



TEORIAS DA RELATIVIDADE

Para o futuro? A velocidade da luz é o limite da natureza? Veremos que as Teorias da Relatividade nos dão pistas para nossas perguntas.



As Teorias da Relatividade foram propostas por Albert Einstein no início do século 20, bem na época em que a Física estava enfrentando reformulações em algumas teorias. Uma teoria que surgiu nesse período foi a Física Quântica, como já estudamos. Einstein também teve contribuições para a quântica, mas sua fama é atribuída às Teorias da Relatividade.

Muito provavelmente você já ouviu falar em Albert Einstein, aliás ele é considerado um dos físicos mais famosos do mundo, um verdadeiro *pop star* da Física. Chegou a ser indicado como a pessoa do século pela revista *Time*. Você também já deve ter ouvido uma pessoa chamando a outra de “Einstein” quando quer dizer que ela é um gênio. Muitos consideram Einstein como um gênio, principalmente por ter a capacidade de imaginar situações não cotidianas em relação ao espaço e o tempo. Mas do que tratam as Teorias da Relatividade?

A Teoria da Relatividade é dividida em duas partes: Relatividade Especial (ou Relatividade Restrita), publicada em 1905 e a Relatividade Geral, publicada em 1915. A primeira coisa que deve se ter em mente quando fala-se de Relatividade são os seus conceitos mais fundamentais, de que quando um objeto viaja na velocidade da luz ocorrem três fenômenos principais: sua massa aumenta, seu comprimento diminui e seu tempo torna-se lento. O valor da velocidade da luz é sempre o mesmo, qualquer que seja a posição do observador. A velocidade da luz é representada pelo símbolo c , que significa celeridade. Celeridade é a rapidez da luz, cujo valor é de 300.000 km/s.

Muitos filmes e séries de ficção científica usam e abusam das Teorias da Relatividade. A Relatividade proporciona fenômenos fascinantes e intrigantes ao mesmo tempo. Possibilita às naves espaciais viajarem na velocidade da luz, pois no contexto da ficção científica, é importante que se atinja tal velocidade (ou superior), pois senão o filme seria



entediante se a velocidade das naves espaciais fosse baixa, afinal, elas demorariam muito tempo até chegar ao destino!

Outro fenômeno interessante é a viagem no tempo. Filmes como “De Volta para o Futuro” e a franquia “Jornada nas Estrelas” de Gene Roddenberry são recheados de enredos envolvendo viagem no tempo, tanto para o futuro, quando para o passado.



Jornada nas Estrelas IV – A Volta para a Casa: A tripulação da Enterprise viaja para o passado, do século 23 para o século 20 (na década de 1980) para uma missão. Na foto, Spock e Kirk embarcam em um ônibus

RELATIVIDADE ESPECIAL

Lembre-se do início da mecânica quando estudamos sobre referenciais, ou sistemas de referência. A ideia está relacionada ao movimento relativo. Um exemplo simples é quando você está viajando em um ônibus cuja velocidade é 60 km/h. Quando você está sentado no banco do ônibus, sua velocidade é zero em relação ao ônibus, mas sua velocidade em relação ao solo é de 60 km/h.

Isto significa que sua velocidade é relativa a um determinado referencial: depende de qual referencial você está medindo.

Um referencial é um local a partir do qual o movimento é observado e medido.

De acordo com Einstein, todo movimento é relativo, não em relação a qualquer lugar estacionário do universo, mas em relação a qualquer sistema de referência arbitrário. Uma nave espacial não pode medir a velocidade de seu movimento em relação ao espaço vazio, mas apenas em relação a outros objetos.

Se você está num carro, num ônibus ou numa nave espacial sem janelas, não há como descobrir se você está em movimento ou em repouso.

O primeiro postulando da Relatividade Espacial é o seguinte:

Todas as leis da natureza são as mesmas em todos os sistemas de referência que se movam com velocidade uniforme.

Num avião a jato voando a 700 quilômetros por hora, por exemplo, o café derrama na xícara da mesma maneira como o faz quando o avião está parado. Não existe um experimento físico que possa ser realizado, mesmo com a luz, para determinar nosso estado de movimento uniforme. As leis da física dentro de um carro que se move



uniformemente são as mesmas que em um laboratório estacionário.

Uma das perguntas que Einstein, quando jovem, se indagava era: “como pareceria um feixe luminoso se você estivesse se deslocando lado a lado com ele?”. De acordo com a física clássica, o feixe estaria em repouso em relação a esse observador.

Einstein chegou à conclusão de que, não importando quão rápido os observadores possam se mover uns em relação aos outros, cada um deles mediria a rapidez da luz que passa por eles como sendo igual a 300.000 quilômetros por segundo.

E o segundo postulado da Teoria da Relatividade Especial foi:

A velocidade de propagação da luz no espaço tem o mesmo valor para todos os observadores, não importando o movimento da fonte ou do observador; ou seja, a velocidade de propagação da luz é uma constante.

DILATAÇÃO TEMPORAL

Quer viajar no tempo? Olhe para as estrelas. As estrelas como enxergamos hoje, na verdade, se encontram no mesmo estado de anos atrás. Isto ocorre porque a distância entre nós e as estrelas são de milhares de anos-luz, o que faz com que a luz que enxergamos de uma estrela hoje é de milhares de anos atrás. Por exemplo, a estrela mais próxima do Sol, a Alfa Centauri, está a uma distância de aproximadamente 4,5 anos-luz. Se a estrela esgotar seu combustível e parar de brilhar hoje, nós só saberemos daqui a 4,5 anos.

Além das três dimensões que você conhece, a largura, altura e comprimento, existe uma quarta dimensão: o **tempo**. Para fornecer uma descrição completa de um objeto, é importante admitir as três dimensões espaciais e mais a temporal. As três dimensões de um objeto só são características em um determinado período de tempo, pois em outro dado momento o objeto pode tomar outra forma, se deformar, ser destruído, etc. Por esta razão, as coisas existem no espaço-tempo.

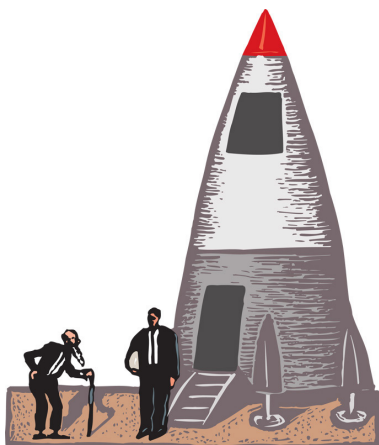
Dois observadores lado a lado, em repouso um em relação ao outro, compartilham de um mesmo sistema de referência. Ambos concordariam em suas medições do espaço e dos intervalos de tempo entre eventos dados, portanto, dizemos que eles compartilham a mesma região do espaço-tempo. Entretanto, se existir movimento relativo entre eles, os observadores não concordarão em suas medições do espaço e do tempo.

O tempo pode ser dilatado, ou seja, podetranscorrer mais lentamente em determinado referencial do que noutro. Podemos exemplificar a dilatação do tempo com um paradoxo famoso, o **paradoxo dos gêmeos**:

No ano em que irmãos gêmeos completam 30 anos, um deles resolve fazer uma viagem espacial, enquanto o outro irmão fica na Terra. A nave viaja a uma velocidade de 0,8c (0,8 vezes a velocidade da luz).



Após alguns meses de viagem, o viajante retorna à Terra e encontra o seu irmão. Porém, uma surpresa: seu irmão está com 80 anos, enquanto ele, que veio do espaço, está apenas com 60 anos. Isso ocorreu porque o tempo na nave espacial passou de forma diferente do que na Terra.



Embora o viajante envelheça menos do que os que ficam na Terra, isso não significa que seu ciclo vital tenha sofrido alteração, seus batimentos cardíacos continuam os mesmos quando medidos por alguém a bordo da nave, seu cabelo cresce da mesma maneira como na Terra, etc. Para o viajante espacial, o tempo passa normal. Para o irmão que ficou na Terra, o tempo também passa normalmente. O que acontece é que o viajante experimentou velocidades muito altas (bem próximas à da velocidade da luz), e o espaço a sua volta tem características diferentes que o espaço na Terra, a velocidades baixas. Desta forma, o tempo também possui características diferentes quando alguém viaja a uma velocidade muito alta: o tempo passa de forma diferente que na Terra. Isto acontece porque o tempo não é universal, ou seja, ele não é igual em todos os lugares do universo. O tempo é relativo.

A diferença temporal pode ser calculada pela expressão:

$$\Delta t = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \cdot \Delta t'$$



Onde,

- ▶ Δt é o intervalo de tempo no referencial da Terra
- ▶ $\Delta t'$ é o intervalo de tempo para a nave espacial
- ▶ v é a velocidade da nave em relação a velocidade da luz
- ▶ c é a velocidade da luz

O termo $1/\sqrt{1-v^2/c^2}$ é conhecido como fator de Lorentz, e pode ser representado pela letra grega γ . Dessa forma a expressão para a dilatação temporal pode ser representada como:

$$\Delta t = \gamma \Delta t'$$

Perceba que quanto maior for o valor da velocidade da nave espacial, quanto mais se aproximar da velocidade da luz, menor será o fator de Lorentz, e como consequência, a diferença entre os tempos é maior.

Não há nada de diferente com o próprio relógio em movimento; ele simplesmente marca o ritmo de um tempo diferente. Quanto mais rápido um relógio se movimenta, mais devagar ele parece funcionar quando visto por um observador que não se move junto com ele. Se fosse possível fazer um relógio passar voando por nós na velocidade da luz, ele pareceria não estar funcionando. Mediríamos o intervalo entre seus tiques como sendo infinito. O relógio pareceria imutável! Mas uma coisa se move de fato com a velocidade da luz – a própria luz. Portanto, os fótons jamais envelhecem. O tempo não passa para um fóton. Eles não têm idade.



O GPS (Global Position System) funciona de acordo com a Teoria da Relatividade, no qual fazem parte relógios atômicos orbitando a Terra. Como esses relógios estão a uma velocidade relativamente alta, eles sofrem com a dilatação temporal. Por esta razão ajustes são essenciais para corrigir os efeitos da dilatação temporal, a fim de poder usar os sinais provenientes dos relógios para fornecer localizações sobre a Terra com grande precisão.

Viagens espaciais

Se astronautas viajando a 99% de c pudessem ir até a estrela Procyon (a 10,4 anos-luz de distância), retornariam em 21 anos terrestres. Por causa da dilatação temporal, entretanto, somente três anos teriam transcorrido para os astronautas. Isso é o que revelariam todos os relógios usados por eles – e biologicamente, eles estariam de fato três anos mais velhos. Seriam os funcionários que os recebem no retorno que estariam 21 anos mais velhos!

A tecnologia atual não permite tais jornadas. O fornecimento de energia propulsora



suficiente e a blindagem contra a radiação são dois problemas proibitivos. Espaçonaves que viajassem a velocidades relativísticas requereriam bilhões de vezes mais energia do que a usada para pôr em órbita um ônibus espacial atual. E os viajantes espaciais encontrariam partículas interestelares como se estivessem exatamente com um grande acelerador de partículas apontado para eles. Atualmente, não existe uma maneira de construir uma blindagem contra esse intenso bombardeio de partículas por períodos prolongados de tempo. Mas no futuro as viagens espaciais podem ser possíveis!

É mais fácil viajar para o futuro do que para o passado. Para ir para o futuro, basta viajar a uma velocidade próxima à velocidade da luz. Agora, para ir para o passado é mais complicado: teríamos que viajar a uma velocidade maior que a da luz. Partículas hipotéticas que podem se mover mais rápido do que a luz e retroceder no tempo são chamadas de táquions. Porém, para o ser humano, o tempo passa a uma taxa constante de 24 horas por dia.

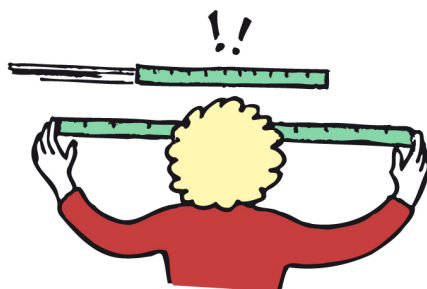
CONTRAÇÃO DO COMPRIMENTO

Quando os objetos se movem pelo espaço-tempo, tanto o espaço como o tempo sofrem alterações. O espaço sofre contração, fazendo com que os objetos pareçam mais curtos quando estão se movendo em relação a nós com velocidades relativísticas.

A contração do comprimento pode ser calculada por:

$$L = L_0 \sqrt{1 - v^2/c^2}$$

onde v é o valor da velocidade relativa entre o objeto observado e o observador, c é a rapidez de propagação da luz, L é o comprimento medido para o objeto em movimento e L_0 é o comprimento medido do objeto em repouso.



A régua é medida com a metade do comprimento normal quando está se deslocando a 87% da velocidade da luz em relação ao observador.

A contração ocorre apenas na direção do movimento. Se um objeto está se movimentando horizontalmente, não ocorre qualquer contração na direção vertical.

A massa depende da velocidade, o quão próxima da luz ela é. Sendo m_0 a massa de repouso do objeto, v a sua velocidade e c a velocidade da luz no vácuo, a massa m do objeto é:



$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Esta equação traduz que quando um corpo está se movendo próximo à velocidade da luz, sua massa aumenta consideravelmente.

MASSA E ENERGIA

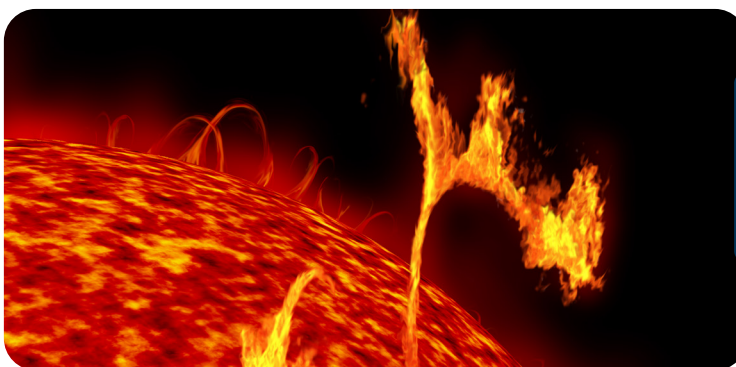
Um pedaço de matéria, até mesmo em repouso e não interagindo com qualquer coisa, possui uma “energia de existência”. Ela é chamada de energia de repouso. Devido a esta equivalência, a energia de um corpo em movimento adiciona-se à sua massa, ou seja, será cada vez mais difícil aumentar a sua velocidade. De fato, um corpo nunca pode atingir a velocidade da luz, porque seria necessária uma quantidade infinita de energia para incrementar indefinidamente a massa.

A relação entre massa e energia é:

$$E = mc^2$$

A energia (E) e massa (m) são equivalentes e podem ser transformadas uma na outra com um fator de conversão de c^2 , onde c é a velocidade da luz. A velocidade da luz é 3×10^8 m/s, assim c^2 é 9×10^{16} (m/s)², o que significa que uma minúscula quantidade de massa pode ser convertida em uma imensa quantidade de energia. O valor de c^2 é 90 quatrilhões (9×10^{16}) J/kg. Um quilograma de matéria possui uma energia de existência de 90 quatrilhões de joules. Mesmo um grão de matéria com massa de apenas 1 miligrama possui uma energia de repouso de 90 bilhões de joules.

A equação $E = mc^2$ explica os processos de fusão e fissão nucleares, nos quais liberam uma grande quantidade de energia.



No Sol, 4,5 milhões de toneladas de massa são convertidas em energia radiante a cada segundo. No entanto, o Sol possui tanta massa que em 1 milhão de anos somente um décimo de milionésimo de sua massa terá sido convertida em energia radiante.

RELATIVIDADE GERAL

Einstein propôs a Relatividade Geral como uma forma de explicar porque astros orbitam outros astros. Ou seja, ele forneceu uma nova explicação sobre o formato do espaço-tempo.



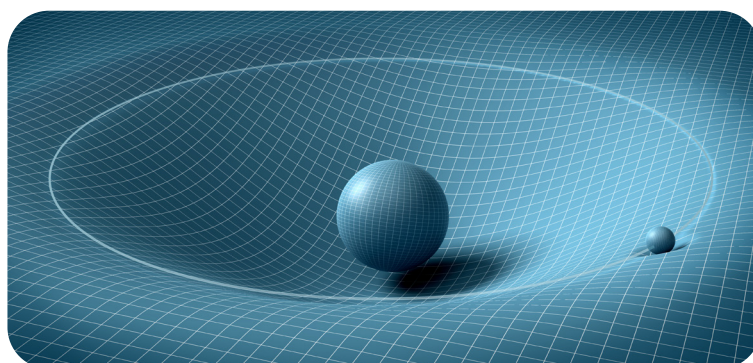
Muito antes que existissem naves espaciais, Einstein podia se imaginar dentro de um veículo muito distante de qualquer influência gravitacional. Numa espaçonave dessas, que estivesse em repouso ou se movendo uniformemente em relação às estrelas distantes, ele e qualquer coisa dentro da nave flutuariam de forma livre; não existiria “para cima” nem “para baixo”. Mas quando os motores do foguete fossem ligados e a espaçonave acelerasse, tudo se passaria de maneira diferente; um fenômeno semelhante à gravidade seria observado. A parede adjacente ao motor do foguete empurraria os ocupantes e se transformaria no piso da nave, enquanto a parede oposta se tornaria o teto. Os ocupantes da nave seriam capazes de ficar em pé sobre o piso e até saltar para cima e para baixo. Se a aceleração da nave tivesse valor igual a g , os ocupantes poderiam muito bem ser convencidos de que a nave não estava acelerando, mas em repouso sobre a superfície da Terra.



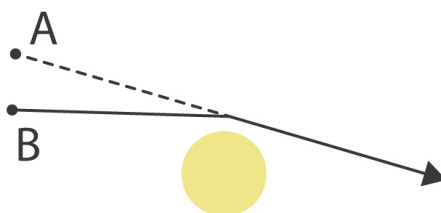
Einstein também propôs que a gravidade é capaz de curvar a trajetória da luz. Para provar isto, foi necessário estudar um eclipse solar ocorrido em 1919.

O eclipse permitiria observar que a luz do Sol seria ofuscada, possibilitando enxergar a luz das estrelas que estariam ao “redor” do Sol. Pretendia-se explicar que a luz de tais estrelas desviava ao atravessar o campo gravitacional do Sol, comprovando assim que a teoria estava correta. Mas como a gravidade pode curvar a luz? Segundo a física newtoniana, a gravitação é uma interação entre massas, mas e quanto à luz que é energia pura e sem massa? A resposta de Einstein foi que a luz pode não ter massa, mas pode ter energia. A gravidade puxa a energia da luz, porque energia e massa são equivalentes. A luz se curva porque se propaga num espaço-tempo com geometria curva. A presença de massa resulta numa curvatura ou dobra do espaço-tempo. A massa da Terra é pequena demais para curvar

consideravelmente o espaço-tempo ao seu redor, que é praticamente plano, e assim, o encurvamento da luz em nosso ambiente não é notado.

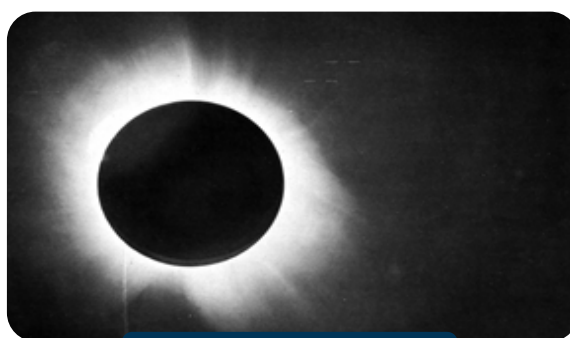


A curvatura do espaço-tempo. Devido à curvatura causada por uma massa como o Sol, os planetas de massas menores orbitam em torno do Sol.



A luz de uma estrela se curva quando ela passa tangencialmente pelo Sol. O ponto A mostra a posição aparente da estrela; o ponto B mostra sua posição verdadeira.

As fotografias tiradas do eclipse ocorreram na cidade de Sobral (Ceará), no Brasil, e no litoral africano, onde o eclipse estaria visível. Astrônomos ingleses foram até a cidade brasileira e na África numa expedição para comprovar a teoria de Einstein.



Eclipse de 29 de maio de 1919.

ONDAS GRAVITACIONAIS

Quando um objeto se move, a curvatura do espaço-tempo ao redor move-se a fim de ajustar-se à nova posição do objeto. Esses reajustes produzem ondulações na geometria resultante do espaço-tempo.



Ondas gravitacionais.

Ondulações se afastam de uma fonte gravitacional à velocidade da luz e constituem **ondas gravitacionais**. Qualquer objeto acelerado produz uma onda gravitacional. Em geral, quanto maior a massa do objeto em movimento e quanto maior sua aceleração, mais forte é a onda gravitacional produzida.

Espera-se que detectores recentemente construídos consigam detectar ondas gravitacionais provenientes de supernovas e de colisões entre buracos negros. As ondas gravitacionais estão por todo lugar. Sacuda sua mão para frente e para trás: você acabou de produzir uma onda gravitacional. Ela não é muito forte, mas existe.