

# ニュートリノで探る宇宙

東京大学  
宇宙線研究所  
神岡宇宙素粒子研究施設  
鈴木洋一郎

- ニュートリノって何？
- 我々はニュートリノの雨の中に住んでいる
- ニュートリノで何が見える
- ニュートリノ望遠鏡と宇宙ニュートリノ観測

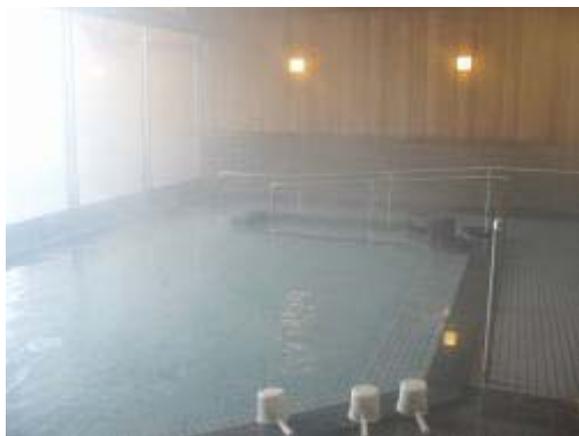
# ニュートリノって何？

小柴先生のノーベル賞受賞で一躍有名に

神岡では、ずっと有名だった

神岡には、コンビニ・ニュートリノがあった





## ニュートリノ温泉 もある

流葉温泉

ニュートリノ

(ながれはおんせん ニュートリノ)



ニュー・トリノ か ニュート・リノ か  
あるいは？

Neutrino

中性微子といわれていたこともある。

ニュートリノは素粒子だ

# 物質は何からできている？



タレス  
(BC 6世紀頃)

万物の元は水である。

エンペドクレス  
(BC 5世紀頃)  
「火水土風」

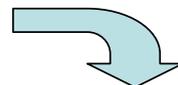


デモクリトス(BC 4世紀頃)

「物質はアトモン(アトム)からできている」

ア  
トモン

否定・打消し  
分割できる



1803年 ドルトンの原子説

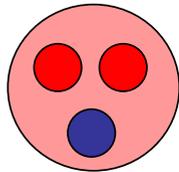
物質の最小単位 = 素粒子

# 現代の素粒子

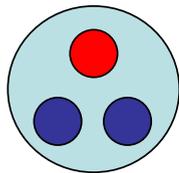
原子 → 原子核と電子

原子核 → 陽子と中性子

陽子



中性子

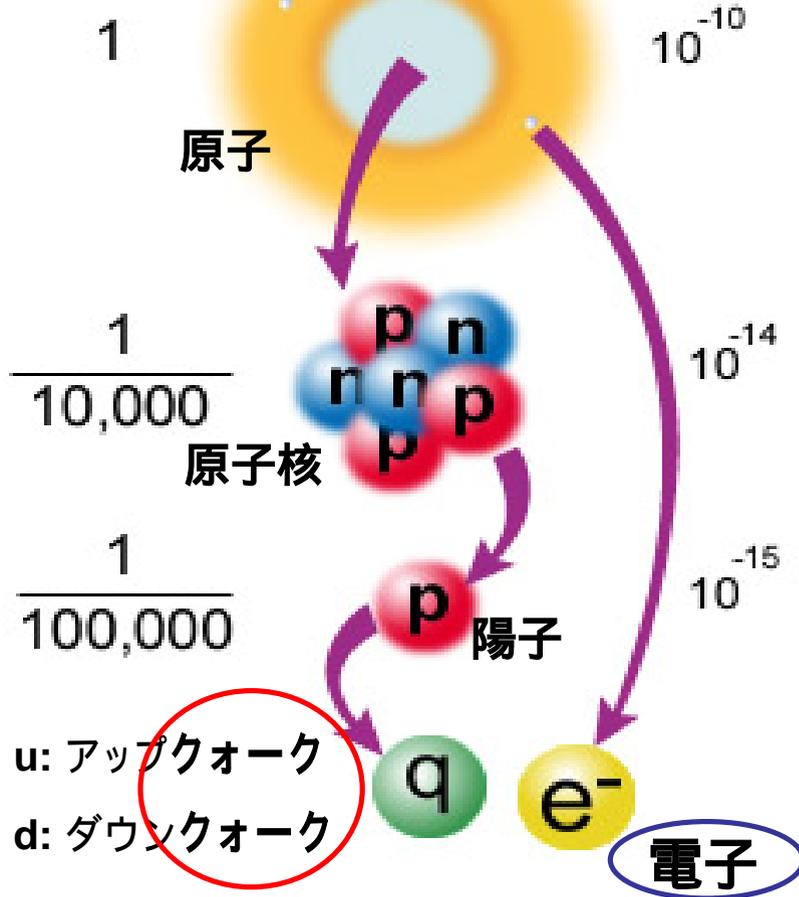


u: アップクォーク

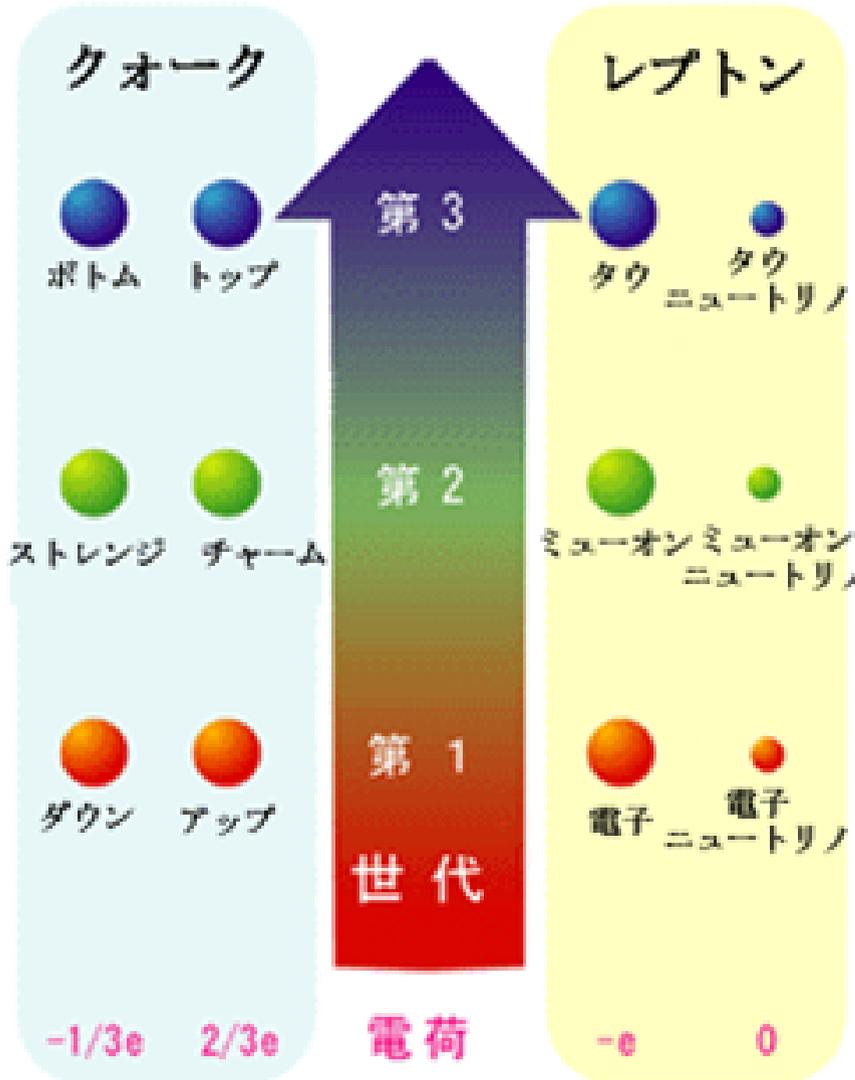


d: ダウンクォーク

size in atoms and in meters



# クォークとレプトン



●物質はクォークとレプトンから出来ている。

●レプトンは、電荷を持った「電子」と、電荷を持たない「ニュートリノ」からなる。

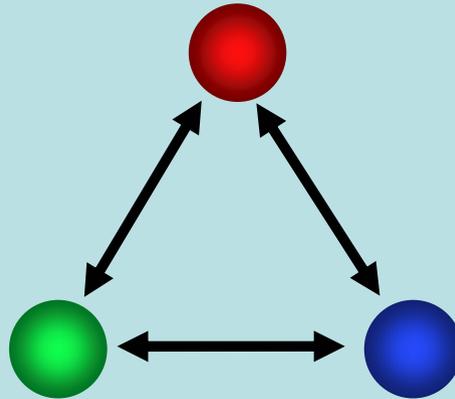
●クォークとレプトンは、性質が同じで重さが違うものが3世代ある。

●第2世代の重い電子をミュー、第3世代の重い電子をタウという。

ニュートリノは電子から電気を剥ぎ取ったもの、  
中性の電子で、  
3種類ある。

電子ニュートリノ

$\nu_e$



ミューニュートリノ  $\nu_\mu$

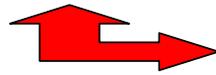
$\nu_\tau$

タウニュートリノ

# ニュートリノはどのように作られる？

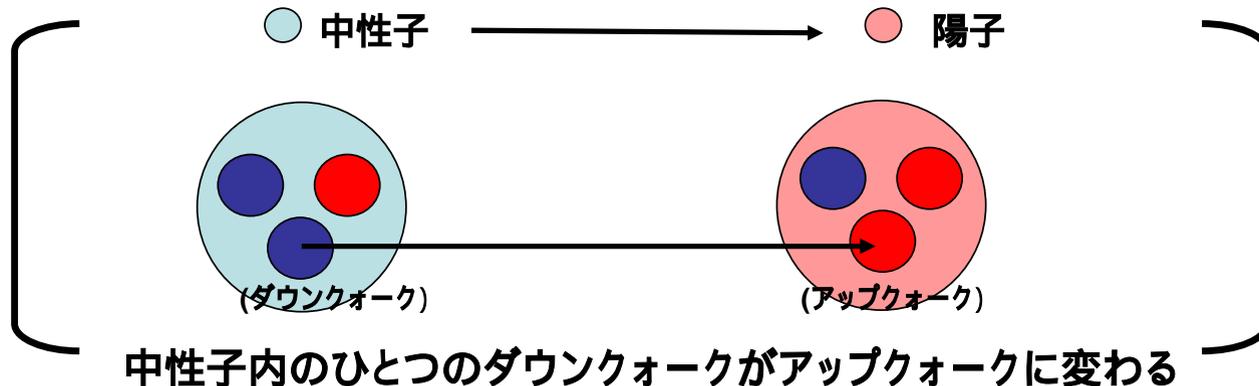
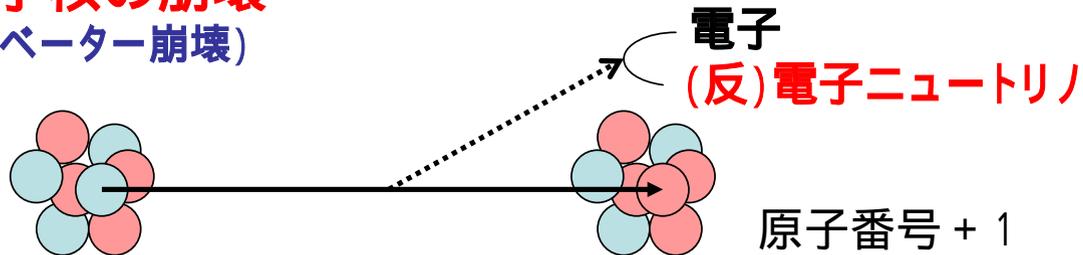
現代の

錬金術からニュートリノが飛び出る



元素の転換 (種類が変わる)

たとえば、原子核の崩壊  
(ベータ崩壊)

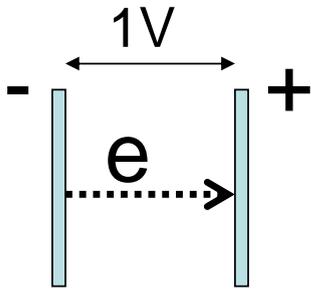


# 弱い力



(注意) 「電気的な力」、「重力」、  
原子核を結び付けている「強い力」は  
クォークの種類は変えない。

# エネルギーの単位



電子ボルト: eV

$$1 \text{ eV} = 1.6 \times 10^{-19} \text{ J [ジュール]}$$

化学反応のエネルギー

$$1 \text{ MeV} = 10^6 \text{ eV}$$

(メガ)

原子核反応のエネルギー

太陽ニュートリノ  $\sim 1 \sim 10 \text{ MeV}$

$$1 \text{ GeV} = 10^9 \text{ eV}$$

(ギガ)

素粒子反応のエネルギー

大気ニュートリノ  $\sim 1 \sim 100 \text{ GeV}$

質量もエネルギーの単位ではかる ( $E = mc^2$ )

陽子/中性子の質量  $\sim 0.9 \text{ GeV}/c^2$

電子の質量  $\sim 0.5 \text{ MeV}/c^2$

ニュートリノの質量  $? \sim 0.05 \sim 1 \text{ eV}/c^2$



我々は、  
ニュートリノの雨  
の中に  
住んでいる。

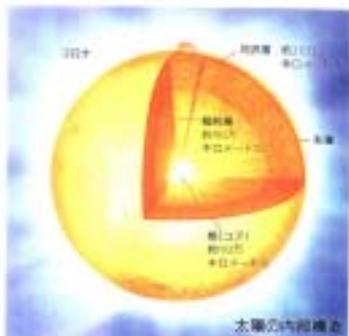
天からと地から



地

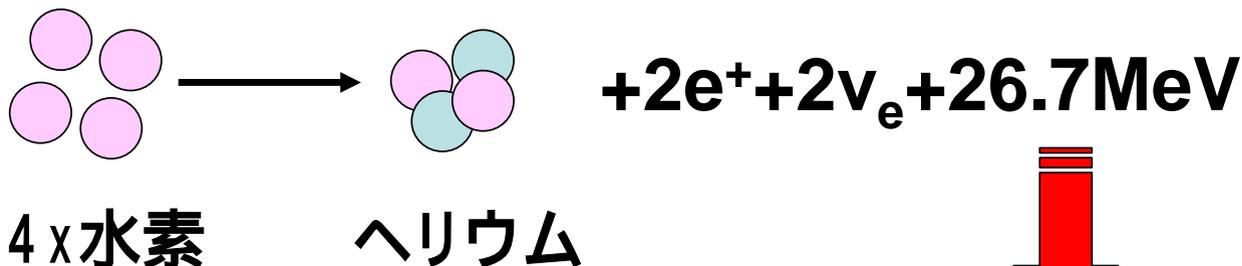


天



# 太陽ニュートリノ

太陽は天然の核融合炉であり、その中心核で大量のニュートリノが発生する

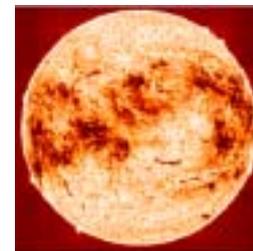


ほとんどが、光・熱エネルギー  
10～100万年して太陽表面  
から放出

地上での太陽エネルギー  
(毎秒 $0.14\text{J}/\text{cm}^2$  ( $1.4\text{kW}/\text{m}^2$ ))

**$\sim 660$ 億  $\nu_e$ /秒/ $\text{cm}^2$**

$2\nu_e \leftrightarrow \sim 25\text{MeV}$

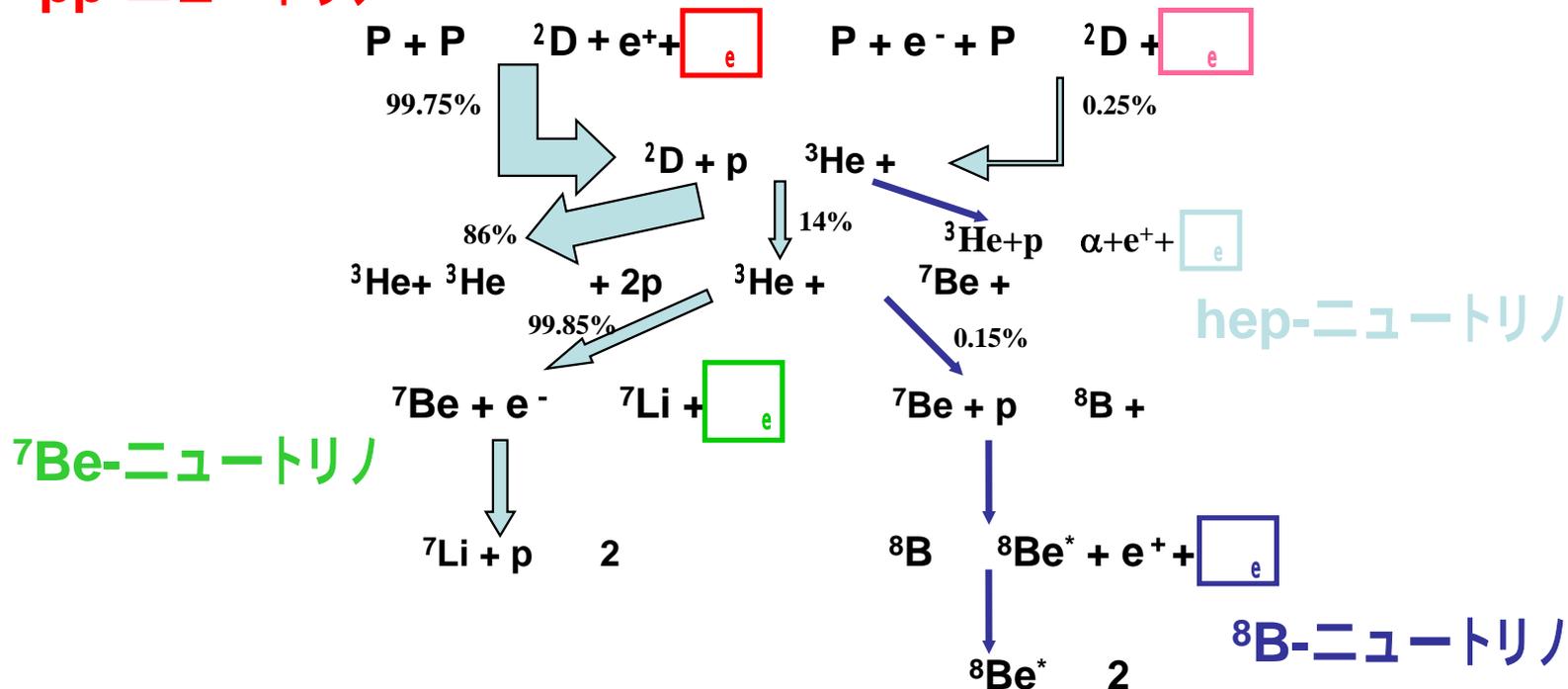


# 太陽ニュートリノスペクトル

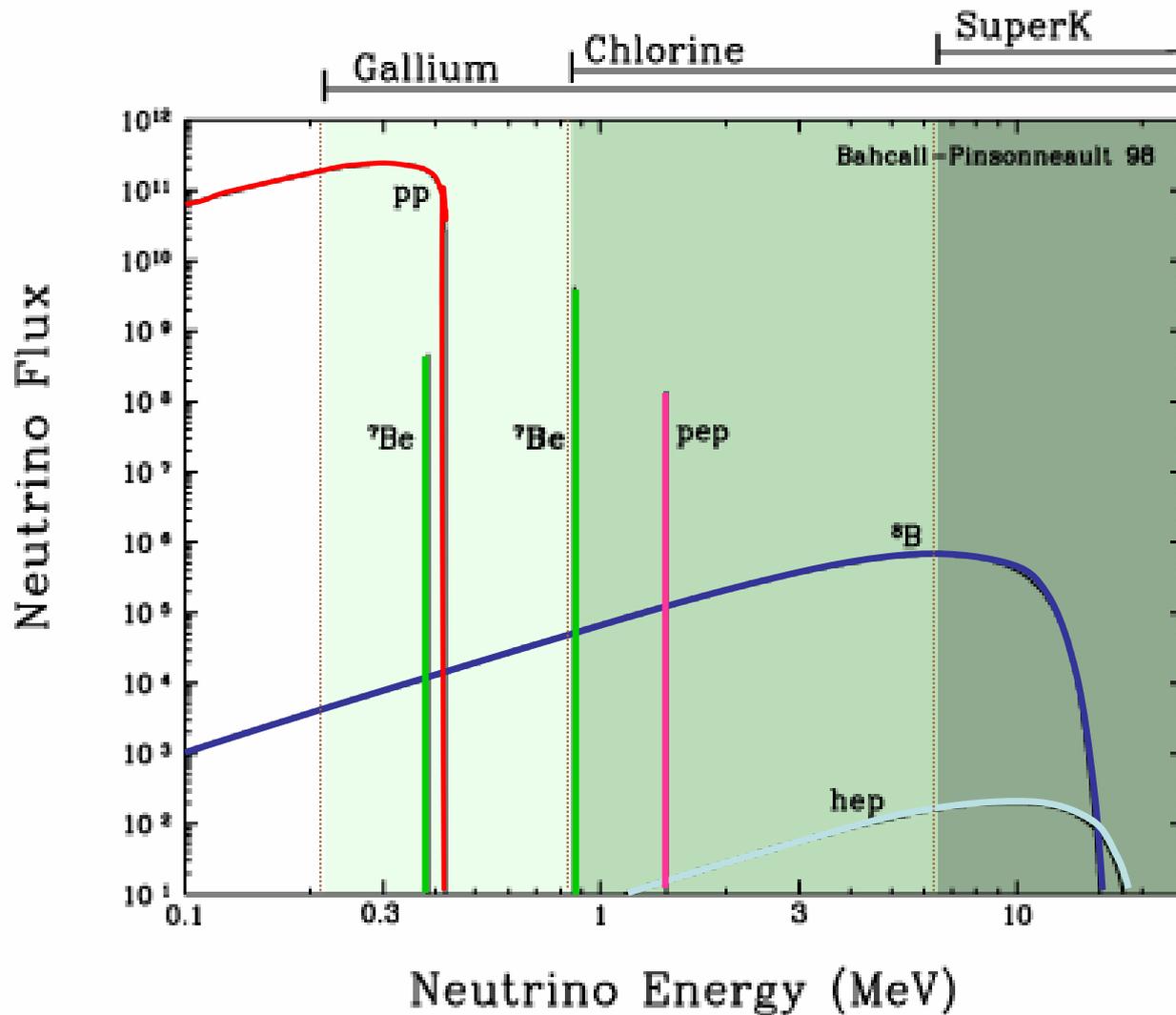
## pp-連鎖反応

pp-ニュートリノ

pep-ニュートリノ



# 太陽ニュートリノエネルギースペクトル



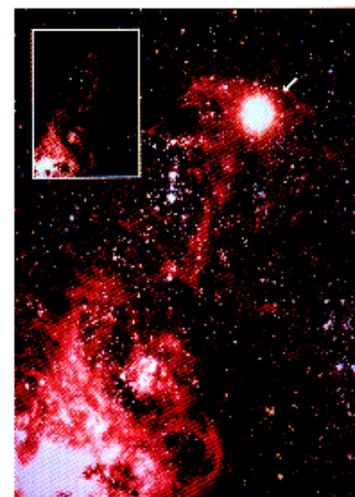
# 超新星からのニュートリノ

- 超新星爆発で発生するエネルギー:
  - (出来た中性子星の持つ重力エネルギー)

$$\begin{aligned}\Delta E &= [-GM^2/R]_{\text{巨星}} - [-GM^2/R]_{\text{中性子星}} \\ M &= 3.0 \times 10^{33} \text{ g} \\ R &= 15 \text{ km} \\ &= 2.7 \times 10^{46} \text{ J}\end{aligned}$$

**太陽の一生に出すエネルギーの1000倍**  
(太陽エネルギー:  $3 \times 10^{26} \text{ J/sec}$ )

99%以上がニュートリノによって運び出される



# 発生するニュートリノの数

- ニュートリノの平均エネルギー: 10 MeV

$$\Phi_{\nu} = \Delta E / \langle E_{\nu} \rangle$$

$$\Delta E = 3 \times 10^{46} \text{ J}$$

$$\langle E_{\nu} \rangle = 10 \text{ MeV} \quad (\text{平均のエネルギー})$$

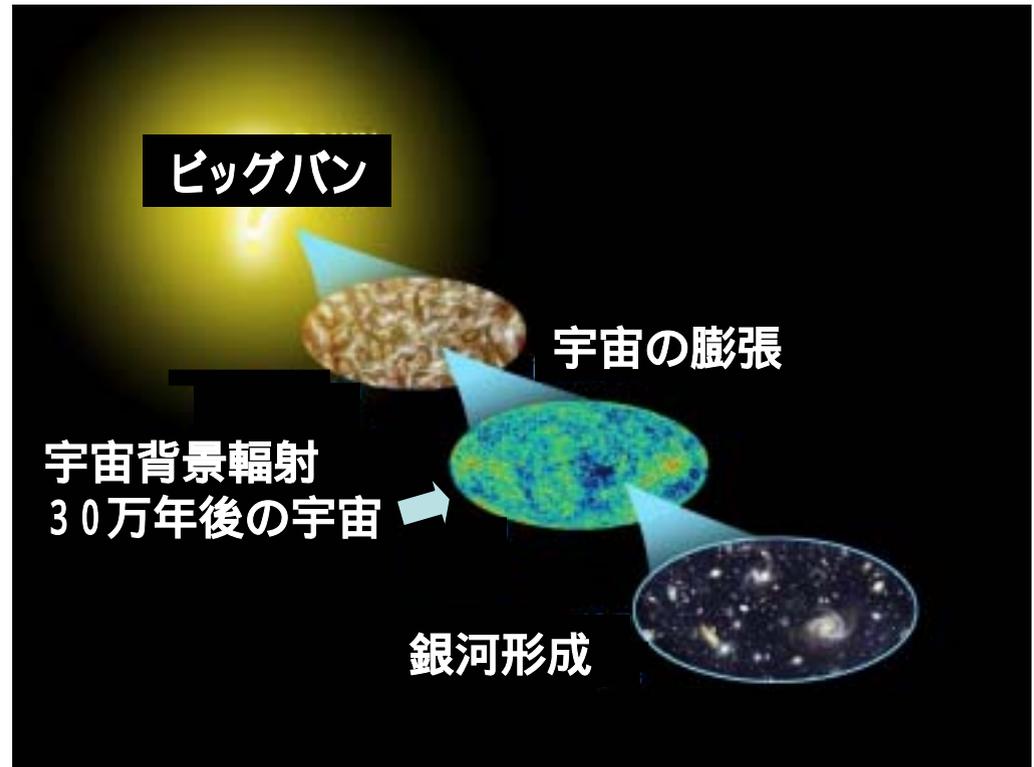
$$= 2 \times 10^{58} \nu \quad (\text{発生するニュートリノの数})$$

**超新星SN1987A (LMC: 17万光年): 距離 =  $1.6 \times 10^{23}$  cm**

**地球でのニュートリノフラックス  $\Phi_{\nu}(\text{earth}) = 6 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2}$   
(600億)**

# ビッグバンの直後に作られたニュートリノ

様々な粒子の生成  
クォーク / 反クォーク  
ニュートリノ / 反ニュートリノ



温度が3億度以上

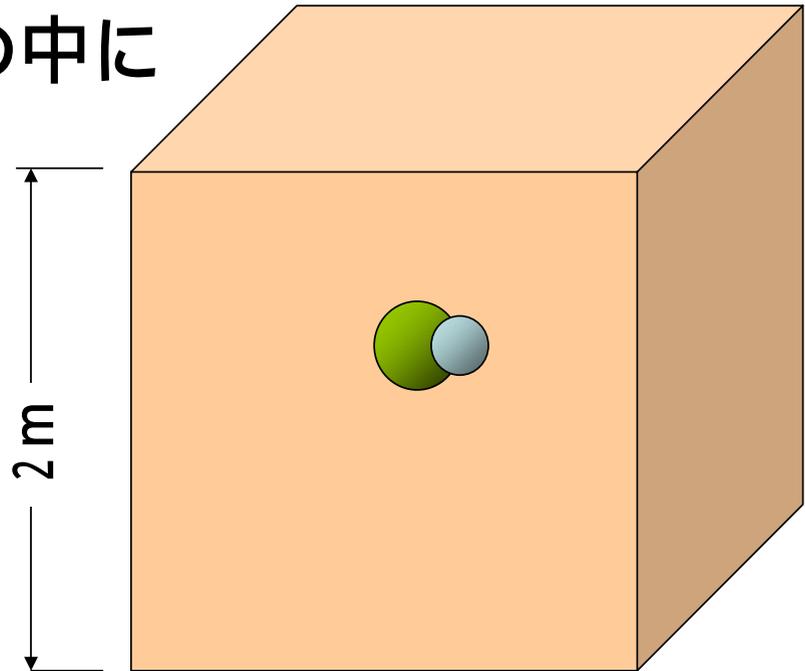


温度が**3億度以下** (宇宙誕生後**約0.1秒**) になると、  
ニュートリノは他の粒子と反応をしなくなり熱平衡から離れる

# 宇宙の中の陽子と電子

宇宙全体で平均してみると

- 陽子と電子は箱の中に  
1個ずつ



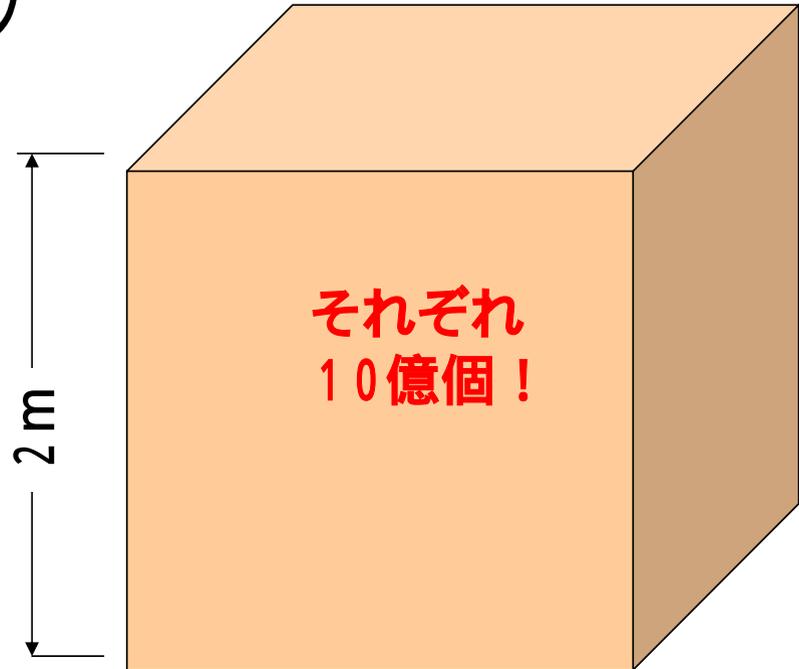
# 宇宙の中のニュートリノ

- 3種類のニュートリノ

- 電子型  $\nu_e$

- ミュー型  $\nu_\mu$

- タウ型  $\nu_\tau$



毎秒1平方cmあたり9兆個が通過

# ニュートリノで何が見える

— 光でみられないものを見る —

宇宙背景ニュートリノ **夢？**

宇宙誕生後 約0.1秒後の様子

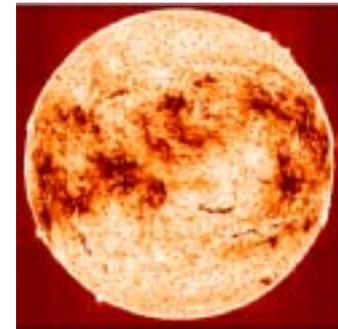
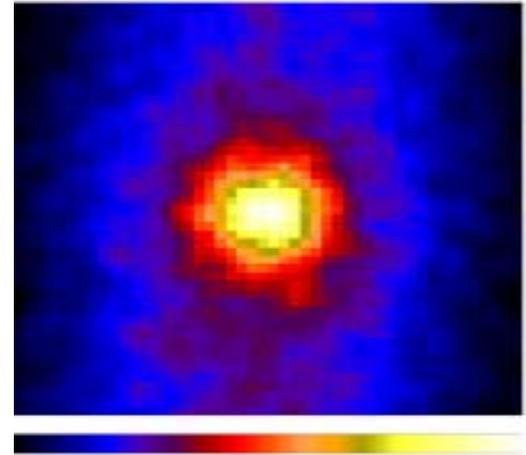
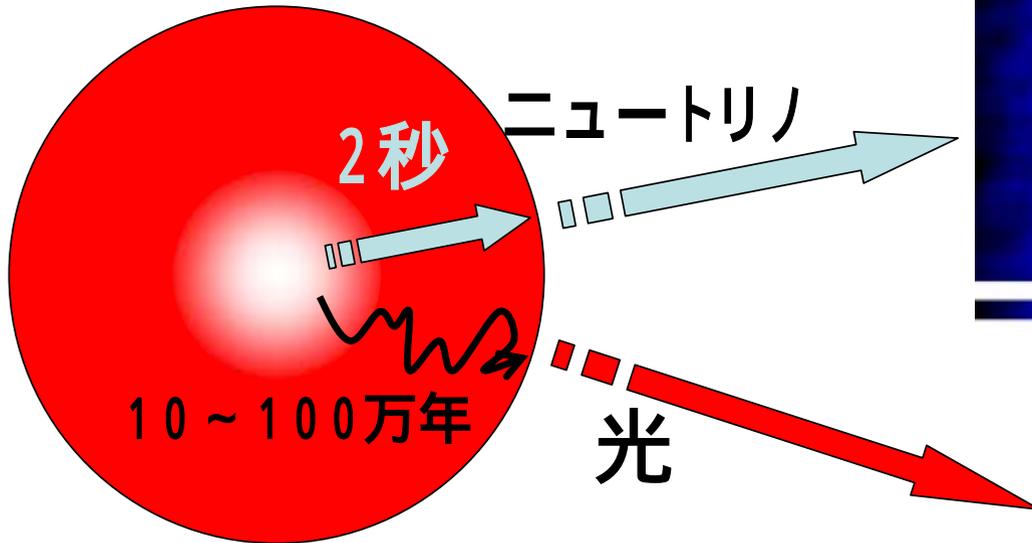
宇宙背景輻射(光)

宇宙誕生後 約30万年後の様子

# 太陽ニュートリノ

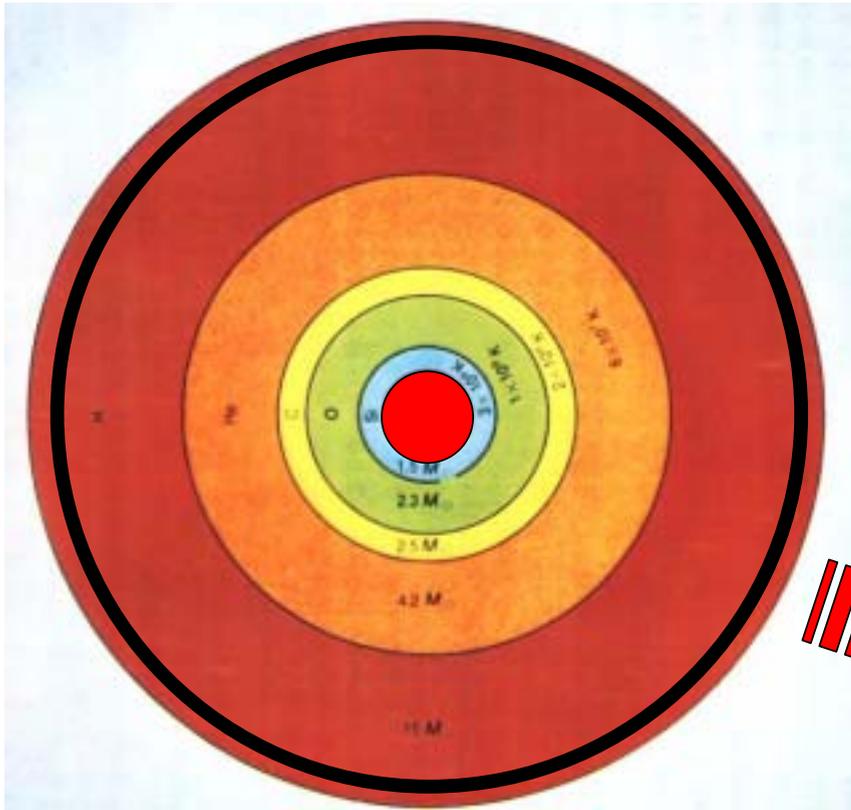
光で見えない中心核の様子  
現在のエネルギー発生  
個々の原子核反応の様子

ニュートリノで見た太陽像  
(スーパーカミオカンデ)

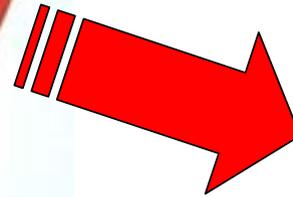


表面の様子  
過去のエネルギー発生  
個々の核反応の様子は分からない

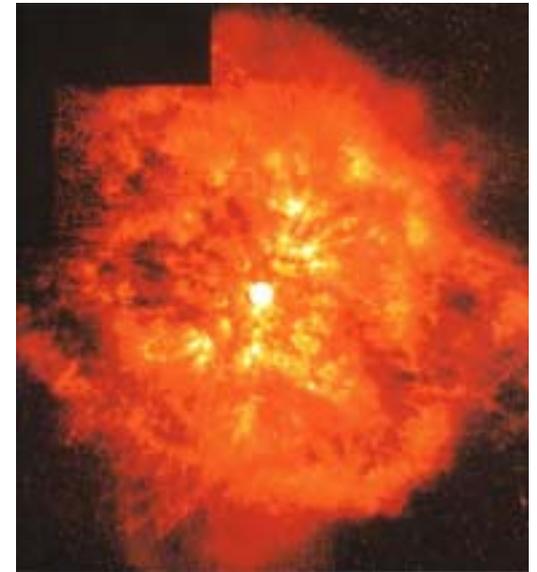
# 超新星爆発直前の星の内部構造



内側から、  
鉄  
ケイ素  
酸素  
炭素  
ヘリウム  
水素

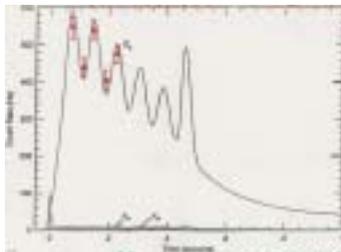


超新星爆発では、中心の鉄の核が  
一気につぶれて、中性子星や  
ブラックホールになる。



# 超新星ニュートリノ

ニュートリノの発生



$\nu$

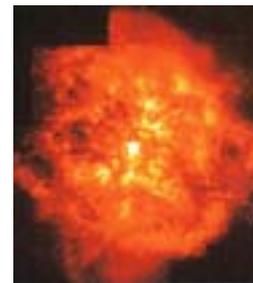
中性子星やブラックホールの  
形成過程が追える

光

数時間から数日



衝撃波の伝播



時間

# 宇宙ニュートリノ観測の 二面性

# 宇宙ニュートリノ観測の二面性

天体を見る新しい目  
としてのニュートリノ



ニュートリノ自身の性質  
(ニュートリノ質量)

天体で発生したニュートリノの数や  
エネルギー分布が変わってしまう

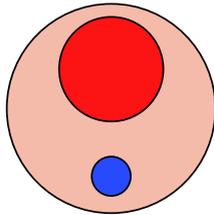
太陽ニュートリノ問題  
大気ニュートリノ異常

ニュートリノ振動の発見

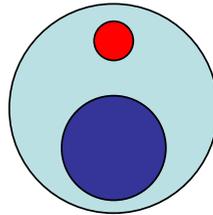
# ニュートリノ振動早分かり

ニュートリノ: 2つの(質量の固有)状態 ● と ● が混ざり合っている

(混ざる割合がミューニュートリノとタウニュートリノでは違う。)



ミューニュートリノ



タウニュートリノ

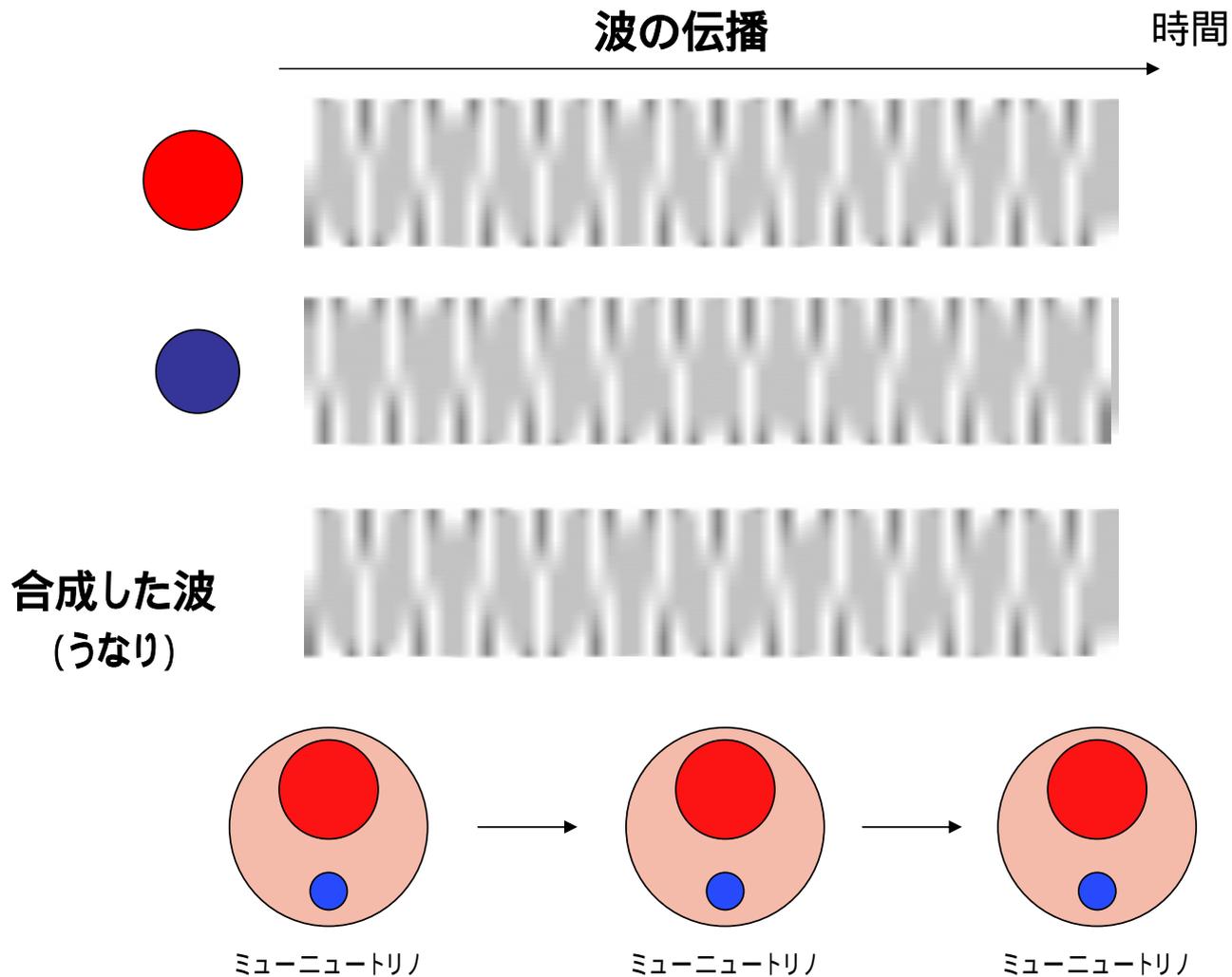
$$\begin{pmatrix} \nu_\alpha \\ \nu_\beta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \end{pmatrix}$$

物質は、質量に固有な波長を持つ

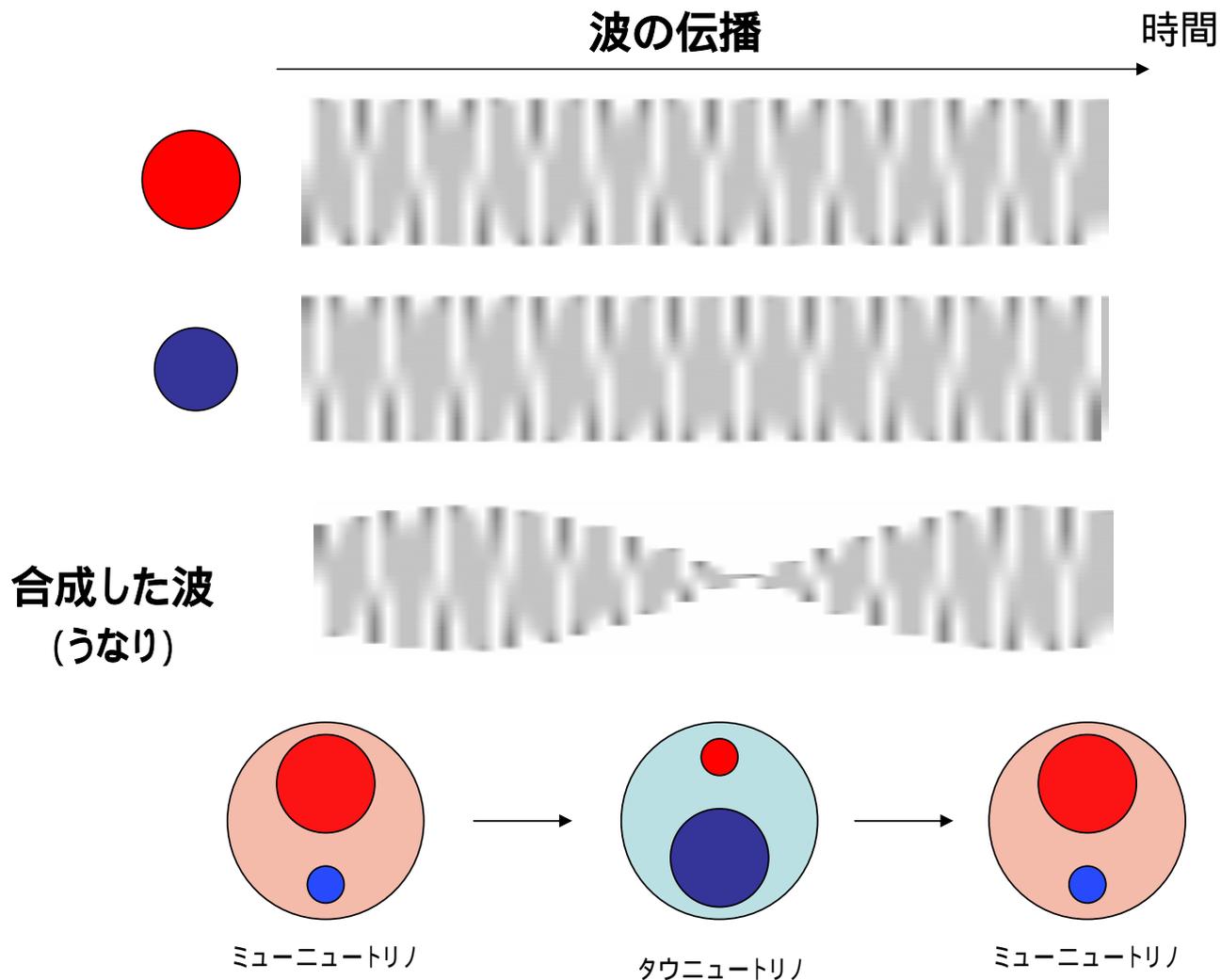
ニュートリノの伝播は、混合している質量の固有状態がそれぞれの波長で伝播する。

$$\psi(t) = e^{-iEt}$$

● と ● の質量が 同じなら、「波長」が同じである



● と ● の質量が 違うと、「波長」が異なる

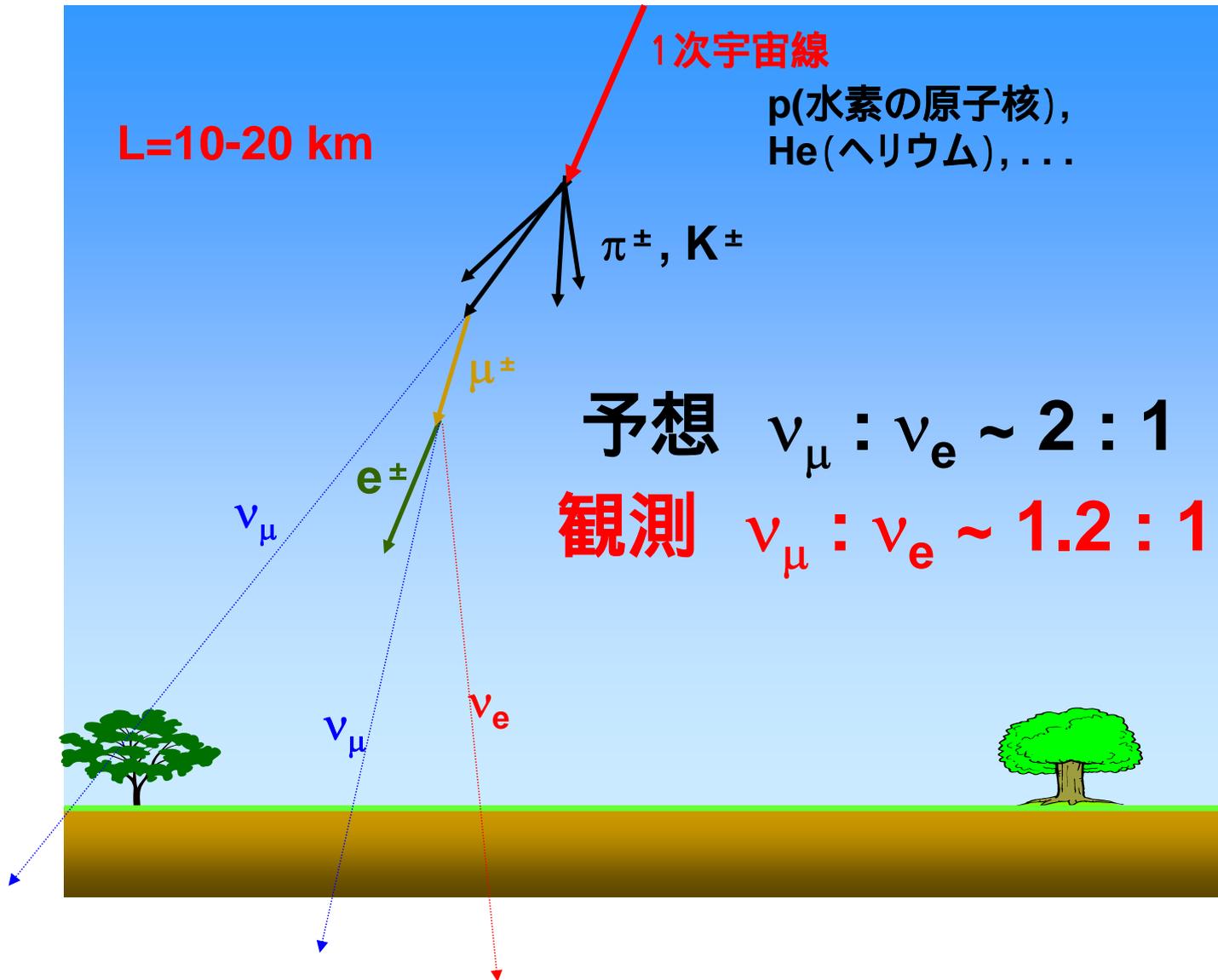


# ニュートリノ振動の発見

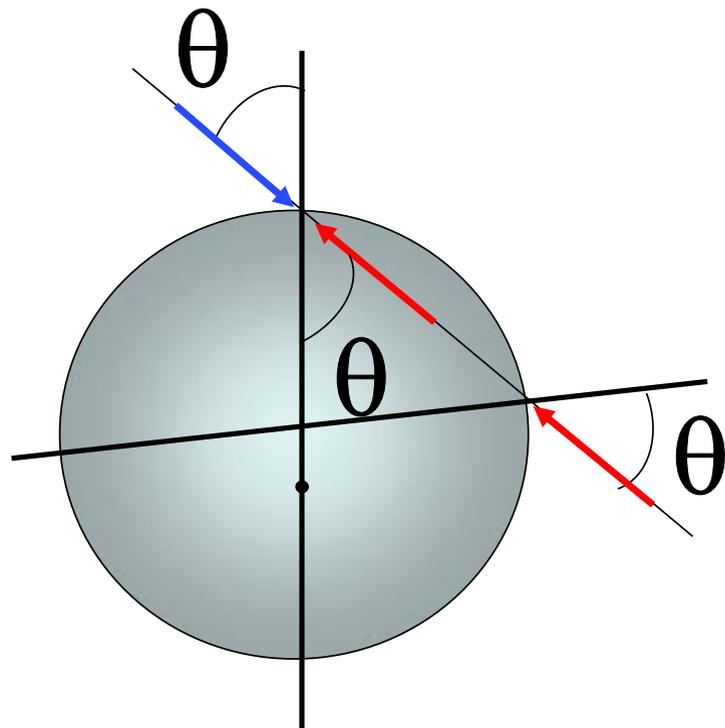
1998年6月

スーパーカミオカンデの大気ニュートリノ

# 大気ニュートリノ

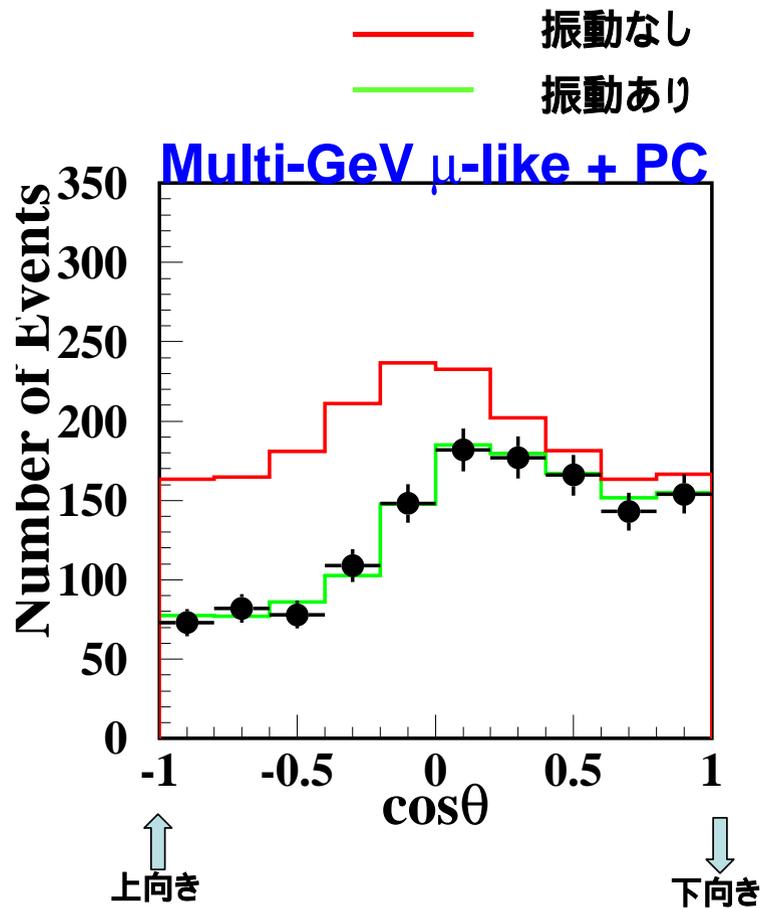


# 大気ニュートリノの分布の期待



大気ニュートリノの角度分布  
振動していなければ、上下対称である

# 観測された天頂角分布 (上下非対称性の発見)



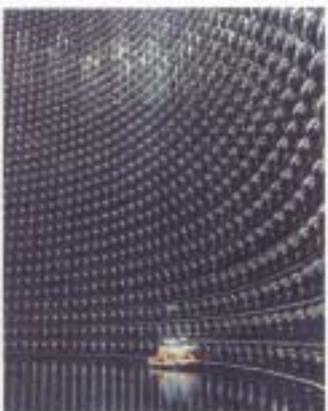
なぞの素粒子 ニュートリノ

# 「質量ある」最終結論

東大宇宙線研

## 理論物理の根幹一新

【東京6日電】東大宇宙線研究所の研究者らが、ニュートリノという素粒子が質量を持つことを最終的に証明した。これは理論物理学の根幹を揺るがす重要な発見で、ニュートリノの質量の測定は、素粒子物理学の最大の課題の一つであった。この発見は、ニュートリノの振動現象を説明する上で重要な役割を果たすことが期待されている。



ニュートリノの質量を測るために設置された検出装置「スーパーカミオカンデ」の内部の様子。 (東大宇宙線研究所提供)

東大宇宙線研究所の研究者らが、ニュートリノという素粒子が質量を持つことを最終的に証明した。これは理論物理学の根幹を揺るがす重要な発見で、ニュートリノの質量の測定は、素粒子物理学の最大の課題の一つであった。この発見は、ニュートリノの振動現象を説明する上で重要な役割を果たすことが期待されている。

ニュートリノは、素粒子物理学の最大の謎の一つとして知られてきた。これまで、ニュートリノは質量がゼロであると仮定されていたが、この発見は、ニュートリノが質量を持つことを示している。これは、ニュートリノの振動現象を説明する上で重要な役割を果たすことが期待されている。

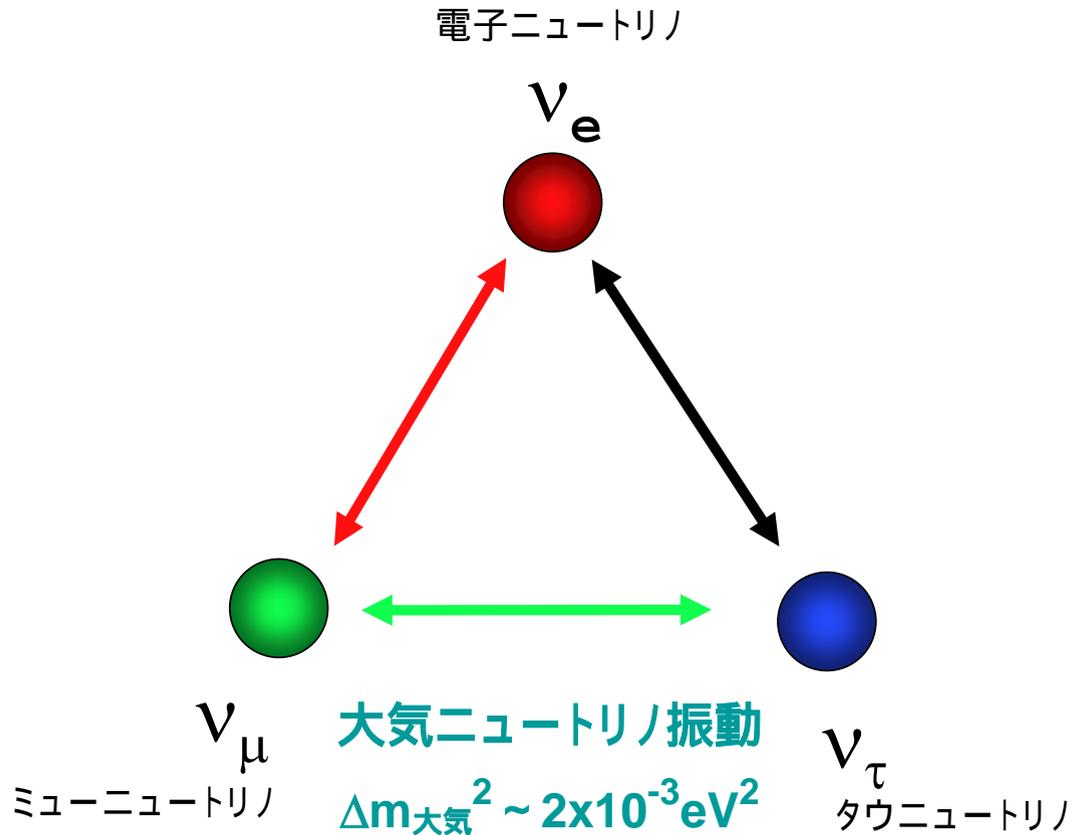
この発見は、ニュートリノの質量の測定に成功したことを示している。これは、ニュートリノの振動現象を説明する上で重要な役割を果たすことが期待されている。

ニュートリノの質量の測定は、素粒子物理学の最大の課題の一つであった。この発見は、ニュートリノの振動現象を説明する上で重要な役割を果たすことが期待されている。

ニュートリノの質量の測定は、素粒子物理学の最大の課題の一つであった。この発見は、ニュートリノの振動現象を説明する上で重要な役割を果たすことが期待されている。

① 東大宇宙線研究所の研究者らが、ニュートリノという素粒子が質量を持つことを最終的に証明した。これは理論物理学の根幹を揺るがす重要な発見で、ニュートリノの質量の測定は、素粒子物理学の最大の課題の一つであった。この発見は、ニュートリノの振動現象を説明する上で重要な役割を果たすことが期待されている。

# 大気ニュートリノ振動



# ニュートリノ望遠鏡と 宇宙ニュートリノ観測

どうやってニュートリノを捕まえるか。  
そして、何が見えたか

# ニュートリノはなかなかつかまらない



地球を70、000、000、000個並べる  
700億個(100光年)

地球

(10 MeVの)ニュートリノ

この時、ニュートリノが反応する確率 ~ 70%

ニュートリノは弱い相互作用しかしない

10 MeV(太陽)ニュートリノと電子の反応:

~ 中性子の反応の100京分の1 ( $10^{-18}$ )

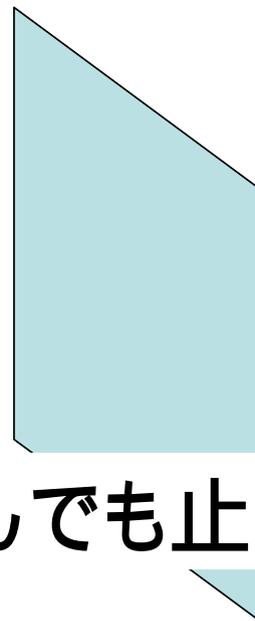
1 GeV(大気)ニュートリノと核子の反応:

~ 中性子の反応の100兆分の1 ( $10^{-14}$ )

なんでも突き抜ける矛  
(ニュートリノ)



矛盾



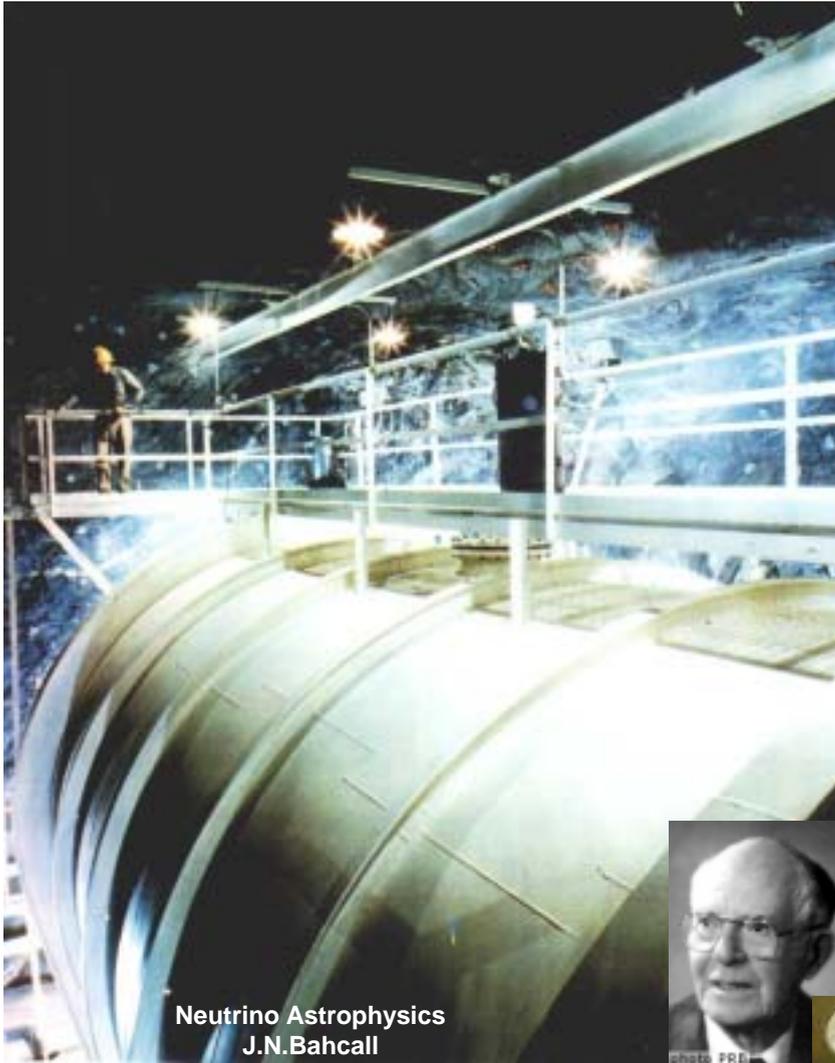
なんでも止める盾

なんでも突き抜けるニュートリノには  
大量の物質を置く  
的が大きければ、下手な鉄砲も  
数打てばあたる。

ニュートリノの測定は、まれに起こる物質との反応によって生成する原子核や、電子、ミュー粒子などの2次粒子を検出することで行う。

# 太陽ニュートリノ観測

# 世界で初めての太陽ニュートリノ観測



## デービスらによるHomestake実験

615トンの四塩化炭素を入れたタンクの中で、ニュートリノと塩素の反応により生まれるアルゴン原子の数を数えた。

1970年頃から行われた実験。



生まれたアルゴン原子の数は、2日に1個。

予想値の約1 / 3。

# カミオカンデとスーパーカミオカンデ

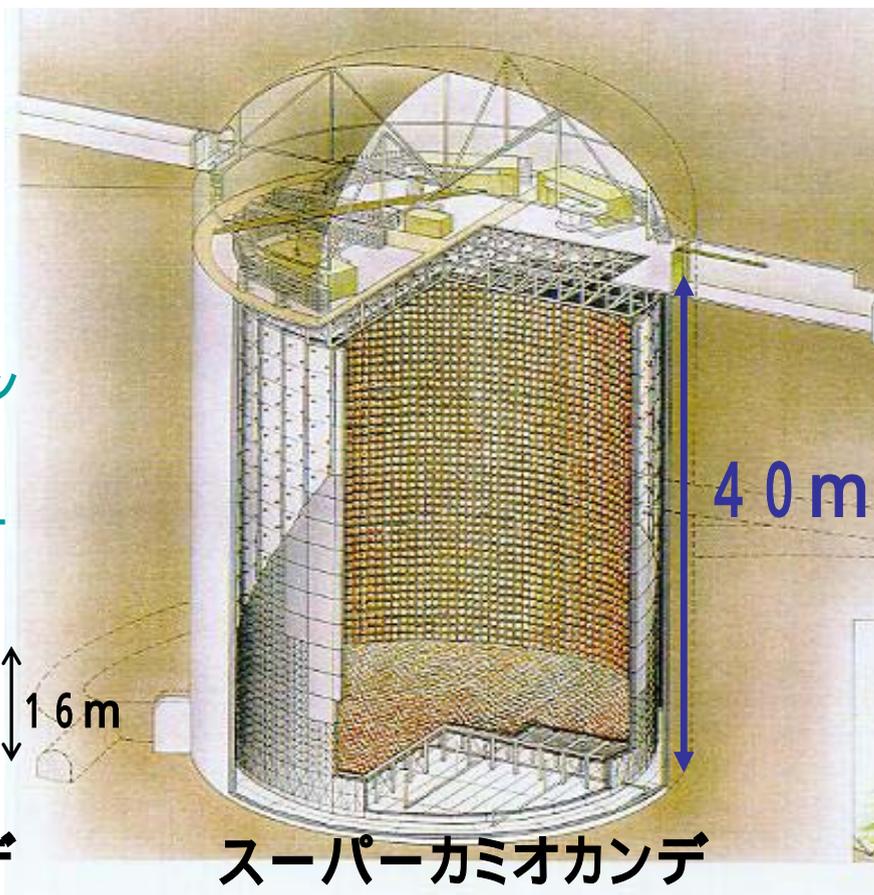
## 水チェレンコフ装置

1996年4月から稼動

3000トン  
有効重量680トン  
高さ 16m  
直径 16m  
1000本のPMT



カミオカンデ

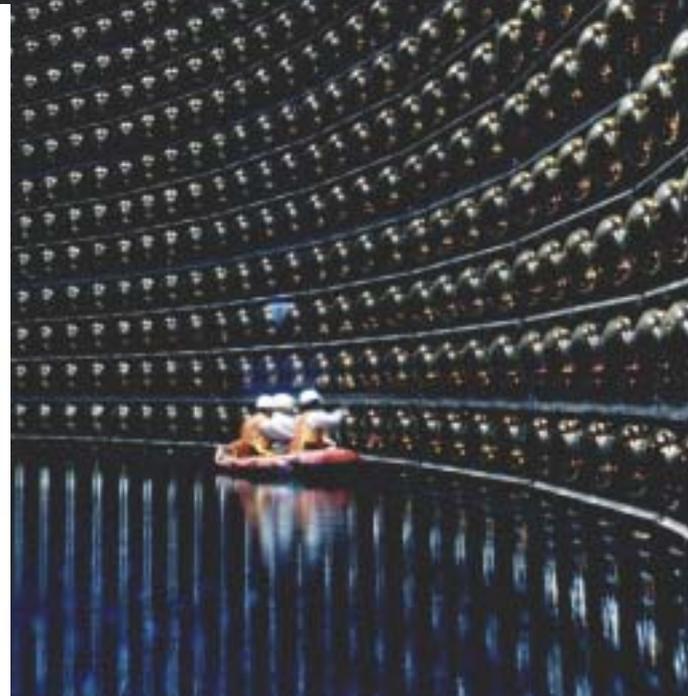
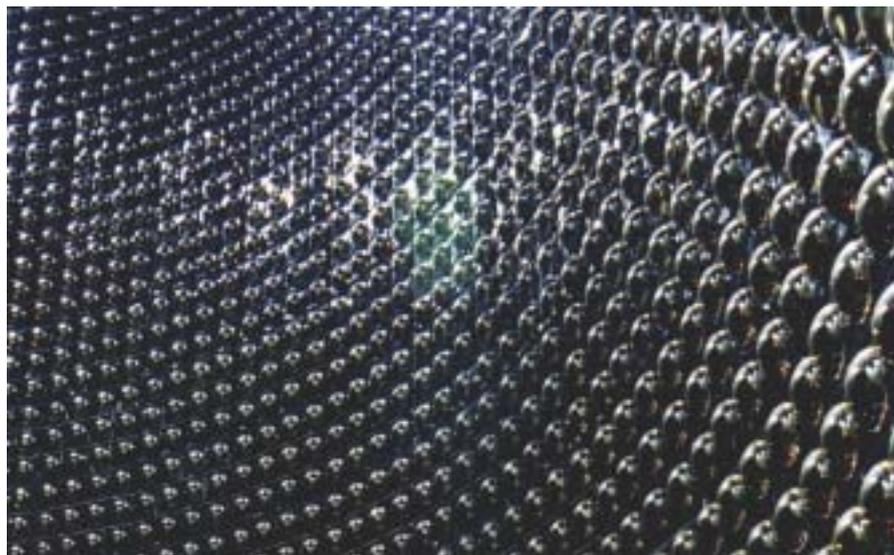


スーパーカミオカンデ

- 総重量  
50,000トン
- 有効重量  
22,500トン
- 光電子増倍管(PMT):  
内水槽 11,146本  
直径 50cm 増倍管  
外水槽 1,885本  
直径 20cm 増倍管

水槽内部 →

直径50cm  
光電子増倍管(PMT)



# カミオカンデでの太陽ニュートリノ観測

- $\nu + e \rightarrow \nu + e$
- はねとばされた電子 $e$ を観測・測定

太陽ニュートリノ

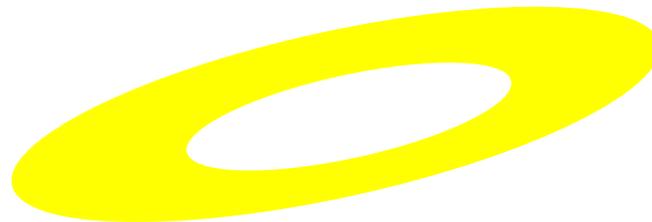


電子がけりだされる方向は、  
ニュートリノの飛来方向である。

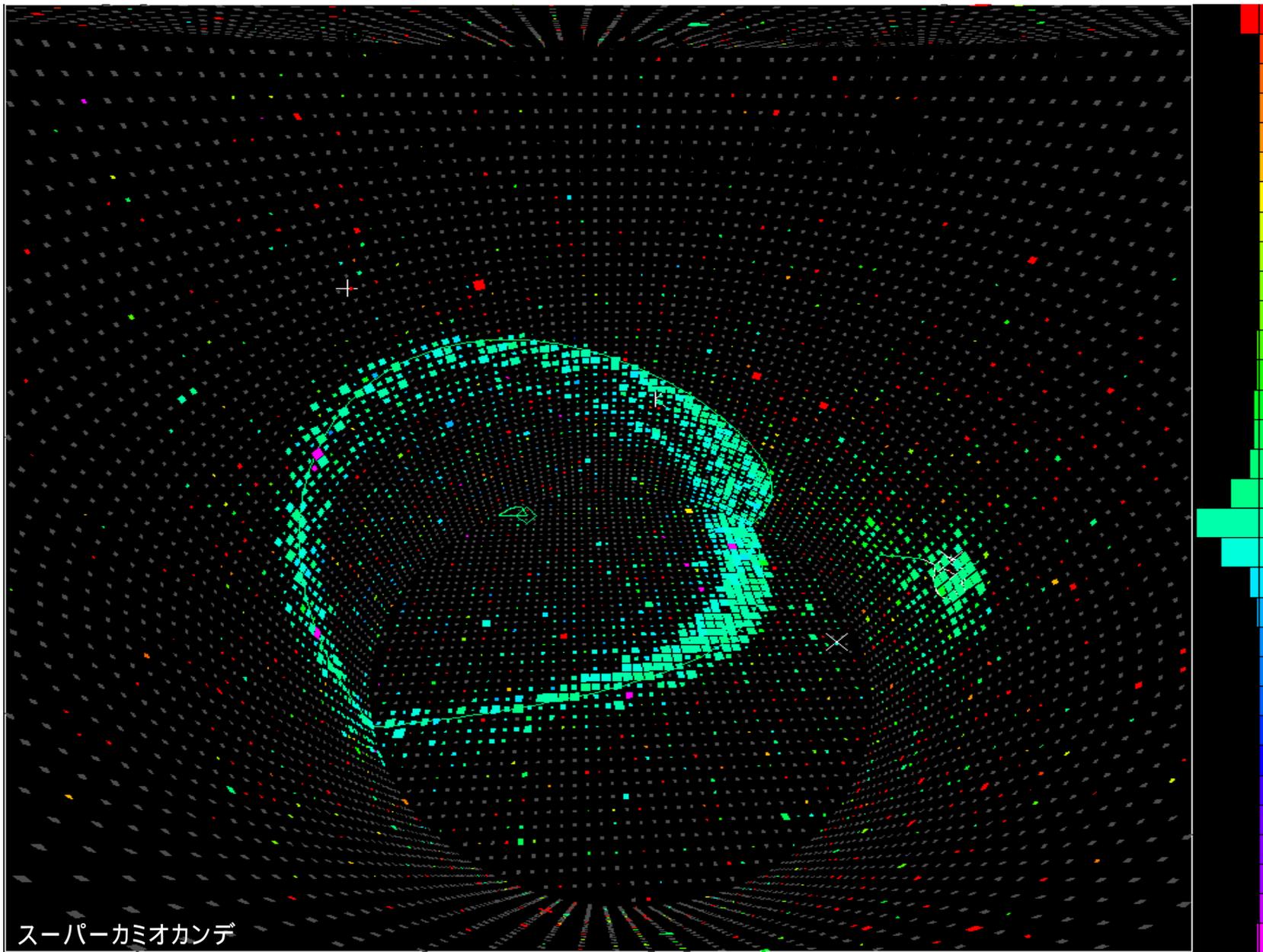
電子



方角の測定

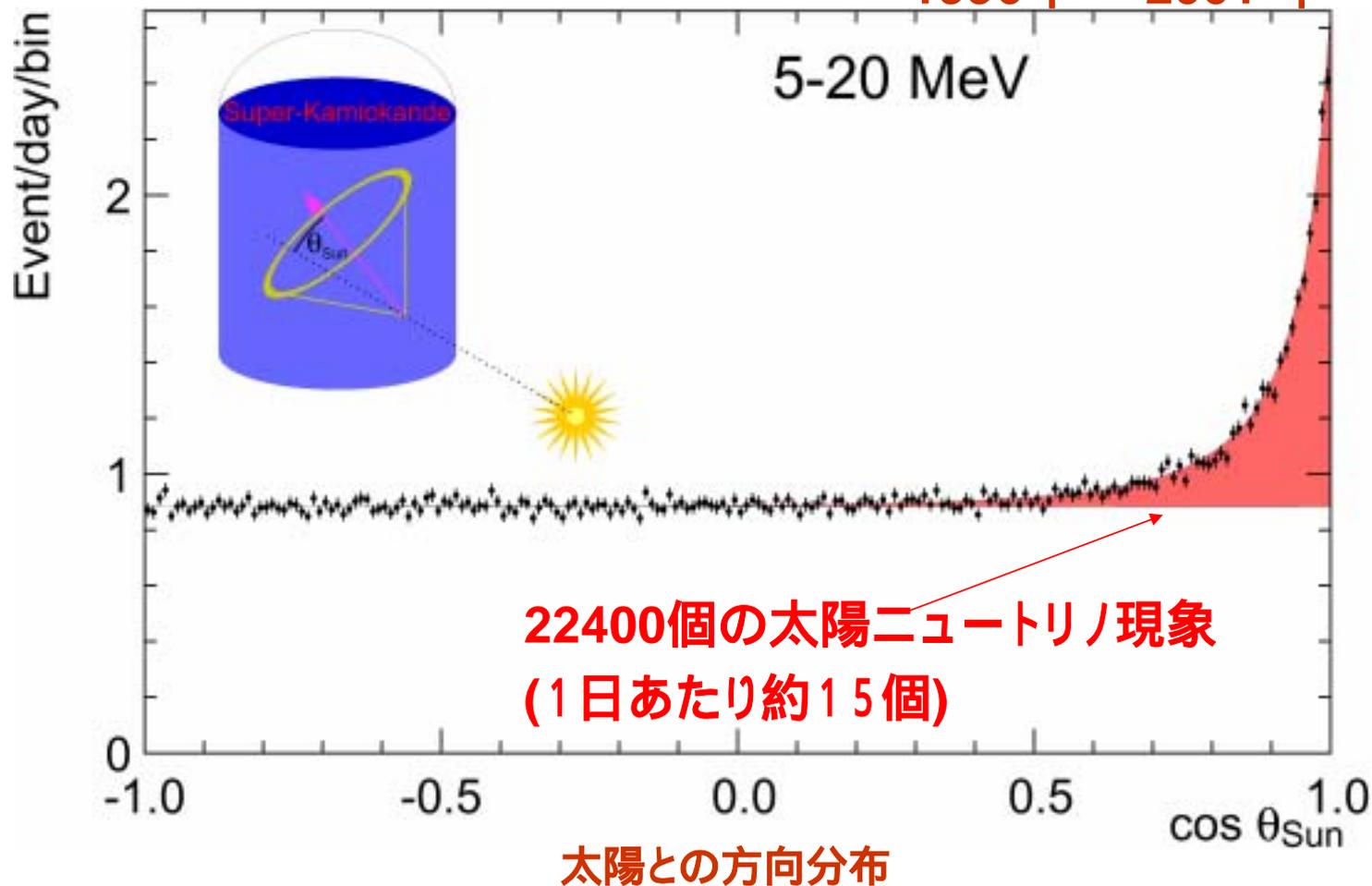


チェレンコフ光



# スーパーカミオカンデで捕らえた太陽ニュートリノ

1996年 - 2001年

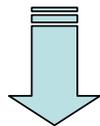


太陽ニュートリノ強度は理論値の45%

# 太陽ニュートリノ振動の確立

## 2001年6月

太陽ニュートリノ  
電子型



ニュートリノ振動

一部が**ミュー**または**タウ型**に変化

地球で観測する  
太陽ニュートリノ



SuperKamiokande



45%

電子型とミュー、  
タウ型の15%が観測にかかる

カナダのSNO実験  
電子型のみ観測



35%

SuperKamiokande



スーパーカミオカンデで  
電子型以外のニュートリノ  
が観測されていることが確認

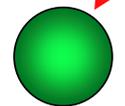


65%が  
ミュー、タウ型  
に振動

**ニュートリノ振動の確立**

電子ニュートリノ

$\nu_e$



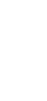
$\nu_\mu$

ミューニュートリノ



$\nu_\tau$

タウニュートリノ



# 太陽ニュートリノ問題の解決



- 太陽ニュートリノも振動していた：  
ニュートリノ質量研究に大きな貢献  
 $\Delta m_{\text{太陽}}^2 = 7 \times 10^{-5} \text{eV}^2$
- ニュートリノの性質がわかり始めた
- 今後本来の目的(ニュートリノによる太陽の研究)ができる

超新星ニュートリノ

大マゼラン星雲での超新星爆発(1987年2月23日)



カミオカンデでこの超新星  
からのニュートリノを観測

超新星SN1987A

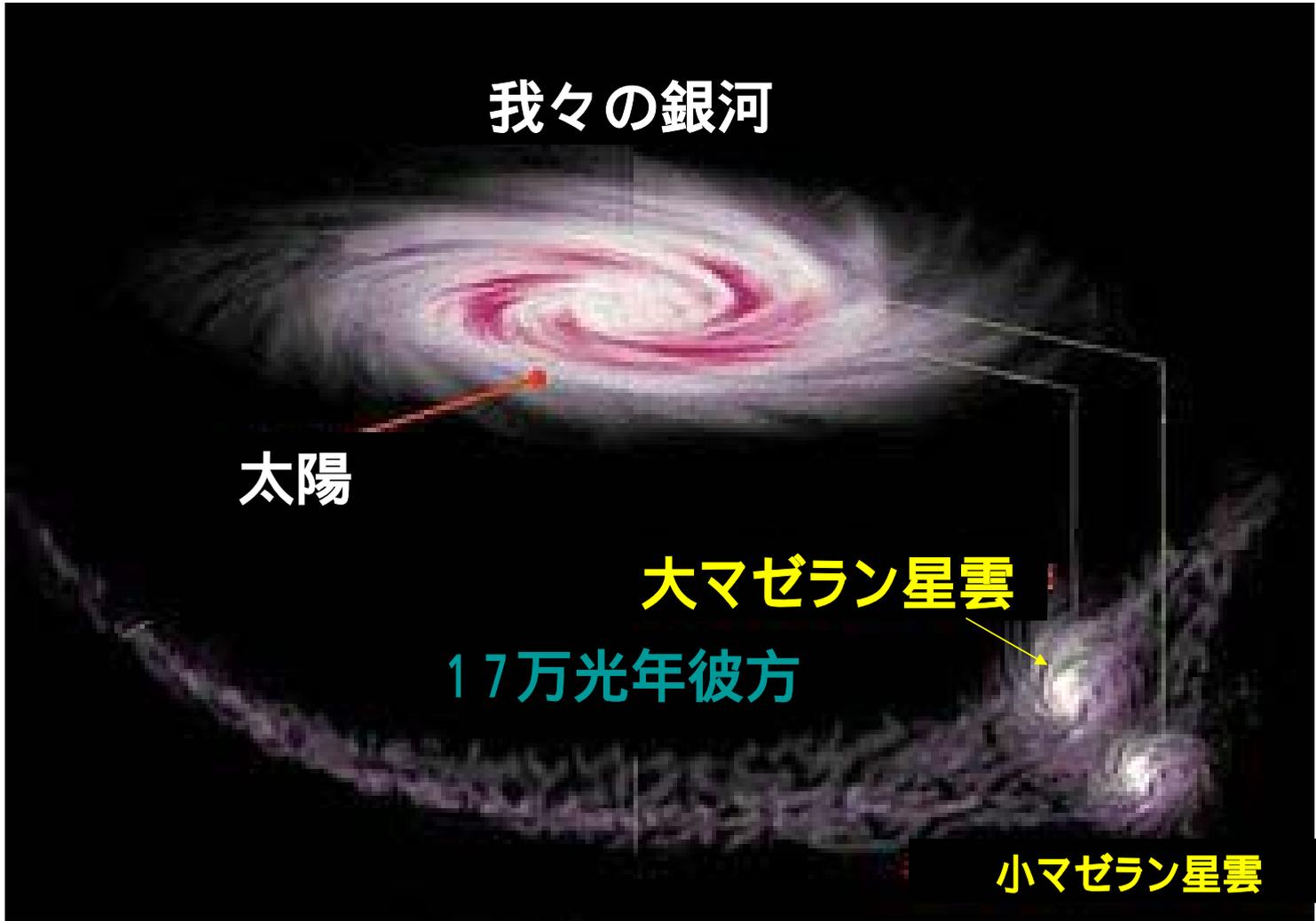
# 我々の銀河

太陽

大マゼラン星雲

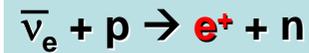
17万光年彼方

小マゼラン星雲

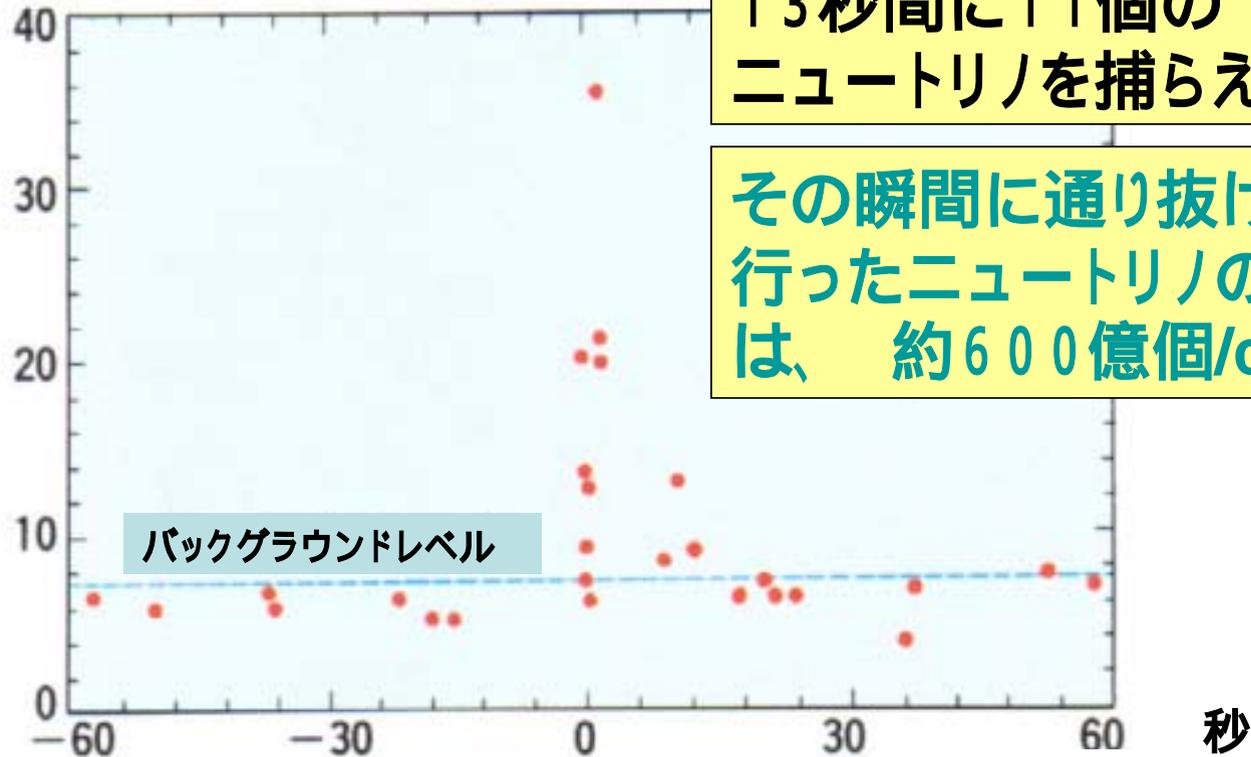




# カミオカンデが捉えた超新星のデータ



ニュートリノのエネルギー



13秒間に11個の  
ニュートリノを捕らえた。

その瞬間に通り抜けて  
行ったニュートリノの数は、  
約600億個/cm<sup>2</sup>

JT: 1987 Feb 23 16:35:35 ( $\pm 1$ min)

UT: 7:35:35

Time

秒

# 超新星ニュートリノの観測

- 爆発のエネルギーの99%をニュートリノが持ち出す理論を大筋確認
- ニュートリノの質量が、当時の地上での実験の上限とほぼ同じ上限を与える。

# 将来の超新星からのニュートリノの観測

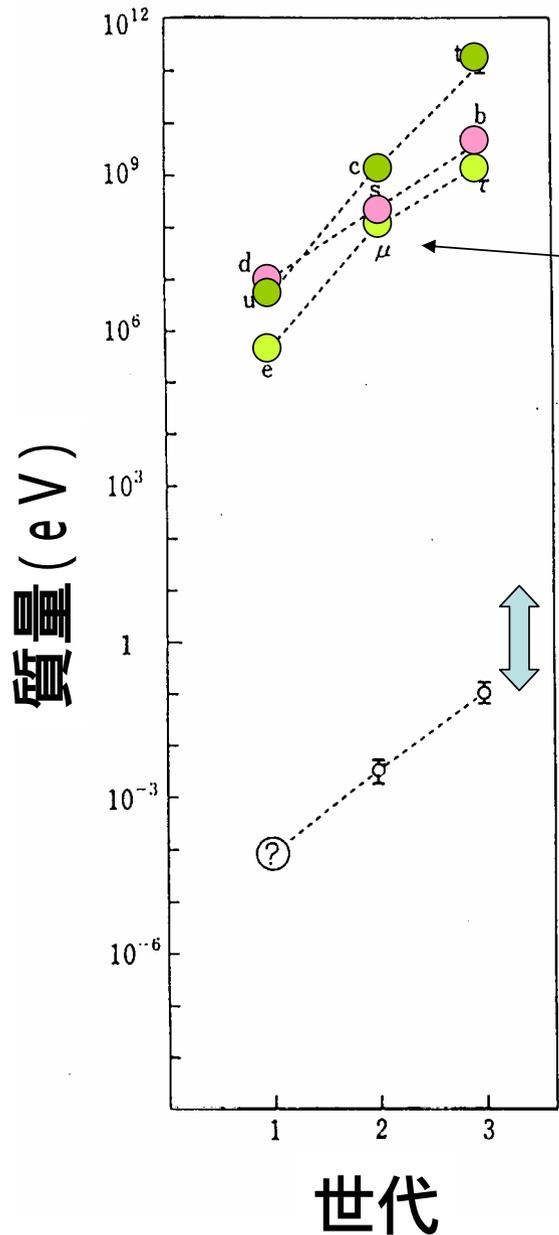
- 銀河中心で起これば8000事象以上ニュートリノが観測される(スーパーカミオカンデ)
- 中性子星の形成過程が時間を追って見える
- ブラックホール形成がおこれば、ドラマティックな信号が見える
- ニュートリノ観測により天文台に超新星爆発の警告を発することができる。

# ビッグバン・ニュートリノ

- 大量にあるのはたしからしい
- しかし、捕まえるのはむずかしい

ニュートリノ質量の貢献は

# ニュートリノ質量の大きさ



クォーク、電子類の質量

ニュートリノの質量は極めて小さい

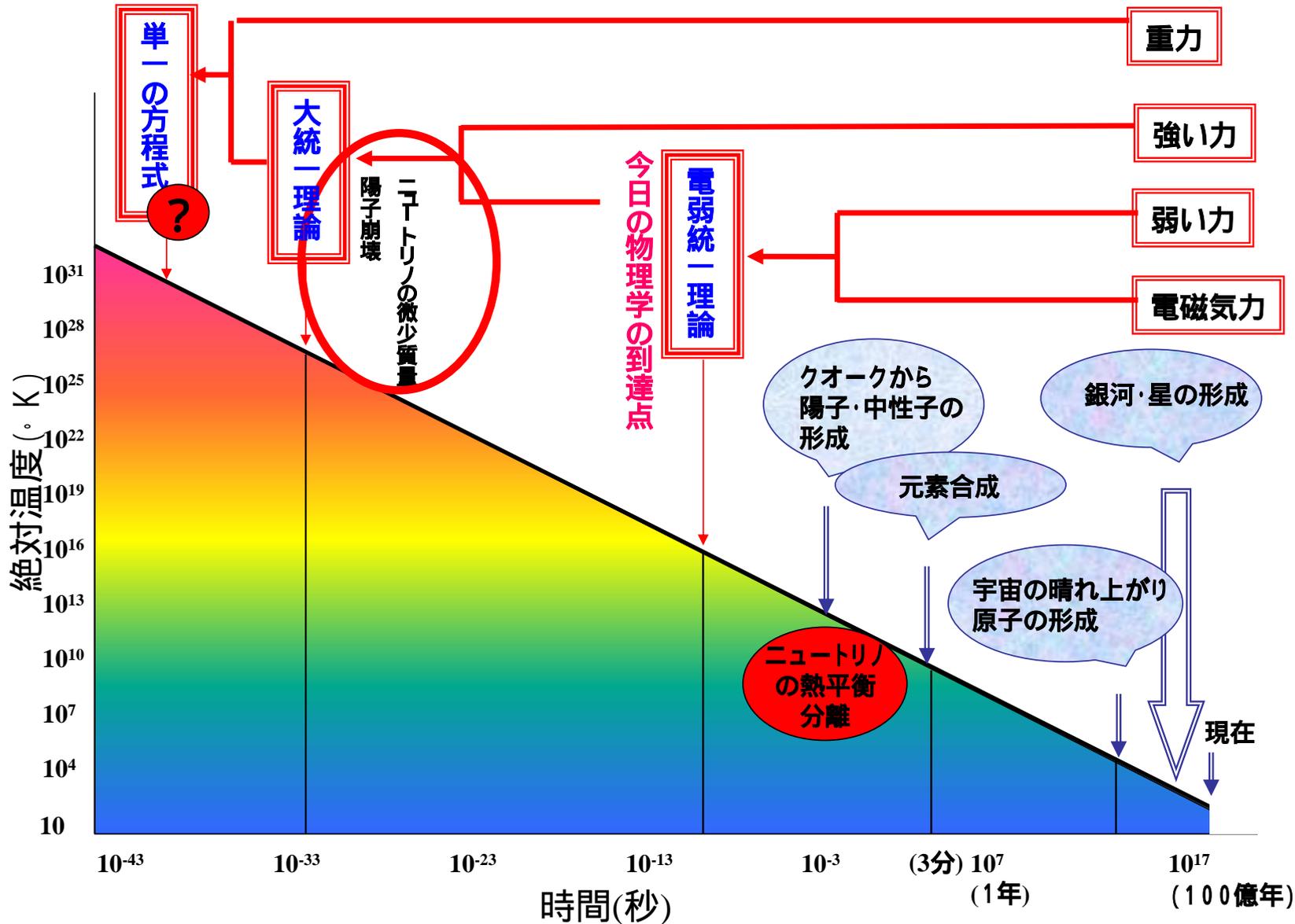
# ニュートリノ質量は宇宙の進化に影響を与えるか

	数密度 ( $\text{cm}^3$ あたり)	質量 (電子ボルト)	質量密度 ( $\text{eV}/\text{cm}^3$ )
陽子	0.0000001	10000000000	100
ニュートリノ	100 (1種類あたり)	0.01 ~ 1	1 ~ 100 (3種類あたり)

宇宙が収縮するための臨界質量密度  $5000 \text{ eV}/\text{cm}^3$

- ニュートリノ質量は宇宙を収縮させる程大きくはない。
- しかし、陽子の質量密度に匹敵し、何らかの影響を与えていたのではないか。

# 宇宙の熱的歴史



ニュートリノは  
宇宙の歴史を紐解く道具である

おしまい