

Přednáška 10 (10.12.2007)

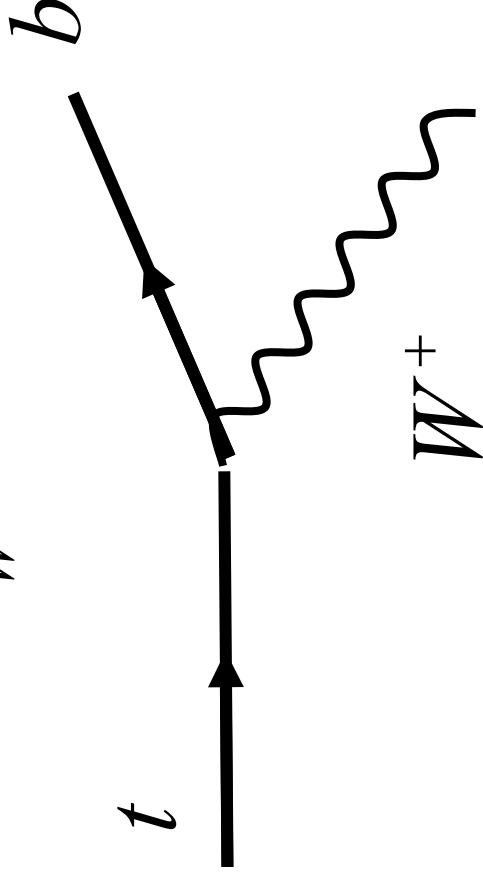
- Kvark t.
- Leptony.
- Oscilace neutrin.

Top kvark

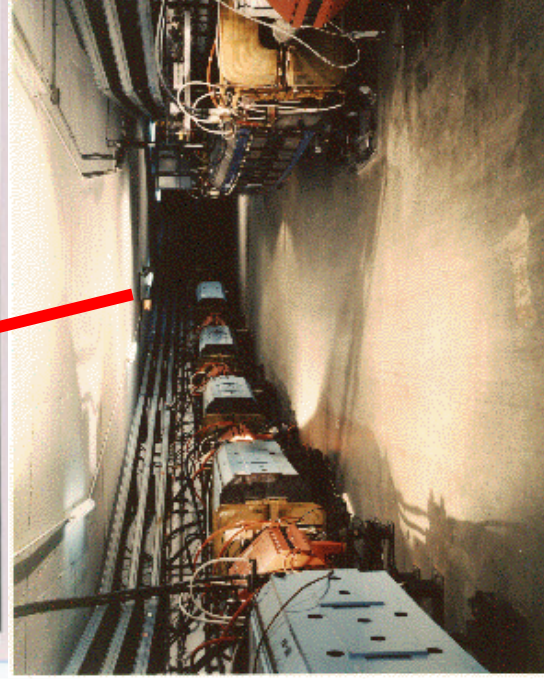
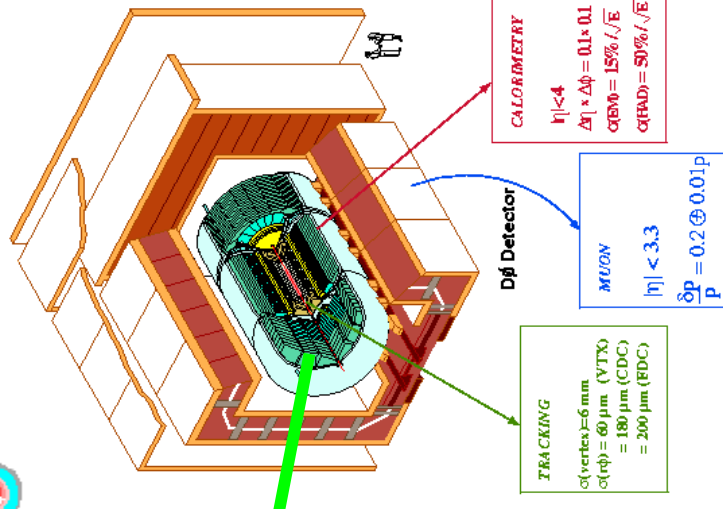
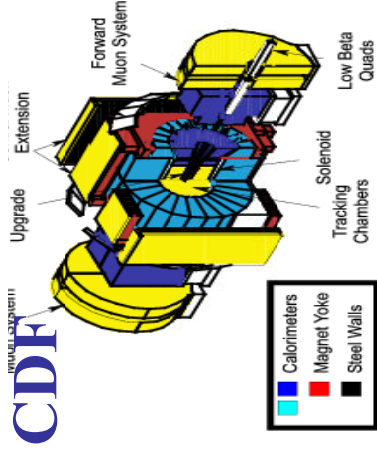
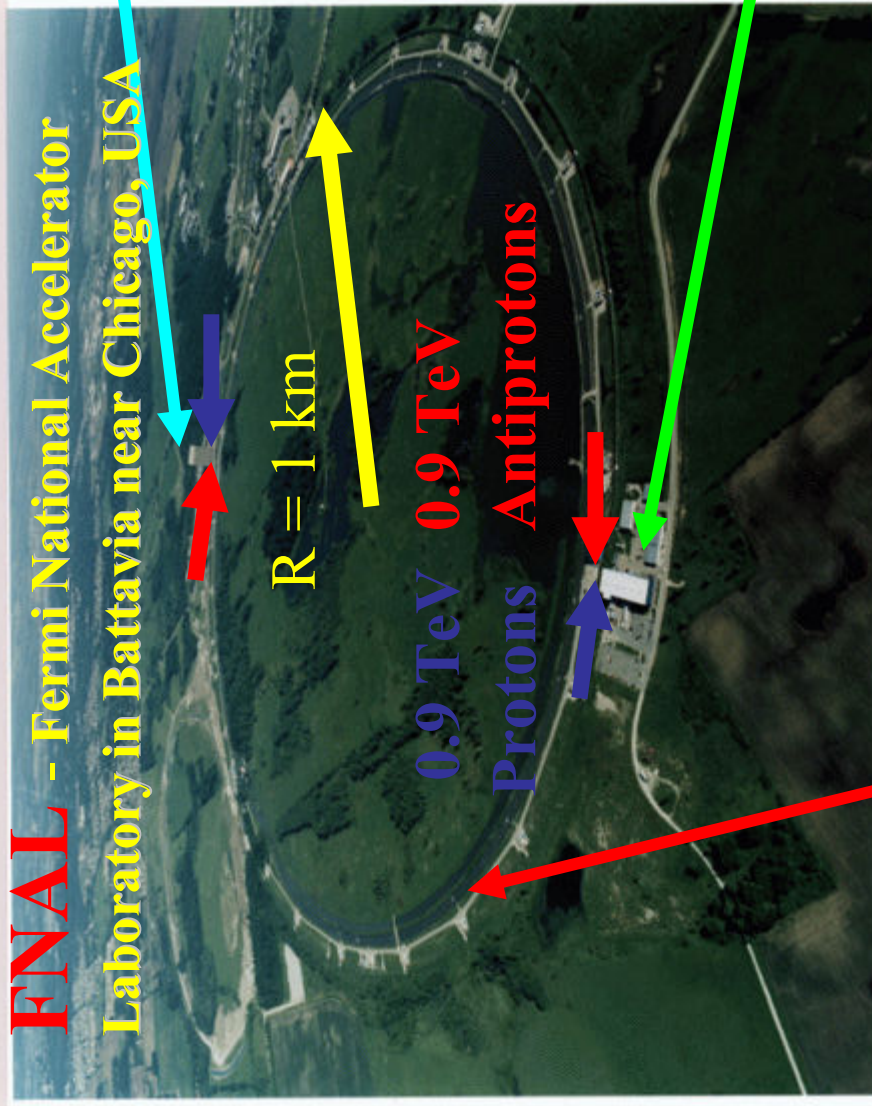
Byl objeven v experimentech na urychlovači TEVATRON ve FNAL (Fermi National Accelerator Laboratory) v městečku Batavia, nedaleko Chicaga v USA

Top je těžší než W boson a okamžitě se na něj rozpadá, tj. neexistují barzony a mezony obsahující top kvark.

$$m_t = 172 \text{ GeV} > m_W = 80 \text{ GeV}$$



FNAL - Fermi National Accelerator Laboratory in Battavia near Chicago, USA

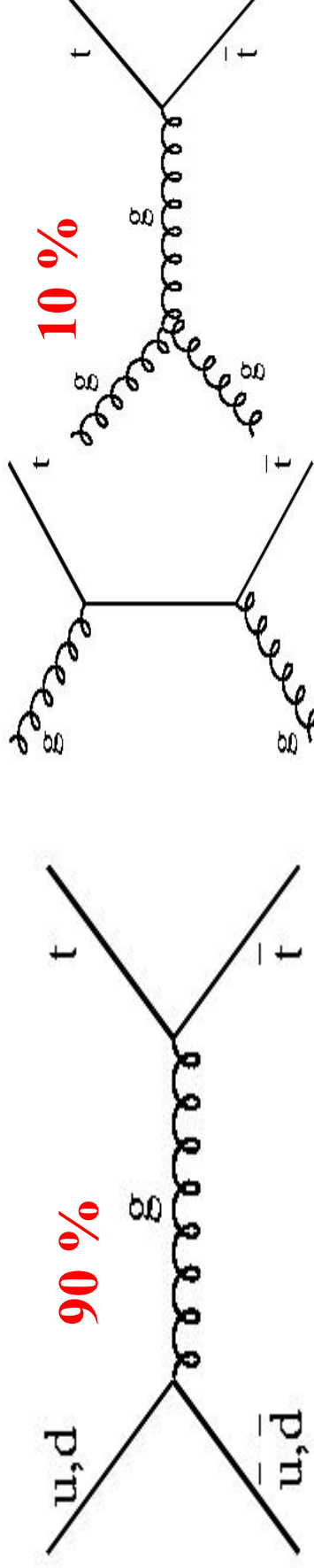


D0

The DØ Collaboration

<p>Arizona, AZ LBNL & UC Berkeley, CA UC Davis, CA UC Irvine, CA UC Riverside, CA Cal State, Fresno, CA Florida State, FL FNAL, IL Illinois, Chicago, IL Northern Illinois, IL Northwestern, IL Indiana, IN Notre Dame, IN Iowa State, IA Kansas, KS Kansas State, KS Louisiana Tech, LA Maryland, MD Boston, MA Northeastern, MA Michigan, MI Michigan State, MI Nebraska, NE Columbia, NY Rochester, NY SUNY, Stony Brook, NY BNL, NY Langston, OK Oklahoma, OK Brown, RI UT Arlington, TX Texas A&M, TX Rice, TX Washington, WA</p>	<p>ISN, IN2P3, Grenoble CERN, IN2P3, Marseille LAL, IN2P3, Orsay LPHI, IN2P3, Paris DAPHNISP, CEA, Saclay</p> <p>JINR, Dubna ITEP, Moscow Moscow State IHEP, Plovdiv PNPI, St. Petersburg</p> <p>Lancaster Imperial College, London Manchester</p>	<p>INP, Moscow</p> <p>NIKHEF, Amsterdam Amsterdam Nijmegen</p> <p>CINVESTAV, Mexico City</p> <p>Panjab U., Chandigarh Delhi U., Delhi Tata Institute, Mumbai</p> <p>LAFEX, CBPF, Rio de Jan. Rio de Janeiro State IFT, Paulista State</p> <p>Eurasian Atoms Ann-Helton, UC Riverside</p>	<p>Academy of Sciences Charles U., Prague Czech Tech. U., Prague</p> <p>San Francisco de Quito</p>
---	--	---	--

Produkce a vlastnosti top kvarku

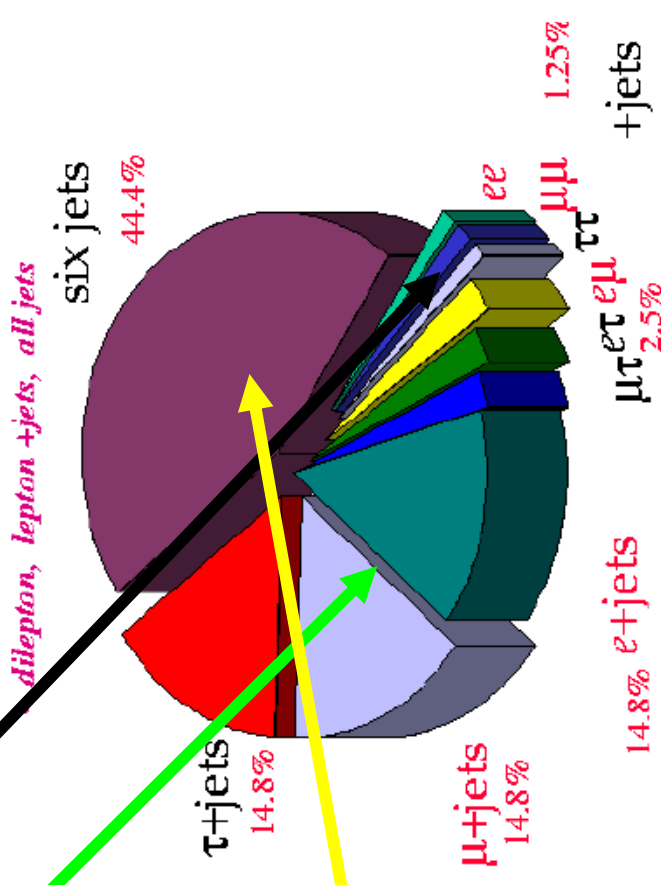


Top kvark je produkován zejména v párech **silnou interakcí** kvarků a gluonů a rozpadá se na **intermediální boson W** a **b kvark**.

- **kvark je mnohem těžší než W boson** a rozpadá se velmi rychle na **b kvark** a **W boson**.
- **Má velmi krátkou dobu života ($ct = 0.15 \text{ fm}$, 1 fm je přibližně rozměr protonu)**, stejná charakteristika pro s kvarky je cm až m, pro c kvark asi 100 mikrometrů a b kvark 300 mikrometrů.
- **Doba života top kvarku je kratší než doba potřebná k formování vázaného stavu s jiným kvarkem**, tj. s největší pravděpodobností neexistují **T-mesony** nebo **baryony** (tj. částice obsahující top kvark).

Možné koncové stavy t -anti t párů

- At the Tevatron, top quarks are mainly pair-produced via $q\bar{q} \rightarrow t\bar{t} (\approx 90\%)$ and $g\bar{g} \rightarrow t\bar{t} (\approx 10\%)$
- Assuming standard model couplings,
 - » $\text{BR}(t \rightarrow Wb) = 100\%$
 - » Categorize Channels by W Decay Mode
 - $W \rightarrow l\nu$, lepton
 - $W \rightarrow q\bar{q}'$, “jets”



Leptony

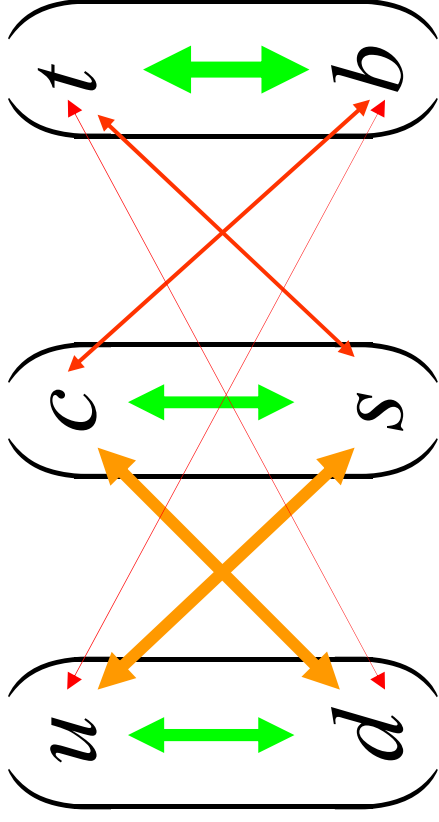
$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ e^- \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} \nu_\mu \\ \mu^- \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} \nu_\tau \\ \tau^- \end{pmatrix}$$

a jejich antičástice.

Slabé interakce mohou měnit vůni kvarků, dokonce mezi jednotlivými pokoleními (rodinami)



Slabé interakce mohou měnit typ leptonů pouze v rámci daného pokolení (rodiny)

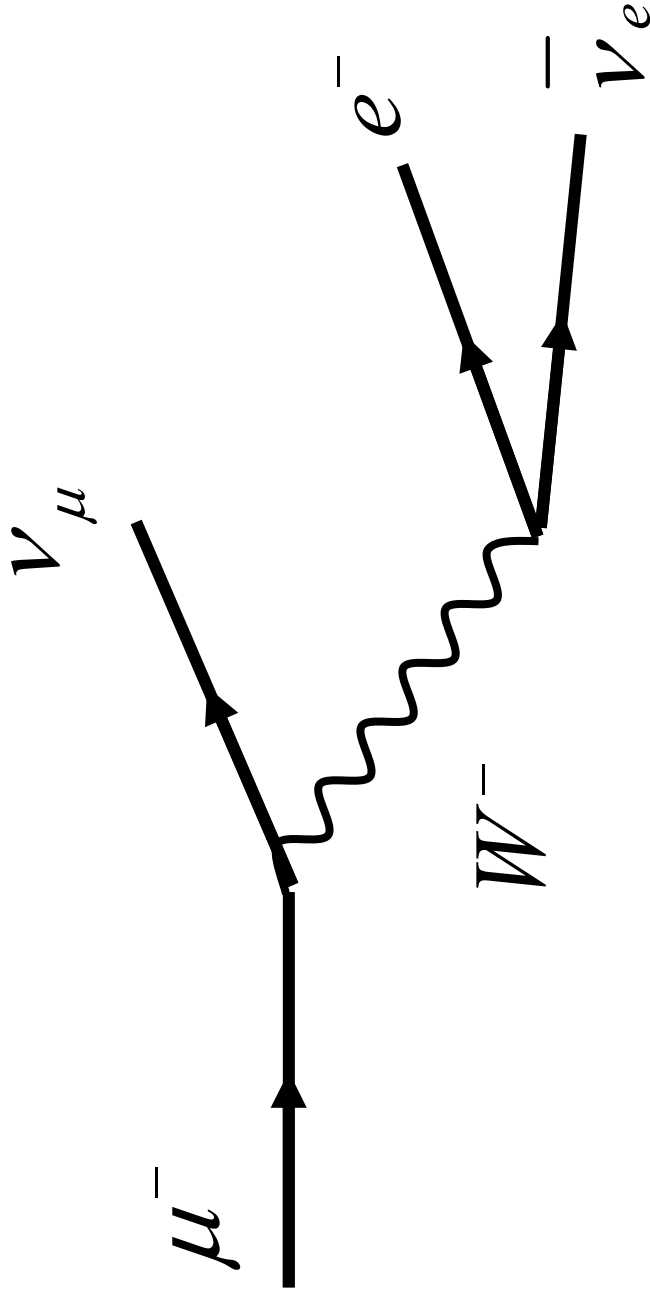
$$\begin{pmatrix} \nu^e & \longleftrightarrow & e^- \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} \nu^\mu & \longleftrightarrow & \mu^- \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} \nu^\tau & \longleftrightarrow & \tau^- \end{pmatrix}$$

Proto se zachovává nejenom celkové leptonové číslo, ale i leptonové číslo daného typu, tj. L_e , L_μ , L_τ

Mion

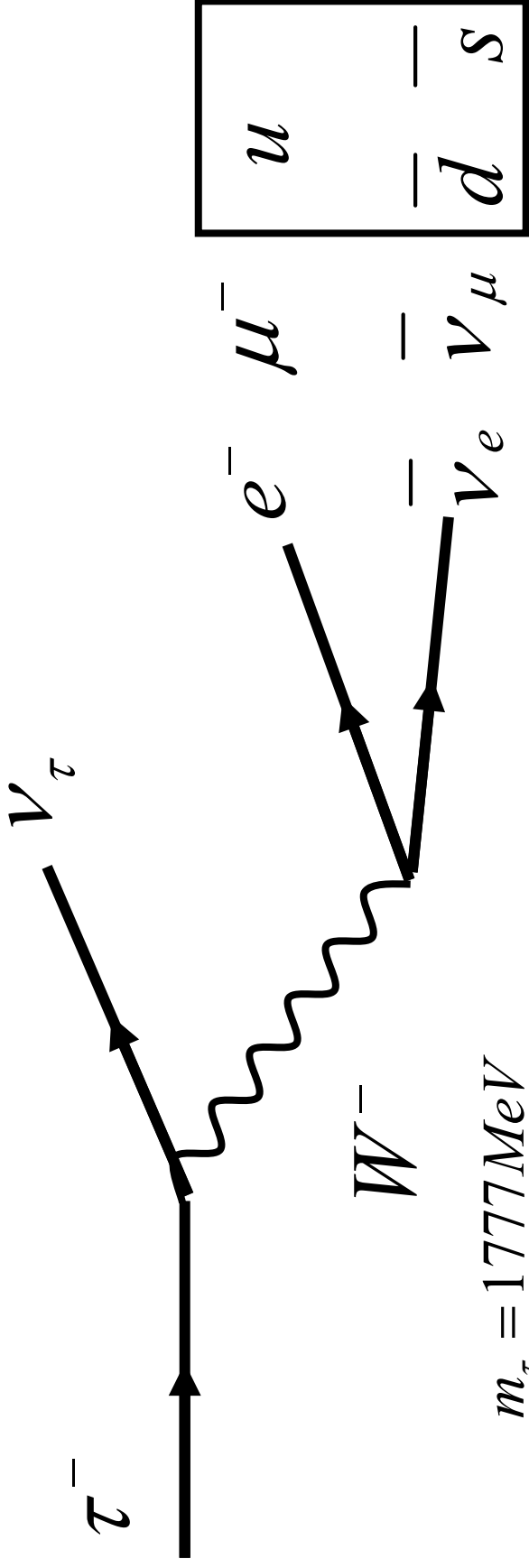


$$m_\mu = 105,66 \text{ MeV}$$

$$\mu^- \rightarrow e^- + \nu_\mu + \bar{\nu}_e$$

$$c\tau = 658,7 \text{ m} \Rightarrow \tau = 2,20 \mu\text{s}$$

Lepton tau = Tauon



$$m_\tau = 1777 \text{ MeV}$$

$$\tau^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_\tau + \nu_e \quad 18\%$$

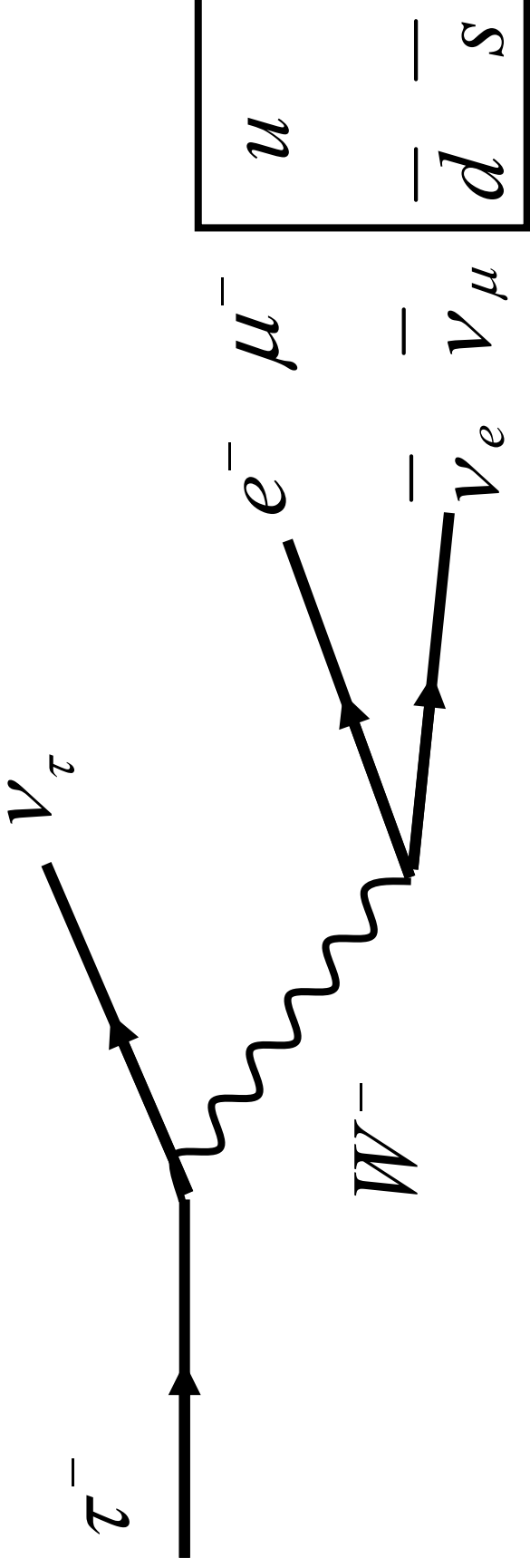
$$\tau^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\tau + \nu_\mu \quad 18\%$$

$$\tau^- \rightarrow \text{hadron}(s)^- + \nu_\tau \quad 64\%$$

$$c\tau = 87 \mu\text{m} \Rightarrow \tau = 0,000290 \text{ ns} = 290 \text{ fs}$$

$$\pi^-, K^-, \dots$$

Doba života tauonu je mnohem menší než mionu, protože doba života je nepřímo úměrná páté mocnině hmoty:



$$\Gamma[\text{GeV}] \approx G_F^2 [\text{GeV}^{-4}] \cdot M^5 [\text{GeV}^5] \Rightarrow \frac{\Gamma_{\tau \rightarrow e}}{\Gamma_{\mu \rightarrow e}} = \left(\frac{m_\tau}{m_\mu} \right)^5 = 1,3 \cdot 10^6$$

$$c\tau(\mu) = 660m \Rightarrow c\tau(\tau \rightarrow e) = 660m / 1,3 \cdot 10^6 = 508 \mu m$$

$$508 \cdot 18\% = 91 \mu m$$

Rozpad neutronu a beta rozpady jader:

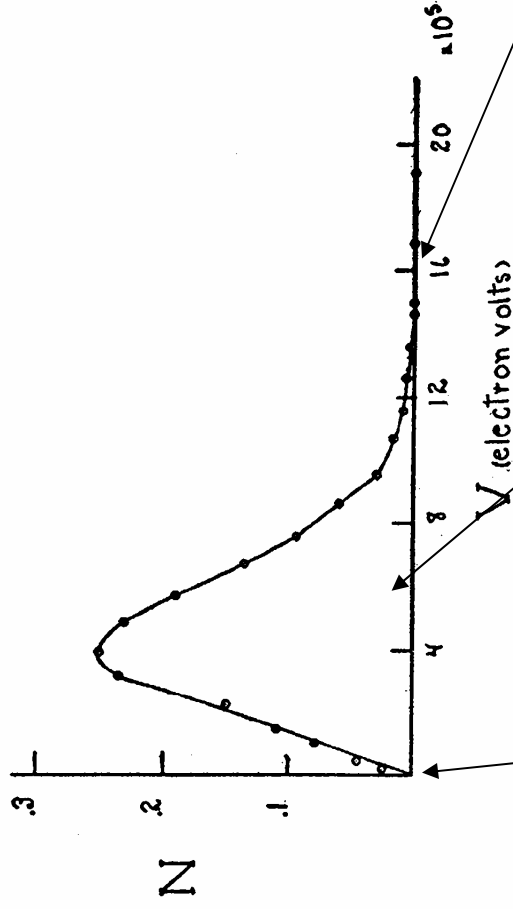
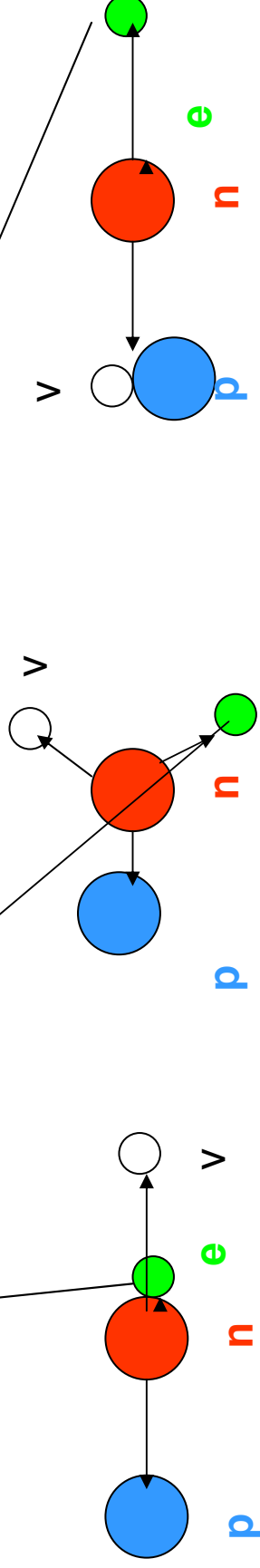


FIG. 5. Energy distribution curve of the beta-rays.



Bohr: At the present stage of atomic theory, however, we may say that we have no argument, either empirical or theoretical, for upholding the energy principle in the case of beta-ray disintegrations

Předpovězení neutrina W. Pauli 1930

Original - Published up Dec 1933
Abschrift/15.12.56 74

Offener Brief an die Gruppe der Radioaktiven bei der
Gesellschafts-Festung zu Tübingen.

Abschrift

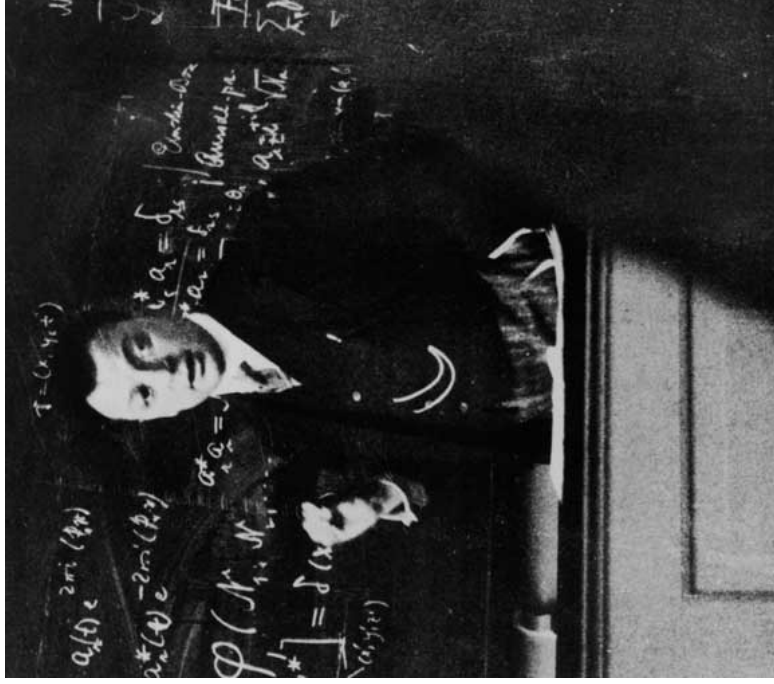
Physikalisches Institut
der Eidg. Technischen Hochschule
Zürich

Zürich, 4. Dez. 1930
Dürrenstrasse

Liebe Radioaktive Damen und Herren,

Wie der Überbringer dieser Zeilen, den ich halbvollendet
ansubstanzieren bitte, Ihnen das näherem auseinanderzusetzen wird, bin ich
angesichts der "falschen" Statistik der β - und α -Kerne, sowie
des kontinuierlichen β -Spektrums auf einen verweifelten Ausweg
verfallen um den "Wechselstrom" (1) der Statistik und den Energiezustand
zu retten. Mithin die Möglichkeit, es könnten elektrisch neutrale
Teilchen, die ich Neutronen nennen will, in den Kernen existieren,
welche den Spin $1/2$ haben und das Ausschliessungsprinzip befolgen und
sich von Lichtquanten ausserdem noch dadurch unterscheiden, dass sie
sich mit Lichtgeschwindigkeit laufen. Die Masse der Neutronen
müsste von derselben Größenordnung wie die Elektronenmasse sein und
jedemfalls nicht grösser als 0,01 Protonenmasse. Das kontinuierliche
 β -Spektrum wäre dann verständlich unter der Annahme, dass beim
 β -Zerfall mit dem Elektron jeweils noch ein Neutron emittiert
wird, d.h. dass die Summe der Energien von Neutron und Elektron
konstant ist.

Předpovězení a objev neutrina



Wolfgang Pauli:

"I have done something very bad today by proposing a particle that cannot be detected; it is something no theorist should ever do."

$$n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$$

$$^AX_Z \rightarrow ^AY_{Z+1} + e^- + \bar{\nu}_e$$



Clyde Cowan Jr.

Objet neutrino - Reines and Cowan

$$n \rightarrow p + e^{-} + \bar{\nu}_e$$

$$\bar{\nu}_e + p \rightarrow n + e^{+}$$



Frederick Reines



Jak vznikají antineutrína v reaktorech



Vzniklá jádra mají příliš mnoho neutronů = nacházejí se mimo údolí stability.
Stabilita je pak dosažena beta-rozpady.
Průměrně vzniká 6 antineutrin na každé rozštěpené jádro

Detekce antineutrin:

Positron anihiluje a vznikají

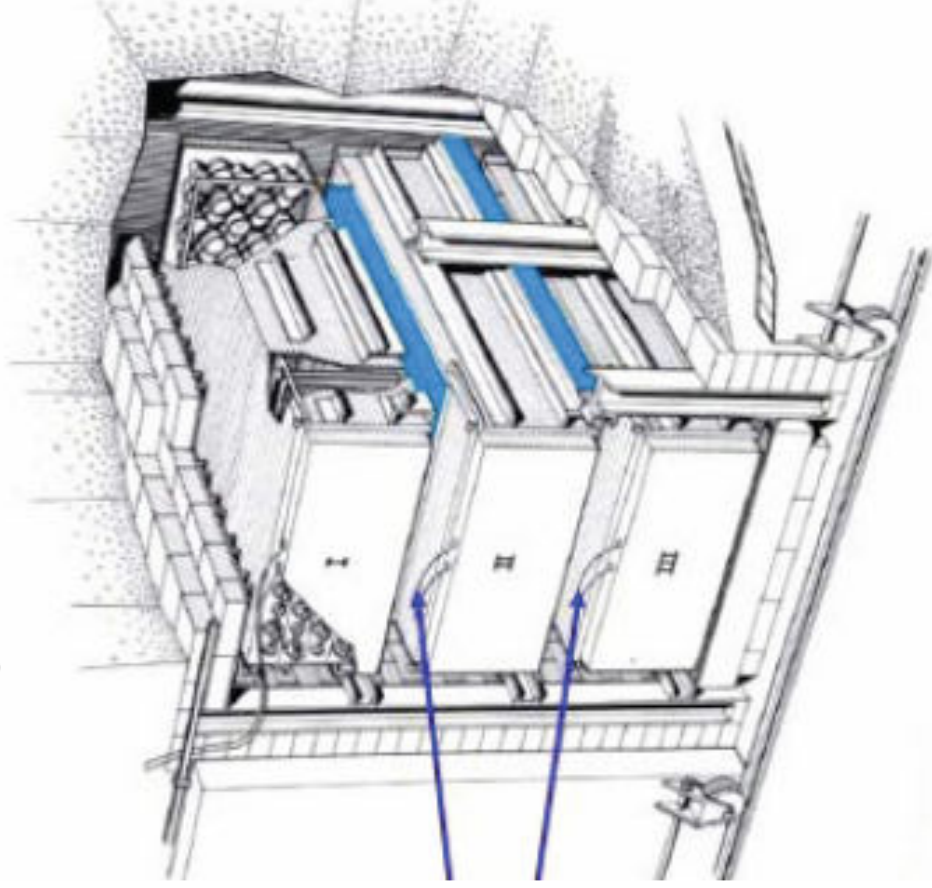
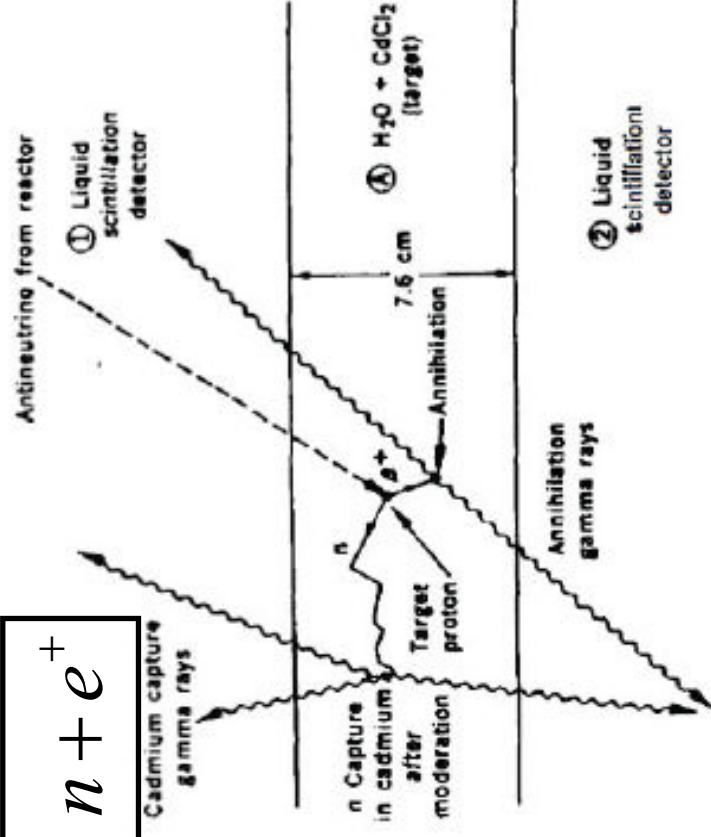
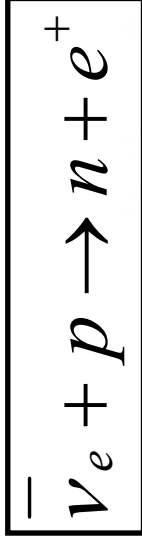
dvě 511 keV gamma

Neutron se zpomaluje a je

zachycen kadmíem a vzniká

několik gama kvant

s energiemi MeV



15.6.1956: Telegram Cowena a Reinese Paulimu - oznamují objev neutrin

RADIOGRAMM - RADIOGRAMME RADIO-GRAMME S.A.

SBZ1311 ZHV UN1844 FM BZJ116 MH CHICAGOILL 56 14 1310

PLC 00253

VIA RADIOGRAMME

NEWYORK

Brilletelegramm

LT

74 15 JUL 56 -1 70

PROFESSOR W. PAULI
ZURICH UNIVERSITY ZURICH ①

Per Post

NACHLASS
PROF. W. PAULI

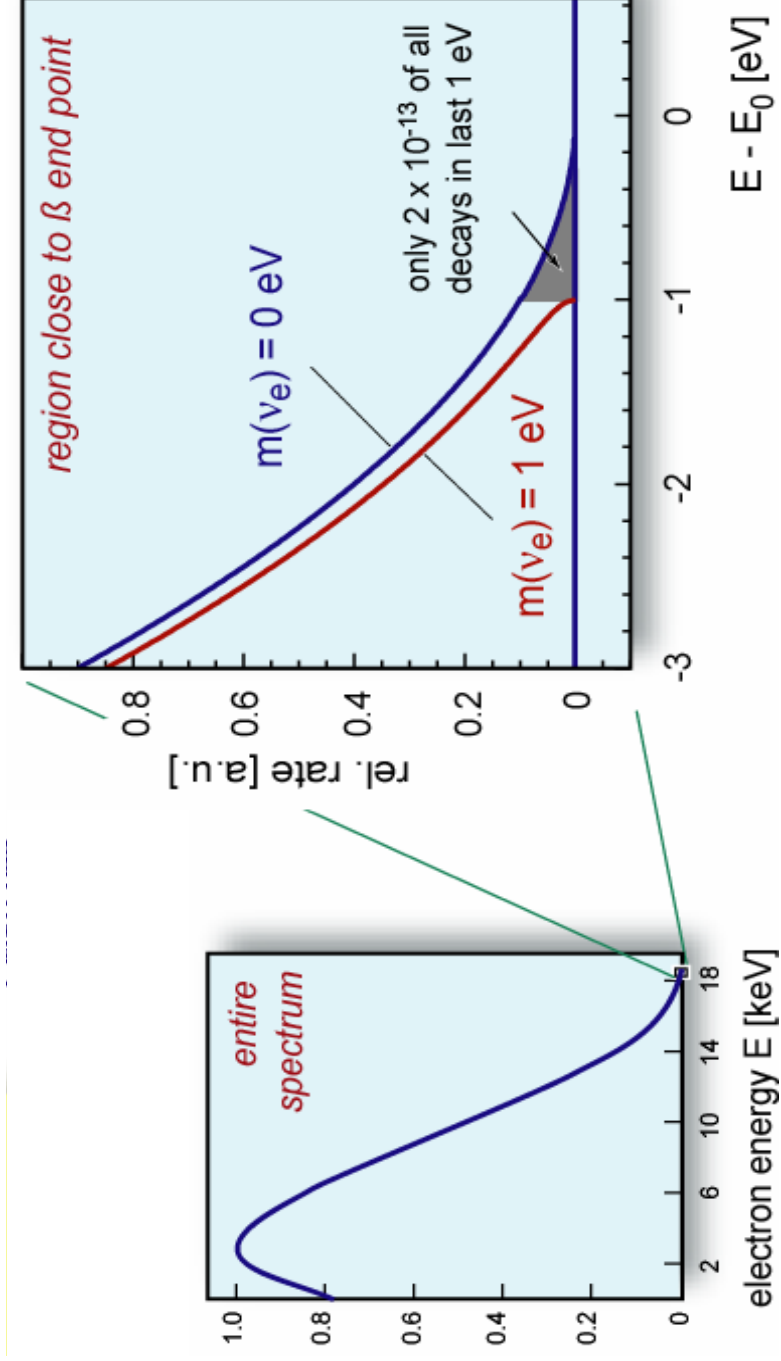
NACHLASS
PROF. W. PAULI

WE ARE HAPPY TO INFORM YOU THAT WE HAVE DEFINITELY DETECTED NEUTRINOS FROM FISSION FRAGMENTS BY OBSERVING INVERSE BETA DECAY OF PROTONS OBSERVED CROSS SECTION AGREES WELL WITH EXPECTED SIX TIMES TEN TO MINUS FORTY FOUR SQUARE CENTIMETERS

FREDERICK REINES AND CLYDE COWN

Přímé měření hmoty elektronového antineutrína

Měří se přesně konec spektra elektronů produkovaných v beta rozpadu




Hmota mionového neutrina

Principle

$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$ (Two body decay)

Decay at rest:



$$|\vec{p}_\nu| = |\vec{p}_\mu|$$

$$m_\pi = E_\nu + E_\mu$$

$$\rightarrow m_\nu^2 = m_\pi^2 + m_\mu^2 - 2 \cdot m_\pi \cdot \sqrt{m_\mu^2 + p_\mu^2}$$

Tři veličiny musí být změřeny s velkou přesností. Hmoty mionu a pionu jsou nejpřesněji známy z měření spekter mionových a pionových atomů, tj. když je elektron nahrazen mionem anebo záporným pi mezonem.

Hmotnost mionového neutrina

PDG2006

ν MASS (muon based)

VALUE (MeV)	CL%	DOCUMENT ID	TECN	COMMENT
<0.19 (CL = 90%) OUR EVALUATION				
<0.17	90	²⁶ ASSAMAGAN	96 SPEC	$m_{\nu}^2 = -0.016 \pm 0.023$

Possible future improvement:



$m_{\nu} < 8$ keV

NuMass collaboration, g-2 storage ring experiment, comparing the pion and muon momenta in flight.

NuMass homepage: <http://www.hep.umn.edu/numass/>

R. Leitner Fyzika V- Přednáška 10

Hmoty Tau neutrina

Metoda: přesné měření invariantní hmoty hadronů a jejich energie v rozpadech tau na mnoho pionů

$$\tau^-(E_\tau, \mathbf{p}_\tau) \rightarrow h^-(E_h, \mathbf{p}_h) + \nu_\tau(E_\nu, \mathbf{p}_\nu)$$

- V klidovém systému tau leptonu je energie hadronového systému funkcí jeho hmoty a hmoty tau neutrina:

$$E_h^* = \frac{m_\tau^2 + m_h^2 - m_\nu^2}{2m_\tau}$$

- $m_\nu(\tau)$ lze vzpočítat, známe-li m_h and E_h^*

Tau neutrino mass

ν MASS (tau based)

VALUE (MeV)	CL%	EVTs	DOCUMENT ID	TECN	COMMENT
< 18.2	95		31 BARATE	98F ALEP	1991–1995 LEP runs

31 BARATE 98F result based on kinematics of $2939 \tau^- \rightarrow 2\pi^- \pi^+ \nu_\tau$ and $52 \tau^- \rightarrow 3\pi^- 2\pi^+ (\pi^0) \nu_\tau$ decays. If possible 2.5% excited a_1 decay is included in 3-prong sample analysis, limit increases to 19.2 MeV.

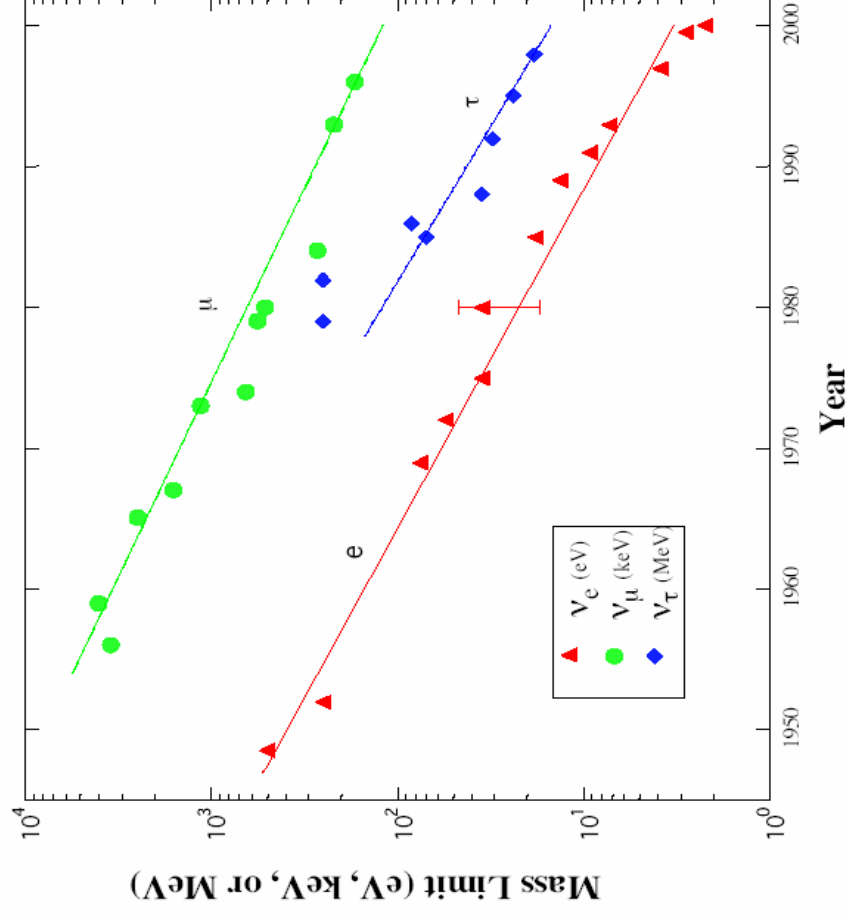
• • • We do not use the following data for averages, fits, limits, etc. • • • **(23 entries**

< 28	95		32 ATHANAS	00 CLEO	$E_{\text{cm}}^{ee} = 10.6 \text{ GeV}$
< 27.6	95		33 ACKERSTAFF	98T OPAL	1990–1995 LEP runs
< 30	95	473	34 AMMAR	98 CLEO	$E_{\text{cm}}^{ee} = 10.6 \text{ GeV}$
< 60	95		35 ANASTASSOV	97 CLEO	$E_{\text{cm}}^{ee} = 10.6 \text{ GeV}$
< 0.37 or > 22			36 FIELDS	97 COSM	Nucleosynthesis
			K. LEITER Fyzika v - Fyzika 10		

$m(\nu_e)$: tritium β -decay ${}^3\text{H} \rightarrow {}^3\text{He} + e^- + \nu_e$

$m(\nu_\mu)$: pion-decay $\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$

$m(\nu_\tau)$: tau hadr. decay $\tau \rightarrow 5\pi + \nu_\tau$



$m(\nu_\mu) < 190 \text{ keV (PDG2006)}$

$m(\nu_\tau) < 18.2 \text{ MeV (PDG2006)}$

$m(\nu_e) < 2 \text{ eV (PDG2006)}$

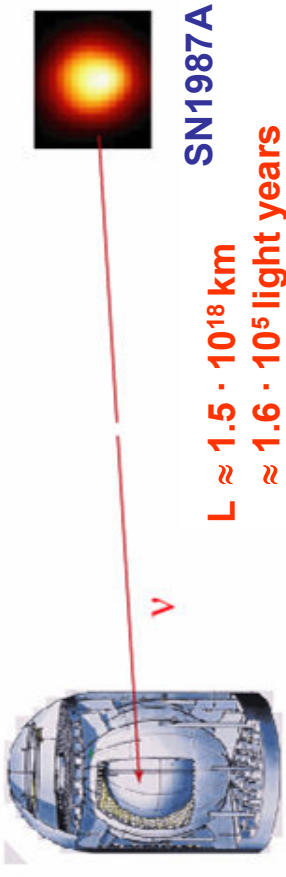
Omezení na hmotu neutrin z výbuchu supernovy SN1987A

Měření doby letu:

$$E^2 = m^2 c^4 + p^2 c^2$$

Neutrino s hmotou m , E ($m^2 \ll E^2$)

$$\Delta t = t_E - t_{SN} = \frac{L}{c} \cdot \left[1 + \frac{m^2 c^4}{2E^2} \right]$$



Dvě neutrina with m , E_1 , E_2

$$t_{E1} - t_{E2} = (t_{SN1} - t_{SN2}) + \frac{L}{c} \cdot \frac{m^2 c^4}{2} \left[\frac{1}{E_1^2} - \frac{1}{E_2^2} \right]$$

Omezení na hmotu neutrin z výbuchu supernovy SN1987A

Měření doby letu:

$$E^2 = m^2 c^4 + p^2 c^2$$

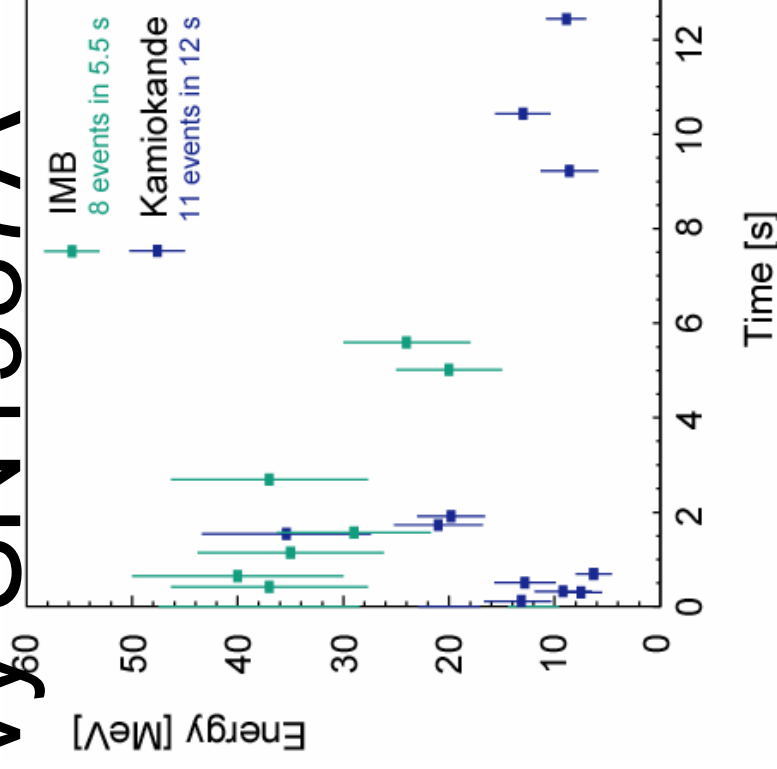
Neutrino s hmotou m , E ($m^2 \ll E^2$)

$$\Delta t = t_E - t_{SN} = \frac{L}{c} \cdot \left[1 + \frac{m^2 c^4}{2E^2} \right]$$

Dvě neutrina with m , E_1 , E_2

$$t_{E1} - t_{E2} = (t_{SN1} - t_{SN2}) + \frac{L}{c} \cdot \frac{m^2 c^4}{2} \left[\frac{1}{E_1^2} - \frac{1}{E_2^2} \right]$$

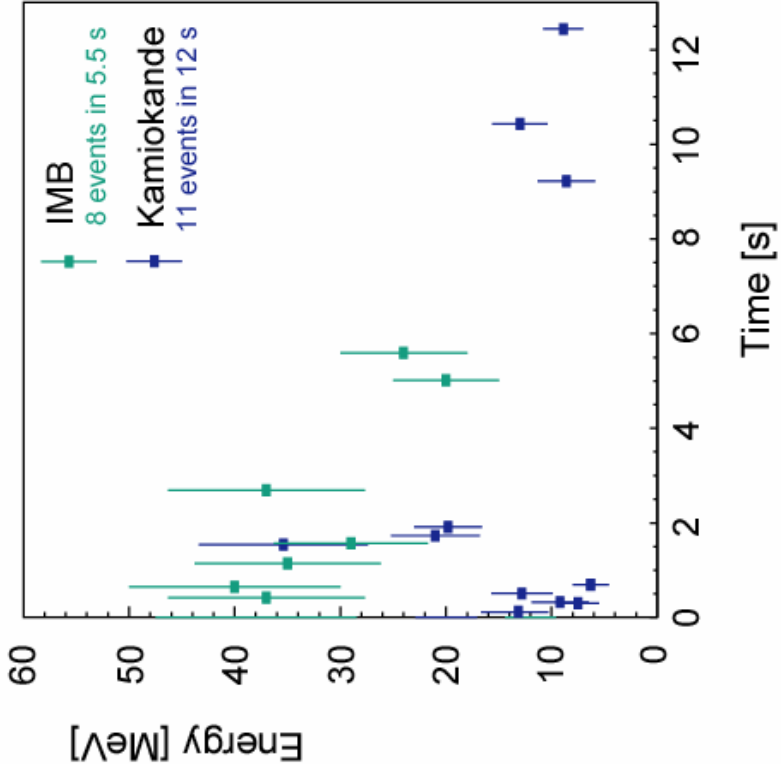
Závisí na
modelu
výbuchu SN₂₆



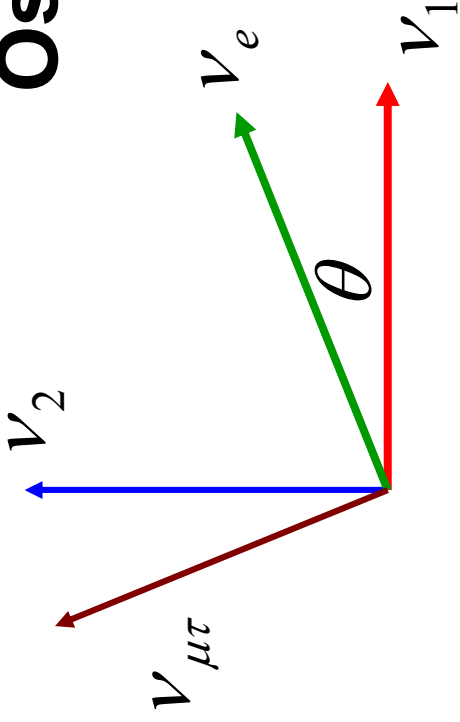
Omezení na hmotu neutrin z výbuchu supernovy SN1987A

PDG2006

VALUE (eV)	CL%	DOCUMENT ID
<16		SPERGEL 88
<14	95	AVIGNONE 90
<19.6	95	KERNAN 95
< 5.7	95	LOREDO 02



Oscillace neutrin



$$H|\nu_1\rangle = E_1|\nu_1\rangle \Rightarrow i\hbar\partial_t|\nu_1\rangle = H|\nu_1\rangle = E_1|\nu_1\rangle \Rightarrow |\nu_1(t)\rangle = e^{\frac{i}{\hbar}E_1t}|\nu_1(0)\rangle$$

$$H|\nu_2\rangle = E_2|\nu_2\rangle \Rightarrow i\hbar\partial_t|\nu_2\rangle = H|\nu_2\rangle = E_2|\nu_2\rangle \Rightarrow |\nu_2(t)\rangle = e^{\frac{i}{\hbar}E_2t}|\nu_2(0)\rangle$$

$$|\nu_e\rangle = \cos(\theta)|\nu_1\rangle + \sin(\theta)|\nu_2\rangle$$

$$|\nu_{\mu\tau}\rangle = -\sin(\theta)|\nu_1\rangle + \cos(\theta)|\nu_2\rangle$$

$$|v_e\rangle = \cos(\theta)|v_1\rangle + \sin(\theta)|v_2\rangle$$

$$|v_e(t)\rangle = \cos(\theta)|v_1(t)\rangle + \sin(\theta)|v_2(t)\rangle = \cos(\theta)e^{-\frac{i}{\hbar}E_1t}|v_1\rangle + \sin(\theta)e^{-\frac{i}{\hbar}E_2t}|v_2\rangle$$

$$\begin{aligned} |v_e(t)\rangle &= A(t)|v_e\rangle + B(t)|v_{\mu\pi}\rangle = A(t)(\cos(\theta)|v_1\rangle + \sin(\theta)|v_2\rangle) + B(t)(-\sin(\theta)|v_1\rangle + \cos(\theta)|v_2\rangle) = \\ &= (A(t)\cos(\theta) - B(t)\sin(\theta))|v_1\rangle + (A(t)\sin(\theta) + B(t)\cos(\theta))|v_2\rangle \end{aligned}$$

$$A(t)\cos(\theta) - B(t)\sin(\theta) = \cos(\theta)e^{-\frac{i}{\hbar}E_1t}$$

$$A(t)\sin(\theta) + B(t)\cos(\theta) = \sin(\theta)e^{-\frac{i}{\hbar}E_2t}$$

$$A(t) = \cos^2(\theta)e^{-\frac{i}{\hbar}E_1t} + \sin^2(\theta)e^{-\frac{i}{\hbar}E_2t}$$

$$B(t) = \sin(\theta)\cos(\theta)\begin{pmatrix} e^{-\frac{i}{\hbar}E_2t} & e^{-\frac{i}{\hbar}E_1t} \\ e^{-\frac{i}{\hbar}E_2t} & -e^{-\frac{i}{\hbar}E_1t} \end{pmatrix}$$

$$A(t) = \cos^2(\theta)e^{-\frac{i}{\hbar}E_1t} + \sin^2(\theta)e^{-\frac{i}{\hbar}E_2t}$$

$$B(t) = \sin(\theta)\cos(\theta)\left(e^{-\frac{i}{\hbar}E_2t} - e^{-\frac{i}{\hbar}E_1t}\right)$$

$$P_{\nu_e \rightarrow \nu_e}(t) = A^*(t)A(t) = \left(\cos^2(\theta)e^{-\frac{i}{\hbar}E_1t} + \sin^2(\theta)e^{-\frac{i}{\hbar}E_2t}\right)\left(\cos^2(\theta)e^{-\frac{i}{\hbar}E_1t} + \sin^2(\theta)e^{-\frac{i}{\hbar}E_2t}\right) =$$

$$\cos^4(\theta) + \sin^4(\theta) + \cos^2(\theta)\sin^2(\theta)\left(e^{-\frac{i}{\hbar}(E_1-E_2)t} + e^{-\frac{i}{\hbar}(E_1-E_2)t}\right) =$$

$$\cos^4(\theta) + \sin^4(\theta) + 2\cos^2(\theta)\sin^2(\theta) - 2\cos^2(\theta)\sin^2(\theta)\left(1 - \frac{e^{-\frac{i}{\hbar}(E_1-E_2)t} + e^{-\frac{i}{\hbar}(E_1-E_2)t}}{2}\right) =$$

$$\left(\cos^2(\theta) + \sin^2(\theta)\right)^2 - 2\cos^2(\theta)\sin^2(\theta)\left(1 - \cos\left(\frac{E_1 - E_2}{\hbar}t\right)\right) =$$

$$1 - 4\cos^2(\theta)\sin^2(\theta) \frac{1 - \cos\left(\frac{E_1 - E_2}{\hbar}t\right)}{2} = 1 - \sin^2(2\theta)\sin^2\left(\frac{E_1 - E_2}{2\hbar}t\right)$$

$$P_{\nu_e \rightarrow \nu_e}(t) = 1 - \sin^2(2\theta) \sin^2\left(\frac{E_1 - E_2}{2\hbar} t\right)$$

$$E_1 = \sqrt{p^2 + m_1^2} = p \left(1 + \frac{m_1^2}{2p^2}\right)^{1/2} \xrightarrow{m_1 \ll p} p \left(1 + \frac{1}{2} \frac{m_1^2}{p^2}\right) = p + \frac{m_1^2}{2p}$$

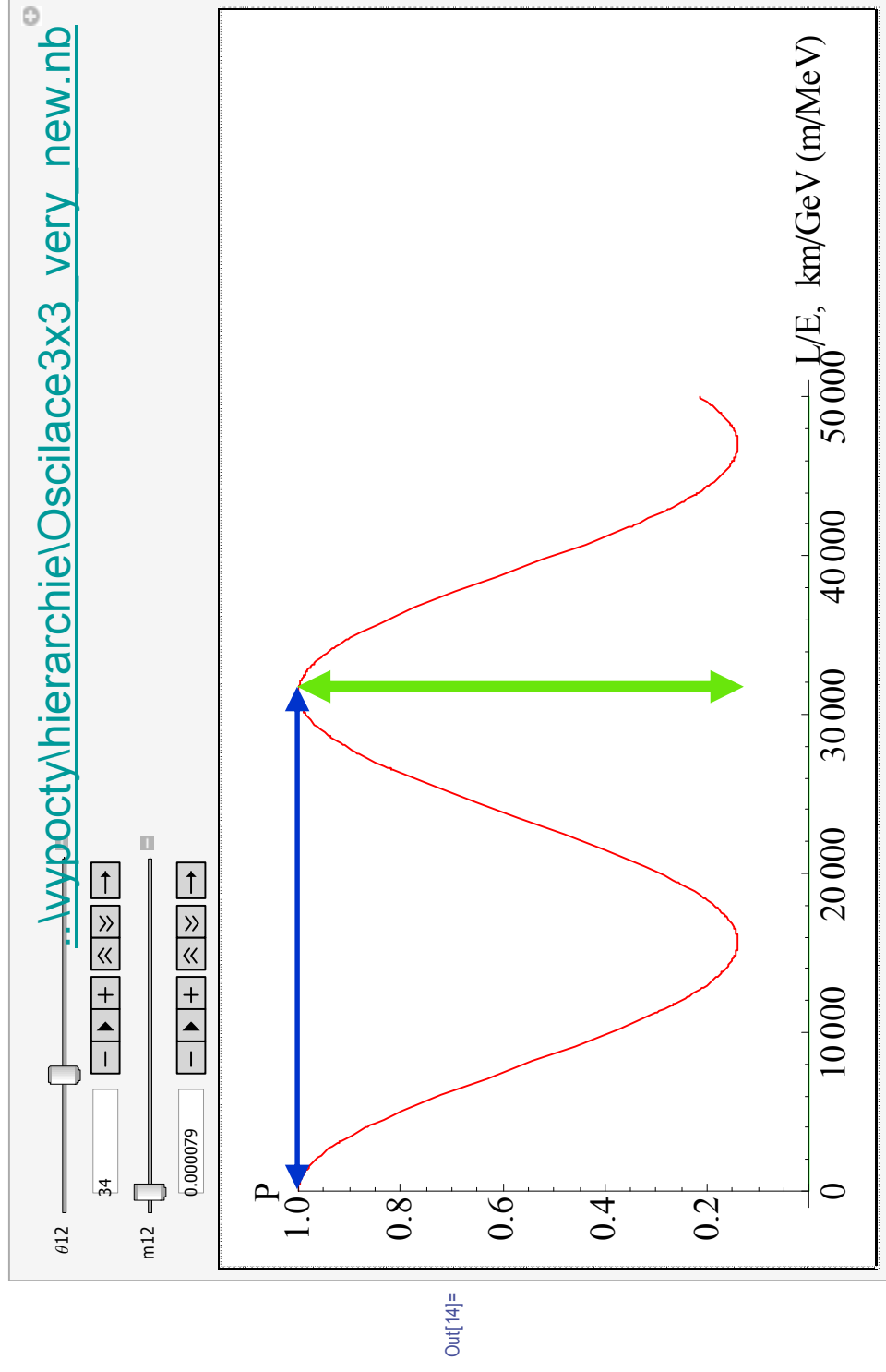
$$E_2 = \sqrt{p^2 + m_2^2} = p \left(1 + \frac{m_2^2}{2p^2}\right)^{1/2} \xrightarrow{m_2 \ll p} p \left(1 + \frac{1}{2} \frac{m_2^2}{p^2}\right) = p + \frac{m_2^2}{2p}$$

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

$$P_{\nu_e \rightarrow \nu_e}(t) = 1 - \sin^2(2\theta) \sin^2\left(\frac{m_1^2 - m_2^2}{4\hbar p} t\right) = 1 - \sin^2(2\theta) \sin^2\left(\frac{m_1^2 - m_2^2}{4\hbar c} \frac{ct}{p}\right) \approx$$

$$1 - \sin^2(2\theta) \sin^2\left(\frac{m_1^2 - m_2^2}{4\hbar c} \frac{L}{p}\right) \approx 1 - \sin^2(2\theta) \sin^2\left(\frac{m_1^2 - m_2^2}{4\hbar c} \frac{L}{E}\right)$$

$$P_{ee}(t) = 1 - \sin^2(2\theta) \sin^2\left(\frac{\Delta m_{12}^2 L}{4\hbar c E}\right)$$



Dva typy experimentů:

$$|\nu_e\rangle(t) = \left(e^{-\frac{i}{\hbar}E_1 t} \cos^2(\theta) + e^{-\frac{i}{\hbar}E_2 t} \sin^2(\theta) \right) |\nu_e\rangle + \cos(\theta)\sin(\theta) \begin{pmatrix} e^{-\frac{i}{\hbar}E_2 t} & -e^{-\frac{i}{\hbar}E_1 t} \\ e^{-\frac{i}{\hbar}E_2 t} & -e^{-\frac{i}{\hbar}E_1 t} \end{pmatrix} |\nu_\mu\rangle$$

Disappearance

Appearance

$$\nu_e + n \rightarrow p + e^-$$

$$E_\nu^{thr} = 0$$

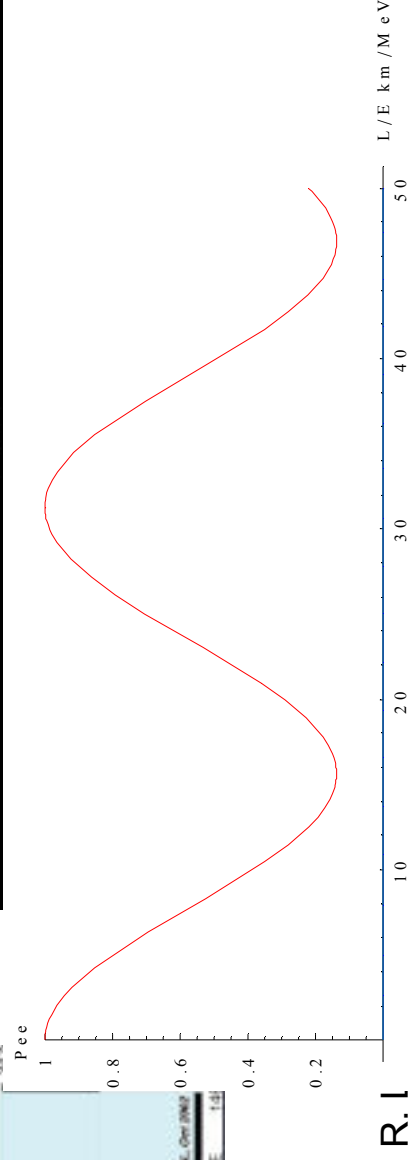
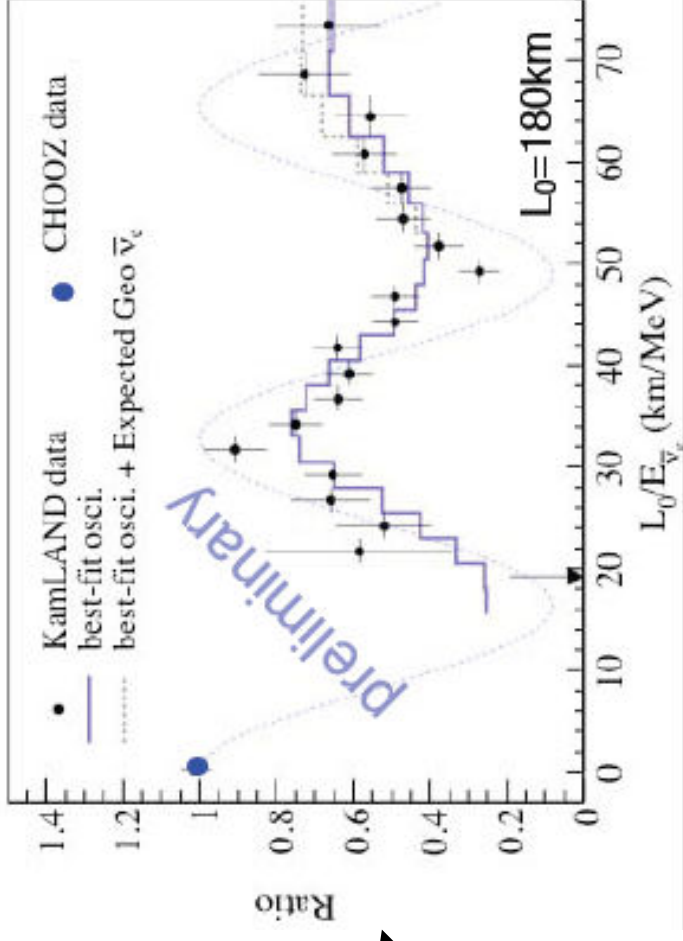
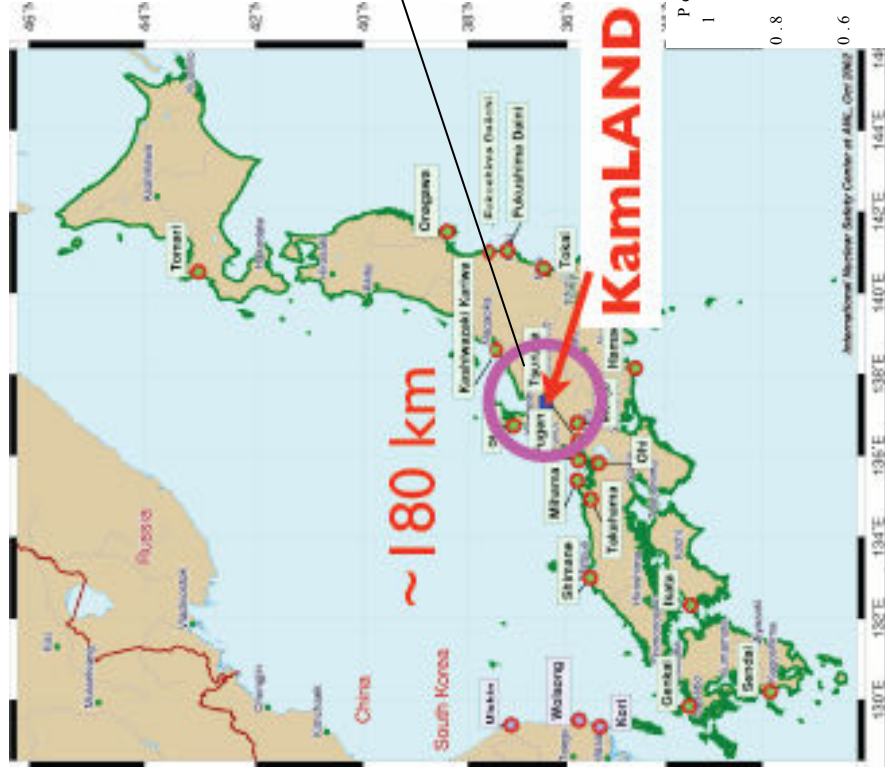
$$\nu_\mu + n \rightarrow p + \mu^-$$

$$E_\nu^{thr} = \frac{(m_p + m_\mu)^2 - m_p^2}{2m_n} \cong m_\mu = 110 \text{ MeV}$$

$$\nu_\tau + n \rightarrow p + \tau^-$$

$$E_\nu^{thr} = \frac{(m_p + m_\tau)^2 - m_p^2}{2m_n} \cong m_\mu = 1777 \text{ MeV}$$

Oscilační průběh antineutrín z jaderných reaktorů byl poprvé změřen v experimentu KamLand v Japonsku



Zdroje neutrin:

Jaderné reaktory: elektronová anti-neutrína, $E < 10 \text{ MeV}$

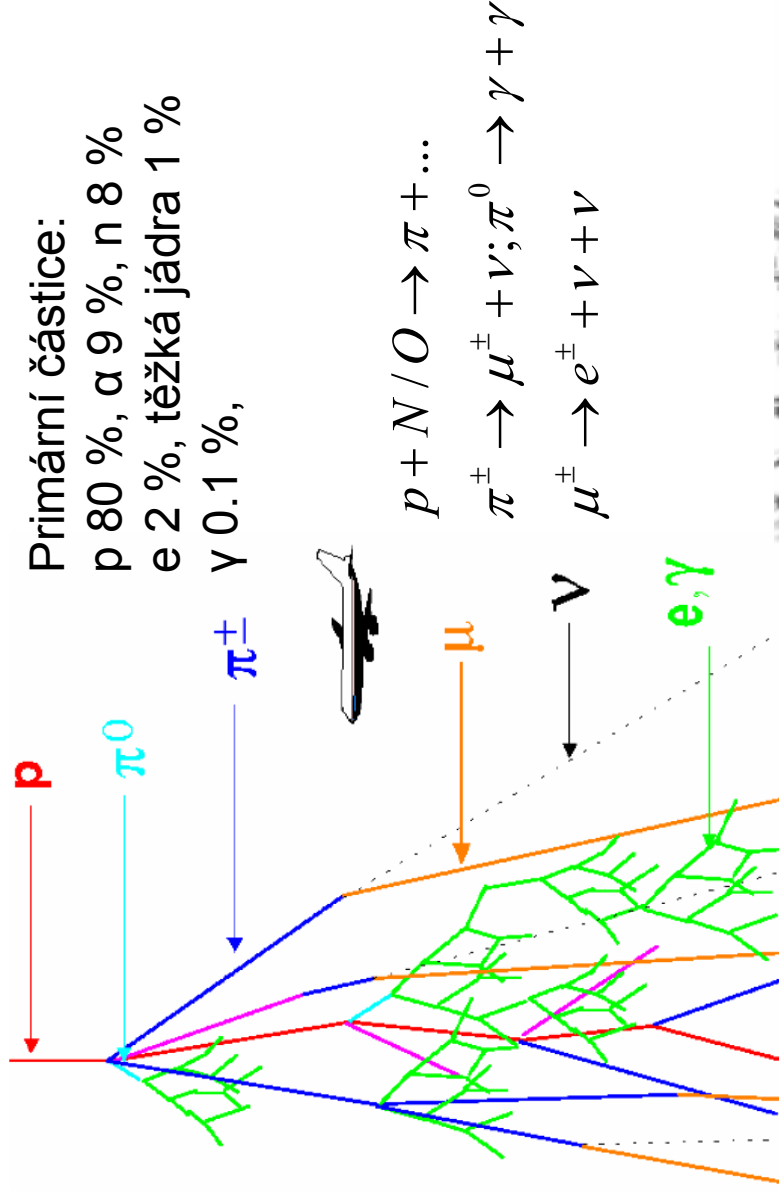
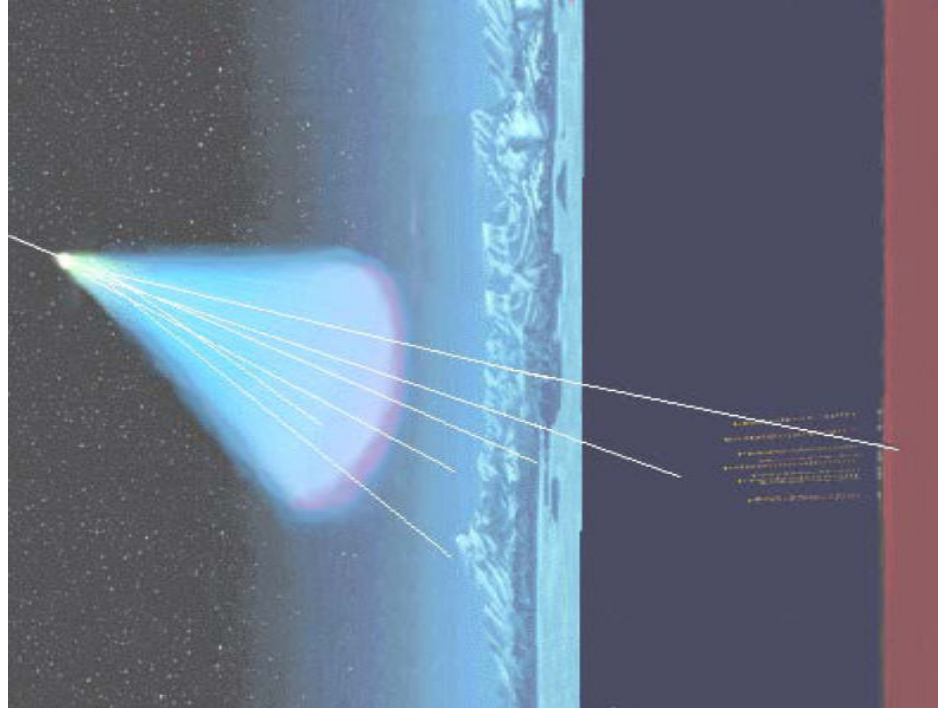
Urychlovače částic: urychlené protony interagují s terčem, vznikají pi mezony a ty se rozpadají na miony a neutrína mionová neutrína a anti-neutrína, E až $\sim 10 \text{ GeV}$

Kosmické záření: elektronová a mionová neutrína a anti-neutrína, $E \sim \text{GeV}$

Slunce: elektronová neutrína, $E < 14 \text{ MeV}$

Reliktní neutrína: neutrína $E < \text{mikroev}$, $\sim 300/\text{cm}^3$, velmi obtížné je detekovat

Kosmické záření:



Sekundární částice

na Zemi:

ν 68 %

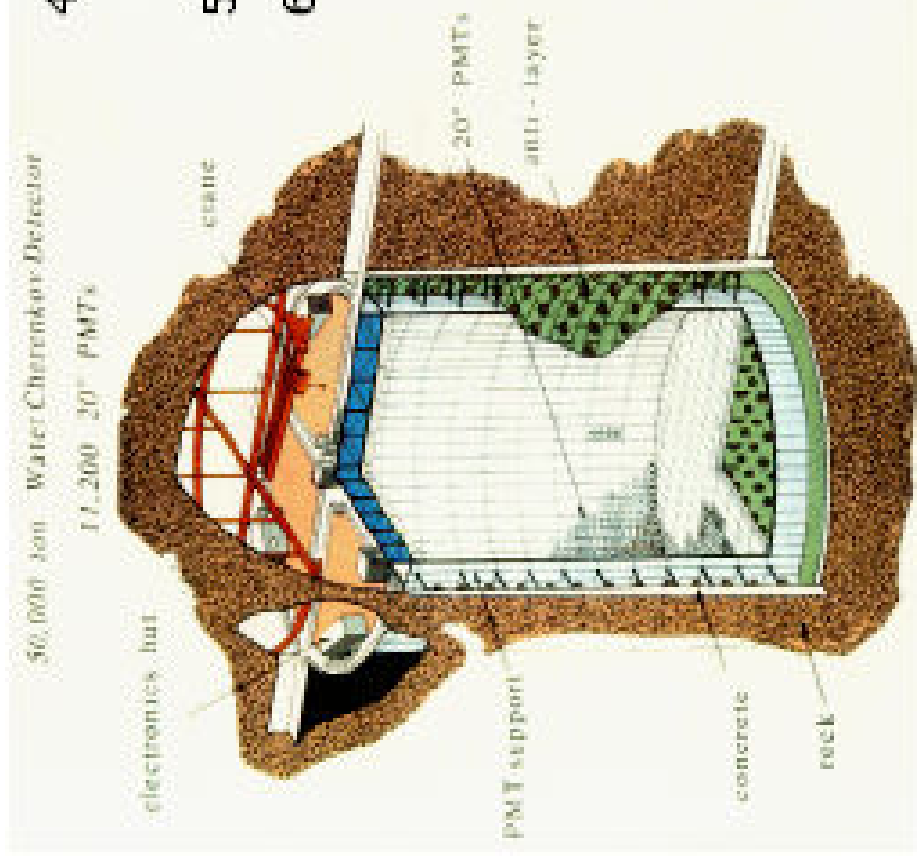
μ 30 %

p, n, π ... 2 %

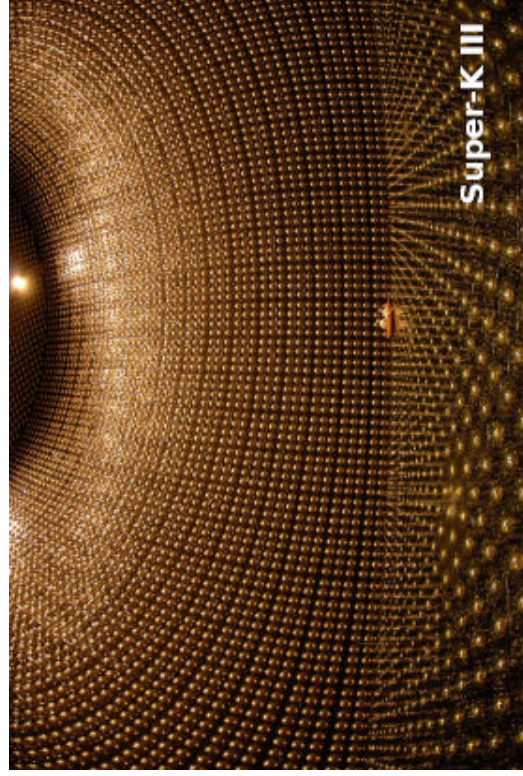
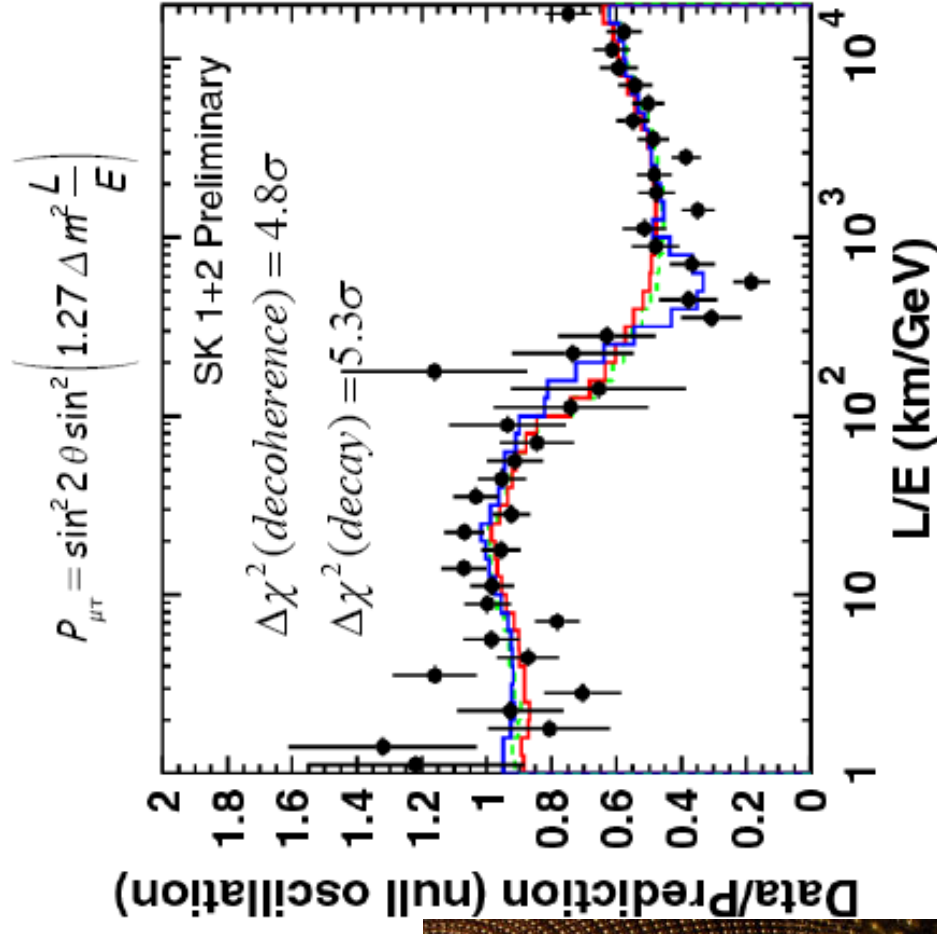
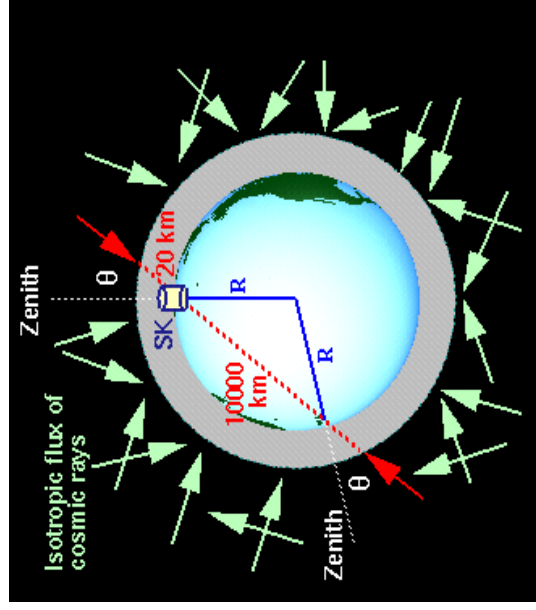


Oscilace neutrin z kosmického záření byly pozorovány v Super Kamiokande

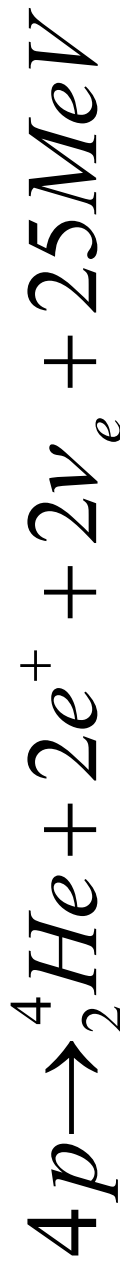
- 1) Velikost: válec 41.4m (h) x 39.3m (d)
- 2) 50,000 tun čisté vody
- 3) 11,200 fotonásobičů
- 4) Energetické rozlišení :
2.5% (pro 1 GeV) a 16% (pro 10 MeV)
- 5) Práh detekce: 5 MeV
- 6) Místo: Kamioka-cho, Yoshiki-gun,
Gifu-ken
(1,000m podzemí v dole Mozumi
Kamioka Mining and Smelting Co.)



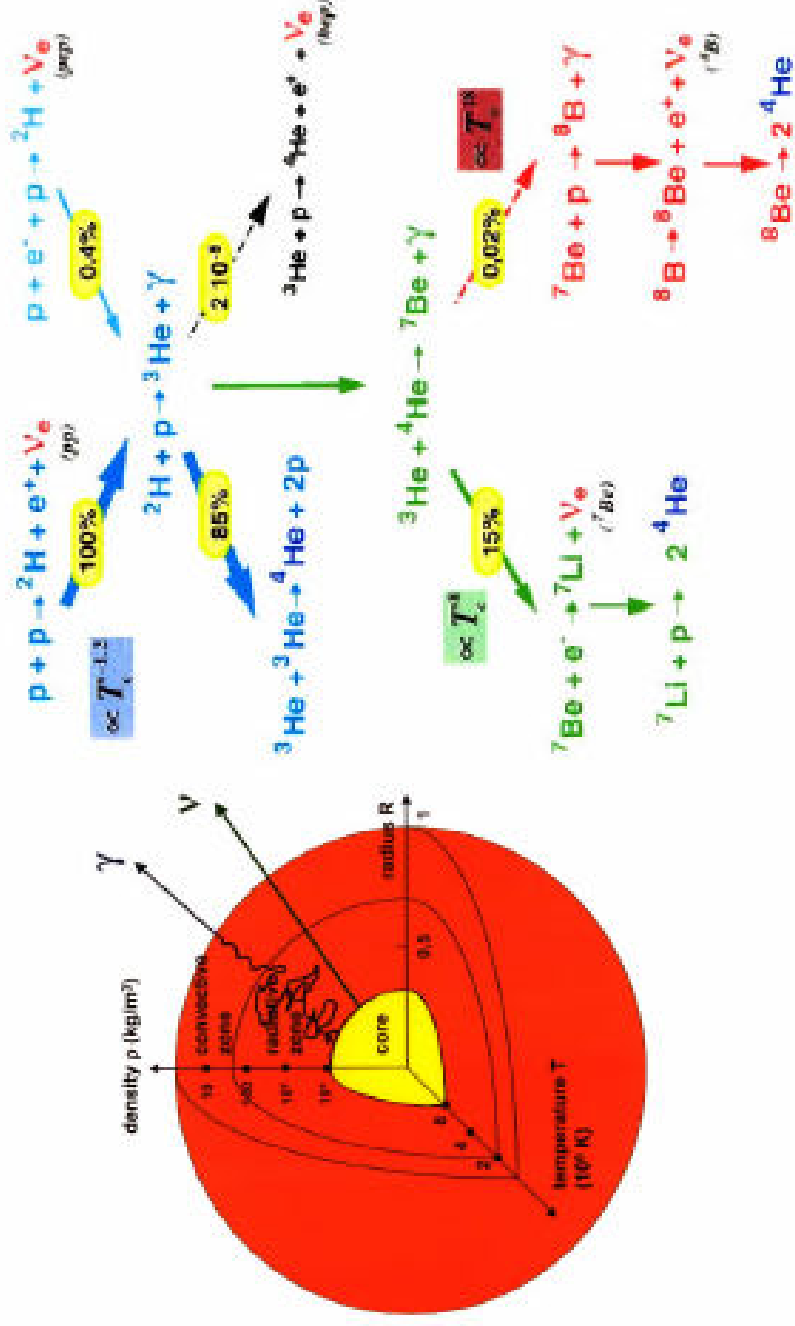
Výsledek ze SuperKamiokande



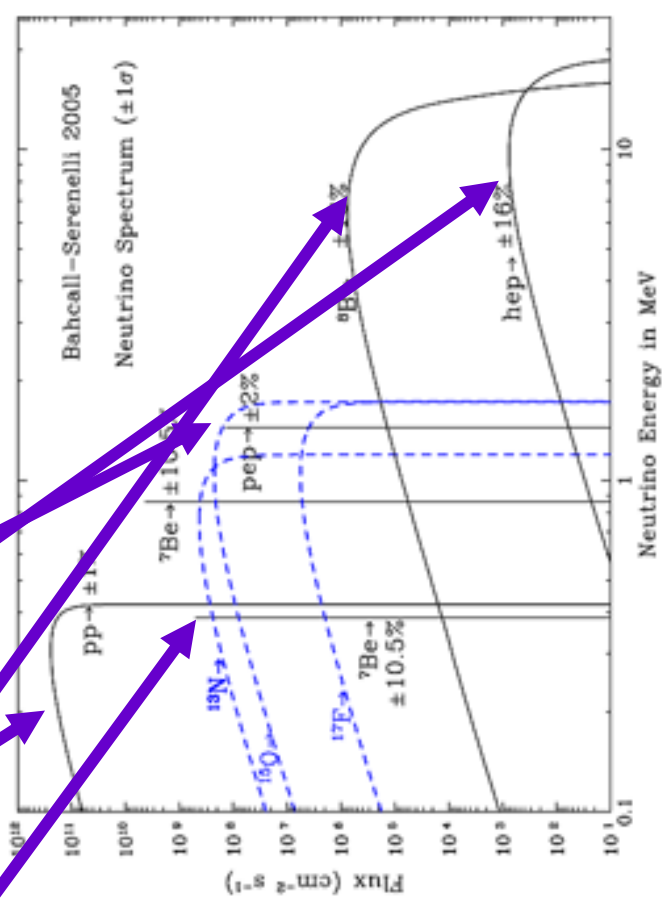
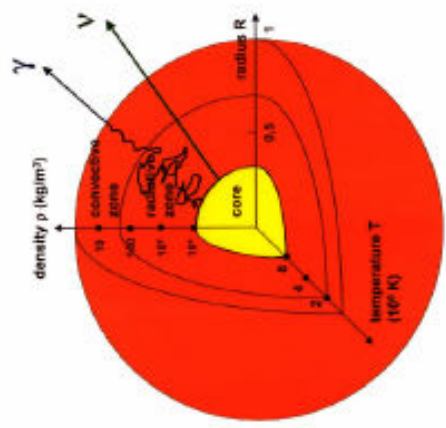
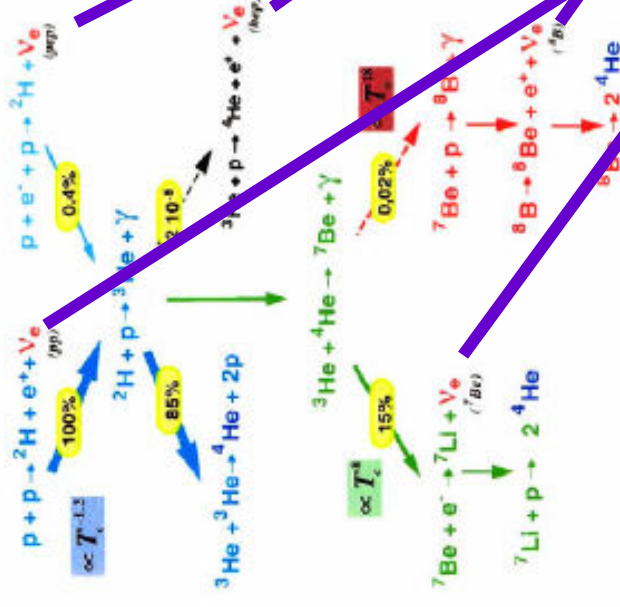
Sluneční neutrína



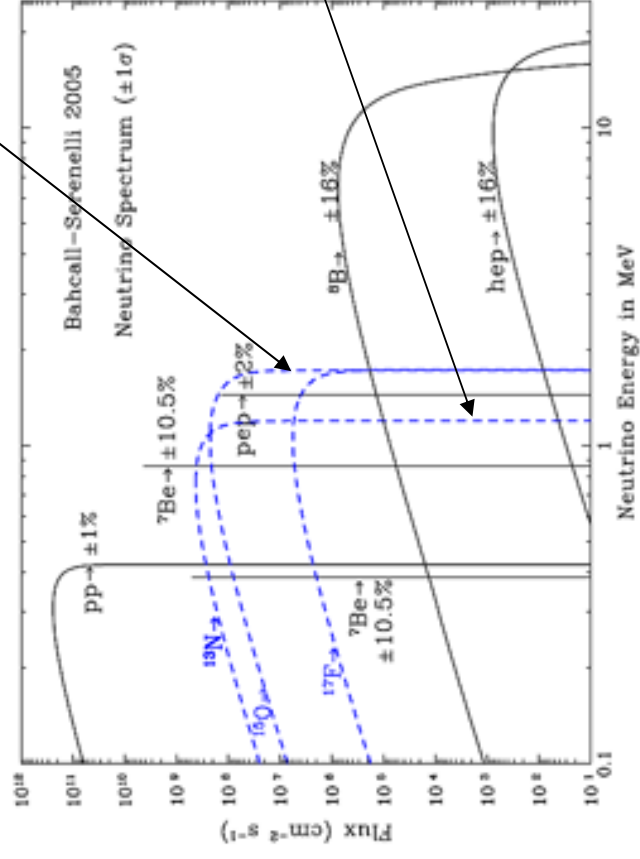
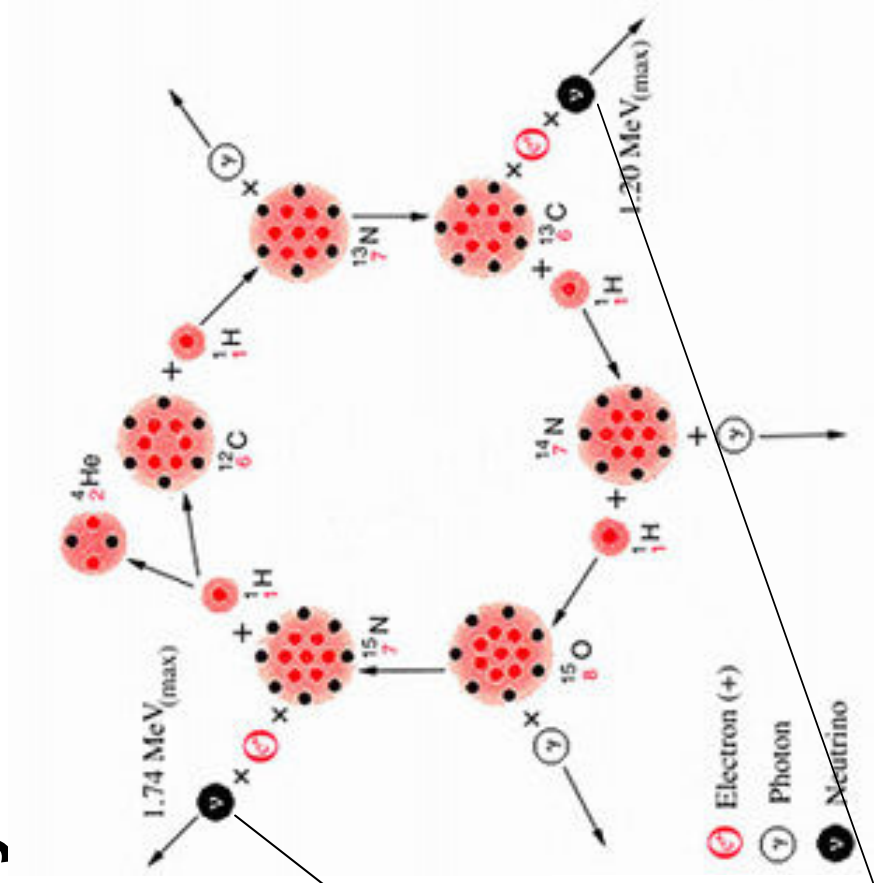
Solar Neutrinos



Solar Neutrinos



CNO cyklus



Detekce slunečních neutrin pomocí Cl Ar metody



Бруно Понтекорво

B. Pontecorvo

*National Research Council of Canada, Division of
Atomic Energy. Chalk River, 1946, Report PD-205.*



An Example

There are several elements which can be used for neutrino radiation in the suggested investigation.

Chlorine and Bromine, for example, fulfil reasonably well the desired conditions. The reactions of interest would be:



(34 days; K capture)



(34 h; emission of positrons of 0.4 MeV)

The experiment with Chlorine, for example, would consist in irradiating with neutrinos a large volume of Chlorine or Carbon Tetra-Chloride, for a time of the order of one month, and extracting the radioactive ${}^{37}\text{Ar}$ from such volume by boiling. The radioactive argon would be introduced inside a small counter; the counting efficiency is close to 100%, because of the high Auger electron yield.

Davisův Experiment



100000 galonová nádrž na tetra chlor karbon

1 Solar Neutrino Unit = 1 interakce na 10^{36} atomů Cl^{37} za 1 s.

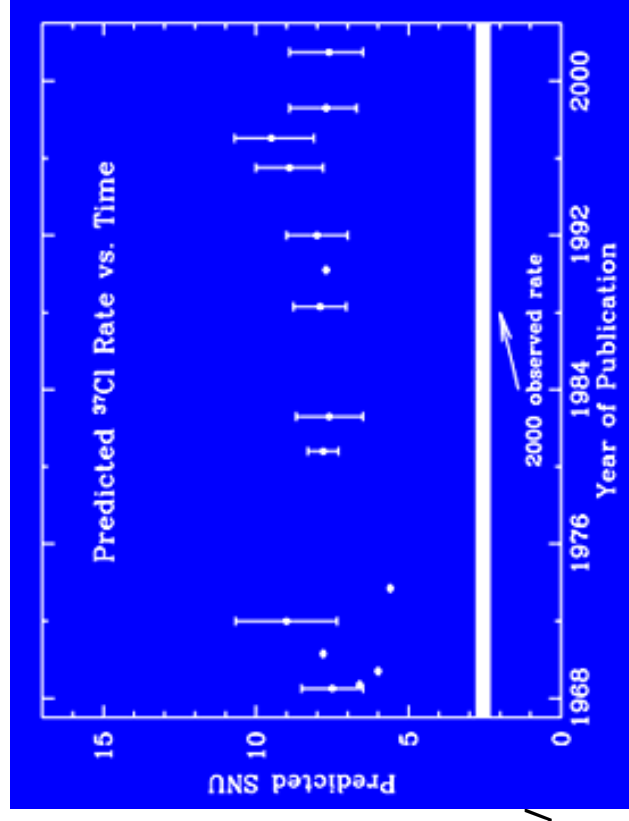
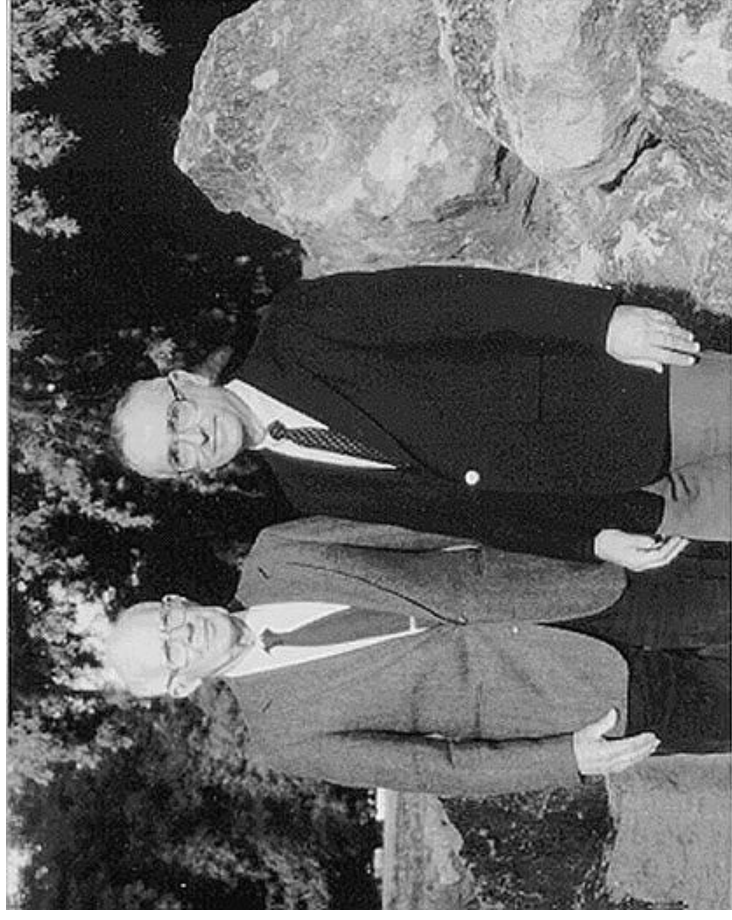
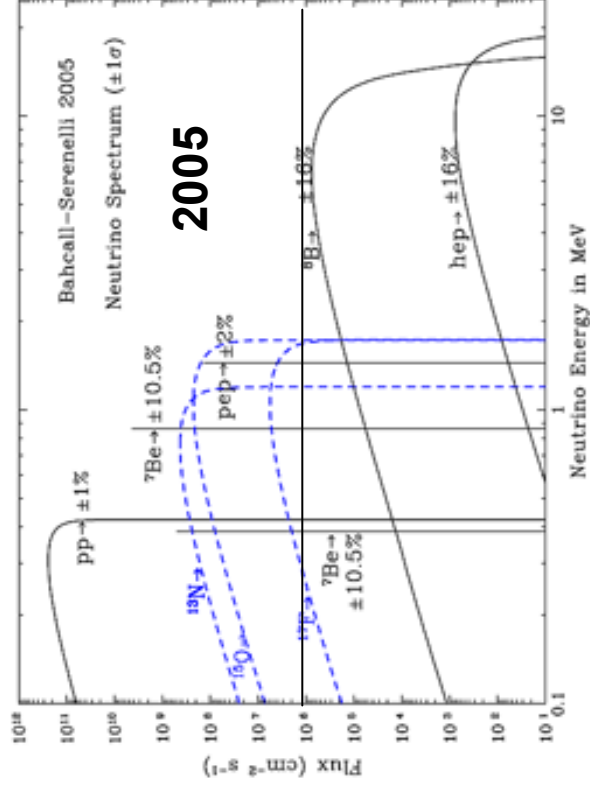
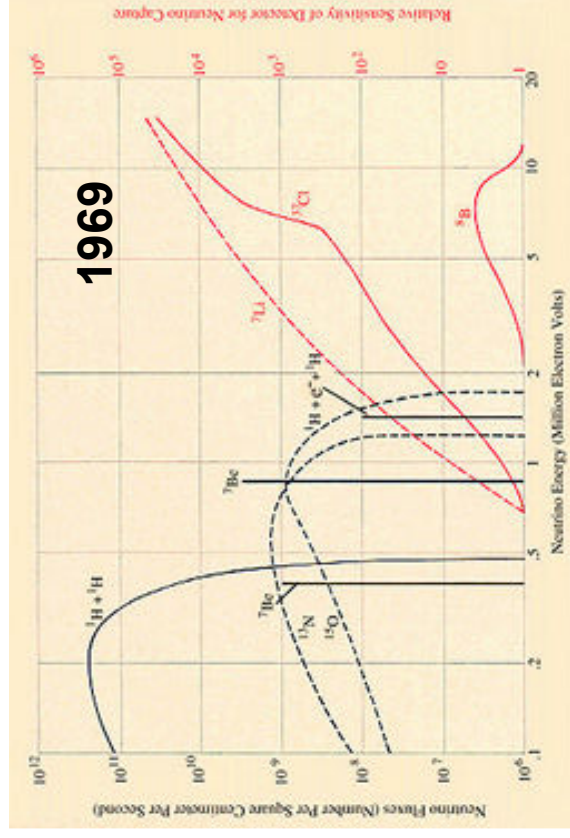
V nádrži je asi 2×10^{30} atomů Cl^{37} , a měří se asi 2.5 SNU, tj. **jeden záchyt za 200000s, tj. asi $2\frac{1}{4}$ dne.**



Photo courtesy of Brookhaven National Laboratory

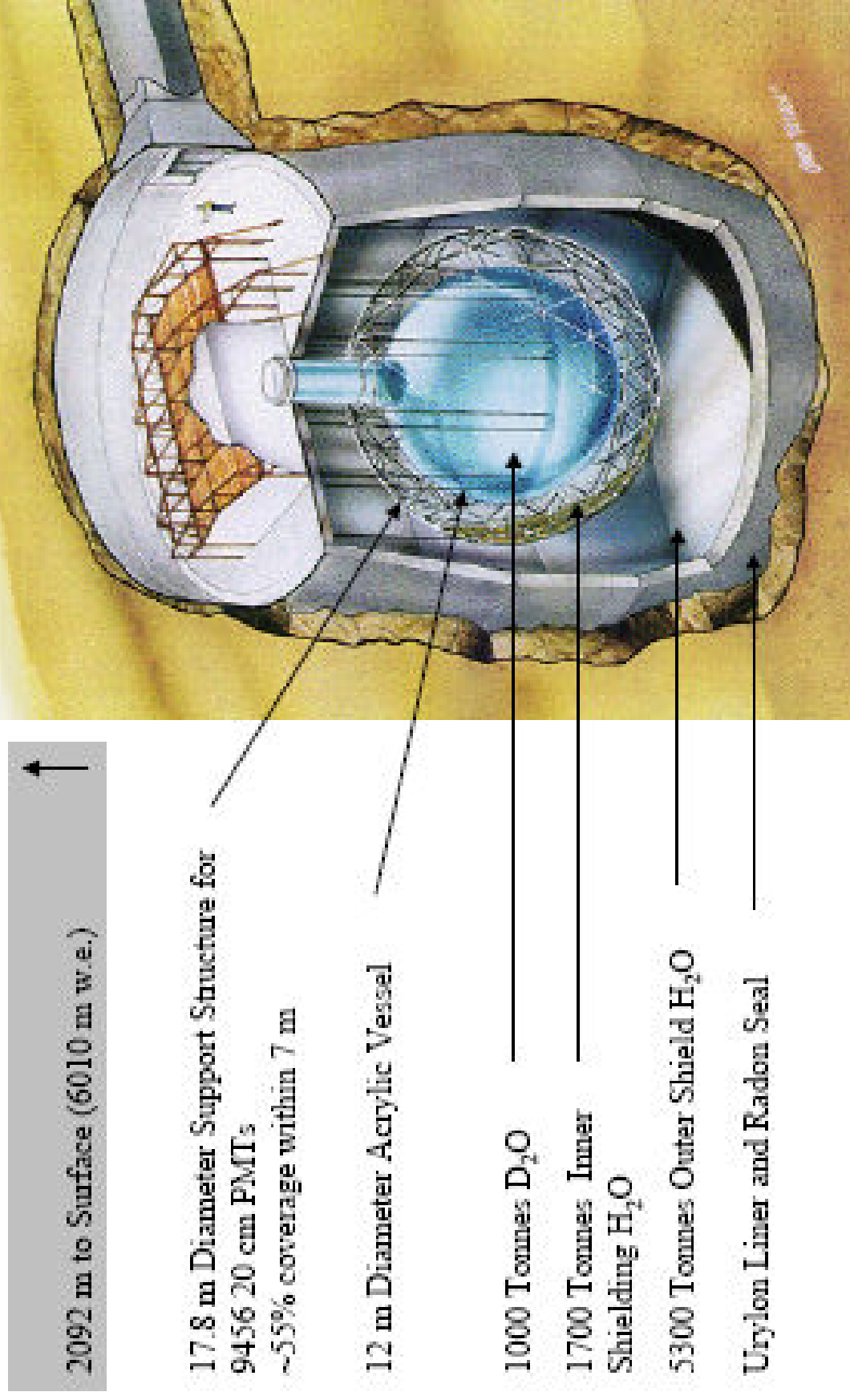
85 letý Ray Davis v roce 1999.

John Bahcall



Fyzika V

Sudbury Neutrino Observatory



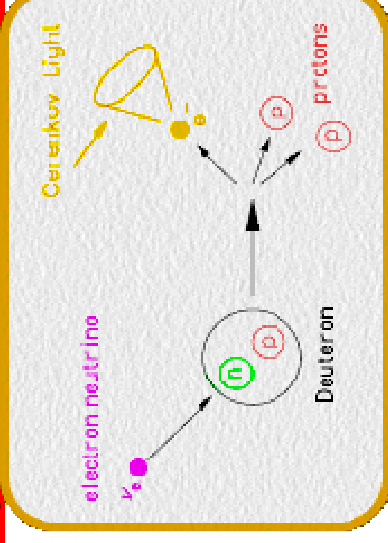
Sudbury Neutrino Observatory (SNO) ν

Kanadë

CC



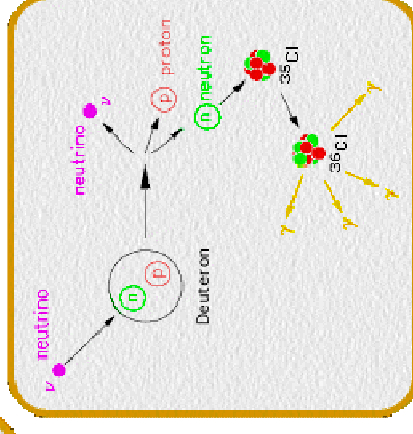
- $Q = 1.445 \text{ MeV}$
- good measurement of ν_e energy spectrum
- some directional info $\propto (1 - 1/3 \cos\theta)$
- ν_e only



NC



- $Q = 2.22 \text{ MeV}$
- measures total ${}^8\text{B}$ ν flux from the Sun
- equal cross section for all ν types

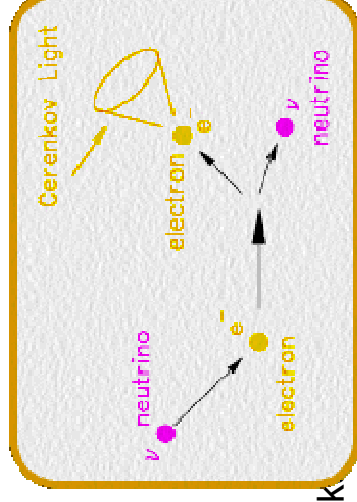


about 30 events per day.

ES

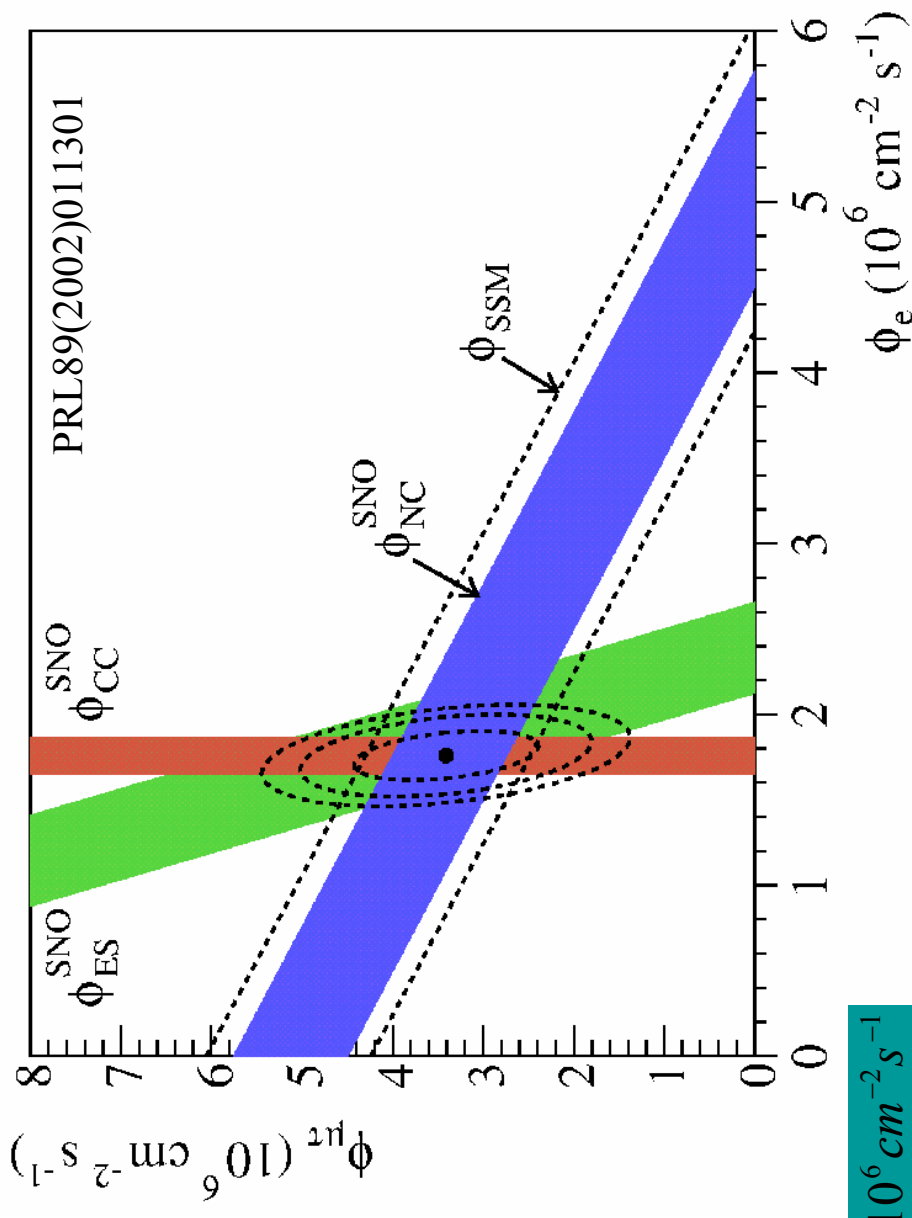


- low statistics
- mainly sensitive to ν_e , some ν_μ and ν_τ
- strong directional sensitivity



about 3 events per day.

SNO result



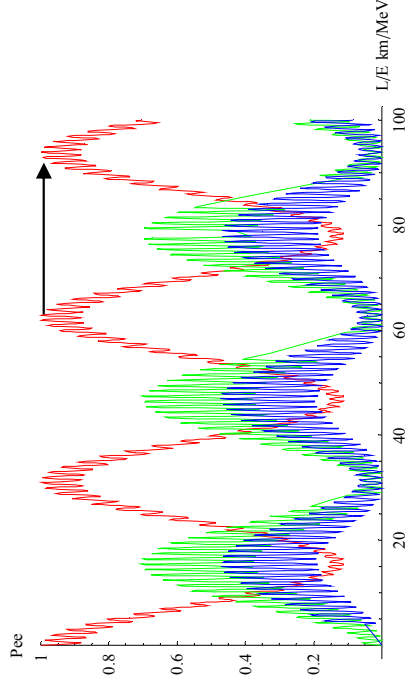
$$\phi_e = 1.76^{+0.05}_{-0.05} (stat)^{+0.09}_{-0.09} (syst) \times 10^6 cm^{-2} s^{-1}$$

$$\phi_{\mu\tau} = 3.41^{+0.45}_{-0.45} (stat)^{+0.48}_{-0.45} (syst) \times 10^6 cm^{-2} s^{-1}$$

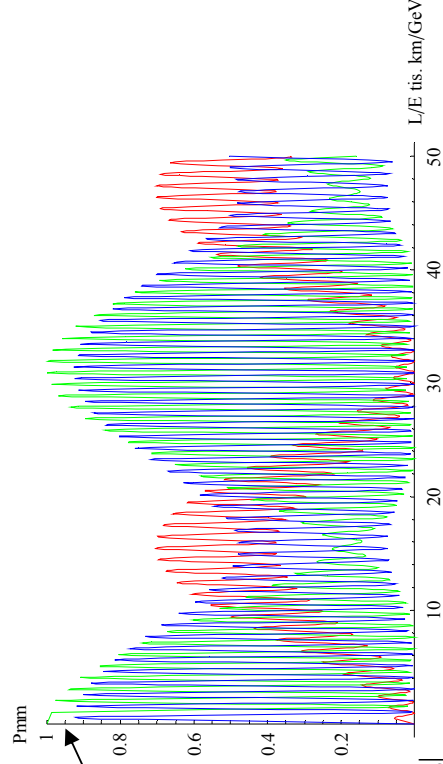
$$\phi_{SSM} = 5.05^{+1.01}_{-0.81} \times 10^6 cm^{-2} s^{-1} \quad \text{--- (SSM)}$$

Oscilace tří druhů neutrin

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\theta_{23}) & \sin(\theta_{23}) \\ 0 & -\sin(\theta_{23}) & \cos(\theta_{23}) \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \cos(\theta_{13}) & 0 & \sin(\theta_{13}) \cdot e^{-i\delta} \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(\theta_{13}) \cdot e^{i\delta} & 0 & \cos(\theta_{13}) \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \cos(\theta_{12}) & \sin(\theta_{12}) & 0 \\ -\sin(\theta_{12}) & \cos(\theta_{12}) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix}$$



**U elektronových neutrin
jsou změřeny oscilace s
dlouhou délkou**



**U mionových
neutrin jsou
změřeny oscilace s
krátkou délkou**

..\vypocty\hierarchie\Oscilace3x3_very_new.nb

Oscilace mezi 3 druhy neutrin, současné experimentální hodnoty

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\theta_{23}) & \sin(\theta_{23}) \\ 0 & -\sin(\theta_{23}) & \cos(\theta_{23}) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos(\theta_{13}) & 0 & \sin(\theta_{13}) \cdot e^{-i\delta} \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(\theta_{13}) \cdot e^{i\delta} & 0 & \cos(\theta_{13}) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos(\theta_{12}) & \sin(\theta_{12}) & 0 \\ -\sin(\theta_{12}) & \cos(\theta_{12}) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix}$$

$$\sin^2(\theta_{12}) = 0.314 \cdot \begin{pmatrix} +0.18 \\ 1 \\ -0.15 \end{pmatrix} \Rightarrow \theta_{12} = 34.1^\circ \quad \begin{matrix} +3.4^\circ \\ -3.0^\circ \end{matrix}$$

$$\sin^2(\theta_{23}) = 0.44 \cdot \begin{pmatrix} +0.41 \\ 1 \\ -0.21 \end{pmatrix} \Rightarrow \theta_{23} = 41.6^\circ \quad \begin{matrix} +10.3^\circ \\ -5.5^\circ \end{matrix}$$

$$\sin^2(\theta_{13}) = \begin{pmatrix} 0.9 & +2.3 \\ & -0.09 \end{pmatrix} \cdot 10^{-2} \Rightarrow \theta_{13} < 10.3^\circ$$

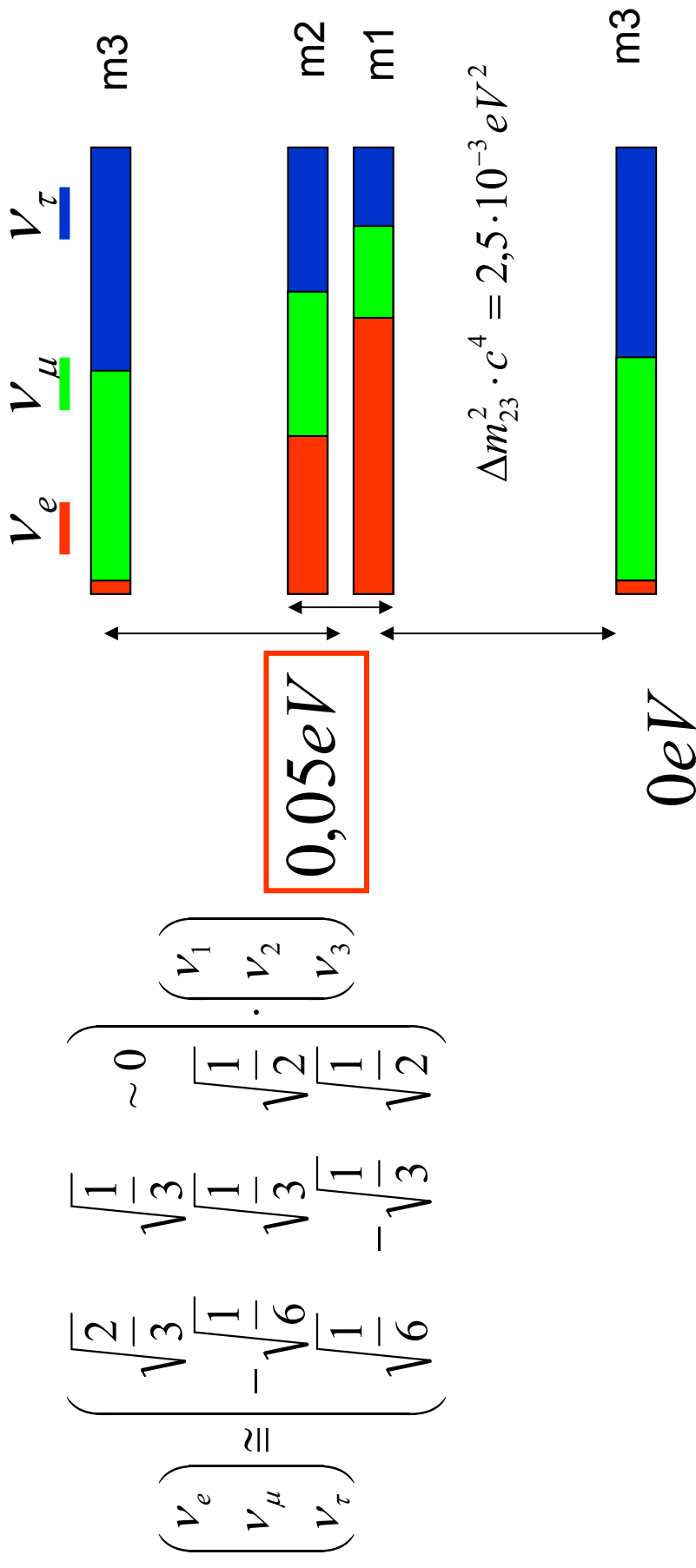
$$m_2^2 - m_1^2 = 7.92 \cdot (1 \pm 0.09) \cdot 10^{-5} eV^2$$

$$\left| m_3^2 - \frac{m_1^2 + m_2^2}{2} \right| = 2.4 \cdot \begin{pmatrix} +0.21 \\ 1 \\ -0.26 \end{pmatrix} \cdot 10^{-3} eV^2$$

„Magické“ úhly T.D.Lee:
Úhlopříčka ve čtverci 45 stupňů,
Úhlopříčka v krychli 35.26 stupně



Přibližně správný zapamatovatelný tvar:



Nejtěžší neutrino: $M(\nu) > 0,05 \text{ eV}$

Hlavní úkoly současných neutrinových oscilačních experimentů:

- Přesnější měření parametrů oscilací
- Dokázat, že oscilace probíhají – neutrina jednoho typu se mění na jiný typ (tzv. appearing experimenty, hlavně mionová na tauonová neutrina).
- Změřit dosud neznámý parametr θ_{13}

Experiment OPERA v Gran Sasso

$$\nu_{\mu} \rightarrow \nu_{\tau}$$

COOPERATIONE INTERNAZIONALE DEL GRAN SASSO

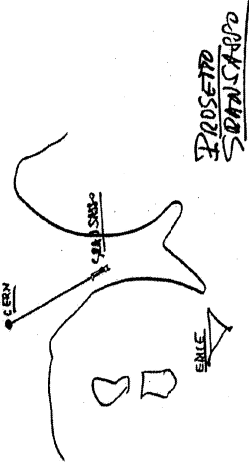
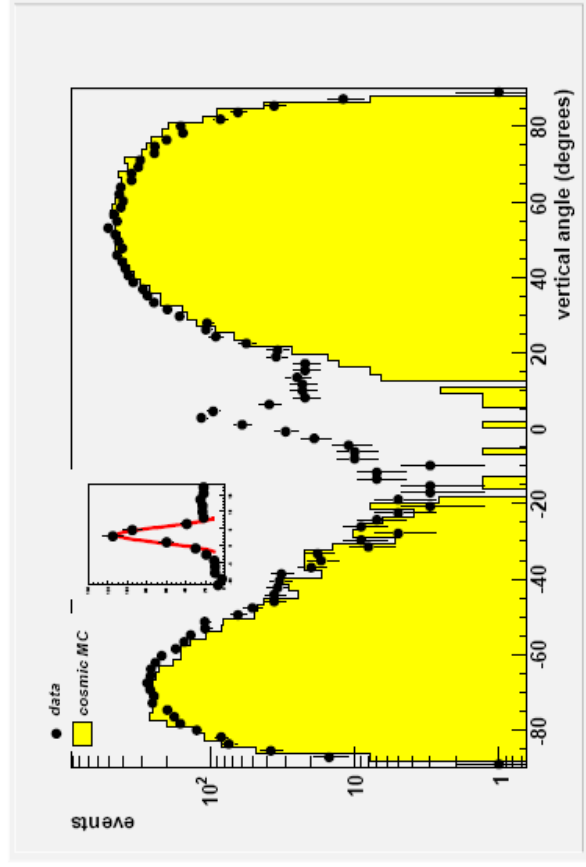
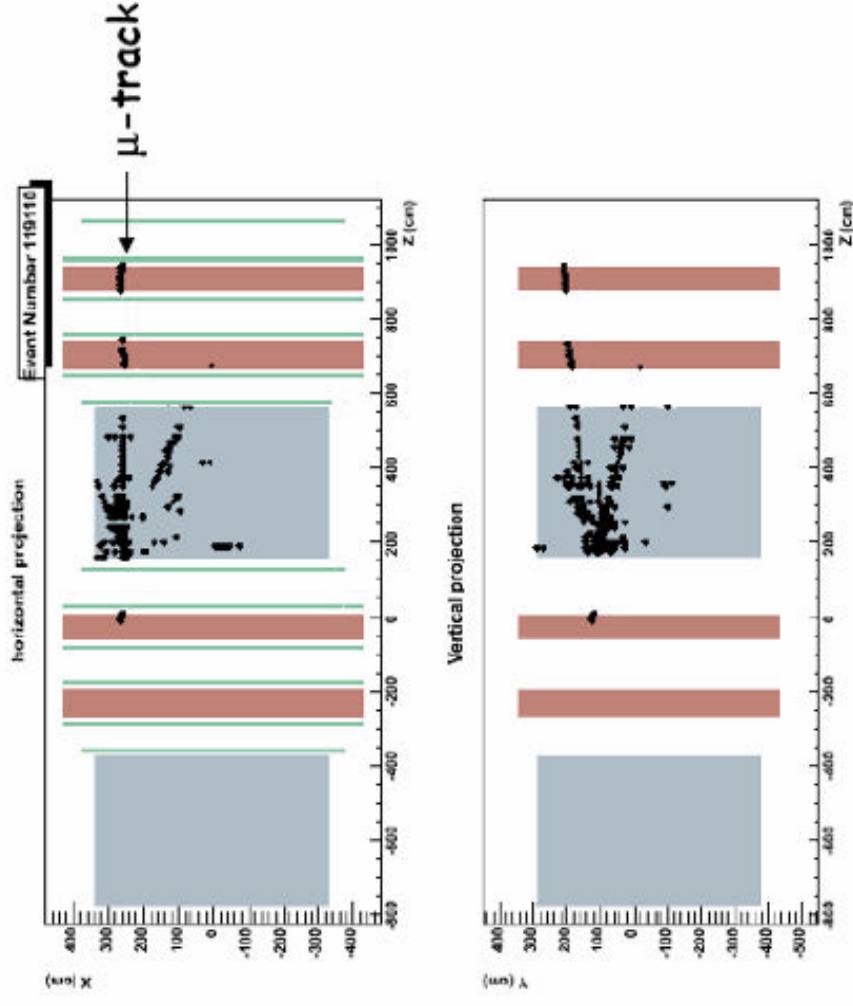
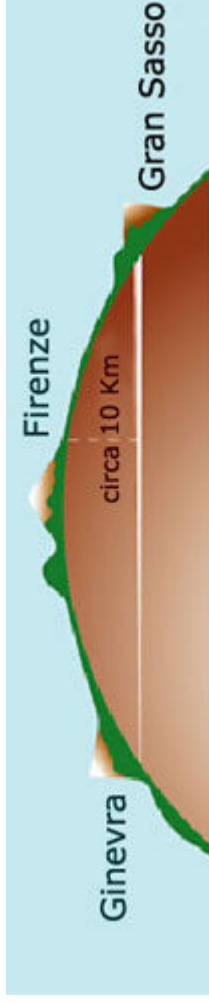
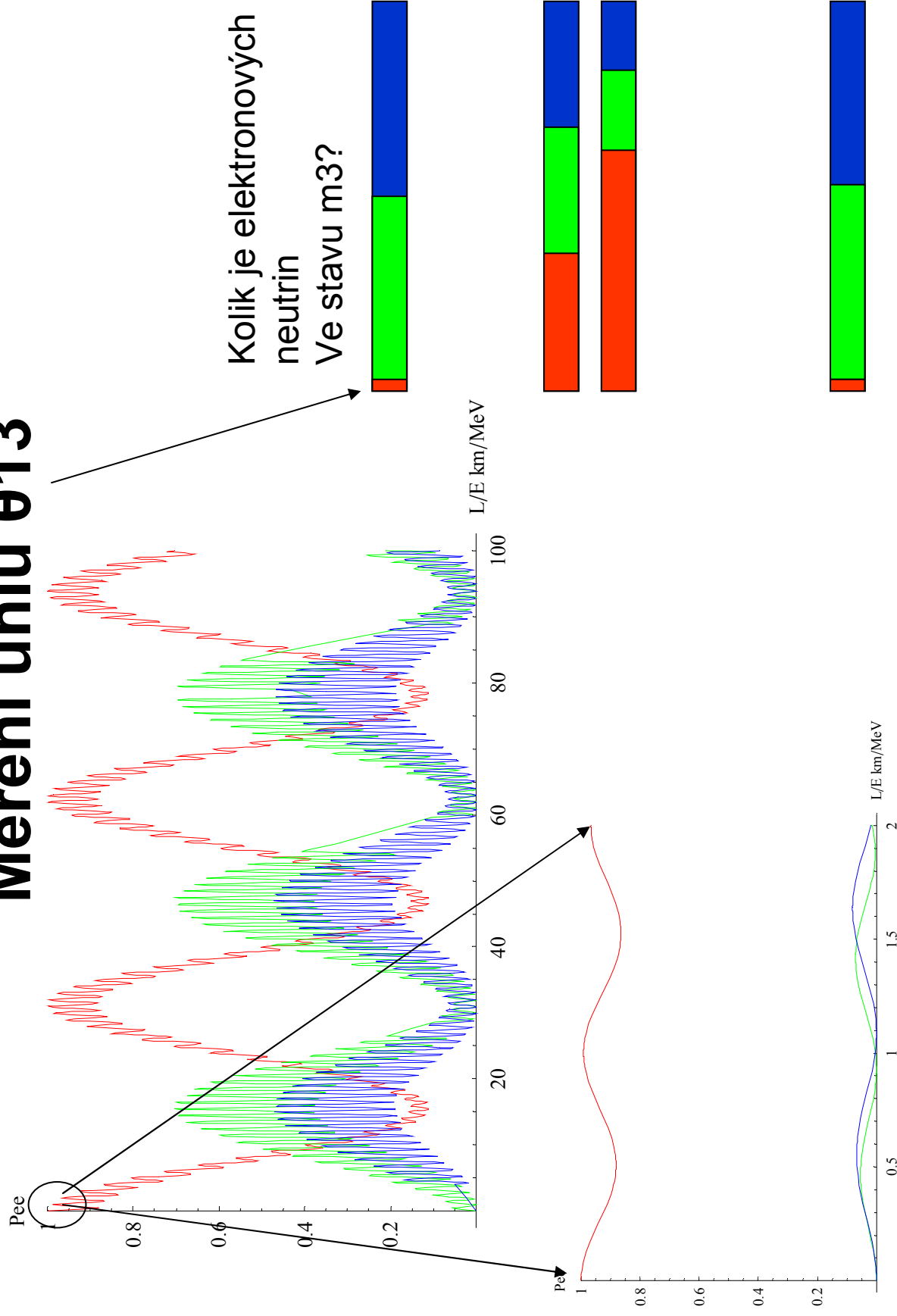


Figure 1.1.1: Sketch by A. Zichichi, 1979



R. Leitner F

Měření úhlu θ_{13}

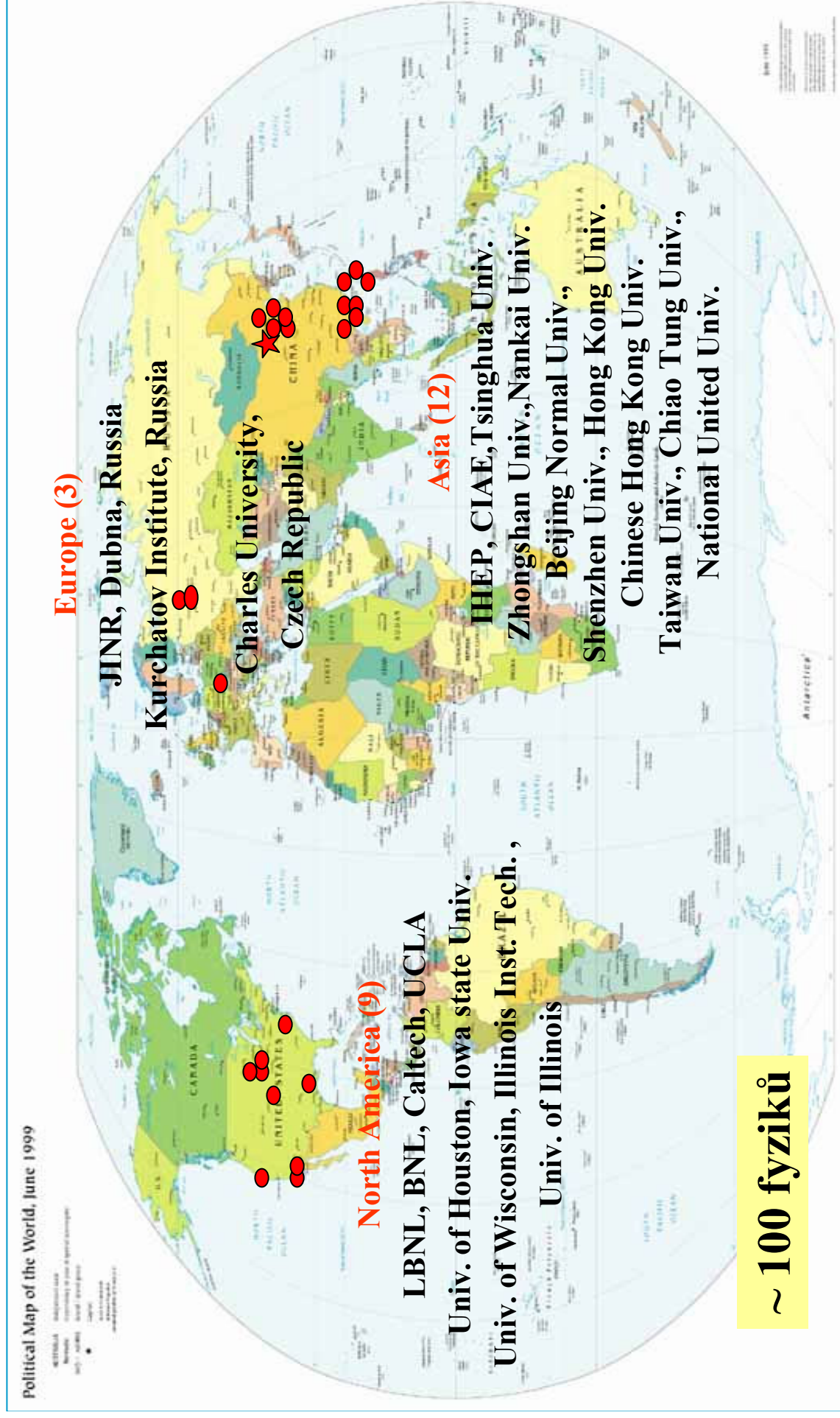


Neutrinový experiment Daya Bay

- Úkolem je změřit $\sin^2 2\theta_{13}$ s přesností 0.01
- 4 jaderné reaktory, 2 další v roce 2011, celkový výkon 17.4 GW
- Hornatý povrch, tj. snadné stínění proti kosmickému záření
- Na pobřeží Tichého oceánu 60 km od Hong Kongu



Daya Bay je mezinárodní experiment



Rozmístění jednotlivých detektorů

