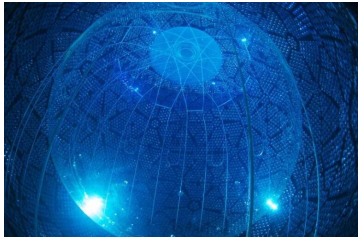
Neutrinos

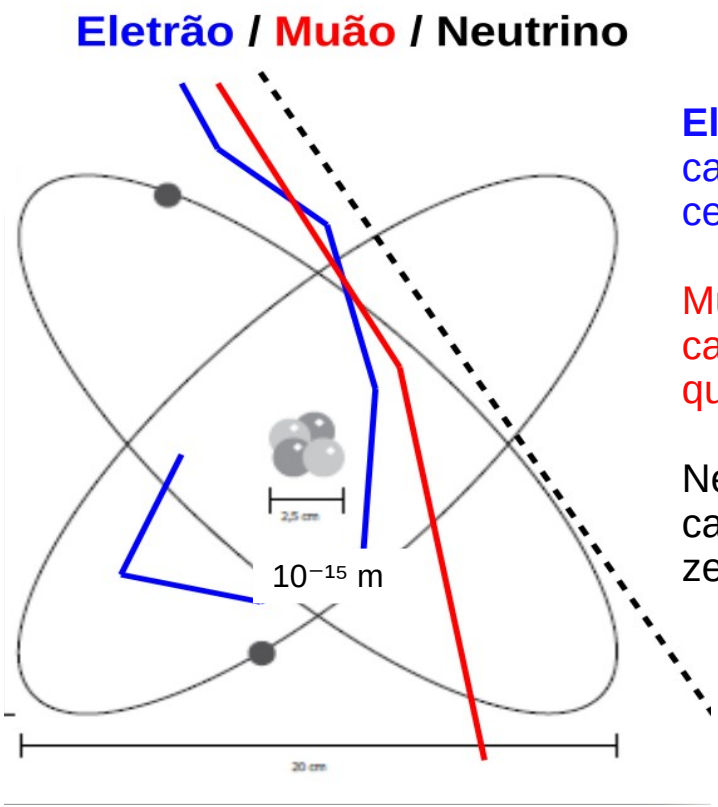
Escola Avançada de
Professores no CERN

5 de Novembro 2021

Sofia Andringa, sofia@lip.pt



a matéria é feita de átomos ... de vazio e de forças ...



Eletrão
carga = 1, massa = 1
centímetros (10^{-2} m)

Muão
carga = 1, massa ~ 200
quilómetros (10^{3} m)

Neutrino
carga = 0, massa ~ 0
zetametros (10^{21} m)

10^{-10} m = 0,0000000001 m

Neutrinos

As partículas mais comuns do Universo

Sem carga, apenas interação nuclear fraca

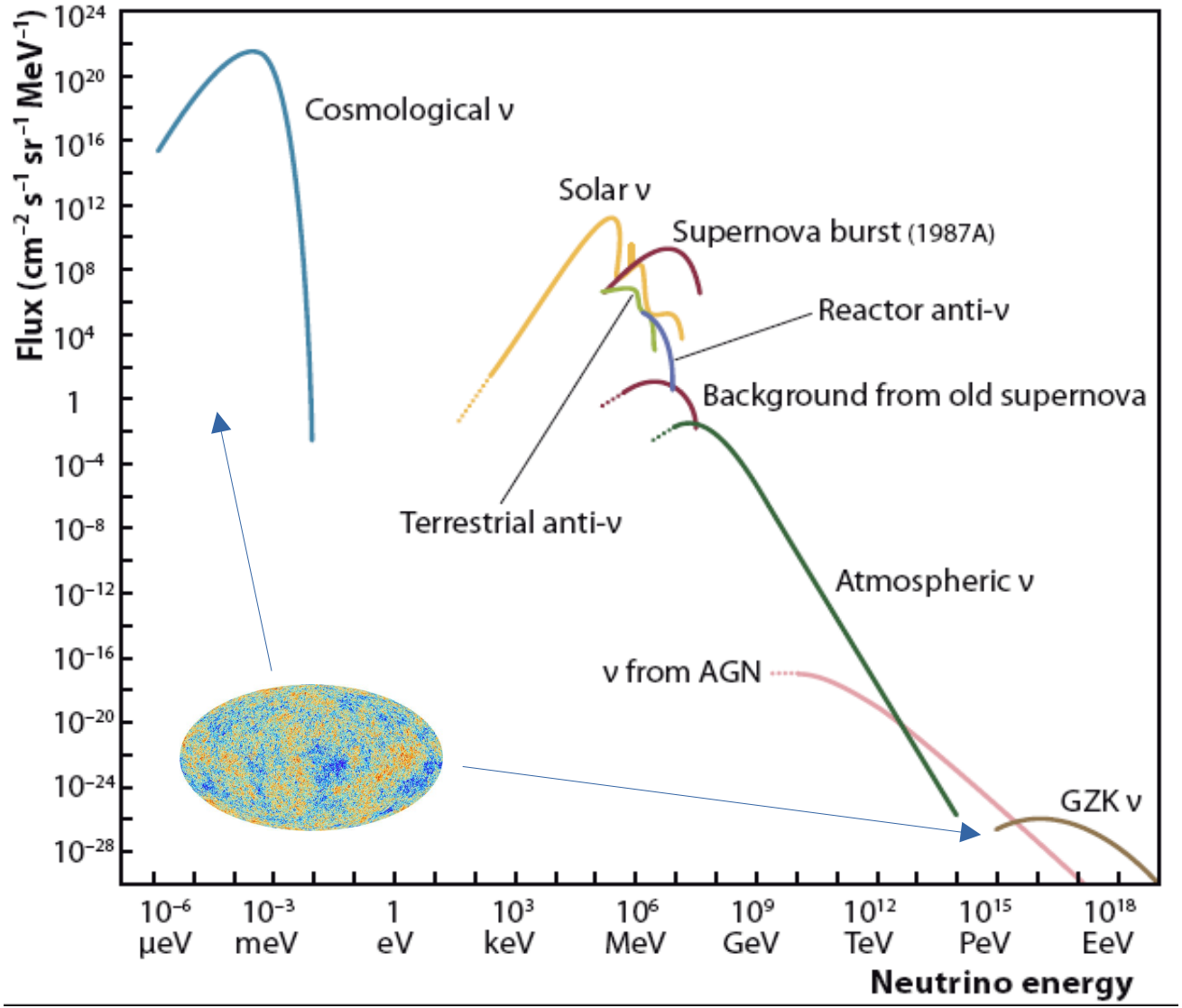
… deteção é muito difícil
… mas trás informação única

Quase sem massa

… não podem decair: são estáveis
… massa de origem diferente?

Oscilação entre três estados

… matriz de mistura complexa
… conservar a simetria CP/T?



Fontes

1950s: reatores nucleares

1960s: **o Sol**

1960s: raios cósmicos na atmosfera terrestre

1960s: aceleradores de partículas em laboratório

1980s: SuperNova 1987A

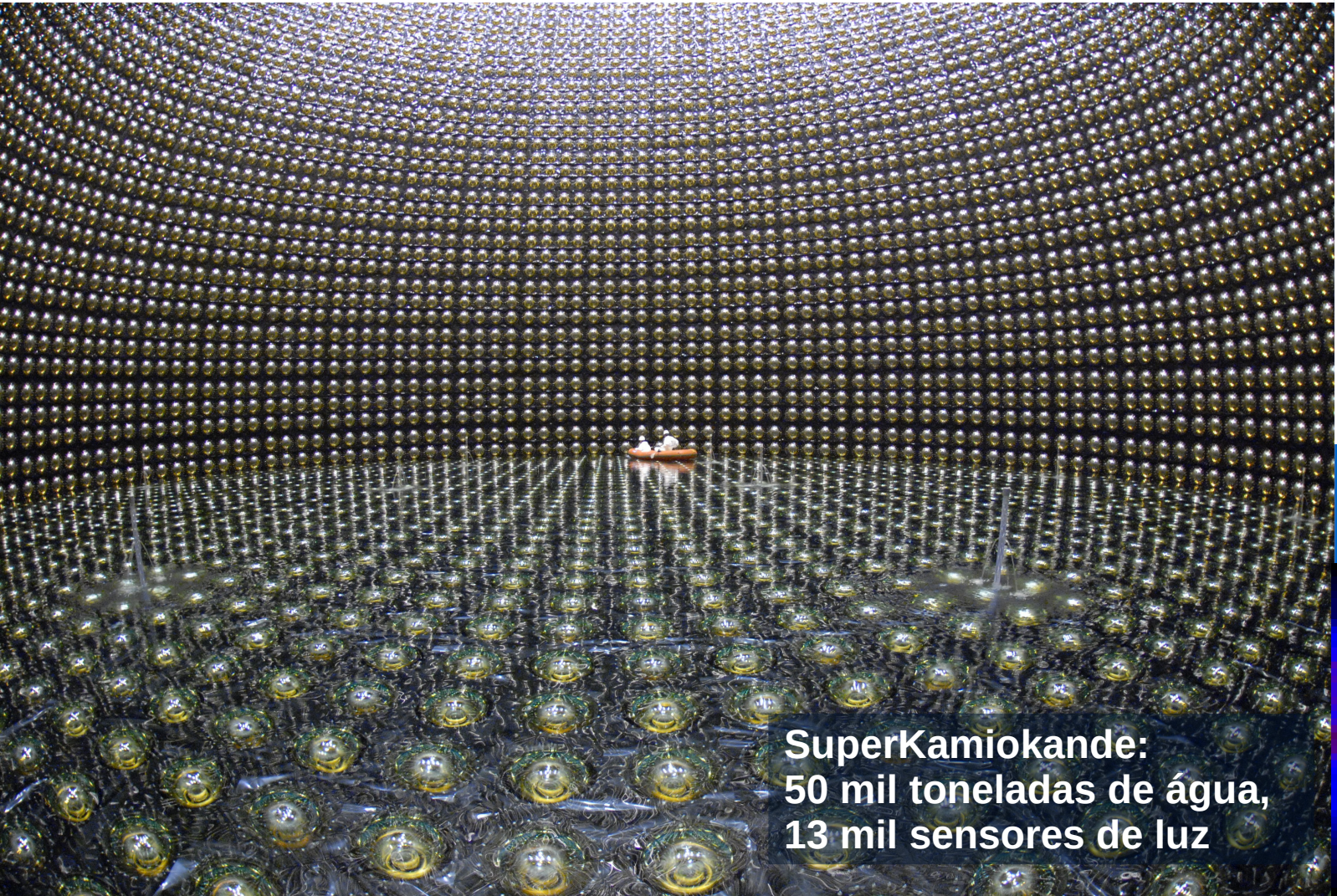
2000s: **a Terra**

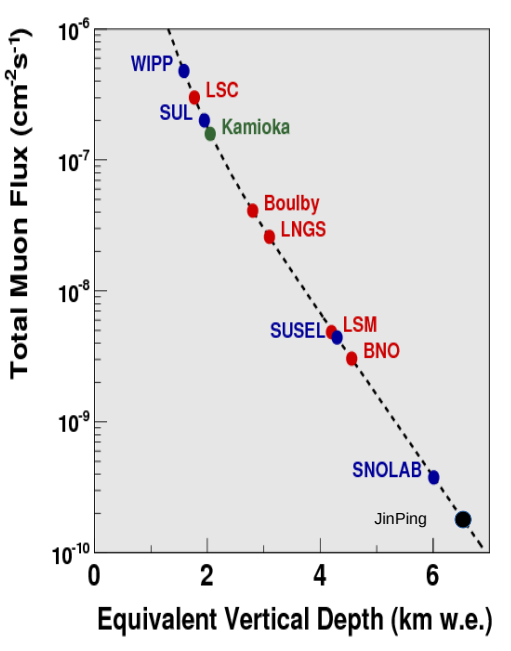
2010s: a Galáxia

2020s?: GZK

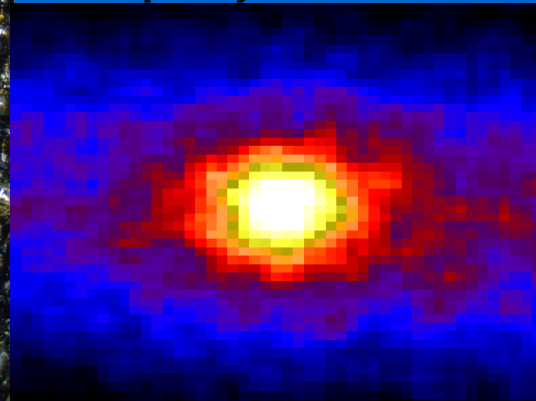
20xxs?: BigBang

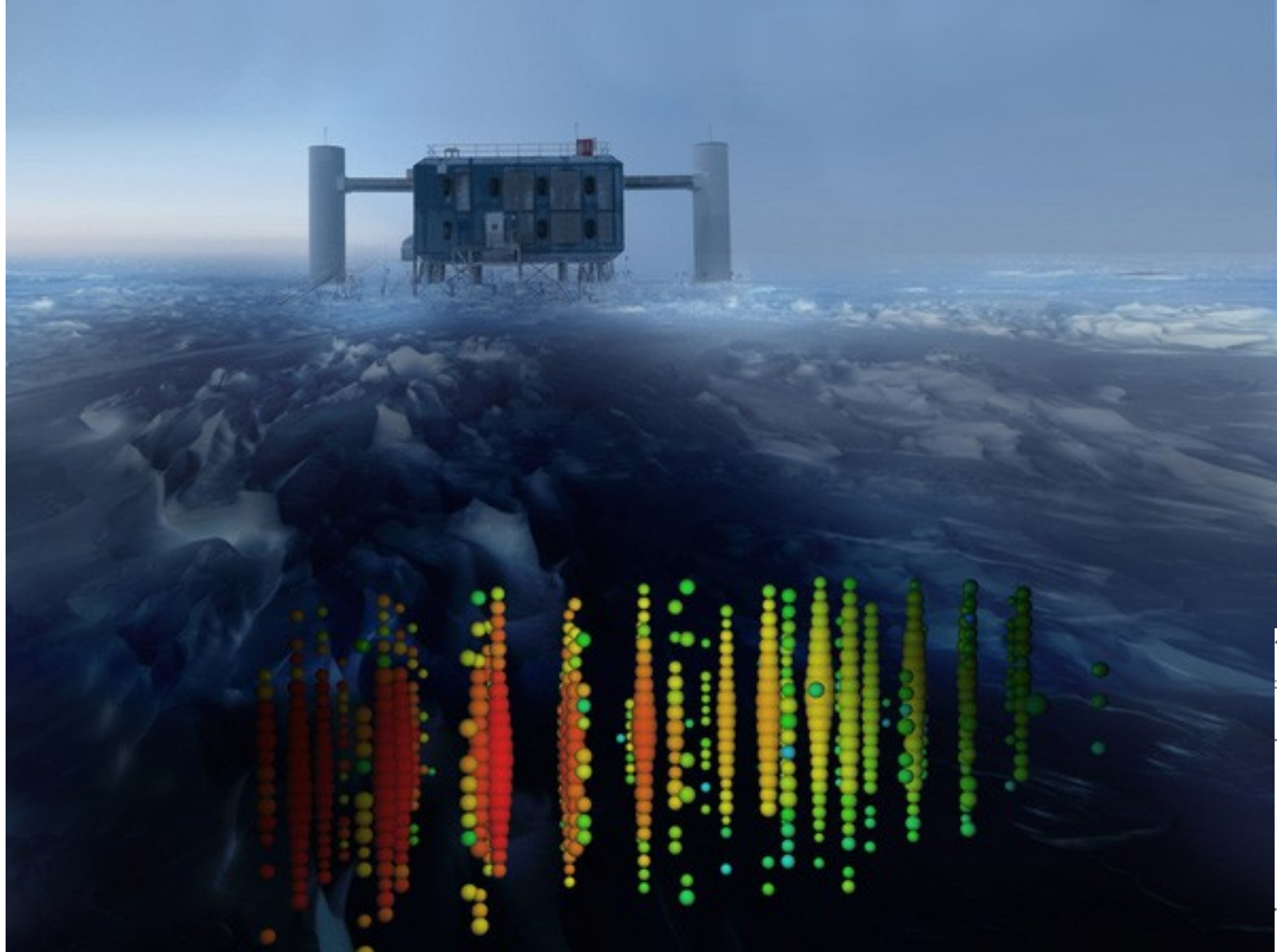
laboratórios subterrâneos para detetar neutrinos

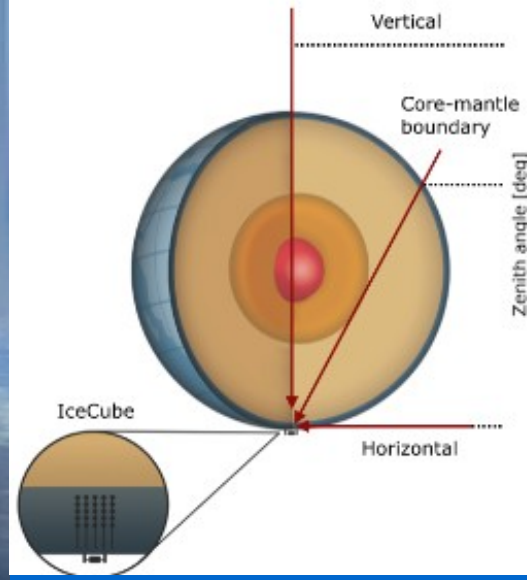




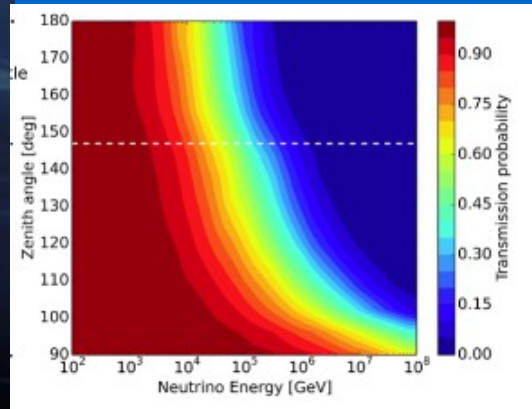
Neutrinografia do Sol
500 dias e noites de exposição no SK

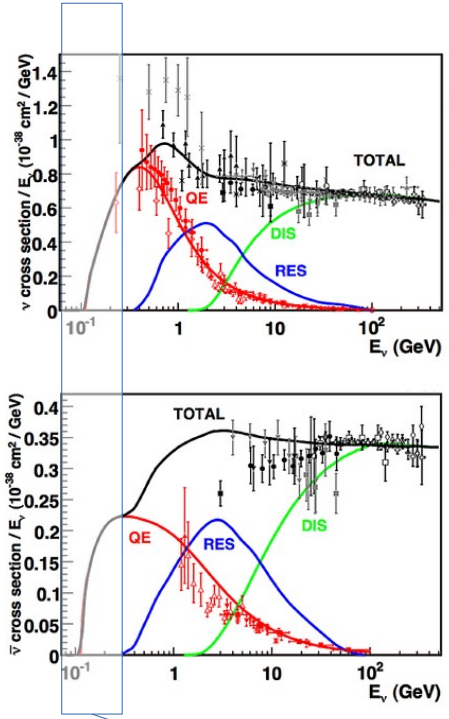


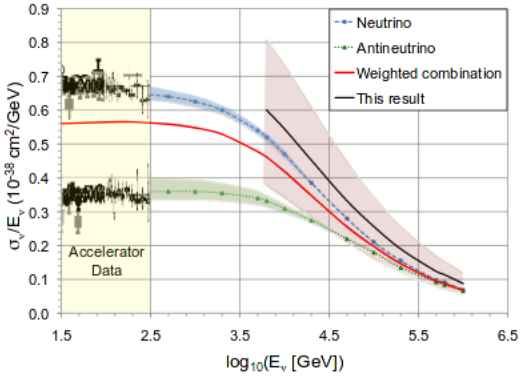


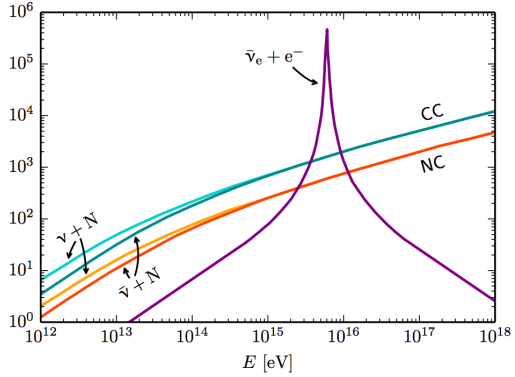


Absorção na Terra
7.5 anos de dados do IceCube (com 1 km³)



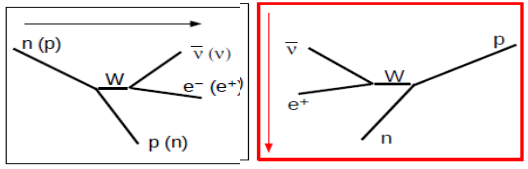






a alta energia: $\sigma = 2\ G_F^2\ M\ (hc)^2/(3\pi)\ E$
Interação com eletrão / nucleão escala com
$(m_e / M_N) \sim 0.5\ MeV / 1\ GeV \sim 0.5 \times 10^{-3}$

a baixa energia (QE)
declínio beta inverso:



Vida média do neutrão => $\sigma\ (E=M_n-M_p+m_e) \sim 6 \times 10^{-42}\ cm^2$

3 tipos de neutrino
eletrão
muão
tau
(e anti-neutrinos para os três leptões positivos)

Detetar neutrinos

1. secção eficaz é muito pequena!!

2. depende da energia do neutrino

3. diferente para anti-neutrinos

4. diferente para neutrinos do eletrão

*** energia mínima para criar o leptão correspondente !**

O problema dos Neutrinos solares e a situação hoje

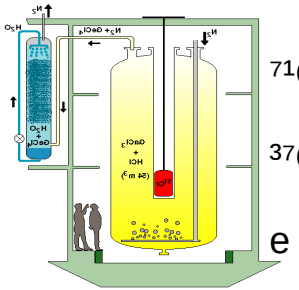
1. Fusão nuclear no Sol

4 p → ^{4}He + 2 ν + 26 MeV

Luminosidade na Terra: 1367 W/m²

Fluxo: XXX neutrinos/m²/s

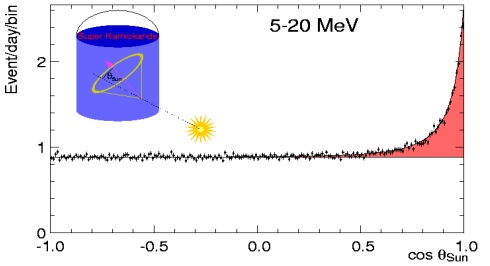
2. Medições de várias décadas



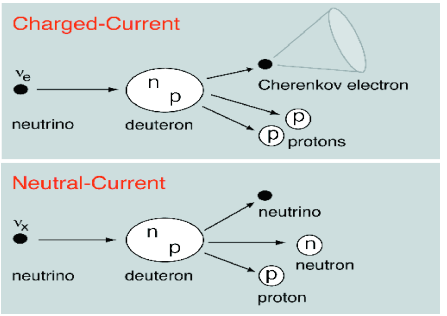
^{71}Ga → ^{71}Ge (E>0.2 keV): 0.58 x SSM

^{37}Cl → ^{37}Ar (E>0.8 MeV): 0.34 x SSM

e ν → e ν (E: 5-20 MeV): 0.40 x SSM



3. Medições diretas E>5 MeV

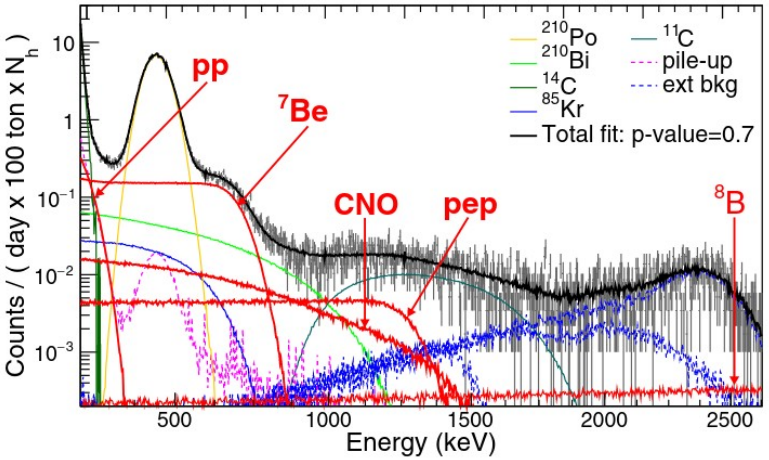


0.33 x SSM

1.00 x SSM

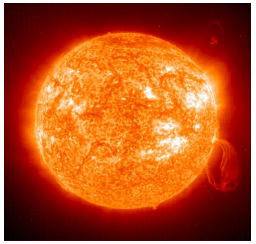
(medida por SNO em 2000)

4. O modelo solar completo

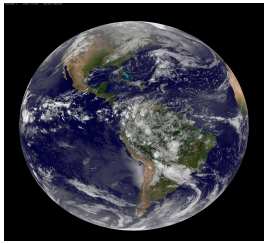


(medida por Borexino 2020)

O Sol e a Terra
fusão e fissão nuclear
neutrinos e anti-neutrinos do eletrão



Fusão
Neutrino
L~ 10^{12} /(cm².s)



Fissão
Anti-neutrino
L~ 10^{6} /(cm².s)

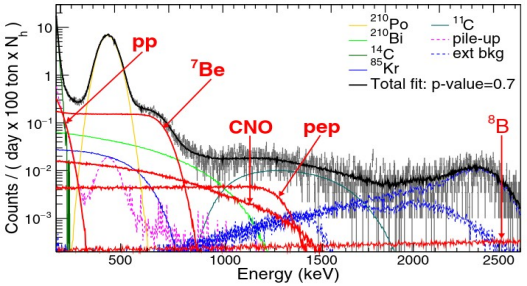
Problema dos neutrinos solares resolvido

Confirmada a produção de energia
Medição das várias componentes
Sensibilidade à densidade
Metalicidade do Sol

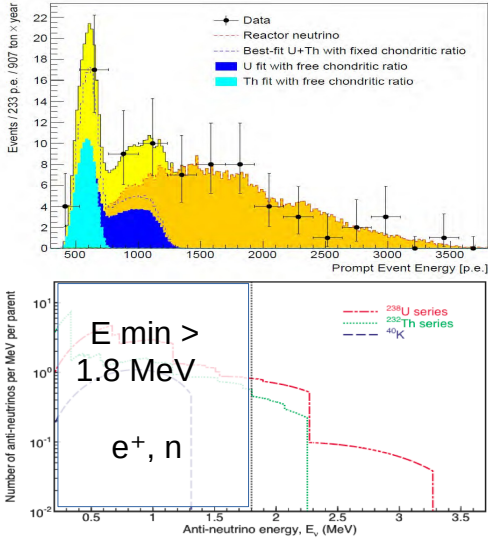
Neutrinos já muito bem conhecidos

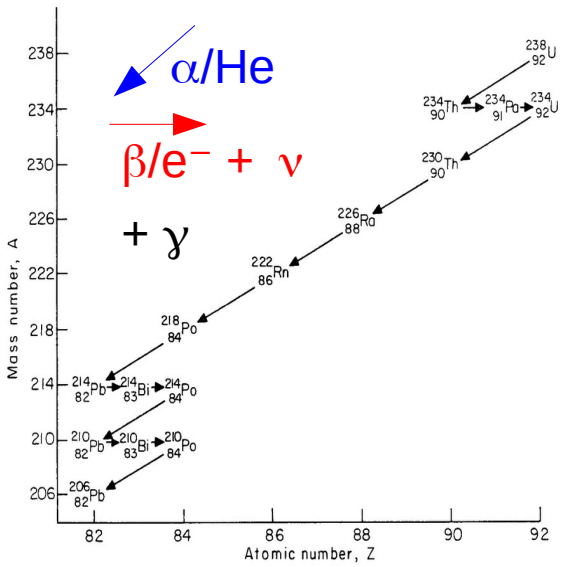
Componente de calor radiogénico
Abundância de Urânio e Tório
Separar crosta, manto, núcleo?
Contribuir para modelo formação

Borexino 2020 (**Sol** + fundos)



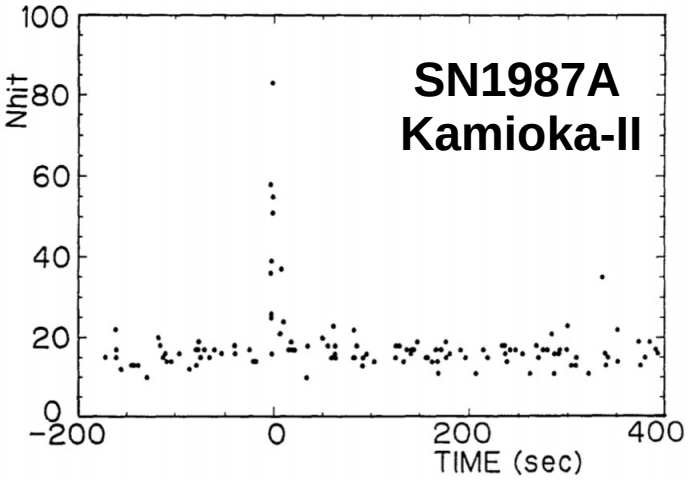
Borexino 2015 (**Geo**+ reatores)





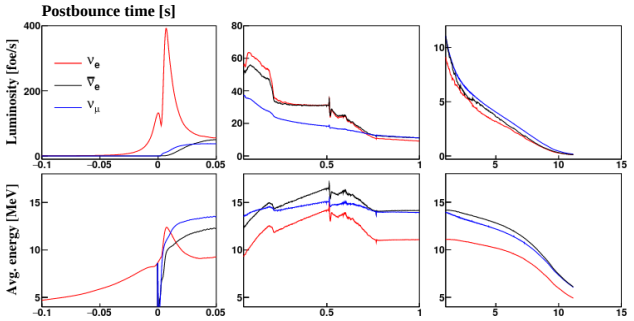
Mensageiros
da nossa e de outras galáxias

neutrinos de baixa e alta energia



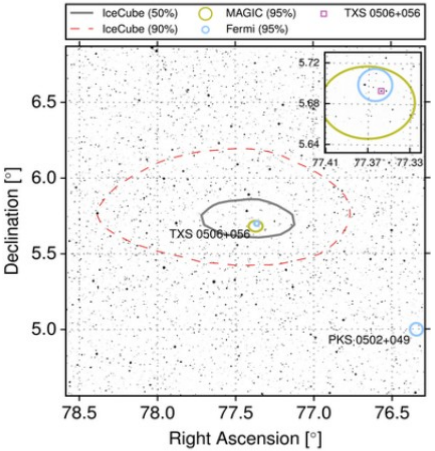
3 horas antes da chegada da luz!

SNEWS 2.0: todos os detetores,
alerta de minutos (até 12h antes)



neutronization | accretion & explosion | cooling

Neutrinos + Raios Gama (2017)
da mesma fonte de alta energia

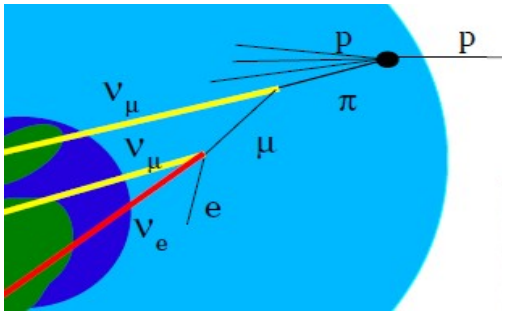


Sistema de alerta de IceCube, num minuto,
para telescópio apontarem nessa direção

apanham flash de raios gama de um blazar

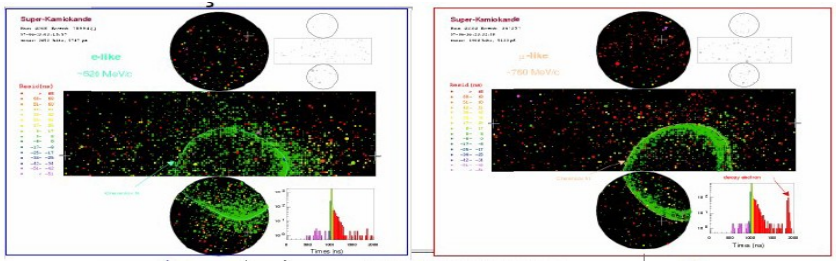
Gamas de piões neutros
Neutrinos de piões carregados
criados por colisões de protões acelerados

1. Raios cósmicos

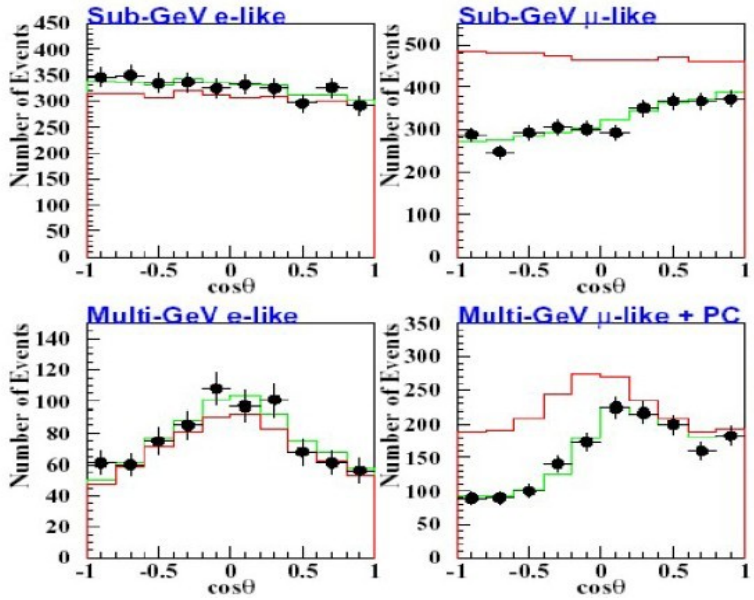


2. Identificar neutrinos

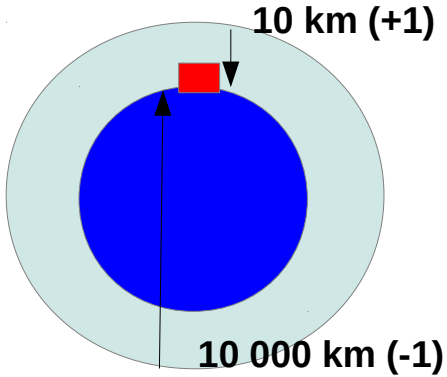
eletrão *muão*



3. muão varia com energia (eletrão ok)



4. variação aumenta com a distância percorrida (~1/2 à maior distância)



Neutrinos atmosféricos

- fonte comum de (anti-) neutrinos de eletrão e muão
- neutrinos do muão transformam-se em neutrinos do tau
- depende da sua energia (comprimento de onda)
- aumenta com percurso entre produção e deteção
- os neutrinos sentem a passagem do tempo

Prémio Nobel de 2015

Takaaki Kajita e Arthur McDonald
(respectivamente das experiências SK e SNO)

fluxos e secções eficazes bem calculados

fluxo total de neutrinos conserva-se do Sol à Terra

neutrinos não decaem

oscilam entre as 3 famílias

dependendo da energia e da distância percorrida

Neutrinos têm massa !!

neutrinos transformam-se periodicamente
(se sentem o tempo é porque têm massa)

o Breakthrough 2016 foi atribuído a **cinco** experiências que fecham o círculo da oscilação entre os 3 neutrinos

uma surpresa que surge de muitos anos de experiências dedicadas e da interpretação conjunta de muitos dados

oscilação de 2 neutrinos

mecânica quântica em ação

o neutrino é criado por interação com um leptão, num estado bem definido $|\nu_\alpha\rangle$ que não corresponde a um estado próprio de massa, mas contém duas opções

$|\nu(0)\rangle = |\nu_\alpha\rangle = \cos\theta\,|\nu_1\rangle + \sin\theta\,|\nu_2\rangle$ $\qquad\qquad$ $\cos^2\theta + \sin^2\theta = 1$

o neutrino propaga-se (sem interação) como uma partícula livre;
o seu comprimento de onda depende da energia, e da massa

$|\nu(t)\rangle = \cos\theta\,\exp(-i E_1 t)\,|\nu_1\rangle + \sin\theta\,\exp(-i E_2 t)\,|\nu_2\rangle$ $\qquad$ $E_1^2 = p^2 + m_1^2$

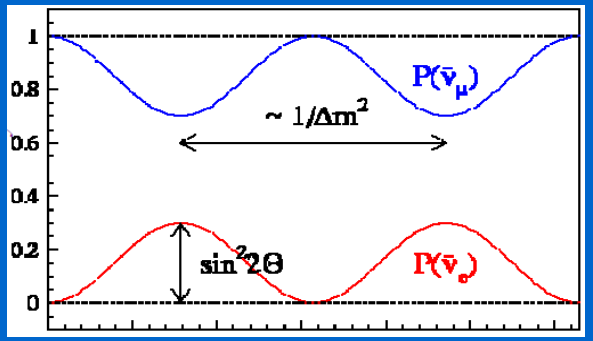
$E_1 \sim E + m_1^2 / 2E$

na deteção o neutrino interage (associado a um leptão carregado):
a onda colapsa num estado bem definido $|\nu_\beta\rangle = -\sin\theta\,|\nu_1\rangle + \cos\theta\,|\nu_2\rangle$

$$\mathbf{P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta) = |\langle \nu_\beta | \nu(t)\rangle|^2} = \sin^2\theta\cos^2\theta\,|\exp(-i E_2 t) - \exp(-i E_1 t)|^2$$
$$= 2\sin^2\theta\cos^2\theta\,(1 - \cos[(E_2 - E_1).t])$$
$$\mathbf{= \sin^2 2\theta\,.\,\sin^2(\Delta m^2 / (4.E).t)}$$

$$\mathbf{P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta) = \sin^2 2\theta\,.\,\sin^2(1.27\,\Delta m^2\,L/E)}$$

a amplitude depende do "ângulo de mistura" θ
a frequência depende de Δm^2 / E



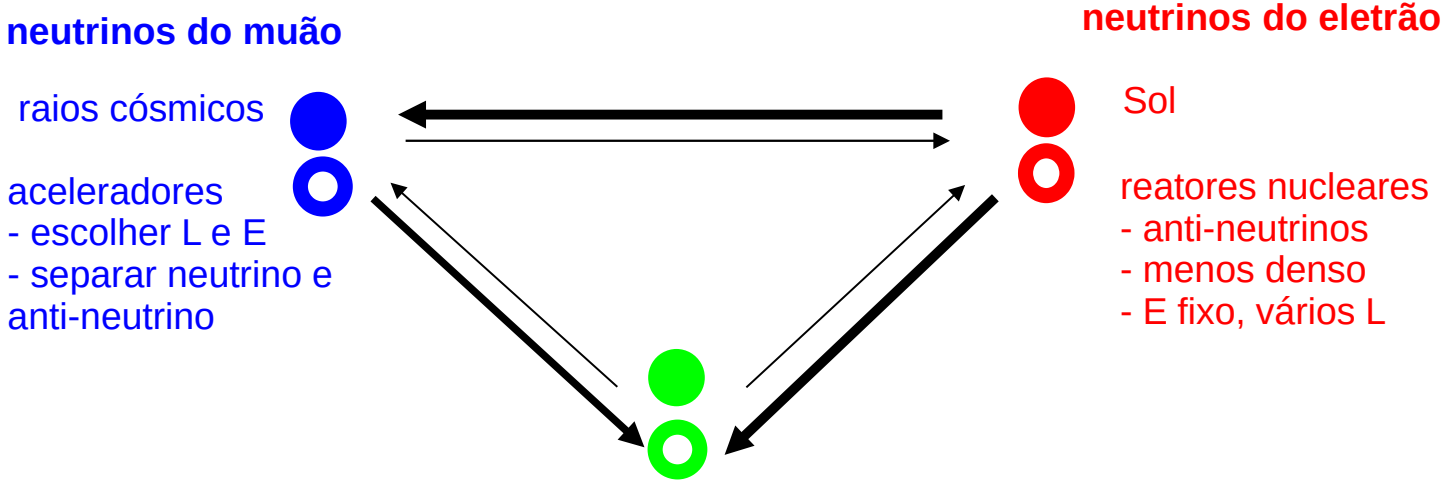
Oscilação de 3 neutrinos

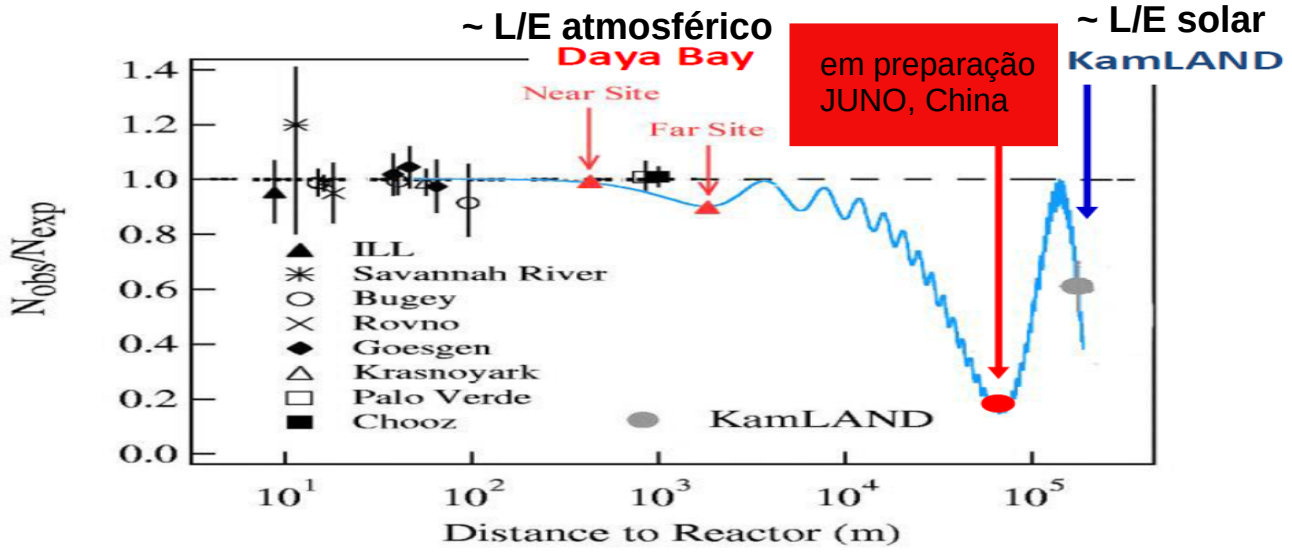
1. por sorte, a Natureza separou as 3 rotações

2. confirmada em neutrinos e em anti-neutrinos

3. confirmação com fontes controladas, em L e E

4. um modelo consistente!





As massas dos neutrinos

1. interferometria

2. massa efetiva

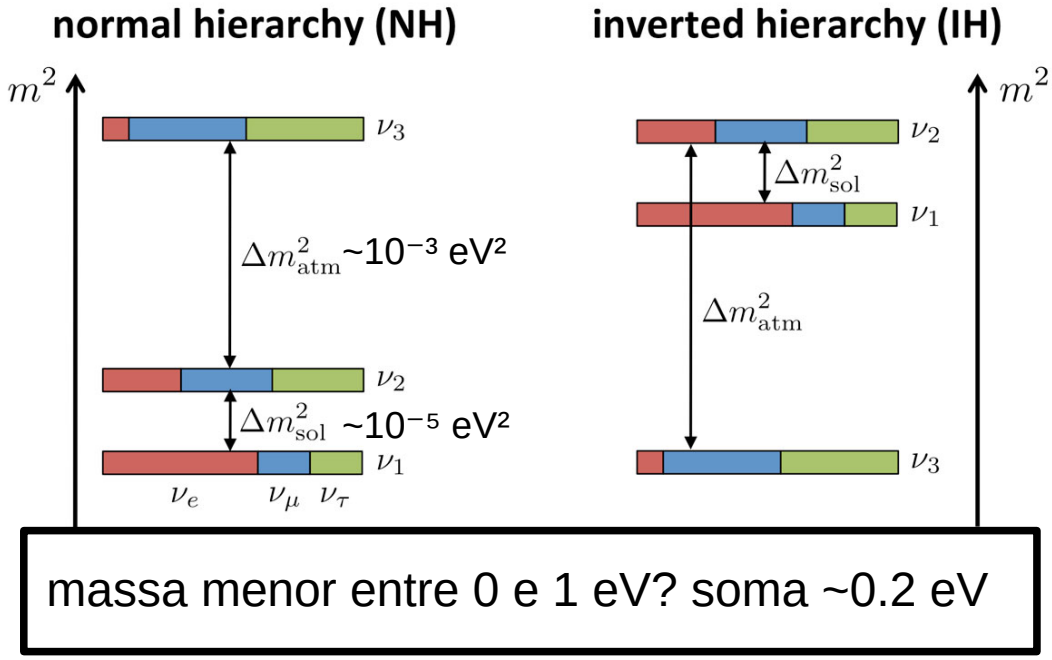
3. ordenação?

4. valor mínimo?

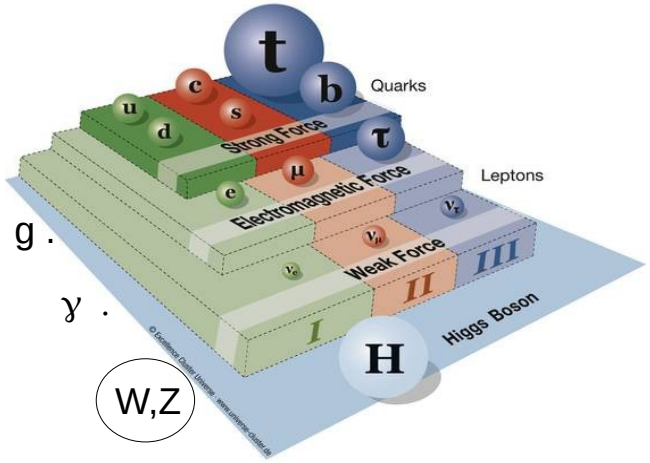
$P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta) = \sin^2 2\theta \cdot \sin^2(1.27\,\Delta m^2\,L/E)$

a oscilação é consequência da interferência entre ondas e permite medir diferenças ínfimas em frequências e Δm^2

ao interagir mais com a matéria, o neutrino do eletrão ganha uma massa efetiva, que permite ordenar Δm^2_{Sol}



massa menor entre 0 e 1 eV? soma ~0.2 eV



não é só uma massa pequena

o Modelo Padrão da Física de Partículas

1. não prevê partículas sem interação

2. deve incluir todos os termos possíveis

interação fraca entre leptões e neutrinos esquerdos (e as anti-partículas direitas)
acoplamento ao Higgs requer partículas (e anti-partículas) esquerdas e direitas

o que é o neutrino direito? pode ser só uma outra projeção do anti-neutrino?

O número leptónico não se conserva: podemos criar matéria?

o melhor teste para esta possibilidade é o declínio beta duplo:

$2n \rightarrow 2p + 2e^- + 2\bar{\nu}$ uns 25 isótopos conhecidos

$2n \rightarrow 2p + 2e^-$ ~~$+ 2\bar{\nu}$~~ muitas experiências diferentes

Para além do Modelo Padrão

Dirac

neutrino direito que interage apenas com o bosão de Higgs

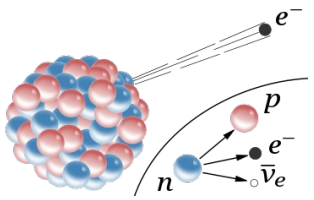
e/ou

Majorana

novo termo em que número leptónico não se conserva

a massa do neutrino do eletrão

de volta ao declínio beta

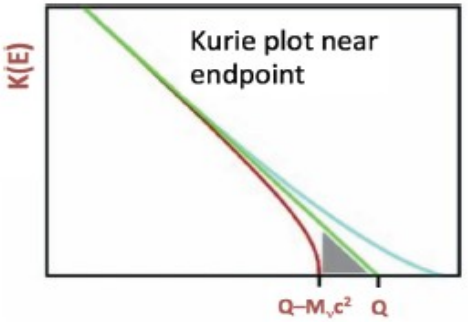


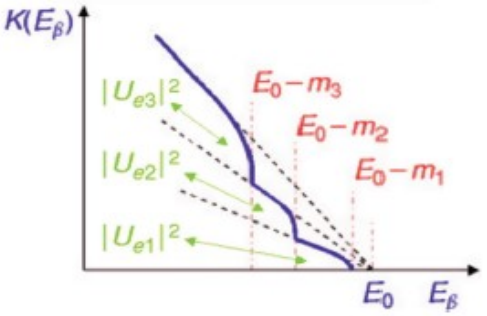
neutrino proposto por Pauli em 1930
para garantir conservação de energia
no declínio beta:
"uma proposta indecente"
confirmada ao fim de 25 anos

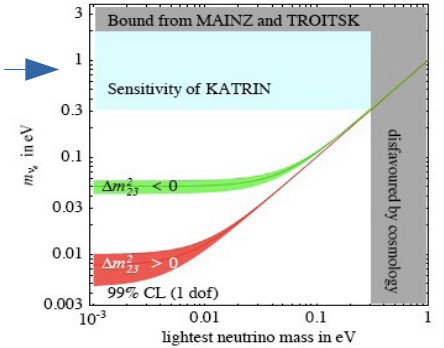
$$M = \sum_i^{n_\nu} m_{\nu,i}$$

na cosmologia

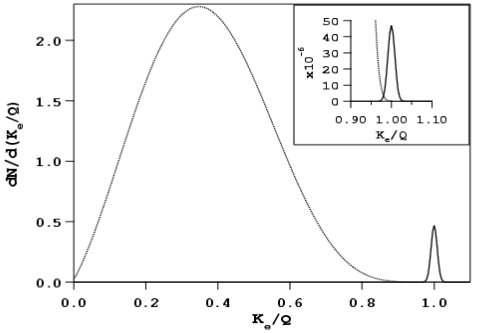
$$\langle m_\beta \rangle^2 = \sum_i^{n_\nu} |\, U_{ei} \,|^2 \, m_{\nu,i}^2$$

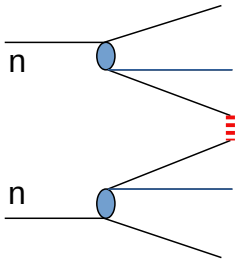




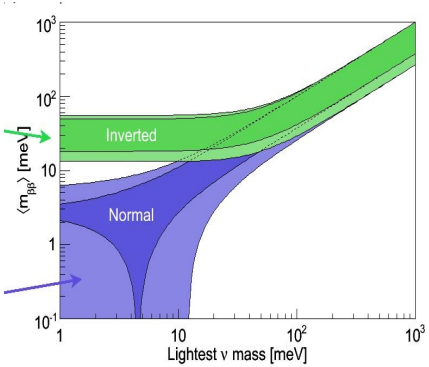


$$\langle m_{\beta\beta} \rangle = | \sum_i^{n_\nu} U_{ei}^2 m_{\nu,i} \, |^2$$



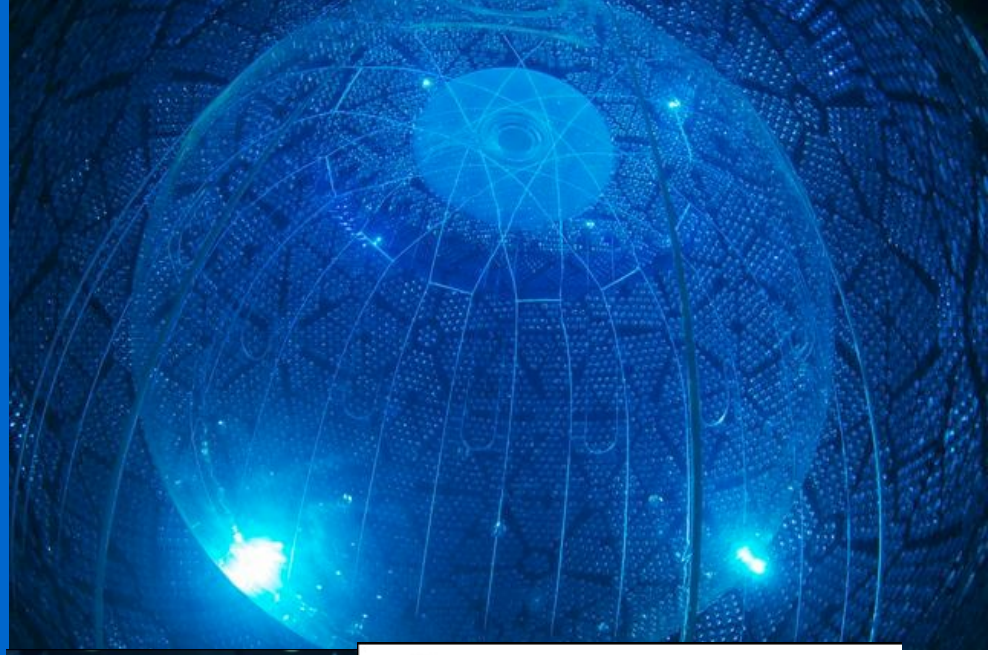


2 neutrinos!
0 neutrinos?



(a reutilização de detetores)

ex: de SNO a SNO+



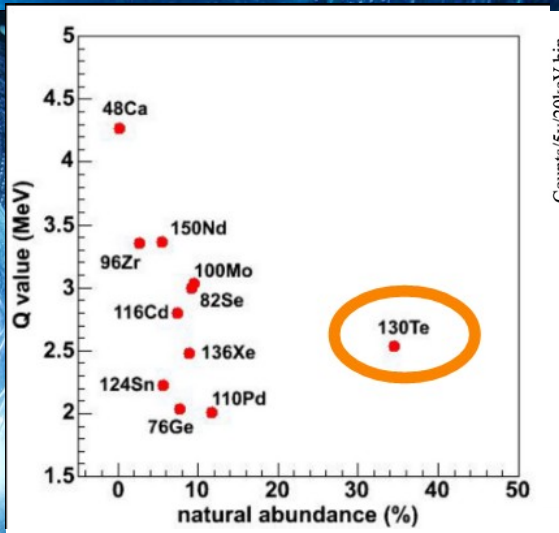
SNO: 1k ton de água pesada (salgada)

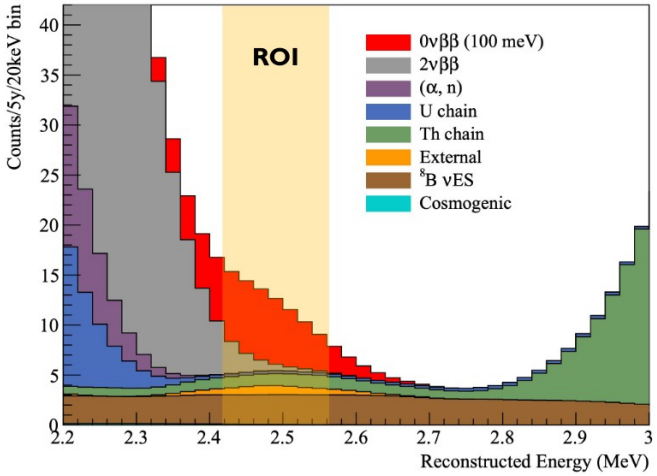
correntes carregadas, só neutrino do eletrão
correntes neutras, para todos os neutrinos

laboratório a 2070 m de profundidade
9500 sensores de luz a 8.5 m de raio
esfera de 5 cm de acrílico com 6 m de raio

SNO+: 780 ton cintilador orgânico líquido
v Sol / Geo / SuperNova / ...

+ 1.3 kg de ^{130}Te para 0νββ





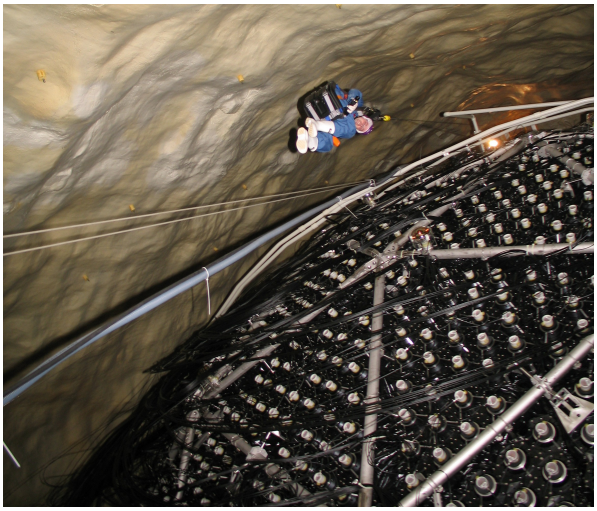
em 5 anos
50 ev. fundo

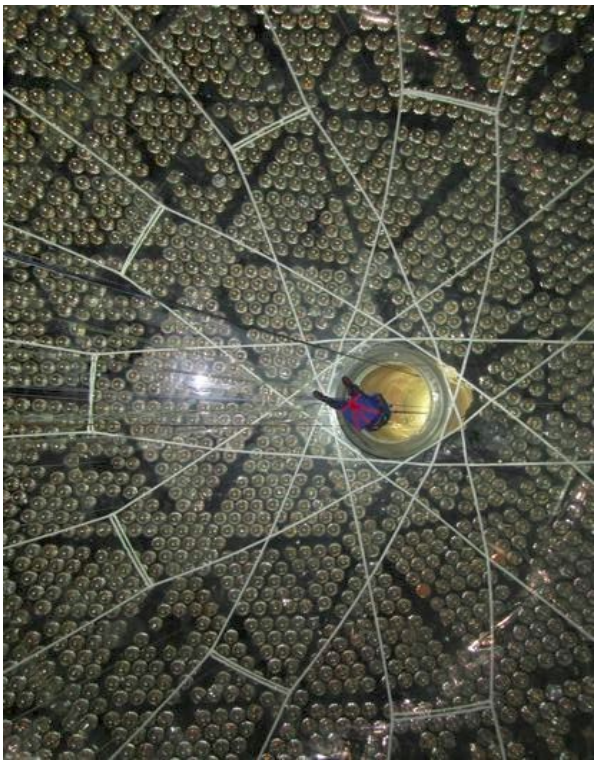
limite na
vida média

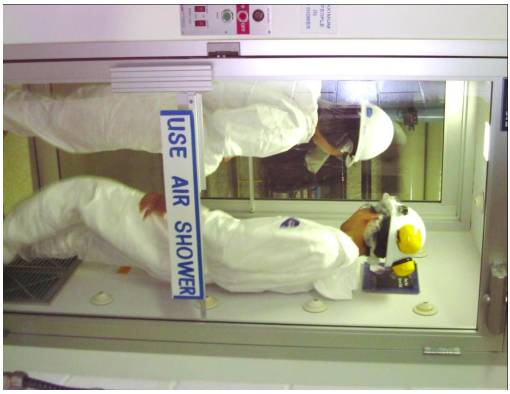
> 10^{26} anos

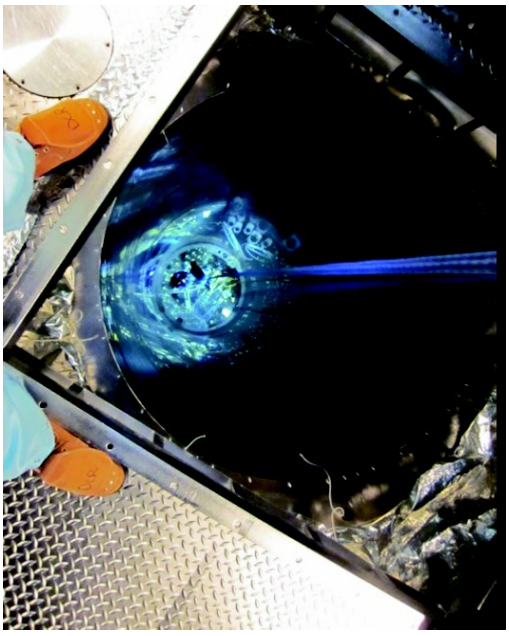
(a reutilização de detetores)

ex: de SNO a SNO+









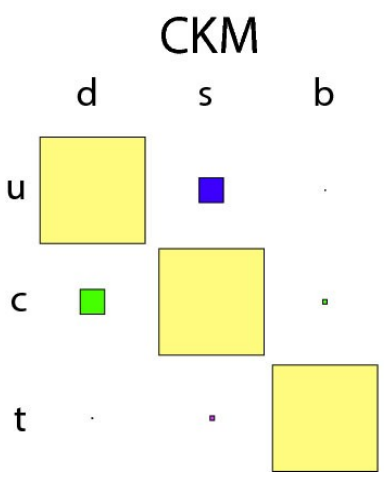
Se partículas e anti-partículas são equivalentes porque é o Universo feito de matéria?

Onde se esconderá alguma pequena diferença?

v [e,m,t] = Sol [12] x [13] x Atm [23] x v [1,2,3]

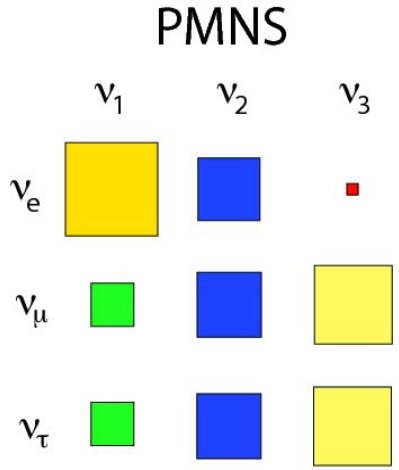
$$\begin{bmatrix} \cos(30^o) & \sin(30^o) & 0 \\ -\sin(30^o) & \cos(30^o) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos(10^o) & 0 & \sin(10^o)^* \\ -\sin(10^o)^* & 0 & \cos(10^o) \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & \cos(45^o) & \sin(45^o) \\ 0 & -\sin(45^o) & \cos(45^o) \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$* = e^{i\delta}$



$$\mathrm{Im}\left(U_{\alpha i} U^*_{\beta i} U^*_{\alpha j} U_{\beta j}\right) = J \sum_{\gamma,k} \varepsilon_{\alpha\beta\gamma} \varepsilon_{ijk}$$

	CKM	PMNS
J	$3\times10^{-5}\ \sin(\delta)$	$3\times10^{-2}\ \sin(\delta)$
δ	70º	???



Matriz de mistura e as simetrias CP/T

1. a assimetria entre matéria / anti-matéria

2. só com 3 famílias!

3. CKM (quarks) vs PMNS (neutrinos)

4. como medir?

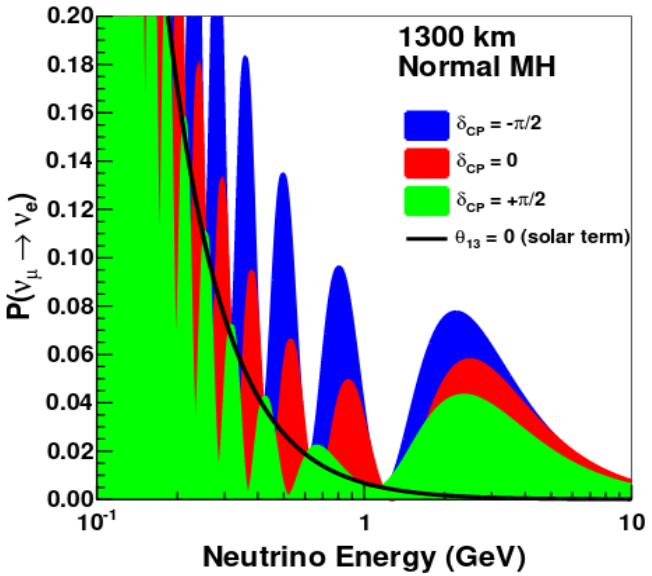
neutrinos vs anti-neutrinos

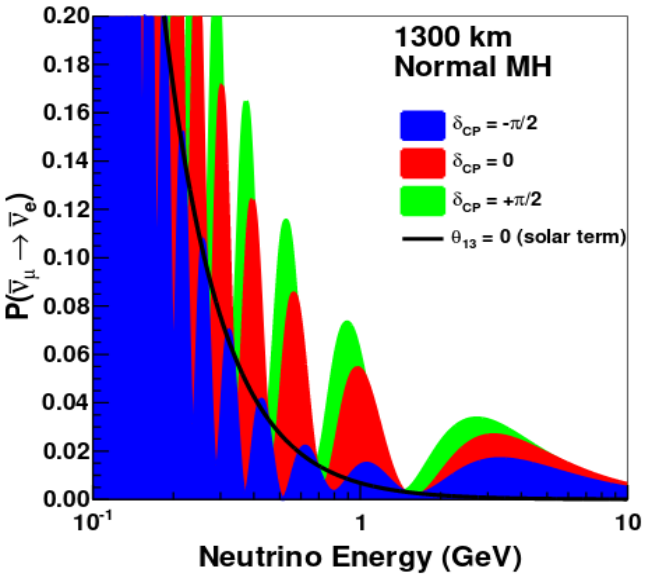
de volta às oscilações

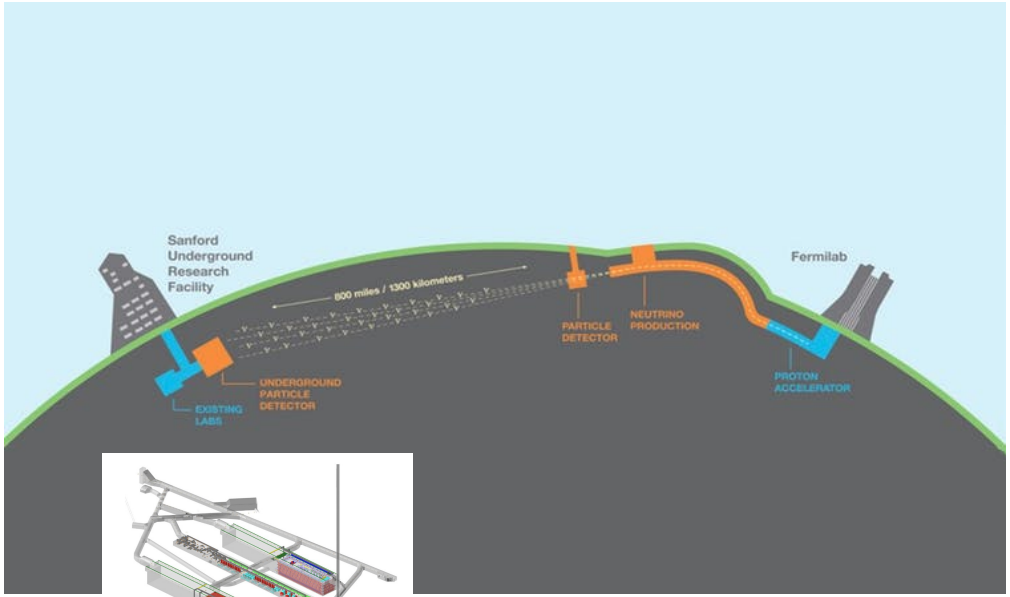
neutrinos e anti-neutrinos de muão desaparecem em igual quantidade
... mas oscilam para neutrino / anti-neutrino de eletrão ou de tau ?

* neutrino de eletrão ganha / anti-neutrino perde massa efetiva
* muda a frequência e a amplitude da oscilação na matéria

* δ_{CP} muda a frequência e a amplitude da oscilação no vácuo!



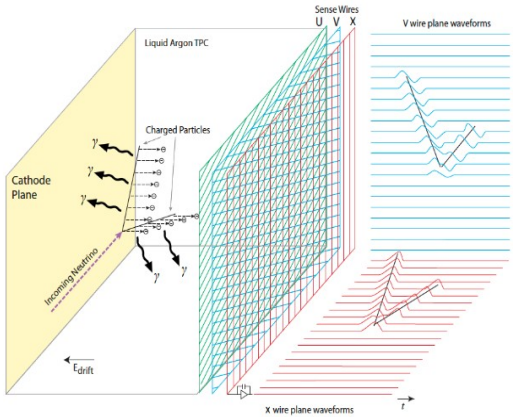


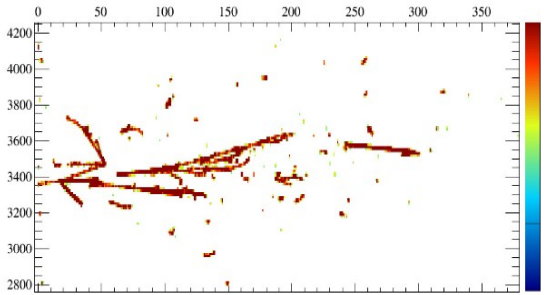


feixes muito intensos
caraterizados por
detetores no Fermilab

protótipos de LAr TPC
em teste no CERN

4 módulos de 17 kton
a instalar no SURF





Projeto DUNE

chegou o tempo das grandes colaborações na física de neutrinos

> 1300 colaboradores
> 200 instituições
> 30 países

Brazil

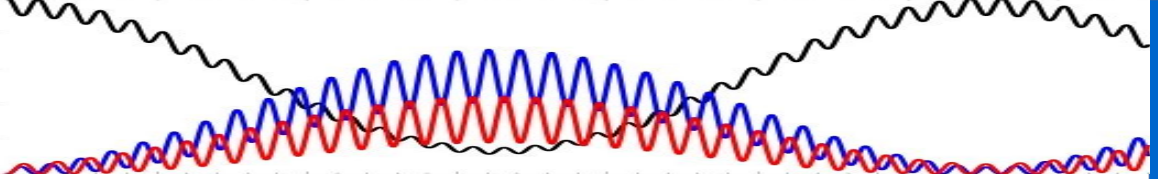
- Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas (CBPF)
- Centro de Tecnologia da Informação Renato Archer
- Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP)
- Universidade Estadual de Feira de Santana (UEFS; State University of Feira de Santana)
- Universidade Federal de Alfenas (UNIFAL)
- Universidade Federal de Goiás (UFG)
- Universidade Federal de São Carlos
- Universidade Federal de São Paulo
- Universidade Federal do ABC (UFABC)
- Universidade Tecnológica Federal do Paraná
- Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ; University of Brazil)
- Universidade Federal Fluminense (UFF)

Portugal

- Laboratório de Instrumentação e Física Experimental de Partículas (LIP)

CERN

...



Oscilação e massa: uma surpresa da experiência

parâmetros medidos em poucos anos
são hoje usados na astro e geo-física

Obrigará à extensão do Modelo Padrão
que pode ter consequências fundamentais

- **violação do número leptónico?**
  teste com decaimentos nucleares raros

- **violação de CP/T no sector leptónico?**
  teste com assimetria nas oscilações

Novos resultados esperados na próxima década

Universo de matéria originado por leptogénesis?

Neutrinos

As partículas mais comuns do Universo

Sem carga, apenas interação nuclear fraca

… deteção é muito difícil
… mas trás informação única

Quase sem massa

… não podem decair: são estáveis
… massa de origem diferente?

Oscilação entre três estados

… matriz de mistura complexa
… conservar a simetria CP/T?