

neutrinos e as outras partículas

os laboratórios subterrâneos,
as oscilações de neutrinos
e outras curiosidades

Sofia Andringa, 10 de Julho 2025
sofia@lip.pt



De que são feitas as coisas?

6

PERIODIC TABLE OF THE ORIGINS OF THE ELEMENTS

1

H

HYDROGEN

2

He

HELIUM

3

Li

LITHIUM

4

Be

BERYLLIUM

5

B

BORON

6

C

CARBON

7

N

NITROGEN

8

O

OXYGEN

9

F

FLUORINE

10

Ne

NEON

11

Na

SODIUM

12

Mg

MAGNESIUM

13

Al

ALUMINUM

14

Si

SILICON

15

P

PHOSPHORUS

16

S

SULFUR

17

Cl

CHLORINE

18

Ar

ARGON

19

K

POTASSIUM

20

Ca

CALCIUM

21

Sc

SCANDIUM

22

Ti

TITANIUM

23

V

VANADIUM

24

Cr

CHROMIUM

25

Mn

MANGANESE

26

Fe

IRON

27

Co

COBALT

28

Ni

NICKEL

29

Cu

COPPER

30

Zn

ZINC

31

Ga

GALLIUM

32

Ge

GERMANIUM

33

As

ARSENIC

34

Se

SELENIUM

35

Br

BROMINE

36

Kr

KRYPTON

37

Rb

RUBIDIUM

38

Sr

STRONTIUM

39

Y

YTIUM

40

Zr

ZIRCONIUM

41

Nb

NIOBIUM

42

Mo

MOLYBDENUM

43

Tc

TECHNETIUM

44

Ru

RUTHENIUM

45

Rh

RHODIUM

46

Pd

PALLADIUM

47

Ag

SILVER

48

Cd

CADMIUM

49

In

INDIUM

50

Sn

TIN

51

Sb

ANTIMONY

52

Te

TELLURIUM

53

I

IODINE

54

Xe

XENON

55

Cs

CAESIUM

56

Ba

BARIUM

57

La

LANTHANUM

58

Ce

CERIUM

59

Pr

PRASEODYMIUM

60

Nd

NEODYMIUM

61

Pm

PROMETHIUM

62

Sm

SAMARIUM

63

Eu

EUROPIUM

64

Gd

GADOLINIUM

65

Tb

TERBIUM

66

Dy

DYSPROSIUM

67

Ho

HOLMIUM

68

Er

ERBIUM

69

Tm

THULIUM

70

Yb

YTERBIUM

71

Lu

LUTETIUM

72

Hf

HAFNIUM

73

Ta

TANTALUM

74

W

TUNGSTEN

75

Re

RHENIUM

76

Os

OSMIUM

77

Ir

IRIDIUM

78

Pt

PLATINUM

79

Au

GOLD

80

Hg

MERCURY

81

Tl

THALLIUM

82

Pb

LEAD

83

Bi

BISMUTH

84

Po

POLONIUM

85

At

ASTATINE

86

Rn

RADON

87

Fr

FRANCIUM

88

Ra

RADIUM

89

Ac

ACTINIUM

90

Th

THORIUM

91

Pa

PROTACTINIUM

92

U

URANIUM

93

Np

NEPTUNIUM

94

Pu

PLUTONIUM

95

Am

AMERICIUM

96

Cm

CURIUM

97

Bk

BERKELIUM

98

Cf

CALIFORNIUM

99

Es

EINSTEINIUM

100

Fm

FERMIONIUM

101

Md

MENDELÉVIUM

102

No

NOBELIUM

103

Lr

LAWRENCIUM

93

Np

NEPTUNIUM

94

Pu

PLUTONIUM

95

Am

AMERICIUM

96

Cm

CURIUM

97

Bk

BERKELIUM

98

Cf

CALIFORNIUM

99

Es

EINSTEINIUM

100

Fm

FERMIONIUM

101

Md

MENDELÉVIUM

102

No

NOBELIUM

103

Lr

LAWRENCIUM

104

Rf

RUTHERFORDIUM

105

Db

DUBNIUM

106

Sg

SEABORGIUM

107

Bh

BOHRIUM

108

Hs

HASSIUM

109

Mt

METLIUM

110

Ds

DARMSTADTIUM

111

Rg

ROENTGIUM

112

Cn

COPECNIUM

113

Nh

NIHONIUM

114

Fl

FLEROVIUM

115

Mc

MOSCOWIUM

116

Lv

LIVERMORIUM

117

Ts

TENESSINE

118

Og

OGANESSON

1

H

HYDROGEN

2

He

HELIUM

3

Li

LITHIUM

4

Be

BERYLLIUM

5

B

BORON

6

C

CARBON

7

N

NITROGEN

8

O

OXYGEN

9

F

FLUORINE

10

Ne

NEON

11

Na

SODIUM

12

Mg

MAGNESIUM

13

Al

ALUMINUM

14

Si

SILICON

15

P

PHOSPHORUS

16

S

SULFUR

17

Cl

CHLORINE

18

Ar

ARGON

19

K

POTASSIUM

20

Ca

CALCIUM

21

Sc

SCANDIUM

22

Ti

TITANIUM

23

V

VANADIUM

24

Cr

CHROMIUM

25

Mn

MANGANESE

26

Fe

IRON

27

Co

COBALT

28

Ni

NICKEL

29

Cu

COPPER

30

Zn

ZINC

31

Ga

GALLIUM

32

Ge

GERMANIUM

33

As

ARSENIC

34

Se

SELENIUM

35

Br

BROMINE

36

Kr

KRYPTON

37

Rb

RUBIDIUM

38

Sr

STRONTIUM

39

Y

YTIUM

40

Zr

ZIRCONIUM

41

Nb

NIOBIUM

42

Mo

MOLYBDENUM

43

Tc

TECHNETIUM

44

Ru

RUTHENIUM

45

Rh

RHODIUM

46

Pd

PALLADIUM

47

Ag

SILVER

48

Cd

CADMIUM

49

In

INDIUM

50

Sn

TIN

51

Sb

ANTIMONY

52

Te

TELLURIUM

53

I

IODINE

54

Xe

XENON

55

Cs

CAESIUM

56

Ba

BARIUM

57

La

LANTHANUM

58

Ce

CERIUM

59

Pr

PRASEODYMIUM

60

Nd

NEODYMIUM

61

Pm

PROMETHIUM

62

Sm

SAMARIUM

63

Eu

EUROPIUM

64

Gd

GADOLINIUM

65

Tb

TERBIUM

66

Dy

DYSPROSIUM

67

Ho

HOLMIUM

68

Er

ERBIUM

69

Tm

THULIUM

70

Yb

YTERBIUM

71

Lu

LUTETIUM

72

Hf

HAFNIUM

73

Ta

TANTALUM

74

W

TUNGSTEN

75

Re

RHENIUM

76

Os

OSMIUM

77

Ir

IRIDIUM

78

Pt

PLATINUM

79

Au

GOLD

80

Hg

MERCURY

81

Tl

THALLIUM

82

Pb

LEAD

83

Bi

BISMUTH

84

Po

POLONIUM

85

At

ASTATINE

86

Rn

RADON

87

Fr

FRANCIUM

88

Ra

RADIUM

89

Ac

ACTINIUM

90

Th

THORIUM

91

Pa

PROTACTINIUM

92

U

URANIUM

93

Np

NEPTUNIUM

94

Pu

PLUTONIUM

95

Am

AMERICIUM

96

Cm

CURIUM

97

Bk

BERKELIUM

98

Cf

CALIFORNIUM

99

Es

EINSTEINIUM

100

Fm

FERMIONIUM

101

Md

MENDELÉVIUM

102

No

NOBELIUM

103

Lr

LAWRENCIUM

93

Np

NEPTUNIUM

94

Pu

PLUTONIUM

95

Am

AMERICIUM

96

Cm

CURIUM

97

Bk

BERKELIUM

98

Cf

CALIFORNIUM

99

Es

EINSTEINIUM

100

Fm

FERMIONIUM

101

Md

MENDELÉVIUM

102

No

NOBELIUM

103

Lr

LAWRENCIUM

104

Rf

RUTHERFORDIUM

105

Db

DUBNIUM

106

Sg

SEABORGIUM

107

Bh

BOHRIUM

108

Hs

HASSIUM

109

Mt

METLIUM

110

Ds

DARMSTADTIUM

111

Rg

ROENTGIUM

112

Cn

COPECNIUM

113

Nh

NIHONIUM

114

Fl

FLEROVIUM

115

Mc

MOSCOWIUM

116

Lv

LIVERMORIUM

117

Ts

TENESSINE

118

Og

OGANESSON

1

H

HYDROGEN

2

He

HELIUM

3

Li

LITHIUM

4

Be

BERYLLIUM

5

B

BORON

6

C

CARBON

7

N

NITROGEN

8

O

OXYGEN

9

F

FLUORINE

10

Ne

NEON

11

Na

SODIUM

12

Mg

MAGNESIUM

13

Al

ALUMINUM

14

Si

SILICON

15

P

PHOSPHORUS

16

S

SULFUR

17

Cl

CHLORINE

18

Ar

ARGON

19

K

POTASSIUM

20

Ca

CALCIUM

21

Sc

SCANDIUM

22

Ti

TITANIUM

23

V

VANADIUM

24

Cr

CHROMIUM

25

Mn

MANGANESE

26

Fe

IRON

27

Co

COBALT

28

Ni

NICKEL

29

Cu

COPPER

30

Zn

ZINC

31

Ga

GALLIUM

32

Ge

GERMANIUM

33

As

ARSENIC

34

Se

SELENIUM

35

Br

BROMINE

36

Kr

KRYPTON

37

Rb

RUBIDIUM

38

Sr

STRONTIUM

39

Y

YTIUM

40

Zr

ZIRCONIUM

41

Nb

NIOBIUM

42

Mo

MOLYBDENUM

43

Tc

TECHNETIUM

44

Ru

RUTHENIUM

45

Rh

RHODIUM

46

Pd

PALLADIUM

47

Ag

SILVER

48

Cd

CADMIUM

49

In

INDIUM

50

Sn

TIN

51

Sb

ANTIMONY

52

Te

TELLURIUM

53

I

IODINE

54

Xe

XENON

55

Cs

CAESIUM

56

Ba

BARIUM

57

La

LANTHANUM

58

Ce

CERIUM

59

Pr

PRASEODYMIUM

60

Nd

NEODYMIUM

61

Pm

PROMETHIUM

62

Sm

SAMARIUM

63

Eu

EUROPIUM

64

Gd

GADOLINIUM

65

Tb

TERBIUM

66

Dy

DYSPROSIUM

67

Ho

HOLMIUM

68

Er

ERBIUM

69

Tm

THULIUM

70

Yb

YTERBIUM

71

Lu

LUTETIUM

72

Hf

HAFNIUM

73

Ta

TANTALUM

74

W

TUNGSTEN

75

Re

RHENIUM

76

Os

OSMIUM

77

Ir

IRIDIUM

78

Pt

PLATINUM

79

Au

GOLD

80

Hg

MERCURY

81

Tl

THALLIUM

82

Pb

LEAD

83

Bi

BISMUTH

84

Po

POLONIUM

85

At

ASTATINE

86

Rn

RADON

87

Fr

FRANCIUM

88

Ra

RADIUM

89

Ac

ACTINIUM

90

Th

THORIUM

91

Pa

PROTACTINIUM

92

U

URANIUM

93

Np

NEPTUNIUM

94

Pu

PLUTONIUM

95

Am

AMERICIUM

96

Cm

CURIUM

97

Bk

BERKELIUM

98

Cf

CALIFORNIUM

99

Es

EINSTEINIUM

100

Fm

FERMIONIUM

101

Md

MENDELÉVIUM

102

No

NOBELIUM

103

Lr

LAWRENCIUM

93

Np

NEPTUNIUM

94

Pu

PLUTONIUM

95

Am

AMERICIUM

96

Cm

CURIUM

97

Bk

BERKELIUM

98

Cf

CALIFORNIUM

99

Es

EINSTEINIUM

100

Fm

FERMIONIUM

101

Md

MENDELÉVIUM

102

No

NOBELIUM

103

Lr

LAWRENCIUM

104

Rf

RUTHERFORDIUM

105

Db

DUBNIUM

106

Sg

SEABORGIUM

107

Bh

BOHRIUM

108

Hs

HASSIUM

109

Mt

METLIUM

110

Ds

DARMSTADTIUM

111

Rg

ROENTGIUM

112

Cn

COPECNIUM

113

Nh

NIHONIUM

114

Fl

FLEROVIUM

115

Mc

MOSCOWIUM

116

Lv

LIVERMORIUM

117

Ts

TENESSINE

118

Og

OGANESSON

1

H

HY

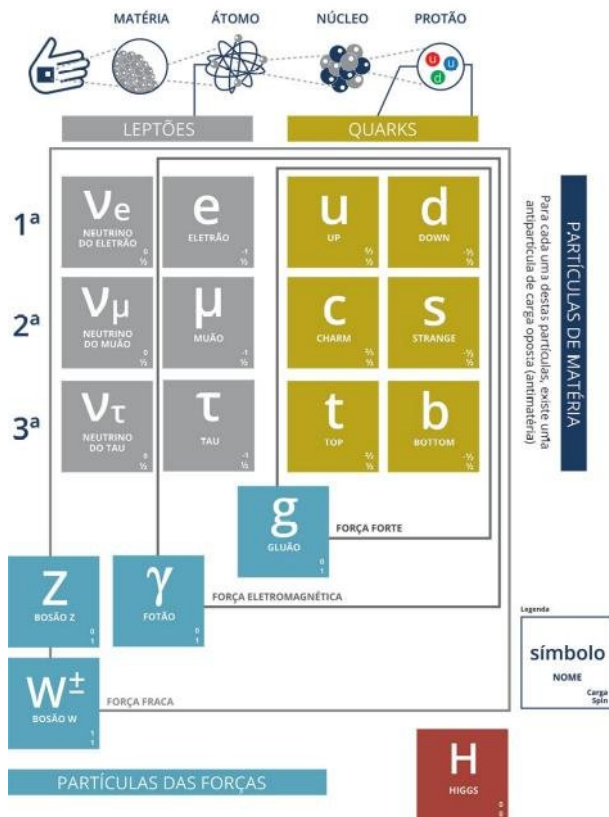
For more detail, visit <http://bit.ly/ElementOrigins>



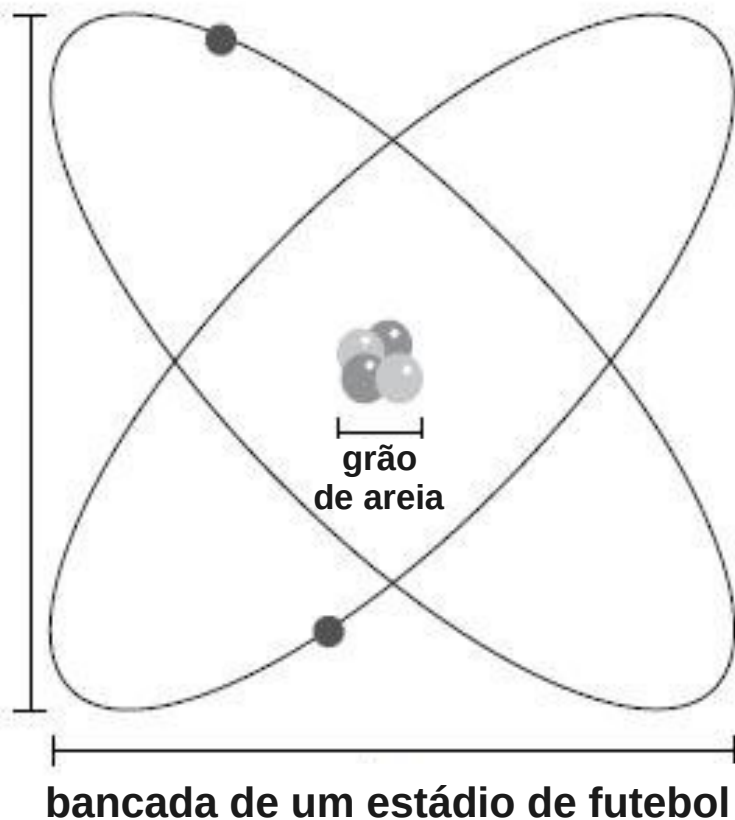
© Andy Brunning/Compound Interest 2019 | www.compoundchem.com | @compoundchem
Shared under a Creative Commons 4.0 Attribution-NoDerivatives-NonCommercial licence.



#IYPT2019



De que são feitos os átomos?



os átomos são feitos principalmente de vazio !!

Z elétrons elementares

Z protões + $(A-Z)$ neutrões, feitos de quarks

força eletromagnética

núcleo atrai os elétrons

pode ligar átomos para formar moléculas

devia destruir o núcleo atómico?

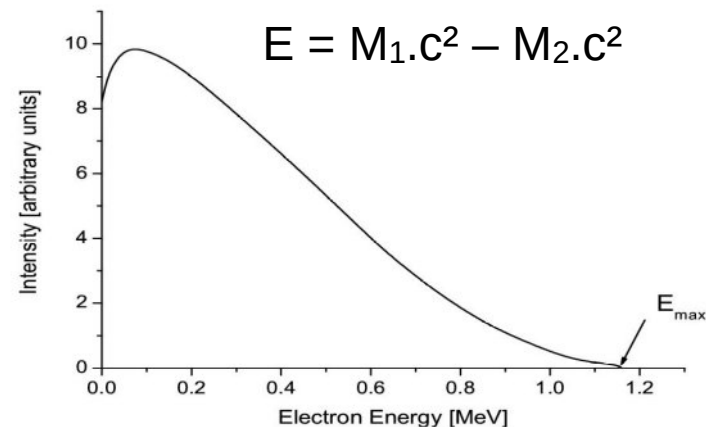
força nuclear forte

liga protões e neutrões

liga os quarks dentro de protões e neutrões

explica a massa do núcleo, e do átomo!

Radioatividade



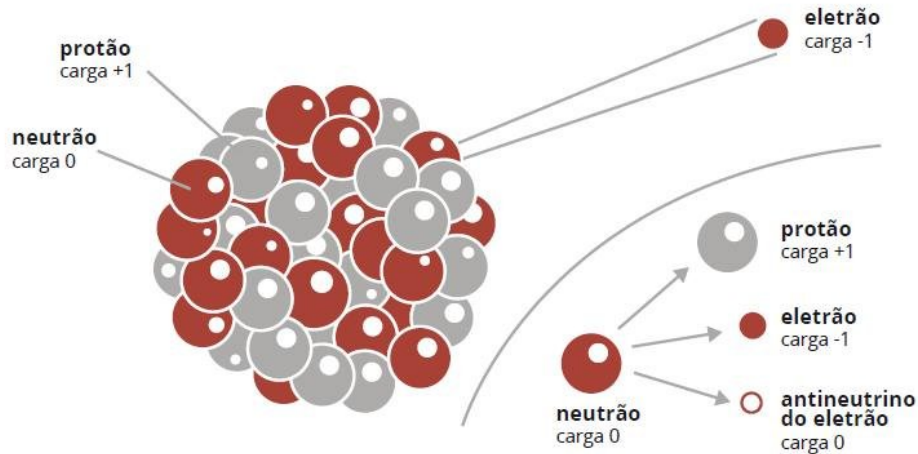
α (força forte): núcleo pesado parte-se em dois (um deles ${}^4\text{He}$ = partícula alfa)
(A,Z) $\rightarrow$ (A-4,Z-2) + He (4,2); $E(\alpha) = M(A,Z) - M(A-4,Z-4)$, energia cinética fixa

β (força fraca): núcleo com alguns neutrões emite um eletrão (partícula beta)
(A,Z) $\rightarrow$ (A,Z-1) + e^- ; $E(\beta) < M(A,Z) - M(A,Z-1)$, **a energia não se conserva?**

γ (força eletromagnética): núcleo excitado emite um fóton (raio gama)
(A,Z)* $\rightarrow$ (A,Z-1) + γ ; $E(\gamma) = M(A,Z)^* - M(A,Z)$, comprimento de onda fixo

Neutrinos e a força fraca

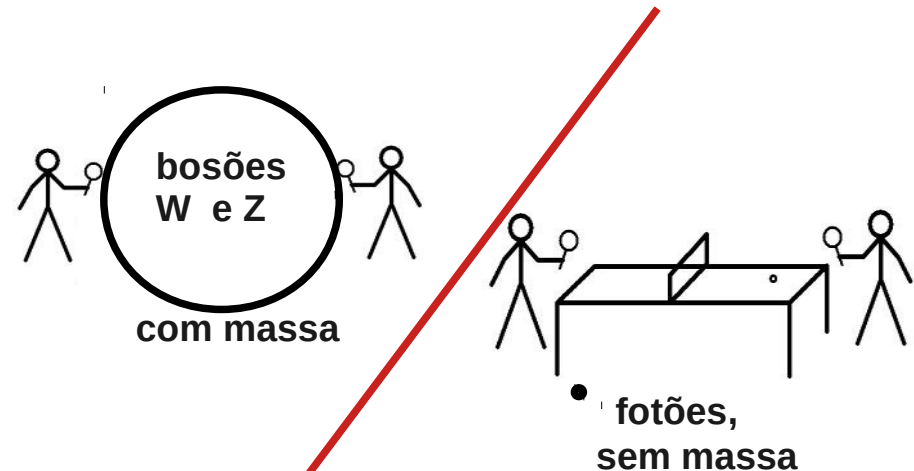
DECAIMENTO β



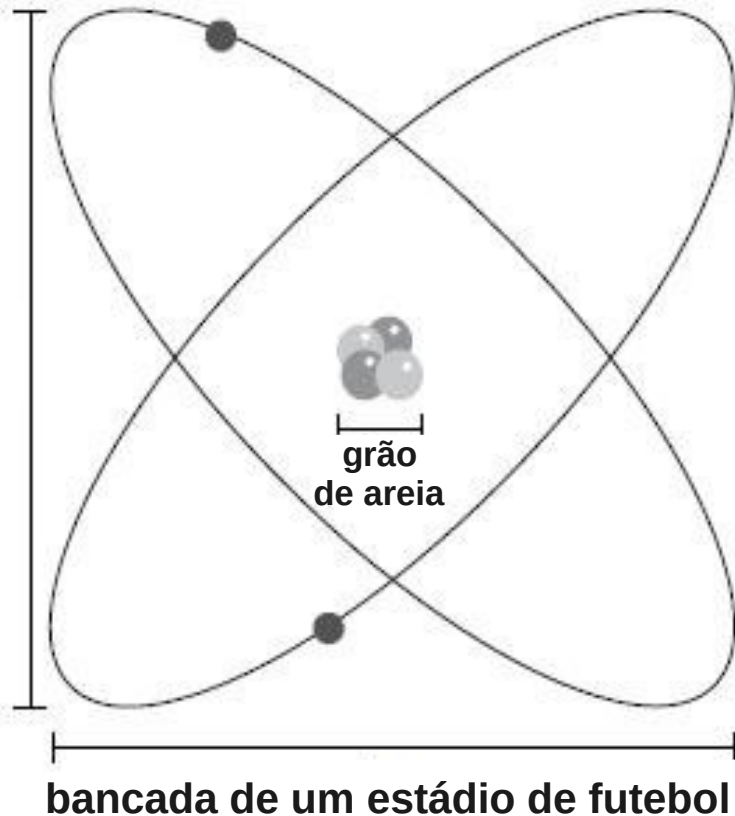
neutrinos só sentem a força nuclear fraca
(e só em distâncias muito curtas)

em 1930, é proposto um “remédio desesperado”:
uma partícula sem massa, sem carga elétrica e
... que não podemos detetar...

em 1957, foi detetado o primeiro (anti-)neutrino!



Neutrinos interagem fracamente



os neutrinos atravessam os átomos pelo vazio

só muito raramente batem no núcleo – e mudam-no!

é preciso 10^{19} neutrinos atravessarem-nos
(cerca de um ano a apanhar neutrinos do Sol)
para que um deles interaja no nosso corpo...

receita para ver um neutrino

polvilhar muitos neutrinos
numa taça com muitos átomos,
deixar repousar muito tempo,
a muito baixa temperatura,
com pouca luz e pouco ruído

De que são feitas as coisas?

de partículas elementares e forças fundamentais

1ª geração, descoberta estudando a “matéria normal”

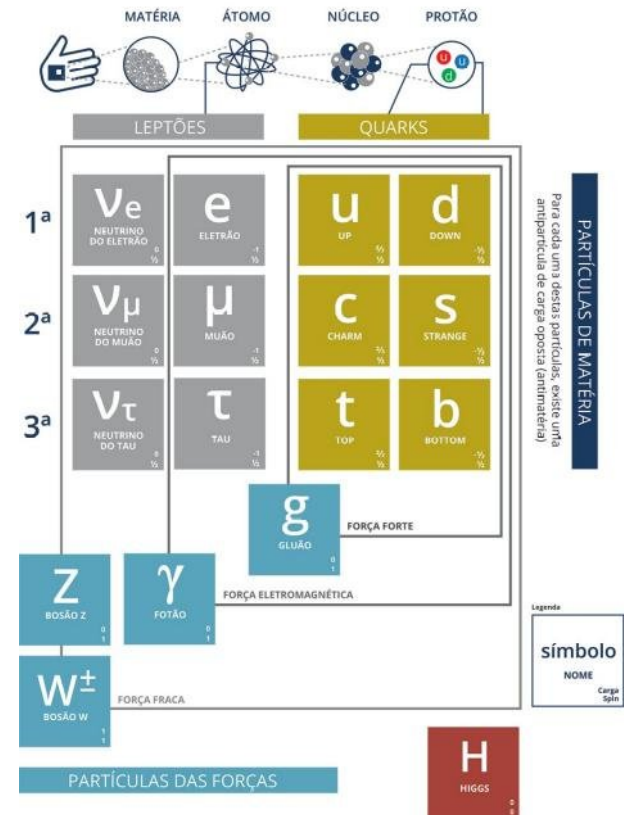
2ª geração, descoberta por surpresa na Natureza

3ª geração, descoberta em experiências no laboratório

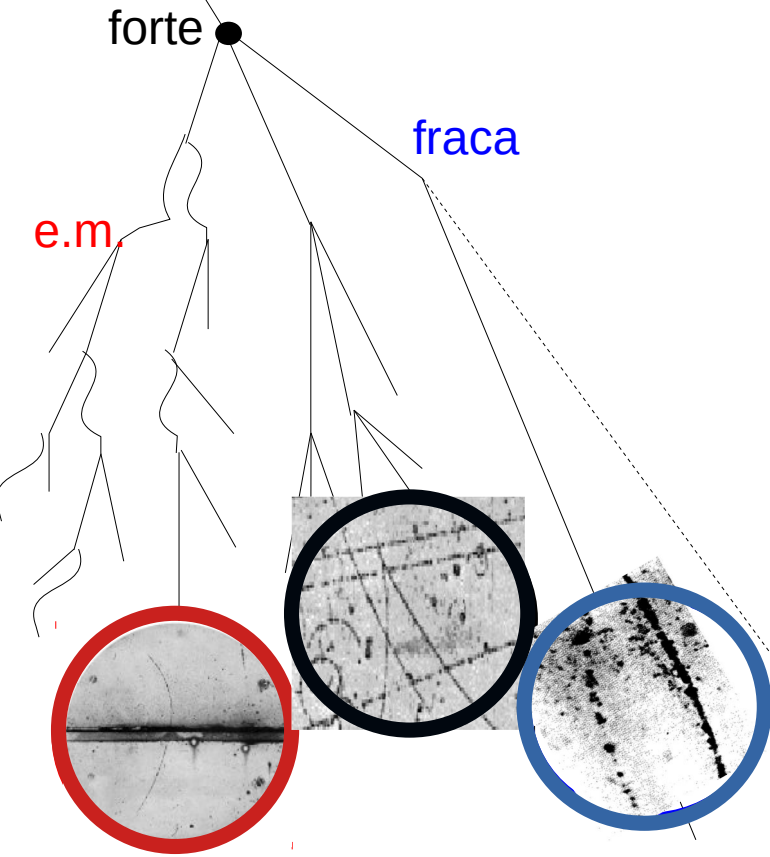
(tabela completada em 2012 com o bóson de Higgs)

$$E = m c^2$$

com mais energia podemos criar novas partículas



Observatórios em altitude



1912: subindo num balão para se afastar da radiação natural

Hess descobriu que a radiação aumenta com a altitude

1930: detetando partículas no topo de uma montanha
Anderson descobriu várias partículas desconhecidas

Um electrão com carga positiva? positrão, e^+

“É a outra solução da equação de Dirac!”

Um electrão com 200 x mais massa? muão, μ

“Ops, e isto? Quem é que pediu isto?”

π , K , Λ , Ω , Σ , Δ

Muitas combinações possíveis de quarks

muões e a relatividade

raios cósmicos produzem muitos muões na atmosfera terrestre

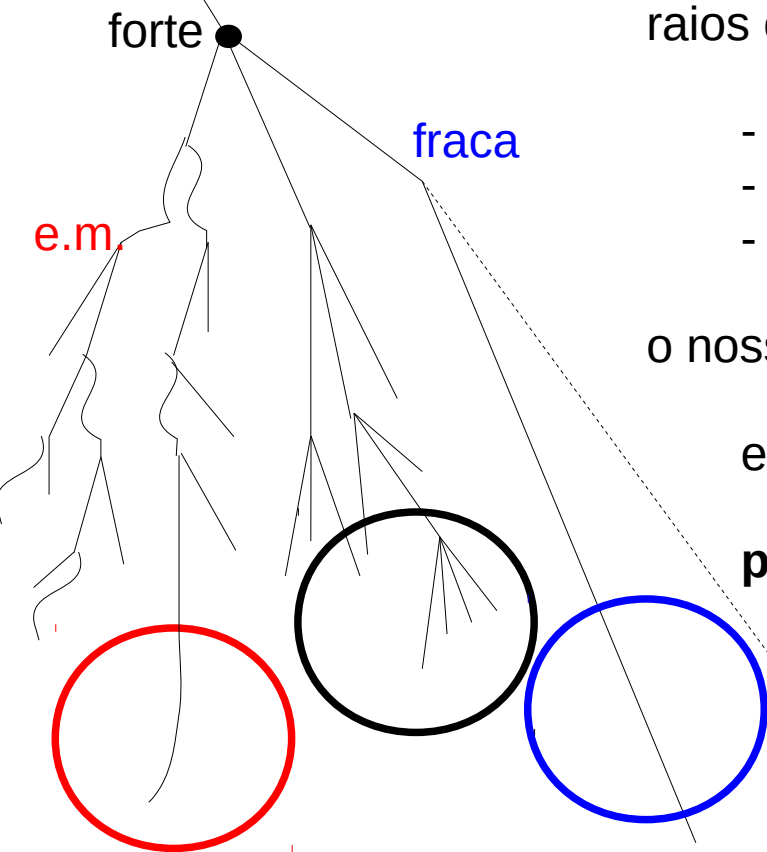
- viajam quase à velocidade da luz $c \sim 300\,000\text{ km/s}$
- mas vivem muito pouco tempo ($2\text{ }\mu\text{s} = 2 \times 10^{-6}\text{ s}$)
- vemos $1 / \text{cm}^2 / \text{min}$ à superfície ao nível do mar

“distância = velocidade $\times$ tempo = 600 m”?? é relativa!!

a velocidades próximas da da luz,
o espaço (visto pelo muão) contrai
o tempo (medido por nós) dilata



anti-partículas e anti-matéria



raios cósmicos produzem tantas partículas como anti-partículas

- elétrons com carga positiva e prótons com carga negativa
- neutrinos que uns criam elétrons e outros pósitrons
- outros neutrinos que criam múons negativos e positivos

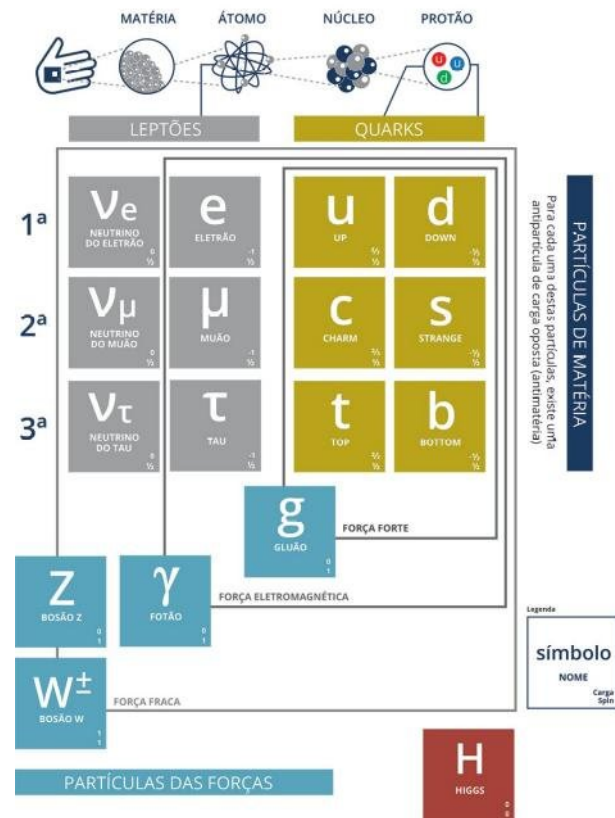
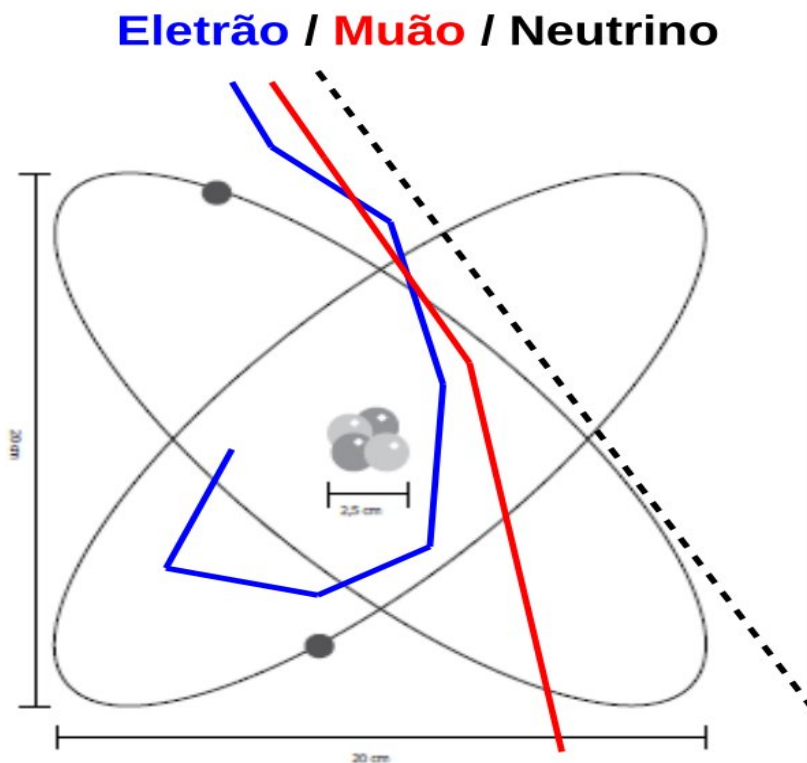
o nosso corpo produz mais de 100 pósitrons por hora (beta +)

e conseguimos produzir anti-átomos no laboratório!

porque não há anti-matéria à nossa volta?

matéria + antimatéria = energia (aniquilam-se!)

Criar imagens com partículas ?

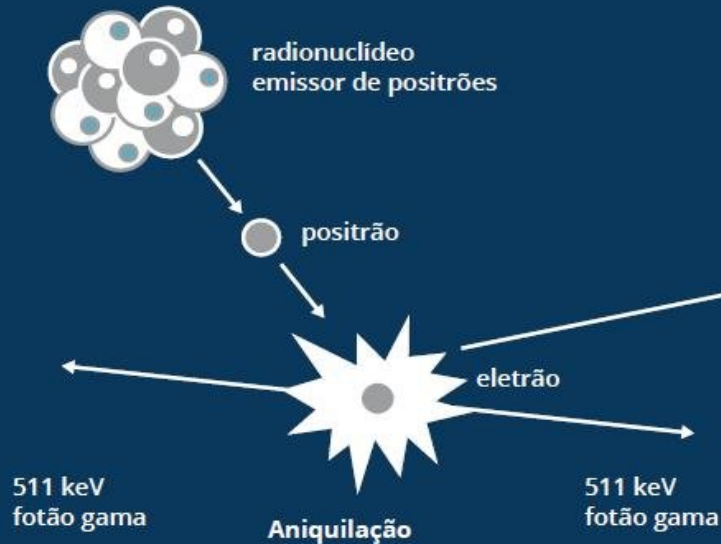


positrões na medicina

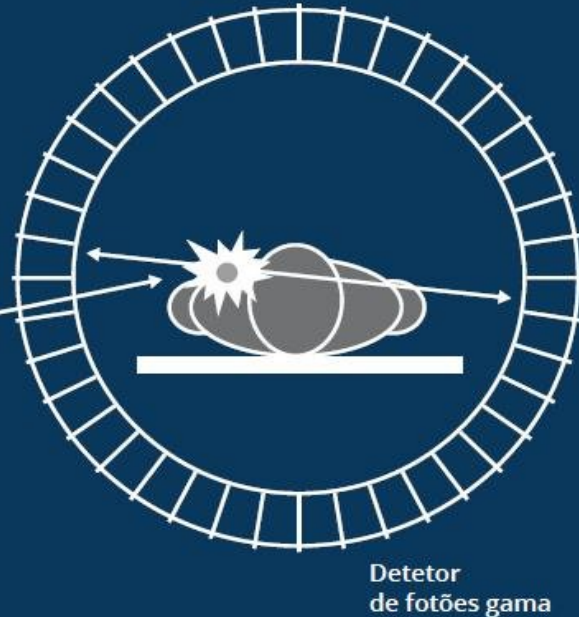
PET

A tomografia por emissão de positrões permite criar imagens do interior do organismo a partir da radiação emitida pela aniquilação de positrões e elétrons.

Emissão de positrões e aniquilação positrão-elétron



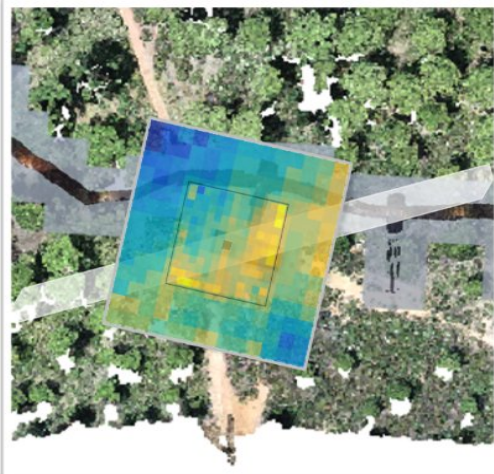
Scanner de PET



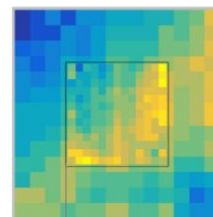
muões na arqueologia



muões na geologia



ÁREA DA DETEÇÃO



~ 17 x 17 m

~ 30 m x 30 m

na matéria os muões perdem energia lenta e constantemente (átomo a átomo)

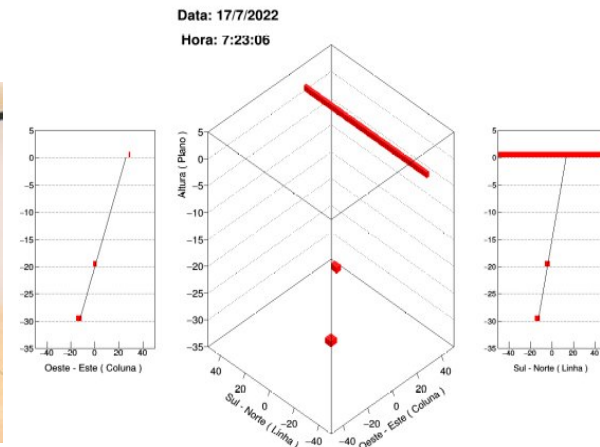
até pararem e decaírem, podemos ver as suas trajetórias nos nossos detetores

pages.lip.pt/loumu

LIP + ICT + Ciência Viva + LNEG

explorar a **muografia** em Portugal

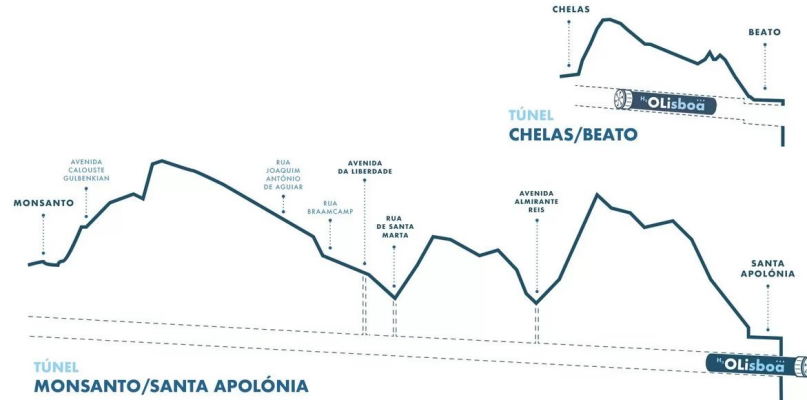
[visitas ao Lousal: 20 Julho e 3 Agosto de 2025]



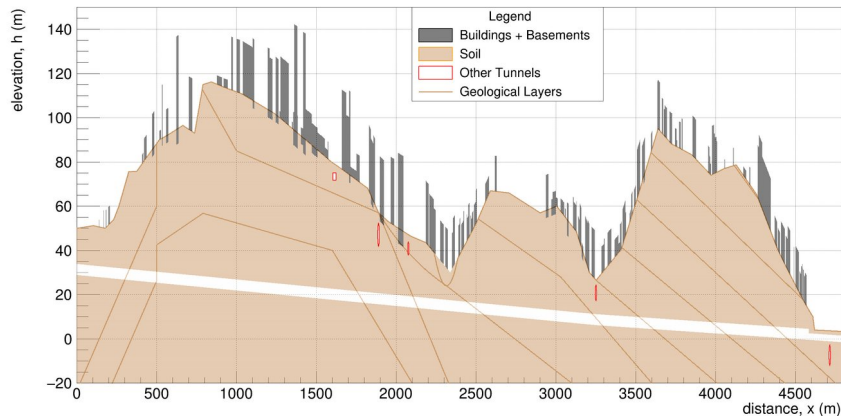
muões na cidade de Lisboa



PGDL
PLANO GERAL
DE DRENAGEM
LISBOA

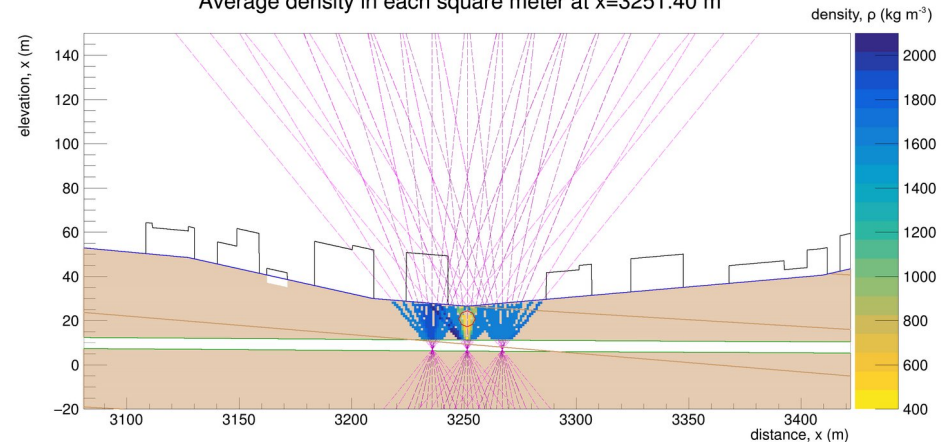


Longitudinal profile of the drainage tunnel



conseguiremos ver os túneis do metro!
conseguiremos ver os prédios maiores?
e o que mais poderemos encontrar????

Average density in each square meter at $x=3251.40$ m



neutrinos na astronomia

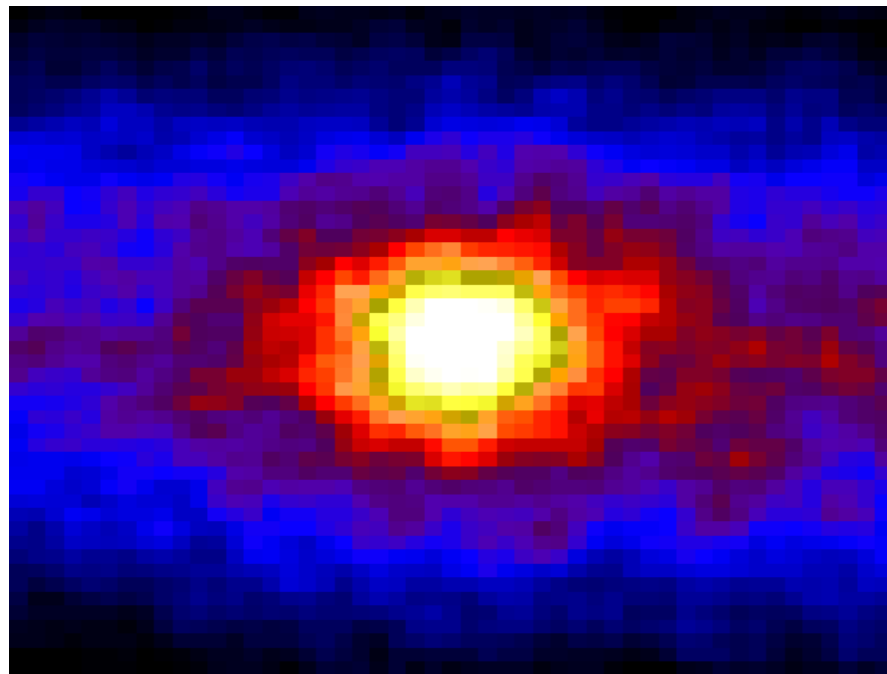
neutrinografia do Sol

(500 dias e noites de exposição
num detetor de 50 kton de água)

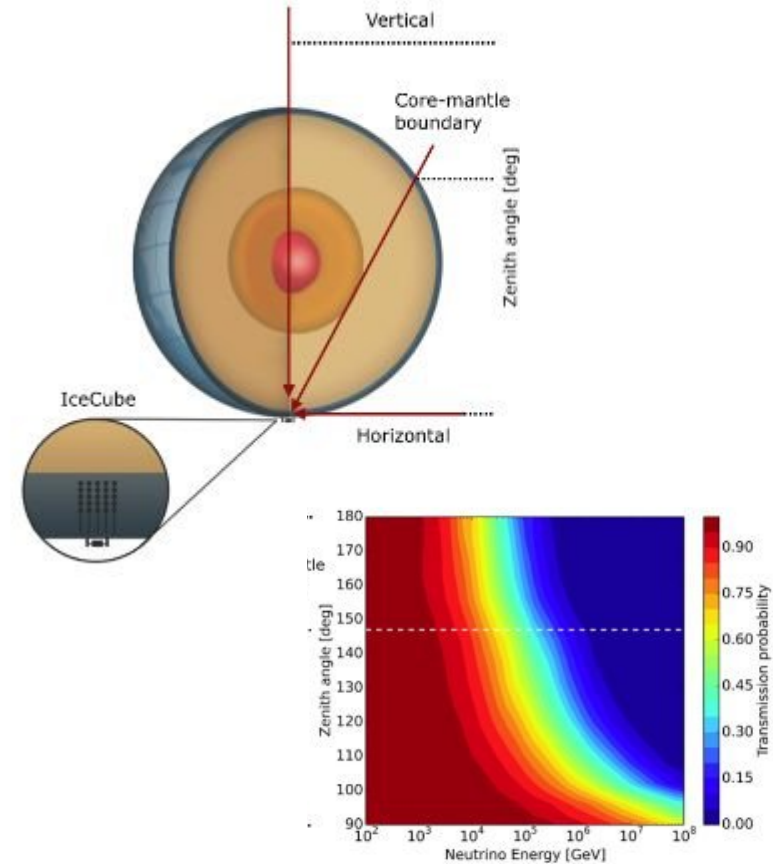
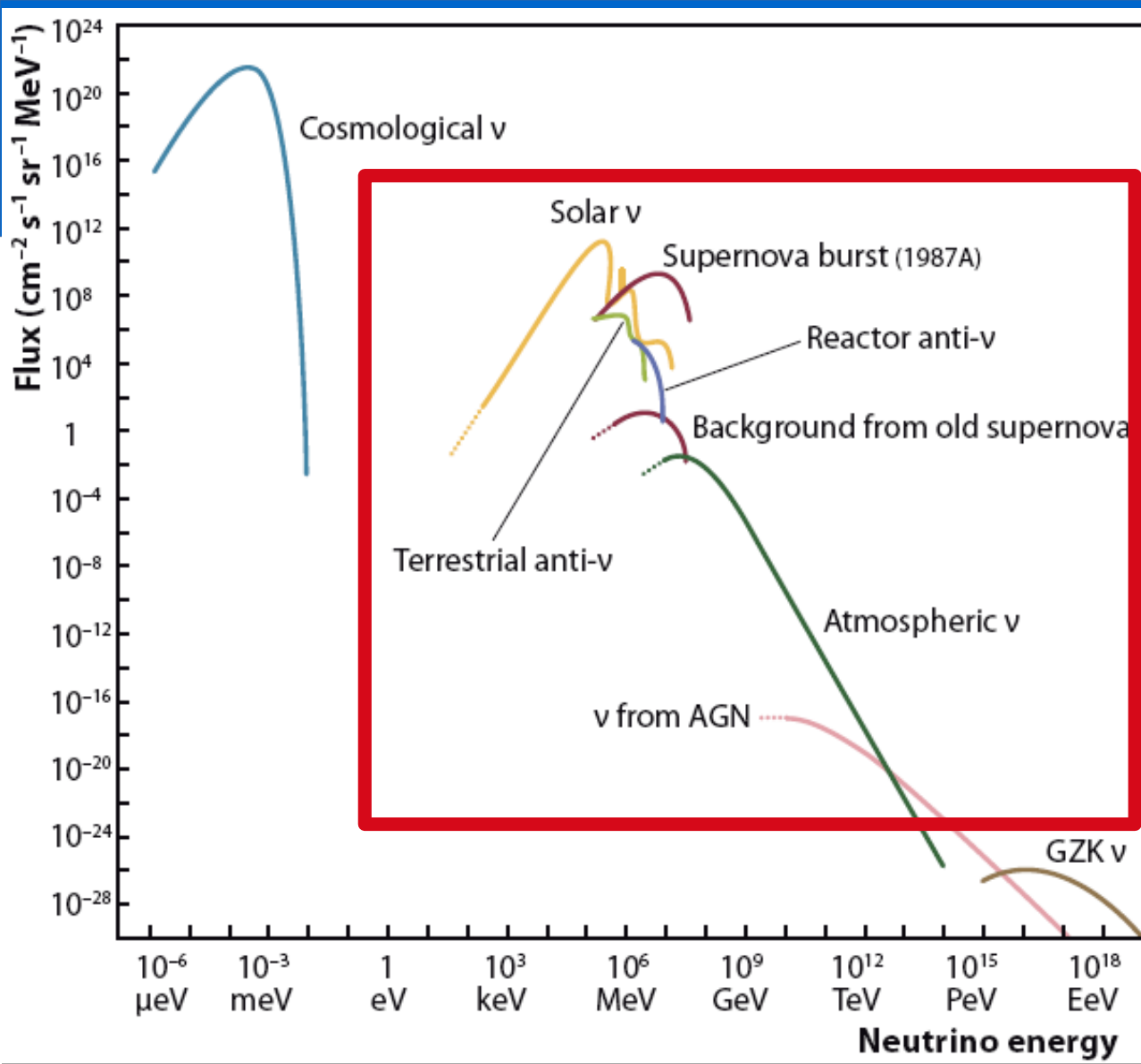
numa explosão de supernova em 1987
neutrinos chegaram 3 horas antes da luz!

Nota:

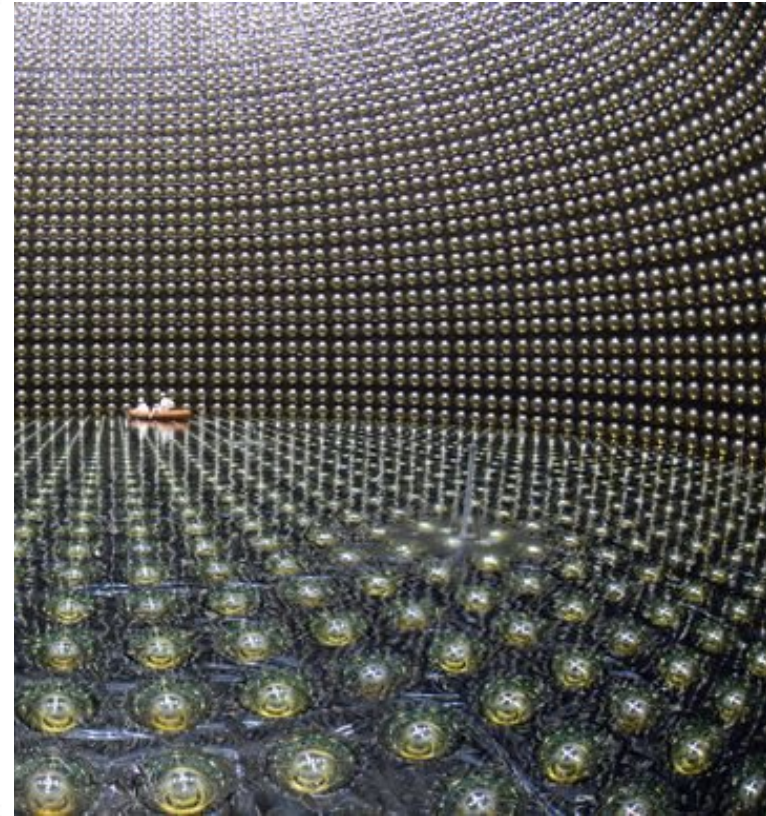
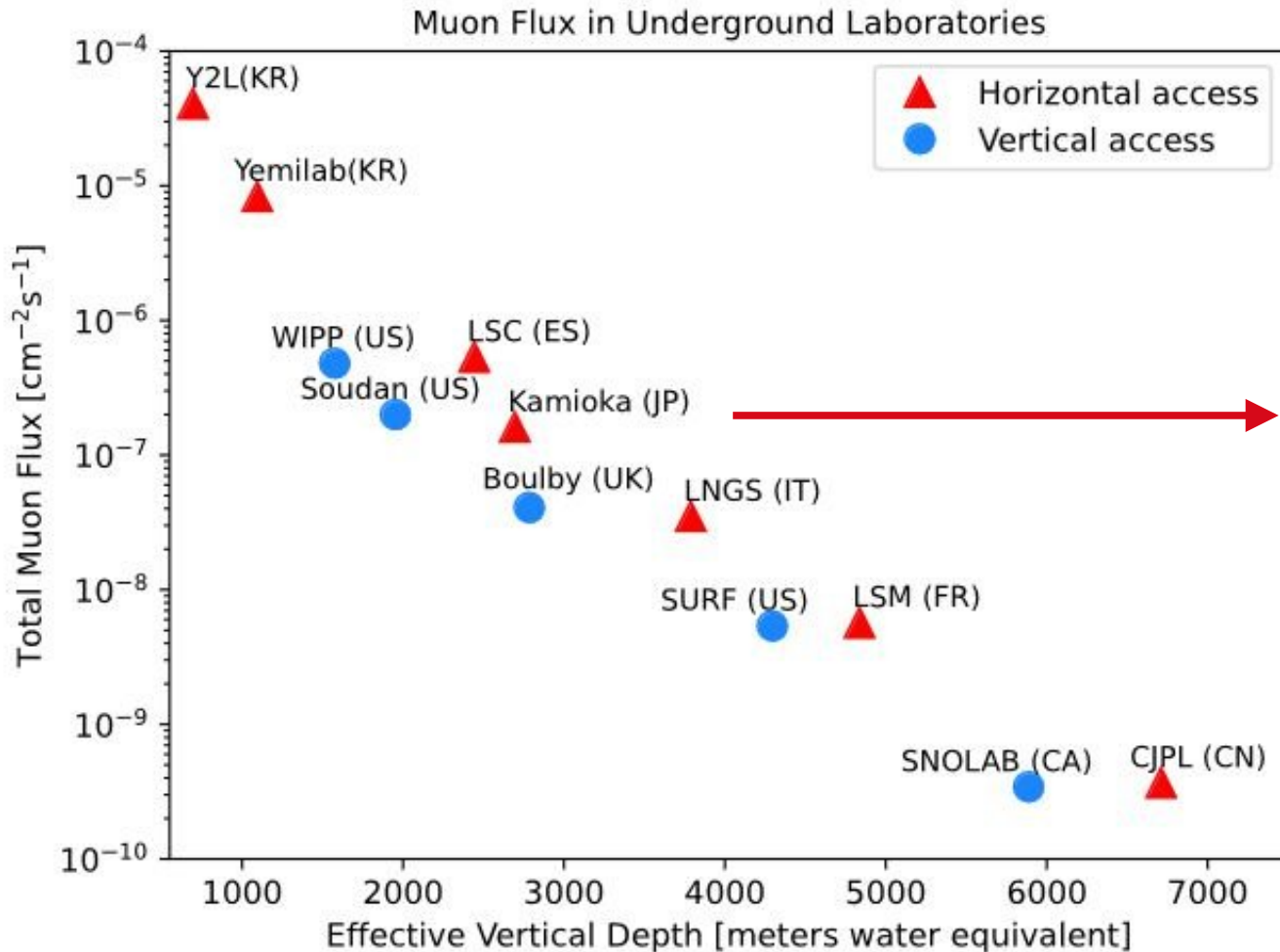
nunca vemos diretamente os neutrinos,
só os sinais posteriores criados pela sua passagem
(a mudança de um núcleo,
a criação de um electrão, muão, tau
ou anti-electrão, anti-muão, anti-tau)



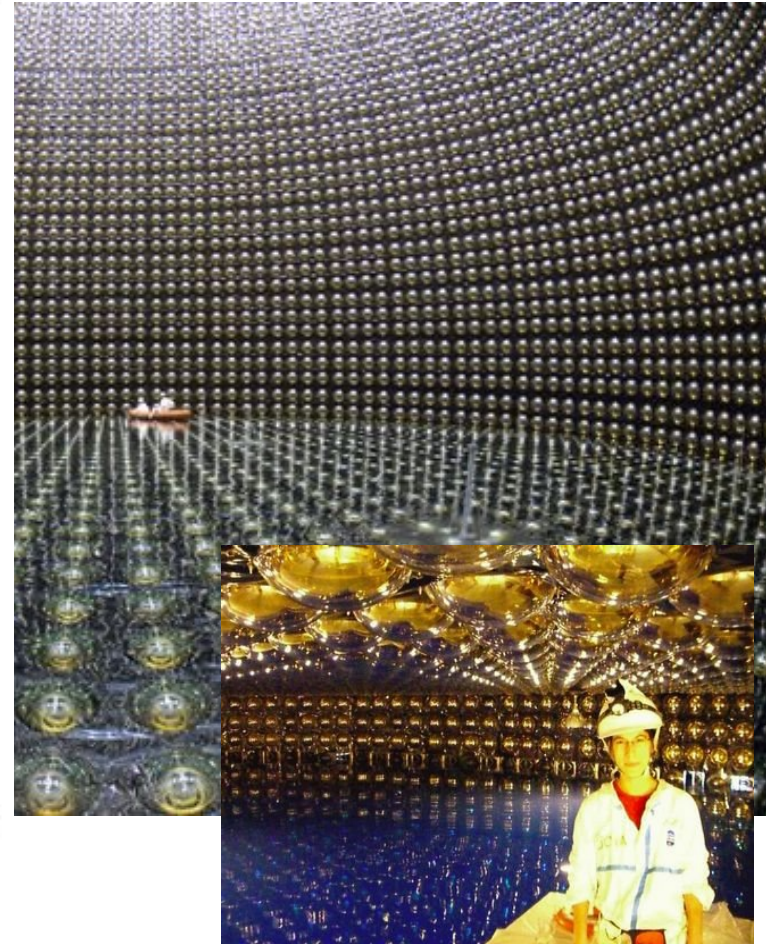
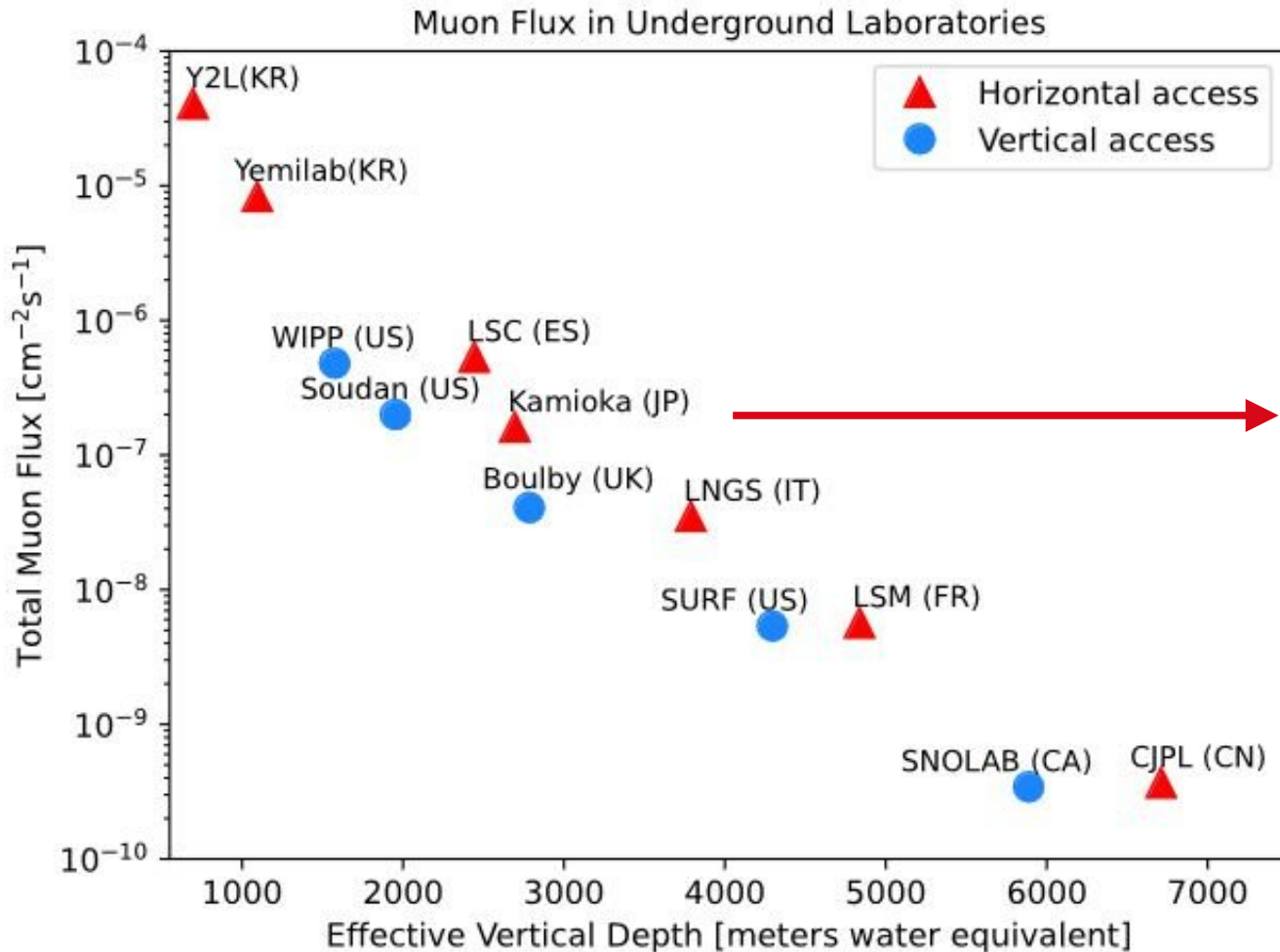
neutrinos de todo o lado!



Observatórios subterrâneos

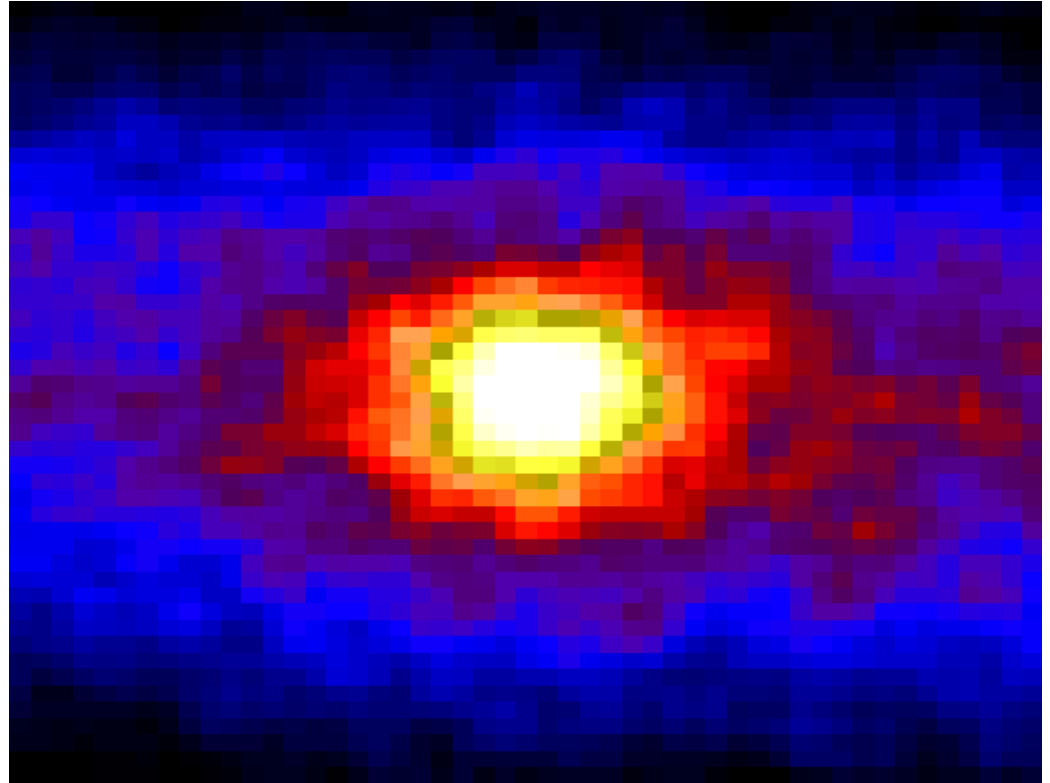
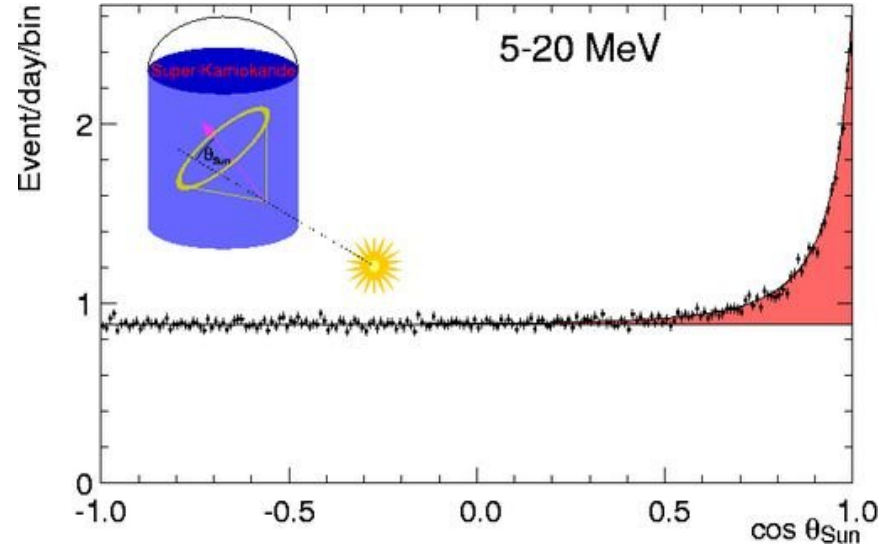


Observatórios subterrâneos

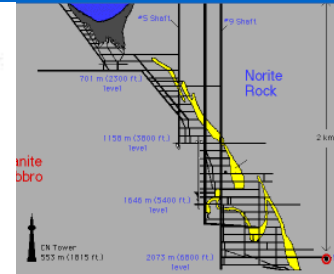
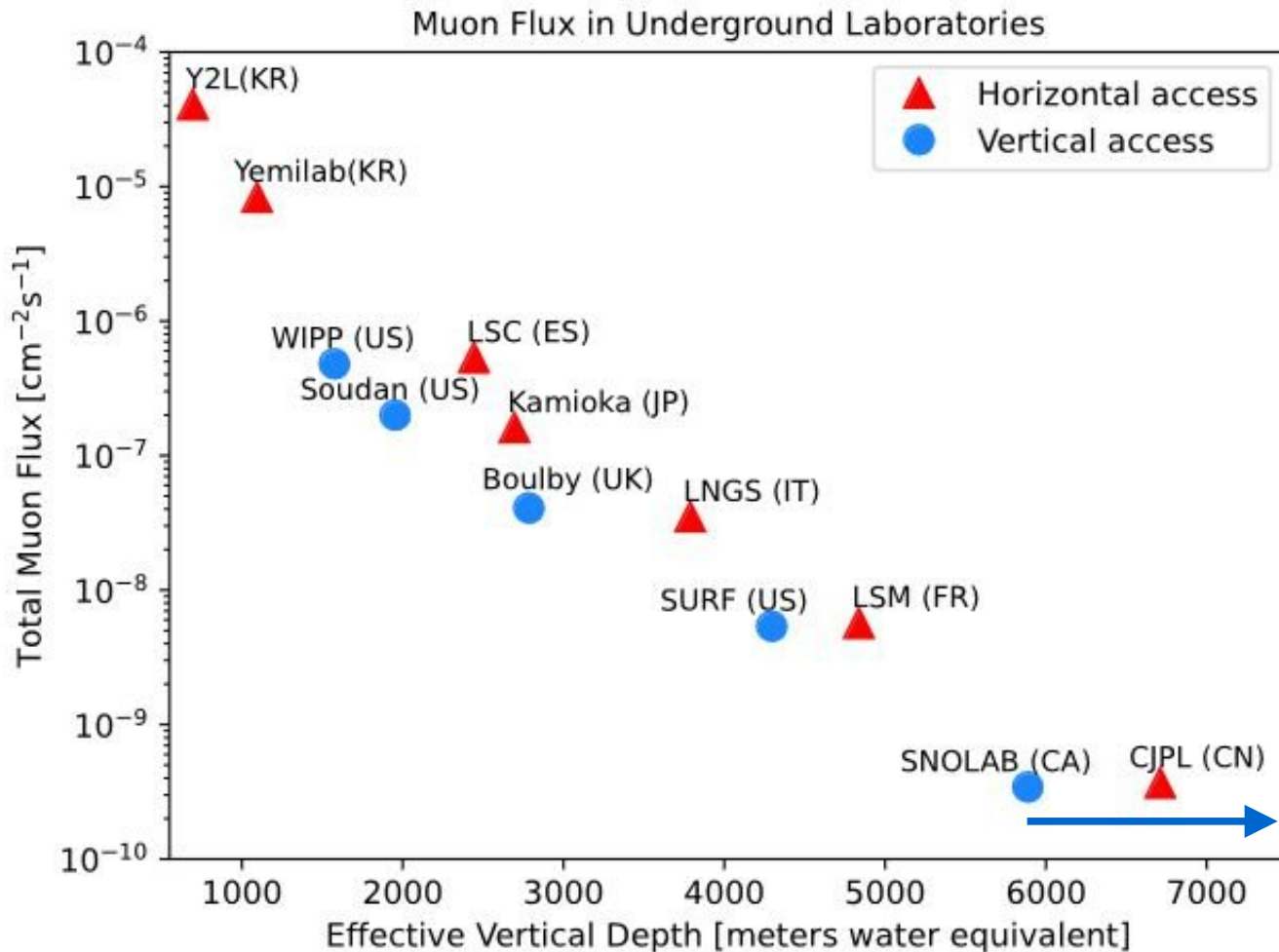


a neutrinografia do Sol

neutrinografia do Sol
(500 dias e noites de exposição
num detetor de 50 kton de água)



Observatórios subterrâneos



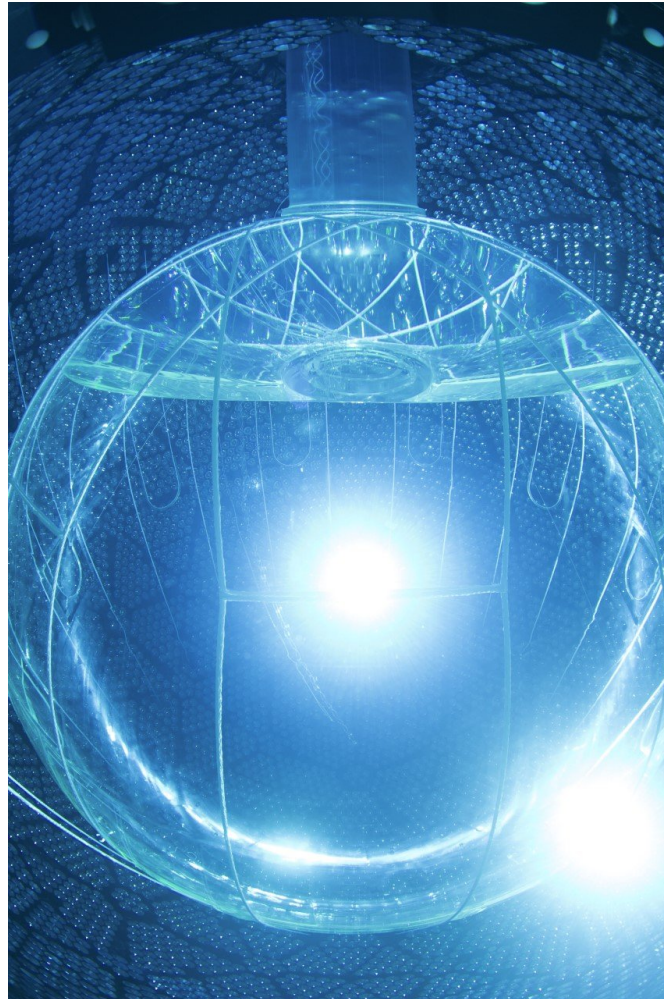
reutilizar o detetor SNO para SNO+

2000 m de profundidade
[só 3 muões por hora]

caverna cheia de água
[para radiação da rocha]

“volume ativo” numa
esfera de 6 m de raio
(5 cm de espessura)

9000 sensores de luz
a um raio maior de 8 m
[para a radiação extra]



“volume ativo” pode ter
vários líquidos no interior:

- água pesada em SNO
- água pura depois

Feixes de luz criados na direção
das partículas carregadas com
velocidade superior à da luz

- cintilador para SNO+
- cintilador +Te depois

Partículas carregadas de baixa
produzem muito mais luz
mas em todas as direções

SNO e os neutrinos solares

neutrinos solares e
água pesada salgada

$\nu + e \rightarrow \nu + e$
(tal qual como em H_2O)

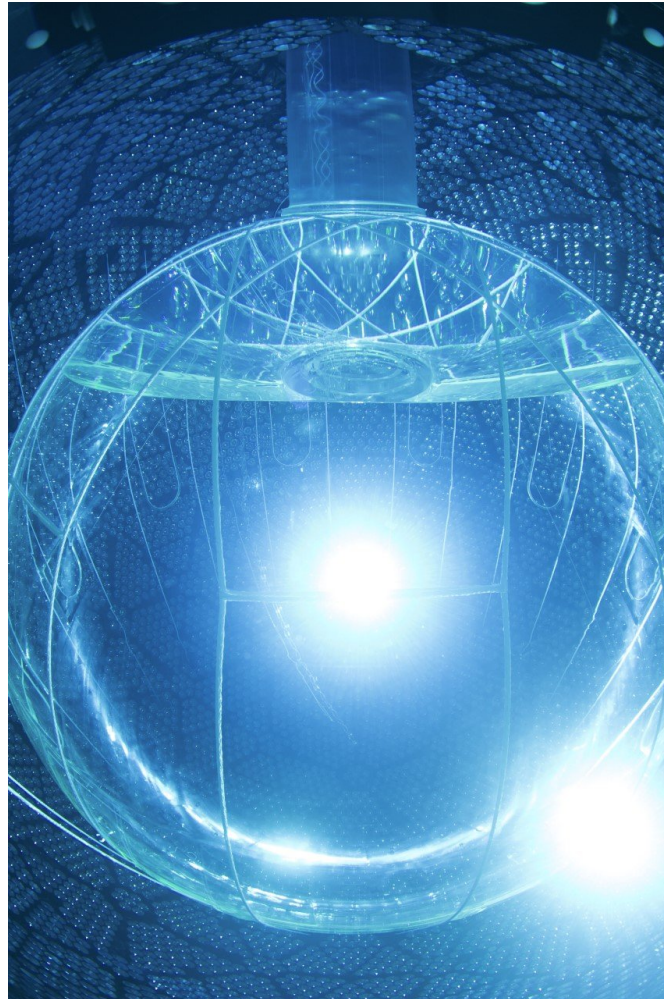
$\nu_e + (n,p) \rightarrow e + p + p$

$\nu_x + (n,p) \rightarrow \nu + p + n$

$n + {}^{35}\text{Cl} \rightarrow {}^{36}\text{Cl} + \gamma$

em todos os casos, o
que se vê são elétrões:

$\gamma \rightarrow e^+ + e^-$



o Sol emite neutrinos do elétron
(é até é fácil calcular quantos são)
na neutrinoграфия há muito menos!

SNO fez duas medições:

Fluxo ν_e = 1/3 Fluxo ν_x
Fluxo ν_x = modelo do Sol

**Confirma-se o modelo do Sol,
mas muda o modelo do neutrino**

a descoberta das oscilações de neutrinos

neutrinos solares (Energia ~ MeV)

40% do esperado em água normal

100% do esperado em água pesada

* 1/3 são neutrinos do elétron

* 2/3 são outros tipos de neutrino

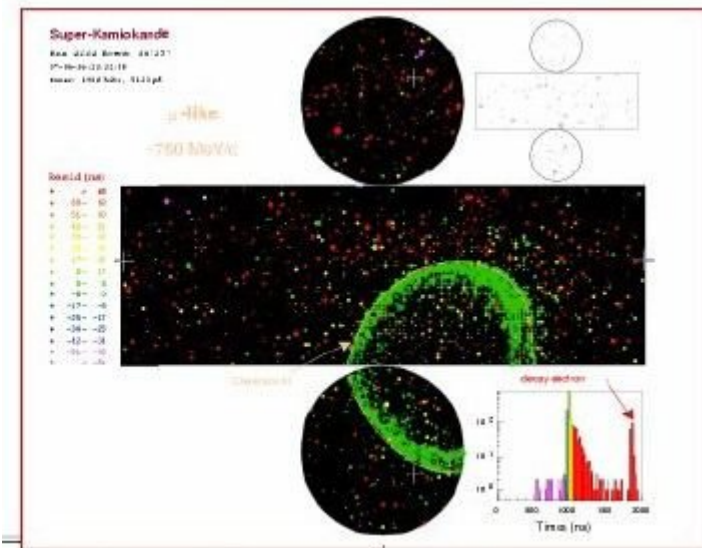
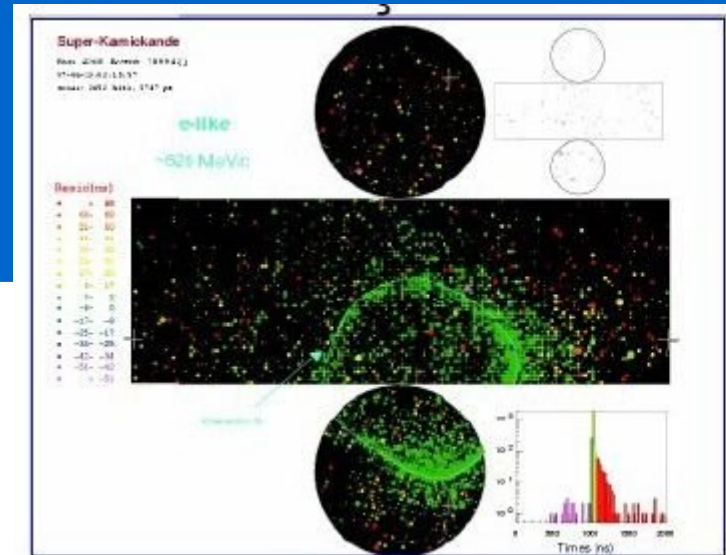
neutrinos atmosféricos (Energia ~ GeV)

100% do esperado para neutrinos do elétron

100% do esperado para neutrinos do muão
vindos de cima (cerca de 10 km)

50% do esperado para neutrinos do muão
vindo de baixo (cerca de 10 000 km)

* neutrinos mudam ao longo do seu percurso



Prêmio Nobel 2015

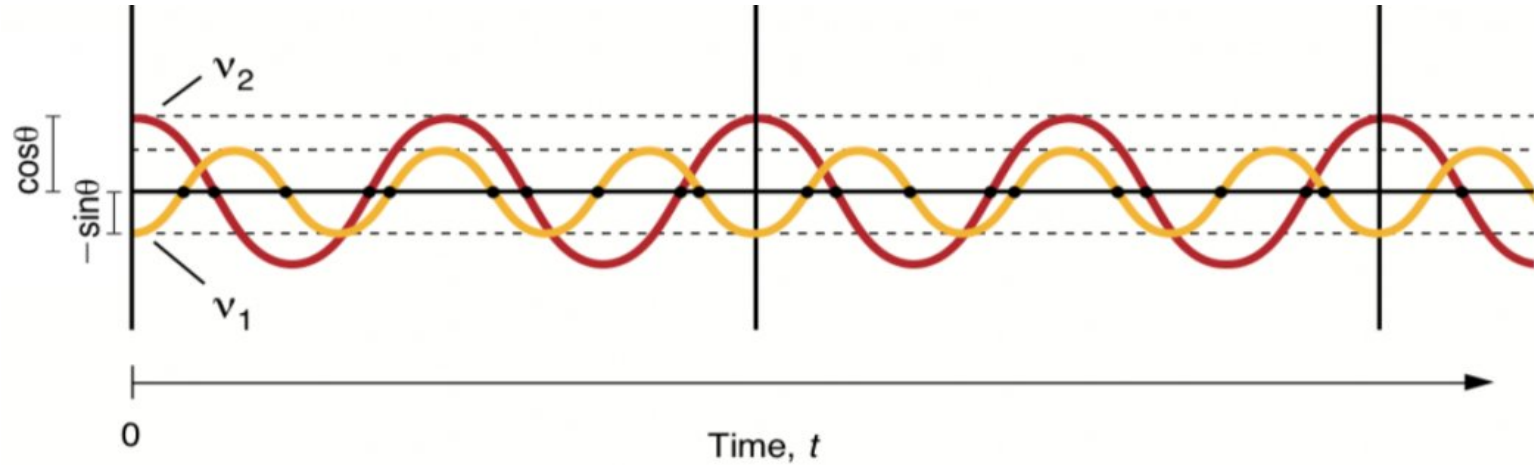


Os neutrinos mudam de família ao longo do tempo!

Oscilação é um grande exemplo da mecânica quântica

Se sentem o tempo, é porque têm massa!

Os neutrinos oscilam ao longo do tempo, mudam de tipo enquanto viajam:



se interagem perto da fonte criam elétrons (são neutrinos de elétron)
ao longo do caminho misturam-se com neutrino de muão e de tau
a oscilação depende do comprimento de onda, e por isso da energia
podemos ver a oscilação em função da distância ou da energia

Prémio Nobel 2015



só depois de medido
o 3º lado do triângulo

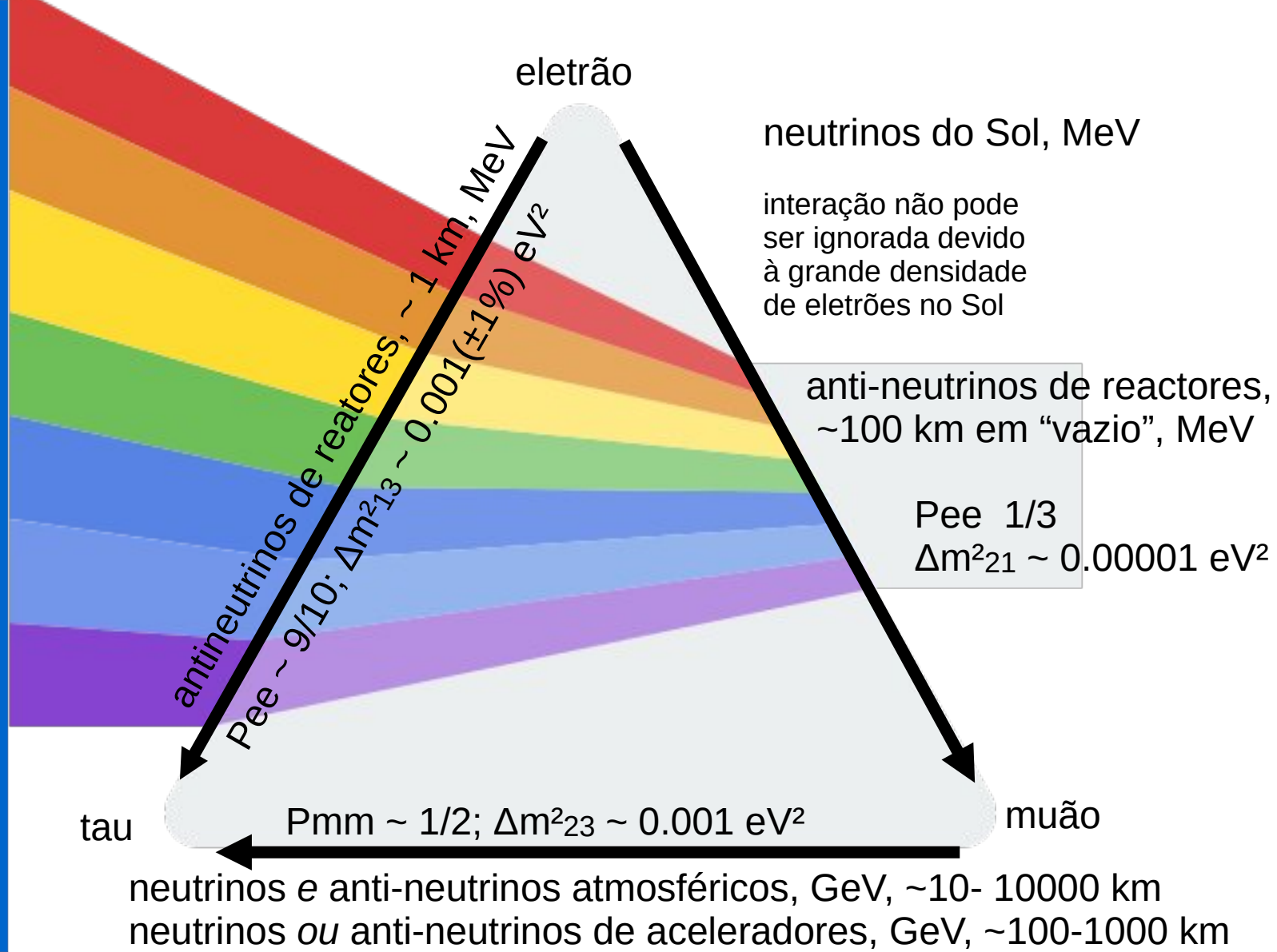
prémio Breakthrough
para 5 experiências

triângulo fecha com
muão → tau → electrão

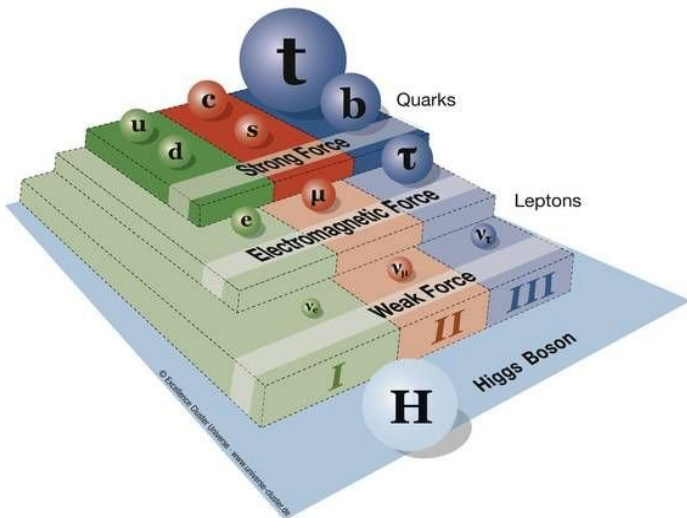
km/MeV = 1000 km/GeV

1000 km no ar é vazio
1000 km de Terra não

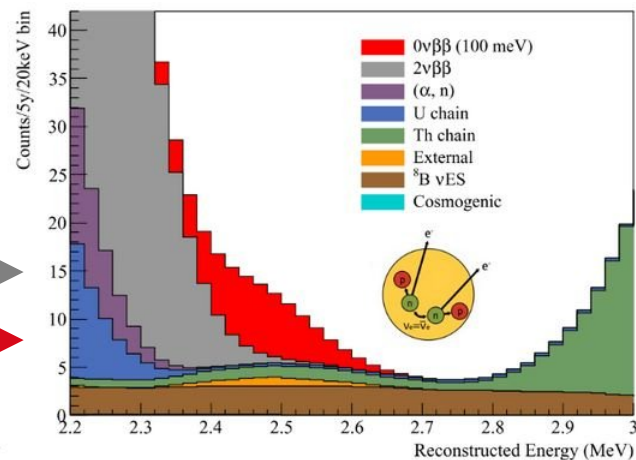
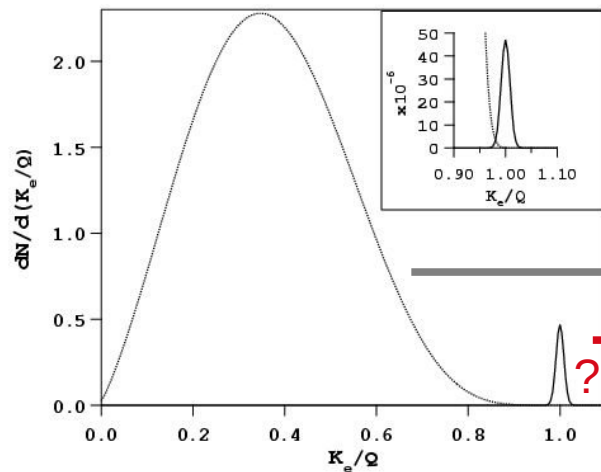
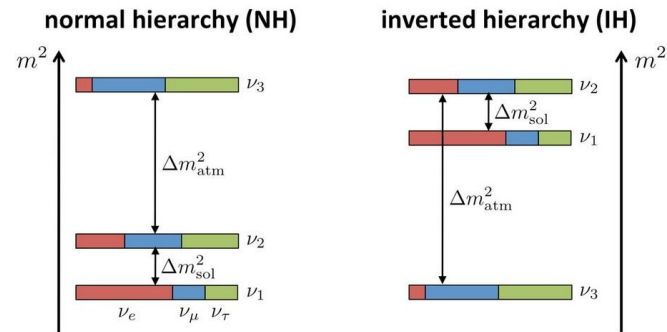
Pxy anti-neutrinos
= Pyx neutrinos ?



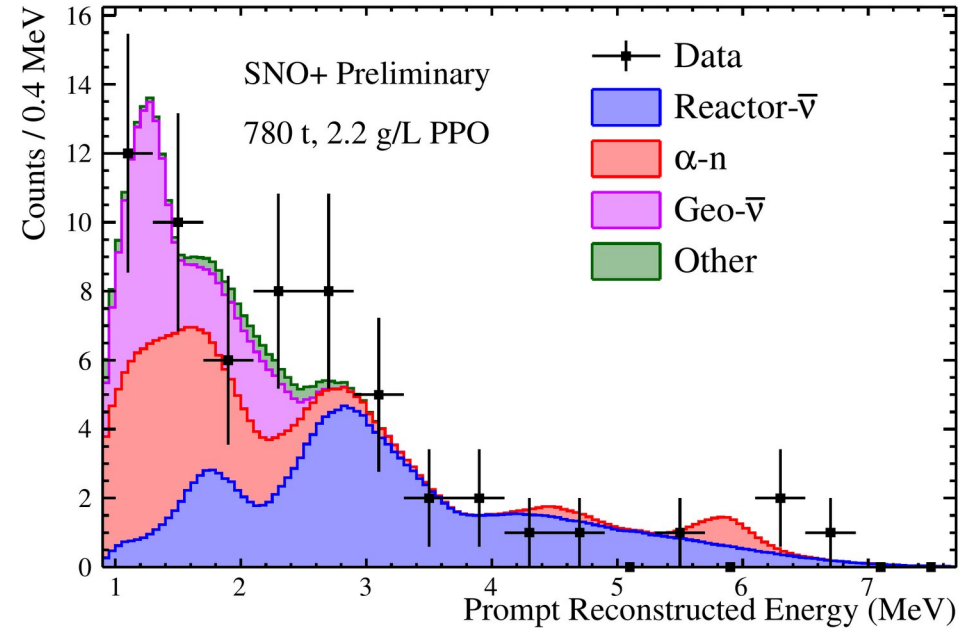
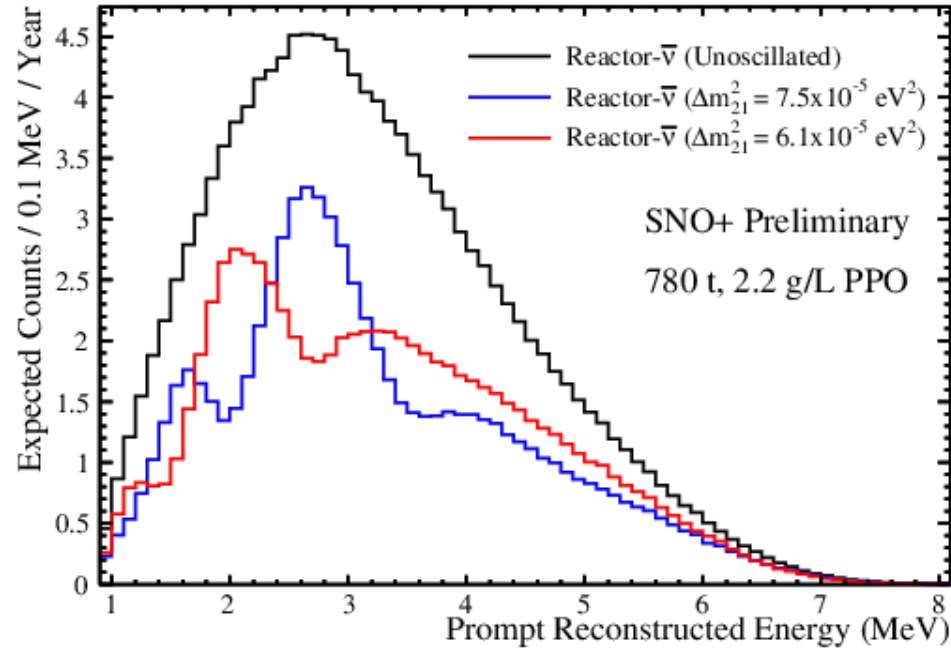
a massa dos neutrinos e o decaimento beta duplo



quark t	173 GeV
Muão	106 MeV
Elétrão	511 keV
Neutrino	< 1 eV
$\sqrt{\Delta m^2_{23}}$	~ 0.1 eV
$\sqrt{\Delta m^2_{21}}$	~ 0.01 eV



medida das oscilações em SNO+

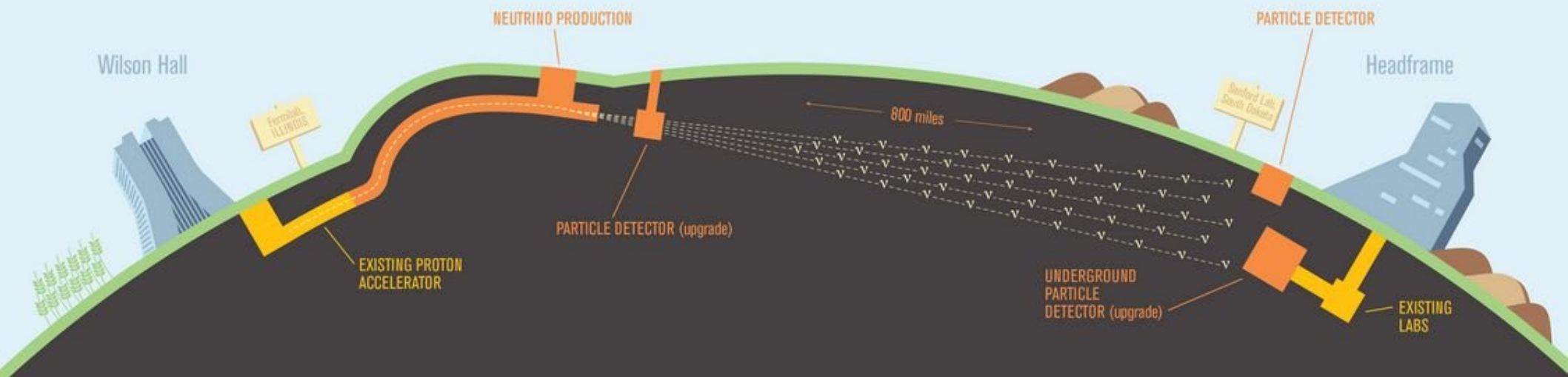


o padrão da oscilação é função da diferença entre dois valores de massa de neutrino

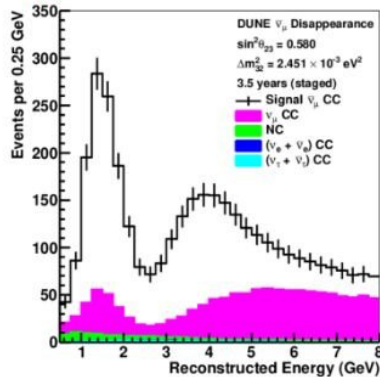
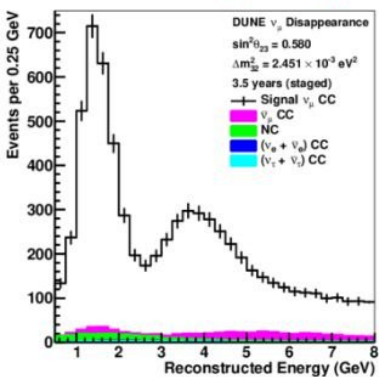
é muito parecida à diferença de valores que deduzimos dos neutrinos solares,
mas aqui são antineutrinos, será exatamente igual?

Há diferenças entre neutrinos e antineutrinos?

o projeto de DUNE



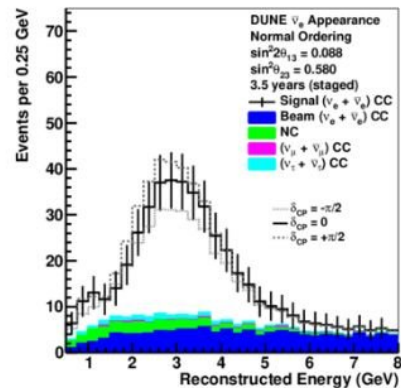
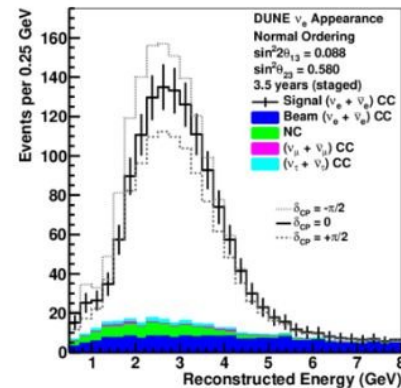
(anti)- ν_μ disappearance



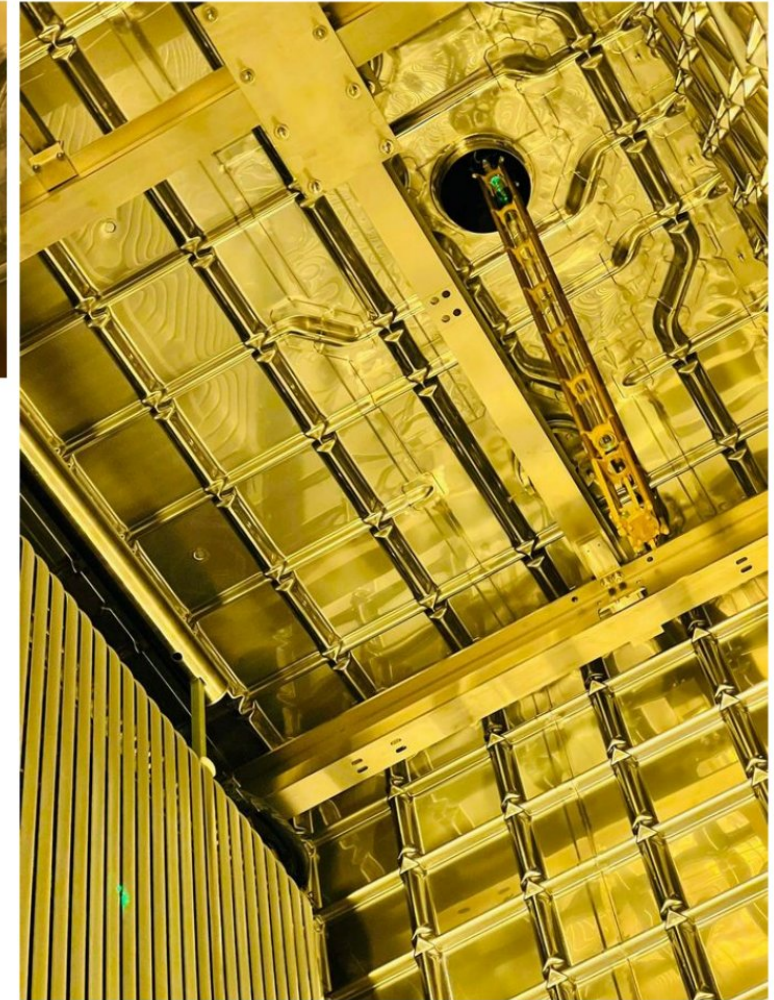
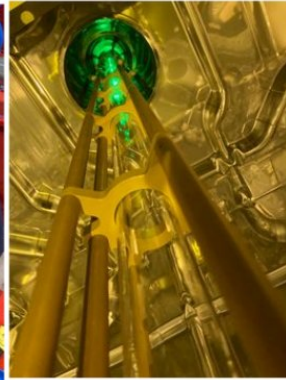
medir as oscilações
depois de 1300 km

(anti)neutrinos de
muão e de eletrão

(anti)- ν_e appearance

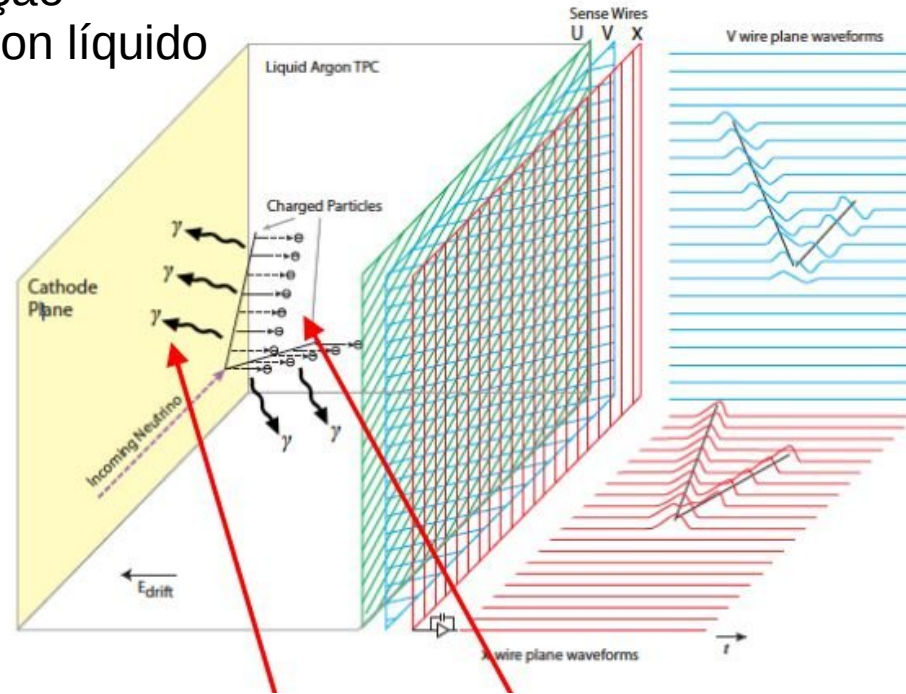


protoDUNE no CERN

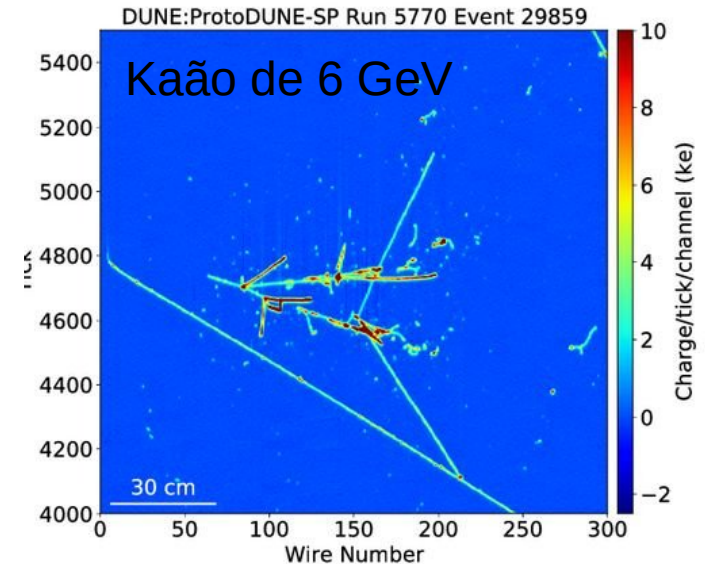
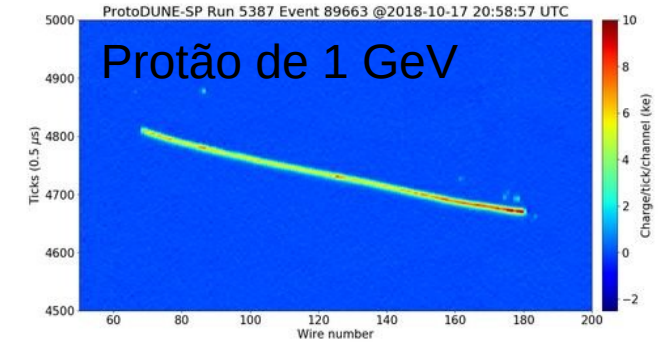


protoDUNE no CERN

câmara de projeção
de traços em árgon líquido



neutrinos de energias mais altas vão criar mais partículas
protótipos testados com partículas carregadas no CERN
(tb o uso de métodos de IA para reconstrução de imagem)



em resumo

Os neutrinos são as partículas mais frequentes do universo e ao mesmo tempo são, das partículas conhecidas, as menos bem conhecidas

Os neutrinos quase não interagem mas por vezes vemos alguns e trazem-nos informação do centro do Sol, da Terra, ou de Supernovas

Os neutrinos existem em três sabores diferentes e oscilam entre eles e então têm massa, mas muito mais pequena do que o que podemos medir

Quase tudo o que sabemos sobre neutrinos aprendemos com surpresa de fontes naturais e esperamos ainda muitas surpresas com tudo o que ainda queremos aprender sobre eles

mais perguntas ?

como fazemos as descobertas?

As três gerações de partículas de matéria

- 1^a estudando a matéria normal (tabela periódica e radioatividade)
- 2^a observando processos naturais raros (surpresas nos raios cósmicos)
- 3^a criando testes dedicados em laboratório (aceleradores de partículas)

Teoria, observação e experiência

- e^+ pósitrons previstos pela teoria
- μ múons observados surpreendentemente
- ν neutrinos descobertos em experiências dedicadas

As novas partículas são depois usadas para ver de novas formas !!

escalas de energia

1 eV **é a energia que uma pilha de 1 V dá a cada um dos eletrões que acelera**

1 keV = 10^3 eV energia típica dos fotões de raio-X

1 MeV = 10^6 eV massa do eletrão $\sim 0.5 \text{ MeV}/c^2$
($m \sim 10^{-30} \text{ kg}$; $c = 300\,000 \text{ km/s}$)



1 GeV = 10^9 eV massa do protão, $\sim 1.0 \text{ GeV}/c^2$

1 TeV = 10^{12} eV os protões do LHC no CERN têm 7 TeV

1 PeV = 10^{15} eV energia típica dos protões dos raios cósmicos

1 EeV = 10^{18} eV mas detetam-se raios cósmicos até 100 EeV!



1 Joule = 6 EeV **é a energia de um humano a mover-se devagar (50 kg a 0.2 m/s)**

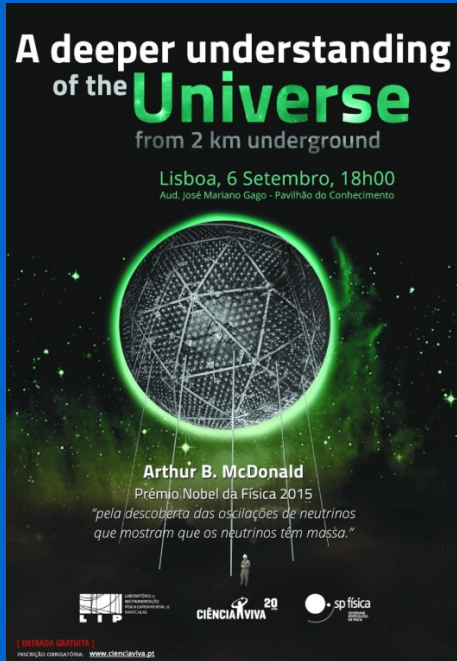
neutrinos e supernovas



Prémio Nobel 2015

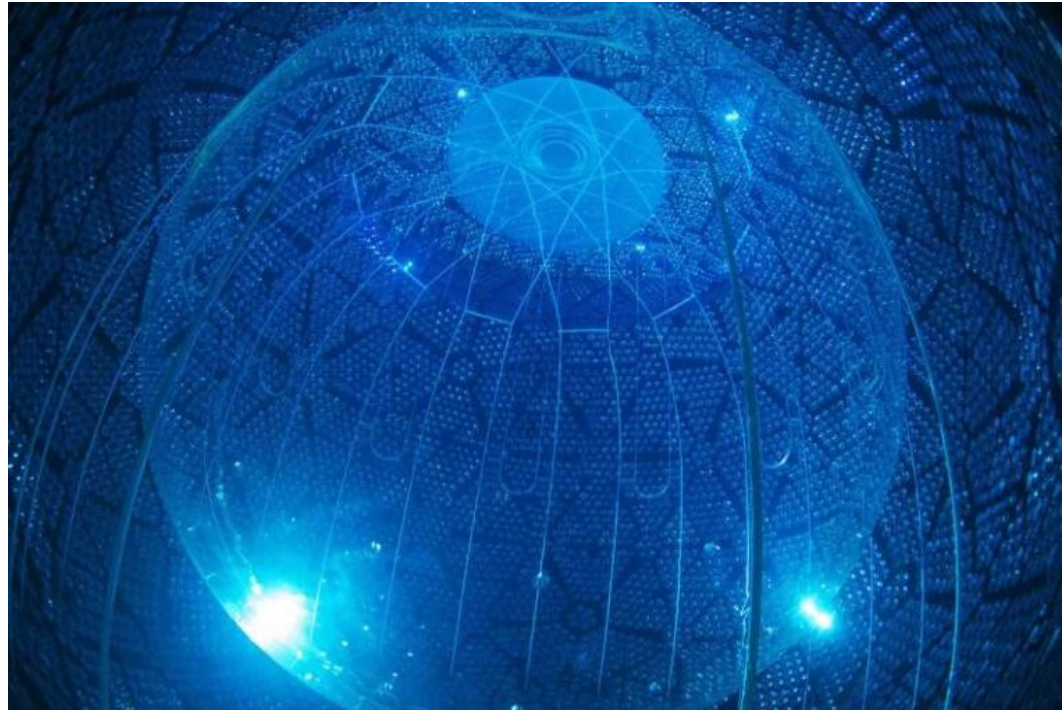


As propriedades dos neutrinos continuam a ser exploradas!



O LIP participa na experiência SNO+

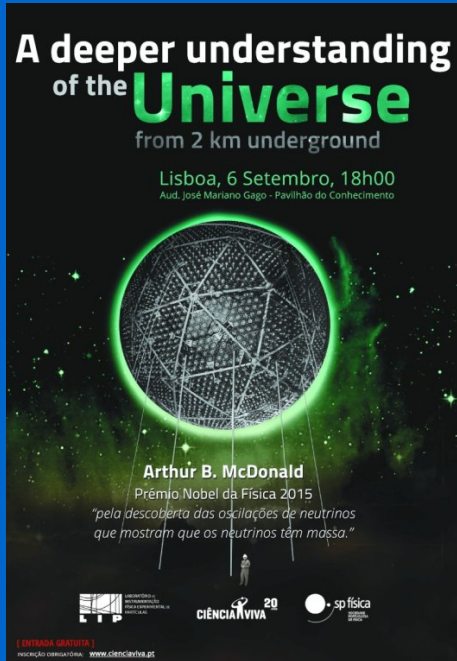
mede neutrinos do Sol, da Terra (e de Supernovas?)
mede decaimento beta duplo (com e sem neutrinos):
os neutrinos são a sua própria anti-partícula??
contribuem para um Universo de matéria (e não anti-matéria)?
[ajudarão a explicar a matéria escura??]



Prémio Nobel 2015



As propriedades dos neutrinos continuam a ser exploradas!



O LIP participa na experiência DUNE
mede neutrinos (e anti-neutrinos) produzidos num acelerador
com grande precisão nas oscilações de neutrinos:
é igual ou é diferente entre eles???
contribuem para um Universo de matéria (e não anti-matéria)?



decaimentos radioativos

A maior parte das partículas e estados nucleares são instáveis e vivem um tempo limitado. Ao fim de algum tempo decaem em estados mais estáveis e em partículas mais leves.

A probabilidade de uma partícula (ou núcleo) decair durante um dado intervalo de tempo, é uma propriedade desse tipo de partícula (ou núcleo) e é constante ao longo do tempo.

Se há N partículas no instante T , durante um intervalo ΔT , devem decair $\Delta N = - N \cdot \Delta T \cdot \lambda$ em que λ é a probabilidade constante, a que chamamos a constante de decaimento.

A vida média dos dados

A probabilidade de sair “1” no lançamento de qualquer dado perfeito é sempre a mesma, $\lambda =$

1. Lança todos os dados que tens
2. Retira todos aqueles em que saiu “1”
3. Aponta na tabela quantos dados ainda tens
4. Repete o processo enquanto ainda tiveres dados
5. Representa os resultados da tabela num gráfico
6. Como podes recuperar o valor de λ a partir do gráfico?
7. Quanto “tempo” passou até a amostra se reduzir a metade?
8. Relaciona a “vida média” com a constante de decaimento

Número do lançamento	Dados a lançar (N)	Dados com “1” (ΔN)
0	Todos	
1		
2		
3		
4		
5		
...		

decaimentos radioativos

identifica os vários tipos de decaimento radioativo, unindo as propriedades correspondentes na tabela

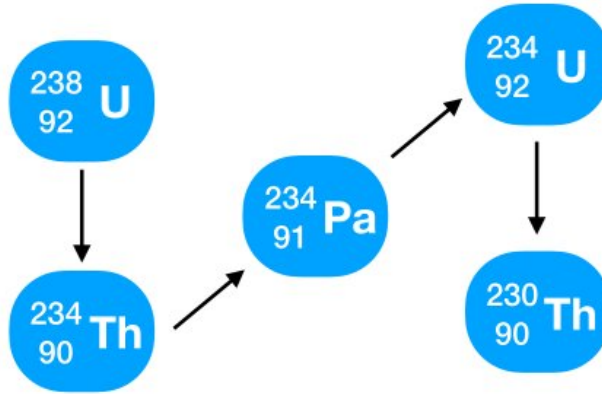
Decaimento	Partículas emitidas	Simbolo	Nome do decaimento
$^{210}_{84}\text{Po} \longrightarrow ? + ^{206}_{82}\text{Pb}$	um positrão e um neutrino	β	decaimento beta+
$^{14}_6\text{C} \longrightarrow ? + ? + ^{14}_7\text{N}$	dois protões e dois neutrões	$\beta+$	decaimento alfa
$^{22}_{11}\text{Na} \longrightarrow ? + ? + ^{22}_{10}\text{Ne}$	um electrão e um anti-neutrino	α	decaimento beta
$^{130}_{52}\text{Te} \longrightarrow ? + ? + ^{130}_{54}\text{Xe}$	dois electrões e dois anti-neutrinos	$2\nu\beta\beta$	decaimento beta duplo
$^{130}_{52}\text{Te} \longrightarrow ? + ^{130}_{54}\text{Xe}$	dois electrões	$0\nu\beta\beta$	decaimento beta duplo sem neutrinos

série de decaimento do urânio

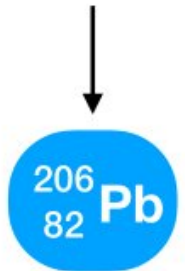
tenta completar a série radioativa do urânio (até ao chumbo), identificando os vários decaimentos alfa e beta

↓ = decaimento alfa
↗ = decaimento beta

238 = massa total
92 = numero de
protões



isótopos intermédios



o urânio e os geoneutrinos

A vida média do urânio-238 é comparável à idade da Terra: 4.5×10^9 anos.
Podemos usar os geoneutrinos para saber quanto Urânio existe no planeta?

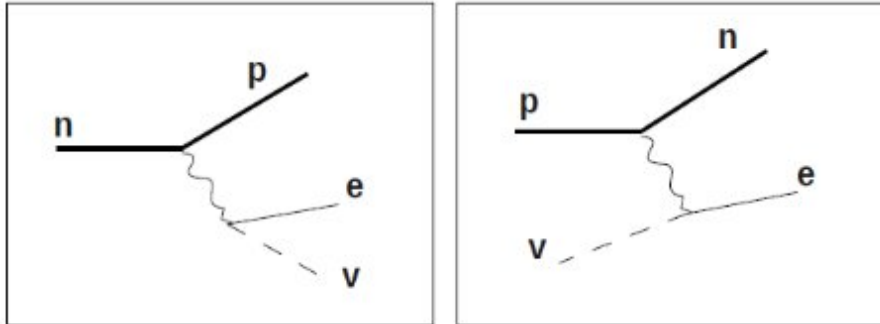
Quanta energia é libertada por cada núcleo de urânio que decai?

E quantas partículas alfa, beta, e neutrinos ou antineutrinos?

Como estimarias a energia dos geoneutrinos emitidos?

Podemos detetar estes geoneutrinos?

diagramas de Feynman, que ajudam nos cálculos
(aqui o tempo lê-se da esquerda para a direita)

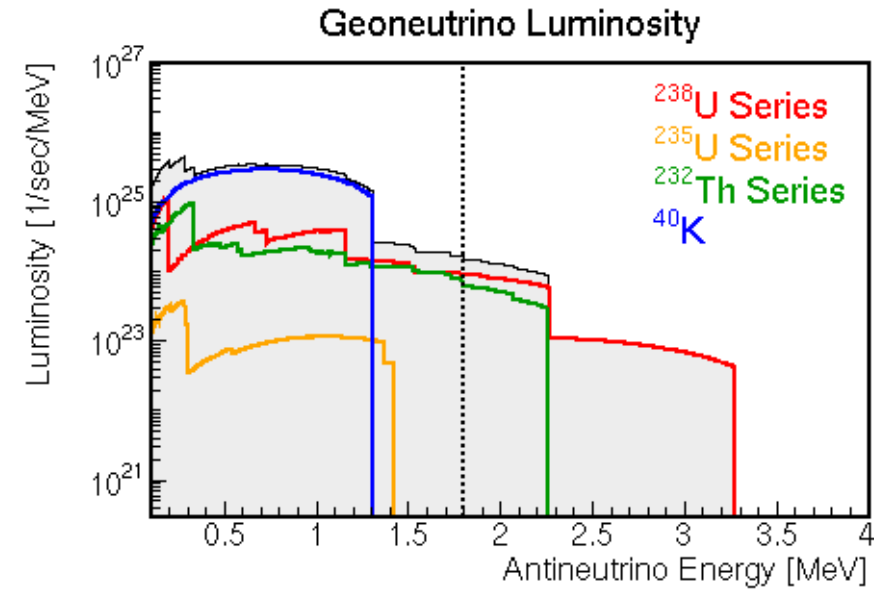


Identifica eletrões, positrões, neutrinos e antineutrinos
nos diagramas do decaimento beta e do processo inverso

A energia de cada partícula tem sempre duas componentes:
a energia cinética e a massa em repouso, $E^2 = (pc)^2 + (mc^2)^2$

Como estimarias a energia dos (anti)neutrinos detetados?

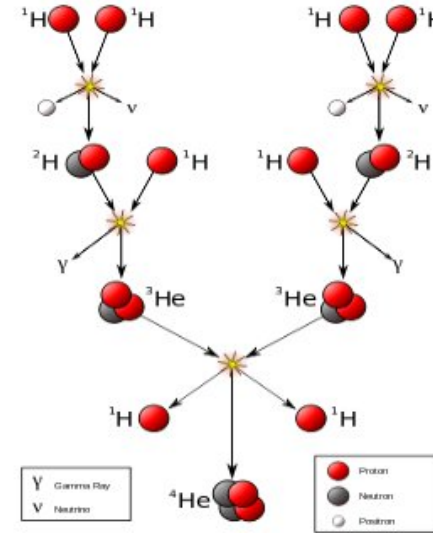
neutrinos da Terra e do Sol



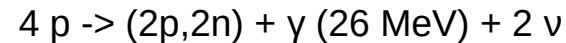
11 May 2006 00:51:51 JST: geoneutrino-luminosity-2.kino

A Terra emite anti-neutrinos, nos decaimentos beta das séries radioativas do urânio, tório e potássio. Detetamos os geo-neutrinos pelo processo inverso.

Sabendo a luminosidade dos geoneutrinos, podemos saber a quantidade de Urânio na Terra?



O principal processo de produção de energia no Sol é a fusão de Hidrogénio que leva à criação de Hélio



Sendo a luminosidade na Terra de 1367 W / m^2 qual é o fluxo de neutrinos solares (por m^2 e por s)?

o LIP e a tabela periódica

#2 De que elemento falamos? Existe em tomates e bananas e, portanto, em todos nós! Tem um isótopo radioactivo que emite positrões. É, por isso, a maior fonte de anti-partículas no corpo humano!



VER RESPOSTA

47 enigmas sobre os elementos químicos
(muitos deles vimos hoje)

#3 Qual é o elemento que surge das rochas e cuja presença se tenta minimizar ventilando as habitações?



VER RESPOSTA

#5. Qual o elemento químico que vai ser adicionado ao cintilador líquido no detector de neutrinos SNO+?



VER RESPOSTA

#13. A experiência de neutrinos SNO+ encontra-se no SNOLAB, um laboratório subterrâneo no Canadá instalado numa mina activa de que elemento químico?



VER RESPOSTA

#17. Qual o elemento químico que será usado no interior do futuro detector de neutrinos DUNE?



VER RESPOSTA