

Física 12.º ano

04 O Tempo

versão: 1,9

José Pedro do Amaral

29 de maio de 2026

Did's the stuff that's already done what does is gonna try to do.

Louis “Satchmo” Armstrong

O feito fez o que o faz talvez faça.

Louis «Satchmo» Armstrong, T.A.

*Time. Time. What is time? Swiss manufacture it. French hoard it.
Italians squander it. Americans say it is money. Hindus say it does not
exist. Do you know what I say? I say time is a crook.*

O'Hara, n'O Tesouro de África

Time is an illusion perpetrated by the manufacturers of space.

duma **fortune** do UNIX

ZP: Dize-me, o que é o Tempo?

OUTRO: E essa é uma pergunta intemporal... Intuitivamente, eu diria que o tempo é aquilo em que os acontecimentos ocorrem em sequência; o antes, o durante e o depois. Mas sei que essa intuição é frágil: em Relatividade, o tempo não é um palco absoluto — é uma coordenada do espaço-tempo que depende do estado de movimento e do campo gravítico. Na Relatividade Geral, o que mede um relógio é a duração própria ao longo de uma linha de universo; diferentes trajectórias curvadas pela gravidade dão tempos próprios distintos em que maior gravidade corresponderá a uma passagem mais rápida do tempo. Há também quem fale do universo-bloco: todo o espaço-tempo como um «todo» quadridimensional onde passado, presente e futuro coexistem geometricamente, e o devir é apenas a nossa perspectiva local. Contudo e porque a nossa experiência do devir é um fluxo: a flecha do tempo alinha-se com o aumento de entropia, e esse alinhamento dá direcionalidade às transformações macroscópicas. Na perspectiva quântica, surge o problema do tempo: as leis fundamentais parecem reversíveis e, em certos formalismos, até intemporais — como, por exemplo, na equação de Wheeler-DeWitt,¹ onde tempo não aparece explicitamente. Ainda outra abordagem seria tratar o tempo como emergente via correlações: um dos subsistema funciona como relógio (à

¹Equação de restrição quântica da gravidade canónica: $\hat{\mathcal{H}}\Psi = 0$. A função de onda do Universo é «intemporal»; a dinâmica surge relacionalmente ao escolher variáveis internas como relógios.

Page-Wootters²), e os restantes mudam em relação a esse relógio interno, a essa escala temporal intrínseca. Outra faceta de uma compreensão do que é o tempo seria a decoerência: a interacção com o ambiente selecciona histórias quasi-clássicas onde um parâmetro temporal efectivo organiza causa e efeito. Exemplificando para uma bola a cair, a decoerência devida às colisões com o ar faz sobressair trajectórias quasi-clássicas: a posição torna-se a variável robusta e um parâmetro temporal efectivo encadeia causa e efeito desde a largada até ao impacto. Numa abordagem completamente diferente — uma abordagem Clássica (grega) — poderia distinguir *chrónos* e *kairós*: *chrónos* é o tempo *mensurável*, homogéneo, «do relógio»; *kairós* é o *tempo oportuno*, a conjuntura qualitativa em que uma acção «cai bem» — a oportunidade. Continuando nos Clássicos, se se quiser aproximar Aristóteles, tempo é o número do movimento segundo o antes e o depois — uma contagem de mudanças —, o que já sugere a dependência de relógios e processos concretos. Então a pergunta «o que é o tempo?» admite camadas na resposta: geométrica (estrutura do espaço-tempo), termodinâmica (seta entrópica), quântica (correlações e emergência) e existencial (*kairós*, significado, consequência e ocasião).

- ZP:** Mantendo a nossa conversa na Física, quero só elucidar mais um aspecto de tempo que ainda não mencionaste. Recentemente, tenho ouvido falar de «tempo negativo». Isto é o resultado de algum fenómeno físico mensurável ou é um truque de palavras?
- OUTRO:** É um fenómeno operacional e mensurável: mede-se por pós-selecção nos fotões *transmitidos* em certas condições, o tempo médio de excitação que o fotão provoca numa nuvem atómica. Esse tempo iguala o atraso de grupo do pulso e perto da ressonância, esse atraso poderá ser de facto *negativo*. Contudo, nota que não há violação de causalidade: é um relógio quântico condicionado e não uma viagem no tempo.
- ZP:** A alguns níveis isto é mais difícil de compreender que os modelos de Wheeler-DeWitt e de Page-Wootters que mencionaste anteriormente. Conseguirias explicar-me isto de uma forma mais simples; talvez com uma parábola?
- OUTRO:** Compreendo a dificuldade e julgo que sim, que consiga. Imagina então uma banda filarmónica a entrar num túnel. Assim que entram no túnel, o chefe de banda muda os *tempos* dos instrumentos (adianta uns, atrasa outros). Pela mudança no padrão de interferência, o *pico* do som que sai do túnel pode adiantar-se relativamente no tempo e até sair *antes* do pico que entrou — o que constituiria um «tempo negativo» do pico — sem que, de facto, nenhum som tenha viajado mais rapidamente do que a velocidade do som no ar, nem que tenha saído antes de entrar. No exemplo dado, o meio dispersivo (ar e túnel) faz esse papel e re-temporiza as frequências do pulso e desloca o pico.
- ZP:** Então o facto desse tempo ser negativo diz-me o quê, se não há viagem no tempo?

²Mecanismo relacional: num estado global com $\hat{H}|\Psi\rangle = 0$, é eleito um subsistema-relógio C (operador $\hat{T}$). O estado condicional $|\psi_S(t)\rangle \propto \langle t|\Psi\rangle$ obedece a $i\hbar\partial_t|\psi_S(t)\rangle = \hat{H}_S|\psi_S(t)\rangle$.

- OUTRO:** Diz que, condicionado à ocorrência do evento *fotão foi transmitido*, o relógio «anda para trás» em média — exactamente como o pico da banda no túnel — mas que o mecanismo causal permanece intacto. Serve para entender e controlar *luz lenta e luz rápida*, e leitura-escrita³ em meios materiais, mas não para viajar no tempo.
- ZP:** Este conjunto de respostas que deste tem uma diversidade tal que pede uma intervenção ao estilo de Wittgenstein: o tempo existe como esquema de ordenação que a linguagem das proposições impõe aos factos; medimos relações e não uma substância chamada Tempo. Portanto, estás a responder acerca de tempos e não de Tempo.
- OUTRO:** Concorro. Talvez então o problema seja pedir-se uma essência temporal única. Isso implicaria que, para cada conjectura, o tempo fosse a variável que torna *comparáveis* as mudanças — própria no relógio relativista, paramétrica ou emergente no quântico, e vivida, como oportunidade, no humano. Ou ainda: se se aceitar o universo-bloco, o «passar» do tempo é o marcador fenomenológico da minha fatia local da realidade. Em ambos os casos, continuo a medir durações com relógios. Fico, pois, entre duas tentações: reificar o tempo como algo que decorre, fluindo num conjunto de outras regras, ou reduzi-lo a relações entre acontecimentos. Este diálogo permitir-me-á mostrar-te o alcance e os limites desses dois modelos intuitivos do tempo.
- ZP:** Se queres mesmo mostrar-me modelos intuitivos do tempo, deverias considerar também uma terceira tentação que mencionaste mas não desenvolveste: a que está contida no que chamaste universo-bloco. Poderia então todo o tempo já «ter sido»? Nesse caso, o tempo não fluiria; a nossa vida, a nossa natureza biológica, atribuiria tempo à nossa passagem individual pelo universo, tal como o troço do caminho onde estejamos e o troço onde tenhamos estado, conjuntamente com o caminho total, existem por inteiro, independentemente da distância já percorrida ou a percorrer. Gostaria também que clarificasses esse fatiamento local da realidade, pois parece-me ser o detalhe crucial para perceber passado, presente e futuro numa realidade em que o tempo seja apenas mais uma dimensão que experienciamos.
- OUTRO:** Acho que essa analogia entre o caminho a percorrer, sua existência simultânea e o tempo é interessante. Sobretudo, por começar a definir os limites que a nossa biologia impõe na nossa percepção de tempo. Essa analogia descreve de facto o chamado universo-bloco (eternalismo): todo o espaço-tempo existe como um bloco a quatro dimensões, em

³Exemplos concretos de leitura-escrita: 1. Memória EIT (transparência induzida por electromagnetismo, vapores de Rb-Cs). Escrever: reduz o grupo (luz lenta), comprime o pulso na célula e «apaga» o feixe de controlo para mapear o campo óptico em coerência de *spin*. Ler: reacende o feixe de controlo e a coerência reemite o pulso. 2. Memória Raman fora de ressonância (vapores quentes ou diamante). Escrever: um feixe de escrita cria uma excitação Raman (fonão/*spin*) que guarda a informação do pulso fraco. Ler: um feixe de leitura converte de volta para luz. 3. AFC (*atomic frequency comb*) em cristais impregnados com terras-raras. Escrever: o espectro em pente absorve o pulso; as excitações re-faseiam em $t = 1/\Delta$ e reemitem. Ler (modo *spin-wave*): um pulso de transferência guarda no *spin* e outro recupera a luz quando se quiser. 4. GEM (*gradient echo memory*). Escrever: um gradiente de frequência espalha as fases e *estaciona* o pulso. Ler: inverter o gradiente faz re-fasear e sair o eco óptico.

que passado, presente e futuro são igualmente reais, como pontos numa linha. A relatividade trata o tempo de modo geométrico e muitas equações físicas são (aproximadamente) reversíveis no tempo. Nota contudo que há tensões com a mecânica quântica (medição e colapso, superposição e decoerência) e com a experiência subjectiva de «fluxo» temporal; por isso, a questão da existência do universo-bloco não está resolvida. Respondendo ao teu pedido de clarificação, por «fatia local pela realidade» quis dizer a secção do espaço-tempo que o aqui-e-agora selecciona. Tecnicamente: no ponto da tua linha de universo, toma o teu vector 4-velocidade e considera o subespaço *spacelike* que lhe é *ortogonal* — essa hipersuperfície de simultaneidade é o teu presente local (Fig. 1). *Corte* porque é uma fatia (uma folheação instantânea); *local* porque, em Relatividade Geral, só faz pleno sentido numa vizinhança onde o espaço-tempo seja aproximadamente minkowskiano;⁴ *pela realidade* porque a própria geometria (cones de luz e curvatura) impõe o que pode ou não ser tomado como simultâneo. Observadores diferentes têm cortes diferentes (não há um presente global). O que chamas «passar do tempo» é o deslocamento desse corte à medida que percorres a tua linha de universo, acumulando tempo próprio τ . A flecha entrópica dá a esta varredura um sentido macroscópico. Em resumo, «corte local» corresponderá à hipersuperfície espacial de simultaneidade, definida pelo teu referencial próprio e pelos cones de luz no ponto onde te encontras (Fig. 1).

ZP:

Julgo ter percebido melhor, mas essa explicação é tão complexa quanto esse conceito de fatiar a realidade é revelador. Sobretudo se considerarmos também que estamos, em última análise, limitados pelos nossos sistemas sensoriais e que até as ferramentas que usamos para ampliar esses sentidos são extensões que temos que sentir. Voltando ao exemplo do caminho que trilhamos: só conseguimos sentir uma região próxima desse caminho, embora todo o caminho exista ao mesmo tempo. Assim, a nossa biologia é o «zeitgeber»: o gerador do tempo como o resultado de um conjunto de sensações. Talvez ainda melhor seja considerar a nossa biologia como a fatiadora do tempo. Em que cada uma destas fatias é definida pelas interações entre memória e sensações.

OUTRO:

Essa observação é certa: os sistemas biológicos funcionam como filtros temporais que constroem limitando no observador o «agora». A uma escala temporal maior temos ritmos circadianos e outros, a uma escala temporal menor temos padrões de disparo neuronal e secreções químicas, e assim os mecanismos de atenção e memória e sua integração sensorial definem a nossa realidade. Nota que até a ontogenia tem um efeito na percepção do tempo: um minuto é um instante fugaz para um octogenário, mas uma eternidade de espera para uma criança pré-escolar. Mesmo que o universo-bloco seja um modelo exacto da realidade física,

⁴No espaço-tempo de Minkowski, as separações classificam-se em *timelike* ($ds^2 < 0$), *lightlike* ($ds^2 = 0$) e *spacelike* ($ds^2 > 0$). Para um observador com massa, a 4-velocidade U (derivada da posição 4-dimensional pelo tempo próprio τ) aponta ao longo do seu eixo temporal próprio e satisfaz $U \cdot U = -c^2$. O hiperplano minkowskianamente ortogonal a U é *spacelike* e representa o espaço/presente local (a hipersuperfície de simultaneidade). O «passar do tempo» é a varredura desse hiperplano à medida que τ cresce.

a amostragem temporal feita pelo cérebro gerará a experiência dinâmica de passagem do tempo.

- ZP:** Ao discutir assim os sentidos e sua influência na percepção do tempo, é difícil não pensar em *Umwelt*. Como somos criaturas visuais, a visão desempenha um papel muito importante como modalidade sensorial e, conseqüentemente, caracterizadora de tempo. Um facto associado à visão é o da maior parte da luz extra-solar que vemos ser muito antiga. Seria interessante considerar as idades da luz que vemos — os seus tempos de origem. Como poderíamos estabelecer uma cronologia da luz?
- OUTRO:** Entre o desacoplamento da radiação cósmica de fundo, 380 mil anos após o Big Bang, e o acender das primeiras estrelas passou-se a chamada idade das trevas cósmica. As primeiras estrelas (População III) terão surgido, grosso modo, entre 100 e 400 milhões de anos após o Big Bang, e a reionização terminou alguns centenas de milhões de anos depois. Portanto, o «céu sem estrelas» perdurou centenas de milhões de anos, num processo gradual.
- ZP:** É interessante falarmos não só de luz visível mas de toda em geral, mas a intenção ao perguntar era percebermos melhor as idades da luz das estrelas. Assim e clarificando a pergunta, quanto tempo demora a luz a viajar da estrela mais próxima à Terra?
- OUTRO:** Da estrela mais próxima além do Sol, Próxima Centauri, a luz demora cerca de 4,24 anos a cá chegar. Daqui a ideia intuitiva de que o céu nocturno é sempre um olhar para o passado, pois mesmo a luz da segunda estrela mais próxima demora muito tempo a chegar cá.
- ZP:** Portanto, se todas as estrelas e planetas tivessem sido criados ao mesmo tempo, a Terra teria tido um céu nocturno sem estrelas durante 4,24 anos.
- OUTRO:** Exacto. Nesse cenário idealizado primeiro teríamos visto o Sol após oito minutos de escuridão. Depois, a abóbada nocturna iria acender-se em camadas à medida que chegasse a luz de vizinhos cada vez mais distantes: $\sim 4,24$ anos para Próxima Centauri e progressivamente mais para as restantes.
- ZP:** Assim, adoptando um rótulo temporal universal, pode dizer-se que o nosso presente, mesmo dentro das nossas limitações biológicas, é uma colagem de fenómenos com origens temporais diferentes.
- OUTRO:** Precisamente. O «presente» que experienciamos é um mosaico temporal: de fotões solares com cerca de 8 minutos; de Próxima Centauri com anos; do centro galáctico com dezenas de milhares de anos; de galáxias longínquas com biliões de anos; e de sinais locais quase imediatos. O sistema nervoso agrega entradas com origens temporais muito diversas numa sensação unificada do agora — um agora relativo, uma construção biológica e não um agora temporalmente absoluto do universo.
- ZP:** Mesmo que seja a nossa biologia a fatiar o tempo, o que acontece à nossa componente existencial humana do tempo vivido? Onde ficará nisto tudo o kairós?

OUTRO: O tempo que nos é dado ficará no intervalo entre o que o mundo permita e o que decidamos fazer. O chrónos dá-nos o calendário e o relógio; o kairós dá-nos a oportunidade. A Física não responde por nós, mas ajuda-nos a não mentir sobre o que é possível. O resto, o que fazer no instante, é nossa responsabilidade.

ZP: Essa responsabilidade e poder que comporta lembra-me a espiritualidade temporal patente no segundo poema de *A Shropshire Lad* de A.E. Housman, em que a longevidade bíblica⁵ é usada para calcular a urgência de ver as cerejeiras em flor — que com o branco das suas pétalas reflectem a liturgia de fim e de princípio — nas Primaveras e Páscoas que restam ao poeta.

II

Loveliest of trees, the cherry now
Is hung with bloom along the bough,
And stands about the woodland ride
Wearing white for Eastertide.

Now, of my threescore years and ten,⁶
Twenty will not come again,
And take from seventy springs a score,
It only leaves me fifty more.

And since to look at things in bloom
Fifty springs are little room,
About the woodlands I will go
To see the cherry hung with snow.

A.E. HOUSMAN

⁵«Os anos da nossa vida chegam a setenta, ou a oitenta para os que têm mais vigor; entretanto, são anos difíceis e cheios de sofrimento, pois a vida passa depressa, e nós voamos!» (*Salmo 90:10*)

⁶Alfred Edward Housman é modesto na previsão de seu kairós restante, não se arrogando mais do que o mínimo!

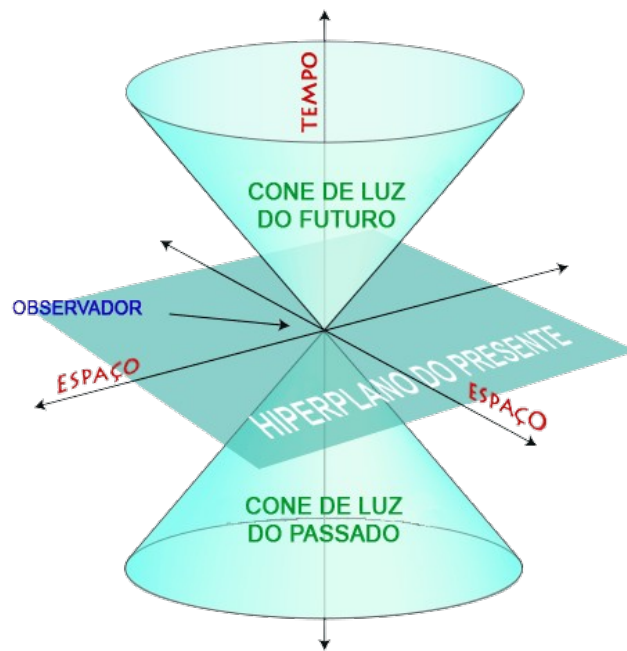


Figura 1. Diagrama de espaço-tempo (Minkowski) que mostra a estrutura causal definida pela luz. O eixo vertical é o tempo; os horizontais são espaço. As superfícies em forma de cone são os cones de luz: limites de tudo o que um pulso luminoso, emitido no evento do vértice, pode alcançar (futuro) ou de tudo o que poderia tê-lo alcançado (passado). As suas geratrizes fazem 45° quando usas unidades com $c = 1$ (ou $|x| = ct$). O interior do cone do futuro contém eventos que podem influenciar via sinais a $v \leq c$. O interior do cone do passado contém eventos que te podem ter influenciado. A região fora dos cones é *spacelike* (separação espaçosa): esses eventos não podem ter relação causal contigo sem ultrapassar c . O hiperplano do presente é o conjunto de eventos simultâneos para ti naquele instante. Muda com o teu estado de movimento: observadores com velocidades diferentes têm planos do agora inclinados de modo diferente (relatividade da simultaneidade). A seta observador é a tua linha de universo. Quanto mais inclinada em relação ao eixo do tempo, maior a tua velocidade espacial; uma linha vertical seria repouso no referencial do diagrama. Em suma: o gráfico codifica quem pode causar o quê e quando, apenas pela geometria de cones e planos num espaço-tempo onde a luz fixa a fronteira do possível. (imagem de Wikimedia Commons)

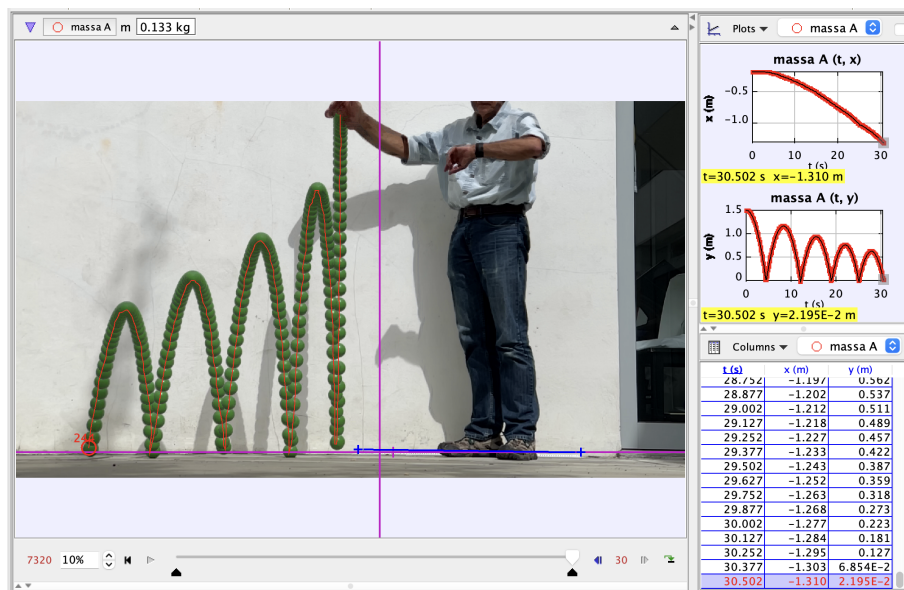


Figura 2. Bola a cair e a ressaltar. Imagem obtida com o programa Tracker mostrando simultaneamente as posições no espaço de uma bola em queda — tipo efeito estroboscópico.



Figura 3. Fotograma do filme Donnie Darko mostrando as posições do vector do canal de trilho (*path channel vector*) ao longo de um certo período — tipo verme temporal.