



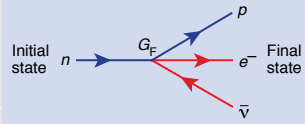
## Prvý pokus: Enrico Fermi



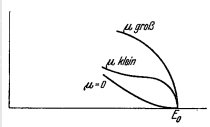
Versuch einer Theorie der  $\beta$ -Strahlen. I').  
Von E. Fermi in Rom.

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

Eine quantitative Theorie des  $\beta$ -Zerfalls wird vorgeschlagen, in welcher man die Existenz des Neutrinos annimmt, und die Emission der Elektronen und Neutrinos aus einem Kern beim  $\beta$ -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  $\beta$ -Strahlungsspektrums werden abgeleitet und mit der Erfahrung verglichen.



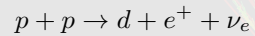
s experimentálnym spektrom  
najlepšie súhlasí hypotéza  
neutrína s nulovou hmotnosťou



## Zdroje neutrín

- jadrové reaktory (jadrové výbuchy)  
beta premena štiepných produktov,  
napr.  $^{134}\text{Cs}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{135}\text{I}$ ,  $^{131}\text{I}$ ,  $^{135}\text{Xe}$  ...

- Slnko



- kozmické žiarenie, atmosférické neutrína

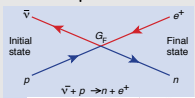


- urýchľovače

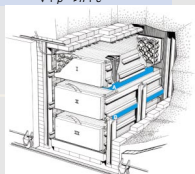
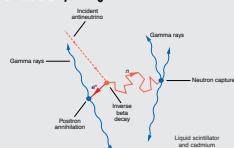
## Objav (anti)neutrína

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

inverzná premena beta



detekčný objem: voda a  $\text{CdCl}_2$



900 hodín naberania dát  
1 neutríno/hodina



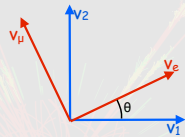
## Oscilácie neutrín

Majme len dve generácie neutrín

Dve sady neutrínových stavov:  
( $\nu_e, \nu_\mu$ ), a s určitými (rôznymi) hmotnosťami ( $\nu_1, \nu_2$ )

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

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



Časový vývoj stavu:

$E_1$  a  $E_2$  sú rozdielne kvôli rozdielnym hmotnostiam

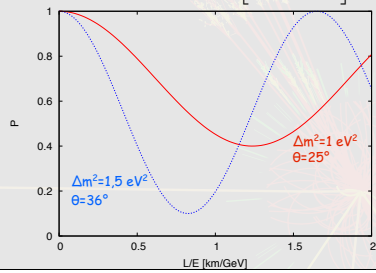
$$\nu_e(t) = \cos \theta \nu_1 e^{-iE_1 t/\hbar} + \sin \theta \nu_2 e^{-iE_2 t/\hbar}$$

10

## Oscilácie neutrín 2

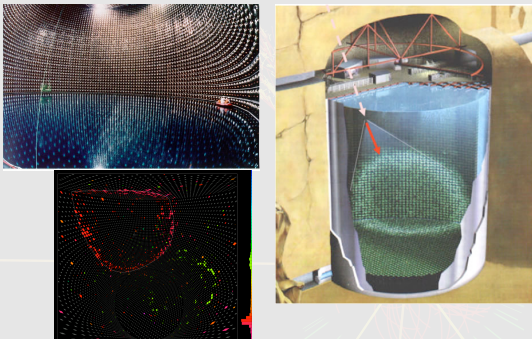
Pravdepodobnosť, že neutríno si zachová typ:

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



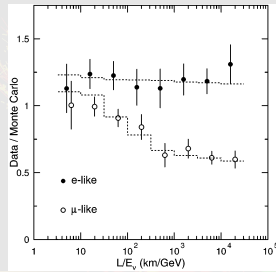
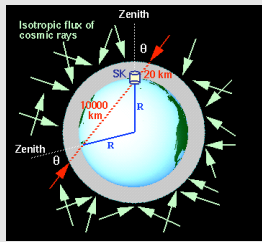
11

## Experiment Superkamiokande



12

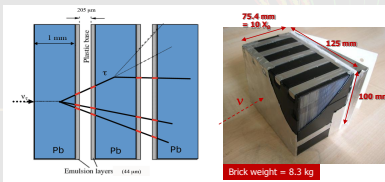
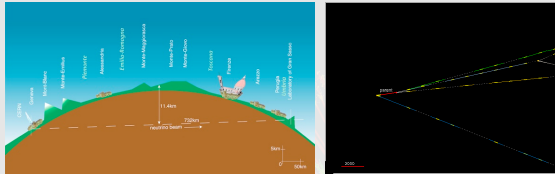
## Super-K: dôkaz oscilácií



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

13

## OPERA: oscilácie na $\nu_\tau$



14

## Otvorené otázky

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

Normálne usporiadanie



Inverzné usporiadanie



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

15