

O TEMPO E A FÍSICA

Solon Pereira da Cruz Filho*

SÍNTESE – A principal proposta desse trabalho é mostrar a relatividade do tempo. Inicialmente, o ponto de vista clássico é explorado: a) a entropia do universo crescendo como uma medida de tempo; b) o tempo como algo independente do observador. Depois de um experimento muito especial, a velocidade da luz – idéia introduzida por Einstein – como uma simples matemática, a relatividade do tempo é mostrada. Finalmente, o conceito de "contínuo" tempo-espaço é apresentado.

ABSTRACT – The main purpose of this work is to show the time relativity. Initially, the classical point of view is explored: a) the universe entropy growing as a measure of time; b) time as something independent of the observer. Then, from a very special experiment the light speed – Einstein's idea – is introduced and with a simple mathematics the time relativity is shown. Finally, the concept of "continuum" space-time is presented.

As teorias modernas da física nos dizem que, no início, toda matéria estava concentrada em um ovo inicial. Ocorreu então a grande explosão (*big-bang*) e, a partir daí, o universo encontra-se em expansão. E vai continuar ainda por alguns bilhões de anos. A idade estimada do universo é de 20 bilhões de anos.

Hoje, a física não sabe se esta expansão vai parar, por efeitos gravitacionais, e a matéria vai voltar a se concentrar de novo (esta é a teoria do *big-crunch* ou grande colapso final) ou, se houve energia suficiente no início e o universo vai continuar indefinidamente em expansão. Desta forma, nosso sistema físico está em evolução desde a origem, desde o *big-bang*. Nosso sistema vem se desdobrando com o tempo.

Qual é nossa noção intuitiva de tempo? Como se consegue avaliar a idéia de tempo? Uma das respostas que a física nos dá é em função de processos que são termodinamicamente irreversíveis. Estou querendo dizer que a evolução de nosso universo já tem um desdobramento até certo ponto previsível. Há coisas que ao acaso acontecem, mas de modo geral tudo obedece às leis da física, em particular, obedece à segunda lei da termodinâmica. Esta lei nos diz que em nenhum processo é possível um rendimento de 100%, ou de outra maneira, a entropia do universo sempre aumenta. Que é entropia? Vamos pensar em termos de energia útil e energia não útil. Por exemplo, eu pego este copo de cima da mesa e levanto até uma certa altura. Eu transfiro para esse copo uma certa energia. Se eu soltar o copo, ele cai no chão, se partindo, fazendo barulho, se aquecendo levemente e vai acabar parando. Onde foi parar a energia que eu cedi ao copo? Ela se transformou em ou-

* Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, PUCRS.

tras formas de energia que são energias não úteis. Não se consegue mais recuperar aquela energia dada ao copo e reutilizar de uma forma útil. O som produzido envolveu energia, a deformação do plástico da mesa e do copo envolveu energia, mas esta energia já é uma energia não útil, não se consegue mais utilizá-la para realizar um trabalho. Isto acontece com todos os sistemas do universo. Uma constante transformação de energia útil em energia desperdiçada. Neste sentido é que se deve entender o aumento de entropia do universo. O universo como um todo tem sua entropia aumentando, e aumentando sempre. Isto é a segunda lei da termodinâmica. Então, vemos que o ovo inicial continha lá dentro muita energia. A partir de sua explosão ele começou a perder sua energia útil. E qual vai ser o fim? No fim, tudo vai voltar a se concentrar, com uma energia menor do que a inicial (*big-crunch*) ou então, tudo vai gelar, esfriar, não havendo mais energia útil em expansão.

Assim, o universo vai terminar ou se expandindo ou se contraindo.

A gente costuma mostrar em aulas de física básica o aumento da entropia a partir de um gás confinado em um cantinho da sala: quando liberado o gás passa a ocupar todo o volume da sala, significando aumento da desordem ou da entropia. Nesse exemplo clássico desconsidera-se qualquer interação entre as partículas do gás, a não ser no instante do choque.

Nesse caso, aumento de entropia implica, tão somente, em ocupação do máximo volume disponível.

Agora, quando levamos em consideração que as partículas possam interagir gravitacionalmente, então, aumento de entropia pode significar que, no final, as partículas novamente estarão condensadas em um pequeno volume.

Num primeiro momento parece que isto não é aumento de entropia, porque tudo estaria se organizando. Como no nosso universo que explode, a desordem aumenta, ele perde energia útil e, uma das possibilidades é de, no final, ele ficar condensado num único ponto. Isso acontece porque existe atração gravitacional, e só por isso. Pode-se mostrar que, neste caso, também temos aumento de entropia.

Voltando ao conceito clássico de tempo, podemos dizer que: o tempo é o fluir constante de energia útil para energia não útil. Isso seria um relógio universal!

Poderíamos imaginar um relógio universal como uma ampulheta onde, em cima, teríamos energia útil fluindo constantemente no sentido de energia não útil.

O fluxo constante e sempre no mesmo sentido é que poderia dar uma idéia de passagem do tempo. Os nossos sentidos estão em contato com sistemas que estão perdendo energia a cada momento e isto é que nos dá a intuição de que o tempo flui de uma maneira constante, uniforme, absoluta. Esta é a idéia de Aristóteles, de Platão, de Newton. A grande ruptura dos conceitos virá com Einstein, que é o conceito que vamos abordar mais a fundo, daqui a pouco, mas a idéia de espaço absoluto e tempo absoluto já nos vem de muito tempo. Absoluto em que sentido? Por exemplo, eu digo que o espaço existe mesmo que não exista matéria. Eu poderia dizer que todo universo está concentrado em certa região do espaço, mas que existe espaço fora dele. Esse é o sentido do termo absoluto. Já o espaço não é absoluto, quando nos referimos a diferentes observadores. Por exemplo: pego este giz e solto-o no chão. Sabemos exatamente onde ele vai cair e posso soltá-lo diversas vezes e ele estará caindo no mesmo ponto do espaço. Vocês concordam?... Não de-

viam. Não deviam, porque ele pode estar caindo no mesmo ponto do nosso referencial, mas não, no de qualquer observador. É sabido que a terra executa pelo menos quatorze movimentos diferentes. Vou citar alguns: sua rotação, sua translação ao redor do Sol, o próprio Sol está se movendo dentro da galáxia, nossa galáxia está em rotação, e também em movimento de expansão. Existem diversos movimentos. Imaginem um observador no Sol, nos olhando. Ele vê o giz cair quase no meu pé na primeira vez, mas na segunda, já teremos descrito uma trajetória curva e o ponto onde o giz cai já não é mais o mesmo. Nós já teremos nos deslocado no espaço. Para ele, o giz caiu aqui e depois lá. Logo, o espaço é relativo, o espaço depende do observador. Para alguém que esteja no centro da galáxia além desses movimentos, ainda tem mais um, o movimento do Sol. Ele descreverá o movimento do giz de uma forma totalmente diferente da nossa ou de qualquer outro observador em posições diferentes. Essa é a idéia de que o espaço é relativo.

Por outro lado, todos esses observadores concordam, dentro das teorias clássicas, que o tempo para esse evento é o mesmo. Se leva-se um segundo para um deslocamento específico em nosso sistema, também será um segundo para o mesmo deslocamento visto por qualquer outro observador. Os deslocamentos são diferentes mas o tempo é o mesmo. Nesse aspecto o tempo parece ser privilegiado em relação ao espaço. O tempo parece ser mais absoluto do que o espaço. Ele flui de modo contínuo para todos os observadores do universo. Em princípio, existirá um agora universal, existem pontos no futuro, absolutos, pontos no passado, absolutos.

Foi aí que entrou Einstein e mostrou, como vou tentar mostrar agora, que o tempo não é absoluto, que o tempo depende do observador. Esse é um aspecto que fere nosso bom senso. Todos nós temos alguma coisa que nos diz, lá dentro, que se para alguém passar 10 minutos, também passaram 10 minutos para todos. A passagem do tempo, para nós, é uma coisa independente do meio, independente de quem está observando, independente da existência do observador. Pelo fato de esta idéia do tempo estar tão enraizada, tão introjetada na nossa cabeça, é difícil utilizar exemplos clássicos, da física do cotidiano, para tentar contrariar esta idéia. Não se consegue contrariar uma idéia usando os exemplos que deram origem a ela mesma. Nossas experiências do dia-a-dia nos levaram a introjetar a idéia de tempo absoluto. Vou precisar tirar vocês da realidade do dia-a-dia para que a gente possa entender um conceito fundamental na teoria da relatividade (a velocidade da luz é constante), que é o ponto chave, a partir do qual todas as deduções foram feitas. Se a gente conseguir fazer isso, se conseguirmos aceitar que a velocidade da luz é absoluta, teremos dado um grande passo no sentido de entender a relatividade do tempo.

Vamos então, sair da realidade! Imaginemos que este seja nosso ovo, nosso universo decorrente de um *big-bang* que tenha ocorrido muitos bilhões de anos atrás. Vamos supor que hoje o tamanho do universo seja este (Fig. 1). Esse raio é a distância que a luz percorreu desde o instante da explosão inicial. O que se move com maior velocidade no universo é a luz, então, a gente deve imaginar a primeira explosão, gerando um raio de luz que está em expansão, até hoje. Isto aqui, então, seria o tamanho do nosso universo, do universo conhecido. Existem teorias de que nossa explosão não é única, de que, provavelmente, em outros lugares do espaço,

também ocorram, ou tenham ocorrido, explosões como a nossa, ou seja, que o *big-bang* não é um só *big-bang*, mas podem ter ocorrido diversos *big-bangs*.

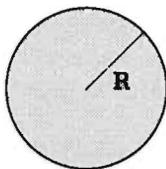


Figura 1. *Tamanho atual do universo*

Vamos supor, como Newton, como Platão, que o espaço exista. Vamos nos imaginar dentro de uma nave, longe daquele universo, e longe de todo e qualquer universo que possa estar acontecendo, e que a gente ainda não viu, porque a luz deles ainda não chegou em nós. Vamos tentar fazer isso? vamos tentar nos imaginar longe de qualquer coisa?

A gente olha para fora e vai enxergar o quê? Imaginem que esta sala seja uma nave com 42 passageiros olhando para fora. O que enxergamos olhando para fora? Absolutamente nada!

Não tem o que observar! Lá fora não tem luz. A luz ainda não chegou. Nós estamos muito mais longe (notem que estamos fazendo uma experiência absurda, mas é a única maneira, é puxando vocês para fora da realidade que talvez eu consiga vender minha idéia). Estamos numa nave olhando para fora e não vemos nada. Nada, absolutamente nada! Vamos supor que exista outro conjunto de passageiros em uma nave parecida com a nossa, que esteja passando pela nossa nave. Estou, de propósito, fazendo um movimento com as duas mãos, porque este "passando pela nave" não significa que nós estejamos em movimento ou que eles estejam em movimento. (Vamos pensar só na nossa nave, por enquanto. Eu posso afirmar que nossa nave esteja em movimento? Ou parada? Não temos, absolutamente, referencial nenhum! Não podemos afirmar que estejamos parados no meio do espaço newtoniano ou andando a milhões de quilômetros por hora. Não temos como afirmar nada!)

Vamos supor a segunda nave passando por nós. Esse "passando" só quer dizer que existe movimento relativo entre as duas. Quem está em movimento, quem não está, é relativo. Nós, em nossa nave, diremos que eles estão passando. Eles dirão que nós é que estamos nos movendo.

Agora, vamos imaginar que as duas naves tenham uma anteninha, ou, se quiserem (esta idéia me ocorreu vendo a dança dos facões na churrasceria Zequinha), que nós, aqui na nossa nave, temos um facão apontando para fora e eles também. E, de repente, um bate no outro. O que nós vamos observar? Uma faísca, um pulso que viaja com a velocidade da luz "c". A mesma velocidade que viajaria se a faísca tivesse sido produzida por um isqueiro em nossa nave e um dedo parado na outra, ou por um isqueiro e um dedo em movimento em nossa nave, ou ainda, por um isqueiro e um dedo na outra nave! Qual é a diferença?

Agora, pensemos: nós somos os da outra nave! Percebem a simetria da situação? O pessoal da outra nave vai enxergar exatamente a mesma coisa. Eles vão

também olhar para o lado e ver uma faísca em seu sistema. Eles vão ver uma nave passando, assim como nós vimos uma nave, passando por nós. As situações são exatamente simétricas, nenhuma é privilegiada em relação à outra. Não é possível dizer que A esteja parada e B se movendo, e nem o contrário. O outro também vai ver uma luzinha e esta luzinha também vai andar com uma velocidade "c". Se para nós era "c" porque para eles não vai ser? A situação é idêntica! Se vocês entenderem esta idéia, a Teoria da Relatividade está na nossa mão!

A Teoria da Relatividade diz o seguinte: a velocidade da luz é a mesma, para qualquer observador independente do movimento entre o observador e a fonte que gerou a luz. A velocidade da luz é a mesma para qualquer observador. Vejam que isso não é tão simples! Eu só consegui vender esta idéia, com um exemplo maluco como esse.

Se eu usar um exemplo simples (do nosso dia-a-dia), vocês não vão conseguir entender! Imaginem um trem andando com velocidade "v" e a gente na estação, esperando o trem (Fig. 2). O trem vem vindo aqui e imaginem alguém com uma lanterna, em cima do trem. Ele liga a lanterna em nossa direção. A luz da lanterna para quem está em cima do trem vai andar com velocidade "c", mas para nós, intuitivamente, vamos dizer que está andando com velocidade "c" mais a velocidade de aproximação do trem. Isso é o que seria lógico. É isso que confunde nossas idéias e não permite que a gente conclua que a velocidade da luz é a mesma para qualquer observador. Eu não devo usar exemplos do dia-a-dia (Einstein fez muito isso, estações, trens etc), porque sempre estaremos tentados a usar a relatividade newtoniana (ela já está introjetada). Imagine que isto não seja luz, mas uma maçã qualquer e eu em cima do trem jogo a maçã pra frente. Qual a velocidade da maçã em relação a este observador na plataforma? Seria a soma das duas, do trem mais a da maçã em relação ao trem. Esta é a idéia clássica. Se for luz, porque não deveríamos somar? Também deveríamos somar e, nesse caso, a luz andaria em relação à plataforma com velocidade maior do que "c".

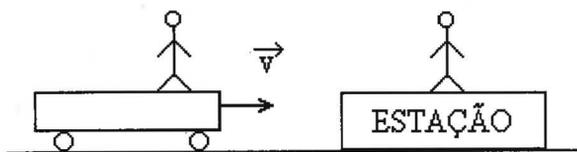


Figura 2. Exemplo de movimento relativo

Vamos retomar nossa linha de raciocínio, fora do nosso espaço. Vamos imaginar que aqui na nossa nave, na nossa sala eu vou ligar uma faísca qualquer no chão. A luz vai até o teto, reflete em um espelho e volta até o chão (Fig. 3). A distância que a luz vai percorrer é duas vezes a altura que vou chamar "2D"

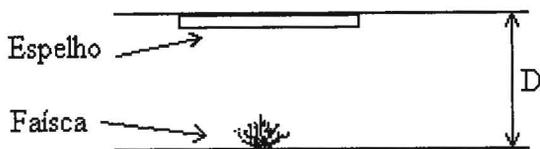


Figura 3. *Experiência feita em nossa nave*

Se ela está andando com velocidade "c" qual o tempo que ela levou para subir e descer? Para isso temos uma fórmula bem simples que é $v = \text{distância}/\text{tempo}$. Logo, o intervalo de tempo será:

$$\Delta t = \frac{2D}{c}$$

Agora vamos imaginar a nave que está passando ali fora com uma velocidade relativa (em relação a nós) "v". Como eles enxergam a nossa experiência?

Do ponto de vista deles, nós estamos nos movendo, então a luz vai fazer uma trajetória não vertical mas assim:

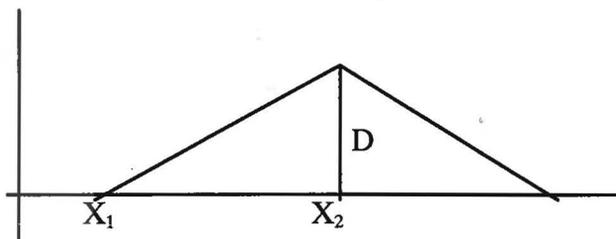


Figura 4. *Experiência anterior vista da outra nave*

Vejam, esta distância "D" é a mesma que medimos no nosso sistema, esta outra $(x_2 - x_1)$ quem é?

Se a velocidade entre um sistema e outro for "v", esta distância será: velocidade x intervalo de tempo ($\Delta t'/2$ (a metade do tempo total para o evento) onde vou usar uma "linha" para caracterizar esse segundo sistema. A distância $(x_2 - x_1)$ é a distância que nós percorremos no sistema deles enquanto a luz sobe do chão ao teto com velocidade "v", logo

$$(x_2 - x_1) = v \Delta t' / 2$$

lembrando que o quadrado da hipotenusa é a soma dos quadrados dos catetos. A hipotenusa é a distância que a luz percorreu no sistema deles, e os catetos são D e $(x_2 - x_1)$ (Fig. 5).

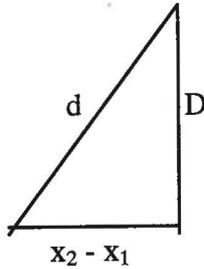


Figura 5

A luz, com velocidade "c" (este é o fator importante) percorreu a hipotenusa em um tempo $\Delta t'/2$, logo, ela vale $d = c\Delta t'/2$. Aplicando o teorema de Pitágoras a este triângulo retângulo, teremos

$$d^2 = D^2 + (x_2 - x_1)^2$$

ou, substituindo: $d = c \Delta t'/2$ $D = c \Delta t/2$ $x_2 - x_1 = v \Delta t/2$

teremos: $(c \Delta t'/2)^2 = (c \Delta t/2)^2 + (v \Delta t/2)^2$

De onde: $c^2 \Delta t'^2 = c^2 \Delta t^2 + v^2 \Delta t^2$

ou $(c^2 - v^2) \Delta t'^2 = c^2 \Delta t^2$

e finalmente: $\Delta t' = \frac{\Delta t}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$ (o tempo medido pelo 2º observador)

Esse fator, $\frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$ é comum em qualquer publicação da vulgarização de

Teoria da Relatividade. Ele corrige intervalos de tempo, distância, massa, etc., para diferentes observadores.

O fundamental está aqui: $\Delta t' = \frac{\Delta t}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$!!!

Vejam que, antes, eu tinha falado que o tempo para qualquer evento independia do observador. Agora estou demonstrando, a partir da constância da velocidade da luz, que isso não é verdade. O tempo é relativo e depende do movimento do observador em relação ao evento. Esta é uma demonstração de como Einstein derrubou a idéia newtoniana de tempo e espaço absolutos.

A partir daqui é que surgem conjecturas do tipo: é possível voltar no tempo? Não, não é possível voltar no tempo. Tudo o que é possível é o tempo andar de forma mais lenta para um observador do que para outro. Mas, voltar no tempo, não.

A idéia de seta do tempo, de que ele sempre vai no mesmo sentido, permanece. Caso contrário, seria contrariada uma lei fundamental que é a segunda lei da termodinâmica: a entropia do universo sempre aumenta.

É fácil vermos que a quantidade Δs escrita como

$$\Delta s^2 = - \Delta x^2 - \Delta y^2 - \Delta z^2 + (c \Delta t)^2,$$

é que vai ser absoluta para qualquer observador. É esta quantidade que substitui tempo e espaço como absolutos.

O tempo não é absoluto, o espaço não é absoluto, a combinação de espaço e tempo definida nessa fórmula é o novo absoluto.

É fácil mostrarmos essa fórmula! Por exemplo, em nosso problema: o primeiro observador vê a luz subir e descer voltando ao mesmo ponto; logo, para ele $\Delta x = 0$, $\Delta y = 0$, $\Delta z = 0$ (não ocorre deslocamento espacial no evento completo). A quantidade Δs^2 será tão somente $\Delta s^2 = (c \Delta t)^2$.

Para o outro observador, que estava se deslocando, houve um deslocamento espacial Δx que descrevemos como $\Delta x = c \Delta t'$, (duas vezes $v \Delta t' / 2$); logo:

$$\Delta s'^2 = (v \Delta t')^2 (c \Delta t')^2$$

que, pela equação mostrada anteriormente, vale $(c \Delta t)^2$; logo

$$\Delta s^2 = \Delta s'^2$$

A quantidade que se conserva (e portanto é absoluta) quando mudamos o referencial em relação ao qual descrevemos um evento é a quantidade Δs^2 , não o tempo e nem o espaço. Δs^2 é conhecido como o quadri vetor espaço-tempo.

O tempo foi incluído por Einstein com o mesmo peso que as componentes espaciais. Todos os vetores nesta teoria passam a ser quadri vetores. Este é o *continuum* espaço-tempo.

Então, como estávamos buscando absolutos, como é a idéia da filosofia, uma coisa que é, "pelo menos por enquanto", Einstein mostrou que é o Δs^2 . O tempo é relativo. O espaço é relativo. O espaço-tempo é, ele não está, ele é.

Einstein, em uma segunda teoria da relatividade, uma teoria específica para a gravidade, mostrou que esta quantidade Δs^2 se deforma quando existe matéria. Ela depende da presença da matéria. Notem que o conceito de Aristóteles, Newton... do espaço e tempo era que o espaço existia independente da existência da matéria. O tempo passava independente da matéria. Agora não, agora o espaço-tempo é absoluto, mas se deforma se houver matéria.

Ele se deformar em presença da matéria significa que o passar do tempo é diferente para diferentes localizações dos observadores, mesmo que não se desloquem entre si. Um conceito bastante estranho! Mas um conceito que se verifica experimentalmente em diversas experiências: a curvatura do espaço. Uma experiência marcante nesse sentido foi realizada no Ceará, a observação de estrelas que estavam passando por trás do Sol durante um eclipse. Normalmente, não se consegue observar uma estrela perto do Sol, devido à luminosidade do mesmo, mas, durante um eclipse isso é possível. As mudanças na velocidade aparente das estrelas, passando atrás do Sol, foram uma confirmação experimental da curvatura do espaço. De maneira clássica, a velocidade das estrelas deveria ser constante mas não era. A luz vinda das estrelas tinha sua trajetória alterada pela presença da matéria (o Sol). Mesmo percorrendo o menor caminho, ela andava em curva. A luz era atraída gravitacionalmente ou, o que é equivalente, o espaço próximo ao Sol é curvo.

Tudo passou a ser dependente da presença de matéria e das velocidades relativas entre observadores. Tudo passou a ser relativo. Inclusive o tempo!

Bibliografia

EINSTEIN, Albert. *Como vejo o mundo*. Rio de Janeiro: Nova Fronteira, 1981.

———. *O significado da relatividade*. Coimbra: Arménio Amado, 1958.

HAWKING, Stephen W. *Uma breve história do tempo*. Rio de Janeiro: Rocco, 1989.

SILK, Joseph. *O big-bang*, Brasília: Editora Universidade de Brasília, 1985.