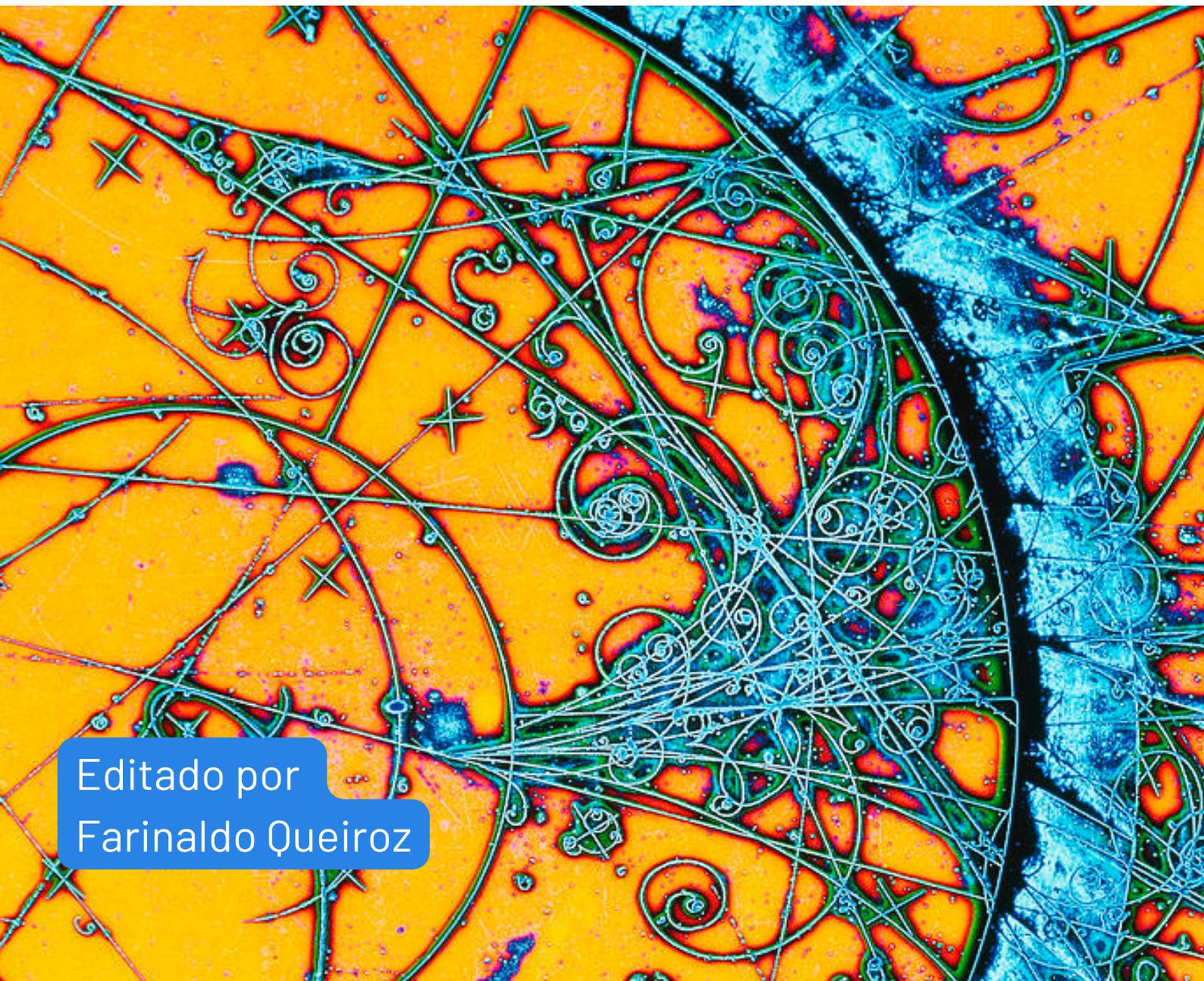


E-Book Física de Partículas

Uma breve introdução ao Universo
em suas menores escalas

João Heitor
Letícia Guedes

Editado por
Farinaldo Queiroz



Sumário

Nota do Autor.....	3
Modelo Padrão.....	4
Férmions.....	6
Bósons.....	9
Antimatéria.....	15
Pontas Soltas.....	23
Referências.....	27

Nota do Autor

Se você passou da capa e sumário deste livro, você tem interesse em conhecer como funcionam as leis do Universo em sua forma mais fundamental, e esse é o público que queremos atingir aqui para divulgar ciência!

É importante salientar, contudo, que os conceitos a seguir são de caráter **introdutório** e tem como objetivo cativar o leitor ao conhecimento científico. É assumido também que o leitor possui conhecimentos de física do ensino médio e um mínimo interesse prévio em Física.

O presente texto foi escrito em formato de *e-book* por mim, estudante de graduação em Física da UFRN, João Heitor, inspirado pelas obras dos grandes físicos que também me inspiraram a seguir a carreira.

Todo o texto foi pensado como uma espécie de “folheto” de divulgação científica, portanto, tentei compactar o máximo de informações potencialmente interessantes dentro das áreas de Física de Partículas e Cosmologia. Com essas informações em mente, espero que aproveite as próximas páginas.

Este material é resultado do projeto final do Programa de Formação em Física de Partículas e Astropartículas (Código PJ933-2023) vinculado à UFRN. O objetivo deste programa é fornecer educação em Física de Partículas para estudante do ensino médio e início da graduação e, por fim, estimulá-los a produzir um ebook (como esse) com os conhecimentos adquiridos.

Modelo Padrão

A Física de Partículas surge da vontade humana de conhecer cada vez mais o que compõe a matéria e suas estranhas interações, como as forças elétricas e magnéticas, por exemplo.

Na escola, você deve ter aprendido sobre a evolução dos modelos atômicos da ciência e como a ideia do átomo foi progressivamente “quebrando” em partes menores. Hoje, temos uma compreensão razoavelmente boa do que são as partículas fundamentais e ela é ilustrada através do **Modelo Padrão da Física de Partículas** (provavelmente a nossa teoria física mais precisa até o momento).

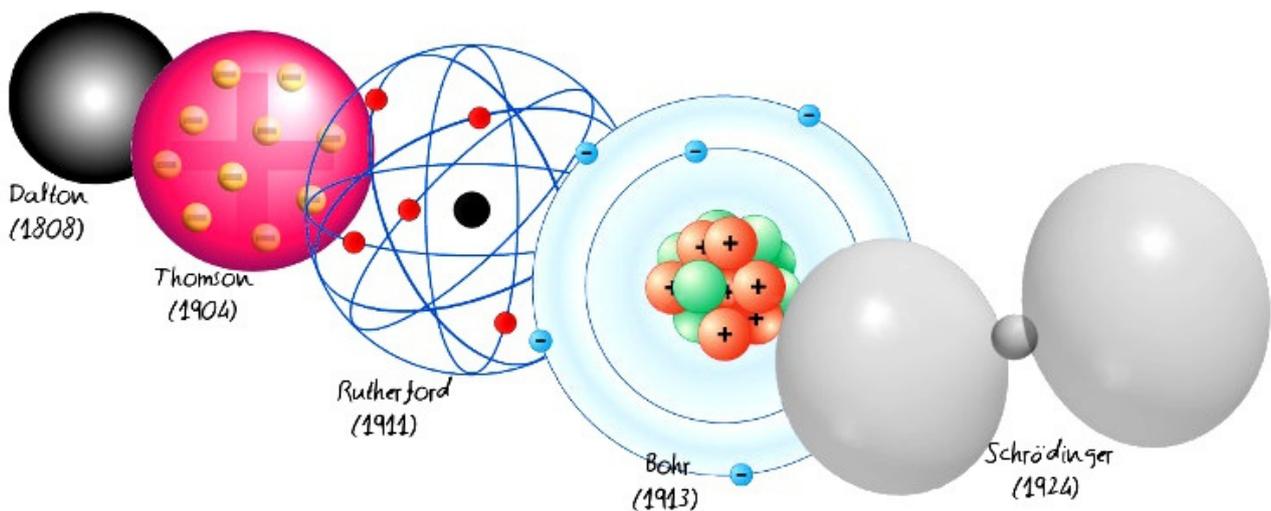


Imagem: <https://conceitosde.com/modelos-atomicos/>

O Modelo Padrão é como a “tabela periódica da física”, onde em vez de átomos, temos as partículas mais elementais que compõem a matéria que conhecemos:

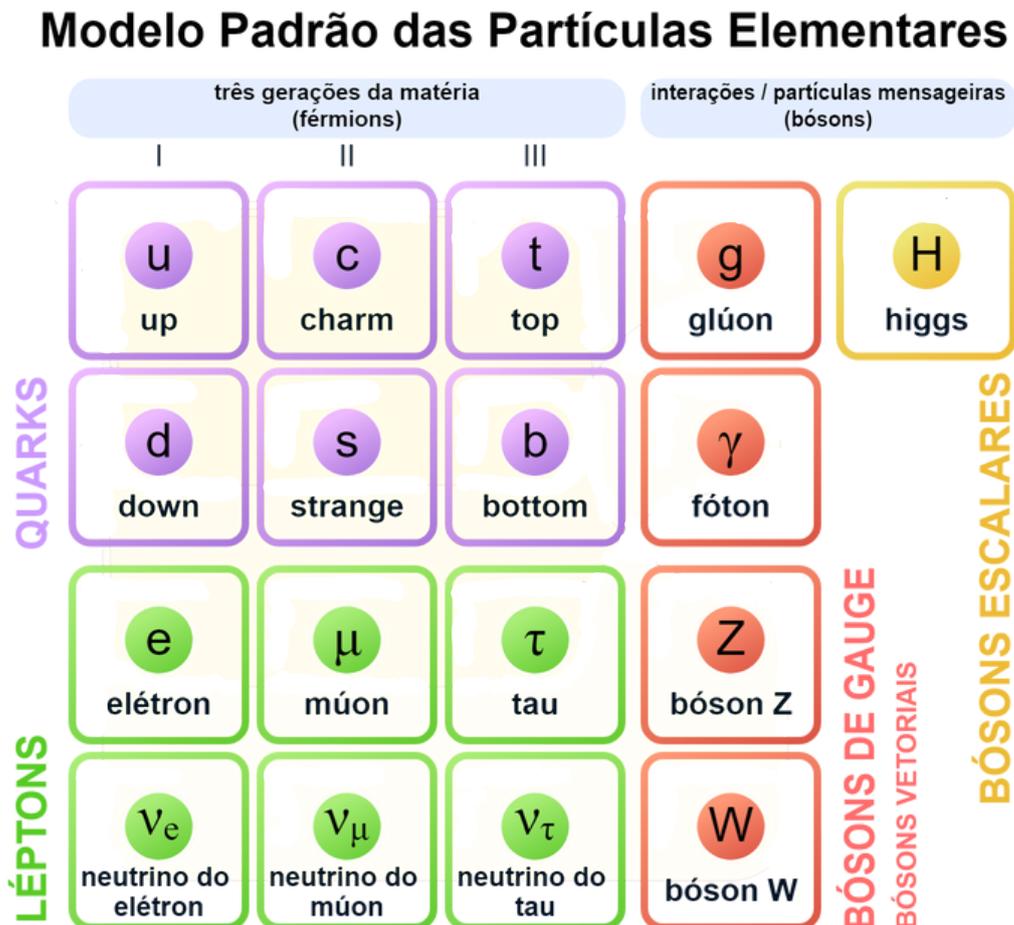


Imagem: https://pt.wikipedia.org/wiki/Modelo_Padrão

De cara, as partículas são divididas em duas categorias:

- **Férmions:** Partículas que constituem a matéria que conhecemos
- **Bósons:** Partículas ditas mediadoras, que fazem o papel de “mensageiros” das interações entre os Férmions (explicarei melhor esse conceito mais adiante).

Férmions

Talvez você saiba que os prótons e nêutrons que constituem o núcleo atômico não são partículas elementares e por isso não aparecem na tabela da página anterior. Esses dois são formados por três quarks ligados entre si por glúons; 2 quarks up e 1 down para o próton, e 1 quark up e 2 down para o nêutron.

Dessa forma, temos o núcleo atômico, que recebe sua carga positiva também dos quarks. O up tem carga $2e/3$ e o down $-e/3$, onde "e" é a carga elementar $1,6 \cdot 10^{-19}$ C. Então, ao somar a carga de dois quarks up e um down, temos *+e para o próton e carga nula para o nêutron. (Massa e carga são propriedades fundamentais).*

Mas e sobre os outros Férmions, onde eles estão na natureza?



Sabemos que quarks nunca aparecem isolados na natureza, eles sempre estão unidos uns aos outros formando partículas compostas. Assim, temos apenas o próton e o nêutron como composições estáveis de quarks, e os outros (strange, charm, top e bottom) terminam não marcando presença no Universo ao passo que seus compostos têm tempo de vida muito curto.

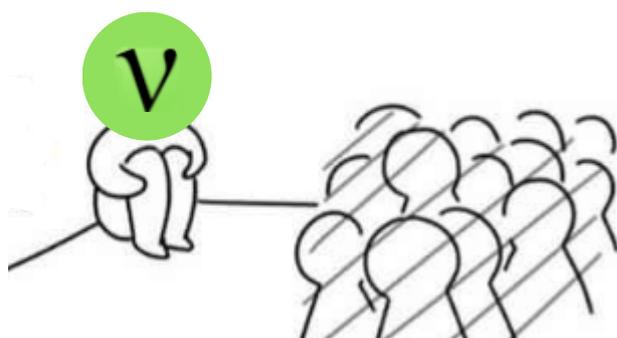
Às partículas compostas de quarks, damos o nome de **Hádrons**; aos prótons e nêutrons especificamente, **Bárions**, nome que vem do grego para "pesado", já que são os responsáveis pela grande maioria da massa da matéria.

Falando agora de Léptons, temos o elétron, bem conhecido e responsável por fenômenos como corrente elétrica e ligações químicas. O mesmo não pode ser dito para o tau e o múon, os primos do elétron mais massivos e menos populares, que também não são comuns porque vivem pouquíssimo na natureza, entre 0,000001 e 0,00000000000001 segundos!



Por último, temos os neutrinos que, agora sim, estão muito presentes no Universo, sendo produzidos por vários fenômenos astrofísicos e nucleares. Porém, são partículas que interagem muito fracamente com as outras, por esse motivo, são muito difíceis de serem detectadas e passaram despercebidas pelos físicos por muitos anos! Isso lhe confere o apelido de “partículas fantasma”, ou se preferir, uma **partícula antissocial**.

Outra propriedade das partículas é o **sabor**, que diferencia os tipos de neutrino, o neutrino eletrônico, o muônico e o tauônico. O primeiro é liberado constantemente pelo Sol durante as fusões de núcleos de hidrogênio, ou prótons, e chegam aos montes à Terra, de modo que você (uma pessoa) é como uma “peneira de neutrinos” e é intensamente atravessado por eles durante o dia.



Ficamos então com as propriedades sendo **massa**, **carga** e **sabor** (que essencialmente diferencia os 6 quarks e 6 léptons entre si). No entanto, há ainda uma propriedade muito importante das partículas a ser mencionada, e que será de grande relevância para as próximas seções, o **spin**.

Você pode se lembrar das aulas de química que essa propriedade é responsável por permitir a existência de dois elétrons no mesmo orbital atômico. Pois bem, o spin é uma propriedade intrínseca complexa, mas a fim de explicar de forma mais intuitiva seu "papel", vamos usar o modelo de uma partícula rotacionando (apesar das partículas não estarem de fato girando). Assim, o spin pode ser visualizado como uma rotação das partículas em torno de si, um **momento angular fundamental** (visto que seus efeitos se comportam como tal).

No caso dos elétrons, o spin somado à carga cria também um momento de dipolo magnético inerente. Pode soar complexo, mas, lembre-se que campos magnéticos são criados por cargas em movimento, e é exatamente o que ocorre aqui.

Veja como os elétrons são como pequeníssimos ímãs, e o valor do spin depende da orientação do campo magnético criado, que por sua vez depende do sentido da "rotação" do spin.

Até aqui, falamos apenas dos Férmions, as partículas de spin semi-inteiro, isto é, que assume os valores em módulo de $1/2$, $3/2$,

$5/2$, etc. A próxima seção trata das partículas que assumem valores inteiros de spin, os Bósons.

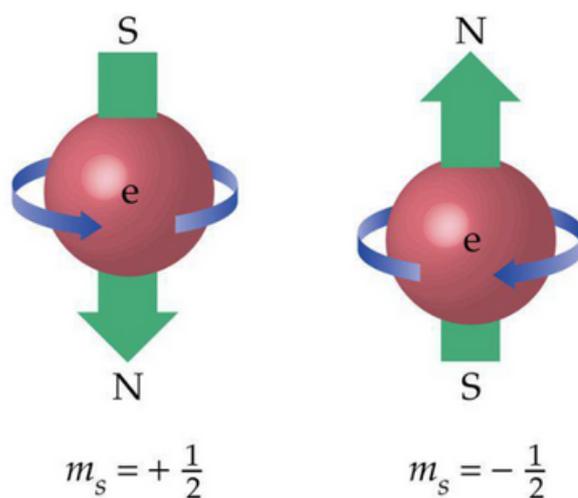


Imagem: <https://dsc-ideias-pensamentos.blogspot.com/2019/03/spintronica.html>

Bósons

Agora, podemos entender os Bósons, ou, como essas partículas interagem. Em primeiro lugar, temos que entender que “forças” como aprendemos na física newtoniana não fazem sentido aqui.



Toda “força” que vemos no mundo macroscópico é na realidade a soma de várias interações entre partículas de um corpo. Da mais forte à mais fraca, temos:

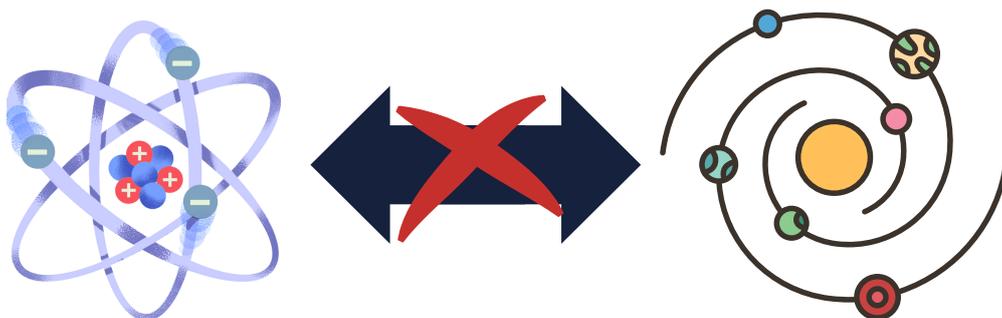
- **Interação Nuclear Forte**
- **Eletromagnetismo**
- **Interação Nuclear Fraca**
- **Gravidade**

Essa lista também é chamada de “forças fundamentais da natureza”, que é uma denominação errônea nesse contexto de física de partículas. Elas são então as **interações fundamentais da natureza**.

A partir disso, temos um bóson para cada interação:

- Nuclear Forte - **Glúon**
- Eletromagnetismo - **Fóton**
- Nuclear Fraca - **Bósons Z e W**
- Gravidade - **(???)**

É isso mesmo, ainda não sabemos quem transmite a interação gravitacional a nível quântico! Esse é um dos maiores abismos da física atual, pois a física do muito pequeno (de partículas e quântica) não se conecta com a física do muito grande (gravitação).

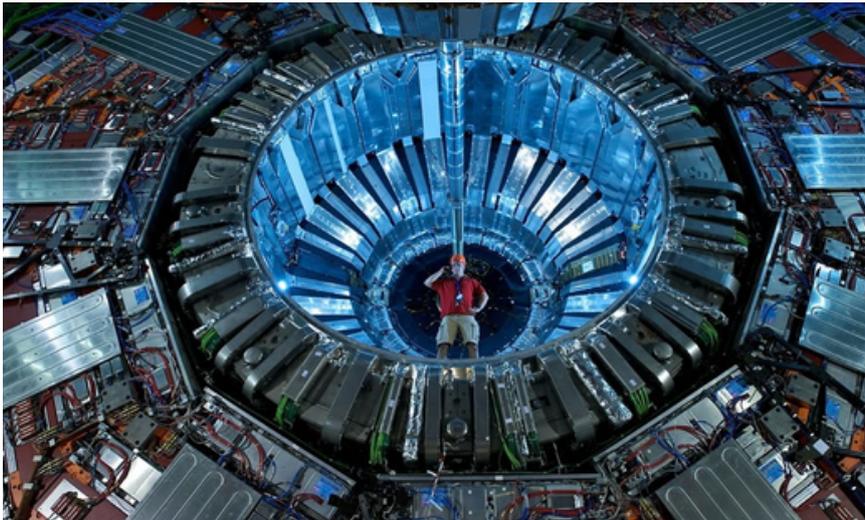


Pode parecer estranho a existência de uma partícula mensageira para que haja uma interação entre duas partículas, mas, pense bem: Como uma carga elétrica sabe da existência de outra carga? Se mudarmos uma delas de posição, qual o tempo de "delay" até que a força elétrica entre elas mude?

Isso é respondido pelos Bósons, eles devem viajar entre as partículas para que elas "saibam que a outra existe" e possam interagir entre si.



Fechando o Modelo Padrão, temos o Bóson de Higgs, descoberto recentemente no LHC. Sua atuação é relativamente complexa de se entender, mas pode-se dizer que ele interage com todas as partículas massivas e **lhes confere** exatamente **sua massa** como propriedade fundamental.



Visão de um corte transversal do LHC, comparado a um humano ao centro



Imagem: <https://pplware.sapo.pt/gadgets/lhc-large-hadron-collider-o-que-ainda-nao-sabe/>

Um acelerador de partículas como o LHC (Large Hadron Collider) faz exatamente o que o nome sugere: Acelera partículas a altíssimas velocidades e, nesse caso de um colisor, as colide gerando uma alta liberação de energia. Dessa forma, podemos analisar o que a colisão gerou e saber mais sobre as partículas, suas interações e, é claro, ter a confirmação experimental necessária para as previsões teóricas do Modelo Padrão (o Bóson de Higgs foi previsto em 1964 e só pôde observado em 2013).

Mapa das interações entre as partículas:

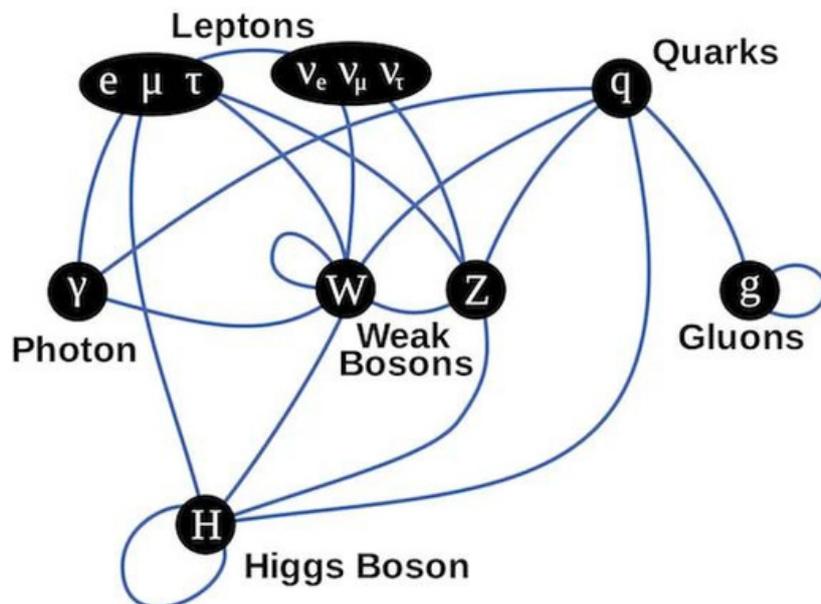
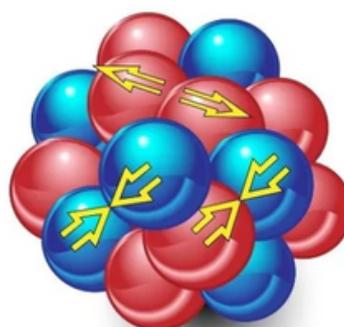


Imagem: <https://blogs.scientificamerican.com/observations/the-standard-model-of-physics-at-50/>

Note que o Higgs se conecta a todas as partículas exceto glúons, fótons e neutrinos, partículas sem massa de acordo com o modelo. Além disso, destacam-se os glúons que interagem com os quarks ligando-os entre si e os fótons que fazem a interação eletromagnética entre os quarks e elétrons (formando o átomo).

Outro ponto interessante é que, na lista das interações, a nuclear forte aparece acima da eletromagnética, ou seja, a partir de certa proximidade, a interação forte se sobrepõe à força eletromagnética entre quarks. Dessa forma, o núcleo atômico pode existir apesar da repulsão entre os prótons criada pelas cargas positivas e, por consequência, podem haver átomos, moléculas, e vida.

Os nêutrons existem para dar estabilidade ao núcleo!



● Nêutron

● Próton

⇌ Atração

⇌ Repulsão

Imagem: <https://www.manualdaquimica.com/quimica-geral/neutrons.htm>

Nesse contexto de interações fundamentais, precisamos também dar a devida importância à interação eletromagnética. Alguém deve ter te contado que matéria é 99% espaço vazio, sendo assim, como os corpos não estão se atravessando constantemente e o Universo não é um caos completo?

Justamente, toda força de contato que você experiencia no cotidiano é possível graças ao eletromagnetismo. Ao dar um grande zoom entre as mãos da pessoa e a caixa da imagem ao lado, veremos que os elétrons da eletrosfera dos átomos de ambos corpos se repelem de forma tão intensa que não é possível que matéria se atravessasse assim tão facilmente.



O eletromagnetismo é responsável pela coesão da matéria na escala macroscópica!

Finalmente, você deve estar sentindo falta da interação nuclear fraca. Essa é mais específica e ocorre em fenômenos de decaimento e fusão nuclear. Um bom exemplo é o decaimento do carbono-14, um isótopo radioativo do carbono convencional que é usado para estimar a idade geológica de fósseis.

O que ocorre é que o núcleo do carbono-14 possui nêutrons em excesso, o que o torna instável, e ao longo do tempo esses nêutrons decaem em prótons. Aqui, um quark down muda de sabor para um quark up, fazendo do nêutron, um próton, e liberando um bóson W que imediatamente decai num par elétron e antineutrino (esse que será esclarecido na próxima seção).

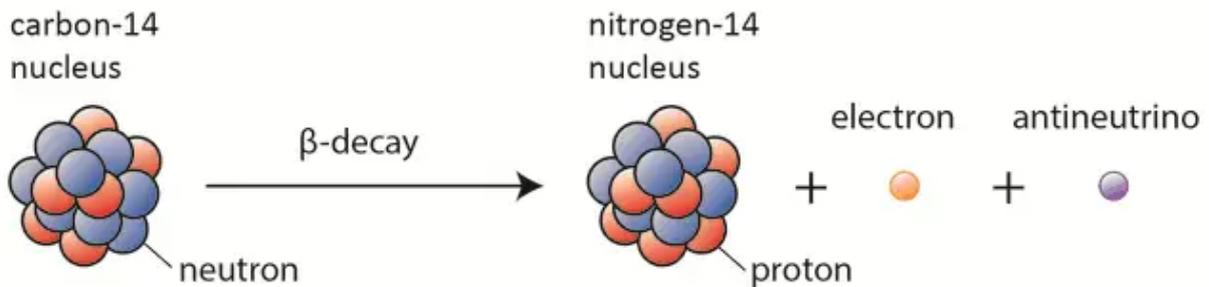
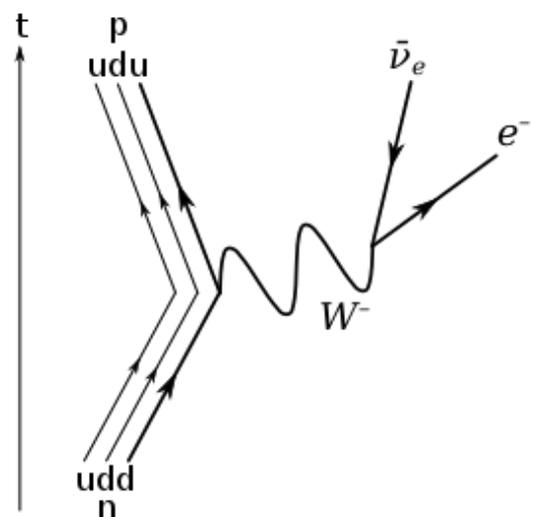


Imagem: <https://www.radiation-dosimetry.org/pt-br/o-que-e-o-carbono-14-producao-propriedades-decaimento-definicao/>

Todo esse processo pode ser observado intuitivamente por meio de um diagrama de Feynman:

Na figura, “u” é o quark up, “d” é o down, e as composições “p” e “n” são o próton e o nêutron. Veja que a seta vertical do tempo cresce para cima, denotando o sentido que devemos ler o diagrama. Com isso em mente, vemos a “quebra” na trajetória dos quarks, quando ocorre o decaimento, sendo liberado do bóson W à direita que rapidamente decai em elétron e antineutrino.



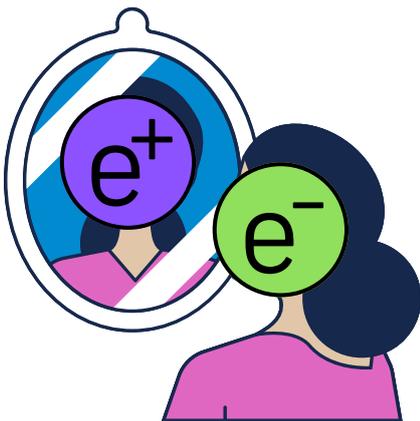
https://pt.wikipedia.org/wiki/B%C3%B3sons_W_e_Z

Um detalhe importante é a seta que representa o antineutrino, ela está ao contrário, como se voltasse no tempo. Pode parecer muito confuso, mas na próxima página começaremos a nos aprofundar nessas partículas que **“andam para trás”**.

Antimatéria

Uma antiga lenda alemã conta que: para cada pessoa, existe uma outra idêntica em algum lugar do mundo, um *Doppelgänger*, e que o encontro entre as duas poderia significar maus presságios ou morte. É mais ou menos o que acontece com as partículas fundamentais.

Sabemos que, para cada Férmion citado anteriormente, há uma **antipartícula** correspondente, de mesma massa, spin, e **sinal inverso de carga**. Para o elétron, há o pósitron, para os neutrinos, os antineutrinos, para os quarks, os antiquarks, etc.



Além disso, o encontro de uma partícula com sua contraposta **aniquila integralmente as duas**, isto é, a totalidade de suas massas é convertida em energia pela equação de Einstein (essa reação é a fonte de energia mais eficiente conhecida).

A antimatéria protagoniza uma das maiores assimetrias do Universo, já que, segundo nossa teoria, deveriam ter sido criadas quantidades iguais de matéria e

$$E = m \cdot c^2$$

antimatéria após o Big Bang, porém, a matéria é muito mais abundante. Tal situação ainda é um mistério para a física e a chamamos de **assimetria bariônica**.

A compreensão da antimatéria se deu com a evolução dos modelos quânticos que descrevem o comportamento das partículas fundamentais.

- **Schrödinger (1926):**

$$i\hbar \frac{\partial \Psi}{\partial t} = - \frac{\hbar^2}{2m} \frac{\partial^2 \Psi}{\partial x^2} + U\Psi$$

A equação de Schrödinger acima foi o pontapé inicial na descrição matemática das partículas. Aqui, elas se comportam como ondas, e sua posição no espaço é uma **nuvem de probabilidades** devido à natureza quântica do sistema, isto é, observar as partículas implica perturbá-las. Lembre-se que para observar precisamos refletir fótons no objeto em questão, e partículas fundamentais são tão pequenas que a interação delas com o fóton altera o sistema e não podemos ter certeza absoluta dos resultados.

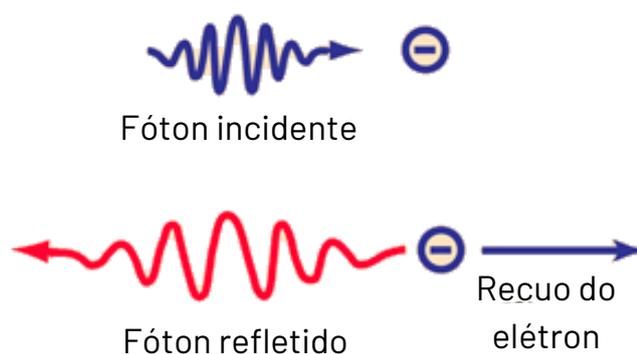


Imagem: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/Relativ/photel.html>

Apesar de ser usada até hoje em algumas situações, a equação de Schrödinger conta com uma grande incompletude, ela não é **relativística**.

- **Einstein (1905):**

Nesse ano era publicada o que se tornou a relatividade especial, teoria que quebrou vários paradigmas da física, entre eles, a descoberta que a velocidade da luz "c" é a limite para qualquer coisa que se move no espaço, e que o tempo e espaço se alteram (distorcem) em velocidade próximas à da luz, ou seja, as equações de movimento de um corpo em altíssima velocidade devem sofrer correções relativísticas (transformações de Lorentz). Além disso, Einstein chegou na famosa equação citada no começo da seção, que descreve a energia de repouso de um corpo baseado em sua massa (medida também no repouso).

Essa conclusão é particularmente importante no contexto de partículas, uma vez que elas se movem naturalmente em altas velocidades. Logo, uma equação para descrevê-las deve levar em conta esses efeitos relativísticos para ser precisa, e foi exatamente o que propôs Dirac em sua equação.

- **Dirac (1928):**

Não muito tempo depois de Schrödinger, Dirac publicava sua equação de onda. Para incluir a relatividade, ele partiu da equação energia-momento de Einstein (fora do repouso):

$$E^2 = (mc^2)^2 + (pc)^2$$

Observe que ela funciona como um teorema de Pitágoras, o primeiro termo da soma já é conhecido, com o detalhe da massa “m” crescer com a velocidade. À direita da adição, temos o termo de momento “p”, que também diz respeito à velocidade e a massa do corpo. A partir disso, Dirac usou os conceitos de energia e momento da mecânica quântica e abriu as contas, chegando em:

$$(i\partial - m)\psi = 0$$

Essa, além de uma belíssima equação da física, descreve as partículas de spin semi-inteiro, os Férmions, e curiosamente apresenta soluções possíveis de **energias negativas** para as partículas! No entanto, o que significa algo possuir energia negativa? Qual o sentido físico?

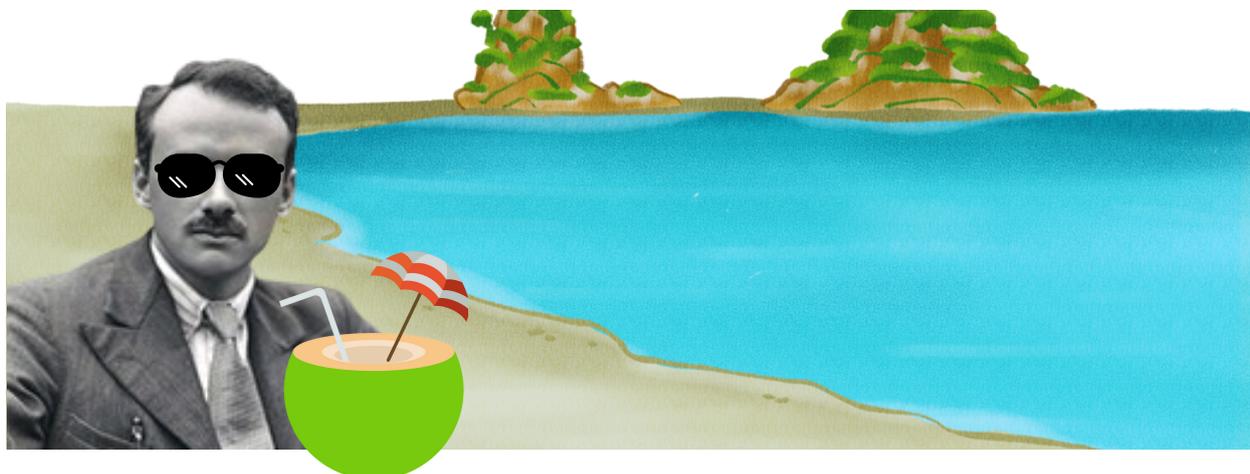
Para facilitar a compreensão, veja a equação da energia novamente:

$$E = \pm \sqrt{(mc^2)^2 + (pc)^2}$$

A energia vem de uma raiz quadrada, ou seja, assim como a raiz de 4 tem simultaneamente as soluções +2 e -2, a energia de um férmion tem soluções positivas e negativas. O dilema então é o que fazer com esses resultados negativos, ignorá-los como muitas vezes fazemos sem querer?



Inicialmente, Dirac pensou que no vácuo todos os estados de energia negativa estariam preenchidos e uma partícula de energia positiva corresponderia a um “buraco” nesse mar de energia negativa (mar de Dirac).



À direita, uma representação do mar de Dirac, com uma partícula ocupando um estado positivo de energia, ou seja, deixando um buraco nos estados preenchidos de energia negativa. Note também que a energia mínima que ela pode assumir não é zero, e sim a energia de repouso da relatividade, isto é, se massa é energia, a partícula tem uma energia de repouso mínima proveniente apenas de sua massa

Apesar de sua equação ser funcional, essa interpretação de Dirac para as energias negativas foi questionada e considerada deselegante, e, em 1932, se mostrou realmente falsa quando a antimatéria foi observada experimentalmente.



Imagem:
<https://oer.physics.manchester.ac.uk/NP/Notes/Notes/Notesse28.xht>

Nessa descoberta, Carl Anderson analisava a composição de raios cósmicos, feixes de partículas em altas energias que “chovem” do espaço. Assim, usou uma placa de chumbo para frear as partículas e analisar suas trajetórias quando submetidas à um campo magnético externo.

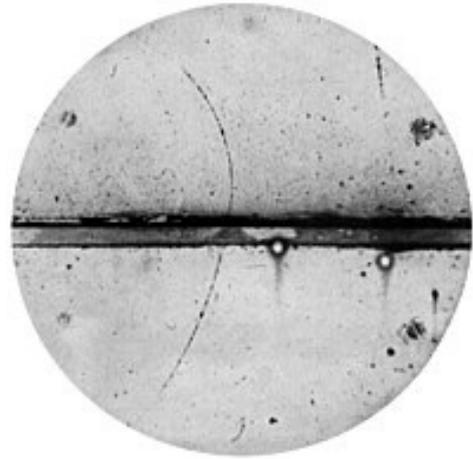


Imagem: <https://pt.wikipedia.org/wiki/P%C3%B3sitron>

O resultado? Uma trajetória para a esquerda, indicando uma **carga positiva** (isso será explicado à seguir), e com uma curvatura específica que indicava a **massa de um elétron** para a partícula. Ou seja, ele foi acidentalmente o primeiro a observar um pósitron! (que lhe conferiu o Nobel de Física).

Nas aulas de eletromagnetismo, aprendemos que cargas em movimento (q) inseridas num campo magnético reagem à uma força magnética perpendicular à ambos vetores velocidade (v) e campo magnético (B), conforme o produto vetorial:

$$\vec{F}_B = q \vec{v} \times \vec{B}$$

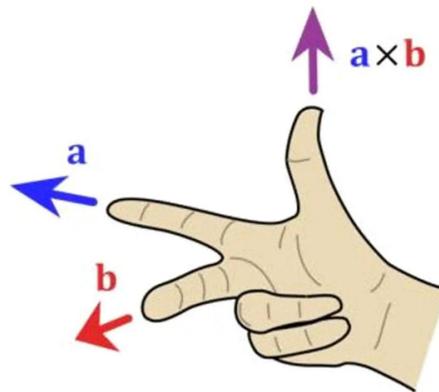


Imagem: https://en.wikipedia.org/wiki/Right-hand_rule

Quando a velocidade é perpendicular ao campo, cria-se um movimento circular da carga, ao passo que o vetor velocidade sempre está perpendicular ao vetor força. Dessa forma, dependendo do sinal de "q", sabemos o sentido que aponta a força, e conseqüentemente, a direção que a partícula toma quando efetua a trajetória circular.

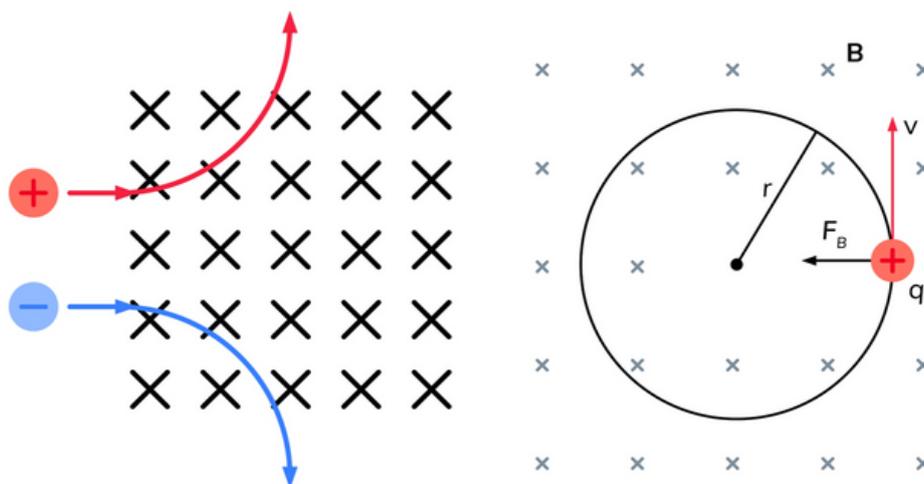


Imagem: <https://www.wizeprep.com/online-courses/19849/chapter/11/core/3/1>

Com base nesse conteúdo de eletromagnetismo, sabemos diferenciar o elétron do pósitron:

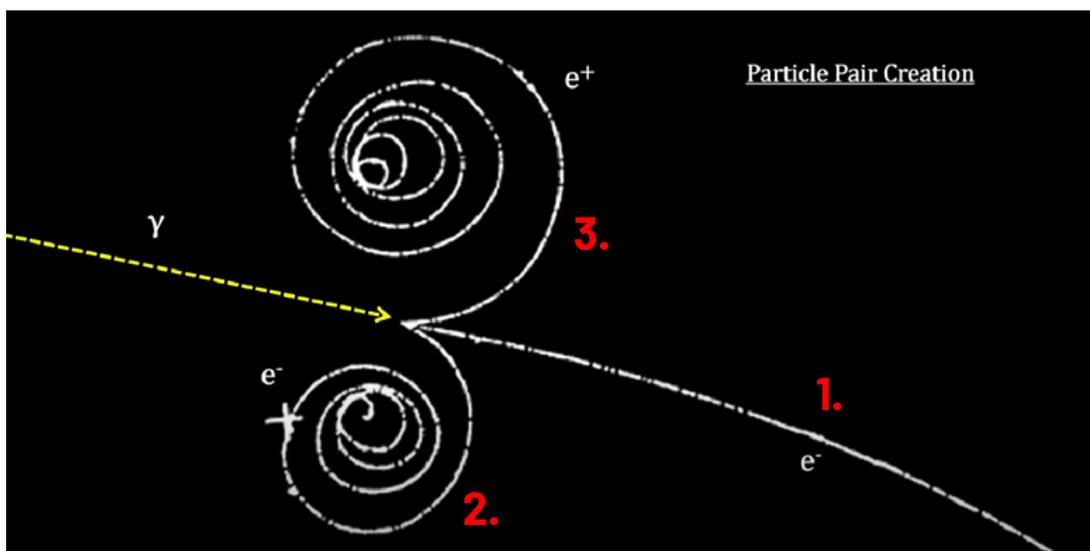


Imagem: <https://www.youtube.com/watch?v=gr0AIAcupd0>

A imagem ante foi retirada de uma câmara de bolhas, aparato experimental que serve para observar partículas eletricamente carregadas. Aqui, está acontecendo uma **produção de pares**:

Um fóton de alta energia (raio gama) vem pela esquerda e é ilustrado em amarelo, já que, devido a sua carga neutra, ele não aparece na imagem da câmara de bolhas. O evento ocorre quando o fóton “esbarra” num elétron, transferindo energia, e o expulsando do átomo em que estava ligado (esse elétron percorreu a trajetória **1.**).

Assim, o raio gama é convertido num par elétron-pósitron (trajetórias **2.** e **3.**), ou seja, temos **matéria sendo criada a partir da luz!** Usando mais uma vez a equivalência massa-energia de Einstein, chegamos no valor de energia necessário para o par ser criado a partir do fóton: 1,02 MeV. Para se ter uma ideia do quão alto é esse valor, um fóton ordinário de luz visível tem em média 2 eV, isto é, 1.000.000 vezes menos energia!

Pontas Soltas

Acabamos de entender como a matéria surge da radiação (produção de pares), e, no sentido contrário, sabemos que radiação surge da matéria, a partir da aniquilação de um par:

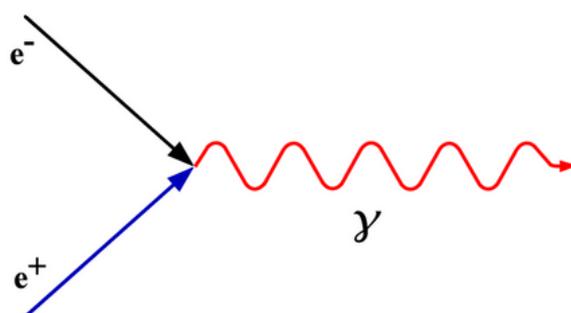
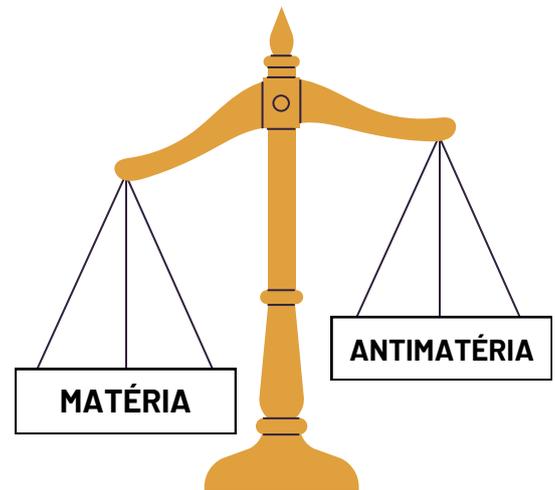


Imagem: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Pair_Annihilation.png

Isso nos conta algo profundo, a criação da matéria no Universo. Veja bem, a teoria do Big Bang diz que tudo surgiu de uma singularidade que expandiu continuamente até os dias atuais. Dessa forma, o Universo primordial era bem menor e recheado de radiação de altíssimas energias, constantemente produzindo pares que se aniquilavam em seguida. Com o passar do tempo, o universo expande e se esfria, até uma temperatura crítica onde a produção de pares não consegue mais ocorrer naturalmente.

Ou seja, **toda matéria que vemos hoje foi criada a partir radiação** no Universo primordial. Além disso, chegamos à conclusão que havia uma quantidade excedente de matéria em relação à antimatéria, pois, se ambas tivessem sido equivalentes, todos os pares teriam se aniquilado após a temperatura crítica. Assim, por algum motivo, houve esse desbalanço no Universo primordial que fez a matéria sobreviver para contar história.

Todo esse desbalanço citado se refere exatamente à já citada assimetria bariônica, uma “imperfeição” no desenvolvimento do Universo que permitiu que eu, você e tudo que é matéria exista nos dias de hoje (e não sabemos exatamente porque ocorreu).



Portanto, sinto que devo concluir toda essa discussão falando sobre algumas “pontas soltas” da física atual, sinalizando que (além da assimetria bariônica) ainda há muito a ser descoberto e descrito pela ciência.

- **Energia Escura:**

Sabemos que nas maiores escalas, o Universo se expande como um balão, e essa expansão se mostra acelerada, isto é, cada vez mais rápida. Logo, deve haver algo constantemente injetando energia no cosmos para acelerar sua expansão, e chamamos esse algo de energia escura. Ela é “escura” simplesmente porque não conhecemos sua origem e ficamos *no escuro* com relação a sua natureza. Na analogia, a energia escura é a força do sopro do menino e os pontos na superfície do balão são os aglomerados de galáxias.

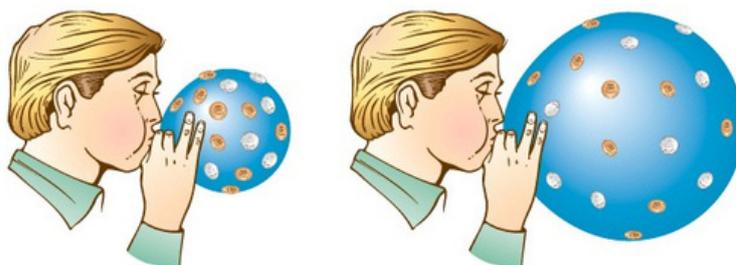


Imagem: <https://astronomy.stackexchange.com/questions/17965/is-the-universe-moving-through-infinite-space-time-as-it-expands>

- **Matéria Escura:**

O Universo vive uma espécie de cabo-de-guerra cósmico entre a gravidade, de natureza atrativa, e a energia escura, de natureza expansiva, e, como dito anteriormente, quem ganha essa disputa hoje é a energia escura.

Porém, quando consideramos toda a matéria do Universo e fazemos as contas, percebemos que ela é insuficiente para gerar toda a atração gravitacional que observamos. Então, isso indica que há uma parcela (considerável) de matéria que não conhecemos e não conseguimos enxergar, a matéria escura.

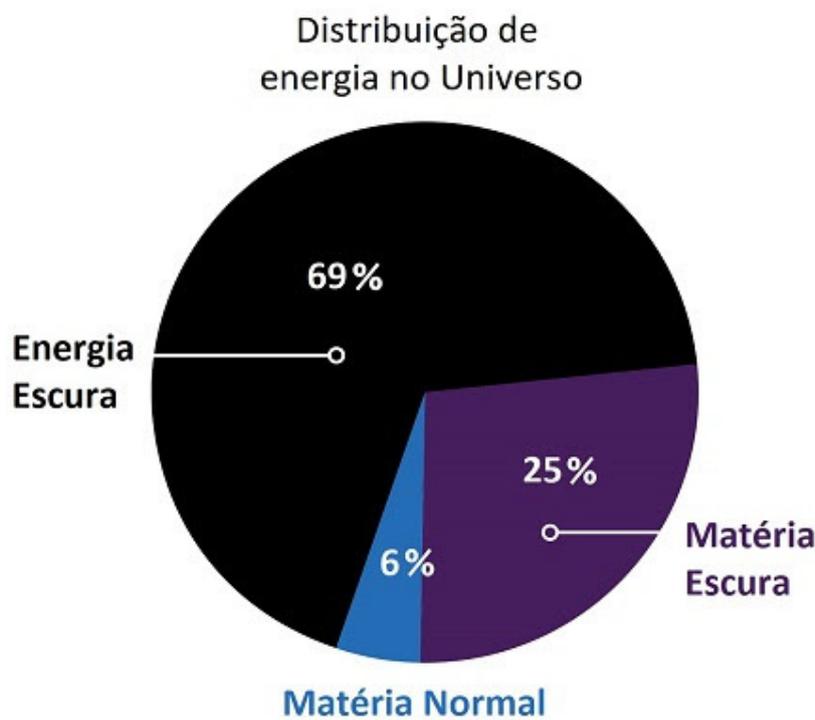


Imagem: <https://www.saberatualizado.com.br/2016/07/o-que-sao-materia-e-energia-escuras.html>

- **Neutrinos:**

Conforme explicado na seção dos Férmions, os neutrinos não têm massa de acordo com o Modelo Padrão, mas, já detectamos experimentalmente que eles trocam de sabor constantemente, processo possível apenas para partículas massivas. Então, por menor que seja a massa dos neutrinos, ela evidencia uma incompletude nas nossas teorias.



Espero que todas as discussões apresentadas ao longo deste e-book sobre as lacunas da física sirvam para te instigar a pensar sobre a natureza da realidade e como ainda sabemos tão pouco sobre o Universo. As áreas de Física de Partículas e Cosmologia ainda vão muito, mas muito mais afundo do que o que lhe foi apresentado e, com certeza, ficam cada vez mais interessantes.

Referências

- GLEISER, Marcelo. Criação Imperfeita. [S. l.: s. n.], 2010.
- "Matter and Radiation":
<http://lifeng.lamost.org/courses/astrotoday/CHAISSON/AT327/HTML/AT32701.HTM#:~:text=The%20key%20to%20understanding%20events,can%20be%20created%20from%20radiation.>
- "Matter/Anti-Matter Asymmetry":
<https://pages.uoregon.edu/imamura/323/lecture-7/asymmetry.html>
- "Visualising Antimatter with Bubble Chambers - Christmas Lectures with Frank Close": <https://www.youtube.com/watch?v=4lbyxwalcQ>
- "Teoria dos Buracos": https://pt.wikipedia.org/wiki/Teoria_dos_buracos
- "Aula 4: Introdução às Equações de Klein-Gordon e Dirac.":
https://www.youtube.com/watch?v=pyam0J_zyug
- "Decaimento Beta": <https://portal.if.usp.br/fnc/pt-br/p%C3%A1gina-de-livro/decaimento-beta>
- "Neutrinos: as partículas 'fantasmagóricas' que constroem nosso universo":
<https://parajovens.unesp.br/neutrinos-as-particulas-fantasmagoricas-que-constroem-nosso-universo/#:~:text=Na%20fus%C3%A3o%20nuclear%2C%20dois%20n%C3%BAcleos,minutos%20para%20chegar%20%C3%A0%20Terra.>
- "11.3 Motion of a Charged Particle in a Magnetic Field":
<https://pressbooks.online.ucf.edu/osuniversityphysics2/chapter/motion-of-a-charged-particle-in-a-magnetic-field/#:~:text=A%20magnetic%20force%20can%20supply,2%CF%80mqB.>