

Física de Neutrinos

José Maneira

Sumário

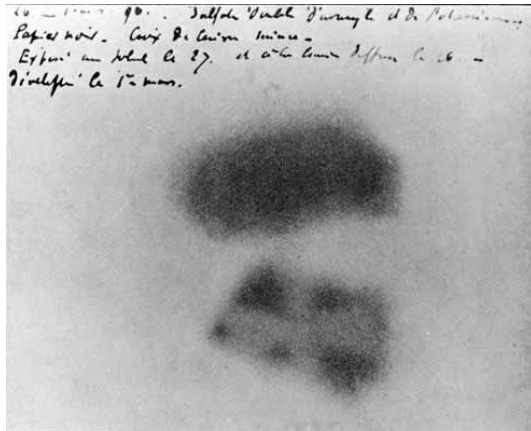
- A descoberta dos neutrinos
- Neutrinos no Modelo Padrão
- Evidências experimentais para oscilações de neutrinos
 - Neutrinos atmosféricos
 - Neutrinos solares
- Oscilações de neutrinos
 - no vácuo
 - na matéria
- Valor absoluto da massa dos neutrinos
 - possíveis hierarquia de massas
 - Declínio beta duplo sem sem neutrinos

Radioatividade



Henri Becquerel, 1896

ao estudar as propriedades da fosforescência com placas fotográficas tapadas, elas só se escureciam quando usou sais de Urânio



o Urânio estava a emitir algo invisível...

Marie e Pierre Curie, 1898

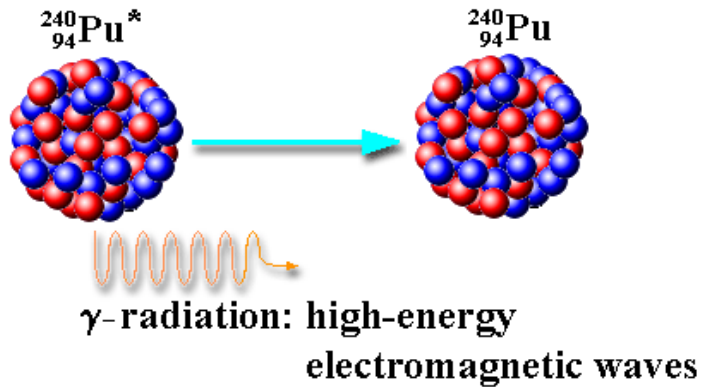
descobrem outros tipos de materiais “radioativos”

descobrem que as radiações são ionizantes

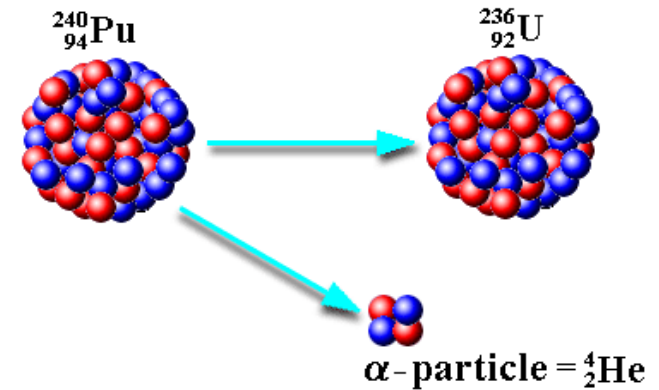


Declínios alfa, beta e gama

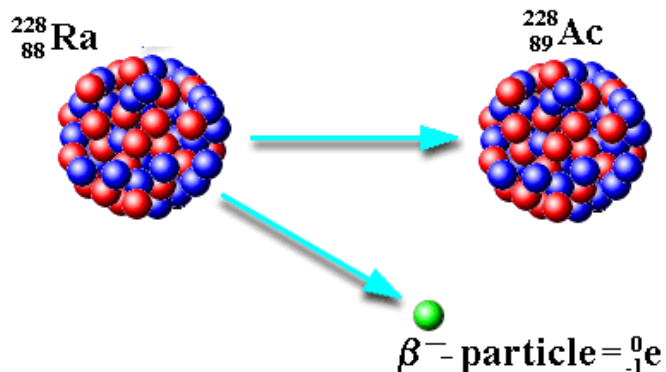
gamma decay



alpha decay



beta minus decay



- Alfa e gama: número de prótons de neutrões não muda
- Beta: um neutrão transforma-se em próton ou vice-versa

Primeiro puzzle da interação fraca

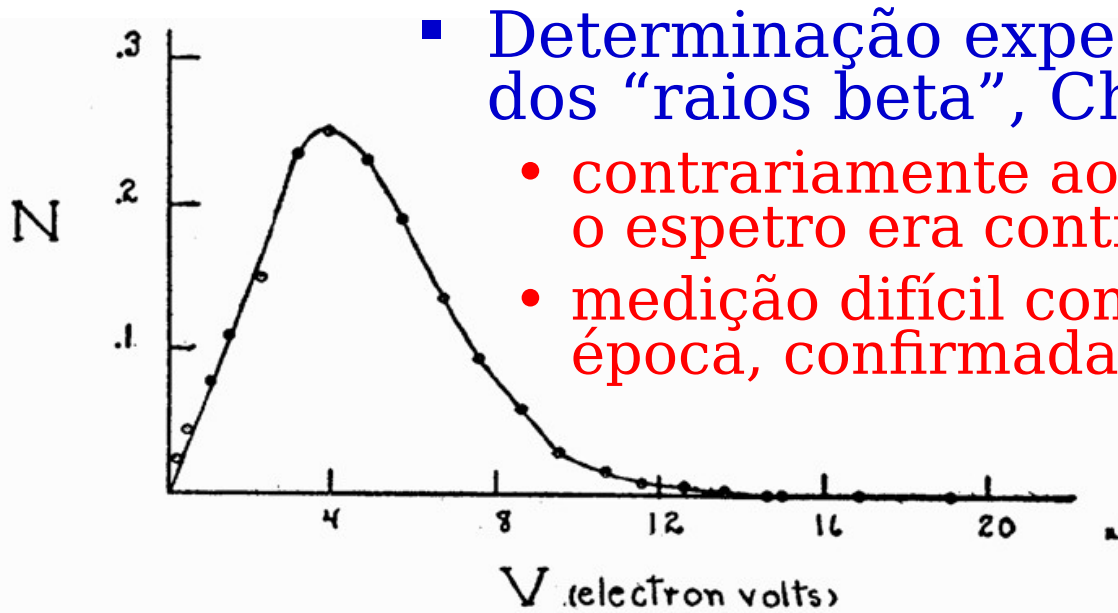
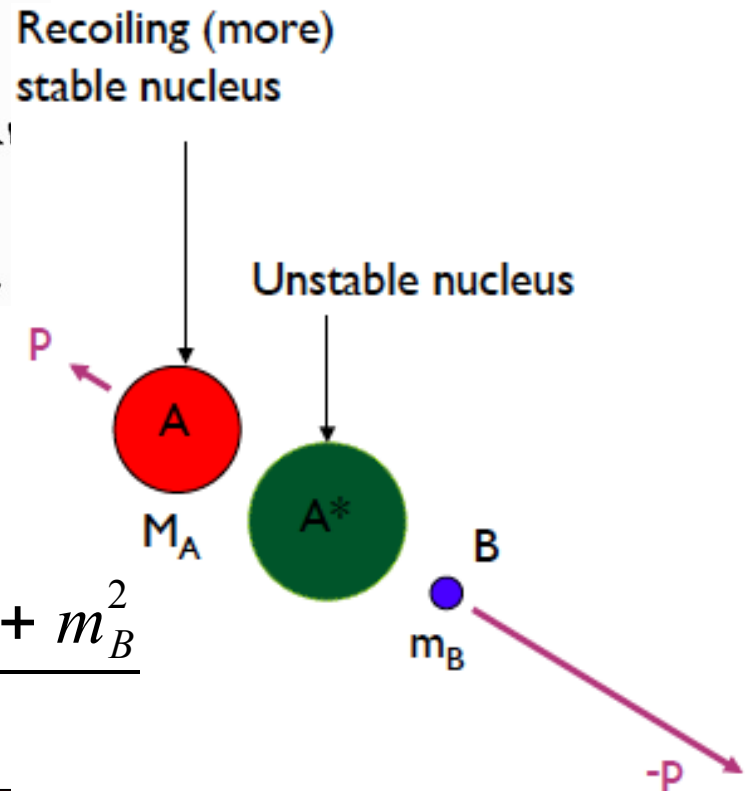


FIG. 5. Energy distribution curve of the beta-rays.

- Determinação experimental da energia dos “raios beta”, Chadwick (1914)
 - contrariamente aos declínios alfa e gama, o espectro era contínuo
 - medição difícil com a tecnologia da época, confirmada em 1927-30

- Num decaimento a 2 corpos, por conservação da energia, a partículas do e.f. deveriam ter energia fixa

$$E_B = \frac{M_{A^*}^2 - M_A^2 + m_B^2}{2M_{A^*}}$$



A carta de Pauli

Physics Institute of
the ETH Zürich

Zürich, Dec. 4, 1930

Dear Radioactive Ladies and Gentlemen,

As the bearer of these lines, to whom I graciously ask you to listen, will explain to you in more detail, because of the "wrong" statistics of the N- and Li-6 nuclei and the continuous beta spectrum, I have hit upon a desperate remedy to save the "exchange theorem" (1) of statistics and the law of conservation of energy. Namely, the possibility that in the nuclei there could exist electrically neutral particles, which I will call neutrons, that have spin $1/2$ and obey the exclusion principle and that further differ from light quanta in that they do not travel with the velocity of light. The mass of the neutrons should be of the same order of magnitude as the electron mass and in any event not larger than 0.01 proton mass. - The continuous beta spectrum would then make sense with the assumption that in beta decay, in addition to the electron, a neutron is emitted such that the sum of the energies of neutron and electron is constant.

.....
way of rescue. Thus, dear radioactive people, scrutinize and judge. - Unfortunately, I cannot personally appear in Tübingen since I am indispensable here in Zürich because of a ball on the night from December 6 to 7. With my best regards to you, and also to Mr. Back, your humble servant

signed W. Pauli

Descoberta: difícil, mas não impossível...

Foi preciso esperar 25 anos pela detecção dos neutrinos!



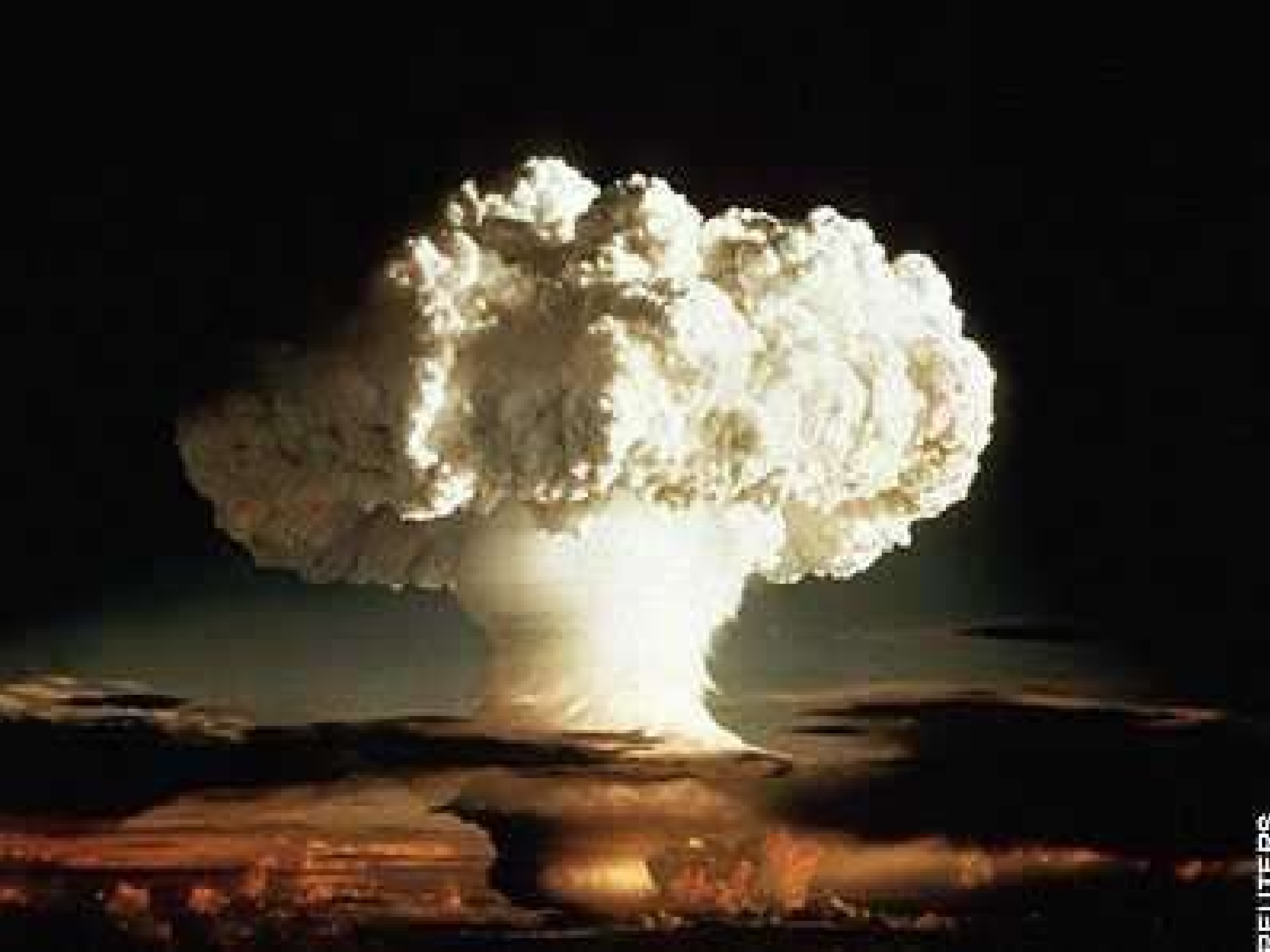
Frederick Reines
(Nobel 1995)



Clyde Cowan

- Secção eficaz de interação dos neutrinos: $\sim 10^{-44} \text{ cm}^{-2}$
- Isto significa que são precisos 10^{19} m (300 anos-luz de água para absorver um neutrino)
 - dito de outro modo: são precisos 10^{19} neutrinos para haver uma interação num detetor com 1 m de água...

mas como obter uma fonte tão intensa de neutrinos?



Primeira proposta (Reines, 1951)

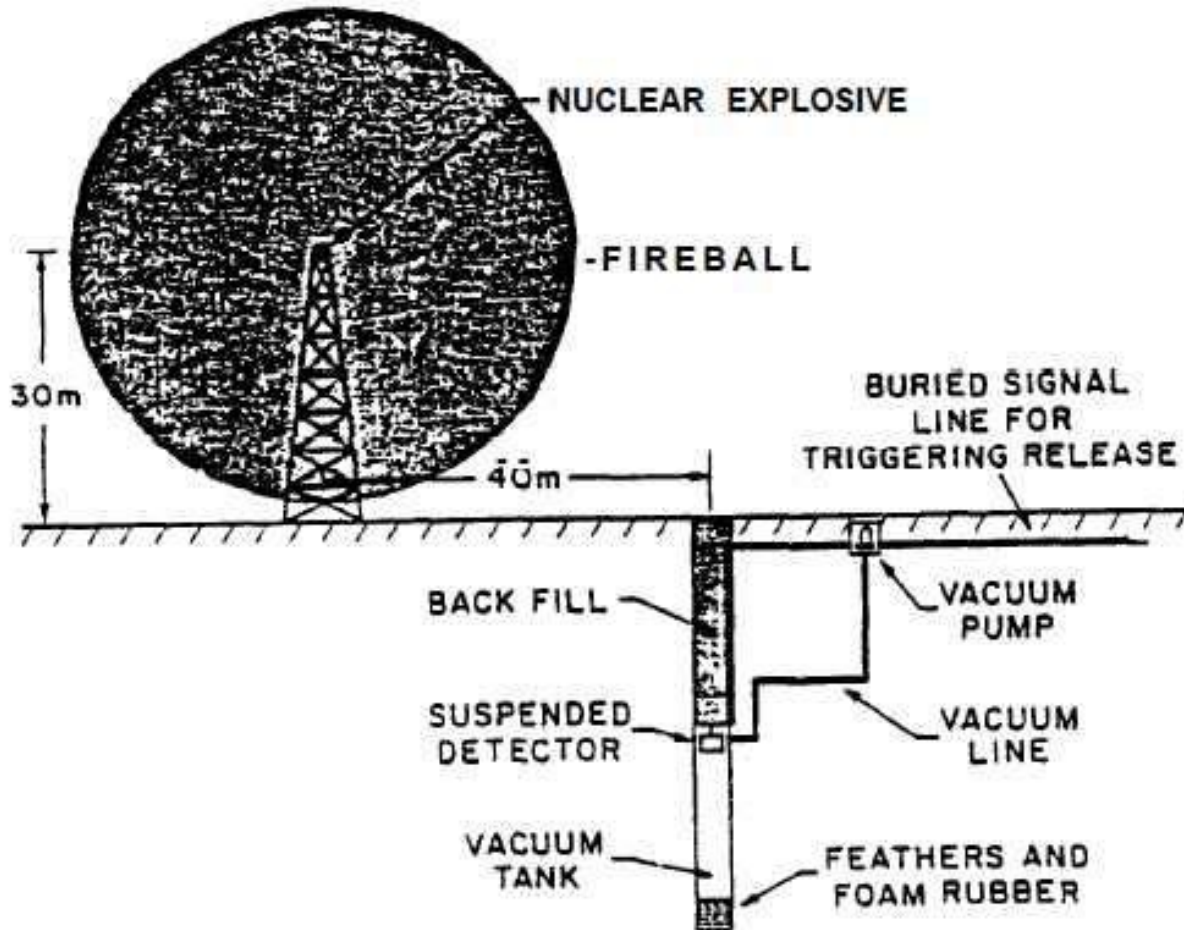


Figure 1. Sketch of the originally proposed experimental setup to detect the neutrino using a nuclear bomb. This experiment was approved by the authorities at Los Alamos but was superseded by the approach which used a fission reactor.

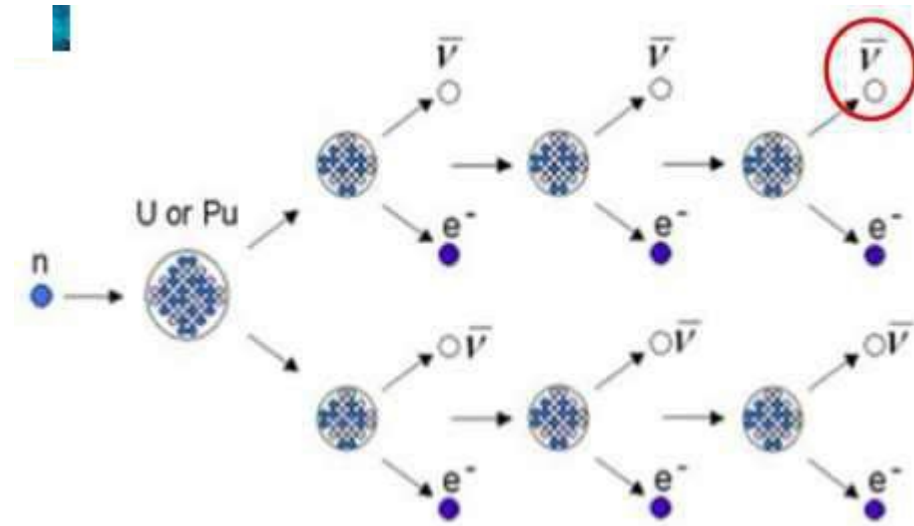
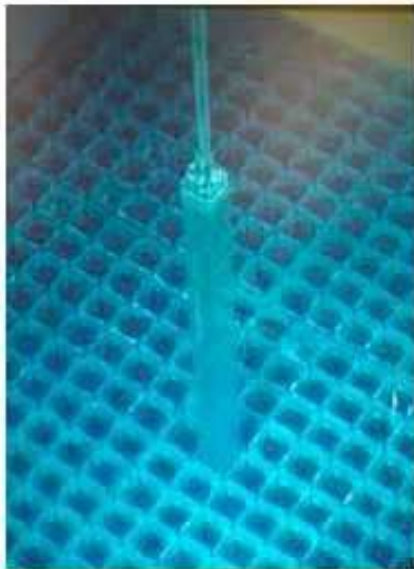
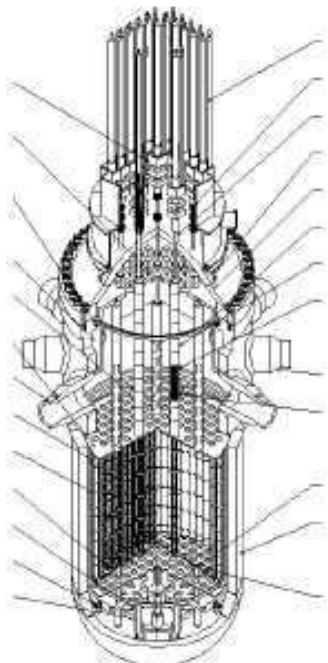
• Aprovada por Los Alamos

• não avançou...

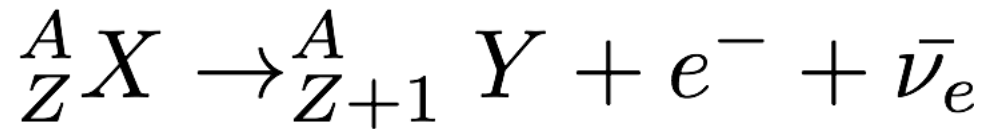
Neutrinos de reactor

■ Reactores nucleares

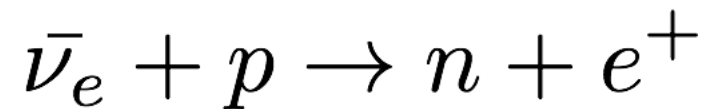
- fonte controlável, mas intensa
- Produz antineutrinos na fissão do Urânio (235 e 238) e Plutônio (239 e 241)



Produção

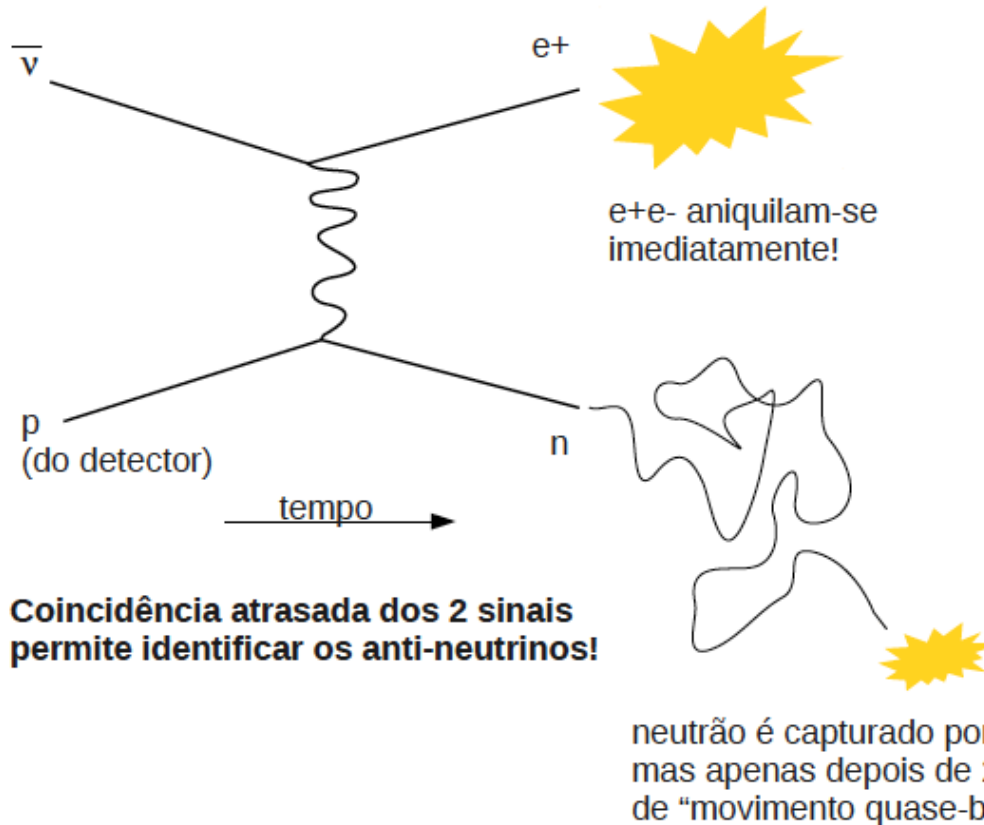
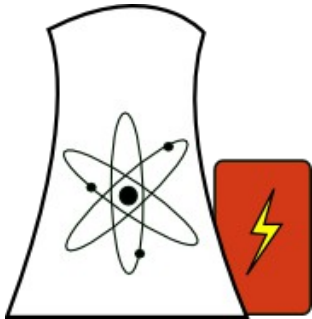
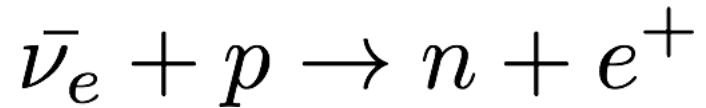


Detecção



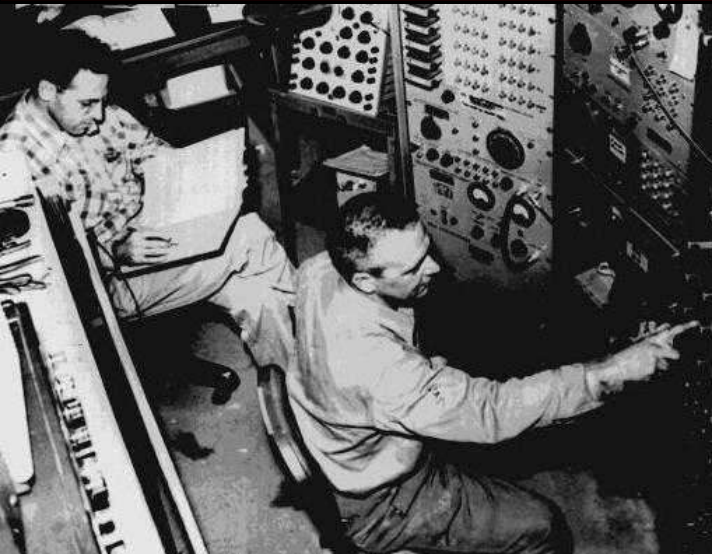
Detetar anti-Neutrinos de reator

Reação: decaimento beta inverso

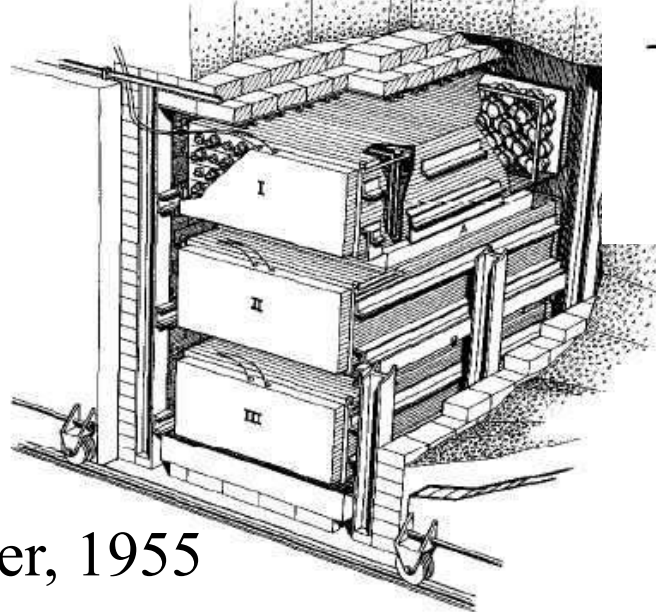
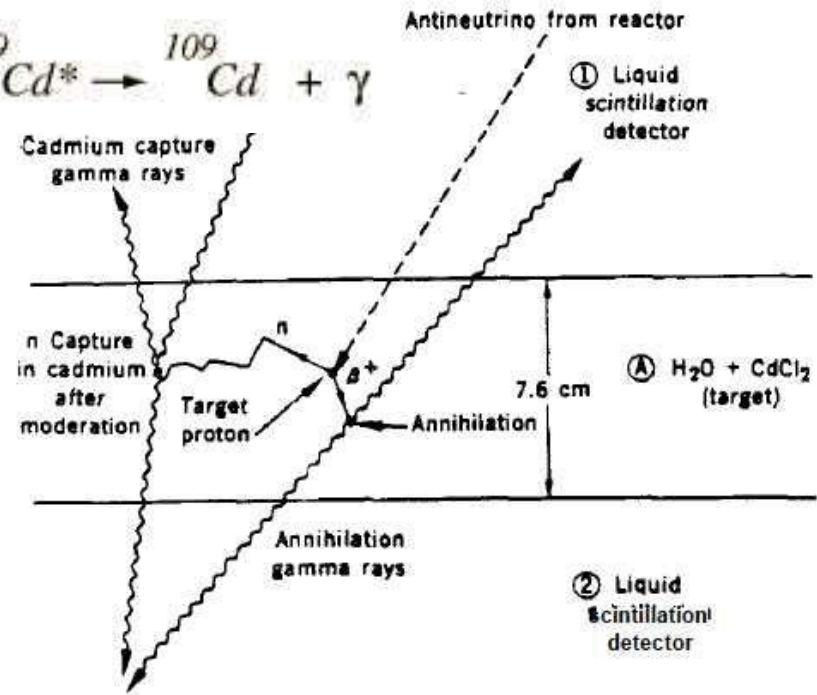
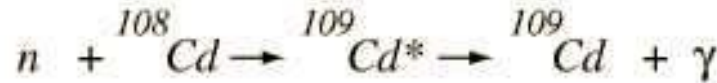


Cintilador pode ser dopado,
para capturar os neutrões com maior eficiência.

Experiências de Cowan e Reines



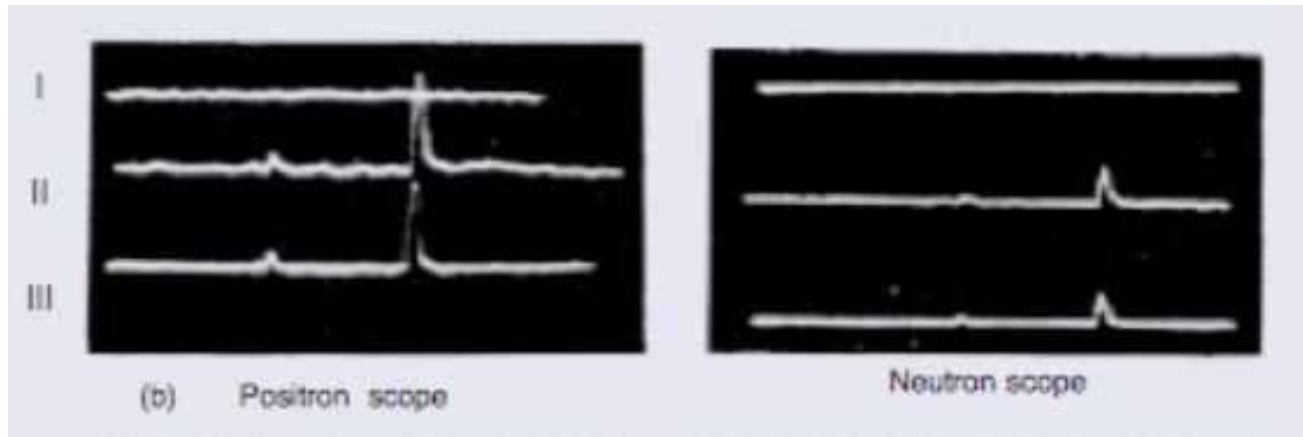
Hanford, 1953



Savannah River, 1955

- Em Hanford (à superfície), havia demasiado ruído de fundo de raios cósmicos.
- Em Savannah River, com 12 m de blindagem, finalmente conseguem observar o sinal!

Resultados Cowan e Reines



- fluxo $\sim 10^{13} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$
- 3 eventos/hora
- $\sim 6.3 \times 10^{-44} \text{ cm}^2$

Frederick REINES and Clyde COWAN

Box 1663, LOS ALAMOS, New Mexico

Thanks for message. Everything comes to
him who knows how to wait.

Pauli

Propriedades dos neutrinos

Neutrinos = antineutrinos?

A resposta é evidente para todos os outros fermiões elementares, pois têm carga elétrica. Mas os neutrinos são os únicos neutros.



Método experimental (Ray Davis, 1955)

Expor grandes quantidades de Cloro a (anti-)neutrinos (reactor nuclear).
Extrair (quimicamente) o Árgon. Contar os átomos de Ar-37 (radioativo) produzidos. Subtrair o “fundo” devido a raios cósmicos...

Resultado: não se observa excesso em relação ao fundo.
A reacção não é possível.

Conclusão: Neutrinos diferentes de antineutrinos? Não necessariamente.
Neutrinos produzidos no decaimento beta têm helicidade direita.
Reacção com o cloro-37 só possível com helicidade esquerda.

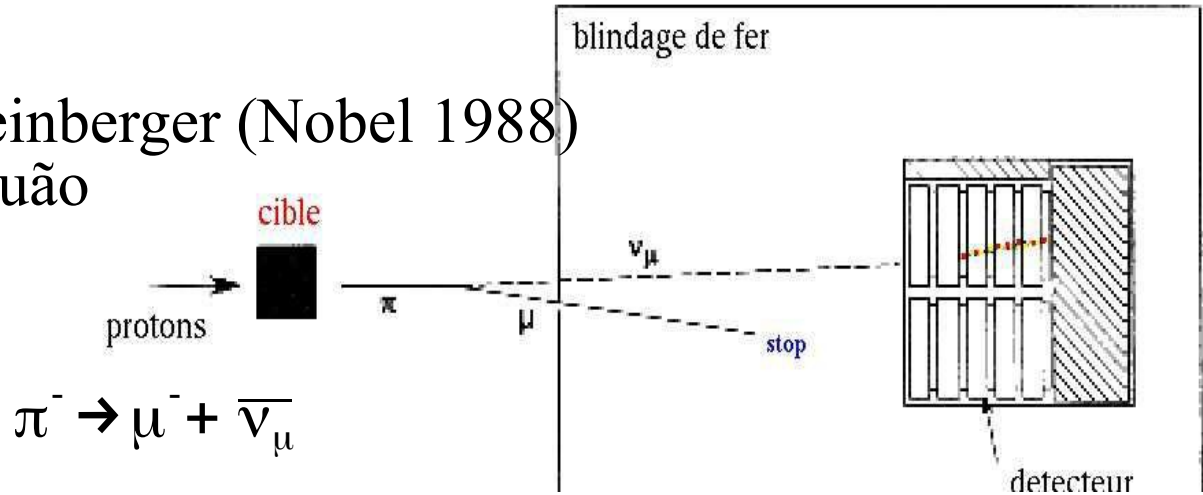
Propriedades dos neutrinos

neutrinos do muão = neutrinos do eletrão ?

Brookhaven, 1962

Lederman, Schwarz, Steinberger (Nobel 1988)

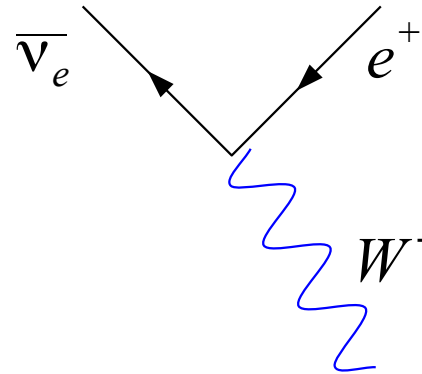
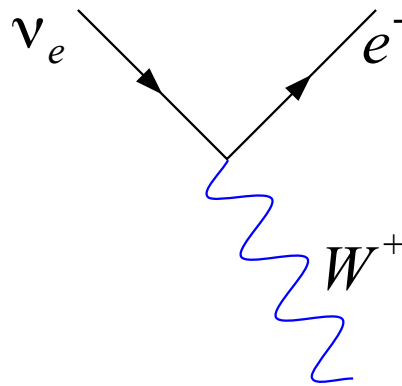
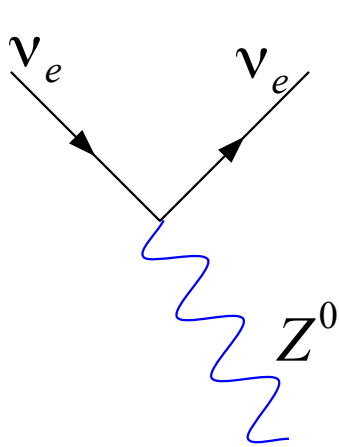
Feixe de neutrinos de muão



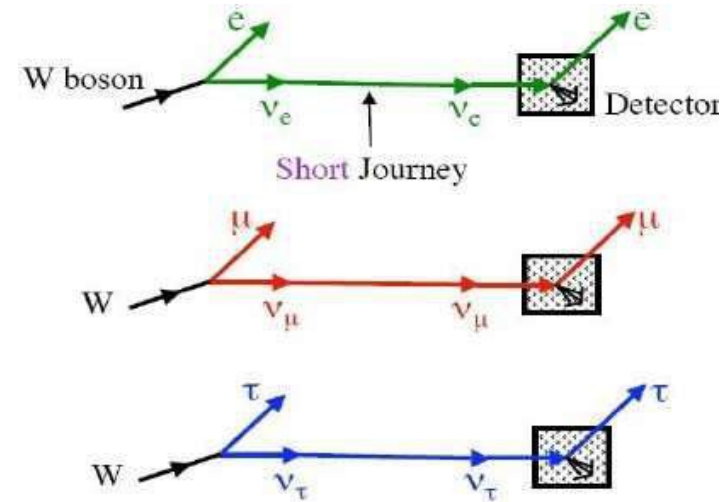
Detectados 34 eventos de muão e nenhum de eletrão. Conclusão: $\nu_\mu \neq \nu_e$

traço de muão isolado

Neutrinos no Modelo Padrão

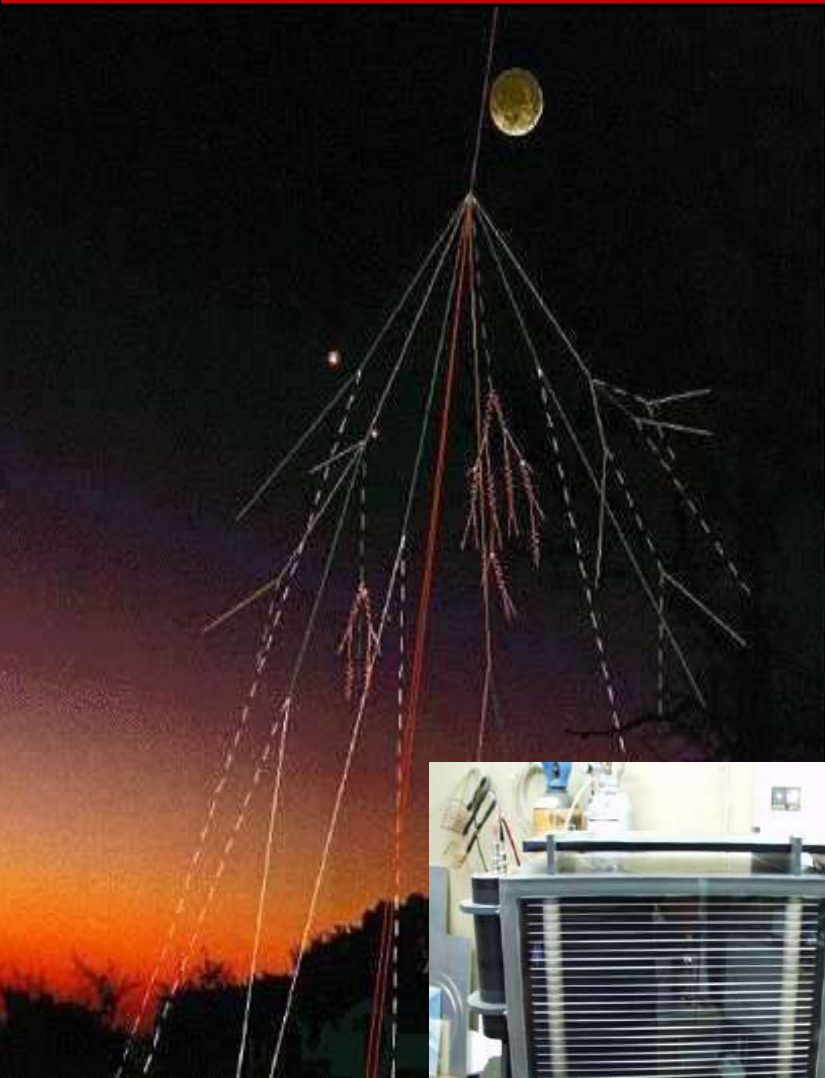


Leptões neutros de spin $\frac{1}{2}$ e massa 0.
Acoplam apenas aos W e Z, respeitando o
número leptónico de sabor.



Oscilações: resultados experimentais

Porquê debaixo da Terra ?

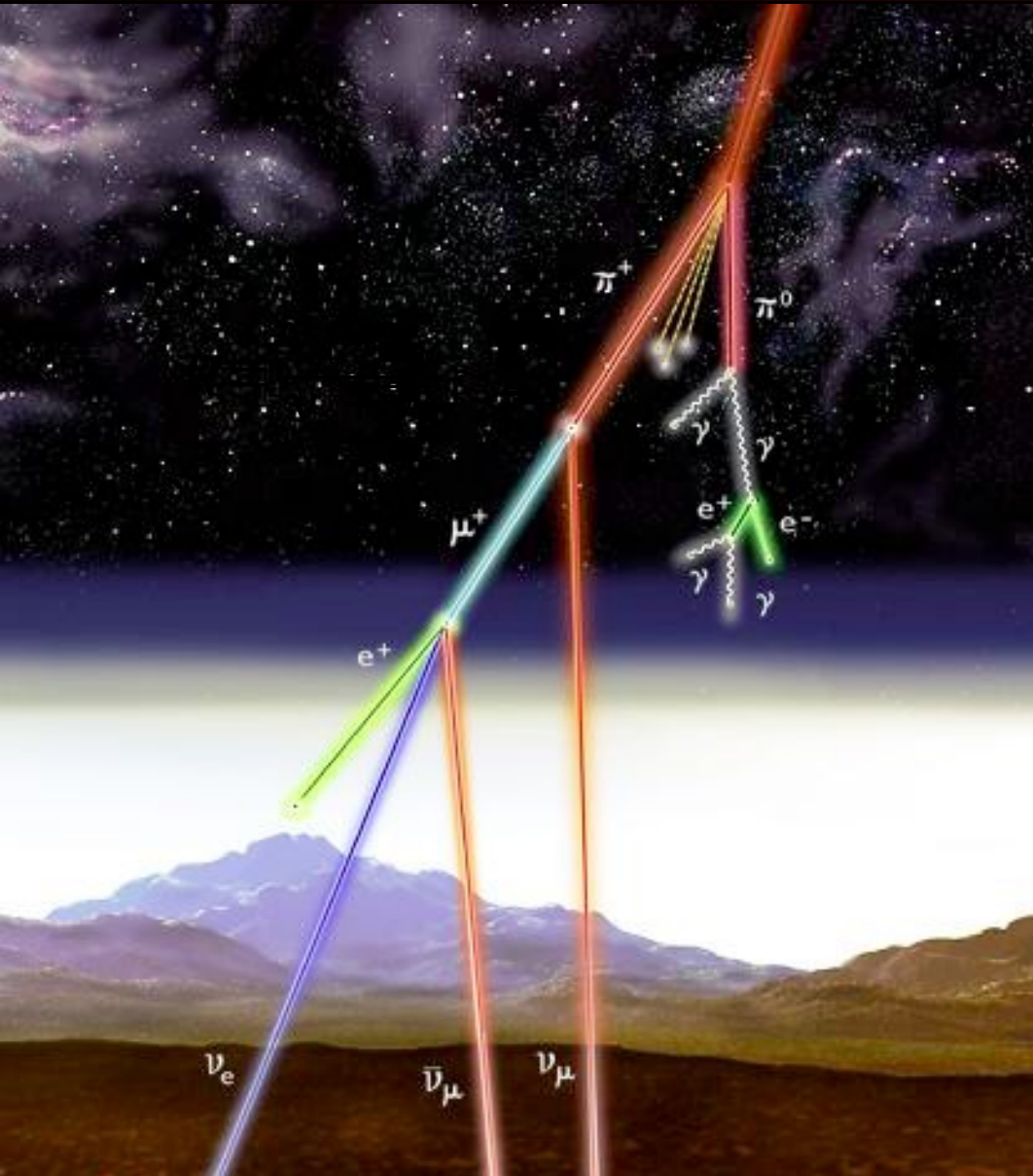


Câmara de
faíscas do LIP

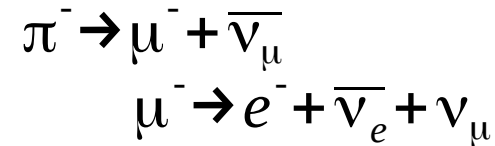
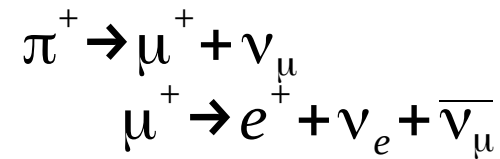


- Neutrinos muito difíceis de detectar
- A probabilidade de interacção é muito baixa
 - Exemplo: 10 eventos de neutrinos por dia, em SNO
- “Ruído” devido a cascatas de raios cósmicos na atmosfera
 - Fluxo de muões à superfície cerca de $10'000 / \text{m}^2 / \text{minuto}$
 - São precisos várias ordens de grandeza de redução

Neutrinos atmosféricos



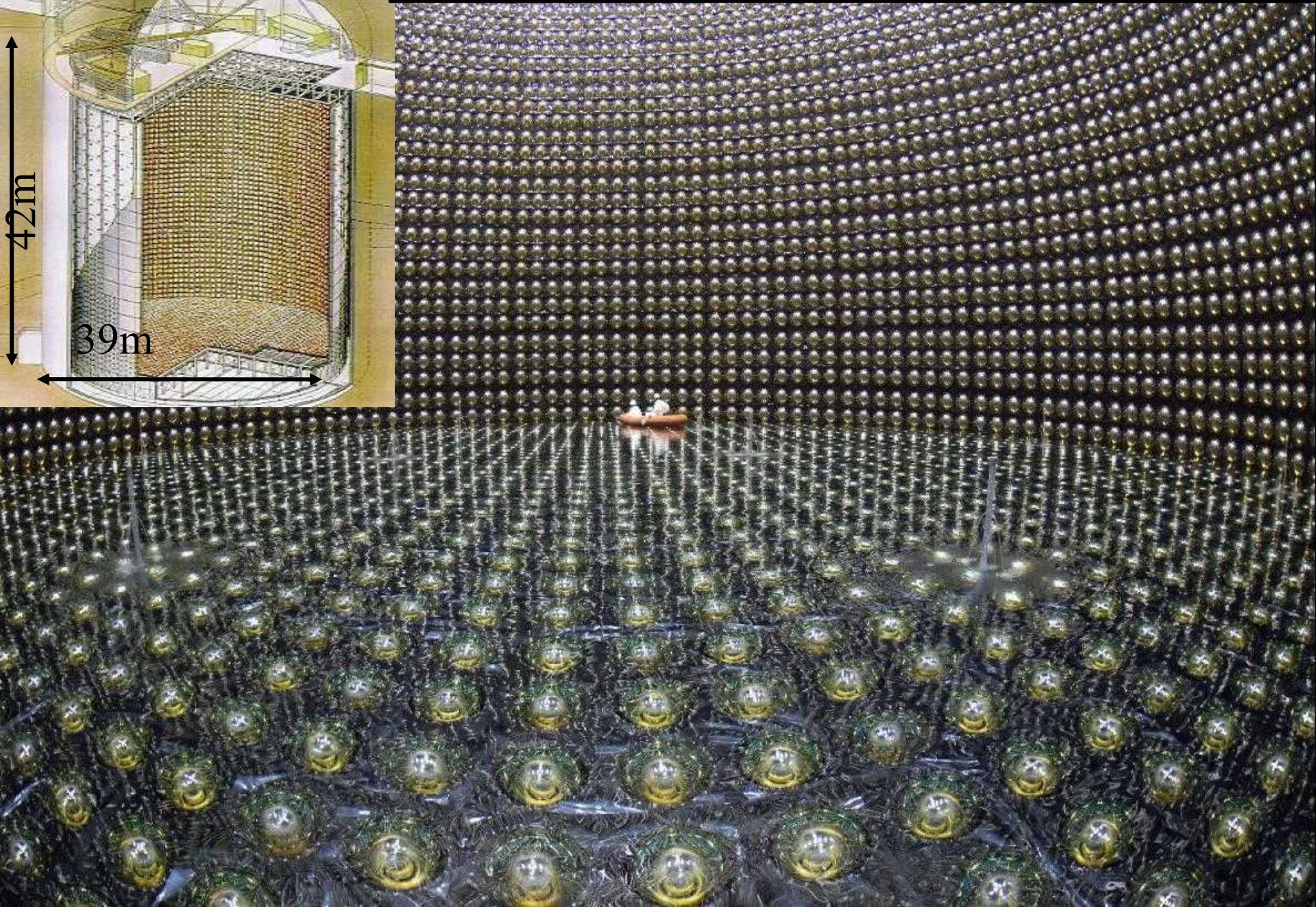
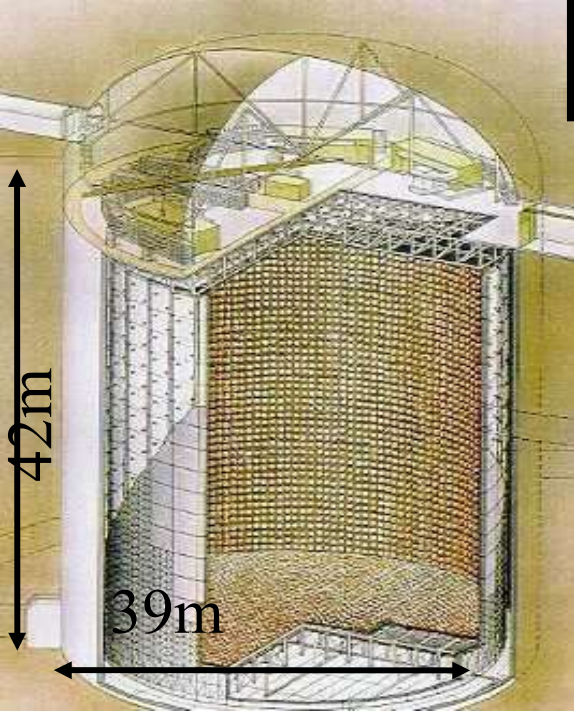
- Protões de alta energia chegam do espaço
- Atingem a atmosfera e produzem um chuveiro de partículas



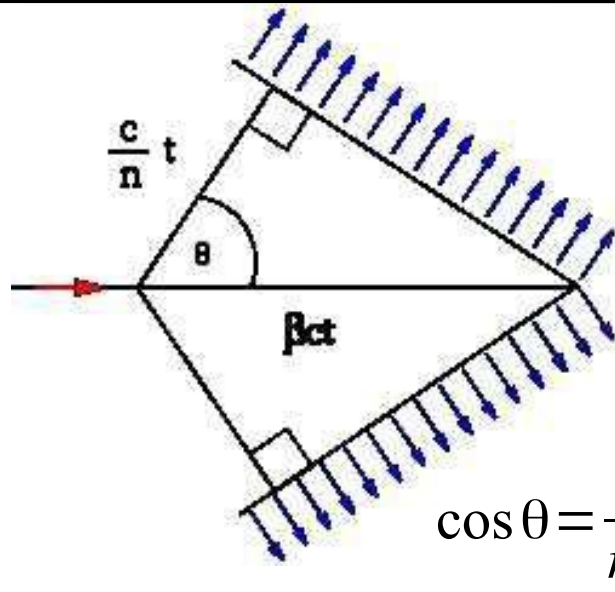
- baixas energias: muão "tem tempo" para decair, $\mu/e \sim 2$
- altas energias: muão atinge superfície terrestre antes de decair $\mu/e > 2$

Kamiokande observou $R \sim 1$

Detector Super-Kamiokande, Japão

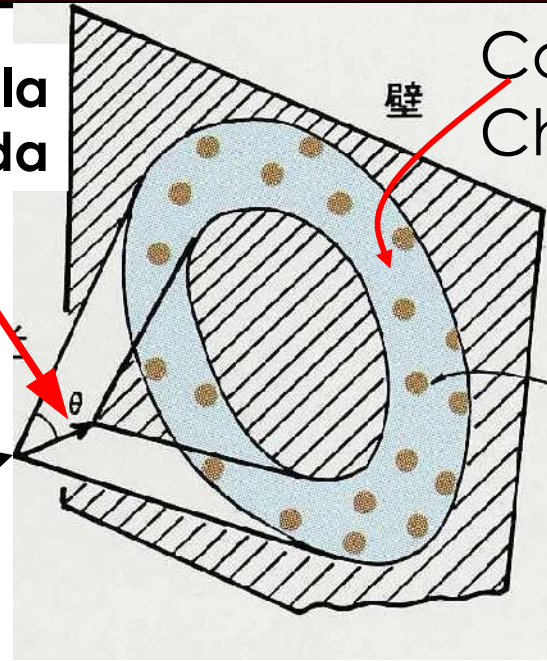


Radiação de Cherenkov



$$\cos \theta = \frac{1}{n\beta}$$

partícula
carregada

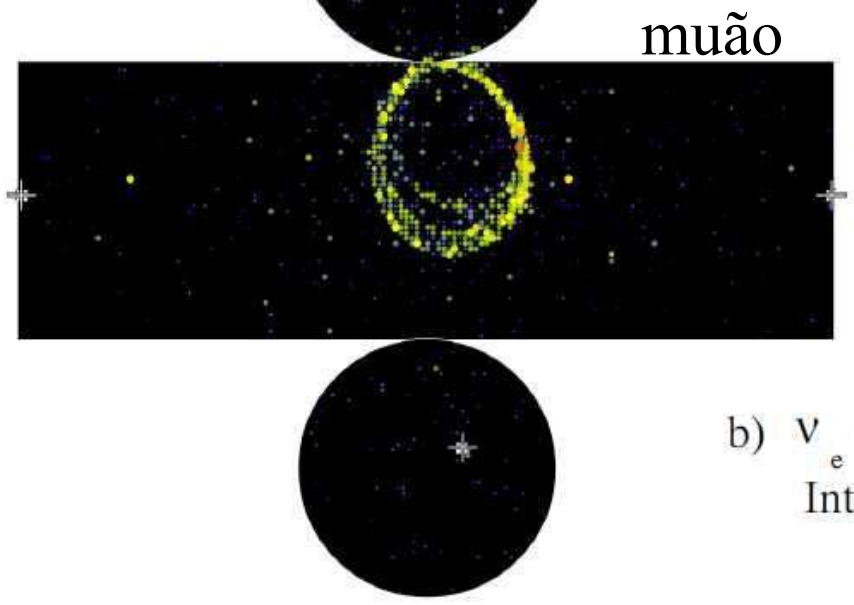


$$\frac{dE}{dx} = \frac{q^2}{4\pi} \int_{v > c/n(\omega)} \mu(\omega) \omega \left(1 - \frac{c^2}{v^2 n^2(\omega)} \right) d\omega.$$

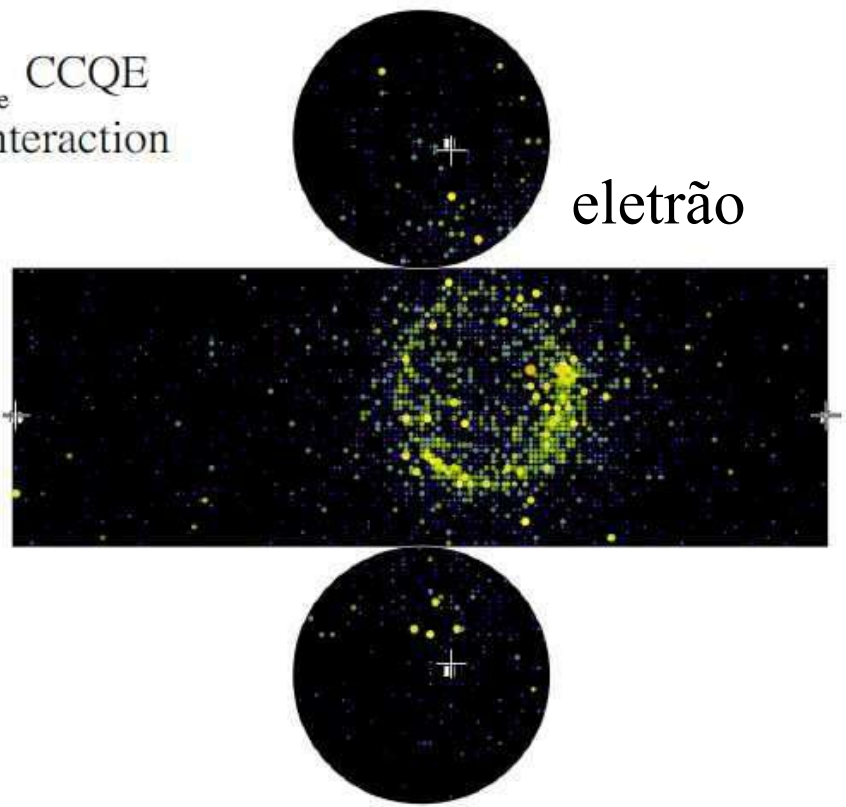
Intensidade $\sim$ proporcional à
frequência $\omega \rightarrow$ mais intenso
no violeta e azul



a) ν_μ CCQE
Interaction



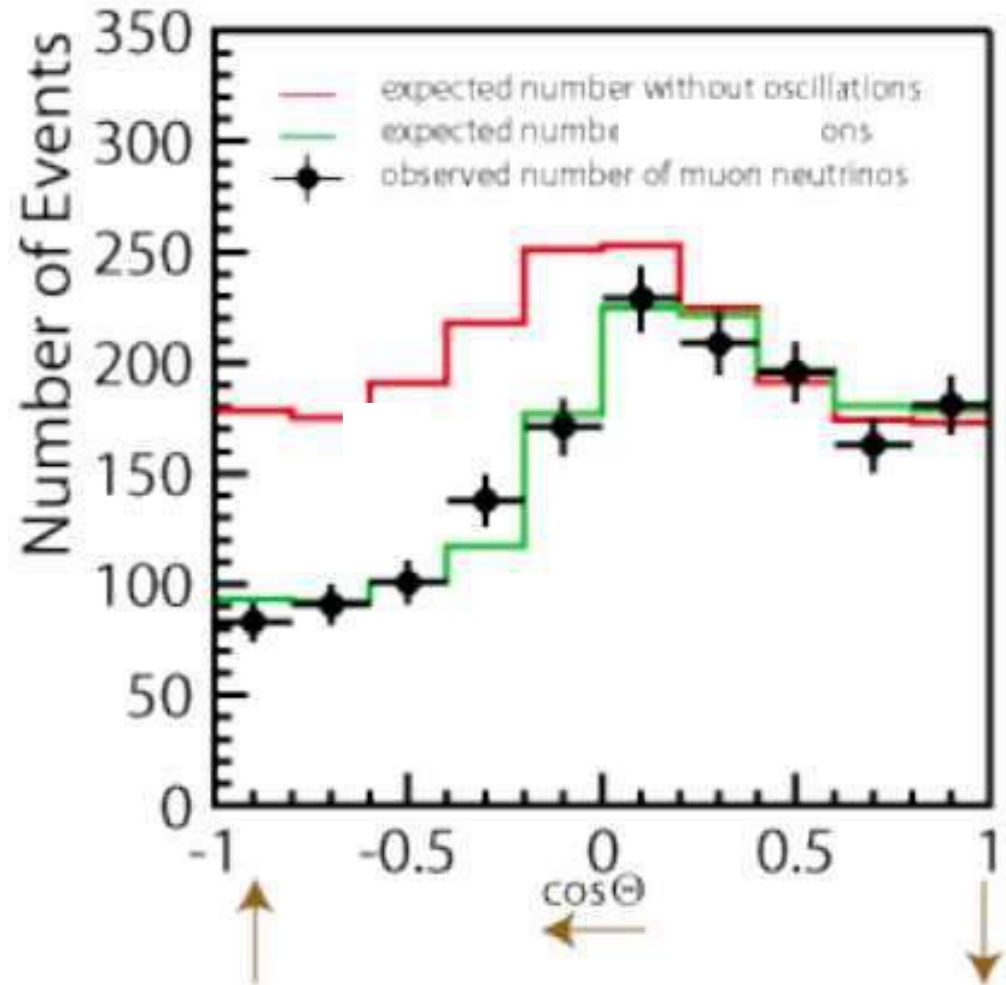
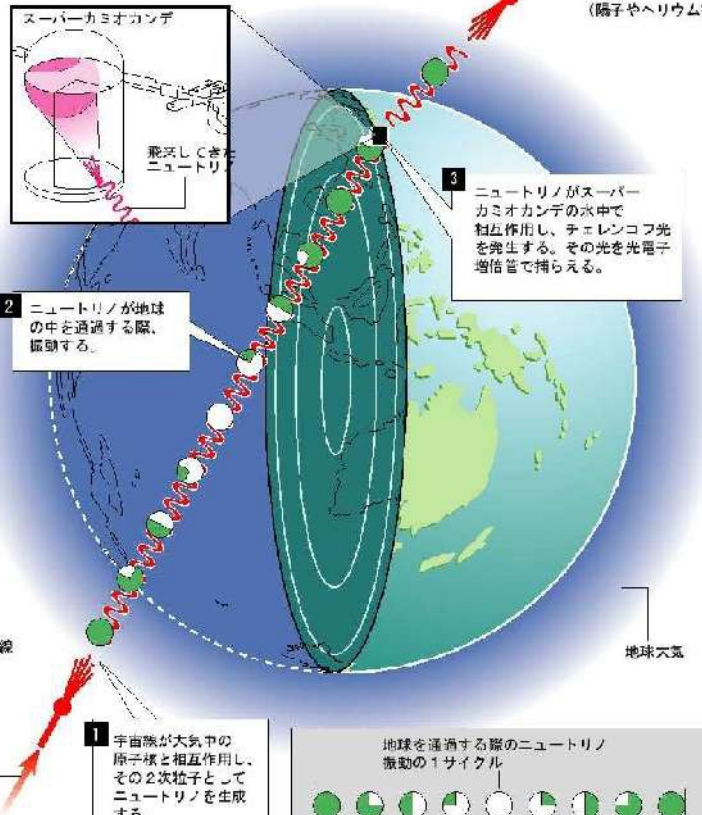
b) ν_e CCQE
Interaction



Faltam neutrinos...

大気ニュートリノによるニュートリノ質量の発見

スーパーカミオカンデは、上から来る大気ニュートリノと下から来る大気ニュートリノの数が違うことを観測した。このことは、ニュートリノが質量を持ち、震動していることを示す。



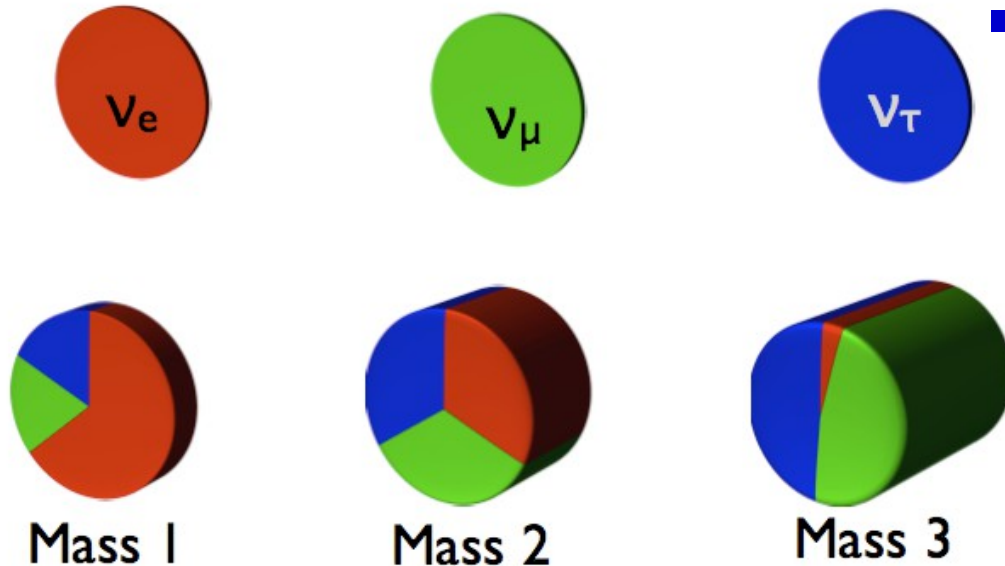
vindos de baixo
distância até
1300 km

vindos de cima
distância até
20 km

1998

Oscilações de neutrinos

Mec. Quântica dos neutrinos



■ Estados próprios do sabor/família

- Neutrinos do elétron (ν_e) são os que são produzidos juntamente com **elétrões**
- Neutrinos do muão (ν_μ) são ... com **muões**
- Neutrinos do tau (ν_τ) são ... com os **taus**

■ Estados próprios de massa

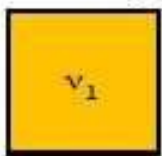
- massa m_1 , m_2 , m_3
- não coincidem com os de sabor $\rightarrow$ combinação linear de estados de massa

Oscilações de neutrinos

Mass States

First

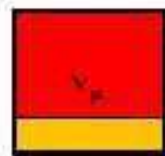
Second



Weak States

First

Second

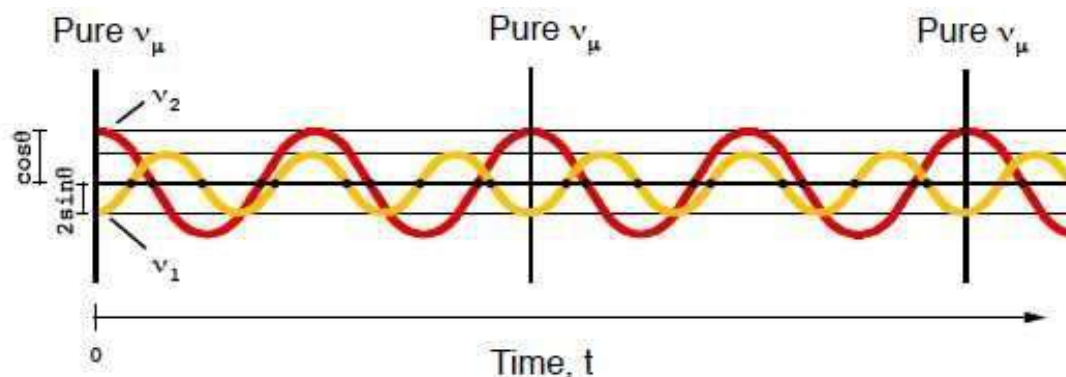


sabor

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

massa

Composição de sabor muda ao longo do tempo, porque os estados de massa tem velocidades ligeiramente diferentes



Probabilidade de “sobrevivência”

(dos neutrinos do elétron)

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

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



Бруно Понтекорво

Bruno Pontecorvo, 1968

L = distância fonte-detector
E = energia

Formalismo Geral

n estados próprios ortonormados

- Estados de sabor $|\nu_\alpha\rangle$, with $\langle\nu_\beta|\nu_\alpha\rangle = \delta_{\alpha\beta}$
- Estados de massa $|\nu_k\rangle$, with $\langle\nu_k|\nu_j\rangle = \delta_{kj}$

Os estados $|\nu_k\rangle$ são estados próprios do Hamiltoniano $\mathcal{H}|\nu_k\rangle = E_k|\nu_k\rangle$, em que $E_k = \sqrt{\vec{p}^2 + m_k^2}$ (unidades "naturais" em que $c \equiv 1$).
Relacionam-se com os estados de sabor através de:

$$|\nu_\alpha\rangle = \sum_k U_{\alpha k}^* |\nu_k\rangle \qquad |\nu_k\rangle = \sum_\alpha U_{\alpha k} |\nu_\alpha\rangle \qquad (1)$$

em que U é uma matriz unitária (chamada matriz de mistura)

$$U^\dagger U = 1 \qquad \sum_k U_{\alpha k} U_{\beta k}^* = \delta_{\alpha\beta} \qquad \sum_\alpha U_{\alpha k} U_{\alpha j}^* = \delta_{kj} \qquad (2)$$

Formalismo Geral

Usando a equação de Schrödinger

$$i \frac{d}{dt} |\nu_k(t)\rangle = \mathcal{H} |\nu_k(t)\rangle$$

vemos que os estados de neutrinos com massa evoluem como ondas planas

$$|\nu_k(t)\rangle = e^{-iE_k t} |\nu_k\rangle.$$

Consideramos o estado $|\nu_\alpha(t)\rangle$ de um neutrino produzido no instante $t=0$ com um sabor bem definido α , tal que $|\nu_\alpha(t=0)\rangle = |\nu_\alpha\rangle$. Combinando com a Eq. 1, temos

$$|\nu_\alpha(t)\rangle = \sum_k U_{\alpha k}^* e^{-iE_k t} |\nu_k\rangle \quad (3)$$

Usando as relações de unitariedade (Eq. 2) e a Eq. 1, obtemos

$$|\nu_\alpha(t)\rangle = \sum_{\beta=e,\mu,\tau} \left(\sum_k U_{\alpha k}^* e^{-iE_k t} U_{\beta k} \right) |\nu_\beta\rangle \quad (4)$$

Formalismo Geral

Logo, após um tempo t , o estado $|\nu_\alpha(t)\rangle$ é uma superposição de estados com sabores diferentes (se a matriz U não for diagonal). Como no início tínhamos um estado puro, a amplitude de transição do sabor α para β é:

$$A_{\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta}(t) \equiv \langle \nu_\beta | \nu_\alpha(t) \rangle = \sum_k U_{\alpha k}^* U_{\beta k} e^{-iE_k t} \quad (5)$$

A probabilidade de transição é o quadrado da amplitude:

$$P_{\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta}(t) = |A_{\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta}(t)|^2 = \sum_{k,j} U_{\alpha k}^* U_{\beta k} U_{\alpha j} U_{\beta j}^* e^{-i(E_k - E_j)t} \quad (6)$$

Queremos portanto prever (e medir) a probabilidade de oscilação de neutrinos $P_{\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta}(t)$. Experimentalmente vamos procurar:

- Detetar neutrinos de sabor diferente do produzido $\rightarrow$ experiências de **aparecimento**.
- Medir uma diminuição no fluxo de neutrinos do sabor produzido $\rightarrow$ experiências de **desaparecimento**.

Oscilações a dois sabores

Sabemos que existem (pelo menos) três sabores de neutrinos. Por isso, em geral, devemos usar o formalismo com três sabores. No entanto, em grande parte das experiências, a descrição a dois sabores é suficiente, e é muito mais simples.

Consideramos então $\alpha, \beta = e, \mu$, ou $\alpha, \beta = e, \tau$ ou $\alpha, \beta = \mu, \tau$, consoante o caso experimental. A matriz U a duas dimensões pode ser parametrizada como uma matriz de rotação.

$$U = \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \quad (9)$$

Por convenção, dizemos que ν_1 é o neutrino mais leve, de modo que $\Delta m^2 \equiv \Delta m_{21}^2 \equiv m_2^2 - m_1^2$ é positivo.

Oscilações a dois sabores

Desenvolvemos a Eq. 8 para dois sabores. Se $k = j$, $\Delta m_{kj}^2 = 0$, a probabilidade de uma transição $\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta$, com $\alpha \neq \beta$ é:

$$\begin{aligned} P_{\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta}(L, E) &= U_{\alpha 1}^2 U_{\beta 1}^2 + U_{\alpha 2}^2 U_{\beta 2}^2 + \\ &\quad U_{\alpha 1}^2 U_{\beta 1}^2 U_{\alpha 2}^2 U_{\beta 2}^2 \exp\left(+i \frac{\Delta m^2 L}{2E}\right) + \\ &\quad U_{\alpha 2}^2 U_{\beta 2}^2 U_{\alpha 1}^2 U_{\beta 1}^2 \exp\left(-i \frac{\Delta m^2 L}{2E}\right) \\ &= 2 \sin^2 \theta \cos^2 \theta - \\ &\quad \sin^2 \theta \cos^2 \theta \left[\exp\left(+i \frac{\Delta m^2 L}{2E}\right) + \exp\left(-i \frac{\Delta m^2 L}{2E}\right) \right] \\ &= \frac{1}{2} \sin^2(2\theta) \left(1 - \cos \frac{\Delta m^2 L}{2E} \right) \\ &= \sin^2(2\theta) \sin^2\left(\frac{\Delta m^2 L}{4E}\right) \end{aligned} \tag{10}$$

Chegámos à fórmula das oscilações de neutrinos, que depende de forma sinusoidal da razão L/E . Como θ é um parâmetro constante, $\sin^2(2\theta)$ funciona como uma amplitude da oscilação.

Prob. sobrevivência a 2 sabores

$$P_{\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta}(L, E) = P_{\nu_\beta \rightarrow \nu_\alpha}(L, E) = P_{\bar{\nu}_\alpha \rightarrow \bar{\nu}_\beta}(L, E) = P_{\bar{\nu}_\beta \rightarrow \bar{\nu}_\alpha}(L, E) \quad (11)$$

Normalmente define-se também a probabilidade de sobrevivência $\nu_\alpha \rightarrow \nu_\alpha$, ou seja, de não haver mudança de sabor:

$$P_{\nu_\alpha \rightarrow \nu_\alpha}(L, E) = 1 - P_{\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta}(L, E) = 1 - \sin^2(2\theta) \sin^2\left(\frac{\Delta m^2 L}{4E}\right) \quad (12)$$

Se $\theta = 0$, $P_{\nu_\alpha \rightarrow \nu_\alpha} = 1$, não há oscilações. Se L/E for muito pequeno em relação a Δm^2 , as oscilações são fracas.

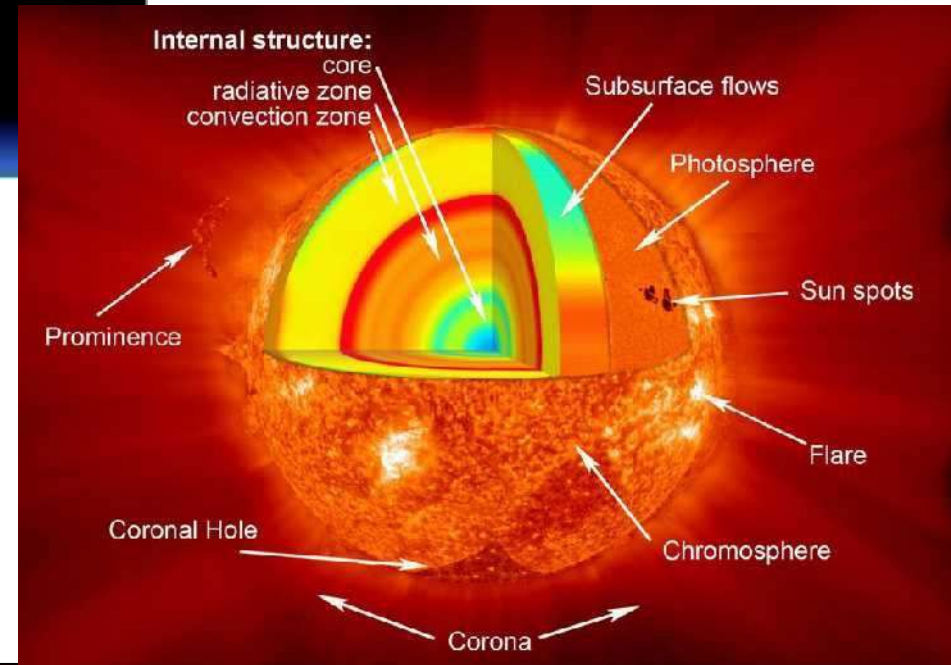
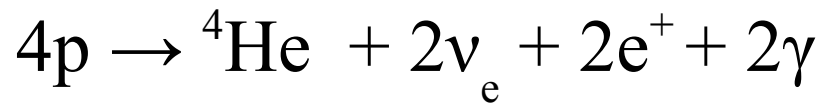
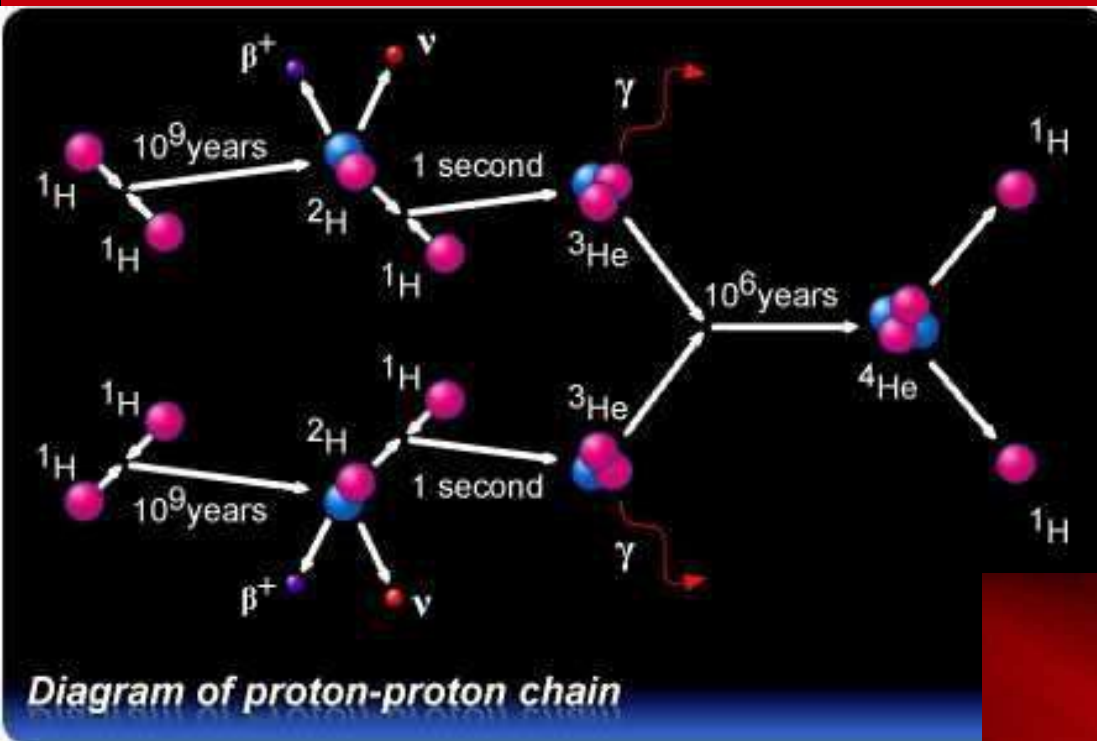
Se $\theta = 45^\circ$, $P_{\nu_\alpha \rightarrow \nu_\alpha}$ pode chegar a 0, máximo das oscilações, que se dá quando $\frac{\Delta m^2 L}{4E} \sim \frac{\pi}{2}$. Para valores grandes de L/E , em média fica $P_{\nu_\alpha \rightarrow \nu_\alpha} = 1/2$.

Para interpretação dos dados de experiências concretas, é conveniente exprimir a distância em m e a energia em MeV.

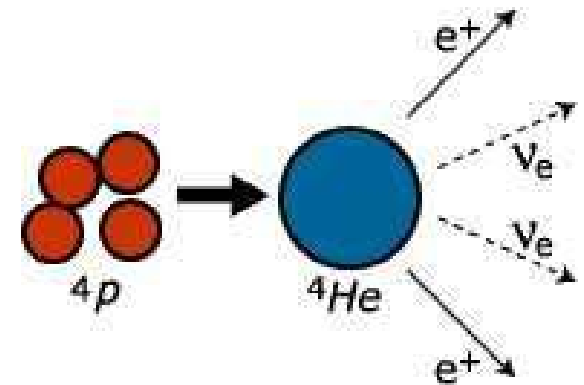
$$P_{\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta}(L, E) = \sin^2(2\theta) \sin^2\left(1.27 \frac{\Delta m^2 [\text{eV}^2] L [\text{m}]}{4E [\text{MeV}]}\right) \quad (13)$$

Neutrinos solares

Fusão nuclear no Sol

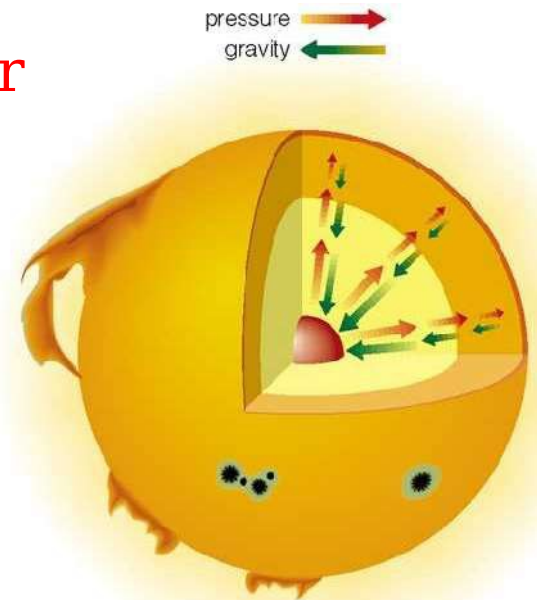


Modelos de estrutura estelar

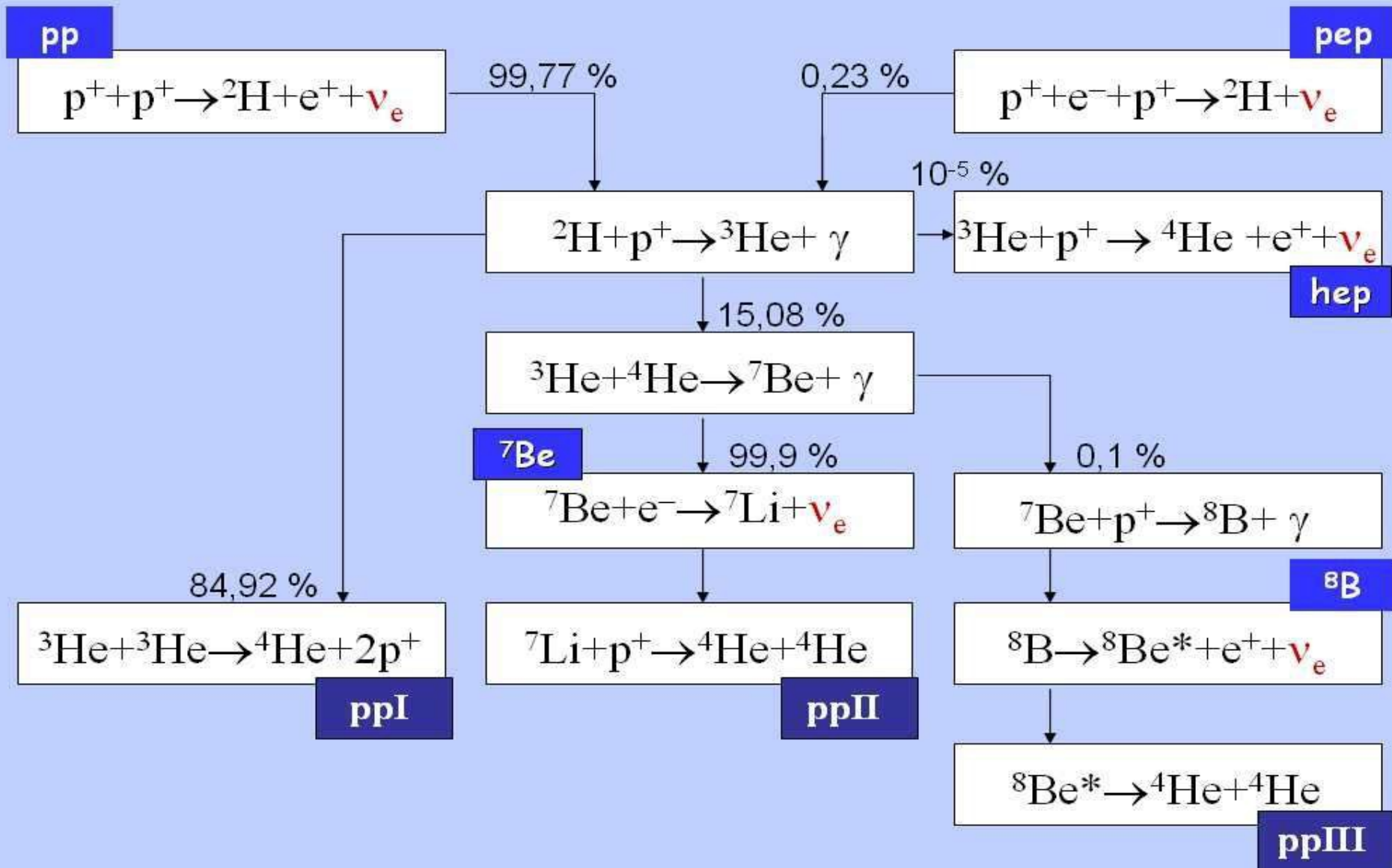


■ Ingredientes:

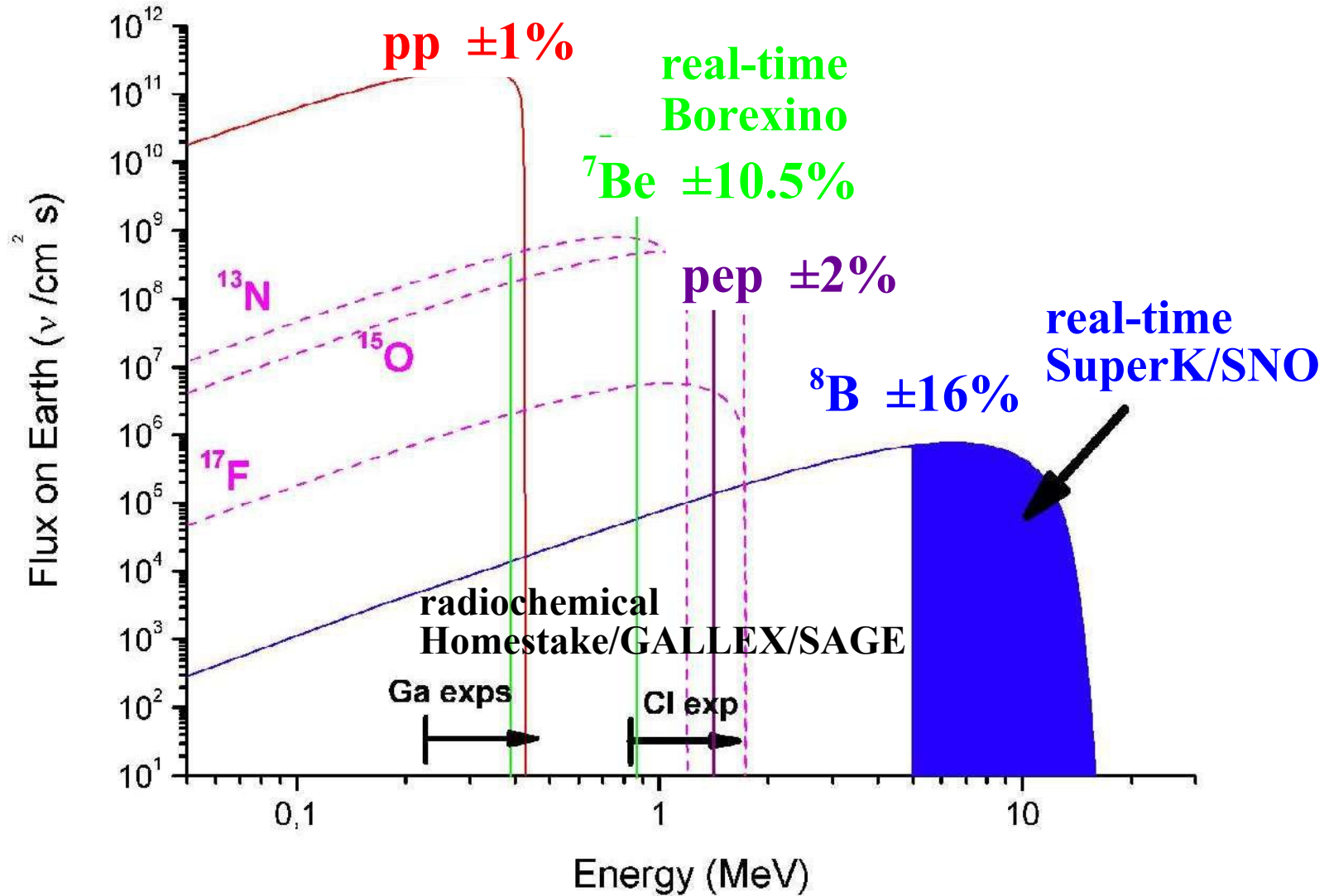
- produção de energia por fusão nuclear
- equilíbrio entre gravidade e pressão térmica
- transporte de energia (radiativo e convectivo)
- Luminosidade, massa, idade
- secções eficazes nucleares
- secções eficazes absorção e dispersão



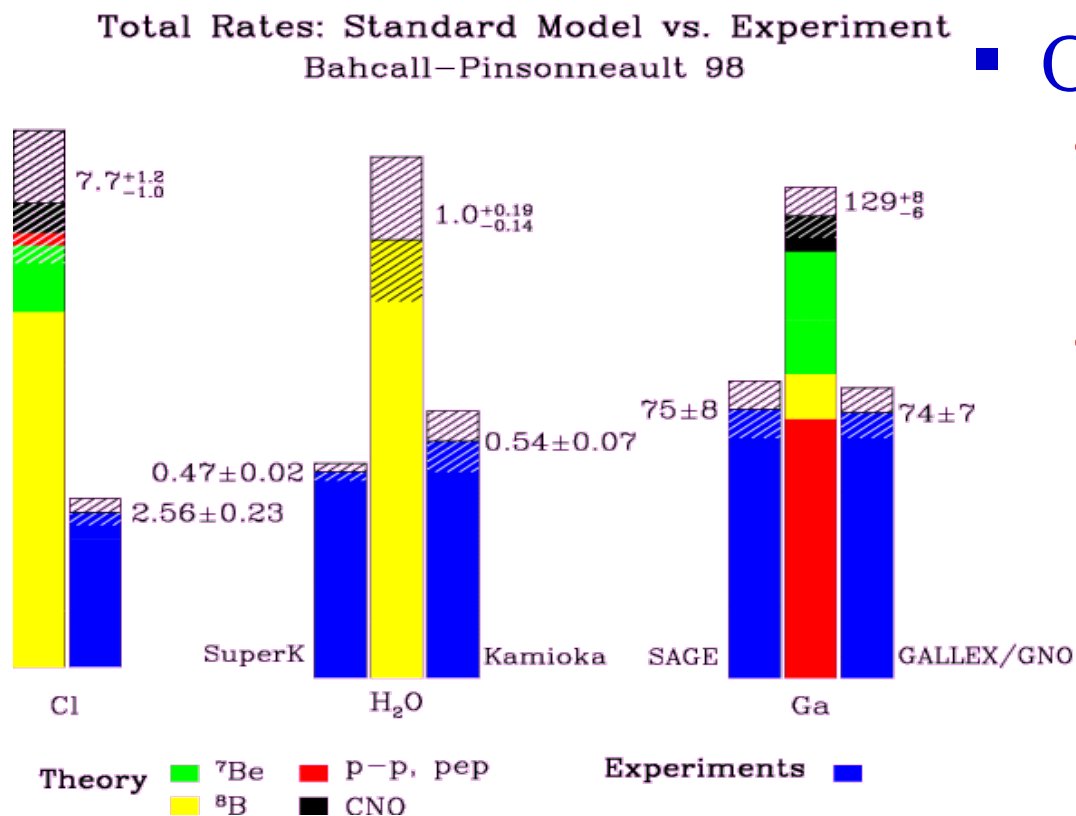
A cadeia pp de fusão nuclear



Espectro de neutrinos solares



O problema dos neutrinos solares

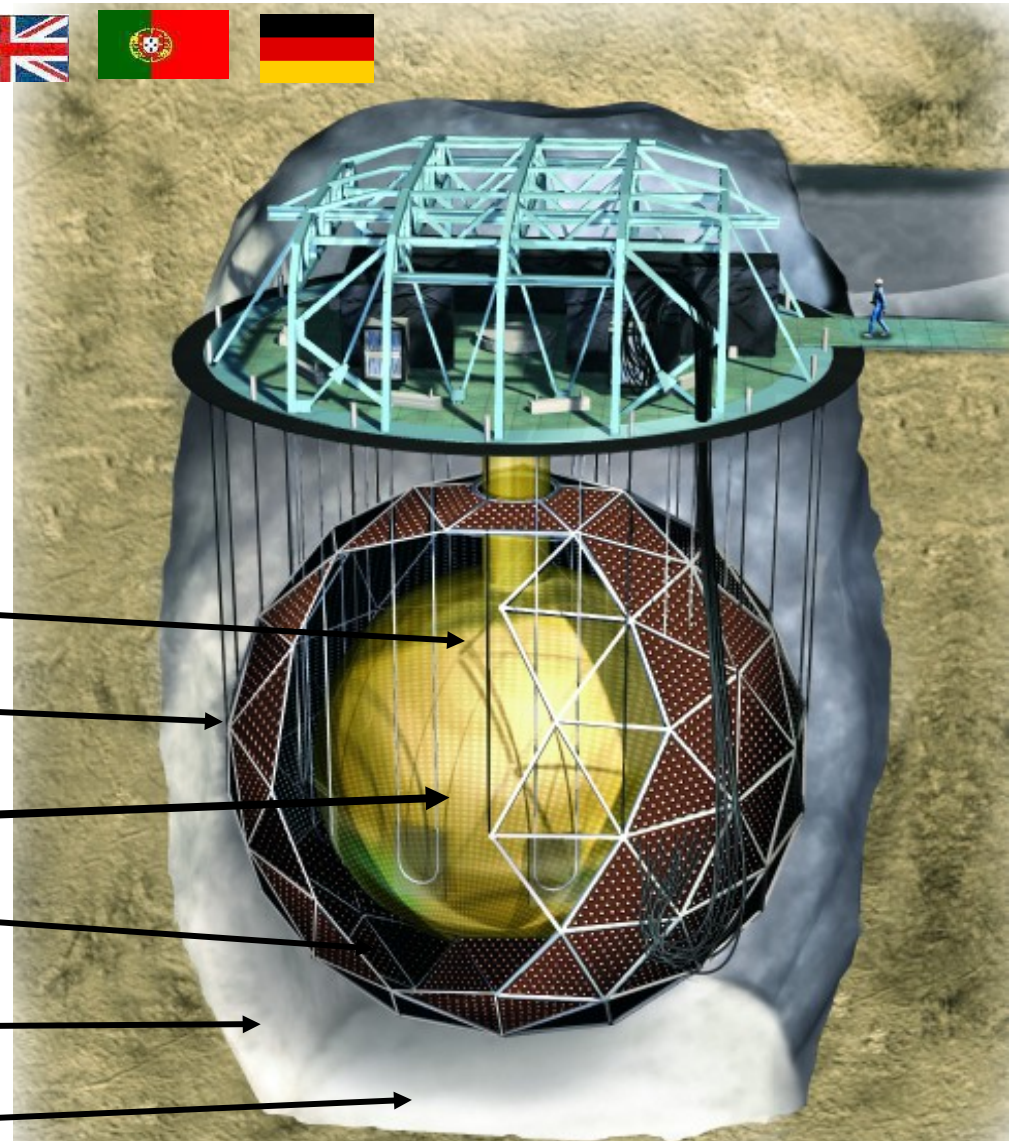
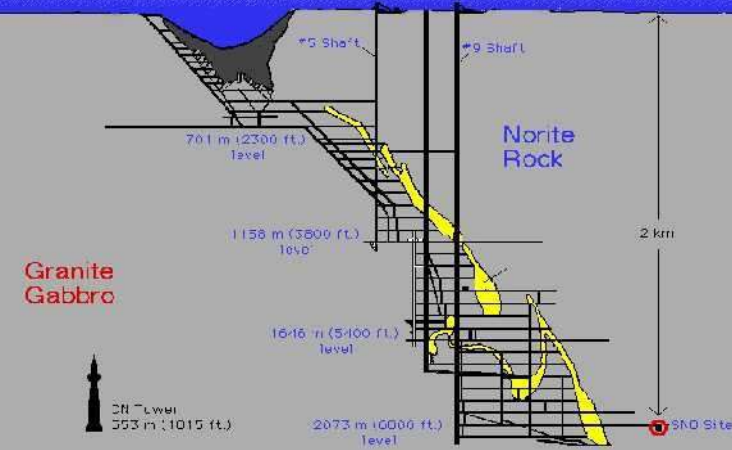


■ O que está errado?

- modelo solar prevê fluxo demasiado intenso?
- não estamos a medir todo o fluxo produzido?
 - o estas experiências são apenas (ou principalmente) sensíveis aos neutrinos do electrão
 - o e se eles tiverem mudado de sabor entre o centro do Sol e a Terra ?



Sudbury Neutrino Observatory



D₂O (água pesada) : 1000 ton

Estrutura de suporte para 9500 PMTs

Esfera de Acrílico: diâm. 12 m

Camada H₂O interna: 1700 ton

Camada H₂O externa: 5300 ton

Liner de Urylon: selagem Rádón



- edifício SNOLAB
 - laboratórios, gabinetes, etc...
- Mina de níquel em plena actividade
 - fazemos treinos de mineiros

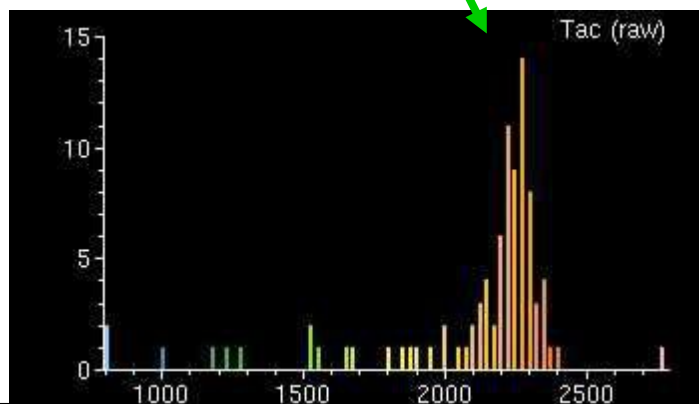
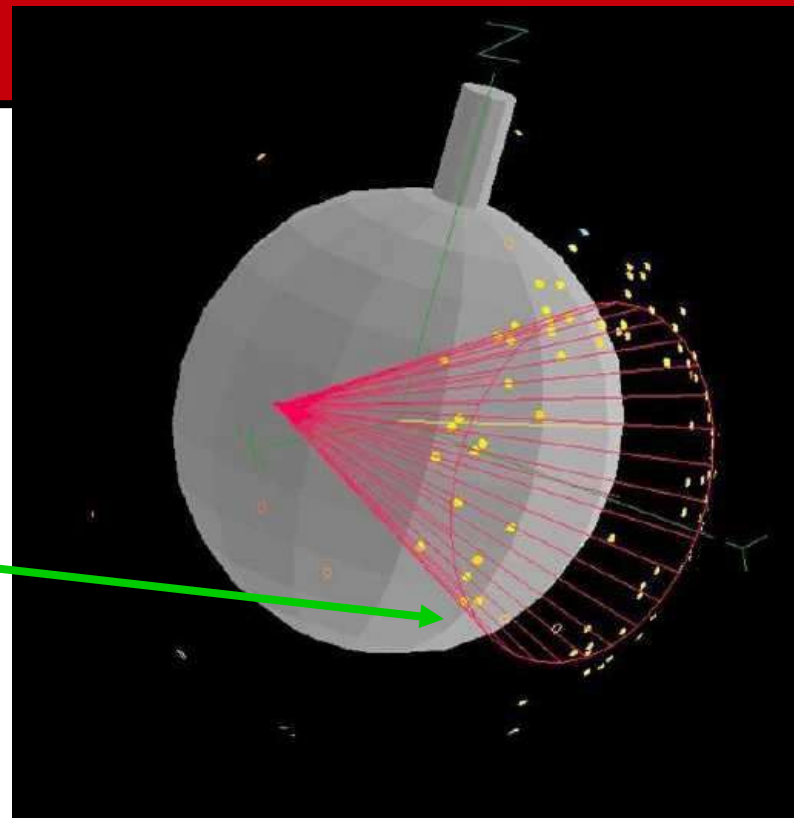




Observáveis

Medições com os PMTs

- posição
- tempo
- carga

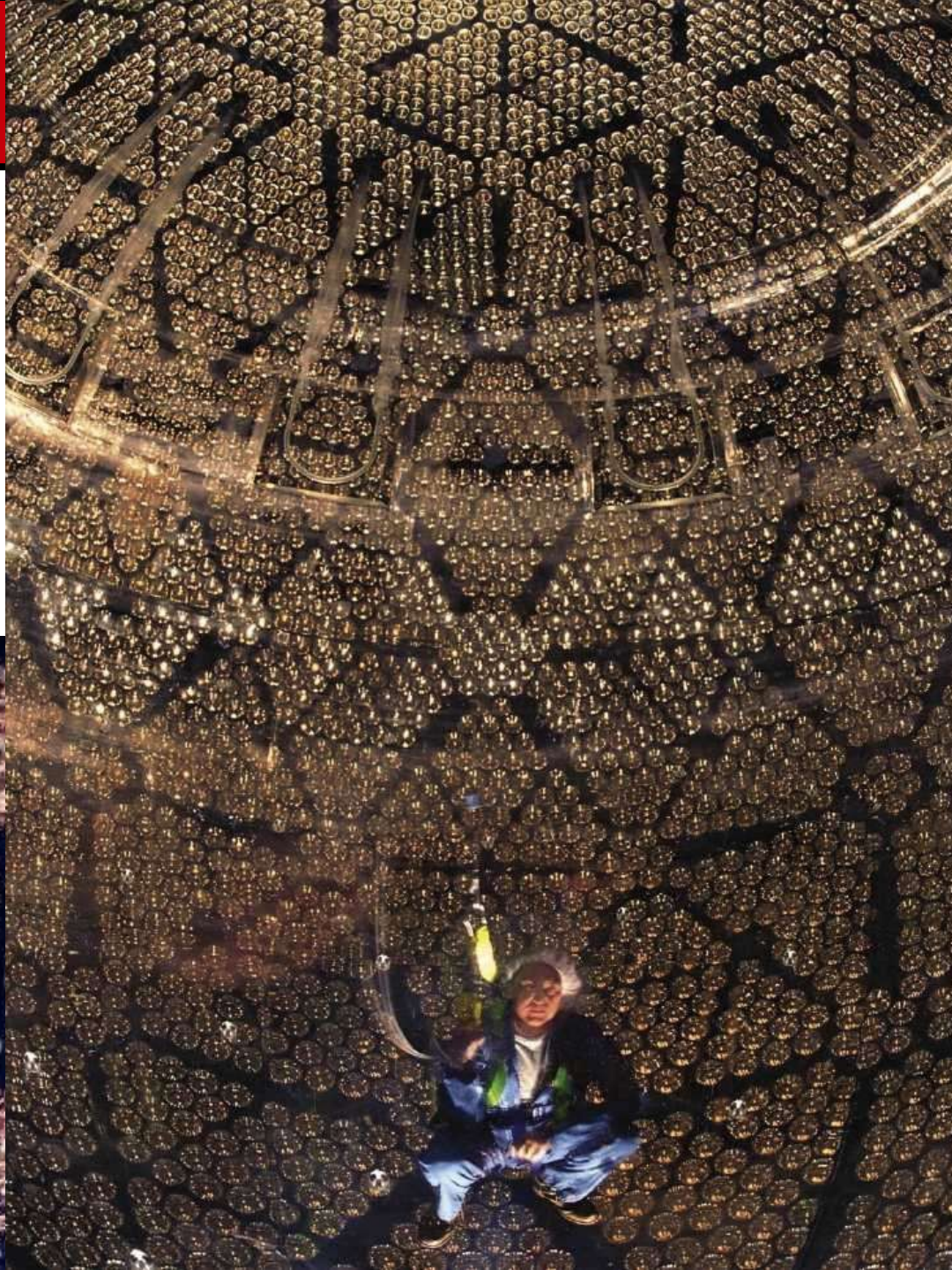


Evento reconstruído

- vértice
- direcção
- energia
- isotropia

Os PMTs

- Diâmetro 20 cm !
- Reflectores para aumentar aceitação
- Montados numa estrutura geodésica de 8.5 m de raio



Reacções de Neutrinos em SNO

CC



electron neutrino flux!
(energy sensitivity)

NC



global neutrino flux!
(only in SNO)

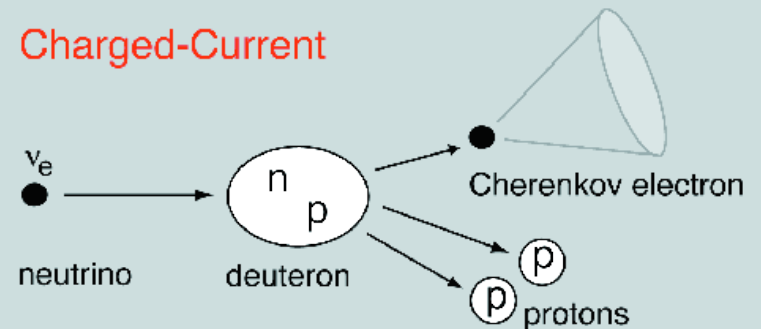
ES



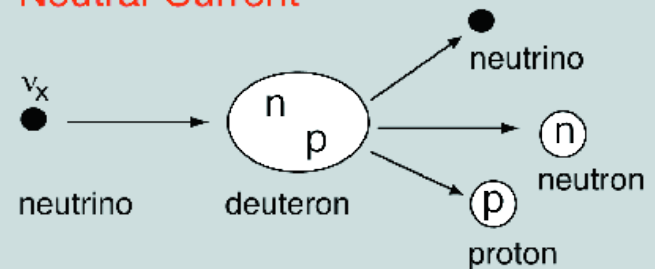
mixed $e/\mu,\tau$
(direction sensitivity)

Neutrino Reactions on Deuterium

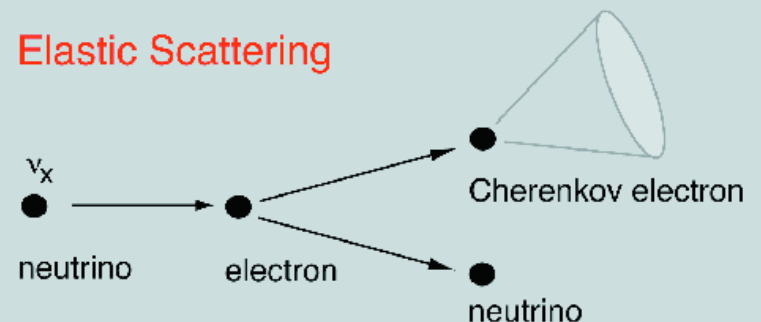
Charged-Current



Neutral-Current

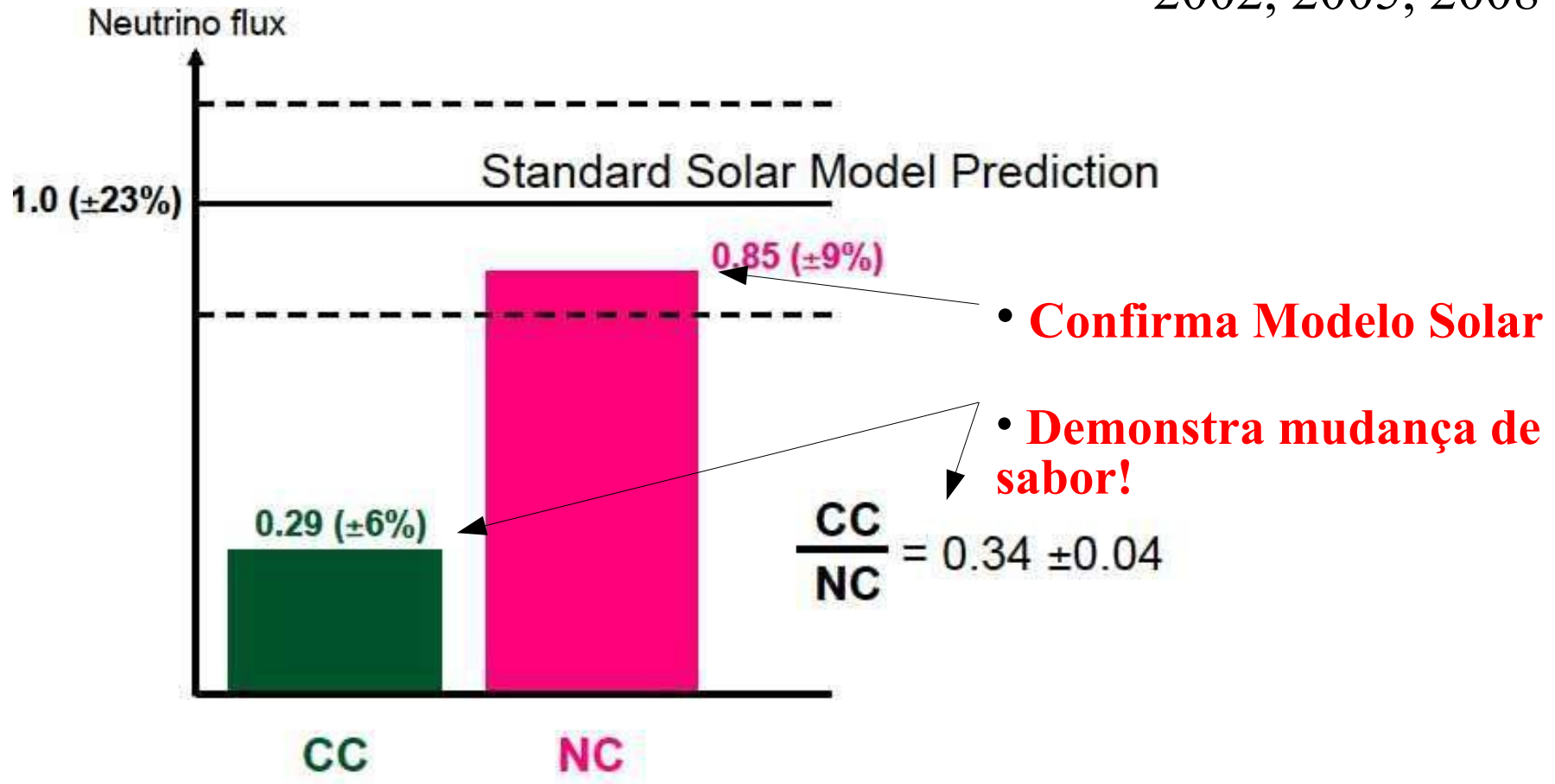


Elastic Scattering



Resultados de SNO

2002, 2005, 2008



<http://arxiv.org> nucl-ex/0502021

"For the greatest benefit to mankind"
Alfred Nobel

2015 NOBEL PRIZE IN PHYSICS

Takaaki Kajita
 Arthur B. McDonald



- "for the discovery of neutrino oscillations, which shows that neutrinos have mass"



The 2015 Nobel Prize in Physics



Neutrinos Win Again: More Than 1,300 Physicists Share Breakthrough Prize for Particle Experiments

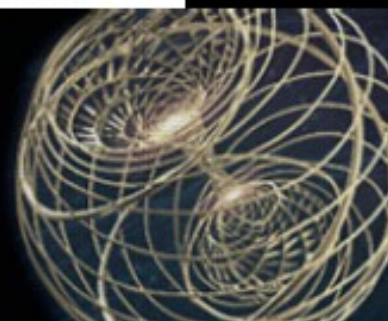
In October two discoverers of neutrino oscillations won the Nobel Prize. Now their full teams and those of several other experiments on the strange particles share a \$3-million award



Investigadores do LIP partilham prémio

"For the fundamental discovery and exploration of neutrino oscillations, revealing a new frontier beyond, and possibly far beyond, the standard model of particle physics."

THE
BREAKTHROUGH
PRIZE



Kam-Biu Luk and the
Daya Bay Collaboration



Yifang Wang and the
Daya Bay Collaboration



Koichi Nishikawa and
the K2K and T2K
Collaboration



Atsuto Suzuki and the
KamLAND Collaboration



Arthur B. McDonald and
the SNO Collaboration



Takaaki Kajita and the
Super K Collaboration



Yoichi Suzuki and the
Super K Collaboration

<http://www.lip.pt/index.php?id=6&subid=73&p=1&pano=2015&ppress=24&lg=pt>

Art McDonald no Ciência Viva



Setembro 2016



Outras confirmações

- Neutrinos de acelerador ($\sim 300 - 700$ km)
 - K2K, T2K, MINOS, OPERA observaram oscilações. Parâmetros compatíveis com oscilações de atmosféricos
- Neutrinos de reator (~ 180 km)
 - KAMLAND observou oscilações. Parâmetros compatíveis com solares, se considerarmos oscilações na matéria (no Sol)
- Neutrinos de reator (~ 1 km)
 - Daya Bay, RENO, Double Chooz observaram oscilações. Medição do terceiro ângulo que faltava

Oscilações a três sabores

A matriz de mistura dos neutrinos é agora de 3×3 , com três ângulos de mistura θ_{12} ("ângulo dos neutrinos solares"), θ_{13} e θ_{23} ("ângulo dos neutrinos atmosféricos"), e uma fase independente δ . Definindo $s_{ij} = \sin \theta_{ij}$ e $c_{ij} = \cos \theta_{ij}$, a matriz pode ser factorizada da seguinte forma.

$$\begin{aligned}
 U &= \begin{bmatrix} U_{e1} & U_{e2} & U_{e3} \\ U_{\mu 1} & U_{\mu 2} & U_{\mu 3} \\ U_{\tau 1} & U_{\tau 2} & U_{\tau 3} \end{bmatrix} \\
 &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c_{23} & s_{23} \\ 0 & -s_{23} & c_{23} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c_{13} & 0 & s_{13}e^{i\delta} \\ 0 & 1 & 0 \\ -s_{13}e^{i\delta} & 0 & c_{13} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c_{12} & s_{12} & 0 \\ -s_{12} & c_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
 &= \begin{bmatrix} c_{12}c_{13} & s_{12}c_{13} & s_{13}e^{i\delta} \\ -s_{12}c_{23} - c_{12}s_{23}s_{13}e^{i\delta} & c_{12}c_{23} - s_{12}s_{23}s_{13}e^{i\delta} & s_{23}c_{13} \\ s_{12}c_{23} - c_{12}s_{23}s_{13}e^{i\delta} & -c_{12}s_{23} - s_{12}c_{23}s_{13}e^{i\delta} & c_{23}c_{13} \end{bmatrix} \quad (14)
 \end{aligned}$$

ângulo dos neutrinos solares

ângulo dos neutrinos atmosféricos

Matrizes de mistura de sabor dos quarks e leptões

O formalismo da mistura de sabor nos neutrinos é inspirado no formalismo semelhante no setor dos quarks, com uma matriz unitária de 3x3:

- Quarks Matriz CKM Cabbibo-Kobaiashi-Maskawa.
- Leptões Matriz PMNS Pontecorvo-Maki-Nakagawa-Sakata.

$$\begin{array}{c} CKM, |\mathbf{V}_{ij}| = \\ \left(\begin{array}{ccc} 0.974 & 0.225 & 0.00347 \\ 0.225 & 0.973 & 0.0415 \\ 0.00862 & 0.0403 & 0.9992 \end{array} \right) \end{array} \quad \begin{array}{c} PMNS, |\mathbf{U}_{ij}| = \\ \left(\begin{array}{ccc} 0.822 & 0.547 & 0.150 \\ 0.356 & 0.704 & 0.614 \\ 0.442 & 0.452 & 0.774 \end{array} \right) \end{array} \quad (15)$$

$$\begin{array}{c} \theta_{12} \sim \\ \theta_{23} \sim \\ \theta_{13} \sim \end{array} \left| \begin{array}{cc} CKM & PMNS \\ 13^\circ & 34^\circ \\ 2.4^\circ & 45^\circ \\ 0.2^\circ & 4.4^\circ \end{array} \right. \quad (16)$$

O que podemos medir agora?

Neutrinos, de Dirac ou Majorana?

Qual o valor absoluto da massa?

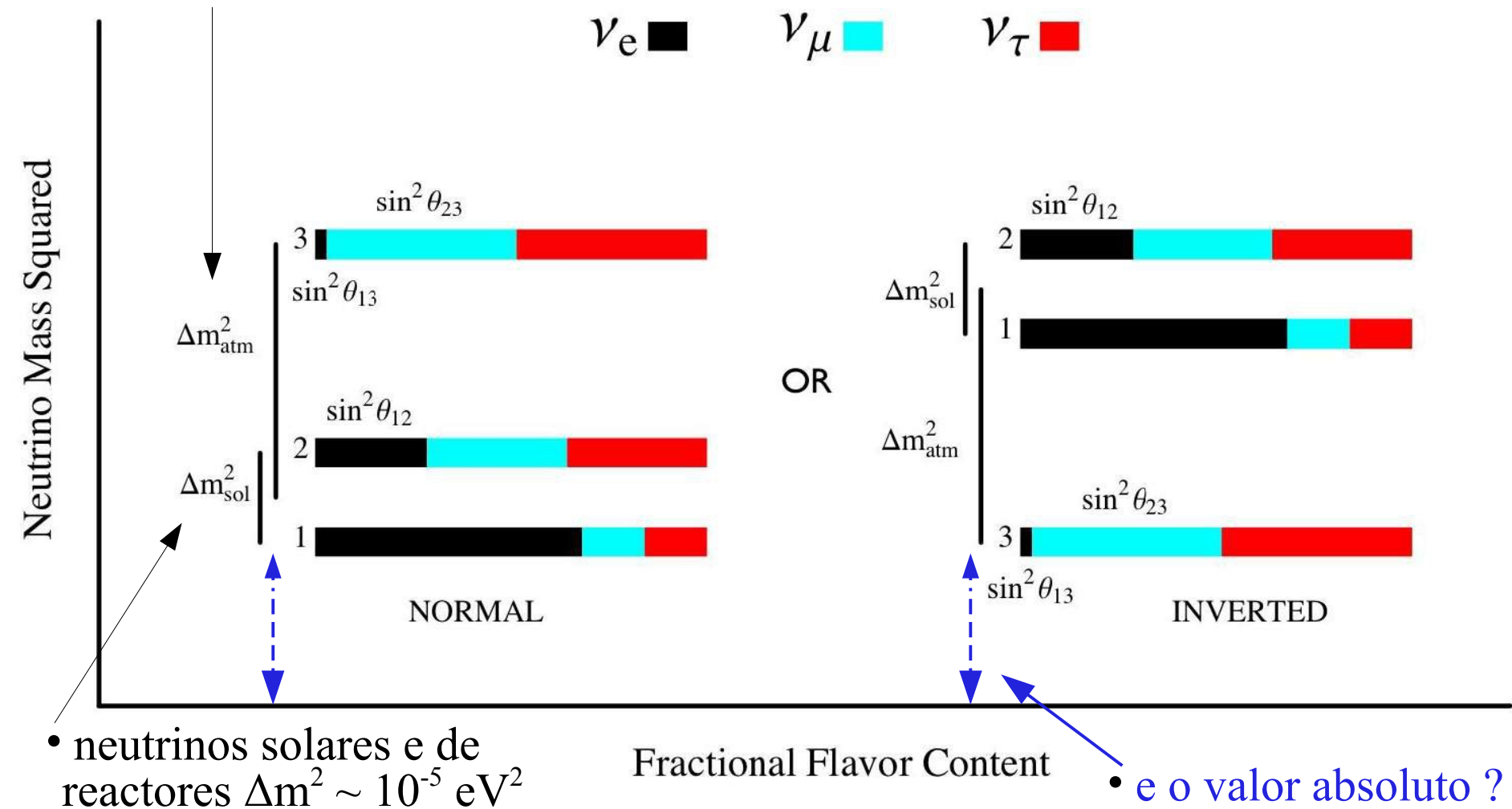
Qual a ordem: $m_1 < m_2 < m_3$ ou $m_3 < m_1 < m_2$?

Violação de CP nos neutrinos ?

Espetro de massa dos neutrinos ?

- neutrinos atmosféricos e de aceleradores $\Delta m^2 \sim 10^{-3} \text{ eV}^2$

Cosmologia
 $\sum m\nu < 0.28 \text{ eV}$

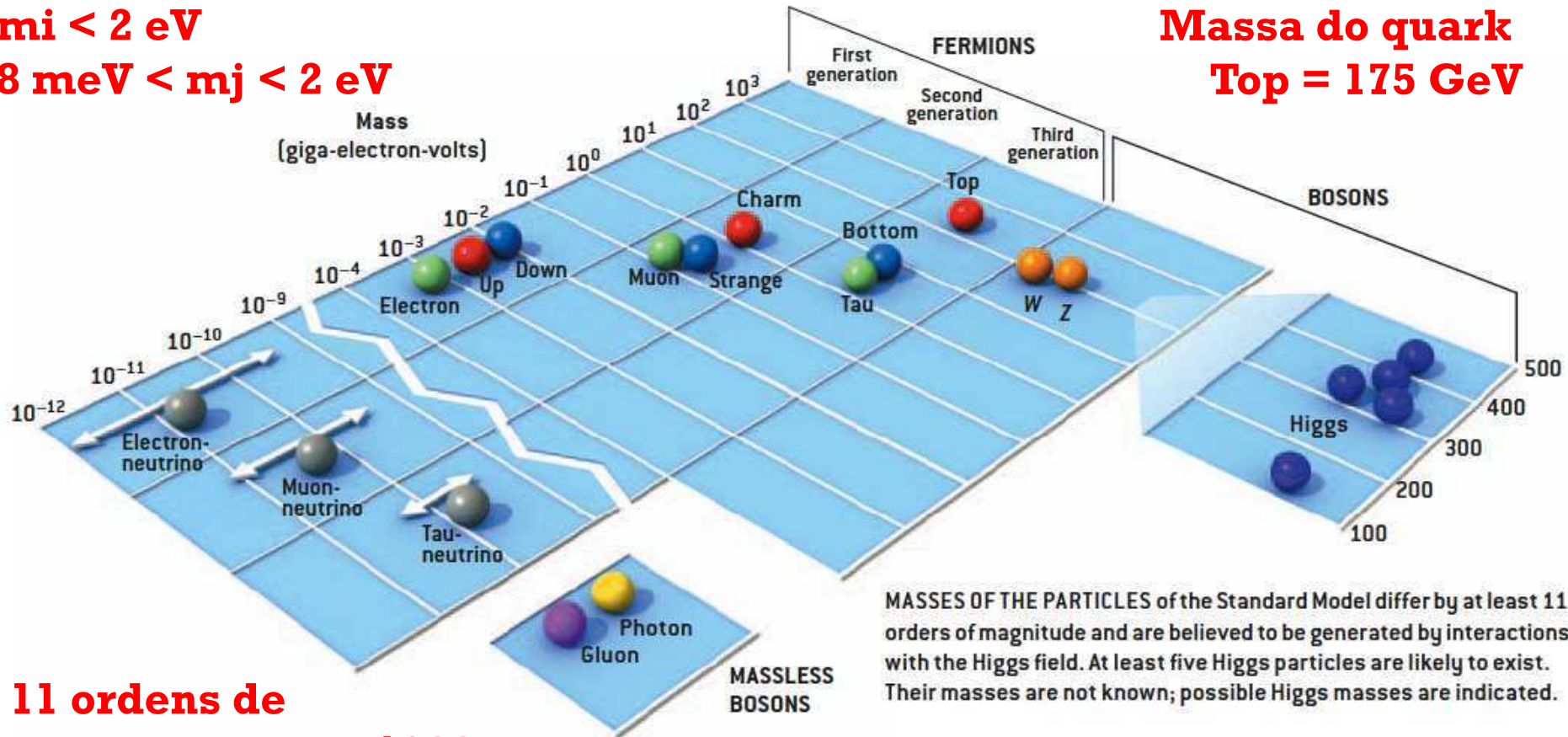


Massa muito pequena

Massa dos neutrinos

$m_i < 2 \text{ eV}$

$8 \text{ meV} < m_j < 2 \text{ eV}$

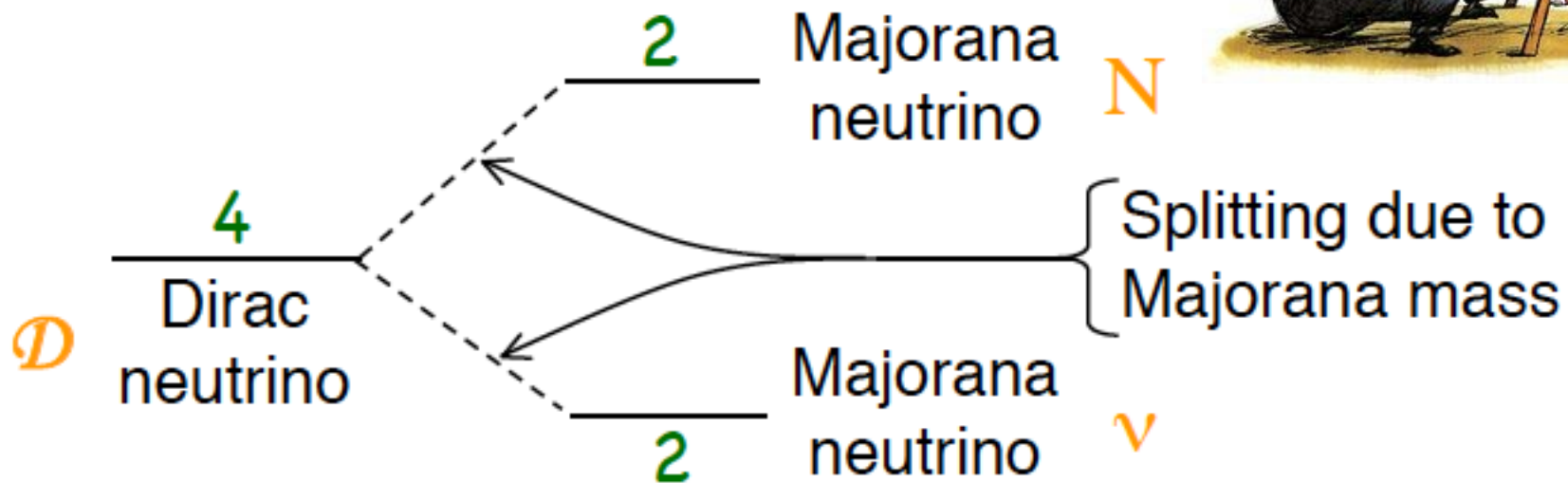


Massa do quark
Top = 175 GeV

**11 ordens de
grandeza! Porquê???**

Mecanismo “see-saw”

- Um termo de Majorana grande resulta em dois neutrinos de Majorana de massa muito diferentes



Massa dos neutrinos leves

$$m_\nu m_N \approx m_D^2$$

Massa dos “novos”
Neutrinos pesados

Massa típica dos
fermiões

Matéria/antimatéria, e neutrinos?

- Porque há mais matéria do que anti-matéria no Universo?
 - Violação de CP nos neutrinos?
- Os neutrinos são a sua própria anti-partícula ?
 - Estas questões estão ligadas?

Matter and Anti-Matter

Early Universe

1,000,000,001

1,000,000,000

matter

anti-matter

Matter and Anti-Matter

Current Universe

|
•
us

matter

anti-matter

The Great Annihilation

Como se cria essa diferença?

- Condições de Sakharov • para a bariogénese

- Violação do número bariónico
- Violação da simetria CP



- Processos fora do equilíbrio

- Violação de CP nos quarks

- é observada, mas é demasiado pequena

- Leptogénese

- Neutrinos pesados no Universo primitivo
- Decaem, com violação CP:

$$\begin{aligned}\Gamma(N \rightarrow \ell^- + H^+) &\neq \Gamma(N \rightarrow \ell^+ + H^-) \\ \Gamma(N \rightarrow \nu + H^0) &\neq \Gamma(N \rightarrow \bar{\nu} + \overline{H^0})\end{aligned}$$

origina depois
assimetria nos bárions

Escala das massas

$$m_\nu m_N \approx m_D^2$$

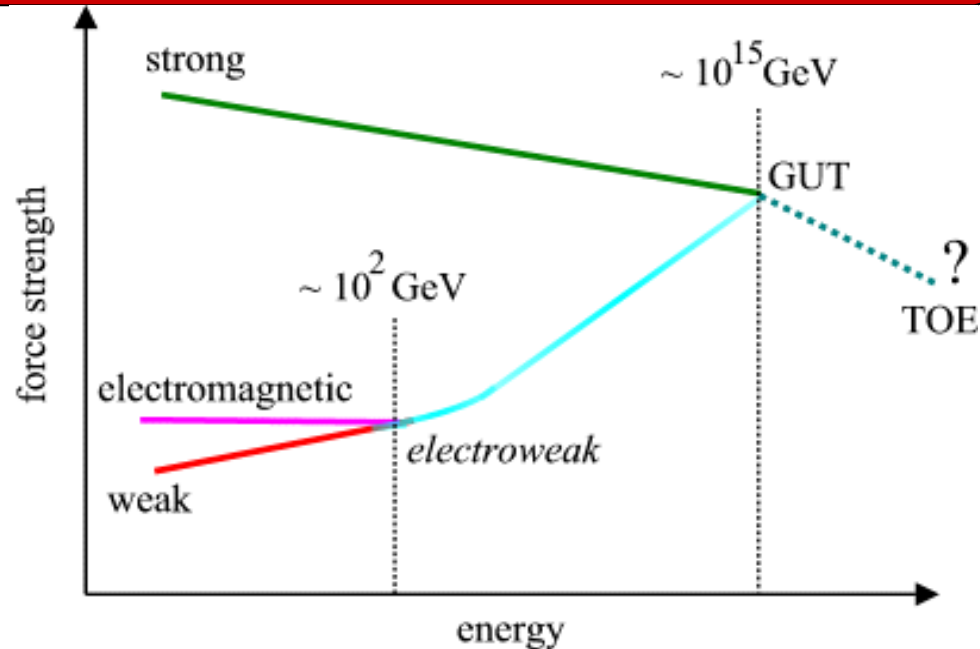
- Neutrinos pesados
“compensam” os leves

- $m_D \sim 100 \text{ GeV}$
- Se $m_\nu \sim 0.01 - 0.1 \text{ eV}$
- Então $m_N \sim 10^{14} - 10^{15} \text{ GeV}$

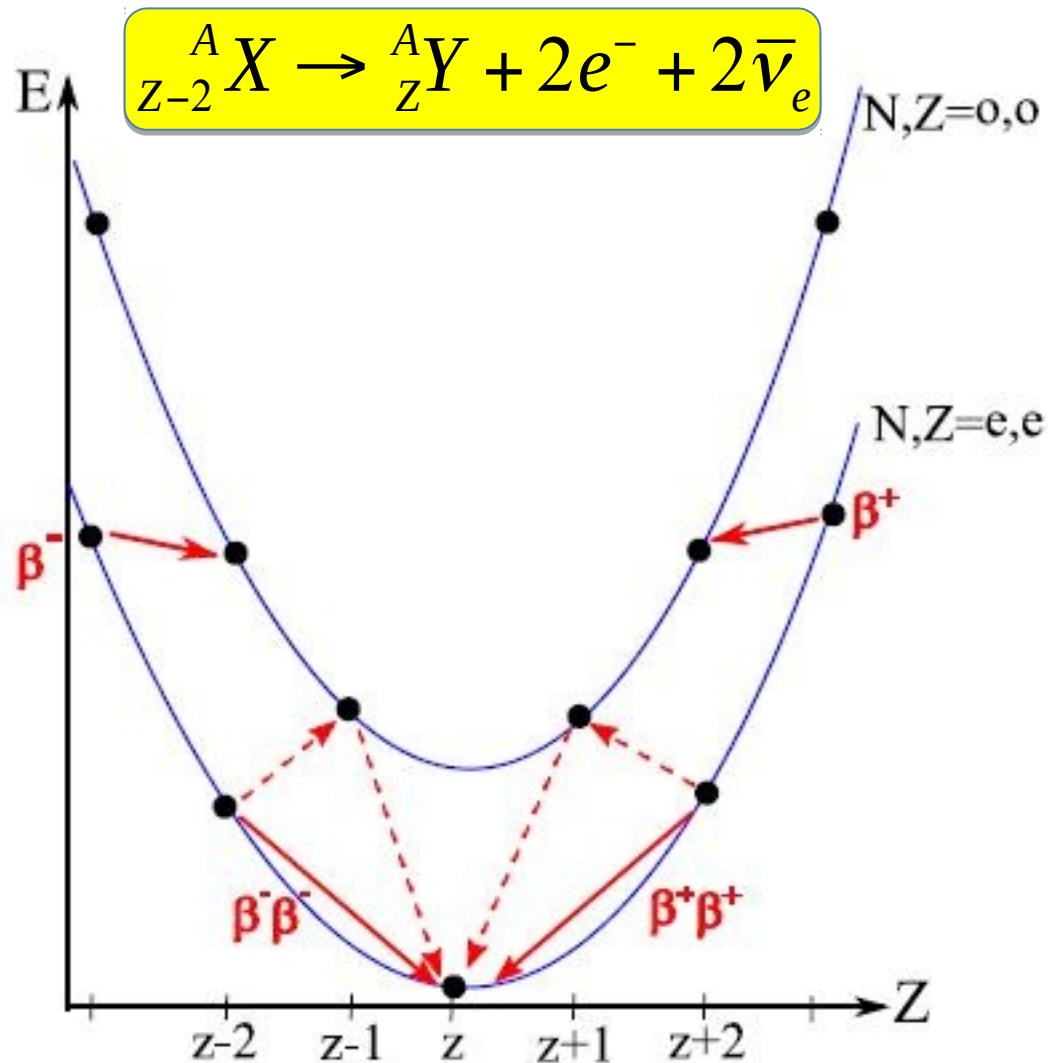
- Teoricamente, está tudo em aberto

- Supersimetria, Higgs múltiplos, etc...
- Mas m_N é próxima da escala de unificação das forças

- Só seria observável diretamente no LHC, em casos de modelos particulares



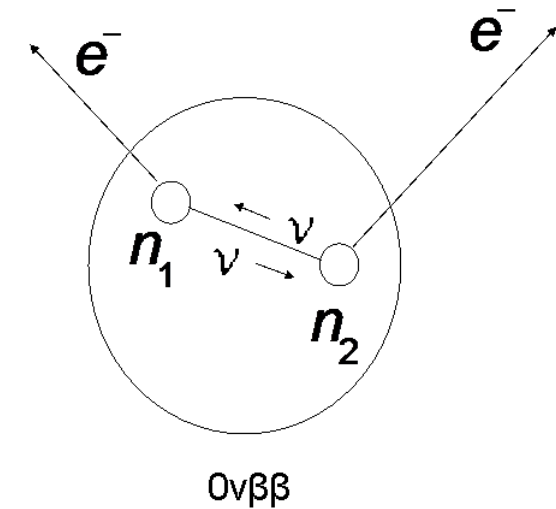
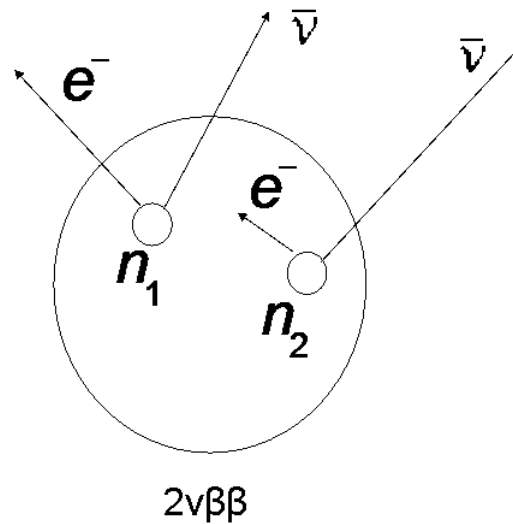
Declínio Beta Duplo



- Declínio radioativo muito raro
 - Quando o declínio beta normal não é energeticamente possível
 - 35 isótopos naturais podem ter DBD
 - Foi observado em cerca de 10

Declínio Beta duplo sem neutrinos

- Caso muito especial
 - Só acontece se neutrinos forem de Majorana
 - Vida média depende da massa dos neutrinos



$$\frac{1}{T_{1/2}^{0\nu}} = G_{0\nu} |\mathcal{M}_\nu|^2 \left| \frac{m_{ee}^\nu}{m_e} \right|^2$$

Massa eficaz de Majorana
Depende das massas m_1, m_2, m_3
mas também de outros parâmetros

$$m_{ee}^\nu = m_1 c_{12}^2 c_{13}^2 + m_2 s_{12}^2 c_{13}^2 e^{2i\alpha_2} + m_3 s_{13}^2 e^{2i(\alpha_3 + \delta)}$$

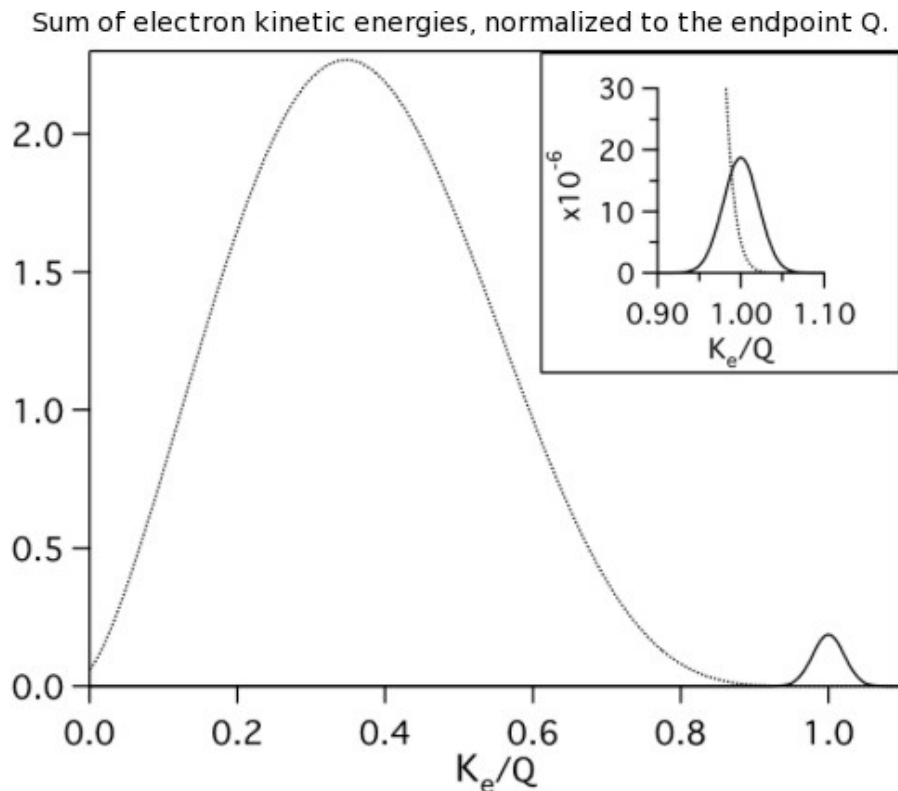
Massa do neutrino do elétron
Combinação diferente
Medida complementar

$$m^2(\nu_e) = \sum_{i=1}^3 |U_{ei}^2| m_i^2$$

Procura experimental do 0NDBD

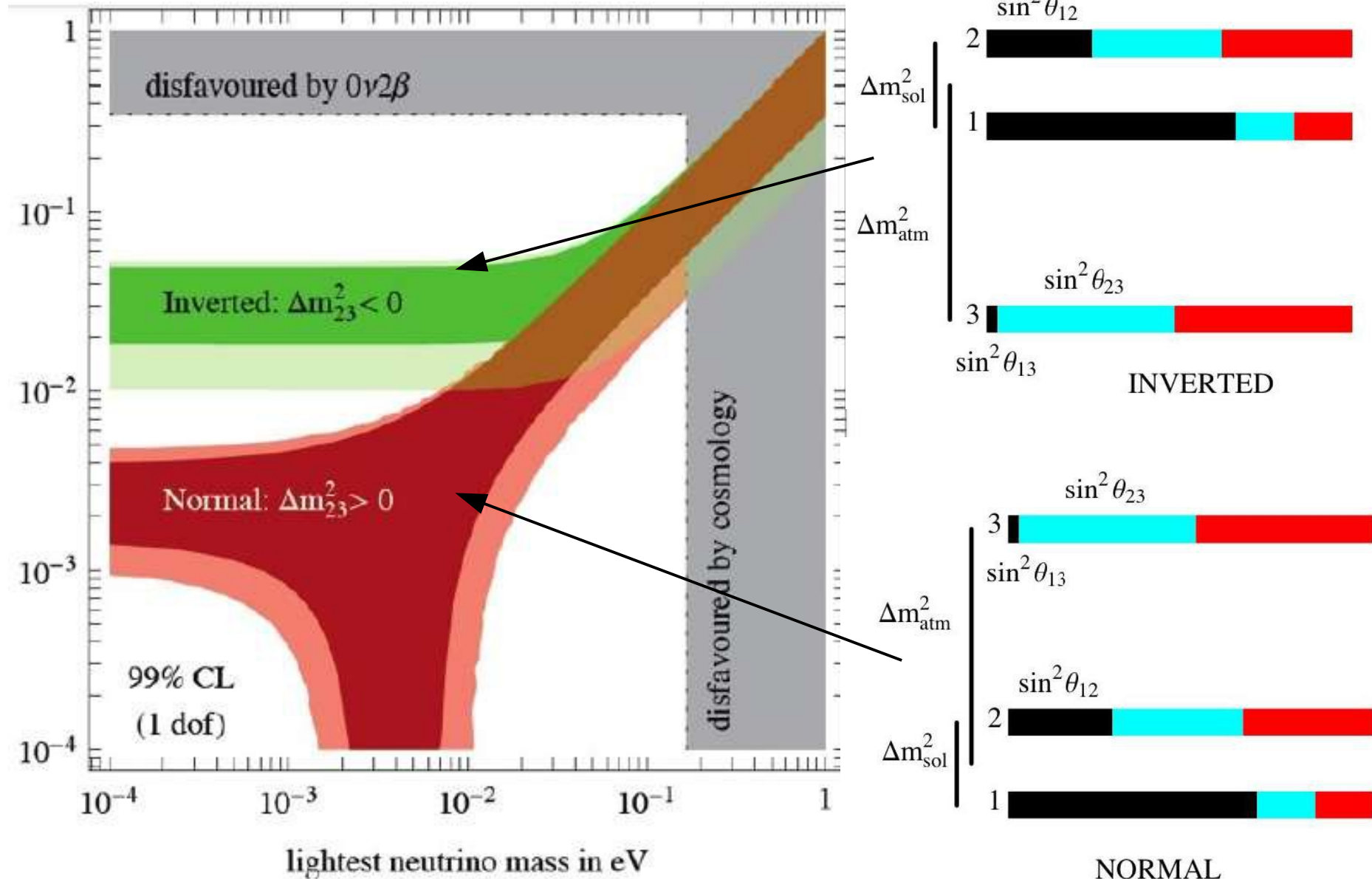
- Método

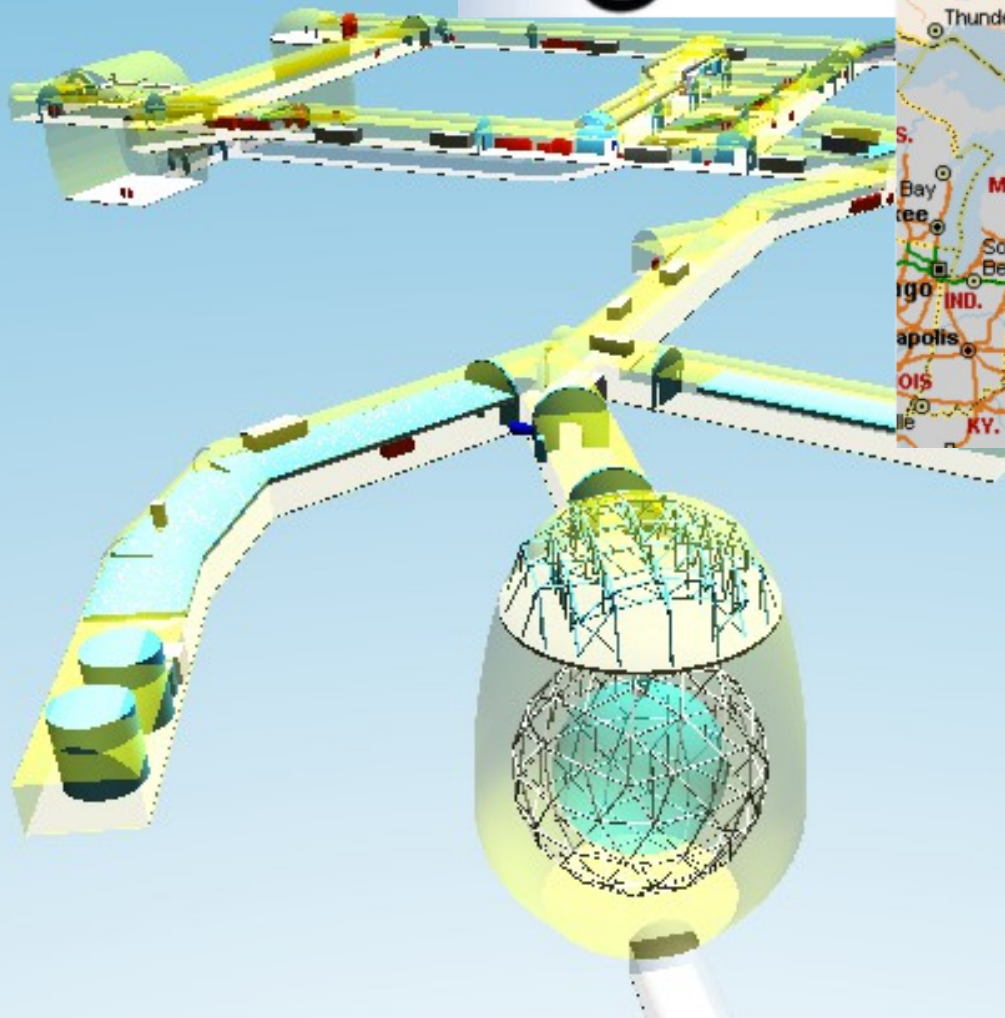
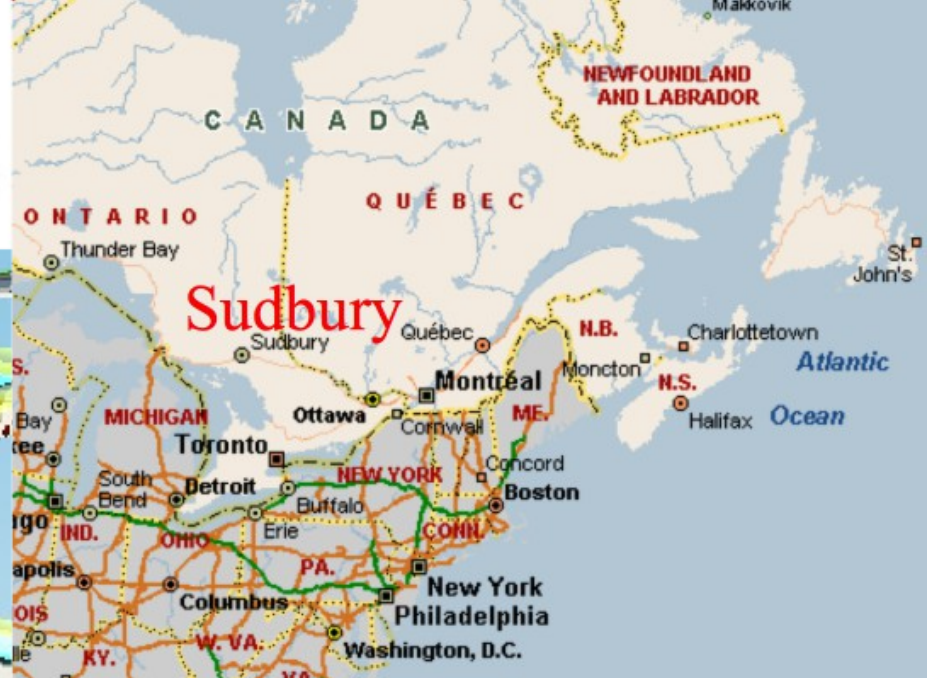
- Procura de um pico de energia (o declínio 2NDBD é contínuo)



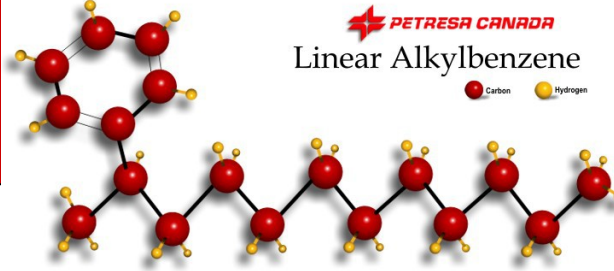
- Resolução do detetor
 - Para distinguir o pico
- Massa do detetor
 - Declínio muito raro
 - São precisas centenas de kg de isótopo
- Baixo ruído de fundo
 - Localização subterrânea
 - Baixa radioatividade
 - Análise dos eventos

Massa eficaz





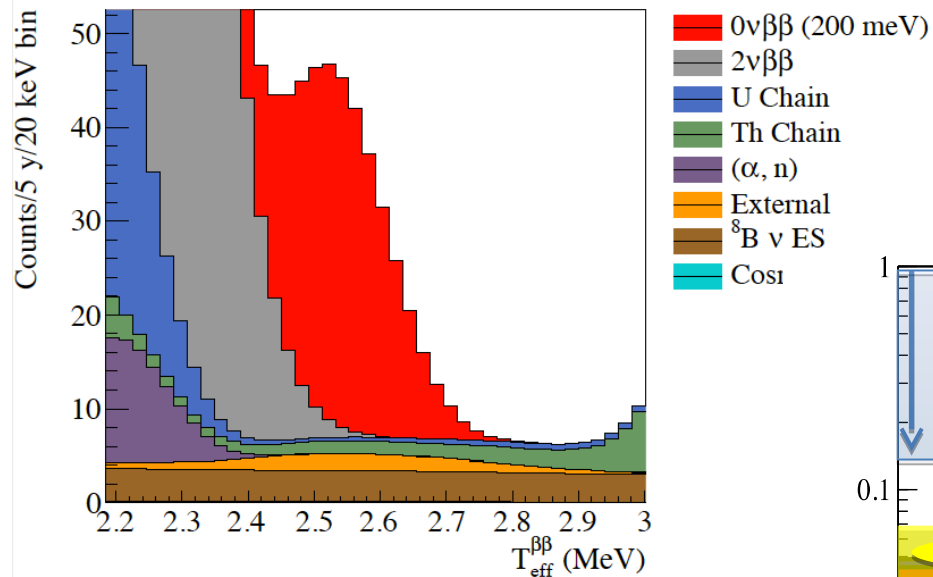
SNOLAB, no Canadá, é o 2º laboratório mais profundo do mundo, e portanto, com muito baixo “ruído de fundo” devido a muões cósmicos



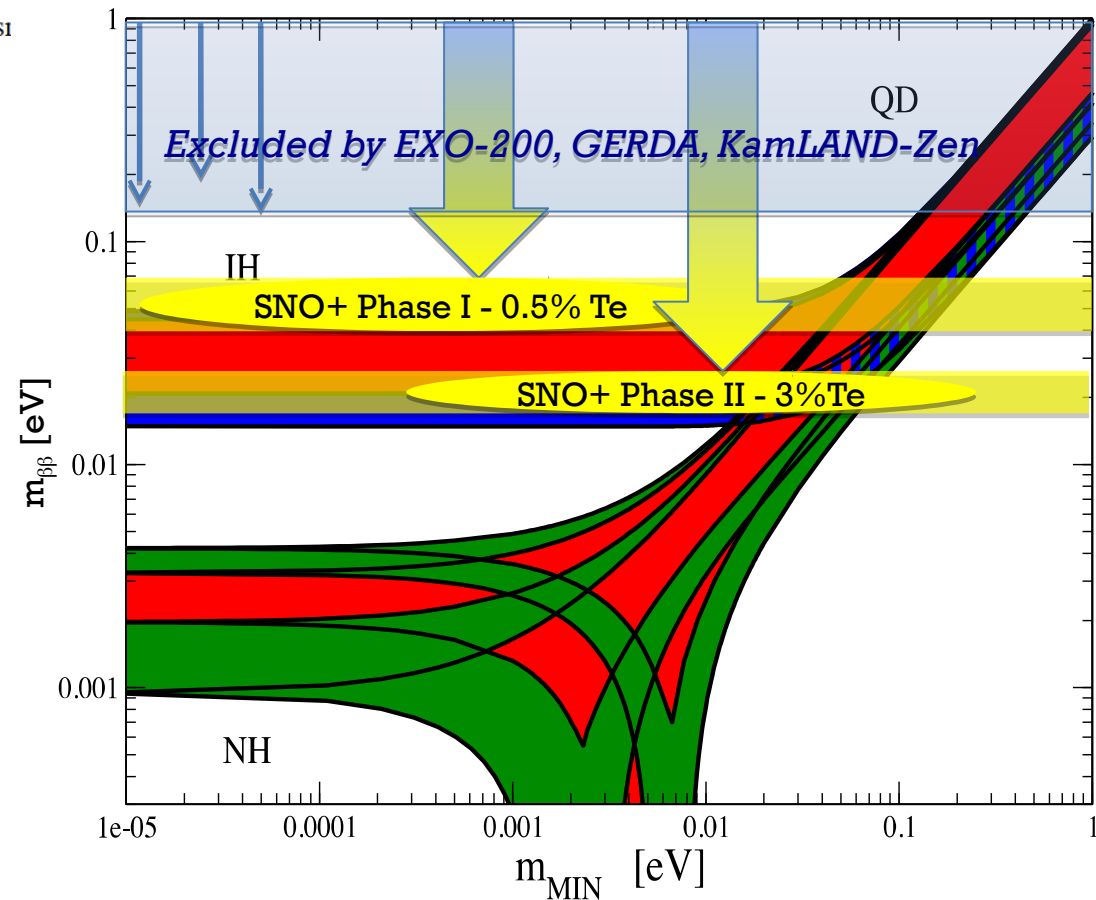
- Sucessor de SNO
 - Cintilador líquido dopado com Telúrio
 - Mais luz: energias mais baixas
 - Mais leve: cordas de reforço
- Programa de física
 - DBD do Te130
 - Neutrinos de reator, geo-neutrinos, neutrinos de Supernovas



Sensibilidade de SNO+ ao 0NDBD

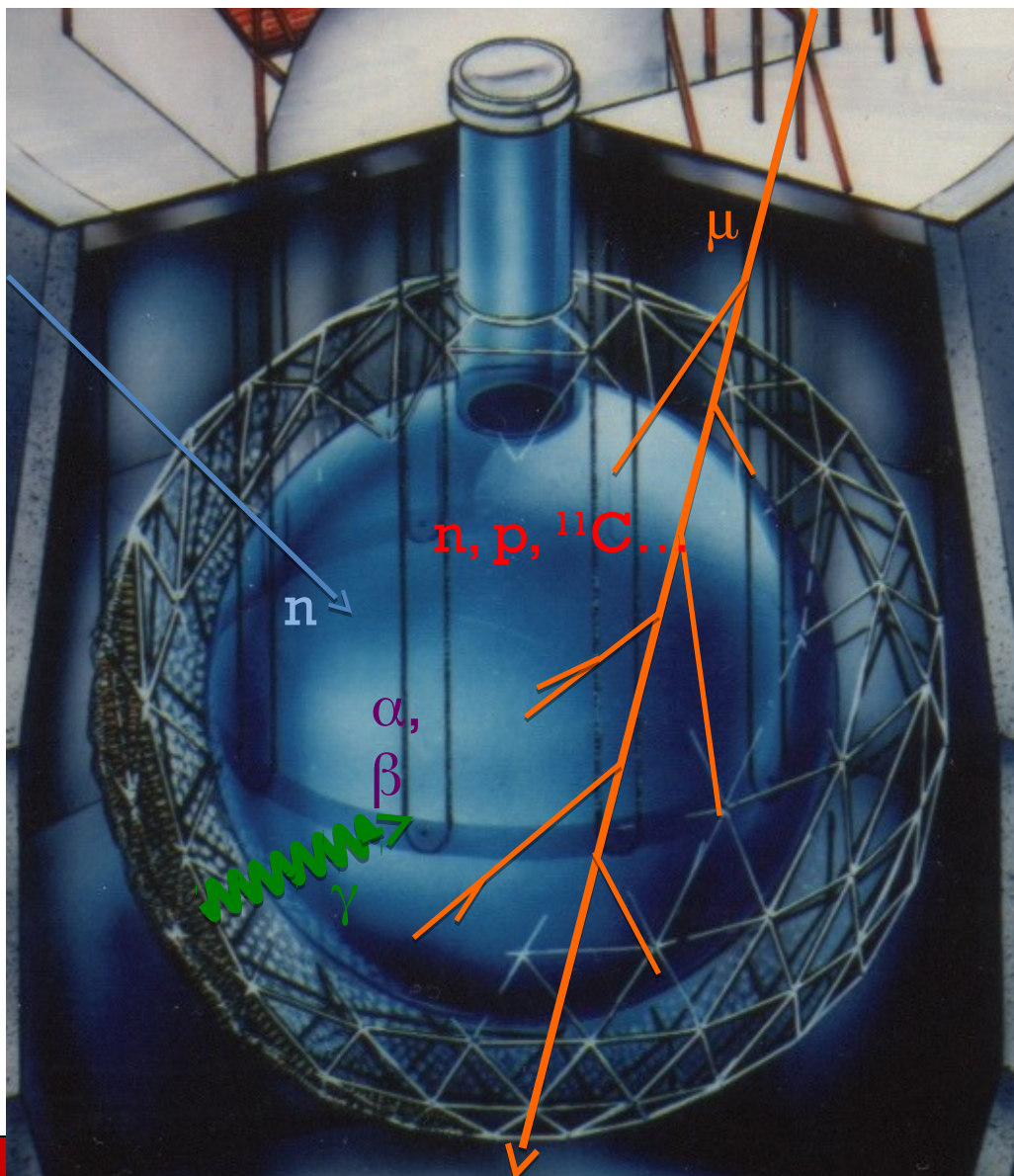


Sinal esperado no limite atual. Fundo dominante: neutrinos solares!



Várias fases, aumentando progressivamente a dopagem

Desafio principal: ruído de fundo



Radioatividade Interna
resíduos de radioisótopos
(cadeia do U/Th, ⁴⁰K, etc) no
cintilador.

Gamas Externos
Dos declínios no acrílico,
água, PMTs, etc.

**Muões de raios
cósmicos**

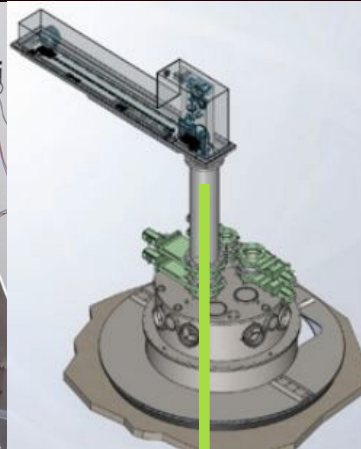
“Cosmogénicos”
Radioisótopos, produzidos
pelos raios cósmicos
incidentes no Telúrio

Limpeza do balão de acrílico

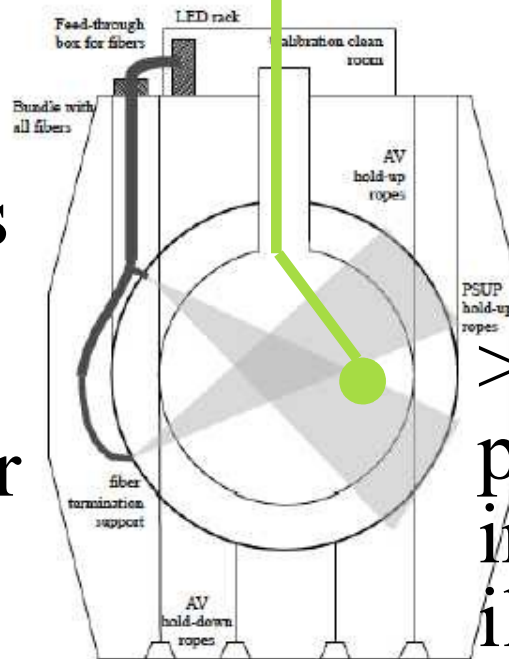


Até por fora!

SNO+@LIP: Calibrações

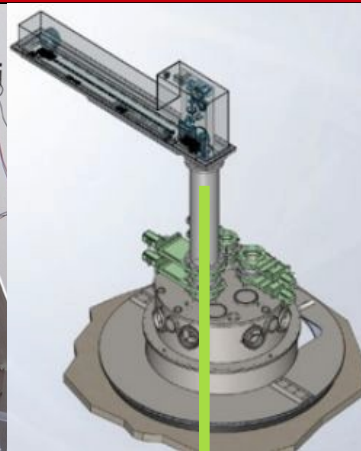


Sistema mecânico
estanque (evitar o gás
Radão) para inserir
fontes óticas e
radioativas no interior
do detetor

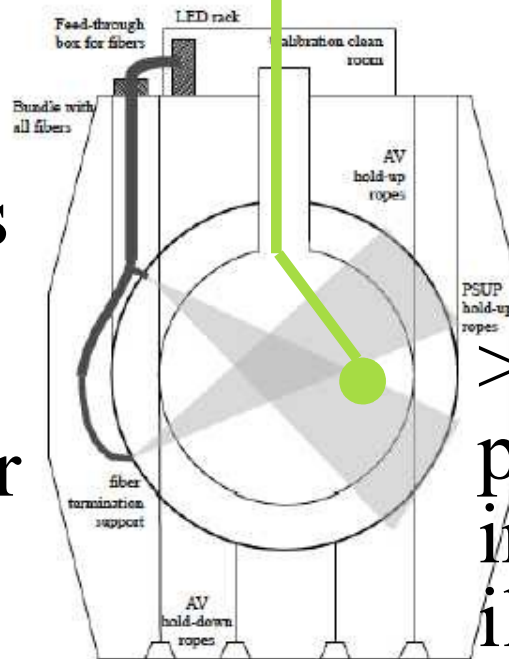


> 100 fibras óticas
para trazer
impulsos LED e
iluminar os PMTs

SNO+@LIP: Calibrações

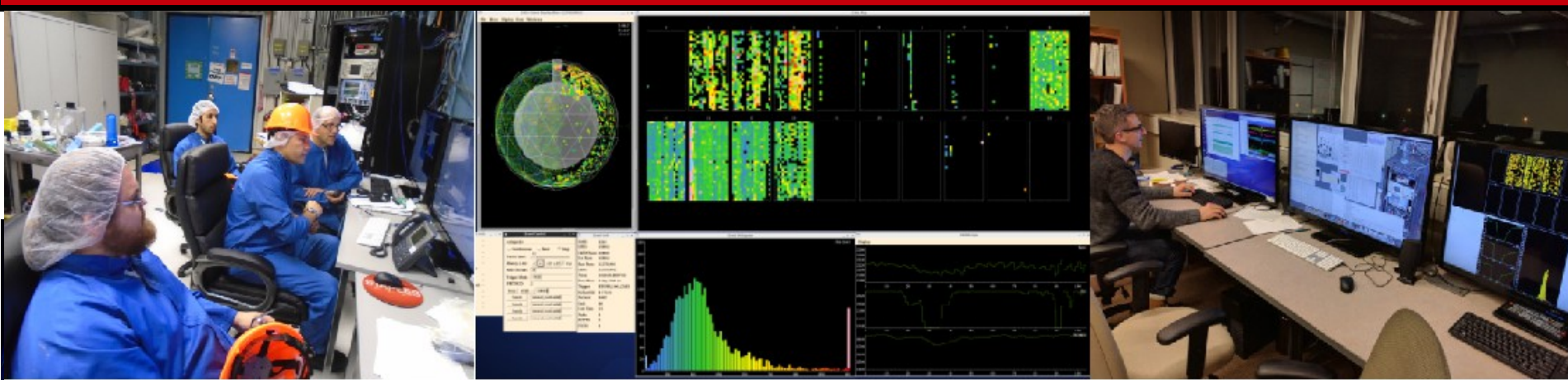


Sistema mecânico
estanque (evitar o gás
Radão) para inserir
fontes óticas e
radioativas no interior
do detetor



> 100 fibras óticas
para trazer
impulsos LED e
iluminar os PMTs

Tomada de dados já começou



- Tomada de dados com o detector cheio de água
- Atividades do grupo do LIP
 - Seleção da qualidade dos dados
 - Calibração ótica: atenuação da água, resposta dos PMT
 - Análise dos fundos de radioactividade
 - Preparação da procura de antineutrinos
- Próximo ano: cintilador
- 2019: cintilador dopado com Telúrio

www.lip.pt/experiments/snoplus