

② $\Rightarrow$ Fenster zu neuer Physik
bei hohen Energien, die uns
direkt nicht zur Verfügung
stehen.

Anderer Art von Oszillationen:
Neutrino - Oszillation

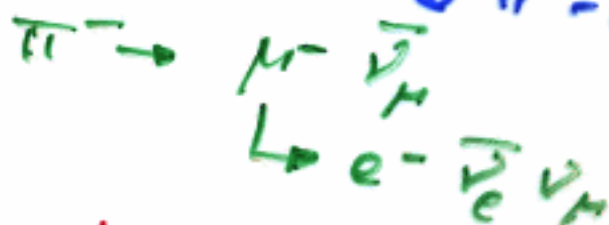
Neutrinos

solare Neutrinos : $6 \cdot 10^{10} \text{ v/cm}^2$
Erdoberfläche
/ Sekunde

atmosphärische Neutrinos: durch hadronische
Schauer hochenergetischer kosmischer
Strahlung in der Atmosphäre:



$\leftarrow$ hadronische Schauer $\Rightarrow$ es entstehen
viele π -Mesonen

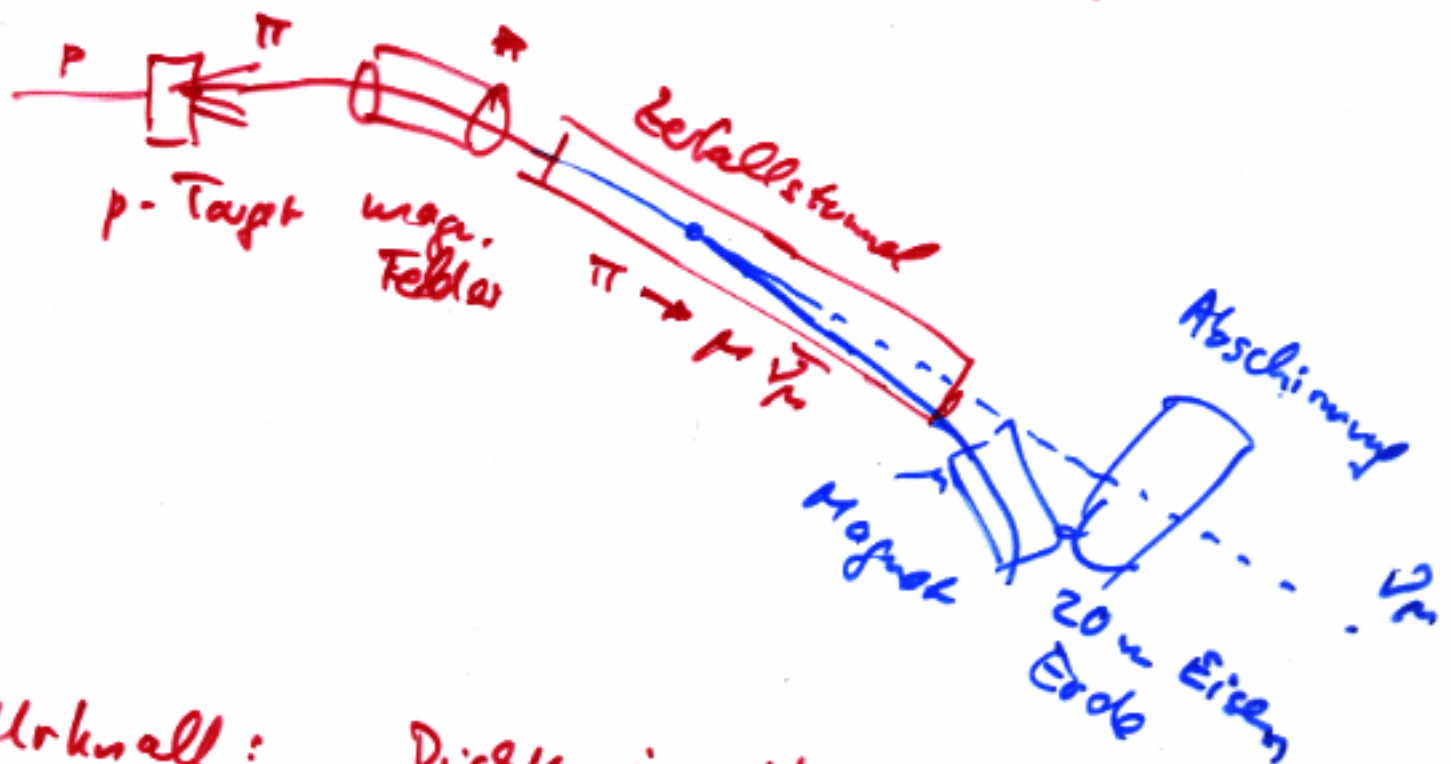


erwartet : $\nu_\mu / \nu_e = 2:1$

Supernova SN 1987A : $10^{58} \nu$
dominante Energie freisetzung

Kernkraftwerke $10^{20} \nu_e / s$

Neutrinostrahlen am Beschleuniger



Urknall: Dichte im Universum ist
heute $300 \nu / \text{cm}^3$

$$\frac{\nu}{p+n} \approx 10^9$$

Standardmodell: Neutrinos sind
masselos
(aber neue Resultate sprechen
für kleine Massen!)

③ SM: $\left\{ \begin{array}{l} \text{nur linkshändige Leptonen} \\ \text{nehmen an der schwachen} \\ \text{WW teil. Es gibt keine} \\ \text{rechtshändigen ~~leptonen~~ Neutrinos} \end{array} \right.$
 Paritäts-
 verletzung

linkshändige Teilchen: $SU(2)$ -Doublets
 $\hookrightarrow$ speziell
 unitäre
 Gruppe

$$\begin{pmatrix} e_L^- \\ \nu_{eL} \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} \mu_L^- \\ \nu_{\mu L} \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} \tau_L^- \\ \nu_{\tau L} \end{pmatrix}$$

rechtshändige Teilchen: $SU(2)$ -Singletts:

$$e_R^- \quad \mu_R^- \quad \tau_R^-$$

Wenn v masselos ist, ist die
 Geschwindigkeit $v =$ Lichtgeschwindig-
 keit c , in jedem Bezugssystem.
 $\Rightarrow$ Es gibt keine Lorentztrans-
 formation, die aus einem

④

Linkshändigen ein rechtshändiges
Neutrino machen kann.

Wenn ν eine kleine Masse haben,
dann existieren auch rechtshändige
Neutrinos

Neutrinoexperimente sind schwierig,
weil σ sehr klein ist.

$$\sigma_{\nu n} (\approx 1 \text{ MeV}) \approx 10^{-43} \text{ cm}^2$$

→ mittlere freie Weglänge in Wasser:

$$10^7 \cdot d_{SE} \text{ (Sonne-Erde)}$$

$$\hookrightarrow 150 \cdot 10^6 \text{ km}$$

→ sehr hohen Neutrino flux

→ sehr große Detektoren

→ viel Zeit

$$\sigma_{\nu p} \propto E_{\nu}$$

hochenergetische Neutrinos sind
besser nachzuweisen.

⑤ erste Neutrinos (ν_e) in der Nähe
von Kernreaktoren ($\approx$ ca. 1950)

Anfang 60er Jahre : erster μ -Neutrino-
strahl in Brookhaven

10^{14} Neutrinos 51 Reaktionen
in Funkenkammer

$\rightarrow$ alles μ , kein e

$\Rightarrow$ Beweis, dass es 2 Arten
von Neutrinos gibt

Nobelpreis 1988 Ledermann
Schwartz
Steinberger

1975 wurde τ -Lepton
entdeckt:

(Martin Perl, Nobelpreis)

$e^+e^- \rightarrow \cancel{e^+} \mu^- + \text{fehlende Energie}$

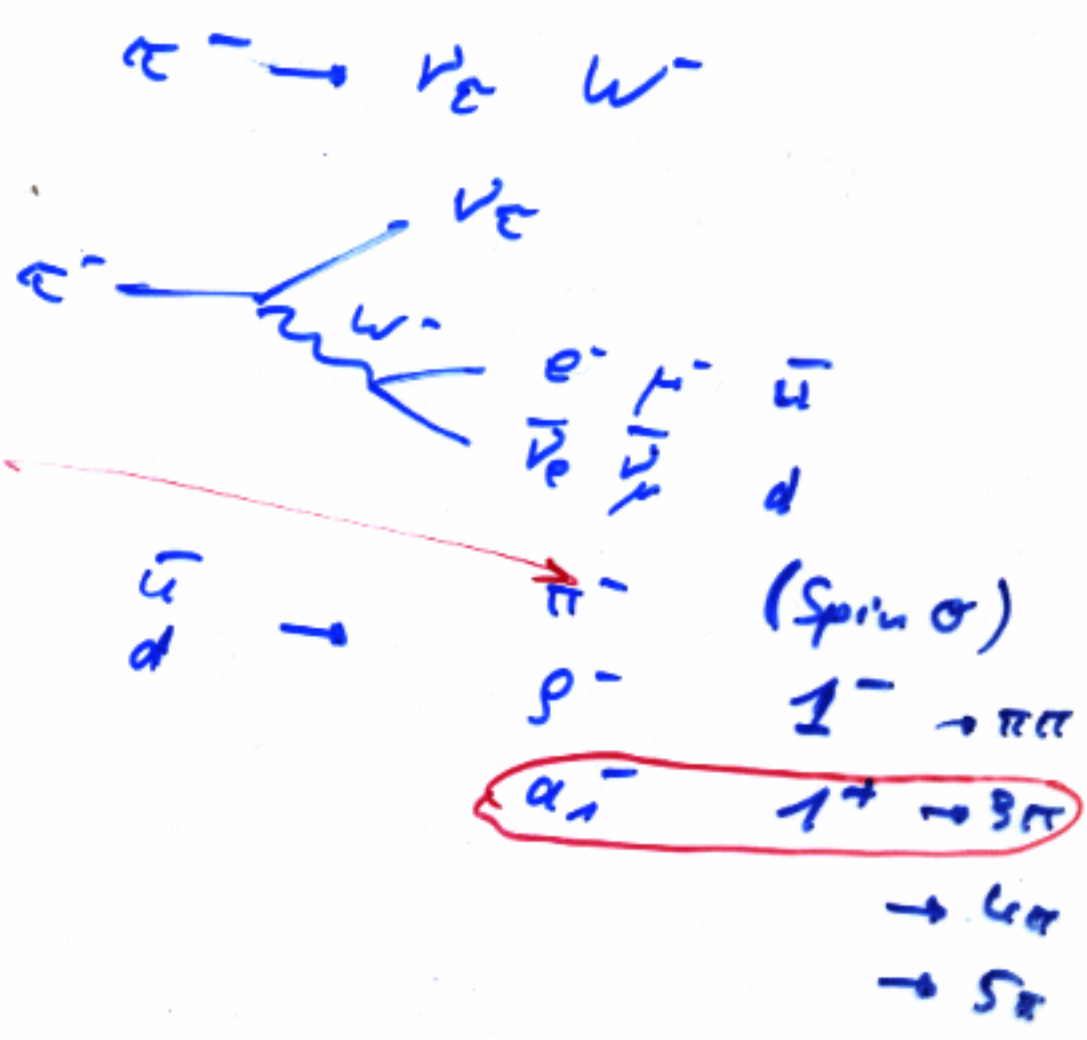
$\rightarrow \tau^+ \tau^-$
 $\swarrow \searrow$
 $e^+ \nu_e \bar{\nu}_e \quad \mu^- \bar{\nu}_\mu \nu_\tau$

6

→ es muss ~~ein~~ ein τ -Neutrino existieren.

1991 : Kühn & Wagner
 Feindt
 ARGUS - Kollaboration.
 → das τ -Neutrino ist
 linkshändig
 und das $\bar{\nu}_\tau$ rechtshändig.

Methodo:



PCAC
 Partially
 Conserved
 Axial
 Currents

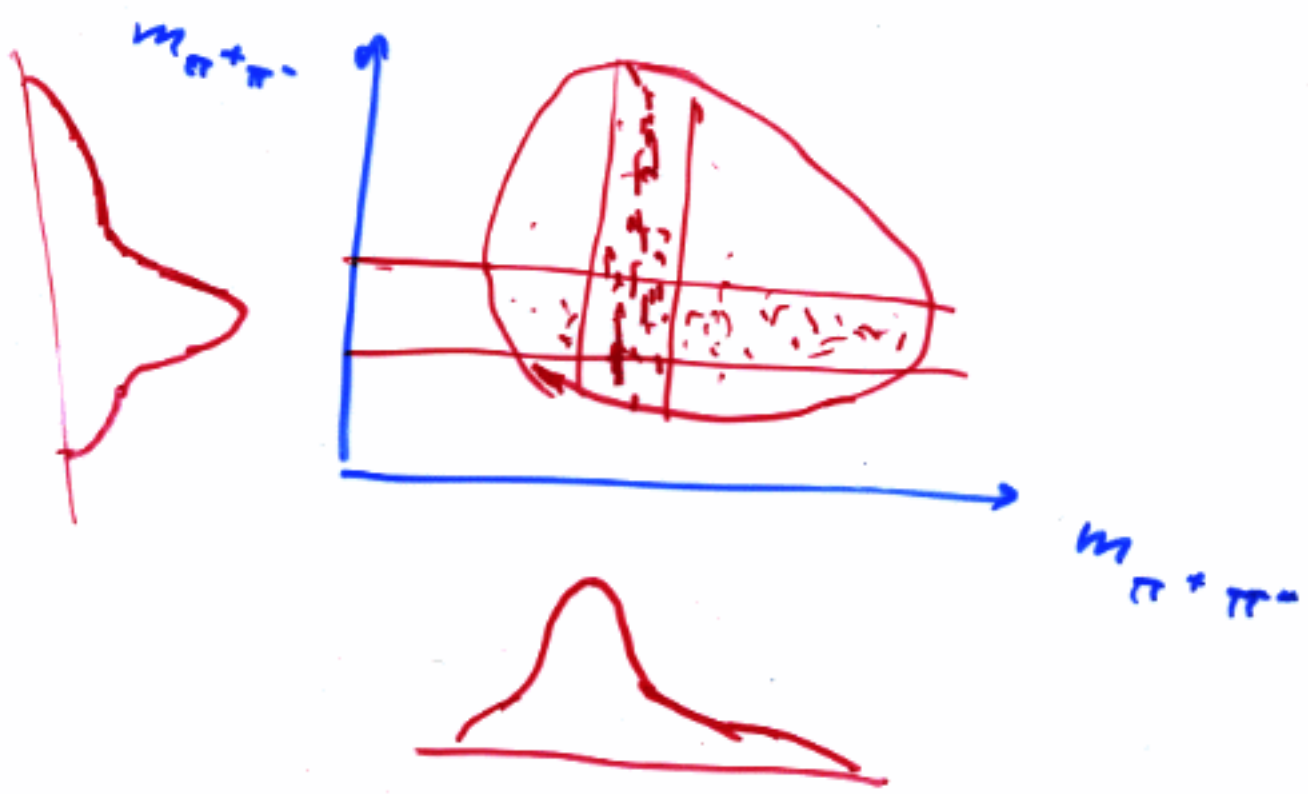
2

$$\tau^- \rightarrow \nu_\tau \quad a_1^- \leftarrow 1$$

$$\hookrightarrow \rho^0 \pi^- \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^-$$

$$\hookrightarrow \pi^- \rho^0 \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^-$$

Darling - Plot



Bose-Symmetrie zwischen π_1^- und π_2^-

$$\rightarrow |g_1 \pi_2^- + g_2 \pi_1^-|^2$$

$$= |g_1 \pi_2^-|^2 + |g_2 \pi_1^-|^2 + 2 \operatorname{Re} (g_1 \pi_2^-)^* g_2 \pi_1^-$$

Kann zwischen Helizität +1 und -1 des a_1

$\Rightarrow$ Links-Rechts-Asymmetrie beobachtbar
 $\Rightarrow$ Helizität des a_1 -Mesons

⑧

→ Helizität des τ -Neutrinos

2000 : DONUT - Experiment
Fermilab

hochenergetischer ν -Strahl, der
auch viele ν_τ enthält

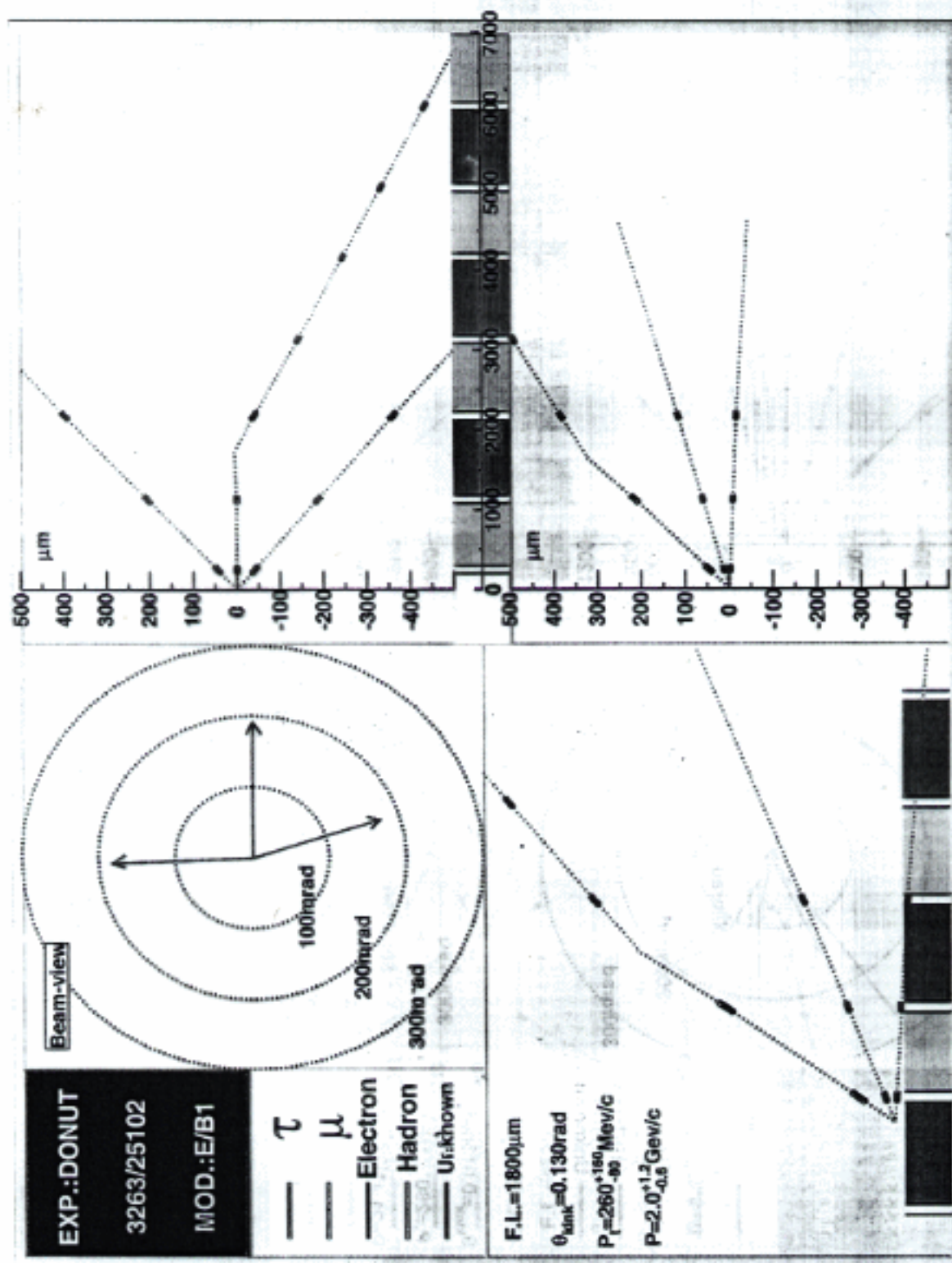
Suche in Emulsions targets
nach kurzen Spuren, die
von einem τ -Lepton
herrühren, und Zerfallsprodukten
vom τ (Knick durch

$$\tau^- \rightarrow \mu^- \bar{\nu}_\mu \nu_\tau$$



→ Existenz ~~des~~ und
Unterscheidbarkeit des
3. Neutrinos
nachgewiesen.

9



Neutrino massen:

Wenn ν_e, ν_μ, ν_τ unterschiedliche Massen haben, dann kann es zu Neutrinooszillationen $\nu_e \rightarrow \nu_\tau$, $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$, ... kommen (muss aber nicht)

Direkte Massenmessungen bisher erfolglos, Grenzen auf

$$m(\nu_e) < \approx \text{eV}$$

$$m(\nu_\mu) < \approx \text{keV}$$

$$m(\nu_\tau) < \approx \text{MeV}$$

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix}$$

$$= M.$$

$$\begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix}$$

↑
Eigenzustände
der
schwachen WW

↓
3x3
Mischungs-
matrix

↑
⊗
Massen-
Eigenzustände

2 Neutrinoarten: (Vereinbarung)

$$\nu_e = \nu_1 \cos \theta + \nu_2 \sin \theta$$

$$\nu_\mu = -\nu_1 \sin \theta + \nu_2 \cos \theta$$

reinen ν_e -Strahl (z.B. Sonne)

mit Impuls p , dann wird

daraus nach Länge L eine
Mischung aus ν_e und ν_μ

$$\nu_1(t) = \nu_1(0) \cdot e^{-iE_1 t}$$

$$\nu_2(t) = \nu_2(0) \cdot e^{-iE_2 t}$$

$$\hbar = c = 1$$

$$E_i = \sqrt{p^2 + m_i^2} \approx p + \frac{m_i^2}{2p}$$

$$\nu_e(0) = 1$$

$$\nu_\mu(0) = 0$$

$$\frac{I_e(t)}{I_e(0)} = \left| \frac{\nu_e(t)}{\nu_e(0)} \right|^2 =$$

$$1 - \sin^2(2\theta) \sin^2 \frac{(E_2 - E_1)t}{2}$$

$$E_2 - E_1 = \frac{m_2^2 - m_1^2}{2p} = \frac{\Delta m^2}{2p}$$

$p^2 \approx E^2$

$$t = \frac{L}{v} = \frac{L \cdot E}{p} \quad L = \text{Flugstrecke}$$

→

$$\frac{I_e(t)}{I_e(0)} = 1 - P(\nu_e \rightarrow \nu_\mu) = 1 - \sin^2(2\theta) \sin^2\left(\Delta m^2 \frac{L}{4E}\right)$$

Δm^2 , θ sind Parameter des Modells

Wenn es $\Delta m^2 > 0$ und $\theta \neq 0$ zwischen irgendwelchen Neutrino-Sorten gibt, sollte es Oszillationen geben.

„Disappearance“-Experimente

$\nu_e \rightarrow$ weniger ν_e
 Sonne $\rightarrow$ es kommen zu wenig ν_e an

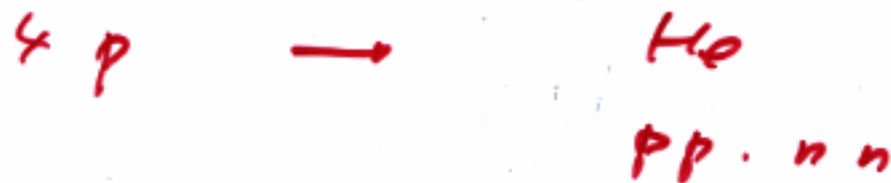
"Appearance" - Experimente



es werden Neutrinos beobachtet, die nicht erzeugt worden sind.

Sonnen - Neutrinos

entstehen im Kernfusions-Zyklus
in der Sonne



→ verschiedene Arten von
Detektoren, die
unterschiedliche Er-
Nachweis-schwellen haben.

→ über 30 Jahre hat sich
die Evidenz verdichtet,

dass zu wenige ν_e
von der Sonne als ν_e
auf der Erde ankommen
(ca. $\frac{1}{3} - \frac{1}{2}$)

⇒ Super-Kamiokande
atmosphärische Neutrinos

erwartet: $\frac{\nu_\mu}{\nu_e} = 2:1$

500 000 t Wasser - Tank

$$\nu_\mu + p \rightarrow \mu + X$$

$$\nu_e + p \rightarrow e + X$$



erzeugen
Čerenkov - Licht

Lichtkegel werden durch
riesiges Photomultiplier-Array
aufgenommen ⇒ μ und e -
Spuren sind unterscheidbar

beobachtet: $\frac{\nu_\mu}{\nu_e} \approx 1$

$\Rightarrow \nu_\mu$ verschwinden auch

$\rightarrow$ Tag-Nacht-Effekt
„Winkelverteilung“



$\frac{\nu_\mu}{\nu_e}$ hängt von der durchgewandten
Materie ab.

resonante $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ -Oszillationen
in Materie
(Mikheyev, Smirnov, Wolfenstein)
MSW-Effekt

$$\sigma_{\nu_\mu p} \neq \sigma_{\nu_e p}$$

CHORUS, NOMAD CERN
suchen nach $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$

Transformationen auf
Strecke von 600 m

Long-Baseline - Experiment:

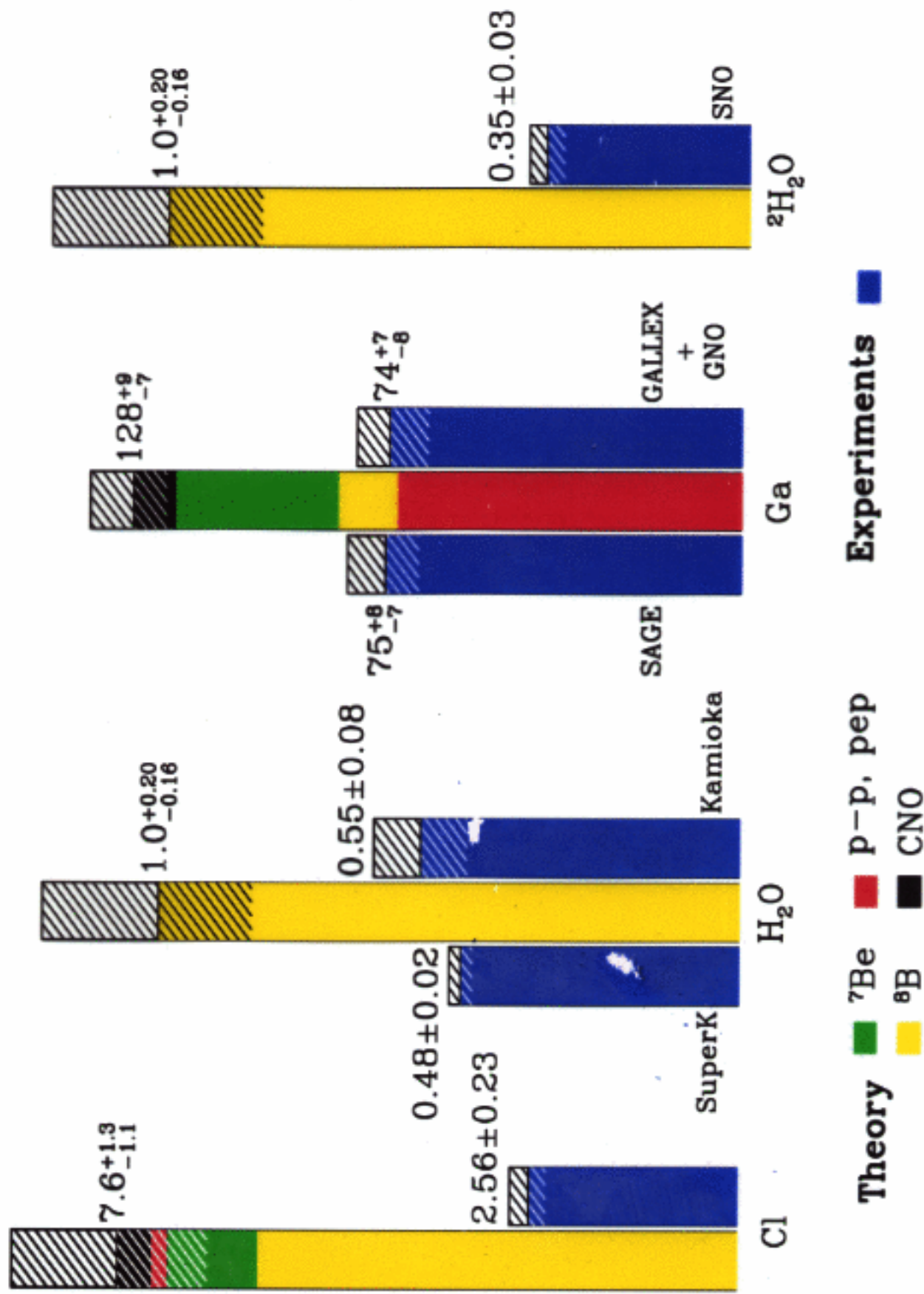
K2K 250 km

geplant: CERN - Gran Sasso
(Italien)
730 km

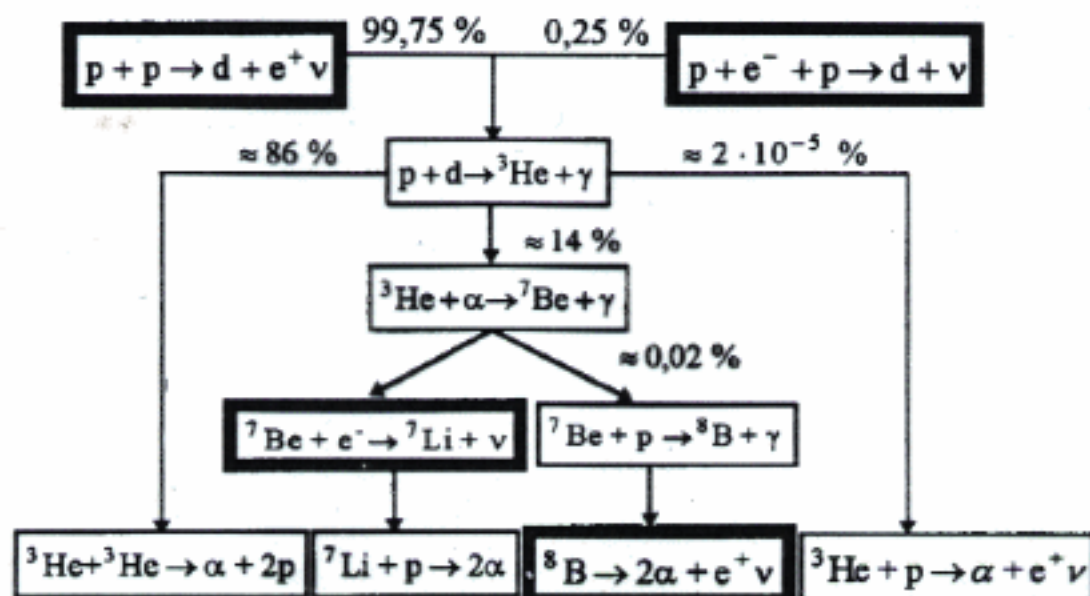
bisher erfolglos

Total Rates: Standard Model vs. Experiment

Bahcall-Pinsonneault 2000



(b) Der Wasserstoffzyklus der Sonne



(b) Das Neutrinospektrum der Sonne

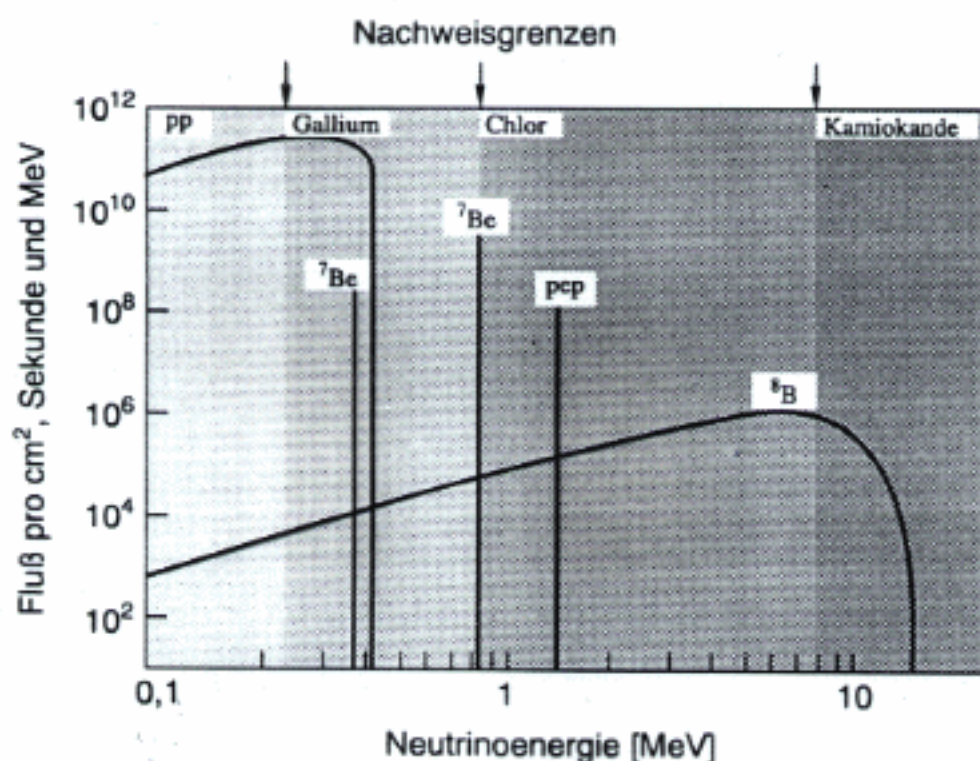
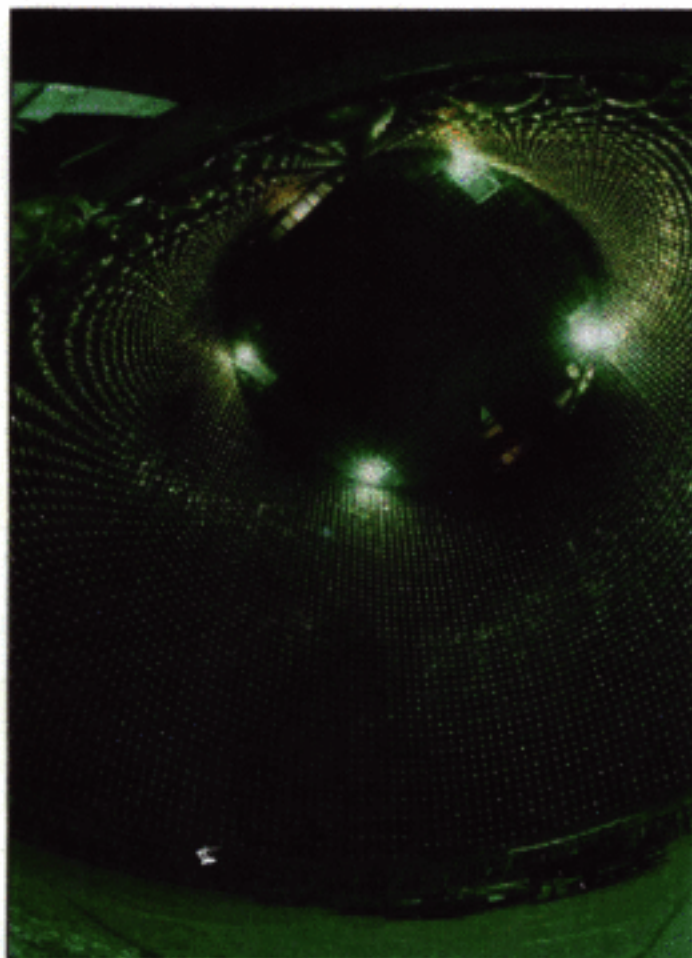
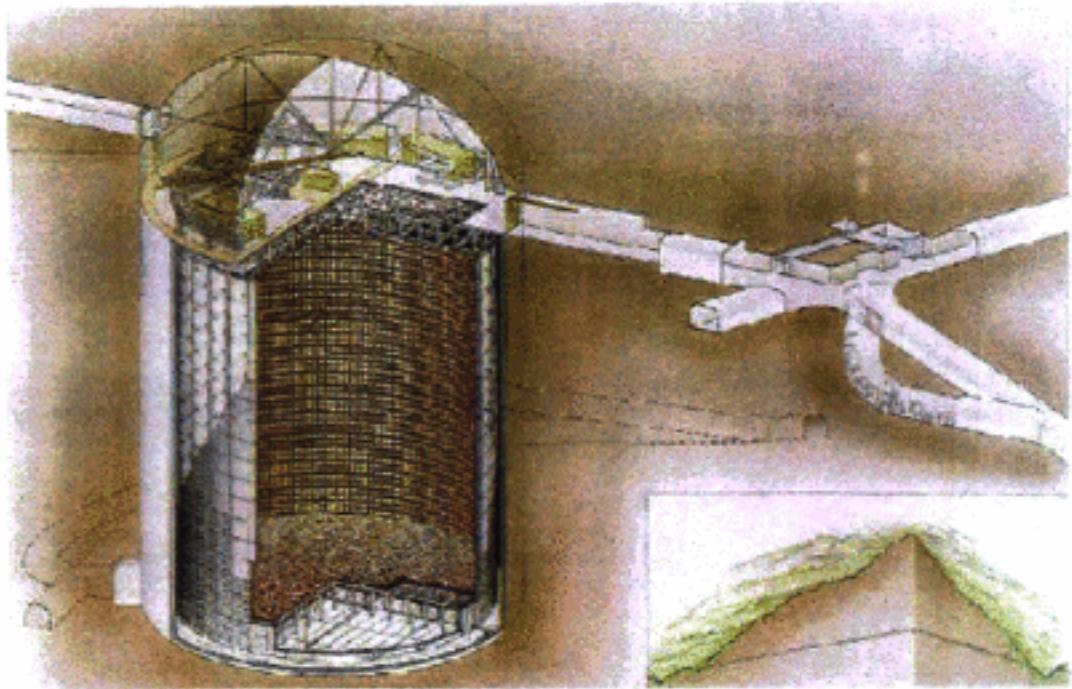


Abb. II.40: (a) Der Wasserstoff-Zyklus (wichtige Prozesse, bei denen ein Neutrino erzeugt wird, sind hervorgehoben)
 (b) Das Sonnenneutrino-Spektrum in doppeltlogarithmischer Darstellung

The Super-Kamiokande Neutrino Detector

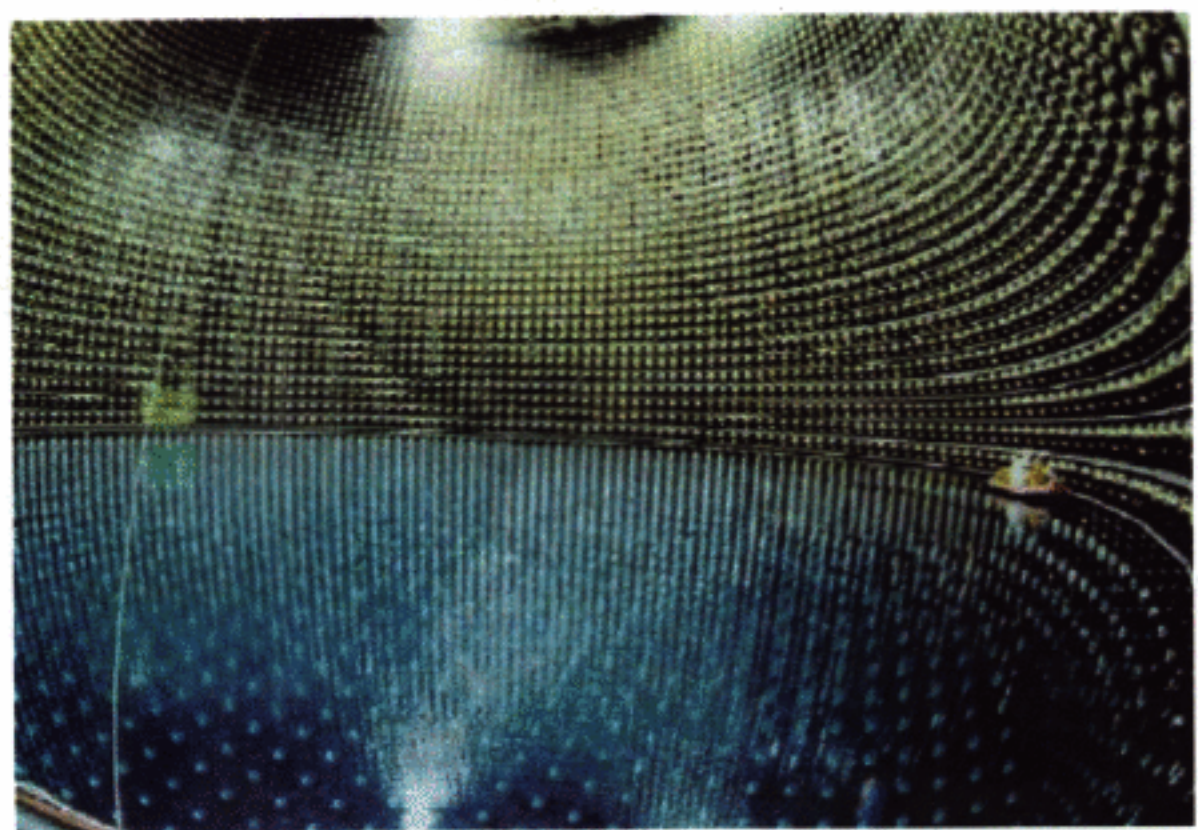


Located in Japan, Super-Kamiokande is a detector that studies the elusive particles known as neutrinos. This is a picture of the detector wall and top with about 9000 photomultiplier tubes which help detect the neutrinos



SUPERKAMIOKANDE INSTITUT FÜR EXPERIMENTELLE PHYSIK UNIVERSITÄT ZÜRICH

Schematic illustration of the Super-Kamiokande detector



Inner detector half-filled with water

Super-Kamiokande

Run 7436 Event 14054126

99-06-19:15:42.49

inner: 516 kts, 1018 ps

outer: 2 kts, 2 ps (in-time)

Trigger ID: 0x07

sp var: 0

Fully-contained

Resid(ms)

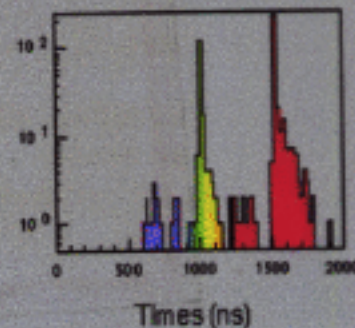
* 182
* 180-182
* 187-189
* 120-127
* 81-114
* 60-91
* 45-63
* 22-40
* 0-22
* -22-0
* -40-22
* -60-85
* -81-114
* -114-127
* -127-182
* -182

ring2

ring1

decay electron

e-like

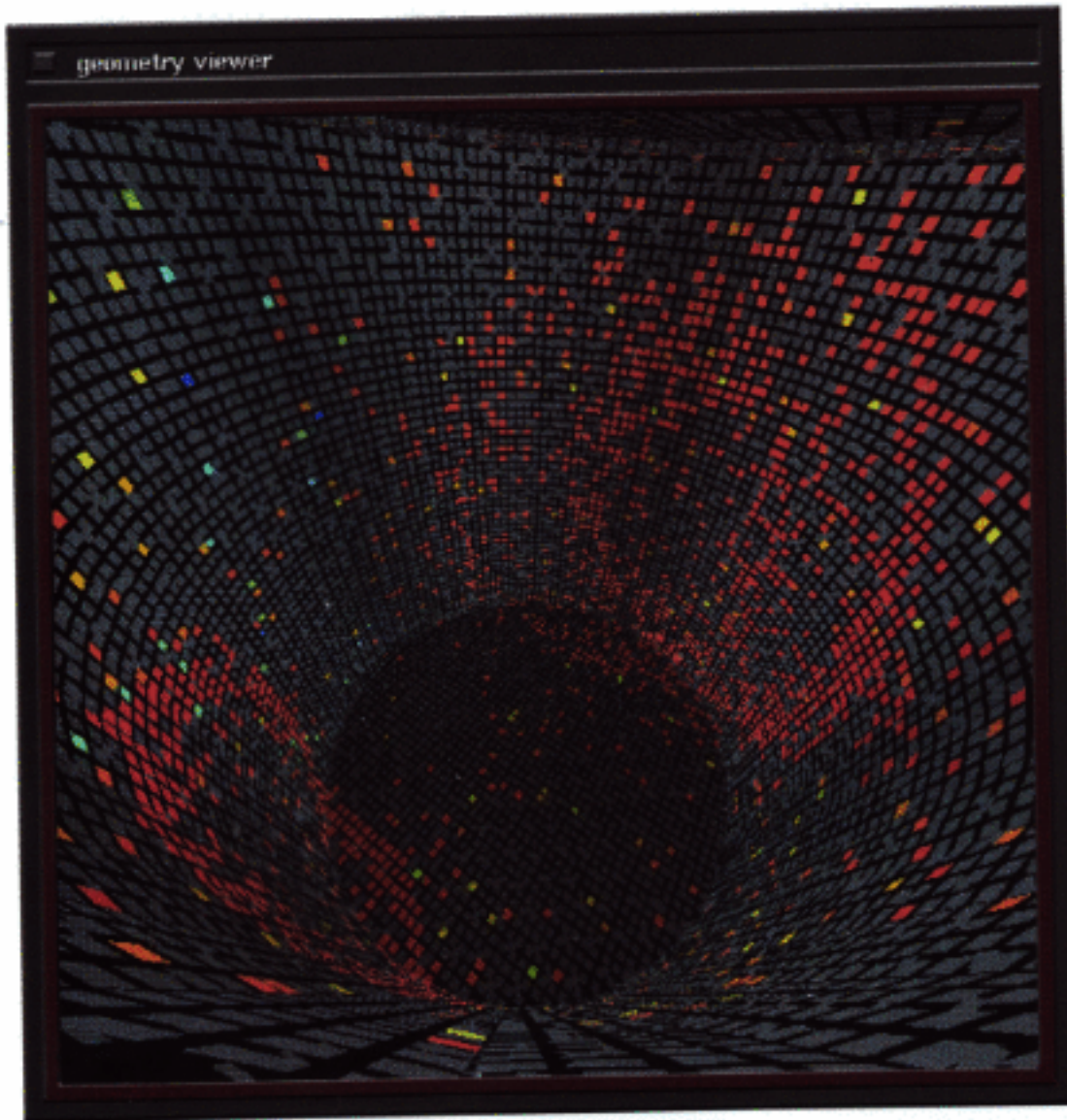


K 2 K

KEK to Kamiokande

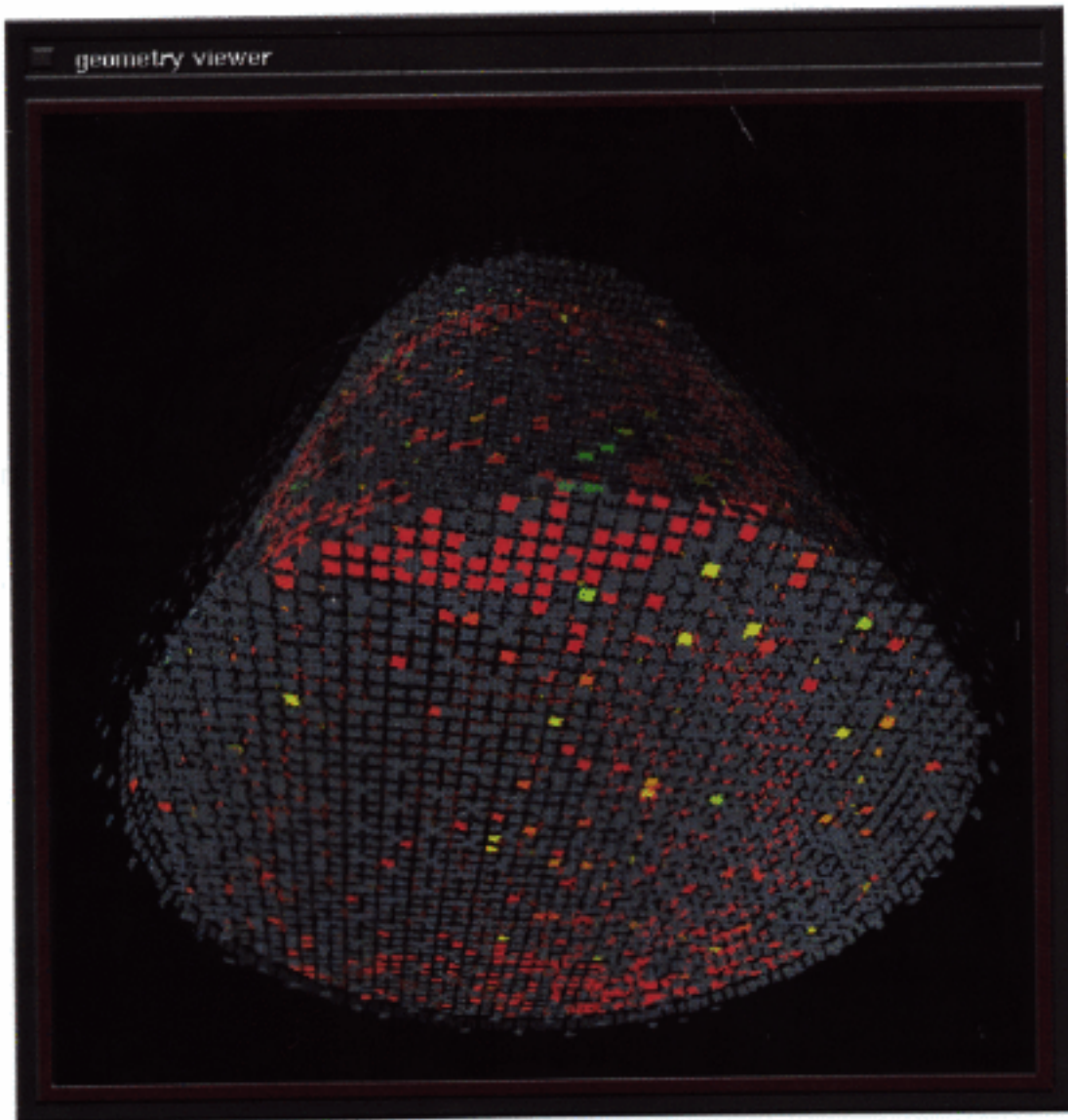
~~250~~ 250 km

Neutrino-Oscillations-Experiment



Cerenkov - Ringe von
Teilchen im
Superkamiokande -
Detektor
(von innen gesehen)

18



1. CONSERVATION
2. CONSERVATION OF SET - ty staff

(von aussen)

Nov 14

2001

Dear colleague,

As a director of the Kamioka Observatory, which owns and is responsible to operate and maintain the Super-Kamiokande detector, it is really sad that I have to announce the severe accident that occurred on November 12 and damaged the significant part of the detector.

The cause and how to deal with the loss in future will be discussed by newly found committees.

However, even before discussing with my colleagues of the Super-K and K2K collaborations, I have decided to express my intension on behalf of the staff of the Kamioka Observatory.

We will rebuild the detector. There is no question. The strategy may be the following two steps, which will be proposed and discussed among my colleagues.

1. Quick restart of the K2K experiment.

(1) We will clear the safety measures which may be suggested by the committees, (2) reduce the number density of the photomultiplier tubes by about a half, (3) use the existing resources, (4) resume the K2K experiment as soon as possible; the goal may be within one year.

2. Preparation for the JHF-Kamioka experiment.

(1) Restore the full Super-Kamiokande detector armed with the state-of-the-art techniques. (2) The detector will be ready by the time of the commissioning of the JHF machine.

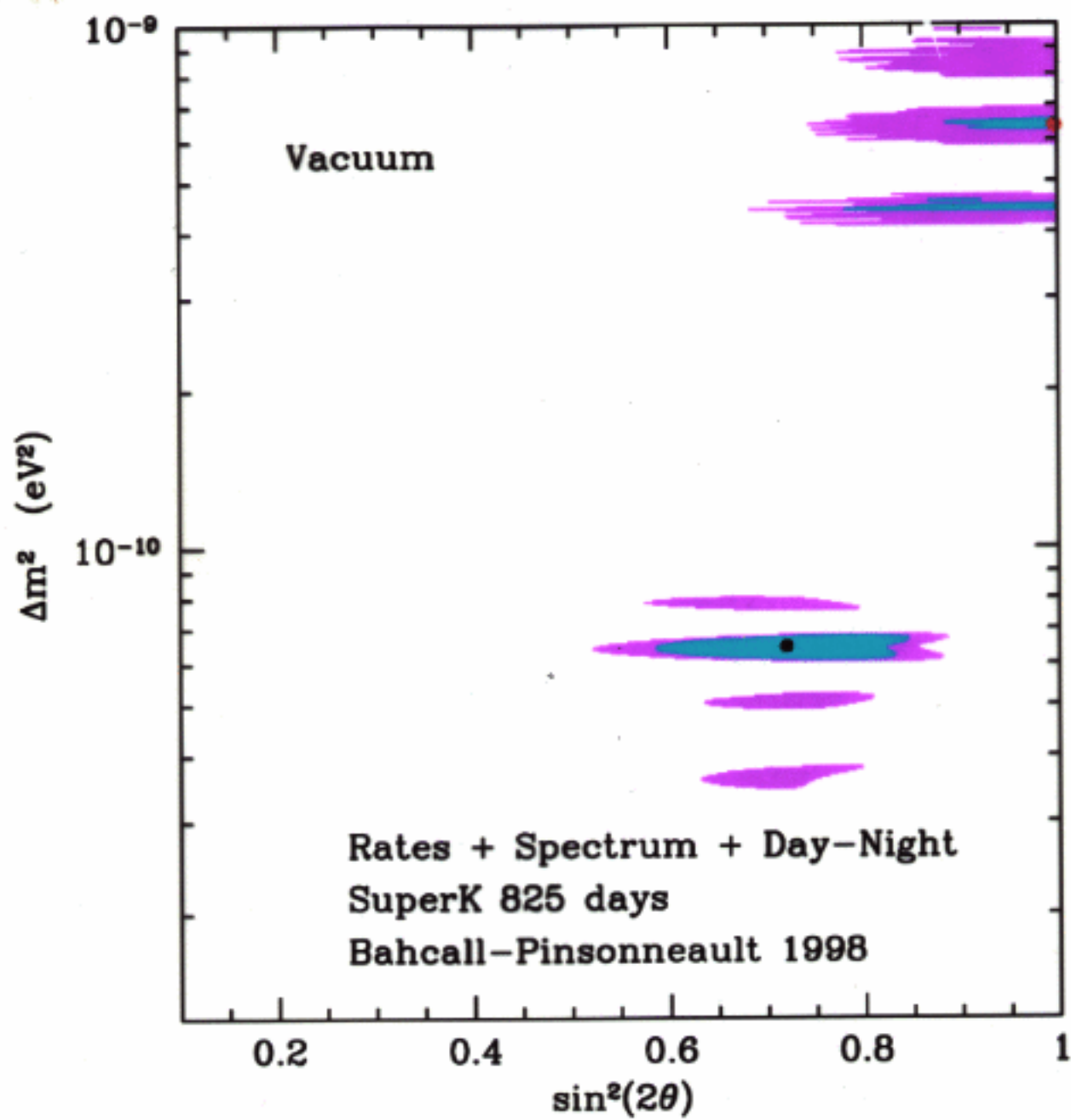
To achieve our objective is formidable but we are determined to do so. We certainly need your encouragement, advice and help. I should appreciate it very much if you could support our effort as you have kindly done so before.

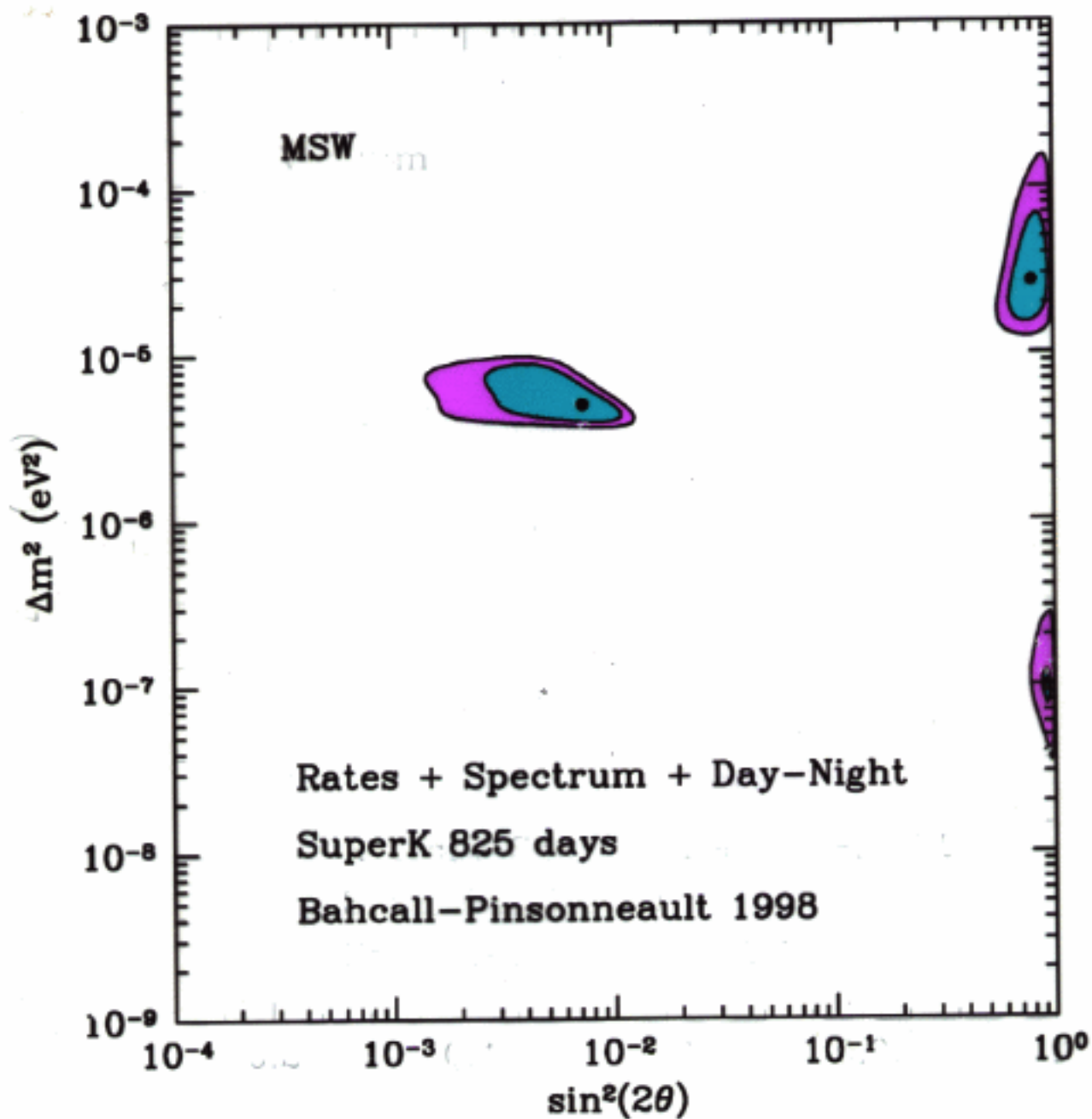
Best regards,

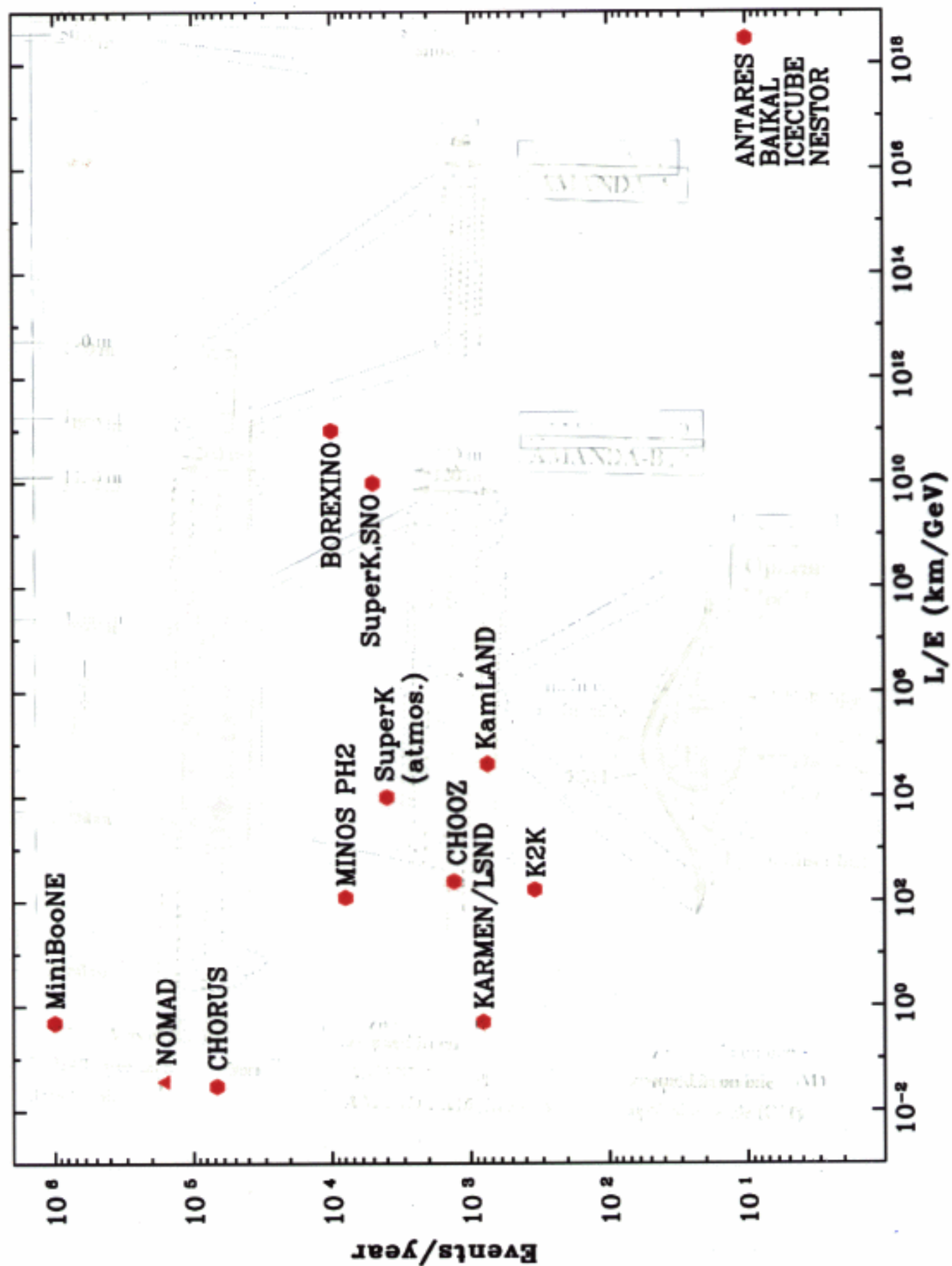
Yoji Totsuka

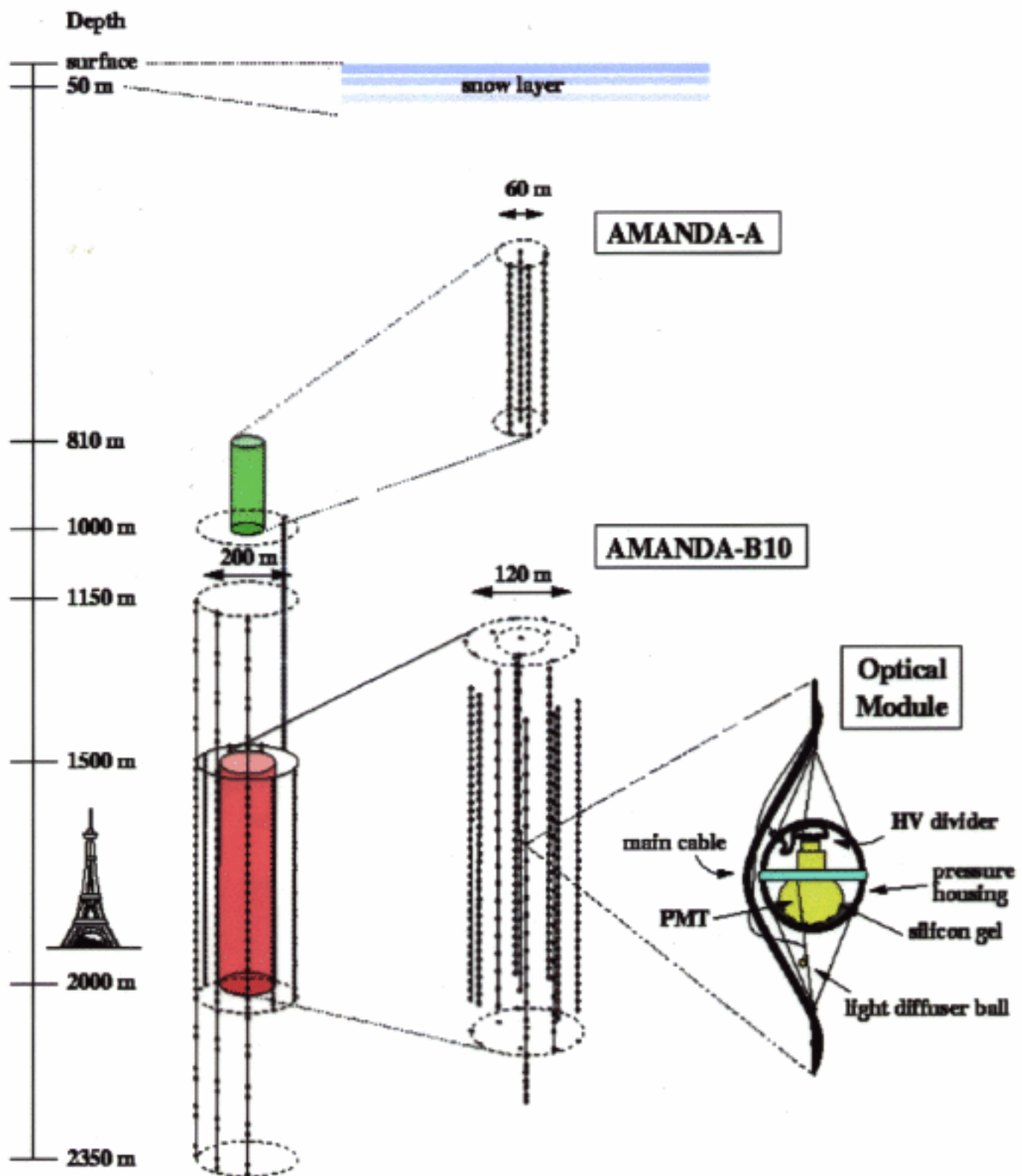
director, Kamioka Observatory

On behalf of the Kamioka Observatory staff









AMANDA as of 2000
Eiffel Tower as comparison
(true scaling)

zoomed in on
AMANDA-A (top)
AMANDA-B10 (bottom)

zoomed in on one
optical module (OM)

~~ist~~
Wenn alle Experimente
richtig sind,

müsste es ein 4. Neutrino
geben (steriles Neutrino)

→ wahrscheinlich ist ein
Experiment falsch
(Kandidat: LNSD)

↓
Konkurrenz KARMEN
(Kompet)

→
 $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$
 $\nu_e \rightarrow \nu_\tau$ Haupteffekte

SNO

Sudbury
Neutrino
Observatory

mit D_2O

(schweres Wasser)

Neutrinoeinfang: nur ν_e
Streuung an Elektronen: $\sigma(\nu_e) \gg \sigma(\nu_\mu, \nu_\tau)$
Spaltung $d \rightarrow pn$:

$$\sigma(\nu_e) = \sigma(\nu_\mu) = \sigma(\nu_\tau)$$

misst Gesamtanzahl von
solaren Neutrinos

⇒ erste Ergebnisse:

totale ν -Rate stimmt
mit Theorie überein

