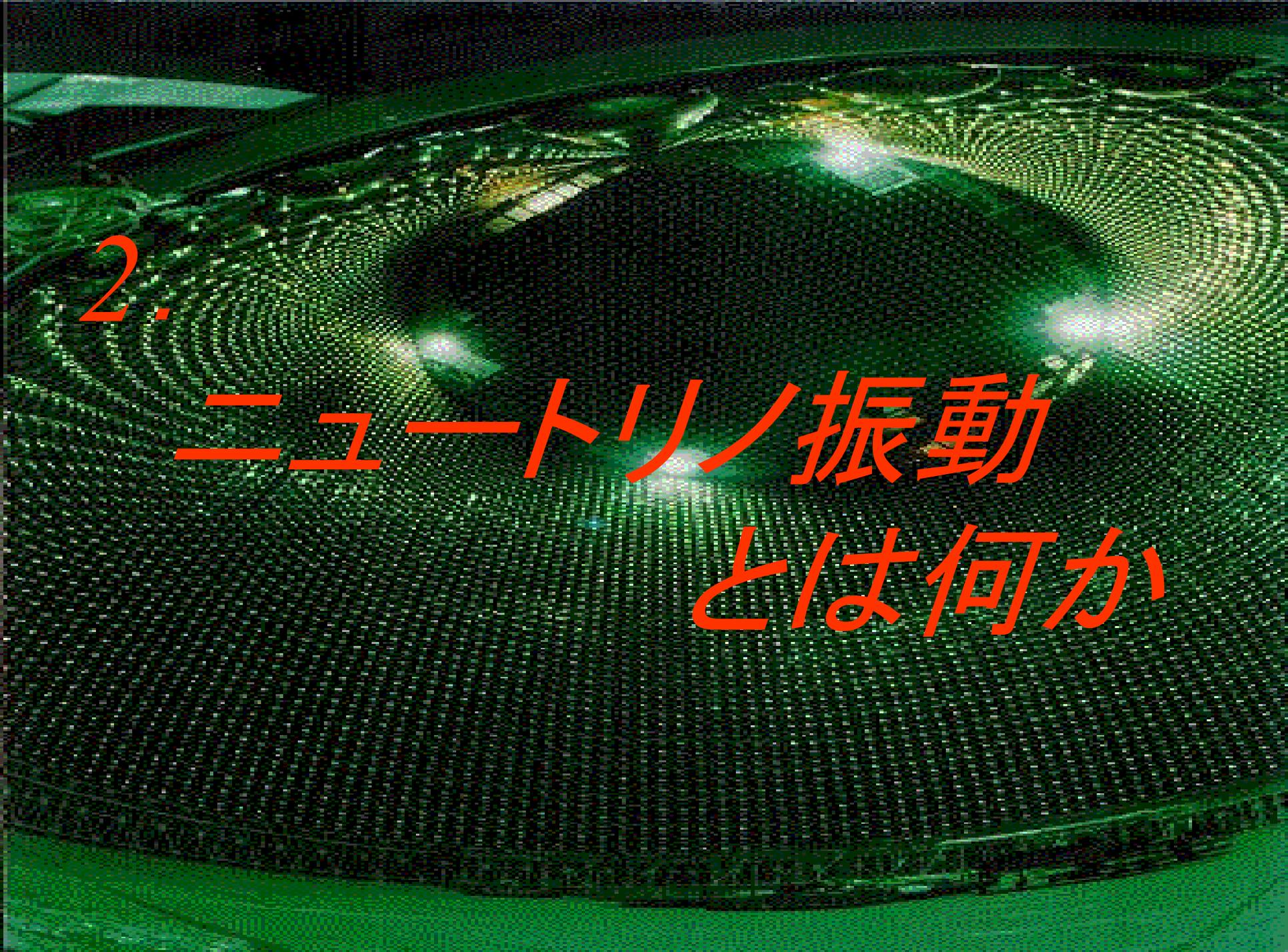
果たしてニュートリノは質量を持つのか？

{ ニュートリノは中性で、相互作用がきわめて弱い
質量があったとしても極めて小さい



何か良い実験手段はないのだろうか？

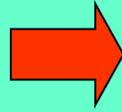
ニュートリノ振動

An aerial night photograph of a city, likely Tokyo, showing a large circular arena in the foreground. The arena is illuminated with bright lights, and the surrounding city lights are visible in the background. The image has a dark, grainy texture.

2.

ニュートリノ振動 とは何か

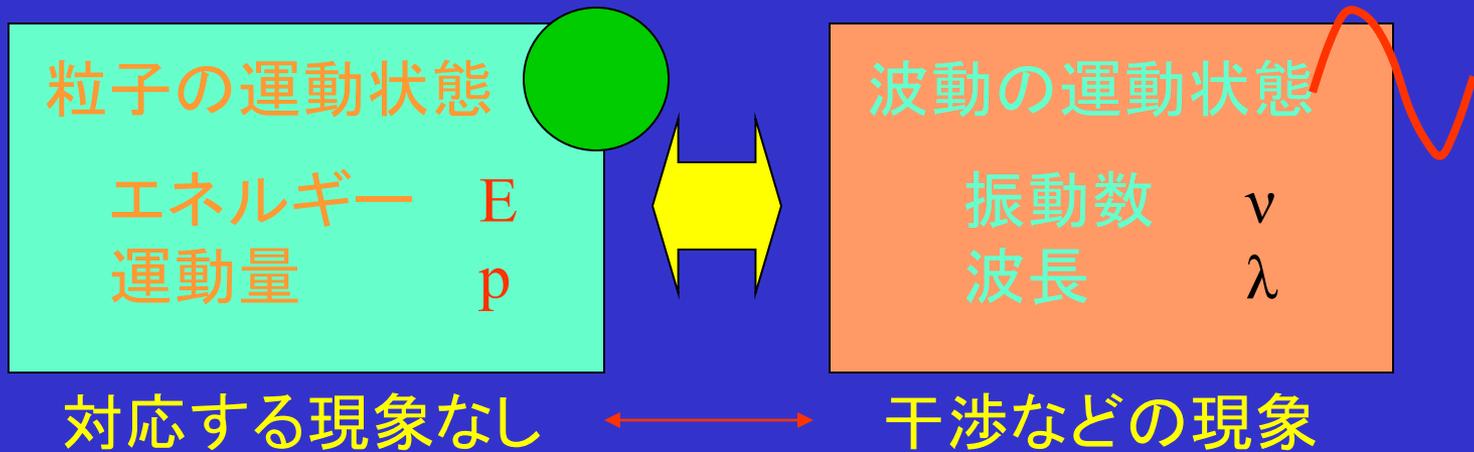
分子、原子よりも小さな世界



量子力学で記述

日常的経験とはかけ離れた現象

★ 古典力学

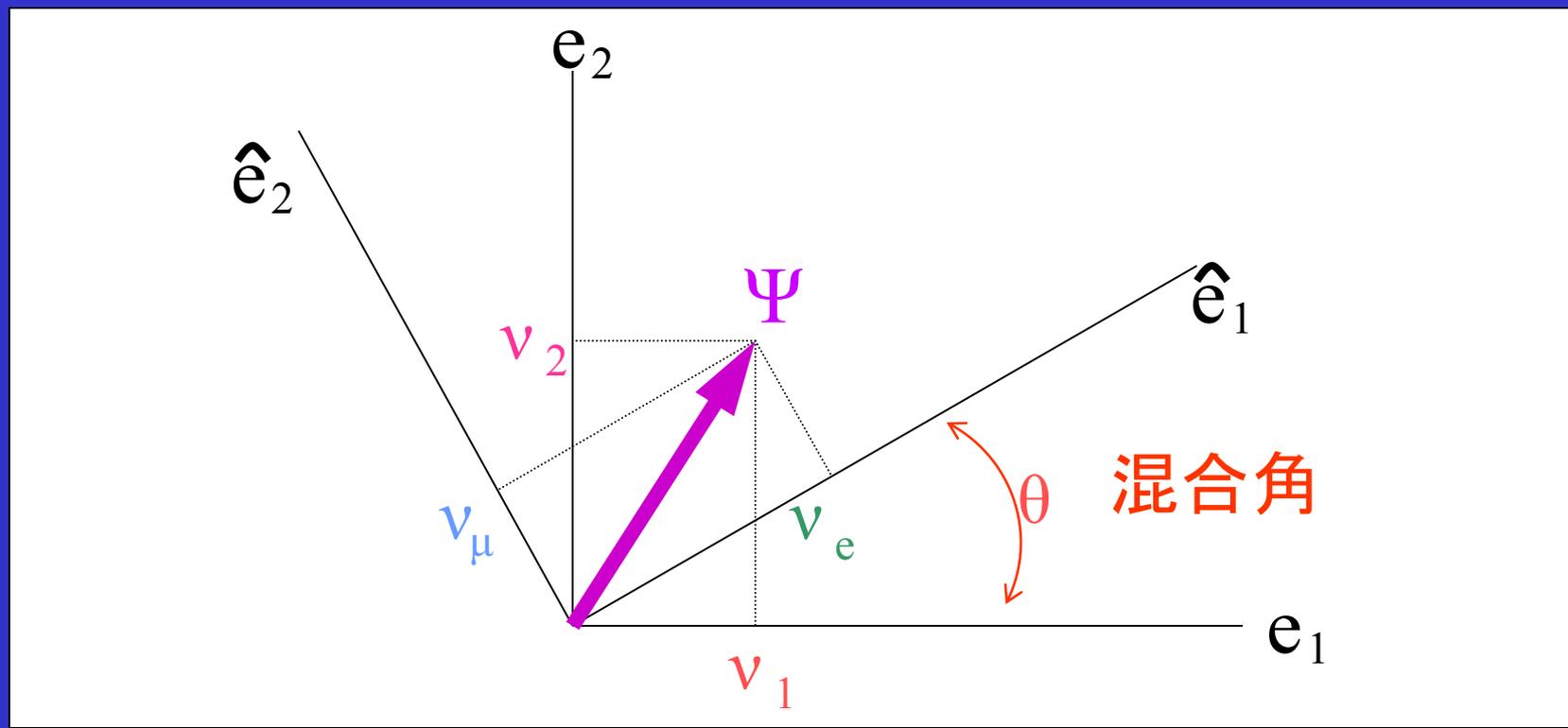
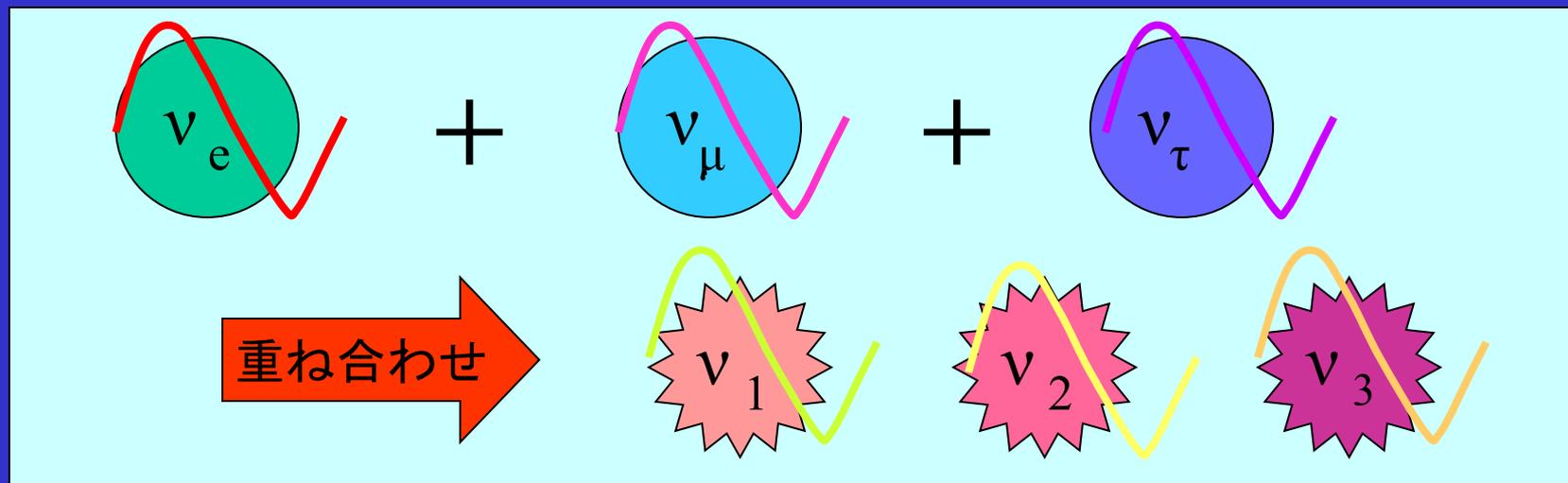


★ 量子力学

粒子性と波動性は不可分

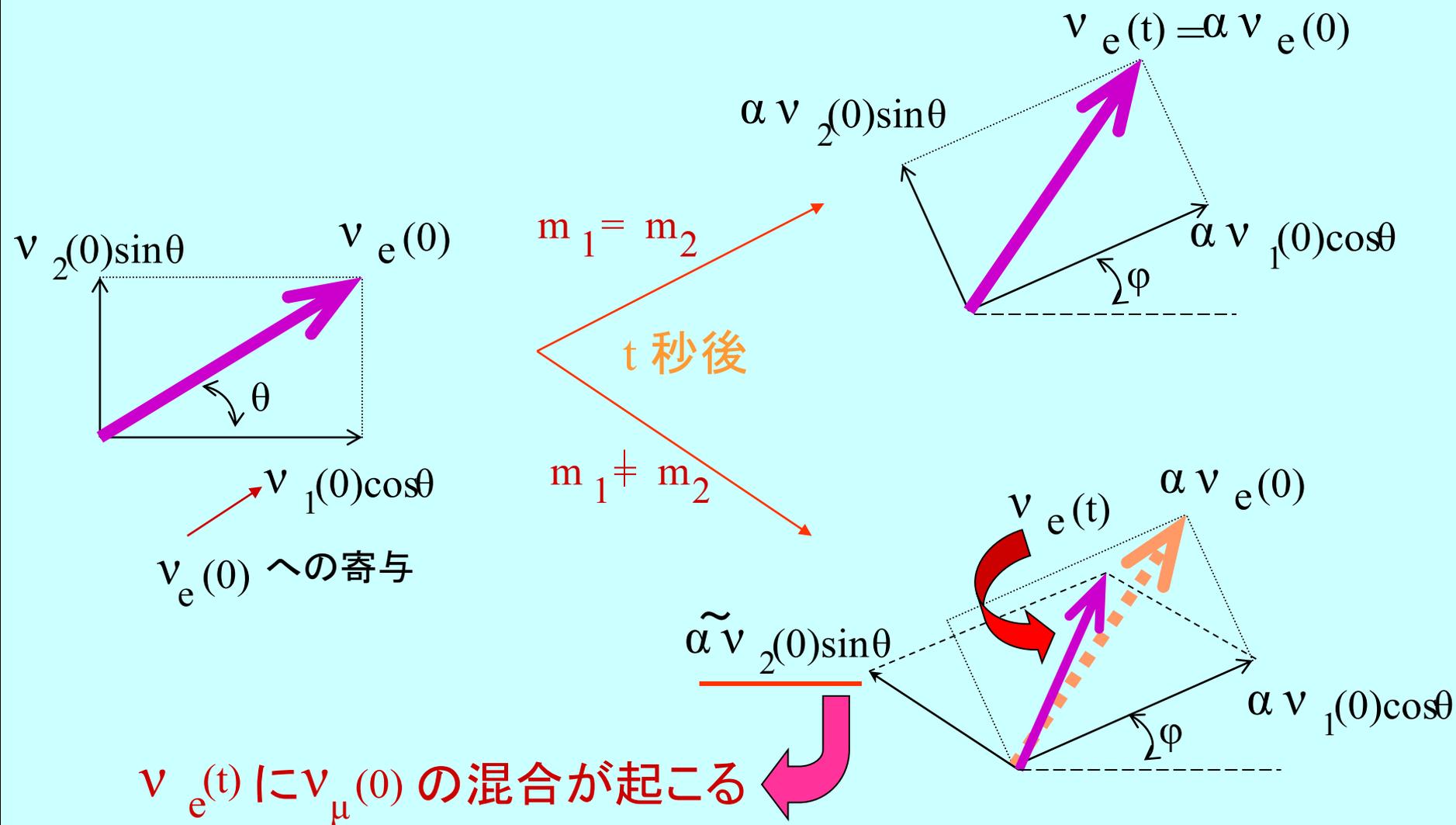
光 粒子性を持つ、光子
電子 波動性を持つ

定まった質量を持つニュートリノの状態



ニュートリノの状態の時間発展

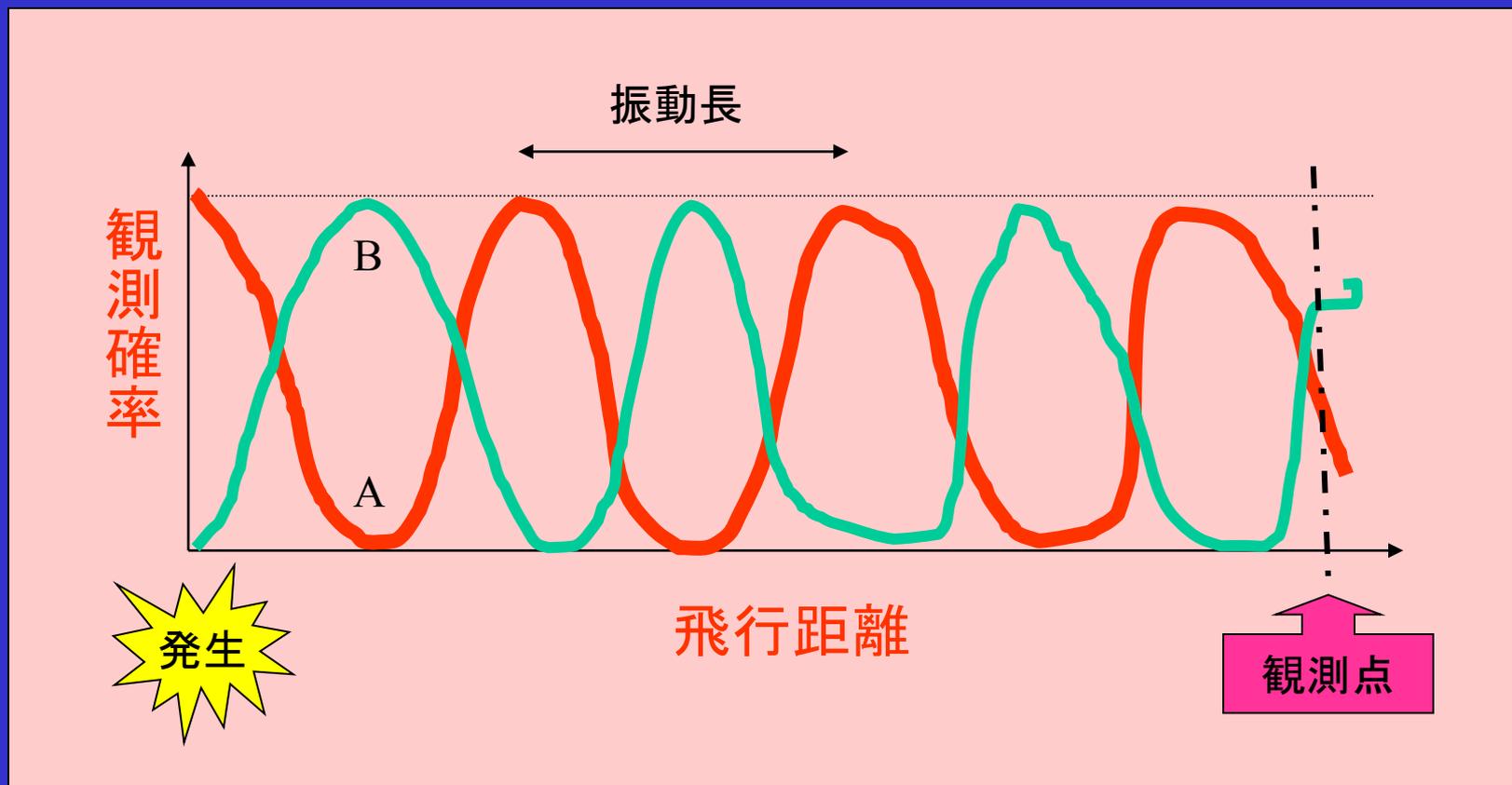
同じ質量を持つ状態 \rightarrow 同じ時間発展



時間の経過(飛行距離)とともに

AニュートリノがBニュートリノへ変化

ニュートリノ振動



ニュートリノ振動がAとBの間で顕著に現れる条件



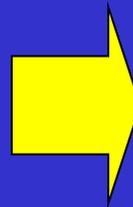
$$\left| (Aの質量の二乗) - (Bの質量の二乗) \right| \\ \sim (エネルギー) / (飛行距離)$$

$$\left(\frac{\Delta m^2}{1 \text{ eV}^2} \right) \sim 1.24 \left(\frac{E}{\text{MeV}} \right) \left(\frac{L}{1 \text{ m}} \right)^{-1}$$

例えば、原子炉からの電子ニュートリノ

$$E \sim 10 \text{ MeV}$$

$$L \sim 100 \text{ m} \text{ とすれば}$$



$$\Delta m^2 = 0.1 \sim 1 \text{ eV}^2$$

ならばニュートリノ振動が見える



混合角 $\sin\theta$ が大きいこと

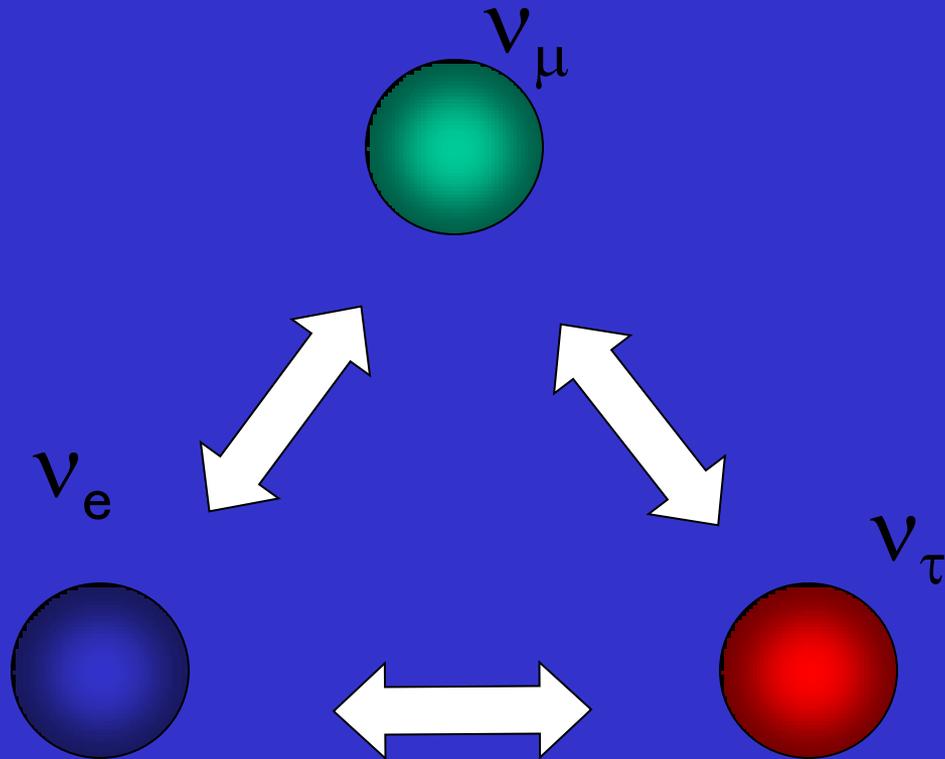
質量の小ささは障害に
ならない



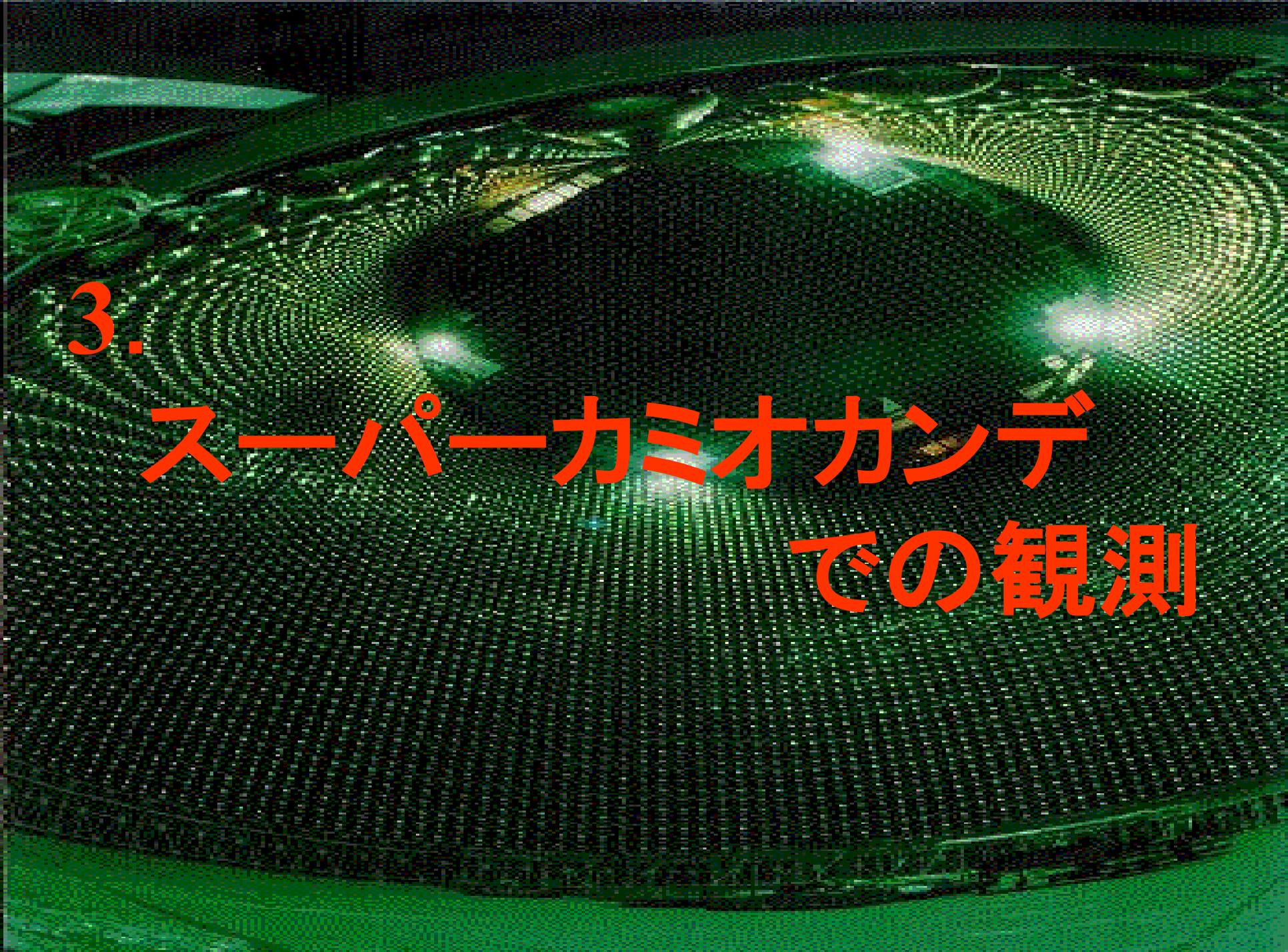
ニュートリノに質量があると



ニュートリノの種類が変わる



これを実験的に観測する  ニュートリノ振動実験

An aerial night photograph of a city, likely Nagasaki, Japan, with a large stadium illuminated in green. The stadium's lights create a bright green glow, and the surrounding city lights are visible in the background. The image has a dark, almost black background, making the green lights stand out prominently.

3.

スーパーカミオカンデ での観測

カミオカンデの運命の転換

マゼラン大星雲の超新星爆発(1987A)



爆発前

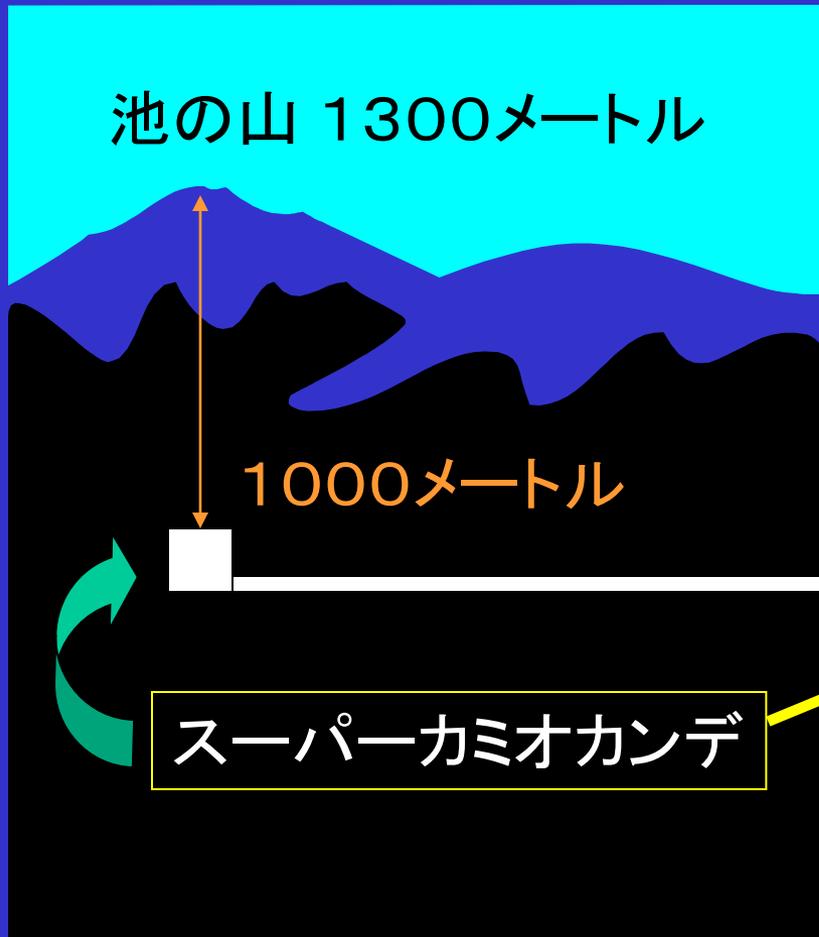
爆発後

スーパーカミオカンデとは

岐阜県吉城郡神岡町茂住神岡鉱山の坑道地下1000メートルに設置

なぜ地下なのか？

宇宙線を岩盤で遮蔽し、
ニュートリノのみを見る
地上の10万分の1

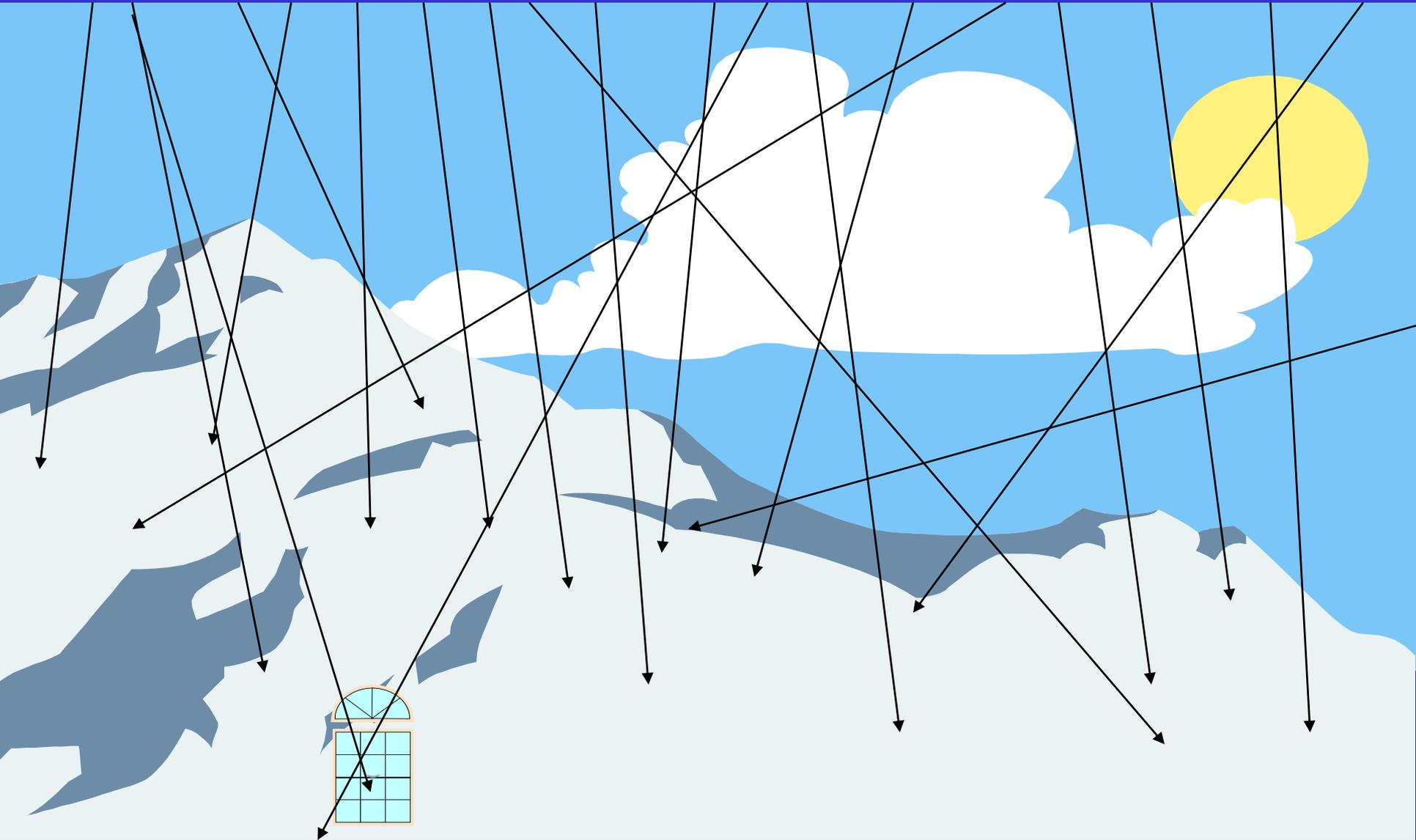


観測装置

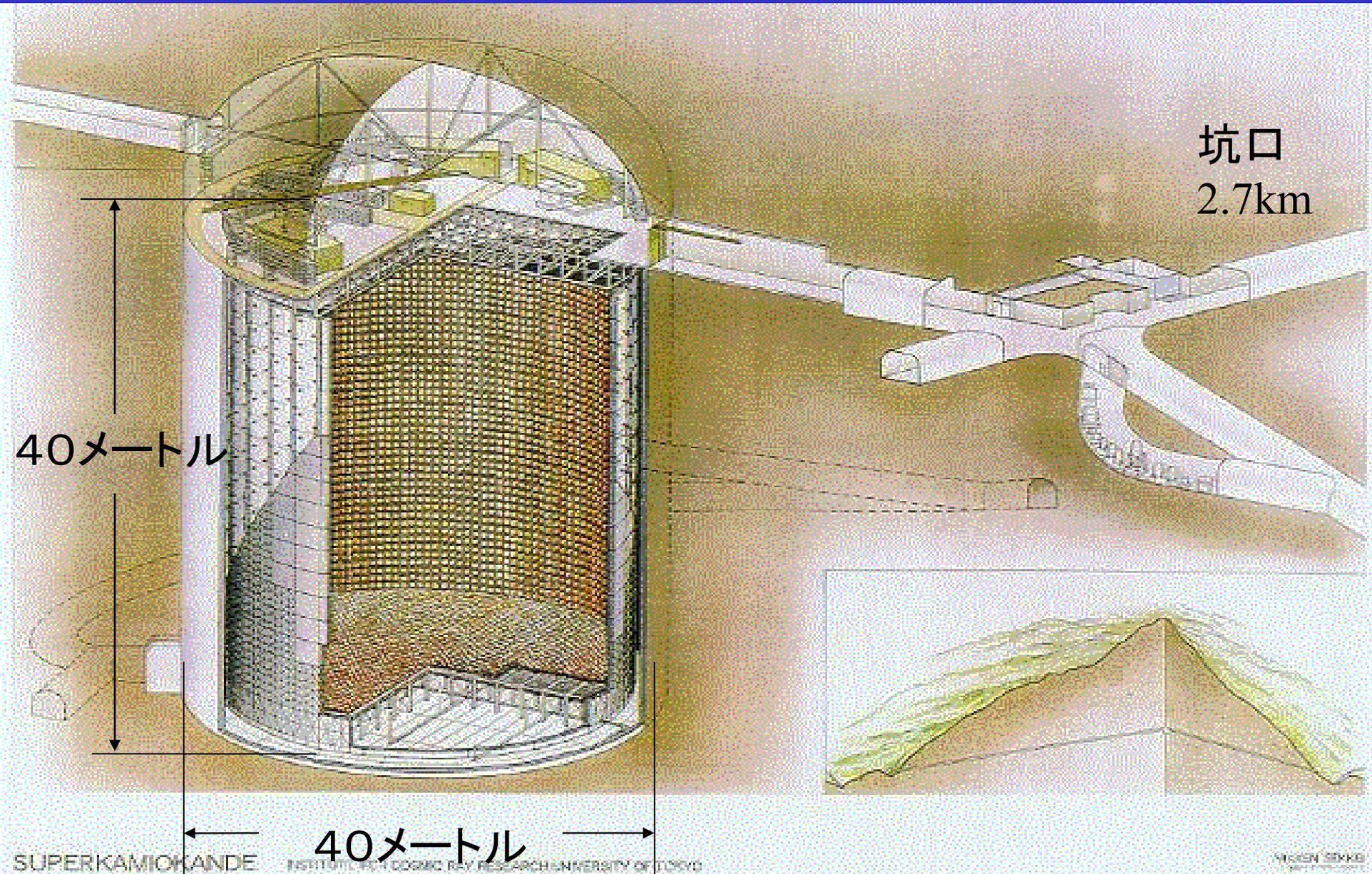
光電子増倍管で壁面を覆い尽くされた巨大な純水槽

ニュートリノ観測の障害となる宇宙線

1次宇宙線(p) → 大気中の原子核との衝突 → 2次宇宙線(μ, ν)



スーパーカミオカンデ概念図

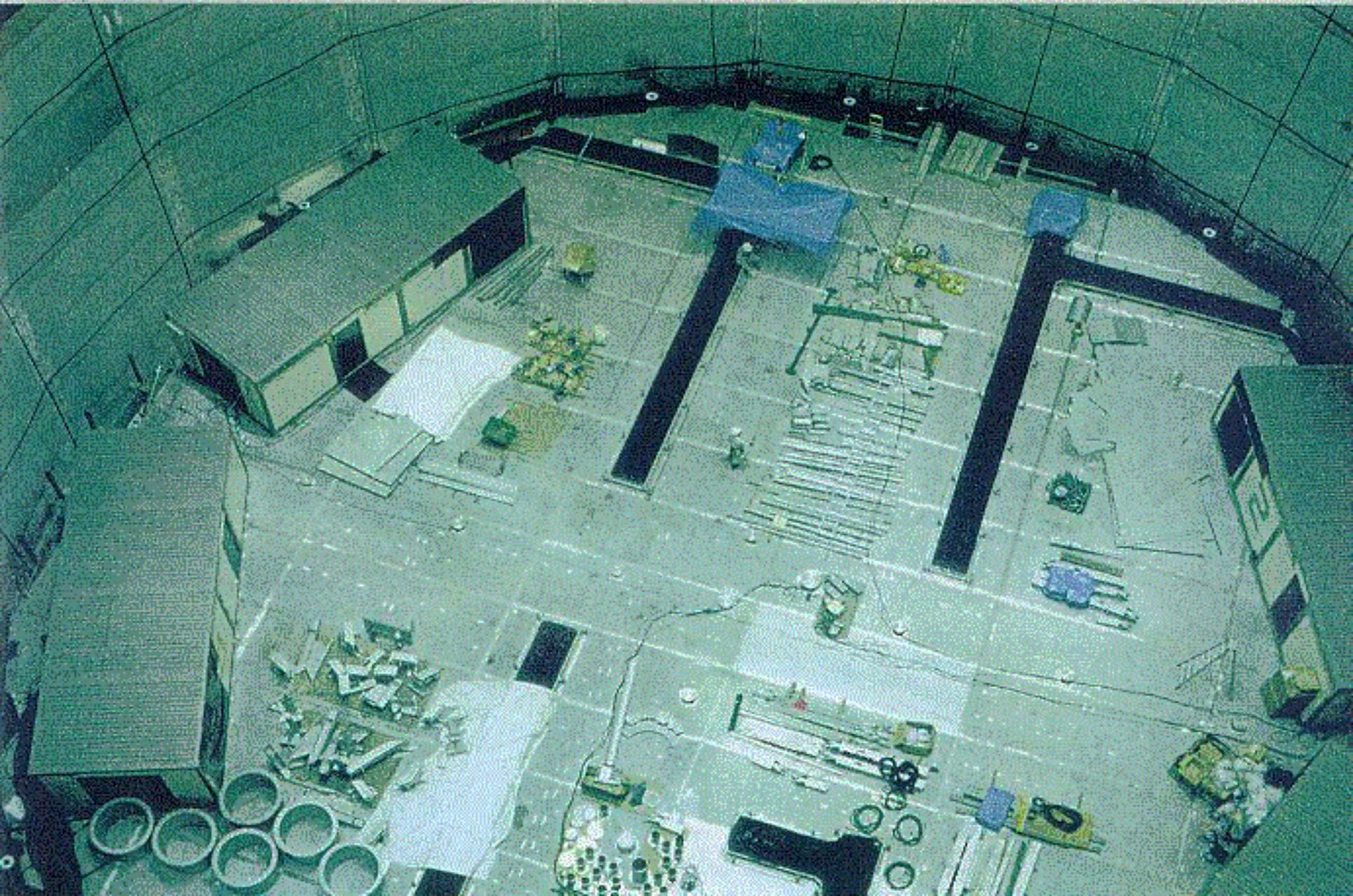


製作過程

水槽用空洞の掘削



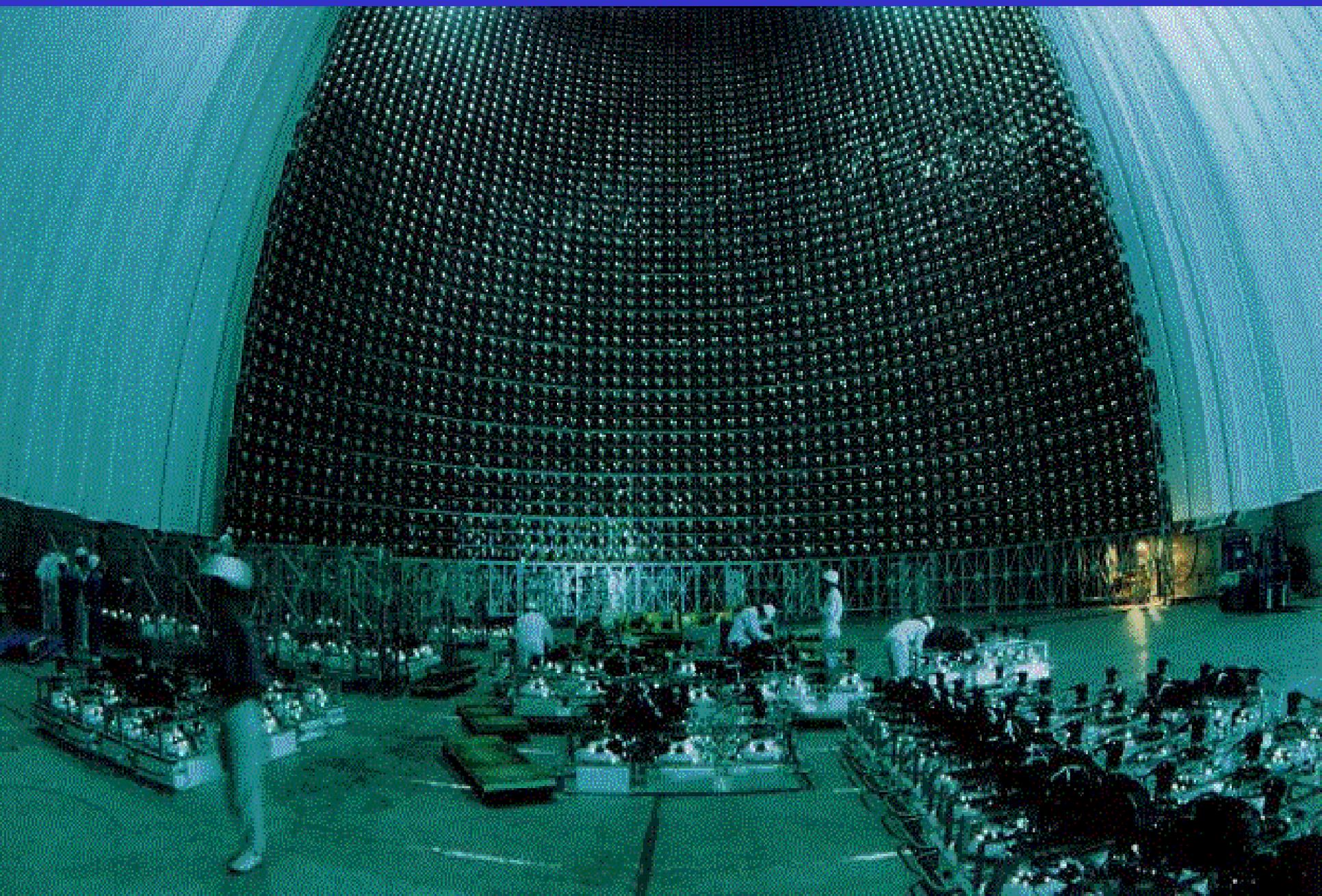
光電子増倍管取り付け準備作業



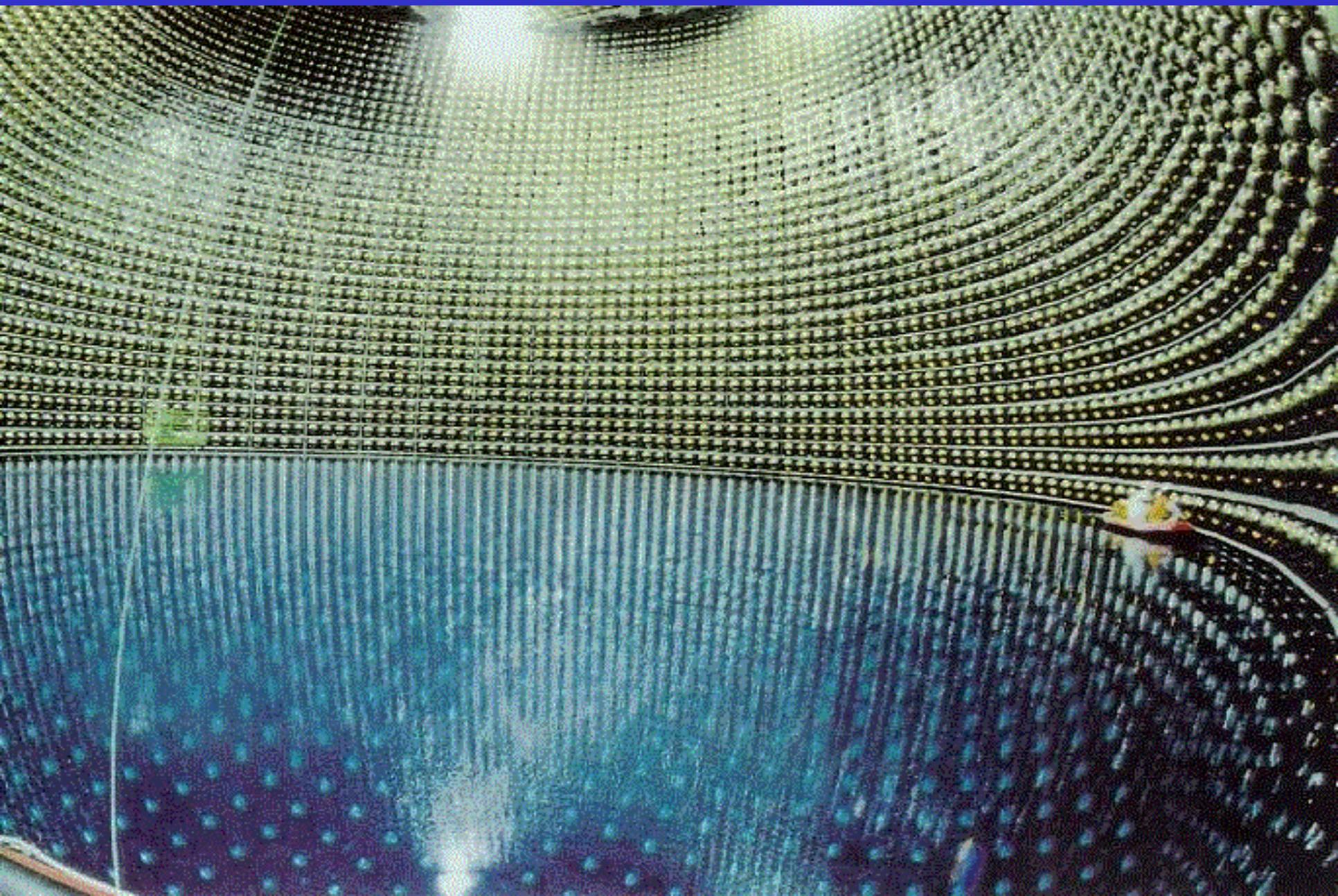
上面への光電子増倍管の取り付け作業



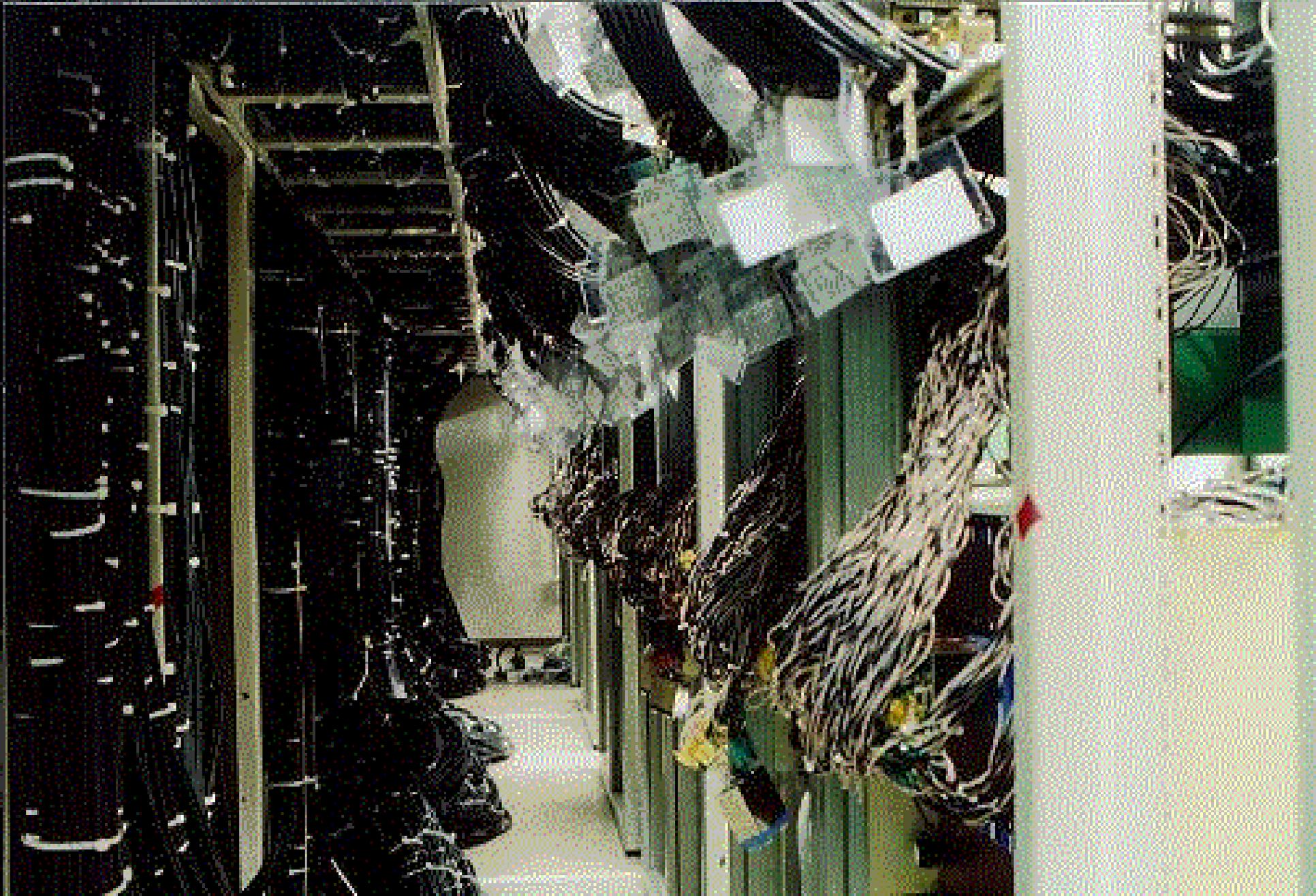
側面への光電子増倍管の取り付け作業



光電子増倍管の表面磨き作業



光電子増倍管から引き出されたケーブル



2つのタイプの素粒子実験



加速器実験

加速粒子の衝突

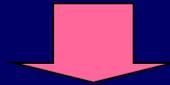


高エネルギー反応

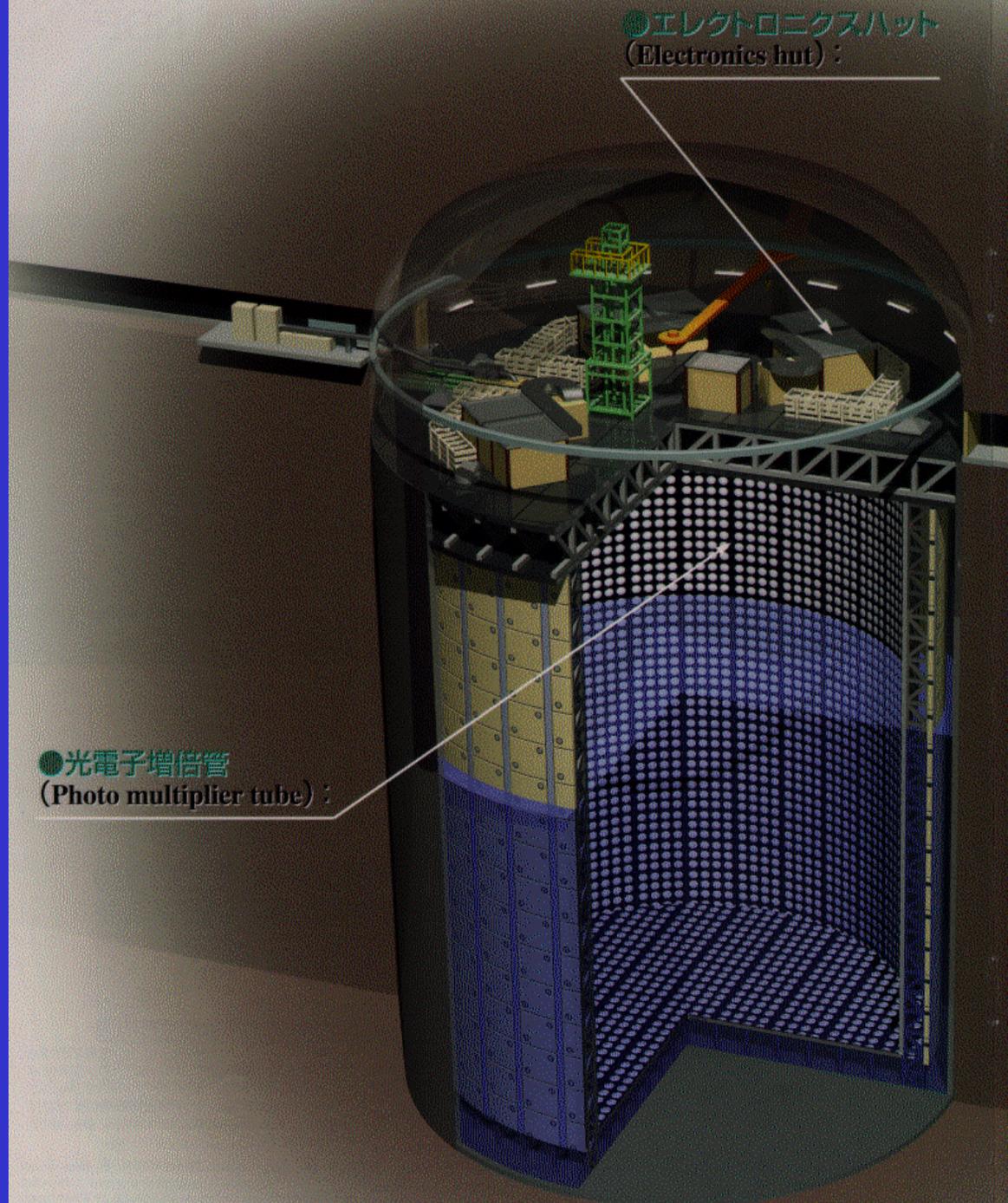


非加速器実験

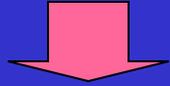
大容量の観測装置
統計精度の確保



まれにしか起こらない反応



スーパーカミオカンデ



ウォーターチェレンコフ検出器

動作機構

水槽中の素粒子反応



水中の高速荷電粒子



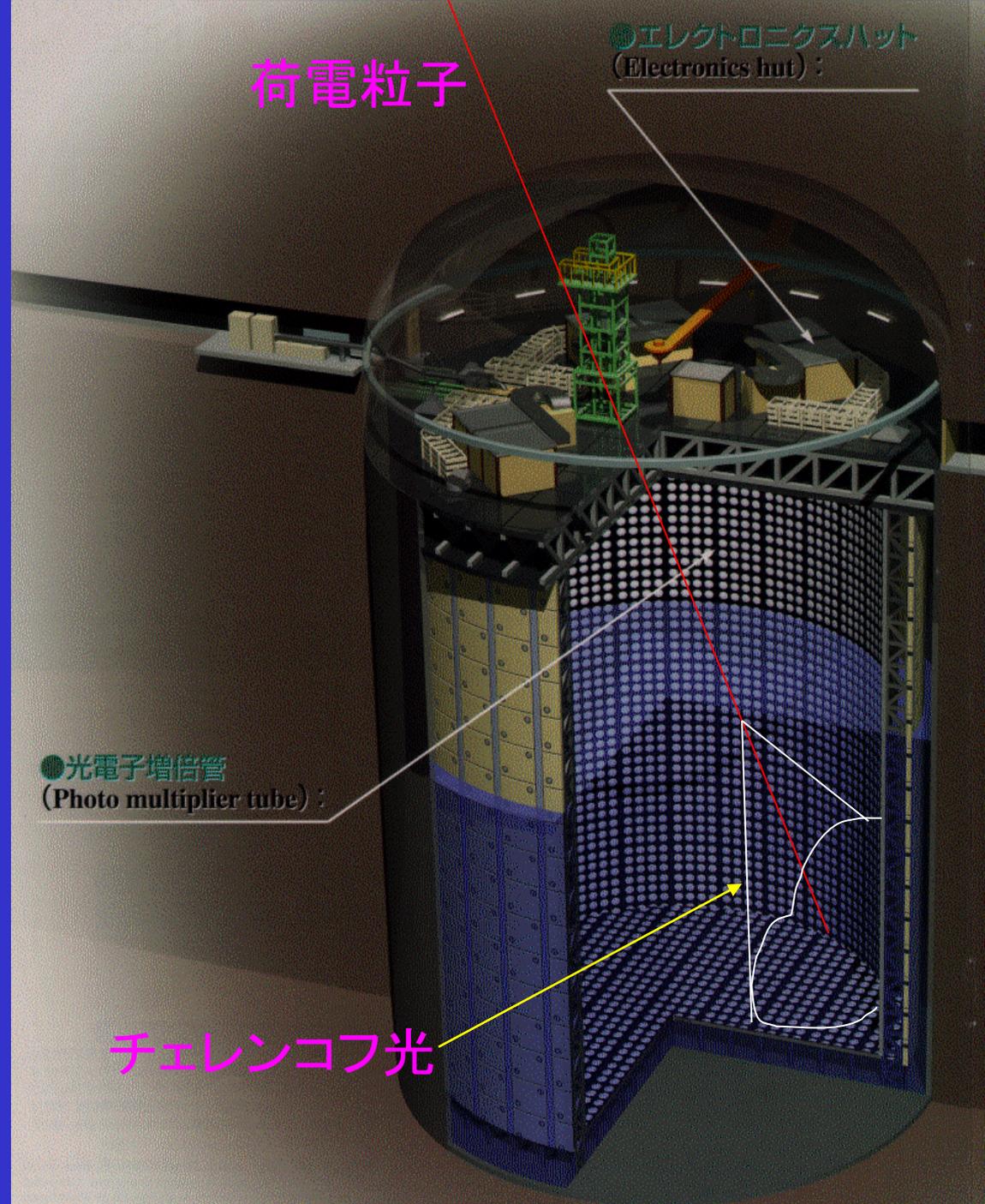
チェレンコフ光



光電子増倍管による検出



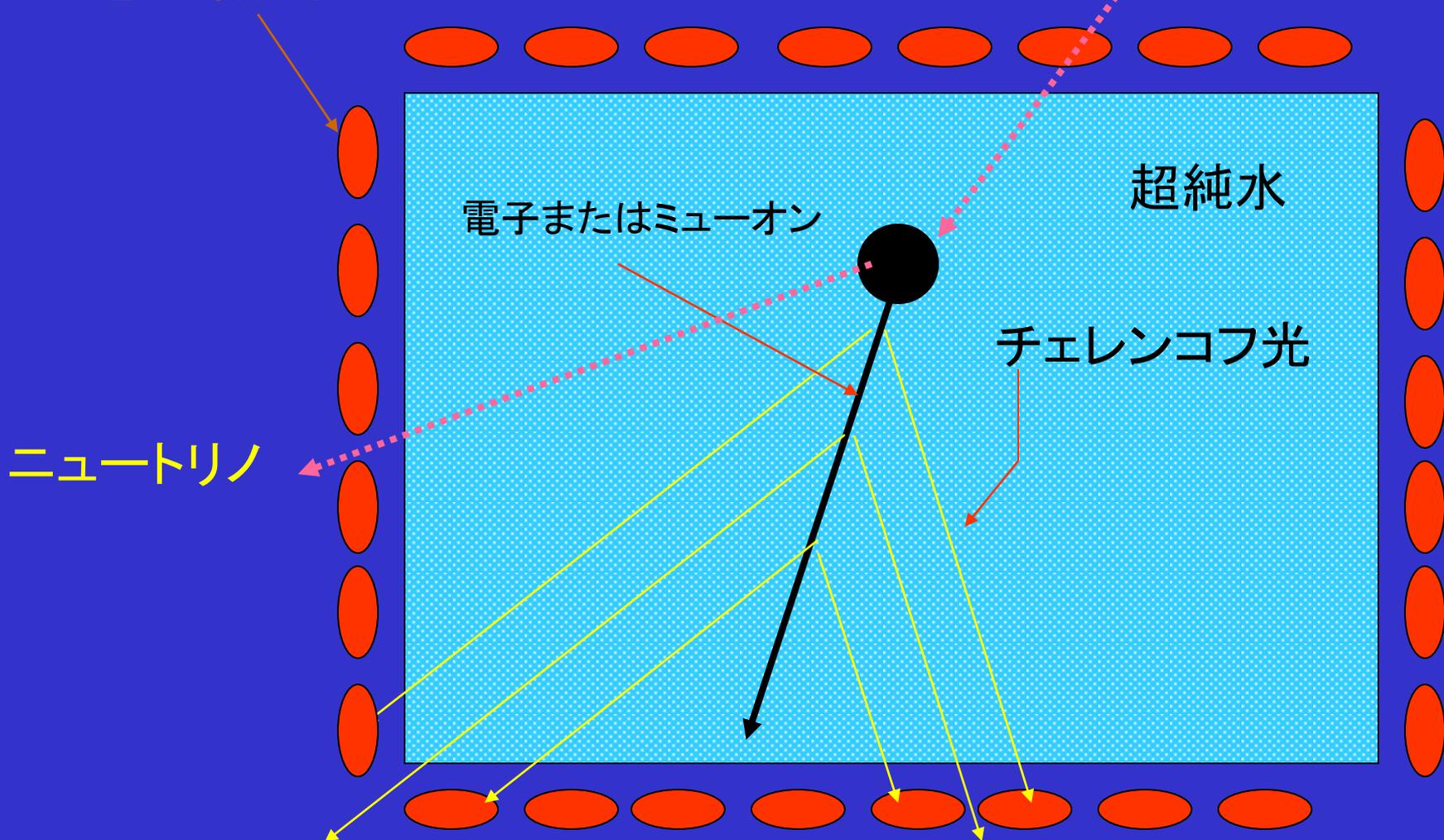
素粒子反応の情報



チェレンコフ観測装置

ニュートリノ

光電子増倍管(光センサー)



事象例 (ミュオン)

Super-Kamiokande

Run 4234 Event 367257

97-06-16:23:32:58

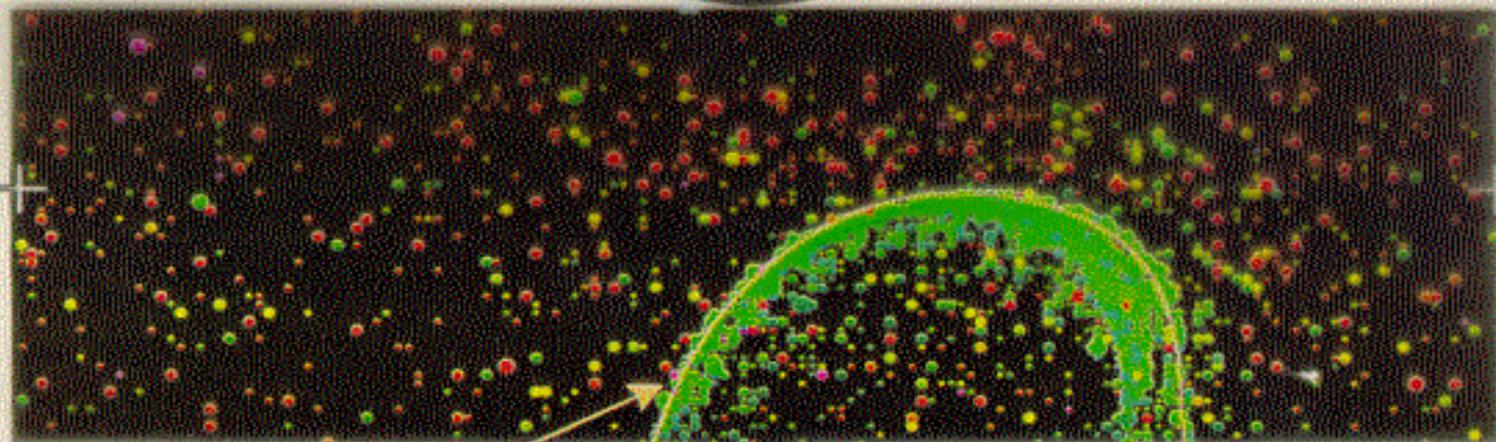
Inner: 1904 hits, 5123 pE

μ -like

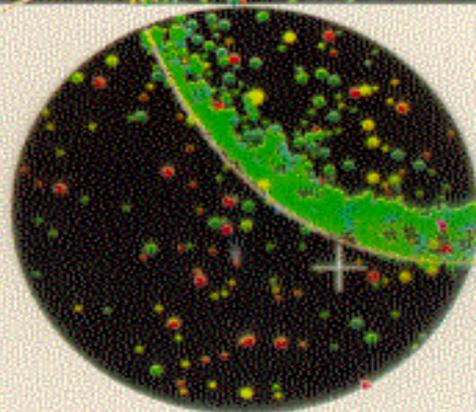
~ 760 MeV/c

Resid(ns)

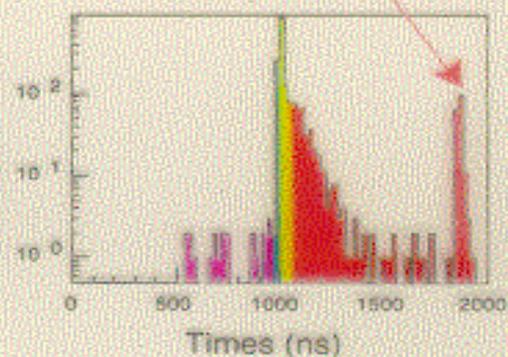
#	>	46
#	60-	68
#	42-	60
#	43-	51
#	34-	43
#	35-	34
#	17-	25
#	6-	17
#	0-	8
#	-5-	0
#	-17-	-8
#	-25-	-17
#	-34-	-25
#	-42-	-34
#	-51-	-42
#	<	-51



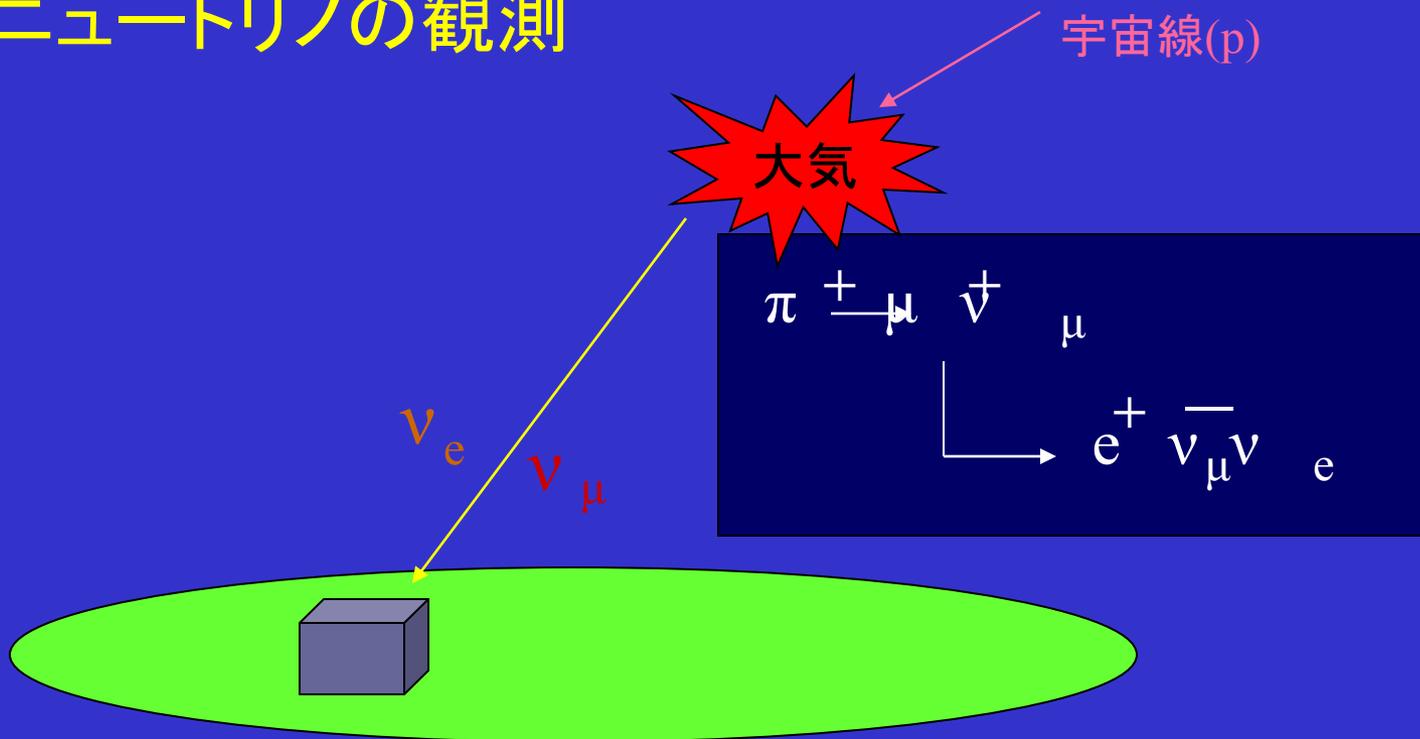
Cherenkov fit



decay electron



大気ニュートリノの観測



期待される観測結果

$$\frac{\text{電子ニュートリノ数}}{\text{ミューニュートリノ数}} = \frac{1}{2}$$

観測結果

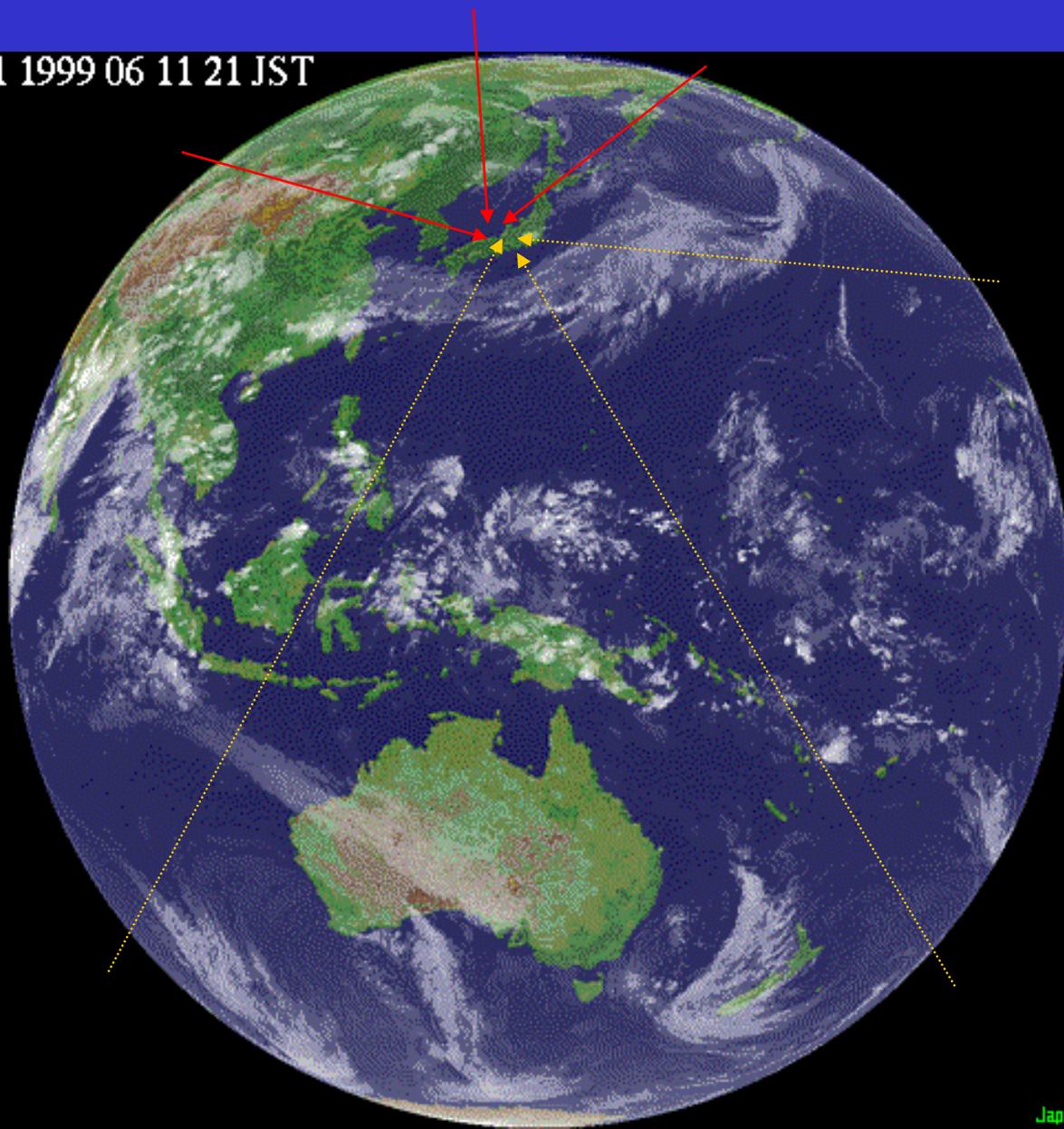
~ 1 !

大気ニュートリノ問題

スーパーカミオカンデによる統計精度の改善

大気ニュートリノは大気中で均等に作られスーパーカミオカンデに
降り注いでいる

GMS5 IR1 1999 06 11 21 JST



スーパーカミオカンデで観測されるニュートリノ

上方からのニュートリノ

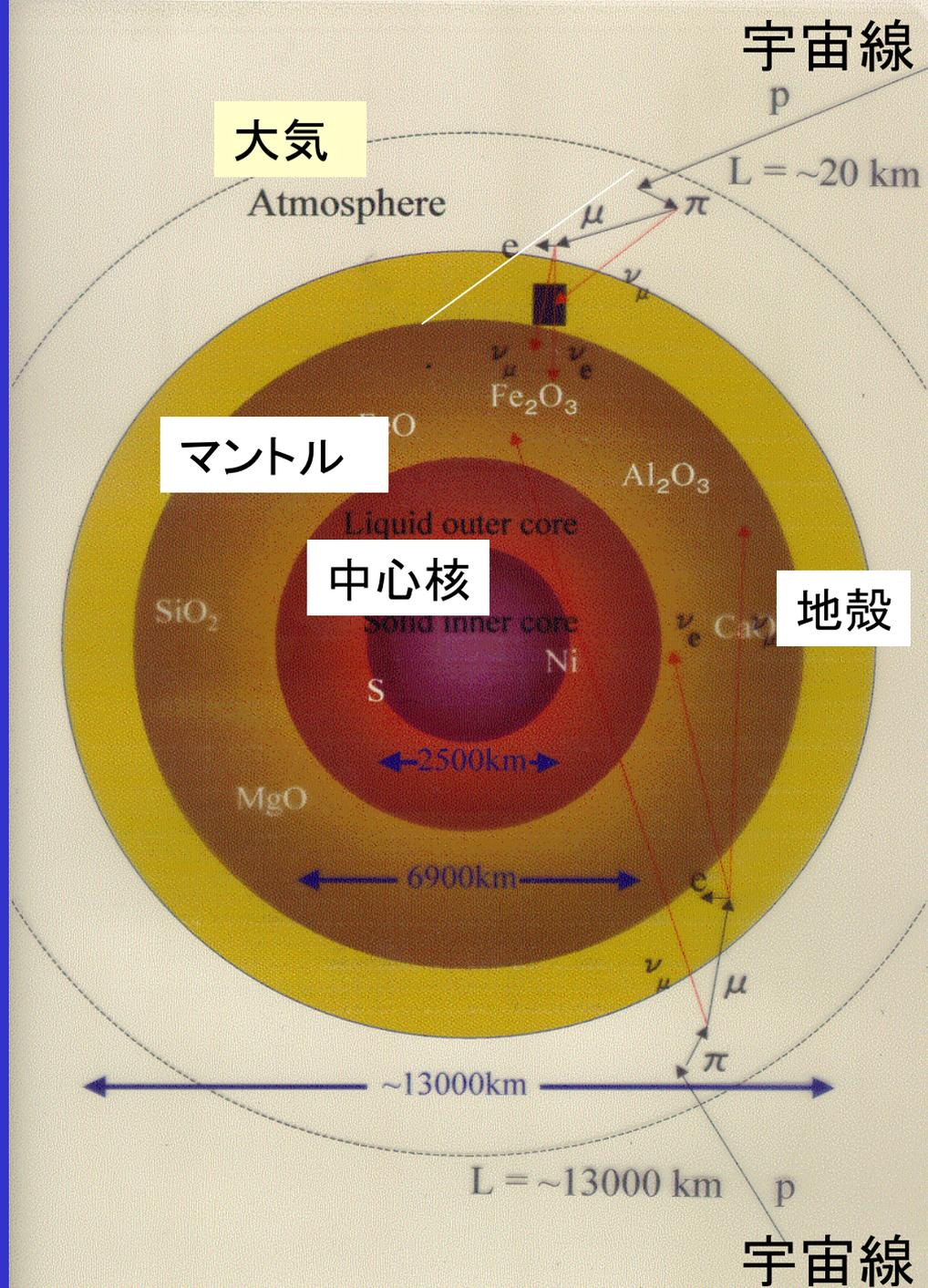
飛行距離 ~ 20 km

下方からのニュートリノ

飛行距離 ~ 13000 km



飛行距離が大きく違う
ニュートリノが対象となる

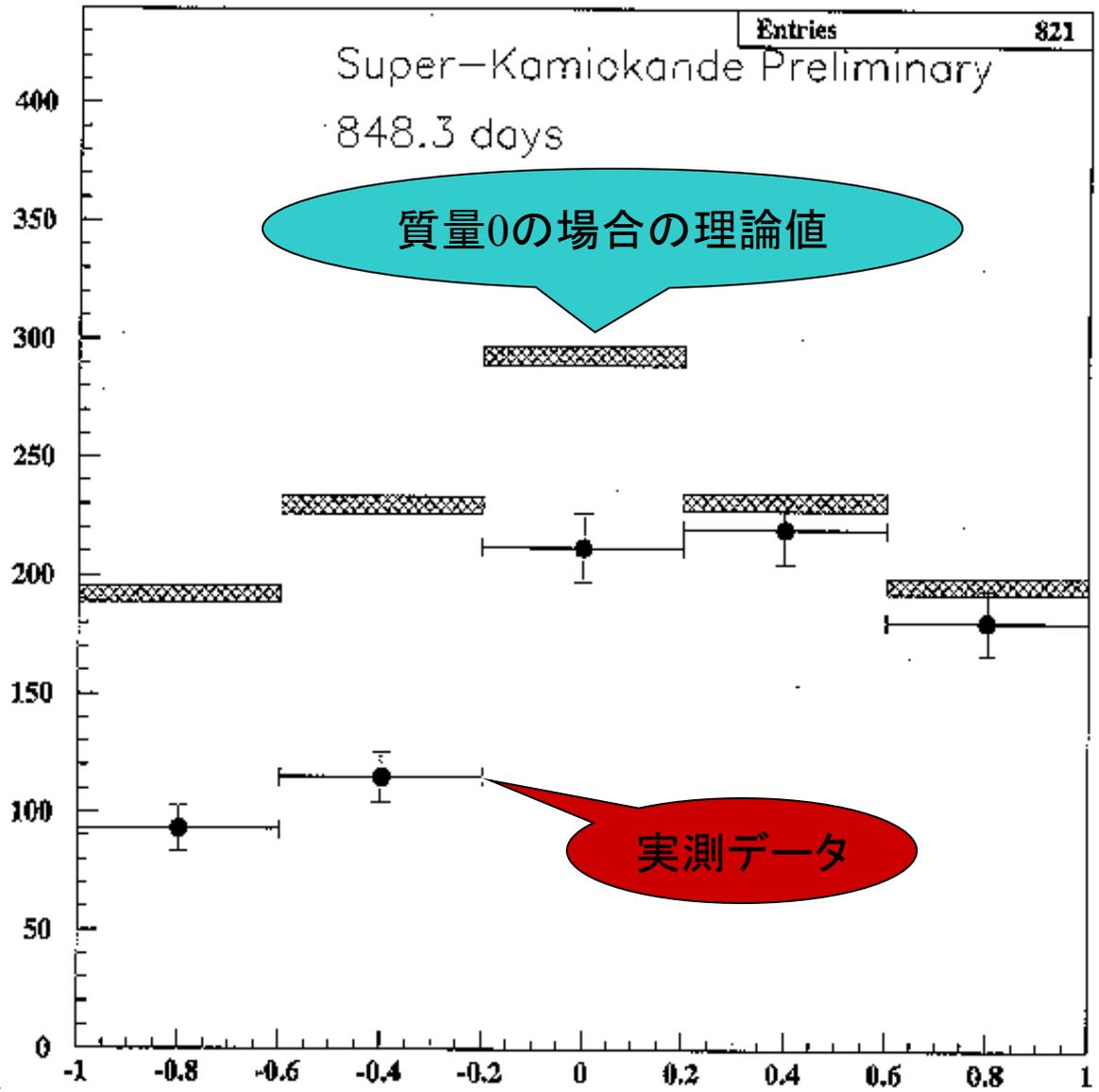


スーパーカミオカンデ での 観測データの例

上空からの
ニュートリノ数



地球の裏からの
ニュートリノ数



地球の裏から

上空から

スーパーカミオカンデの与えた結論

- ミューニュートリノと電子ニュートリノの観測数の比は1対1

統計精度の改善の大幅な改善



ミューニュートリノが電子ニュートリノ以外のものに転化

- 下方からのミューニュートリノの数は上方からのものに比べて有意に少ない

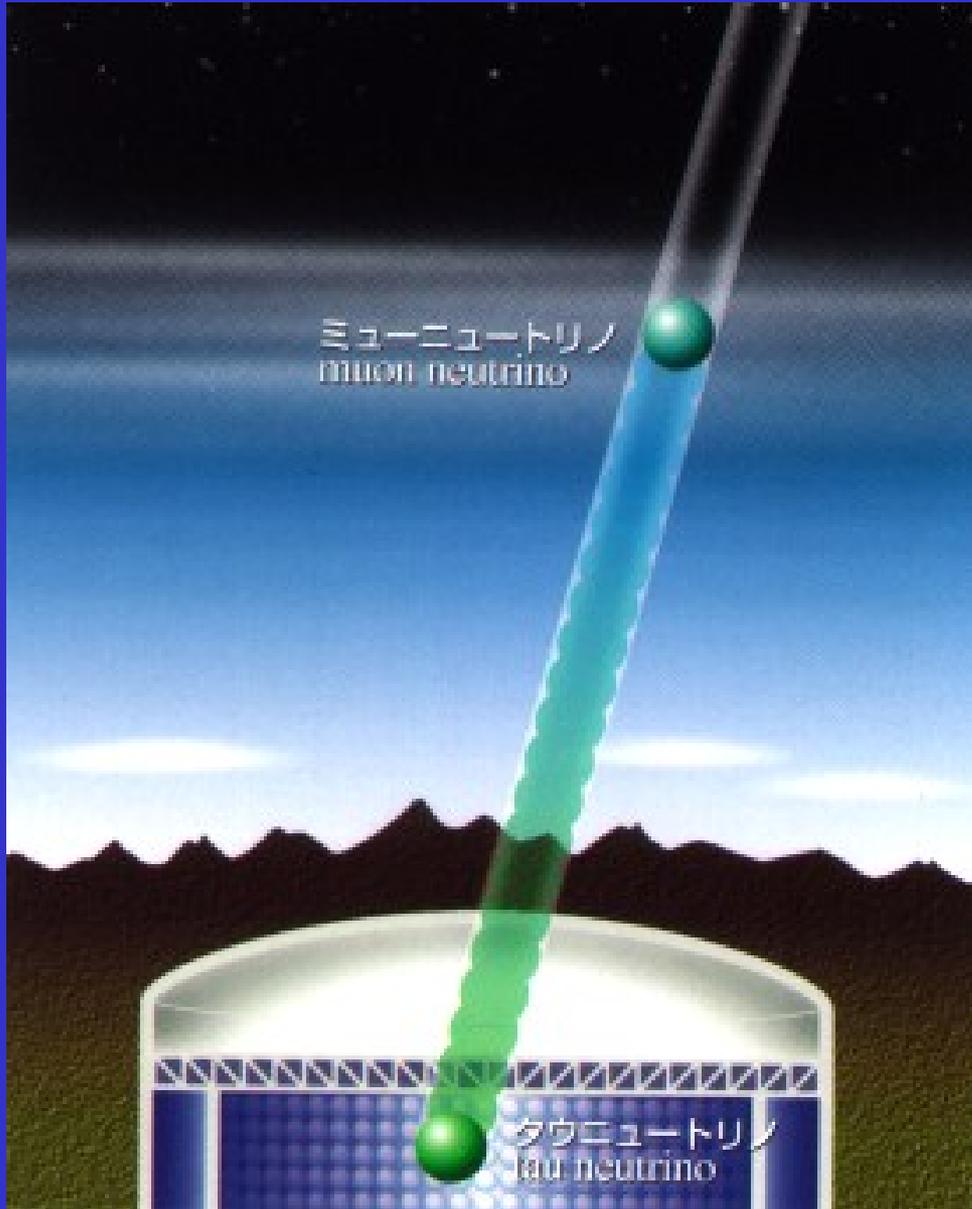


ミューニュートリノがニュートリノ振動により別のニュートリノに転化



ニュートリノ振動が起こっている

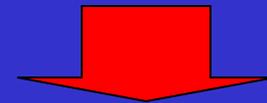




有力な可能性



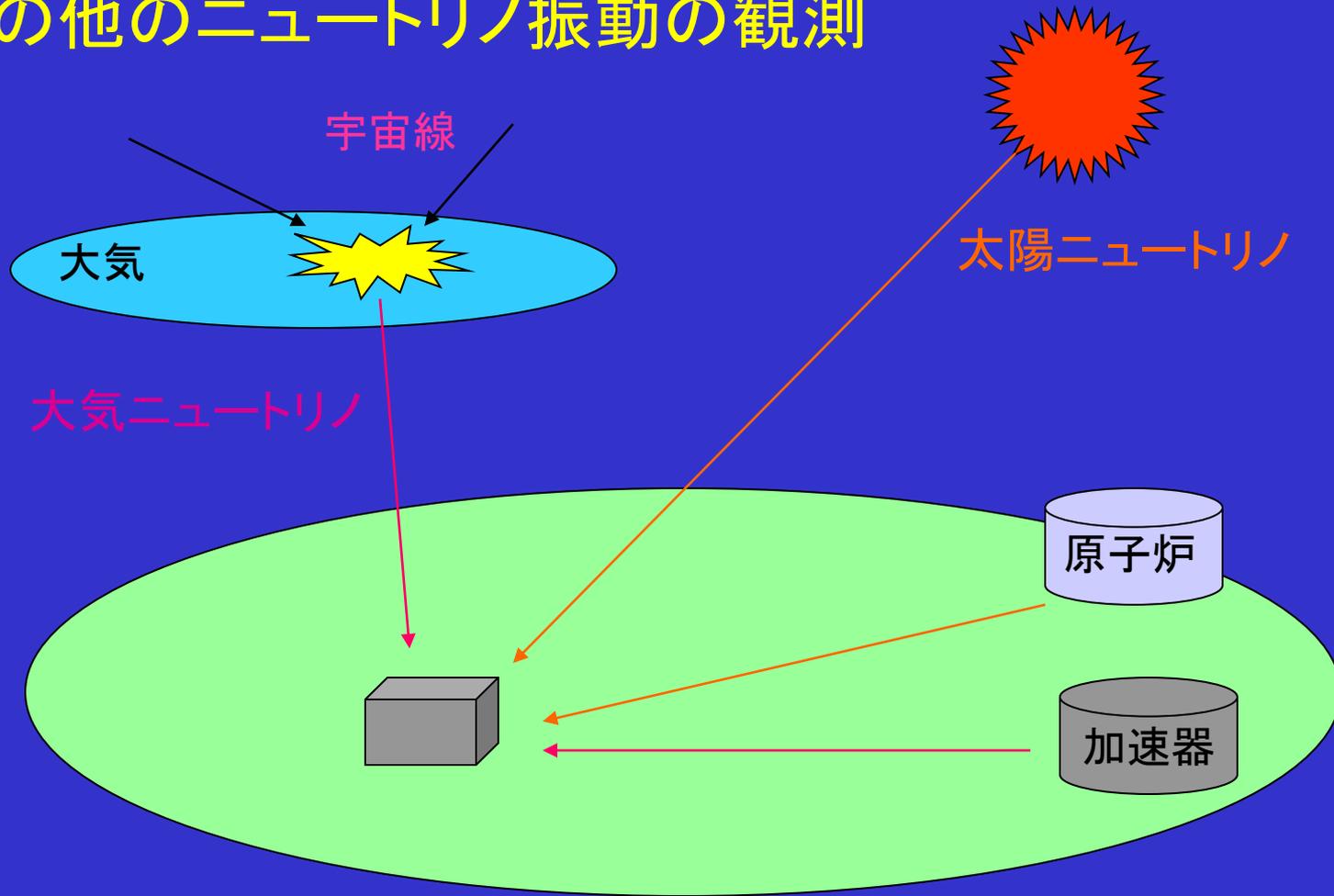
$$\Delta m^2 \sim (4-6) \times 10^{-3} \text{ eV}^2$$
$$\sin^2 2\theta \geq 0.85$$



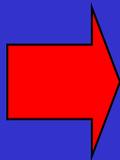
長基線実験へ

$$E = 1 \text{ GeV とすれば}$$
$$L = 250 \text{ km}$$

その他のニュートリノ振動の観測



太陽ニュートリノ観測
大気ニュートリノ観測



ニュートリノ振動を示唆

太陽ニュートリノ

太陽中心部での核反応



光 電子ニュートリノ

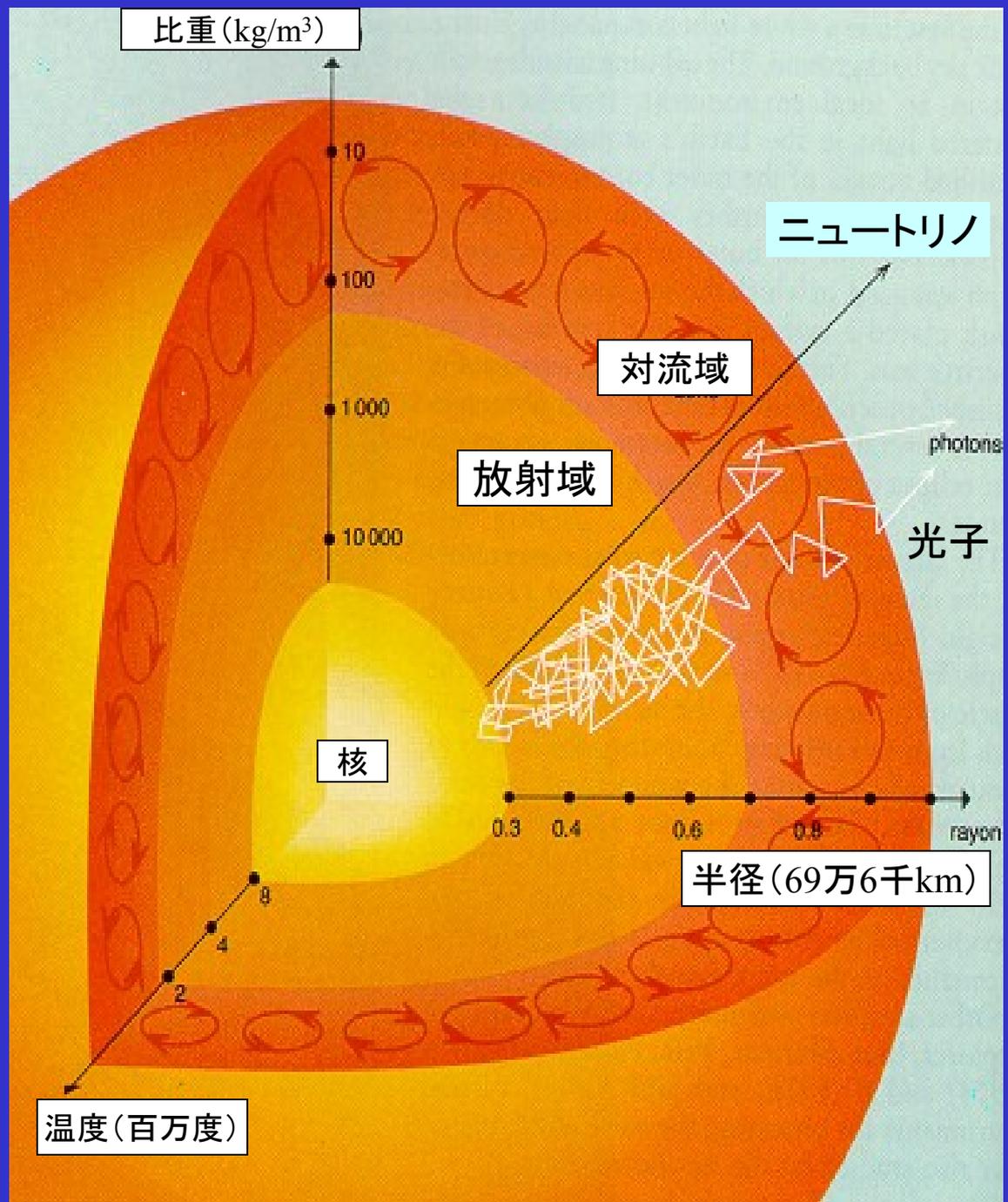
数百万年

2秒

太陽表面

499秒

地球上



太陽模型

予想

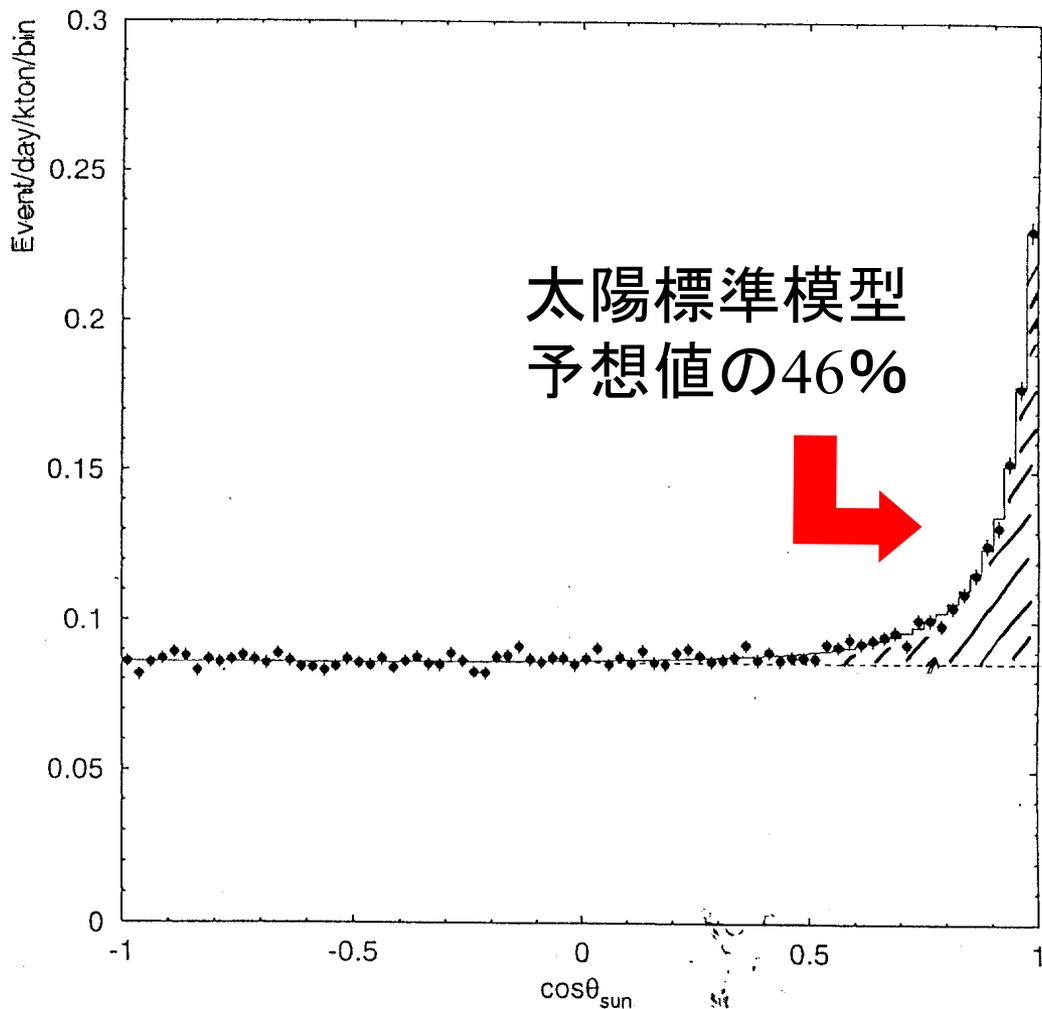
太陽ニュートリノの量
(電子ニュートリノ)

46%

スーパーカミオカンデによる観測値

ニュートリノ振動を示唆

太陽ニュートリノ観測データ



太陽と逆方向

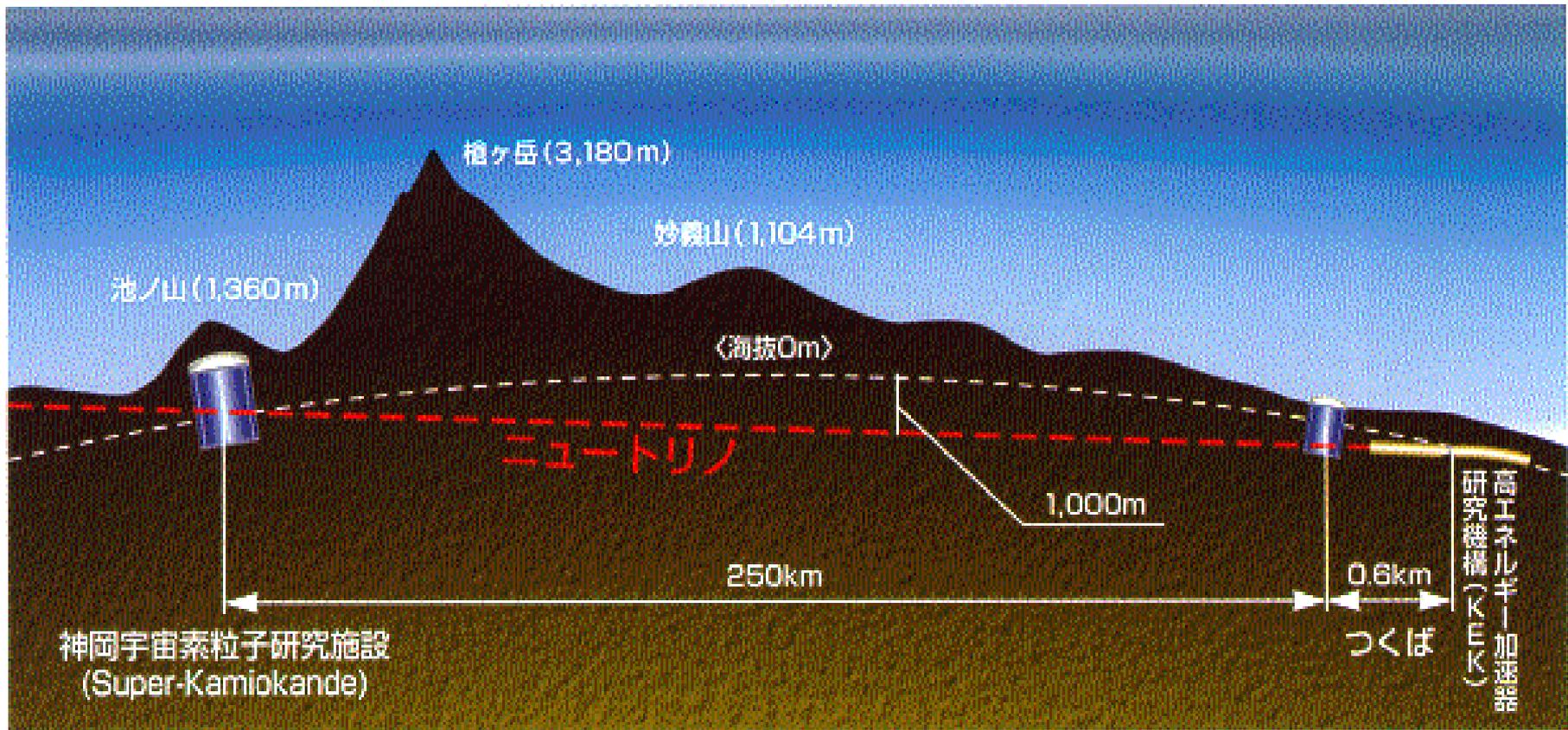
太陽方向

K2K実験 (長基線振動実験)

ニュートリノの飛行距離 = 249825.4 m

長基線ニュートリノ振動実験断面図

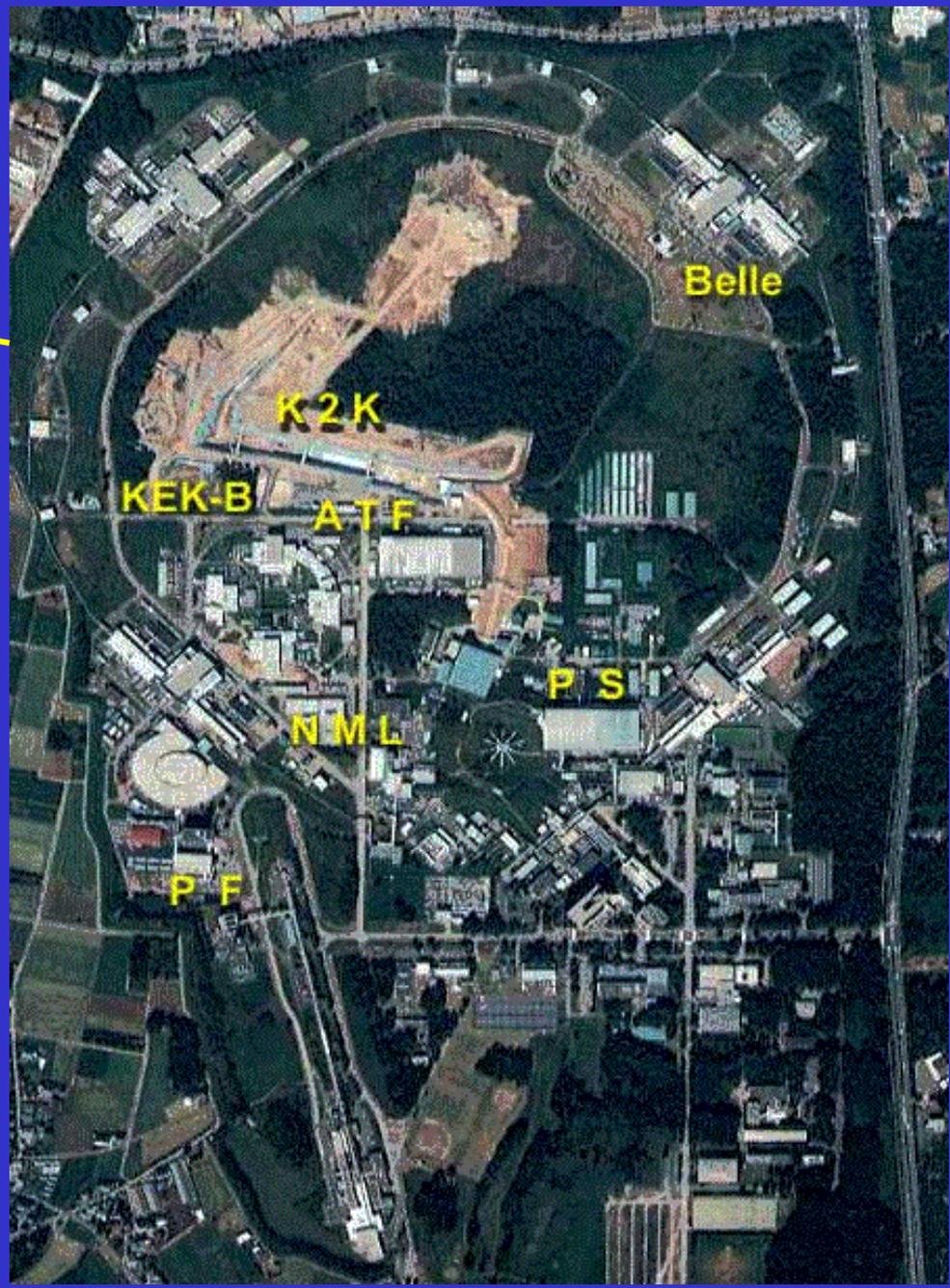
Long base line Neutrino Oscillation Experiment.



K2K実験施設

筑波の高エネルギー
加速器研究機構内に設置

神岡



K2K実験施設の概観



筑波から250kmアルプスの地中を飛行し 神岡で捉えられた第1号ニュートリノ 1999年6月19日

Super-Kamiokande

Run 7436 Event 14054126

99-06-19:18:42:49

Inner: 516 hits, 1018 pE

outer: 2 hits, 2 pE (in-time)

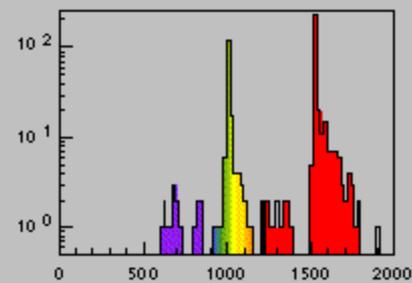
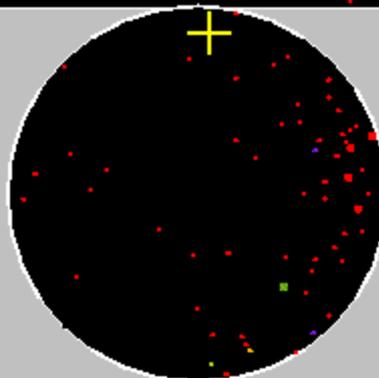
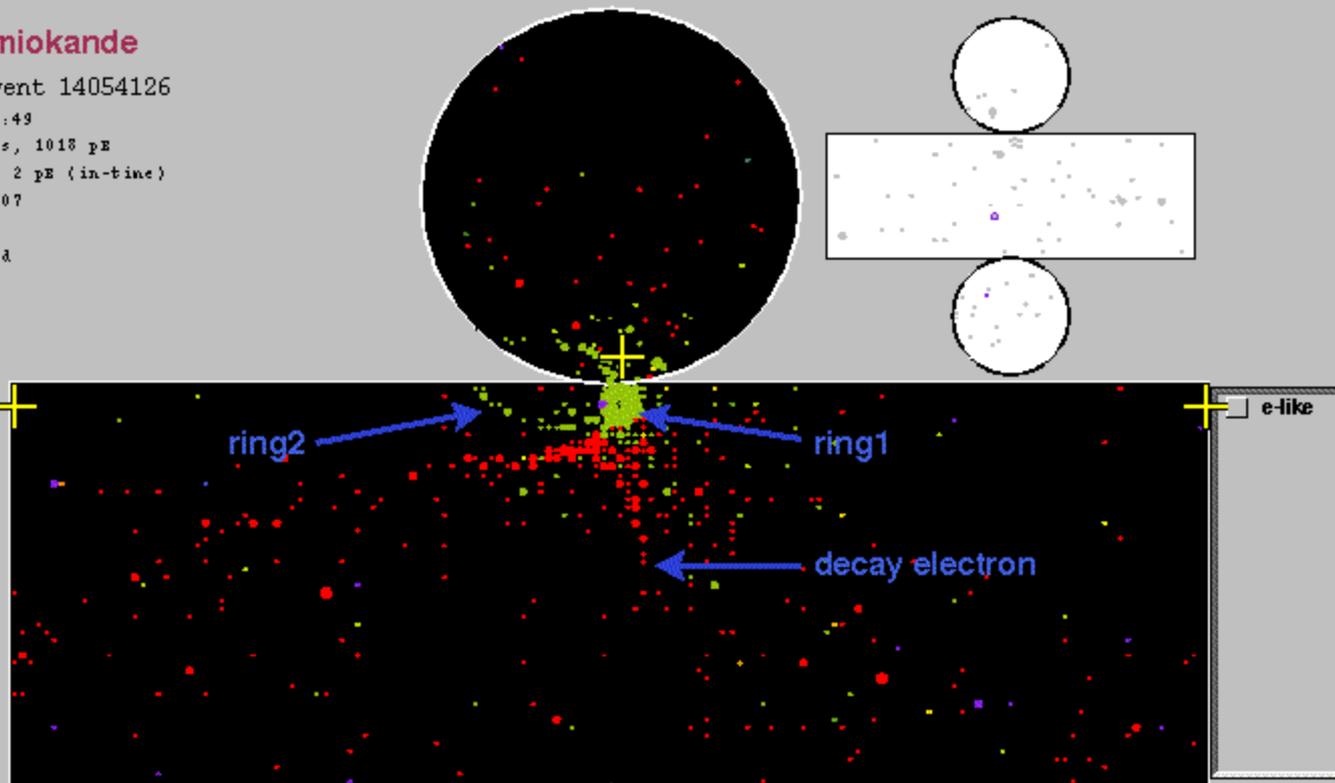
Trigger ID: 0x07

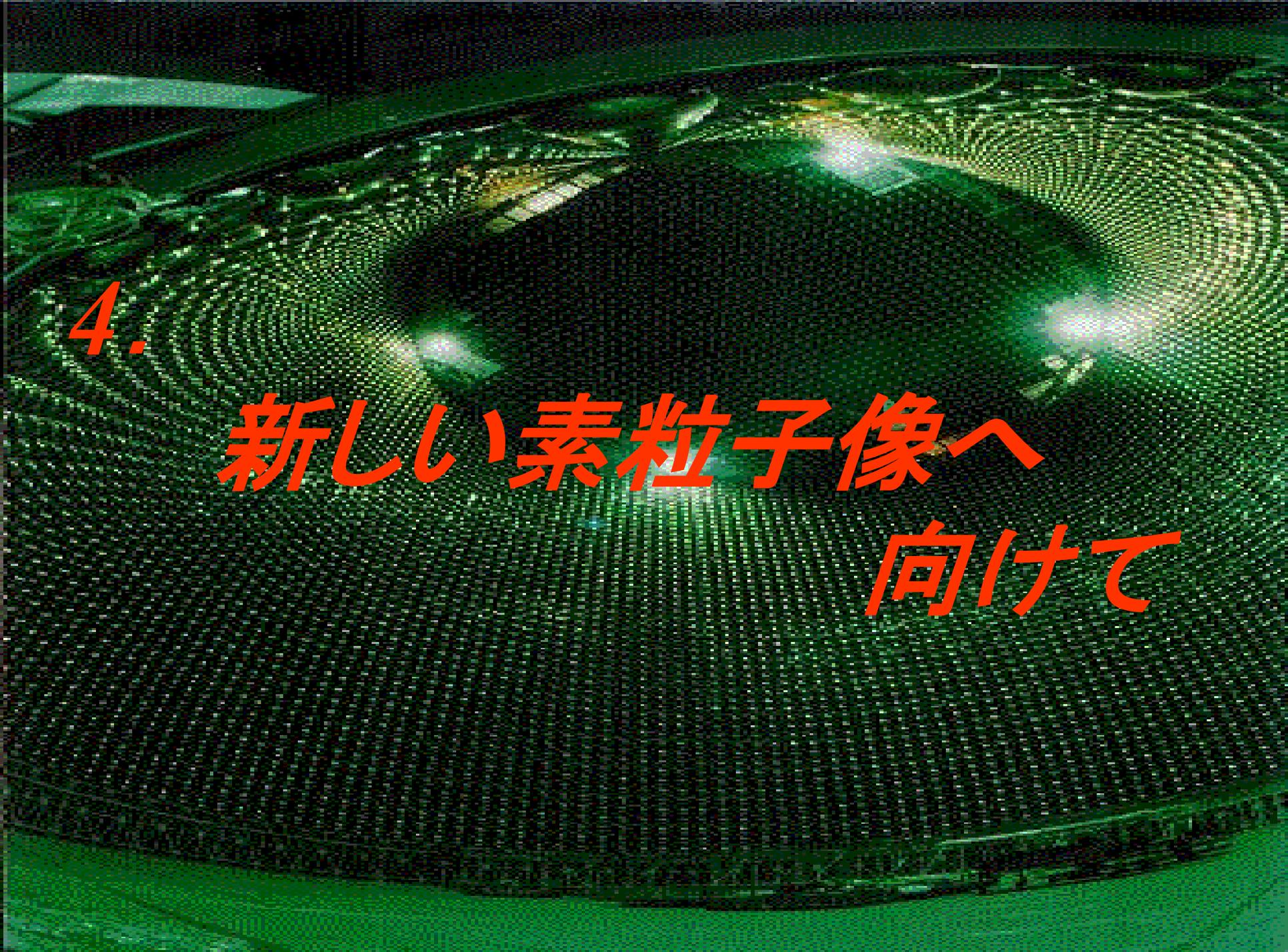
sp ver: 0

Fully-contained

Resid(ns)

- > 182
- 160- 182
- 137- 160
- 114- 137
- 91- 114
- 68- 91
- 45- 68
- 22- 45
- 0- 22
- -22- 0
- -45- -22
- -68- -45
- -91- -68
- -114- -91
- -137- -114
- < -137



An aerial night photograph of a city, with a large stadium in the foreground illuminated in a vibrant green. The stadium's seating and field are clearly visible, and the surrounding city lights create a bokeh effect in the background.

4.

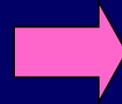
新しい素粒子像へ 向けて

大気ニュートリノからの要求



{
クォーク、荷電レプトンに比べて質量が極めて小さい
世代間混合がクォーク部分と全く異なる性質

ニュートリノ質量の存在



標準模型の拡張

世代間質量階層構造、混合に新たな謎



右巻きニュートリノのだけの導入で良いのか？

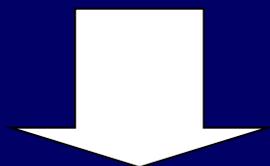


ニュートリノ質量以外の新たな物理なし

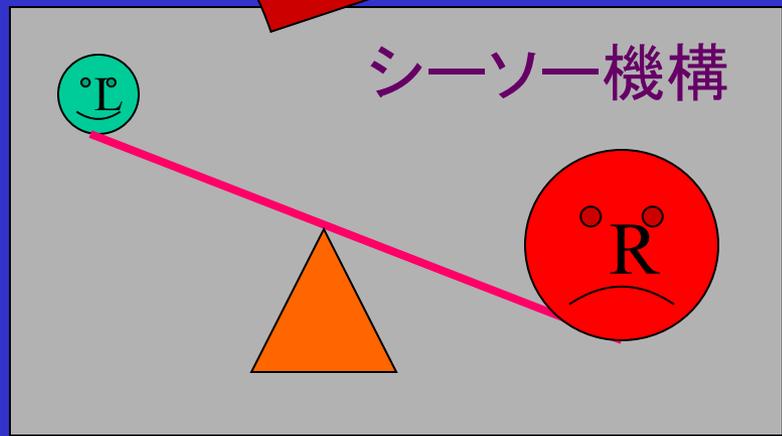
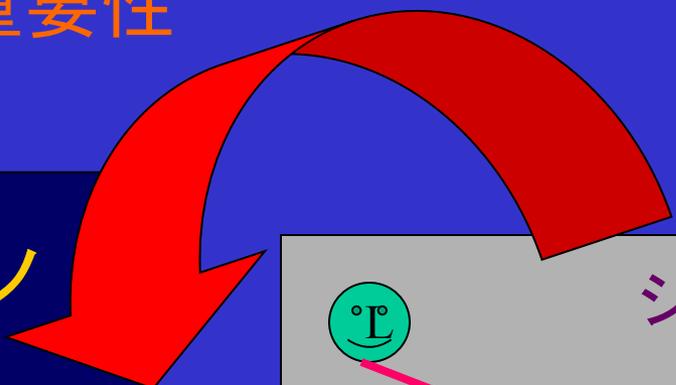
背後により深い何らかの物理的背景が存在する？

右巻きニュートリノの重要性

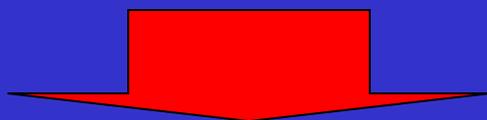
重い右巻きニュートリノ



軽い左巻きニュートリノ



右巻きニュートリノだけがなぜ極端に重いのか？



高エネルギー領域に新しい物理が存在

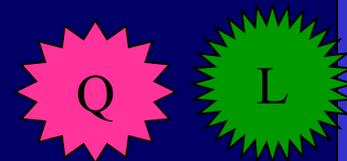
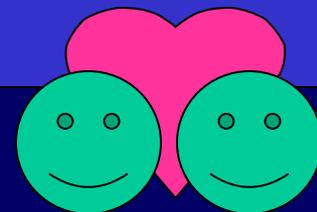
考えられる2つの標準模型拡張の枠組みの可能性

★ 大統一理論

クォーク、レプトンはもともとは同一の粒子



宇宙の進化の過程のある時点で分岐



仮定: 右巻きニュートリノだけが極端に重くなった
全て重くなる

- 左巻きニュートリノの軽さは説明がつく
- ニュートリノ部分の大きな混合は??



細工が必要

★ 超弦理論

あらゆる素粒子は同一の物理的実体(紐)の異なる運動状態



宇宙初期にクォーク、レプトンはすでに別々の粒子



クォーク、レプトン間の関係が弱い

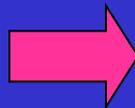


大きな世代間混合も可能

軽い右巻きニュートリノの存在

太陽ニュートリノ観測
大気ニュートリノ観測
K2K実験

ニュートリノ振動



軽い右巻きニュートリノの存在の是非

大統一理論と超弦理論の区別ができる可能性

宇宙物理との関係

質量を持つニュートリノは宇宙物理にも大きな影響をもたらす

★ 暗黒物質の候補となる

銀河、銀河団の観測



膨大な量の光らない物質
の存在 (暗黒物質)

暗黒物質

密接な関係

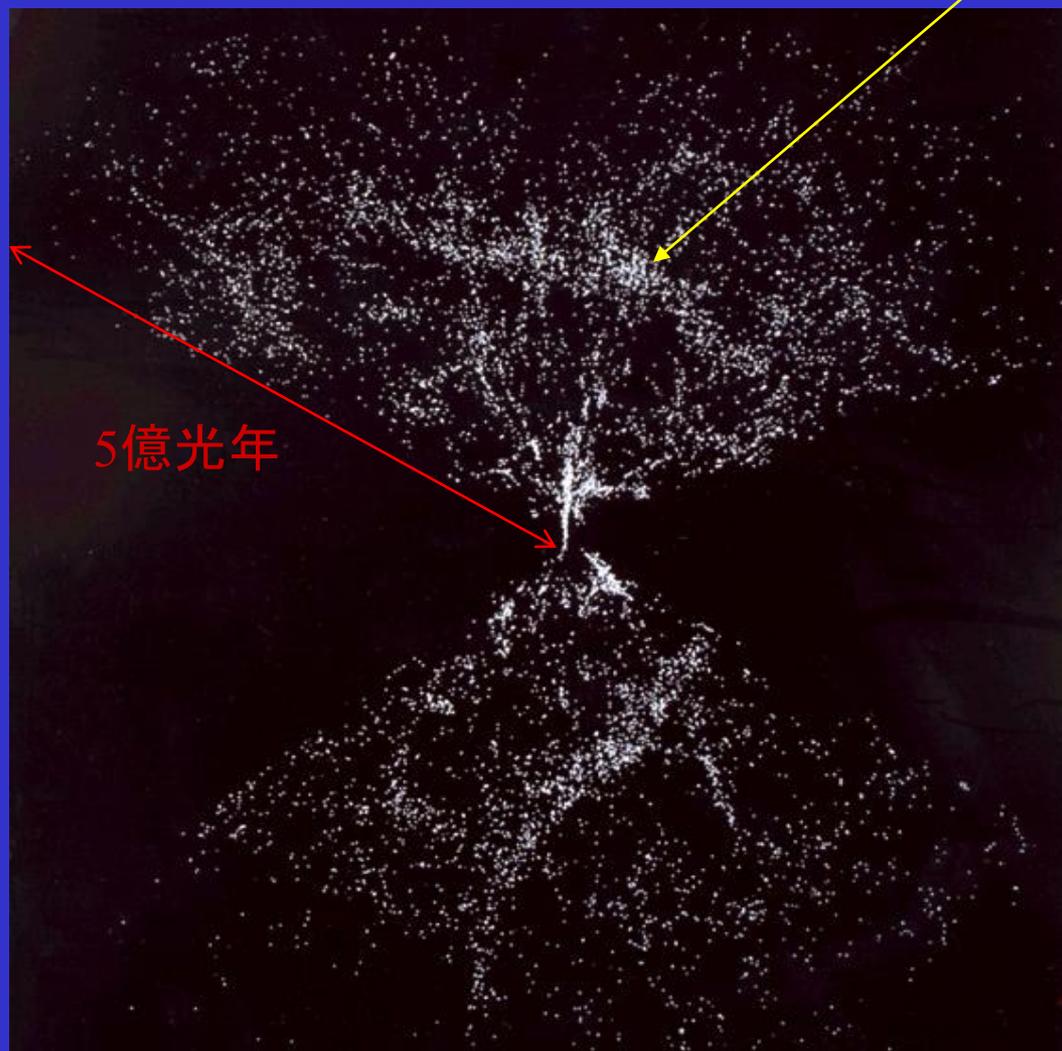
宇宙の大規模構造



大規模構造

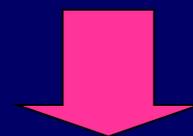
宇宙に銀河は一様には分布していない。

グレートウォール
ボイド



5億光年

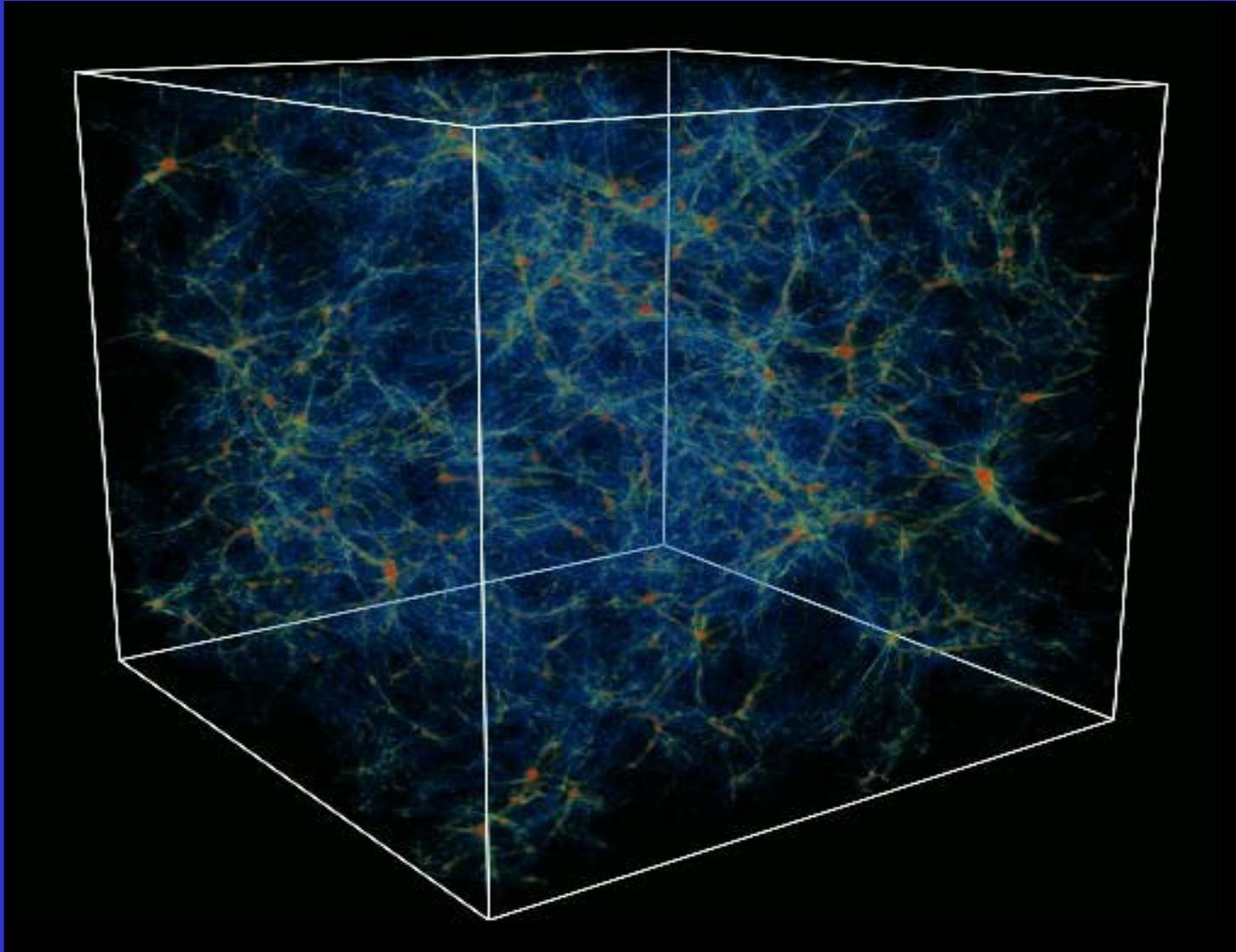
大規模構造の起源



暗黒物質の存在により
説明可能

数eVの質量を持つニュートリノは
一つの候補

冷たい暗黒物質と熱い暗黒物質から導かれる大規模構造 (数値シミュレーションに基づく)



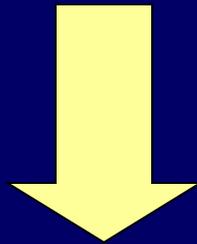


軽元素合成への影響

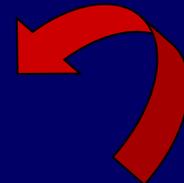
もし軽い右巻きニュートリノがあった場合

^4He 合成時期

左巻きニュートリノ \longleftrightarrow 振動 \longleftrightarrow 右巻きニュートリノ

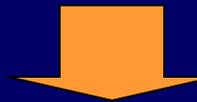


弱い相互作用と宇宙膨張



宇宙のエネルギー密度

中性子総数



中性子は全て ^4He に取り込まれる

^4He 合成量を決定

小さなニュートリノ質量は素粒子物理の新たな
展開に向けて大きな窓を開いてくれた。

現在進行中のニュートリノ振動実験計画からの
新しい結果に期待したい。

