Neutrini e oscillazioni dei neutrini

Neutrini e oscillazioni dei neutrini

1930 proposto da Pauli

per spiegare lo spettro continuo del decadimento beta

$N \rightarrow N' e^-$

$N \rightarrow N' e^- \nu$

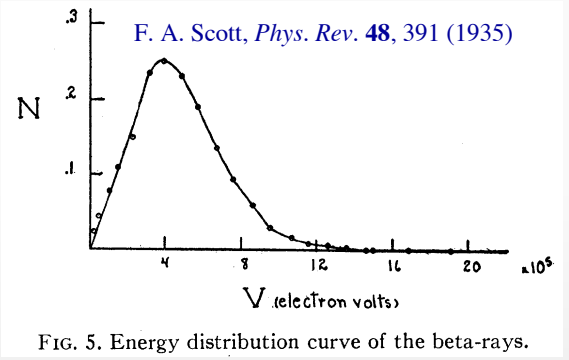
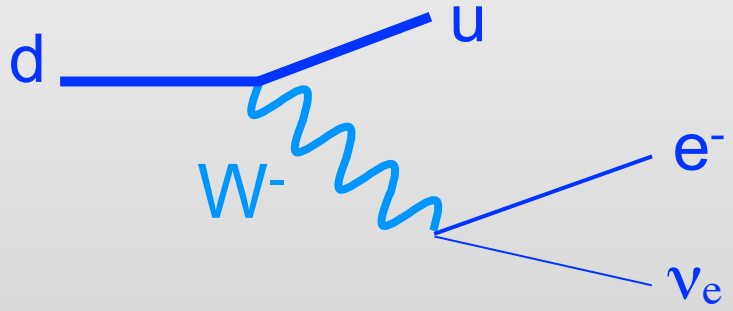
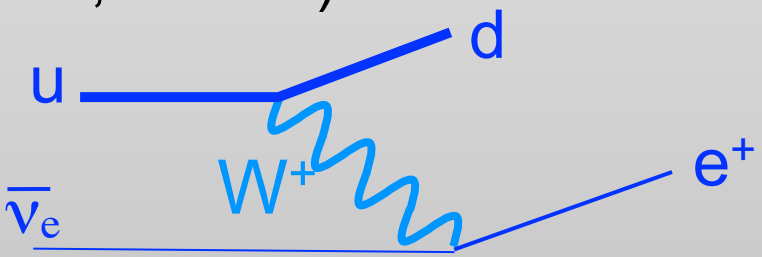


FIG. 5. Energy distribution curve of the beta-rays.

1932 teoria di Fermi del decadimento beta- interazioni deboli



1956 rivelazione diretta (Cowan, Reines)



1962 neutrino mu

2000 neutrino tau

Neutrini e oscillazioni dei neutrini

I neutrini interagiscono (molto) debolmente!

E.g., per una particella da ~1 MeV

protone	1mm carta
elettrone	<1cm alluminio
neutrone	2-3 cm plastica
gamma	10 cm H_2O

Neutrini e oscillazioni dei neutrini

I neutrini interagiscono (molto) debolmente!

E.g., per una particella da ~1 MeV

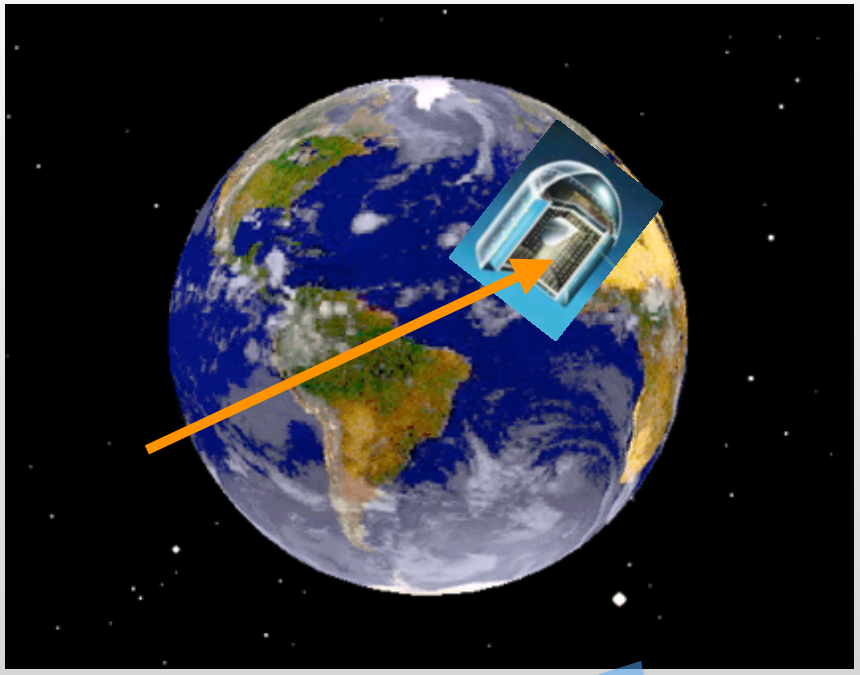
protone	1mm carta
elettrone	<1cm alluminio
neutrone	2-3 cm plastica
gamma	10 cm H_2O
neutrino	*1 anno luce di Piombo*

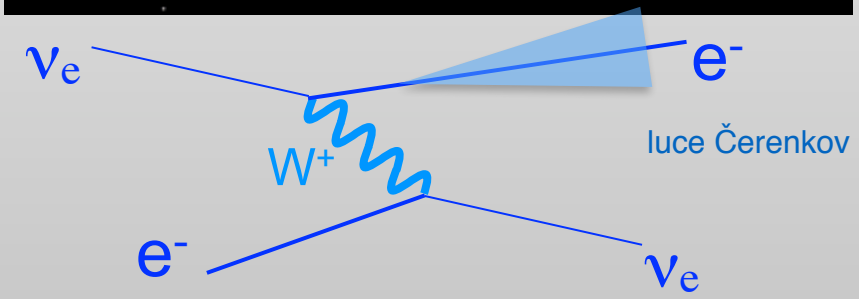
Neutrini e oscillazioni dei neutrini

I neutrini interagiscono (molto) debolmente!

E.g., per una particella da ~1 MeV

protone	1mm carta
elettrone	<1cm alluminio
neutrone	2-3 cm plastica
gamma	10 cm H_2O
neutrino	*1 anno luce di Piombo*





Neutrini e oscillazioni dei neutrini

ν_e

ν_μ

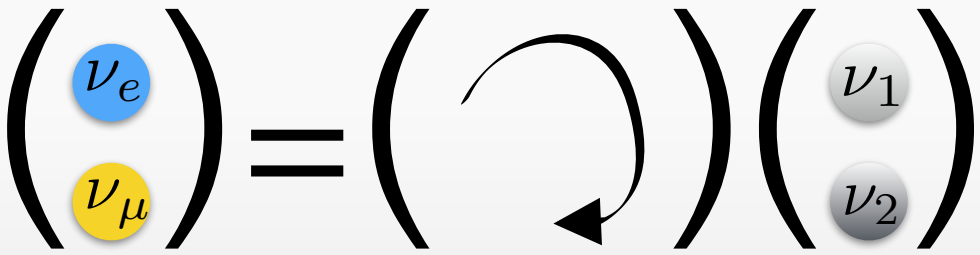
ν_τ

ν_1 m_1

ν_2 m_2

ν_3 m_3

Neutrini e oscillazioni dei neutrini



Neutrini e oscillazioni dei neutrini

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \text{Cos } \theta & \text{Sin } \theta \\ \text{-Sin } \theta & \text{Cos } \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \end{pmatrix}$$

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

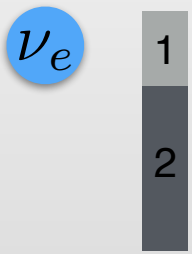
$$\nu_\mu = \cos\theta\ \nu_2 - \sin\theta\ \nu_1$$

Neutrini e oscillazioni dei neutrini

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \text{Cos } \theta & \text{Sin } \theta \\ \text{-Sin } \theta & \text{Cos } \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \end{pmatrix}$$

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

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

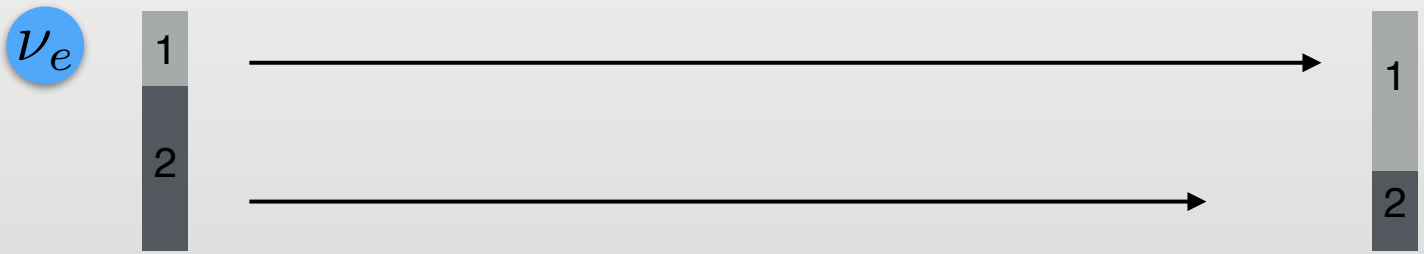


Neutrini e oscillazioni dei neutrini

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \text{Cos } \theta & \text{Sin } \theta \\ \text{-Sin } \theta & \text{Cos } \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \end{pmatrix}$$

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

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



Neutrini e oscillazioni dei neutrini

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \text{Cos } \theta & \text{Sin } \theta \\ \text{-Sin } \theta & \text{Cos } \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \end{pmatrix}$$

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

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

Neutrini e oscillazioni dei neutrini

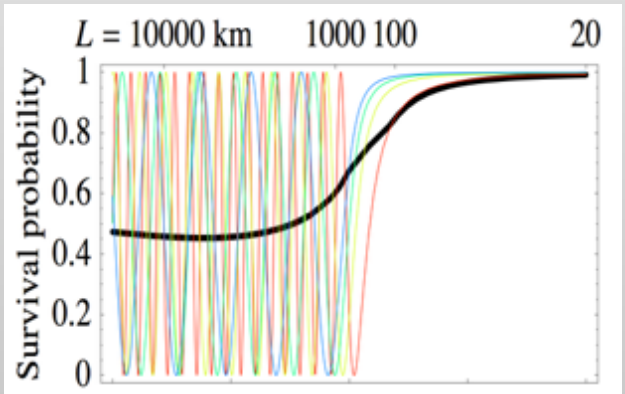
$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \text{Cos } \theta & \text{Sin } \theta \\ \text{-Sin } \theta & \text{Cos } \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \end{pmatrix}$$

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

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

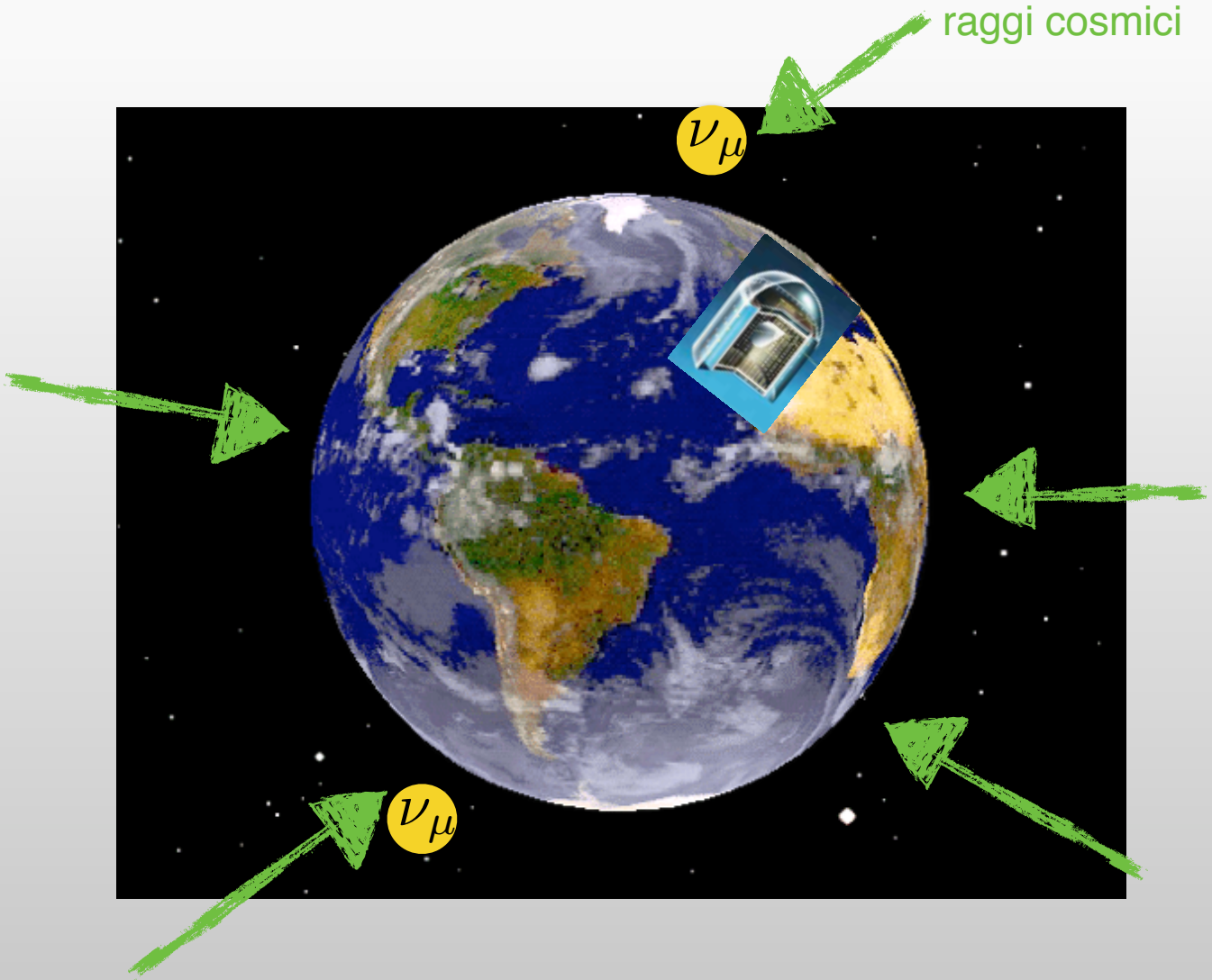
$$P(\nu_e \to \nu_\mu) = \sin^2 2\theta\ \sin^2 \frac{\Delta m^2 L}{4E}$$

$$\Delta m^2 = m_2^2 - m_1^2$$



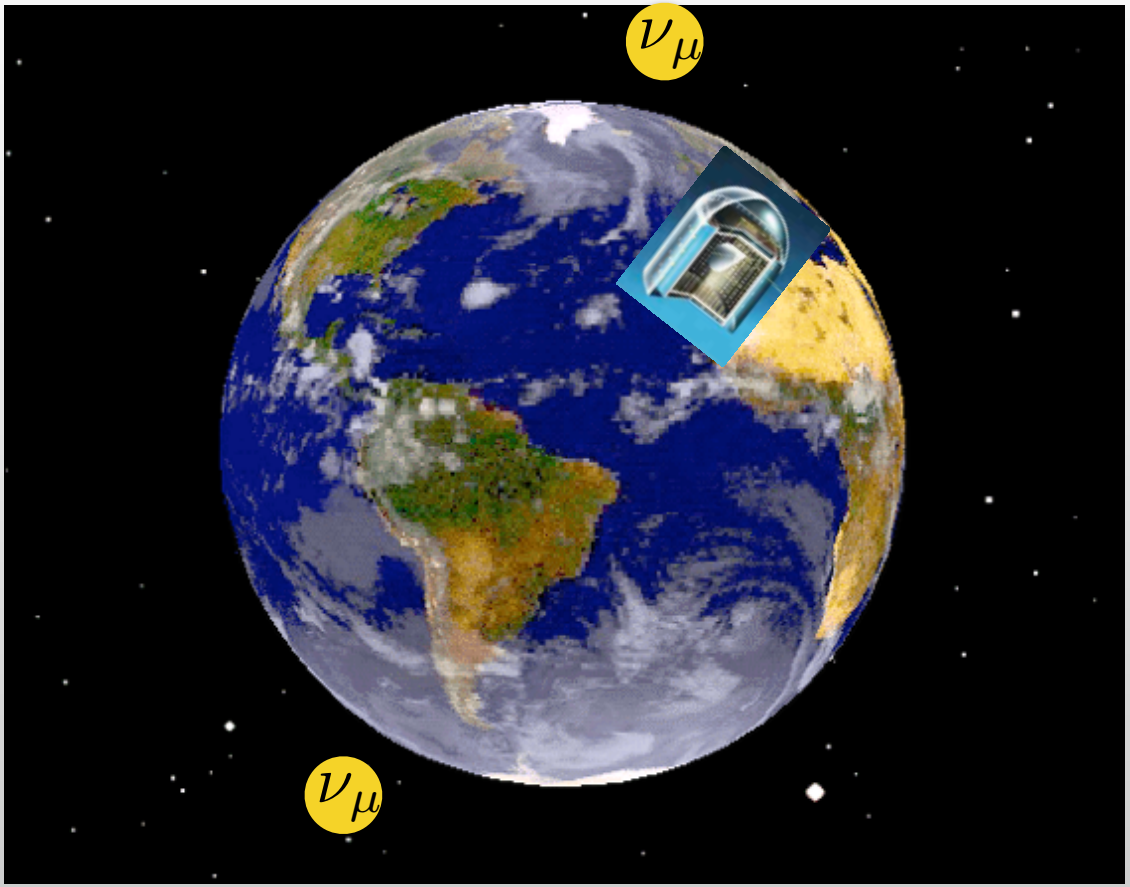
Neutrini e oscillazioni dei neutrini

Il problema dei neutrini atmosferici



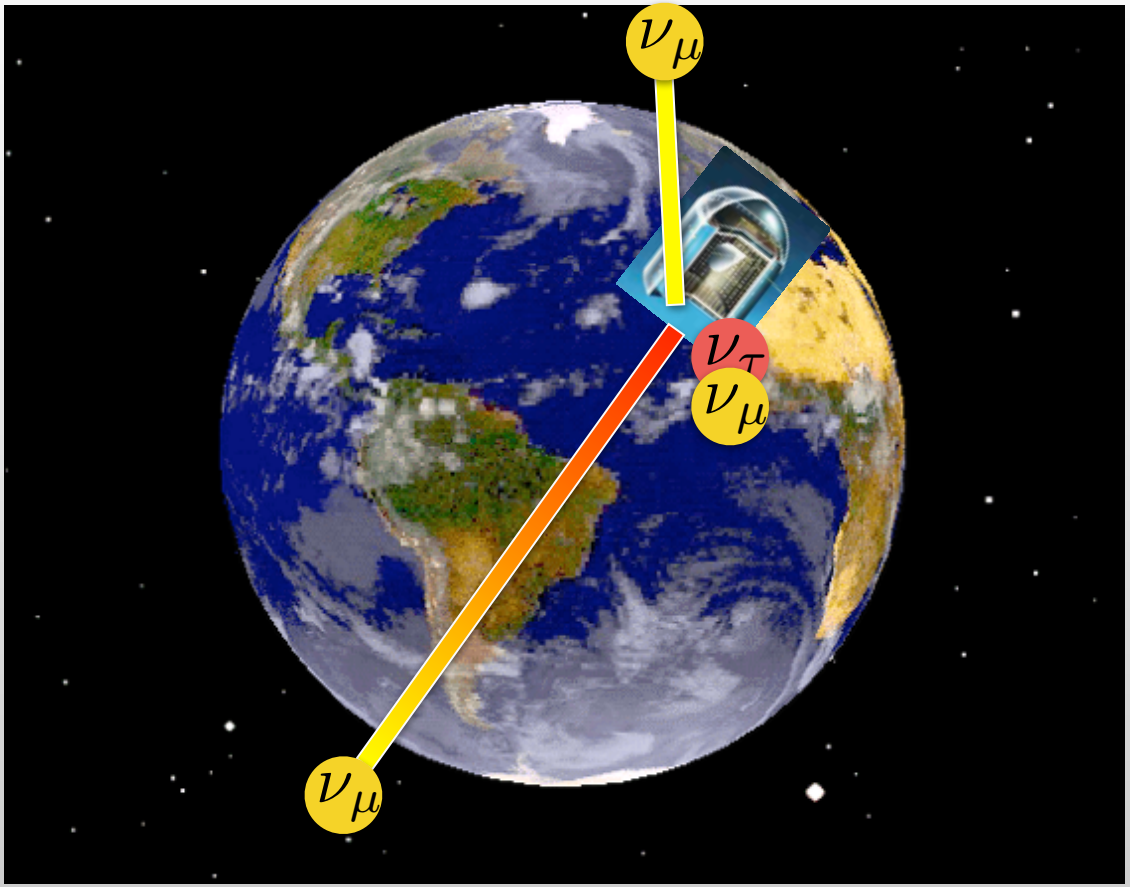
Neutrini e oscillazioni dei neutrini

Il problema dei neutrini atmosferici



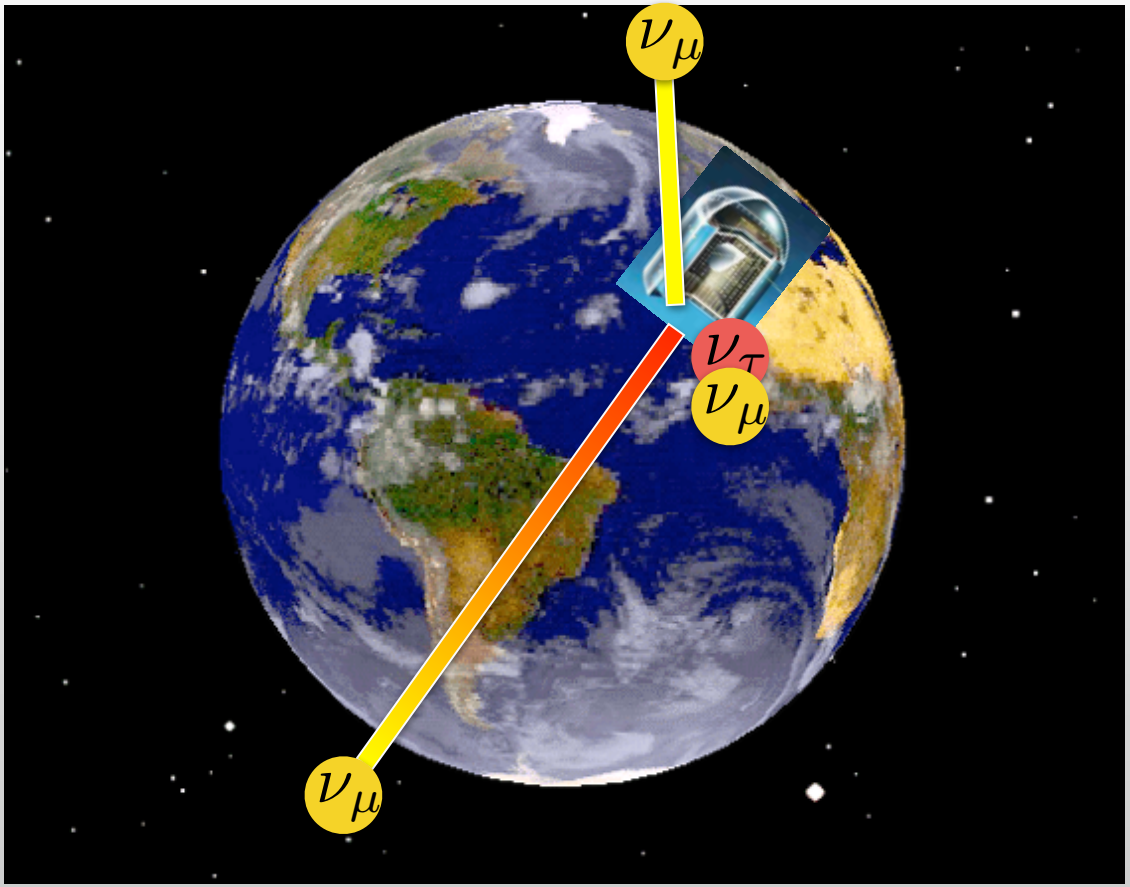
Neutrini e oscillazioni dei neutrini

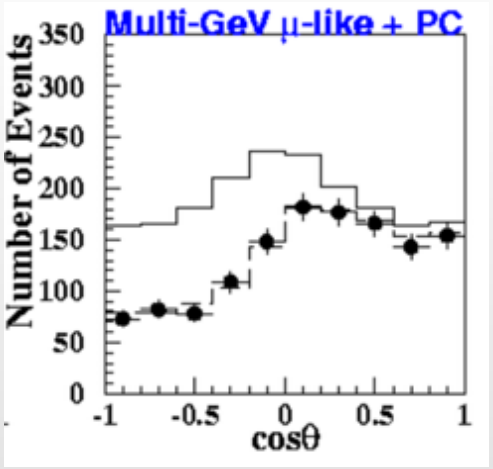
Il problema dei neutrini atmosferici



Neutrini e oscillazioni dei neutrini

Il problema dei neutrini atmosferici





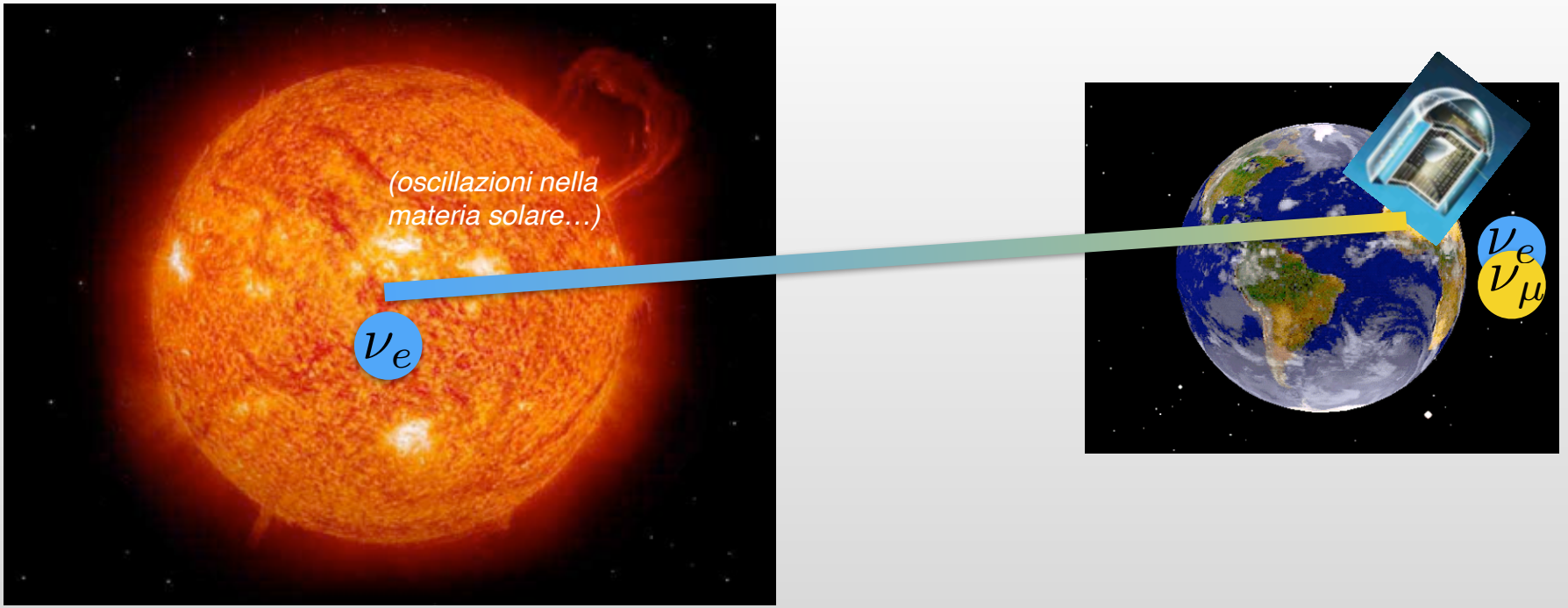
Super-Kamiokande

2015

Takaaki Kajita

Neutrini e oscillazioni dei neutrini

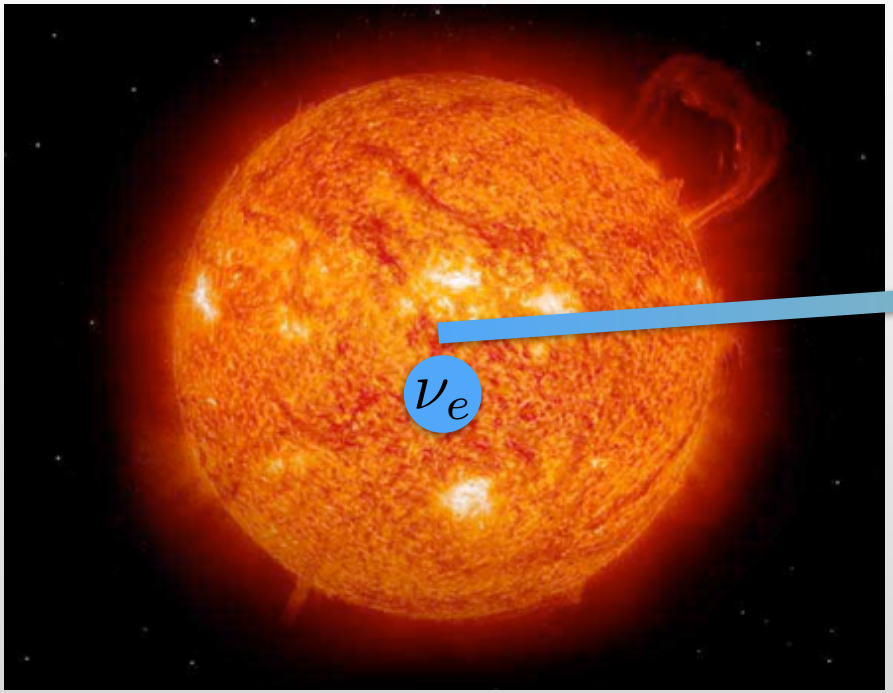
Il problema dei neutrini solari

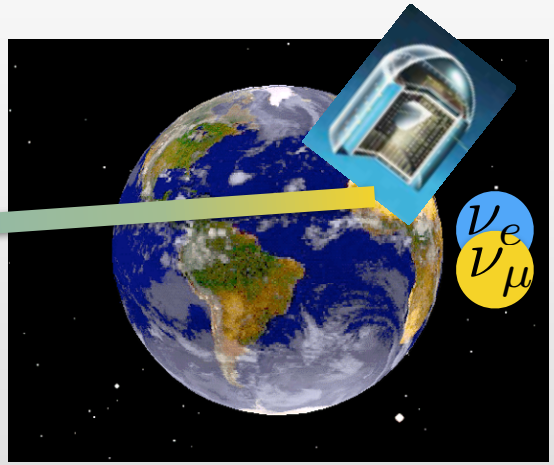


$$4p + 2e^- \rightarrow \mathrm{He} + 2\nu_e$$

Neutrini e oscillazioni dei neutrini

Il problema dei neutrini solari





$$4p + 2e^- \rightarrow \mathrm{He} + 2\nu_e$$

Homestake

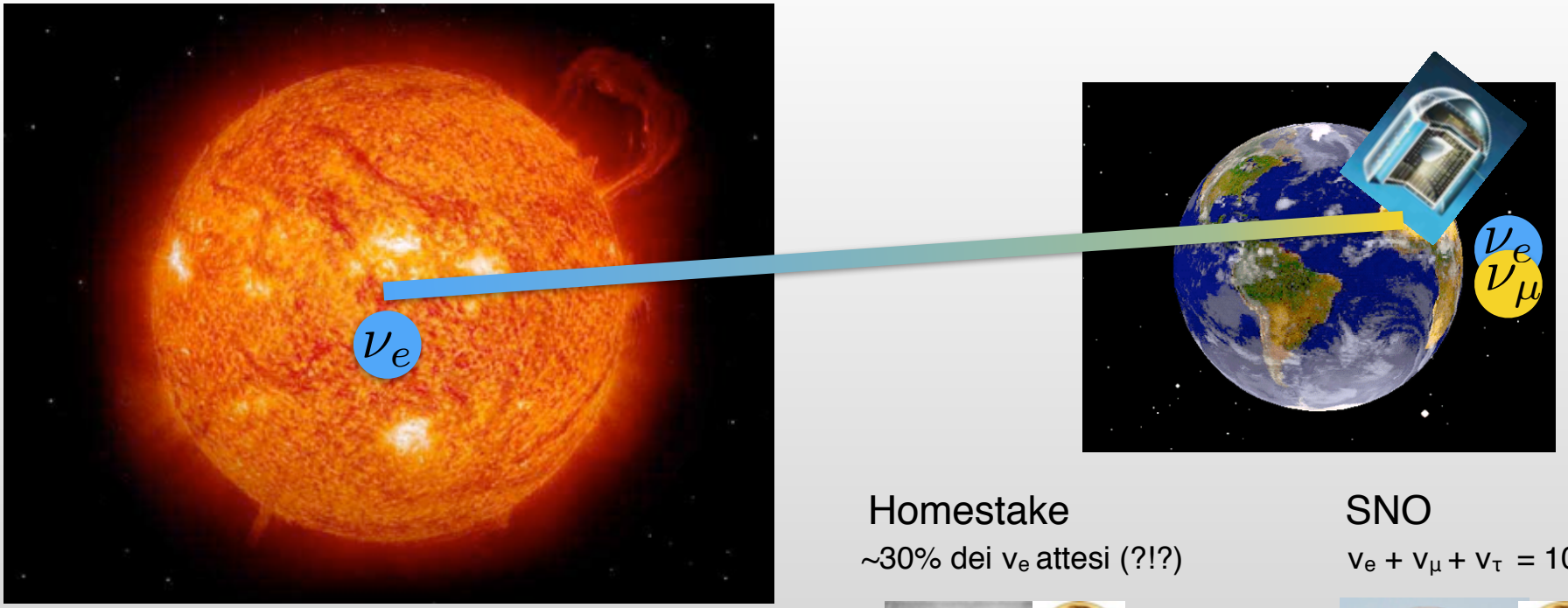
~30% dei ν_e attesi (?!?)

2002

Ray Davis

Neutrini e oscillazioni dei neutrini

Il problema dei neutrini solari



$$4p + 2e^- \rightarrow \mathrm{He} + 2\nu_e$$

Homestake

~30% dei ν_e attesi (?!?)

2002

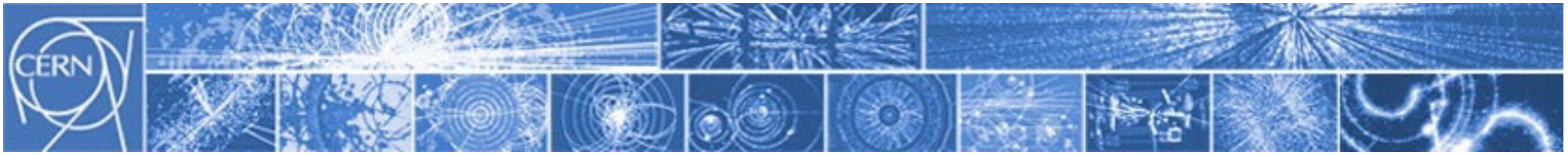
Ray Davis

SNO

$\nu_e + \nu_\mu + \nu_\tau$ = 100% !

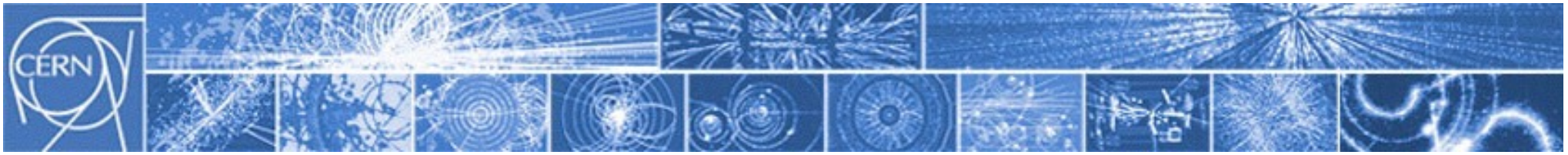
2015

Art McDonald



Neutrini e oscillazioni dei neutrini

La massa dei neutrini e la fisica Oltre il Modello Standard:



Neutrini e oscillazioni dei neutrini

La massa dei neutrini e la fisica Oltre il Modello Standard:

- nel MS, i neutrini hanno strettamente massa = *zero!*

Neutrini e oscillazioni dei neutrini

La massa dei neutrini e la fisica Oltre il Modello Standard:

- nel MS, i neutrini hanno strettamente massa = *zero!*

(conseguenza del fatto che le interazioni deboli sono *left-handed*…)

$$y_{ij}\Psi_i\Psi_j\,\frac{1}{\sqrt{2}}(v+h) \rightsquigarrow \frac{y_\mu v}{\sqrt{2}}\,\mu\mu + \frac{y_\mu}{\sqrt{2}}\mu\mu h + \nu\nu$$

Neutrini e oscillazioni dei neutrini

La massa dei neutrini e la fisica Oltre il Modello Standard:

- nel MS, i neutrini hanno strettamente massa = *zero!*

(conseguenza del fatto che le interazioni deboli sono *left-handed*…)

$$y_{ij}\Psi_i\Psi_j\,\frac{1}{\sqrt{2}}(v+h) \rightsquigarrow \frac{y_\mu v}{\sqrt{2}}\,\mu\mu + \frac{y_\mu}{\sqrt{2}}\mu\mu h + \cancel{\nu\nu}$$

Neutrini e oscillazioni dei neutrini

La massa dei neutrini e la fisica Oltre il Modello Standard:

- nel MS, i neutrini hanno strettamente massa = *zero!*

(conseguenza del fatto che le interazioni deboli sono *left-handed*…)

$$y_{ij}\Psi_i\Psi_j\,\frac{1}{\sqrt{2}}(v+h) \rightsquigarrow \frac{y_\mu v}{\sqrt{2}}\,\mu\mu + \frac{y_\mu}{\sqrt{2}}\mu\mu h + \cancel{\nu\nu}$$

- *New Physics*: e.g. introduciamo ‘neutrini’ RH pesanti *N* (~10^{15} GeV)

Neutrini e oscillazioni dei neutrini

La massa dei neutrini e la fisica Oltre il Modello Standard:

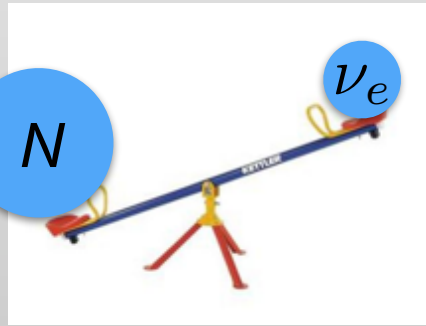
- nel MS, i neutrini hanno strettamente massa = *zero!*

  (conseguenza del fatto che le interazioni deboli sono *left-handed*…)

$$y_{ij}\Psi_i\Psi_j\,\frac{1}{\sqrt{2}}(v+h) \rightsquigarrow \frac{y_\mu v}{\sqrt{2}}\,\mu\mu + \frac{y_\mu}{\sqrt{2}}\mu\mu h + \cancel{\nu\nu}$$

- *New Physics*: e.g. introduciamo 'neutrini' RH pesanti *N* (~10^{15} GeV)

  spiegherebbe anche perché la massa dei neutrini 'normali' è così piccola: meccanismo del *see-saw*



Neutrini e oscillazioni dei neutrini

La massa dei neutrini e la fisica Oltre il Modello Standard:

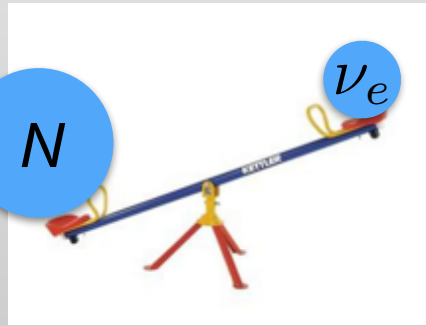
- nel MS, i neutrini hanno strettamente massa = *zero!*

  (conseguenza del fatto che le interazioni deboli sono *left-handed*…)

$$y_{ij}\Psi_i\Psi_j\,\frac{1}{\sqrt{2}}(v+h) \rightsquigarrow \frac{y_\mu v}{\sqrt{2}}\,\mu\mu + \frac{y_\mu}{\sqrt{2}}\mu\mu h + \cancel{\nu\nu}$$

- *New Physics*: e.g. introduciamo 'neutrini' RH pesanti *N* (~10^{15} GeV)

  spiegherebbe anche perché la massa dei neutrini 'normali' è così piccola: meccanismo del *see-saw*



Neutrini *N* ⟶ possono decadere asimmetricamente

⟶ *leptogenesi* ⟶ *baryogenesi* ⟶

asimmetria materia-antimateria ⟶ the reason why we exist