

AGA 315 Aula 18

Astrofísica de neutrinos

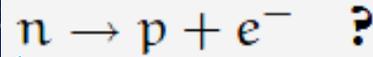
J.E. Horvath

IAG-USP São Paulo, Brasil



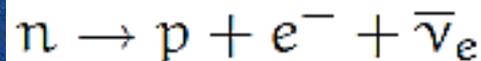
O quê é um neutrino?

Originalmente postulado por Pauli para restaurar a conservação do momento angular (spin) nos decaimentos beta



$$s = \frac{1}{2}$$

$$s = \frac{1}{2} \pm \frac{1}{2} = 1 \text{ ou } 0 !!!$$



$$s = \frac{1}{2}$$

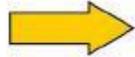
conservado

Eu já sabia...



Um neutrino de cada tipo (“sabor”) acompanha às três gerações de quarks e leptons

As partículas do Modelo Padrão

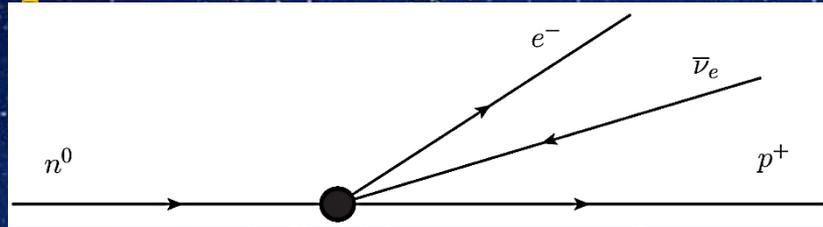
Terceira	$+2/3$  174	$-1/3$  4,3	-1  1,7	0  ?		$Y(\text{upsilon})$
Segunda	$+2/3$  1,3	$-1/3$  0,15	-1  0,106	0  ?		J/Ψ (jota-psi) K^0
Primeira	$+2/3$  0,03	$-1/3$  0,06	-1  $5 \cdot 10^{-4}$	0  ?		n, p

Cada um deles tem seu antineutrino, assim que existem 6 tipos de neutrino/antineutrino...

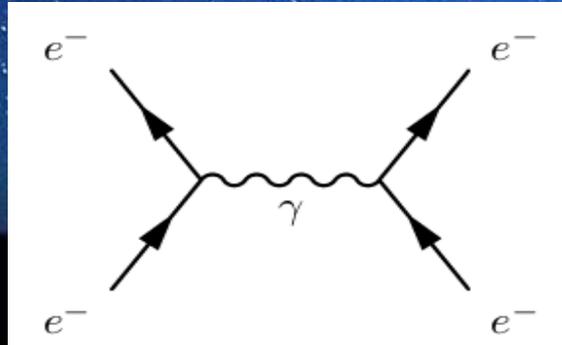
A carga é zero, o spin é $1/2$ para todos, mas têm massa?

Não há nenhuma razão fundamental para que o neutrino tenha massa zero, é muito pequena experimentalmente, mas pode ser *finita* !

O fóton tem que ter massa zero, já que é uma partícula mediadora (boson de gauge), e isto é mantido na teoria quântica, o neutrino não precisa porque não é mediador de nenhuma interação



O decaimento beta mostrado na forma de um diagrama. O neutrino é emitido mas não transporta a interação



O fóton transporta a interação eletromagnética

Na teoria de Fermi, a constante de acoplamento das interações fracas G_F tem dimensões de $(\text{energia})^{-2}$

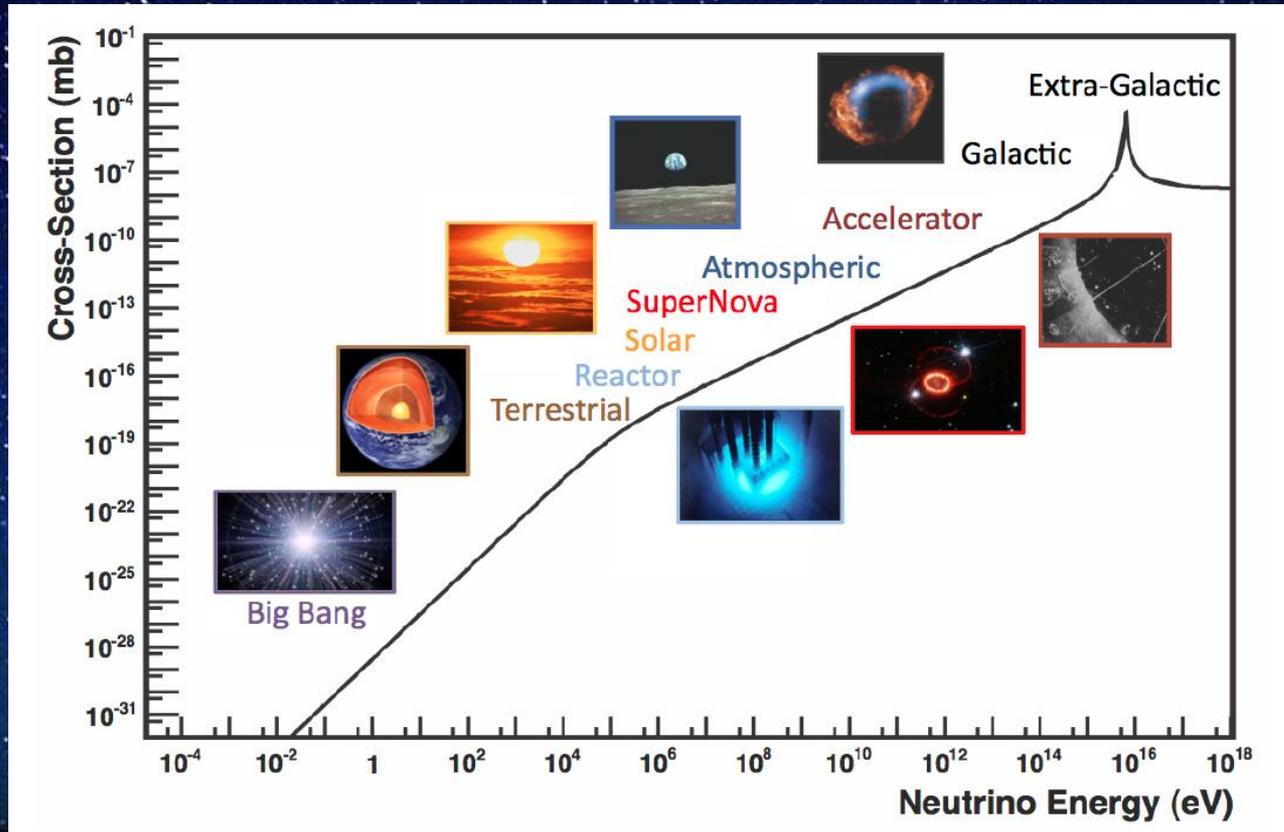
Suponhamos que um neutrino vem colidir com um alvo fixo, um próton por exemplo



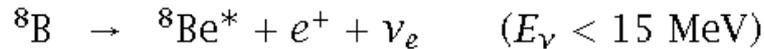
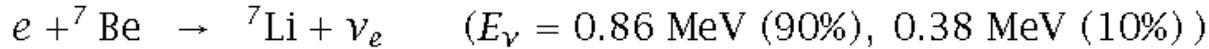
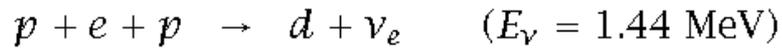
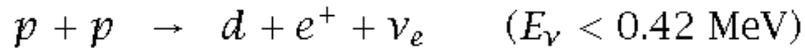
Como a seção de choque deve ter as dimensões de área, e já vimos que $[\text{comprimento}] = [\text{energia}]^{-1}$, a única possibilidade resulta ser a de multiplicar o G_F^2 por uma quantidade com dimensões de $[\text{energia}]^2$, e a única disponível é o S , o quadrado da energia no centro de massa. Se a energia total é baixa, $S \propto E_\nu^2$ e no limite ultra-relativístico $S \propto 2 m_N E_\nu$

*Em ambos os casos a seção de choque dos neutrinos **cresce** com a energia deles. Os neutrinos mais energéticos têm maior probabilidade de interagir*

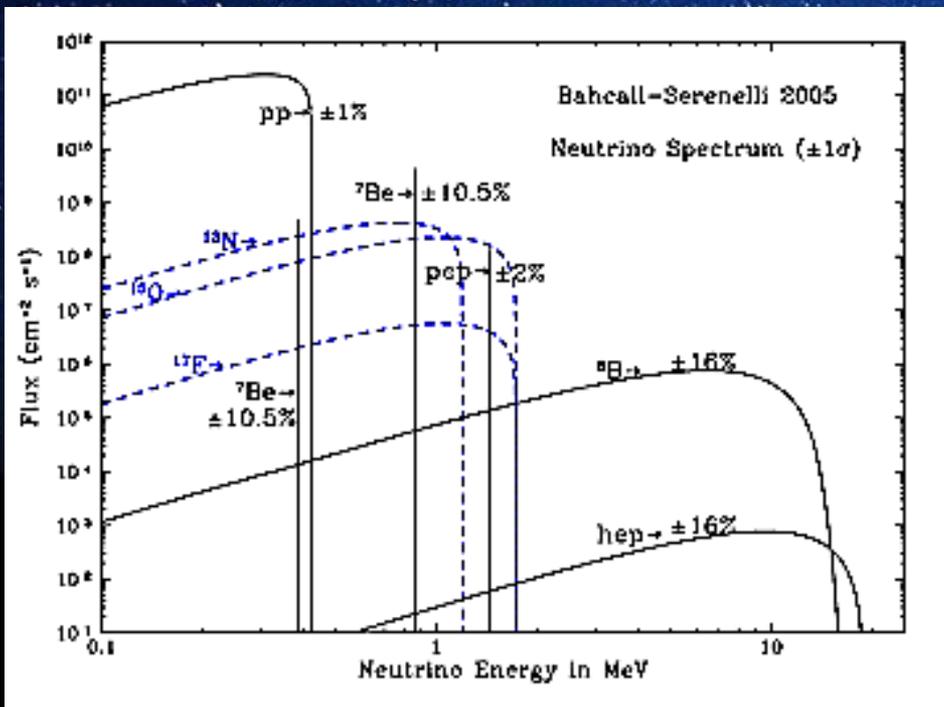
Fontes de neutrinos e energias características



Quais neutrinos são produzidos no Sol?



Predições para o Modelo Padrão do Sol



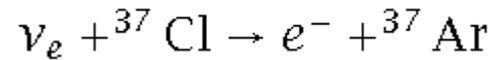
Fluxo $\sim 7 \cdot 10^{10}$ neutrinos $\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$

(!!!)

Mas, $\sigma \sim 10^{-44} \text{ cm}^2 \times E_\nu^2$

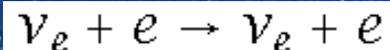
Como detectar esses neutrinos?

Duas formas básicas: com alvos que mudem “quimicamente” (ou seja, induzindo uma interação beta) absorvendo um neutrino, por exemplo



o que requer a contagem posterior do elemento produzido, e por isso recebem o nome de experimentos radio-químicos

ou em reações de espalhamento tipo

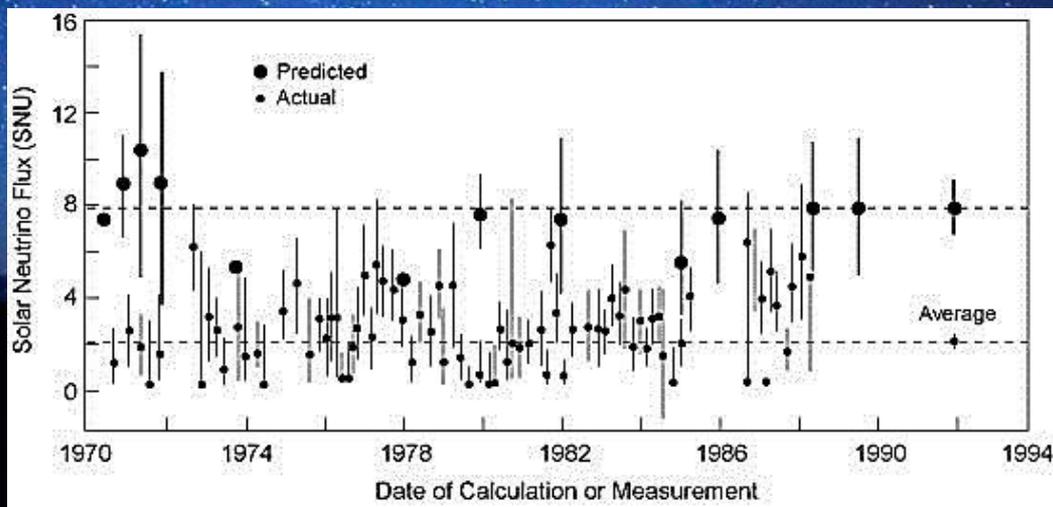


onde a partícula carregada viaja no meio (água) e produz radiação de Cerenkov, esta sim detectável.

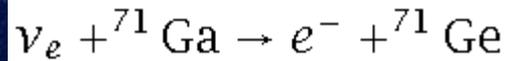
Na primeira tentativa de detecção de neutrinos, R. Davies montou um tanque de Cl_2 na mina de Homestake (para impedir contaminações por eventos estranhos ao neutrino) e separou o Ar produzido cada 3-4 meses. Note-se que o número total de Ar é de poucos por mês (mesmo com 615 ton de C_2Cl_4 !!!!). Para fins de comparação foi definida a SNU (solar neutrino units)

$$10^{-36} \text{ captures/atom/sec}$$

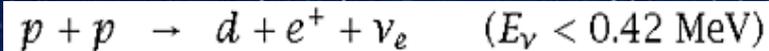
Depois de mais de 40 anos, e de refinar as previsões dos modelos teóricos para convergir em 8 SNU, o experimento de Davies mostrou que faltam neutrinos, já que mediu $2.56 \pm 0.16 \pm 0.16$ SNUs ao longo do tempo



Motivados por estes resultados uma série de experimentos foram planejados e conduzidos. Os mais sensíveis às baixas energias SAGE e GALLEX utilizaram a reação



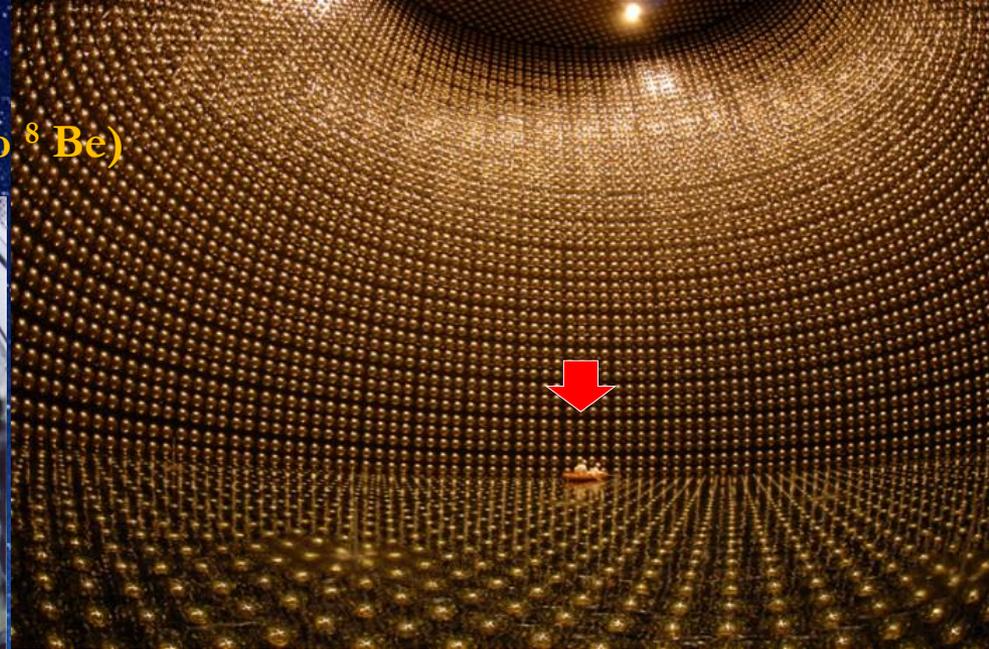
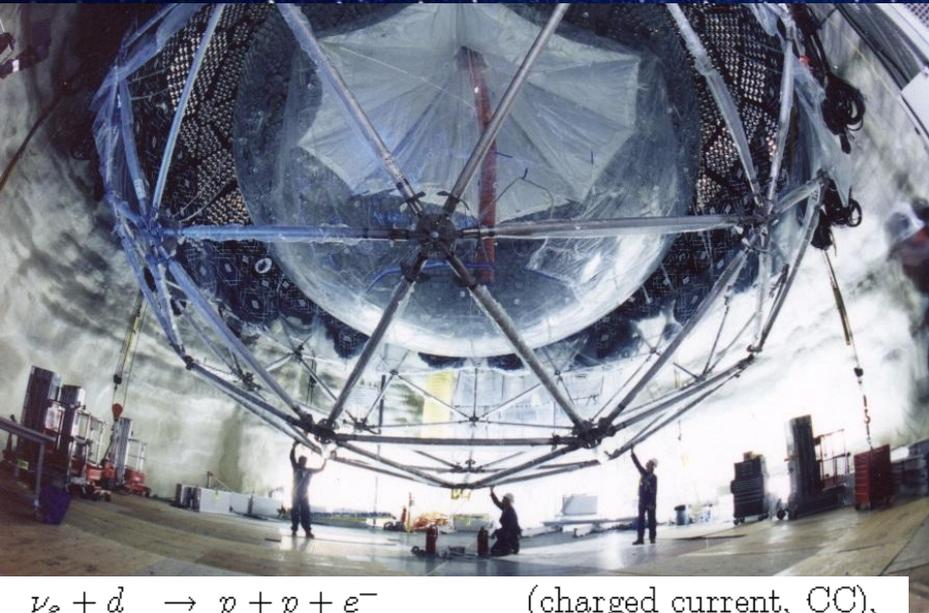
e eram sensíveis aos neutrinos mais abundantes, da reação



com uma predição a priori de medir 69.6 SNU do “miolo” do Sol. Os resultados finais foram $0.517_{-0.053}^{+0.055}(\text{stat.})_{-0.044}^{+0.042}(\text{syst.})$ ou seja, metade da predição em SAGE e $0.601_{-0.060}^{+0.059}$ para GALLEX. Como os dois experimentos foram “calibrados” com neutrinos de reatores, e provaram medir 0.95 ± 0.05 do esperado, e além disso enxergaram pela primeira vez os neutrinos da principal reação termonuclear no Sol, até os mais escépticos se convenceram de que algo estava errado com os neutrinos.

Os experimentos com alta energia limiar (Super-Kamiokande e SNO), no entanto, também mostraram um déficit

SNO (água pesada, sensível aos neutrinos do ^8Be)



Super-Kamiokande (água normal) direcional, os neutrinos vem do Sol!

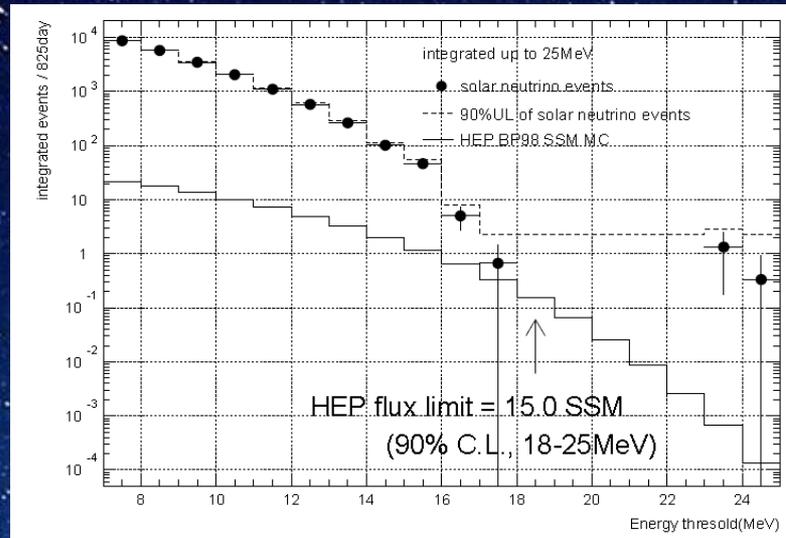
Mediram algo como metade do fluxo

$$0.544 \pm 0.037 \pm 0.064$$



Como SNO viu **TODOS** os neutrinos, e os fluxos são compatíveis com o Modelo Padrão do Sol, **os neutrinos oscilam...**

Este é o *problema dos neutrinos solares*. Soluções possíveis: ou o Modelo Padrão do Sol está errado, ou os neutrinos “somem” no meio do caminho até o detector



Mas...

nos dados do Super-Kamiokande, faltam os neutrinos das energias mais baixas. Se fôr a temperatura do Sol que resulta menor, a observação seria a contrária ➡ não é o Sol

Além disso, quando todos os fluxos são detectados (SNO), eles somados concordam com a predição do Modelo Padrão do Sol

A solução de Mikheyev–Smirnov–Wolfenstein (e Pontecorvo):

os neutrinos são uma mistura dos 3 tipos. Pela interação com a matéria ou em vácuo, eles se convertem de um tipo em outro.

Mas para isto ser possível, a massa deles não pode ser zero !!!

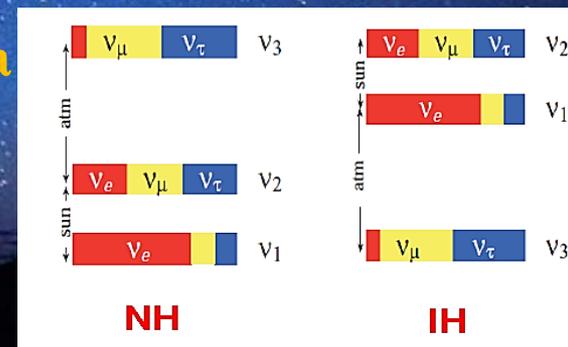
$$P_{\nu_e \rightarrow \nu_e} = 1 - \sin^2 2\theta_{12} \sin^2 \left(\frac{1.27 \Delta m_{12}^2 L}{E} \right)$$

Ângulo de mistura
da matriz

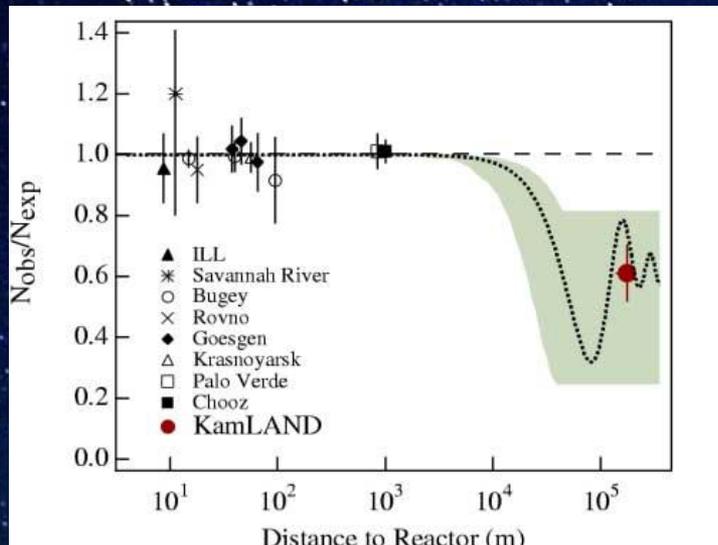
Diferença das massas

Comprimento
característico da
oscilação

De momento não é possível dizer se a hierarquia é “normal” ou “invertida”, nem qual é a origem da massa (análoga à massa dos elétrons (Dirac) ou “fajuta” (Majorana)?)

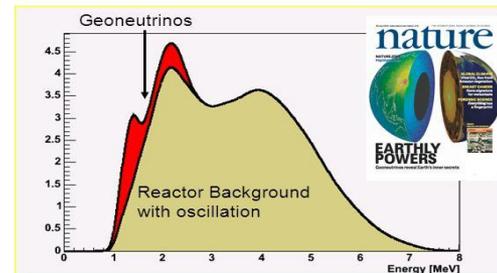


O experimento KamLand: detecção das oscilações em neutrinos emitidos por reatores terrestres



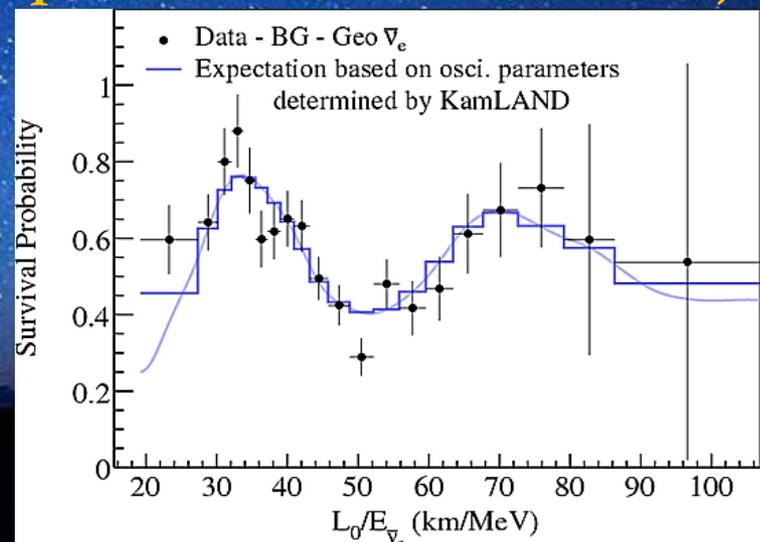
O Sol não emite vários tipos de neutrinos, eles se convertem a caminho (KamLand não veria nada se aquele for o caso !)

Reactor and Earth Signal

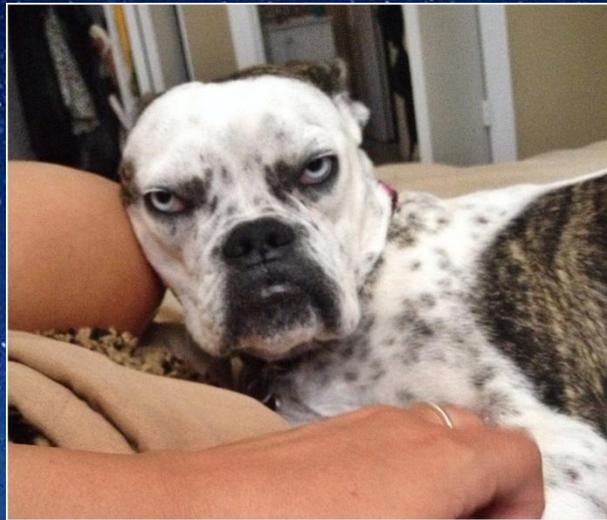


- **KamLAND** was designed to measure reactor antineutrinos.
- Reactor antineutrinos are the most significant contributor to the total signal.

Últimos resultados (com os parâmetros obtidos antes)



Intervalo...



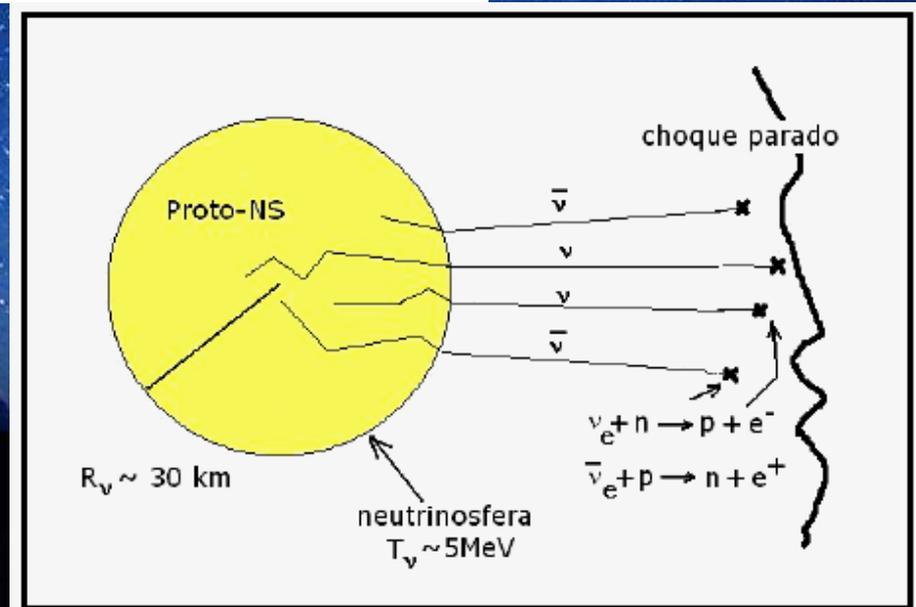
Já tínhamos discutido o problema do colapso gravitacional: depois do choque parar lá for a, o caroço está cheio de neutrinos (térmicos)

como os neutrinos são os que levam a energia de ligação embora, sabemos que há $\approx 10^{53} \text{ erg}$ guardados, 1% disto é suficiente para as explosões acontecerem

A $\langle E_\nu \rangle \approx 10 \text{ MeV}$ e elevada opacidade aos neutrinos (!) indicam que estão no regime de **difusão**, forma-se uma **neutrinosfera** com

$$L_\nu = \frac{7}{4} (4\pi R_\nu^2) (\sigma T_\nu^4) \approx 10^{53} \left(\frac{R_\nu}{30 \text{ km}} \right)^2 \left(\frac{T_\nu}{4 \text{ MeV}} \right)^4 \text{ erg}$$

Férmions !



Portanto, cabe esperar que esses neutrinos sejam emitidos em um tempo \sim segundos. Kamiokande e outros experimentos foram desenhados para detectar estes neutrinos

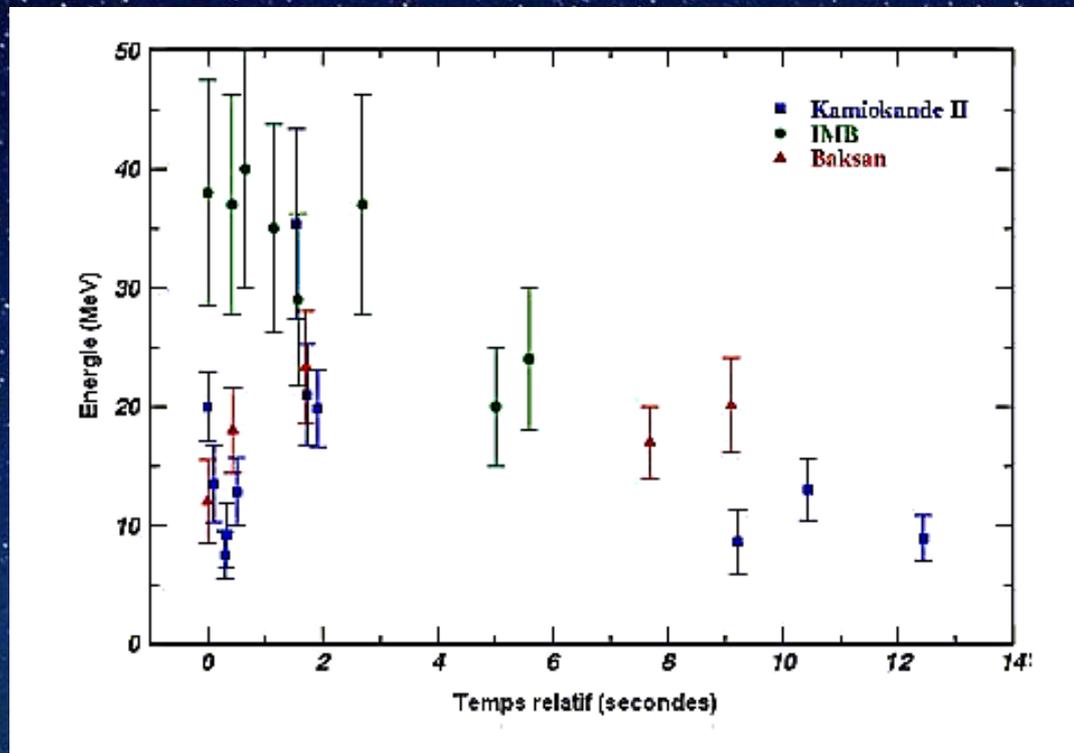
Isto foi colocado a prova em fevereiro de 1987

Além do experimento de Kamiokande, mais 3 estavam em operação

- IMB (USA) (água ultrapura+fotomultiplicadoras, limiar maior)
- Mont Blanc (Itália) 90 tons Liquid Scintillator (limiar menor)
- Baksan (Rússia) 3 ton Scintillator (limiar menor)



Quando descoberta a emissão óptica, foi lançado um alerta e nos, experimentos por volta de 3 h antes havia um surto de neutrinos registrado com a seguinte sequência temporal (curva de luz)



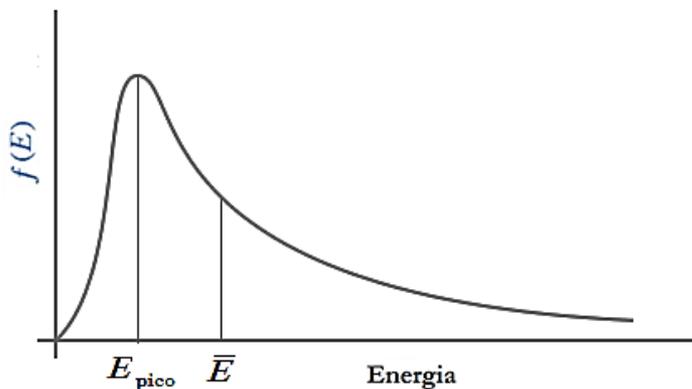
Deve ser levado em conta que a amostragem da emissão é registrada diferentemente em cada experimento por causa das limiares e outros fatores. Houve sinal no experimento de Mont Blanc, mas 4.5 h *antes* e é considerado uma flutuação, sem relação com a supernova.

Se chamamos f à distribuição de neutrinos, que esperamos seja Fermi-Dirac, na fonte a energia média dos neutrinos será

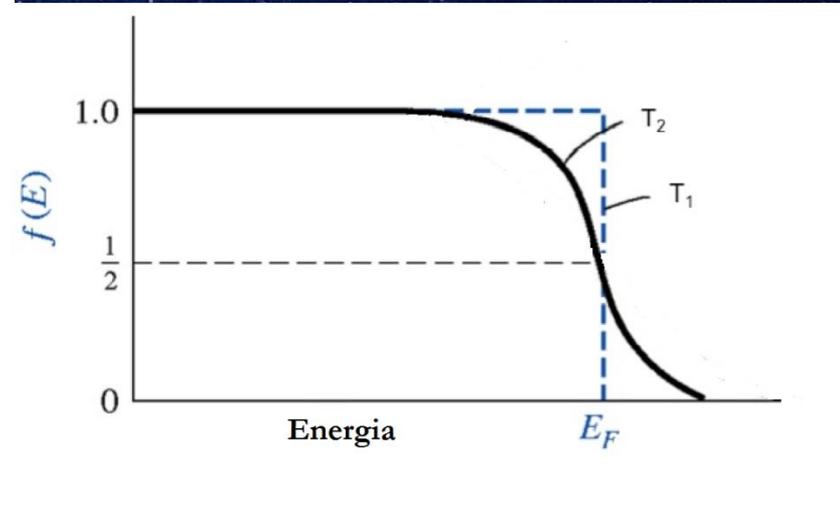
$$\langle \varepsilon \rangle_s = \int_0^\infty \varepsilon^3 f \, d\varepsilon / \int_0^\infty \varepsilon^2 f \, d\varepsilon = TF_3(0)/F_2(0) = 3.15T$$

onde as funções F_2 e F_3 , conhecidas como integrais de Fermi, estão tabuladas

Distribuição clássica (M-B)



Distribuição de F-D



Todos os estados estão cheios até uma energia máxima (nível de Fermi E_F) a $T_1=0$, resultando no escalão mostrado. Para T_2 finita existe espaço $\sim kT$ perto da superfície de Fermi e os neutrinos devem ser emitidos com energias assim

Agora, dessa distribuição, os detectores fazem uma amostragem, a energia média dos neutrinos nos detectores será

$$\langle \epsilon \rangle_d = \sum \epsilon_i / N_d = \int_H^\infty \epsilon^5 f W d\epsilon / \int_H^\infty \epsilon^4 f W d\epsilon = T G_5(H/T) / G_4(H/T),$$

G_4 e G_5 são outras integrais de Fermi

Limiar do detector

Eficiência, modelada com

$$1 - 4.9 \exp(-\epsilon / 3.6 \text{ MeV})$$

Kamioka

$$1 - 3 \exp(-\epsilon / 16 \text{ MeV})$$

IMB

Para uma $\langle \epsilon \rangle_d$ detectada, calculada numericamente dos dados, é possível obter T resolvendo esta equação implícita em T , e com ela, temos podemos (multiplicando por 3.15) calcular a energia média na fonte $\langle \epsilon \rangle_s$, e também a energia total irradiada

$$E_s = 0.77 \times 10^{53} (D/50 \text{ kpc})^2 [F_3(0) G_5 / G_4^2] N_d / (M \langle \epsilon \rangle_d).$$

Nos antineutrinos e- que foram detectados

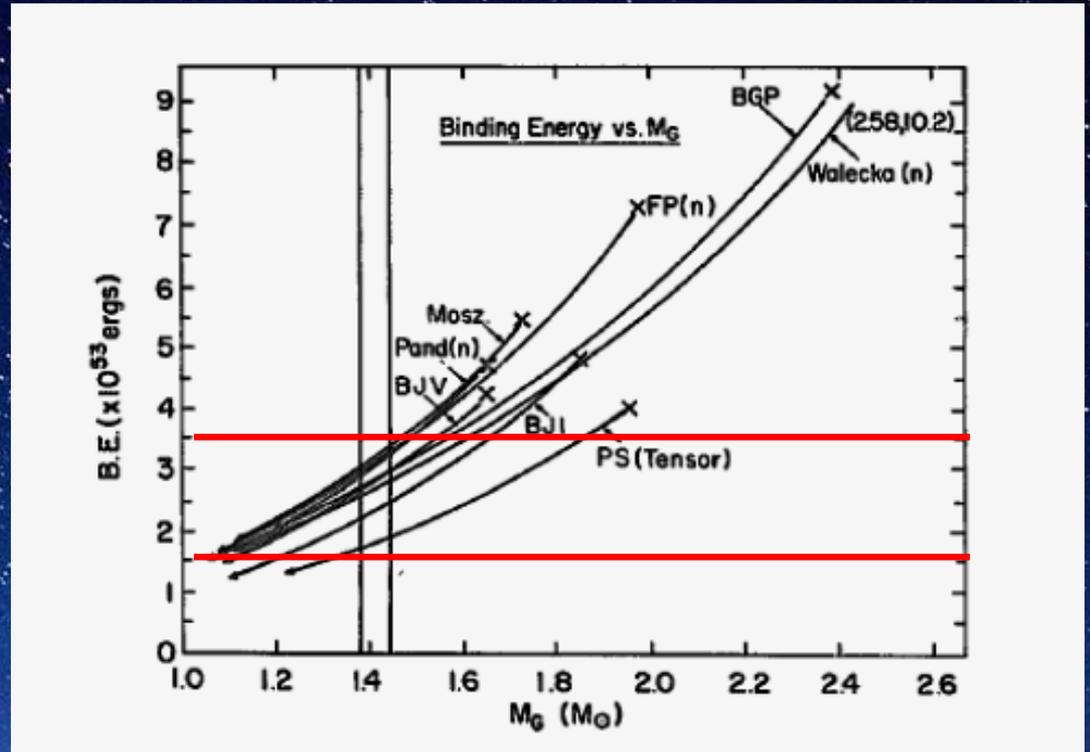
Como deve haver equipartição, a energia total é 6 vezes o resultado obtido para E_s

Supondo que há só um surto (modelo padrão) de neutrinos, a T obtida para a neutrinosfera é

$$T = 4.2_{-0.8}^{+1.2} \text{ MeV}$$

E a energia total resulta

$$E_g = (2.5 \pm 1) \times 10^{53} \text{ ergs} .$$



Como os neutrinos são poucos, a barra de erro não permite escolher o tipo de equação de estado que explica melhor os dados (E_g é a energia de ligação da estrela de nêutrons que foi formada), embora as mais comumente utilizadas são viáveis

Na próxima aula...



Ondas gravitacionais para todos...