

# Parênteses – Polarização

Uma partícula de spin zero é denominada partícula escalar (píon,  $\alpha$ ).

Partículas com spin  $\frac{1}{2}$  formam, com as correspondentes antipartículas, um spinor (elétron).

Lembrem-se que o número de graus de liberdade de um objeto que seja simétrico por transformações de Lorentz é uma potência de 4.

No caso de spin 1 temos uma partícula vetorial.

A projeção do momento angular da partícula em uma direção arbitrária,  $s_z$ , varia de  $-s$  até  $+s$  em passos de 1. Há  $(2s + 1)$  projeções possíveis. Note que isso implica que uma partícula não pode mudar de “turma”: férmions (bósons) continuam sempre como férmions (bósons).

## Helicidade

Se a projeção do spin está na direção do movimento: helicidade positiva ou de mão direita.

Projeção do spin na direção oposta ao movimento: helicidade negativa ou de mão esquerda.

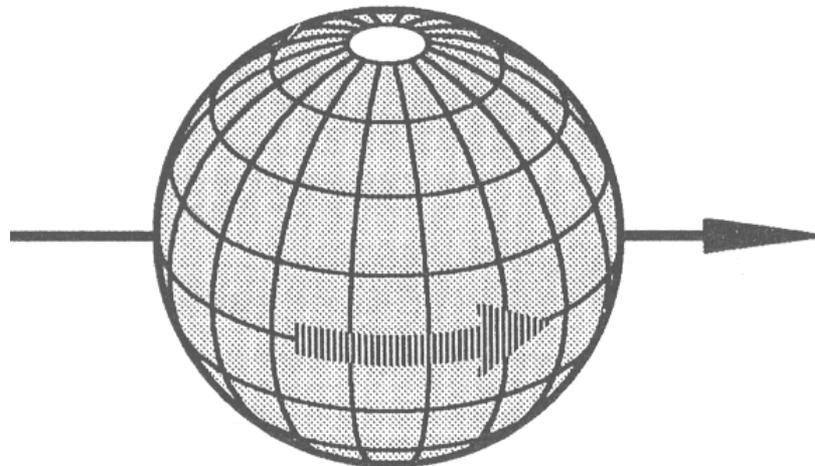
# Massa zero

Em relatividade, além do invariante  $x^2 - c^2t^2 = -s^2$ , que relaciona distância e tempo, existe um outro,  $E^2 - p^2c^2 = m^2c^4$ , que relaciona o momento linear com a energia.

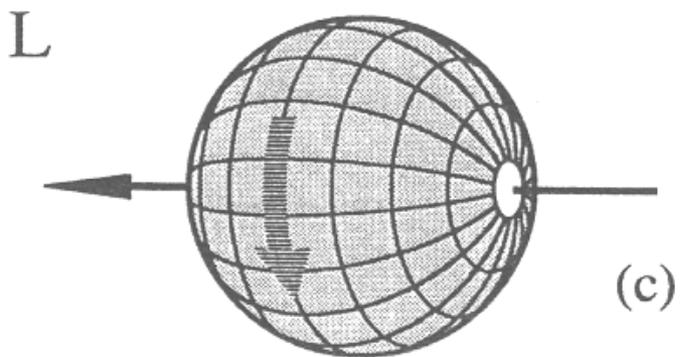
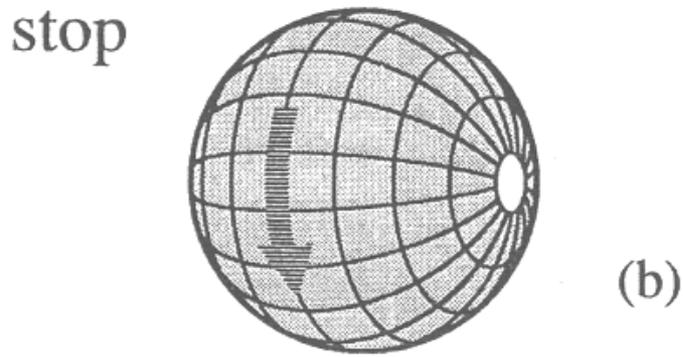
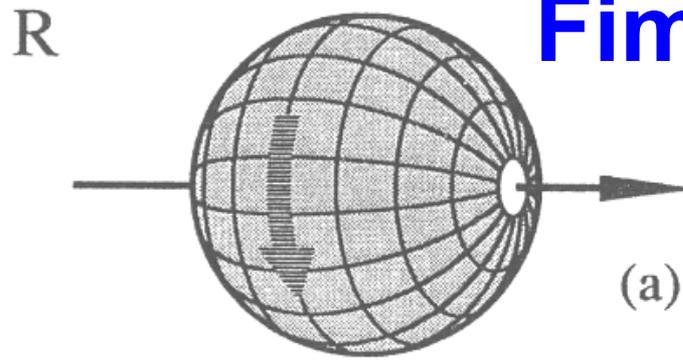
Mas, se  $m = 0$ , então  $E = pc$ . Lembrando das relações:  $E = hf$  e  $\lambda = h/p$ , temos que  $hf = hc/\lambda \Rightarrow \lambda f = c$ .

Consequência: partículas de massa zero podem existir, desde que se movam com a velocidade da luz.

O spin das partículas de massa zero merece algumas considerações. Essas partículas só podem ter duas direções de polarização: de mão esquerda ou de mão direita. Ela não pode ter spin transversal à direção do seu movimento.



# Fim do Parênteses



Não existe rotação capaz de alterar o estado de polarização de uma partícula de massa nula sem passar pelo estado de polarização proibido (longitudinal), mas isso não é problema para partículas massivas.

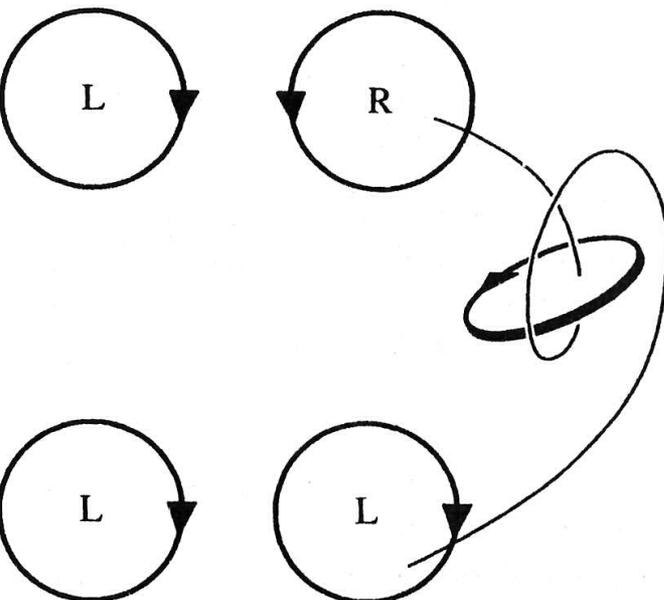
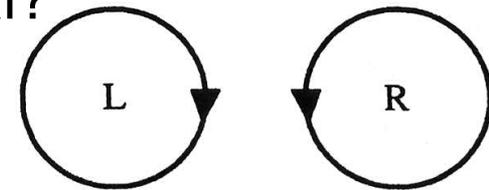
# Observando a quebra de simetria

Existe alguma consequência observável da quebra da simetria  $SU(2)$ ? Deve haver, se o teorema de Noether estiver certo. A cada simetria corresponde uma lei de conservação, portanto a cada simetria quebrada algo deve deixar de se conservar.

No caso da interação fraca, deve ser a carga (fraca), que não se conserva. Mas, se ela não se conserva, para onde vai?

Vamos falar de uma *carga falsa*, num mundo 2-D.

Se ela se conserva, então sempre temos a formação



Agora imaginemos um ser de dimensão maior, que pegue uma delas, gire-a no espaço 3-D e a ponha de volta.

Nesse caso teremos  $-2$  unidades de carga falsa, onde antes tínhamos  $0$ . Permitindo uma virada em 3-D, fugimos da rotação 2-D estrita e quebramos a simetria.

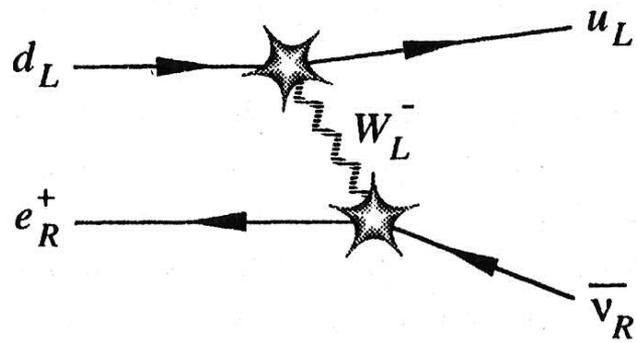
Nesse processo sumimos com 2 unidades de carga.

A não ser que o sistema guarde a virada 3-D na memória, as cargas sumiram no vácuo, sem deixar vestígios.

Existe algo na natureza que se comporte assim? Sim, a helicidade das partículas.

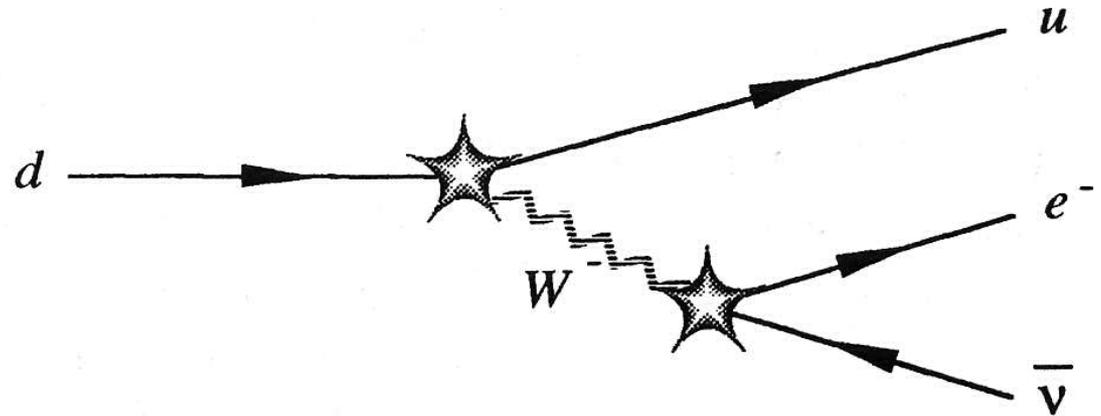
Uma partícula com polarização positiva vindo na sua direção é como a carga falsa  $R$  acima. Isso nos dá um jeito de minar a conservação de carga fraca: apenas partículas com uma determinada helicidade têm carga fraca; as outras têm carga fraca zero.

Notem que isso é uma hipótese. A associação de carga fraca com helicidade certamente leva à não conservação da carga fraca, uma vez que a helicidade de uma partícula com massa não se conserva. O que se observa é que apenas partículas com helicidade negativa e anti-partículas com helicidade positiva carregam carga fraca. As outras têm carga fraca 0 e, portanto, não sentem a força fraca.



O diagrama à esquerda não ocorre com o pósitron e o anti-neutrino  $L$ , pois eles não interagem por não terem carga fraca.

Esse diagrama pode ser reescrito como:



que é o decaimento  $\beta$ , responsável pela transformação  $n \rightarrow p + e^- + \text{anti-}\nu_e$ .

Se a carga fraca realmente não se conserva, então os elétrons emitidos nesse decaimento devem ter helicidade negativa.

E têm!

Apenas partículas com massa podem mudar de helicidade. Então os bósons que carregam carga fraca têm que ter massa, de outra forma sua helicidade se conservaria e não haveria a quebra da simetria  $SU(2)$ .

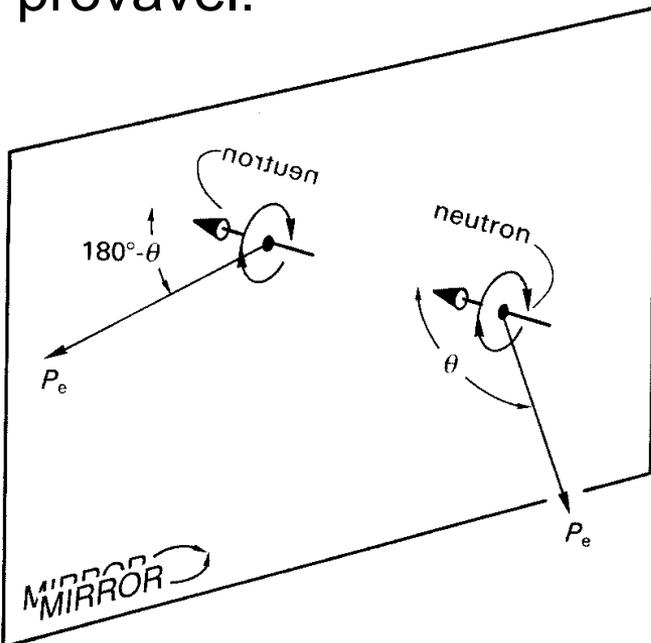
Isso permite também entender porque, em altas energias, a quebra de simetria não é nítida.

Porque quando as energias são muito grandes ( $> 500 \text{ GeV} \gg mc^2$ ) as partículas massivas comportam-se como se não tivessem massa, portanto sua helicidade tende a se conservar.

# Violação da paridade no decaimento $\beta$

Conservação da paridade: leis físicas invariantes na troca de sistema de referência de dextrógiro para levógiro.

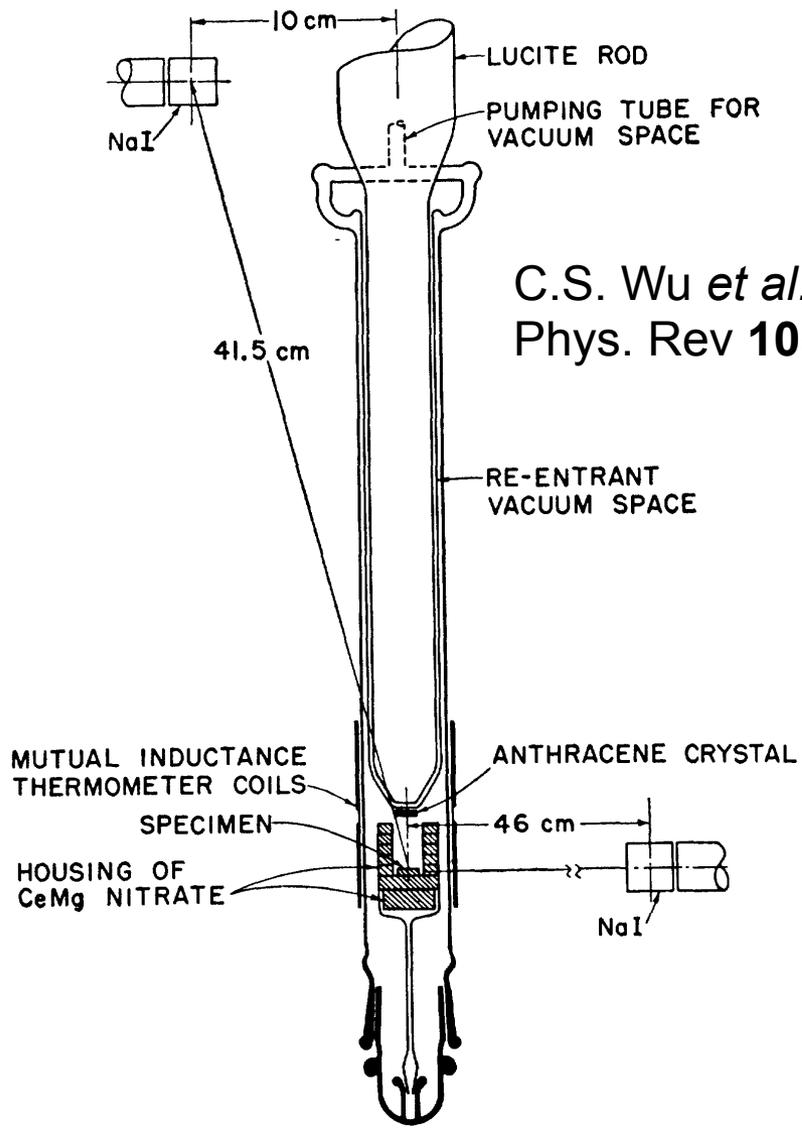
Se a paridade se conserva  $\Rightarrow$  imagem especular de um fenômeno físico é também um fenômeno físico igualmente provável.



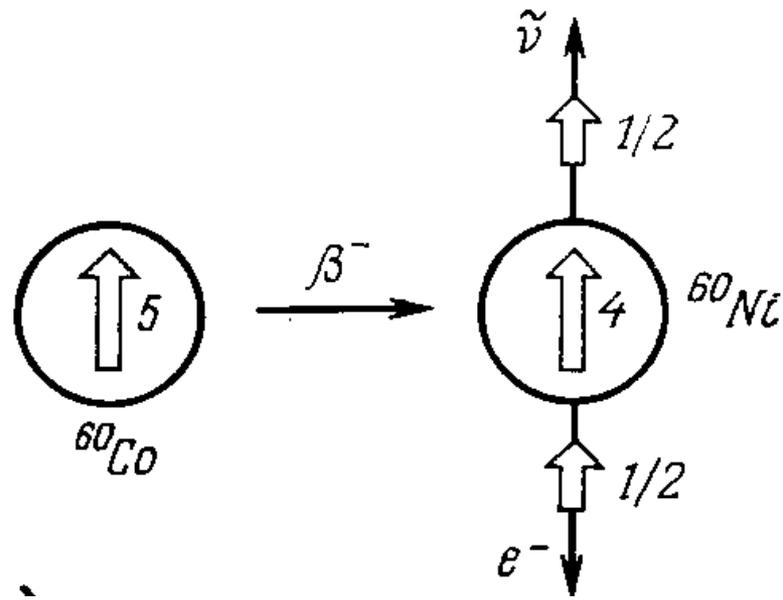
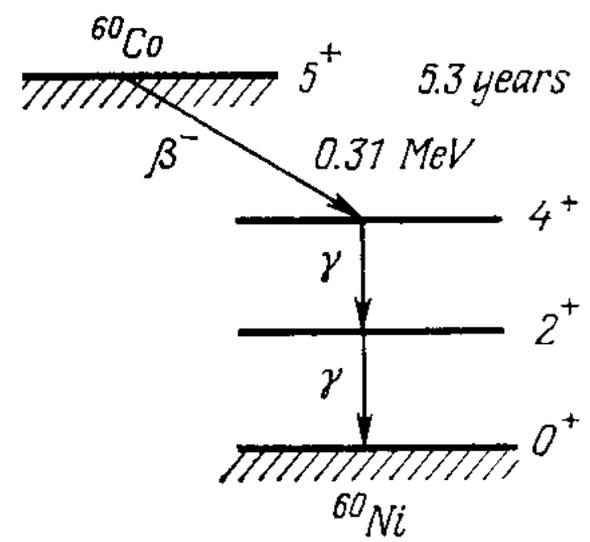
Decaimento  $\beta^-$  do  $n$ , emitindo um  $e^-$  a um ângulo  $\theta$  em relação ao spin  $\Rightarrow$  emissão a  $(\pi - \theta)$  deve ser igualmente provável.

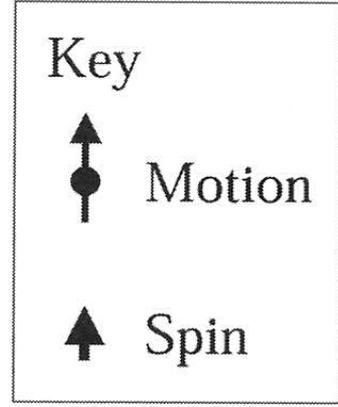
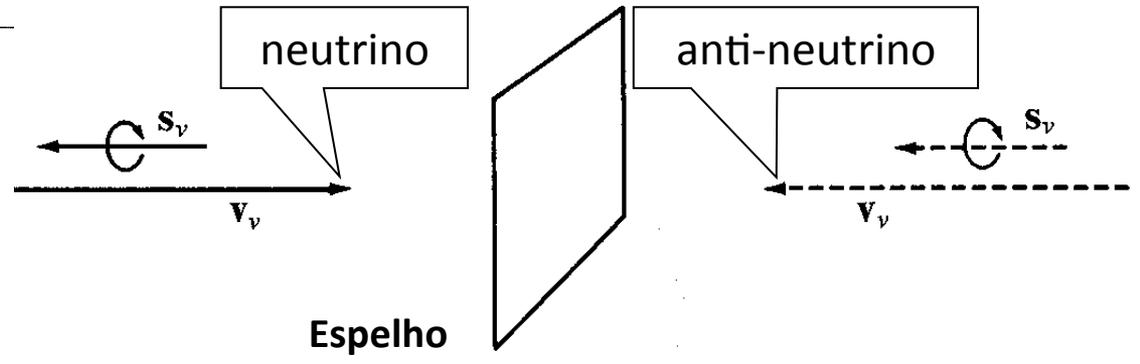
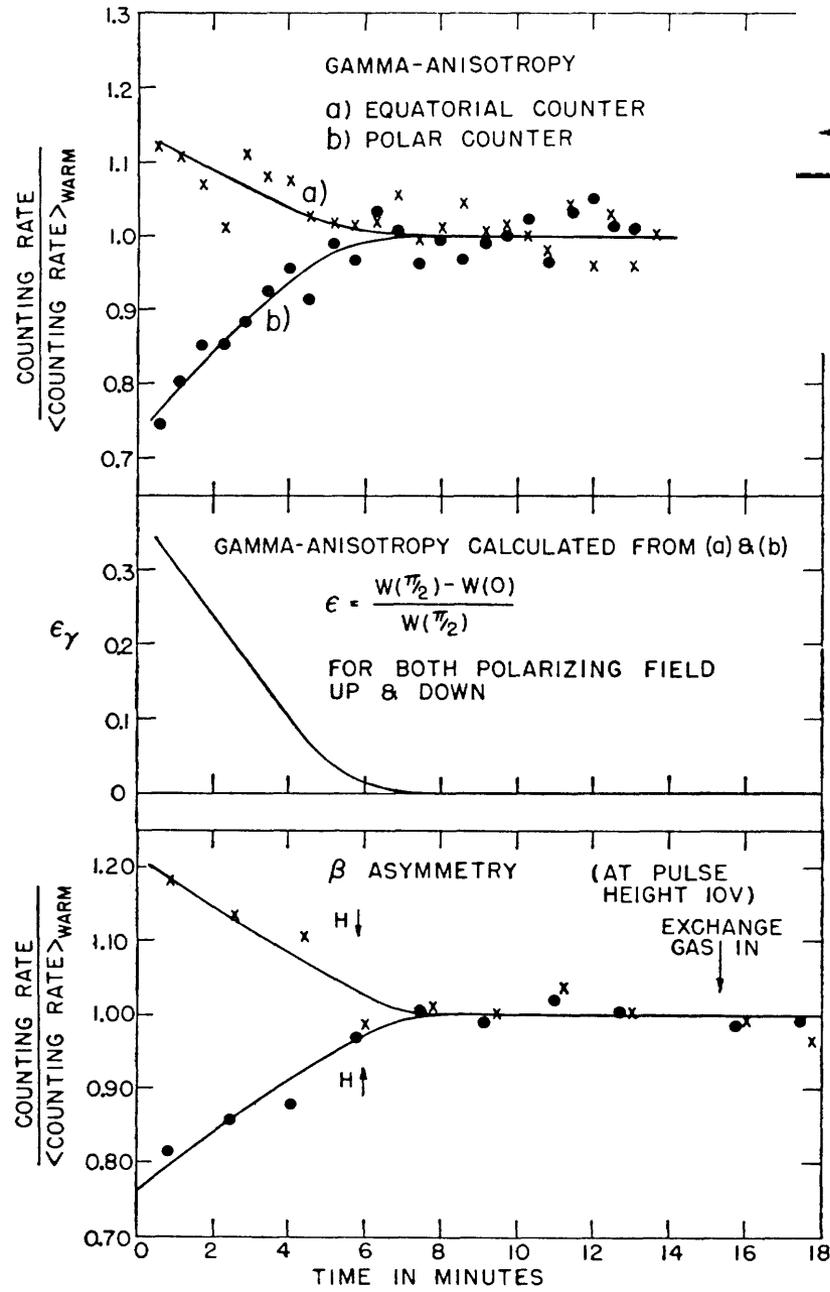
Lee e Yang (1956): não conservação da paridade.

Wu e colaboradores (1957): assimetria dos  $e^-$  emitidos no decaimento do  $^{60}\text{Co} \rightarrow ^{60}\text{Ni}$  ( $Z_{\text{Co}} = 27, Z_{\text{Ni}} = 28 \Rightarrow n \rightarrow p$ ).



C.S. Wu *et al.*,  
Phys. Rev **105**(1957)1413





Raro

Comum

$$P_{\text{errada}} \cong \frac{1 - \beta}{1 + \beta}, \text{ com } \beta = \frac{v}{c}$$

# Cosmologia

Estudo do universo e de sua evolução. Observacional e muito ligado às áreas de astrofísica (dinâmica estelar, etc), física nuclear (reações nucleares, nucleossíntese) e física de partículas.

Composição (conhecida): teoria do Big Bang prevê 76% de H, 24% de He e traços do resto. Observação: 73% H, 26% He e 1% resto.

Diferença pode ser compreendida pela queima de H nas estrelas, como vamos ver adiante.

0,5 % da massa é matéria luminosa. Outro tanto é de matéria “normal” escura (anãs marrons, buracos negros, ...). Temos  $\sim 10^9$  neutrinos e fótons por H. Somando tudo isso: apenas  $\sim 4\%$  da massa do universo é devida a matéria como a conhecemos atualmente.

Começemos com o calendário de Carl Sagan, no qual ele comprimiu a idade do universo em 1 ano terrestre.

# Datas anteriores a Dezembro

Big Bang	<b>1/1</b>
Via Láctea	<b>1/5</b>
Sistema Solar	<b>9/9</b>
Formação da Terra	<b>14/9</b>
Origem da vida na Terra	<b>~25/9</b>
Formação das rochas mais antigas que se conhecem na Terra	<b>2/10</b>
Fósseis mais antigos (bactérias e algas)	<b>9/10</b>
Invenção do sexo (microorganismos)	<b>~1/11</b>
Fósseis de plantas fotossintéticas	<b>12/11</b>
Eucariotas (células com núcleo)	<b>15/11</b>

# Dezembro

Domingo	Segunda	Terça	Quarta	Quinta	Sexta	Sábado
	<b>1</b> Começa a se desenvolver na Terra atmosfera de oxigênio significativa.	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b> Vulcanismo intenso e formação de canais em Marte.	<b>6</b>
<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>	<b>11</b>	<b>12</b>	<b>13</b>
<b>14</b>	<b>15</b>	<b>16</b> Primeiros vermes.	<b>17</b> Fim do pré-cambriano. Início da era paleozóica e do cambriano. Desenvolvimento dos invertebrados	<b>18</b> Primeiro plâncton oceânico. Desenvolvimento dos trilobitas.	<b>19</b> Período Ordoviciano. Primeiros peixes, primeiros vertebrados.	<b>20</b> Período Siluriano. Primeiras plantas vasculares. Plantas começam a colonizar a terra.
<b>21</b> Período Devoniano começa. Primeiros insetos. Animais começam a colonizar a terra.	<b>22</b> Primeiros anfíbios. Primeiros insetos alados.	<b>23</b> Período carbonífero. Primeiras árvores. Primeiros répteis.	<b>24</b> Começa o período Permiano. Primeiros dinossauros.	<b>25</b> Fim da era paleozóica. Começa era Mesozóica.	<b>26</b> Período Triássico. Primeiros mamíferos.	<b>27</b> Período Jurássico. Primeiras aves.
<b>28</b> Período Cretáceo. Primeiras flores. Extinção dos dinossauros.	<b>29</b> Fim da era Mesozóica. Início da era Cenozóica e do período terciário. Primeiros cetáceos. Primeiros primatas.	<b>30</b> Início da evolução dos lobos frontais nos cérebros de primatas. Primeiros homínídeos. Desenvolvimento dos mamíferos gigantes.	<b>31</b> Fim do período Plioceno. Período Quaternário (Pleistoceno e Holoceno). Primeiros humanos.			