Úvod do časticovej fyziky

časť 2b: Neutrína

Boris Tomášik
boris.tomasik@cern.ch

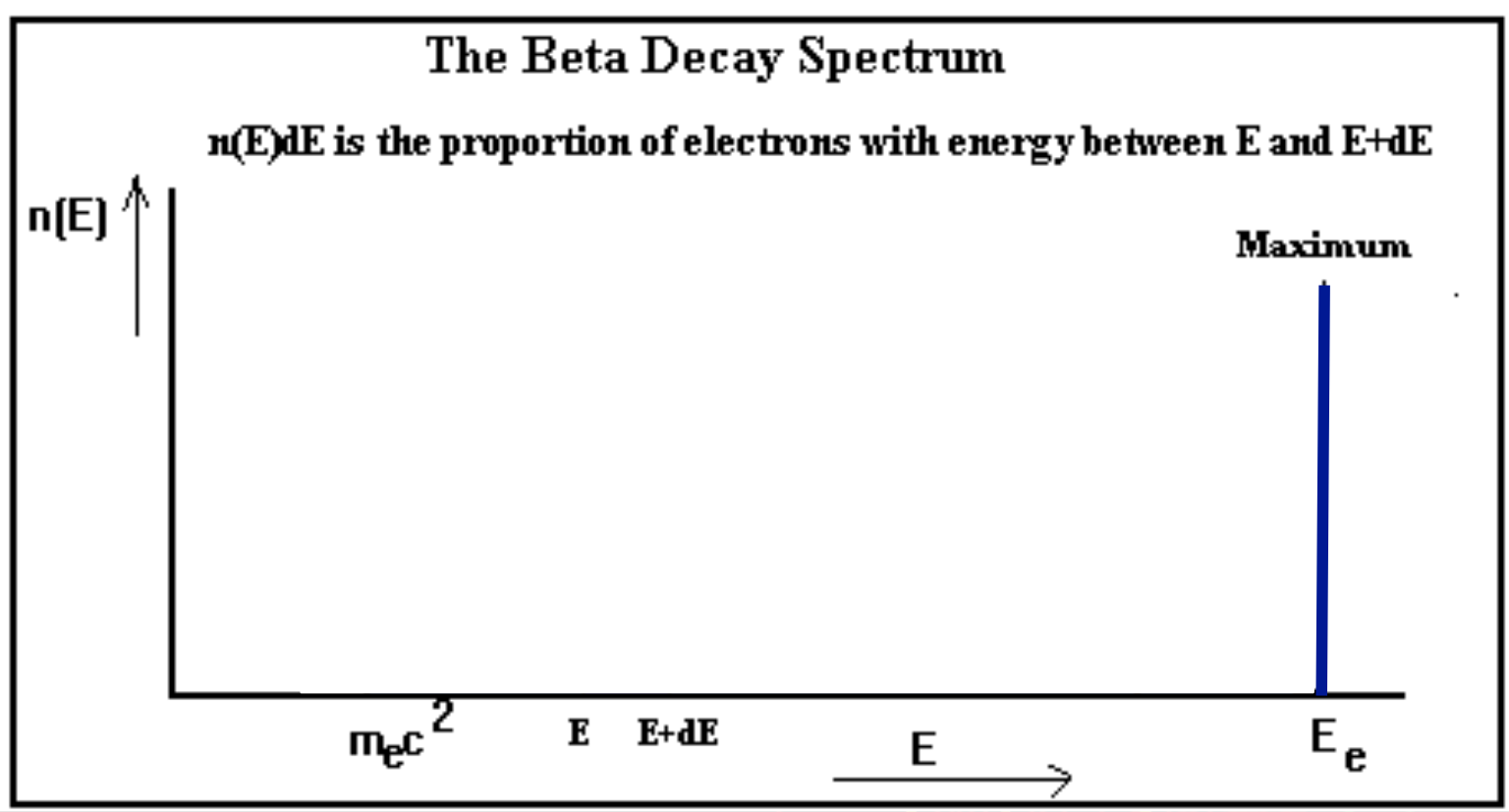
Univerzita Mateja Bela, Fakulta prírodných vied
ČVUT, Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská

CERN, 18.-22.6.2018

Spektrum premeny beta

Chýbajúca energia v rozpade β:

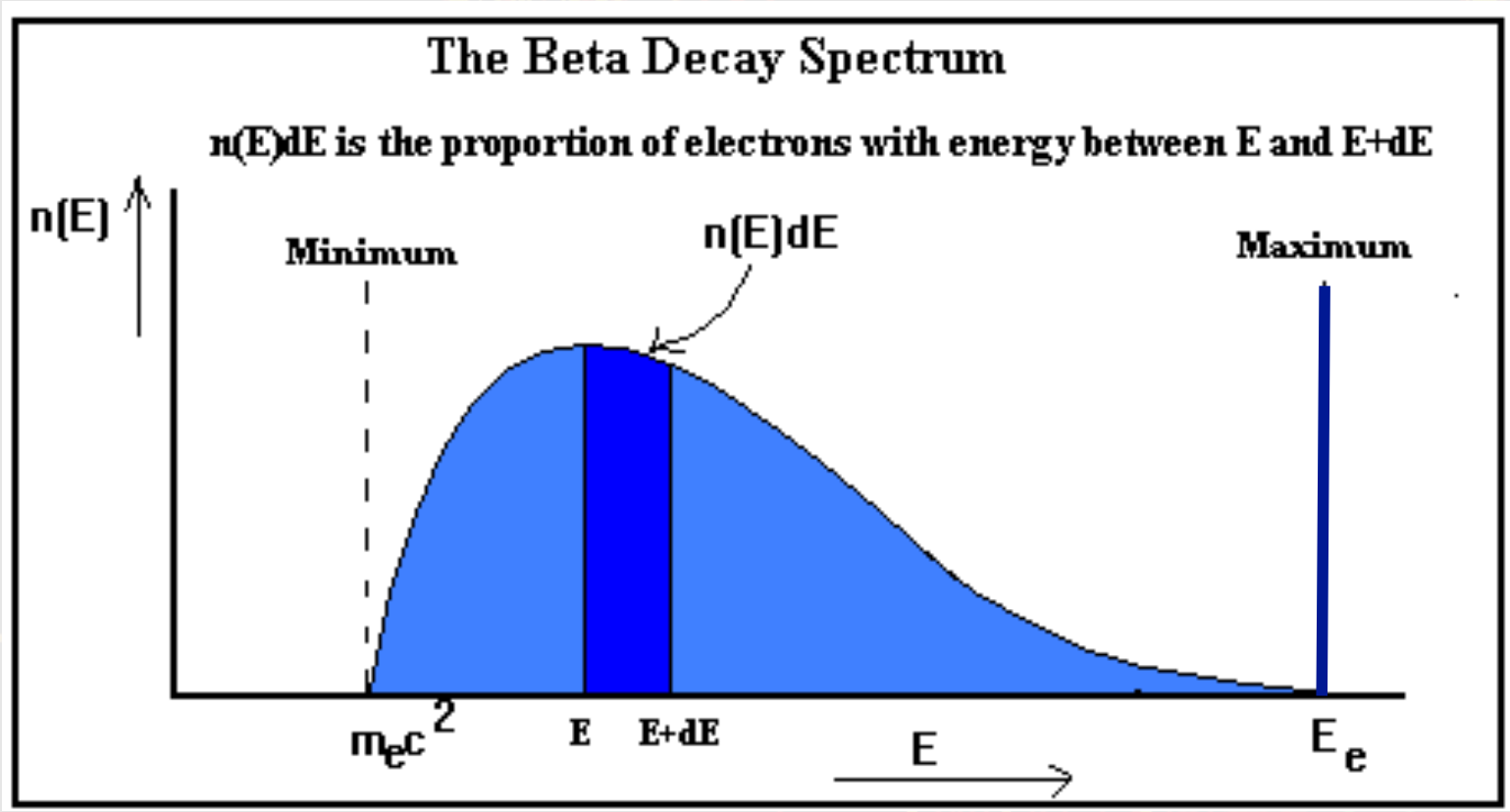
$$n \rightarrow p + e$$



Spektrum premeny beta

Chýbajúca energia v rozpade β:

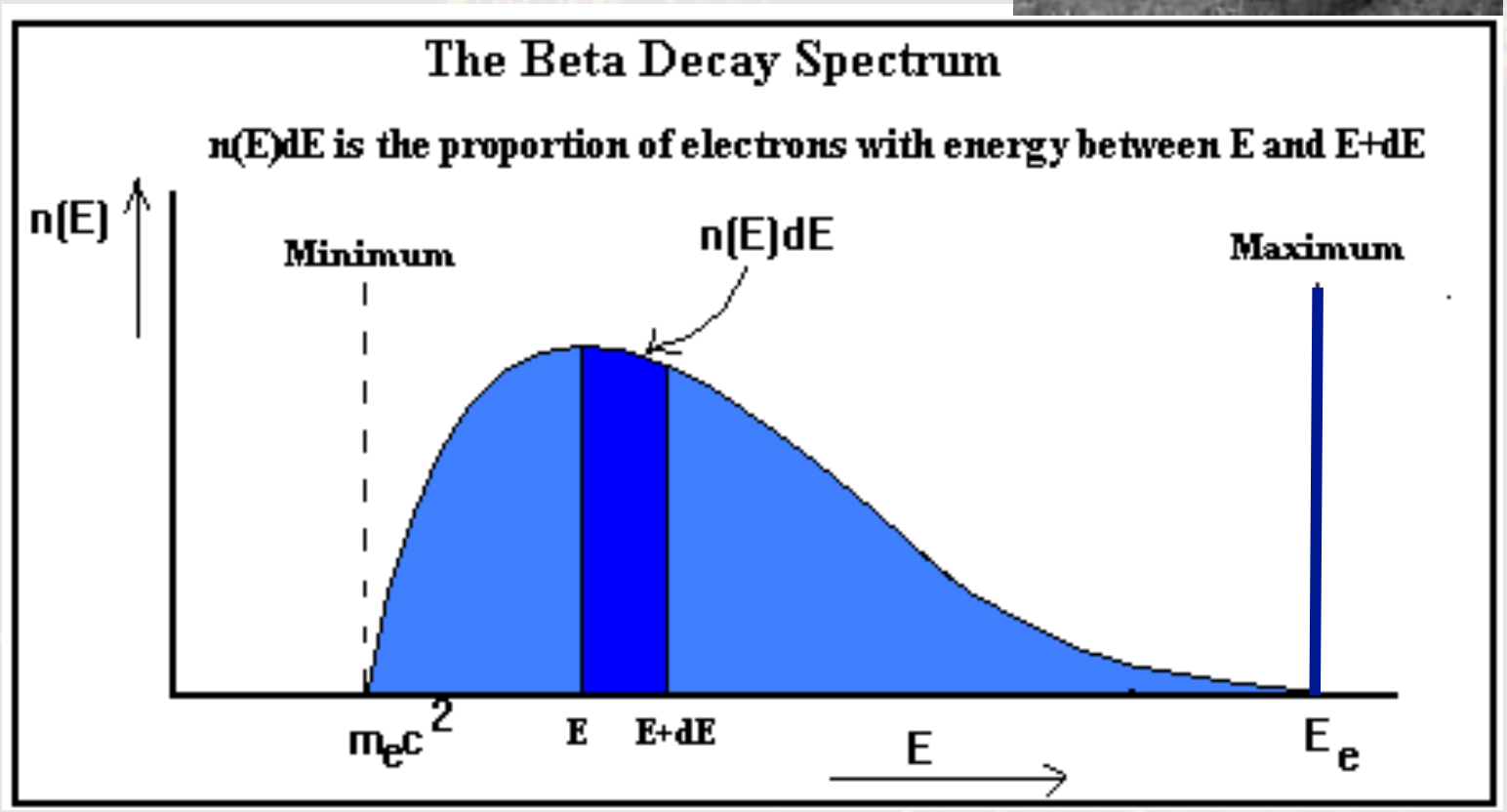
$$n \rightarrow p + e$$



Spektrum premeny beta

Chýbajúca energia v rozpade β:

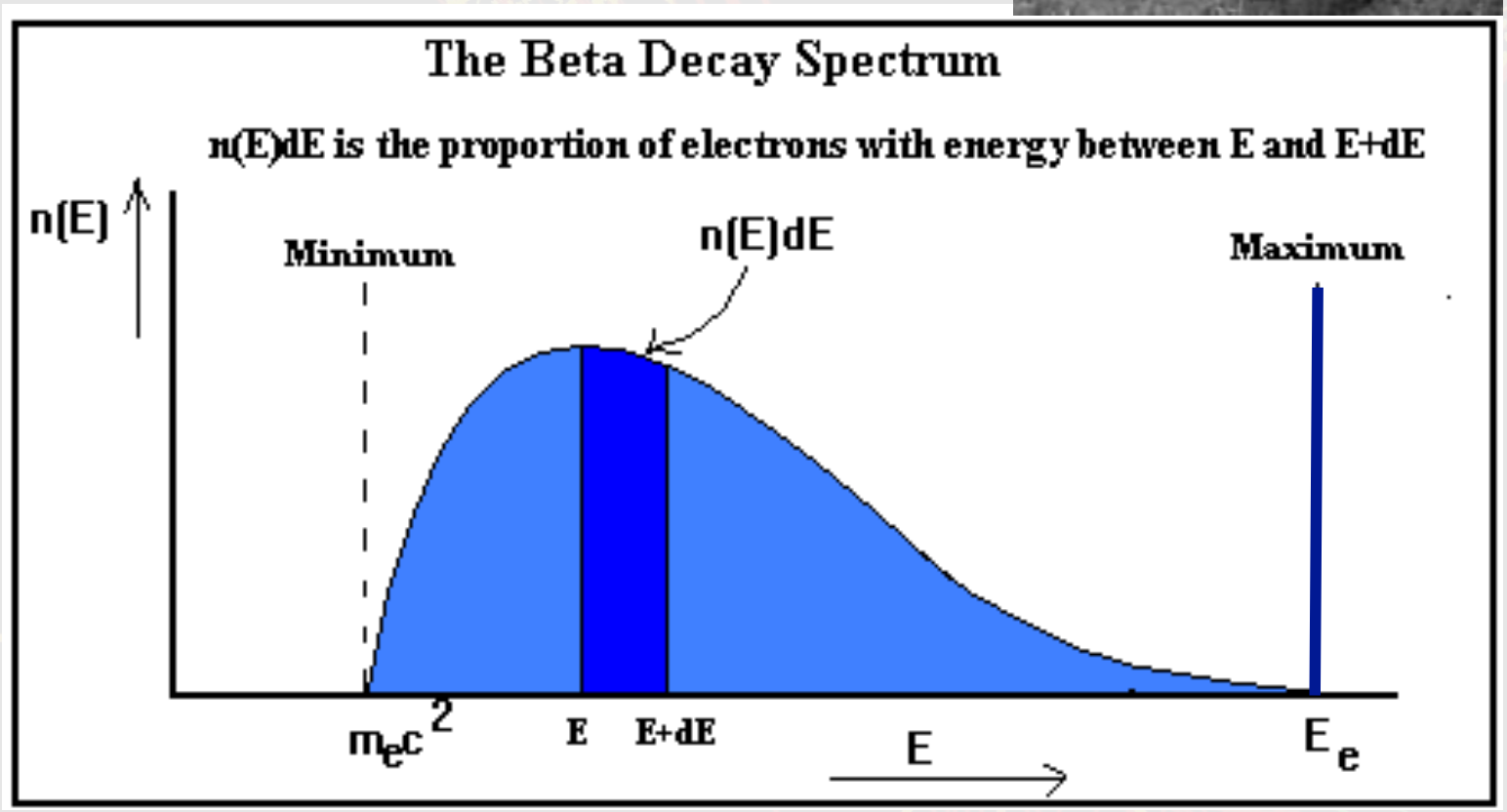
$$n \rightarrow p + e$$



Spektrum premeny beta

Chýbajúca energia v rozpade β:

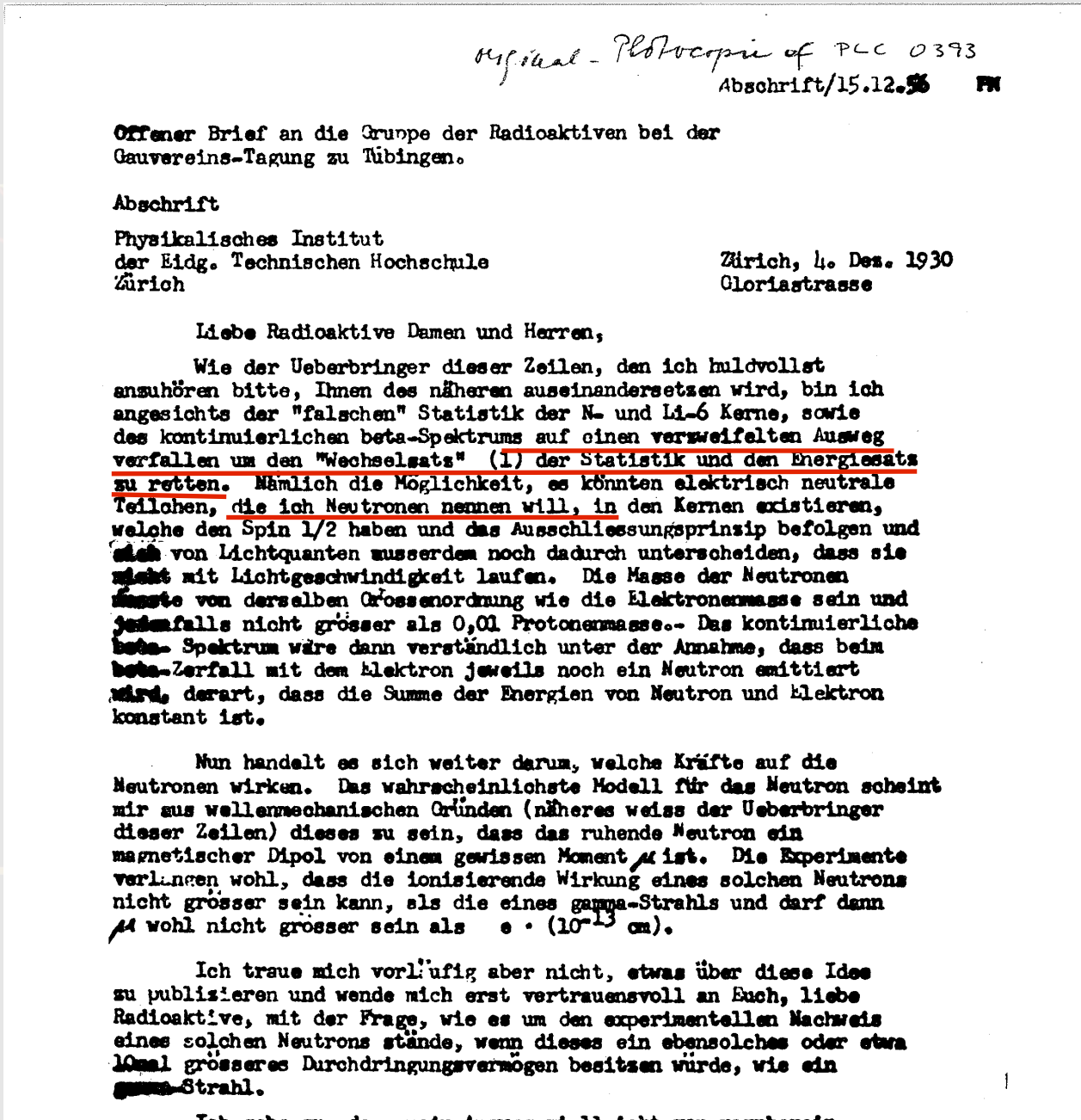
$$n \rightarrow p + e + \bar{\nu}$$



Liebe Radioaktive Damen und Herren

Wolfgang Pauli:

... bol som zvedený k pochybnému východisku ... na záchranu zákona zachovania energie. ... V jadrách môžu existovať ... neutróny ... s hmotnosťou nie väčšou ako 0,01 hmotnosti protónu



Physical - Photocopie of PLC 0393

Abschrift/15.12.30 PW

Offener Brief an die Gruppe der Radioaktiven bei der Gauvereins-Tagung zu Tübingen.

Abschrift

Physikalisches Institut
der Eidg. Technischen Hochschule
Zürich

Zürich, 4. Dez. 1930
Gloriastrasse

Liebe Radioaktive Damen und Herren,

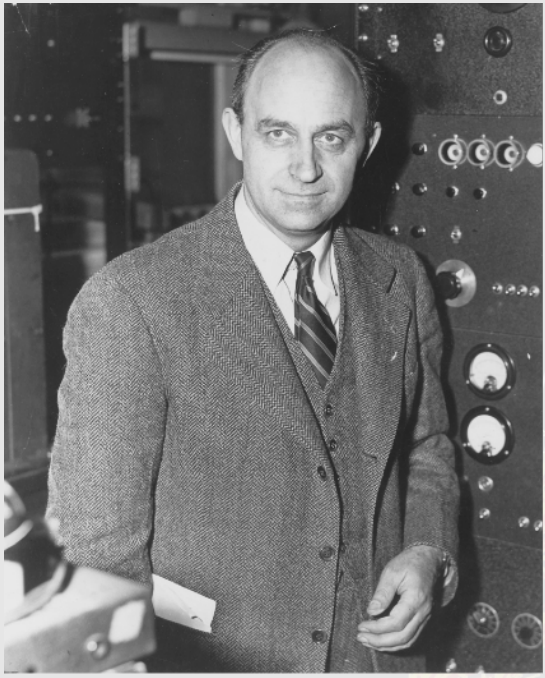
Wie der Ueberbringer dieser Zeilen, den ich huldvollst anzuhören bitte, Ihnen des näheren auseinandersetzen wird, bin ich angesichts der "falschen" Statistik der N- und Li-6 Kerne, sowie des kontinuierlichen beta-Spektrums auf einen verzweifelten Ausweg verfallen um den "Wechselsatz" (1) der Statistik und den Energiesatz zu retten. Nämlich 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 nicht mit Lichtgeschwindigkeit laufen. Die Masse der Neutronen müsste von derselben Grössenordnung wie die Elektronenmasse sein und jedenfalls nicht grösser als 0,01 Protonenmasse.- Das kontinuierliche beta- Spektrum wäre dann verständlich unter der Annahme, dass beim beta-Zerfall mit dem Elektron jeweils noch ein Neutron emittiert wird, derart, dass die Summe der Energien von Neutron und Elektron konstant ist.

Nun handelt es sich weiter darum, welche Kräfte auf die Neutronen wirken. Das wahrscheinlichste Modell für das Neutron scheint mir aus wellenmechanischen Gründen (näheres weiss der Ueberbringer dieser Zeilen) dieses zu sein, dass das ruhende Neutron ein magnetischer Dipol von einem gewissen Moment μ ist. Die Experimente verlangen wohl, dass die ionisierende Wirkung eines solchen Neutrons nicht grösser sein kann, als die eines gamma-Strahls und darf dann μ wohl nicht grösser sein als $e \cdot (10^{-13}$ cm).

Ich traue mich vorläufig aber nicht, etwas über diese Idee zu publizieren und wende mich erst vertrauensvoll an Euch, liebe Radioaktive, mit der Frage, wie es um den experimentellen Nachweis eines solchen Neutrons stände, wenn dieses ein ebensolches oder etwa 10mal grösseres Durchdringungsvermögen besitzen würde, wie ein gamma-Strahl.

1

Prvý pokus: Enrico Fermi

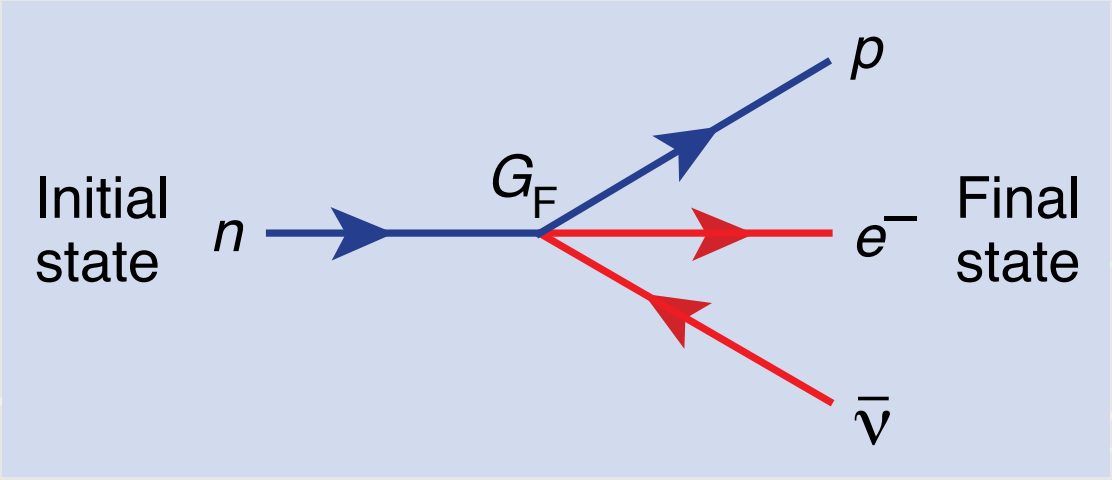


Versuch einer Theorie der β-Strahlen. I[1]).

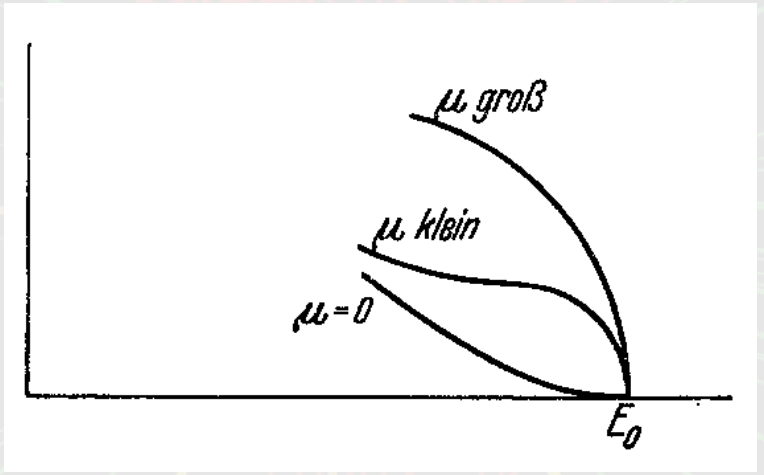
Von **E. Fermi** in Rom.

Mit 3 Abbildungen. (Eingegangen am 16. Januar 1934.)

Eine quantitative Theorie des β-Zerfalls wird vorgeschlagen, in welcher man die Existenz des Neutrinos annimmt, und die Emission der Elektronen und Neutrinos aus einem Kern beim β-Zerfall mit einer ähnlichen Methode behandelt, wie die Emission eines Lichtquants aus einem angeregten Atom in der Strahlungstheorie. Formeln für die Lebensdauer und für die Form des emittierten kontinuierlichen β-Strahlenspektrums werden abgeleitet und mit der Erfahrung verglichen.



s experimentálnym spektrom najlepšie súhlasí hypotéza neutrína s nulovou hmotnosťou



Zdroje neutrín

- jadrové reaktory (jadrové výbuchy)
  beta premena štiepnych produktov,
  napr. ^{134}Cs, ^{137}Cs, ^{135}I, ^{131}I, ^{135}Xe ...
- Slnko

$$p + p \rightarrow d + e^+ + \nu_e$$

- kozmické žiarenie, atmosférické neutrína

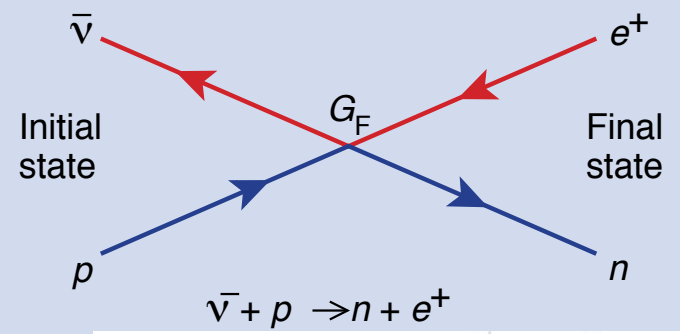
$$\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu \qquad \pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$$

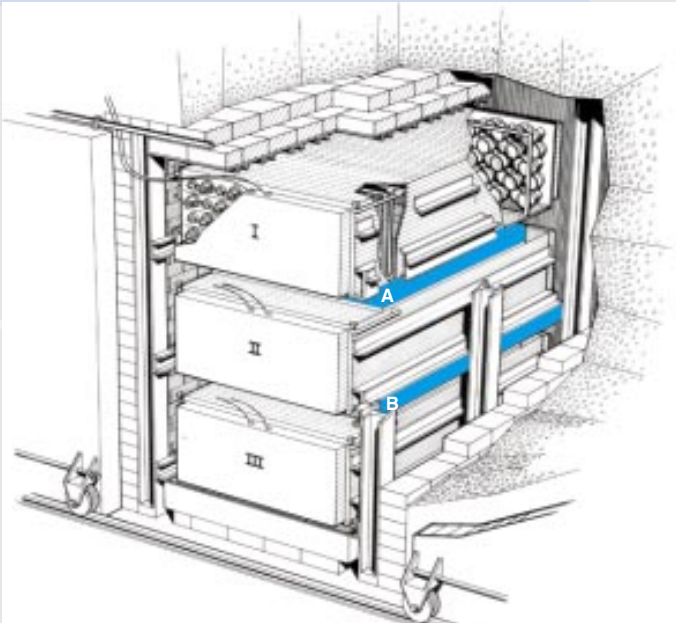
- urýchľovače

Objav (anti)neutrína

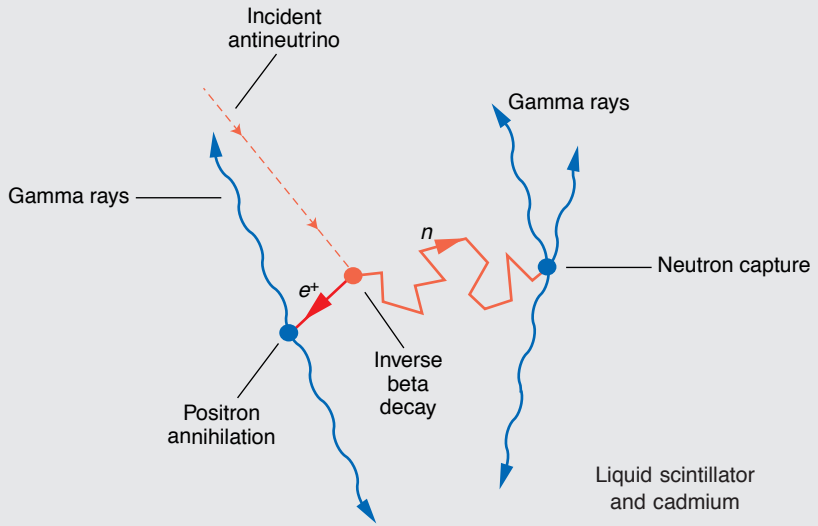
Clyde L. Cowan, Frederick Reines, 1956,
Jadrová elektráreň Savannah River (SC)

inverzná premena beta





detekčný objem: voda a $CdCl_2$



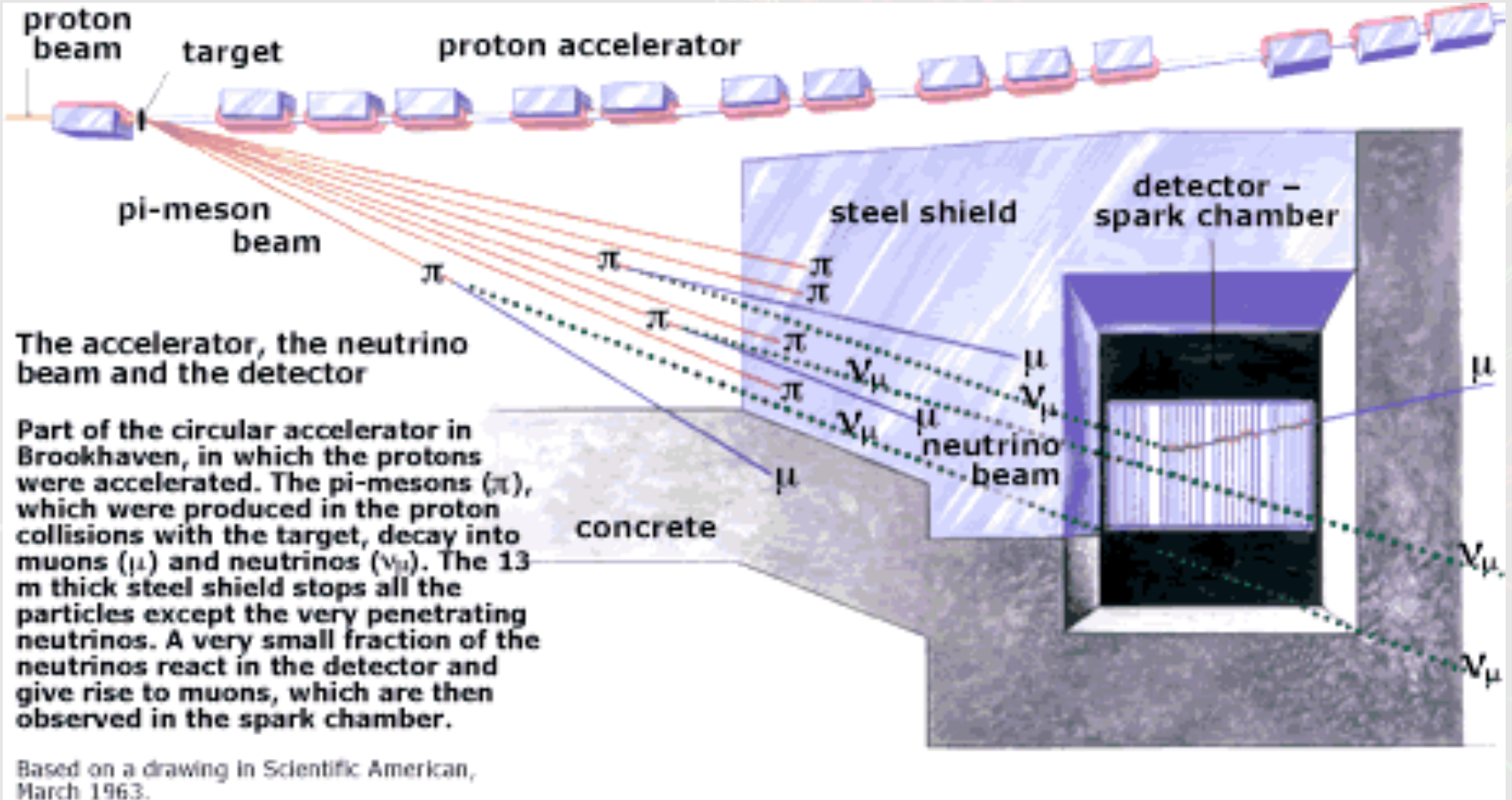
900 hodín naberania dát

1 neutríno/hodina

Objav miónového neutrína

Vzniká pri premene miónu na elektrón alebo pri rozpade piónu na mión.

1962,
Leon Ledermann,
Melvin Schwartz,
Jack Steinberger



Tok slnečných neutrín

Vodíkový cyklus produkcie energie v Slnku(skrátený)

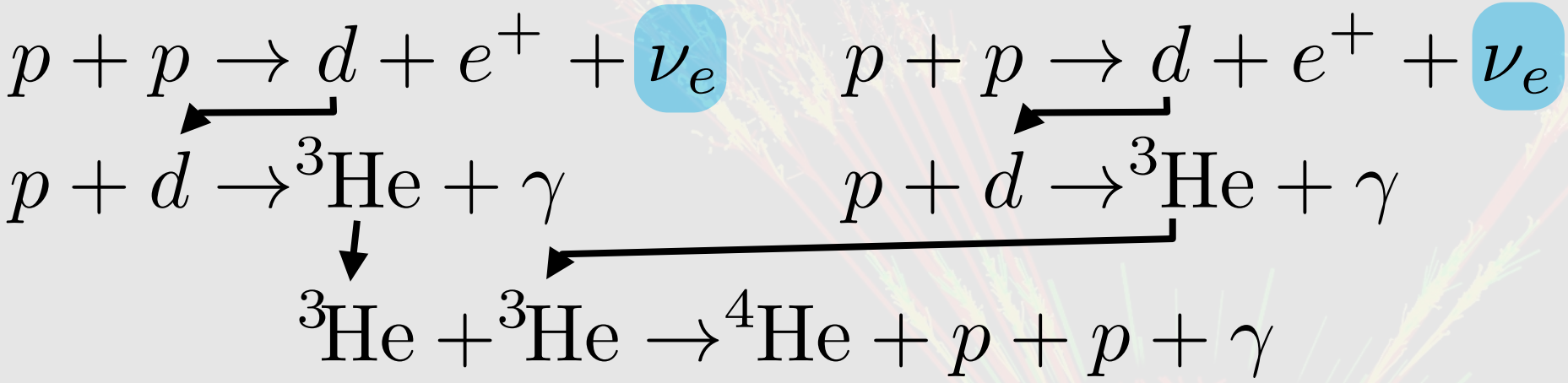
$$p + p \rightarrow d + e^{+} + \nu_e \qquad p + p \rightarrow d + e^{+} + \nu_e$$

$$p + d \rightarrow {}^{3}\mathrm{He} + \gamma \qquad p + d \rightarrow {}^{3}\mathrm{He} + \gamma$$

$${}^{3}\mathrm{He} + {}^{3}\mathrm{He} \rightarrow {}^{4}\mathrm{He} + p + p + \gamma$$

Tok slnečných neutrín

Vodíkový cyklus produkcie energie v Slnku(skrátený)



25 MeV a 2 neutrína

Tok slnečných neutrín

Vodíkový cyklus produkcie energie v Slnku(skrátený)

$$p + p \rightarrow d + e^{+} + \nu_e \qquad p + p \rightarrow d + e^{+} + \nu_e$$

$$p + d \rightarrow {}^{3}\mathrm{He} + \gamma \qquad p + d \rightarrow {}^{3}\mathrm{He} + \gamma$$

$${}^{3}\mathrm{He} + {}^{3}\mathrm{He} \rightarrow {}^{4}\mathrm{He} + p + p + \gamma$$

25 MeV a 2 neutrína

Solárna konštanta: 1,4 kW/m²

Tok slnečných neutrín

Vodíkový cyklus produkcie energie v Slnku(skrátený)

$$p + p \rightarrow d + e^+ + \nu_e \qquad p + p \rightarrow d + e^+ + \nu_e$$

$$p + d \rightarrow {}^3\mathrm{He} + \gamma \qquad p + d \rightarrow {}^3\mathrm{He} + \gamma$$

$${}^3\mathrm{He} + {}^3\mathrm{He} \rightarrow {}^4\mathrm{He} + p + p + \gamma$$

25 MeV a 2 neutrína

Solárna konštanta: 1,4 kW/m²

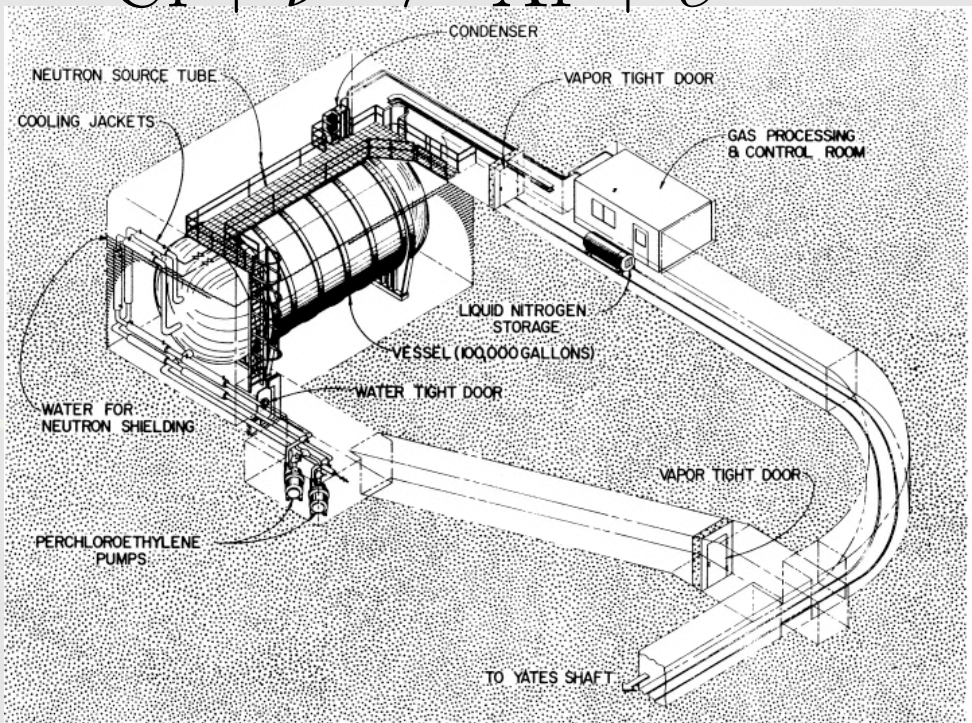
Tok neutrín: $\frac{2}{25 \cdot 10^6 \cdot 1{,}6 \cdot 10^{-19}} 1{,}4 \cdot 10^3 = 7{,}0 \cdot 10^{14}\ /\mathrm{s\ m^2}$

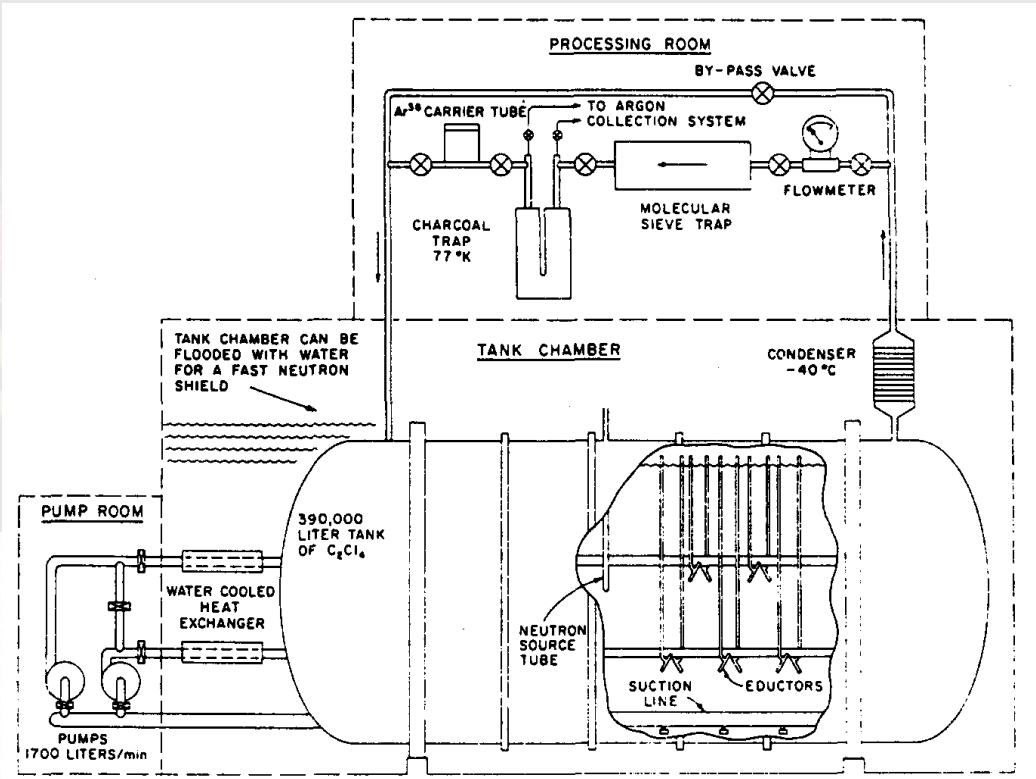
Experiment Homestake

Baňa Homestake, Lead, ND
Raymond Davis Jr.,
John N. Bahcall

hĺbka 1480 m,
380 000 litrov C_2Cl_4

$$^{37}\mathrm{Cl} + \nu \rightarrow {}^{37}\mathrm{Ar} + e$$





citlivé na neutrína s energiou vyššou ako z pp cyklu

deficit neutrín

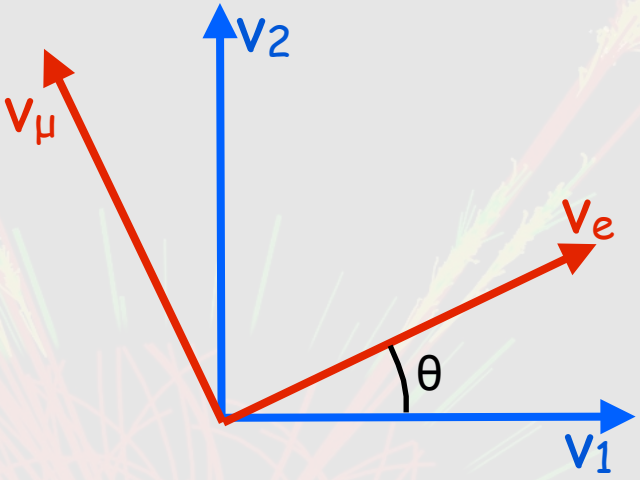
R = 0,27±0,04

Oscilácie neutrín

Majme len dve generácie neutrín

Dve sady neutrínových stavov:
(ν_e,ν_μ), a s určitými (rôznymi) hmotnosťami (ν_1,ν_2)

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



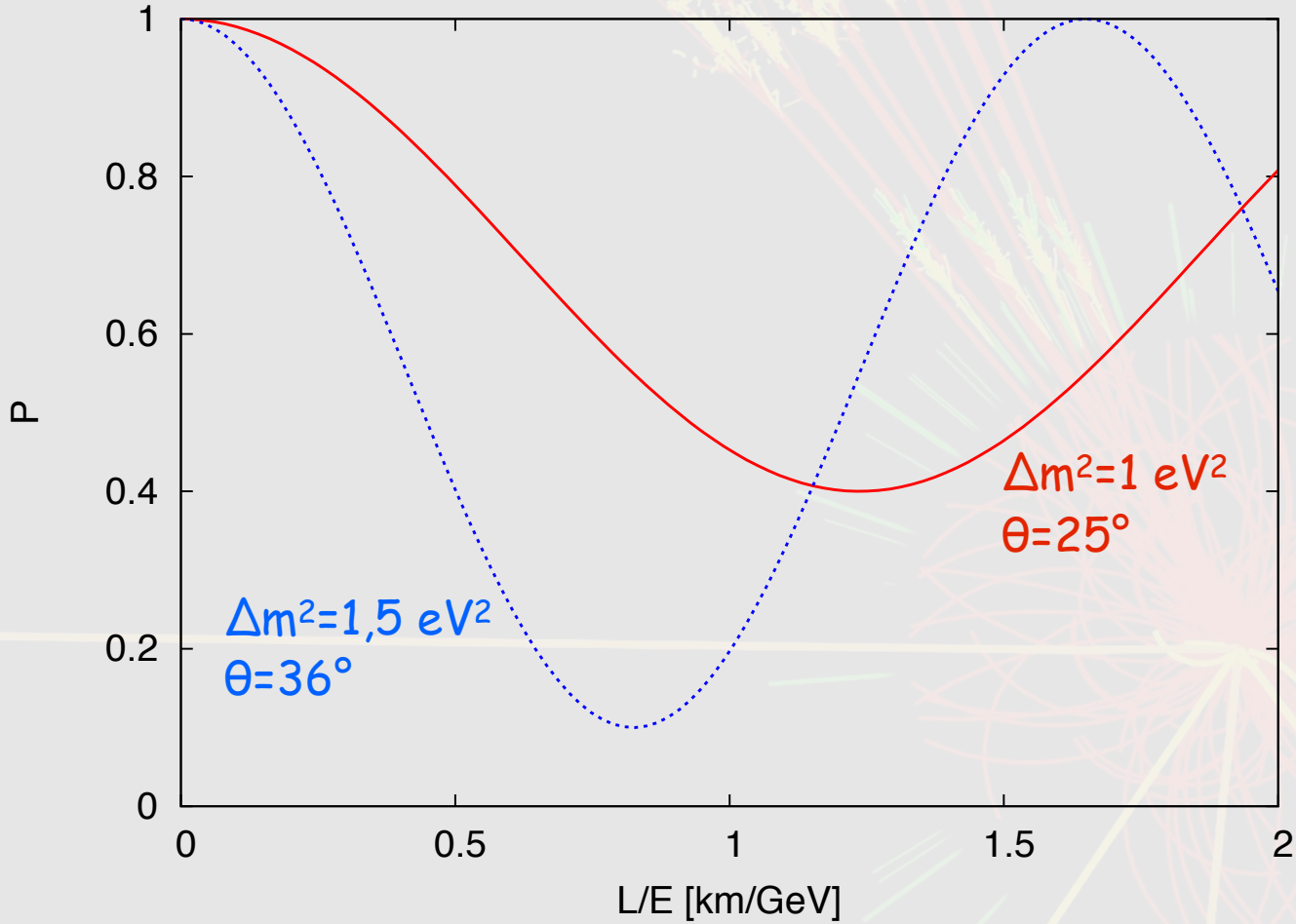
Časový vývoj stavu:
E_1 a E_2 sú rozdielne kvôli rozdielnym hmotnostiam

$$\nu_e(t) = \cos\theta\,\nu_1\,e^{-iE_1t/\hbar} + \sin\theta\,\nu_2\,e^{-iE_2t/\hbar}$$

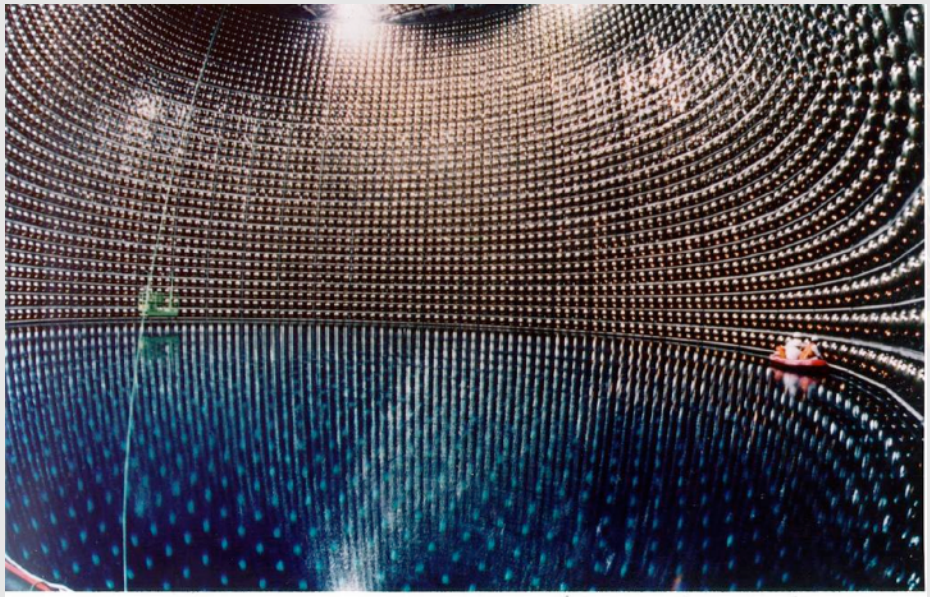
Oscilácie neutrín 2

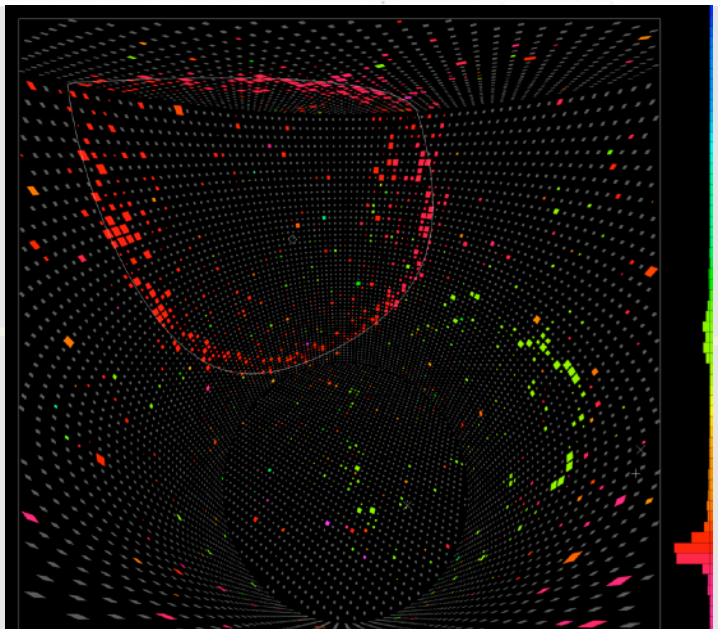
Pravdepodobnosť, že neutríno si zachová typ:

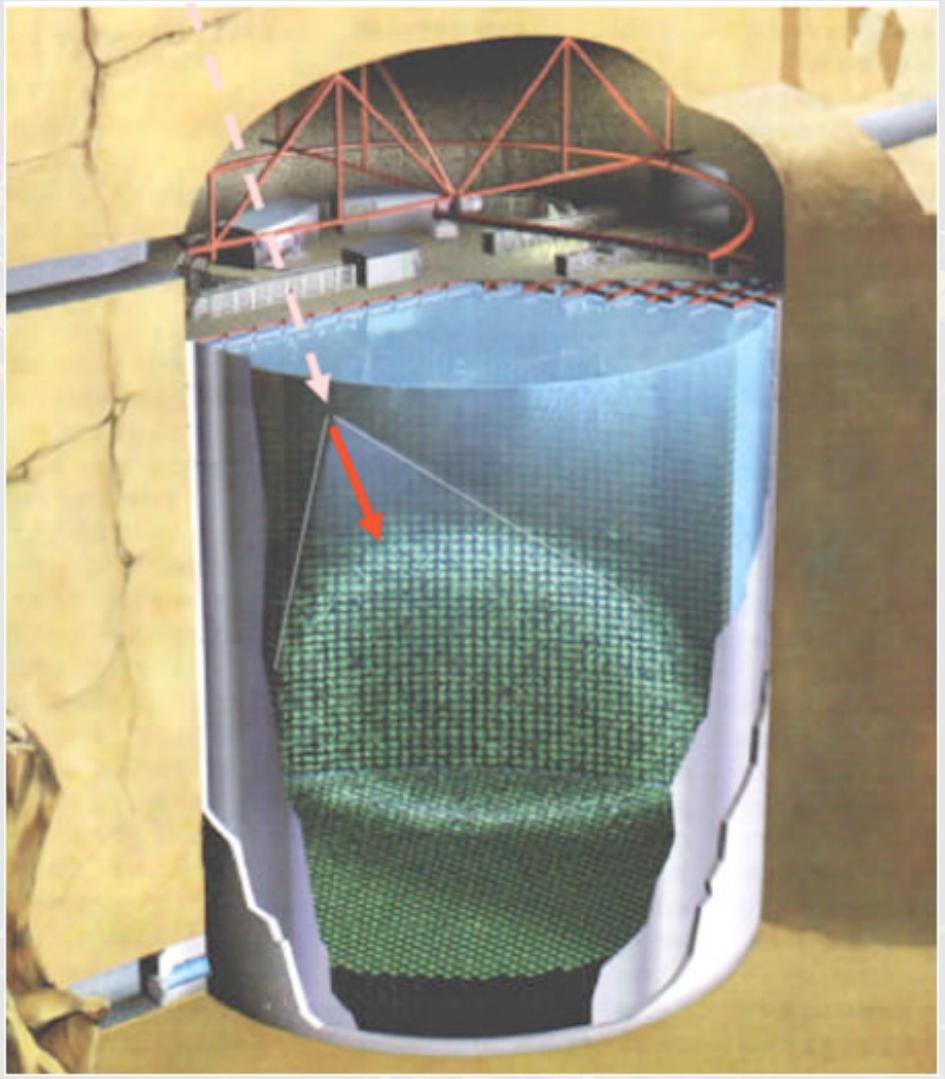
$$P = 1 - \sin^2 2\theta \ \sin^2 \left[\frac{c^2}{4\hbar} \frac{\Delta m^2 \, L}{E} \right]$$



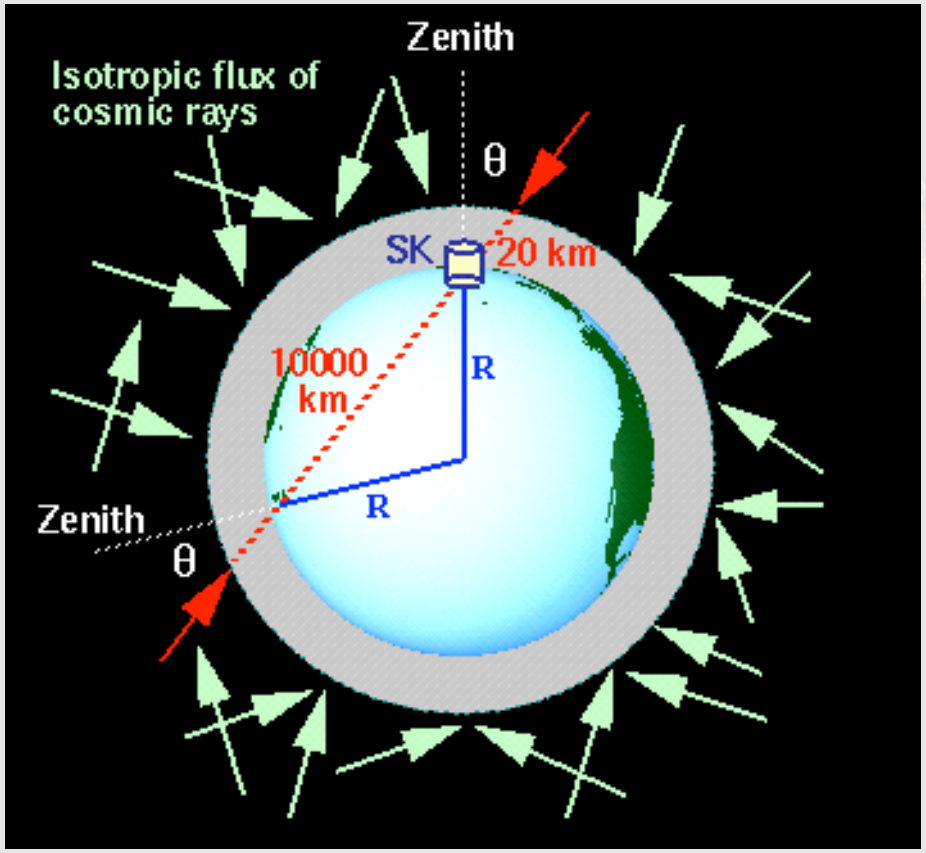
Experiment Superkamiokande

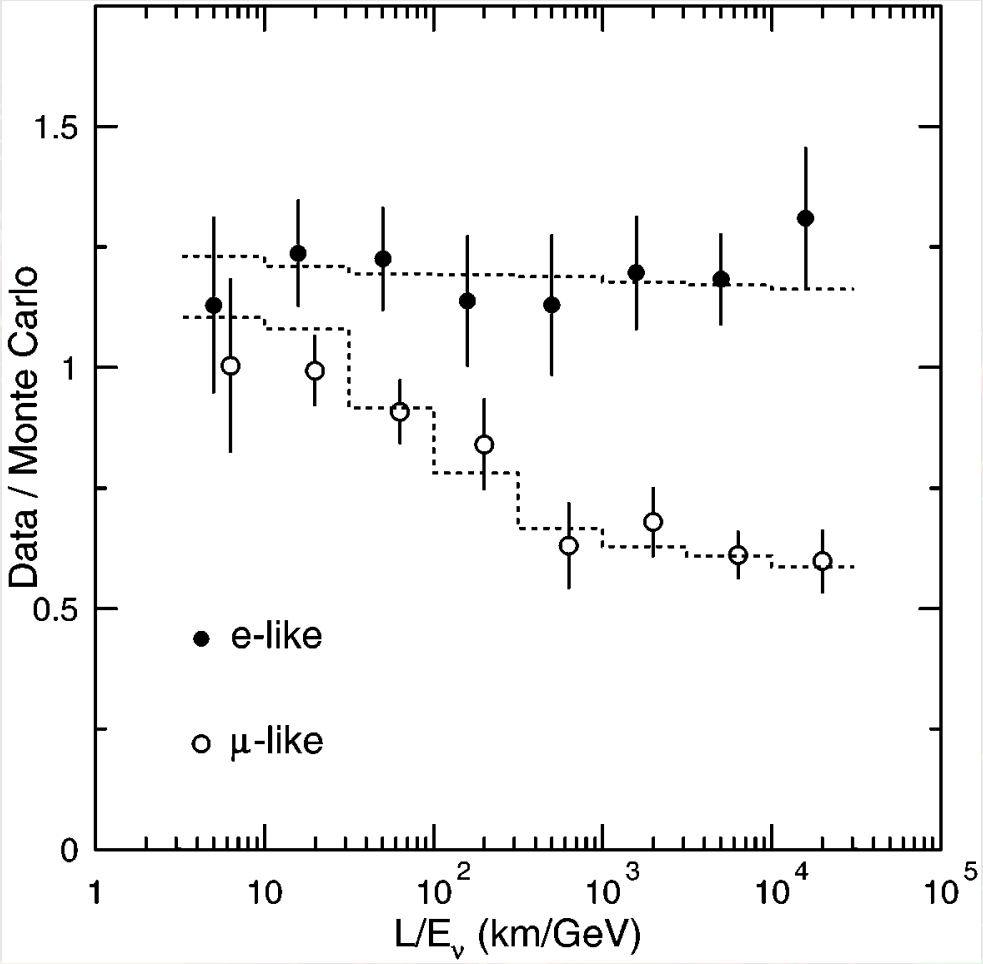






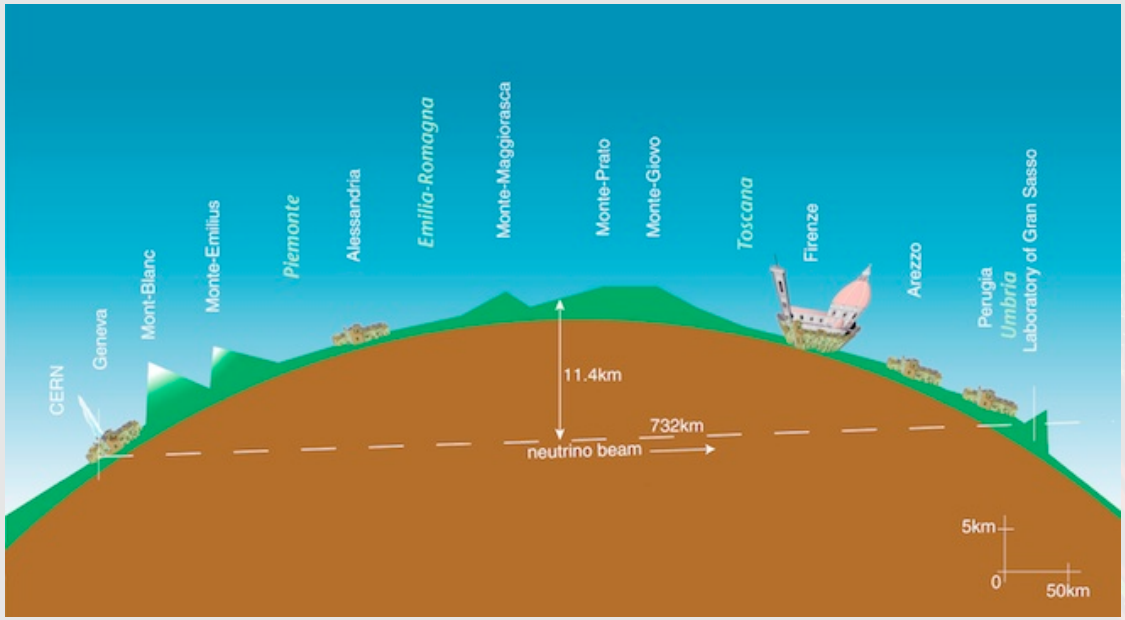
Super-K: dôkaz oscilácií

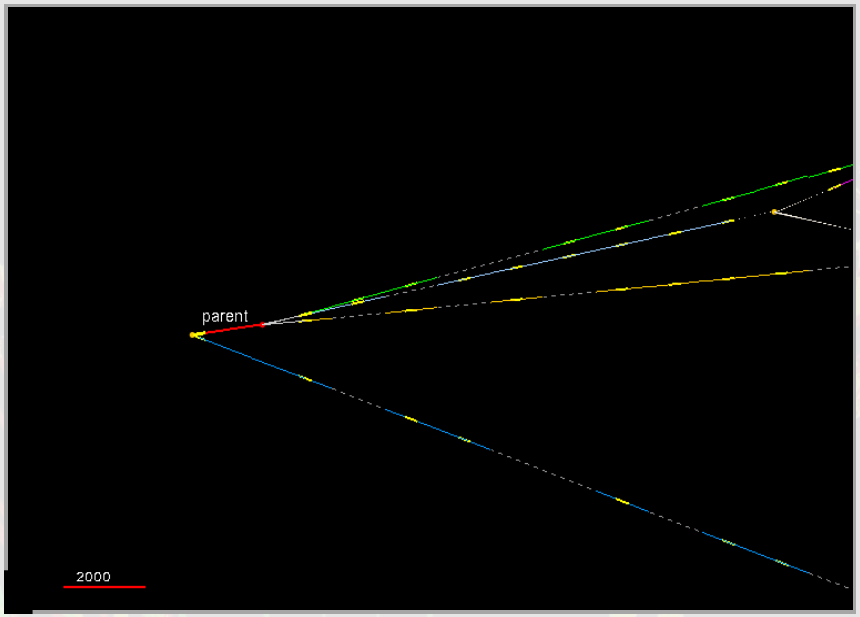


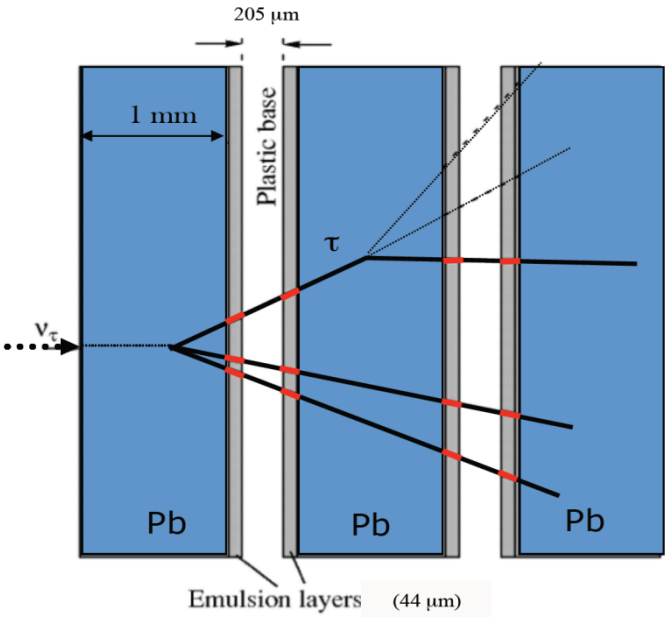


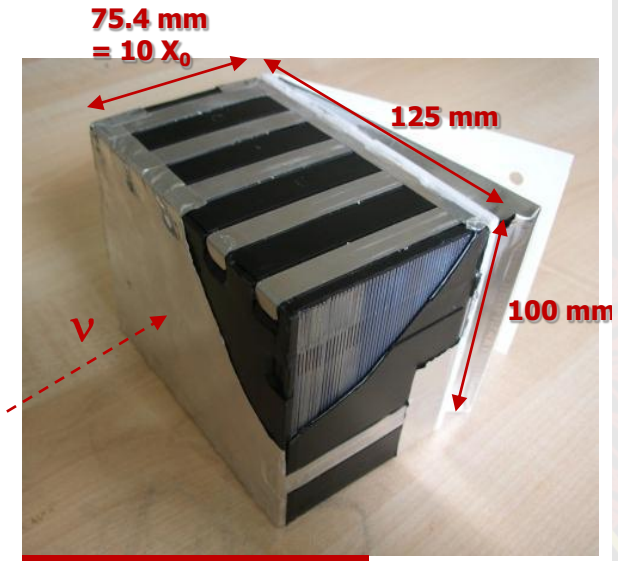
[T. Fukuda et al., Physical Review Letters 81 (1998) 1563]

OPERA: oscilácie na ν_T





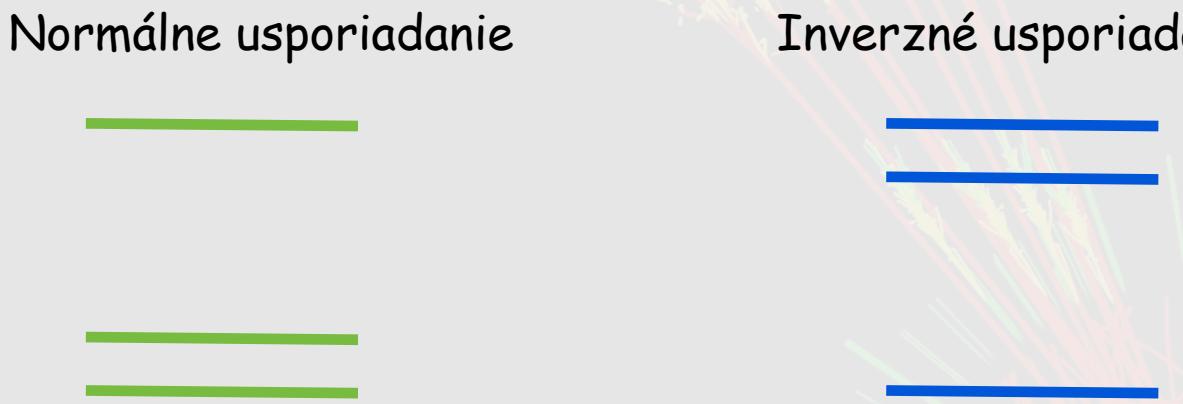




Brick weight = 8.3 kg

Otvorené otázky

- Aké sú absolútne hmotnosti neutrín? (oscilácie hovoria len o rozdieloch)



- Sú neutrína Majoranovské častice? (sú sami sebe antičasticami?)