

O que são os neutrinos

Hélio da Motta
CBPF

LISHEP 2023
MARÇO 2023





The background of the image consists of numerous vertical stripes of varying widths and colors, including shades of purple, magenta, and dark green, set against a black background.

ChatGPT



Os neutrinos são partículas subatômicas que têm massa muito baixa e quase não interagem com a matéria. Eles são produzidos em muitos processos naturais, incluindo a fusão nuclear no Sol e em outras estrelas, a desintegração de isótopos radioativos na Terra e em outras fontes cósmicas. Os neutrinos viajam a velocidades próximas à da luz e são capazes de atravessar grandes quantidades de matéria sem sofrer interações significativas, o que os torna extremamente difíceis de detectar.



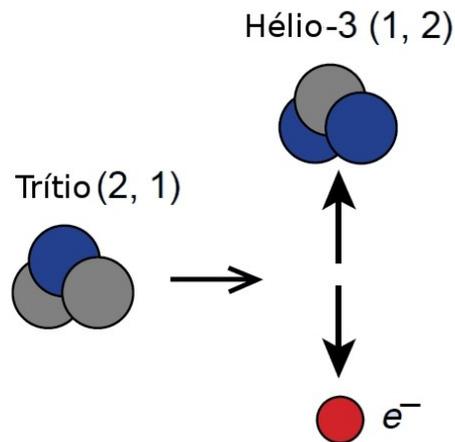
Os neutrinos têm três tipos ou "sabores": o elétron-neutrino, o múon-neutrino e o tau-neutrino. Eles podem mudar de um sabor para outro enquanto viajam, em um fenômeno conhecido como oscilação de neutrinos.

Os neutrinos são importantes na física de partículas e na astrofísica, pois fornecem informações sobre o funcionamento interno do Sol e outras estrelas, bem como sobre a formação e evolução do universo. Eles também são usados em experimentos de detecção de neutrinos para estudar a física fundamental e procurar evidências de novas partículas ou fenômenos.

 Regenerate response

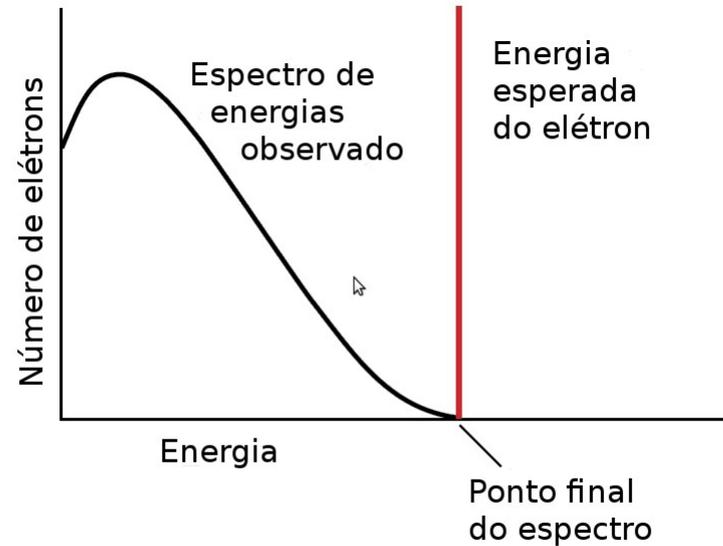
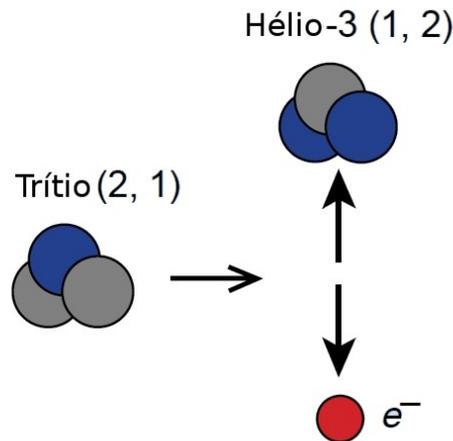
Decaimento beta

Decaimento de dois corpos



Decaimento beta

Decaimento de dois corpos



FALTA ENERGIA !!!

VIOLAÇÃO DA CONSERVAÇÃO DA ENERGIA ???????

De que é capaz um cientista desesperado

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, how because of the "wrong" statistics of the N and Li6 nuclei and the continuous beta spectrum, I have hit upon a desperate remedy to save the "exchange theorem" of statistics and the law of conservation of energy. Namely, the possibility that there could exist in the nuclei electrically neutral particles that I wish to call neutrons

principles they do not neutrons electron masses.

understandable by the assumption that in beta decay a neutron is emitted in addition to the electron such that the sum of the energies of the neutron and the electron is constant... ..

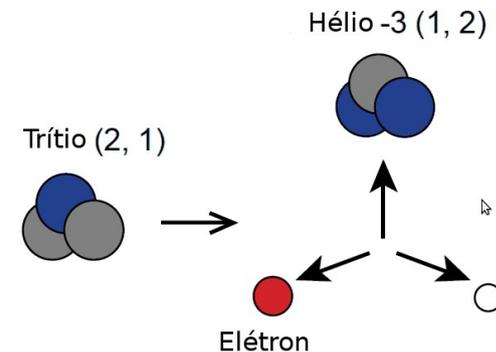
Unfortunately, I cannot appear in Tübingen personally since I am indispensable here in Zurich because of a ball on the night of 6/7 December. With my best regards to you, and also to Mr Back.

Your humble servant

W. Pauli

Encontrei um remédio desesperado para salvar o teorema de troca da estatística e a lei de conservação da energia

Eu não posso comparecer pessoalmente em Tübingen pois sou indispensável aqui em Zurique devido a um baile



**Decaimento de três corpos
Energia distribuída entre
Elétron e neutrino.**

Energia é conservada !!

Neutrinos ! Finalmente !



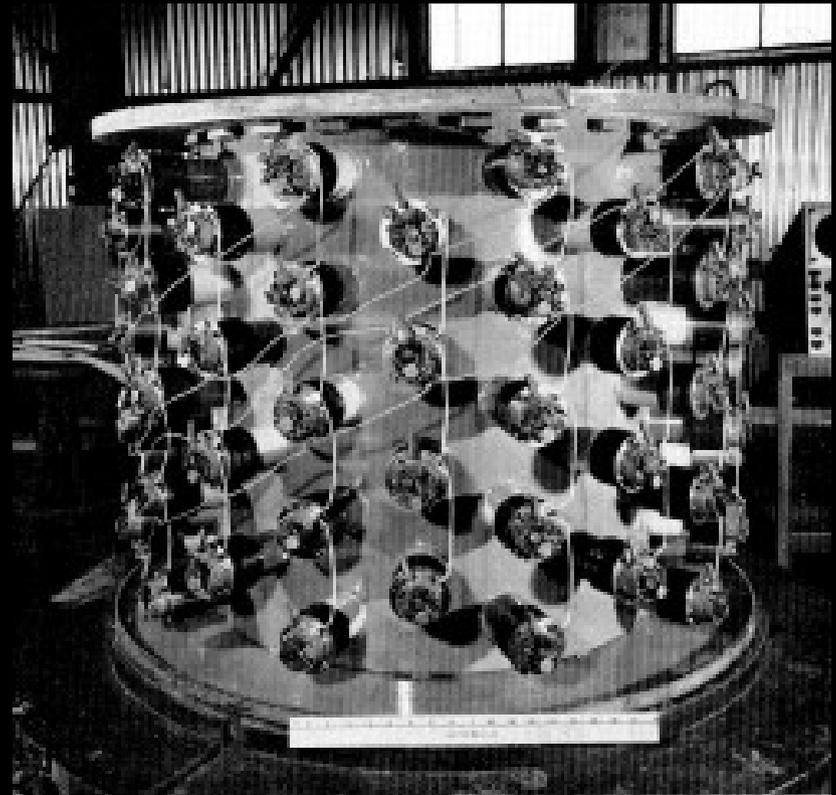
Decaimento beta inverso

Reator nuclear de Savannah River
(Carolina do Sul)

Fluxo de 5×10^{13} neutrinos por
segundo por cm^2

Dois tanques com 200 L de água
com 40 kg de CdCl_2

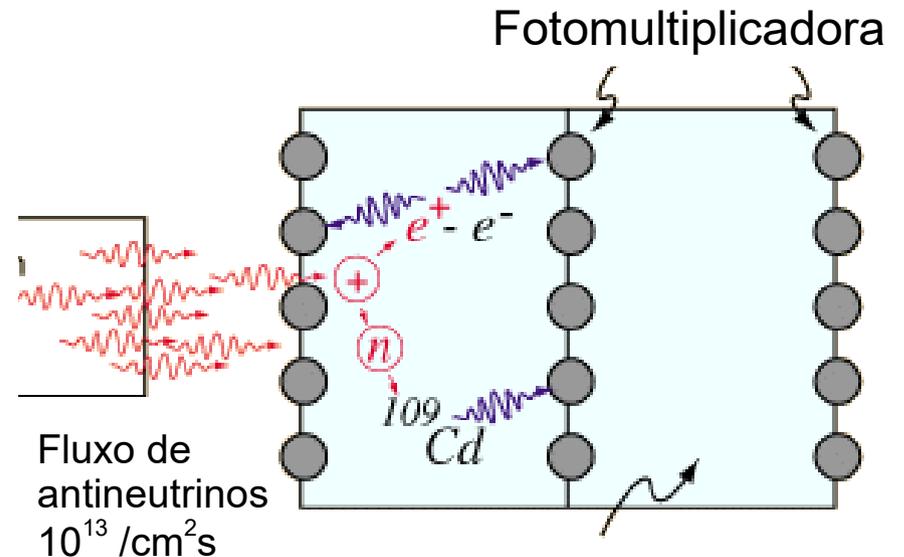
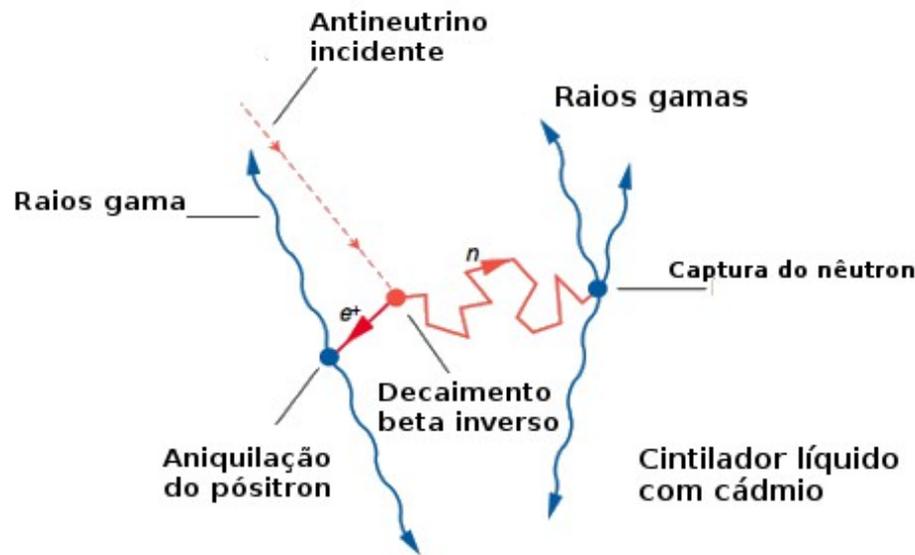
110 fotomultiplicadoras



Neutrinos ! Finalmente !



Decaimento beta inverso



Pósitron se aniquila rapidamente com um elétron produzindo dois raios gama

Após cerca de 5 microsegundos o nêutron é capturado por um núcleo de cádmio

Seção de choque medida

$$6,3 \times 10^{-44} \text{ cm}^2$$

Adoro sorvete



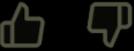
Adoro sorvete



Adoro sorvete



É verdade que neutrinos mudam de sabor?

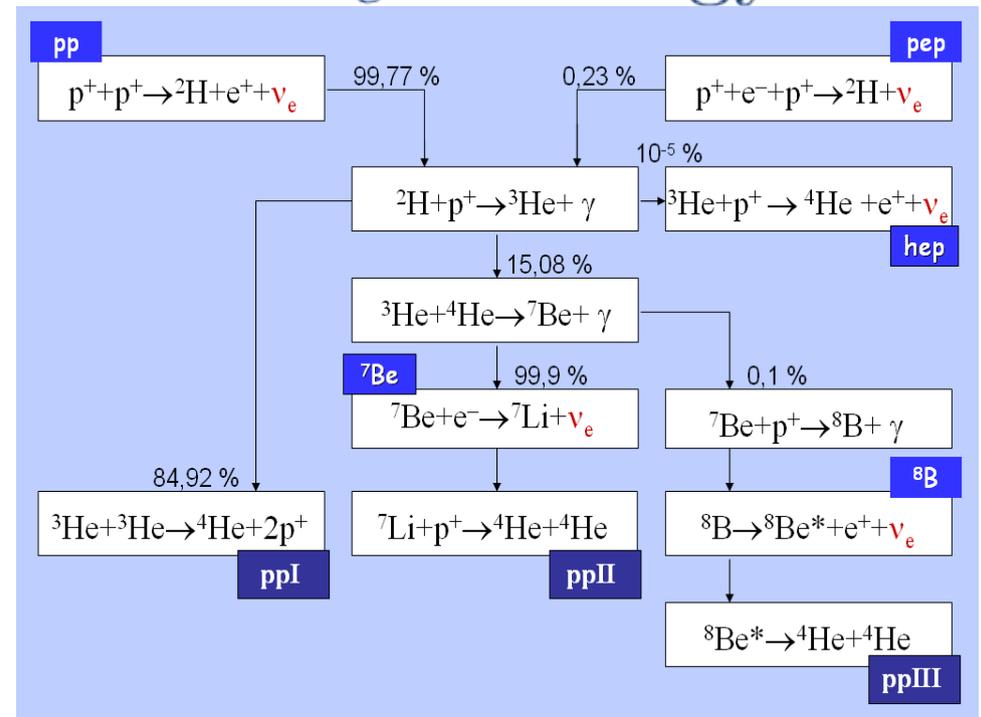
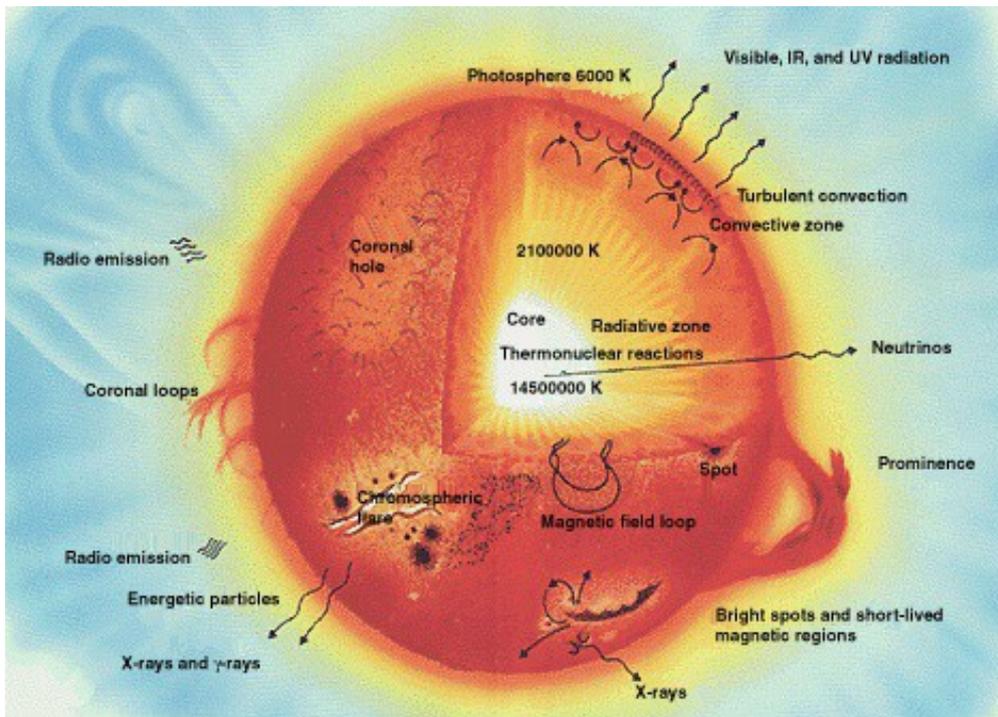


Sim, é verdade que os neutrinos podem mudar de sabor. Os neutrinos são partículas subatômicas que vêm em três sabores: elétron, múon e tau. Esses sabores estão relacionados aos léptons associados a eles: elétron, múon e tau.

Quando os neutrinos se movem pelo espaço ou interagem com a matéria, eles podem mudar de sabor. Isso ocorre porque os neutrinos viajam em um estado quântico que é uma mistura dos três sabores. Esse estado quântico pode mudar à medida que os neutrinos se movem, resultando em uma mudança de sabor.

Esse fenômeno é conhecido como oscilação de neutrinos e foi descoberto na década de 1990. A oscilação de neutrinos é um dos poucos fenômenos observáveis que podem indicar a presença de física além do Modelo Padrão, o modelo que descreve as partículas subatômicas e suas interações.

Produção de energia nas estrelas=neutrinos



Apenas neutrinos escapam do núcleo do Sol

Cerca de 100.000.000.000 de neutrinos por cm² por s chegam à Terra

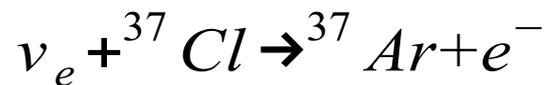
Neutrinos podem fornecer um teste empírico da teoria de fusão termonuclear como fonte da energia do Sol

Observando o sol

John Bahcall calculou o fluxo de neutrinos vindos do sol

Experimento de Davis

Tanque com 380 m³ de percloroetileno
 $\text{Cl}_2\text{C}=\text{CCl}_2$ colocado a 1.478 m de profundidade na mina de ouro de Homestake na Dakota do Sul



Contagem dos átomos de Ar permitia determinar o número de neutrinos capturados



Mina de ouro de Homestake, Dakota do Sul

Observando o sol

Esperavam ~ 51 átomos de Ar

Encontraram só ~ 17

Descrença generalizada

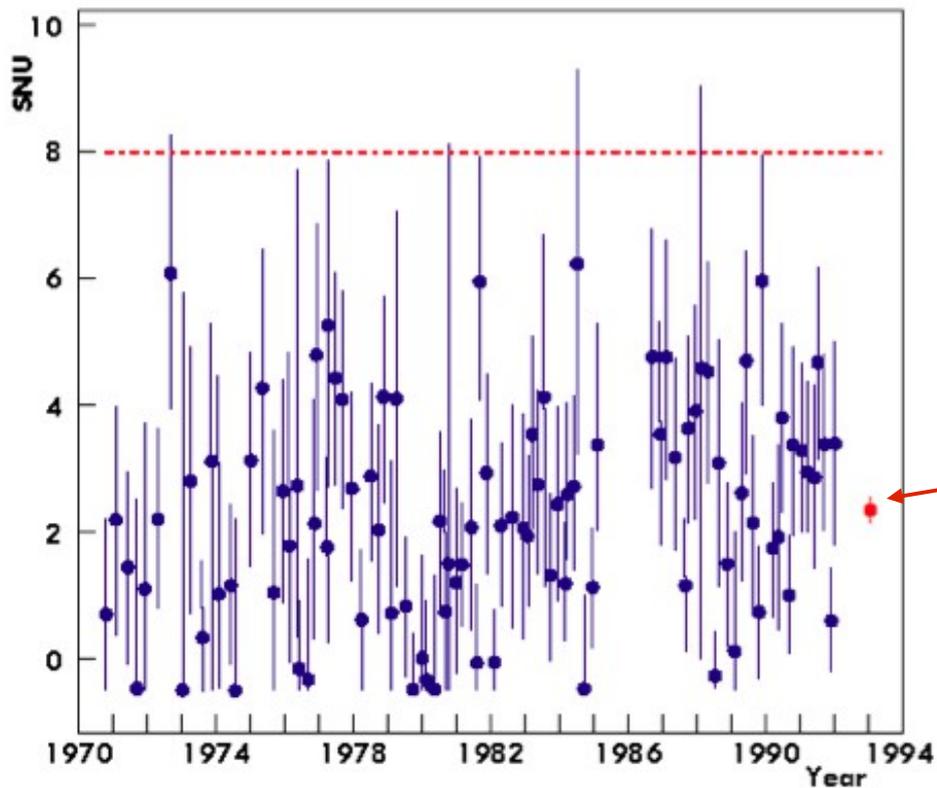
Estes caras conseguiam encontrar 17 átomos

em uma piscina de 25m X 7m X 1,9m ?



SIM !!!

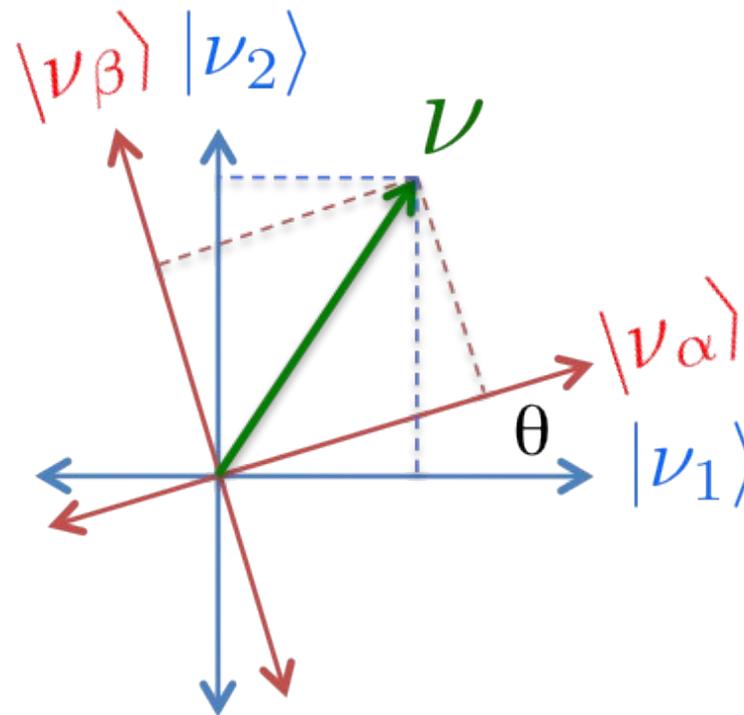
Anomalia dos neutrinos solares



$$\frac{\varphi_{\nu_e}(\text{Homestake})}{\varphi_{\nu_e}(\text{Teoria})} = 0,34 \pm 0.06$$

Mistura de dois neutrinos

$$\begin{pmatrix} \nu_\alpha \\ \nu_\beta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\theta_{ij} & \text{sen}\theta_{ij} \\ -\text{sen}\theta_{ij} & \cos\theta_{ij} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_i \\ \nu_j \end{pmatrix}$$



$$P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta) = |\langle \nu_\beta | \nu_\alpha(L) \rangle|^2 = \left| \sum_i U_{\alpha i}^* e^{-i(m_i^2 L/2E)} U_{\beta i} \right|^2$$

Se começamos com ν_α em $L=0$

$$P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta) = \sin^2 2\theta_{ij} * \text{sen}^2 \left(1,27 \Delta m_{ij}^2 \frac{L}{E} \right)$$

O ângulo de mistura, θ ,
determina a amplitude da
oscilação

Δm^2 determina a
frequência da oscilação em
função de L/E

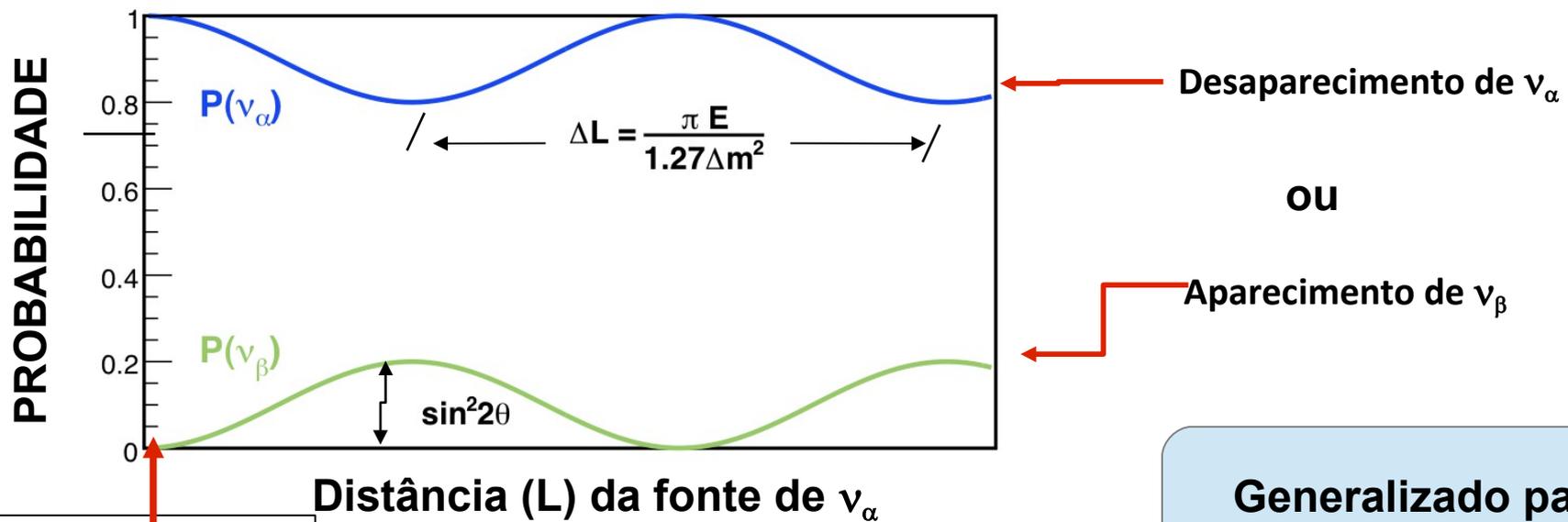
$$\Delta m_{ij}^2 \equiv m_j^2 - m_i^2$$

probabilidade depende da
diferença dos quadrados
dos dois autoestados de massa

Oscilação de neutrinos

$$P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta) = \sin^2 2\theta_{ij} * \sin^2 \left(1,27 \Delta m_{ij}^2 \frac{L}{E} \right)$$

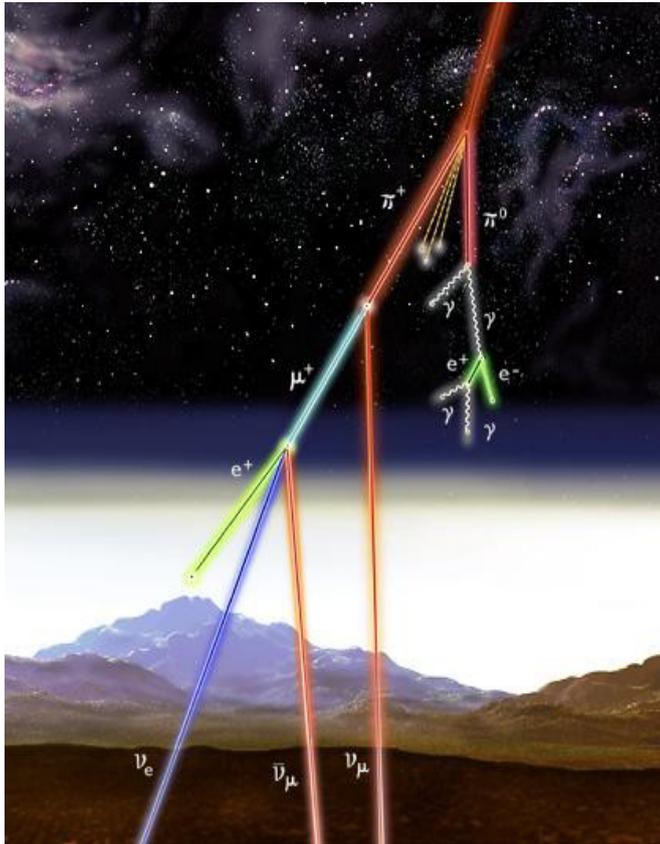
E fixo
L variável



Generalizado para
três sabores

Neutrinos atmosféricos

Super kamiokande (Japão)



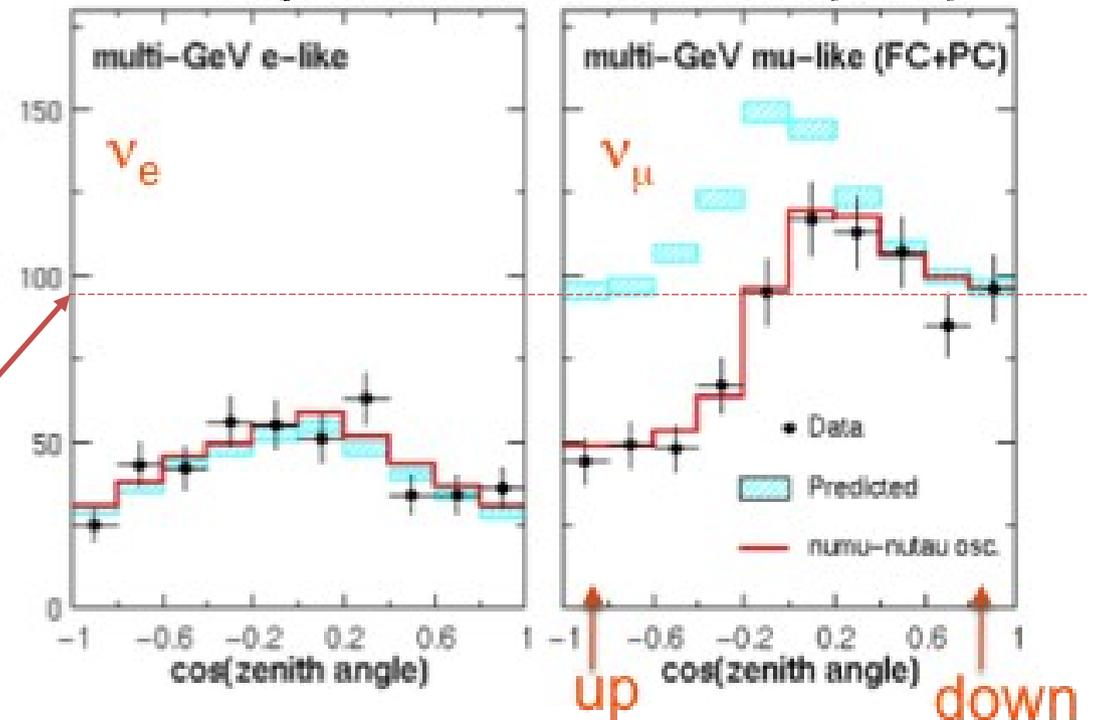
$$\langle E \rangle_{Super-K} \gg 1-10 \text{ GeV}$$

$$\langle L \rangle_{Super-K} \gg 10-10^4 \text{ km}$$

Esperava-se

$$\frac{\phi_{\nu_{\mu}}}{\phi_{\nu_e}} \approx 2$$

$$\frac{\phi_{\nu_{\mu}}(Up)}{\phi_{\nu_{\mu}}(Down)} \approx 1$$



Março de 2023

Hélio da Motta (CBPF)

21

Problema dos neutrinos solares resolvido !

Sudbury Neutrino Observatory

1.000 toneladas de água pesada

17 m de diâmetro

9.600 fotomultiplicadoras

Sensível a todos os sabores de neutrinos

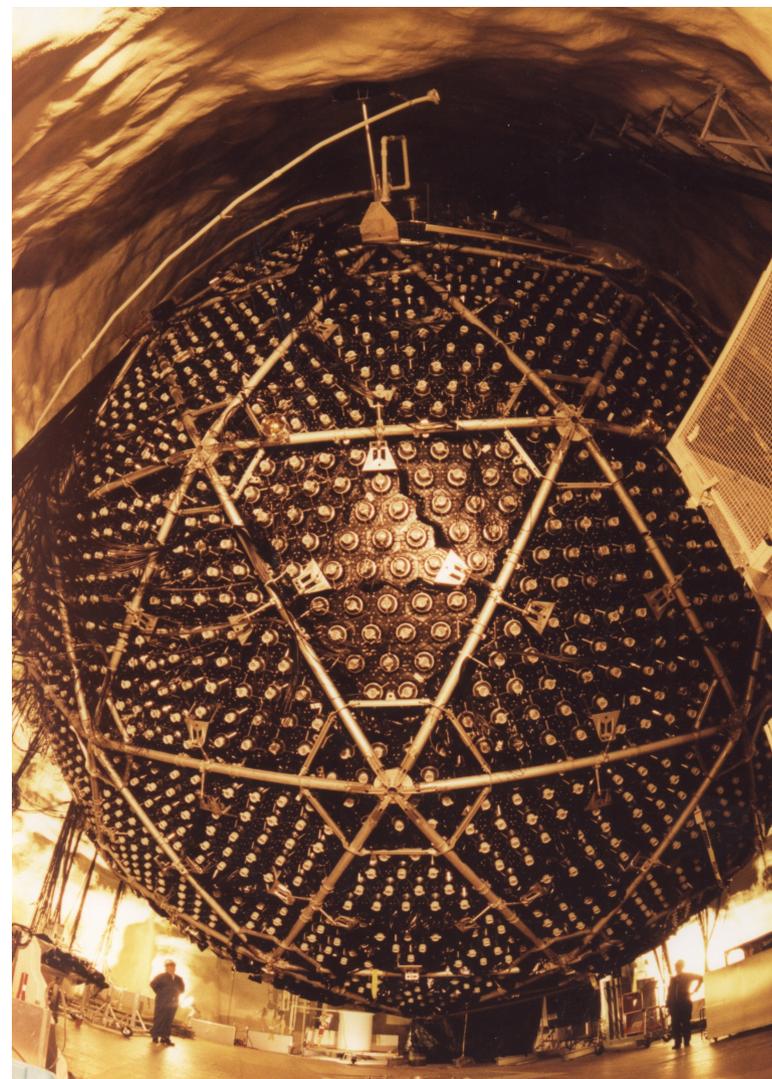
$$\frac{\phi_{\nu_e}}{\phi_{\nu_\mu} + \phi_{\nu_e} + \phi_{\nu_\tau}} = 0,34 \pm 0,023 \pm 0,030$$

Fração de ν_e
concorda com
Davis !

SNO $\phi_{\nu_\mu} + \phi_{\nu_e} + \phi_{\nu_\tau} = (4,94 \pm 0,21 \pm 0,36) \times 10^6 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$

Fluxo total
concorda com
Bahcall!

Teoria $\phi_{total} = (5,69 \pm 0,91) \times 10^6 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$



Os neutrinos são quirais?



Sim, os neutrinos são partículas quirais. Quiralidade é uma propriedade das partículas subatômicas que se refere à maneira como elas se comportam sob uma transformação de espelho. Uma partícula é considerada destra se sua imagem especular (ou seja, a imagem refletida no espelho) não pode ser superposta à partícula original, enquanto uma partícula é considerada canhota se a imagem especular pode ser superposta à partícula original.

Os neutrinos são partículas canhotas, o que significa que sua imagem especular é uma partícula de helicidade direita. Isso se deve à maneira como o spin do neutrino está alinhado com sua direção de movimento. Os neutrinos canhotos só interagem com outras partículas canhotas, o que os torna diferentes de outras partículas subatômicas, como os quarks, que podem ser tanto canhotos quanto destrões. A quiralidade dos neutrinos é uma propriedade fundamental que tem implicações importantes na física de partículas e na cosmologia.

Qual é a verdadeira Catarina ?



1

Março de 2023



2

Hélio da Motta (helio@cbpf.br)

Qual é o verdadeiro cuco ?



1

Março de 2023



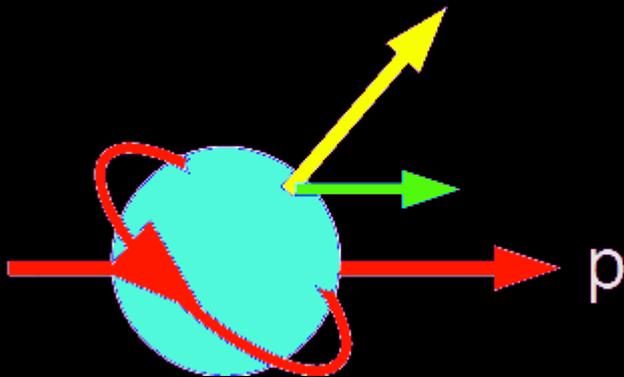
2

Hélio da Motta (helio@cbpf.br)

25

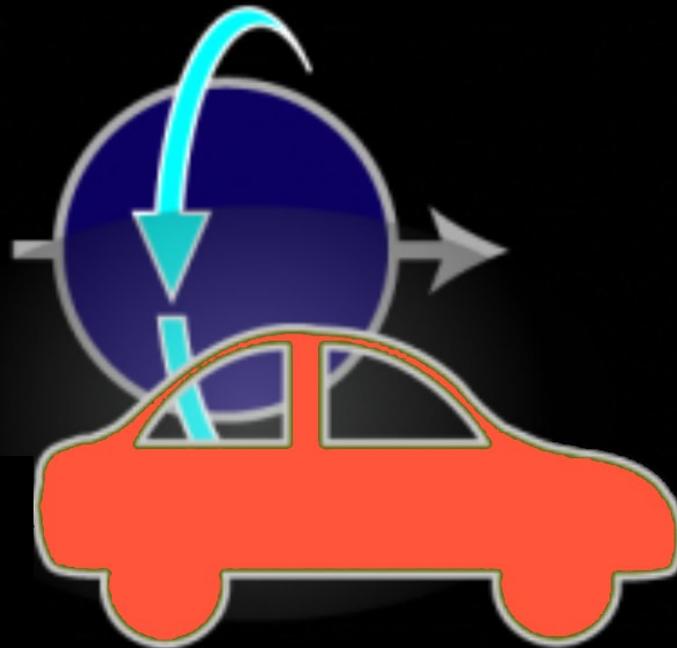
Helicidade

Helicidade é a projeção do spin ao longo da direção do deslocamento da partícula



Mão esquerda (levógiro) mão direita (destrógiro)

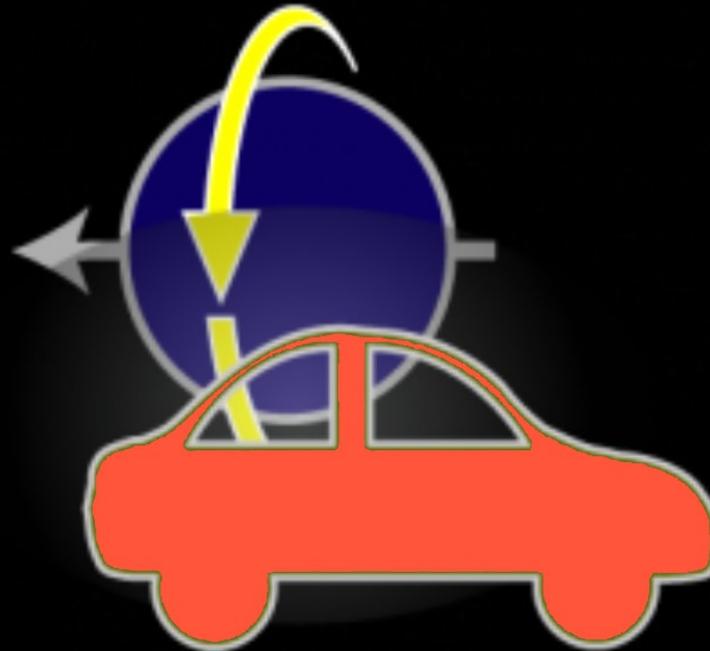
**Sistema de referência no carro
Carro mais lento que a bola → destrógiro**



Sistema de referência no carro
Carro e bola movem na mesma velocidade → helicidade ?
Bola parada em relação ao carro !!



**Sistema de referência no carro
Caro mais rápido que a bola → levógiro**



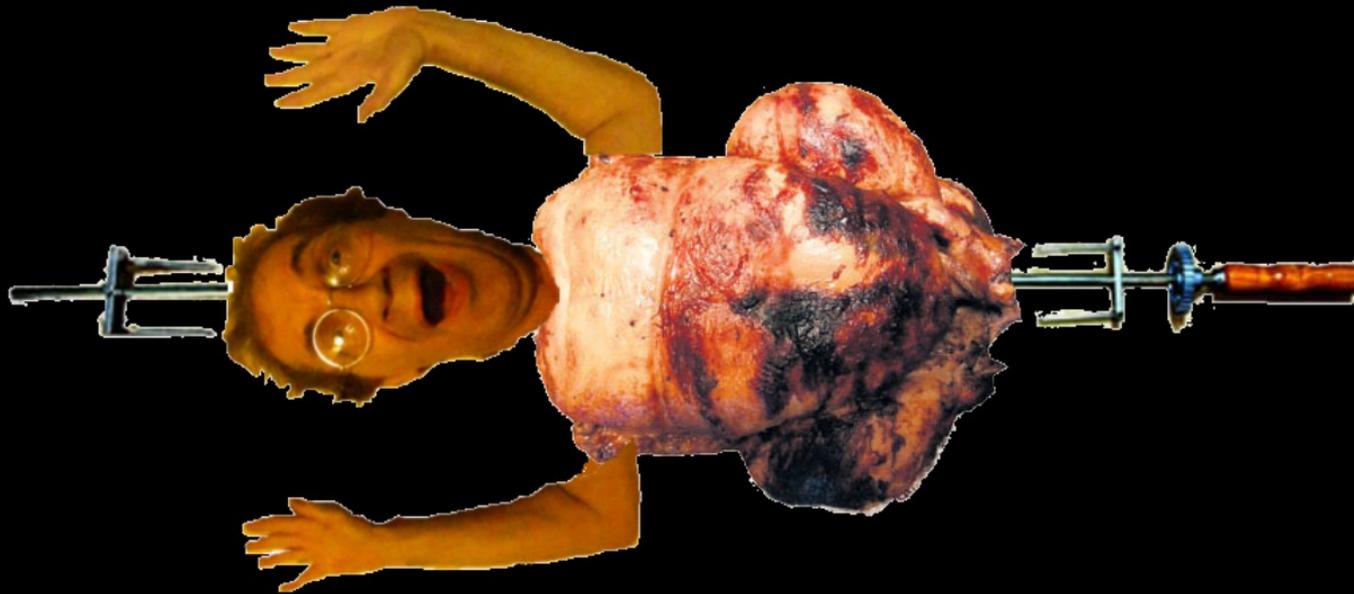
HELICIDADE DEPENDE DO SISTEMA DE REFERÊNCIA !!!

NÃO É UMA PROPRIEDADE INTRÍNSECA DE UMA PARTÍCULA !!!

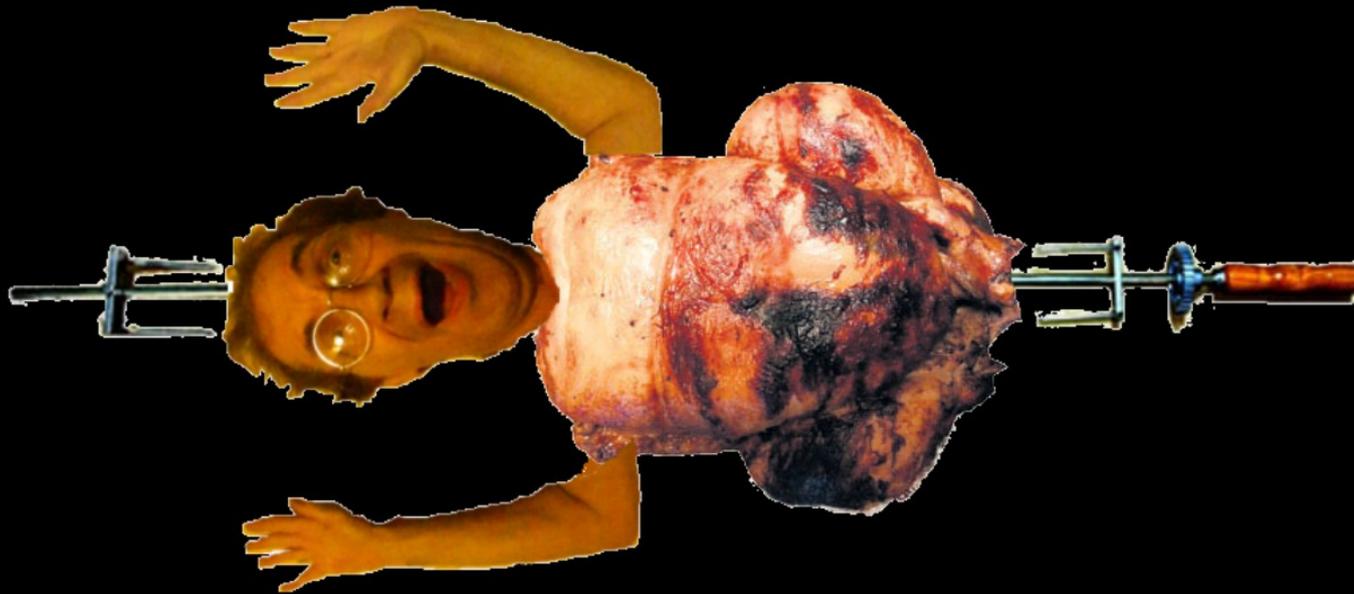
HÁ ALGO DE ALGUMA FORMA RELACIONADA À HELICIDADE QUE SEJA INVARIANTE ?

SIMETRIA SIGNIFICA ALGUMA COISA?

**SE EU GIRAR COMO UM FRANGO SENDO ASSADO
OBSERVADORES EM DIVERSES SISTEMAS DE
REFERÊNCIA DISCORDARÃO DE QUAL SEJA A
MINHA HELICIDADE**



**SE EU GIRAR COMO UM FRANGO SENDO ASSADO
OBSERVADORES EM DIVERSES SISTEMAS DE
REFERÊNCIA DISCORDARÃO DE QUAL SEJA A
MINHA HELICIDADE**

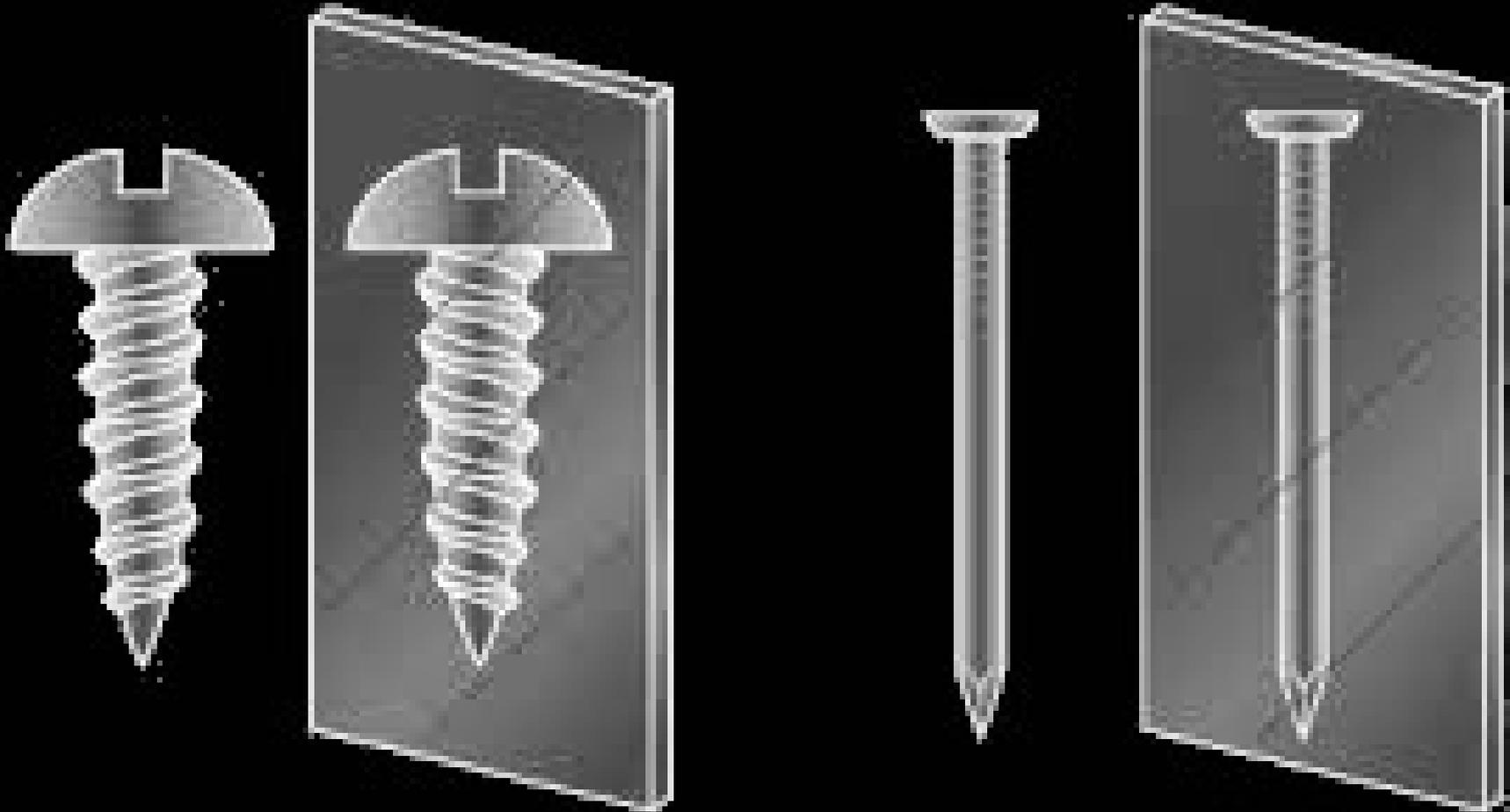


**ENTRETANTO, NÃO HAVERÁ DÚVIDAS QUANTO
QUAL É A MINHA MÃO DIREITA E QUAL É A
MINHA MÃO ESQUERDA**

Quiralidade

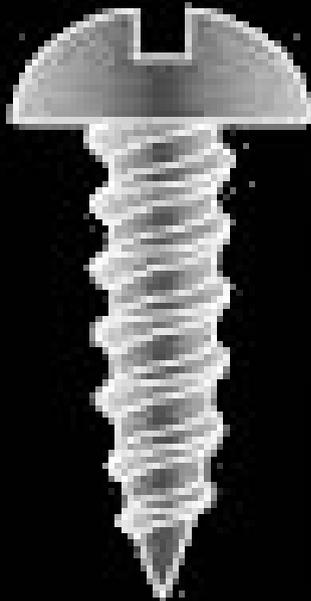
**Algo é quiral se não pode
ser superposto
à sua imagem especular**

Quiralidade

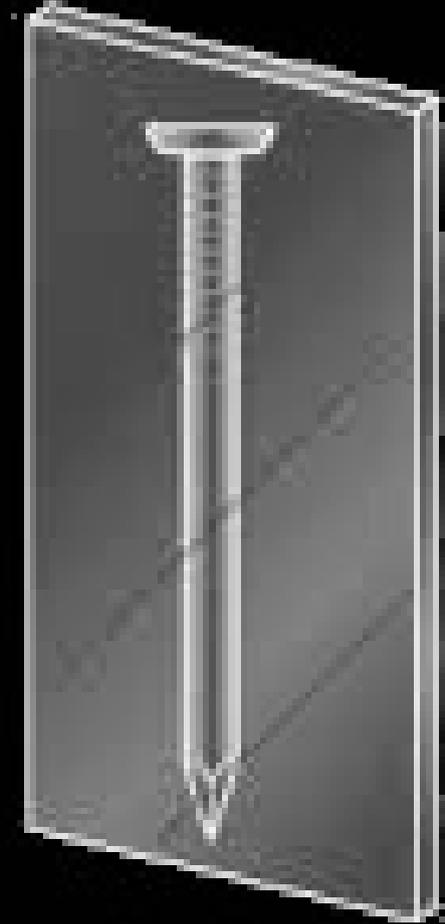
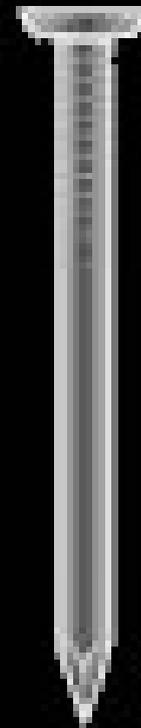


Quiralidade

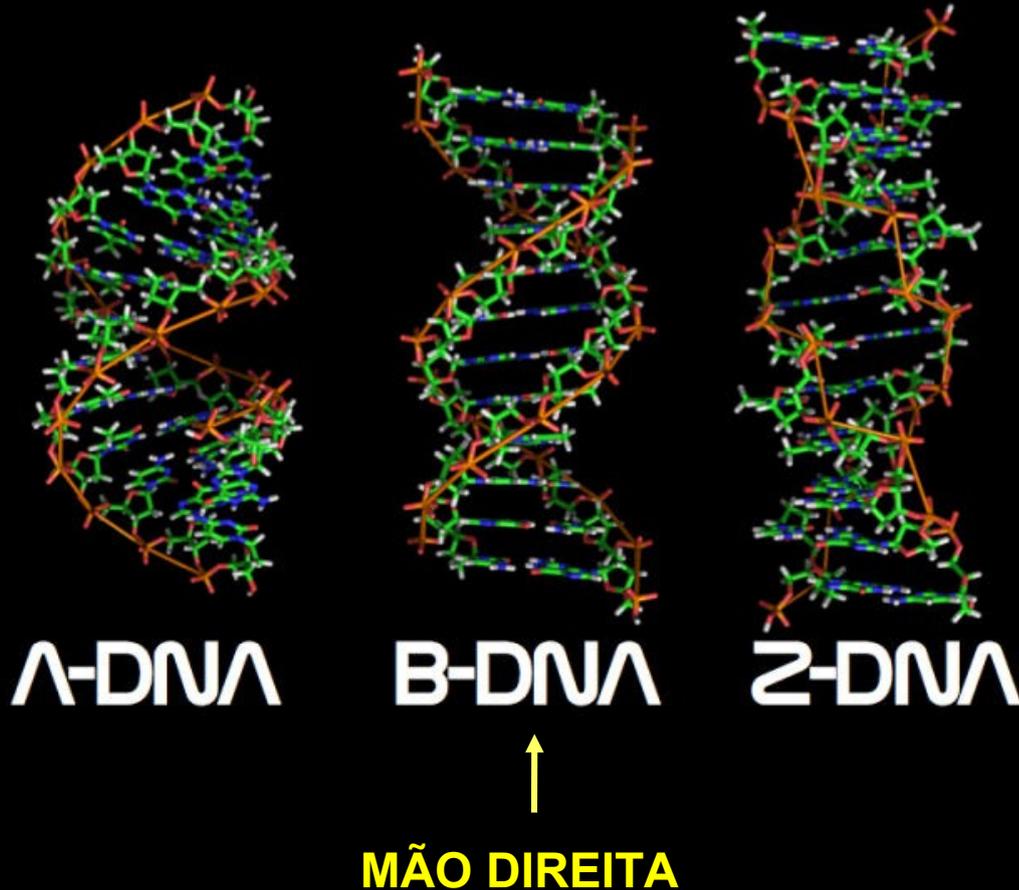
MD



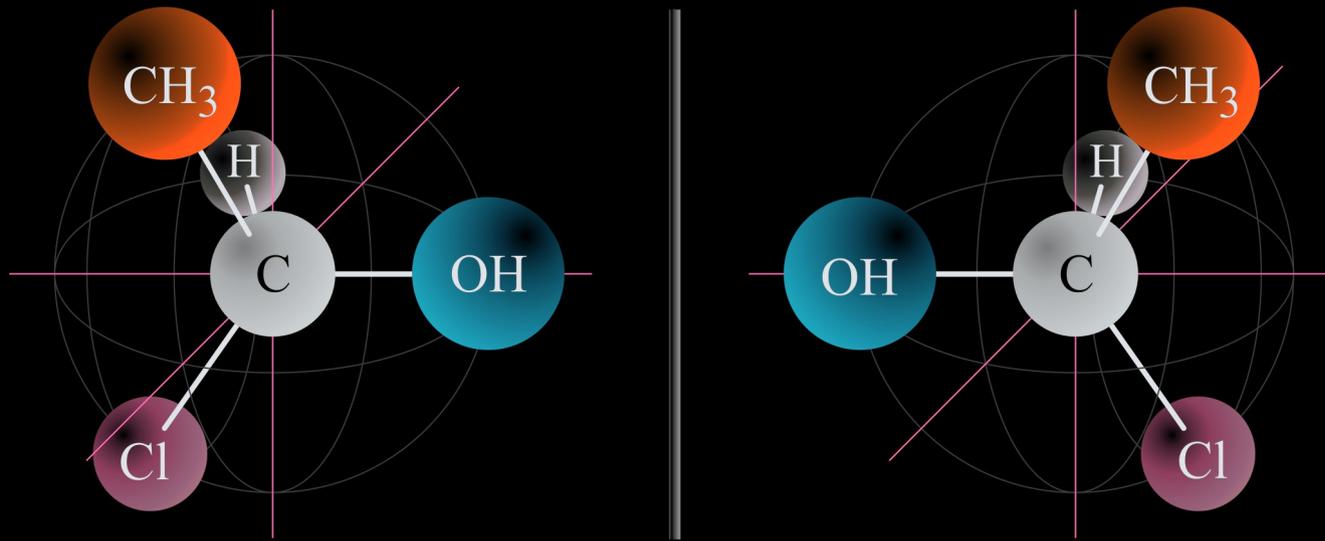
ME



Quiralidade está ao nosso redor



Quiralidade está ao nosso redor



Quiralidade está ao nosso redor

Donald Trump



Quiralidade está ao nosso redor

Donald Trump



**INTERAGE APENAS COM A DIREITA
IGNORA A ESQUERDA**

Quiralidade está ao nosso redor

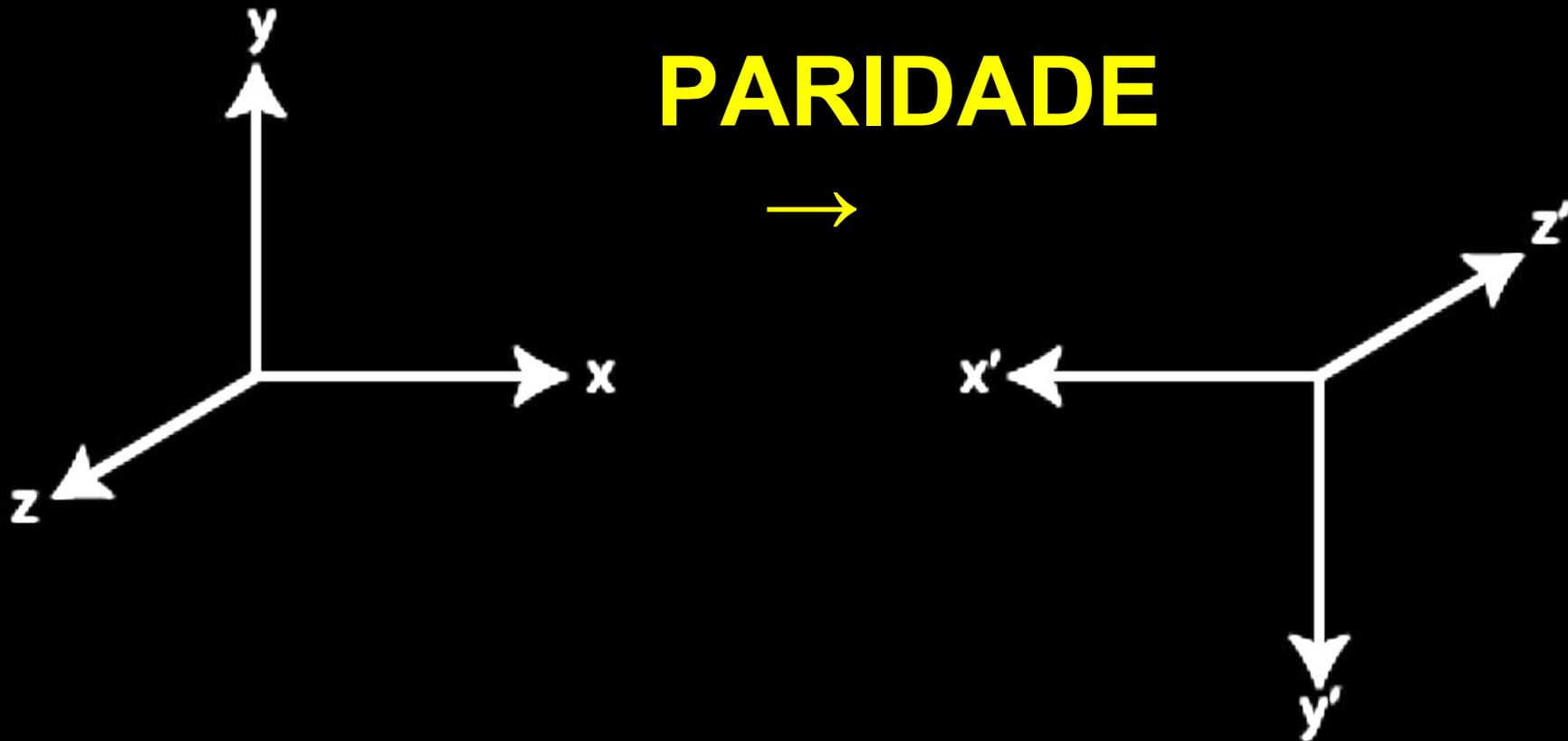
Donald Trump



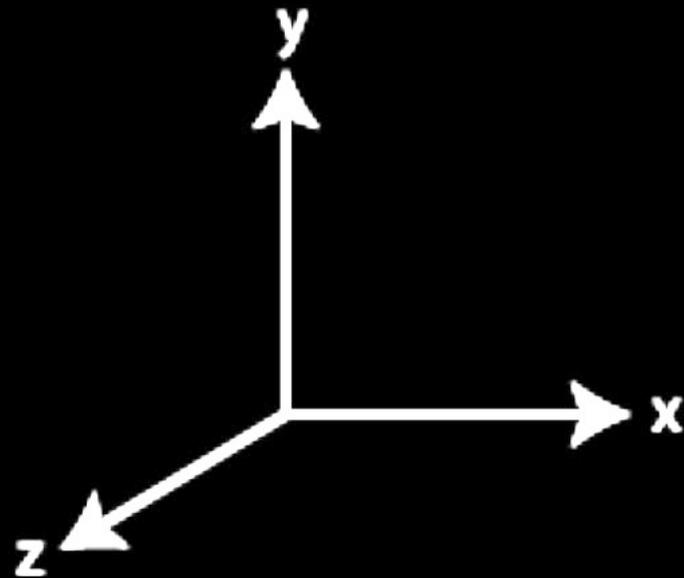
**INTERAGE APENAS COM A DIREITA
IGNORA A ESQUERDA**

INTERAÇÃO TRUMP É QUIRAL !!!

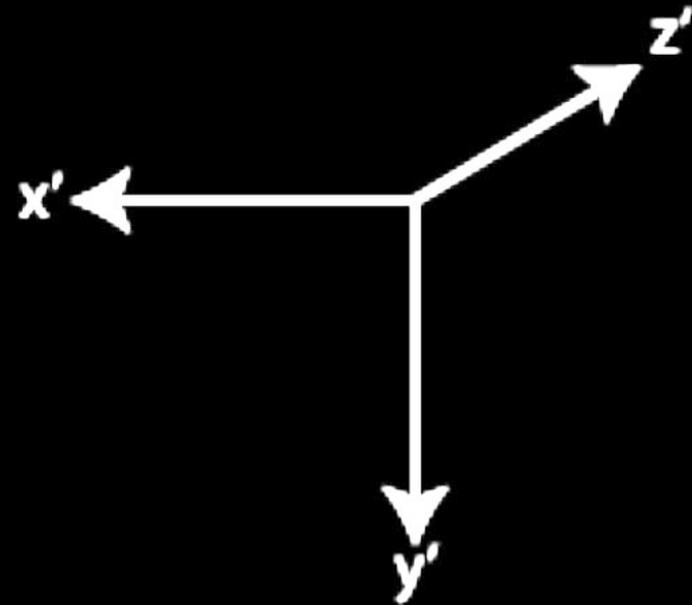
QUIRALIDADE X HELICIDADE



QUIRALIDADE X HELICIDADE



PARIDADE



MÃO DIREITA

MÃO ESQUERDA

MASSA E QUIRALIDADE DAS PARTÍCULAS

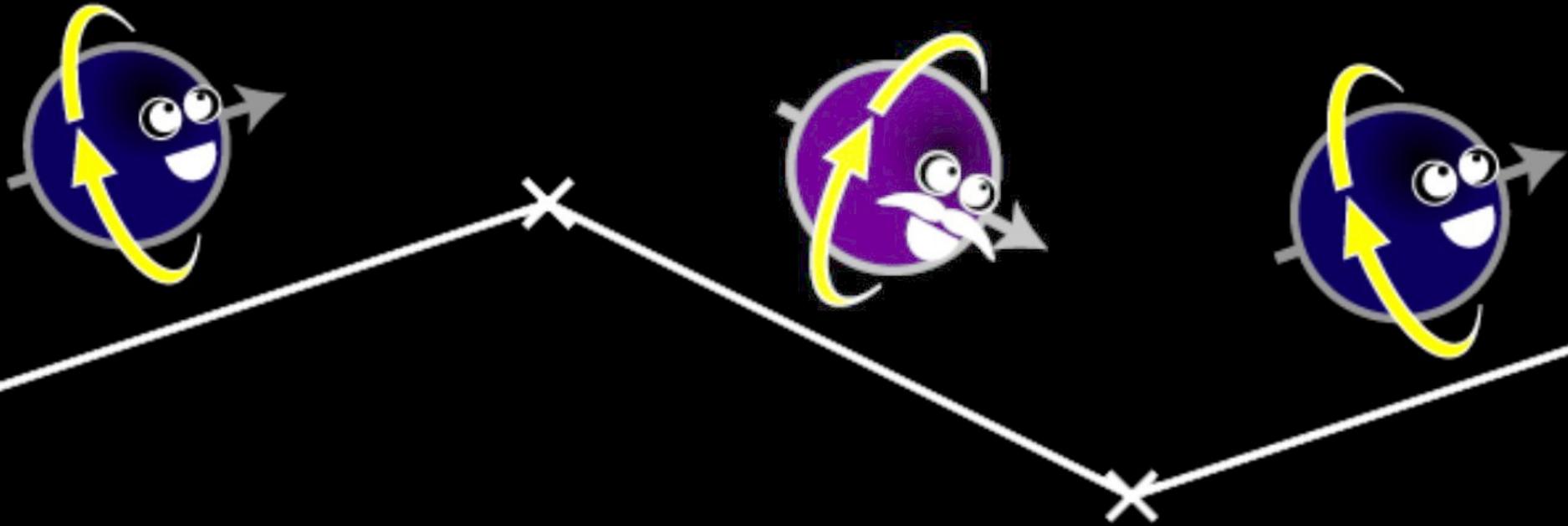
**PARTÍCULAS NASCEM SEM MASSA E LEVÓGIRAS
ANTIPARTÍCULAS NASCEM SEM MASSA E DESTRÓGIRAS**

ADQUIREM MASSA AO INTERAGIR COM O CAMPO DE HIGGS

**SE NÃO INTERAGEM COM O CAMPO DE HIGGS ELAS PERMANECEM
SEM MASSA**

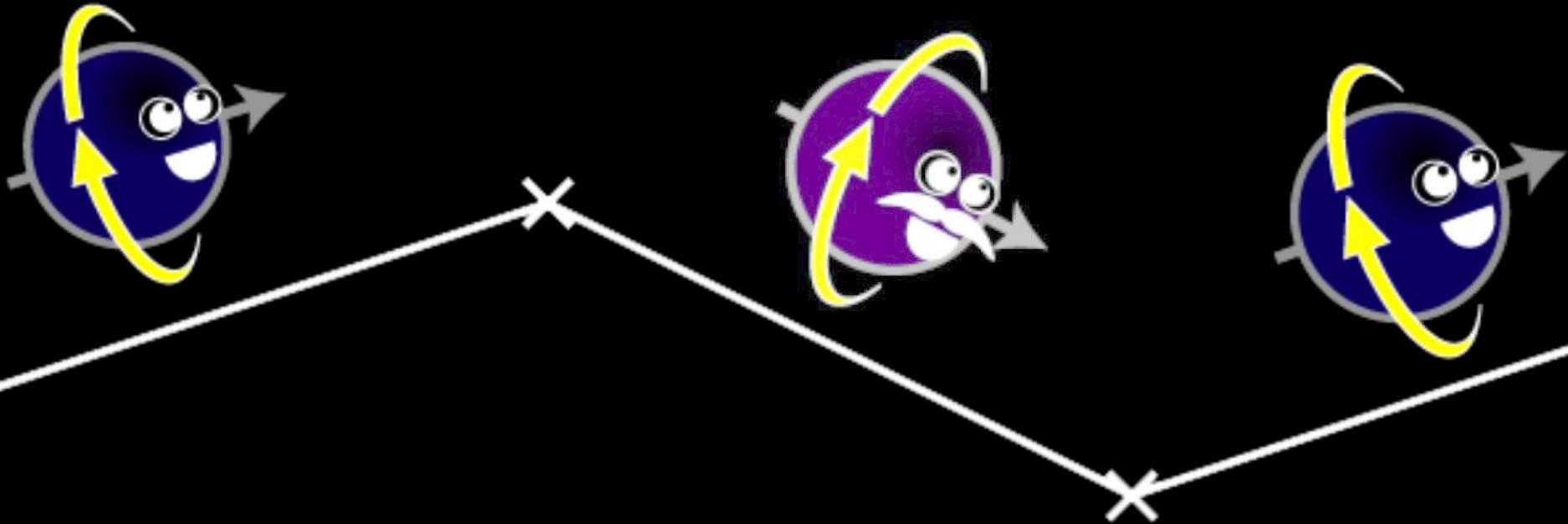
**QUANTO MAIS INTERAÇÕES COM O CAMPO DE HIGGS
MAIS MASSA É ADQUIRIDA**

A CADA INTERAÇÃO A QUIRALIDADE É INVERTIDA



**PARTÍCULAS GANHAM MASSA AO INTERAGIR COM O CAMPO DE HIGGS !!
A CADA “BATIDA” A QUIRALIDADE DA PARTÍCULA É INVERTIDA !!!**

INTERAÇÃO COM HIGGS PRESERVA A HELICIDADE MAS NÃO A QUIRALIDADE !!!



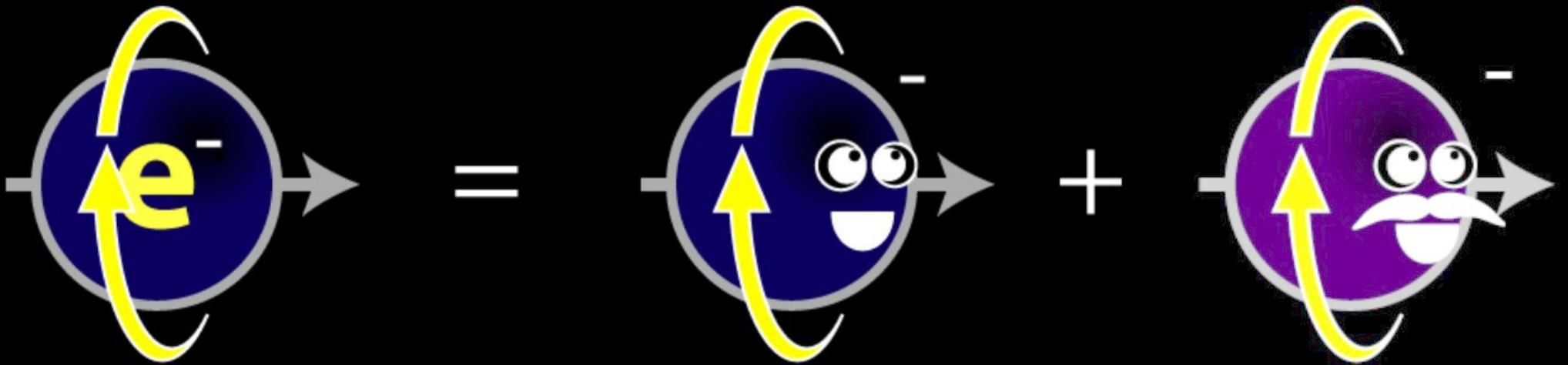
**PARTÍCULAS GANHAM MASSA AO INTERAGIR COM O CAMPO DE HIGGS !!
A CADA “BATIDA” A QUIRALIDADE DA PARTÍCULA É INVERTIDA !!!**

INTERAÇÃO COM HIGGS PRESERVA A HELICIDADE MAS NÃO A QUIRALIDADE !!!

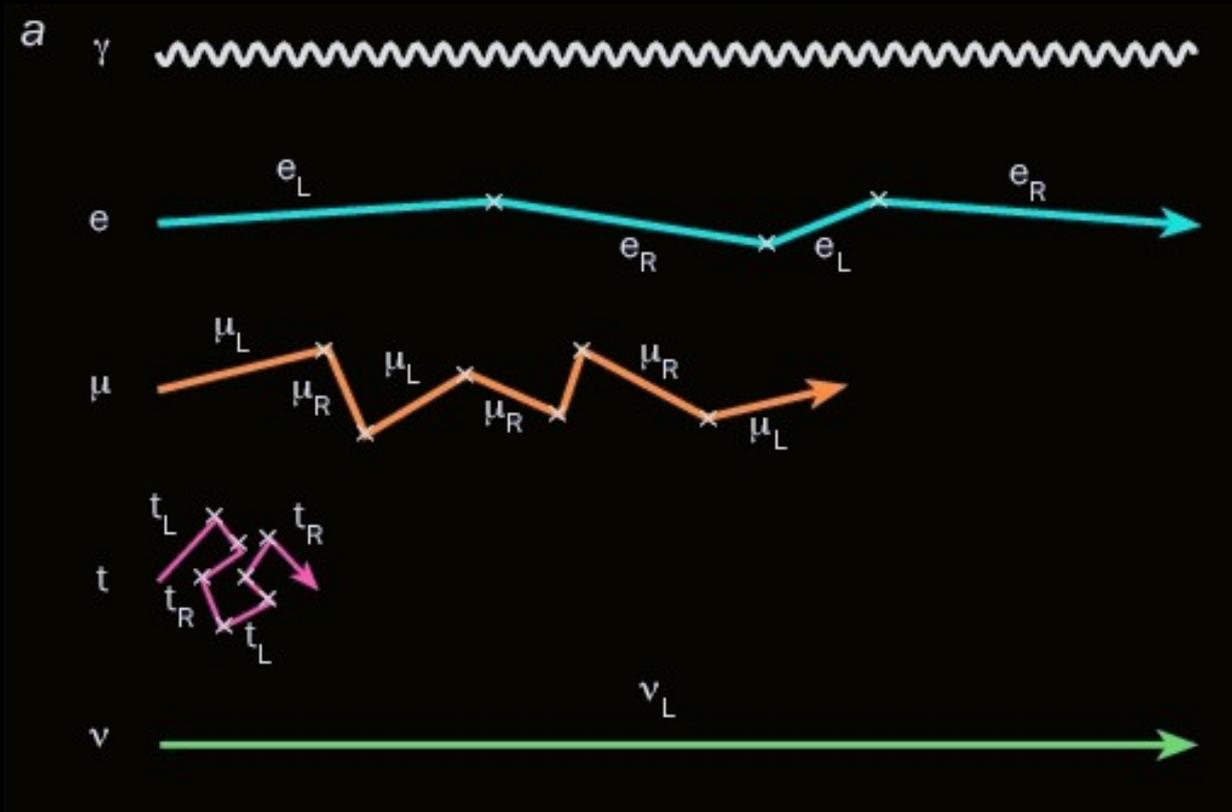
PARTÍCULAS SEM MASSA → QUIRALIDADE = HELICIDADE

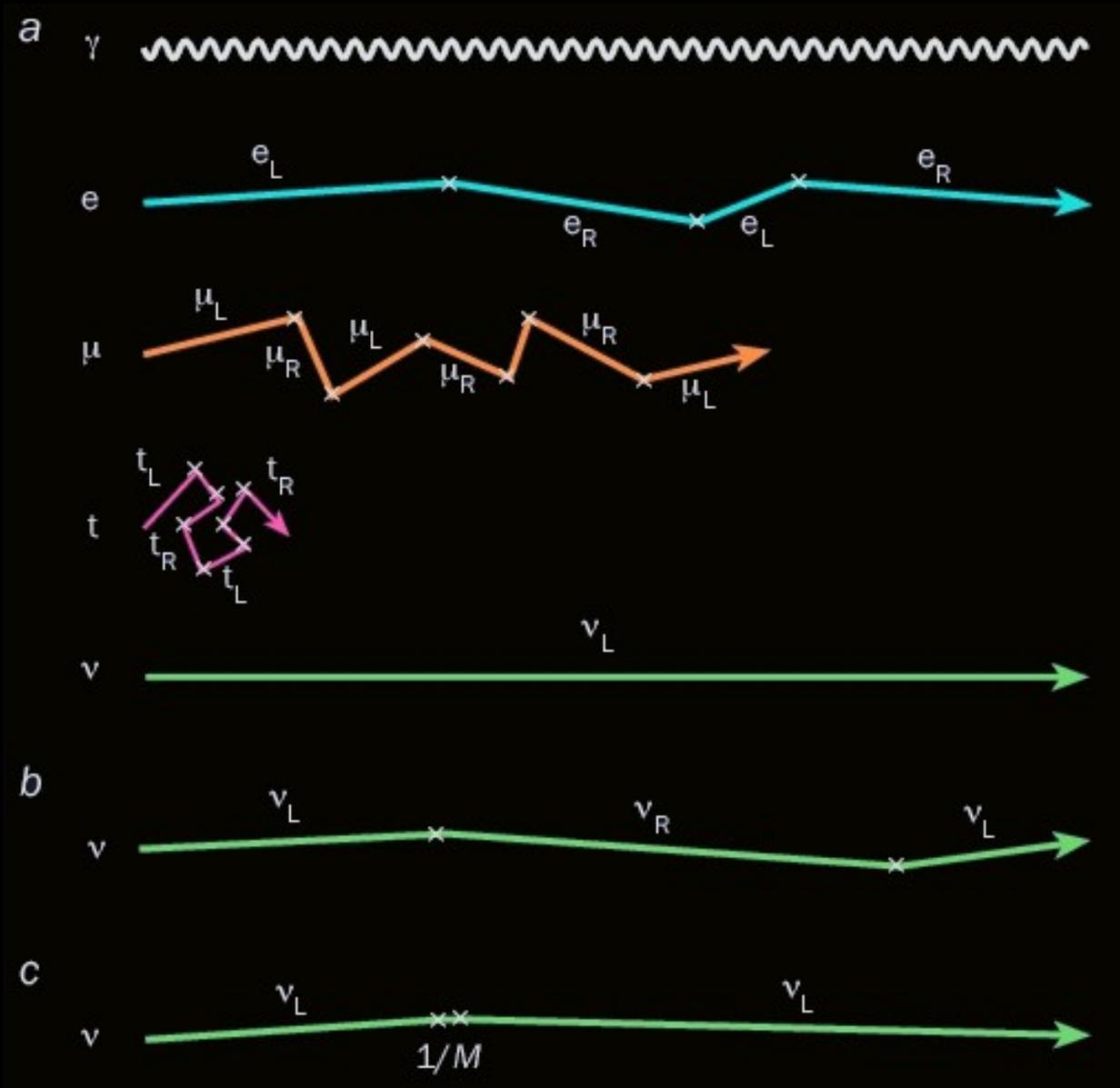
**QUANTO MENOR A MASSA, MAIOR A VELOCIDADE,
MAIS A CHIRALITY SE APROXIMA DA HELICIDADE**

PARTÍCULAS COM MASSA → COMPONENTES DE AMBAS AS CHIRALIDADES



QUIRALIDADE E HELICIDADE SÃO A MESMA APENAS PARA PARTÍCULAS SEM MASSA
QUIRALIDADE É INTRÍNICA À PARTÍCULA
HELICIDADE DEPENDE DO SISTEMA DE REFERÊNCIA
INTERAÇÃO FRACA VÊ APENAS A COMPONENTE LEVÓGIRA
(OU A COMPONENTE DESTRÓGIRA EM ANTIPARTÍCULA)





Neutrinos são quirais !!

Neutrinos são de mão esquerda (quiral)
e
antineutrinos são de mão direita (quiral)

Weak interaction couples only to left-handed chiral particles
and
to right-handed chiral antiparticles

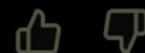
Existe um quarto neutrino?



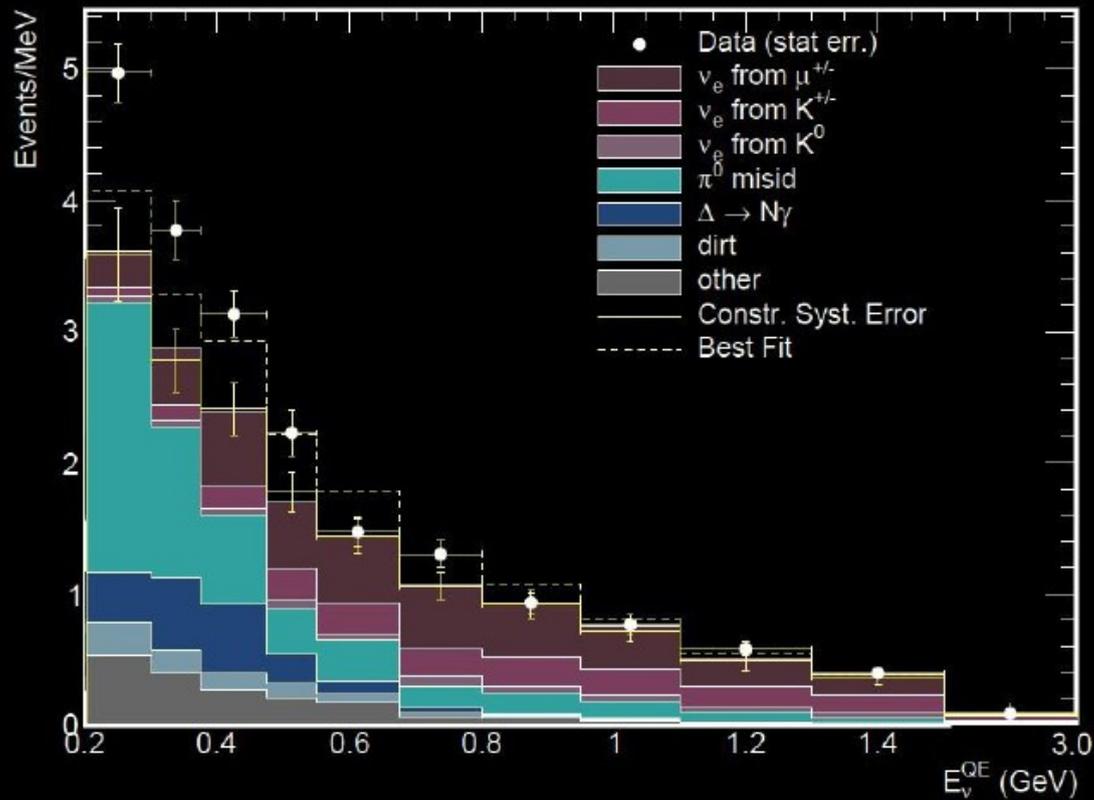
Atualmente, não há evidências conclusivas de um quarto neutrino. Os três tipos conhecidos de neutrinos - o neutrino do elétron, o neutrino do múon e o neutrino do tau - foram confirmados em experimentos e observações, e a oscilação entre esses três tipos é bem compreendida na física de partículas.

No entanto, alguns experimentos recentes relataram a observação de anomalias nos dados que podem ser explicadas pela existência de um quarto neutrino, às vezes chamado de "neutrino estéril". Esses experimentos incluem o experimento LSND, o MiniBooNE e o experimento Reactor Anomaly, entre outros. No entanto, outros experimentos não observaram nenhuma evidência para um quarto neutrino, e a existência de um quarto neutrino é ainda uma questão em aberto na física de partículas.

Mais estudos e observações serão necessários para determinar se há de fato um quarto neutrino, e se assim for, qual seria sua massa, sabor e outras propriedades.

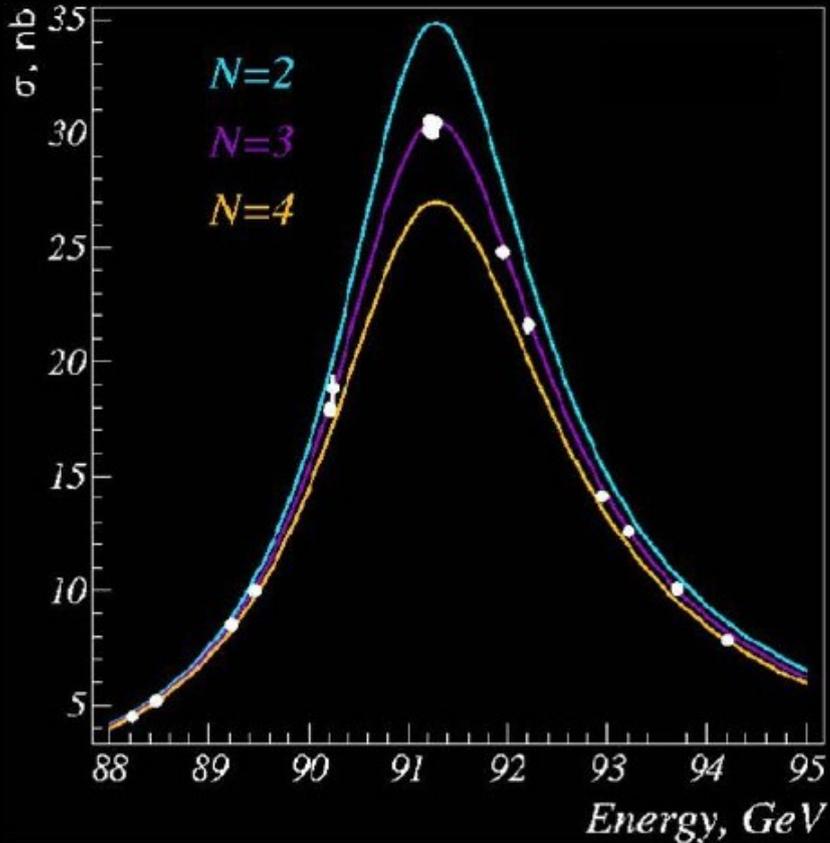


MiniBooNE: excesso de ν_e e $\bar{\nu}_e$



Excesso de $381 + 85,2 \nu_e$
Excesso de $79,3 + 28. \bar{\nu}_e$

O que pode ser ?



Resultados do CERN para a taxa de produção do bóson Z implica a existência de **APENAS** três neutrinos leves.

Podemos considerar a hipótese de neutrinos estéreis não têm nada a ver com o bóson Z

Os neutrinos podem explicar a assimetria matéria-antimatéria?



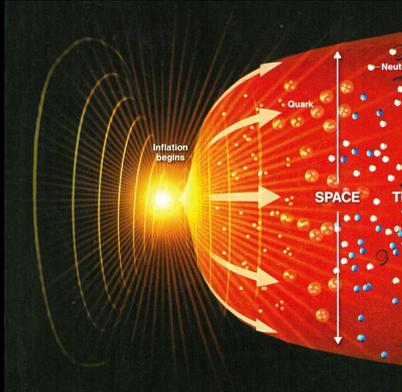
Os neutrinos não podem explicar diretamente a assimetria matéria-antimatéria, que é um dos maiores mistérios da física. A assimetria matéria-antimatéria refere-se ao fato de que o universo é composto quase inteiramente de matéria, enquanto a antimatéria parece ter desaparecido quase completamente após o Big Bang.



Embora os neutrinos não possam explicar a assimetria matéria-antimatéria por si só, eles podem estar indiretamente relacionados a ela. Algumas teorias propõem que os neutrinos têm uma pequena quantidade de assimetria matéria-antimatéria em sua própria natureza, o que poderia ter influenciado a evolução do universo logo após o Big Bang.

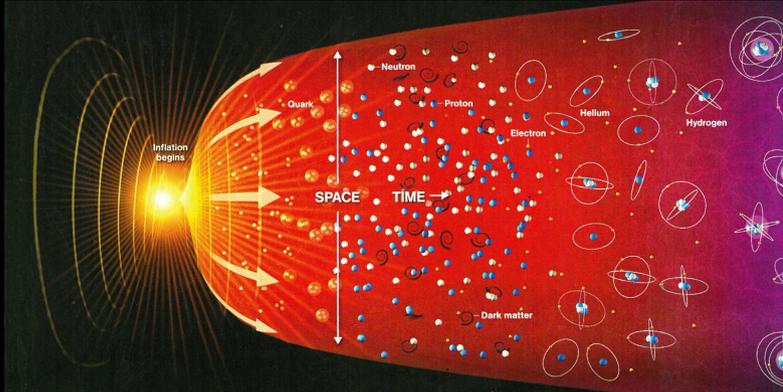
Além disso, a detecção de neutrinos pode ajudar os cientistas a entender melhor o universo primitivo e a natureza da matéria e antimatéria. Experimentos que medem as propriedades dos neutrinos e sua oscilação podem fornecer informações importantes sobre as condições do universo logo após o Big Bang, ajudando a explicar a assimetria matéria-antimatéria e outras questões fundamentais da física.

O início



Big Bang: matéria e antimatéria são criadas em quantidades iguais

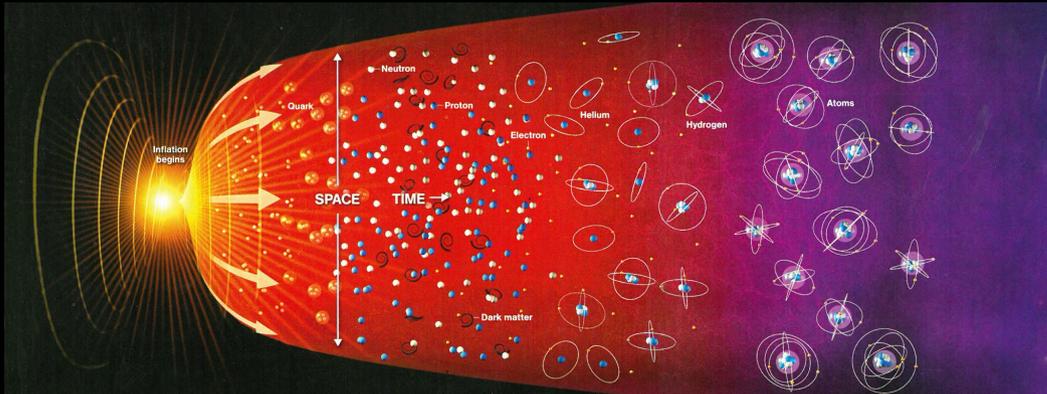
O início



Big Bang: matéria e antimatéria são criadas em quantidades iguais

A medida que o universo esfria matéria e antimatéria se aniquilam

O início



Big Bang: matéria e antimatéria são criadas em quantidades iguais

A medida que o universo esfria matéria e antimatéria se aniquilam

Sendo tudo igual, nenhuma matéria/antimatéria permanece, sobra apenas luz

O início



Big Bang: matéria e antimatéria são criadas em quantidades iguais

A medida que o universo esfria matéria e antimatéria se aniquilam

Sendo tudo igual, nenhuma matéria/ permanece, sobra apenas luz

ISTO NÃO ACONTECE !!! HÁ MATÉRIA NO UNIVERSO
Diferenças entre matéria e antimatéria (violação de simetria CP?)

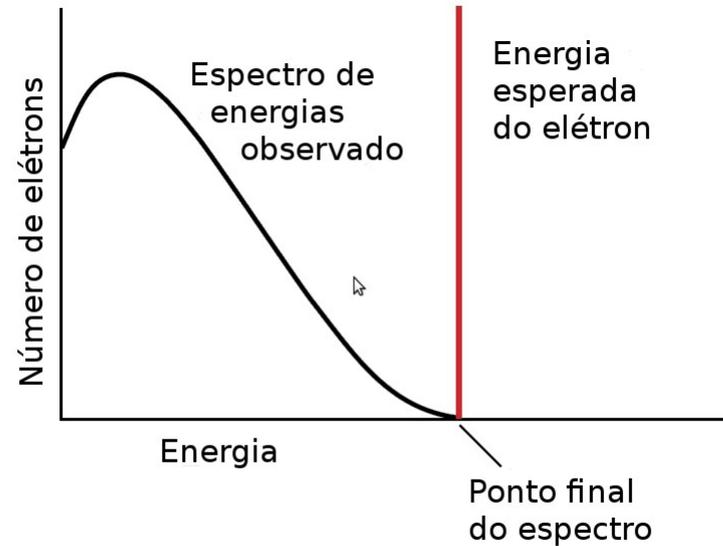
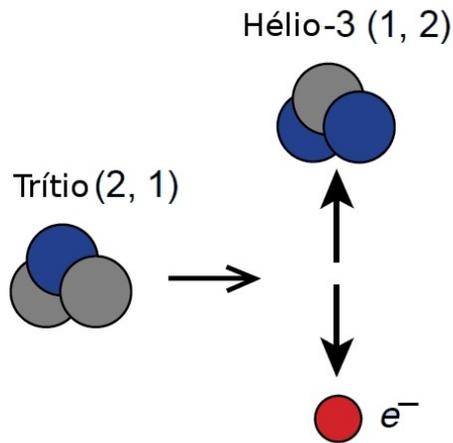
NEUTRINOS NÃO TÊM CARGA ELÉTRICA
NEUTRINOS NÃO TÊM COR
NEUTRINOS TÊM MASSA MUUUUUUUUITO PEQUENA
NEUTRINOS SÃO LEVÓGIROS
NEUTRINOS TÊM TRÊS SABORES
NEUTRINOS VIOLAM CP
NEUTRINOS SÃO LEGAIS!

OBRIGADO!!!

Como jóia fulgurante, a cidade jazia sobre o seio do deserto. No passado, havia conhecido mudanças e inovações, mas agora tudo estava imóvel no tempo. Noites e dias passavam sobre a face do deserto, mas nas ruas de Diaspar era sempre crepúsculo, e a escuridão jamais chegava. As longas noites de inverno cobriam o deserto de geada, ao se congelar a última umidade caída no ar rarefeito da Terra - mas a cidade não sofria calor ou frio. Não tinha contato com o mundo exterior. Era, em si mesma, um universo.

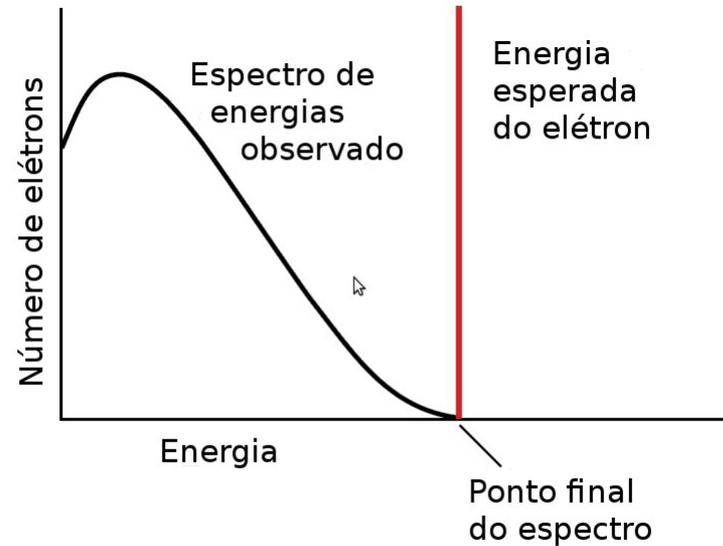
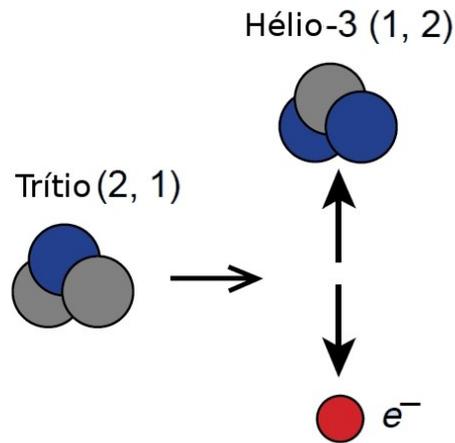
Decaimento beta

Decaimento de dois corpos



Decaimento beta

Decaimento de dois corpos



FALTA ENERGIA !!!

De que é capaz um cientista desesperado

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, how because of the "wrong" statistics of the N and Li6 nuclei and the continuous beta spectrum, I have hit upon a desperate remedy to save the "exchange theorem" of statistics and the law of conservation of energy. Namely, the possibility that there could exist in the nuclei electrically neutral particles, that I wish to call neutrons, which have spin 1/2 and obey the exclusion principle and which 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 masses. The continuous beta spectrum would then become understandable by the assumption that in beta decay a neutron is emitted in addition to the electron such that the sum of the energies of the neutron and the electron is constant... ..

Unfortunately, I cannot appear in Tübingen personally since I am indispensable here in Zurich because of a ball on the night of 6/7 December. With my best regards to you, and also to Mr Back.

Your humble servant,

W. Pauli

Wolfgang Pauli



De que é capaz um cientista desesperado

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, how because of the "wrong" statistics of the N and Li6 nuclei and the continuous beta spectrum, I have hit upon a desperate remedy to save the "exchange theorem" of statistics and the law of conservation of energy. Namely, the possibility that there could exist in the nuclei electrically neutral particles that I wish to call

neutrons

principle

they do not

neutrons

electron

masses.

understandable by the assumption that in beta decay a neutron is emitted in addition to the electron such that the sum of the energies of the neutron and the electron is constant... ..

Unfortunately, I cannot appear in Tübingen personally since I am indispensable here in Zurich because of a ball on the night of 6/7 December. With my best regards to you, and also to Mr Back.

Your humble servant,

W. Pauli

Encontrei um remédio desesperado para salvar o teorema de troca da estatística e a lei de conservação da energia

Wolfgang Pauli



De que é capaz um cientista desesperado

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, how because of the "wrong" statistics of the N and Li6 nuclei and the continuous beta spectrum, I have hit upon a desperate remedy to save the "exchange theorem" of statistics and the law of conservation of energy. Namely, the possibility that there could exist in the nuclei electrically neutral particles that I wish to call neutrons.

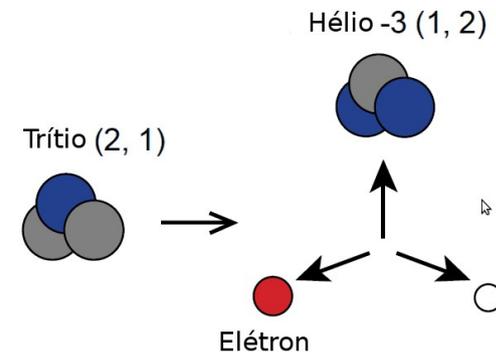
Encontrei um remédio desesperado para salvar o teorema de troca da estatística e a lei de conservação da energia

understandable by the assumption that in beta decay a neutron is emitted in addition to the electron such that the sum of the energies of the neutron and the electron is constant... ..

Unfortunately, I cannot appear in Tübingen personally since I am indispensable here in Zurich because of a ball on the night of 6/7 December. With my best regards to you, and also to Mr Back.

Your humble servant,

W. Pauli



**Decaimento de três corpos
Energia distribuída entre
Elétron e neutrino.**

Energia é conservada !!

De que é capaz um cientista desesperado

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, how because of the "wrong" statistics of the N and Li6 nuclei and the continuous beta spectrum, I have hit upon a desperate remedy to save the "exchange theorem" of statistics and the law of conservation of energy. Namely, the possibility that there could exist in the nuclei electrically neutral particles that I wish to call

neutrons

principle

they do not

neutrons

electron

masses.

understandable

by the assumption that in beta decay a neutron

is emitted in addition to the electron such that the sum of the

energies of the neutron and the electron is constant... ..

Unfortunately, I cannot appear in Tübingen personally since I am indispensable here in Zurich because of a ball on the night of 6/7 December. With my best regards to you, and also to Mr Back.

Your humble servant

W. Pauli

Encontrei um remédio desesperado para salvar o teorema de troca da estatística e a lei de conservação da energia

Eu não posso comparecer pessoalmente em Tübingen pois sou indispensável aqui em Zurique devido a um baile

Wolfgang Pauli



Fiz algo muito ruim ao propor uma partícula que não pode ser detectada. Isto é algo que um teórico jamais deveria fazer. (1931)

Como detectar um neutrino?

Como detectar um neutrino?

Bethe-Peierls calcularam a seção de choque do neutrino como sendo da ordem de

$$10^{-44} \text{ cm}^2$$

Como detectar um neutrino?

Bethe-Peierls calcularam a seção de choque do neutrino como sendo da ordem de

$$10^{-44} \text{ cm}^2$$

Precisa de um bloco de chumbo com alguns anos-luz de comprimento para que um neutrino interaja !!!!!

Como detectar um neutrino?

Bethe-Peierls calcularam a seção de choque do neutrino como sendo da ordem de

$$10^{-44} \text{ cm}^2$$

Precisa de um bloco de chumbo com alguns anos-luz de comprimento para que um neutrino interaja !!!!!

OU

Como detectar um neutrino?

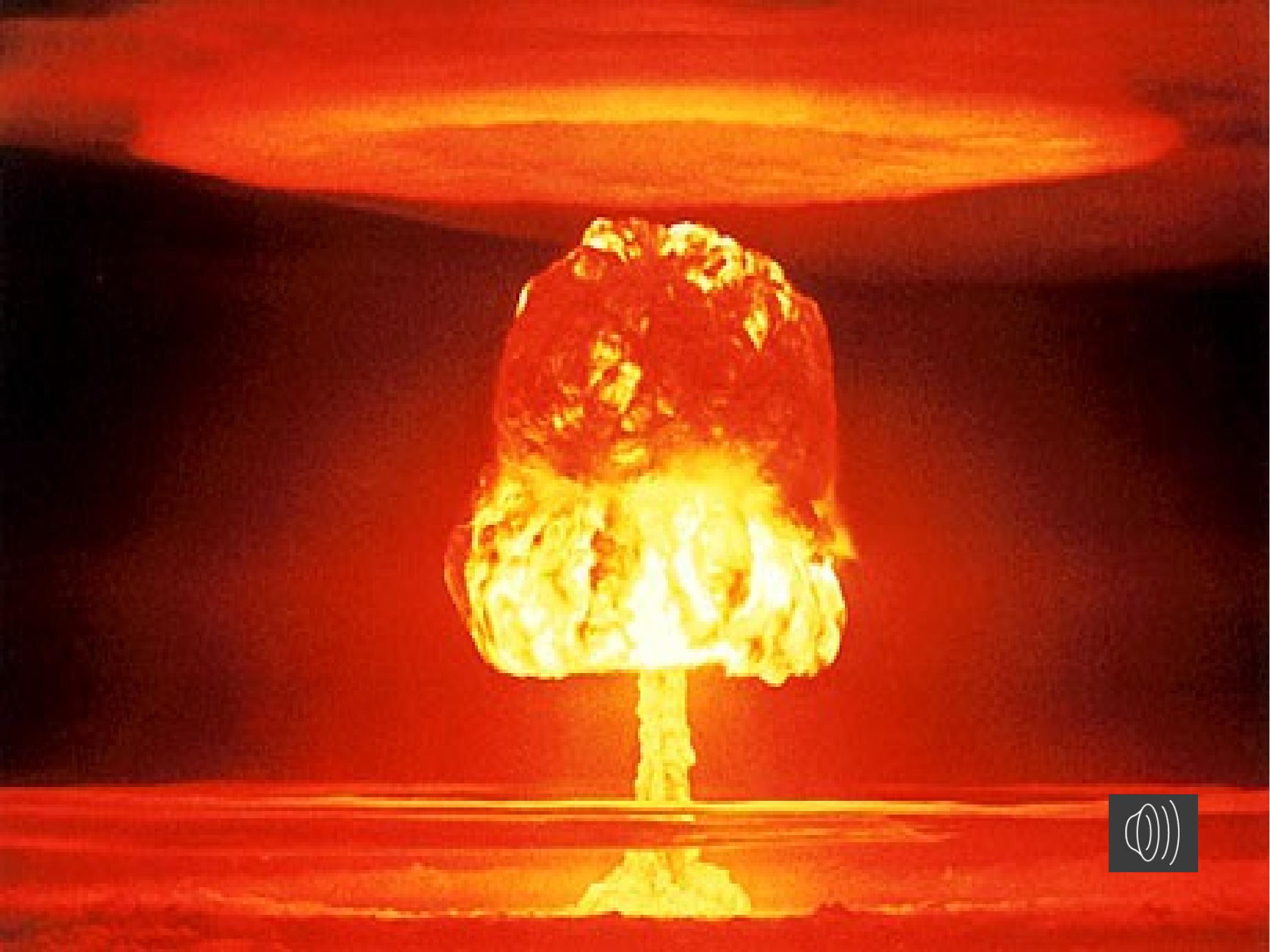
Bethe-Peierls calcularam a seção de choque do neutrino como sendo da ordem de

$$10^{-44} \text{ cm}^2$$

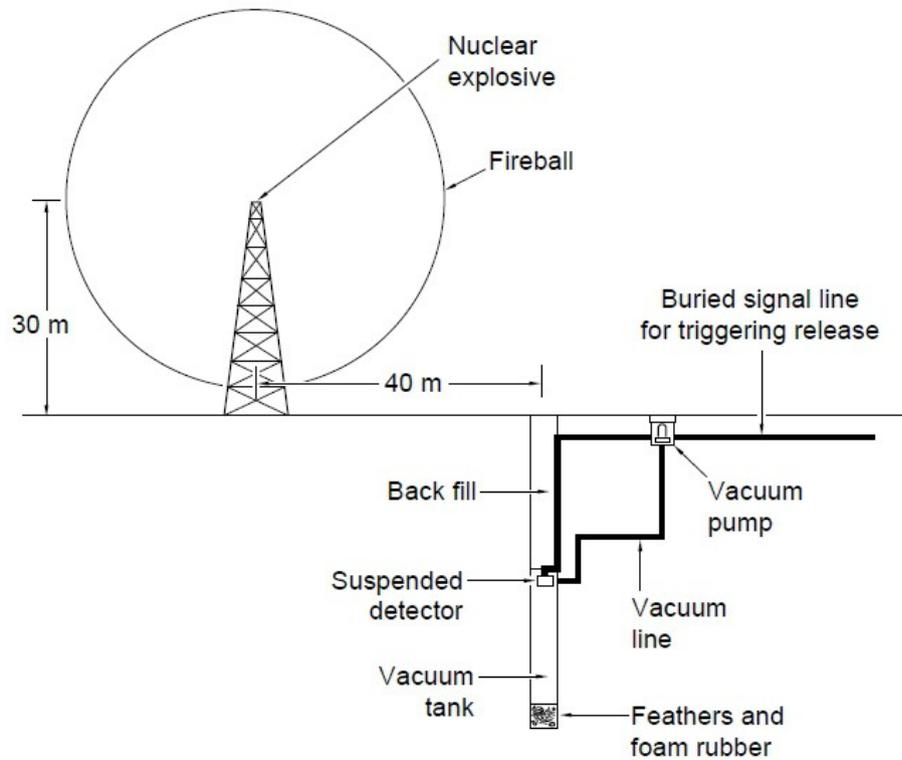
Precisa de um bloco de chumbo com alguns anos-luz de comprimento para que um neutrino interaja !!!!!

OU

zilhões de neutrinos

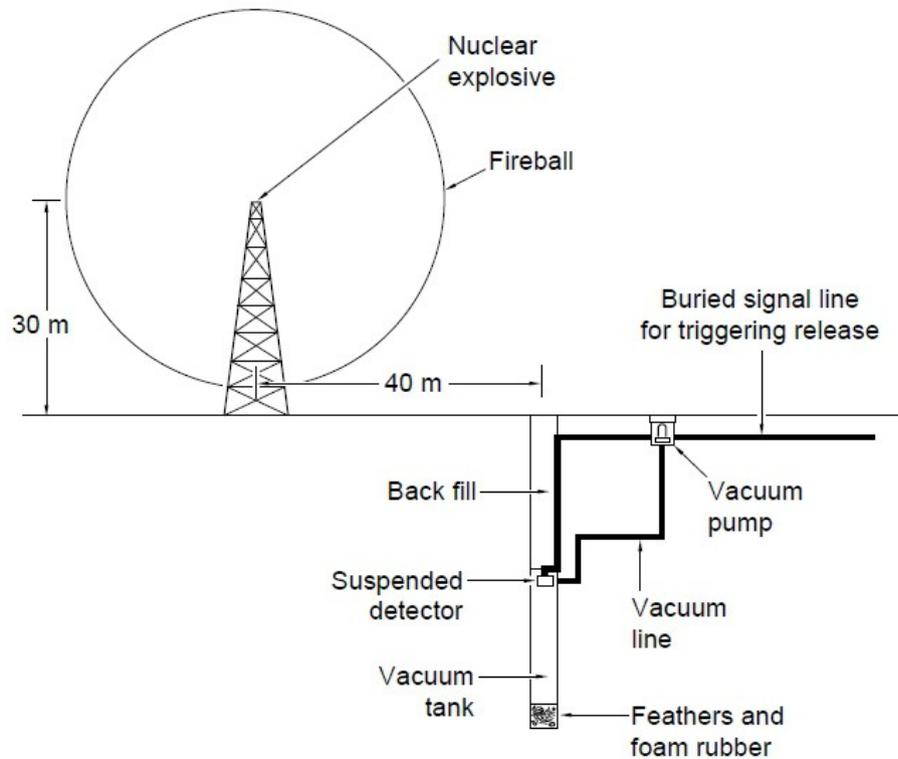


Poltergeist



Poltergeist

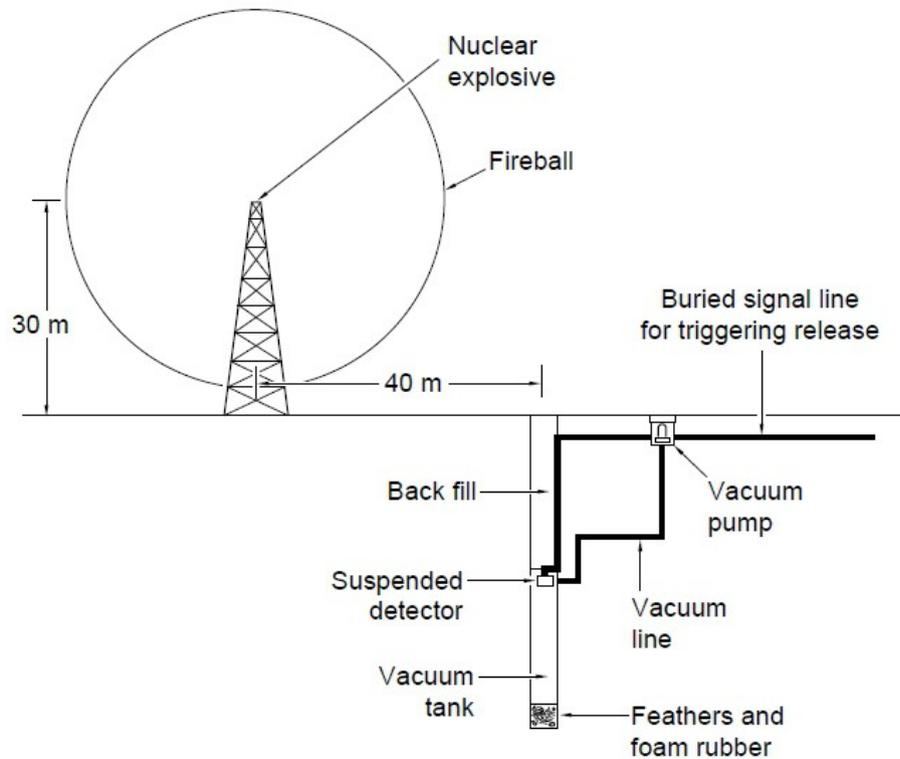
Detector é mantido no topo do poço



Poltergeist

Detector é mantido no topo do poço

Faz-se vácuo no poço

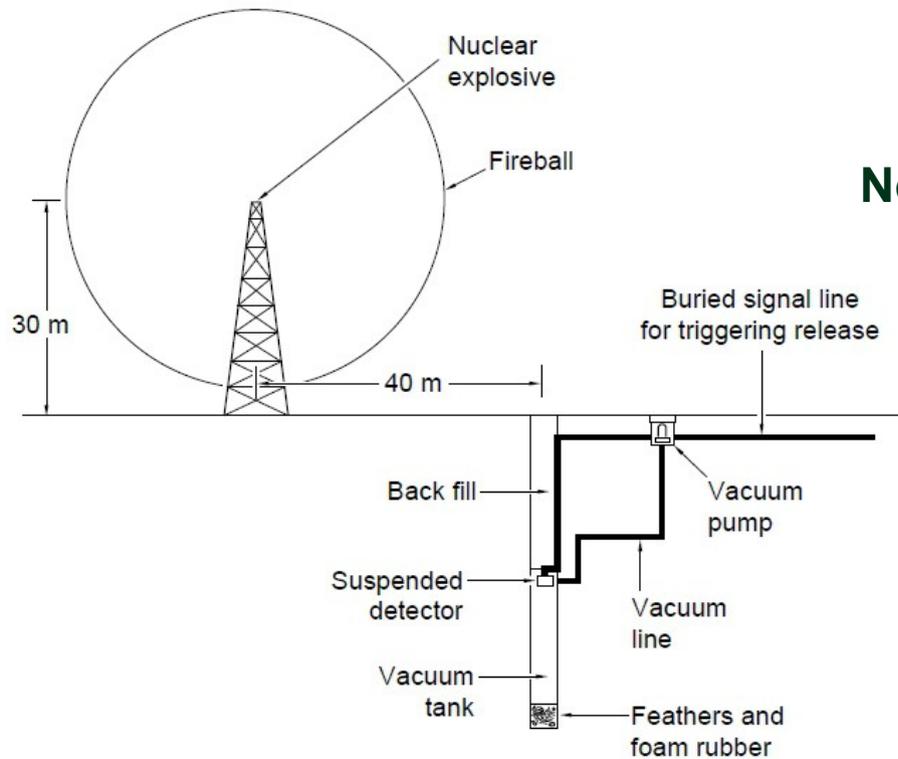


Poltergeist

Detector é mantido no topo do poço

Faz-se vácuo no poço

No momento da explosão o detector é solto



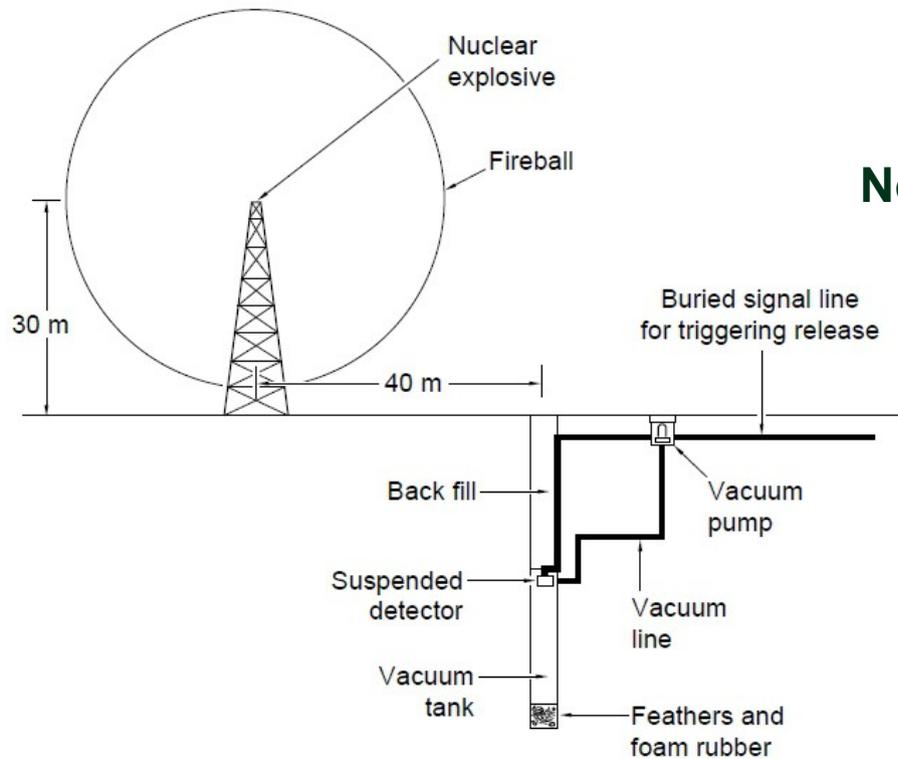
Poltergeist

Detector é mantido no topo do poço

Faz-se vácuo no poço

No momento da explosão o detector é solto

Detector cai no poço por alguns segundos



Poltergeist

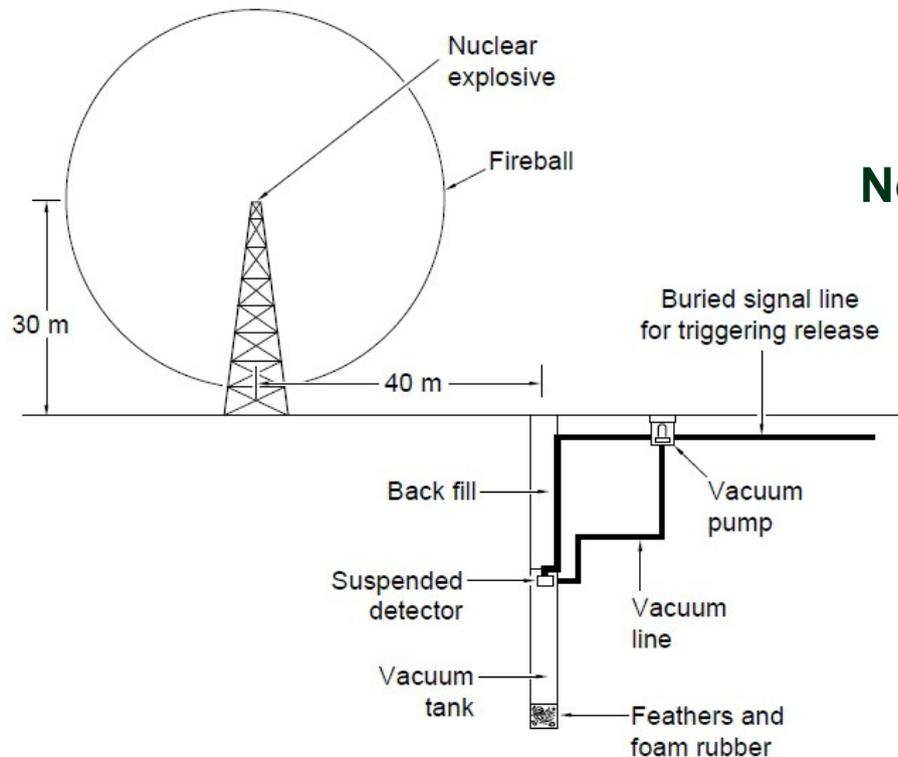
Detector é mantido no topo do poço

Faz-se vácuo no poço

No momento da explosão o detector é solto

Detector cai no poço por alguns segundos

Recebe fluxo intenso de neutrinos



Poltergeist

Detector é mantido no topo do poço

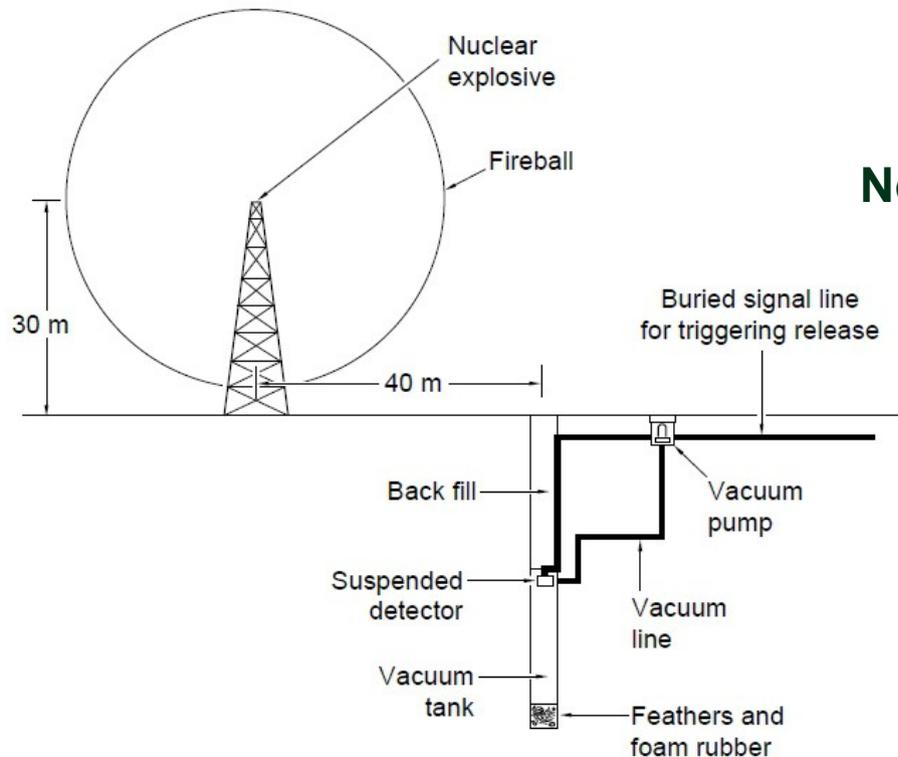
Faz-se vácuo no poço

No momento da explosão o detector é solto

Detector cai no poço por alguns segundos

Recebe fluxo intenso de neutrinos

Após alguns dias detector é recuperado e dados analisados



Neutrinos ! Finalmente !



Decaimento beta inverso

Neutrinos ! Finalmente !



Decaimento beta inverso

Reator nuclear de Savannah River
(Carolina do Sul)



Neutrinos ! Finalmente !



Decaimento beta inverso

Reator nuclear de Savannah River
(Carolina do Sul)

Fluxo de 5×10^{13} neutrinos por
segundo por cm^2



Neutrinos ! Finalmente !

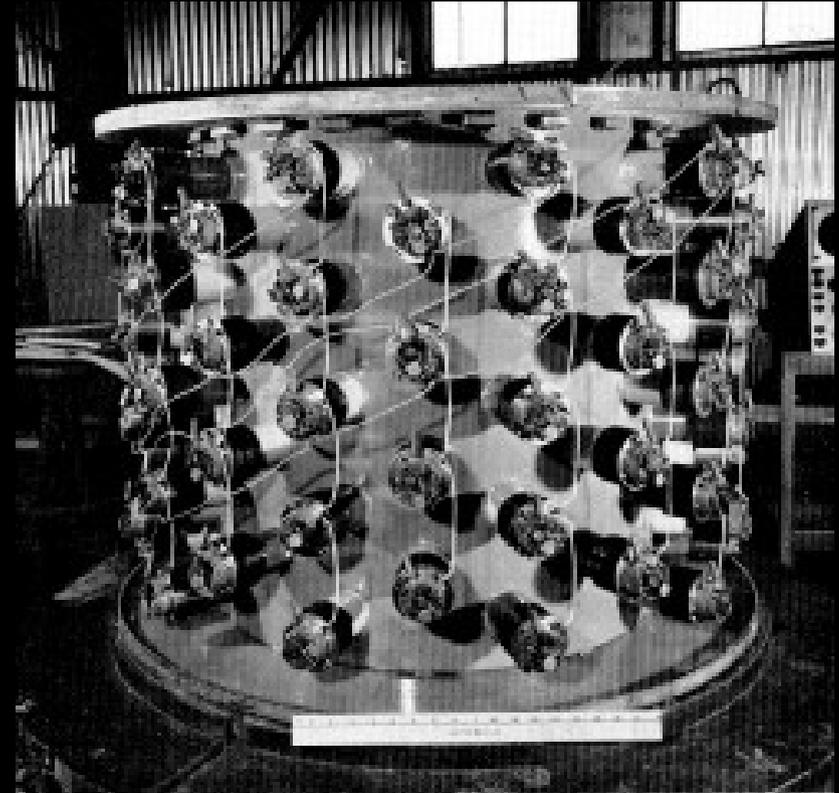


Decaimento beta inverso

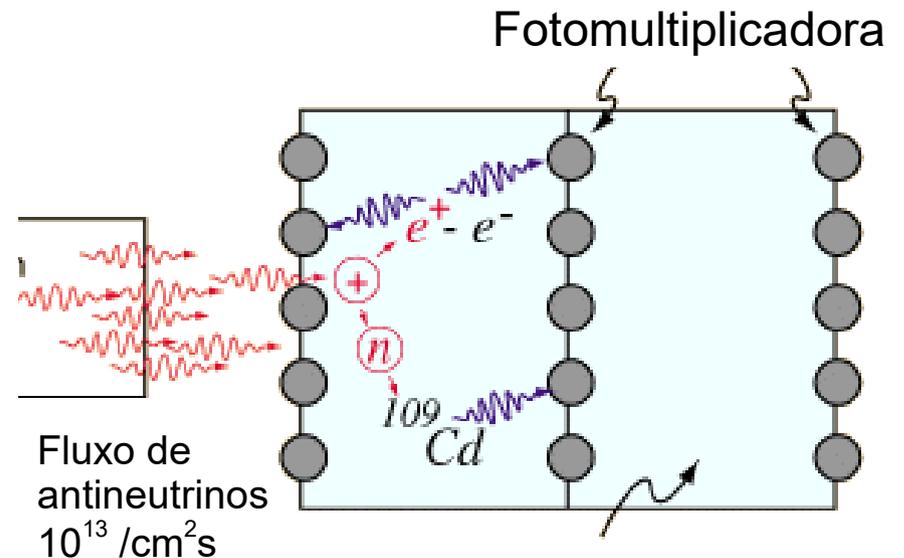
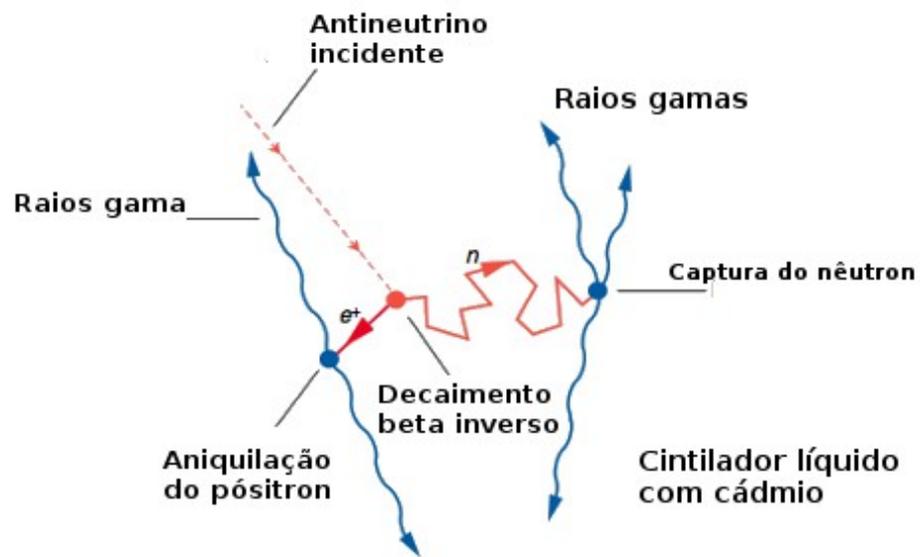
Reator nuclear de Savannah River
(Carolina do Sul)

Fluxo de 5×10^{13} neutrinos por
segundo por cm^2

Dois tanques com 200 L de água
com 40 kg de CdCl_2



Neutrinos ! Finalmente !



Pósitron se aniquila rapidamente com um elétron produzindo dois raios gama

Após cerca de 5 microsegundos o nêutron é capturado por um núcleo de cádmio

Um telegrama aguardado há 25 anos

“[Prof. Pauli], estamos felizes em informá-lo que definitivamente detectamos neutrinos entre os fragmentos de fissão ao observar o decaimento beta inverso.”

- Fred Reines e Clyde Cowan (1956)

“Tudo vem para aquele que sabe esperar.”

- Wolfgang Pauli (1956)

Famílias e sabores no Modelo padrão

1962 – Schwartz, Lederman e Steinberger demonstram a existência de um segundo tipo de neutrino que produz múons, ao invés de elétrons, quando interagem

Esta descoberta foi a primeira indicação da estrutura de família no Modelo Padrão.

O terceiro (e último?) neutrino foi detectado apenas em 2000 pelo experimento DONUT no FERMILAB, (70 anos após a hipótese de Pauli).

| | I | II | III | |
|---------|---------|-----------|------------|--|
| Quarks | u | c | t | |
| | d | s | b | |
| Leptons | ν_e | ν_μ | ν_τ | |
| | e | μ | τ | |

Três gerações de matéria

Interações básicas dos neutrinos

Todas as partículas de um mesmo tipo são idênticas
Todos os elétrons são idênticos

Há três tipos (ou sabores) de partículas da mesma família que os elétrons

| Partícula | Símbolo | Massa | Neutrino associado |
|------------------|----------------|--------------|---------------------------|
| elétron | e | 1 | ν_e |
| múon | μ | 200 | ν_μ |
| tau | τ | 3500 | ν_τ |

**Léptons
carregados**

**Neutrinos ou
léptons neutros**

Neutrinos são sempre produzidos ou destruídos (por interação fraca) em associação com seu parceiro carregado.

Interações básicas dos neutrinos

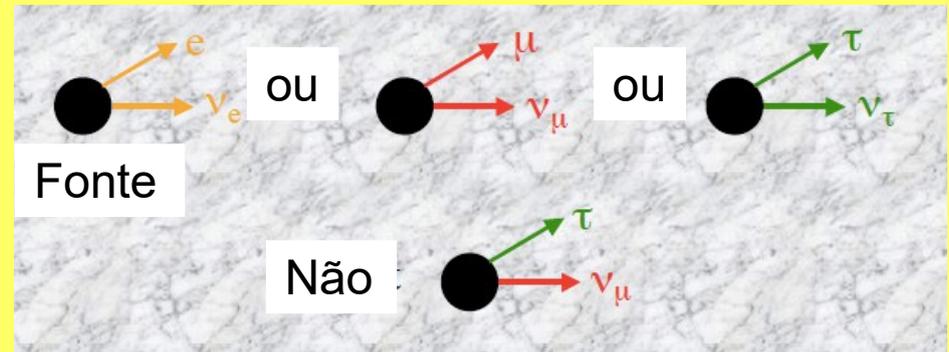
Criação

Detecção

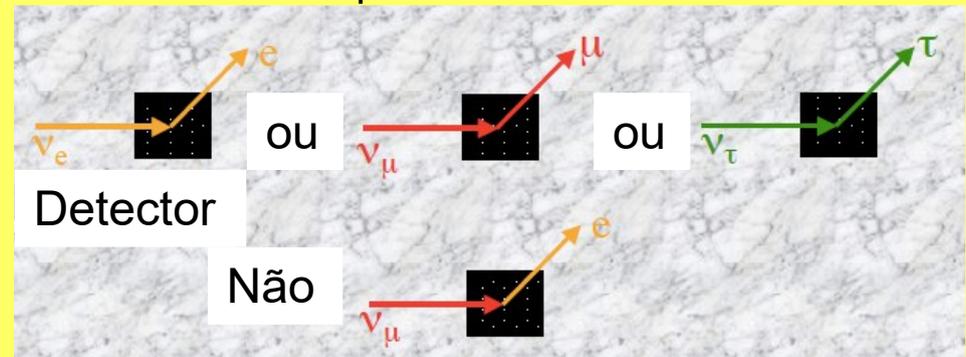
Estas são chamadas de interações de corrente carregada (o neutrino muda de carga elétrica).

Há também interações de corrente neutra quando ocorre uma interação elástica.

O neutrino e lépton carregado tem sempre o mesmo sabor



Quando um neutrino colide com um átomo em um detector, ele cria um lépton carregado. O lépton carregado sempre tem o mesmo sabor que o neutrino.



Fontes de neutrinos (na superfície da Terra)

•Sol

<0,5 MeV, 10^{11} /cm² /s

3-14 MeV, 3×10^6 /cm² /s

Raios cósmicos: ~1 GeV, ~5000/m²/sec

•Decaimentos radioativos na Terra:

<3 MeV, 10^6 - 10^7 /cm²/sec

•Supernova. 99% da energia da explosão aparece como neutrinos de todos os tipos.

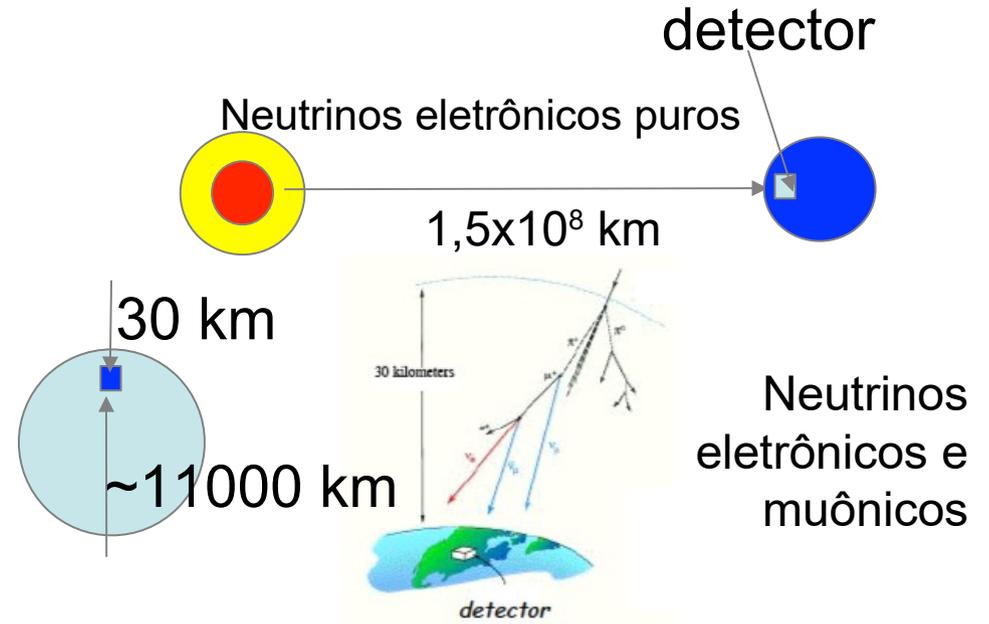
~10 MeV, 20 vistas em 1987.

•CMB ν 300 cm⁻³ @ 2.7 K. (ainda não detectado).

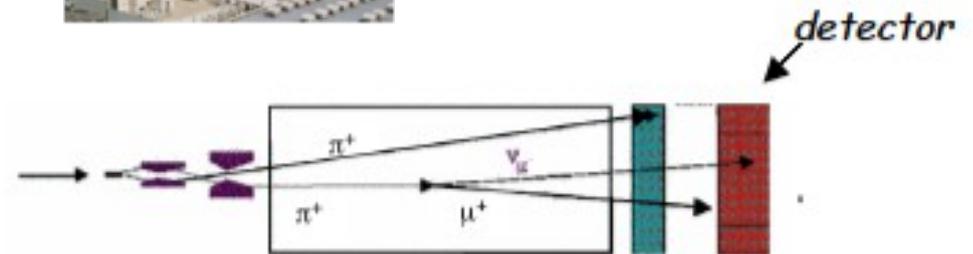
•Reatores nucleares. <10 MeV, 6×10^{20} /3GW(th)

•Feixe de acelerador(10-120 GeV proton)

1-100 GeV, 10^{17} /m²/GeV/MW*ano @1 km.



Fonte pura de anti-neutrino eletrônico. Feixe isotrópico (4Pi).



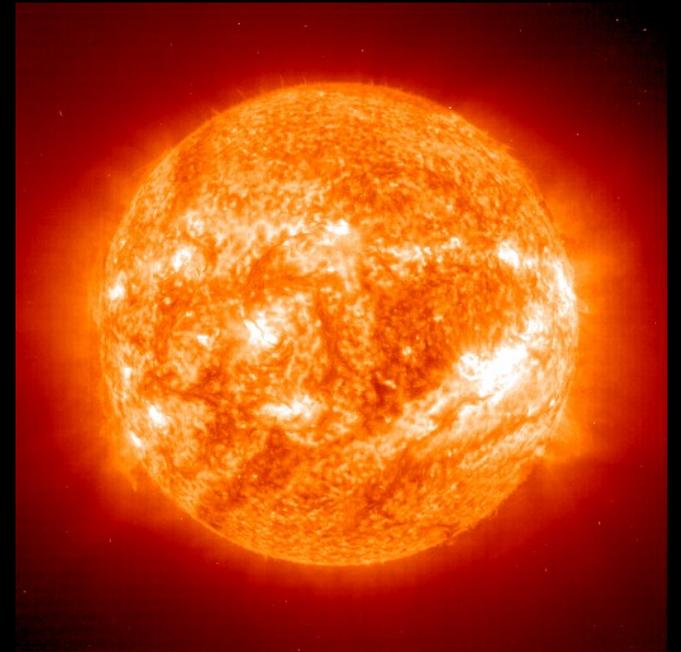
Fonte pura de neutrinos (antineutrinos), pulsada, direta

Minha fonte favorita de neutrinos



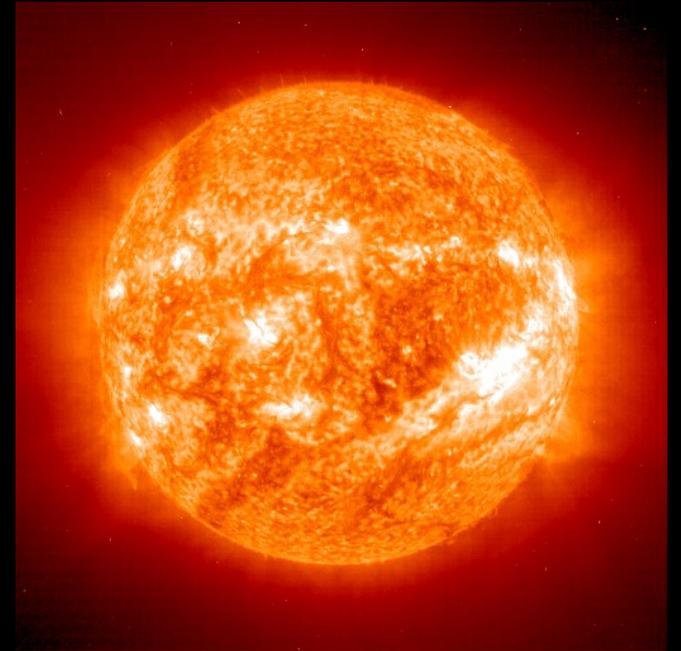
Uma banana emite cerca de 1 milhão de neutrinos por dia devido ao decaimento da pequena quantidade de átomos radioativos de potássio que possui naturalmente

Como o sol pode brilhar por tanto tempo?



Como o sol pode brilhar por tanto tempo?

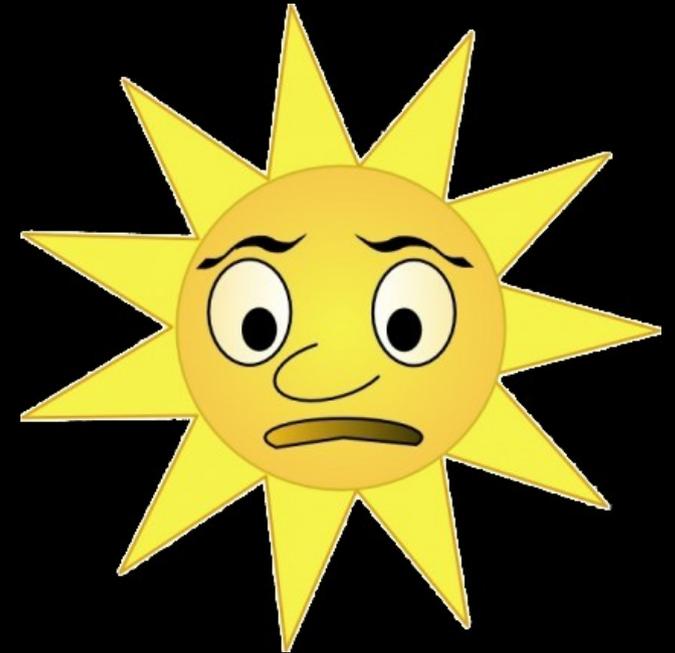
Carvão!! O sol é uma grande bola de carvão!



Como o sol pode brilhar por tanto tempo?

Carvão!! O sol é uma grande bola de carvão!

Não .. teria apagado há muito tempo

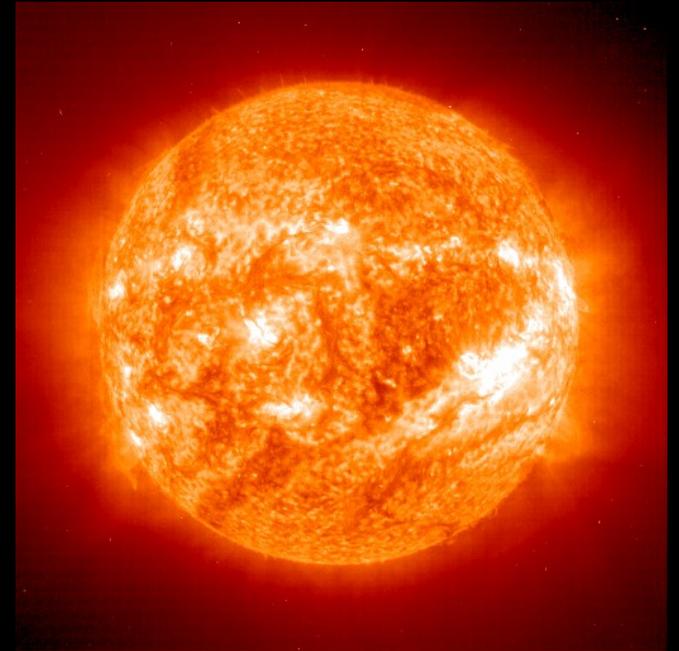


Como o sol pode brilhar por tanto tempo?

Carvão!! O sol é uma grande bola de carvão!

Não .. teria apagado há muito tempo

Mecanismo de contração gravitacional !



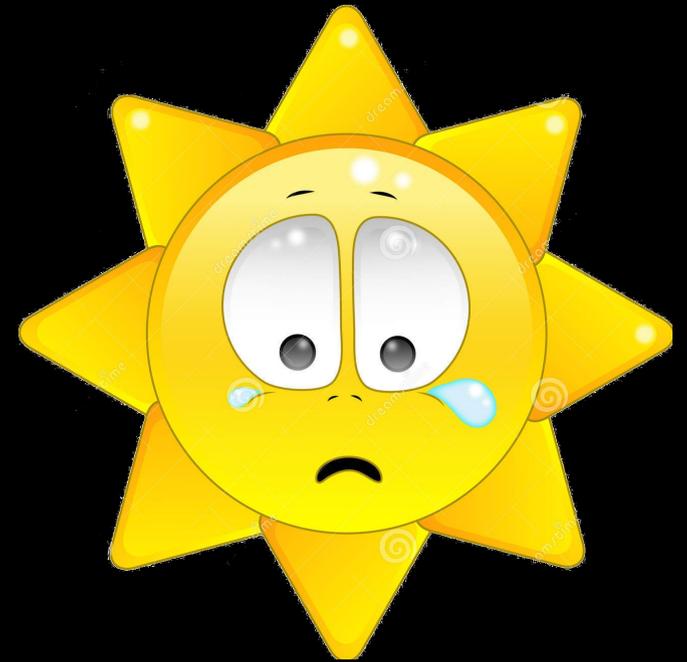
Como o sol pode brilhar por tanto tempo?

Carvão!! O sol é uma grande bola de carvão!

Não .. teria apagado há muito tempo

Mecanismo de contração gravitacional !

Não ... sol teria apenas 20 M de anos



Sou velho pacas !!!

Como o sol pode brilhar por tanto tempo?

Carvão!! O sol é uma grande bola de carvão!

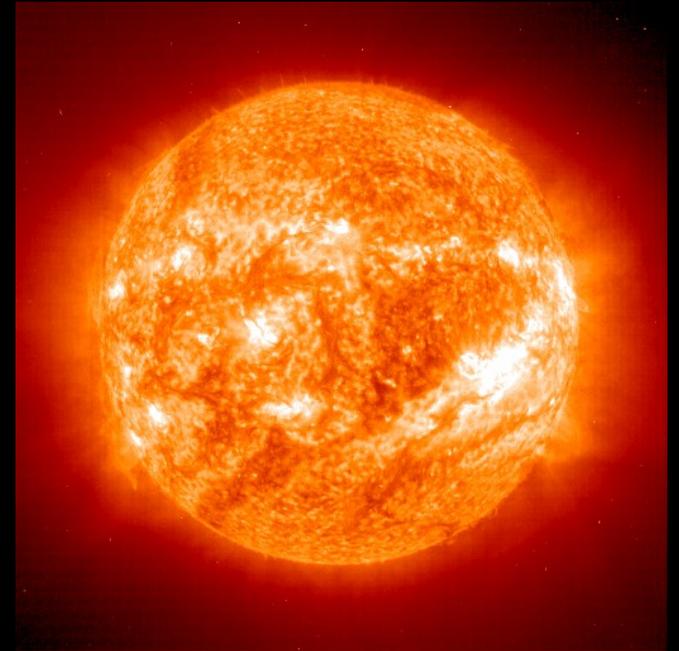
Não .. teria apagado há muito tempo

Mecanismo de contração gravitacional !

Não ... sol teria apenas 20 M de anos

Radioatividade !!!

$$E=mc^2$$



Como o sol pode brilhar por tanto tempo?

Carvão!! O sol é uma grande bola de carvão!

Não .. teria apagado há muito tempo

Mecanismo de contração gravitacional !

Não ... sol teria apenas 20 M de anos

Radioatividade !!!

$$E=mc^2$$



É isto aí !!

Observando o sol

Esperavam ~ 51 átomos de Ar

Encontraram só ~ 17



Observando o sol

Esperavam ~ 51 átomos de Ar

Encontraram só ~ 17

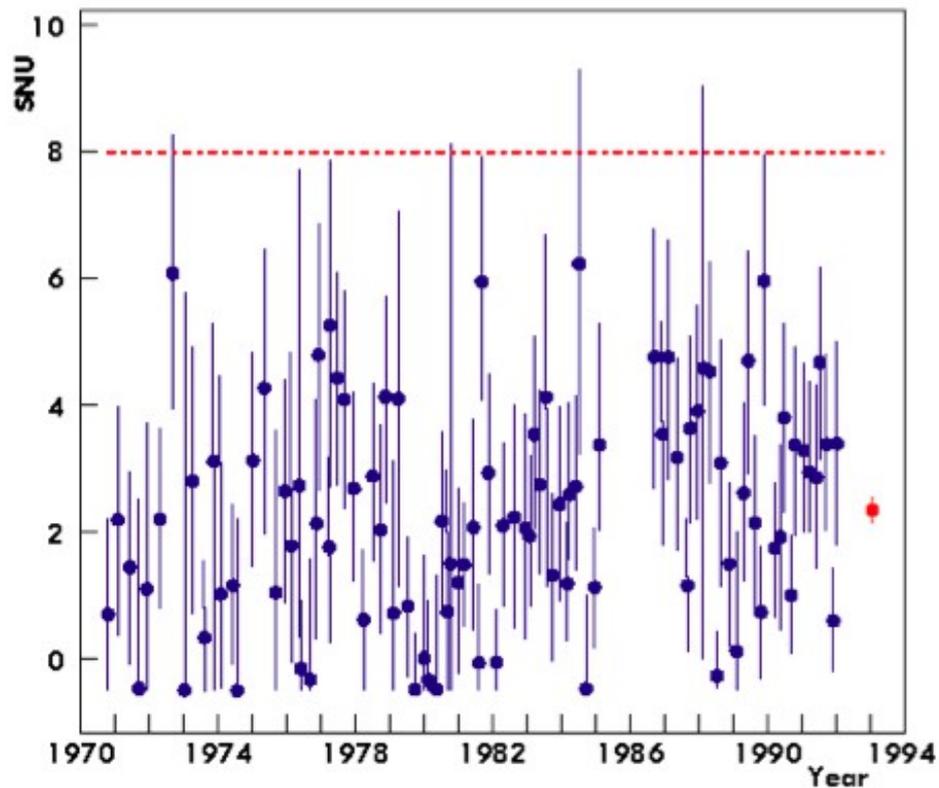
Descrença generalizada

Estes caras conseguiam encontrar 17 átomos

em uma piscina de 25m X 7m X 1,9m ?

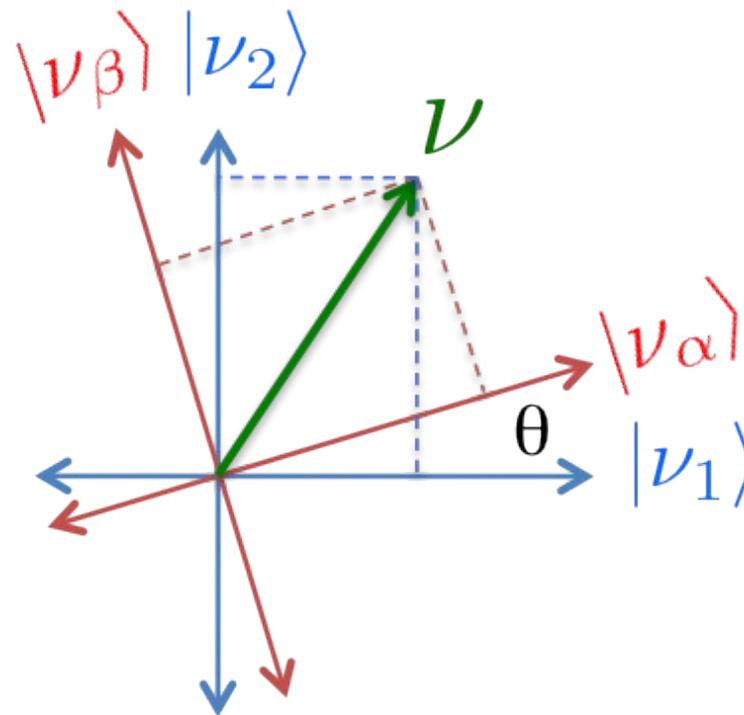


Anomalia dos neutrinos solares



Mistura de dois neutrinos

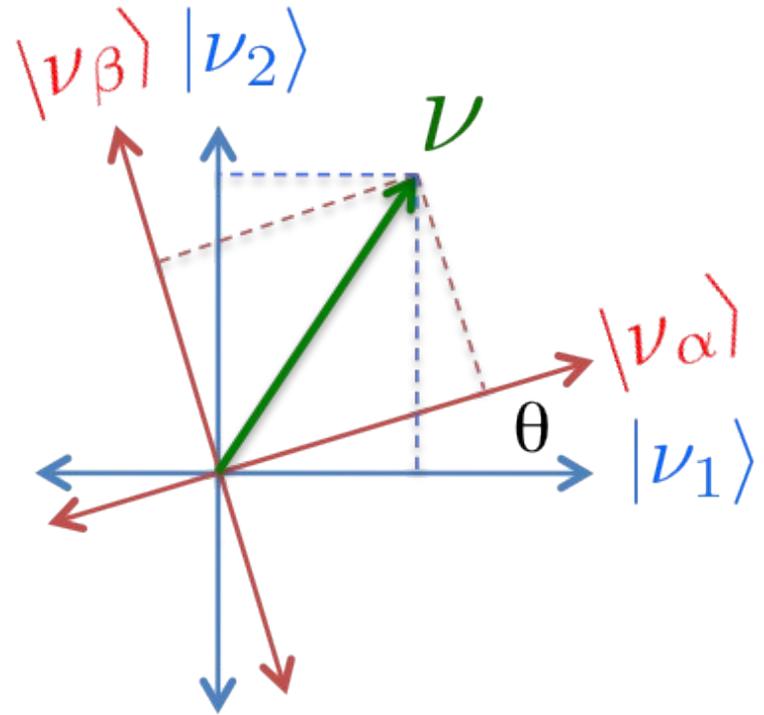
$$\begin{pmatrix} \nu_\alpha \\ \nu_\beta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\theta_{ij} & \text{sen}\theta_{ij} \\ -\text{sen}\theta_{ij} & \cos\theta_{ij} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_i \\ \nu_j \end{pmatrix}$$



Mistura de dois neutrinos

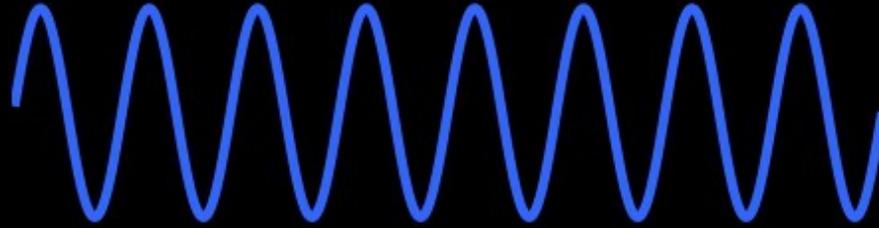
$$\begin{pmatrix} \nu_\alpha \\ \nu_\beta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\theta_{ij} & \text{sen}\theta_{ij} \\ -\text{sen}\theta_{ij} & \cos\theta_{ij} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_i \\ \nu_j \end{pmatrix}$$

$$P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta) = |\langle \nu_\beta | \nu_\alpha(L) \rangle|^2 = \left| \sum_i U_{\alpha i}^* e^{-i(m_i^2 L/2E)} U_{\beta i} \right|^2$$



Oscilação de neutrinos

Mecânica quântica
partícula \leftrightarrow onda
Massa determina frequência



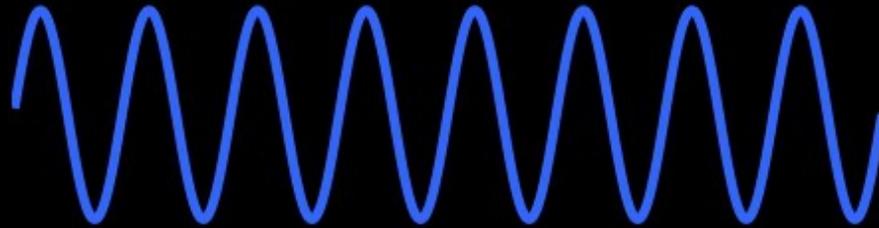
Onda 1

Oscilação de neutrinos

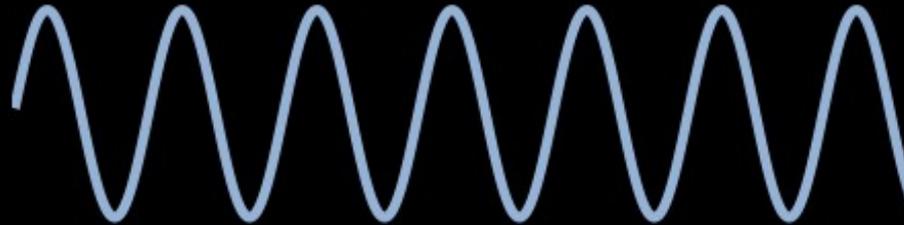
Mecânica quântica
partícula \leftrightarrow onda

Massa determina frequência

Se neutrinos (ν_e, ν_μ, ν_τ) são
realmente misturas de
diversas ondas com diferentes
frequências (diferentes
massas)...



Onda 1



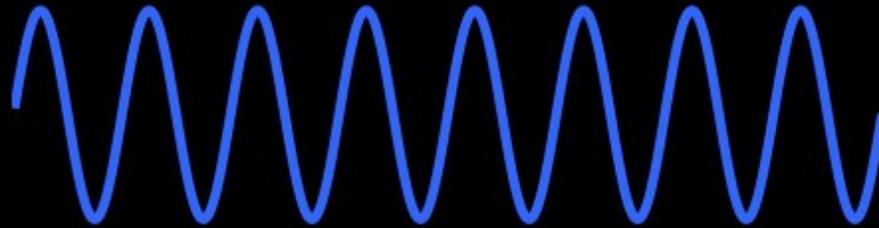
Onda 2

Oscilação de neutrinos

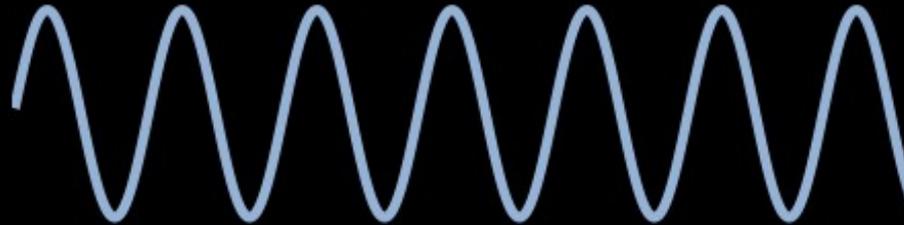
Mecânica quântica
partícula \leftrightarrow onda
Massa determina frequência

Se neutrinos (ν_e, ν_μ, ν_τ) são
realmente misturas de
diversas ondas com diferentes
frequências (diferentes
massas)...

Eles podem *interferir*
como quaisquer ondas e
mudar o sabor do
neutrino!



Onda 1



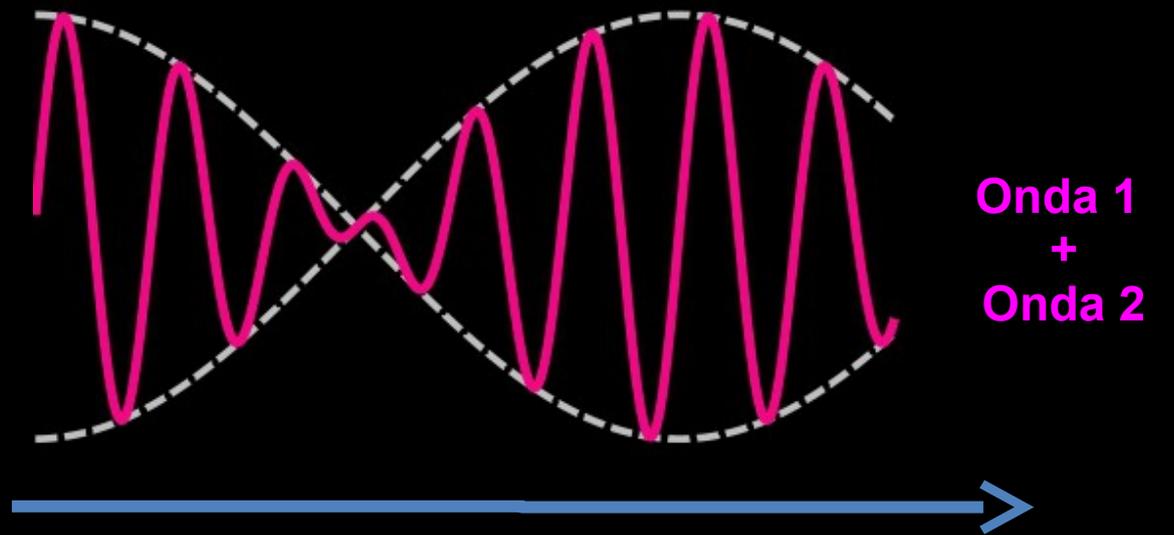
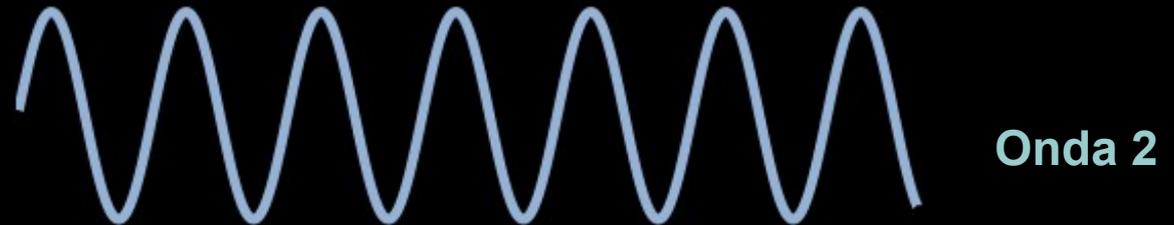
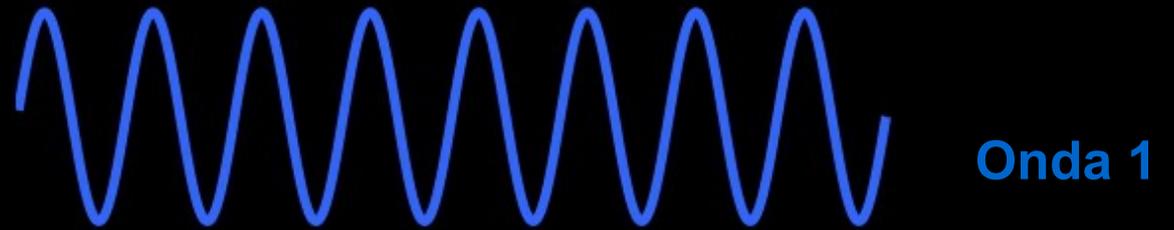
Onda 2

Oscilação de neutrinos

Mecânica quântica
partícula \leftrightarrow onda
Massa determina frequência

Se neutrinos (ν_e, ν_μ, ν_τ) são
realmente misturas de
diversas ondas com *diferentes*
frequências (diferentes
massas)...

Eles podem *interferir*
como quaisquer ondas e
mudar o sabor do
neutrino!

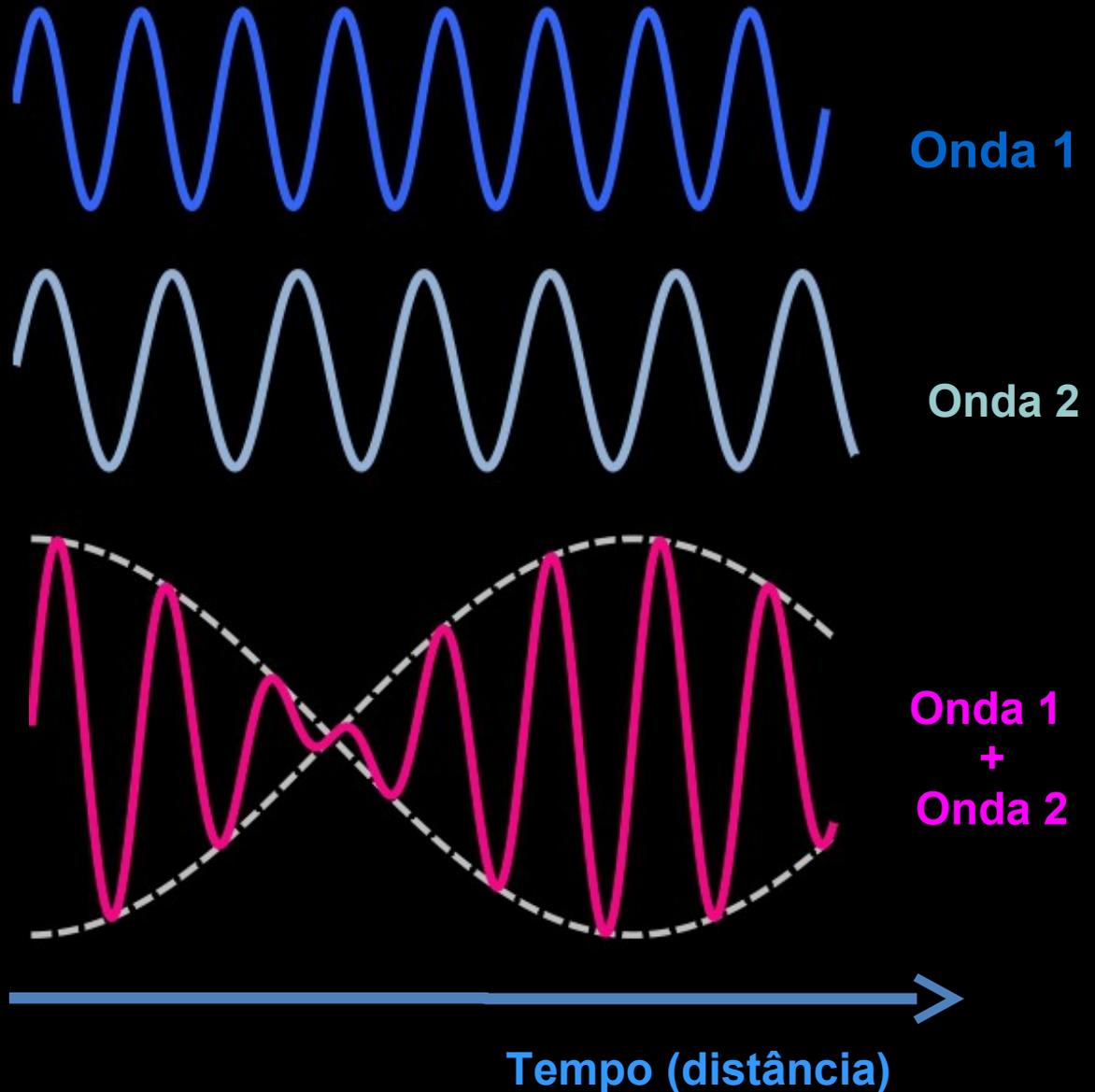


Oscilação de neutrinos

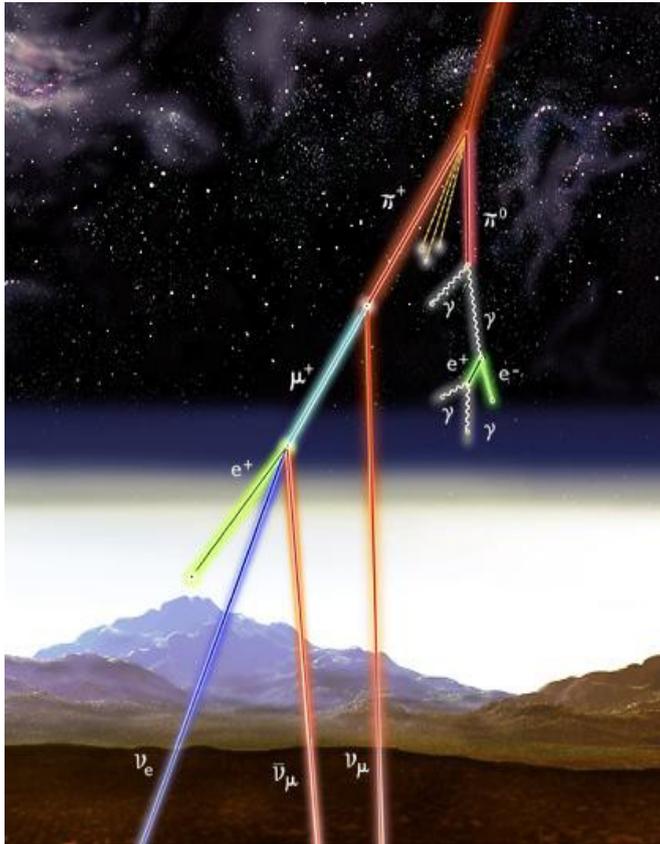
Mecânica quântica
partícula \leftrightarrow onda
Massa determina frequência

Se neutrinos (ν_e, ν_μ, ν_τ) são
realmente misturas de
diversas ondas com diferentes
frequências (diferentes
massas)...

Eles podem interferir
como quaisquer ondas e
mudar o sabor do
neutrino!

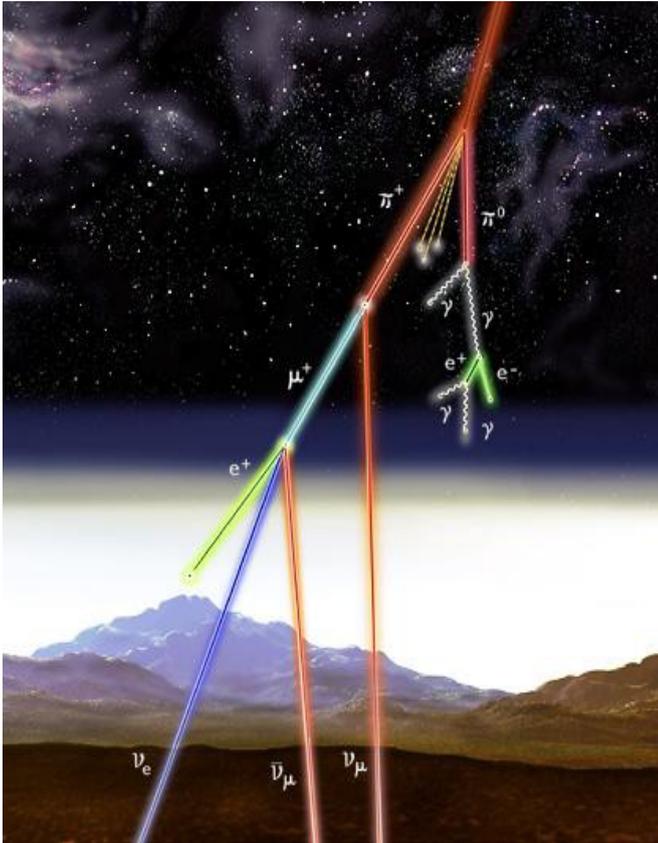


Neutrinos atmosféricos



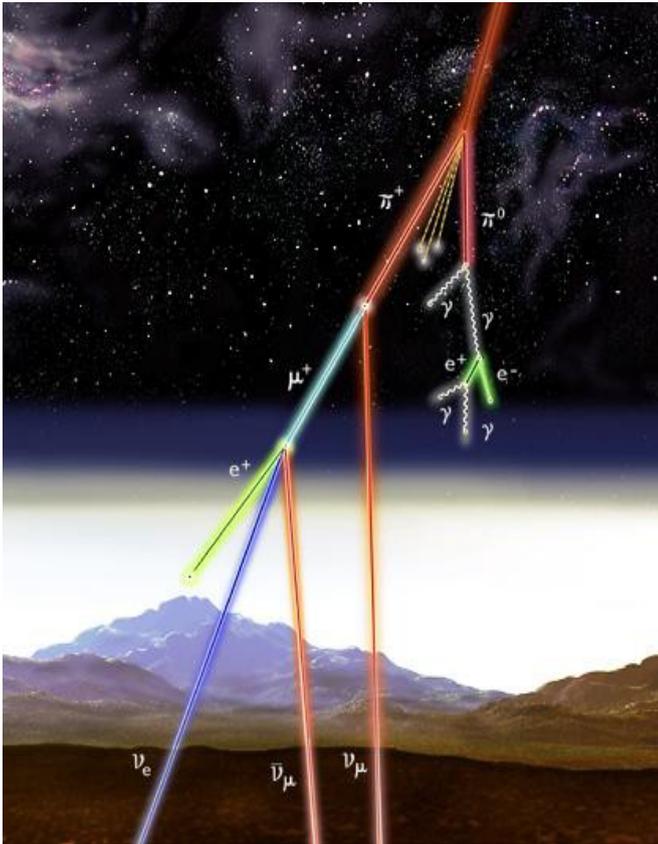
Neutrinos atmosféricos

Super kamiokande (Japão)



Neutrinos atmosféricos

Super kamiokande (Japão)



$$\langle E \rangle_{Super-K} \gg 1-10 GeV$$

$$\langle L \rangle_{Super-K} \gg 10-10^4 km$$

Esperava-se

$$\frac{\phi_{\nu_\mu}}{\phi_{\nu_e}} \approx 2 \quad \frac{\phi_{\nu_e}(Up)}{\phi_{\nu_\mu}(Down)} \approx 1$$

E agora?

Neutrinos existem ?

SIM !

E agora?

Neutrinos existem ?

Tem sabores?

SIM !

E agora?

Neutrinos existem ?

Tem sabores?

Oscilam ?

SIM !

E agora?

Neutrinos existem ?

Tem sabores?

Oscilam ?

Têm massa ?

SIM !

E agora?

Neutrinos existem ?

Tem sabores?

Oscilam ?

Têm massa ?

Qual a massa ?



E agora?

Neutrinos existem ?

Tem sabores?

Oscilam ?

Têm massa ?

Qual a massa ?

Neutrino e antineutrino são diferentes ?



E agora?

Neutrinos existem ?

Tem sabores?

Oscilam ?

Têm massa ?

Qual a massa ?

Neutrino e antineutrino são diferentes ?

Como interagem?



Como estudar as propriedades dos neutrinos

Baixíssima seção de choque dificulta realização de experimentos

Precisa de grandes detectores ou grande fluxo ou ambos

Não tem carga elétrica. Não deixa qualquer sinal em detectores.

Fontes empregadas em experimentos

Raios cósmicos

Reatores

Aceleradores

Experimentos com raios cósmicos

Super Kamiokamde (Japão)

Grande fluxo e grandes detectores

Não se tem controle sobre o fluxo

Situado a 1.000 metros de profundidade

Tanque cilíndrico de 41,4 m de altura e 39,3 m de diâmetro

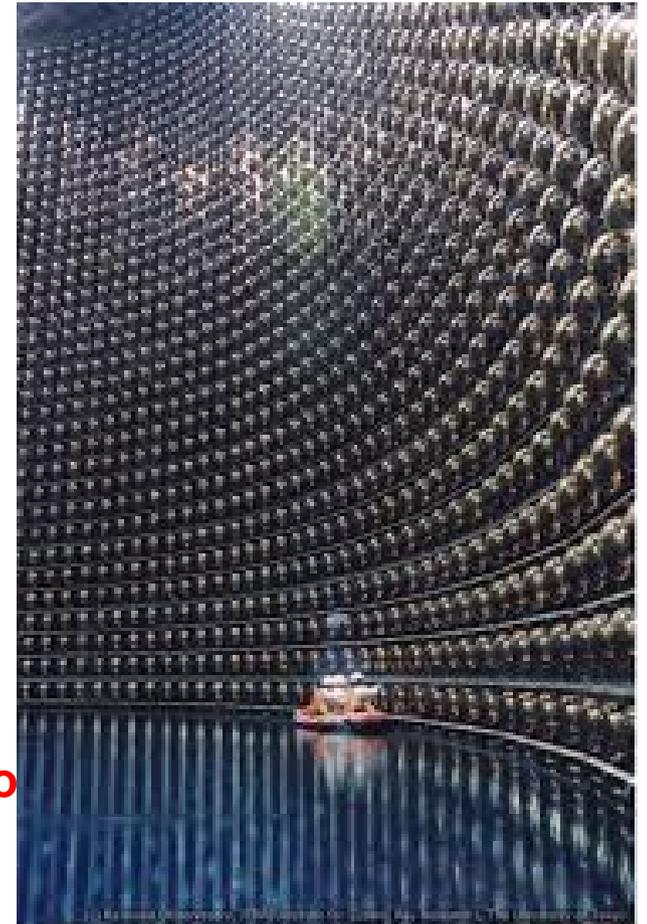
50.000 toneladas de água ultrapura

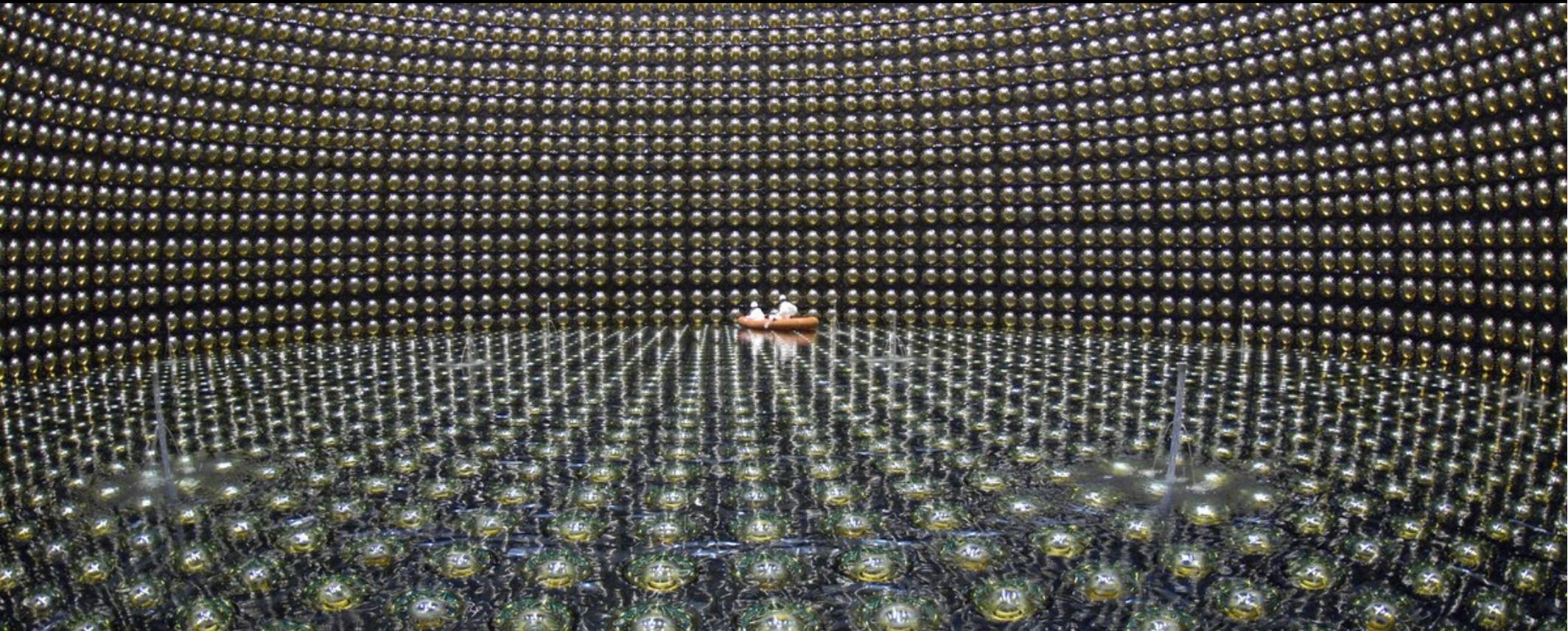
13.000 fotomultiplicadoras

Um neutrino interage e produz partículas carregadas que se movem mais rápido que a luz na água.

Produz radiação cherenkov, que é detectada permitindo a reconstrução do evento

Detectou em 1999 evidências de oscilação de neutrino





Experimentos com reatores

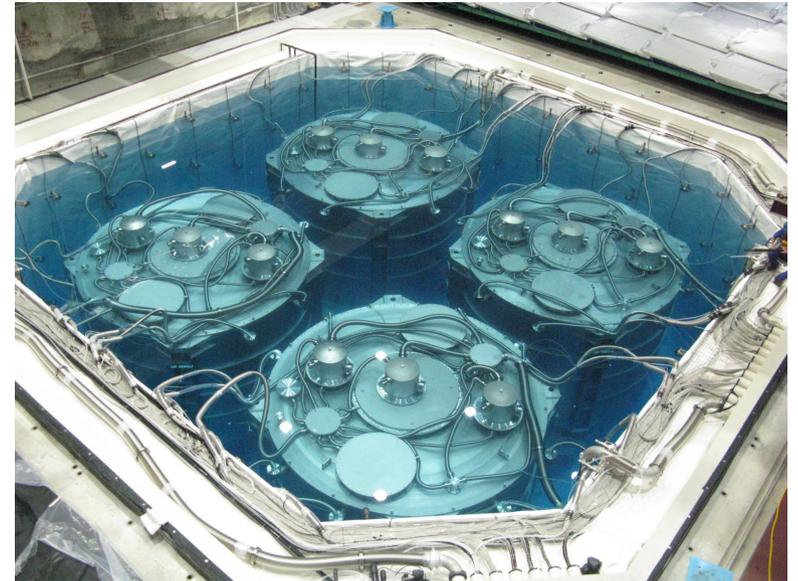
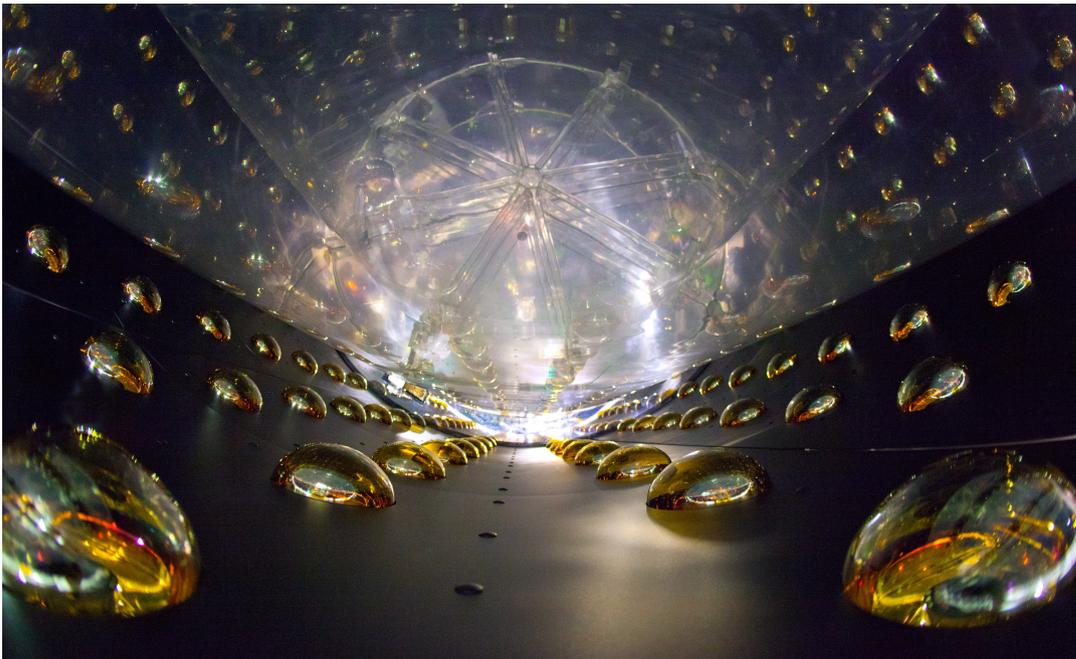
Fluxo intenso e detectores de tamanho pequenos ou médios

Não se tem controle sobre o fluxo

Daya Bay (China)

8 detectores de antineutrinos

Três localizações em um raio de 1,9 km de um complexo de seis reatores nucleares.

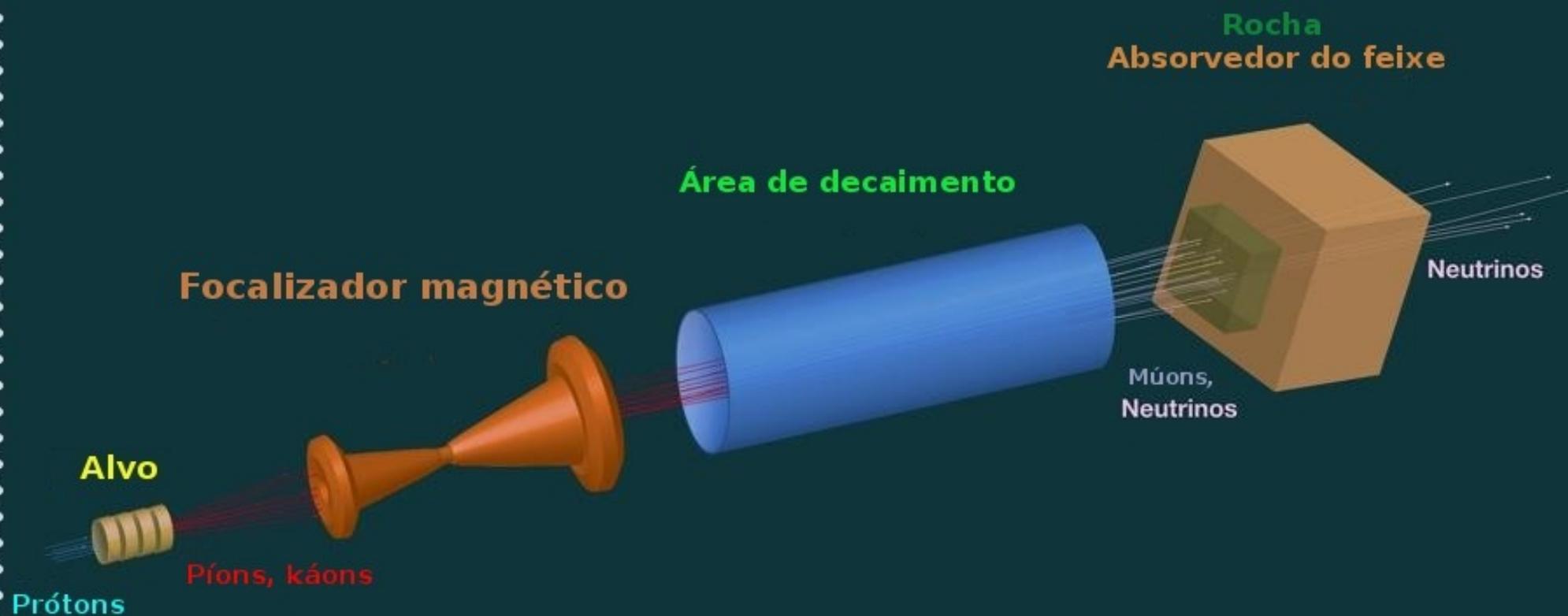


Cada detector tem 20 toneladas de cintilador líquido dopado com gadolínio cercado por oito multiplicadoras.

$$\theta_{13} \approx 8,42^\circ$$

$$|\Delta m|^2 = 2,4 \times 10^{-3} eV^2$$

Receita de feixe de neutrino



prótons do acelerador



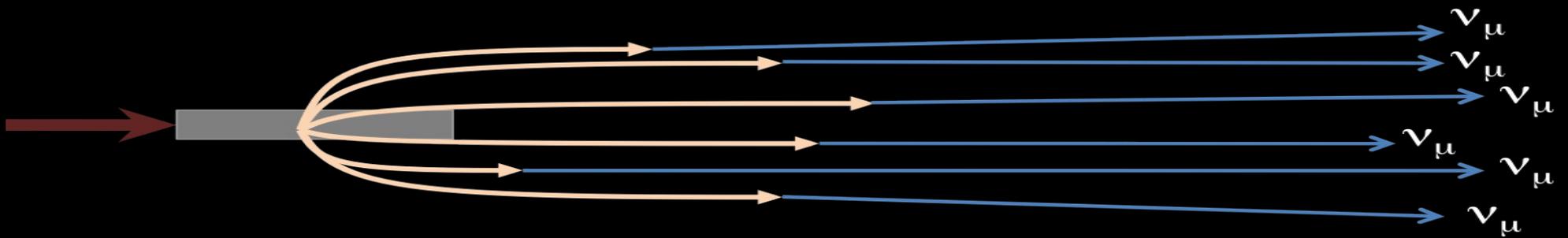
Tubo de decaimento de 675 m



Detector de neutrinos



Linha de feixe NuMI

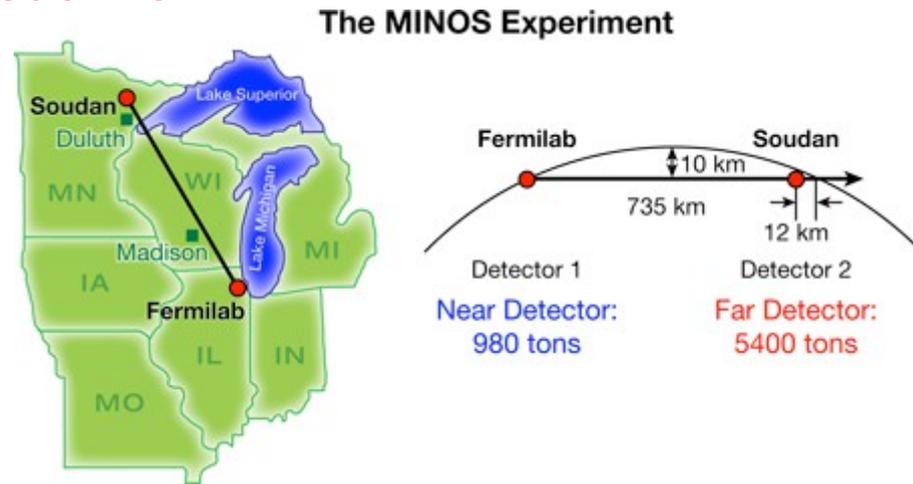


MINOS

Dois detectores: um próximo à fonte de neutrinos (ν_μ) e outro a 735 km de distância. Usou também feixe de antineutrino.

Detector próximo: 980 toneladas, colocado à 100 m de profundidade. Calorímetros feitos de aço e cintiladores.

Detector distante: 5.400 toneladas, colocado a 716 m de profundidade na mina de Soudan. Calorímetros feitos de aço e cintiladores.



Março de 2023

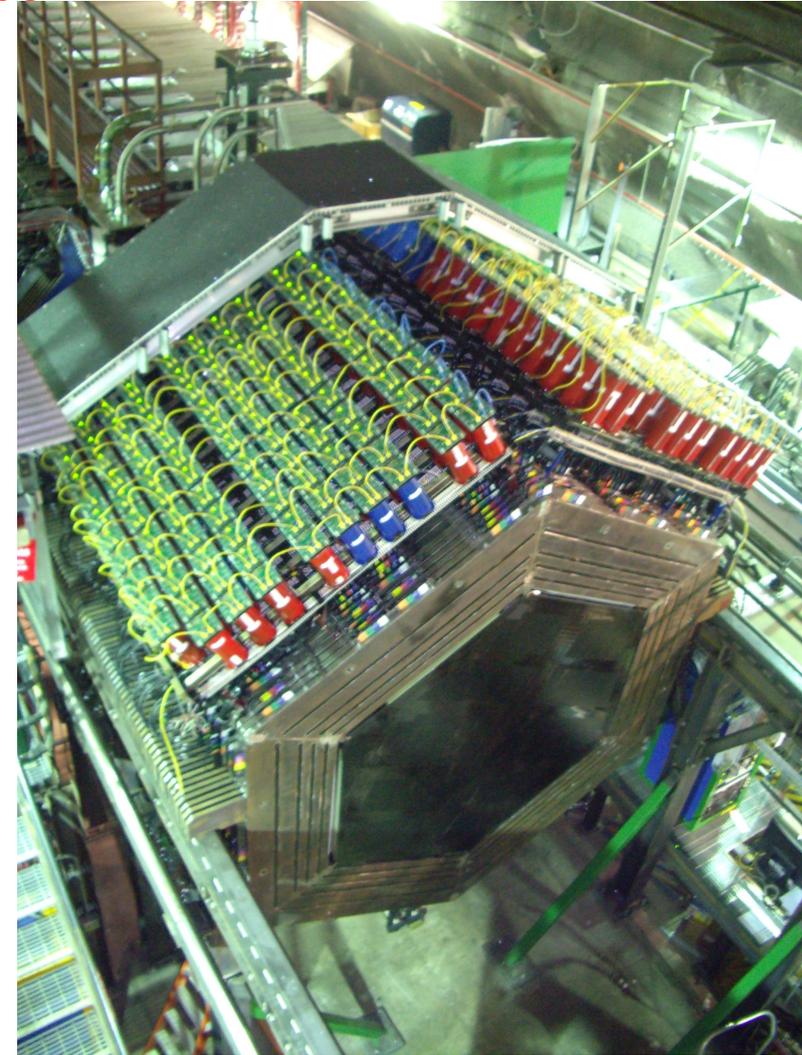
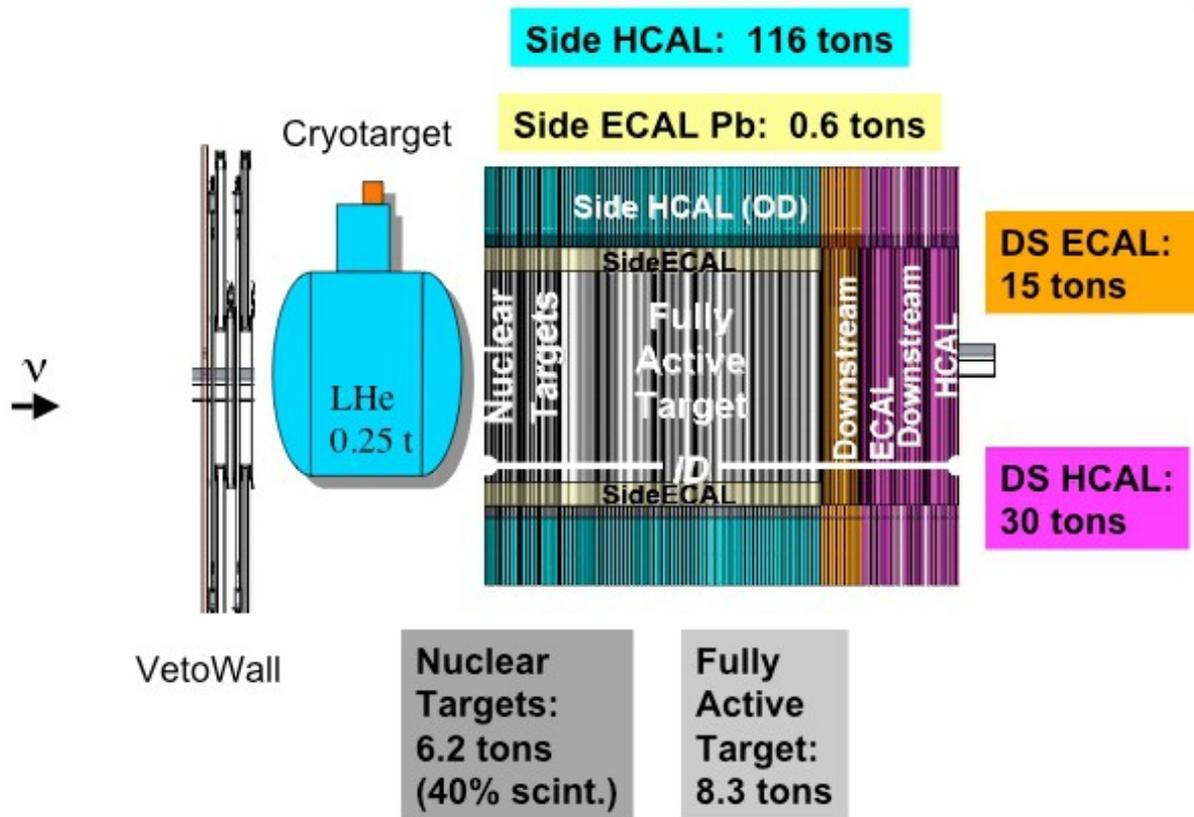


Hélio da Motta (CBPF)

MINERvA

Un detector de 180 toneladas feito de camadas de cintilador e diversos materiais.
Capaz de realizar medidas precisas das secções de choque de interações de
Neutrinos (ν_μ) e antineutrinos.

Excelente reconstrução de eventos



Realizou a primeira comunicação bem sucedida empregando feixe de neutrinos

Março de 2023

Hélio da Motta (CBPF)

133



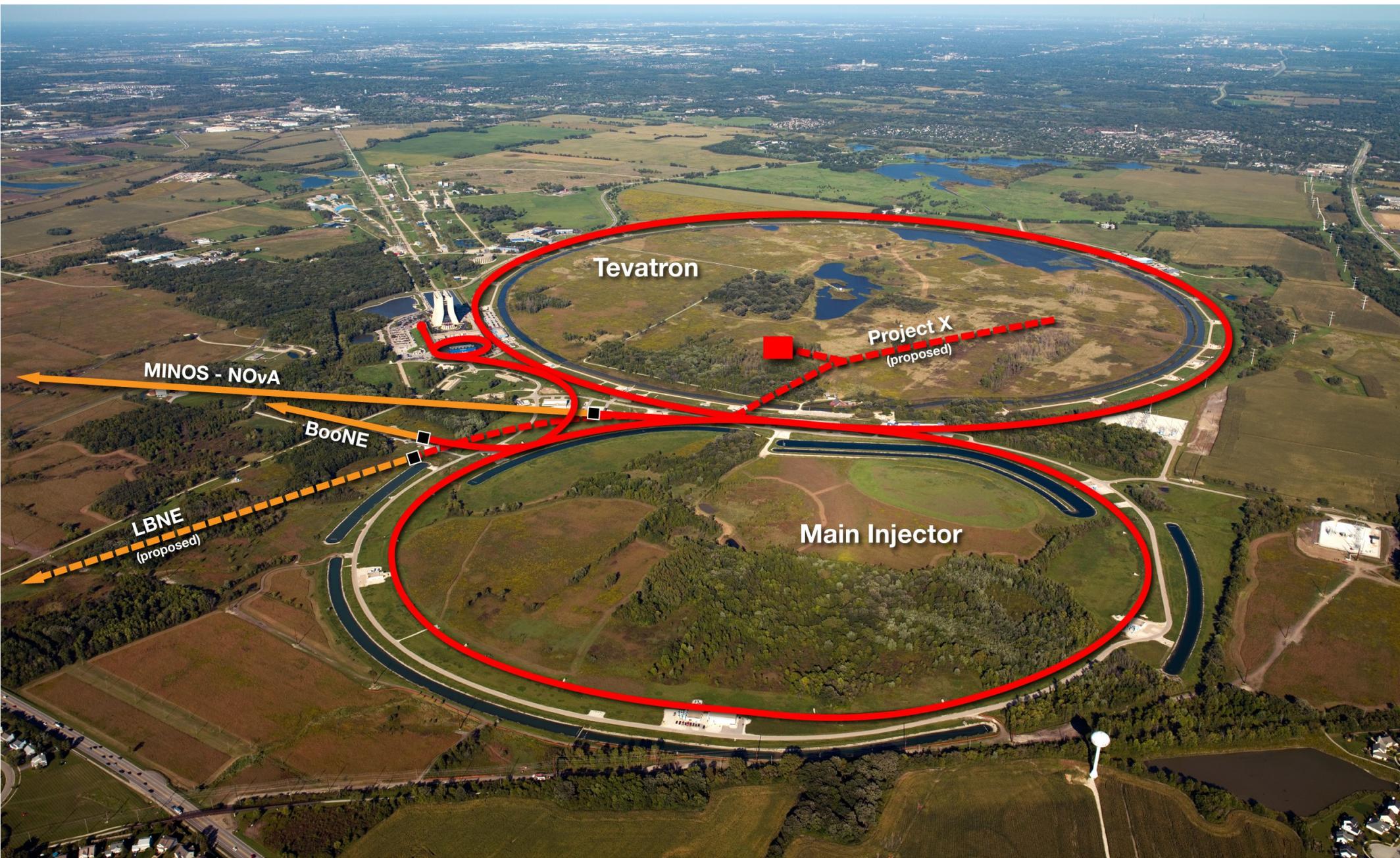
DUNE



DUNE



Deep Underground Neutrino Experiment



Tevatron

Project X
(proposed)

MINOS - NOvA

BoóNE

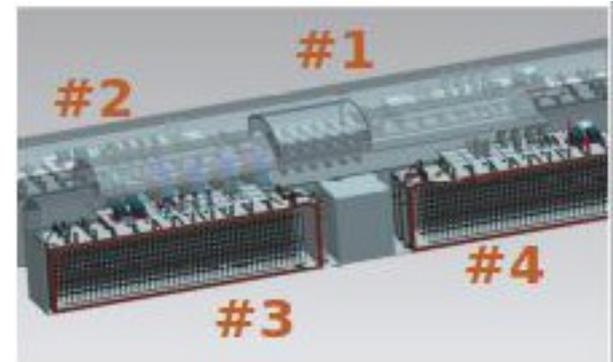
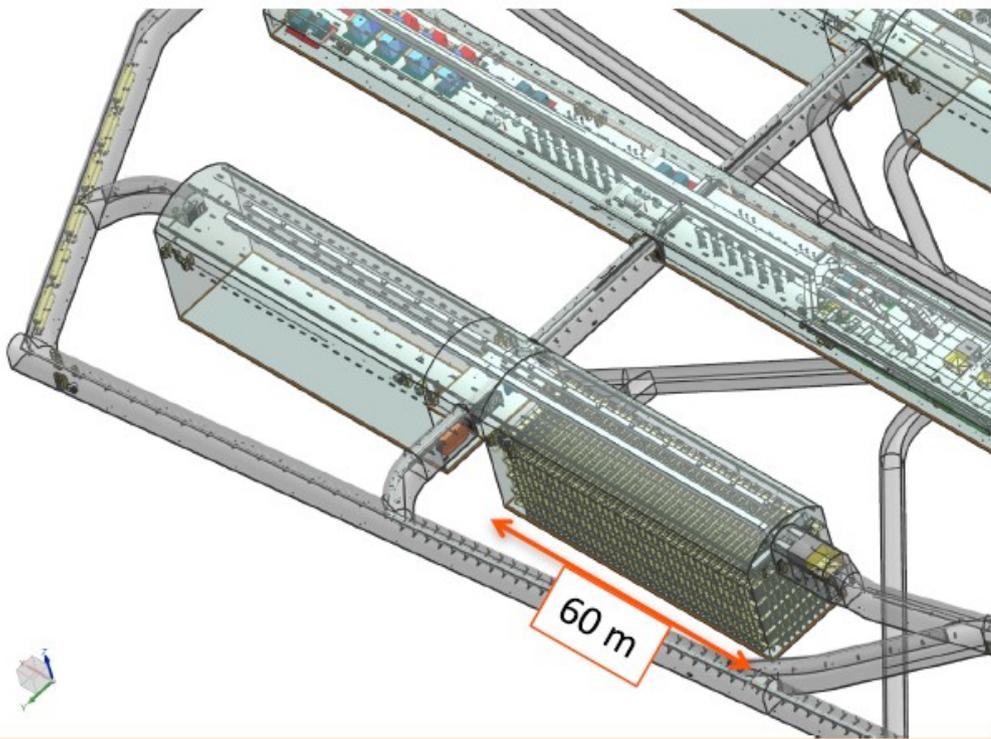
LBNE
(proposed)

Main Injector



Detectores do DUNE

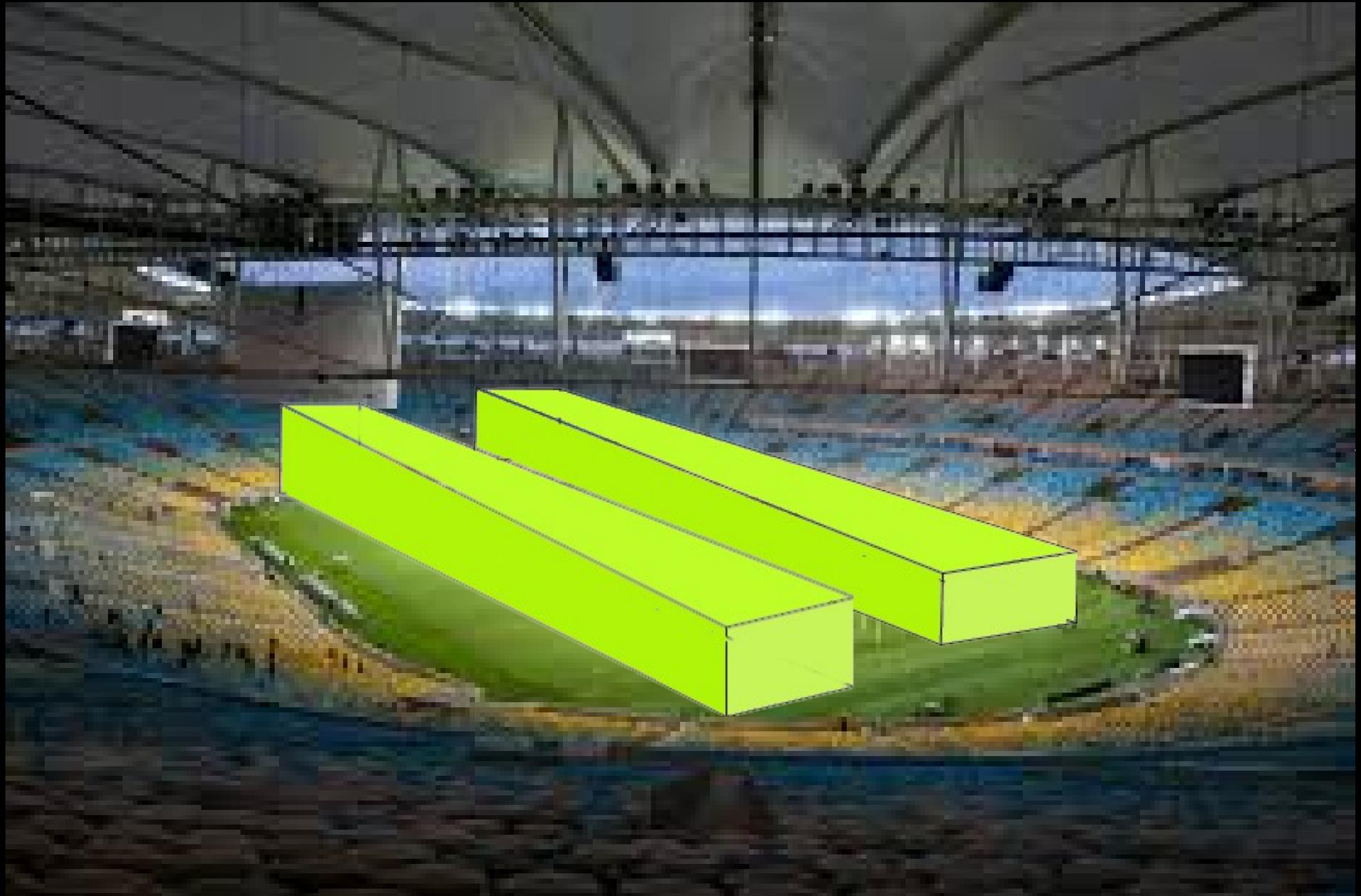
4 tanques cada um com 10 mil toneladas de Ar líquido



4 criostatos cada um medindo

15 X 14 X 62 m³ (LAC)

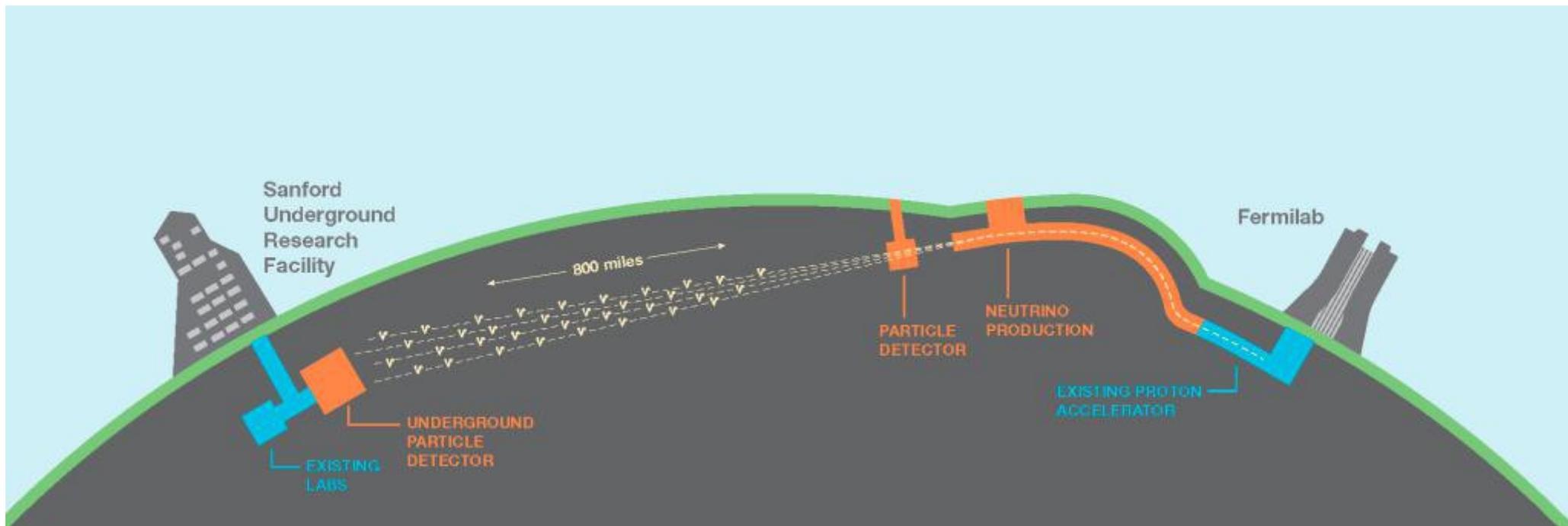
Maracanã X DUNE



DUNE

Feixe intenso de neutrinos ou antineutrinos

Um detector próximo à fonte



Enorme detector cerca de 1.300 km distante da fonte e a mais de 1.000 m abaixo do solo

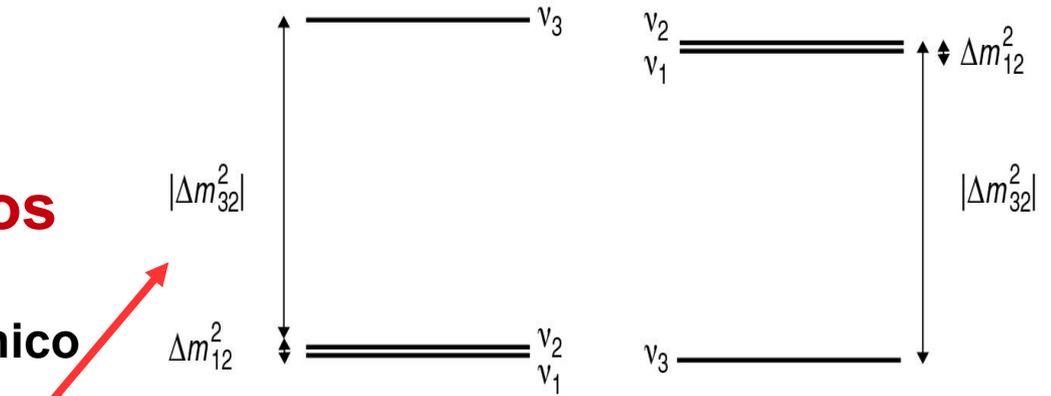
Programa científico básico do DUNE

Física de oscilação de neutrinos

Descobrir violação de CP no setor leptônico

Determinar a hierarquia de massas

Medidas precisas da física de oscilação (parâmetros)

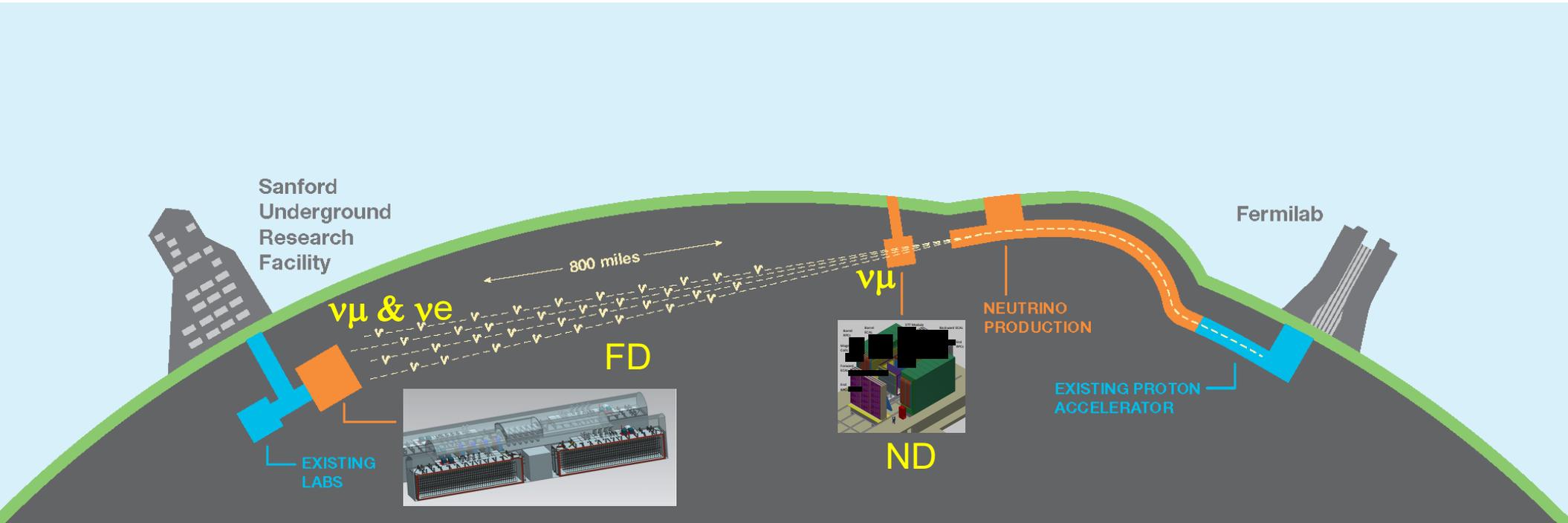


Decaimento do próton ?: $p \rightarrow K^+ \nu$

Explosão de supernovas

Estratégia do DUNE

Medir o espectro de **neutrinos** em 1.300 km

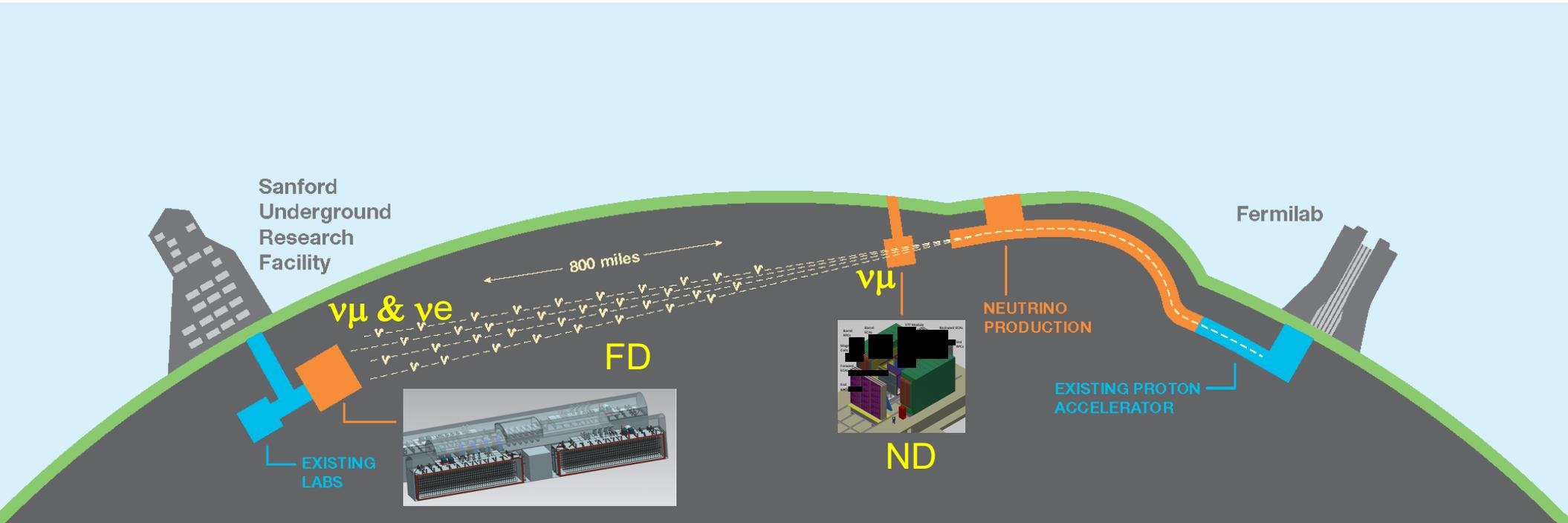


Detector no Fermilab: medidas do feixe de ν_μ sem oscilação

Detector em SURF: medidas dos espectros oscilados de ν_μ e ν_e

Estratégia do DUNE

... então repetir para **antineutrinos**



Detector no Fermilab: medidas do feixe de ν_μ sem oscilação

Detector em SURF: medidas dos espectros oscilados de ν_μ e ν_e

Neutrinos de supernovas

O colapso do núcleo de uma supernovas produz um pulso incrivelmente intenso de neutrinos

Possibilidade de ver a formação de estrela de nêutrons



Potencial para ver a formação de buracos negros

Conclusão

A física de neutrinos tem um história excitante, rica de surpresas

Neutrinos oscilam !

Massas extremamente pequenas mas NÃO nulas. Ainda a serem medidas.

Possível violação de CP? Explicação da predominância de matéria no universo?

Não se encaixa na teoria atual. Estão além do modelo padrão

Neutrino e antineutrino são diferentes?

Há outros tipos de neutrinos?

**Novos experimentos em preparação para tentar responder as questões
ainda em aberto**