

ICRR Spring School 2022
2022年2月28日

宇宙線研究所での

ニュートリノ研究 (私の若い頃のことを中心に)

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
- その後
- 大気ニュートリノの異常
- ニュートリノ振動
- 今後の研究
- 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

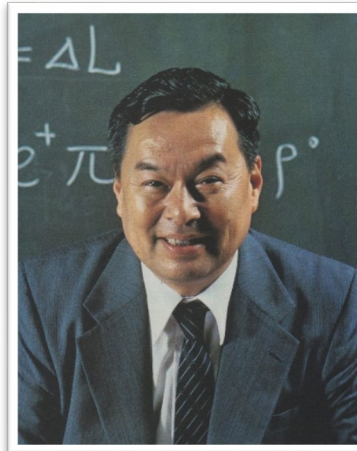
大気ニュートリノの発見 (1965)



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)



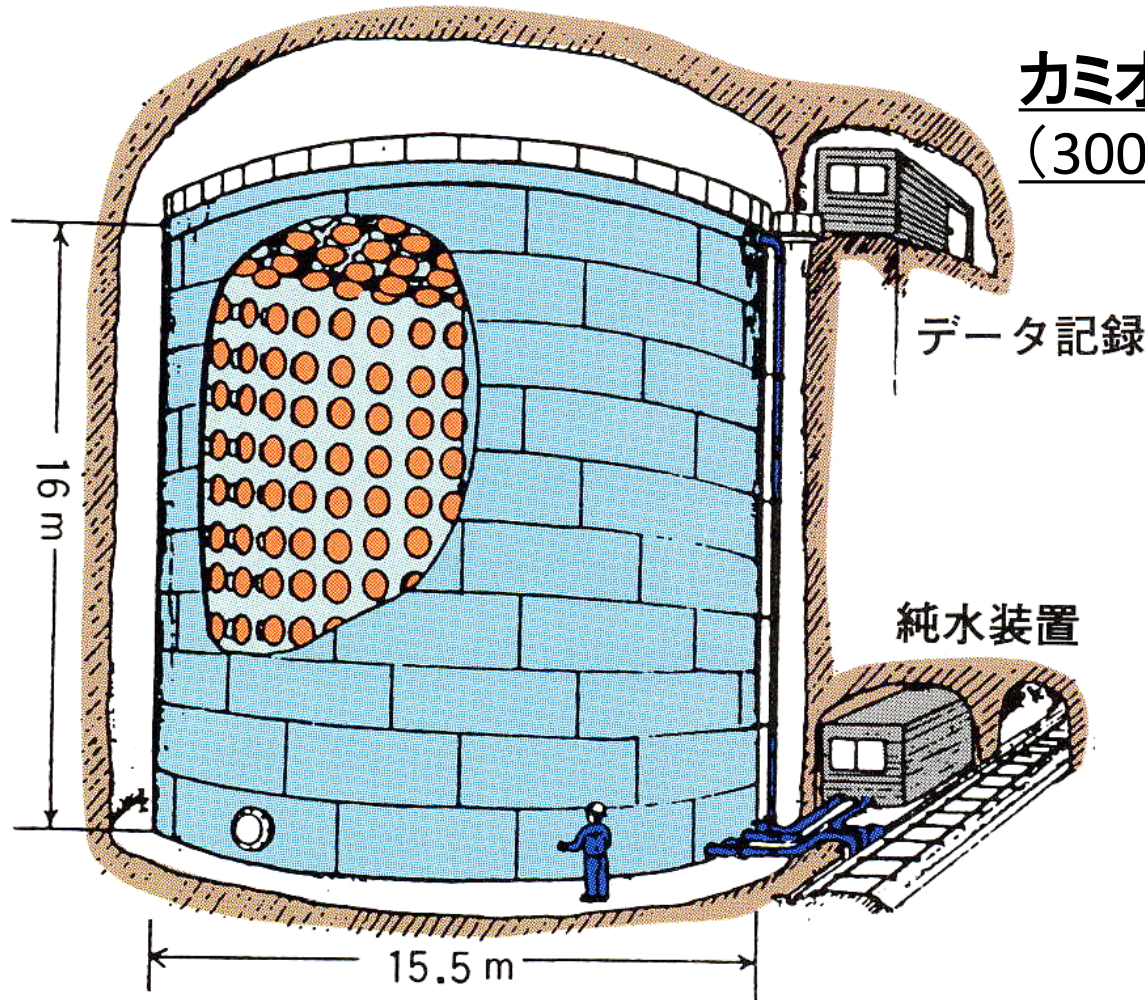
大学院生の頃

- ✓ 1970年代、素粒子の間に働く3つの力(強い力、電磁力、弱い力)を統一して記述する大統一理論が提唱されました。
- ✓ これらの理論は原子核内にある陽子や中性子がおおよそ 10^{30} 年の寿命で崩壊すると预言しました。

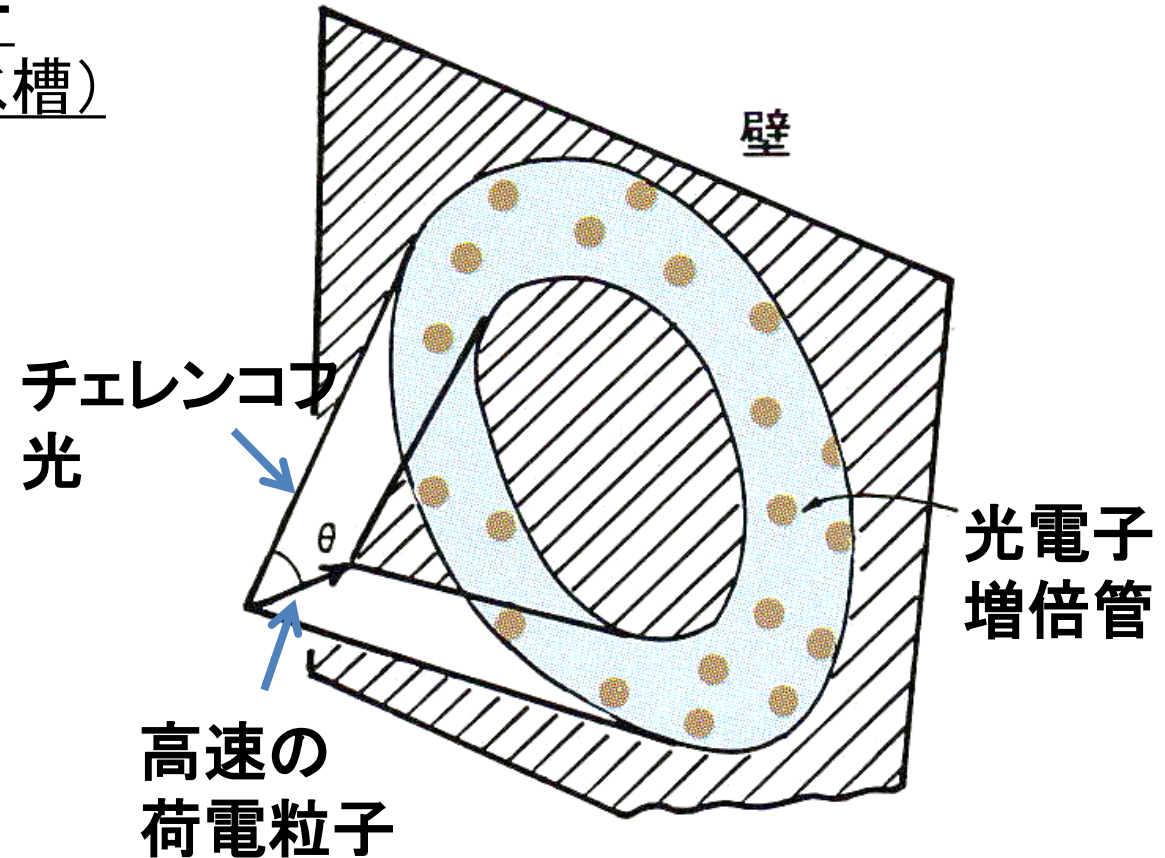


神岡核子崩壊実験(カミオカンデ)

- ✓ この予言を受けて、世界中で陽子の崩壊を検出する実験が開始されました。その一つが日本で行われたKamiokande (Kamioka Nucleon Decay Experiment, カミオカンデ) 実験でした。



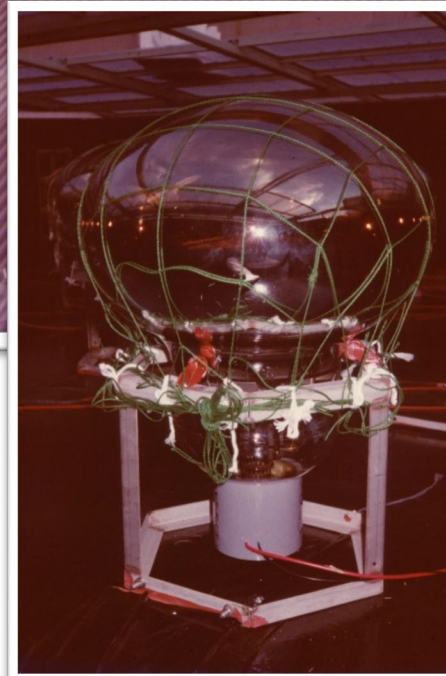
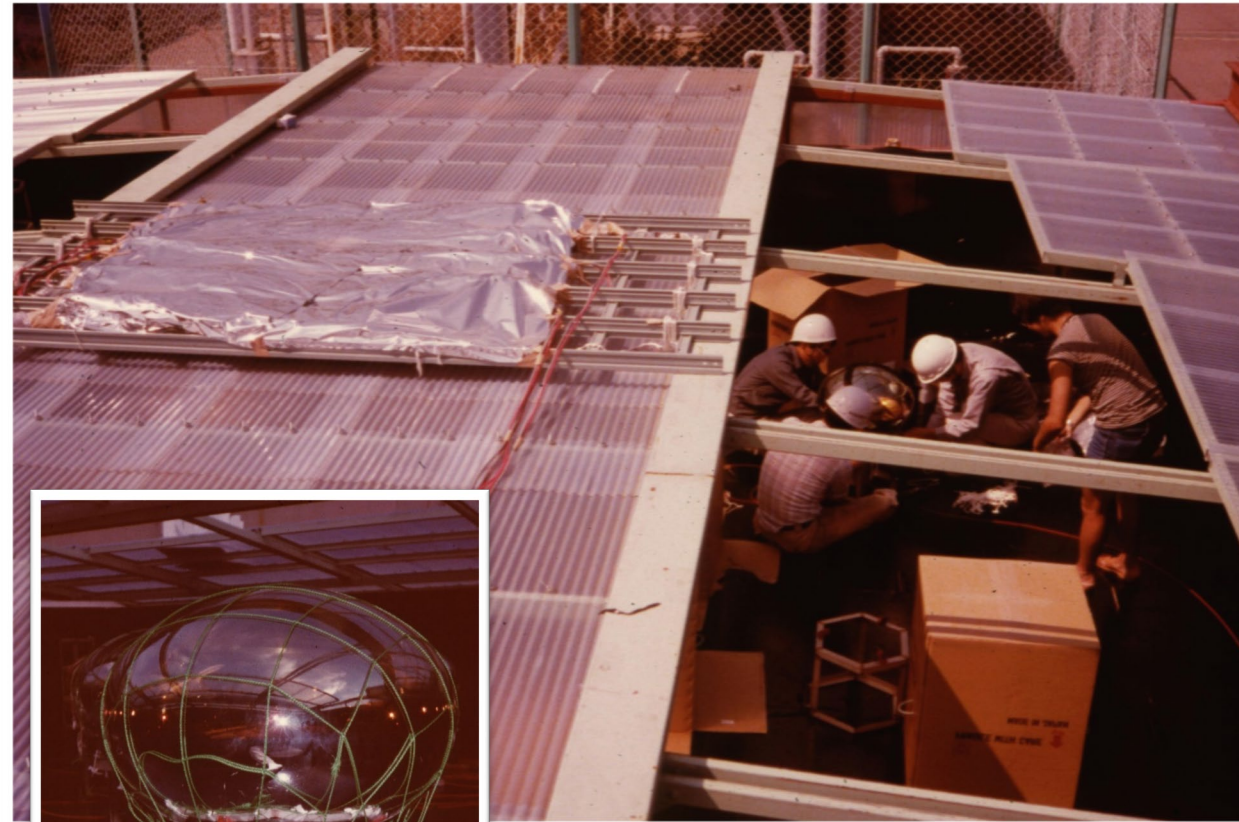
カミオカンデ
(3000トン水槽)



大学院修士1年の頃



修士1年の春：新たに開発された光電子増倍管の試験（浜松）



KEK(つくば)に水槽を作っているいろいろな試験

研究場所付近(現在の岐阜県飛騨市神岡町)



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、主に中畑君と）

光電子増倍管の坑内への搬入



カミオカンデ建設(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

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

カミオカンデへ



カミオカンデ建設 (1983年春)

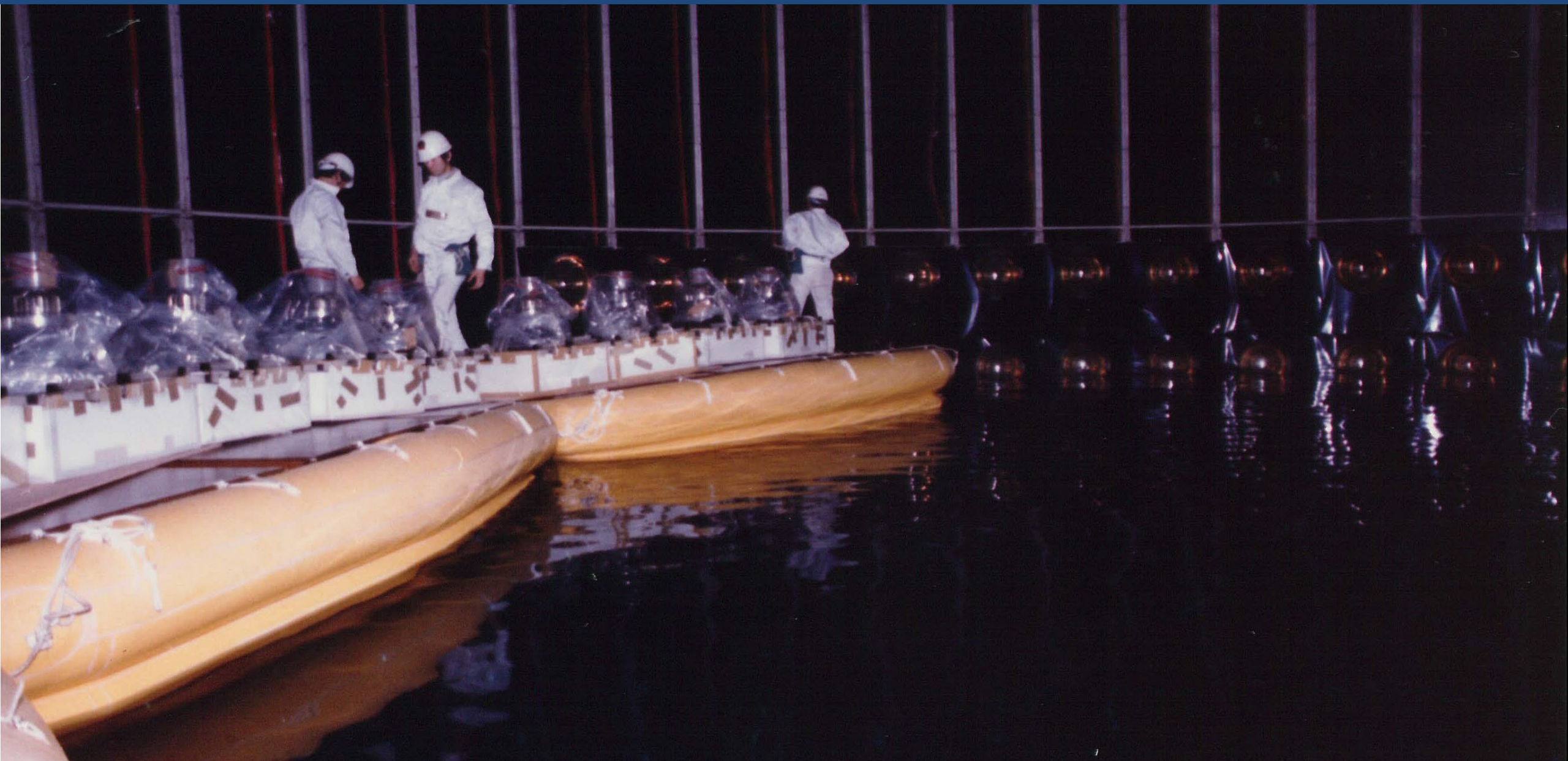


底面と側面2列の光電子増倍管を取り付け終えた時の写真。

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。

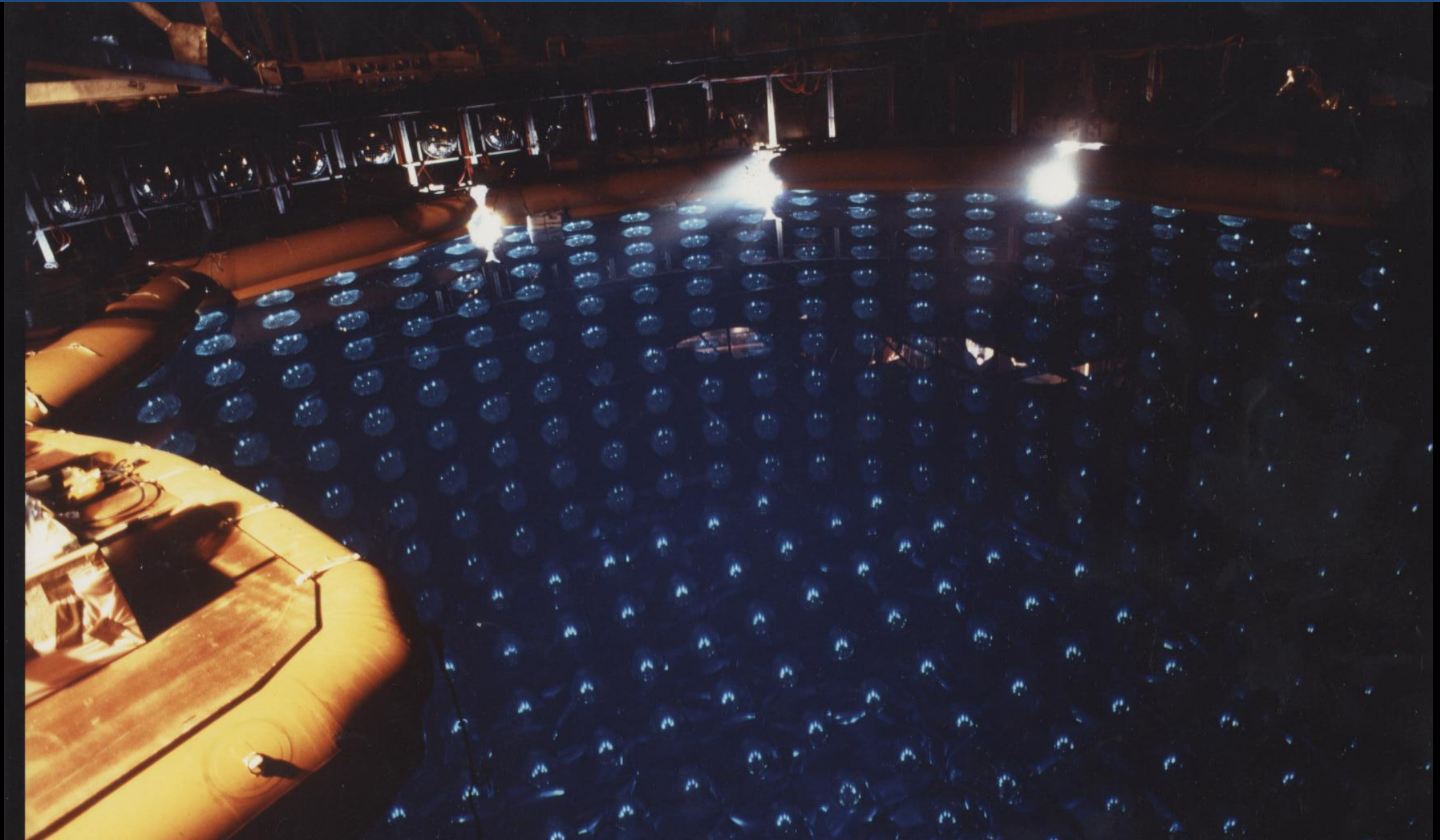
結局、とにかく少数でも確認することにして確認したところ、全ての高電圧がショートしていることがわかり、全部接続をやりなおし。

カミオカンデ建設 (1983年春)



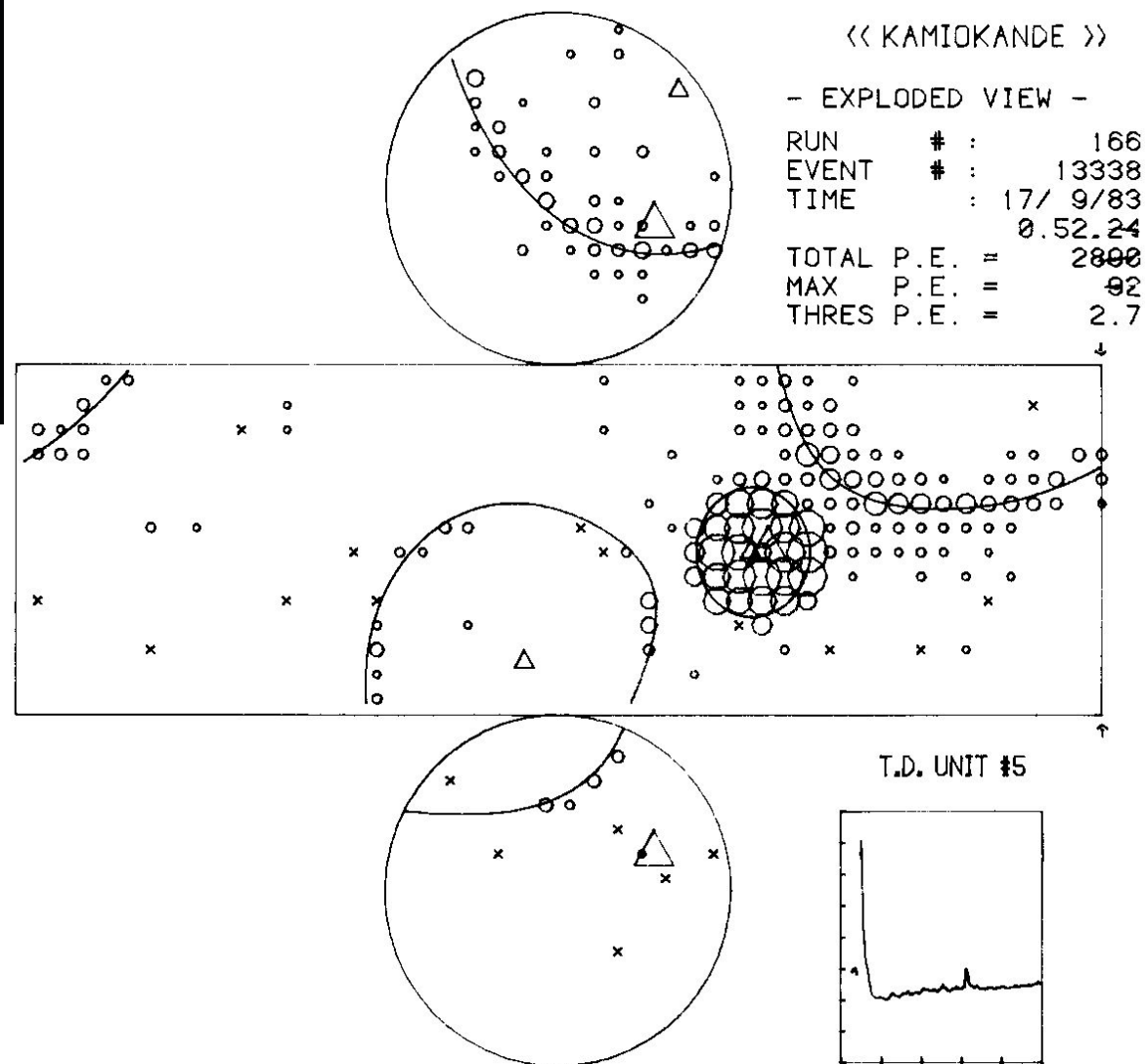
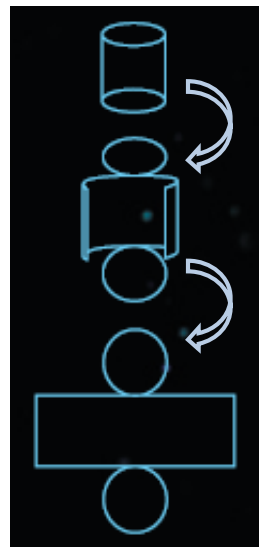
カミオカンデ実験開始

カミオカンデ実験開始 (1983年 7月 6日)

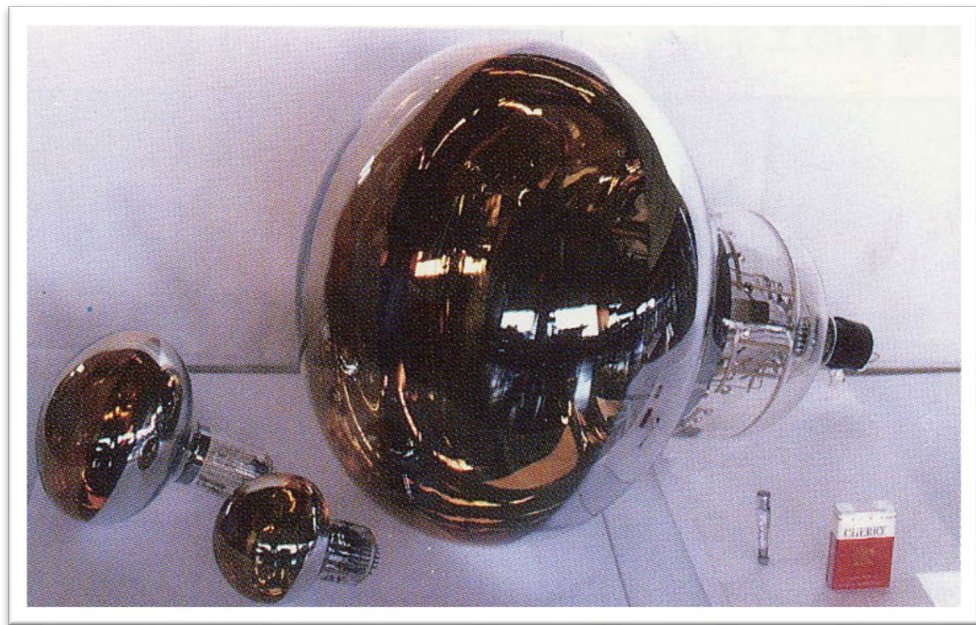


陽子崩壊を探す

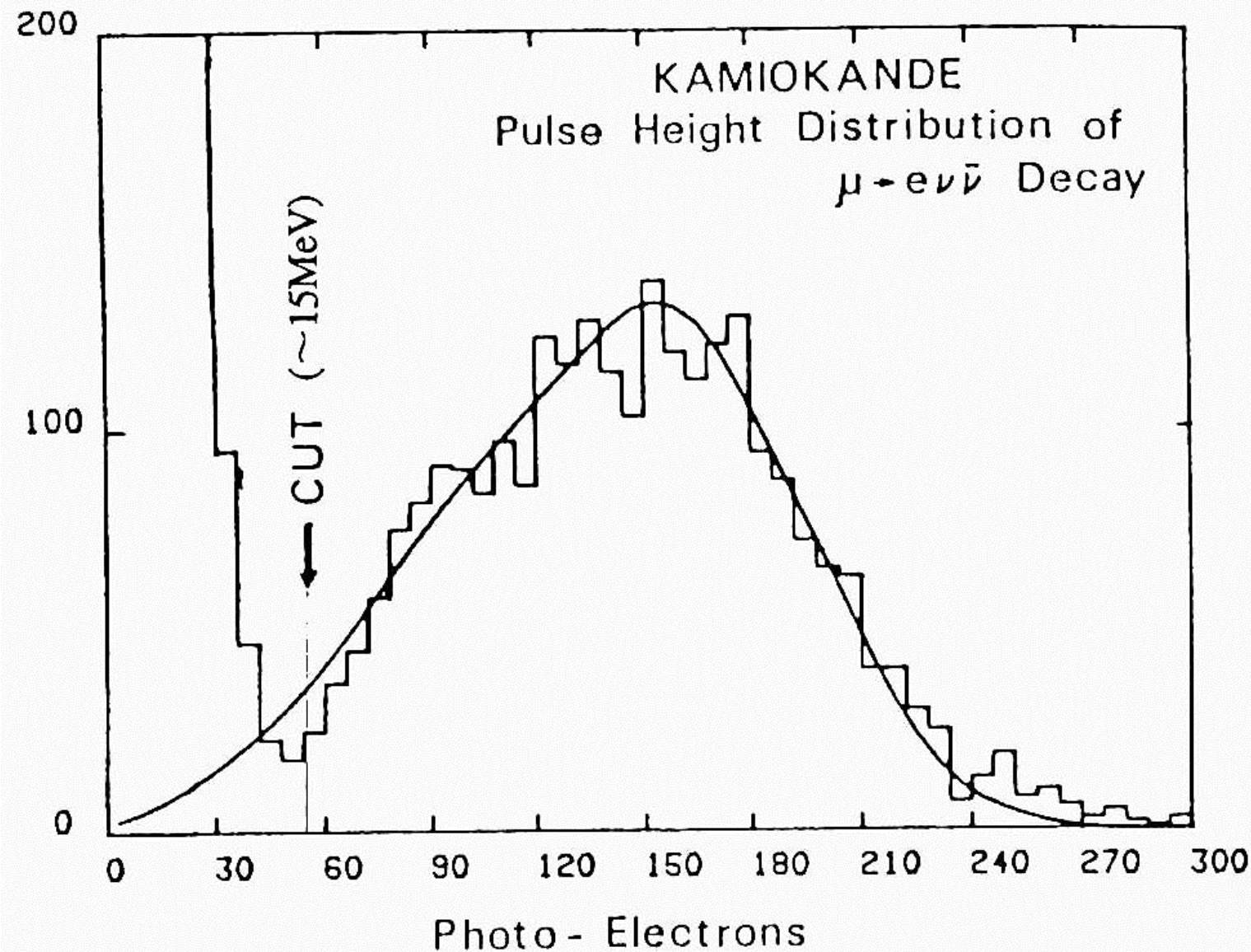
- 実験が始まるとすぐにデータ解析体制。ただし、ソフトウェアの開発は非常に遅れていた
ので、開発しながら解析。
- 陽子崩壊と考えると矛盾ないイ
ベントも観測（右図、
 $p \rightarrow \mu^+ \eta (\rightarrow \gamma\gamma)$ とも考えられた。
（ただし運動量の総和が大き
すぎ....）
- とにかく、明確な陽子崩壊の兆
候は観測できませんでした。



$\mu \rightarrow e$ decay



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、宇宙線ミュー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

3000トンタンクと岩盤との間に外水槽測定器を設置

太陽ニュートリノの観測に向けた改造(カミオカンデ-II)



水槽上面に反射シートを貼って、
外水槽測定器へ(85年頃)

水槽上面の気密化(これは1987年か?)



ともかく、大学院生活を楽しみました

博士論文

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)。

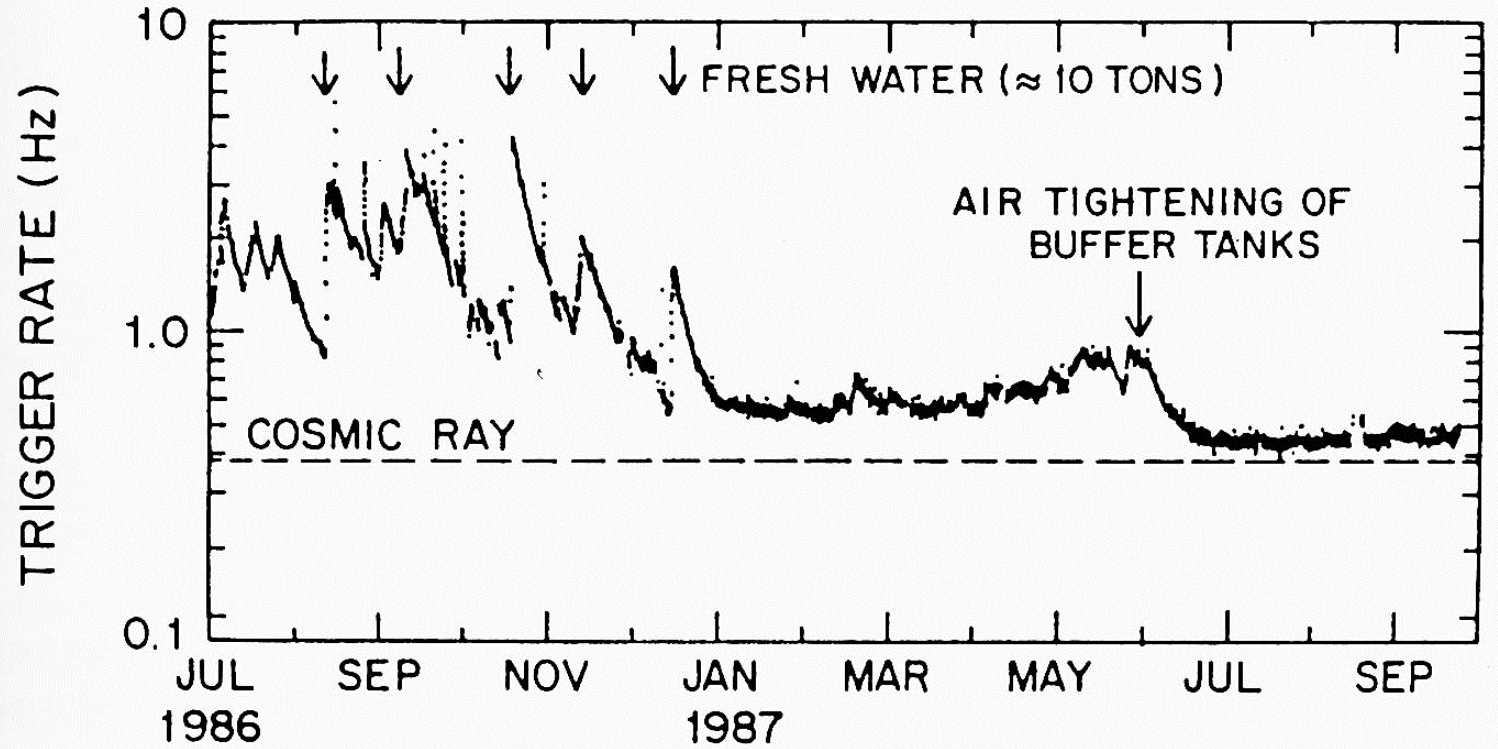
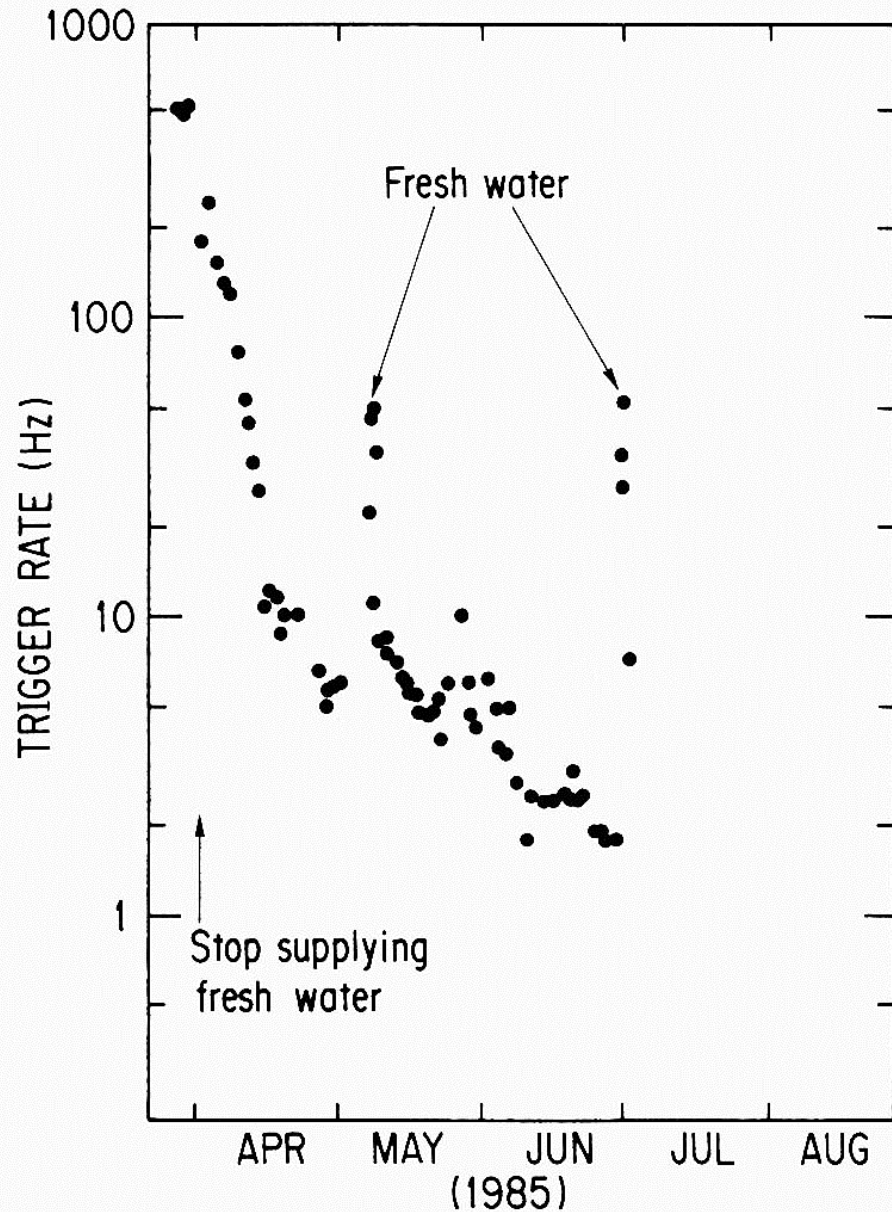
“Search for Nucleon Decays into Anti-neutrino plus Mesons”
(もちろん、陽子の崩壊は見えませんでした。)

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。



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)

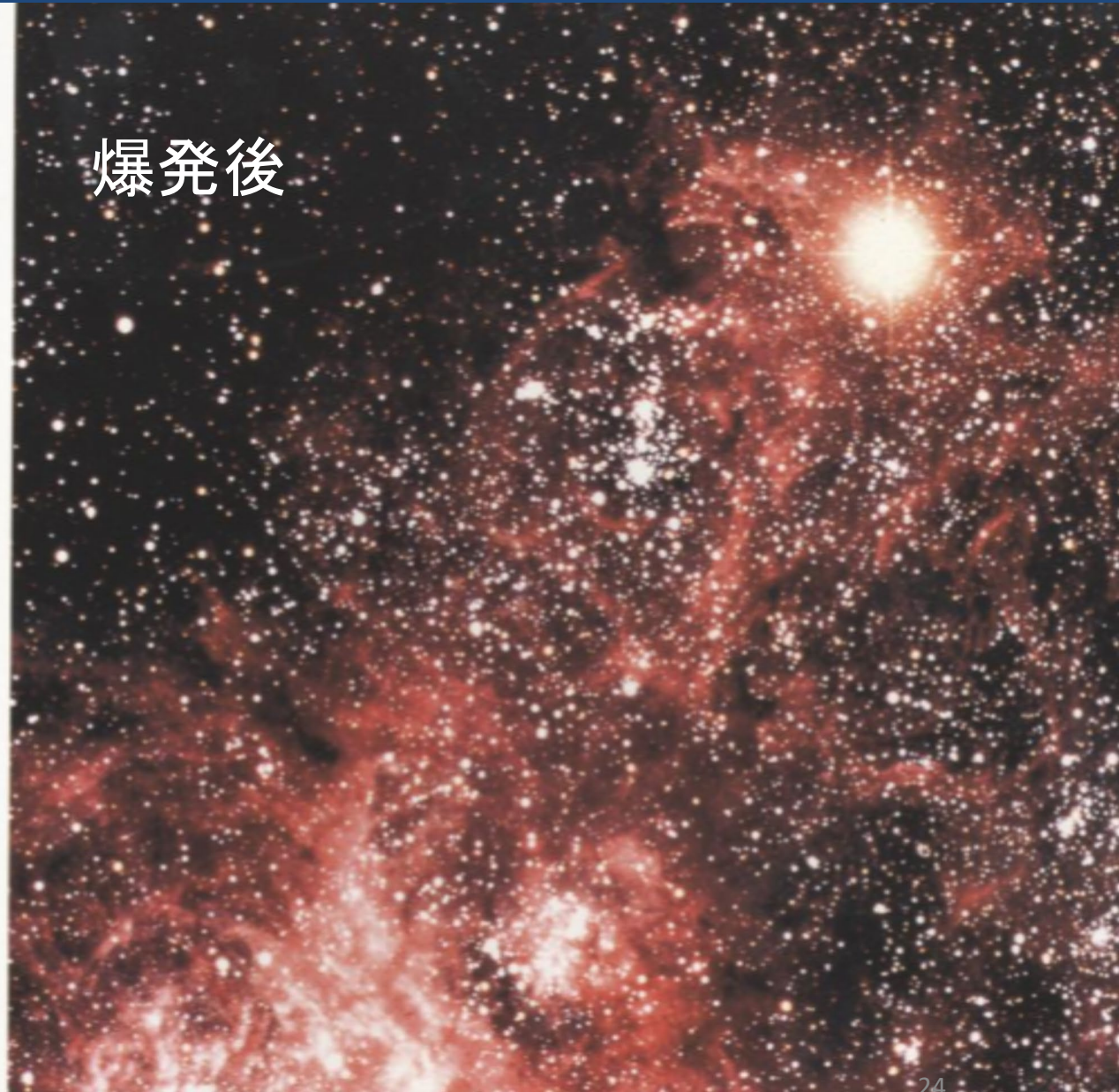


超新星爆発

SN1987A
爆発前

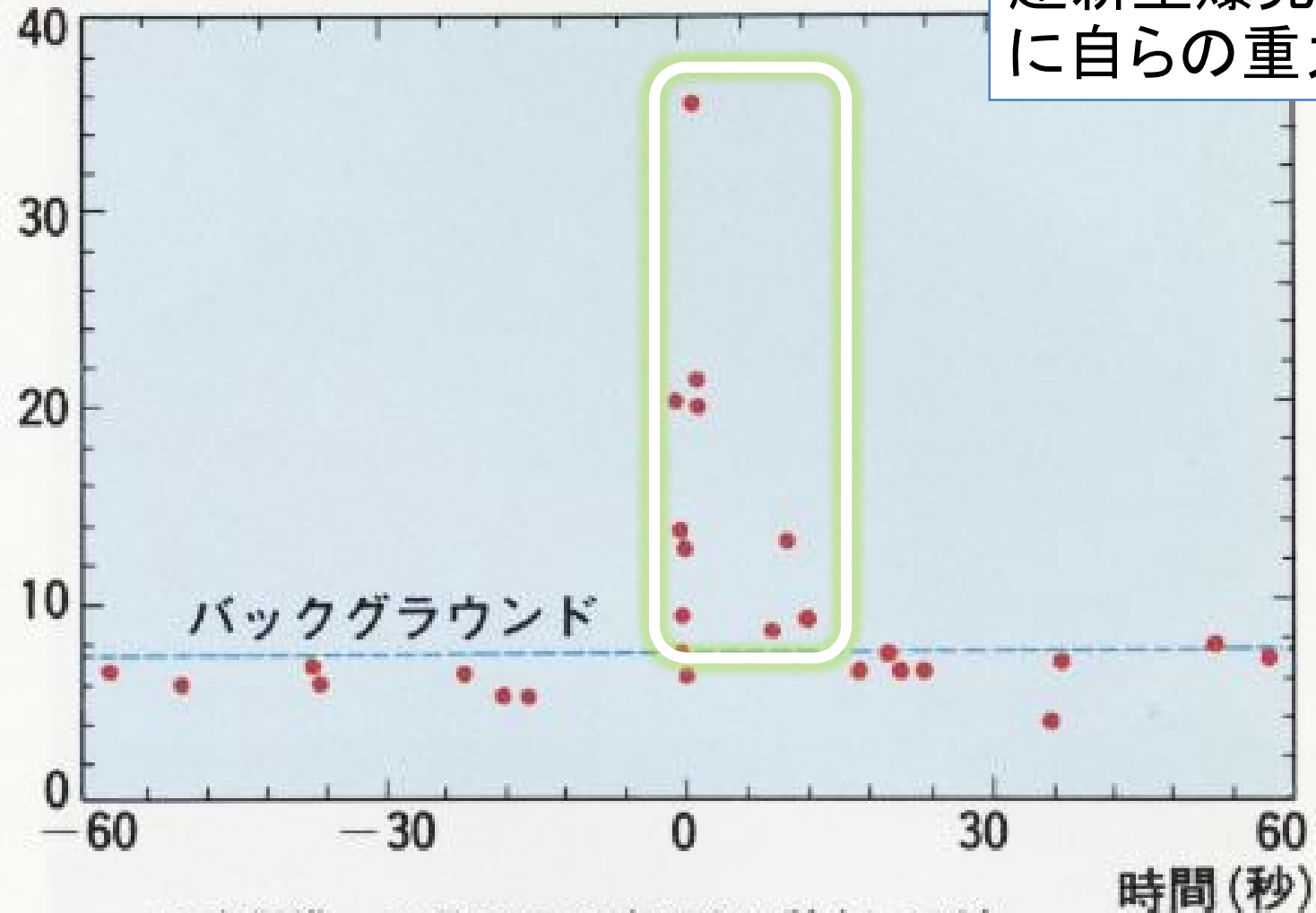


爆発後



超新星SN1987A (1987年 2月 23日)

二次電子のエネルギー (MeV)



日本標準 2月23日 16時35分35秒 (± 1分)

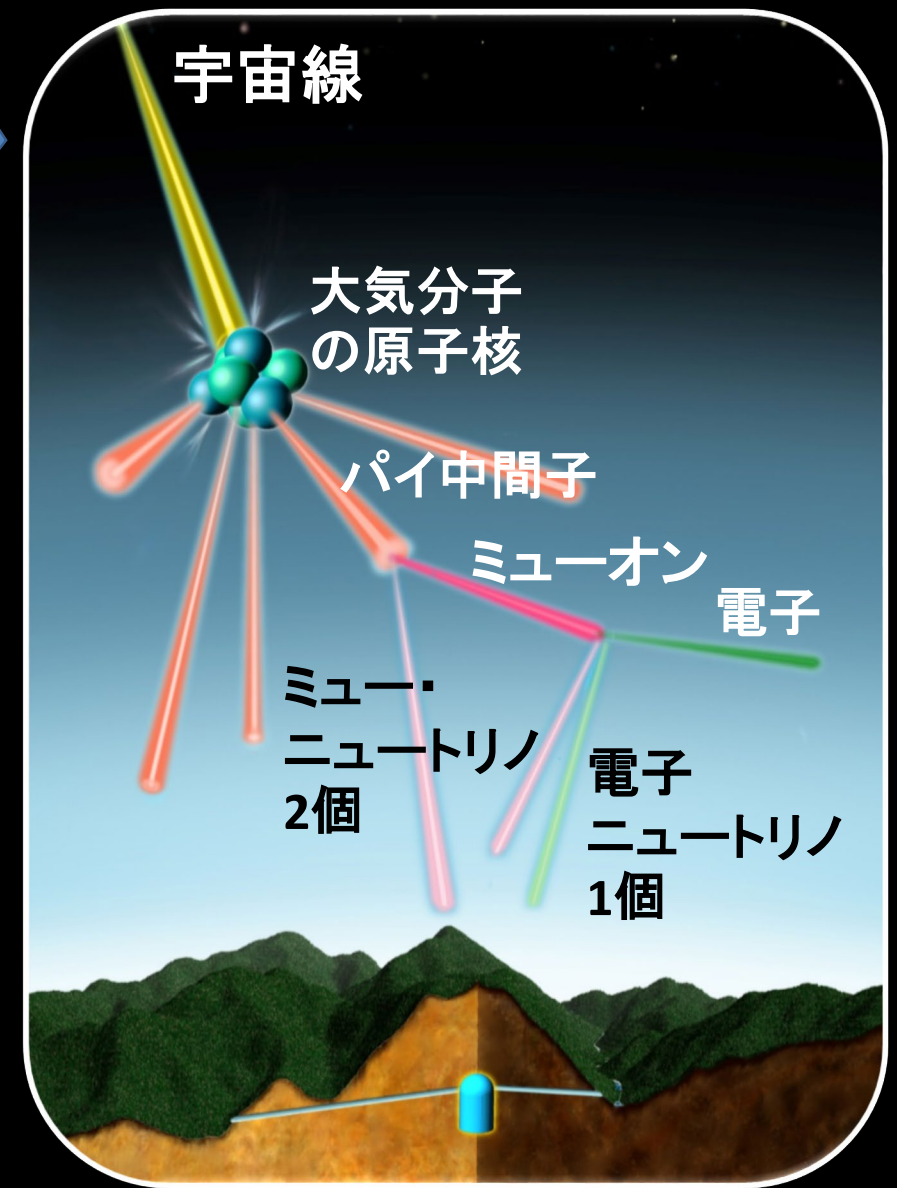
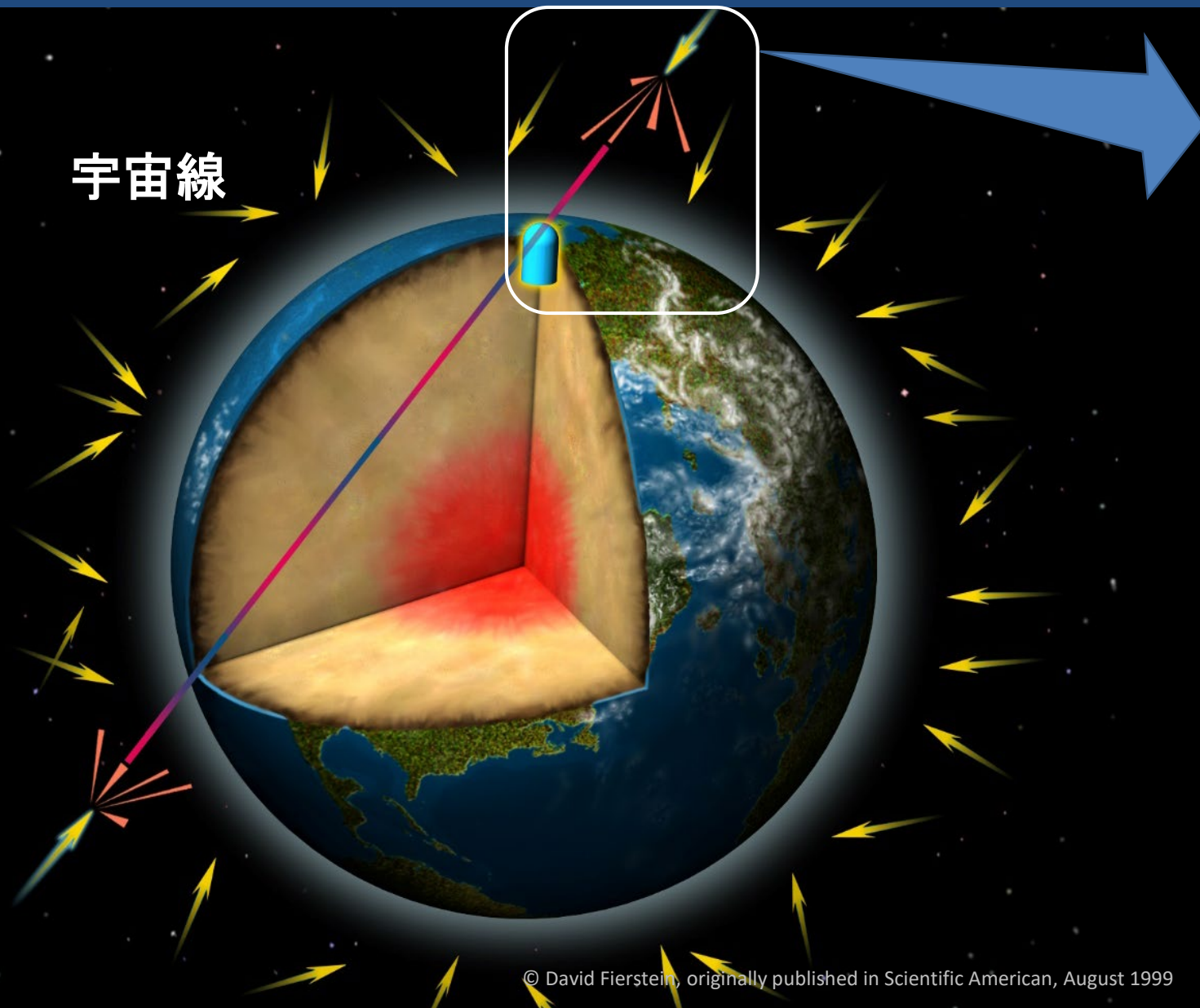
超新星爆発のメカニズム (重い星がその最後に自らの重力でつぶれる現象) の解明



→ ノーベル賞
(小柴先生、2002年)

大気ニュートリノの異常

大気ニュートリノ

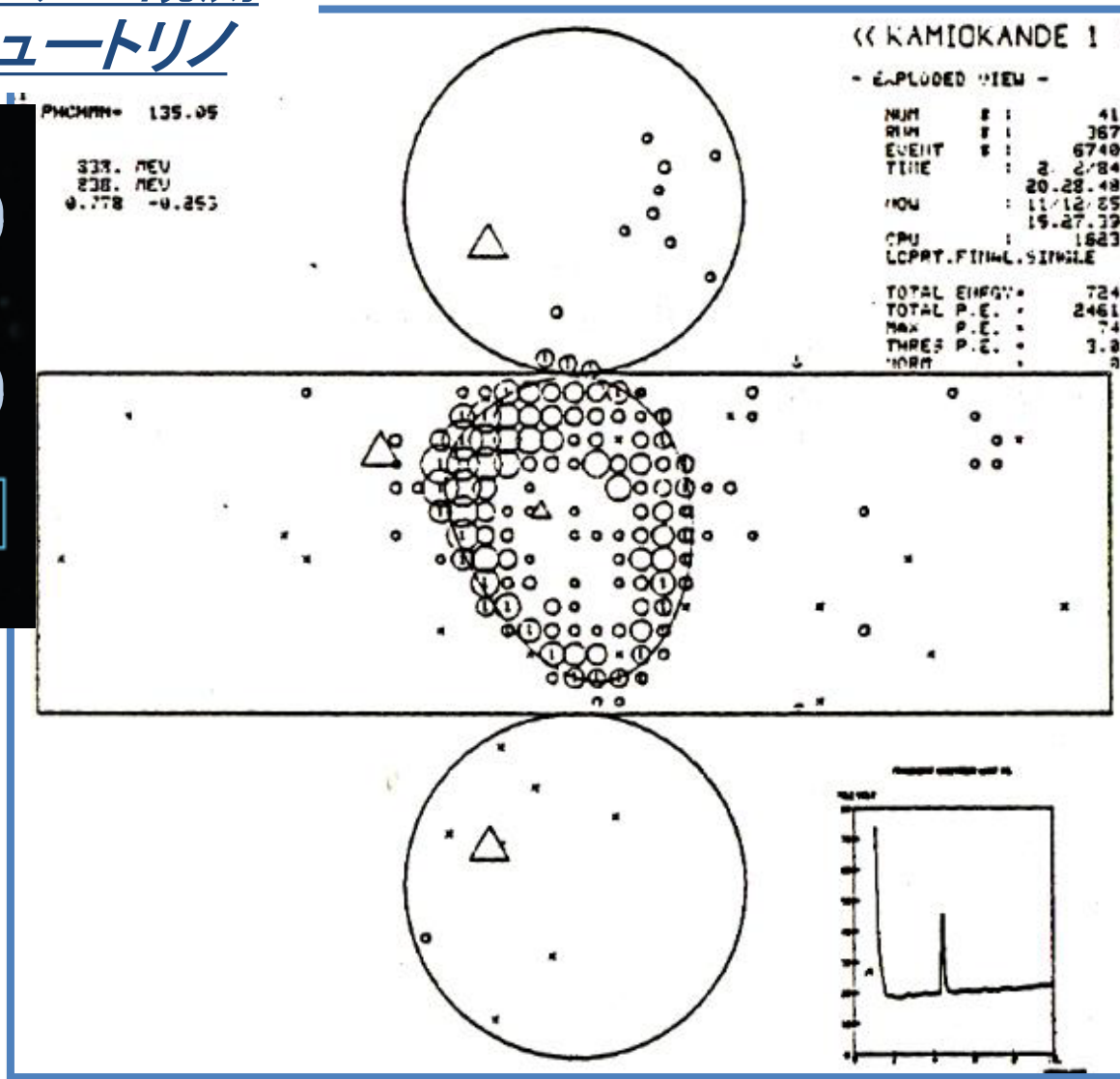
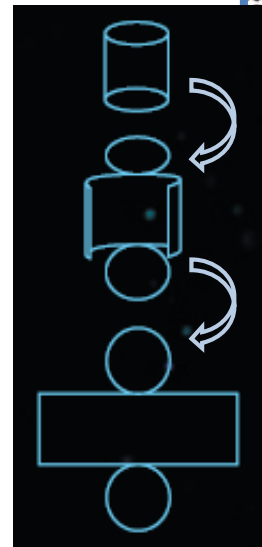


© David Fierstein, originally published in Scientific American, August 1999

1986年頃

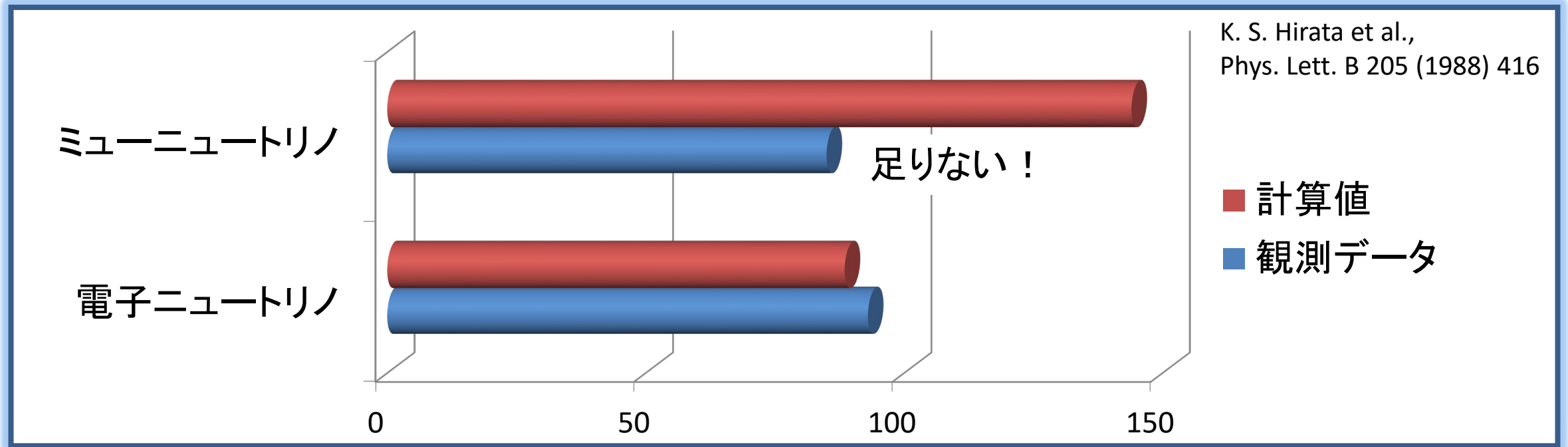
- 博士論文を書きながらデータ解析には改善の余地があると考えていました。そこで、博士論文を提出すると解析ソフトの改良に着手。
- 改良の一つは、観測されたチェレンコフ光のリングについて、それが電子によるものかミューオンによるものかを判別するもの。
- ところが、データに適用したところ、ミュー・ニュートリノ事象の数が予想値よりずっと少ない....
- どこかで間違えているはず。
- ということで、1986年暮れころから、間違い探しを開始。

カミオカンデで観測されたニュートリノ



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。



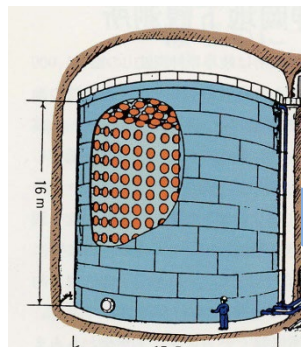
参考: 当時の思い:

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。

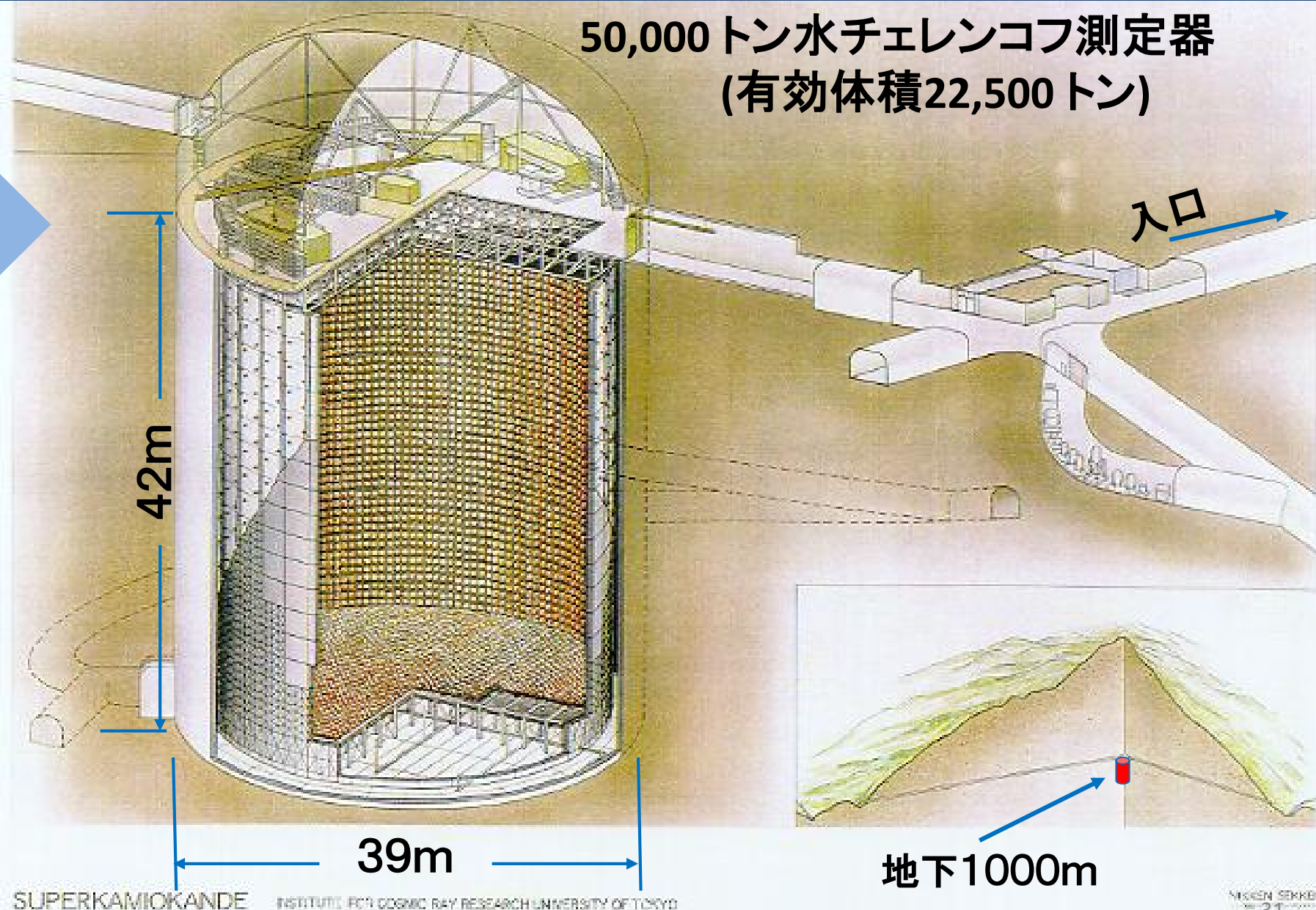
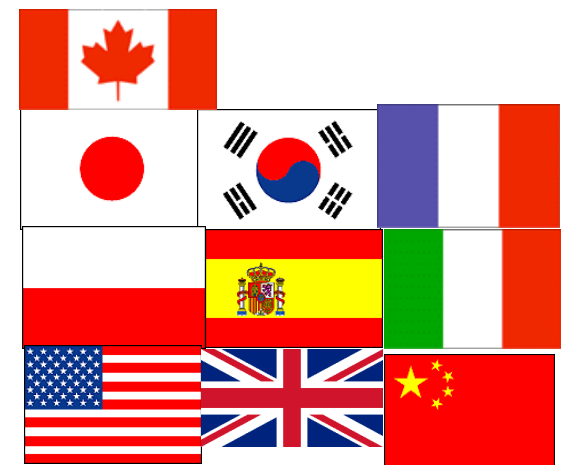
ニュートリノ振動

スーパーカミオカンデ測定器



約20倍の大きさ

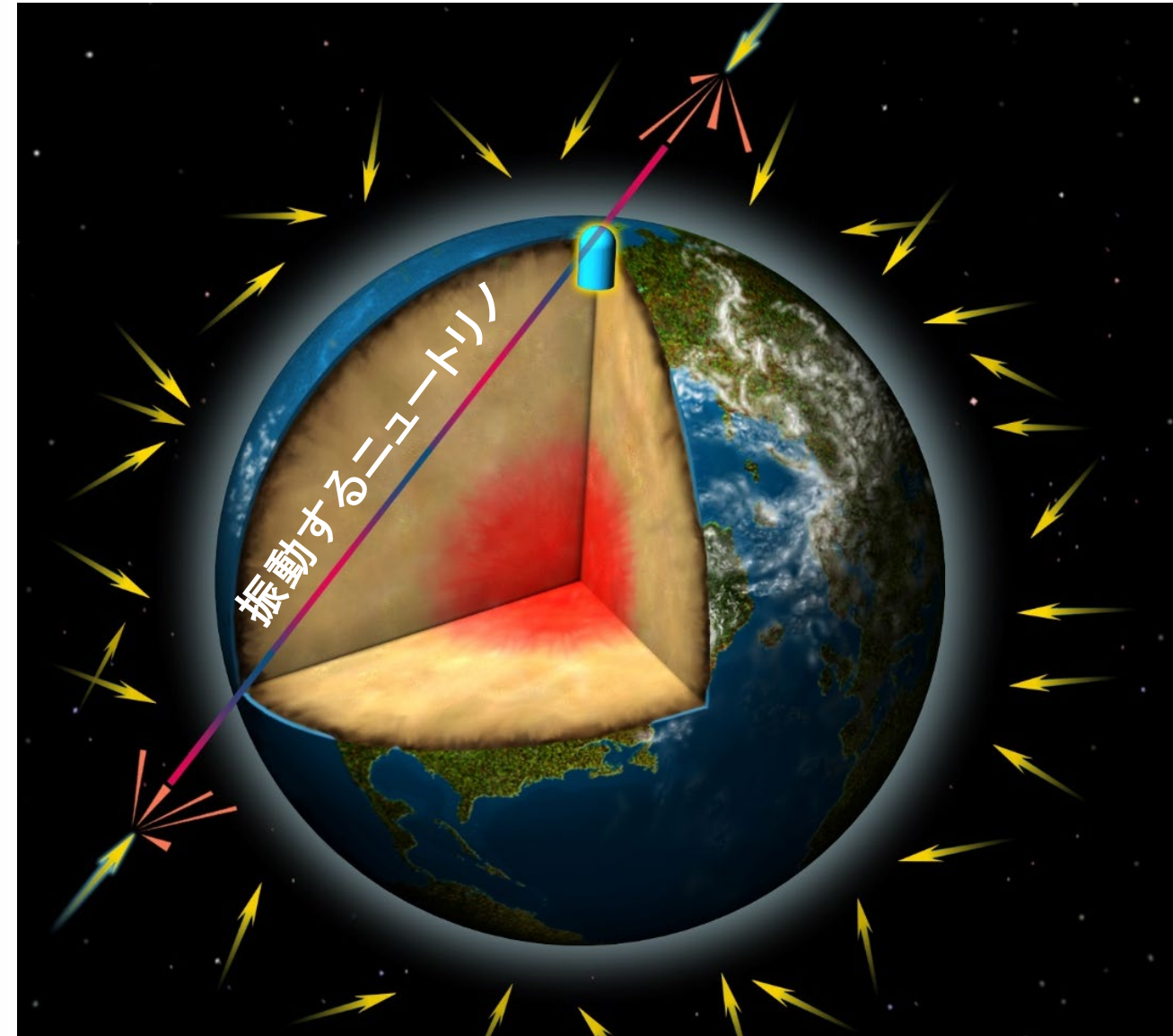
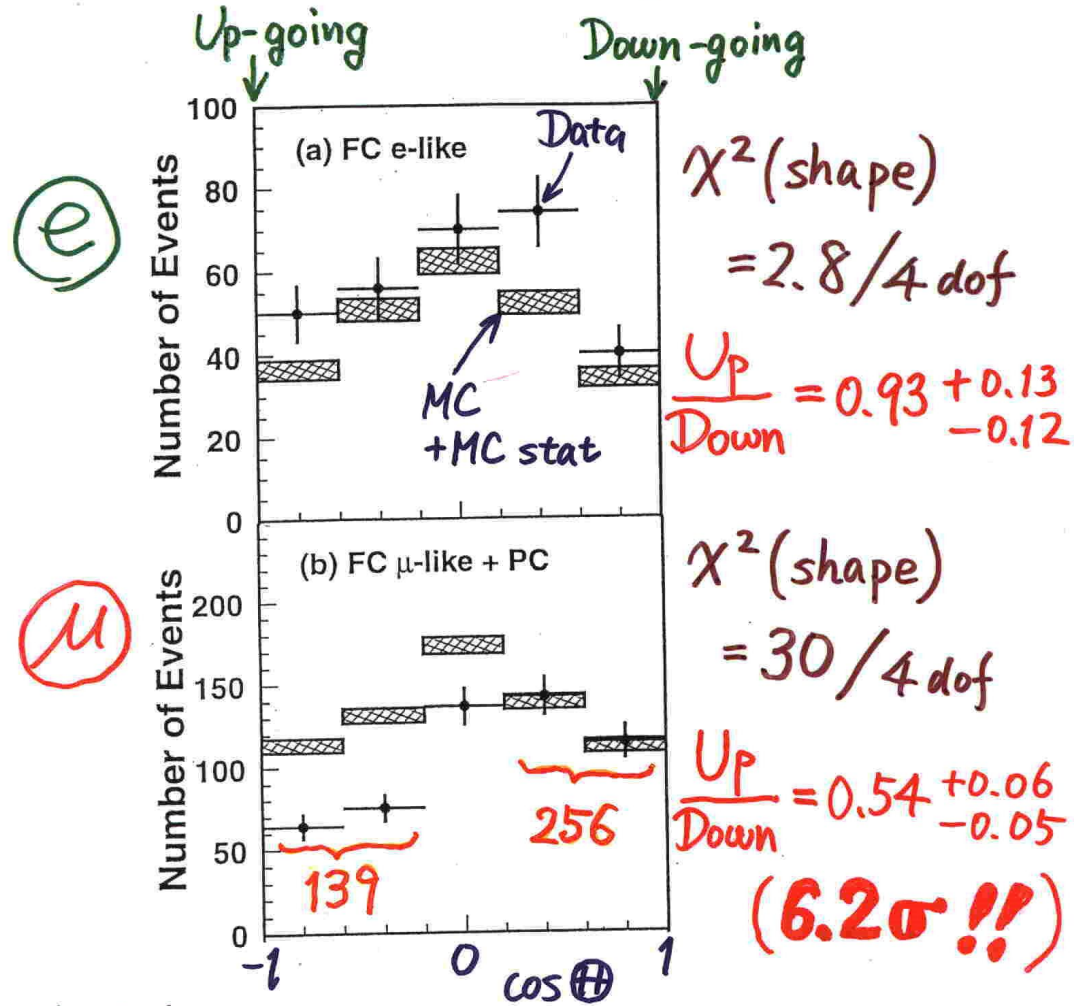
~200人の共同研究



ニュートリノ振動の証拠 (高山でのニュートリノ'98国際会議)

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

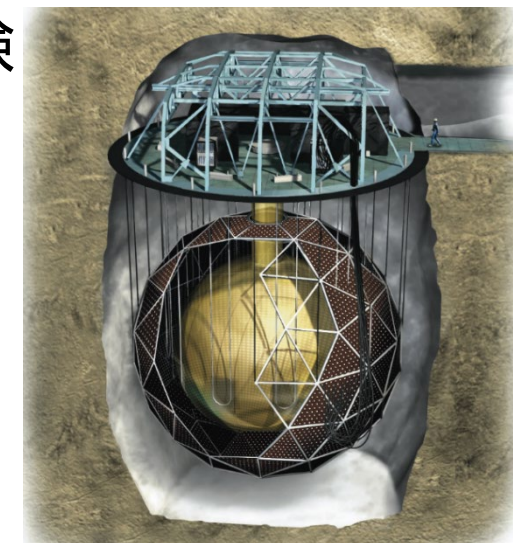
Zenith angle dependence (Multi-GeV)



太陽ニュートリノ振動 (2001-2002)

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

SNO実験
(カナダ)



重水(D₂O) 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

SNO

電子ニュートリノ
のみ

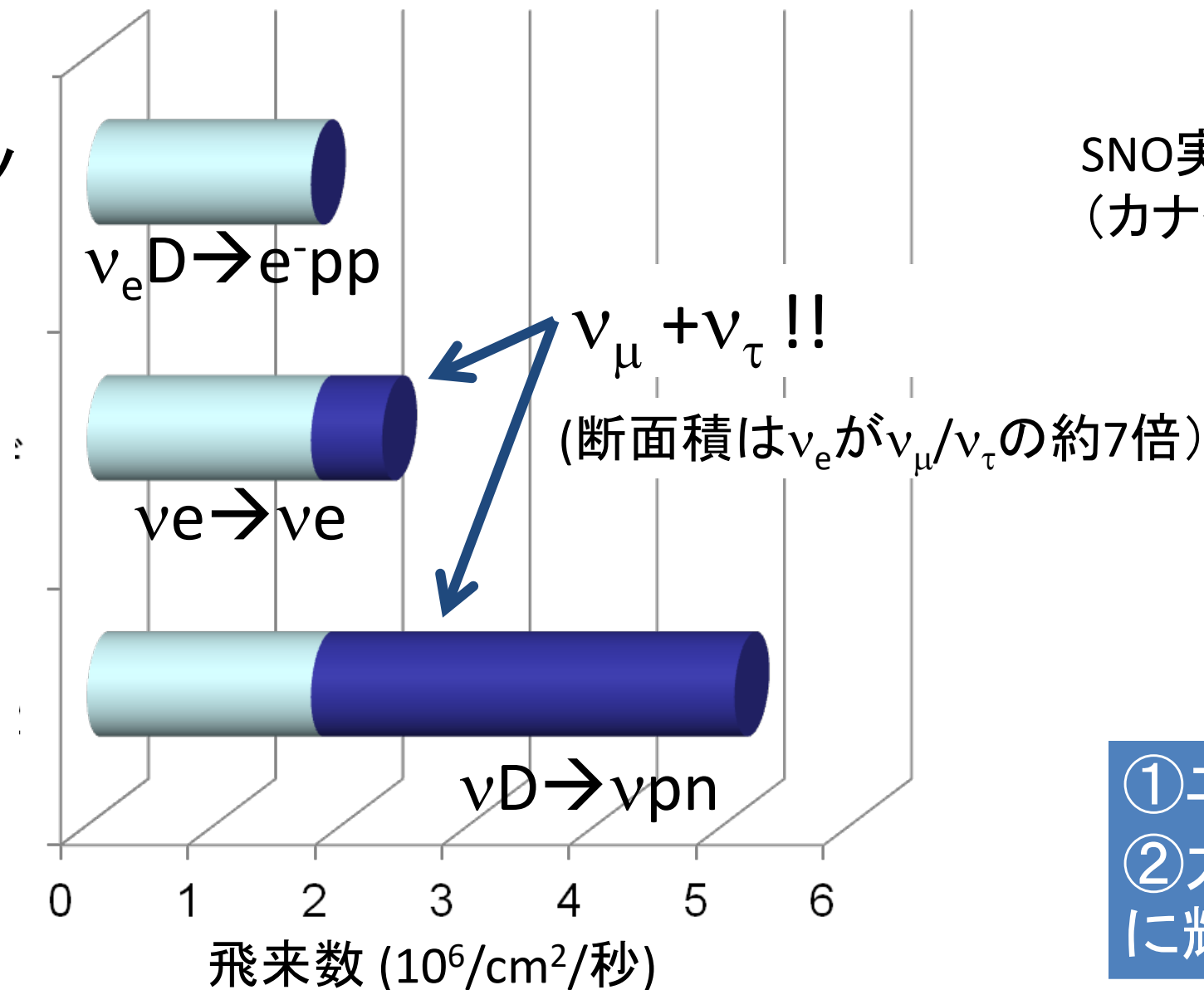
スーパー

カミオカンデ

($\nu_e + \nu_\mu + \nu_\tau$)

SNO

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



加速器を用いた長基線ニュートリノ振動実験

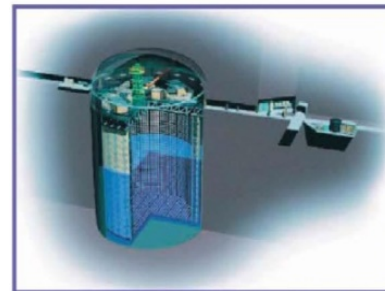
K2K 実験 (1999 – 2004)



加速器ニュートリノでの
ニュートリノ振動の確認

T2K 実験 (2010 -)

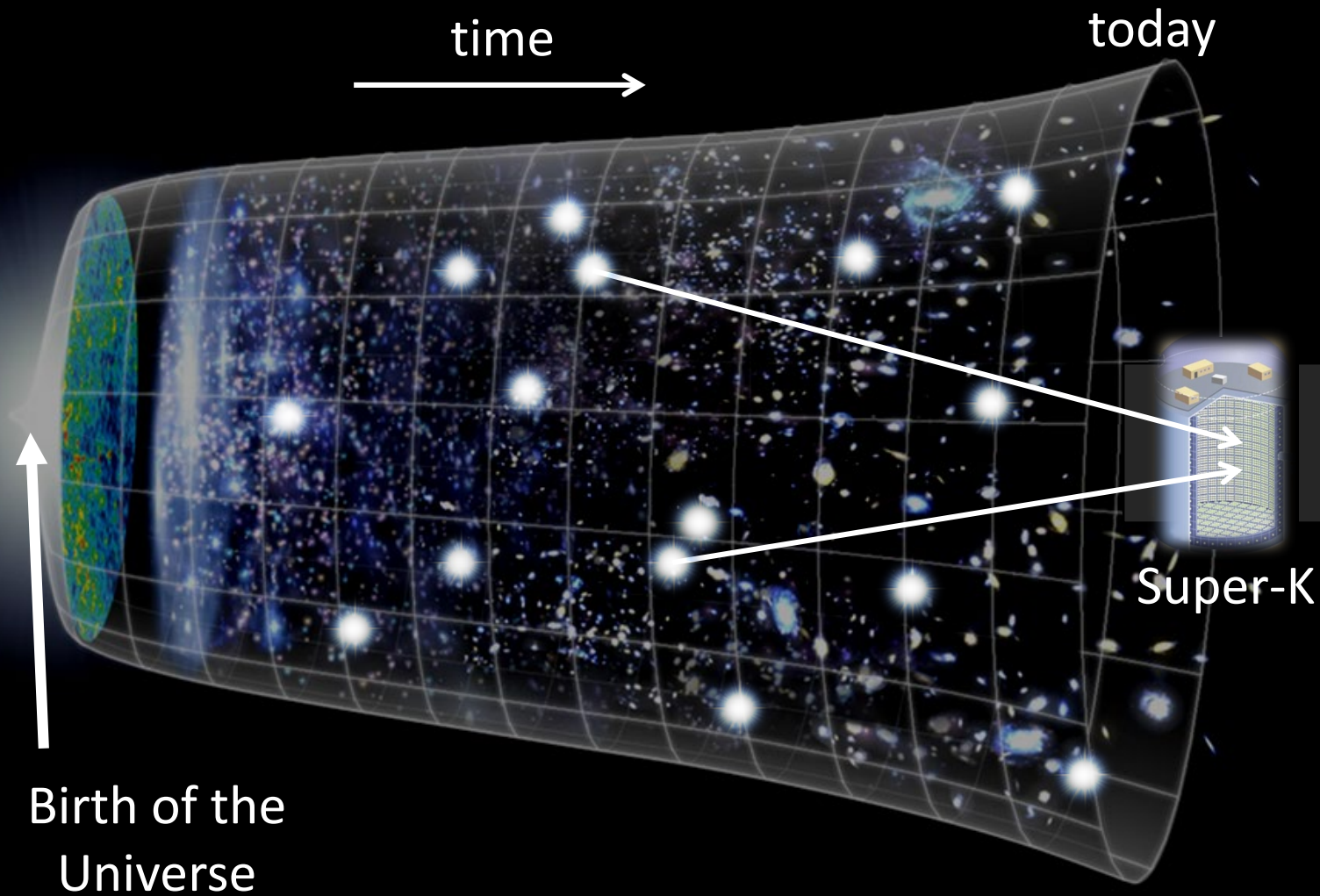
ミューニュートリノから電子ニュートリノへの
振動の発見 (3世代ニュートリノ振動).



Super-Kamiokande
(ICRR, Univ. Tokyo)



現在のスーパーカミオカンデ

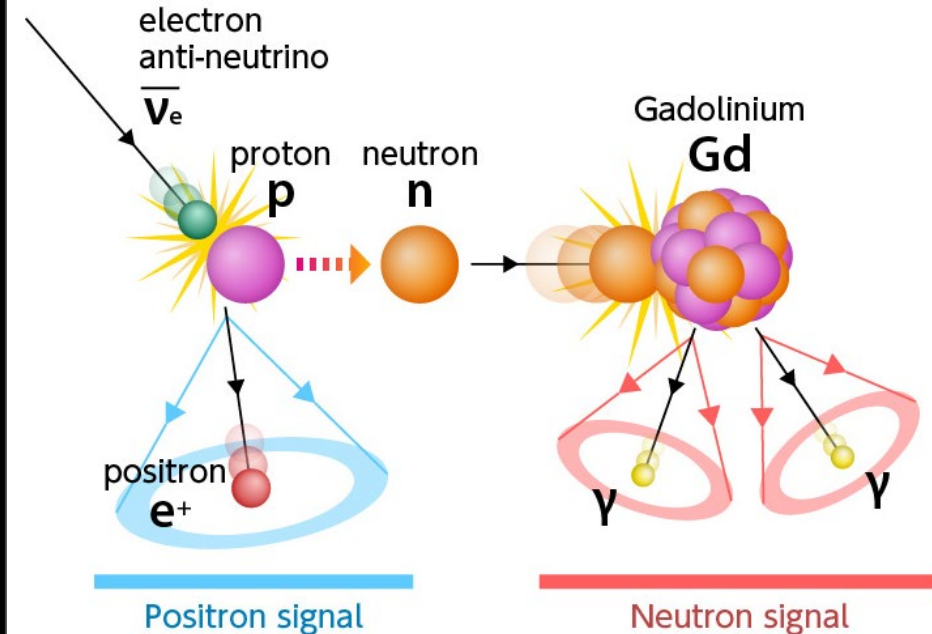
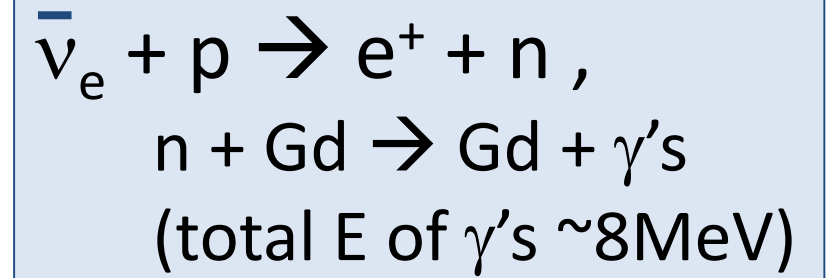


Birth of the
Universe

Super-K

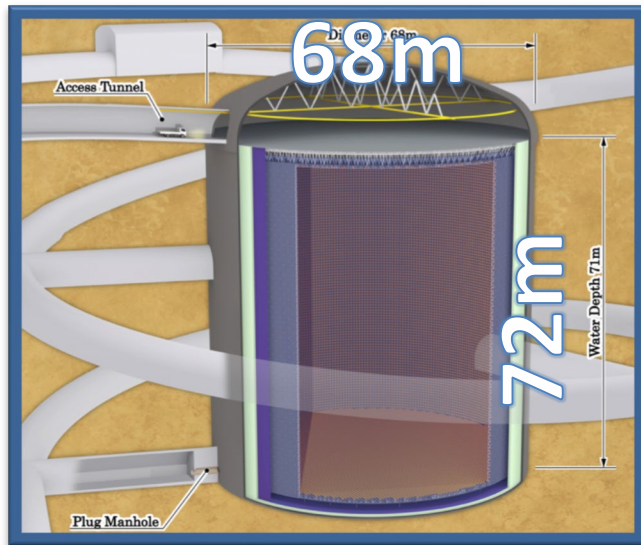
Credit: NASA/WMAP Science Team

過去の宇宙での超新星爆発の
ニュートリノをとらえよう！



今後の研究

ハイパーカミオカンデ



J-PARC大強度加速器
(約2.6倍に増強)



ハイパー・カミオカンデ
総重量26万トン(研究につか
える水の重量はSKの約8倍)

- ✓ 今までの実験の20倍以上の頻度で加速器ニュートリノを測定。
- ✓ J-PARCでニュートリノと反ニュートリノを生成して神岡に向けて飛ばし、ハイパー・カミオカンデで「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」に違いがあるか否か調べ、宇宙の物質の起源の謎に挑みます。その他にもたくさんのサイエンス。
- ✓ 2020年建設開始。**2027年実験開始の予定。**(世界20か国から約500人参加。)

- 大学院時代は、研究の入り口。
- 理学系の大学院に行く人は、自分の興味(と能力)に従って、自分のやりたい研究ができる研究室を選ぶのがよいと思います。
- 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。よい研究室を選んでください。
- スプリング・スクールを楽しんでください。