

# Neutrinos: O Que São e Para Que Servem?

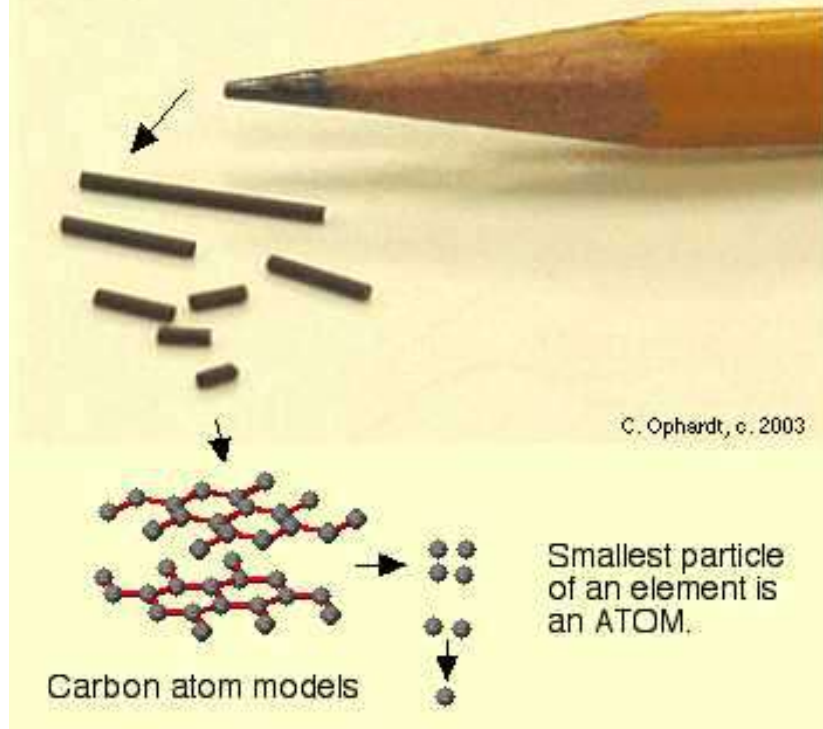
*André de Gouvêa*

*Northwestern University*



## Física Em Casa

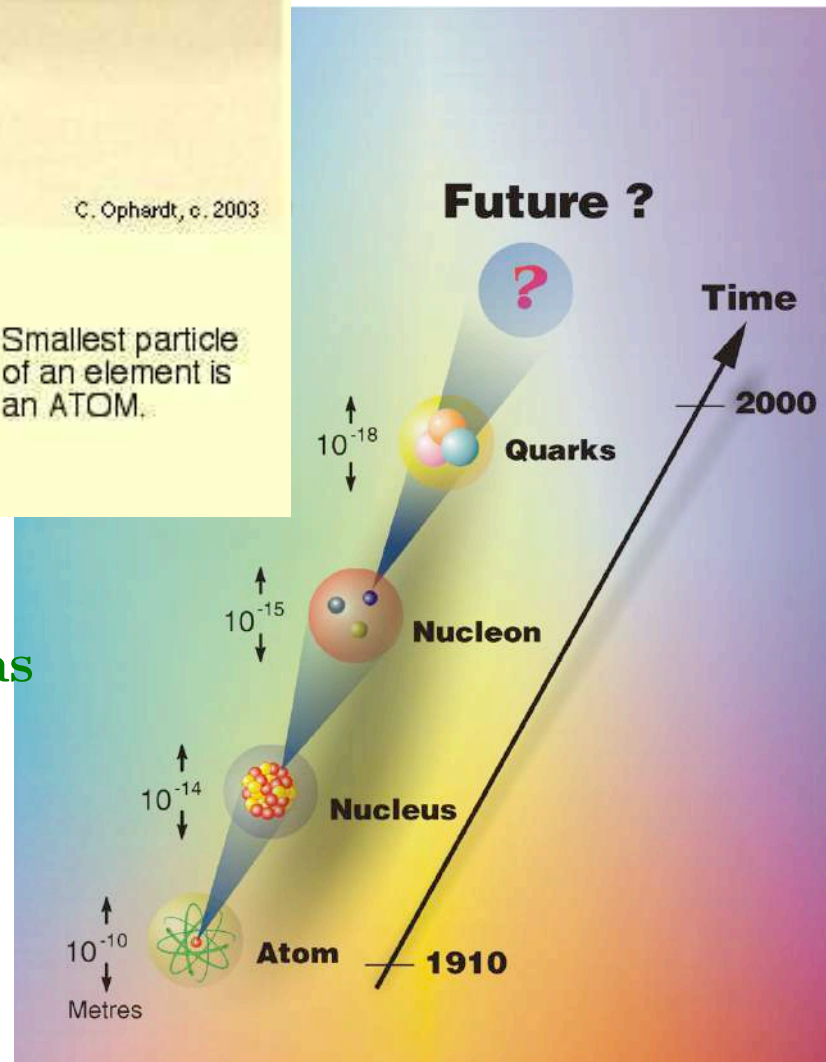
## Carbon, C: Graphite



## Física de Partículas

### Perguntas:

- Quais os ingredientes básicos da matéria?
- Como esses interagem uns com os outros?



- Quais são as leis fundamentais que descrevem todos os fenômenos naturais (pelo menos em tese)?
- E ainda outras perguntas práticas:
  - como funciona o sol?
  - elementos pesados?
  - ...

# Periodic Table of Elements

|   | 1                                         | 2                                         | 3                                        | 4                                      | 5                                          | 6                                        | 7                                          | 8                                      | 9                                       | 10                                      | 11                                        | 12                                       | 13                                     | 14                                      | 15                                        | 16                                        | 17                                        | 18                                        |                                          |
|---|-------------------------------------------|-------------------------------------------|------------------------------------------|----------------------------------------|--------------------------------------------|------------------------------------------|--------------------------------------------|----------------------------------------|-----------------------------------------|-----------------------------------------|-------------------------------------------|------------------------------------------|----------------------------------------|-----------------------------------------|-------------------------------------------|-------------------------------------------|-------------------------------------------|-------------------------------------------|------------------------------------------|
| 1 | 1<br><b>H</b><br>Hydrogen<br>1.00794      | Atomic #<br>Symbol<br>Name<br>Atomic Mass |                                          |                                        |                                            |                                          |                                            |                                        |                                         |                                         |                                           |                                          |                                        |                                         |                                           |                                           |                                           | 2<br><b>He</b><br>Helium<br>4.002602      |                                          |
| 2 | 3<br><b>Li</b><br>Lithium<br>6.941        | 4<br><b>Be</b><br>Beryllium<br>9.012182   |                                          |                                        |                                            |                                          |                                            |                                        |                                         |                                         |                                           |                                          |                                        |                                         |                                           |                                           |                                           |                                           | 10<br><b>Ne</b><br>Neon<br>20.1797       |
| 3 | 11<br><b>Na</b><br>Sodium<br>22.98976928  | 12<br><b>Mg</b><br>Magnesium<br>24.3050   |                                          |                                        |                                            |                                          |                                            |                                        |                                         |                                         |                                           |                                          |                                        |                                         |                                           |                                           |                                           |                                           | 18<br><b>Ar</b><br>Argon<br>39.948       |
| 4 | 19<br><b>K</b><br>Potassium<br>39.0983    | 20<br><b>Ca</b><br>Calcium<br>40.078      | 21<br><b>Sc</b><br>Scandium<br>44.955912 | 22<br><b>Ti</b><br>Titanium<br>47.887  | 23<br><b>V</b><br>Vanadium<br>50.9415      | 24<br><b>Cr</b><br>Chromium<br>51.9961   | 25<br><b>Mn</b><br>Manganese<br>54.938045  | 26<br><b>Fe</b><br>Iron<br>55.845      | 27<br><b>Co</b><br>Cobalt<br>58.933195  | 28<br><b>Ni</b><br>Nickel<br>58.6934    | 29<br><b>Cu</b><br>Copper<br>63.546       | 30<br><b>Zn</b><br>Zinc<br>65.38         | 31<br><b>Ga</b><br>Gallium<br>69.723   | 32<br><b>Ge</b><br>Germanium<br>72.64   | 33<br><b>As</b><br>Arsenic<br>74.92160    | 34<br><b>Se</b><br>Selenium<br>78.96      | 35<br><b>Br</b><br>Bromine<br>79.904      | 36<br><b>Kr</b><br>Krypton<br>83.798      |                                          |
| 5 | 37<br><b>Rb</b><br>Rubidium<br>85.4678    | 38<br><b>Sr</b><br>Strontium<br>87.62     | 39<br><b>Y</b><br>Yttrium<br>88.90585    | 40<br><b>Zr</b><br>Zirconium<br>91.224 | 41<br><b>Nb</b><br>Niobium<br>92.90638     | 42<br><b>Mo</b><br>Molybdenum<br>95.96   | 43<br><b>Tc</b><br>Technetium<br>(97.9072) | 44<br><b>Ru</b><br>Ruthenium<br>101.07 | 45<br><b>Rh</b><br>Rhodium<br>102.90550 | 46<br><b>Pd</b><br>Palladium<br>106.42  | 47<br><b>Ag</b><br>Silver<br>107.8682     | 48<br><b>Cd</b><br>Cadmium<br>112.411    | 49<br><b>In</b><br>Indium<br>114.818   | 50<br><b>Sn</b><br>Tin<br>118.710       | 51<br><b>Sb</b><br>Antimony<br>121.760    | 52<br><b>Te</b><br>Tellurium<br>127.60    | 53<br><b>I</b><br>Iodine<br>126.90447     | 54<br><b>Xe</b><br>Xenon<br>131.293       |                                          |
| 6 | 55<br><b>Cs</b><br>Caesium<br>132.9054519 | 56<br><b>Ba</b><br>Barium<br>137.327      | 57–71                                    |                                        | 72<br><b>Hf</b><br>Hafnium<br>178.49       | 73<br><b>Ta</b><br>Tantalum<br>180.94788 | 74<br><b>W</b><br>Tungsten<br>183.84       | 75<br><b>Re</b><br>Rhenium<br>186.207  | 76<br><b>Os</b><br>Osmium<br>190.23     | 77<br><b>Ir</b><br>Iridium<br>192.217   | 78<br><b>Pt</b><br>Platinum<br>195.084    | 79<br><b>Au</b><br>Gold<br>196.966569    | 80<br><b>Hg</b><br>Mercury<br>200.59   | 81<br><b>Tl</b><br>Thallium<br>204.3833 | 82<br><b>Pb</b><br>Lead<br>207.2          | 83<br><b>Bi</b><br>Bismuth<br>208.98040   | 84<br><b>Po</b><br>Polonium<br>(209.9824) | 85<br><b>At</b><br>Astatine<br>(209.9671) | 86<br><b>Rn</b><br>Radon<br>(222.0176)   |
| 7 | 87<br><b>Fr</b><br>Francium<br>(223)      | 88<br><b>Ra</b><br>Radium<br>(226)        | 89–103                                   |                                        | 104<br><b>Rf</b><br>Rutherfordium<br>(261) | 105<br><b>Db</b><br>Dubnium<br>(262)     | 106<br><b>Sg</b><br>Seaborgium<br>(266)    | 107<br><b>Bh</b><br>Bohrium<br>(264)   | 108<br><b>Hs</b><br>Hassium<br>(277)    | 109<br><b>Mt</b><br>Meitnerium<br>(268) | 110<br><b>Ds</b><br>Darmstadtium<br>(271) | 111<br><b>Rg</b><br>Roentgenium<br>(272) | 112<br><b>Uub</b><br>Ununbium<br>(285) | 113<br><b>Uut</b><br>Ununtrium<br>(284) | 114<br><b>Uuq</b><br>Ununquadium<br>(289) | 115<br><b>Uup</b><br>Ununpentium<br>(288) | 116<br><b>Uuh</b><br>Ununhexium<br>(292)  | 117<br><b>Uus</b><br>Ununseptium          | 118<br><b>Uuo</b><br>Ununoctium<br>(294) |

For elements with no stable isotopes, the mass number of the isotope with the longest half-life is in parentheses.

Design and Interface Copyright © 1997 Michael Dayah (michael@dayah.com). <http://www.ptable.com/>

Ptable.com

|                                           |                                         |                                              |                                         |                                        |                                       |                                        |                                         |                                         |                                          |                                         |                                      |                                          |                                         |                                         |
|-------------------------------------------|-----------------------------------------|----------------------------------------------|-----------------------------------------|----------------------------------------|---------------------------------------|----------------------------------------|-----------------------------------------|-----------------------------------------|------------------------------------------|-----------------------------------------|--------------------------------------|------------------------------------------|-----------------------------------------|-----------------------------------------|
| 57<br><b>La</b><br>Lanthanum<br>138.90547 | 58<br><b>Ce</b><br>Cerium<br>140.116    | 59<br><b>Pr</b><br>Praseodymium<br>140.90765 | 60<br><b>Nd</b><br>Neodymium<br>144.242 | 61<br><b>Pm</b><br>Promethium<br>(145) | 62<br><b>Sm</b><br>Samarium<br>150.36 | 63<br><b>Eu</b><br>Europium<br>151.964 | 64<br><b>Gd</b><br>Gadolinium<br>157.25 | 65<br><b>Tb</b><br>Terbium<br>158.92535 | 66<br><b>Dy</b><br>Dysprosium<br>162.500 | 67<br><b>Ho</b><br>Holmium<br>164.93032 | 68<br><b>Er</b><br>Erbium<br>167.259 | 69<br><b>Tm</b><br>Thulium<br>168.93421  | 70<br><b>Yb</b><br>Ytterbium<br>173.054 | 71<br><b>Lu</b><br>Lutetium<br>174.9668 |
| 89<br><b>Ac</b><br>Actinium<br>(227)      | 90<br><b>Th</b><br>Thorium<br>232.03806 | 91<br><b>Pa</b><br>Protactinium<br>231.03588 | 92<br><b>U</b><br>Uranium<br>238.02891  | 93<br><b>Np</b><br>Neptunium<br>(237)  | 94<br><b>Pu</b><br>Plutonium<br>(244) | 95<br><b>Am</b><br>Americium<br>(243)  | 96<br><b>Cm</b><br>Curium<br>(247)      | 97<br><b>Bk</b><br>Berkelium<br>(247)   | 98<br><b>Cf</b><br>Californium<br>(251)  | 99<br><b>Es</b><br>Einsteinium<br>(252) | 100<br><b>Fm</b><br>Fermium<br>(257) | 101<br><b>Md</b><br>Mendelevium<br>(258) | 102<br><b>No</b><br>Nobelium<br>(259)   | 103<br><b>Lr</b><br>Lawrencium<br>(262) |

30/07/2020

neutrinos

# ELEMENTARY PARTICLES of THE STANDARD MODEL:

Northwestern

|         | FERMIONS                                                                                                           |                                                                                                                  |                                                                                                                   | BOSONS                                                                                                    |
|---------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|         | I                                                                                                                  | II                                                                                                               | III                                                                                                               |                                                                                                           |
| QUARKS  | <br>$u$<br>UP QUARK               | <br>$c$<br>CHARM QUARK          | <br>$t$<br>TOP QUARK            | <br>$\gamma$<br>PHOTON |
|         | <br>$d$<br>DOWN QUARK             | <br>$s$<br>STRANGE QUARK        | <br>$b$<br>BOTTOM QUARK         | <br>$g$<br>GLUON       |
| LEPTONS | <br>$\nu_e$<br>ELECTRON-NEUTRINO | <br>$\nu_\mu$<br>MUON-NEUTRINO | <br>$\nu_\tau$<br>TAU-NEUTRINO | <br>$Z$<br>Z BOSON    |
|         | <br>$e^-$<br>ELECTRON           | <br>$\mu$<br>MUON             | <br>$\tau$<br>TAU             | <br>$W$<br>W BOSON   |

FORCE CARRIERS

Tabela Periódica  
do Século 21

(Incluindo o bóson de Higgs!)



<http://www.particlezoo.net>

30/07/2020

neutrinos



Natureza = Relógio

(ex. Cosmologia)





Estudar cada peça

(ex. estudar os neutrinos)

“Hit it really hard and see what happens!”

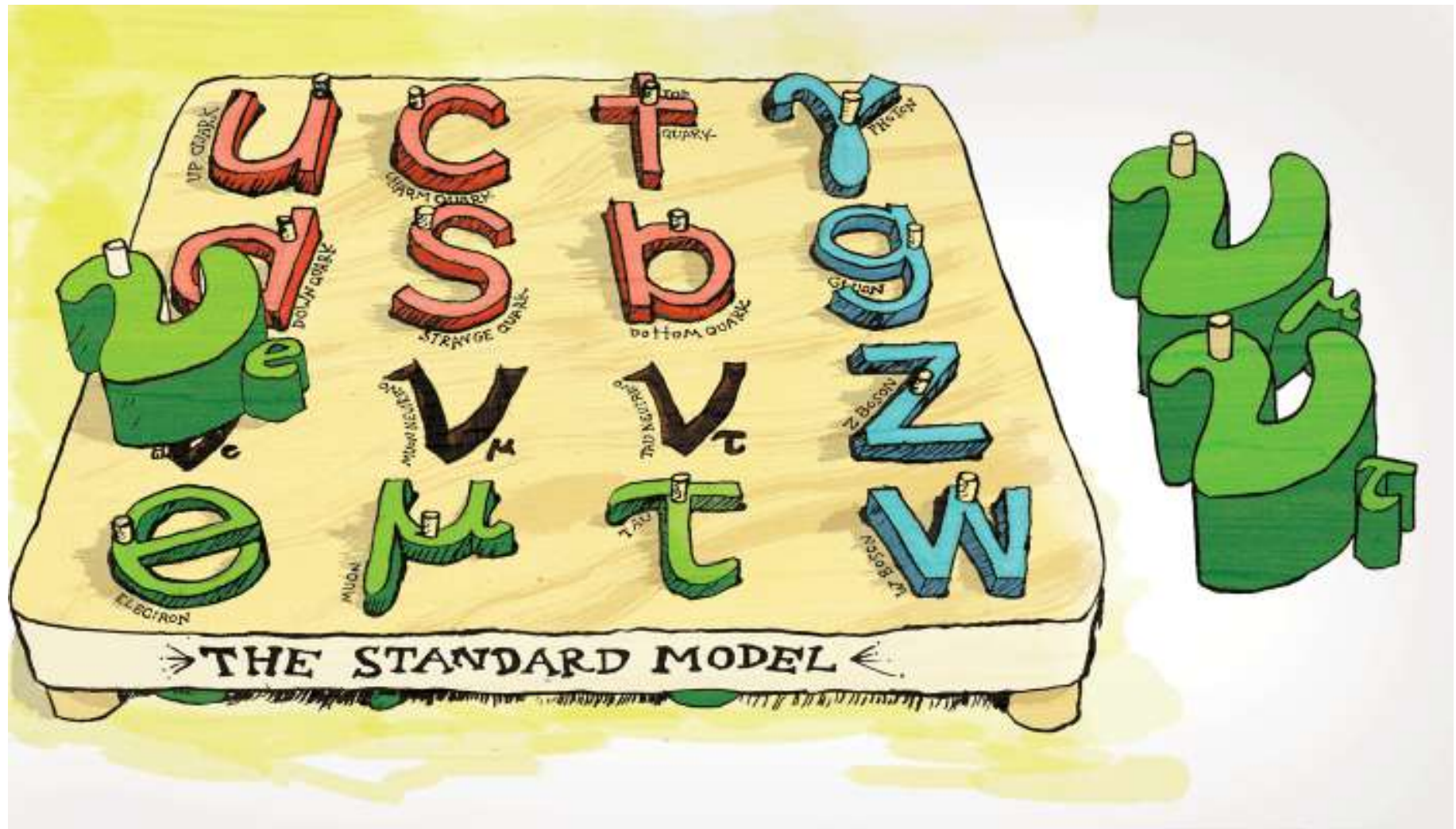
(Feynman)



(ex. LHC)

[botando  $E = mc^2$  para trabalhar]

# Neutrinos





# ELEMENTARY PARTICLES of THE STANDARD MODEL:

|         | FERMIONS                                                                                                           |                                                                                                                  |                                                                                                                   | BOSONS                                                                                                    |                |
|---------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------|
|         | I                                                                                                                  | II                                                                                                               | III                                                                                                               |                                                                                                           |                |
| QUARKS  | <br>$u$<br>UP QUARK               | <br>$c$<br>CHARM QUARK          | <br>$t$<br>TOP QUARK            | <br>$\gamma$<br>PHOTON | FORCE CARRIERS |
|         | <br>$d$<br>DOWN QUARK             | <br>$s$<br>STRANGE QUARK        | <br>$b$<br>BOTTOM QUARK         | <br>$g$<br>GLUON       |                |
| LEPTONS | <br>$\nu_e$<br>ELECTRON-NEUTRINO | <br>$\nu_\mu$<br>MUON-NEUTRINO | <br>$\nu_\tau$<br>TAU-NEUTRINO | <br>$Z$<br>Z BOSON    |                |
|         | <br>$e^-$<br>ELECTRON           | <br>$\mu$<br>MUON             | <br>$\tau$<br>TAU             | <br>$W$<br>W BOSON   |                |

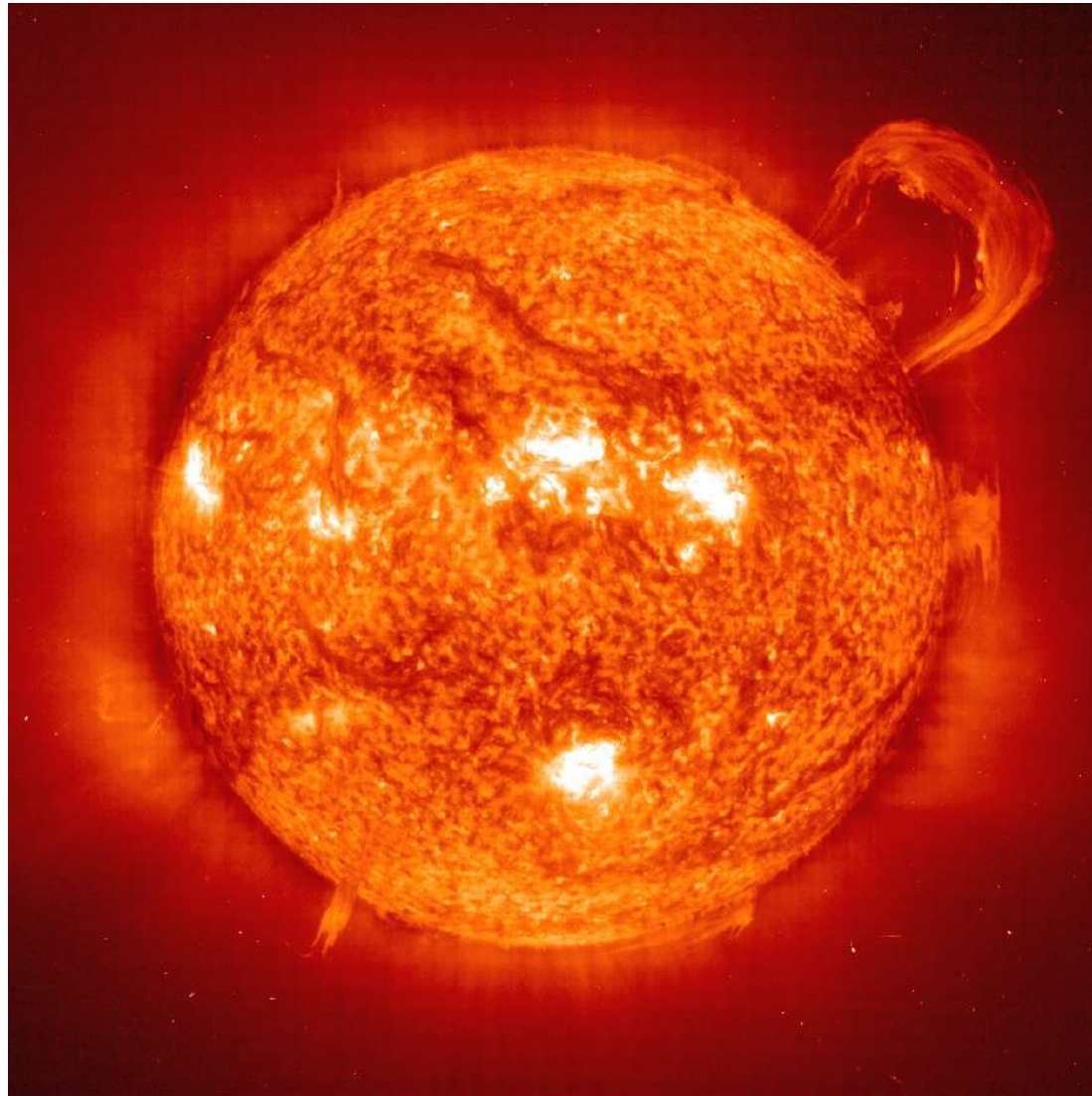


Neutrinos são  
parte do quadro  
das Partículas  
Fundamentais  
conhecidas.

neutrino =  $\nu$   
(‘nu’)

<http://www.particlezoo.net>

## Neutrinos São Muito Abundantes!



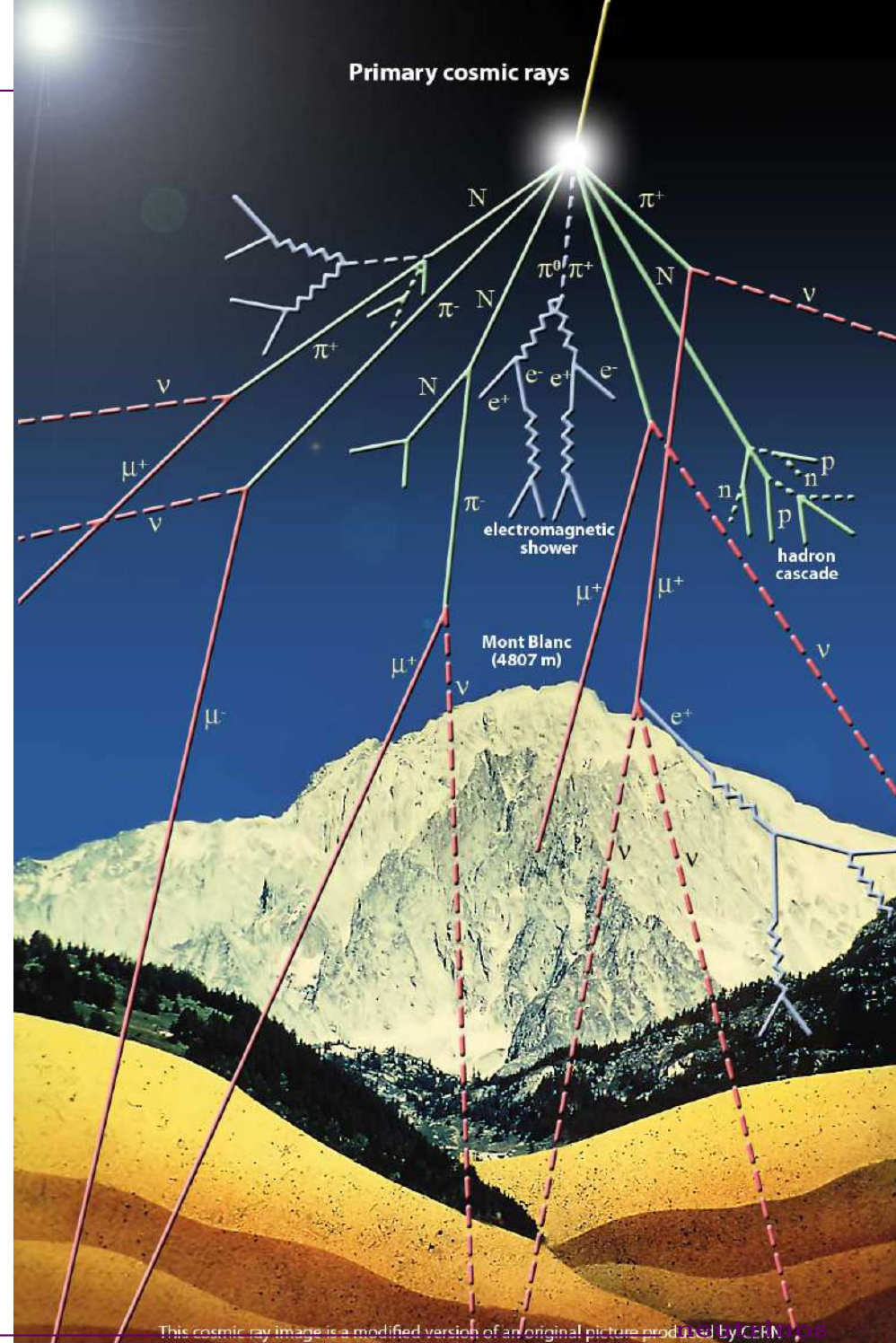
| Reaction                                                           | Termination (%) | Neutrino Energy (MeV)    |
|--------------------------------------------------------------------|-----------------|--------------------------|
| $p + p \rightarrow {}^2\text{H} + e^+ + \nu_e$                     | 99.96           | $< 0.423$                |
| $p + e^- + p \rightarrow {}^2\text{H} + \nu_e$                     | 0.044           | 1.445                    |
| ${}^2\text{H} + p \rightarrow {}^3\text{He} + \gamma$              | 100             | —                        |
| ${}^3\text{He} + {}^3\text{He} \rightarrow {}^4\text{He} + p + p$  | 85              | —                        |
| ${}^3\text{He} + {}^4\text{He} \rightarrow {}^7\text{Be} + \gamma$ | 15              | —                        |
| ${}^7\text{Be} + e^- \rightarrow {}^7\text{Li} + \nu_e$            | 15              | 0.863(90%)<br>0.386(10%) |
| ${}^7\text{Li} + p \rightarrow {}^4\text{He} + {}^4\text{He}$      |                 | —                        |
| ${}^7\text{Be} + p \rightarrow {}^8\text{B} + \gamma$              | 0.02            | —                        |
| ${}^8\text{B} \rightarrow {}^8\text{Be}^* + e^+ + \nu_e$           |                 | $< 15$                   |
| ${}^8\text{Be} \rightarrow {}^4\text{He} + {}^4\text{He}$          |                 | —                        |
| ${}^3\text{He} + p \rightarrow {}^4\text{He} + e^+ + \nu_e$        | 0.00003         | $< 18.8$                 |

*Note:* Adapted from Ref. 12. Please refer to Ref. 12 for a more detailed description.

uns 100 bilhões atravessam  
o seu polegar a cada segundo!



## Há fontes mais próximas ...





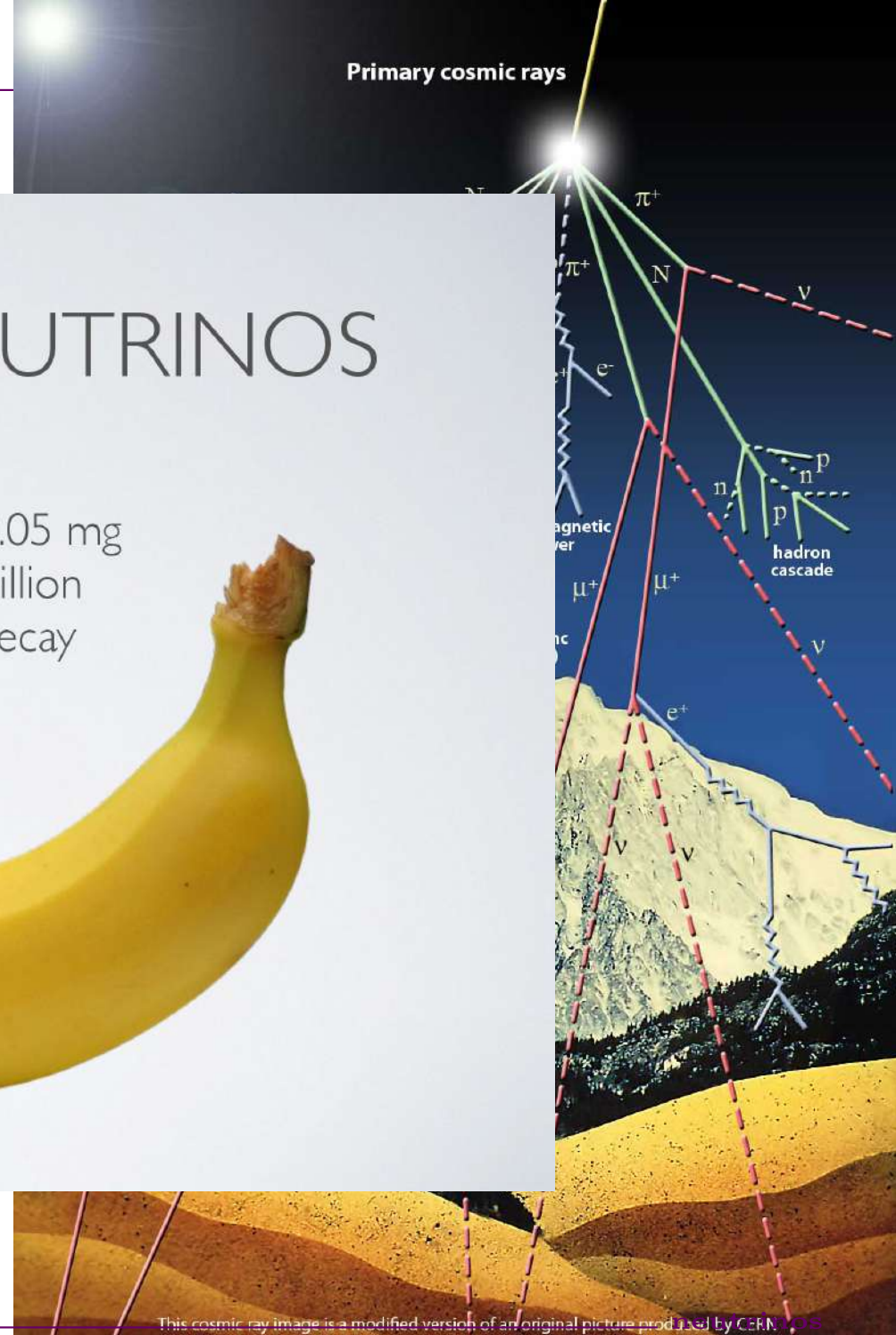
Há fontes mais próximas ...

## EVERY DAY NEUTRINOS

A medium banana contains around 0.05 mg of  $^{40}\text{K}$ , which produces around 1 million neutrinos per day via radioactive decay



12



This cosmic ray image is a modified version of an original picture produced by CERN.

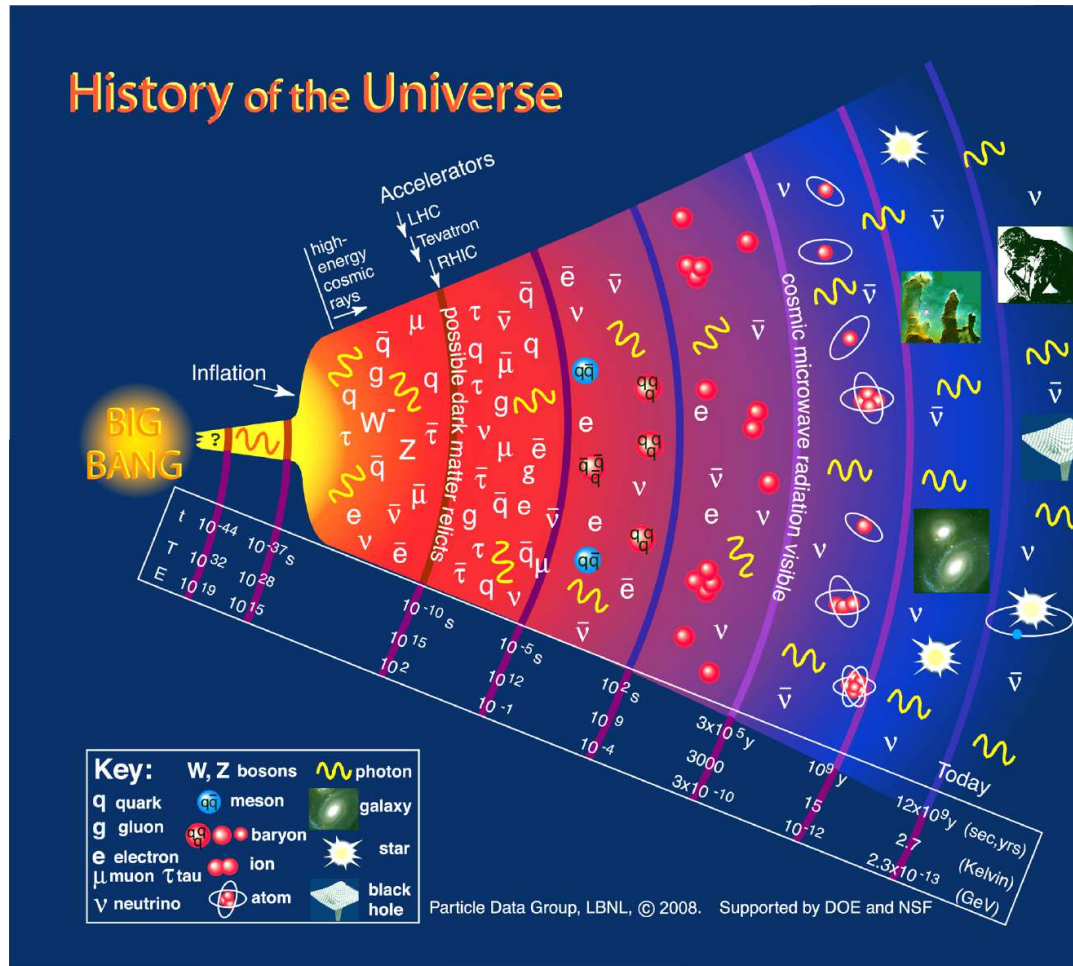


...e outras muito mais distantes.



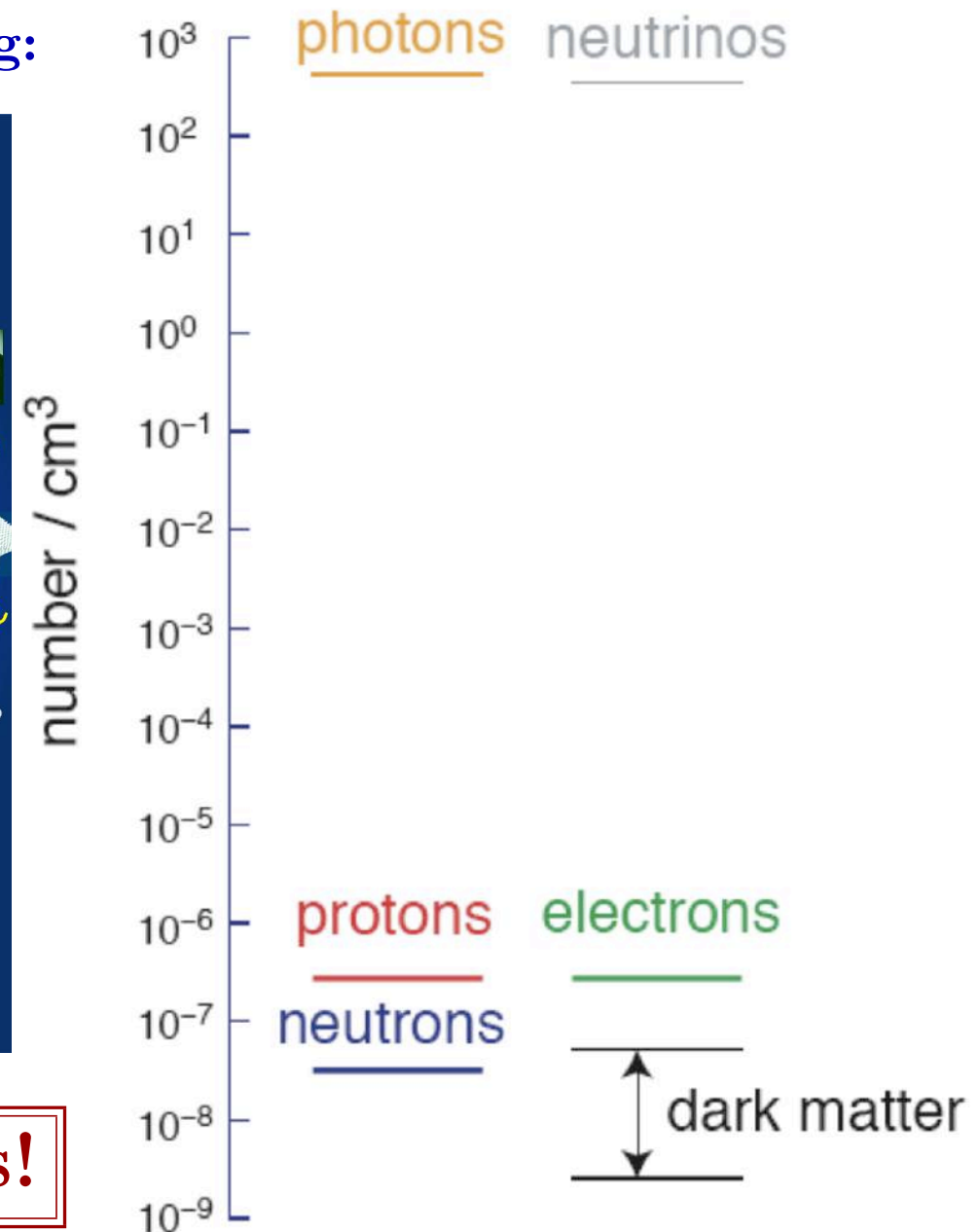
**Supernova: 100 vezes mais energia é liberada na forma de neutrinos!**

Neutrinos tb são relíquias do Big Bang:



Neutrinos são onipresentes!

## The Particle Universe



## Por Outro Lado, Neutrinos São Muito Difíceis de Detetar:

Neutrinos não têm carga (diferente, por ex., dos elétrons) e não interagem via as interações nucleares (diferente, por ex., dos nêutrons).

Eles interagem somente através das interações FRACAS.

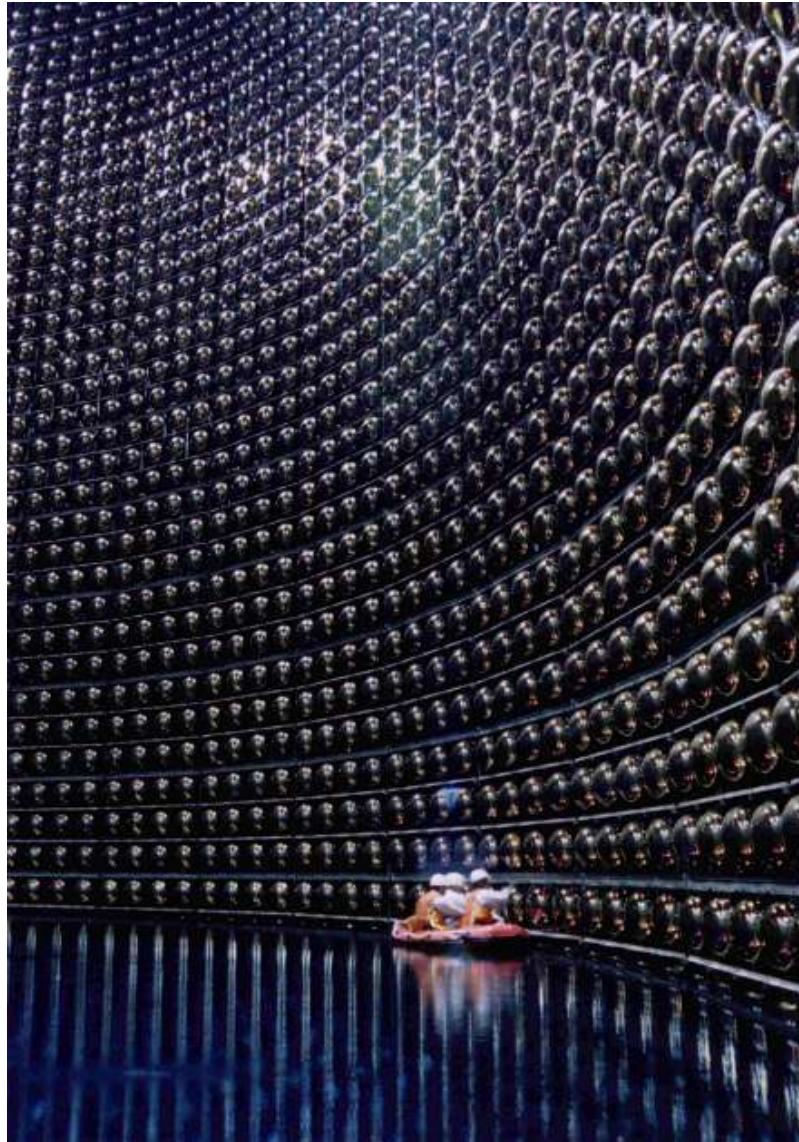


É preciso uma parede de chumbo com a espessura do sistema solar para capturar todos os neutrinos produzidos no interior do sol!

Solução: muitos neutrinos e detetores gigantes!

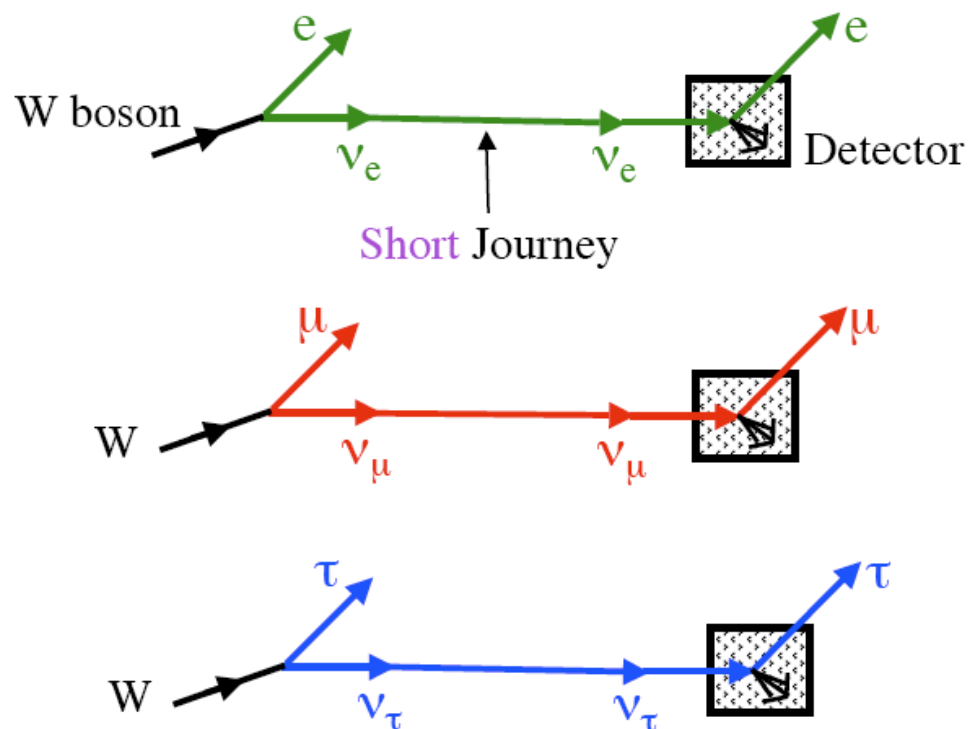


## Por Exemplo ...



Super-KamiokaNDE.  $(40 \text{ m})^3$ !

Até o final do último século, era assim que descrevíamos os neutrinos:



- Três sabores (vide a figura);
- Interação só fracamente;
- Massa ZERO;
- 2 degrees of freedom:
  - left-handed state  $\nu$ ,
  - right-handed state  $\bar{\nu}$ ;
- neutrinos carry lepton number:
  - $L(\nu) = +1$ ,
  - $L(\bar{\nu}) = -1$ .

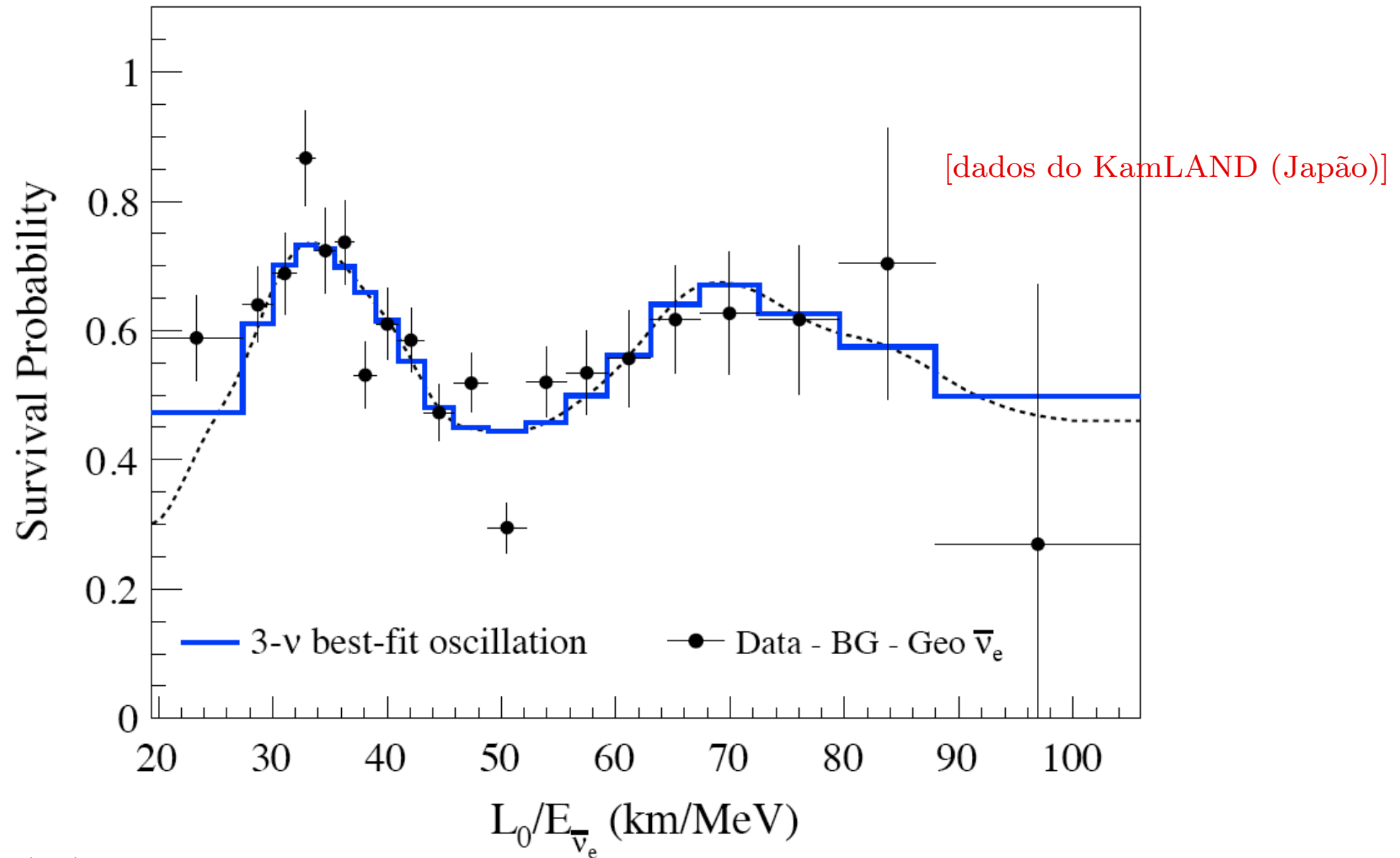
Nesse século, muita coisa mudou. Nós descobrimos que **as massas dos neutrinos** são **não nulas**. Em mais detalhe, descobrimos que

- Os neutrinos se misturam.
- Neutrinos oscilam. Isso quer dizer que eles mudam de sabor ao atravessar uma distância bem longa (dependendo da energia. Na prática as distâncias necessárias variam entre quilômetros e milhares de quilômetros).

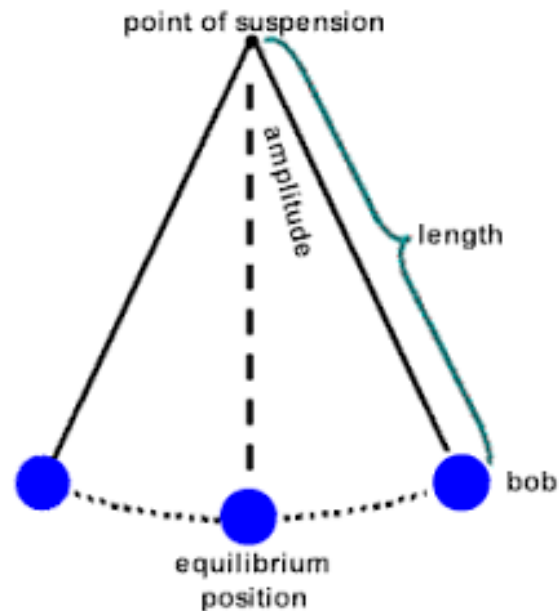
Esses dois fenômenos só podem ocorrer se os neutrinos têm massa, e as massas não são iguais.



# Neutrinos têm um relógio interno = massa



# Por quê? Mecânica Quântica!



# Neutrinos com **massa** são misturas dos diferentes **sabores**



$\nu_1$

20% orange ( $\nu_\mu$ )

60% yellow ( $\nu_e$ )

20% red ( $\nu_\tau$ )



$\nu_2$

32% orange ( $\nu_\mu$ )

36% yellow ( $\nu_e$ )

32% red ( $\nu_\tau$ )



$\nu_3$

48% orange ( $\nu_\mu$ )

4% yellow ( $\nu_e$ )

48% red ( $\nu_\tau$ )



electron-neutrino



muon-neutrino



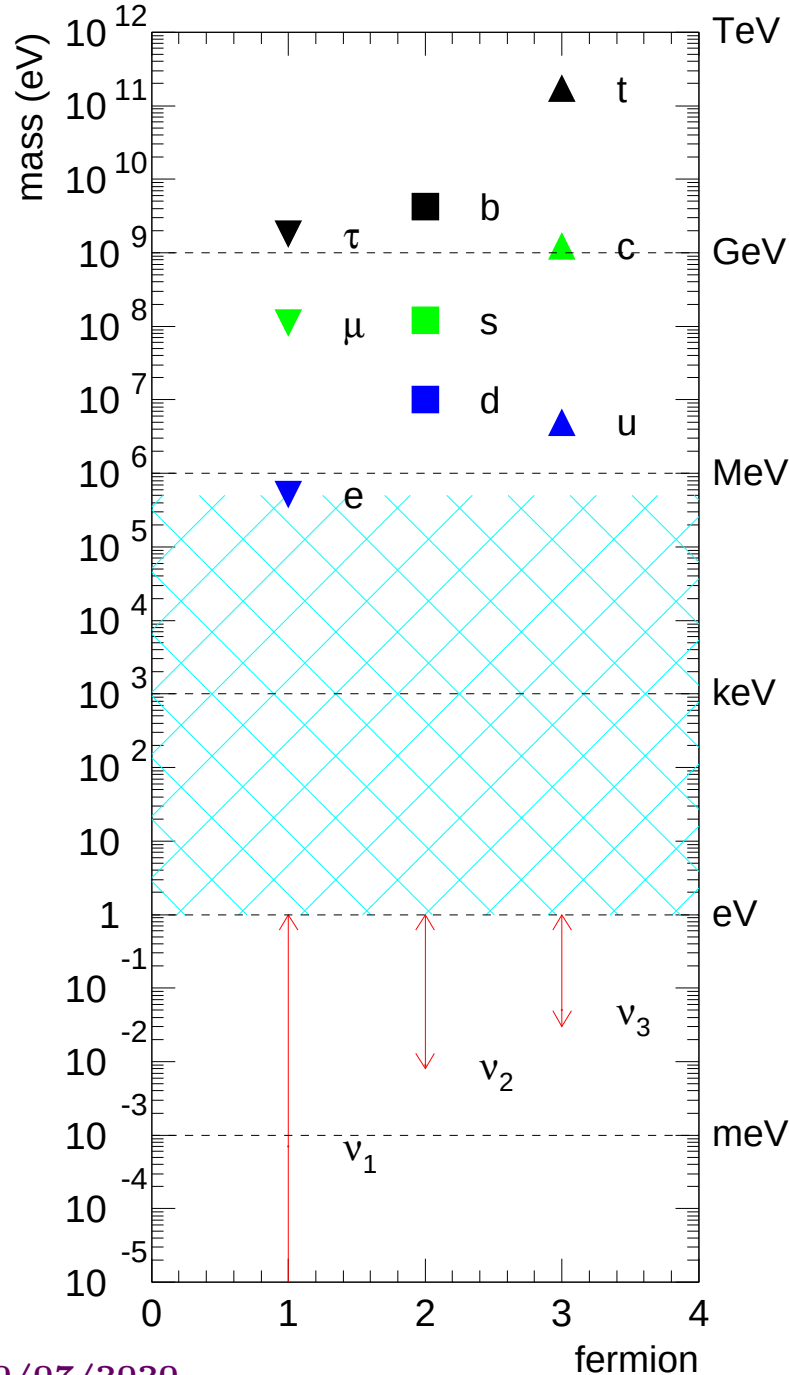
tau-neutrino



electron-antineutrino

**neutrinos**





# NEUTRINOS TÊM MASSA!

E Daí?

- as massas dos neutrinos são muito pequenas!

# ELEMENTARY PARTICLES of THE STANDARD MODEL:

|         | FERMIONS                                                                                                           |                                                                                                                  |                                                                                                                   | BOSONS                                                                                                    |
|---------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|         | I                                                                                                                  | II                                                                                                               | III                                                                                                               |                                                                                                           |
| QUARKS  | <br>$u$<br>UP QUARK               | <br>$c$<br>CHARM QUARK          | <br>$t$<br>TOP QUARK            | <br>$\gamma$<br>PHOTON |
|         | <br>$d$<br>DOWN QUARK             | <br>$s$<br>STRANGE QUARK        | <br>$b$<br>BOTTOM QUARK         | <br>$g$<br>GLUON       |
| LEPTONS | <br>$\nu_e$<br>ELECTRON-NEUTRINO | <br>$\nu_\mu$<br>MUON-NEUTRINO | <br>$\nu_\tau$<br>TAU-NEUTRINO | <br>$Z$<br>Z BOSON    |
|         | <br>$e^-$<br>ELECTRON           | <br>$\mu$<br>MUON             | <br>$\tau$<br>TAU             | <br>$W$<br>W BOSON   |



(Now with Higgs boson!)

Tabela Periódica  
do Século 21

<http://www.particlezoo.net>

30/07/2020

neutrinos

# ELEMENTARY PARTICLES of THE STANDARD MODEL:

|         | FERMIONS                                                                                                           |                                                                                                                  |                                                                                                                   | BOSONS                                                                                                    |
|---------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|         | I                                                                                                                  | II                                                                                                               | III                                                                                                               |                                                                                                           |
| QUARKS  | <br>$u$<br>UP QUARK               | <br>$c$<br>CHARM QUARK          | <br>$t$<br>TOP QUARK            | <br>$\gamma$<br>PHOTON |
|         | <br>$d$<br>DOWN QUARK             | <br>$s$<br>STRANGE QUARK        | <br>$b$<br>BOTTOM QUARK         | <br>$g$<br>GLUON       |
| LEPTONS | <br>$\nu_e$<br>ELECTRON-NEUTRINO | <br>$\nu_\mu$<br>MUON-NEUTRINO | <br>$\nu_\tau$<br>TAU-NEUTRINO | <br>$Z$<br>Z BOSON    |
|         | <br>$e^-$<br>ELECTRON           | <br>$\mu$<br>MUON             | <br>$\tau$<br>TAU             | <br>$W$<br>W BOSON   |



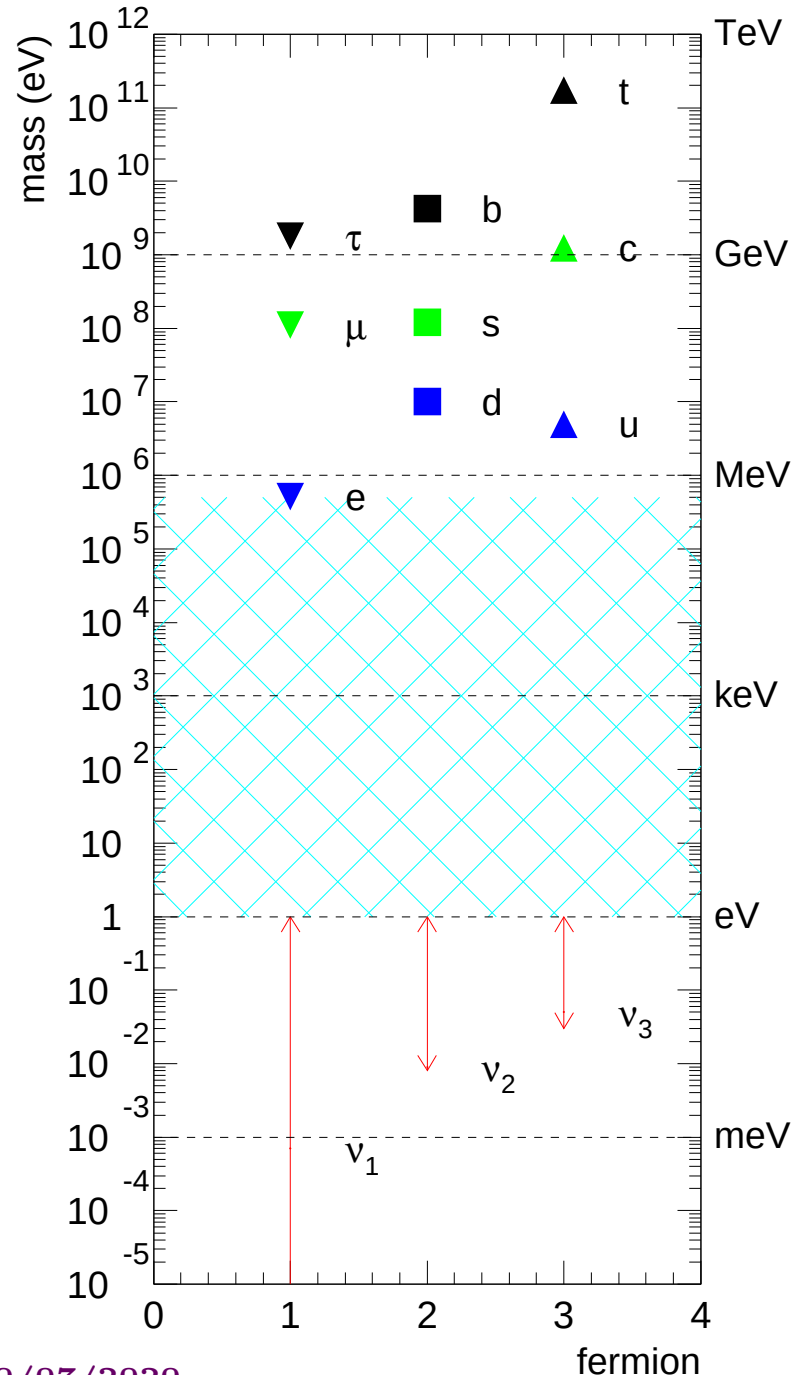
(Now with Higgs boson!)

Tabela Periódica  
do Século 21

<http://www.particlezoo.net>

30/07/2020

neutrinos



# NEUTRINOS TÊM MASSA!

E Daí?

- contradiz as expectativas teóricas;
- as massas dos neutrinos são muito pequenas!
- a massa dos neutrinos pode ajudar a desvendar outros mistérios em física de partículas!



# ELEMENTARY PARTICLES of THE STANDARD MODEL:

Northwestern

|         | FERMIONS                                                                                                           |                                                                                                                  |                                                                                                                   | BOSONS                                                                                                    |
|---------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|         | I                                                                                                                  | II                                                                                                               | III                                                                                                               |                                                                                                           |
| QUARKS  | <br>$u$<br>UP QUARK               | <br>$c$<br>CHARM QUARK          | <br>$t$<br>TOP QUARK            | <br>$\gamma$<br>PHOTON |
|         | <br>$d$<br>DOWN QUARK             | <br>$s$<br>STRANGE QUARK        | <br>$b$<br>BOTTOM QUARK         | <br>$g$<br>GLUON       |
| LEPTONS | <br>$\nu_e$<br>ELECTRON-NEUTRINO | <br>$\nu_\mu$<br>MUON-NEUTRINO | <br>$\nu_\tau$<br>TAU-NEUTRINO | <br>$Z$<br>Z BOSON    |
|         | <br>$e^-$<br>ELECTRON           | <br>$\mu$<br>MUON             | <br>$\tau$<br>TAU             | <br>$W$<br>W BOSON   |

Isto é muito mais do que um quadro colorido. É um modelo matemático com grande poder de previsão.



<http://www.particlezoo.net>

30/07/2020

neutrinos

- Resultado de mais de 70 anos de pesquisa teórica e experimental em física de partículas.
- Fomalismo teórico baseado no “casamento” da Mecânica Quântica com a Relatividade Especial – Teoria Quântica de Campos Relativística.
- Super Poderoso – uma vez conhecidos os ingredientes da teoria: campos (partículas) e simetrias internas (interações), a dinâmica do sistema é determinada sem ambiguidades depois de medidos experimentalmente um número finito de observáveis.



Dados os ingredientes conhecidos e conhecidas todas as regras, é fácil prever que a massa dos neutrinos é exatamente zero.

Neutrinos com massa indicam a existência de novos ingredientes ou regras novas. Ainda não sabemos quais são esses.

Por outro lado, nós temos uma ideia do que ingredientes podem ser ...



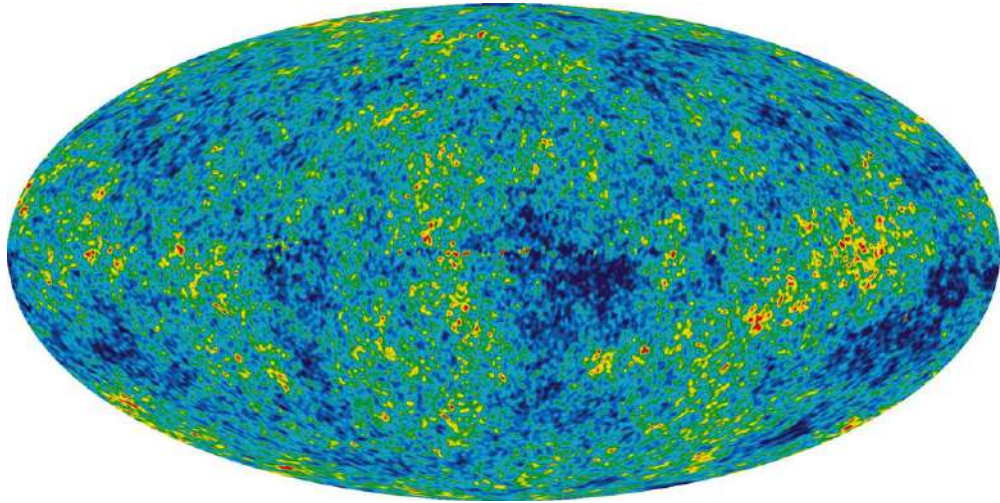
# Bariogênese

ou

Por que o universo é, hoje em dia, tão cheio de coisas?

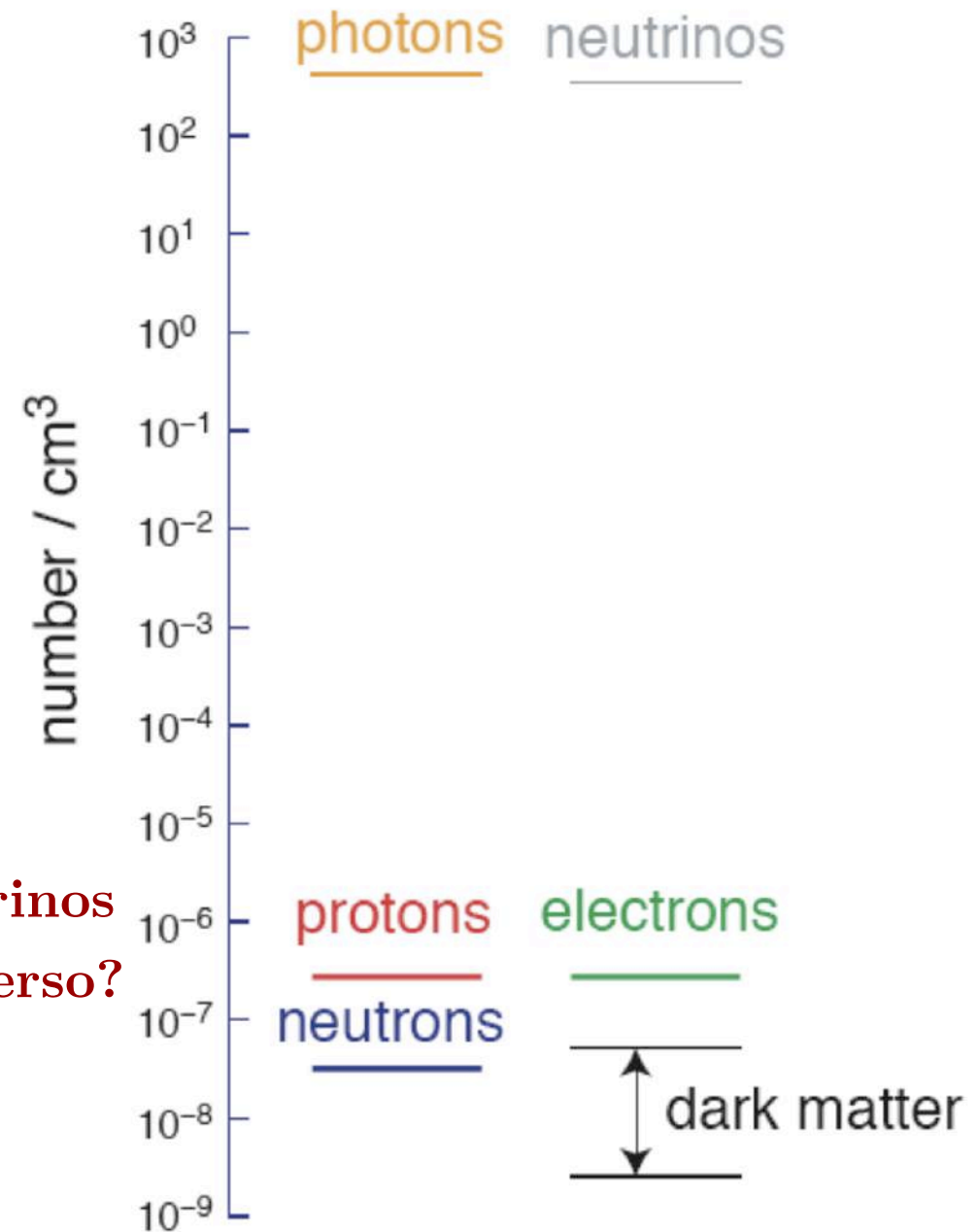


# The Particle Universe



Por que há muito mais fótons e neutrinos do que há elétrons e prótons no universo?

(e o que aconteceu com a antimatéria?)



A resposta é que, em algum momento no passado remoto, o universo era muito quente. Nessa época, o universo era um plasma de matéria, antimatéria, neutrinos, e fótons, nas mesmas proporções.

Ao se expandir, o universo “esfria” e a matéria e a antimatéria colidem e se aniquilam, se transformando em fótons e neutrinos. Portanto, o universo, hoje, deveria ser, aproximadamente, um gás só de fótons e neutrinos!

Essa “grande aniquilação,” portanto, tem que ter sido imperfeita. Por alguma razão, havia um pouco mais de matéria do que de antimatéria. Essa “sobra” é o único ingrediente que constitui TUDO que a gente vê por aí: galáxias, estrelas, planetas, pedras, árvores, pessoas, etc.

Nós somos subproduto de uma pequena assimetria entre a quantidade de matéria e antimatéria no início da história do universo. Mas de onde vem isso?

# Matter and Anti-Matter Early Universe



# Matter and Anti-Matter Current Universe

1  
us

*matter*

*anti-matter*

The Great Annihilation

54



Como a gente pode explicar essa assimetria de 1 parte em 1 bilhão?

Imaginem uma partícula nova bem pesada que decai em matéria e antimatéria

$$N \rightarrow \text{matéria},$$

e

$$N \rightarrow \text{antimatéria}.$$

Além disso, as proporções não são iguais. Isso é,  $N$  decai mais em matéria do que em antimatéria.

Decaimentos da nova partícula  $N$  durante a infância do universo podem ser responsáveis pela assimetria entre a matéria e a antimatéria. Essa partícula hipotética “lembra” os neutrinos!

$N$  pode ser o ingrediente que falta para explicar porque os neutrinos têm massa. Se isso for verdade, é possível fazer algumas previsões ...



- A massa dos neutrinos é “diferente” da massa das outras partículas [✓]
- Neutrinos sabem distinguir matéria de antimatéria. Em física de partículas a gente diz que os neutrinos violam a simetria CP. [?]
- Existem mais neutrinos (provavelmente muito pesados e “tímidos”). [?]

## Experiências Com Neutrinos

Desafios para a próxima década:

- Alta precisão;
- Volumes gigantescos;
- Novas tecnologias.

Ex.: o “Hyper-Kamiokande,” no Japão – Uma megatonelada de água! – e o Deep Underground Neutrino Experiment,” nos EUA ...

# Resumindo

- A Física de Partículas vive um momento muito importante. Nós temos um modelo que explica *quase* todos os fenômenos estudados até hoje ...
- ...mas há exceções notáveis e palpáveis!
- Neutrinos têm massa. A gente não sabe como isso acontece e o que isso significa.
- A maioria da matéria do universo não é composta das partículas fundamentais que a gente conhece. Será que a matéria escura é uma partícula nova? Que partícula é essa? O que é que ela “faz”?
- Há outros poucos fenômenos que a gente não consegue explicar. Um deles é, dado tudo que a gente sabe, como pode a gente (e o planeta, estrelas, galáxias, etc) existir?



E agora?

A gente sabe onde procurar. A estratégia é

- Medir as propriedades dos neutrinos (mais e melhor);
- Descobrir a matéria escura;
- Continuar procurando, em várias outras direções.

Por outro lado, não é claro de onde virá a próxima peça do quebra-cabeças. As opções são muitas e nesse momento nós estamos a mercê das experiências.

**A gente sabe que encontrou alguma coisa nova e importante. Só falta descobrir o que.**

# Backup Slides . . .

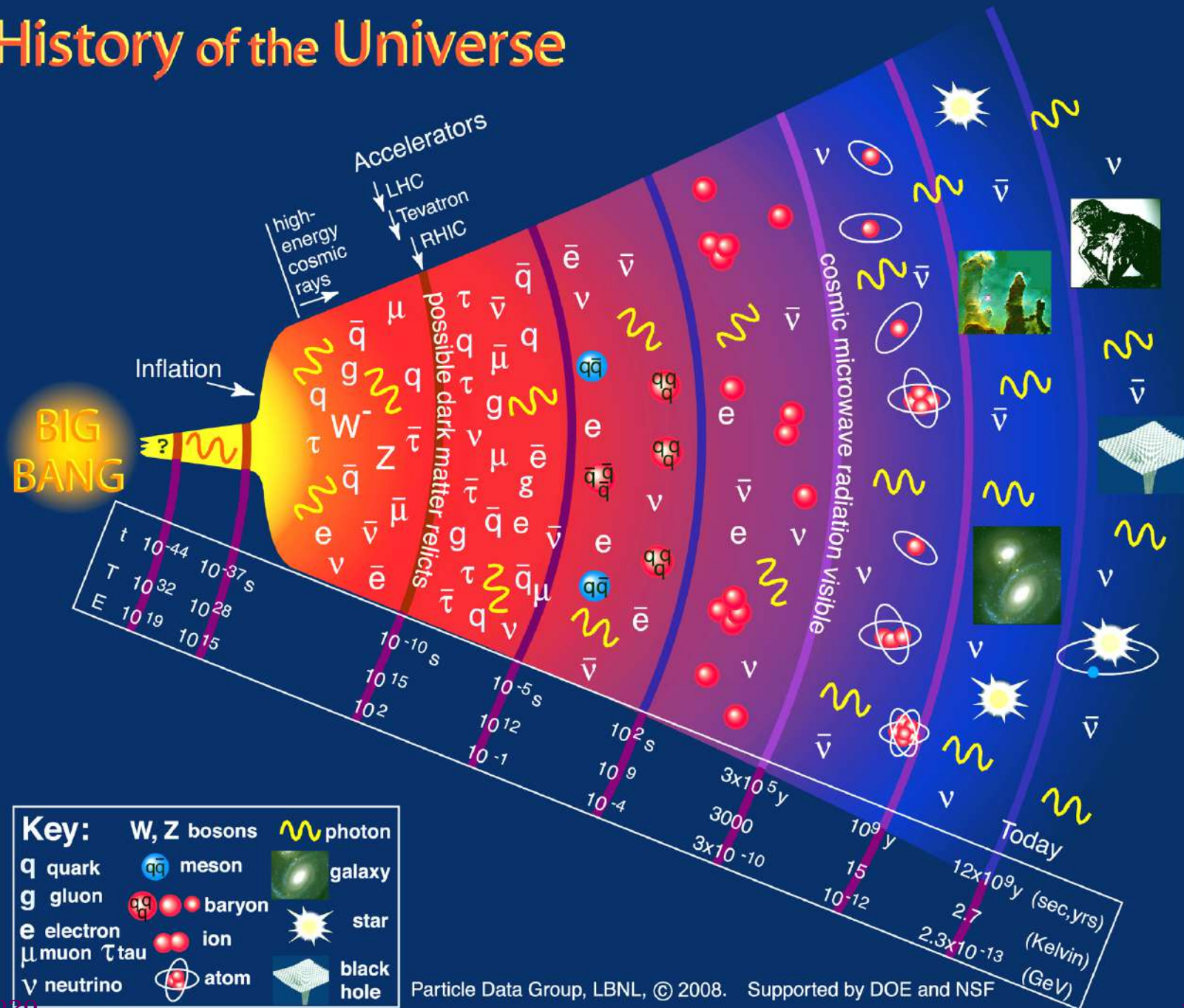




*“I have done something very bad today by proposing a particle that cannot be detected; it is something that no theorist should ever do.”*

*- Wolfgang Pauli*

# History of the Universe



Particle Data Group, LBNL, © 2008. Supported by DOE and NSF