

ICRR Spring School 2025

2025年3月4日

# ニュートリノ研究 ～私の20代の頃のことを中心に～



東京大学宇宙線研究所 梶田隆章

# 目次

- カミオカンデ以前の宇宙線研究所でのニュートリノ研究
- 大学院生の頃
- カミオカンデ実験開始
- カミオカンデ:その後
- 大気ニュートリノの異常
- スーパーカミオカンデとニュートリノ振動の発見
- 宇宙線研が関係しているニュートリノ研究:その後
- まとめ

# カミオカンデ以前の宇宙線研究所でのニュートリノ研究

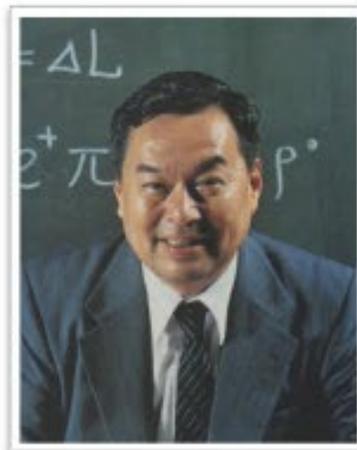
# 大気ニュートリノの発見(1965年)



1965年、世界の2つの実験  
(インドと南アフリカ)で大気  
ニュートリノの発見。

インド-日本-英国の共同研究  
@インド

C.V. Achar et al., PL 18, 196 (1965)



三宅三郎元所長  
(1965年当時は大阪市立大)  
(写真の提供元不明、すみません)

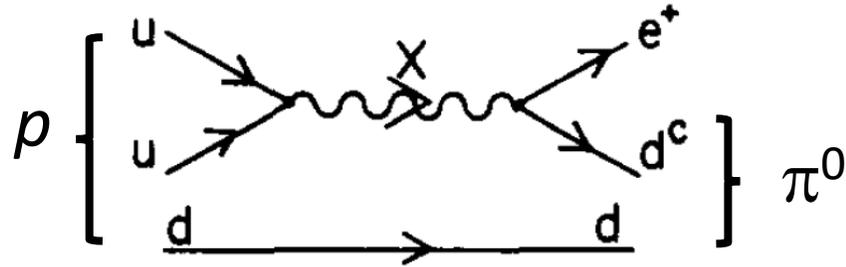


Photo by S. Gupta

# 大学院生の頃

# そもそもの始まり

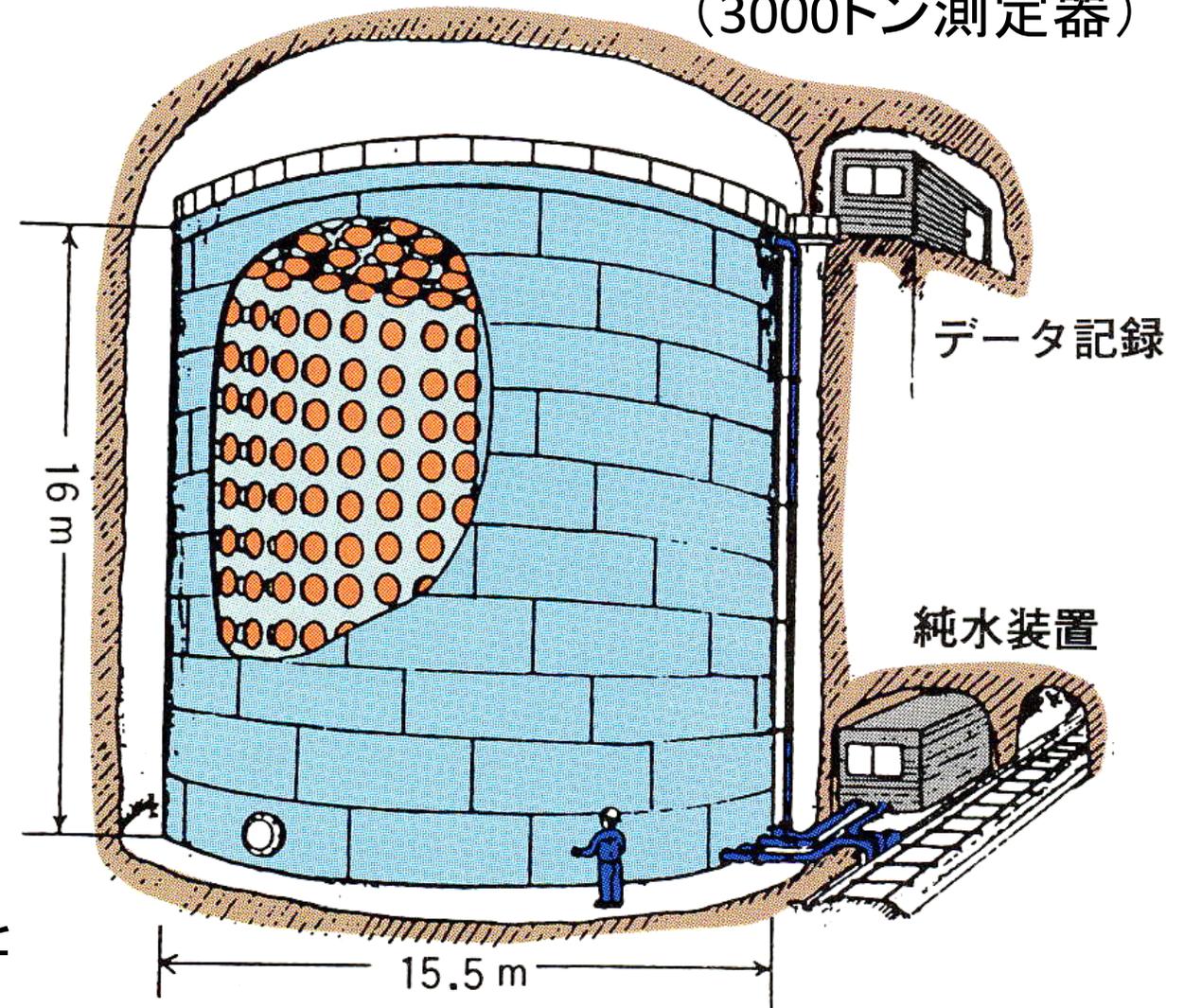
- ✓ 1970年代の新しい素粒子理論によって、原子核内にある陽子が約 $10^{30}$ 年の寿命で崩壊すると预言されました。



- ✓ これを受けて、世界中で陽子の崩壊を検出する実験が開始されました。その一つが**カミオカンデ**でした。

(私は、この実験に魅力を感じ、大学院に入学すると同時(1981年4月)にカミオカンデに参加しました)

カミオカンデ  
(3000トン測定器)

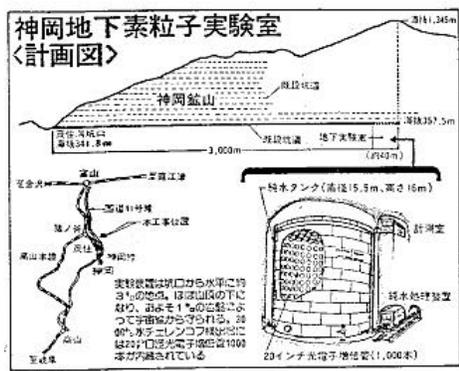


# サイエンス Exciting ドキュメント

レクチャー：三宅三郎東京大学 宇宙線研究所長 — 総予算5億の空前のビッグ・プロジェクト！ 神岡鉱山地底での“陽子消滅実験”がめざす驚異の真実を徹底レポート!!

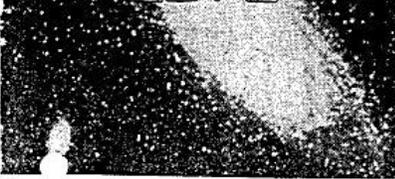


# 日本の最高頭脳集団が宇宙大崩壊の証拠探しに挑戦



人、水、火、空気。宇宙の森羅万象を形成する物質ほど不思議なものはない。万物は流転する……これまで物質は分裂、反応はしても消滅することはないと信じられてきた。また物質の最終単位(素粒子)も、原子核を構成する陽子・中性子・中間子レベルで説明されてきた。大学入試ならそれで間に合う。しかし、極小の「粒」はまだ存在していたのだ。物質の物質と、それを支配している法則への飽くなき探究は、ついに驚嘆すべき帰結に達した。物質は死ぬ、しかも、この超ミクロにおける発見は、超マクロ宇宙の誕生と滅亡の謎を一挙に解いてくれるのだ!!

いわれていたのは、物質は消滅しない。物質は流転する……これまで物質は分裂、反応はしても消滅することはないと信じられてきた。また物質の最終単位(素粒子)も、原子核を構成する陽子・中性子・中間子レベルで説明されてきた。大学入試ならそれで間に合う。しかし、極小の「粒」はまだ存在していたのだ。物質の物質と、それを支配している法則への飽くなき探究は、ついに驚嘆すべき帰結に達した。物質は死ぬ、しかも、この超ミクロにおける発見は、超マクロ宇宙の誕生と滅亡の謎を一挙に解いてくれるのだ!!



宇宙はいかに誕生したか…いかに滅亡するか…それはなぜか。疑いが解かれた

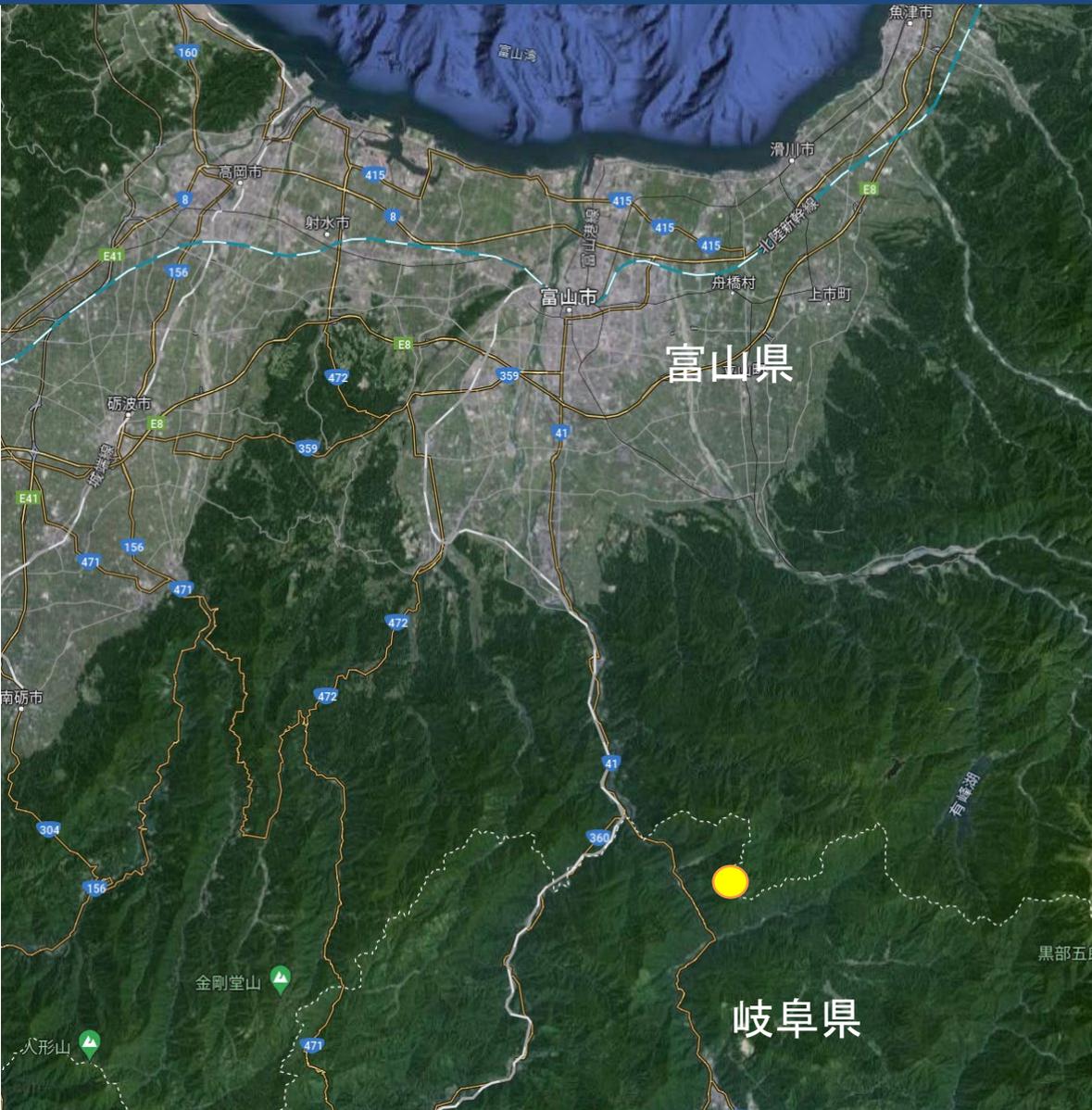
宇宙が誕生した瞬間に決定された。現在を思えば、宇宙の誕生は、大抵、理論は主眼とする。宇宙が誕生し、物質の存在が決定された。まさにその瞬間に、死、ガイムワット、宇宙の死、宇宙の死を意味する。人(物質)が死ぬように、宇宙(物質)にも寿命がある。しかし、最新の物理学は、大統一理論は宇宙の死を必ずしも、人(物質)が死ぬように、宇宙(物質)にも寿命がある。しかし、最新の物理学は、大統一理論は宇宙の死を必ずしも、人(物質)が死ぬように、宇宙(物質)にも寿命がある。しかし、最新の物理学は、大統一理論は宇宙の死を必ずしも、人(物質)が死ぬように、宇宙(物質)にも寿命がある。

物質の死を示す直径10cmの光の環が地底に走る

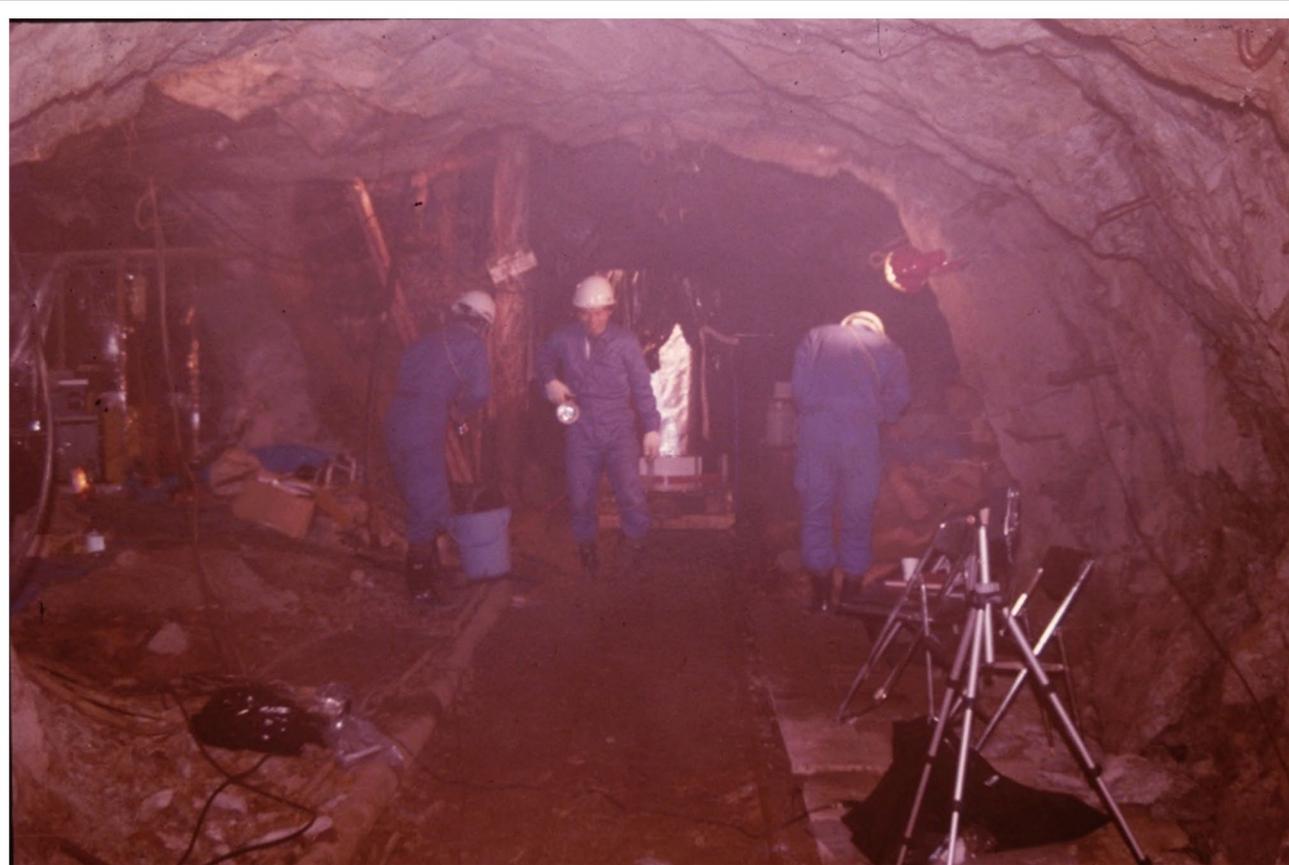
宇宙の誕生と滅亡の謎を一挙に解いてくれるのだ!!

出典不明(このページしかコピーしてなくて出典がわかりません)

# カミオカンデの場所



# 大学院修士1～2年の頃



修士1年の終りの頃？ 坑内での最初の計測（私はこの後に行きました）

光電子増倍管1000本のキャリブレーション  
（修士2年の秋、主に中畑君（前所長）と）

光電子増倍管の坑内への搬入



# カミオカンデ建設メンバー(1983年春、博士課程1年)



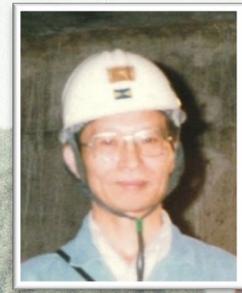
瀧田君 梶田(D1)

中畑君

有坂さん



鈴木先生



須田先生



宮野先生

戸塚洋二先生

小柴昌俊先生  
(2002年ノーベル物理学賞)

木舟正先生

# カミオカンデ建設 (1983 年春)

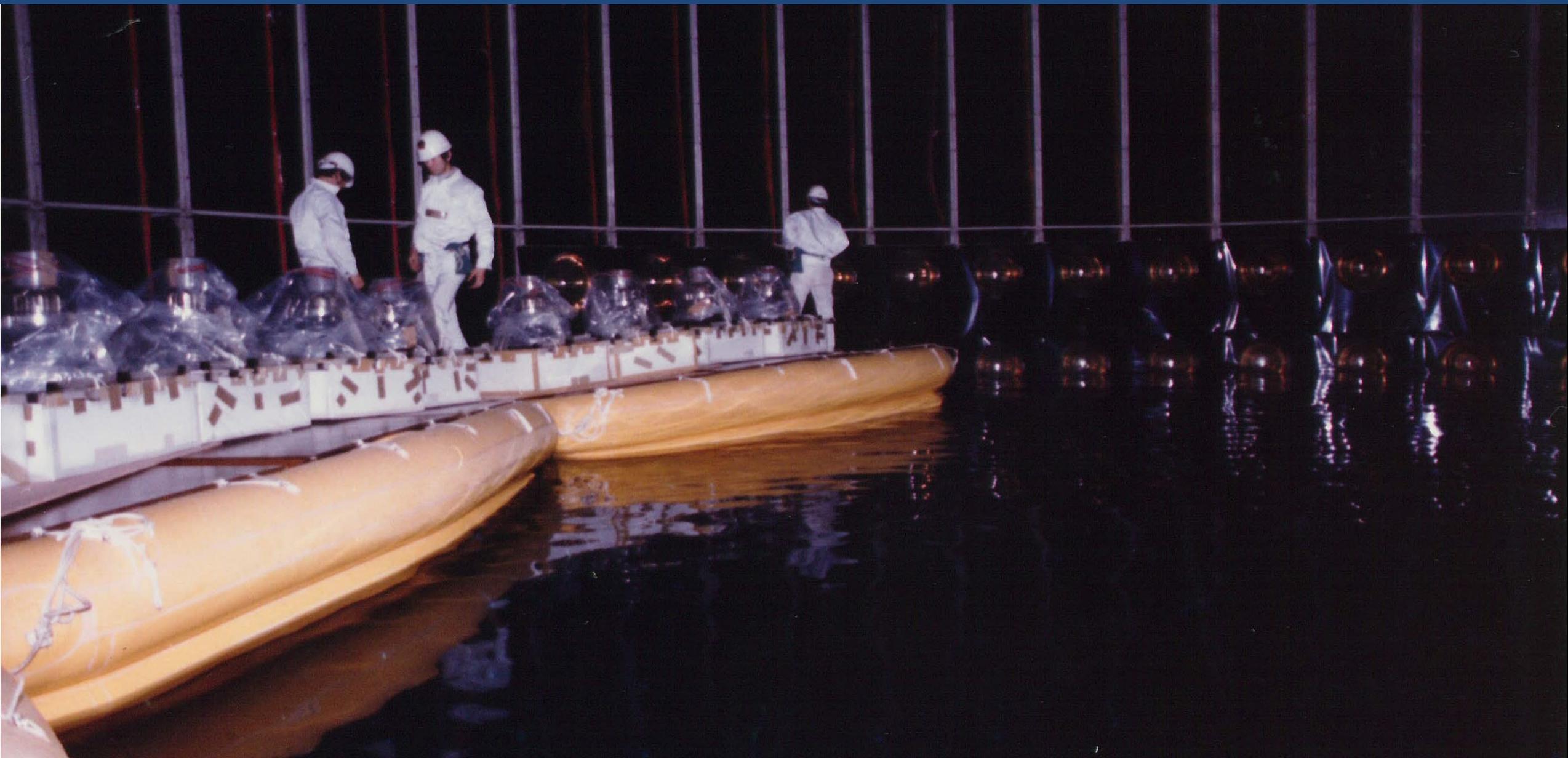


底面と側面2列の光電子増倍管を取り付け終えた時の写真。

この時、小柴先生と、現地での建設の責任者だった須田先生の間で、すぐに水を入れるか、信号の確認をしてから水を入れるかの大議論。

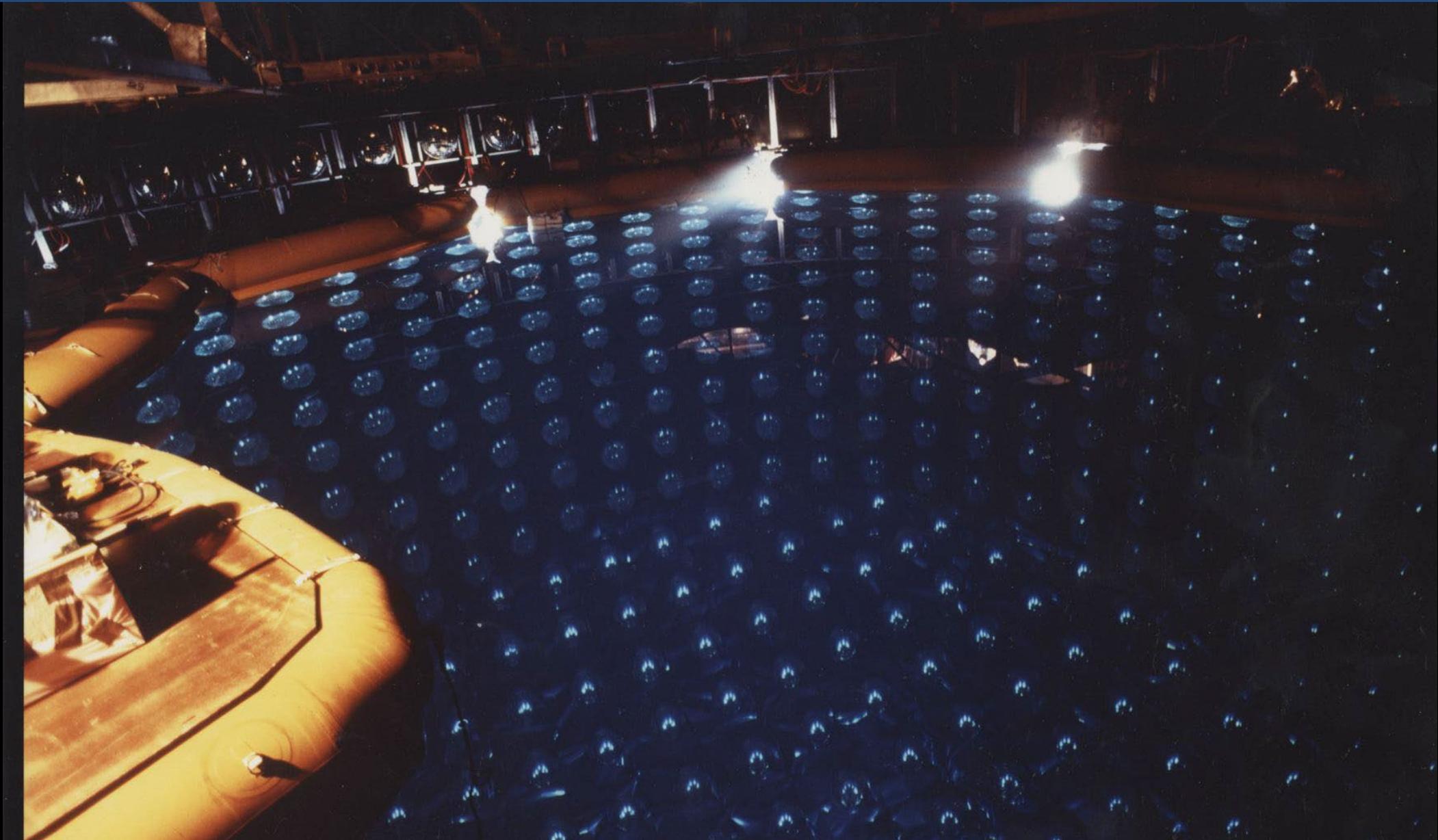
結局、とにかく少数でも確認することにして確認したところ、ほぼ全ての高電圧がショートしていることがわかり、全部接続をやりなおし。

# カミオカンデ建設 (1983 年春)

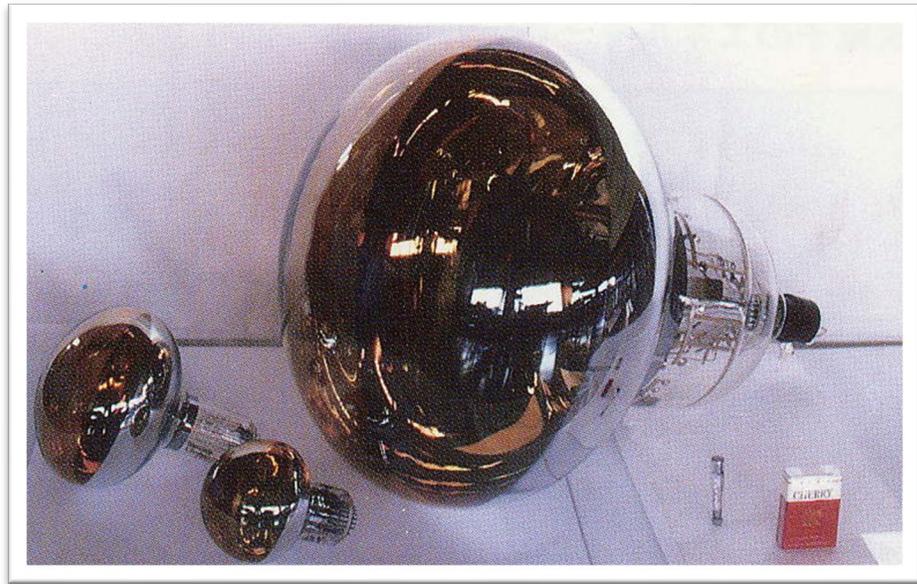


**カミオカンデ実験開始**

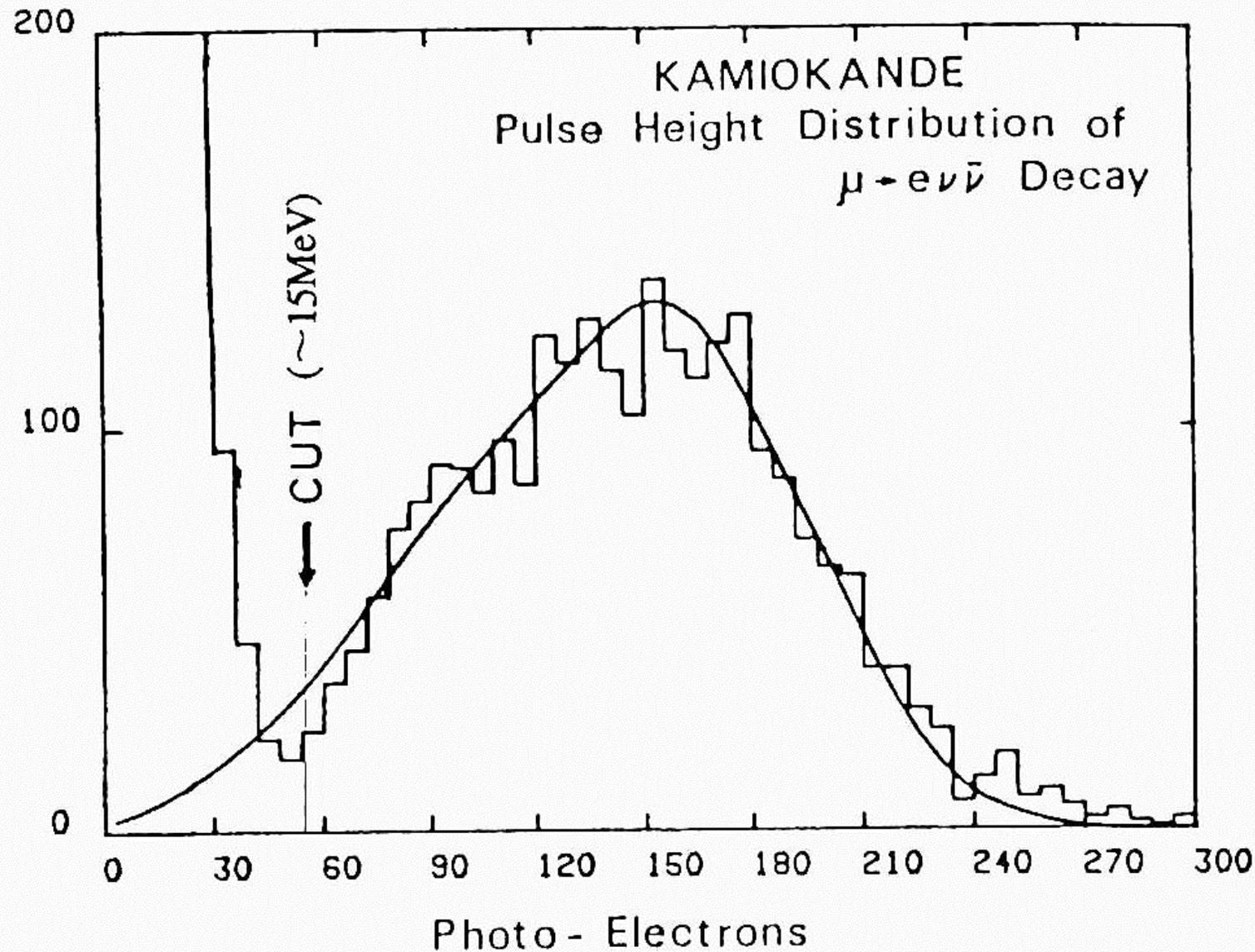
# カミオカンデ実験開始 (1983年7月6日)



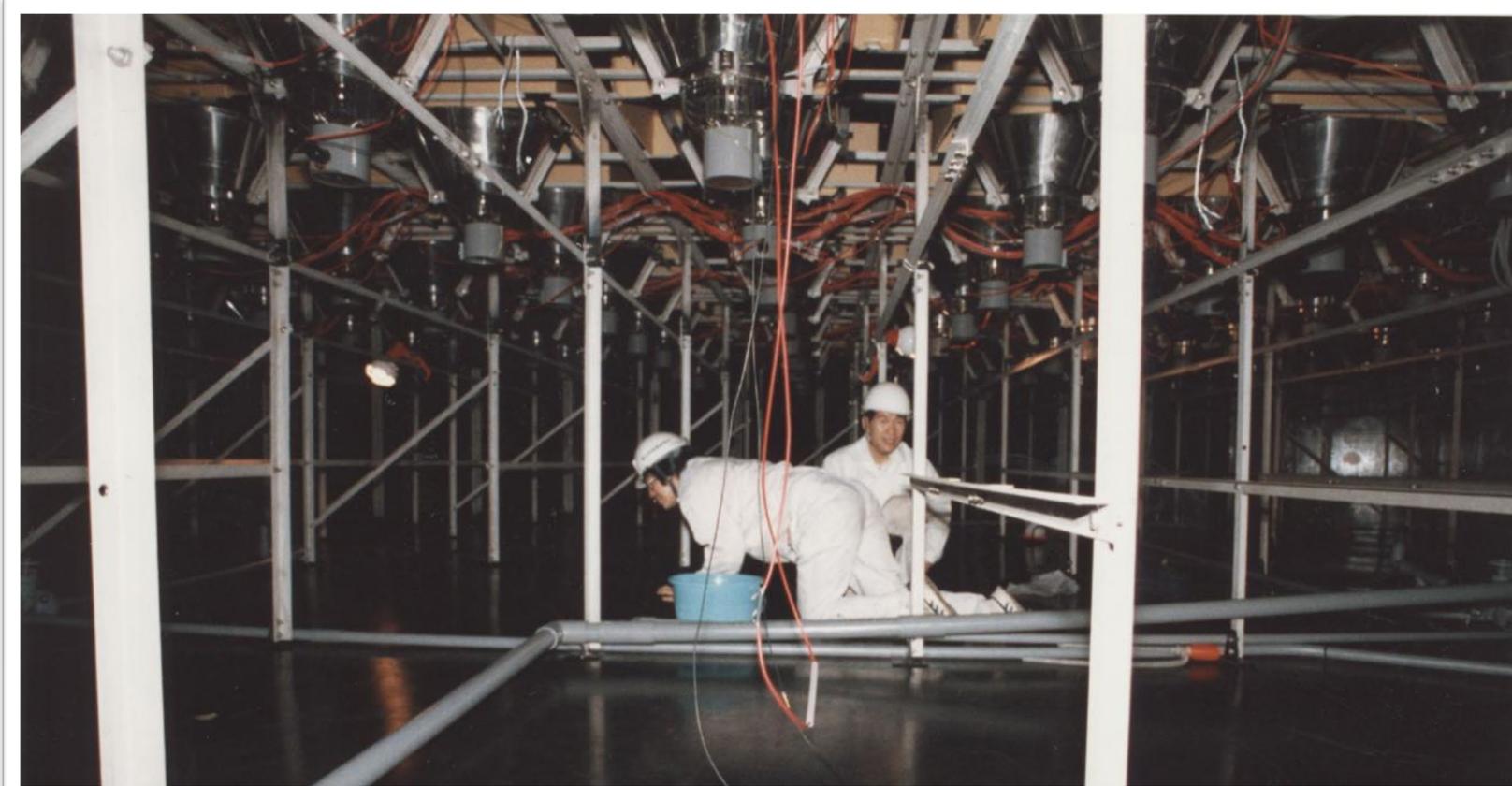
# $\mu \rightarrow e$ decay



- 陽子崩壊の明確な信号は見えませんでした。
- 一方、写真のカミオカンデの光検出器の性能は非常によく、宇宙線ミュオンの崩壊電子のデータ(右図)から、**もう少し**頑張って太陽ニュートリノを観測をしようとの提案(小柴先生、1983年秋)。



# 太陽ニュートリノの観測に向けた改造(カミオカンデ-II)



3000トンタンクの底での作業

共に1984(博士課程2年)-85年(博士課程3年)頃  
ともかく、大学院生活を楽しみました

3000トンタンクと岩盤との間に外水槽測定器を設置

こんなことをやりながら、何とか博士3年で博士論文を書きました(1986年3月博士)。

“Search for Nucleon Decays into Anti-neutrino plus Mesons”

(もちろん、陽子の崩壊は発見できませんでした。)

日本学術振興会のPDは不採用。ありがたいことに、東大の素粒子センターに助手として1年(最終的に2年)おいてもらえることに

UTICEPP-86-03  
Feb. 1986

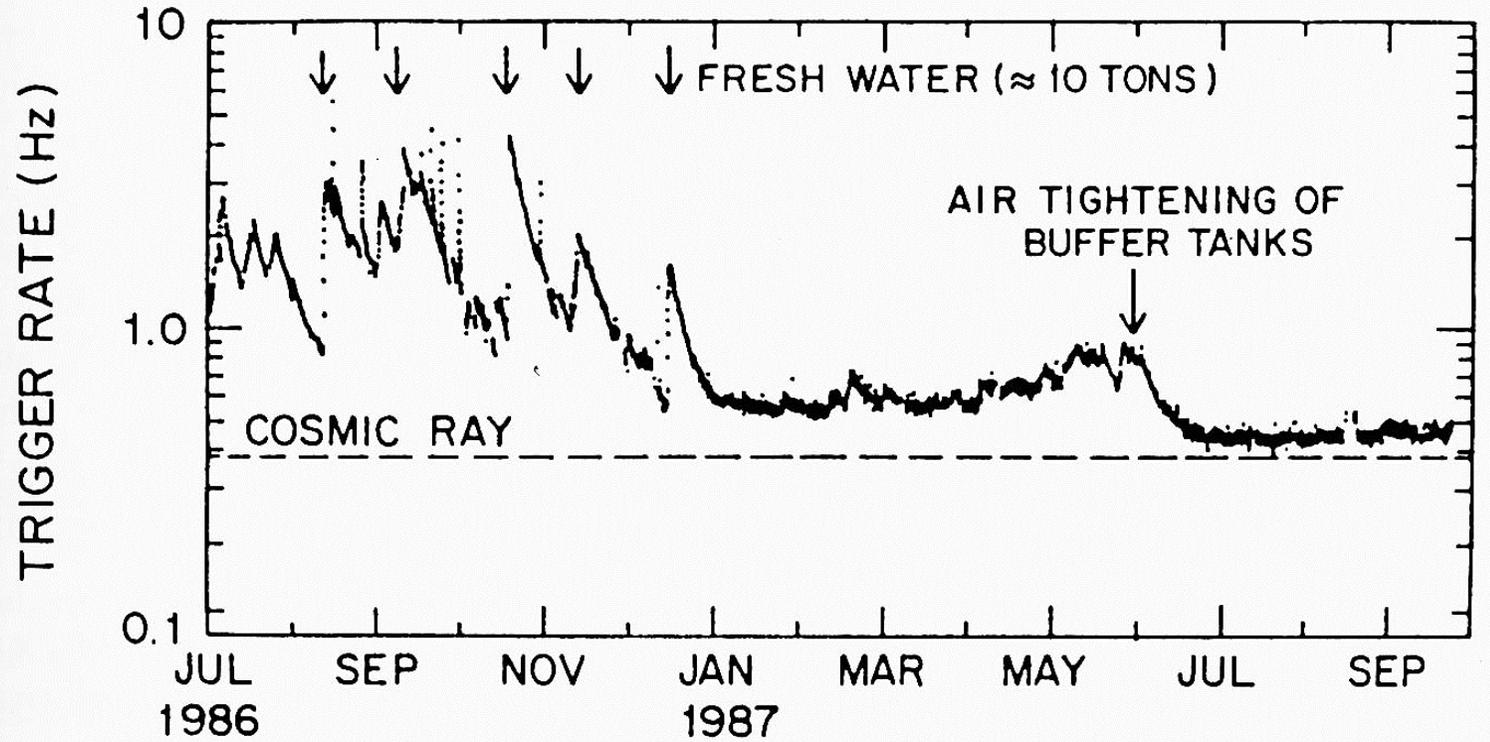
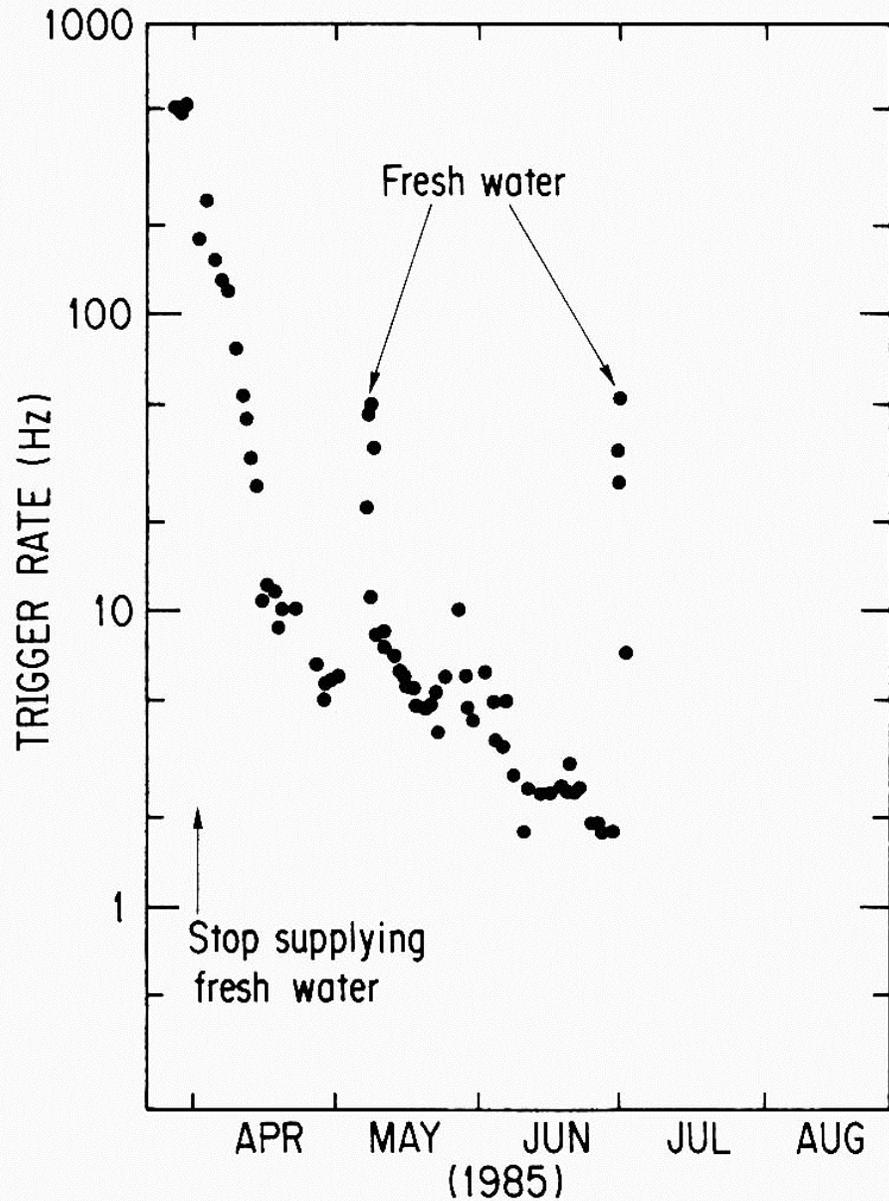
Search for Nucleon Decays into Anti-Neutrino plus Mesons

TAKAAKI KAJITA

Department of Physics, Faculty of Science,  
University of Tokyo

# カミオカンデ:その後

# 太陽ニュートリノの観測に向けて(カミオカンデ-II)



# 超新星爆発

SN1987A  
爆発前

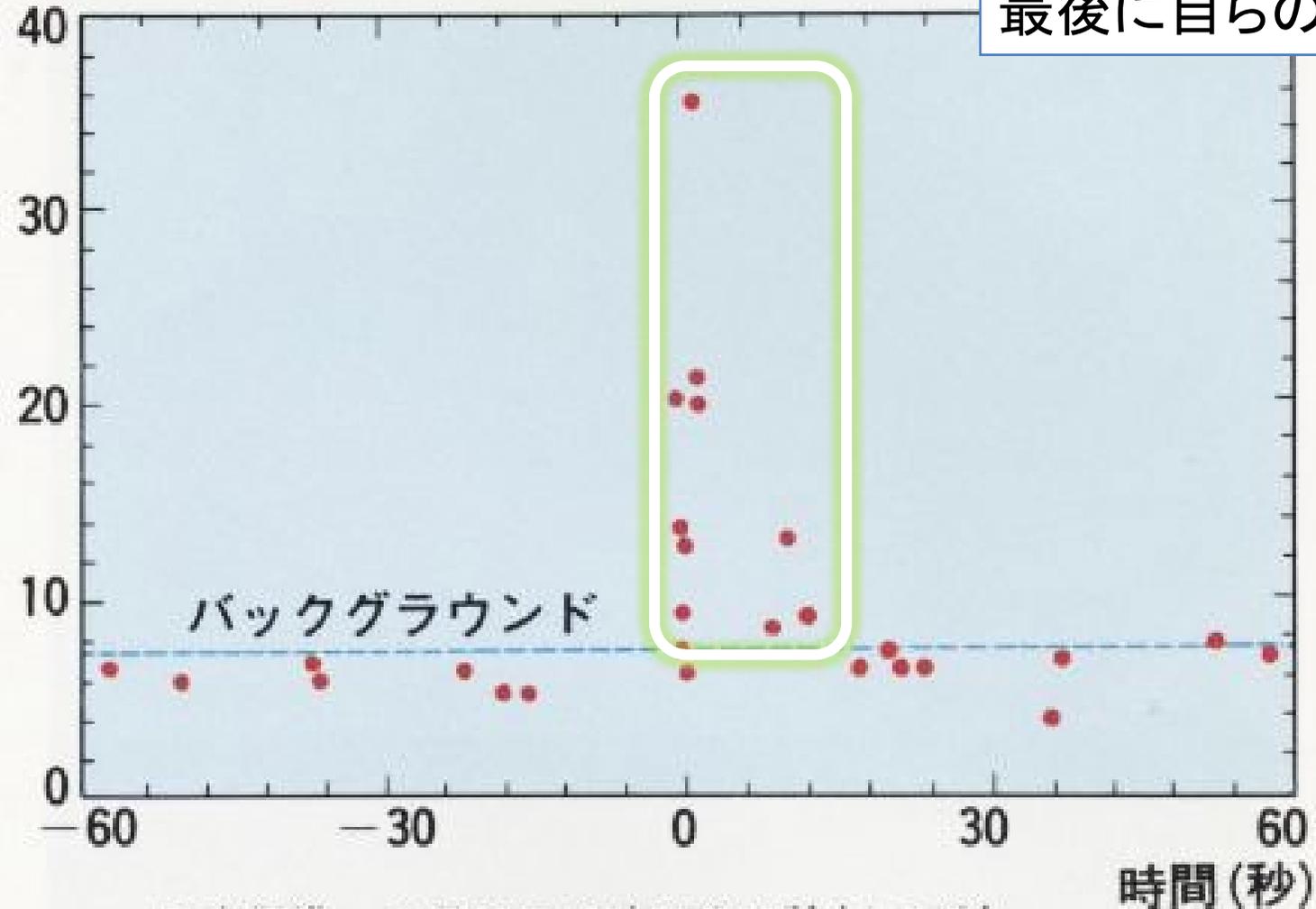


爆発後



# 超新星SN1987A (1987年2月23日)

二次電子のエネルギー (MeV)



超新星爆発のメカニズム、すなわち重い星がその最後に自らの重力でつぶれる現象、の解明

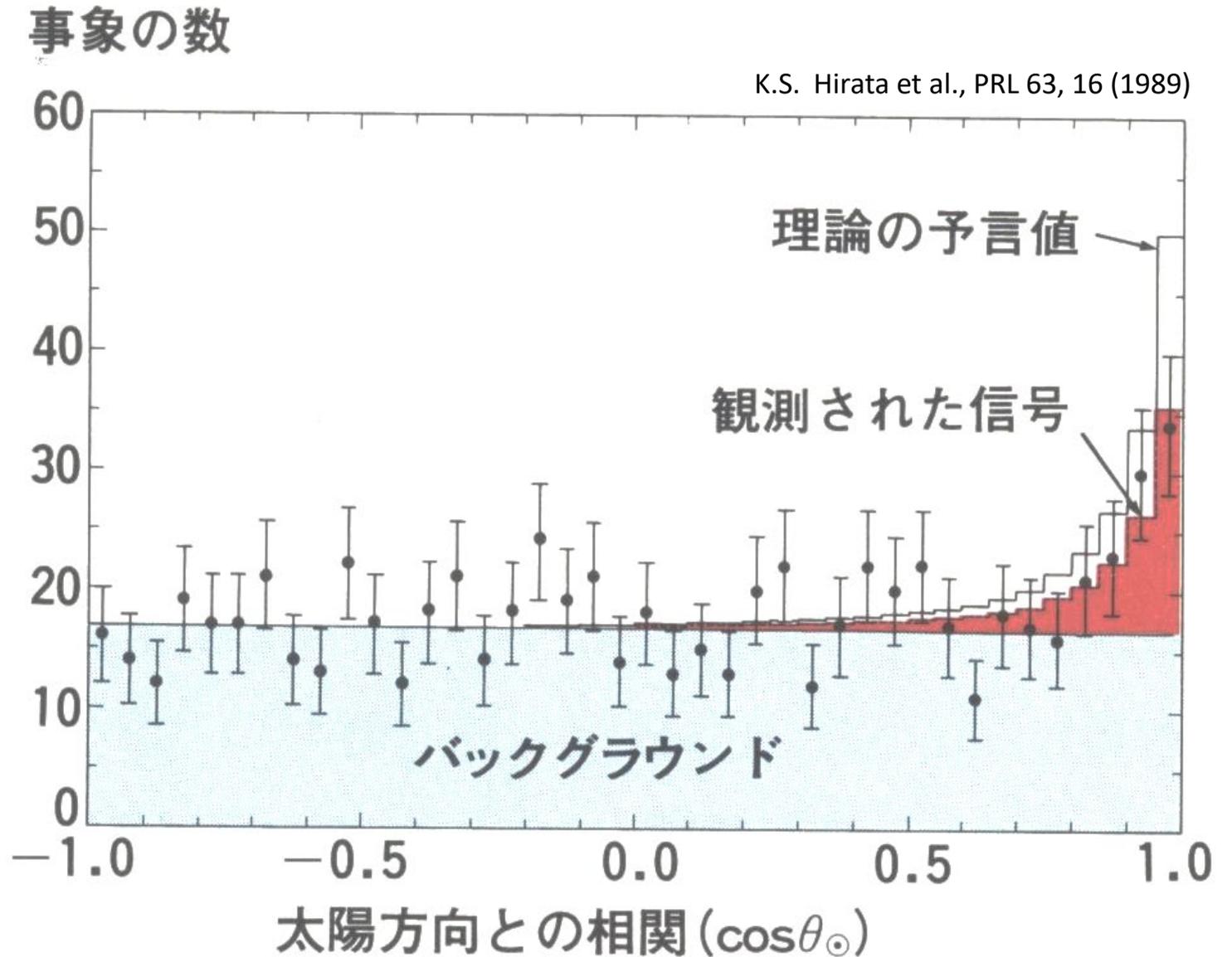


→ ノーベル賞  
(小柴先生、2002年)

日本標準 2月23日16時35分35秒(±1分)

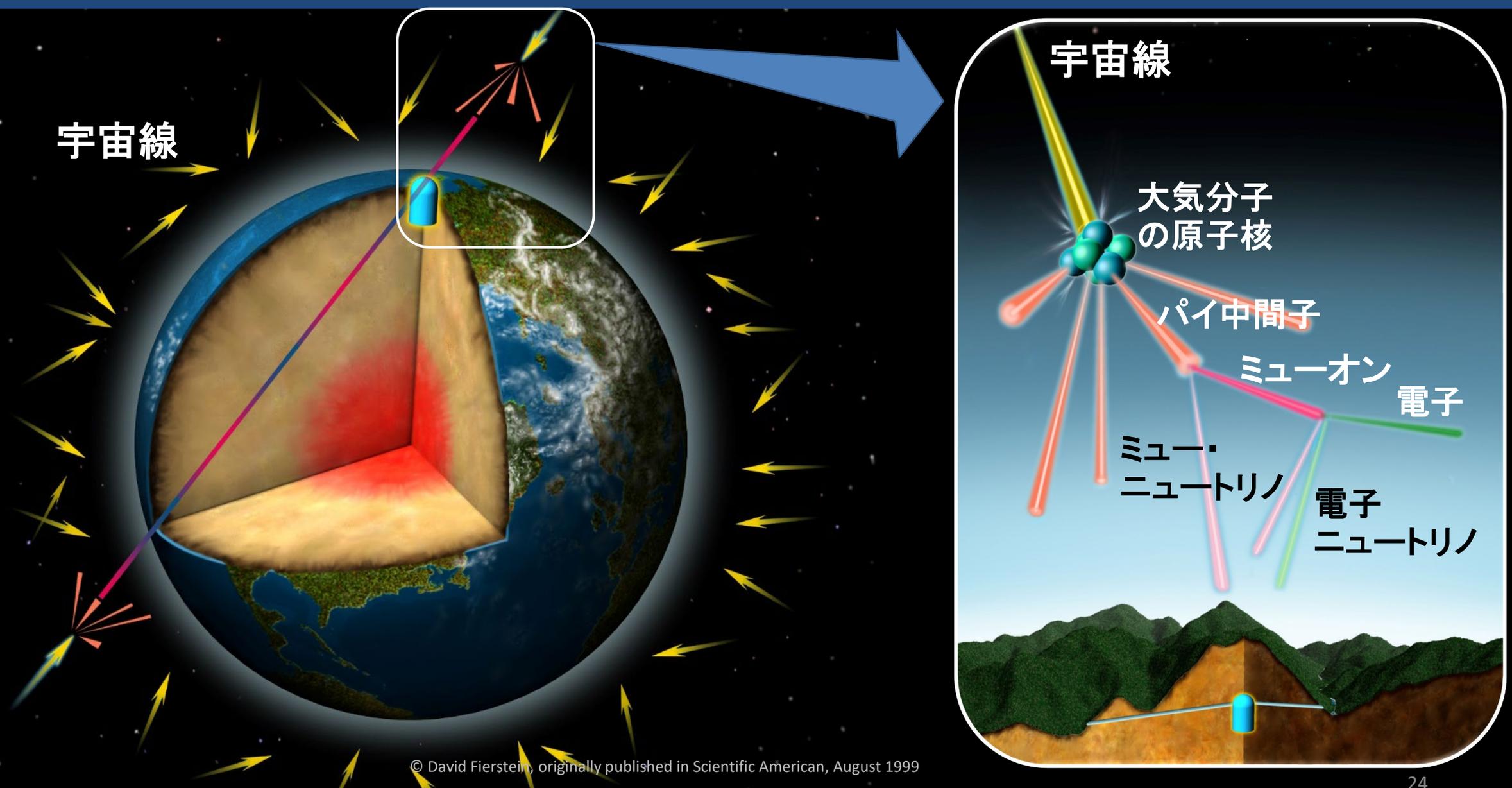
# 太陽ニュートリノは？

- 太陽ニュートリノの観測と太陽ニュートリノ問題の確認 (1989年) (中心人物: 中畑現所長)
- その後、今世紀になって、あとで出てくるスーパーカミオカンデやカナダのSNO実験、東北大学のカムランド実験の活躍などで太陽ニュートリノ問題はニュートリノ振動によるものとわかりました。



# 大気ニュートリノの異常

# 大気ニュートリノ

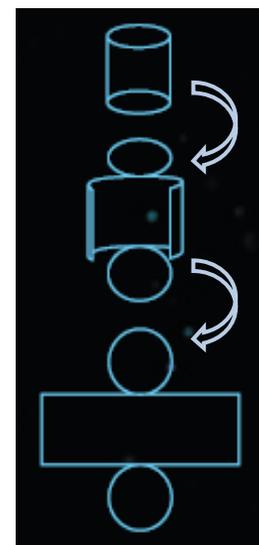


© David Fierstein, originally published in Scientific American, August 1999

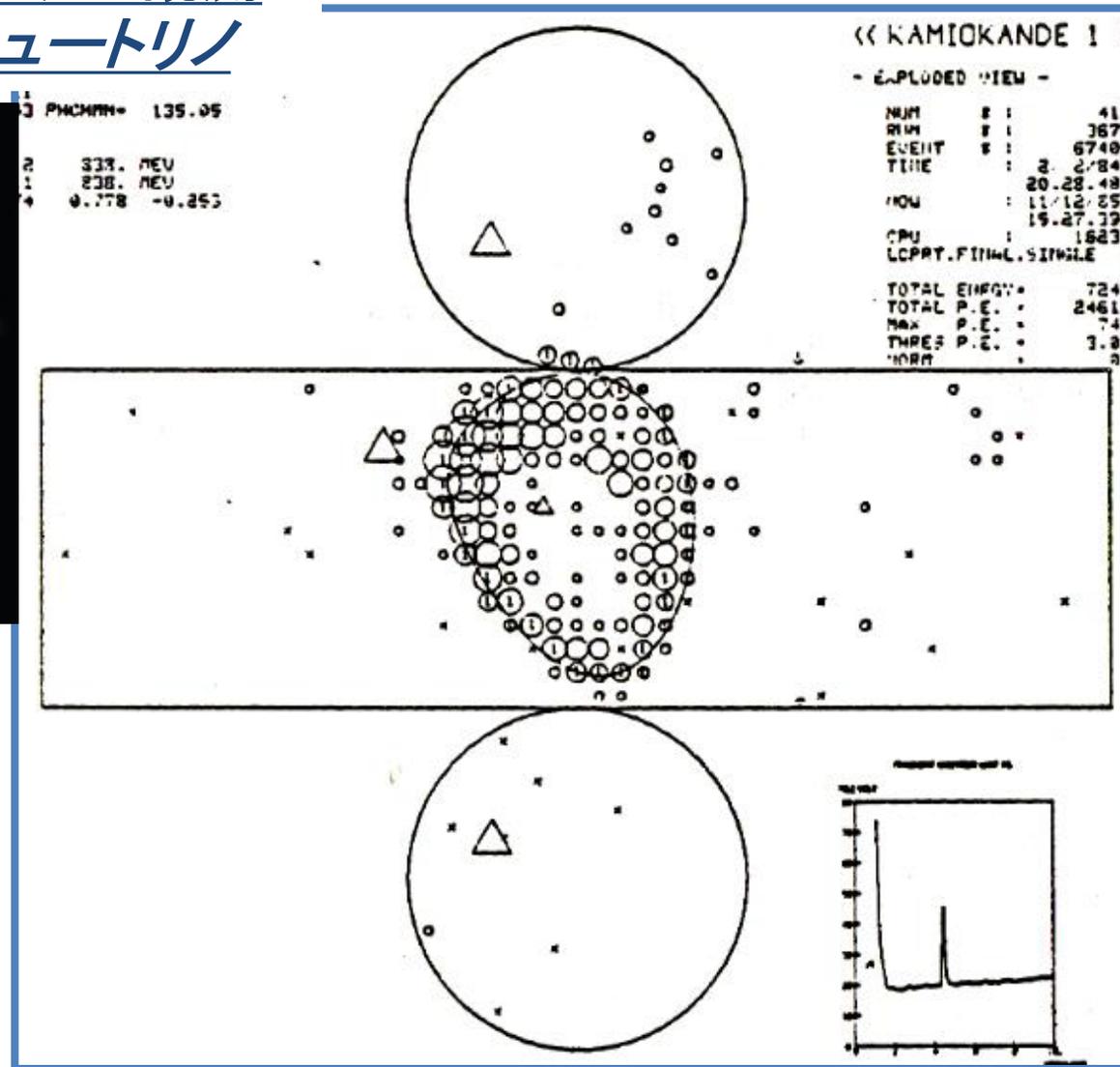
# 1986年頃

- 博士論文を書きながらデータ解析には改善の余地があると考えていました。そこで、博士論文を提出すると解析ソフトの改良に着手。
- 改良の一つは、観測されたチェレンコフ光のリングについて、それが電子によるものかミューオンによるものかを判別するもの。
- ところが、データに適用したところ、ミュー・ニュートリノ事象の数が予想値よりずっと少ない....
- どこかで間違えているはず。
- ということで、1986年暮れころから、間違い探しを開始。

## カミオカンデで観測されたニュートリノ

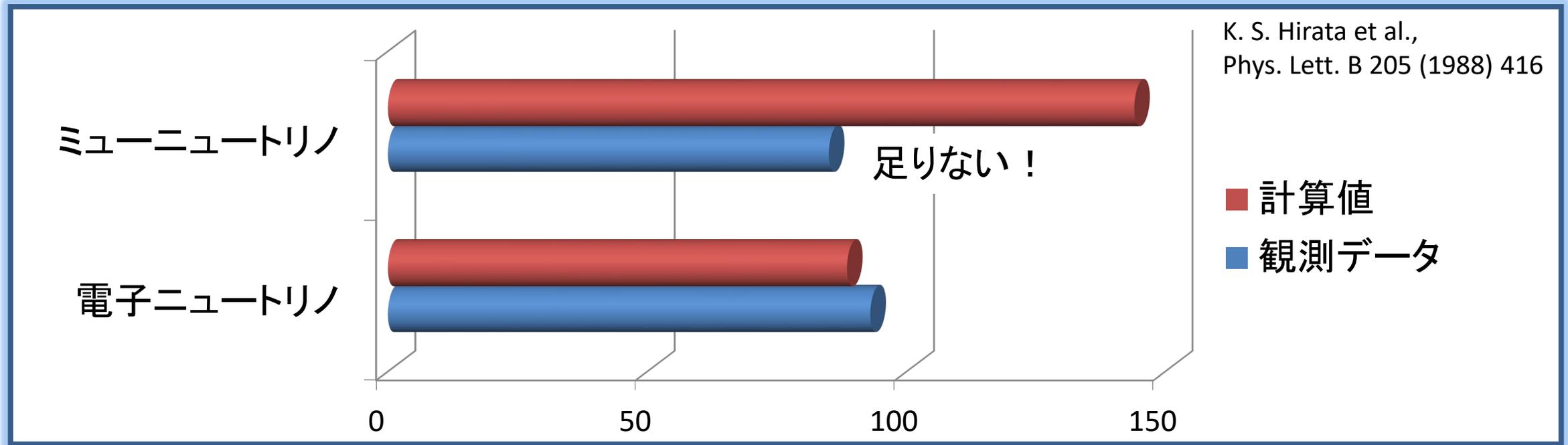


```
1  PMCHRN= 135.05
2  333. NEV
3  238. NEV
4  0.778 -0.253
```



# 大気ニュートリノ(ミューニュートリノ)がたりない(1988年)

一年間調べましたが、特に間違いは発見できませんでした。ということで、何か我々が知らない現象が起こっている可能性もあり、論文としてまとめることにしました。



参考: 当時の思い:

世界的にはこのデータは評判が悪かったのですが、このデータをすごく重要に感じて、この謎を解明することに専念することになりました。

研究者としてはこのころが一番楽しかったです。

# スーパーカミオカンデとニュートリノ振動の発見

# スーパーカミオカンデ

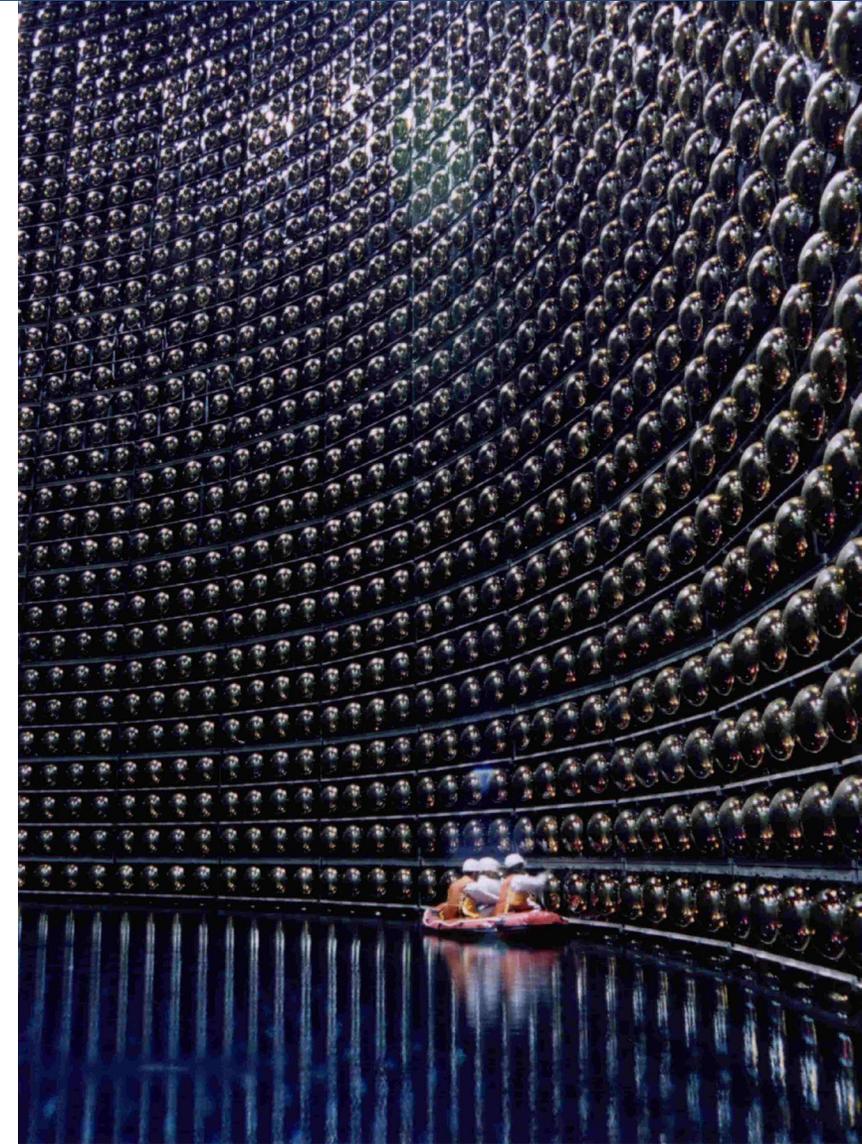
50,000 トン水チェレンコフ測定器  
(有効体積22,500 トン)

42m

39m

1000m underground

SUPERKAMIOKANDE INSTITUT FÜR COSMIC RAY RESEARCH UNIVERSITY OF TOKYO

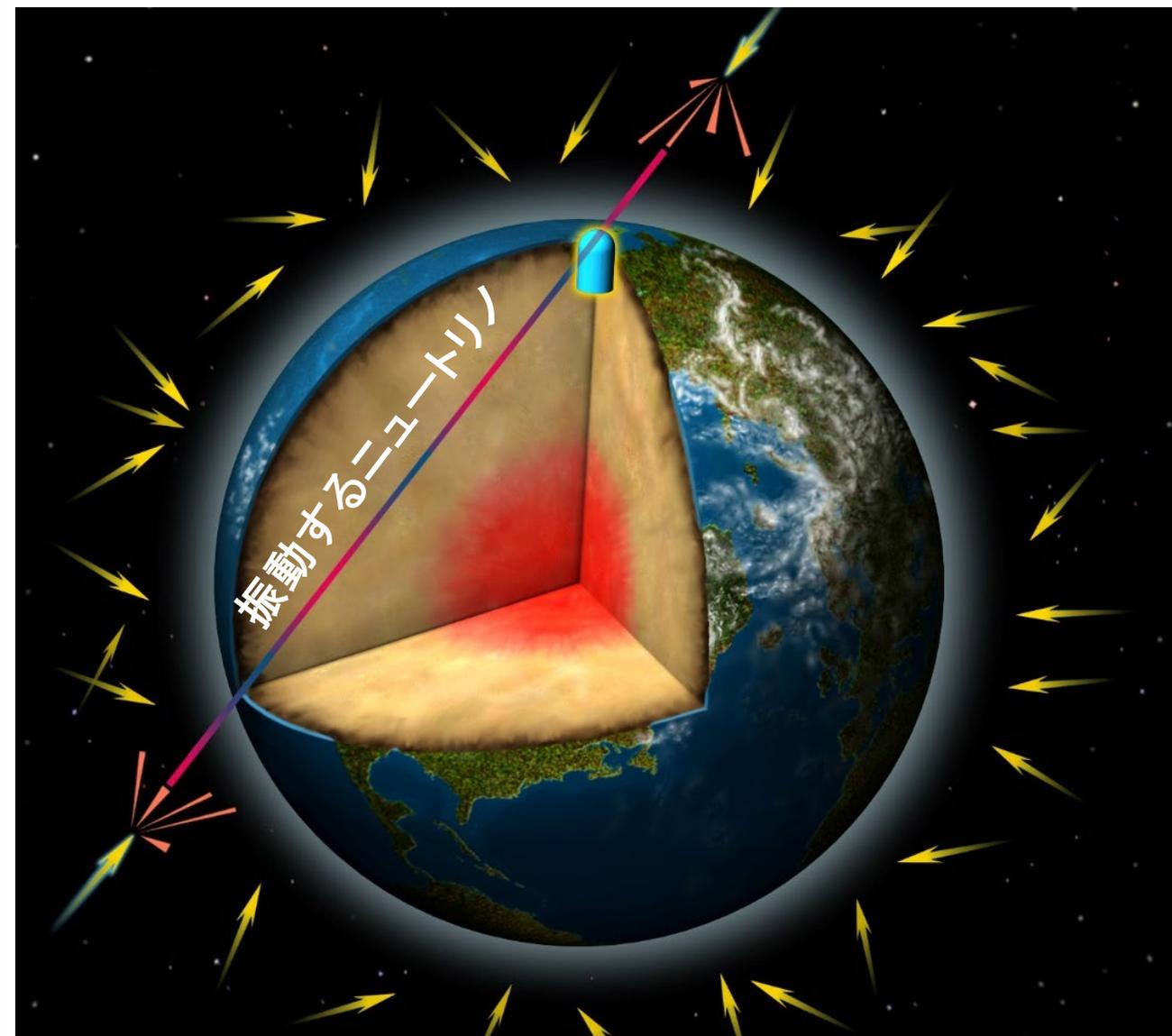
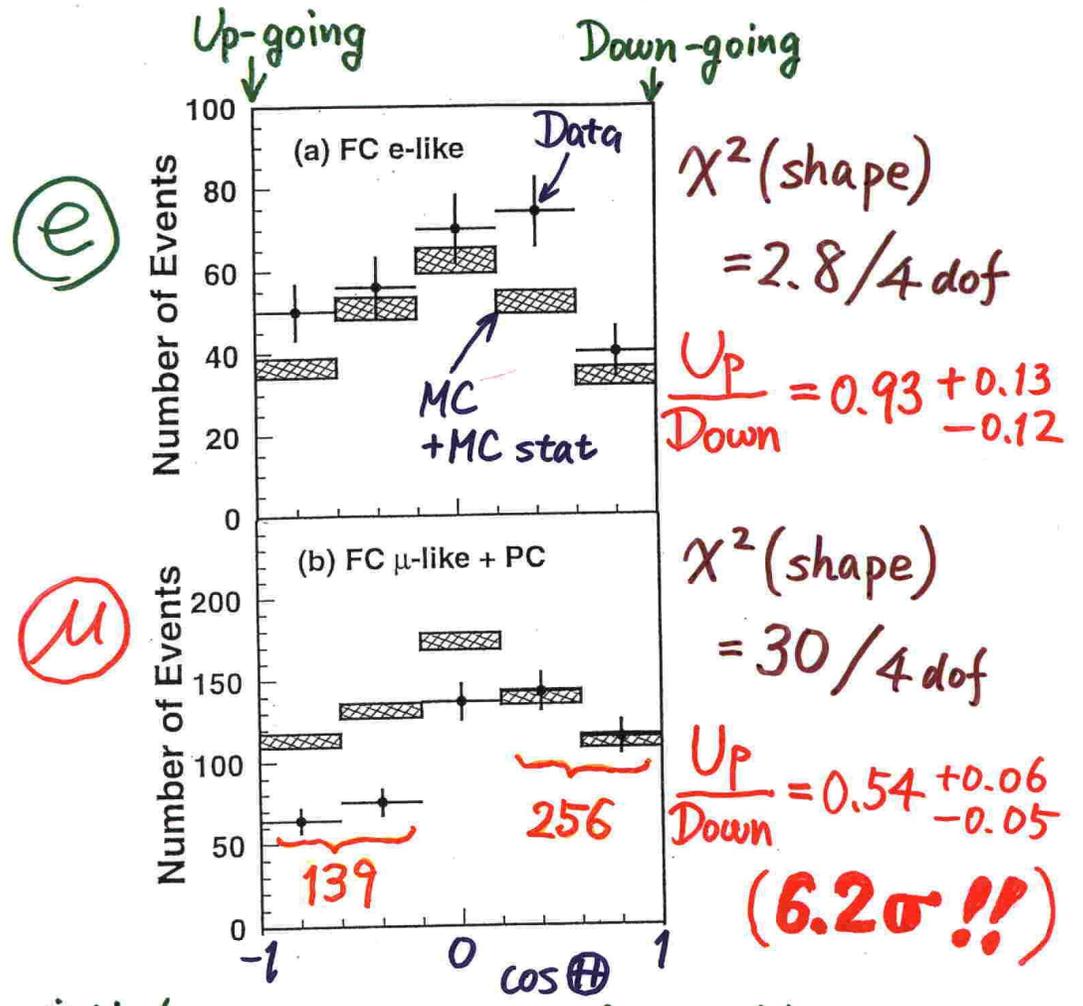


~230人の共同研究

# ニュートリノ振動の発見 (高山でのニュートリノ'98国際会議)

Y. Fukuda et al., PRL 81 (1998) 1562

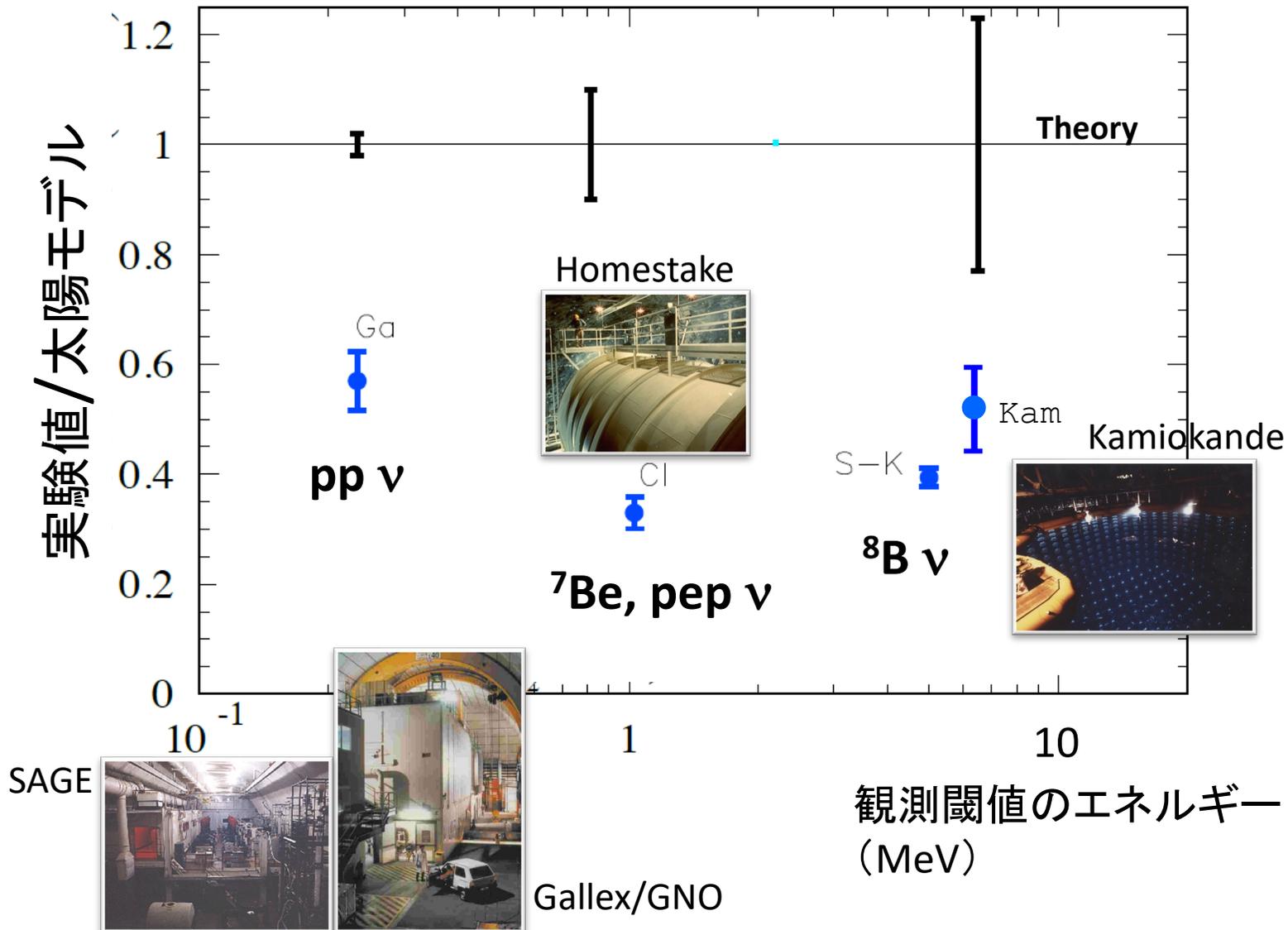
## Zenith angle dependence (Multi-GeV)



# 宇宙線研が関係しているニュートリノ研究:その後

# 太陽ニュートリノ問題 (2000年以前)

いくつかの実験で太陽ニュートリノの観測に成功していました。



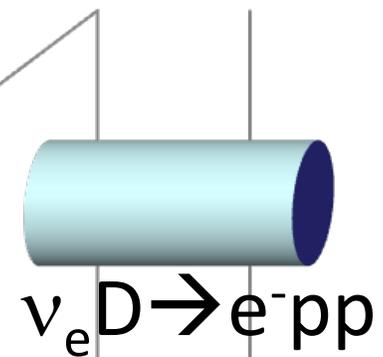
これらの実験全てで太陽ニュートリノの観測値は予想値より小さいものでした。しかし、その理由はわかっていませんでした。

# 太陽ニュートリノ問題の解決 (2001-2002)

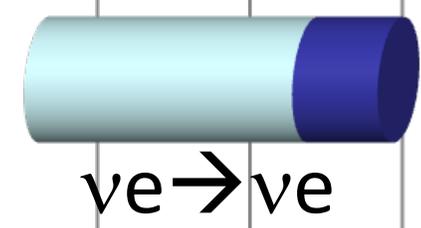
SK, PRL 86 (2001) 5651  
 SNO PRL 89 (2002) 011301  
 SNO PRC 72, 055502 (2005)

SNO

$\nu_e$ のみ



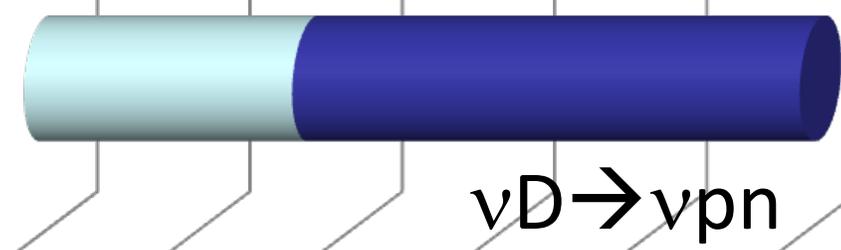
スーパー  
カミオカンデ  
 ( $\nu_e + \nu_\mu + \nu_\tau$ )



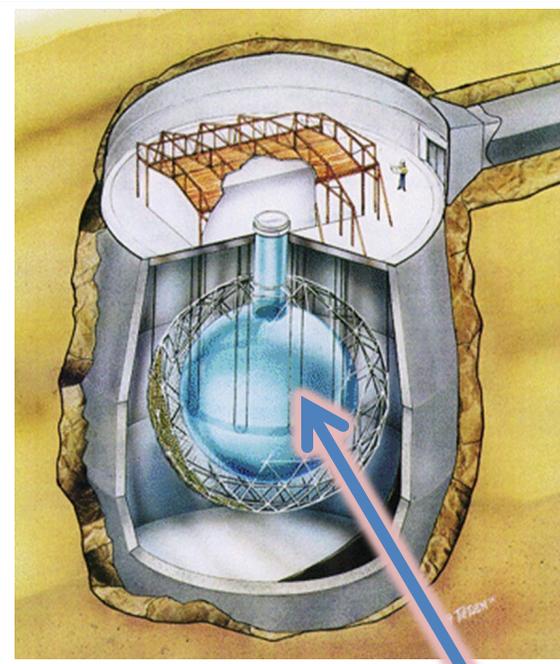
$\nu_\mu + \nu_\tau !!$

SNO

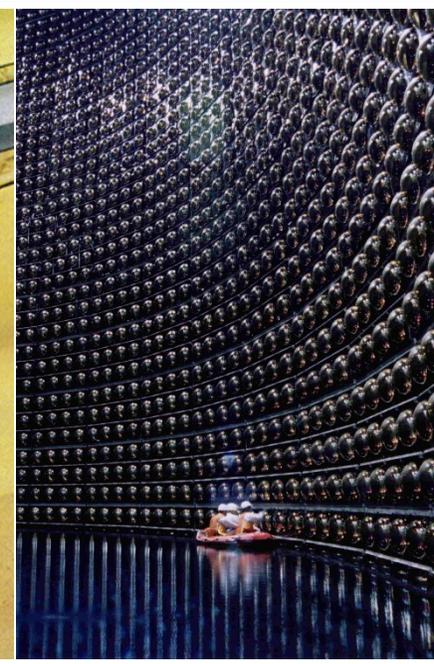
全種類のニュートリノ  
 ( $\nu_e + \nu_\mu + \nu_\tau$ )



0 1 2 3 4 5 6  
 飛来数 ( $10^6/cm^2/秒$ )



SNO (カナダ)



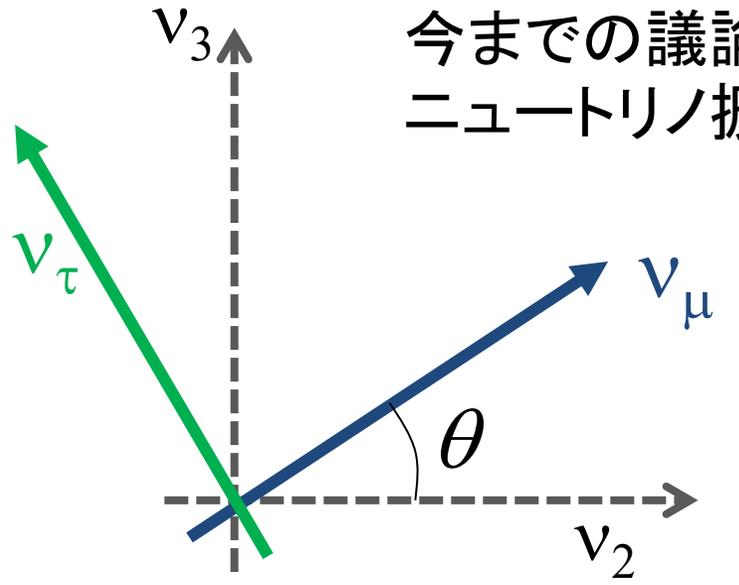
スーパー  
カミオカンデ

重水 ( $D_2O$ )  
 1000トン

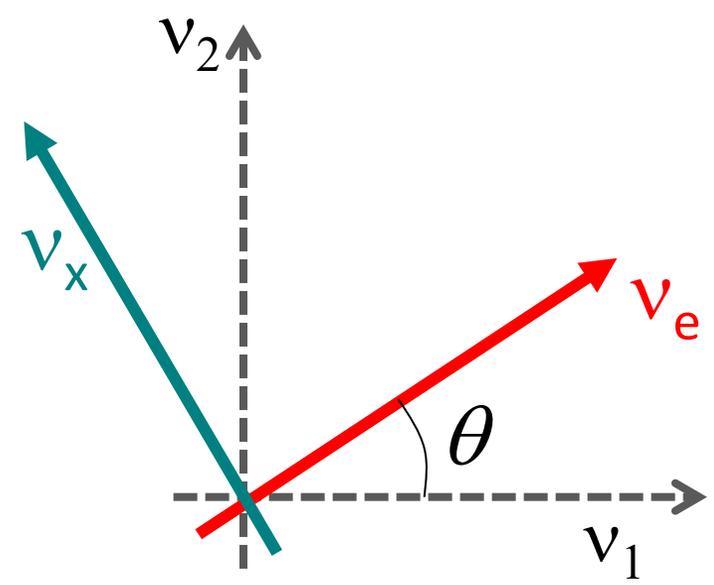
- ①ニュートリノ振動
- ②太陽は予想通りに輝いている

# 2世代ニュートリノ振動から3世代振動へ

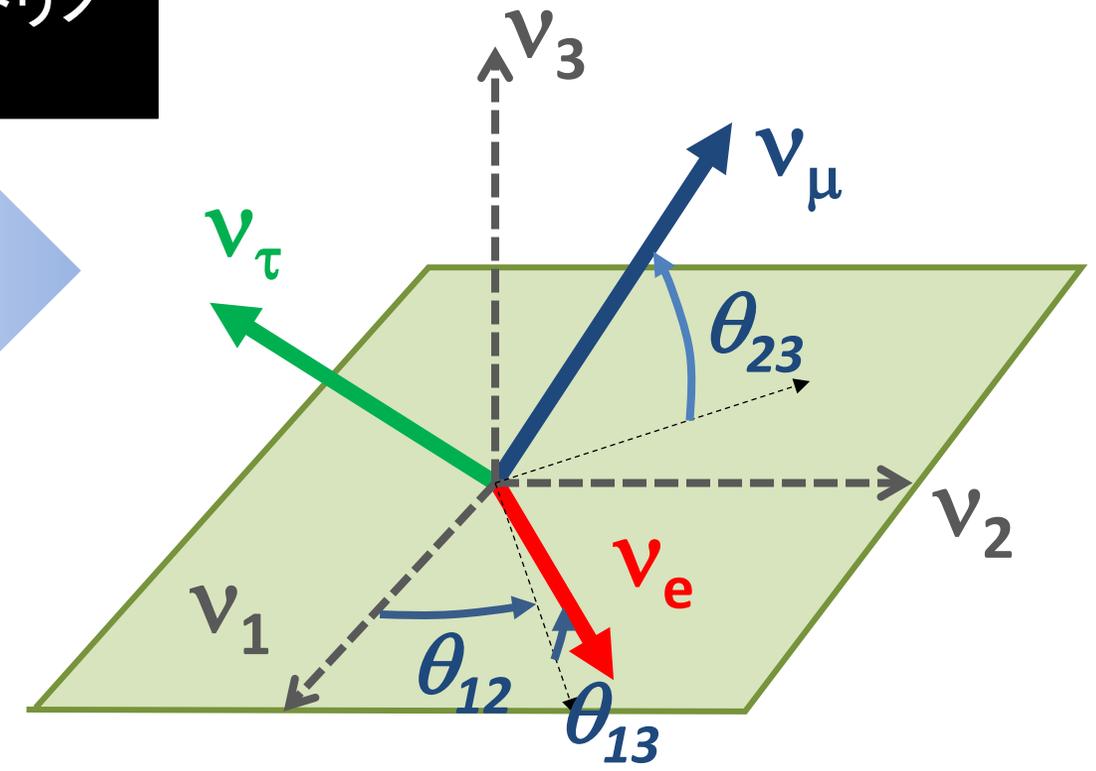
今までの議論: 2世代  
ニュートリノ振動



しかし、現実には  
ニュートリノ  
は3種類



3世代ニュートリノ振動



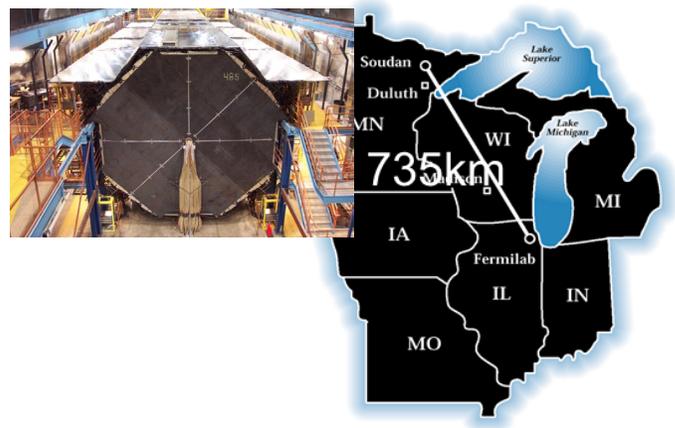
3つの混合角:  $\theta_{12}$ ,  $\theta_{23}$ ,  $\theta_{13}$

# 第3のニュートリノ振動の発見 (2011-2012)

太陽ニュートリノ振動確定後、世界のコミュニティの中心課題に

## 加速器ニュートリノ振動実験 ( $\nu_{\mu} \rightarrow \nu_{e}$ )

**MINOS (米国)**



**T2K (日本)**

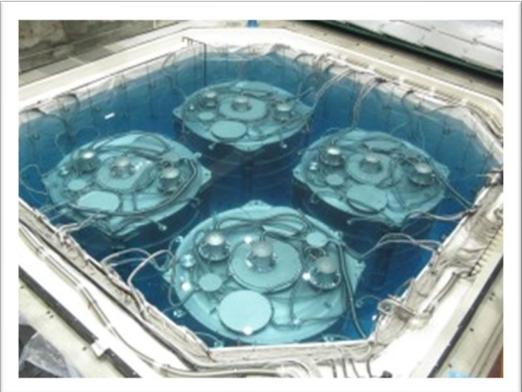


**NOvA (米国、少し遅れて)**



## 原子炉を使った (1-2 km 程度の短距離の) ニュートリノ振動実験 ( $\nu_{e}$ 消失)

**Daya Bay (中国)**



**RENO (韓国)**



**Double Chooz (フランス)**



国名は実験の所在地を表すのみ

# 宇宙の物質の起源の謎

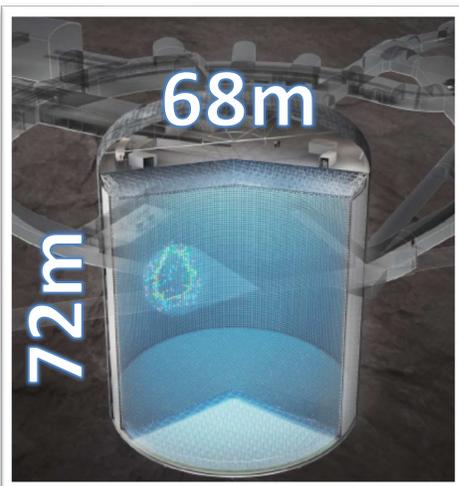


宇宙の物質の起源に小さい質量をもったニュートリノの関わっているのでは  
M. Fukugita and T. Yanagida, Phys. Lett. B 174 (1986) 45-47

すばる望遠鏡 (<https://subarutelescope.org/jp/gallery/pressrelease/2015/06/22/173.html>)

# Hyper-Kamiokande

- 小さい質量を持ったニュートリノが宇宙の物質の起源に関わっているか知りたい
- そのため、ニュートリノのニュートリノ振動と反ニュートリノのニュートリノ振動に違いがあるか確認したい(残念ながら今の装置では難しい) → Hyper-Kamiokande
- 世界21か国から500人を超える研究者が参加する超大型の国際共同実験
- 2020に建設開始
- 実験開始は2027の予定



HK空洞掘削現場  
(2024年6月)

J-PARC

Hyper-Kamiokande

# まとめ

- 大学院時代は、研究の入り口。
- 理学系の大学院に行く人は、自分が本当にやりたい研究は何かを考え、自分のやりたい研究ができる研究室を選んでください。
- 多くの場合、大学院の時代の研究室がその後の研究者人生を大きく左右します。研究室選びは大切です。
- スプリング・スクールを楽しんでください。