

28 de maio de 2025

Epítomes de Teoria Quântica de Campos e Relatividade Geral – Artigo da autoria Roberto N. Onody

Big Bang – nasce o Universo, as 4 forças estão unificadas.

O Universo começa a envelhecer e a esfriar.

Transições de fase começam a separar as 4 forças

Idade Temperatura Força que se separou

$10^{-43}s$ $10^{32}K$ *gravidade*

$10^{-35}s$ $10^{27}K$ *forte*

$10^{-12}s$ $10^{15}K$ *eletromagnética e fraca*



Figura 1 – As forças eletromagnética e fraca se unificam em energias de 102 GeV; a forte deve se unificar a elas perto de 1015 GeV (estamos bem longe desse patamar, o recorde de energia atual é de 6,8 103 GeV que foi obtido em 2022 no Large Hadron Collider, do CERN); a gravitacional deve se unir às outras 3 perto da energia de Planck, 1019 GeV. A energia de 1 GeV corresponde a energia cinética de um mosquito com massa de 2,5 miligramas voando com velocidade de 1 m/s

Por: Prof. Roberto N. Onody *

O objetivo de um epítome é resumir um assunto, em geral complexo, destacando os seus pontos mais importantes e relevantes. Um epítome fornece uma visão geral de um tema, uma compreensão básica, sem se aprofundar nos detalhes. É com esse propósito que eu abordo aqui dois temas fundamentais da Física Moderna: a Teoria Quântica de Campos e a Teoria da Relatividade Geral. Juntas, as duas modificaram antigos conceitos e revolucionaram a compreensão que temos hoje do mundo em que vivemos. Ambas tocam tão profundamente na imaginação e na curiosidade do ser humano que fazem despertar o interesse e o amor pela ciência. Um proselitismo saudável nestes tempos de negacionismo.

As forças conhecidas da natureza são apenas quatro: a eletromagnética, a fraca, a forte e a gravitacional (**Figura 1**). As três primeiras forças são descritas por teorias de campos quânticos, mas não a força gravitacional. A interação gravitacional é descrita pela Relatividade Geral, que é uma teoria de campos clássicos.

Uma [teoria quântica de campos](#) envolve vários conceitos como a *invariância de Lorentz* (de acordo com a relatividade especial, as leis da Física são equivalentes para todos os observadores que se movem em referenciais

inerciais), *renormalização* (para manipular os infinitos que surgem ao fazer expansões em séries), *simetrias de gauge* (transformações matemáticas sobre os campos que deixam invariante a Lagrangeana do sistema, preservando assim sua dinâmica). Além de explicar a *dualidade onda-partícula*, uma teoria quântica de campos permite a existência de *criação e de aniquilação de partículas*, algo impossível e inimaginável do ponto de vista da Física Clássica.

1-A Força Eletromagnética – O eletromagnetismo clássico se consolidou graças a dois desenvolvimentos fundamentais: as [equações de Maxwell](#), que mostram como o movimento de cargas elétricas gera campos elétricos e magnéticos e como a luz se propaga com velocidade constante no vácuo e a [força de Lorentz](#), que descreve como partículas carregadas se movimentam sob a ação de campos elétricos e magnéticos.

Antes de abordarmos a quantização do campo eletromagnético propriamente dito, precisamos primeiro falar sobre a quantização das partículas elementares (feita em 1926) através da [equação de Schrödinger](#). Foi quando nasceu a Mecânica Quântica.

A equação de Schrödinger transforma *grandezas físicas* (como os vetores posição e momento linear, a energia, etc...) de partículas clássicas (não relativísticas) em *operadores quânticos*. [A equação de Dirac](#) estendeu essa quantização para partículas relativísticas (isto é, partículas que se movimentam com velocidades próximas à da luz), incorporou de maneira natural o conceito de spin e, além disso, previu a existência da antimatéria.

De maneira inédita, o estado de uma partícula passa a ser descrito por uma *função de onda*! O determinismo presente em todas as teorias clássicas anteriores é substituído por incertezas e conceitos probabilísticos. Assim nasceu a chamada *primeira quantização* – as partículas podem se comportar como ondas!

Duas consequências muito importantes dessa quantização são: a energia de um sistema não é mais contínua, mas, discretizada (como, por exemplo, no [átomo de hidrogênio](#)) e o [Princípio de Incerteza de Heisenberg](#), que demonstra ser impossível medir simultaneamente duas grandezas físicas (cujos respectivos operadores não comutam) com precisão arbitrária!

Em 1927, Paul Dirac quantizou o campo eletromagnético. Para isso, ele provou que o campo eletromagnético pode ser visto ou reescrito como um conjunto de osciladores harmônicos. Como estes já haviam sido quantizados (na primeira quantização), estava pronta a quantização do campo eletromagnético. Assim nasceu a chamada *segunda quantização* – as ondas podem se comportar como partículas!

O campo eletromagnético clássico passa, então, a ser entendido como um operador quântico que, atuando sobre o vácuo, pode criar ou destruir fótons (a partícula do campo eletromagnético quantizado). *O vácuo quântico não é vazio!*

Suponha um *elétron* colidindo com um *pósitron* (a antipartícula do elétron) no vácuo. Eles têm a mesma massa e cargas elétricas opostas. Dependendo das condições iniciais da colisão, eles podem se *espalhar* ou se *aniquilar*. É uma *crença muito popular* de que ao se juntar a matéria com a antimatéria elas, inexoravelmente, se aniquilarão mutuamente. Não é bem assim. Dependendo da forma da colisão, elas podem se aniquilar ou apenas se espalhar.

Analisemos o caso mais simples de aniquilação – uma *colisão frontal* de um par elétron-pósitron (**Figura 2**). Para analisar este processo, é melhor utilizar o *referencial do centro de massa*. Nele, o elétron e o pósitron têm vetores velocidades com mesmo módulo e direção, mas, sentidos opostos. Como o processo tem vetor *momento linear total inicial nulo* (valor este que se conserva após a colisão), a produção de um *único fóton é proibida*! Dois ou mais fótons, com vetor momento linear total nulo, poderão ser criados. Dependendo da *energia da colisão*, a aniquilação do par elétron-pósitron [pode produzir diferentes partículas](#)!

Processos como este, envolvendo partículas carregadas e fótons, compõem a teoria de campos denominada eletrodinâmica quântica. Entretanto, para que a eletrodinâmica quântica tivesse sucesso foram necessários ainda vários aperfeiçoamentos. Cálculos realizados envolvendo expansão em séries esbarravam em termos de segunda ordem que divergiam! Criou-se então, um procedimento padrão para eliminar esses infinitos – a renormalização de massa e de carga. Aqui é um bom momento para abordar os efeitos das flutuações quânticas que, através das partículas virtuais, levam à polarização do vácuo.

Na eletrodinâmica quântica, fótons do campo eletromagnético de um elétron criam pares de *elétrons e pósitrons virtuais*. Esse pares se alinham ao campo elétrico gerado pelo elétron real como dipolos elétricos, ou seja, o vácuo se comporta como um meio dielétrico. Em distâncias maiores (menores) ou seja em baixas (altas) energias, a carga do elétron aparecerá menor (maior) devido à blindagem feita pela nuvem de pares virtuais. Para levar esses fatos em consideração, deve-se proceder à renormalização da carga elétrica.

Outro aspecto importante que uma teoria quântica de campos deve contemplar é que ela deve ser uma *teoria de gauge*. Isso significa que a Lagrangeana (de onde sai toda a dinâmica do sistema) deve ser invariante por *transformações de gauge*. Gauge se refere que ao fato de que a Lagrangeana tem graus de liberdade redundantes que podemos fixar ao escolher uma gauge.

As transformações entre diferentes gauge formam um grupo de Lie e cada gerador desse grupo é um campo de gauge (em geral, um campo vetorial) que, após a quantização, gera um bóson. No caso da eletrodinâmica quântica, esse bóson é o fóton e o grupo de simetria é o grupo unitário $U(1)$.

Na Física *não existe teoria com maior sucesso* do que a eletrodinâmica quântica. O elétron, como toda partícula carregada e com spin, tem momento de dipolo magnético com um certo valor. As flutuações quânticas alteram esse valor. Na eletrodinâmica quântica podemos calcular essas flutuações através dos diagramas de Feynman. O resultado é espetacular: a diferença entre o valor teórico e o experimental do momento de dipolo magnético do elétron é de apenas de uma parte em um trilhão!

2-A Força Fraca – É uma força que atua entre partículas elementares denominadas léptons: elétron, múon, tau (todos com carga elétrica -1), neutrino do elétron, neutrino do múon e neutrino do tau (todos com carga elétrica zero) e quarks: que existem em 6 tipos ou ‘sabores’ up, down, charm, strange, top e bottom, em 3 ‘cores’: vermelho, verde e azul e com cargas elétricas fracionárias: $+2/3$ e $-1/3$. Léptons e quarks (e suas respectivas antipartículas) têm *massa não nula* e spin igual a $1/2$.

Todas as partículas mencionadas acima são *férmions* (isto é, partículas com spin semi-inteiro) e, obedecem, portanto, ao Princípio de Exclusão de Pauli – *num mesmo sistema, dois férmions idênticos não podem estar no mesmo estado quântico*. É esse princípio que *impede o colapso gravitacional* de estrelas de nêutrons e de anãs brancas!

A força fraca pode alterar os ‘sabores’ dos quarks e é carregada ou mediada pelos bósons (isto é, partículas com spin inteiro) Z^0 , W^+ e W^- que têm spin igual a 1 e massas enormes (adquiridas pelo mecanismo de Higgs). Esses bósons têm vida média curtíssima – da ordem de $3 \cdot 10^{-25}$ segundos!

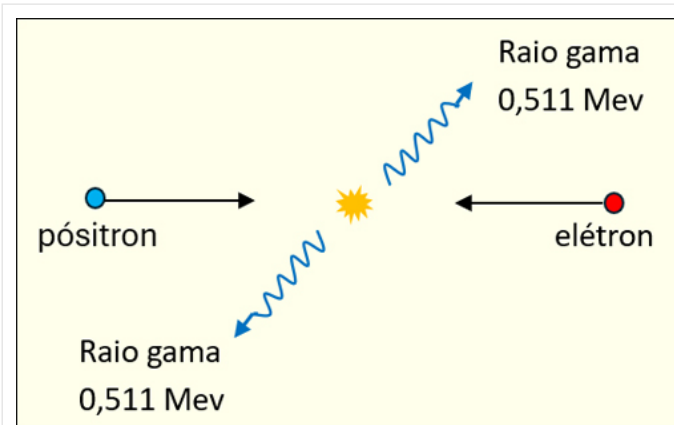


Figura 2 – Se a colisão de elétron-pósitron for de baixa energia ($\sim 1,022$ Mev) é mais comum (provável) a produção de 2 fótons de radiação gama com frequência de $1,23 \cdot 10^{20}$ Hz, ou seja, um milhão de vezes a frequência da luz visível. Já, numa colisão com energia da ordem de 211,32 Mev, há produção de 1 múon e 1 anti-múon. Se a colisão elétron-pósitron tiver energia da ordem de 125,09 Gev será produzido o importantíssimo Bóson de Higgs!

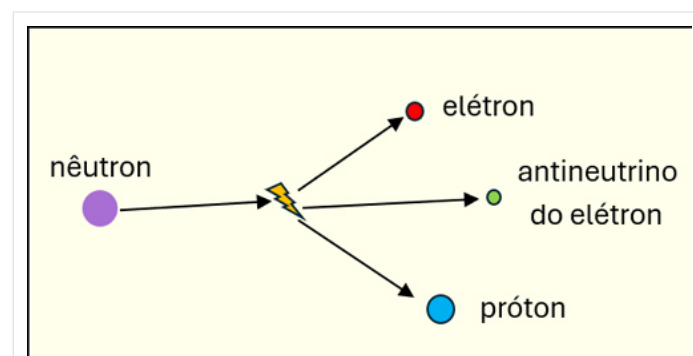


Figura 3 – Em 99,9% dos eventos, o nêutron decai produzindo um próton, um elétron e um antineutrino. Existem, porém, outros ‘canais’ para o decaimento do nêutron. Em 0,001% dos eventos, além do elétron, do próton e do antineutrino, o processo também produz um fóton (raio gama) e em 0,00000025% dos eventos, o próton e o elétron que foram produzidos se ligam formando um átomo de hidrogênio neutro

A alteração de ‘sabores’ dos quarks é o mecanismo responsável pelo *decaimento do nêutron*. O nêutron (próton) é composto por 1 (2) quark up e 2 (1) quarks down. Como o quark down é mais pesado do que o quark up o *nêutron é mais pesado do que o próton*. Por esse motivo, argumentos de conservação de momento e energia permitem o decaimento de um *nêutron livre*, mas, não o de um *próton livre*. O próton livre é uma partícula estável? Tudo indica que sim, experimentos recentes estimam o tempo de vida do próton como sendo maior do que $1,67 \cdot 10^{34}$ anos!

Um *nêutron livre* tem tempo de vida entre 14,63 e 14,79 minutos (não se sabe o valor exato). Em 99,9% dos casos, o nêutron decai em um próton, um elétron e um antineutrino (**Figura 3**). A força fraca altera um quark down do nêutron para um quark up, transformando-o num próton e criando um elétron e um antineutrino do elétron. Este processo descrito também ocorre em *núcleos de átomos radioativos*, o que acarreta em um aumento do seu respectivo número atômico Z.

A interação fraca admite *violação da simetria CP* (conjugação de carga e paridade) e é, portanto, a candidata natural para explicar por que o *nosso universo é feito de matéria* e não de antimatéria.

Curiosamente, ao contrário do que acontece com as forças forte, eletromagnética e gravitacional, não se conhece *estados ligados* e estáveis que

sejam mantidos pela força fraca. Todos os mésons (partículas formadas por 1 quark e 1 antiquark) são instáveis e decaem rapidamente devido à interação fraca.

A primeira tentativa teórica de descrever a interação fraca foi feita por Enrico Fermi em 1933. No final da década de 1950 e ao longo da década de 1960, S. Glashow, A. Salam e S. Weinberg (que receberam o prêmio Nobel de Física de 1979) desenvolveram a teoria de campos eletrofraca que unificou as forças fraca e eletromagnética.

Logo após o Big Bang, as duas forças são uma só, com simetria de gauge $SU(2) \times U(1)$ e 4 bósons de gauge sem massa. Cerca de 10^{-12} segundos depois do Big-Bang, a temperatura do universo fica abaixo de 10^{15} Kelvin e há uma quebra espontânea de simetria. Com ela, os 3 bósons de gauge: Z^0 , W^+ , W^- da força fraca (que interagem com o campo de Higgs) adquirem massa enquanto o bóson de gauge (fóton) da força eletromagnética (que não interage com o campo de Higgs) permanecerá sem massa.

O maior sucesso da teoria de campos eletrofraca foi a predição da existência dos 3 bósons massivos, comprovada experimentalmente em 1983, e do *bóson de Higgs*, encontrado em 2012 pelo LHC.

3-A Força Forte – É uma força que atua *somente entre os quarks* e tem dois níveis de intensidade: a superforte, que garante o confinamento dos quarks no interior dos *bárions* (férmions compostos por 3 quarks, como os prótons e nêutrons) e a forte (ou nuclear), que é um efeito residual da superforte, que serve para manter prótons e nêutrons unidos no núcleo atômico (apesar da força elétrica repulsiva entre os prótons).

A força superforte é carregada ou mediada por oito *glúons* – partículas bosônicas com spin igual a 1, sem massa e nem carga elétrica. Cada glúon é formado com uma 'cor' e uma 'anti-cor' dos quarks. Como são 3 cores, deveríamos ter 9 tipos de glúons, mas, devido a uma restrição da teoria de grupos [SU\(3\)](#), apenas 8 glúons são independentes.

A força nuclear é carregada ou mediada por *mésons* π (bósons compostos por 1 quark e 1 anti-quark). No núcleo atômico, pela ação dos glúons, as 'cores' dos quarks de um próton (nêutron) são alteradas, com a liberação de um méson π virtual que é absorvido pelo nêutron (próton). Veja [animação](#).

A teoria quântica de campos da interação forte é denominada [Cromodinâmica Quântica](#). Cada um dos seis tipos ('sabores') de quarks pode ter uma das 3 cores: azul, vermelho e verde. As cores correspondem às cargas da interação forte e, matematicamente, correspondem aos autoestados e seus respectivos autovalores das duas [matrizes de Gell-Mann](#) diagonais (3×3 , associadas à simetria SU(3)). Os antiquarks têm 3 anticores: antiazul, antivermelho e antiverde. Todas as partículas compostas por quarks têm *cor neutra ou branca*.

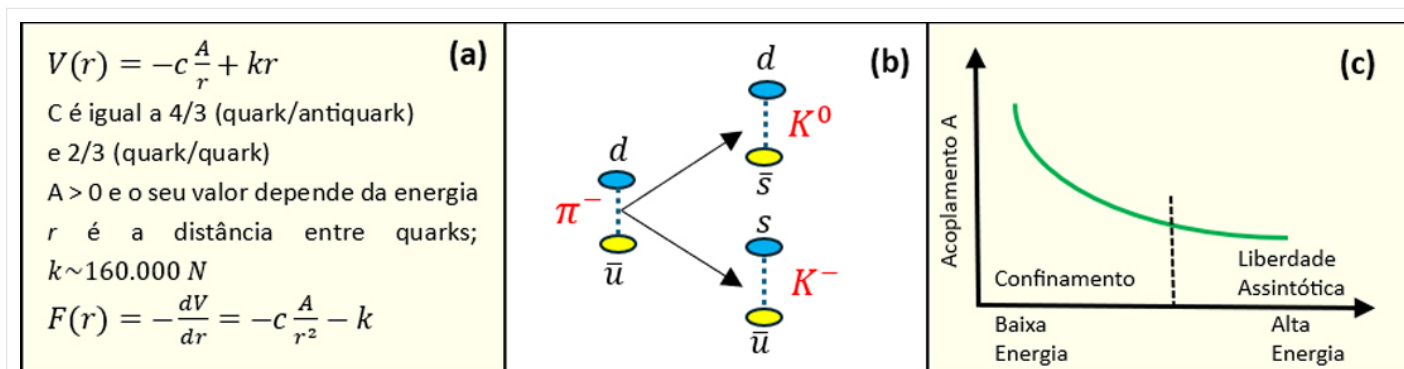


Figura 4 – (a) A energia potencial efetiva $V(r)$ e a força $F(r)$ entre quarks e antiquarks. A grandes distâncias, a força se aproxima de um valor constante que corresponde ao peso de cerca de 200 pessoas! **(b)** Hadronização – 1 méson π menos (quark down + antiquark up) gera 1 méson K neutro (quark down + antiquark strange) e 1 méson K menos (quark strange + antiquark up). **(c)** Variação do acoplamento A em função da energia. Quando a energia é de cerca de 1 GeV, $A \sim 1,00$; em 100 GeV, $A \sim 0,12$.

Na cromodinâmica quântica chamamos de *hádrons* os *bárions* compostos por 3 quarks (como o próton, o nêutron e [muitos mais](#)) e os *mésons* que são compostos por 1 quark e 1 antiquark (como os mésons π , K e [muitos mais](#)). A união desses quarks é mantida pelos glúons que, por terem *carga de cor* (ou *anti-cor*) interagem entre si. Sem *carga elétrica*, os glúons não têm antipartículas (anti-glúons).

Em anos recentes, aceleradores potentes produziram partículas exóticas como os [tetraquarks](#), que são mésons com 2 quarks e 2 antiquarks e os [pentaquarks](#), que são bárions com 4 quarks e 1 antiquark.

Para compreendermos os hádrons, precisamos saber um pouco mais sobre a energia de interação entre seus quarks. A [energia potencial de Cornell](#) (**Figura 4 a**) descreve, tipicamente, a interação entre quarks e quarks/antiquarks. Note que a força é sempre atrativa (negativa para qualquer r). A energia potencial tem comportamento Coulombiano a pequenas distâncias, mas, ela *cresce linearmente* (e indefinidamente) com a distância. Esse crescimento significa que não podemos separar os quarks – eles estão [confinados](#)!

Como os *quarks têm cor*, se combinam para formar hádrons sem cor e *não podem ser separados*, nunca foi encontrada (em laboratório) uma *partícula colorida*. O confinamento de cor não tem prova analítica, mas, tem sua comprovação em [cromodinâmica quântica na rede](#) (em que o espaço-tempo é discretizado).

O que acontece em colisões de hádrons de alta energia? No *Large Hadron Collider* (no CERN) prótons colidem com prótons a incríveis 13.600 GeV! Para onde vai tanta energia se não é possível separar os quarks? Aí acontece um processo chamado de [hadronização](#) – onde novos hádrons são criados e, muitas vezes, na forma de jatos. Na **Figura 4 b** exemplificamos uma hadronização de um méson com a criação de dois novos mésons. A hadronização também ocorre em bárions, mas, devido a necessidade de conservar o *número bariônico*, é obrigatória a formação de um par de bárion/antibárion.

Como acontece na eletrodinâmica quântica, a carga de cor dos quarks é blindada por uma *nuvem de quarks, antiquarks e glúons virtuais*. Dessa forma, o valor do acoplamento A diminui (aumenta) com o aumento (diminuição) da energia (**Figura 4 c**). Em altas energias (que correspondem a escalas de comprimentos pequenos) a força de interação predominante entre os quarks é do tipo Coulombiana com intensidade controlada pelo acoplamento A . Como o valor de A fica cada vez menor com o aumento da energia, os quarks se comportam como se eles estivessem livres – é a chamada [liberdade assintótica](#).

As teorias de campos que acabamos de apresentar descrevem 3 das 4 forças da natureza. Elas contêm a essência do chamado [Modelo Padrão](#) da Física das partículas elementares. O Modelo Padrão tem 19 parâmetros (massas, constantes de acoplamento etc.) que precisam ser determinados experimentalmente. É a melhor estrutura teórica que temos atualmente, mas, é incompleta já que não inclui a gravitação e tampouco consegue explicar a existência da [matéria escura](#).

4-A Força Gravitacional – Inspirado pelas [Leis de Kepler](#) para o movimento dos planetas no sistema solar, Isaac Newton publicou (em sua monumental obra *Principia*, de 1687) a [Lei da Gravitação Universal](#). Ela não é completamente exata, mas, para campos gravitacionais mais fracos, é uma *excelente aproximação*. Ela previu, por exemplo, a existência do planeta Netuno muito antes de sua visualização por telescópio.

Todos os planetas do sistema solar têm *precessão do periélio*, isto é, uma rotação do seu ponto de maior aproximação ao Sol. Esse efeito tem várias causas, mas, a principal delas é a perturbação gravitacional que os próprios planetas provocam uns nos outros. O planeta Mercúrio, por estar mais próximo do Sol, tem o maior valor de precessão. No final do século XIX, cálculos realizados utilizando a Gravitação de Newton encontravam para a precessão de Mercúrio o valor de 532 segundos de arco/por século. Entretanto, medidas astronômicas muito precisas indicavam o valor de 574 segundos de arco/por século. Algo estava errado.

Equação de Einstein	Equação de Friedmann
$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}Rg_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4}T_{\mu\nu} \quad (1915)$	$\frac{\ddot{a}}{a} = -\frac{4\pi G}{3}\left(\rho + \frac{3P}{c^2}\right) \quad (1922)$
$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}Rg_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4}T_{\mu\nu} \quad (1917)$	<p>onde:</p> <p>$a(t)$ é o fator de escala do universo</p>
$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}Rg_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4}(T_{\mu\nu} - g_{\mu\nu}\rho_{ee}) \quad (1998)$	<p>$\ddot{a} = \frac{d^2a}{dt^2}$</p> <p>$\rho$ é a densidade e P é a pressão</p>
<p>onde:</p> <p>$\mu, \nu = 0, 1, 2, 3 \rightarrow 4$ dimensões: 1 temporal + 3 espaciais</p> <p>$R_{\mu\nu}$ é o tensor de Ricci; R é a curvatura escalar</p> <p>$g_{\mu\nu}$ é o tensor métrico; $\Lambda > 0$, é a constante cosmológica</p> <p>$T_{\mu\nu}$ é o tensor de momento e energia;</p> <p>ρ_{ee} é a densidade de energia escura</p> <p>G é a constante da Gravitação ; c é a velocidade da luz</p>	<p>a densidade ρ e a pressão P devem conter a soma das contribuições da radiação, da matéria escura, da matéria ordinária e da energia escura</p> <p>A equação de Friedmann vale para um universo homogêneo e isotrópico</p>

Figura 5 – A equação de Einstein, como proposta originalmente em 1915, suscitava um universo não estático, que culminaria em um colapso gravitacional; em 1917, Einstein acrescentou a constante cosmológica, com caráter repulsivo, para obter um universo em equilíbrio estático; em 1998, medidas astronômicas revelaram que o universo está acelerando. A constante cosmológica passou então, a ser reescrita do lado direito, junto com o tensor de momento-energia, e interpretada como sendo a densidade de energia escura. A equação de Friedmann foi proposta em 1922 pelo físico russo Friedmann. Ela é fundamental para todos os modelos que procuram descrever a evolução do universo. Observe que a aceleração ou desaceleração do universo depende do sinal do parêntese que contém a densidade e a pressão somadas de todas as 4 componentes do universo.

A solução veio quando Albert Einstein publicou o seu trabalho mais espetacular e criativo – a [Teoria da Relatividade Geral](#). A equação de Einstein (**Figura 5**) tem, no seu primeiro membro só geometria e no segundo membro somente matéria e energia. John Wheeler resumiu esse fato de maneira bem pitoresca: “O espaço-tempo diz à matéria como se movimentar e a matéria diz ao espaço-tempo como se curvar”.

Na equação de Einstein de 1915 estão presentes – o [tensor métrico](#), o [tensor de curvatura de Ricci](#) e a [curvatura escalar](#) (que envolvem derivadas de primeira e de segunda ordem do tensor métrico), o [tensor de momento-energia](#) (contendo matéria e energia), a constante da Gravitação de Newton e a velocidade da luz.

Como a gravitação é uma força exclusivamente atrativa, com o passar do tempo a equação de Einstein levaria ao colapso do universo. Para recuperar um universo estático, Einstein incluiu, em 1917, uma força repulsiva através da *constante cosmológica*. Em 1929, Edwin Hubble mediu o ‘redshift’ cosmológico. Ele observou que a luz proveniente de estrelas ou galáxias distantes tendiam para o vermelho, indicando que elas estavam se afastando umas das outras (em todas as direções). *O universo estava (está) em expansão!* Na verdade, o universo está em *expansão acelerada* (veja no final desse artigo).

A equação de Einstein corresponde a 16 equações diferenciais acopladas e não lineares (ou seja, não vale o [princípio de superposição](#)). Como todos os tensores são simétricos, o número de equações independentes, de fato, se reduz a 10.

Hoje são conhecidas algumas dezenas de [soluções exatas](#) da equação de Einstein, sendo 3 delas muito importantes pois envolvem as métricas de [Schwarzschild](#) (corpo esférico sem rotação), [Kerr](#) (corpo esférico em rotação) e [Friedmann-Lemaître-Robertson-Walker](#) (em cosmologia, para um universo homogêneo e isotrópico).

Ao contrário do que acontece na teoria de gravitação de Newton, na Teoria da Relatividade Geral o problema de 2 corpos *não é exatamente solúvel!*

Desde a sua proposição em 1915 a Teoria da Relatividade Geral tem sido um [sucesso fabuloso](#), fazendo previsões incríveis que modificaram completamente a nossa compreensão do universo. Vejamos alguns exemplos.

**Precessão do periélio de Mercúrio.* O cálculo teórico da precessão feito com a Relatividade Geral coincide com os dados astronômicos.

**Deflexão da luz.* Ao passar nas proximidades de corpos massivos, um raio de luz é defletido, não segue em linha reta. Esse efeito foi observado pela primeira vez no eclipse solar de 1919 na cidade de Sobral, Ceará.

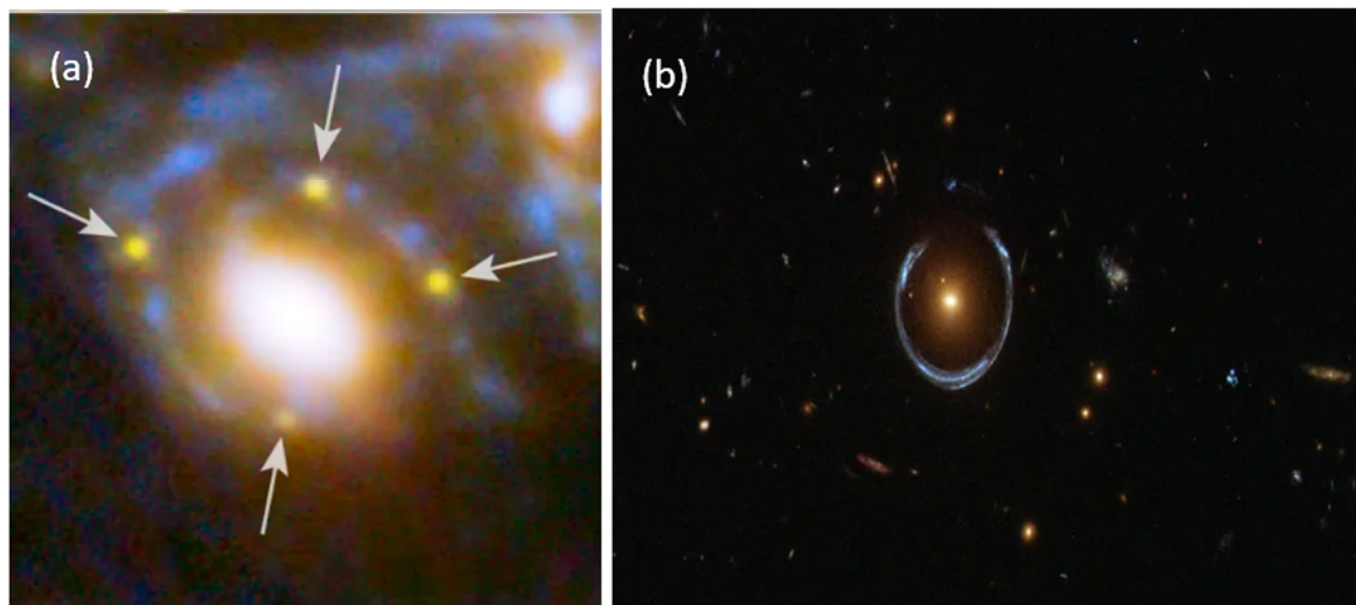


Figura 6 – Lentes gravitacionais podem ampliar imagens de astros muito distantes por fatores que vão de dezenas a centenas de vezes. (a) uma Cruz de Einstein de uma supernova distante 9,3 bilhões de anos-luz da Terra. Ela foi formada e distorcida por uma galáxia situada há 5 bilhões de anos-luz (a luz clara, no centro). (b) um Anel de Einstein (em azul) de uma galáxia situada há 10,8 bilhões de anos-luz, distorcida por uma galáxia (em laranja, no centro) com massa 10 vezes maior do que a da Via-Láctea. Crédito: NASA, ESA

***Lentes Gravitacionais.** A deflexão da luz mencionada acima poderia transformar corpos celestes massivos em *lentes de aumento*, como telescópios naturais? Sim, a partir da década de 1980, o avanço tecnológico permitiu ver imagens magnificadas de objetos celestes muito distantes, como [quasares](#) e [supernovas](#). A luz emitida por esses objetos, ao passar por galáxias muito massivas, é desviada e amplificada formando imagens como a *Cruz de Einstein* ou o *Anel de Einstein*. O Anel de Einstein só aparece quando o alinhamento entre o quasar, a galáxia defletora e a Terra é quase perfeito (**Figura 6**). As lentes gravitacionais já foram observadas nos comprimentos de onda de rádio, infravermelho, visível e até raios-x.

***Dilatação temporal gravitacional.** Um relógio anda *mais devagar* na superfície da Terra do que a bordo de um satélite. Os 24 satélites que compõem o GPS (Global Positioning System) levam em conta esse atraso.

***Redshift gravitacional.** A luz perde energia ao transicionar de um campo gravitacional intenso para outro mais fraco. Isto significa que ela fica mais vermelha. Em astronomia, esse fato é utilizado para estimar as massas de estrelas anãs brancas.

***Buracos negros.** Para o caso de um corpo esférico e sem rotação o físico alemão [Karl Schwarzschild](#) encontrou, em 1916, uma solução exata da equação de Einstein. Nessa solução existe uma *distância radial crítica* (denominada *raio de Schwarzschild* e que é dependente da massa do corpo) a partir da qual a curvatura do espaço-tempo se torna tão grande que não existe mais uma trajetória pela qual uma partícula possa escapar, nem mesmo a luz! Um corpo celeste com essa massa e esse raio é um [buraco negro](#). Como qualquer evento que aconteça no interior do buraco negro não é acessível ao mundo exterior, o raio de Schwarzschild é também chamado de *horizonte de eventos*.

Buracos negros que giram só foi resolvido exatamente em 1963 pelo matemático neozelandês [Roy Kerr](#). Um buraco negro em rotação tem, para além do horizonte de eventos, uma nova superfície que delimita uma região chamada *ergosfera*. Nessa região, uma partícula é acelerada para a velocidade da luz. Suponha que uma partícula penetre tangencialmente na ergosfera, ela não será engolida no horizonte de eventos e, como a ergosfera aumenta sua energia, ela poderá se afastar com mais energia do tinha quando se aproximou do buraco negro. Um buraco negro em rotação pode ser um gerador de energia ([processo de Penrose](#)).

Sobre a formação dos *buracos negros estelares*. Grandes estrelas, com massas 8 vezes (ou mais) a massa do Sol, contrabalançam a pressão gravitacional com a pressão de radiação proveniente da reação de fusão de elementos químicos. Numa primeira fase, núcleos de Hidrogênio se fundem formando Hélio que, por sua vez, se combinam para formar o carbono e assim por diante, até chegar ao Ferro. Aqui o processo cessa, pois a fusão de núcleos de Ferro *absorve* ao invés de *liberar* energia. Neste ponto, o núcleo da estrela extremamente massivo *colapsa* gravitacionalmente, explodindo numa supernova que pode produzir uma estrela de nêutron ou um buraco negro. Se a massa da estrela progenitora estiver entre 8 e 25 massas solares forma-se uma estrela de nêutron e acima desse valor, forma-se um buraco negro.

A explosão da supernova retira muita massa das estrelas progenitoras. Até hoje, a *maior estrela de nêutron* conhecida tem apenas 2,35 massas solares enquanto o *menor buraco negro* encontrado possui 3,8 massas solares.

Em princípio, todos os buracos negros devem decair (evaporar), perdendo massa por [radiação Hawking](#). Quanto menor a massa do buraco negro mais rapidamente ele decai. Até hoje, nunca testemunhamos o decaimento de um buraco negro – o menor deles, com 3,8 massas solares, levaria 10^{67} anos (o 1 seguido de 67 zeros) para decair, um número que é absurdamente maior do que a idade do universo de 13,8 bilhões de anos!

A descrição dada acima, refere-se à criação de buracos negros estelares. As maiores estrelas conhecidas têm, no máximo, até 200 massas solares. Entretanto, medidas de ondas de rádio (iniciadas na década de 1960) indicavam a existência de objetos celestes muito distantes, com comportamento típico de buracos negros só que com milhões e até bilhões de massas solares! Eram os [quasares](#) – galáxias distantes que possuem no seu centro buracos negros supermassivos muito ativos.

Hoje sabemos que, quase todas as galáxias têm em seu núcleo [buracos negros supermassivos](#), incluindo a nossa Via Láctea (**Figura 7**). O maior deles é o TON 618, um quasar monstruoso que está a 10,4 bilhões de anos-luz da Terra e tem massa 66 bilhões de vezes maior do que a do Sol. Isso significa que ele tem um raio de Schwarzschild igual a 130 vezes a distância Terra-Sol. Como esses buracos negros supermassivos se formaram é ainda uma questão não resolvida.

Por último, gostaria de mencionar os [buracos negros primordiais](#). No nascimento do nosso universo, ocorreu um processo chamado inflação (de curtíssima duração no tempo), no qual o espaço se expandiu exponencialmente com velocidade maior que a da luz. Durante este período, regiões mais densas podem ter colapsado e formado pequenos buracos negros primordiais. Um buraco negro com a massa da Terra teria o tamanho de uma moeda. Até hoje nenhum buraco negro primordial foi detectado, mas, há cientistas que acreditam que talvez isso seja possível quando o telescópio [Nancy Grace Roman Space Telescope](#) da NASA estiver operacional em 2027 (estimativa pré-Trump).

**Ondas Gravitacionais.* As [ondas gravitacionais](#) tiveram sua existência prevista por Einstein em 1916. Elas surgem quando há grandes e rápidas variações de massas numa região do espaço. Uma vez que a massa curva o espaço, uma variação da massa também varia o espaço à sua volta criando uma onda gravitacional, que estica e comprime o espaço e se propaga com a velocidade da luz.

Em 2015, usando luz laser em interferômetros com formato de L, o LIGO (Laser Interferometer Gravitational Wave Observatory) detectou a passagem de uma onda gravitacional [pela primeira vez](#). Um feito experimental extraordinário, pois, a variação espacial medida entre os braços do interferômetro foi de um milésimo do diâmetro de um próton! O evento que originou essa onda gravitacional foi uma colisão de dois buracos negros com 36 e 29 massas solares que, após a fusão, se transformou num único buraco negro com 62 massas solares. O equivalente a 3 massas solares se transformou em *energia de radiação gravitacional*.

Desde 2015, dezenas de ondas gravitacionais já foram detectadas envolvendo colisões entre buracos negros, estrelas de nêutrons e buracos negros com estrelas de nêutrons. Quem sabe, quando o [Telescópio Einstein](#) já estiver funcionando, será possível até detectar ondas gravitacionais oriundas de explosões de supernovas.

**Aceleração do Universo.* Na equação de Friedmann (Figura 5), o sinal do parênteses (que contém a densidade e a pressão) é o que controla o destino do nosso universo. Para as 4 espécies que compõem o nosso mundo: radiação, matéria ordinária, matéria escura e energia escura, as *densidades de energia* são *grandezas positivas*. Dessa forma, elas contribuem para desacelerar o universo. As pressões feitas pela matéria ordinária e pela matéria escura também são positivas (e negligíveis, posto que não relativísticas). A pressão de radiação é sempre positiva e vale um terço da densidade de energia. Para que o universo esteja [acelerando](#) é necessário então, que a [pressão da energia escura](#) seja negativa e, além disso, dominante.

O fato de a pressão da densidade de energia escura ser negativa é consequência da invariância de Lorentz do tensor de momento-energia do vácuo ([veja aqui](#)). Além disso, medidas muito precisas da [radiação cósmica de fundo em micro-ondas](#), demonstraram que o universo é composto por cerca de 70% de *energia escura*, 25% de *matéria escura* e 5% de matéria regular (bariônica). Resultado – o Universo está acelerando.

Apesar dos enormes sucessos das teorias quânticas de campos e da relatividade geral, elas possuem um ponto de conflito e incongruência – é o chamado [problema da constante cosmológica](#) (ou a *catástrofe do vácuo*).

Na **Figura 5** temos as equações de Einstein no formato de 1998. A constante cosmológica, originalmente colocada do lado esquerdo (geométrico), está do lado direito (tensor momento-energia) e é interpretada como a *densidade de energia escura*. A energia escura é a responsável pela expansão acelerada do universo!

À luz da teoria quântica de campos, esse termo pode ser interpretado como oriundo das *flutuações quânticas do vácuo*. Essas flutuações correspondem a pares de partículas e antipartículas virtuais que estão sendo criadas e aniquiladas e dão origem à densidade de energia do vácuo. Identificar a densidade de energia do vácuo com a densidade de energia escura parece bastante natural, só que há um problema.

Estudando as [explosões de supernovas tipo Ia](#), a [radiação cósmica de fundo em micro-ondas](#) e as [oscilações acústicas bariônicas](#), obtém-se para a *densidade de energia do vácuo* o *valor experimental* de $6 \cdot 10^{-10} \text{ J/m}^3$. Entretanto, um cálculo analítico via [diagramas de Feynman](#) para a eletrodinâmica quântica resulta num *valor teórico* de 10^{110} J/m^3 , uma diferença exorbitante de 120 ordens de magnitude! Sobre isso foi dito que essa era *'a pior previsão teórica em toda a Física'*.

**Físico, Professor Sênior do IFSC – USP*

e-mail: onody@ifsc.usp.br

(Meus agradecimentos ao Sr. Rui Sintra da Assessoria de Comunicação do IFSC/USP)

Para acessar *todo* o conteúdo do site “Notícias de Ciência e Tecnologia”, [clique aqui](#)

Para acessar *todo* o conteúdo do site “Newsletter – Ciência em Panorama”, [clique aqui](#)

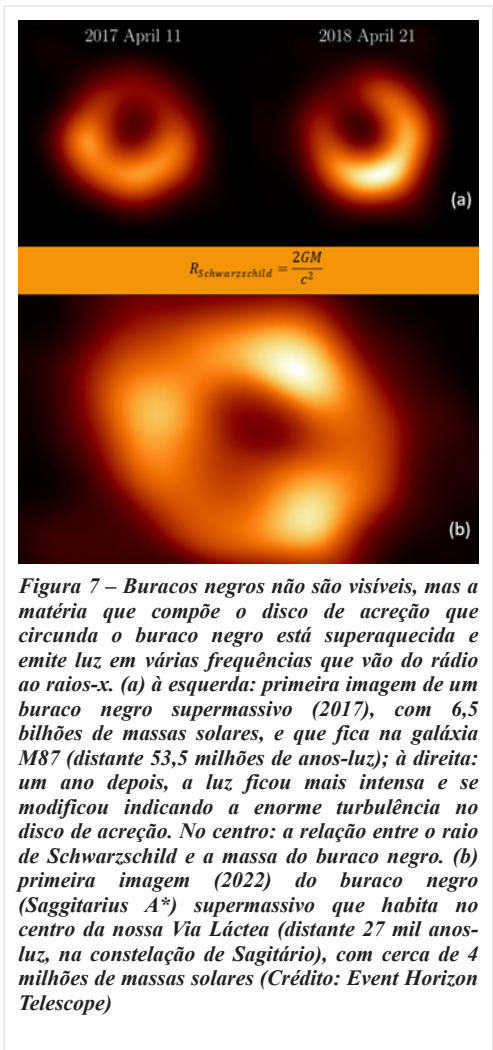


Figura 7 – Buracos negros não são visíveis, mas a matéria que compõe o disco de acreção que circunda o buraco negro está superaquecida e emite luz em várias frequências que vão do rádio ao raios-x. (a) à esquerda: primeira imagem de um buraco negro supermassivo (2017), com 6,5 bilhões de massas solares, e que fica na galáxia M87 (distante 53,5 milhões de anos-luz); à direita: um ano depois, a luz ficou mais intensa e se modificou indicando a enorme turbulência no disco de acreção. No centro: a relação entre o raio de Schwarzschild e a massa do buraco negro. (b) primeira imagem (2022) do buraco negro (Sagittarius A*) supermassivo que habita no centro da nossa Via Láctea (distante 27 mil anos-luz, na constelação de Sagitário), com cerca de 4 milhões de massas solares (Crédito: Event Horizon Telescope)