



素粒子物理学とニュートリノ

第二部 ニュートリノの物理学

東京都立大学理学研究科物理学専攻
素粒子理論研究室助手 安田修

ニュートリノ振動(量子力学的効果)

実はずっと以前から、ニュートリノに質量がある場合には、ひとつの種類
のニュートリノから別な種類のニュートリノに変換する可能性が
知られていた(振動と呼ばれる理由は次ページ):

1957年 ポンテコルボ

$\bar{\nu}_e \rightleftharpoons \bar{\nu}_\mu$

1962年 牧-中川-坂田

$e \rightleftharpoons \mu$



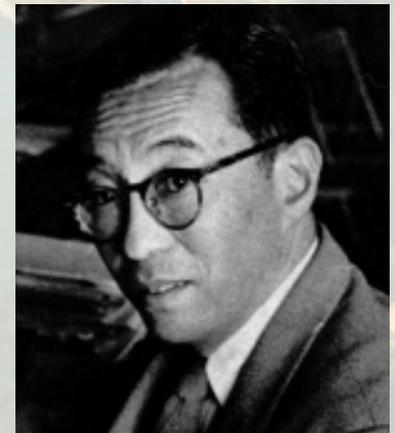
ポンテコルボ



牧二郎



中川昌美



坂田昌一

ニュートリノ振動

種類の違うニュートリノの状態 ν_e, ν_μ と質量の違うニュートリノの状態 ν_1, ν_2 (質量 m_1, m_2) が 2 行 2 列の行列により

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} U_{e1} & U_{e2} \\ U_{\mu 1} & U_{\mu 2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \end{pmatrix}$$

混合行列は牧・中川・坂田行列と呼ばれる

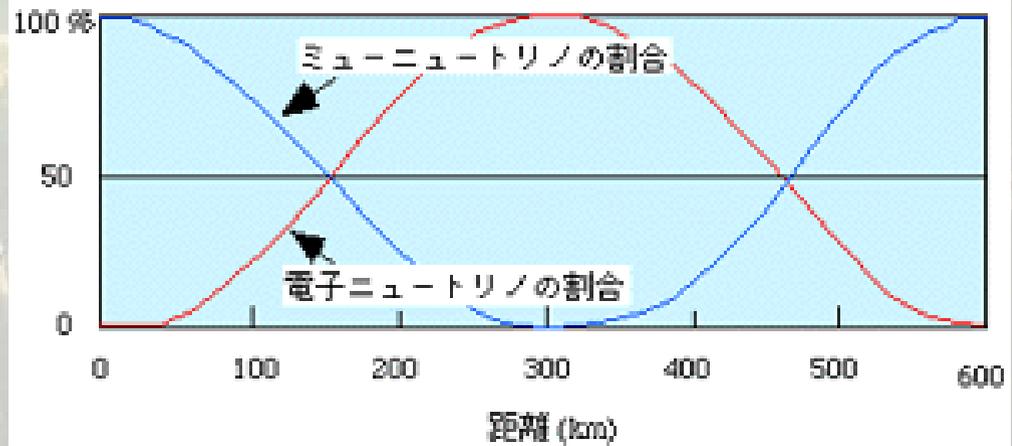
と関係つけられている時、時間 t 、距離 L ($= c t$) だけニュートリノが走る間に ν_μ から ν_e に変換される確率は

$$\sin^2 \left(\frac{(\Delta m^2 c^4) (L / \hbar c)}{4E} \right) = \sin^2 \left(1.27 \frac{(\Delta m^2 c^4 / \text{eV}^2) (L / \text{km})}{(E / \text{GeV})} \right)$$

となり、振動的振る舞い
を示す。

$$\hbar = h / (2\pi),$$

$$\Delta m^2 \equiv m_2^2 - m_1^2$$



ニュートリノ振動を示唆する実験事実

太陽ニュートリノ欠損	Homestake(米), Kam(日), SK(日), SNO(加), GALLEX(伊), SAGE(露)
大気ニュートリノ異常	IMB(米), Kam(日), SK(日), Soudan2(米), MACRO(伊)
加速器ニュートリノ欠損	K2K(日)
原子炉ニュートリノ欠損	KamLAND(日)

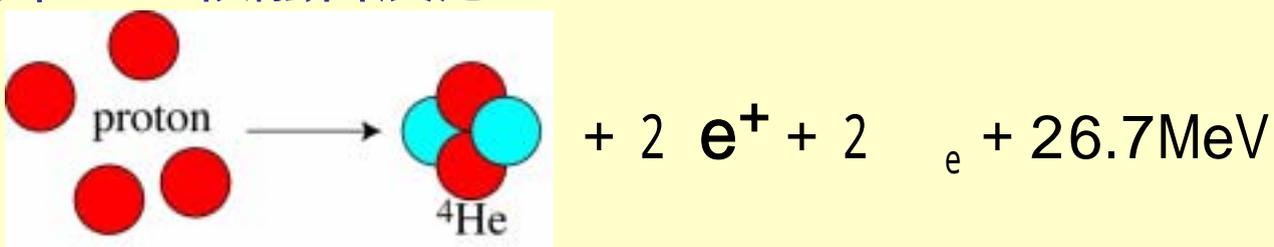
Kam: カミオカンデ

SK: スーパーカミオカンデ

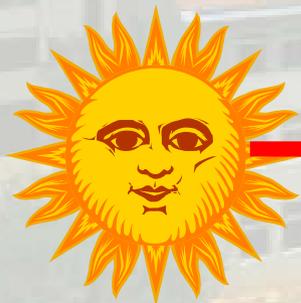
KamLAND: カムランド

太陽ニュートリノ欠損

太陽中では核融合反応



がつねに起こっていてその e^- (太陽ニュートリノ) が地球に到達しているが、地上での観測値は理論値の約1/2以下

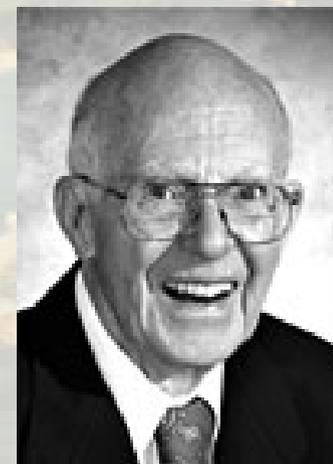


電子ニュートリノ



太陽ニュートリノ欠損は、1970年代からデイビスが米国サウスダコタ州にあるホームステークで行ってきた実験で最初に観測されていた。

しかしニュートリノ振動という解釈で完全に解決されたのは2002年末のことである。



デイビス

大気ニュートリノ異常

地球には宇宙から1次宇宙線がつねに降り注いでいるが、それらが大気中の核子と衝突して2次宇宙線が生成される。

ほとんどの粒子は \pm 中間子となり、それがミューオン μ^\pm に崩壊し、さらに電子又は陽電子へと崩壊する。

粒子と反粒子の違いを無視すれば

$$(\mu^+ + \bar{\mu}^-) : (e^+ + \bar{e}^-) = 2 : 1$$

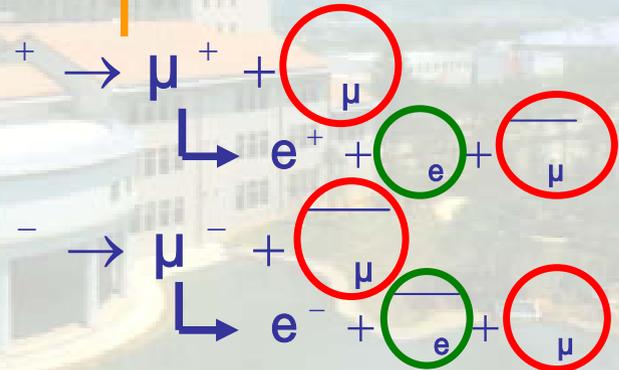
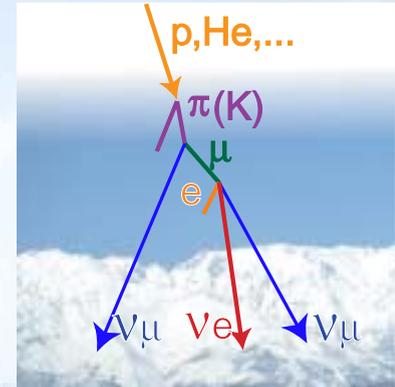
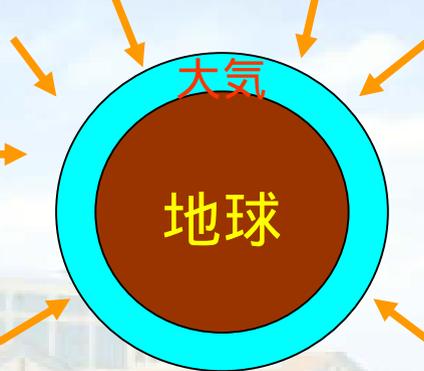
となるはずであるが、観測結果は

$$(\mu^+ + \bar{\mu}^-) : (e^+ + \bar{e}^-) = 1.3 : 1$$

となつて理論と食い違っている。

大気ニュートリノ異常は1998年のスーパーカミオカンデの発表で確立した。

1次宇宙線(陽子、ヘリウム)



戸塚洋二



梶田隆章

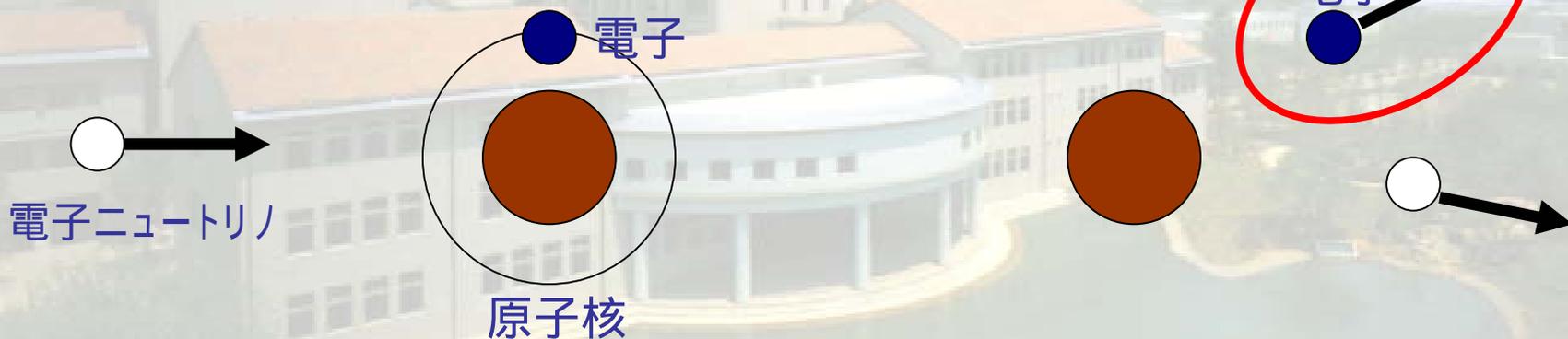
素粒子の感じる力

(重力を除くと)ニュートリノは弱い力しか感じない
観測はものすごく難しい

素粒子		強い力	電磁気力	弱い力	重力
クォーク	u				
	d				
レプトン	e	×			
	ν_e	×	×		

ニュートリノの観測の原理

ニュートリノは弱い力しか感じないので、弱い力を通してニュートリノと相互作用を起こした荷電粒子を観測する

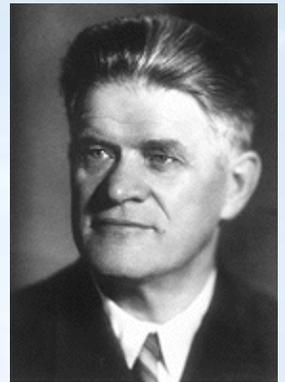


荷電粒子の観測の原理

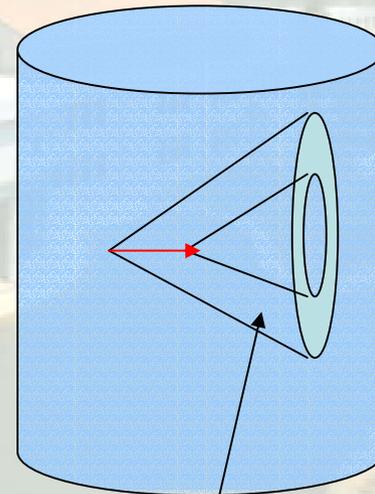
(1) 水中

光速度近くで水中を走る荷電粒子はある速度(あるエネルギー)以上の時にチェレンコフ光と呼ばれる光を放つ。その光を光電子増倍管で観測する。

IMB, カミオカンデ、スーパーカミオカンデ



チェレンコフ



チェレンコフ光

(2) 液体シンチレーター((CH₂)_n)の中

液体シンチレーターの中を荷電粒子が通過すると原子中の電子が一時励起され、また元の状態に落ちる際に光を発する。

カムランド



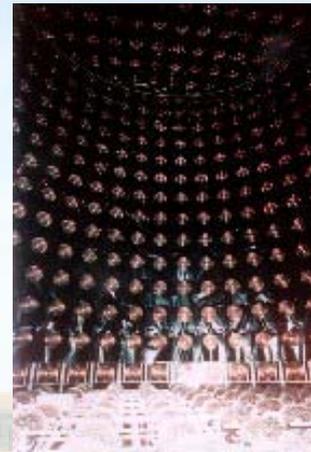
スーパーカミオカンデ

水による測定器

その前進カミオカンデの拡張施設

太陽ニュートリノ欠損解決における
重要な貢献

大気ニュートリノ異常現象の発見



カミオカンデ



小柴昌俊



スーパーカミオカンデ

K2K (加速器ニュートリノ欠損)

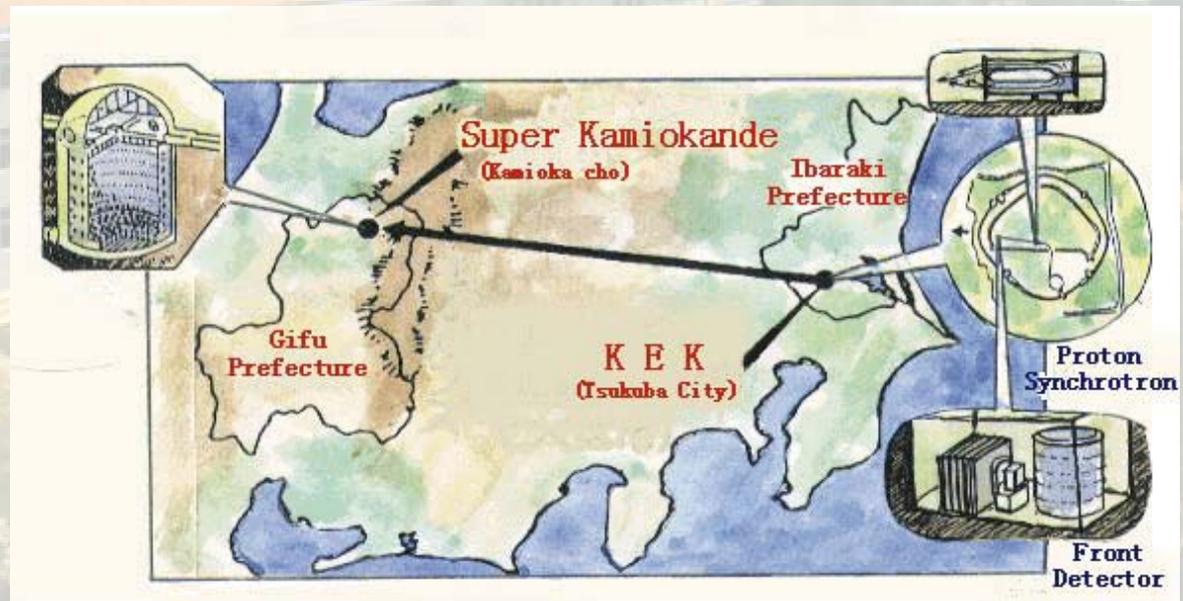
高エネルギー研究機構(筑波) スーパーカミオカンデ(神岡)

人工的なニュートリノ(μ)が距離250 kmでどれだけ別なニュートリノに変換しているかを測定(世界初)

その結果はスーパーカミオカンデの大気ニュートリノの結果と一致



西川公一郎



カムランド(原子炉ニュートリノ欠損)

液体シンチレーターによる測定器

各地にある原発(平均距離200km)から
来る反電子ニュートリノ $\bar{\nu}_e$ を検出

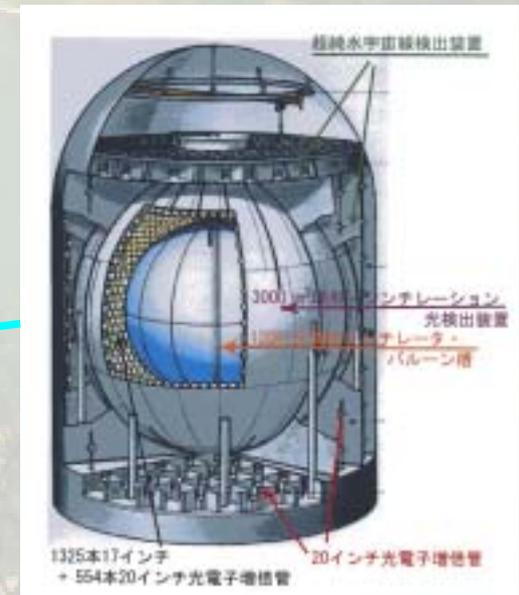
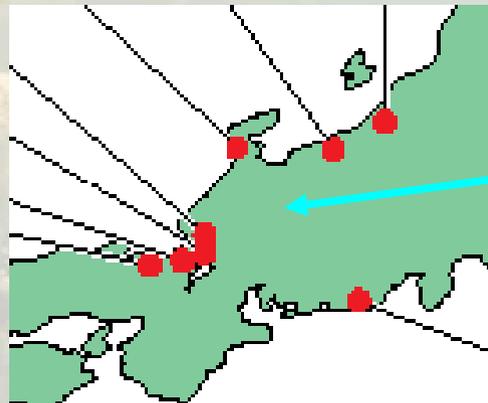


原子炉ニュートリノの欠損を発見(世界初)

その結果は太陽ニュートリノの結果と一致
(独立な検証)



鈴木厚人



現在までのニュートリノ振動実験のまとめ

太陽ニュートリノ・原子炉ニュートリノ

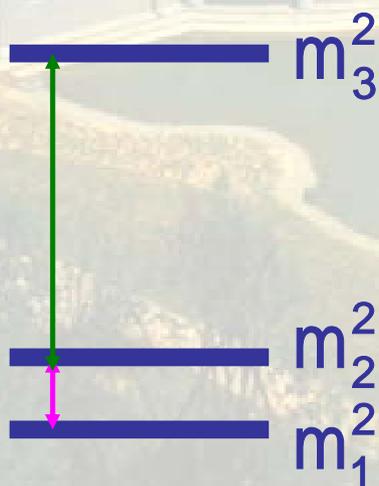
$$m_{21}^2 = 7 \times 10^{-5} \text{eV}^2$$

大気ニュートリノ・加速器ニュートリノ

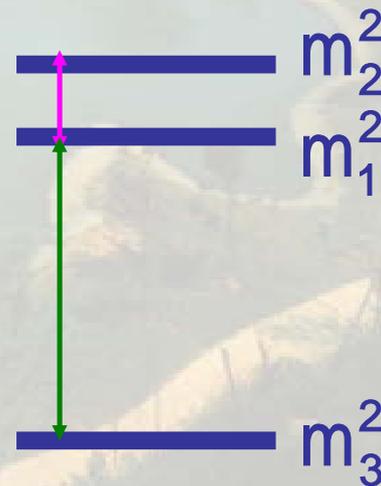
$$m_{32}^2 = 3 \times 10^{-3} \text{eV}^2$$

という結果が得られ、ニュートリノに質量があることが確定した。質量のパターンは現在の所、下図のどちらの可能性も残っている。

ニュートリノ振動からは、質量の二乗の差しかわからない



又は



宇宙論とニュートリノの質量

ニュートリノの質量があまりにも大きいと宇宙の膨張が止まってしまい、現在の観測と矛盾する $m_1 + m_2 + m_3 < 92 \text{ eV}$

ニュートリノの質量がある程度大きいと、宇宙の大規模構造形成(銀河の分布)が観測と矛盾する $m_1 + m_2 + m_3 < 3 \text{ eV}$

[現在の宇宙論]

宇宙のエネルギー(=質量)の内訳

2% 核子

30% コールドダークマター

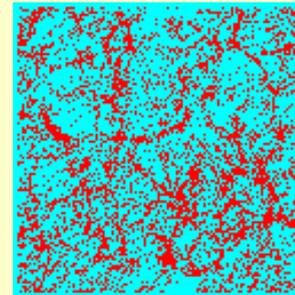
70% 真空エネルギー

質量の重い
未知の粒子
からなる暗
黒物質

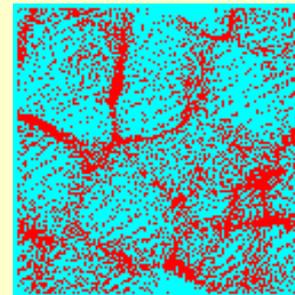
H^3 のベータ崩壊から m_e の質量に制限がついている: $m < 1 \text{ eV}$

ニュートリノの質量が宇宙の膨張に影響を与えることはほとんどない

天文学による銀河の分布の観測

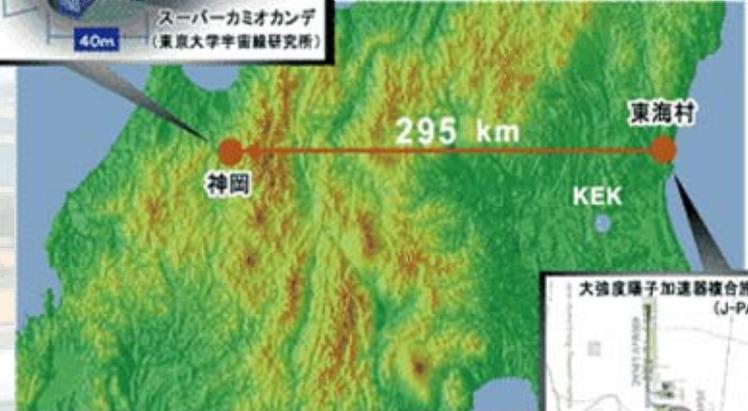
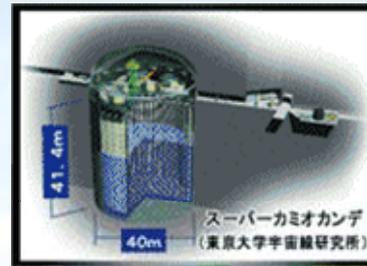


コールドダークマターのみ
(観測と一致)



充滿している
ニュートリノの質量が3 eV以上
の場合(観測と矛盾)

将来のニュートリノ実験 J-PARC計画



K 2 Kの拡張版(イベント数を50倍にして精密実験)

牧・中川・坂田行列の未知の要素 U_{e3} とその虚数部を測る

$$\begin{pmatrix} e \\ \mu \end{pmatrix} = U_{MNS} \begin{pmatrix} 1 \\ 2 \\ 3 \end{pmatrix}$$

$$U_{MNS} = \begin{pmatrix} U_{e1} & U_{e2} & U_{e3} \\ U_{\mu 1} & U_{\mu 2} & U_{\mu 3} \\ U_1 & U_2 & U_3 \end{pmatrix}$$

第一段階 (2007年~)

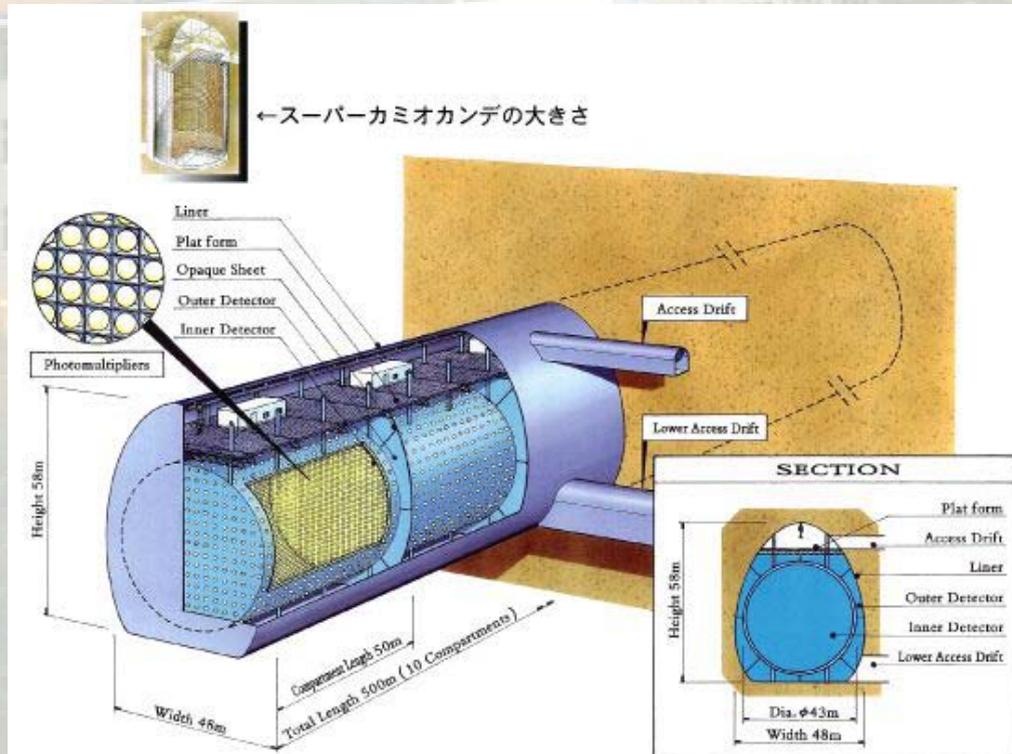
0.75MWのニュートリノビーム
(K2Kの50倍)

スーパーカミオカンデ

第二段階 (?年~)

4MWのニュートリノビーム
(K2Kの300倍)

ハイパーカミオカンデ
(スーパーカミオカンデの20倍)



ビデオ「クローズアップ現代」
(2000年10月12日放映)

