

A Relatividade do Tempo

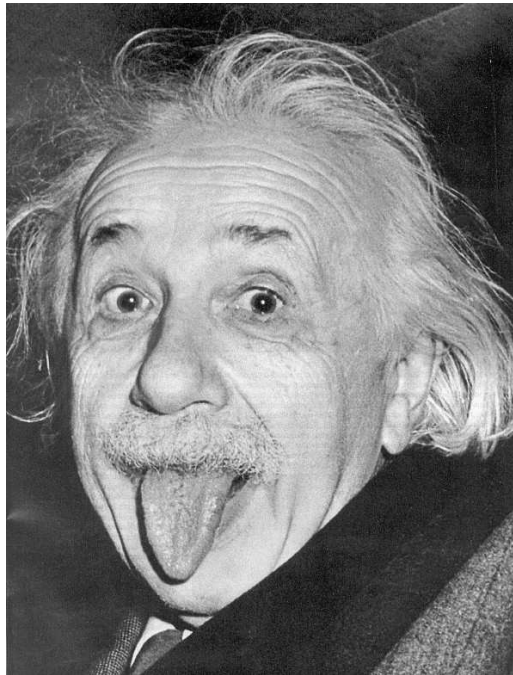
José Natário

(Instituto Superior Técnico)

Aveiro, Março de 2015

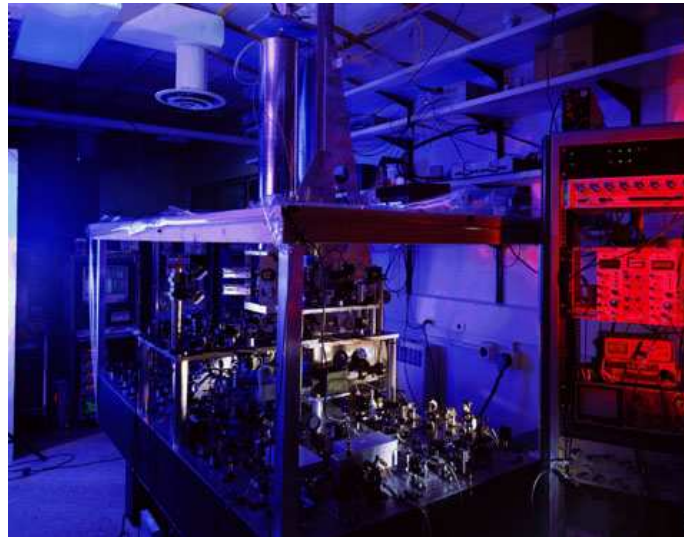
O que é o tempo?

Einstein: o tempo é aquilo que é medido pelos relógios.



O que é um relógio?

Einstein: qualquer fenómeno periódico estável: um corpo rígido em rotação livre (e.g. a Terra) ou uma oscilação atómica (e.g. relógios atómicos).



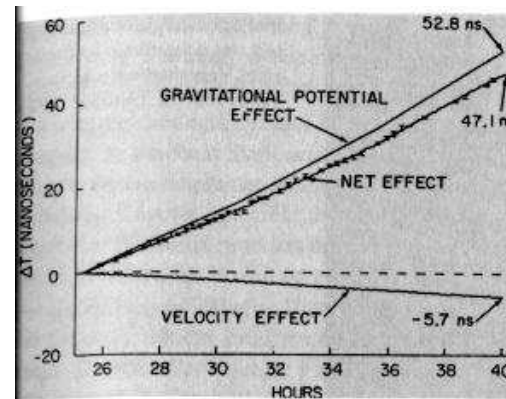
Que horas são?

Será que o tempo medido por todos os relógios coincide?

À primeira vista: sim!

Medindo cuidadosamente: **não!**

Em Outubro de 1971, Hafele e Keating levaram quatro relógios de césio em voos comerciais à volta da Terra (uma vez para leste e uma vez para oeste) e compararam com os relógios do Observatório Naval dos Estados Unidos. Os relógios atrasaram-se/adiantaram-se 60/270 nano-segundos!



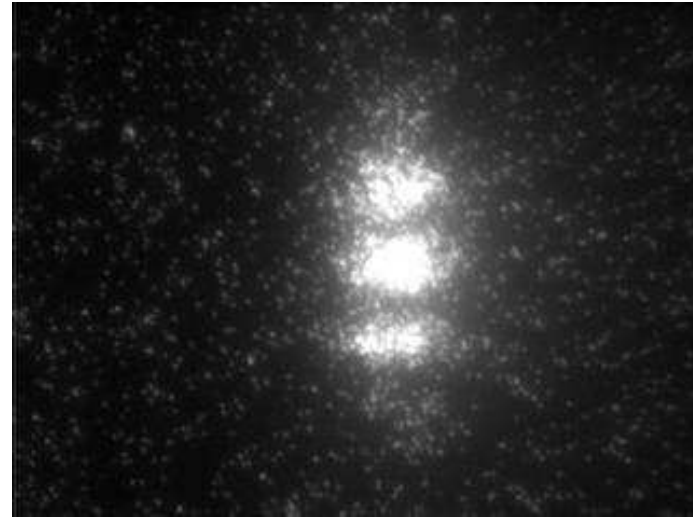
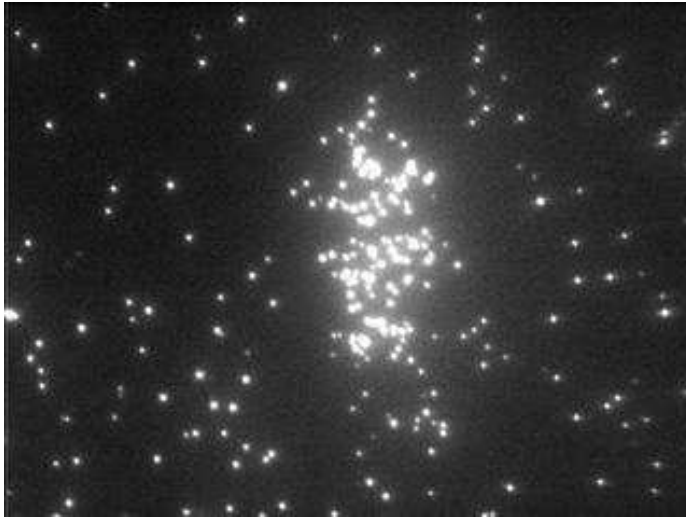
O problema com a luz

Duas teorias para a luz:

ondulatória...



... e corpuscular.



Em ambas a velocidade da luz deveria depender do observador.

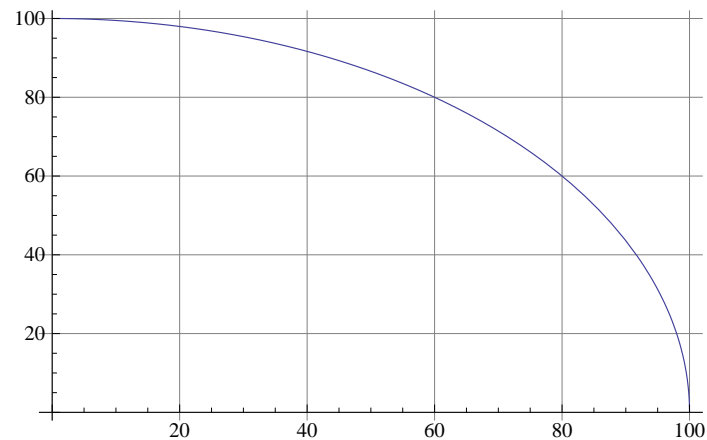
Mas é um facto experimental que a velocidade da luz é a mesma para todos os observadores!

Relatividade Restrita (1905)

$$\text{Velocidade} = \frac{\text{Espaço percorrido}}{\text{Tempo gasto a percorrê-lo}}.$$

A solução de Einstein: o tempo decorre a ritmos diferentes observadores com diferentes velocidades!

Esta diferença só é apreciável para velocidades comparáveis à da luz (300 000 quilómetros por segundo):



A 10% da velocidade da luz o tempo passa 99,95% do ritmo habitual.

A 50% da velocidade da luz o tempo passa 87% do ritmo habitual.

A 80% da velocidade da luz o tempo passa 60% do ritmo habitual.

A 99% da velocidade da luz o tempo passa 14% do ritmo habitual.

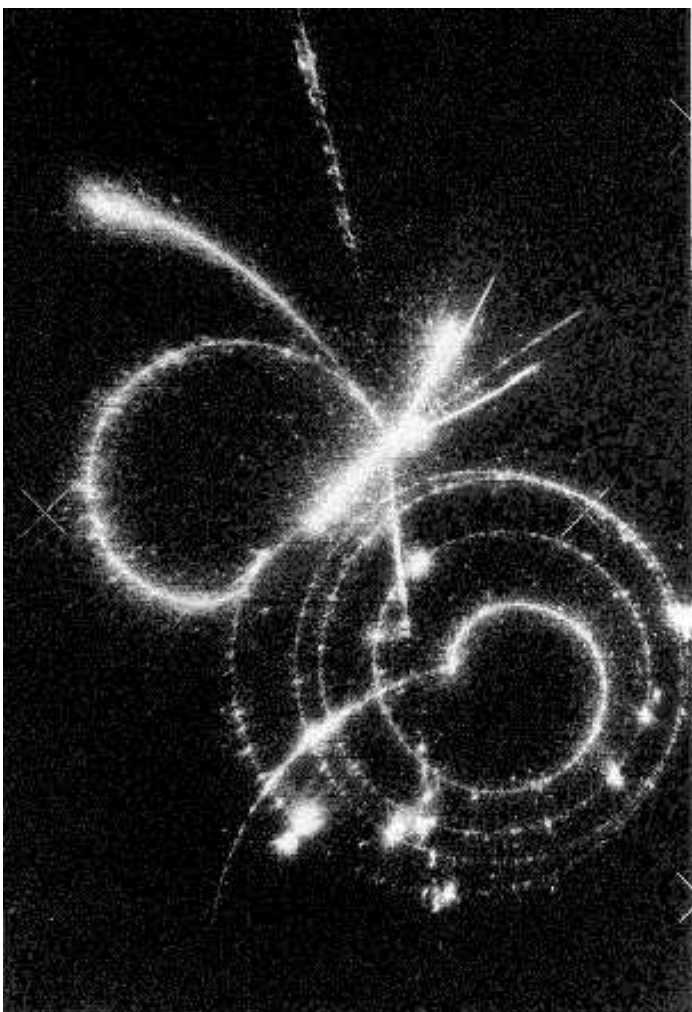
Velocidade do veículo mais rápido jamais construído (sonda Helios 2, lançada em 1976): 70 quilômetros por segundo (0,02% da velocidade da luz).



Muões

São produzidos na atmosfera a cerca de 10 quilómetros de altitude. Desintegram-se tão depressa que mesmo à velocidade da luz só conseguiriam percorrer cerca de 600 metros.

Mas são observados no solo!



Paradoxo dos Gêmeos

Alice e Bernardo são gêmeos. Alice parte numa viagem espacial a uma velocidade próxima da da luz. Quando regressa, tem mais ou menos a mesma idade com que partiu, mas Bernardo tem já uma idade avançada.

Mas do ponto de vista da Alice é ela que está parada!

Solução: o gêmeo que envelhece mais é aquele que não acelera.



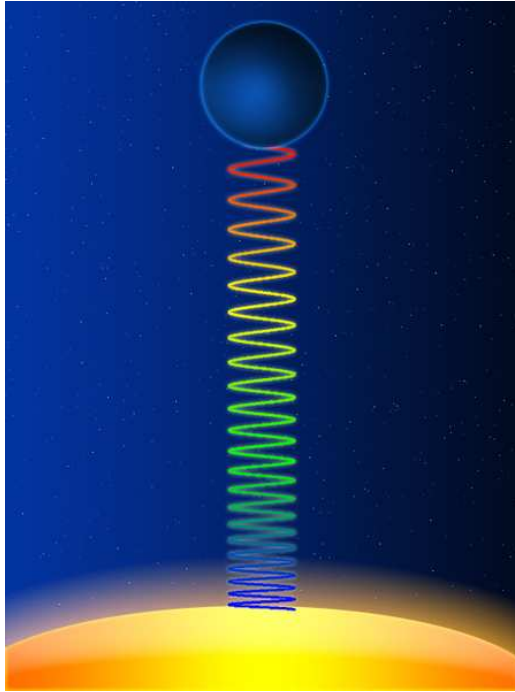
Relatividade Geral (1915)

Um objecto atirado para cima perde velocidade à medida que sobe.

Mas um fóton tem que se mover sempre à velocidade da luz.

Portanto um fóton perde **energia** à medida que sobe, ou seja, a sua **frequência** diminui.

O resultado mantém-se se substituirmos a frequência dos fótons pela frequência de uma luz intermitente. **Como é possível?**



A solução de Einstein: o tempo decorre a ritmos diferentes para observadores em diferentes locais num campo gravitacional!

Isto é matematicamente análogo ao facto dos paralelos de diferentes latitudes terem comprimentos diferentes. Diz-se então que o tempo é curvo.

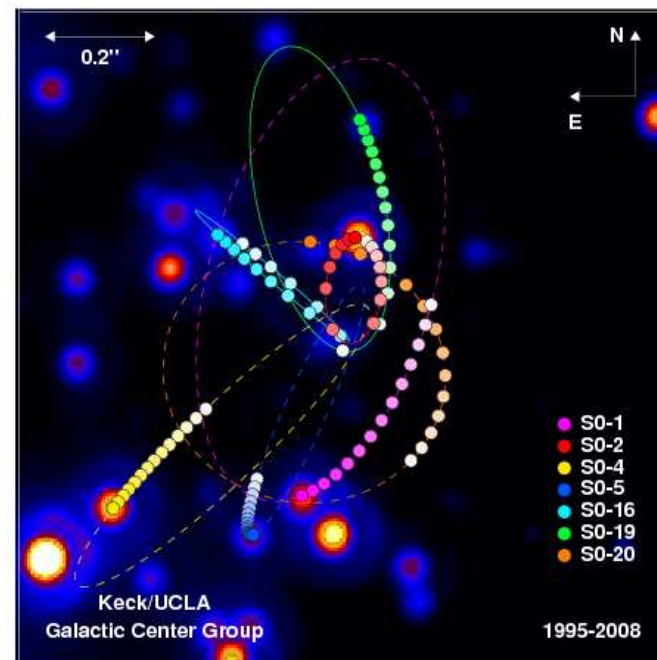


Paradoxo dos gémeos generalizado: objectos em queda livre movem-se de forma a envelhecerem o máximo.

Esta diferença só é apreciável para campos gravitacionais muito intensos, nos quais objectos em queda atingem velocidades comparáveis à da luz:

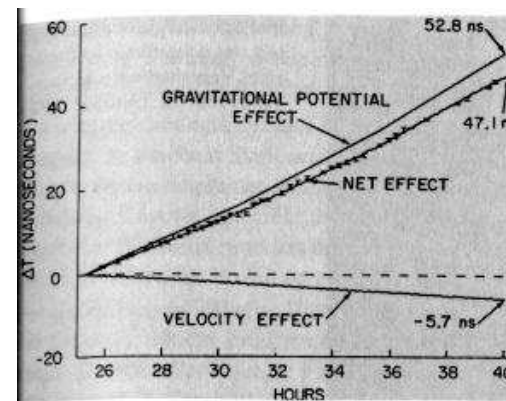
Por exemplo o tempo na Lua passa apenas a um ritmo 0,0000001% superior ao da superfície da Terra.

Na vizinhança de um **buraco negro** existem locais onde o tempo passa a um ritmo arbitrariamente baixo.



Experiência de Hafele-Keating

Em Outubro de 1971, Hafele e Keating levaram quatro relógios de césio em voos comerciais à volta da Terra (uma vez para leste e uma vez para oeste) e compararam com os relógios do Observatório Naval dos Estados Unidos. Os relógios atrasaram-se/adiantaram-se 60/270 nano-segundos!

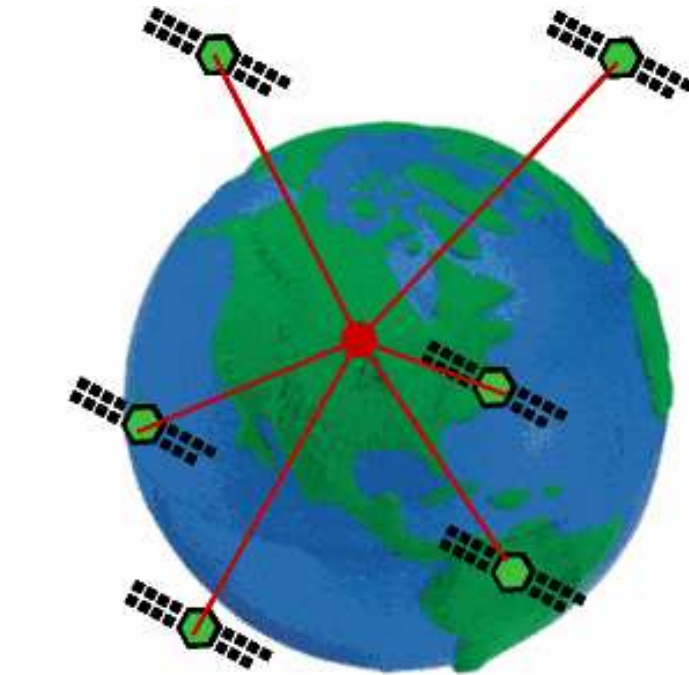


GPS

Baseado em satélites em órbita transportando relógios atômicos.

Os satélites emitem sinais com indicação da hora e do local exacto em que se encontram.

O receptor calcula a distância aos satélites pela diferença entre a hora de emissão e a hora de recepção, e obtém a sua posição por triangulação.



Os relógios nos satélites adiantam-se cerca de 38 000 nano-segundos por dia em relação aos relógios na Terra.

Velocidade da luz: 30 centímetros por nano-segundo.

Se este efeito não fosse corrigido, o erro acumulado num dia seria de **11 quilómetros**.

Ele sabe que o tempo é curvo:

