

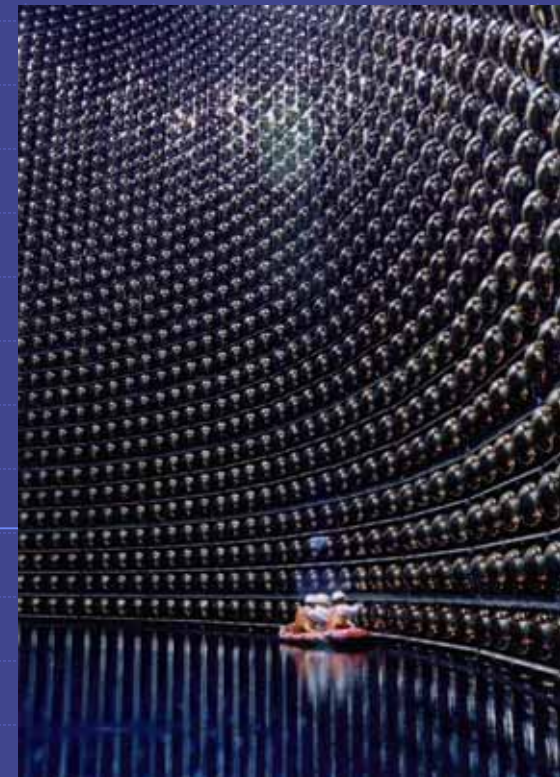
謎の素粒子ニュートリノを 捕らえた！

～スーパーカミオカンデの発見～

西嶋恭司（東海大学理学部）

日本計算機統計学会（May,2005 at 松本）

- 小柴昌俊元教授のノーベル物理学賞受賞
- ニュートリノとは？
- スーパーカミオカンデの紹介
- 大気ニュートリノの話
- 太陽ニュートリノの話



小柴昌俊元教授の ノーベル物理学賞受賞




The Nobel Prize in Physics 2002

天体物理学に対するパイオニア的貢献、
特に宇宙ニュートリノの観測に対して




Raymond Davis Jr.

 1/4 of the prize
USA

University of
Pennsylvania
Philadelphia, PA,
USA




Masatoshi Koshiha

 1/4 of the prize
Japan

University of Tokyo
Tokyo, Japan



Riccardo Giacconi

 1/2 of the prize
USA

Associated
Universities Inc.
Washington, DC,
USA

The Nobel Prize in Physics 2002

[Press Release](#)
[Advanced Information](#)
[Information for the Public](#)
[Presentation Speech](#)
[Illustrated Presentation](#)

Raymond Davis Jr.

[Autobiography](#)
[Nobel Lecture](#)
[Interview](#)
[Nobel Diploma](#)
[Prize Award Photo](#)
[Articles](#)
[Other Resources](#)

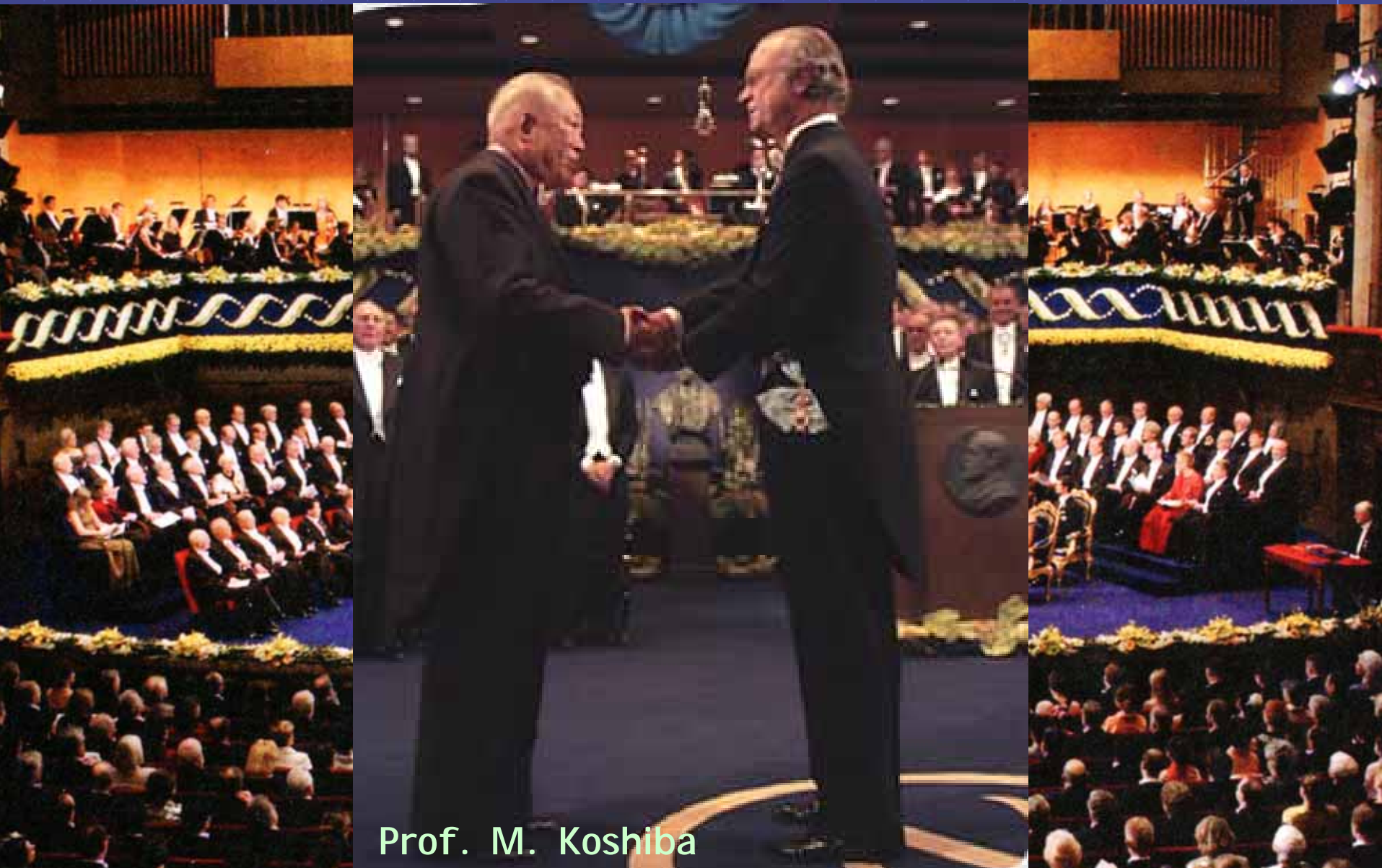
Masatoshi Koshiha

[Curriculum Vitae](#)
[Nobel Lecture](#)
[Interview](#)
[Nobel Diploma](#)
[Prize Award Photo](#)
[Articles](#)
[Other Resources](#)

Riccardo Giacconi

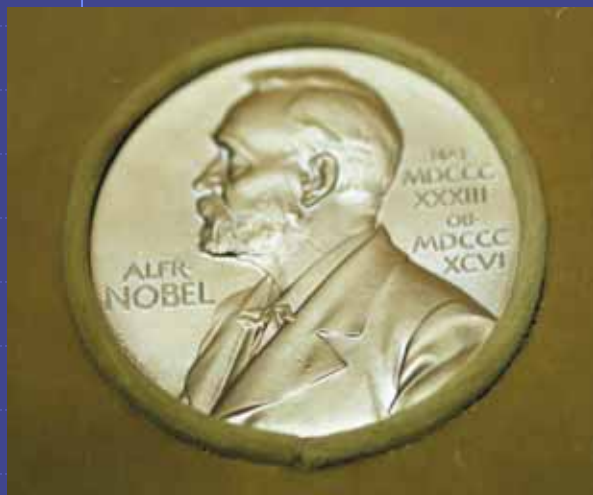
[Autobiography](#)
[Curriculum Vitae](#)
[Nobel Lecture](#)
[Interview](#)
[Nobel Diploma](#)
[Prize Award Photo](#)
[Banquet Speech](#)
[Other Resources](#)

ノーベル賞受賞式



Prof. M. Koshiba

賞状とメダル



星の一生

ブラックホール

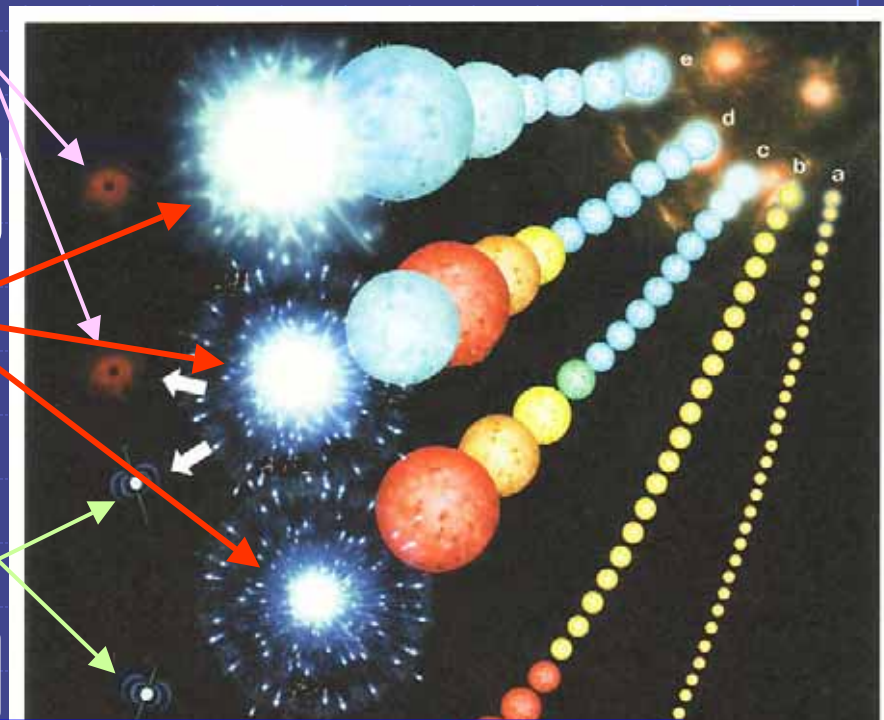
太陽質量の30倍以上の星

超新星

太陽質量の25倍程度の星

中性子星

太陽質量の10倍程度の星



● 重力崩壊型超新星

● 開放される重力エネルギー

10^{53} erg: 太陽が一生の間に放出するエネルギーの数百倍

● その99%が～10秒間にニュートリノによって運び出される。

超新星SN1987Aの出現

● 1987年2月23日



大マゼラン星雲

我々の銀河

太陽

大マゼラン星雲

17万光年彼方

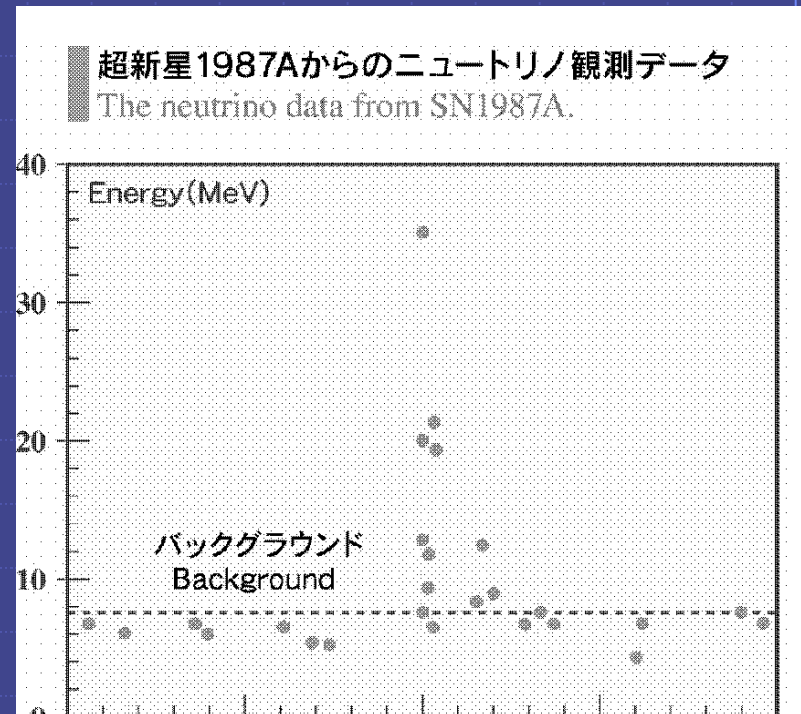
小マゼラン星雲

KAMIOKANDEによる ニュートリノバーストの検出

● KAMIOKANDE

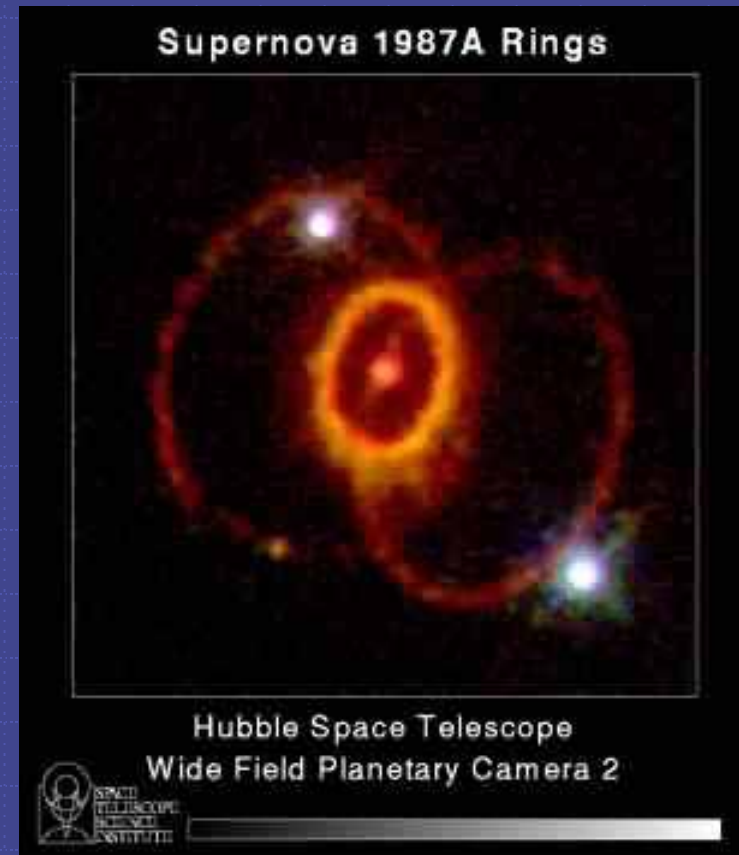
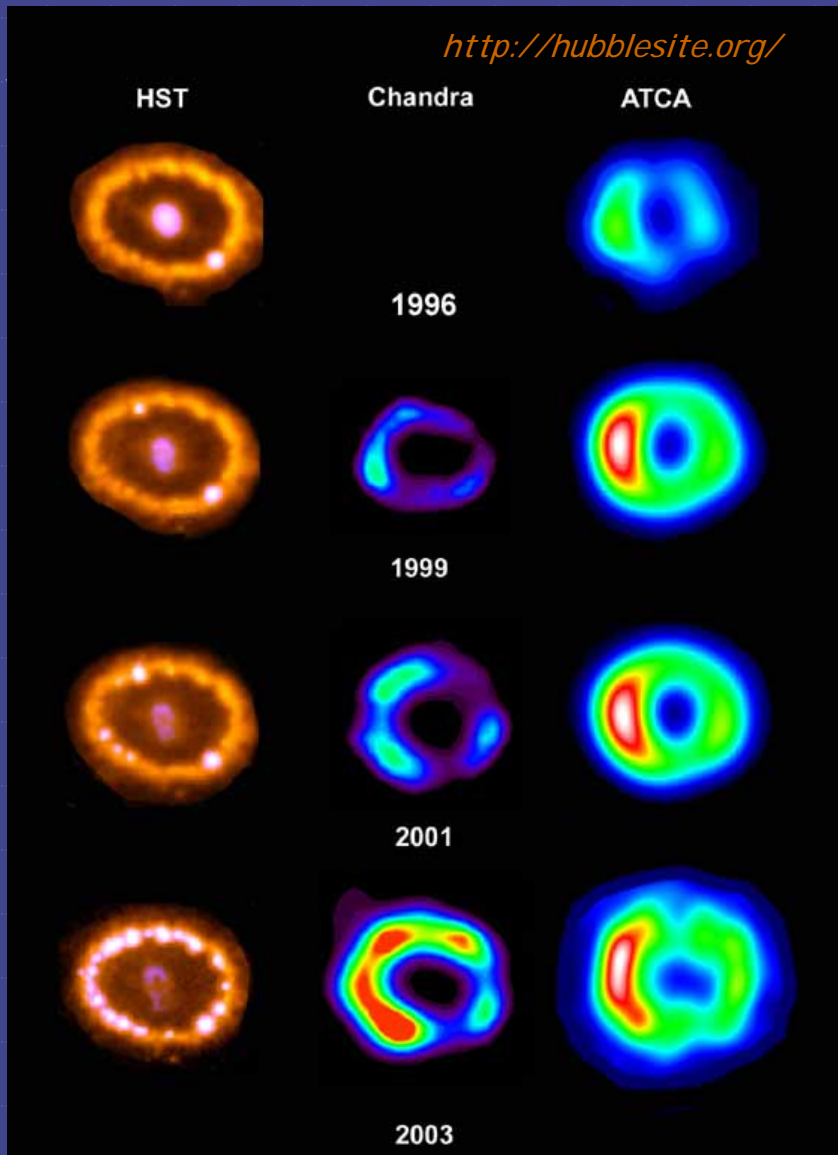
11個 / 13秒 : 3×10^{53} erg

理論的にしか語ることのできなかった、超新星爆発の理論を観測的に実証。ニュートリノで宇宙を観測し、天体の進化、宇宙の進化を明らかにするニュートリノ天文学を創始した。



小柴昌俊氏 (東京大学特別荣誉教授・元東海大学教授)
ノーベル物理学賞受賞(2002)

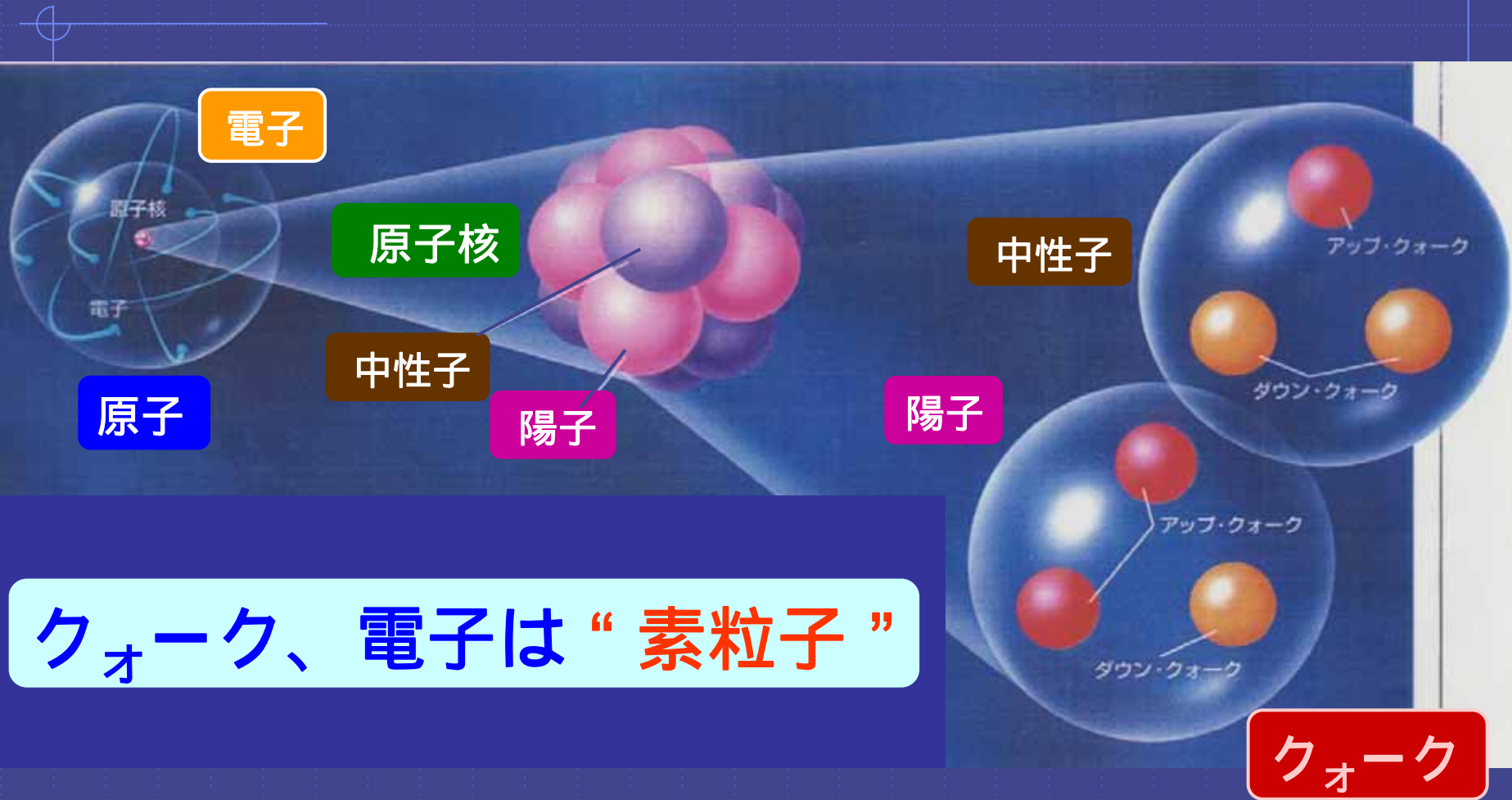
超新星SN1987Aのその後



膨張している衝撃波が
可視光リングに衝突し
ている！

ニュートリノとは？

原子核の構造



クォーク、電子は“素粒子”

クォーク

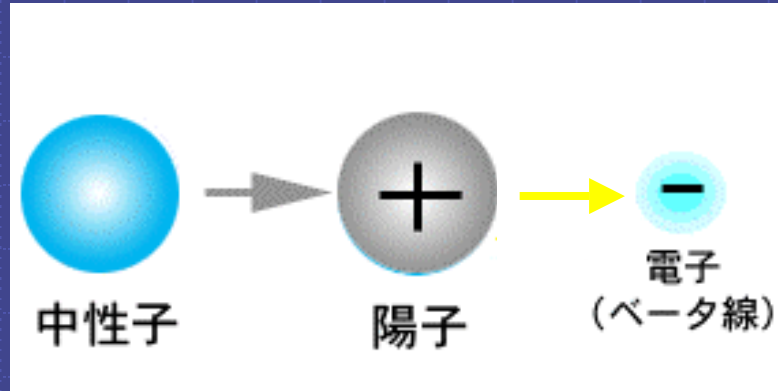
現在見つかっている素粒子の種類

	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 tau
クォーク::QUARK	 アップ up	 チャーム charm	 トップ top
	 ダウン down	 ストレンジ strange	 ボトム bottom

「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。」

ベータ崩壊の謎？

- ベータ崩壊

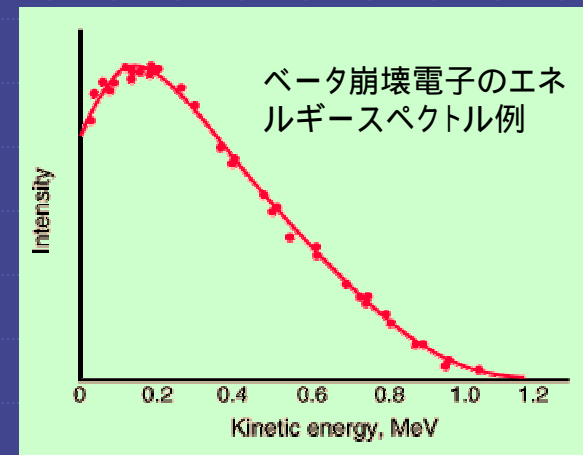


- エネルギー保存則が破れている？

- 予想されるベータ線のスペクトルは線スペクトルなのに、実験結果は連続スペクトル

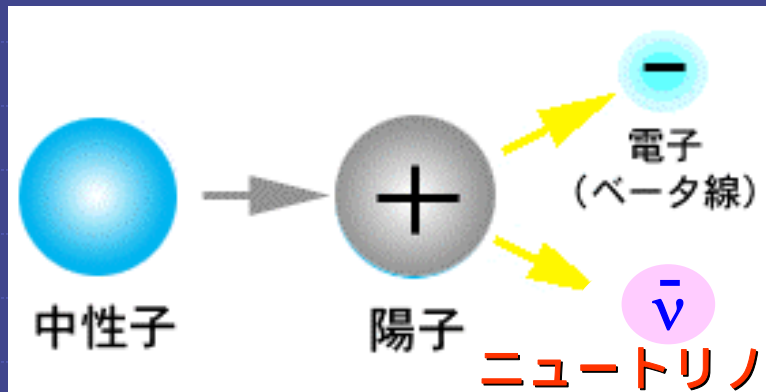
$$m_n c^2 = m_p c^2 + \frac{p^2}{2m_p} + m_e c^2 + K_e$$
$$K_e \approx m_n c^2 - m_p c^2 - m_e c^2 = \text{const.}$$

$$E = mc^2$$



ニュートリノの予言 by W. Pauli

● ベータ崩壊



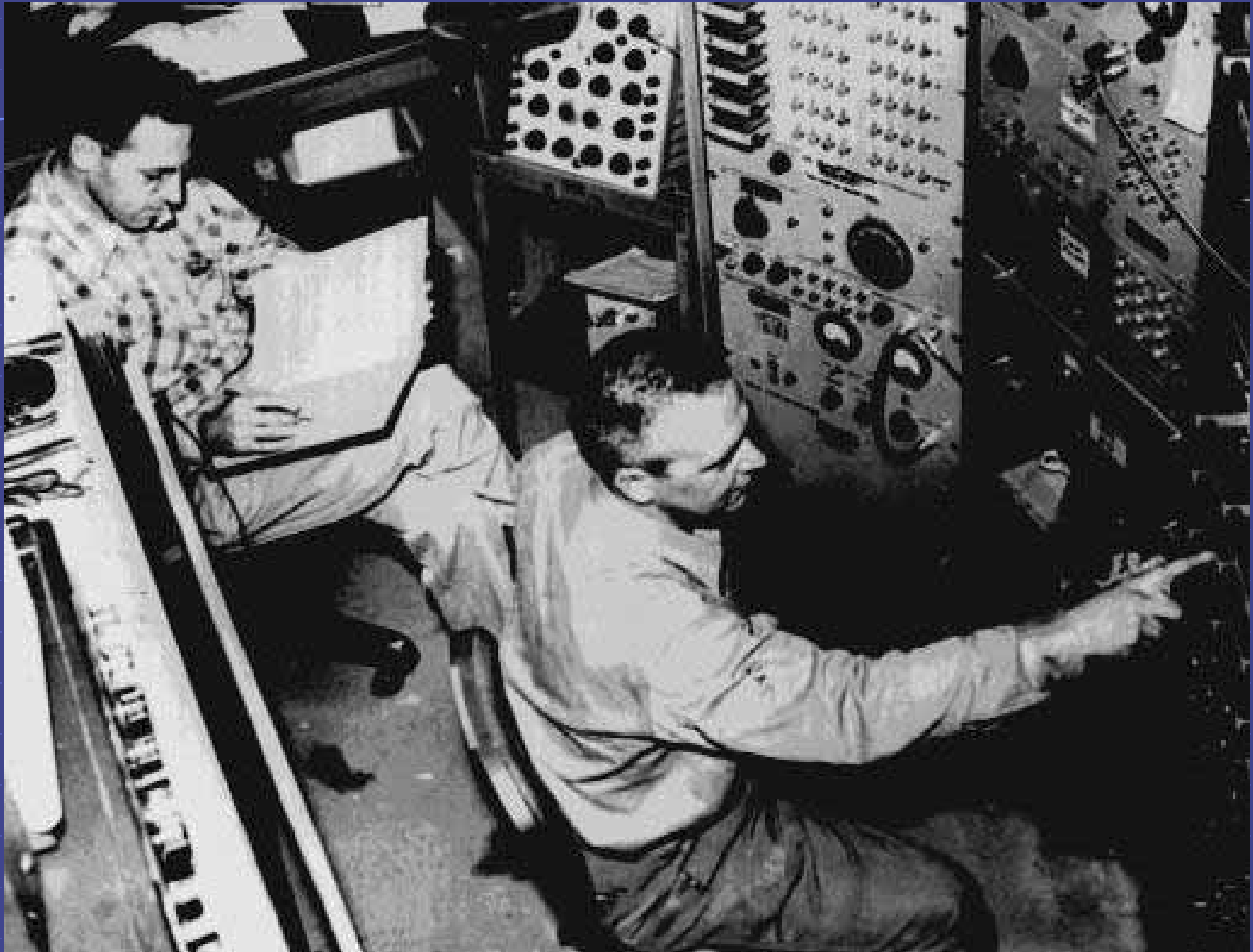
● エネルギーの保存

$$m_n c^2 = m_p c^2 + \frac{p^2}{2m_p} + m_e c^2 + K_e + m_\nu c^2 + K_\nu$$

$$K_e + K_\nu \approx m_n c^2 - m_p c^2 - m_e c^2 - m_\nu c^2 = \text{const.}$$



ニュートリノの発見 (I)

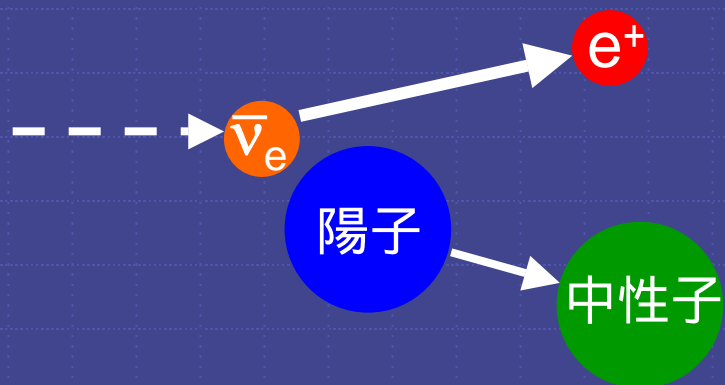


F.Reines (右、1995年ノーベル賞) とC.Cowen (1956年発見)

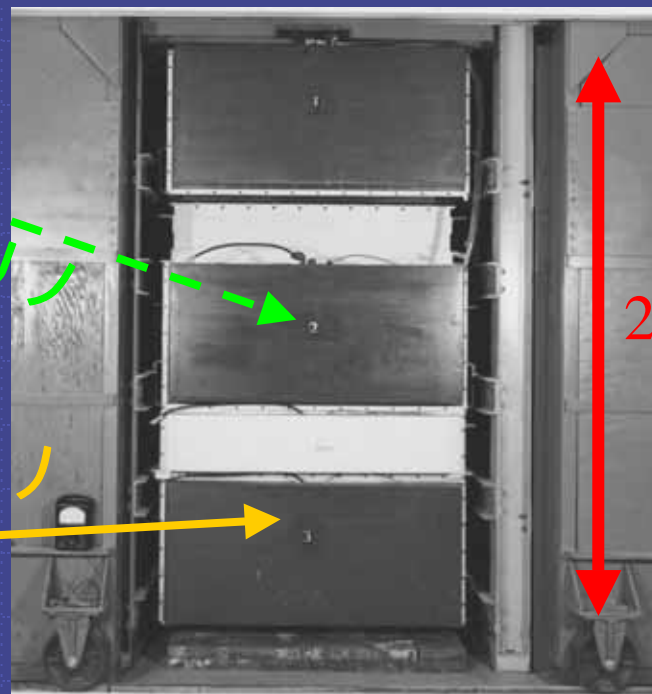
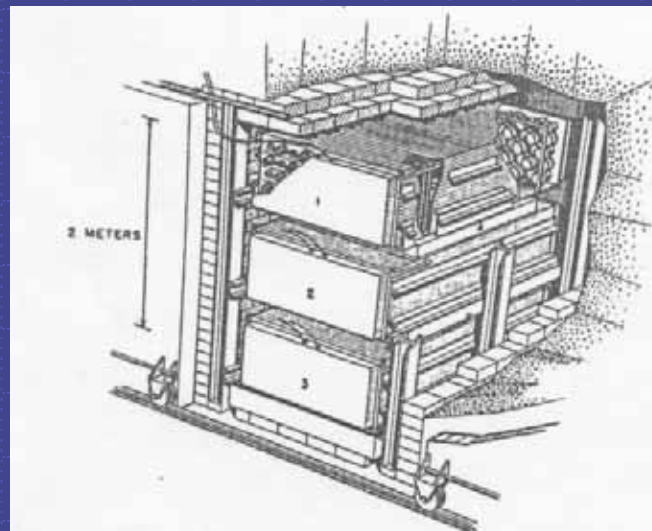
ニュートリノの発見(II)



原子炉で反電子ニュートリノが大量に生成される。



ニュートリノ測定器

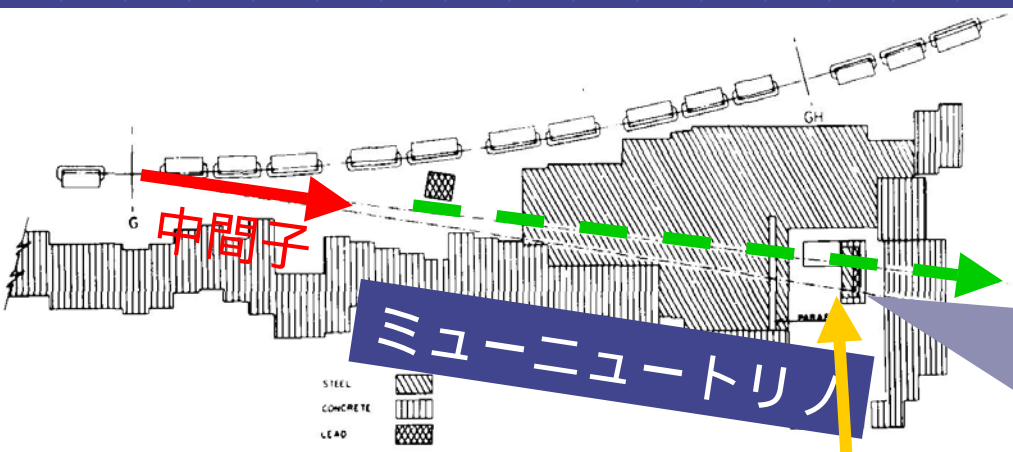


ミュー・ニュートリノの発見(1)



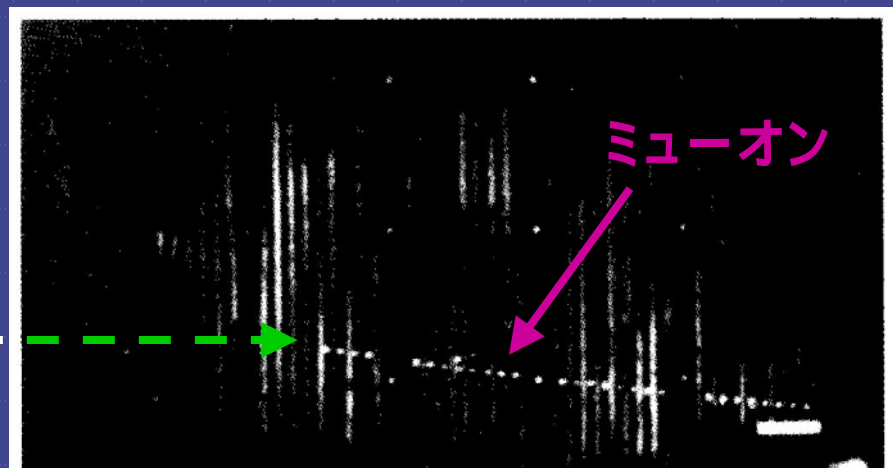
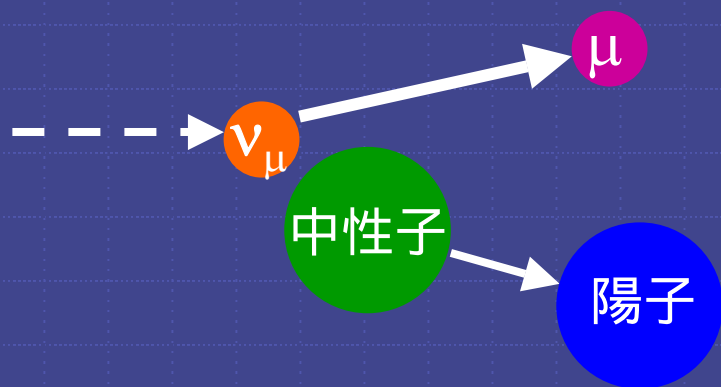
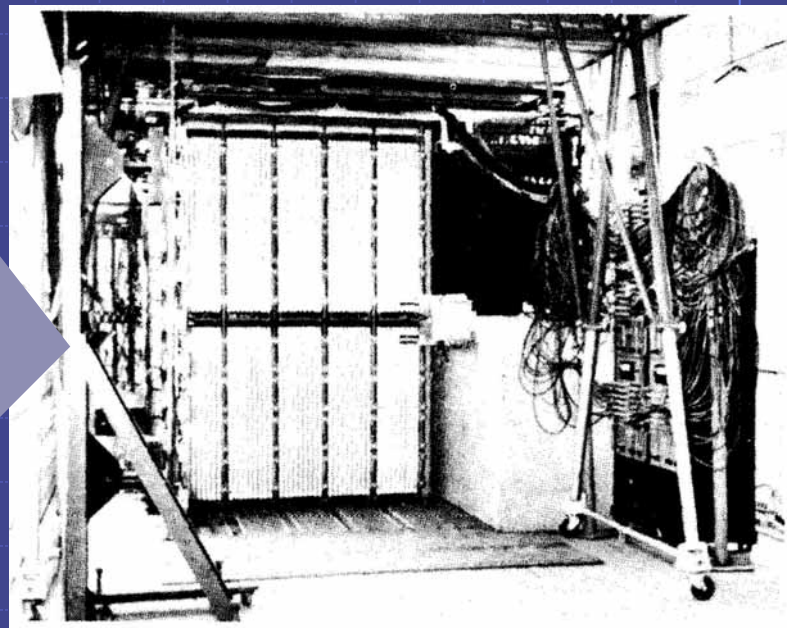
左から J.Steinberger, M.Schwartz and L.Lederman
(1962年発見、1988年ノーベル賞受賞)

ミュー・ニュートリノの発見(II)



加速器でミューニュートリノを大量に生成する。

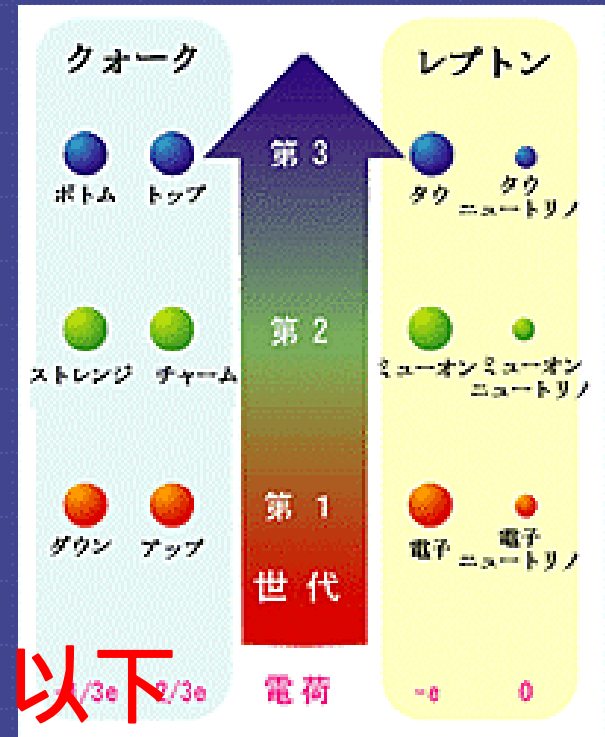
ニュートリノ測定器



観測された事象の1例

ニュートリノの性質

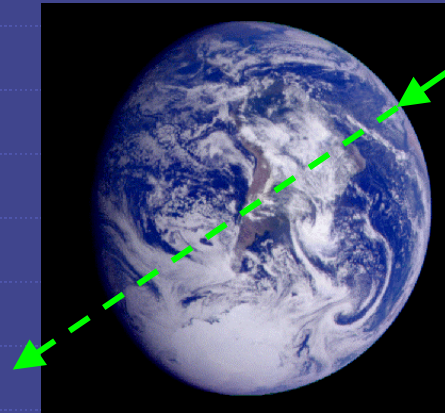
- 3種類（世代）
 - 電子ニュートリノ (ν_e)
 - ミューニュートリノ (ν_μ)
 - タウニュートリノ (ν_τ)
- 電氣的に中性
- ~~質量はゼロ~~
- 質量は電子の百万分の一以下
- 相互作用が極めて弱い
 - 地球も突き抜ける！



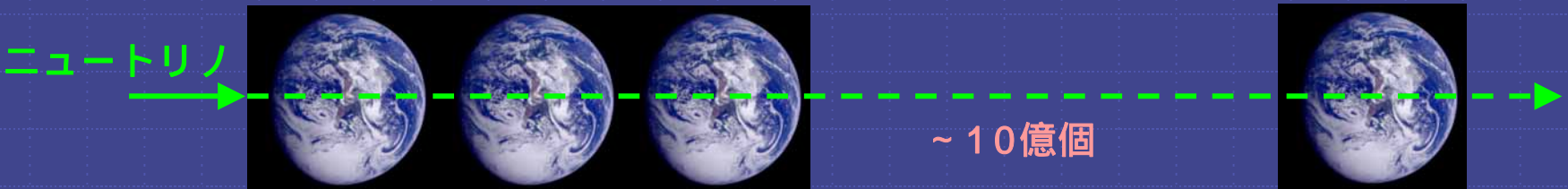
ニュートリノの貫通力

- 地球の中心を通過するニュートリノが地球と相互作用する確率（太陽ニュートリノの場合）はおよそ

$$\frac{1}{1,000,000,000}$$

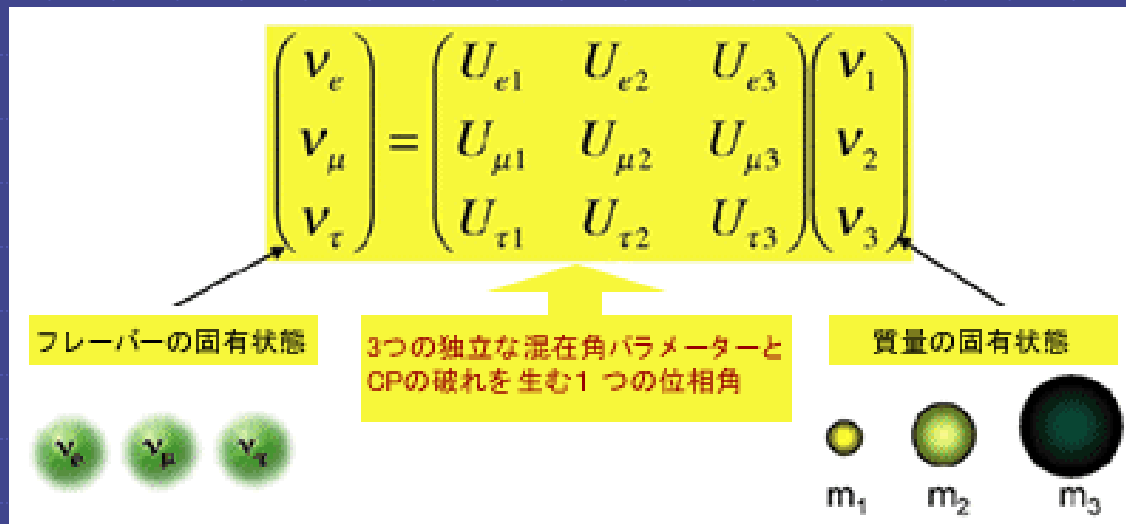


- ニュートリノを止めるには地球10億個以上必要！（エネルギーに依存）



ニュートリノ振動

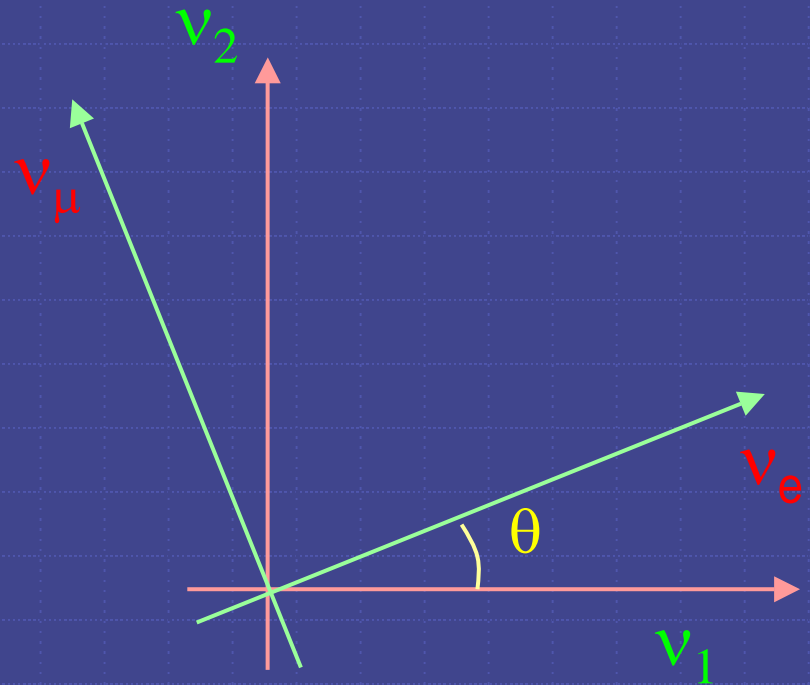
- すべての素粒子は**粒子**であると同時に**波**（物質波）でもある。
- もしニュートリノが質量を持てば、**質量の固有状態**と**フレーバーの固有状態**は異なる可能性がある。（牧、中川、坂田,1962）



ニュートリノ振動の簡単な例

質量の違いが極めて小さいと ν_1 と ν_2 は重なったまま非常に長い距離を飛ぶ。重なったまま飛んでいるときには、最初電子ニュートリノ ν_e だけであったニュートリノが、ある時間が経過するとミュニュートリノ ν_μ の成分が現れることになる。このような、異なるニュートリノ間での相互移行を振動と呼ぶ。

$$\begin{aligned}\nu_e &= \cos\theta\nu_1 + \sin\theta\nu_2 \\ \nu_\mu &= -\sin\theta\nu_1 + \cos\theta\nu_2\end{aligned}$$

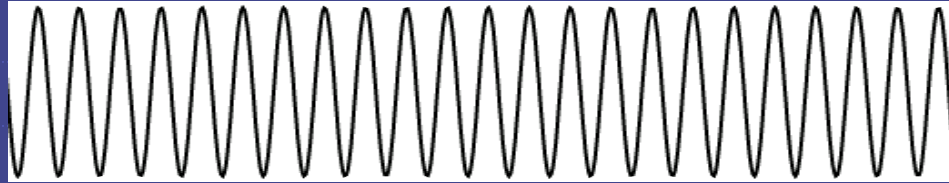


ニュートリノ振動の概念

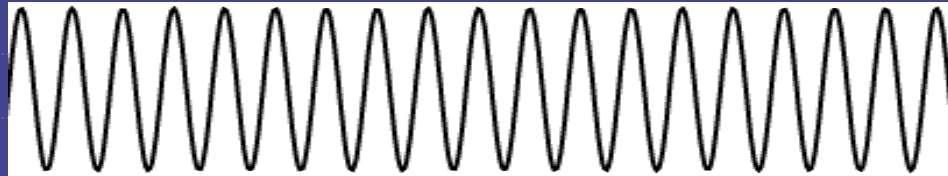
波の伝播

時間

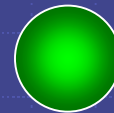
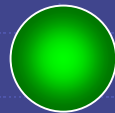
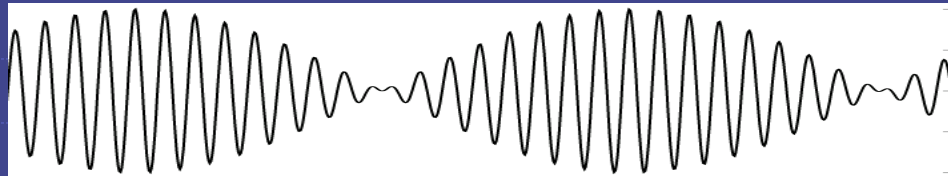
v_1 の物質波



v_2 の物質波



合成波
 v_e の物質波



電子

ミュー

電子

ミュー

ニュートリノ

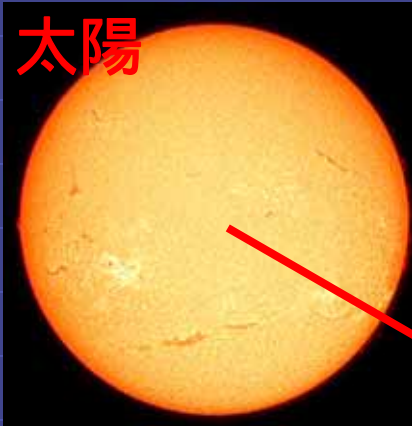
ニュートリノ

ニュートリノ

ニュートリノ

ニュートリノの主な発生源

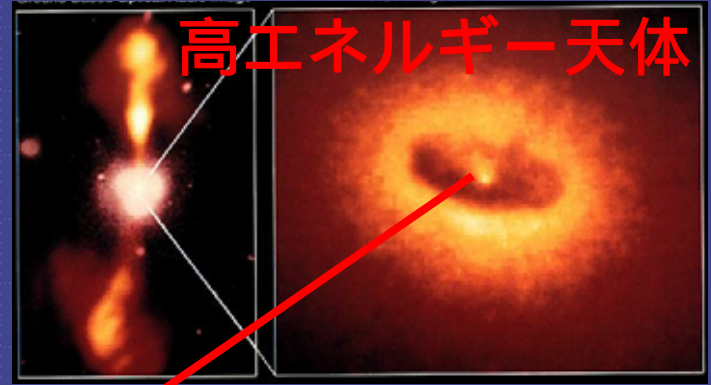
太陽



超新星



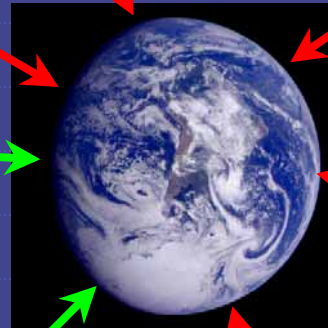
高エネルギー天体



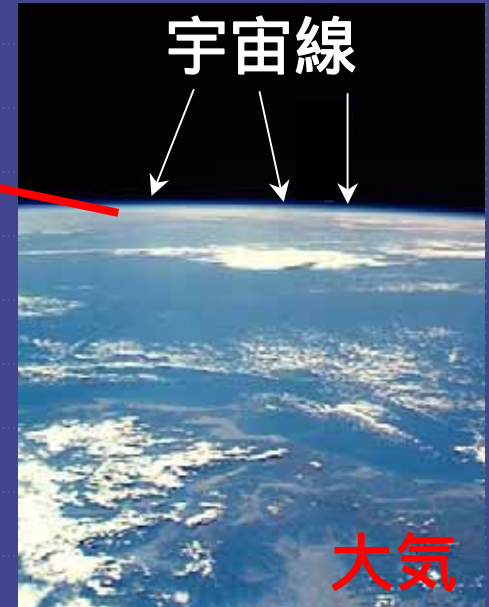
加速器



原子炉



宇宙線



大気

ビッグバン



スーパーカミオカンデ

スーパーカミオカンデの 名前の由来と歴史

- Kamiokande :

Kamioka Neutron Decay Experiment

Kamioka : 岐阜県吉城郡神岡町 (現・飛騨市)

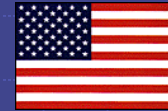
Nucleon : 陽子と中性子の総称



Kamioka Neutrino Detection Experiment

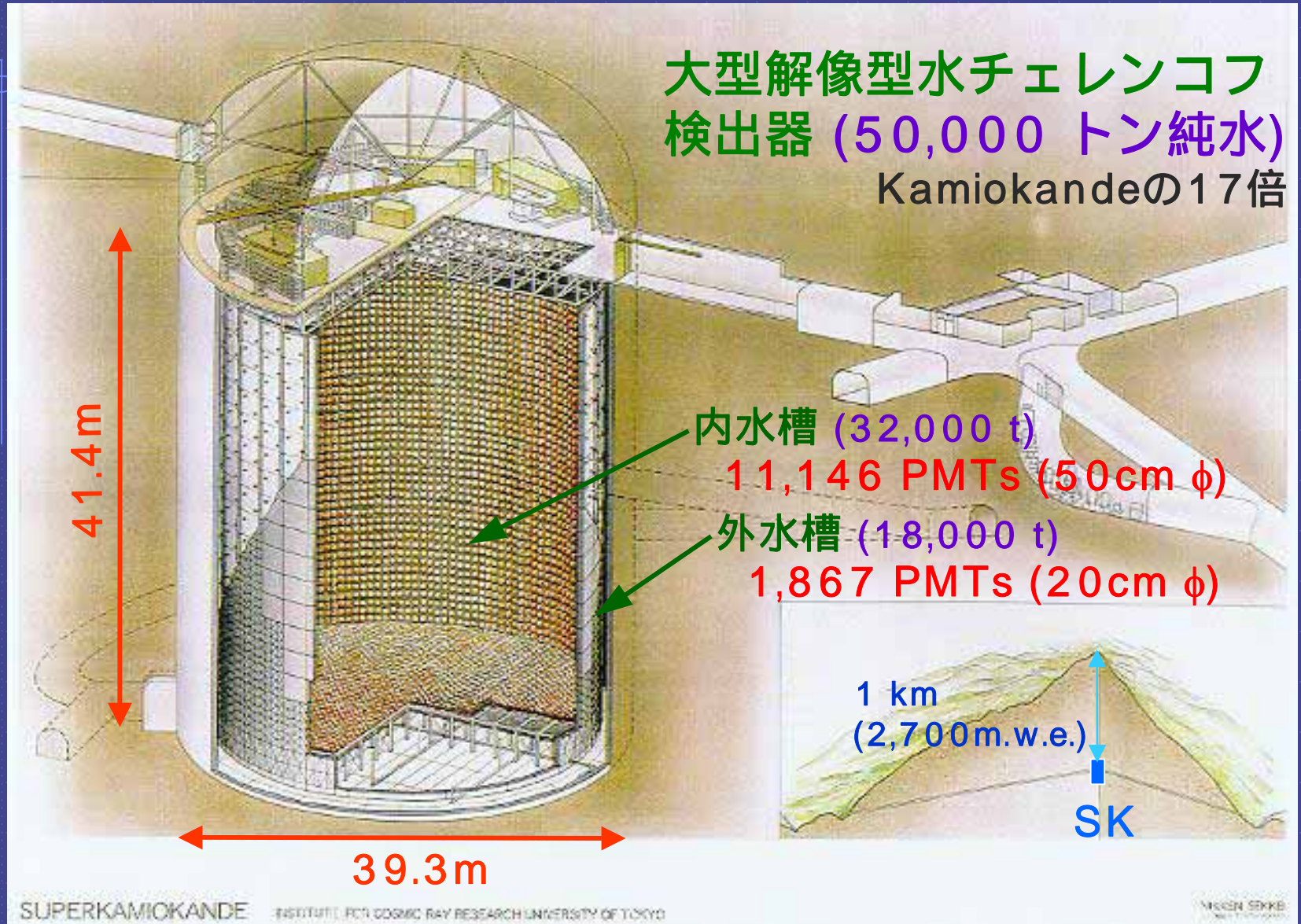
- 1983年カミオカンデ運転開始
 - 我が国におけるニュートリノ研究の出発点
- 1996年スーパーカミオカンデ運転開始
 - ニュートリノ研究で世界をリードする

スーパーカミオカンデ 参加研究機関

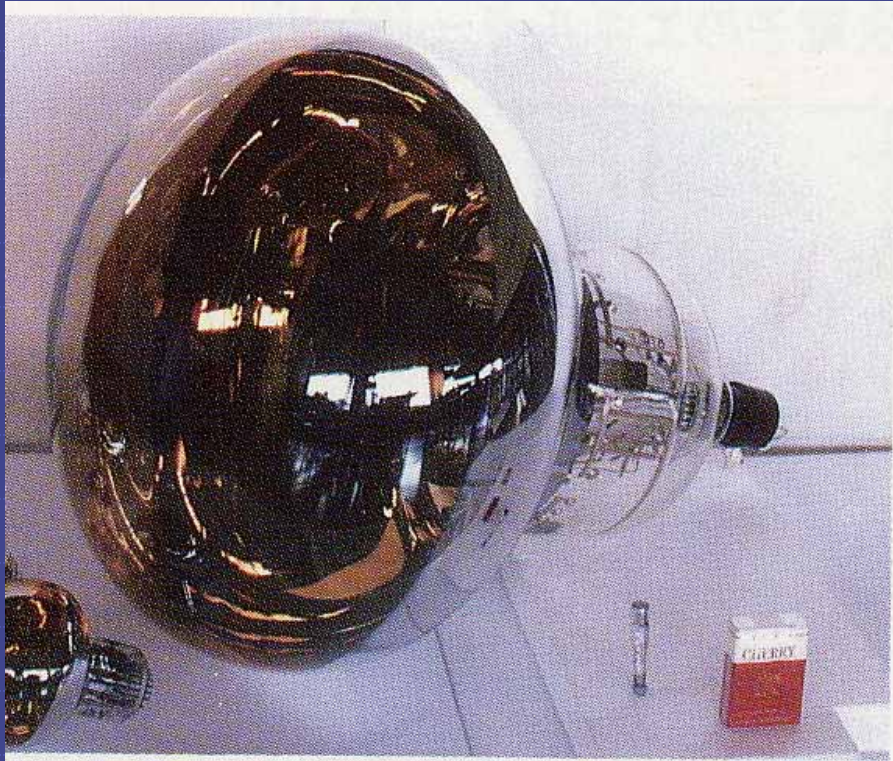


- 東京大学
- ボストン大学
- ブルックヘブン国立研究所
- カリフォルニア大学アーバイン校
- カリフォルニア州立大学
- チョンナム国立大学
- デューク大学
- 岐阜大学
- ハワイ大学
- インディアナ大学
- 高エネルギー加速器研究機構
- 神戸大学
- 京都大学
- ロスアラモス国立研究所
- ルイジアナ州立大学
- ミネソタ大学
- 宮城教育大学
- 名古屋大学
- ニューヨーク州立大学ストーニーブルック校
- 新潟大学
- 岡山大学
- 大阪大学
- ソウル国立大学
- 静岡大学
- 静岡精華短大
- ソンギョンカン大学
- 東北大学
- 東海大学
- 東京工業大学
- ワルシャワ大学
- ワシントン大学

スーパーカミオカンデ検出器



直径 50 cm 光電子増倍管



Happy Koshiba !

建設中のスーパーカミオカンデ

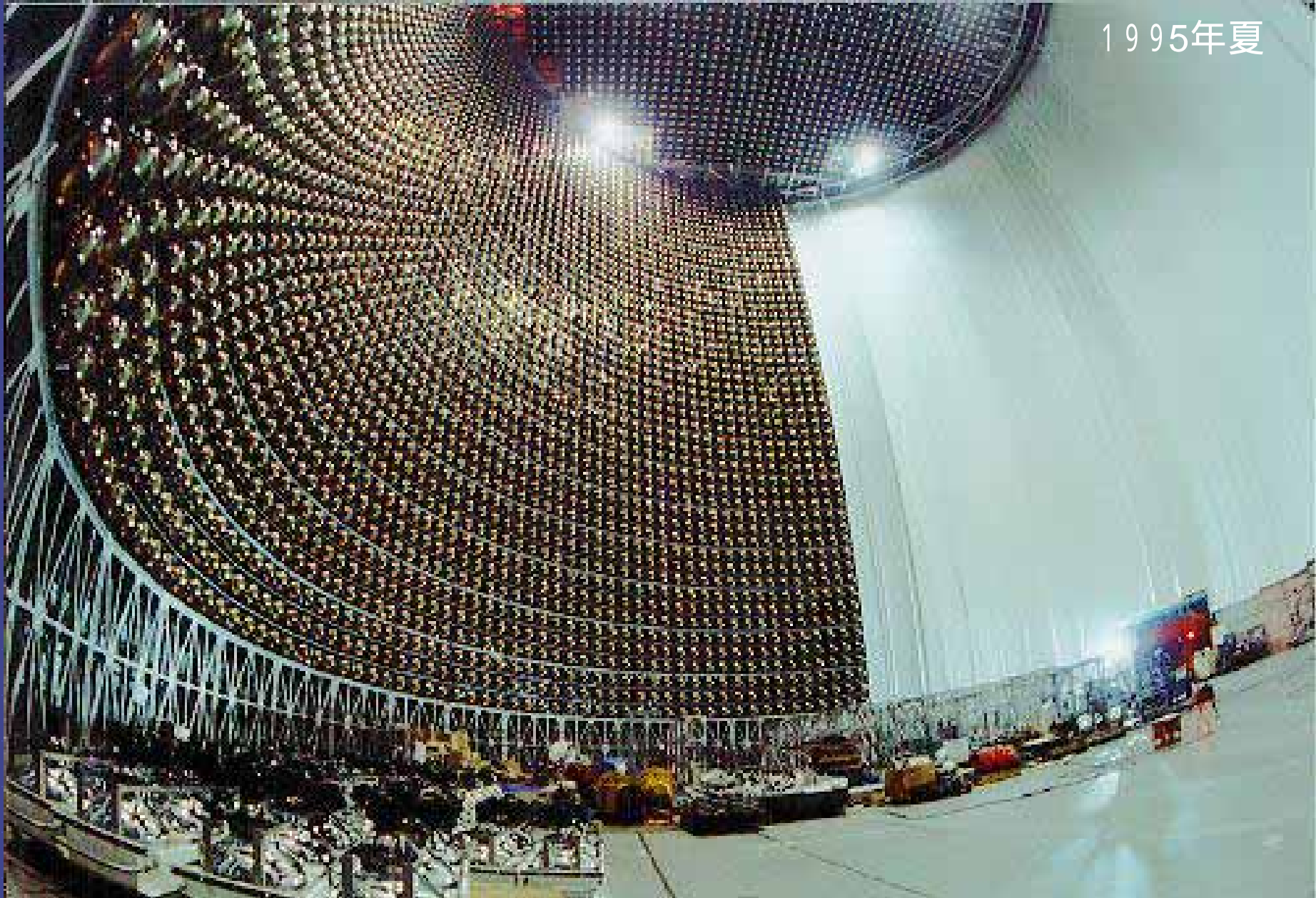
ステンレス水槽の建設

1994年12月

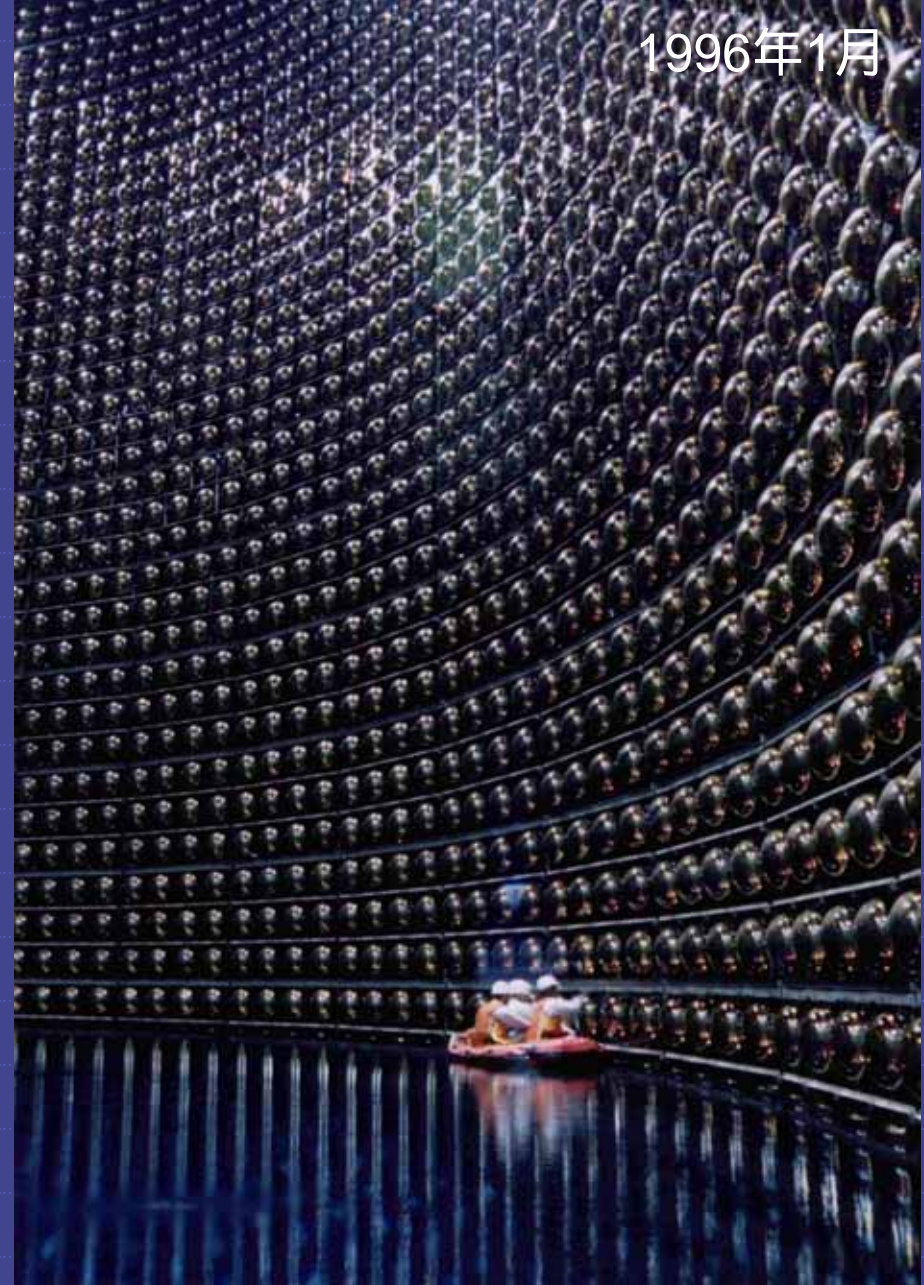
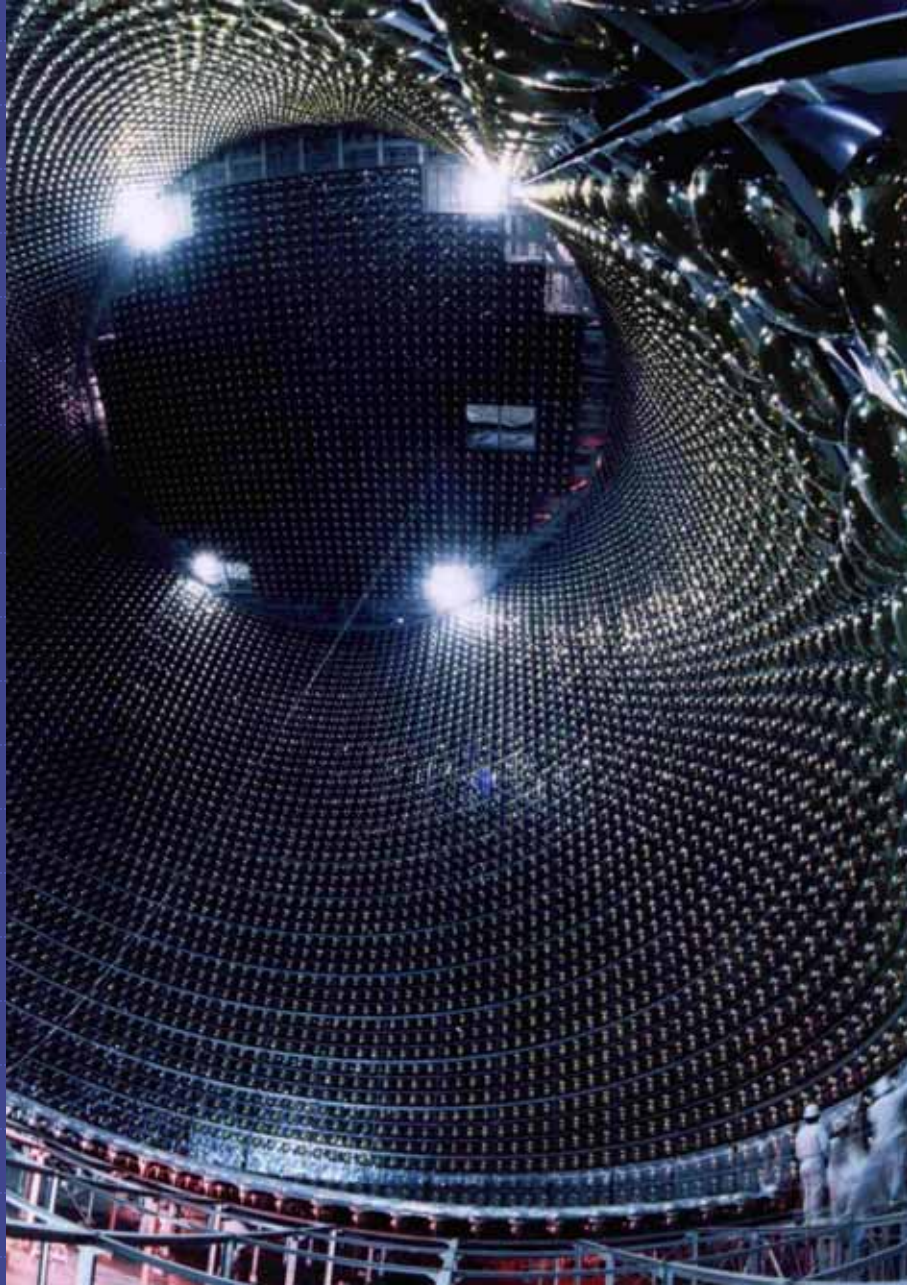


建設中のスーパーカミオカンデ

1995年夏



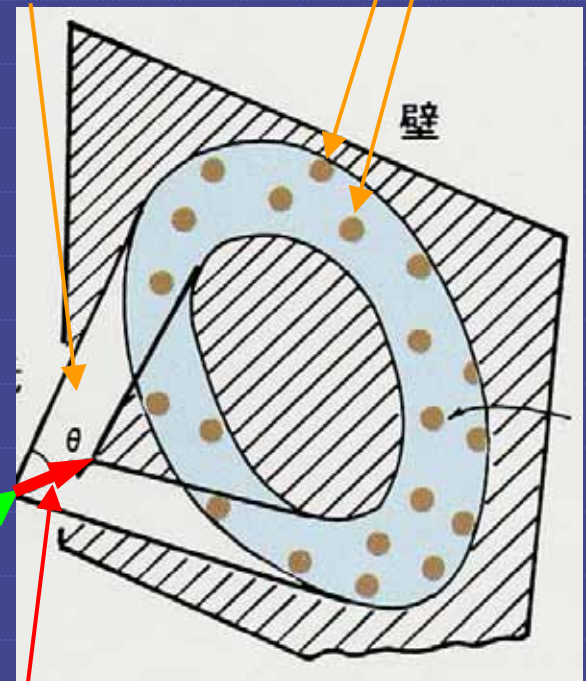
建設中のスーパーカミオカンデ



ニュートリノの検出原理

- ニュートリノと電子または原子核との衝突による荷電粒子の放出
- 水中での光速を超えた荷電粒子によるチェレンコフ光の発生（水中での光速 $=c/1.33$ ）
- 光電子増倍管によるチェレンコフ光のパターン検出
- 粒子の到来方向、エネルギー、種類の決定

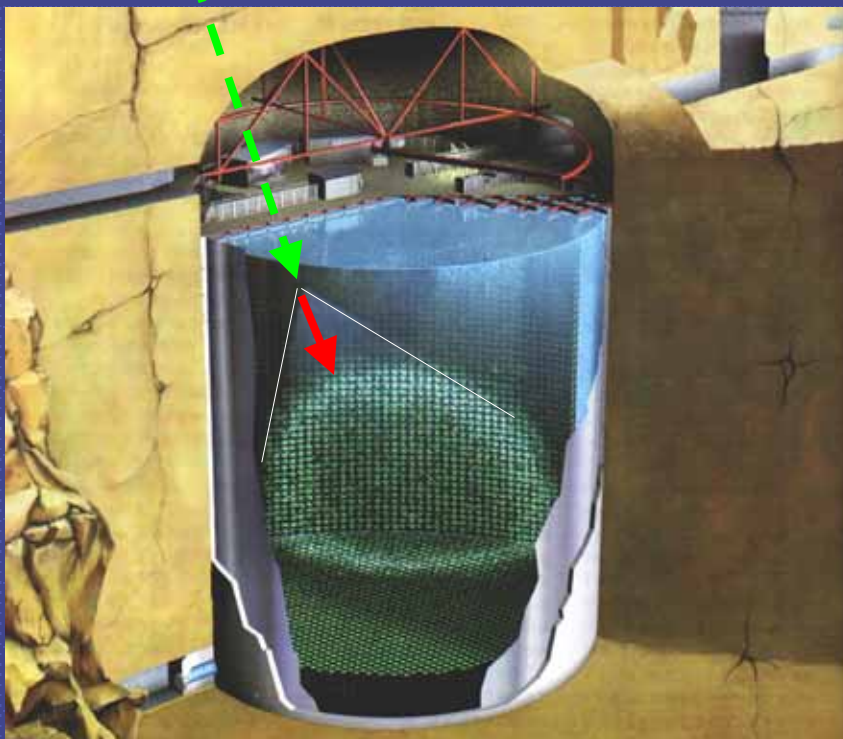
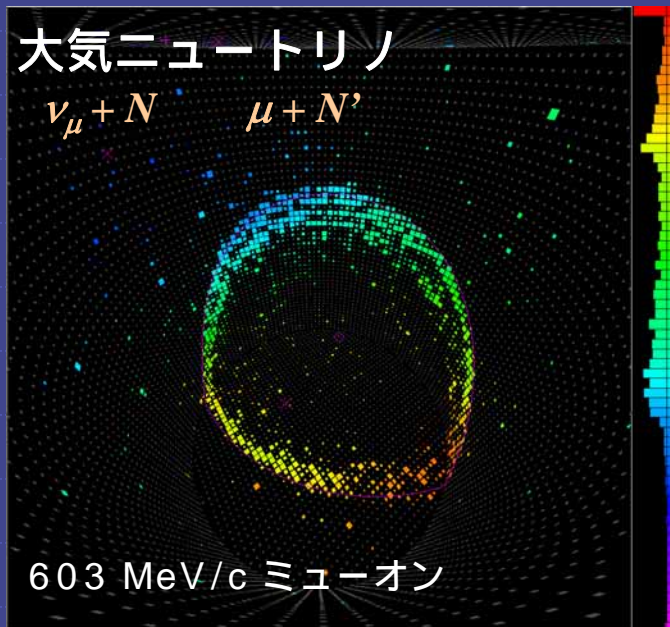
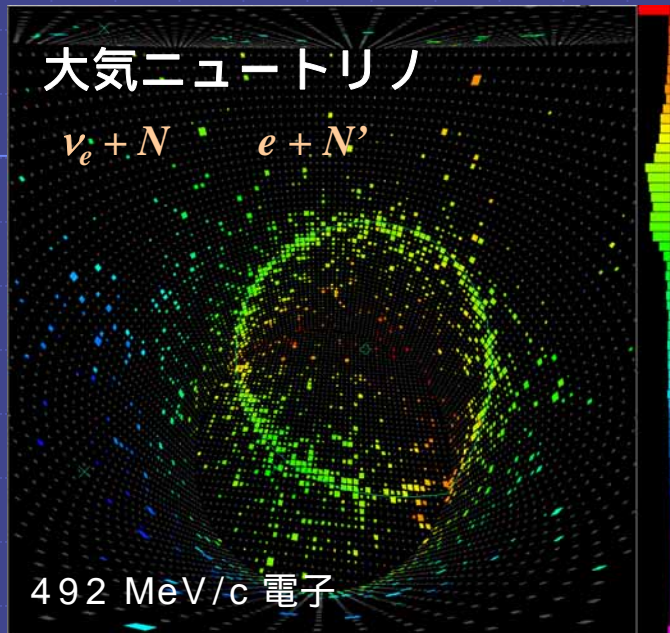
チェレンコフ光 光電子増倍管



ニュートリノ

素粒子（電子やミューオンなど）

事象例



スーパーカミオカンデの研究目的

ニュートリノ物理学

- ニュートリノの質量（太陽ニュートリノ・大気ニュートリノ）
- 大統一理論の検証（陽子崩壊）

ニュートリノ宇宙物理学

- 星のエネルギー源（太陽ニュートリノ）
- 超新星爆発のメカニズム（超新星ニュートリノ）
- 高エネルギー現象（高エネルギー天体ニュートリノ）

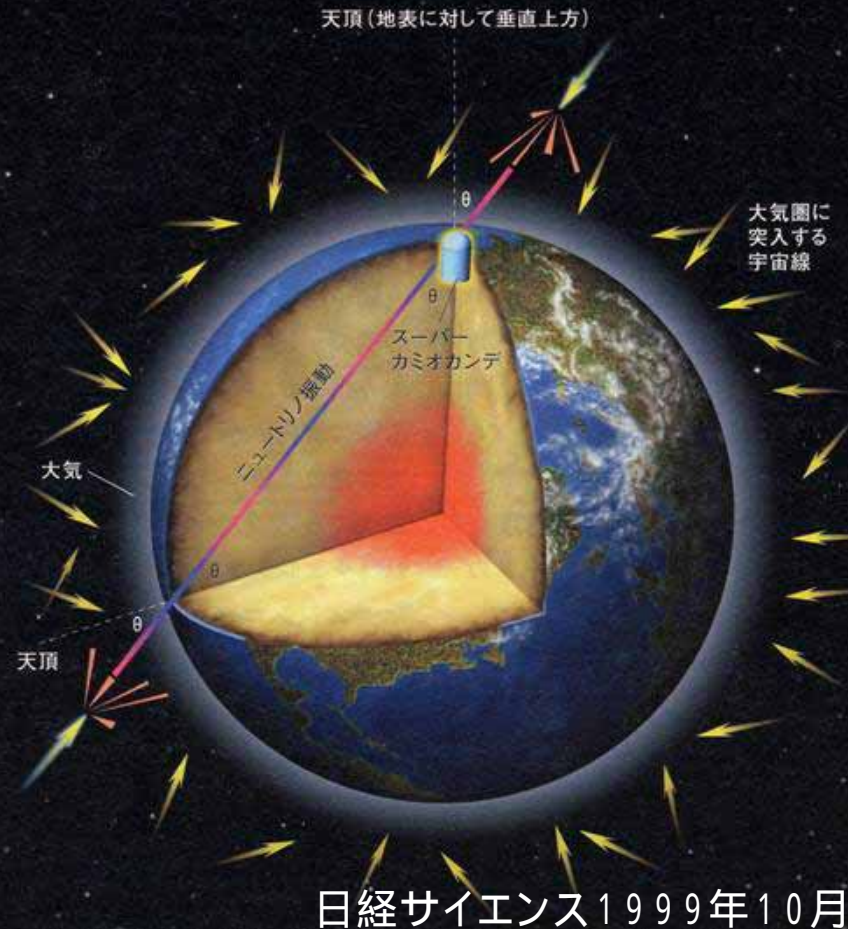
大気ニュートリノ

大気ニュートリノ

宇宙線（陽子やヘリウム）



スーパーカミオカンデ



日経サイエンス1999年10月号

地球の反対側でも同じことがおこっているのので、下からもニュートリノが来る。

カミオカンデが観測した 大気ニュートリノ異常

ミューニュートリノと電子ニュートリノの比が2:1になるはずなのに、ミューニュートリノが予想の60%しかなかった。

(カミオカンデ 1988)

電子ニュートリノの数

計算値：89 事象

観測値：93 (±9.6) 事象

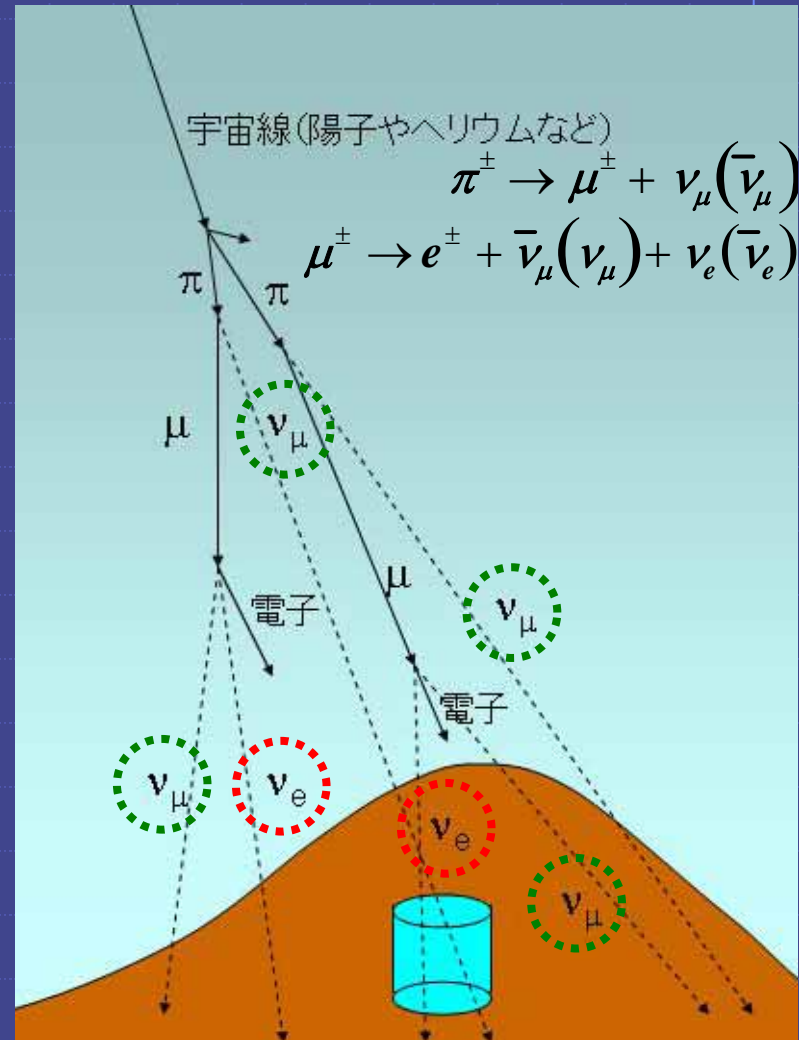
→ OK!

ミューニュートリノの数

計算値：144 事象

観測値：85 (±9.2) 事象

→ 全然たりない!



地球の反対側からも飛来

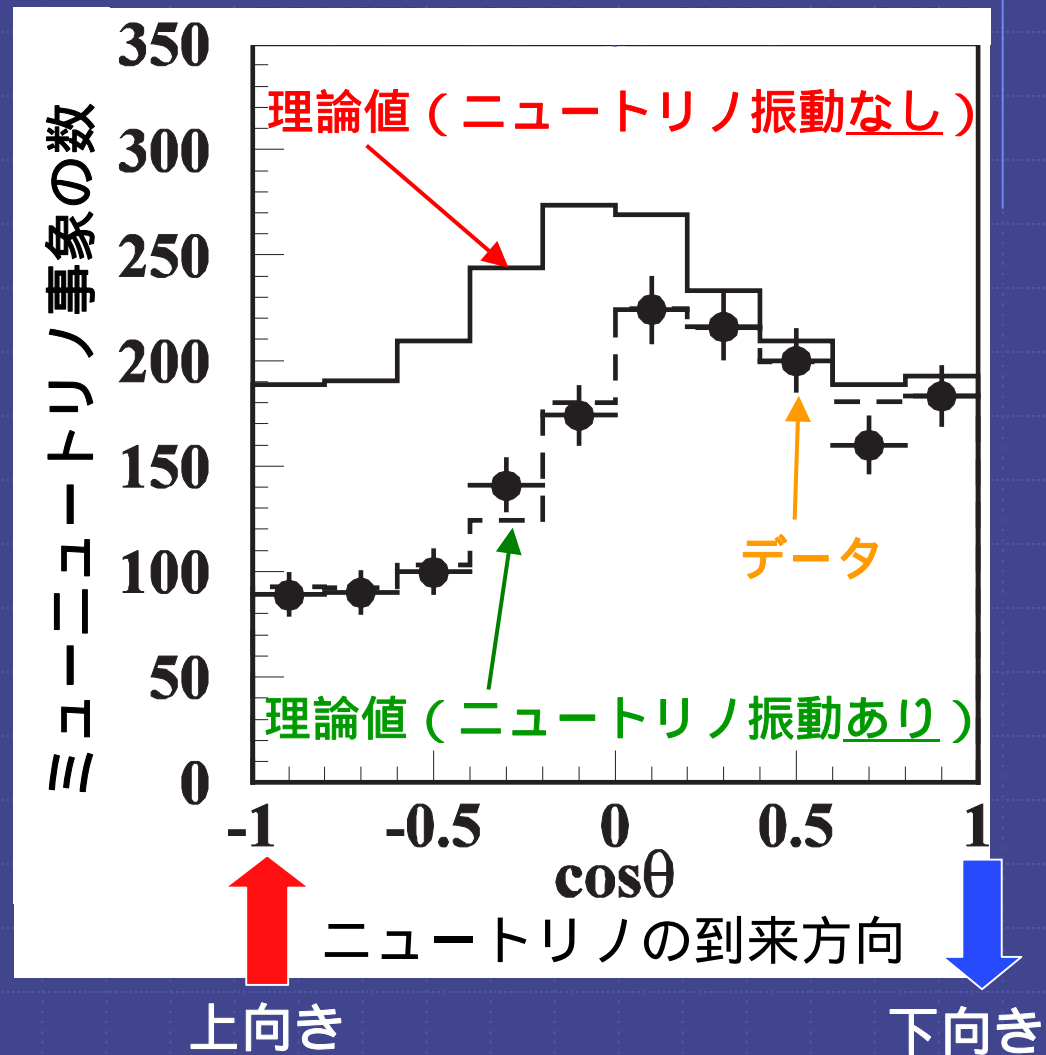
ニュートリノ振動の証拠

スーパーカミオカンデ
(1998)

下から来るミュ
ニュートリノが、上
から来るミュニュ
ートリノより少ないこと
を発見。



$\nu_{\mu} \rightarrow \nu_{\tau}$ 振動の証拠

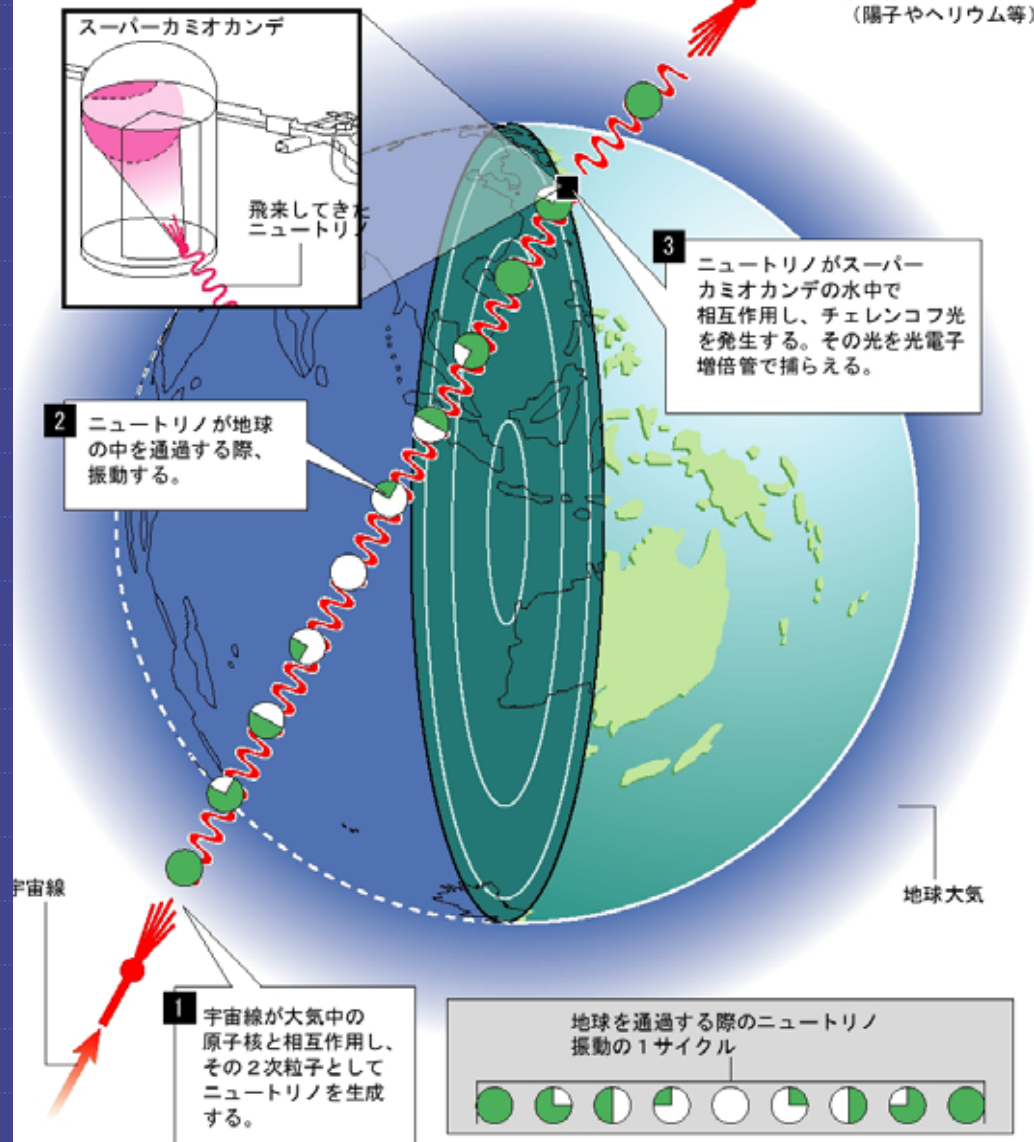


データの解釈

地球の反対側から来るニュートリノは長い距離を飛んでいる間にニュートリノ振動によって半分タウニュートリノになって観測されていない

大気ニュートリノによるニュートリノ質量の発見

スーパーカミオカンデは、上から来る大気ニュートリノと下から来る大気ニュートリノの強さが違うことを観測した。このことは、ニュートリノが質量を持ち、震動していることを示す。



しみじみと 心のかよう 贈り物
 印業小司
(虎) とらや
 東京・赤坂 電話(3408)4121

6月5日 金曜日
 1998年(平成10年)

発行所
読売新聞社
 東京都千代田区大手町1-7-1
 郵便番号 100-8055
 電話(03)3242-1111

読売新聞

THE YOMIURI SHIMBUN
 EVENING EDITION (日刊) 第43865号 ©読売新聞社 1998年

夕刊

がヒット
 ルバム好調
 芸能 12
 会見 15

なぞの素粒子 ニュートリノ 「質量ある」最終結論

理論物理の根幹一新

宇宙空間に充満する基本粒子でありながら、質量(重さ)の有無がわからなかったなぞの素粒子「ニュートリノ」について、東大宇宙線研究所(白塚洋三所長)の自米共同実験グループは、「質量はある」との最終的な結論をまとめ、五日午前、岐阜県富山市で開催中のニュートリノ国際会議で発表した。質量ゼロを前提としていた現在の標準理論の書き換えなど、現代物理学の根幹を揺るがす成果といえるようだ。(解説・面)

実験グループは「昨年四 鉱山の探鉱跡を利用した地 パーカミオカンデ」(貯水ノ観測を続けてきた。月から、岐阜県北部・神岡 下約千枚の巨大水槽「スー 層五万ト」で、ニュートリ



ニュートリノの質量を捕らえた観測装置「スーパーカミオカンデ」(東大宇宙線研究所提供)

地球に降り注ぐ高エネルギーニュートリノを観測を続けてきた。注目したのは、宇宙から

スーパーカミオカンデ 岐阜県・神岡鉱山の地下約千枚に、高さ四十一・四尺、直径三十九・三寸の円筒をくり抜き、中に汚染物質の極めて少ない五万トの純粋な水を満たした。東大宇宙線研究所のニュートリノ観測装置。水中に飛び込んできたニュートリノが原因となったニュートリノが原因となつて発生する特殊な光を、壁面を埋め尽くした約一万一千本の光センサー「光電子増倍管」でキャッチする。建設費約百四億円。

「粒子が大気中を高速で生ずる大気ニュートリノ」中の「ミュー型」上にある種類。発表した梶田隆彦(東大宇宙線研究所助教授)によると、四月まで約一年間の結果、上空から飛来するニュートリノは「ミュー型」に対して、地上から約一万二千ト

日本版ビッグバンのための金融システムと、土地なきままに販売できず、資産流動化法をめぐり、五日の参院本会議、民主、公明、

金

June 5, 1998

**REMARKS BY THE PRESIDENT AT MASSACHUSETTS INSTITUTE OF
TECHNOLOGY 1998 COMMENCEMENT**

アメリカ・クリントン大統領（当時）

THE WHITE HOUSE

Office of the Press Secretary
(Lincoln, Massachusetts)

For Immediate Release
1998

June 5,

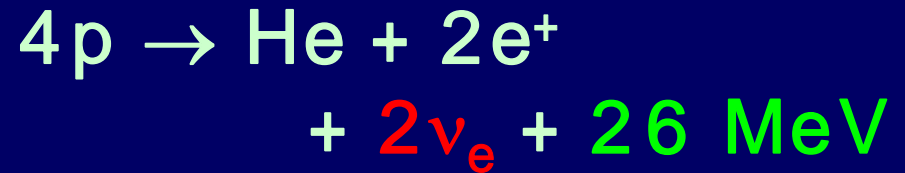
.....

First, we must help you to ensure that America continues to lead the revolution in science and technology. Growth is a prerequisite for opportunity, and scientific research is a basic prerequisite for growth. Just yesterday in Japan, physicists announced a discovery that tiny neutrinos have mass. Now, that may not mean much to most Americans, but it may change our most fundamental theories -- from the nature of the smallest subatomic particles to how the universe itself works, and indeed how it expands.

This discovery was made, in Japan, yes, but it had the support of the investment of the U.S. Department of Energy. This discovery calls into question the decision made in

太陽ニュートリノ

太陽中心部での熱核融合反応



太陽ニュートリノの数

太陽定数/13

$\sim 6.6 \times 10^{10} \nu / \text{cm}^2 \text{sec}$

→人を貫くニュートリノの数

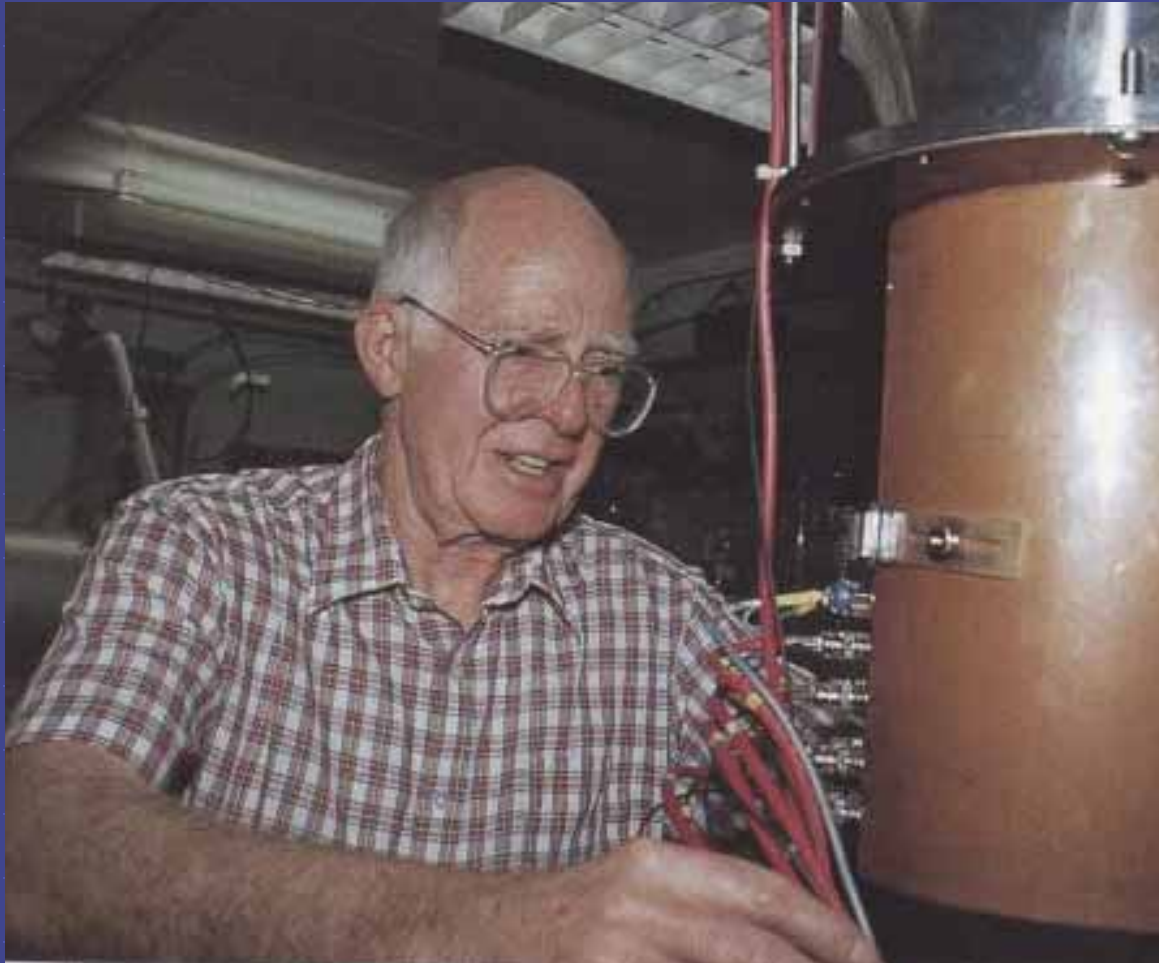
1秒あたり約100兆個

ニュートリノで見る太陽：

太陽中心がほぼリアルタイムで見える

太陽ニュートリノ実験のパイオニア

- Homestake実験(U.S.A.) since 1968



R. Davis Jr.(2002年ノーベル賞受賞)

太陽ニュートリノ問題

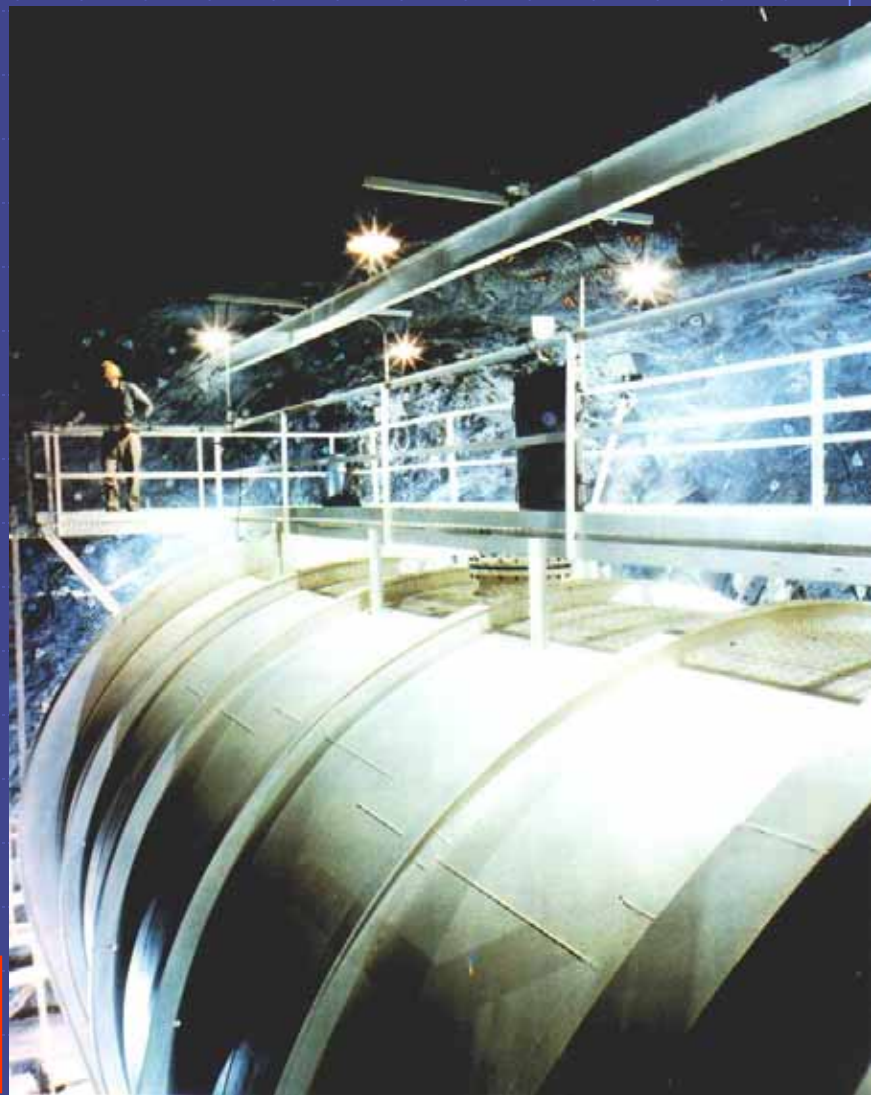
- 四塩化炭素 C_2Cl_4 615 トンからなる検出器を地下1500mに設置



- **結果**：生まれたアルゴン原子の数は、2日に1個 \Rightarrow 予想値の1/3以下

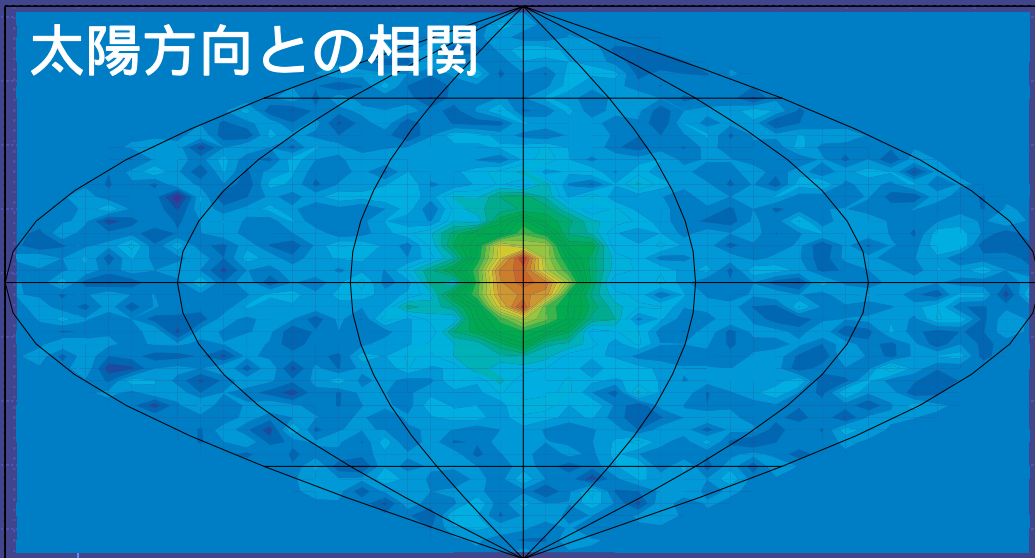


太陽ニュートリノ問題

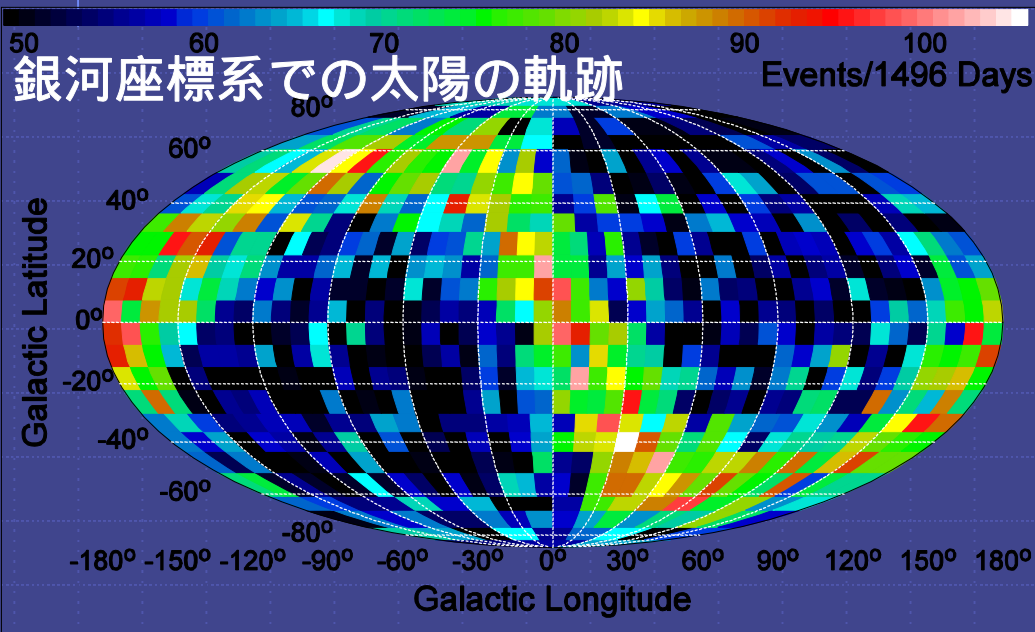


スーパーカミオカンデが見た太陽

太陽方向との相関

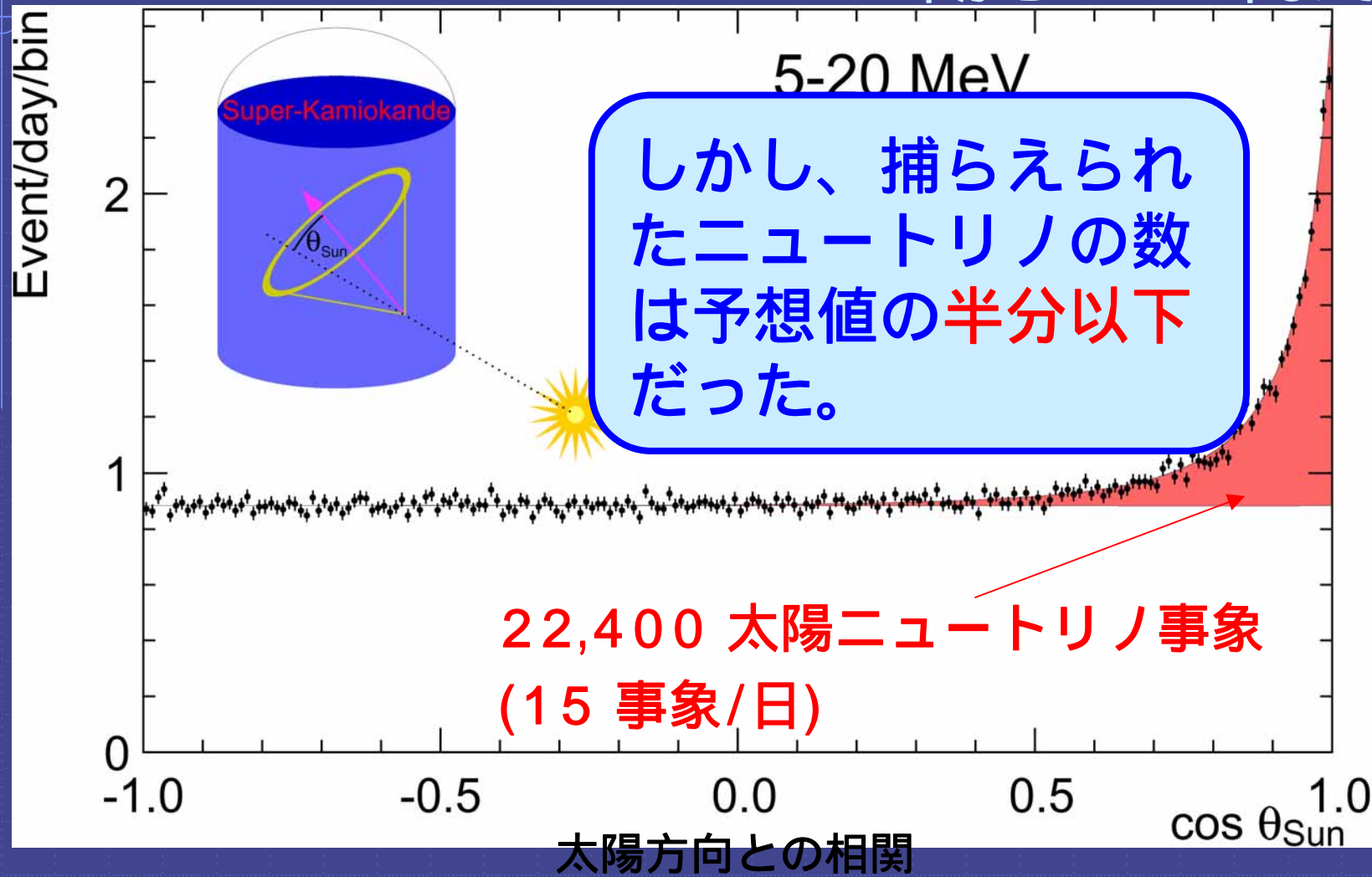


ニュートリノは
太陽から飛来し
ている。



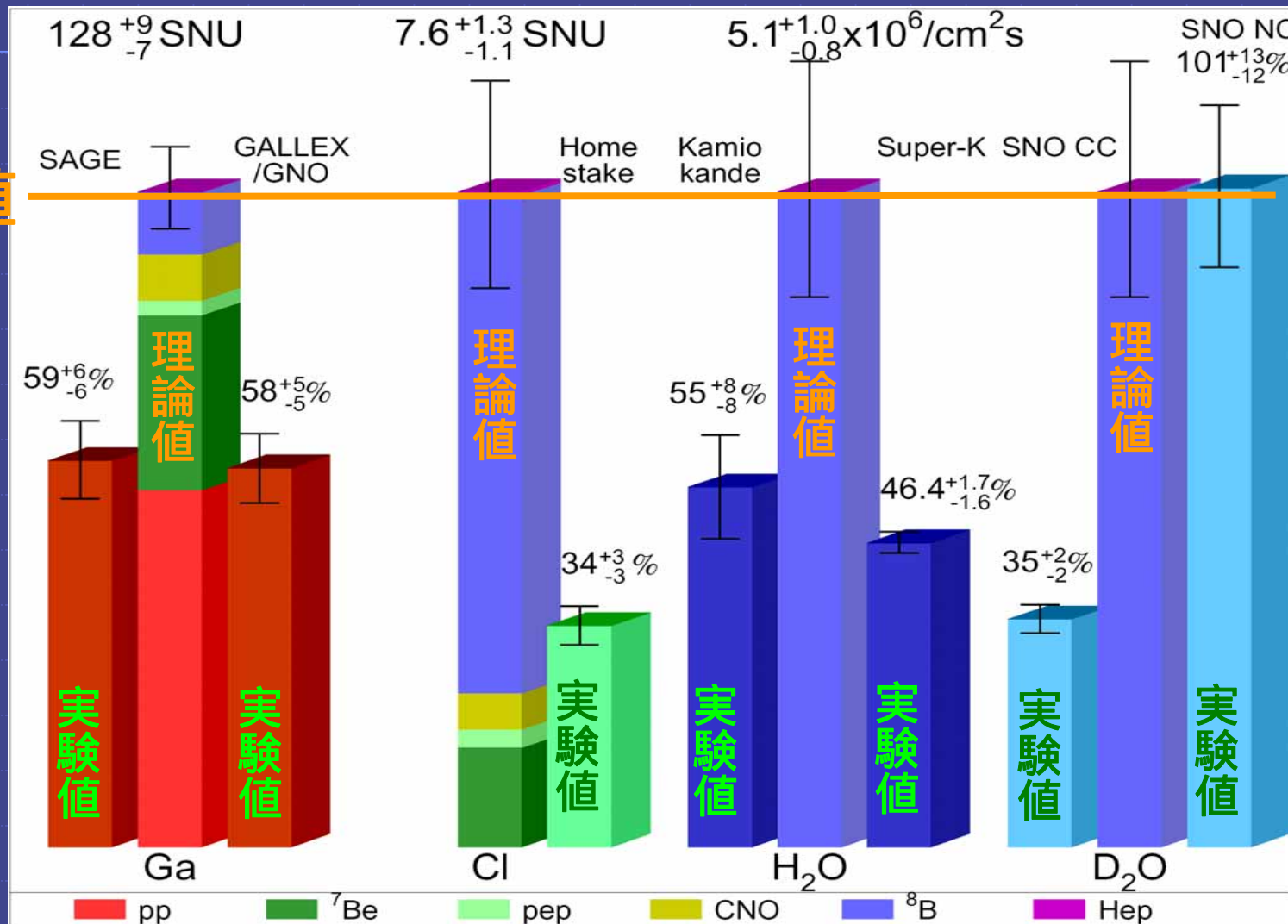
太陽ニュートリノの観測結果

1996年から2001年まで

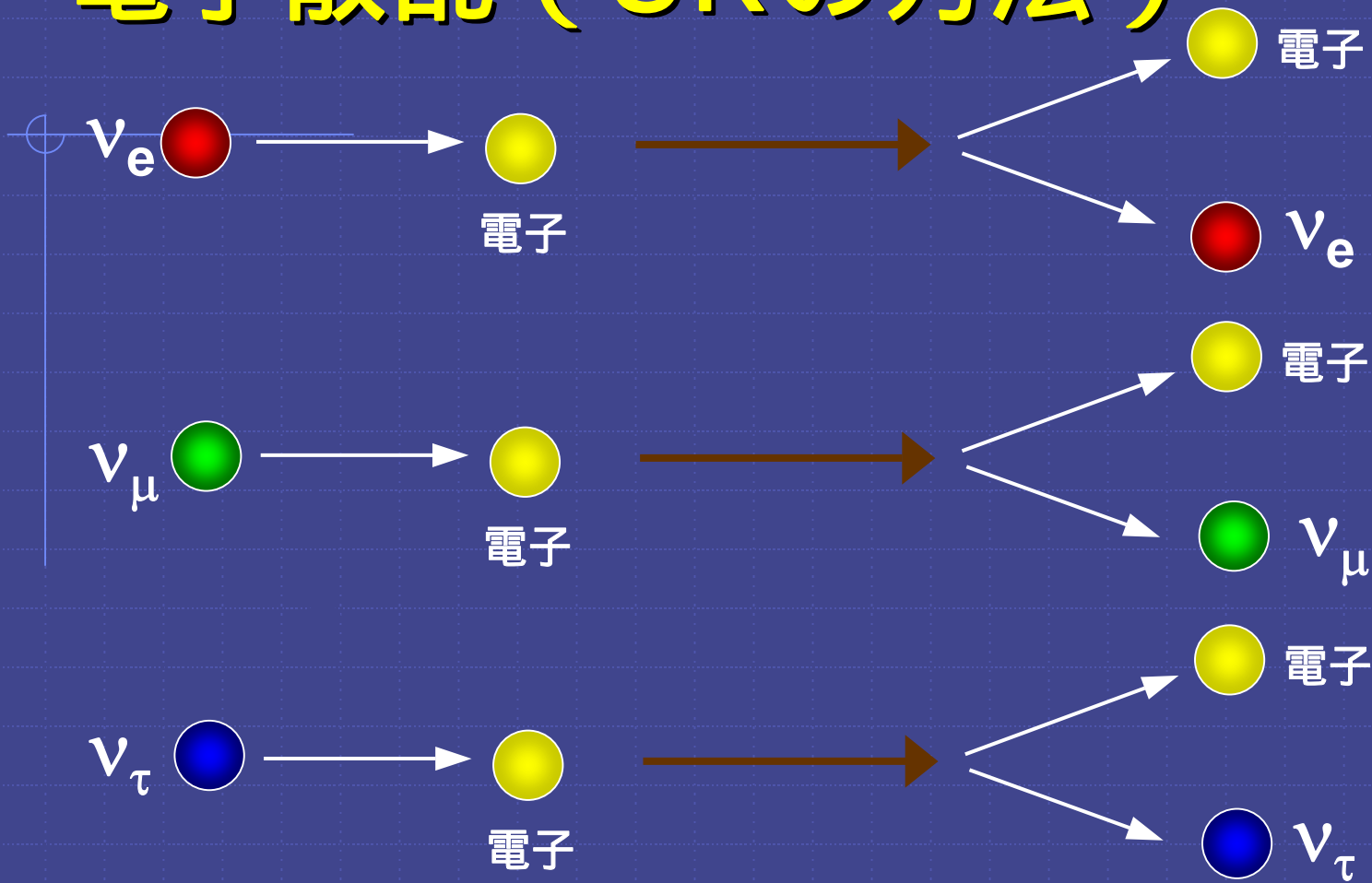


太陽ニュートリノフラックス

理論値



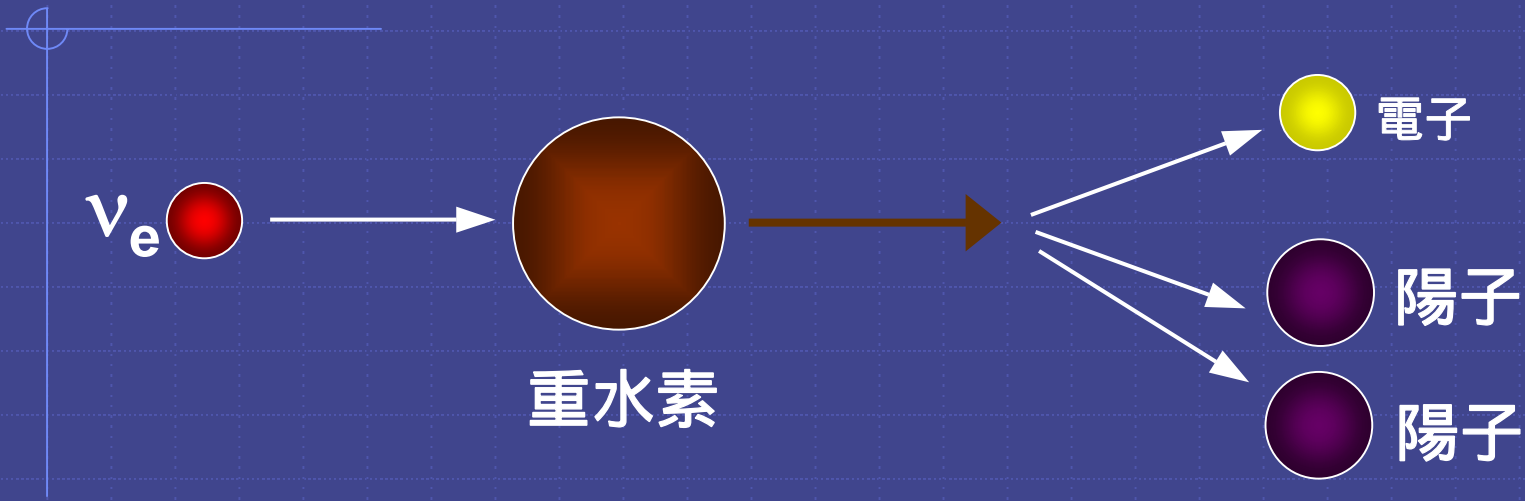
電子散乱 (SKの方法)



ν_e , ν_μ , ν_τ に感度あり。

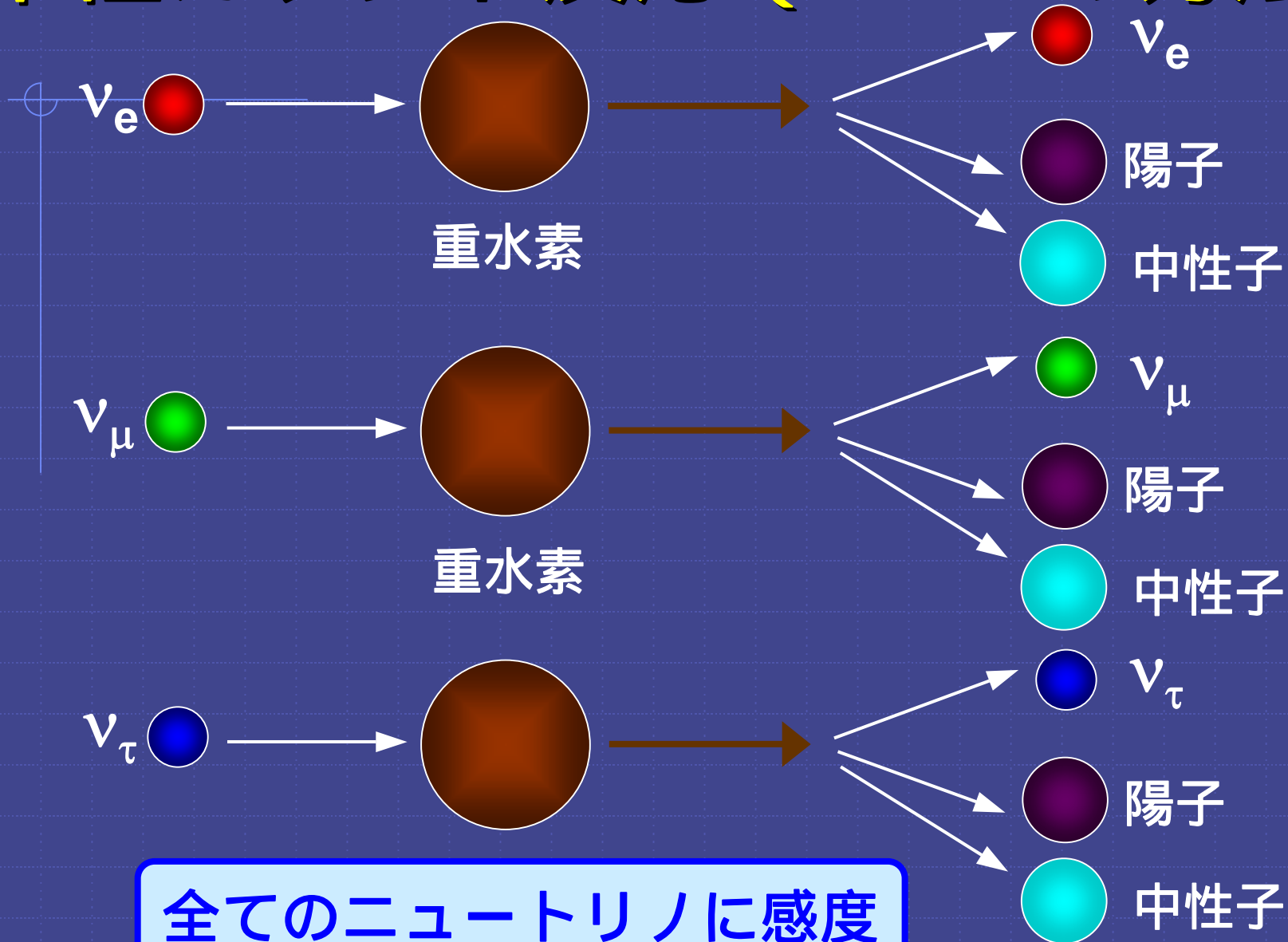
ただし、 $\sigma(\nu_{\mu(\tau)}e^-)$ は $\sigma(\nu_e e^-)$ の約0.15倍

荷電カレント反応 (SNOの方法)



電子ニュートリノ ν_e のみに反応

中性カレント反応 (SNOの方法)



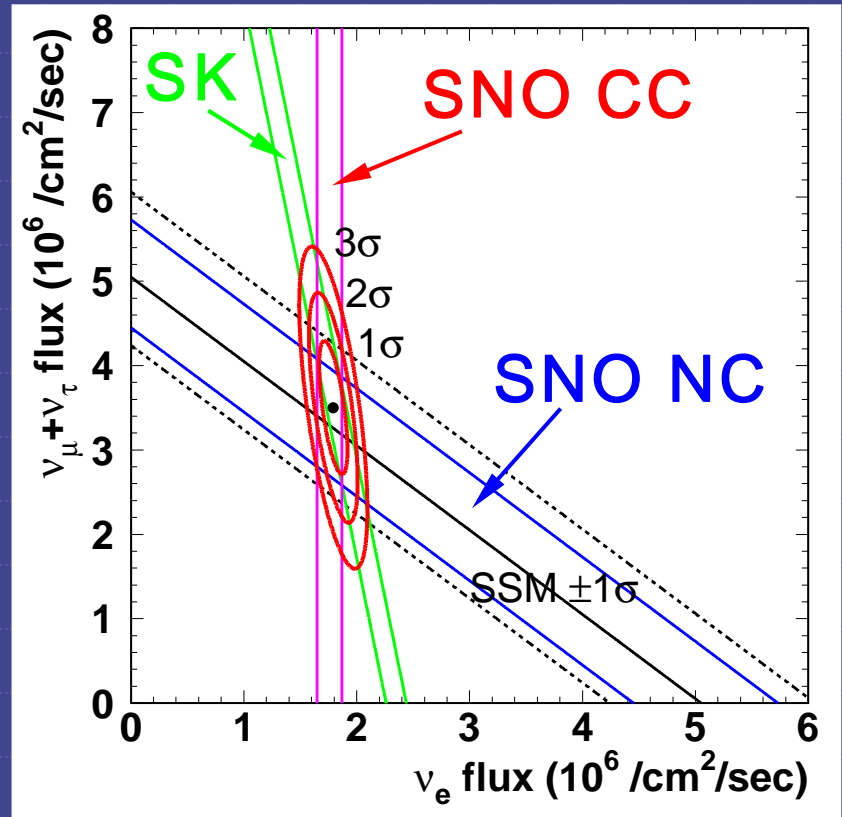
ニュートリノ振動の証拠 (SNO & SK)

SK $\phi_{ES} = 2.35 \pm 0.09$
SNO $\phi_{CC} = 1.76 \pm 0.11$
SNO $\phi_{NC} = 5.09 \pm 0.64$
 [x10⁶/cm²/s]

$$\phi_{ES} = \phi_e + 0.15 \phi_{\mu,\tau}$$

$$\phi_{CC} = \phi_e$$

$$\phi_{NC} = \phi_e + \phi_{\mu} + \phi_{\tau}$$



$$\phi_{\text{exp}} = 5.3 \pm 0.7 \quad \Leftrightarrow \quad \phi_{\text{SSM}} = 5.05 + 1.01 / -0.81$$

ニュートリノ研究の歴史

- 1930 : W.パウリ ニュートリノの存在を予言。
- 1956 : F.ライネスとC.コーワンが反電子ニュートリノを発見。
- 1962 : L.レーダマンら人工ニュートリノビームによりミューニュートリノを発見。
- 1962 : 牧二郎・中川昌美・坂田昌一がニュートリノ振動の理論を提唱。
- 1987 : 小柴昌俊らカミオカンデ研究グループが超新星爆発により発生したニュートリノを世界で初めて観測。
- 1991 : CERNのLEP実験で軽いニュートリノが3世代しか存在しないことを証明。
- 1998 : スーパーカミオカンデ研究グループが大気ニュートリノの観測からニュートリノ振動を発見。
- 2000 : 米国フェルミ研究所の実験でタウニュートリノの存在を確認。
- 2001 : カナダのSNO研究グループと日本のスーパーカミオカンデ研究グループが太陽ニュートリノ観測でもニュートリノ振動の存在を証明。
- 2002 : カナダのSNO研究グループが中性カレント反応の観測により太陽ニュートリノ振動の存在を独立に証明。
- 2002 : K2K研究グループが人工的に作ったニュートリノをスーパーカミオカンデ検出器に入射し、独立にニュートリノ振動の存在を証明。
- 2002 : KamLAND研究グループが原子炉ニュートリノを用いて、ニュートリノ振動の存在を独立に証明。

まとめ

- 超新星爆発にともなうニュートリノをカミオカデは捕らえた。
- ニュートリノに質量があることを発見した
 - 大気ニュートリノによってミューニュートリノの振動が明らかになった。
 - 太陽ニュートリノによって、電子ニュートリノの振動が明らかになった。
 - ニュートリノの質量は、自然法則をより深く理解し、ビッグバン直後の宇宙を理解する鍵を握っている。
- ニュートリノ研究には、日本の貢献が非常に大きい。
- ニュートリノの実験的研究は第2ステージへ。