

Relatividade Geral: Funciona?

Davi C. Rodrigues

**Departamento de Física & Núcleo Cosmo-ufes, CCE
Universidade Federal do Espírito Santo**

Universo na Escola

EEEFM Profa. Maura Abaurre



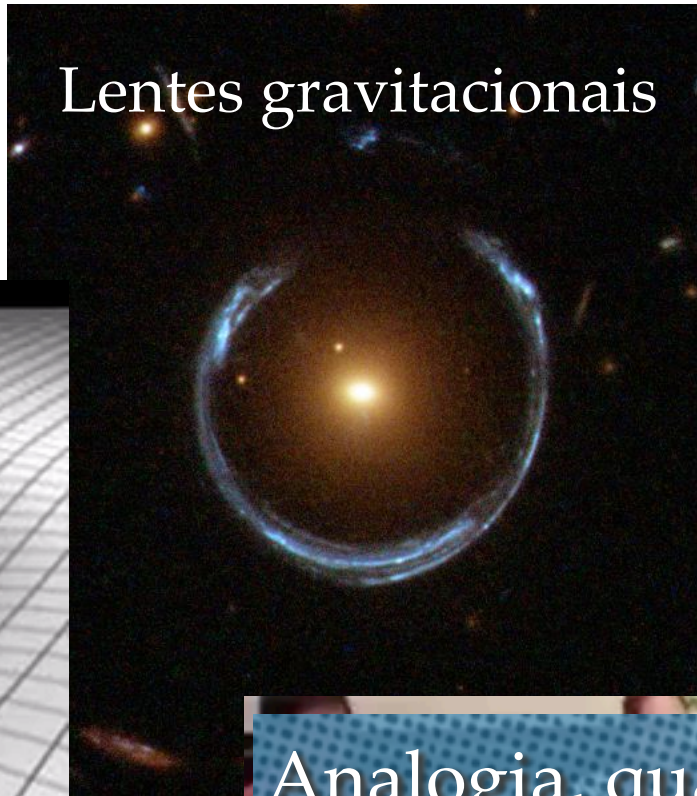
Vila Velha, 16 de maio de 2019

Nos encontros anteriores (e através de outras fontes) vocês já ouviram falar de alguns conceitos de relatividade geral...

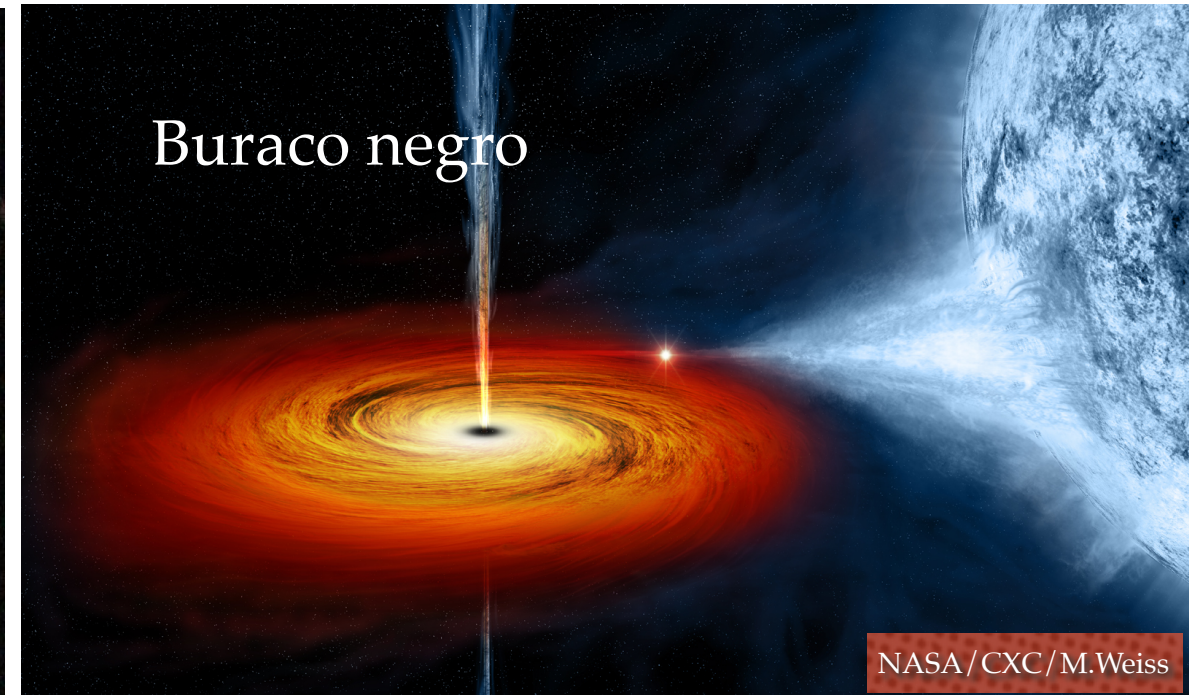
$$G_{\mu\nu} = 8\pi G T_{\mu\nu}$$

Equação de Einstein

Lentes gravitacionais



Buraco negro



Analogia, qualitativa



- Movimento de corpos/planetas devido à curvatura do espaço.

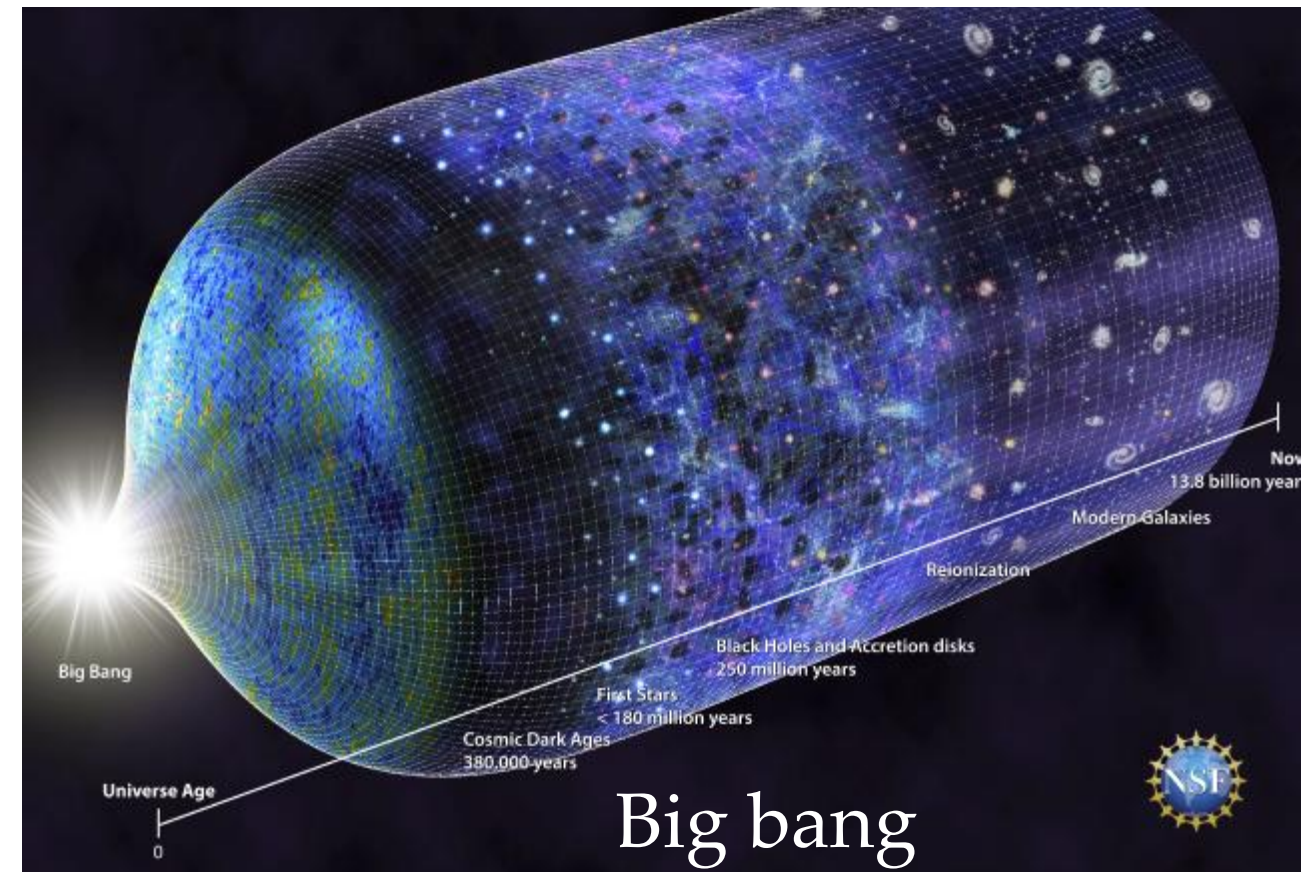
- Deflexão da luz.

Nos encontros anteriores (e através de outras fontes) vocês já ouviram falar de alguns conceitos de relatividade geral...

Ondas gravitacionais



Exceto por buracos de minhoca, todos os demais efeitos já foram detectados (direta ou indiretamente), estando em acordo com relatividade geral.



Para que uma teoria científica seja bem aceita, fornecer novos “*insights*” é bem vindo, mas está longe de ser suficiente.

É claro que estruturas qualitativamente novas (buracos negros, ondas gravitacionais...) aguçam nossa curiosidade e imaginação, mas uma boa teoria científica deve ser avaliada a partir de seus detalhes. (Muitas outras propostas de teorias em princípio fantásticas ou empolgantes já se mostram falsas, ou seja, sem correspondência com a realidade).

De nada adianta uma nova teoria gravitacional se ela não for capaz de explicar como a teoria anterior (no caso, gravitação Newtoniana) conseguiu tanto sucessos — Limite Newtoniano.

Ademais, além das estruturas qualitativamente novas, a nova teoria (relatividade geral) deve introduzir pequenas correções a fenômenos antes bem explicados por gravitação Newtoniana. — Correções pós-Newtonianas.

Assim, vamos dar um passo para trás e nos perguntemos antes...

Gravitação Newtoniana: Funciona?

Entender Relatividade Geral requer primeiro entender Gravitação Newtoniana.

Não digo isso só pelo motivo histórico, gravitação Newtoniana é um importante caso particular, e especialmente simples, de Relatividade Geral.

Gravitação Newtoniana:

Lembremos o que é...

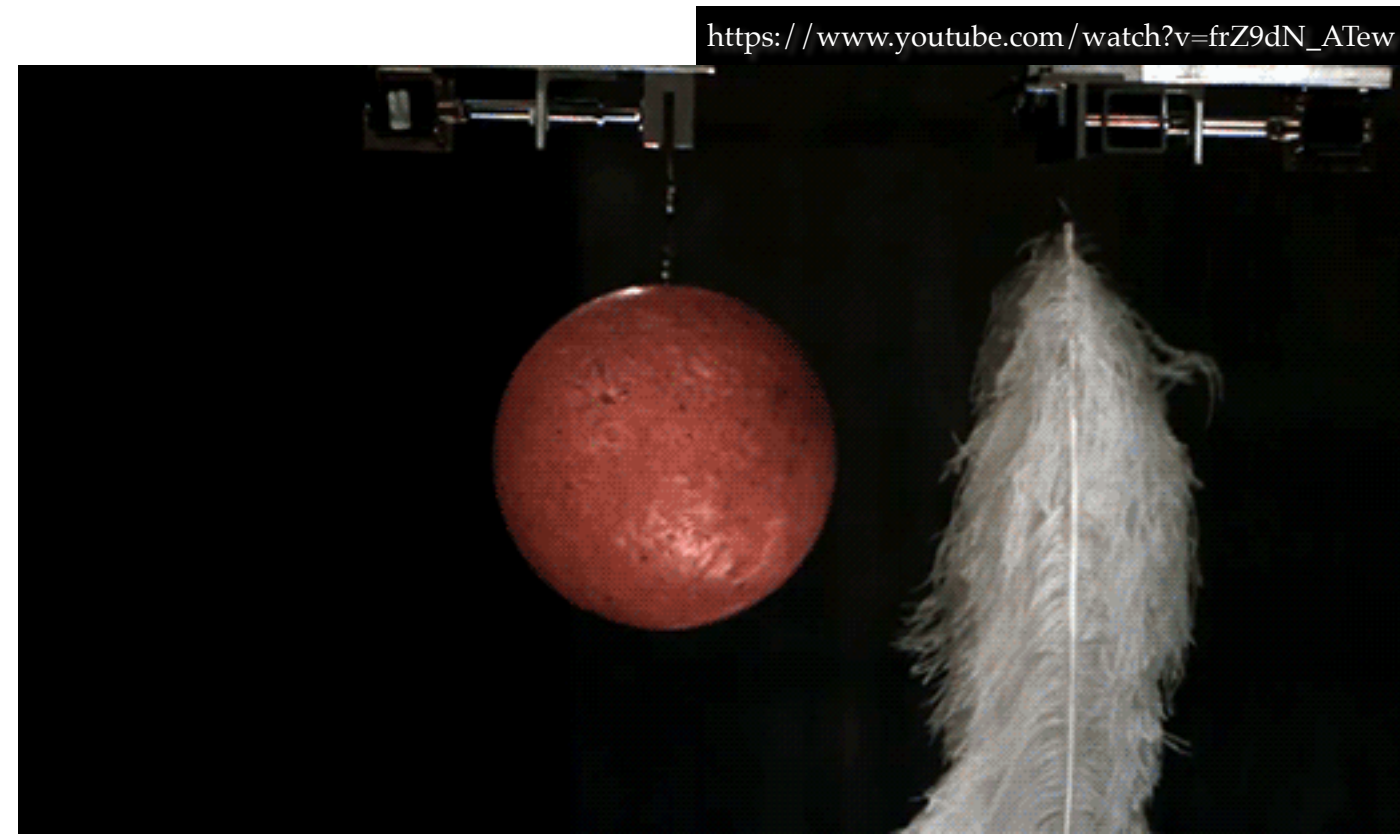
O módulo da força gravitacional entre duas massas a uma distância r é

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2}$$

E, pela famosa 2a Lei de Newton, essa força, ao atuar na massa 1, gera uma aceleração nessa massa cujo módulo é dado por

$$a_1 = \frac{F}{m_1} = G \frac{m_2}{r^2}$$

Logo a aceleração do corpo 1 não depende de sua própria massa! Este simples resultado pode ser testado aqui na Terra com facilidade (quando o atrito com o ar é removido)



Gravitação Newtoniana:

órbitas dos planetas...

Essas duas equações bem simples são também suficientes para descrevermos as órbitas dos planetas. E isso Newton fez. Ele descobriu que usando essas equações poderia deduzir as leis de Kepler!

As Leis de Kepler são um conjunto de conjecturas que em princípio parecem desconexos entre si, mas que funcionavam muito bem.

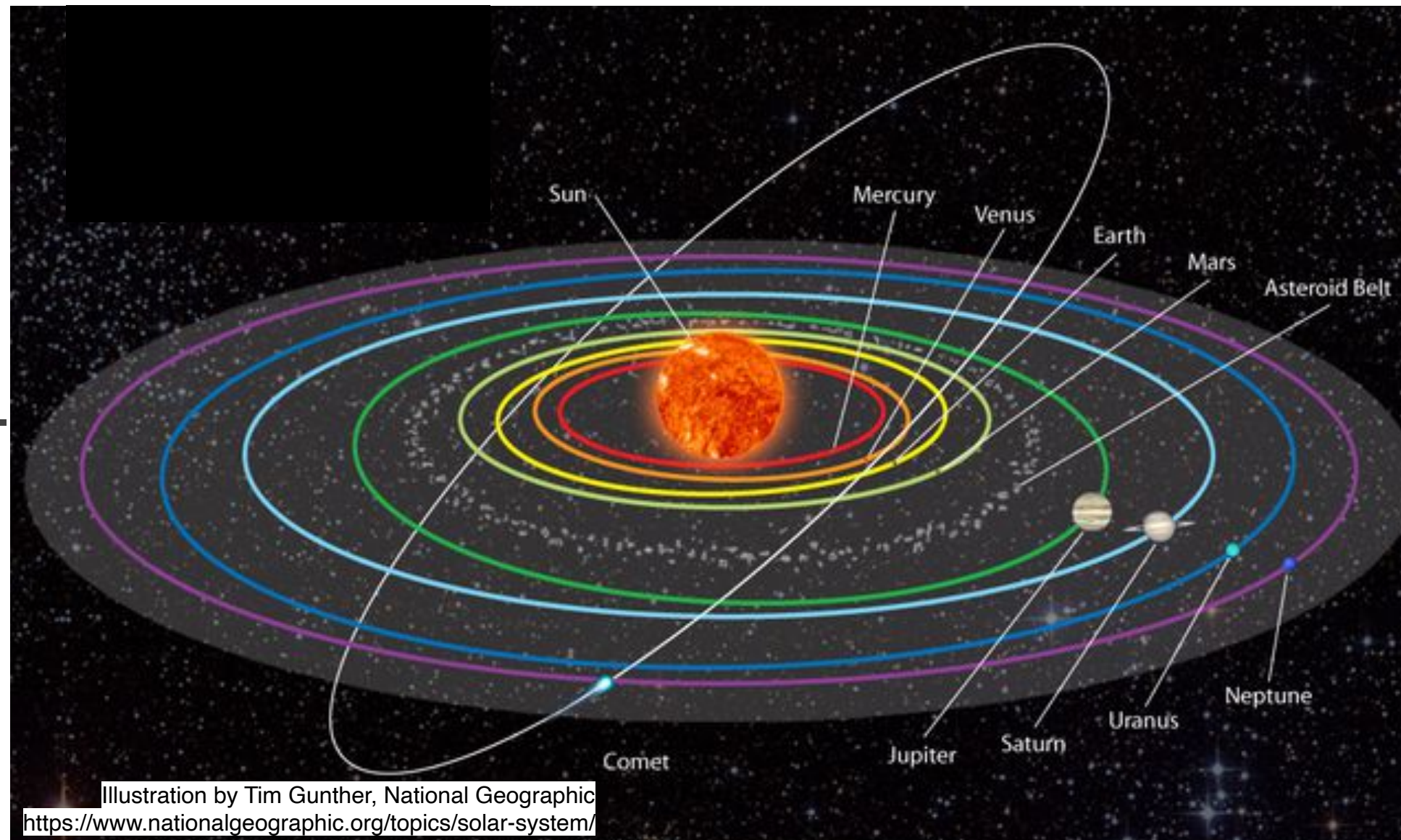
A gravitação Newtoniana não apenas foi capaz de reobter as Leis de Kepler (se tivesse parado aí, poderia ser vista como uma curiosidade). A gravitação unificou o força gravitacional que observamos aqui na Terra com a responsável pelas órbitas dos planetas. Ademais, correções às Leis de Kepler foram encontradas teórica e observacionalmente.

Gravitação Newtoniana:

Indo além de Kepler...

Gravitação Newtoniana não trata necessariamente de dois corpos. Nós sabemos (e todos sabem) que o Sistema Solar tem muito mais corpos do que 2... Temos uma estrela (Sol), 8 planetas e uma enorme quantidade de corpos menores, como planetas anões, asteroides e cometas.

Não só isso, mas o Sol não é uma “bolinha” perfeita, e isso também tem efeitos gravitacionais.



Gravitação Newtoniana:

Generalização para o contínuo

As equações que usamos anteriormente não definem gravitação Newtoniana, são na verdade um caso particular para dois corpos pontuais.

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2} \qquad a_1 = \frac{F}{m_1} = G \frac{m_2}{r^2}$$

De forma geral, não temos dois pontos de massa, ou mesmo um número finito de pontos, temos uma densidade de matéria para cada ponto do espaço (expressa por $\rho(\vec{x})$). E as equações que definem a gravitação Newtoniana são....

ATENÇÃO! CUIDADO!

Matemática avançada logo aqui embaixo!

Gravitação Newtoniana:

Generalização para o contínuo

As equações que usamos anteriormente não definem gravitação Newtoniana, são na verdade um caso particular para dois corpos pontuais.

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2} \qquad a_1 = \frac{F}{m_1} = G \frac{m_2}{r^2}$$

De forma geral, não temos dois pontos de massa, ou mesmo um número finito de pontos, temos uma densidade de matéria para cada ponto do espaço (expressa por $\rho(\vec{x})$). E as equações que definem a gravitação Newtoniana são....

$$\nabla^2 \phi = 4\pi G \rho$$

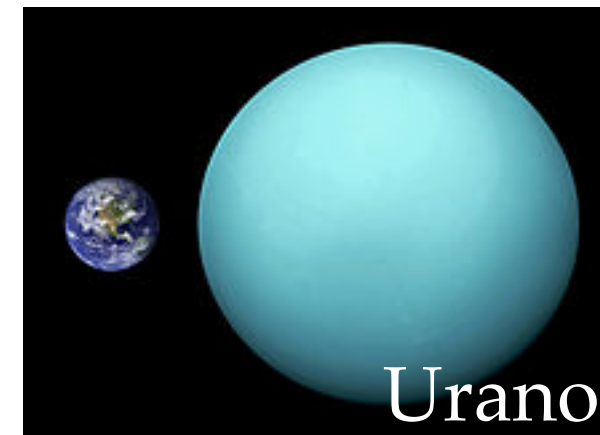
$$\vec{a} = -\vec{\nabla} \phi$$

Gravitação Newtoniana:

Novo planeta detectado!

Os planetas que podemos ver a olho nu são todos do Sistema Solar e são apenas 6: Mercúrio, Vênus, Terra (já viram esse?), Marte, Júpiter e Saturno.

Urano foi descoberto acidentalmente em 1781 por meio de um telescópio, tendo sido inicialmente confundido com uma estrela.



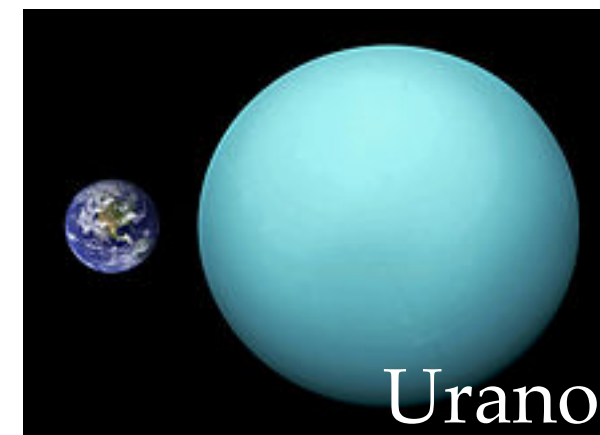
Netuno, ainda mais distante, foi previsto e observado em 1846. Irregularidades na órbita de Urano poderiam ser explicadas se houvesse um novo planeta mais distante. Resultado, a órbita de Netuno foi prevista! Em seguida, telescópios foram apontados na direção e momento certos e.... O oitavo planeta foi descoberto!

Gravitação Newtoniana:

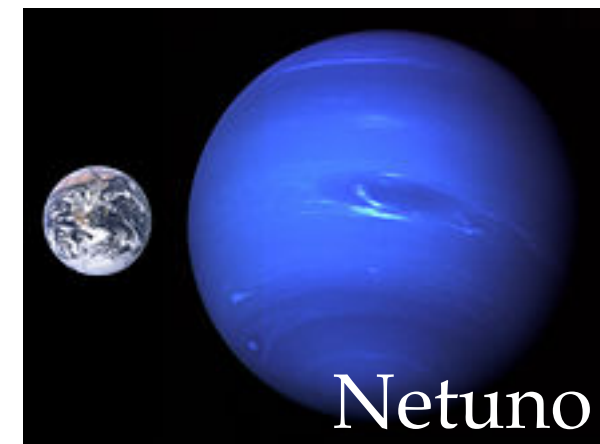
Novo planeta detectado!

Os planetas que podemos ver a olho nu são todos do Sistema Solar e são apenas 6: Mercúrio, Vênus, Terra (já viram esse?), Marte, Júpiter e Saturno.

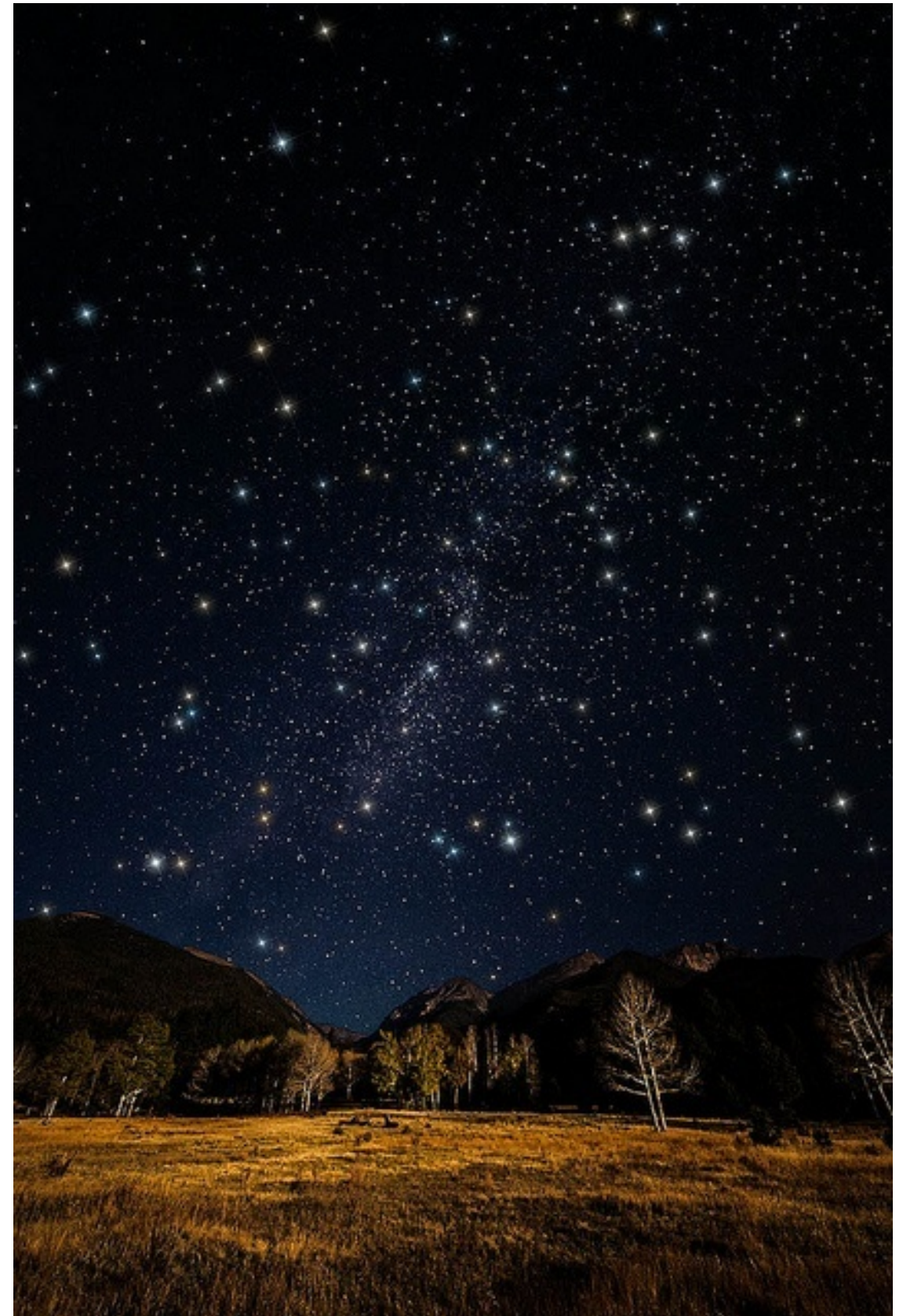
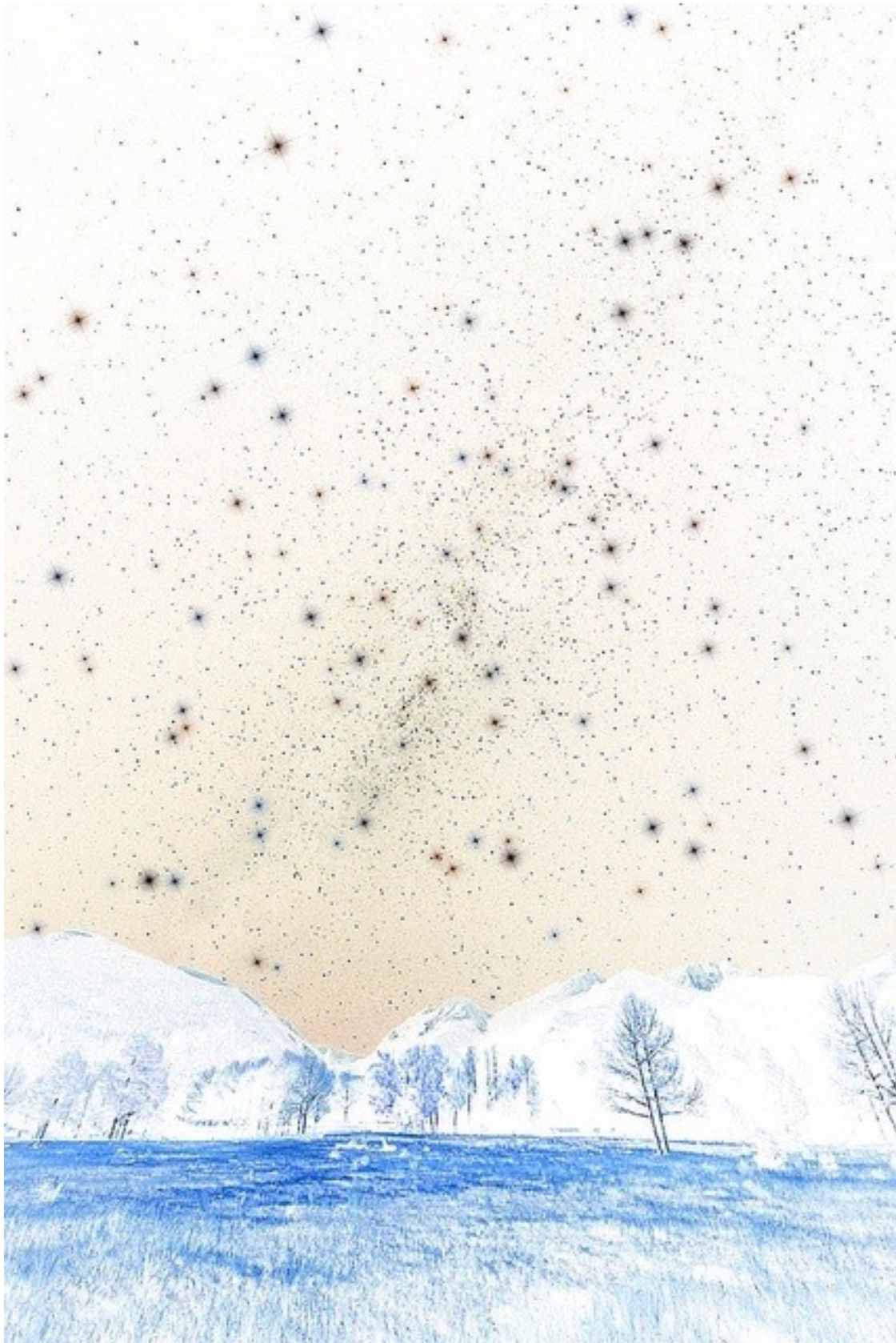
Urano foi descoberto acidentalmente em 1781 por meio de um telescópio, tendo sido inicialmente confundido com uma estrela.



Netuno, ainda mais distante, foi previsto e observado em 1846. Irregularidades na órbita de Urano poderiam ser explicadas se houvesse um novo planeta mais distante. Resultado, a órbita de Netuno foi prevista! Em seguida, telescópios foram apontados na direção e momento certos e.... O oitavo planeta foi descoberto!



Mas o Sol é apenas uma estrela...

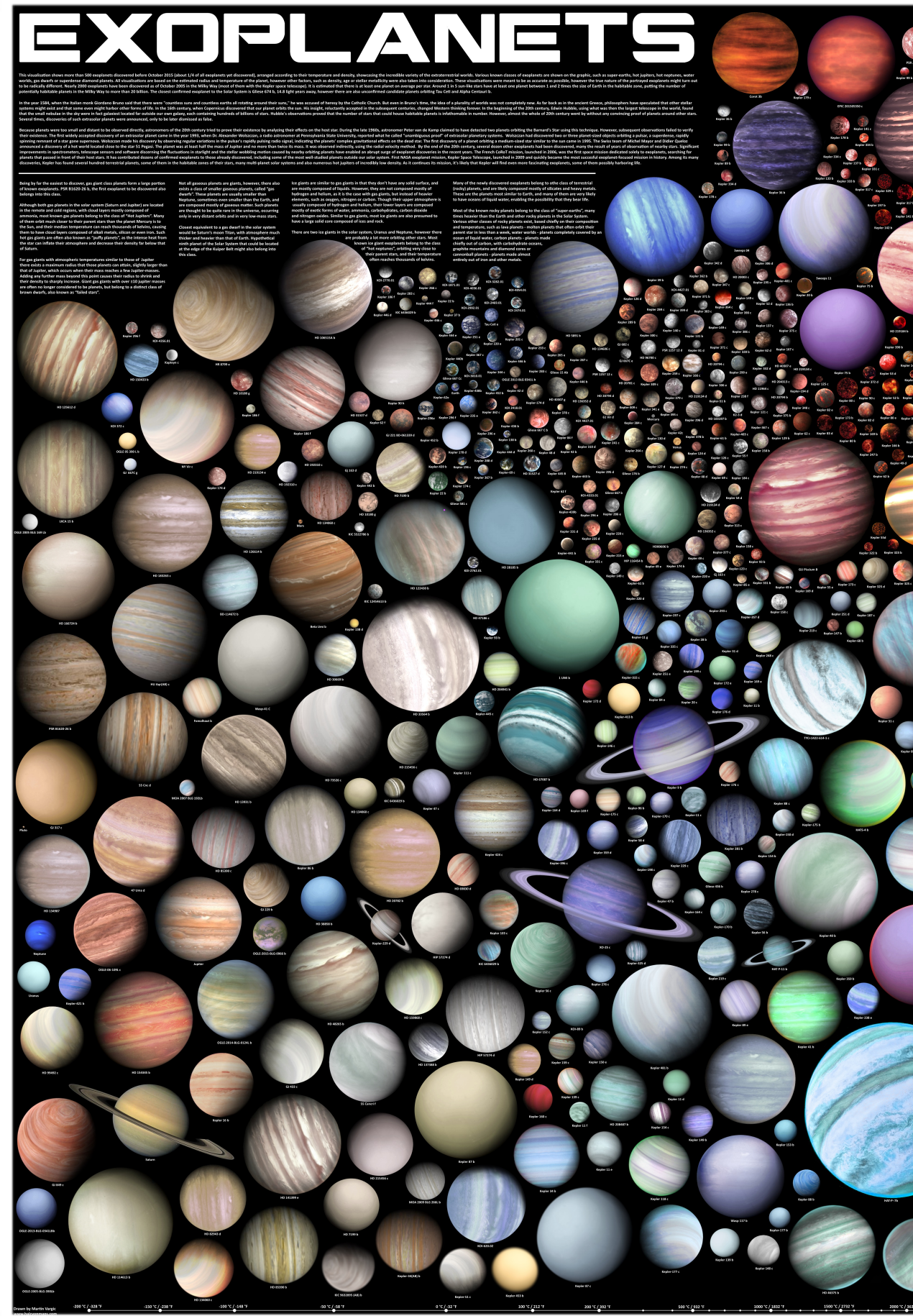


E cada estrela pode ter vários planetas

Há hoje quase 4.000 planetas já detectados fora do Sistema Solar.

Ver:
https://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/docs/counts_detail.html

Todos eles, não só o Sistema Solar, estão em conformidade (em boa aproximação) com a gravitação Newtoniana.



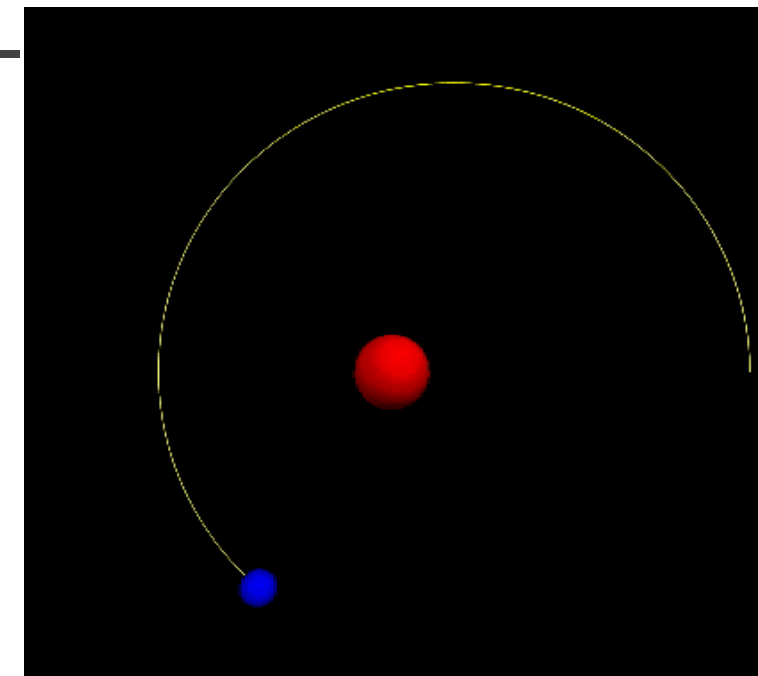
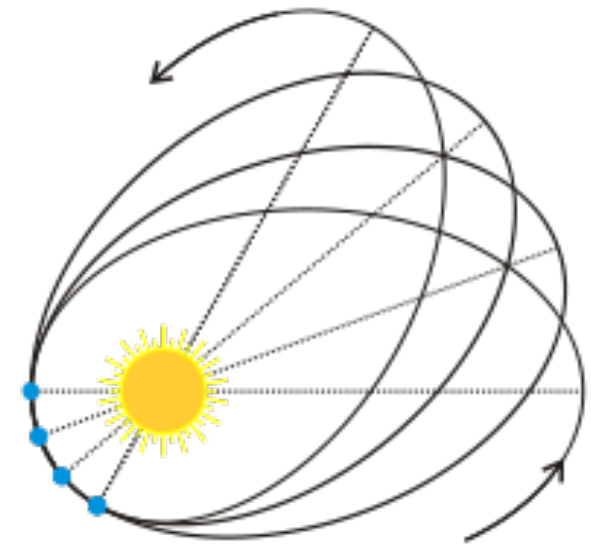
Gravitação Newtoniana:

A estranha órbita de Mercúrio...

Bem antes da Relatividade Geral, astrônomos já observavam que a órbita de Mercúrio era um pouco esquisita... De início, era apenas um problema de considerar mais e mais detalhes da modelagem teórica.

Considerou-se os efeitos gravitacionais de outros planetas, considerou-se também que o Sol não é exatamente esférico... Mas todas essas correções melhoravam, mas não explicavam ainda as observações.

Poderia haver um novo Planeta desconhecido próximo a Mercúrio? Muitas tentativas foram feitas, mas sem sucesso.



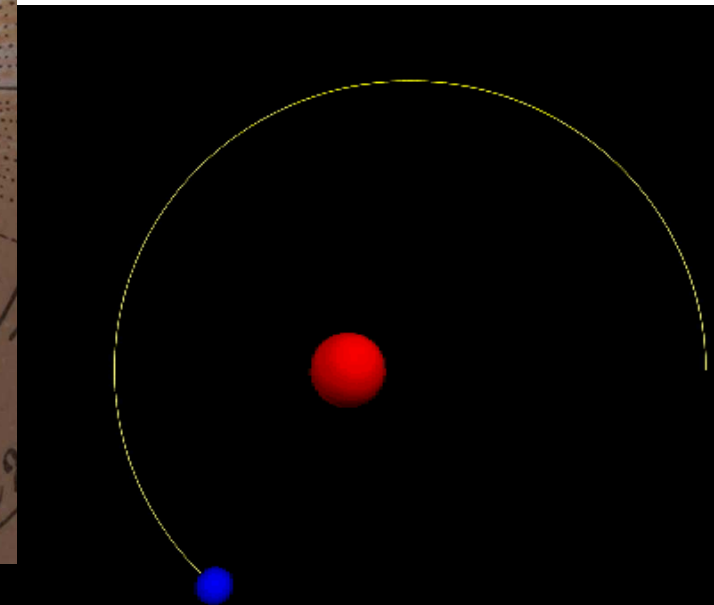
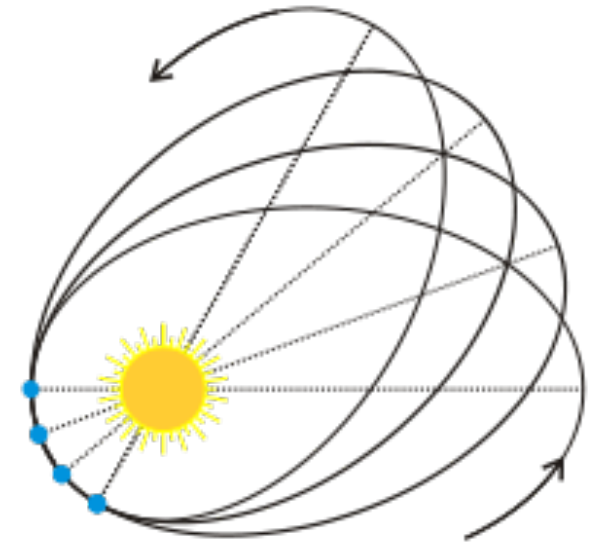
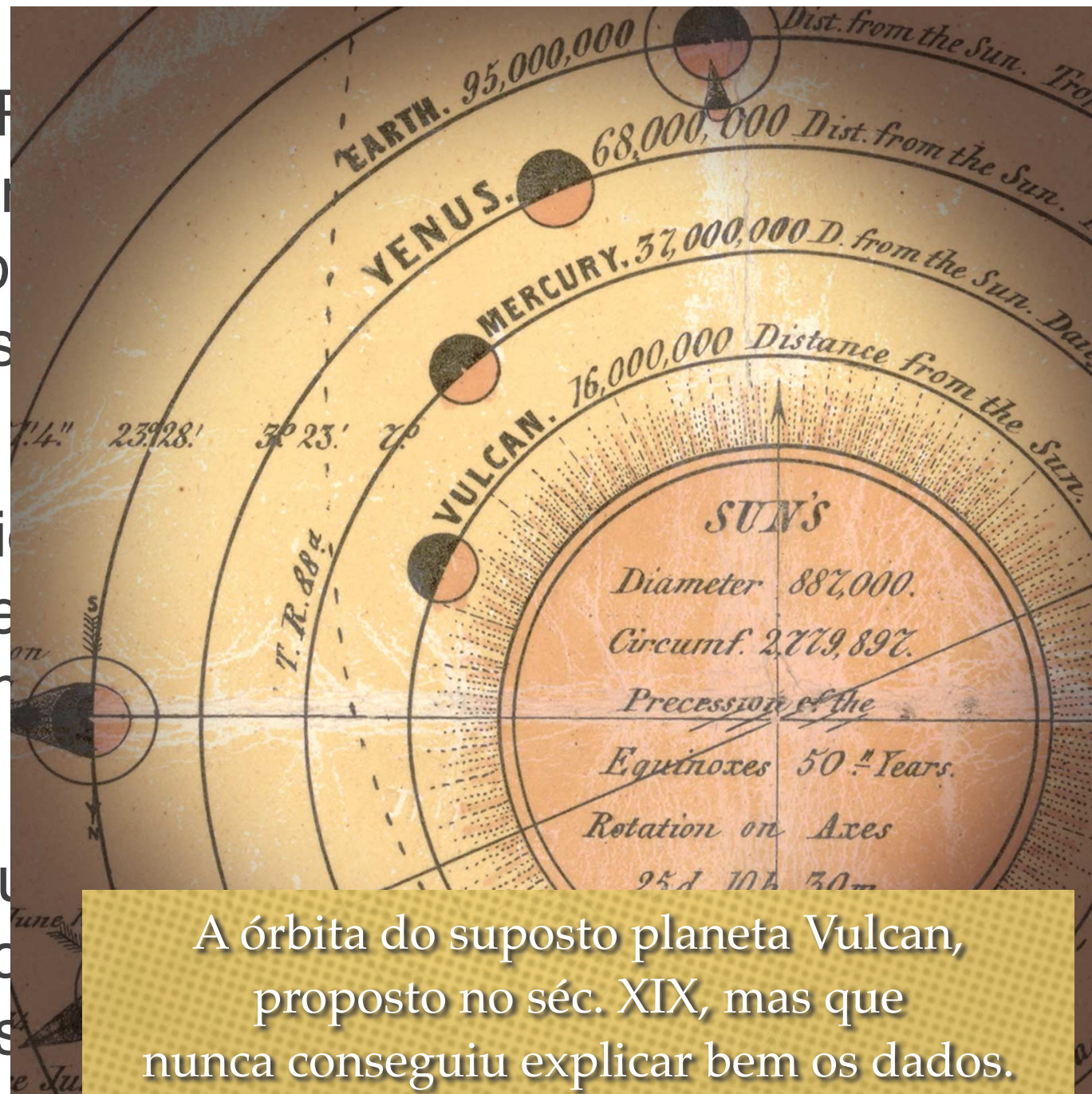
Gravitação Newtoniana:

A estranha órbita de Mercúrio...

Bem antes da R
vavam que a ór
sita... De início
rar mais e mais

Considerou-se
planetas, consi
é exatamente e
melhoravam, m
ções.

Poderia haver u
próximo a Merc
mas sem suces

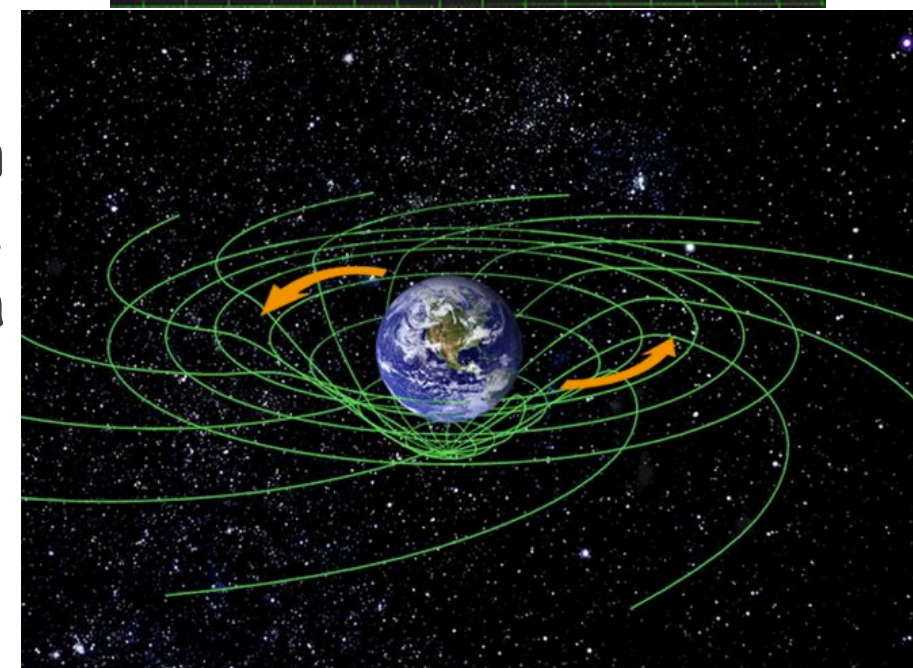
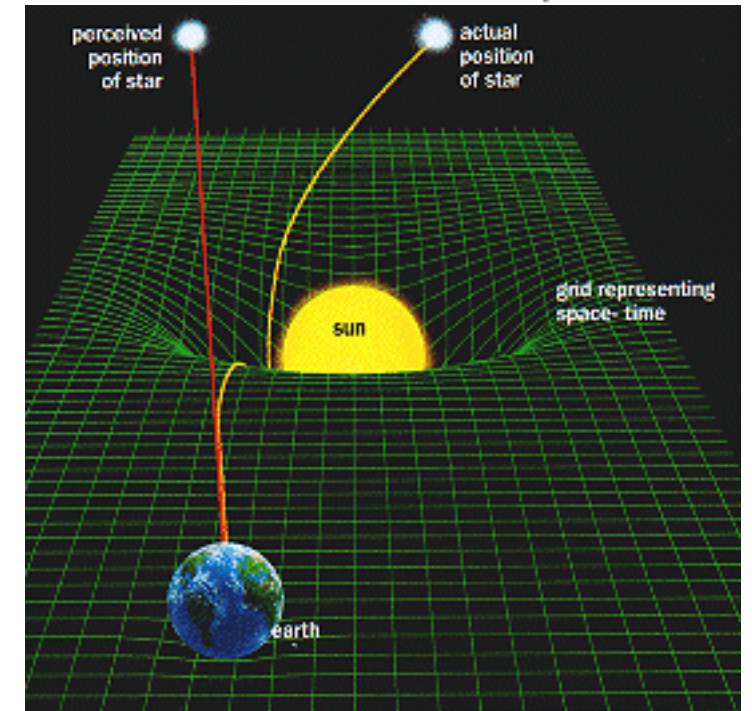
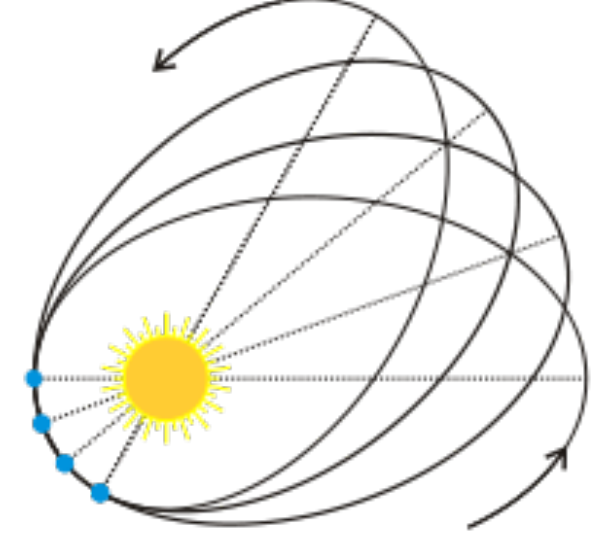


Início do séc. XX: Uma teoria dinâmica para a gravidade

A força gravitacional Newtoniana não se propaga dinamicamente, simplesmente preenche todo o espaço do universo instantaneamente. Logo, em contradição com a relatividade especial!

Einstein propõe uma nova teoria gravitacional que estende gravitação Newtoniana: Relatividade Geral.

A nova teoria não só corrige o conflito com relatividade especial como leva a diversas novidades. Mas como pode uma nova teoria ser melhor que uma anterior que já estava funcionando tão bem?



Relatividade Geral:

Limite Newtoniano

Uma das primeiras coisas que o próprio Einstein se preocupou foi que a nova teoria deveria se parecer com gravitação Newtoniana em certas situações.

Realmente, mostra-se que gravitação Newtoniana é uma boa aproximação de Relatividade Geral nas seguintes condições:

- Todas as velocidades relevantes têm de ser muito menores que a da luz.
- As massas relevantes não podem ser muito concentradas. $\left(\frac{GM}{c^2 R} \approx 0\right)$

A dinâmica dos planetas no sistema solar satisfaz essas condições com facilidade. Logo a própria Relatividade Geral prevê que gravitação Newtoniana tem de funcionar no sistema solar em boa aproximação.

Relatividade Geral:

Nua e crua!

(Aos mais sensíveis, favor fechar os olhos agora)

Relatividade Geral:

Nua e crua!

(Aos mais sensíveis, favor fechar os olhos agora)

$$G_{\mu\nu} = 8\pi G T_{\mu\nu}$$

Equação de Einstein

$$\frac{DU^\mu}{D\tau} = 0$$

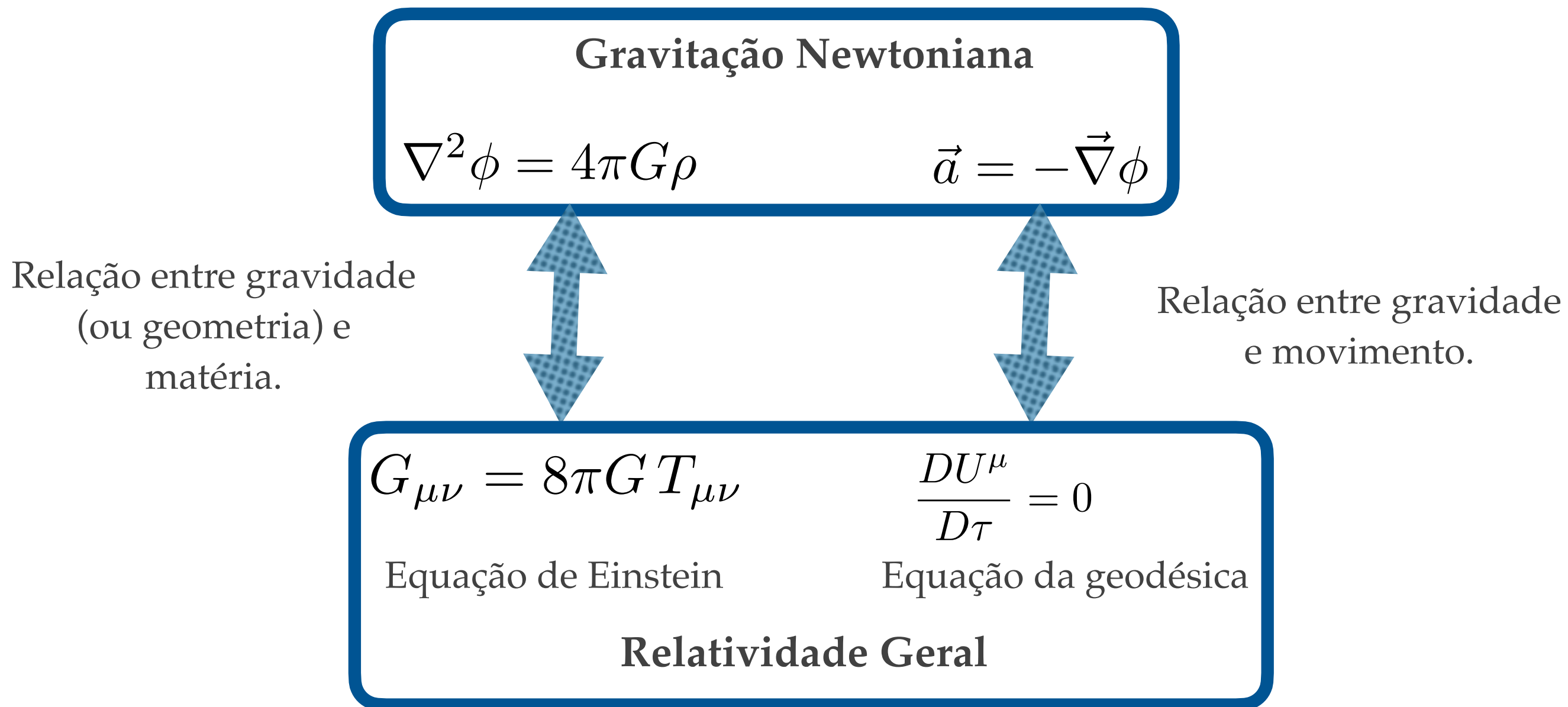
Equação da geodésica

Relatividade Geral

Relatividade Geral:

Nua e crua!

(Aos mais sensíveis, favor fechar os olhos agora)



Relatividade Geral:

Testando, 1, 2, 3...

Primeiro teste: a órbita de Mercúrio. Passou no teste!

Segundo teste (e primeira previsão): deflexão da luz. Também passou!

Terceiro teste: desvio para o vermelho gravitacional. Passou!

Quarto teste: dilatação do tempo gravitacional. Passou!

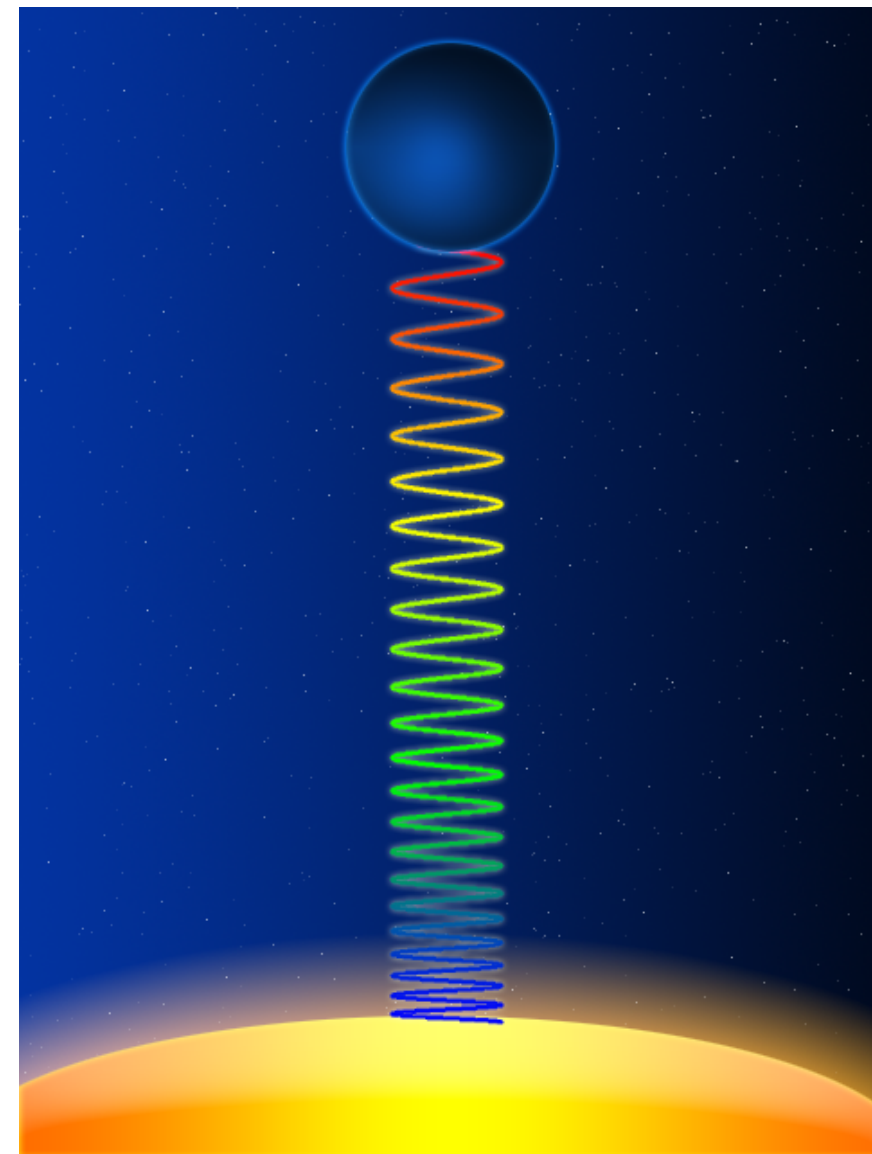
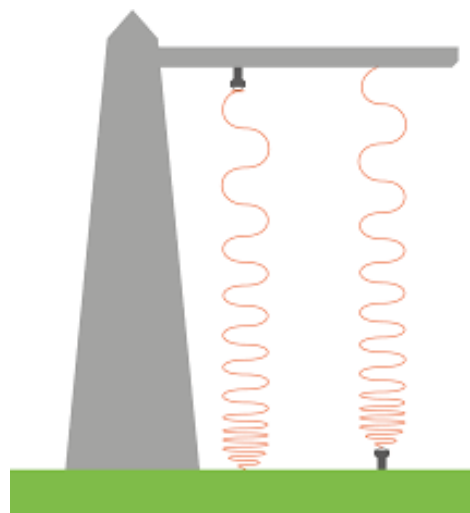
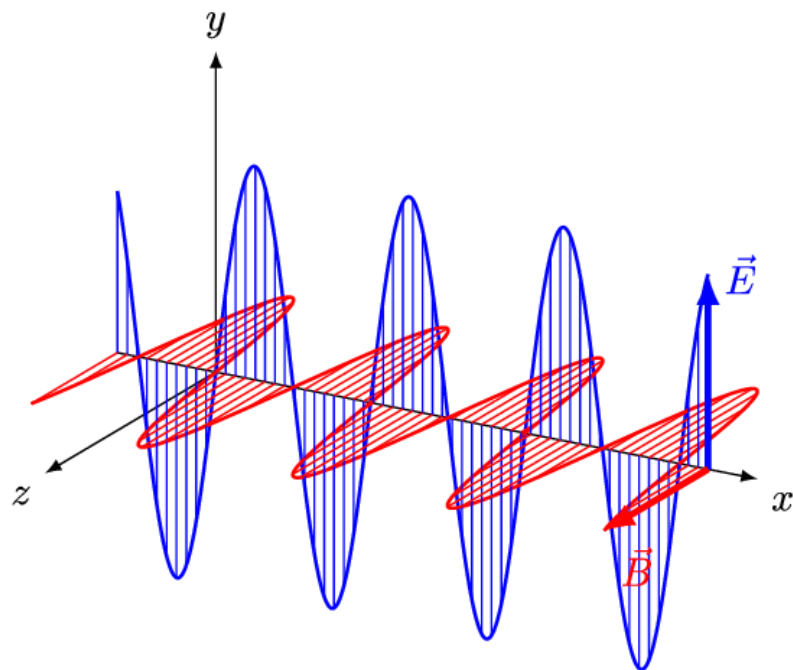
Quinto teste, sexto teste, sétimo teste.... Passou, passou e passou!

Relatividade Geral:

Desvio para o vermelho gravitacional

Tempo passa “mais lentamente” perto de grandes massas.

Logo, se próximo ao solo da Terra temos um fenômeno com um período de 1 segundo, esse mesmo fenômeno seria observado por alguém distante do solo com um período maior!

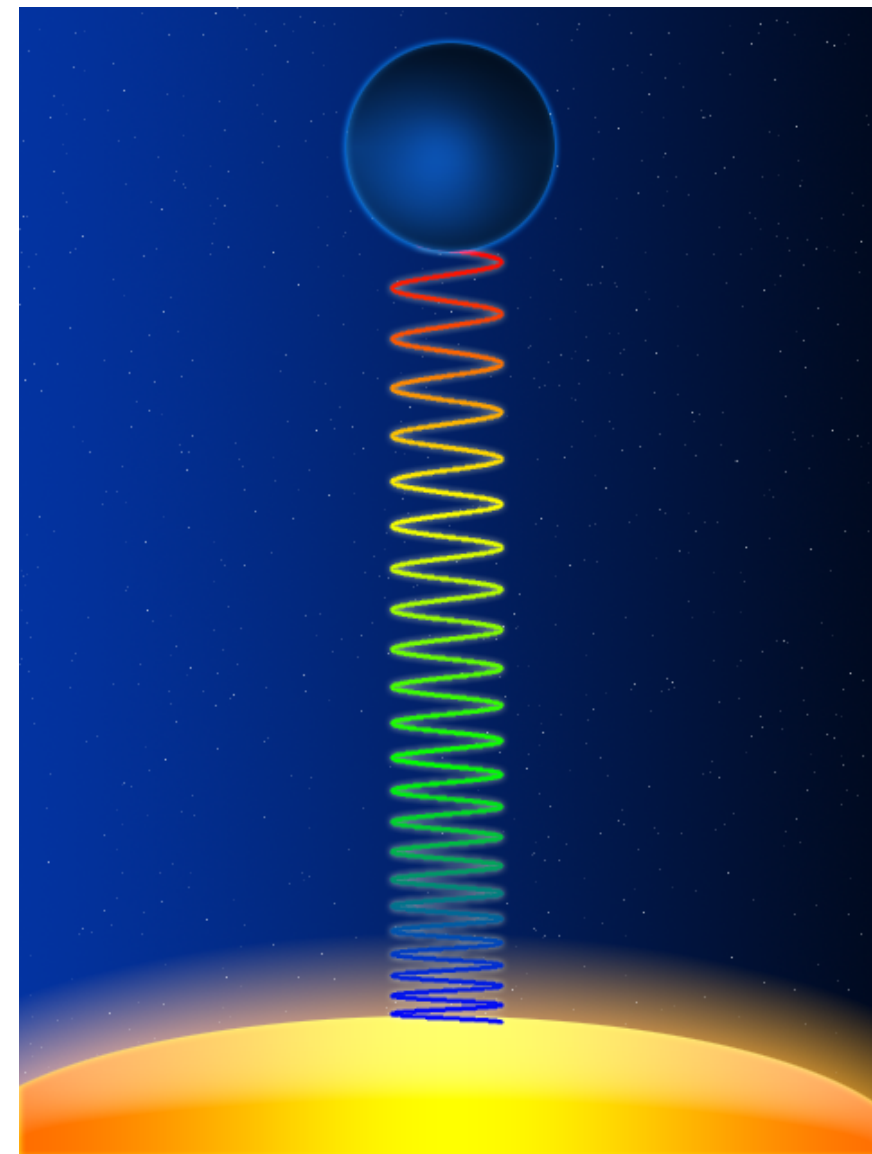
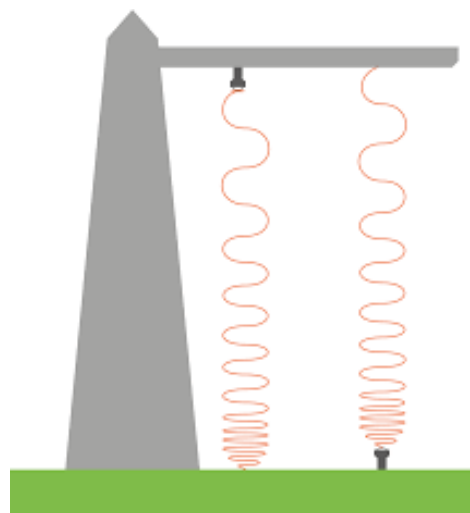
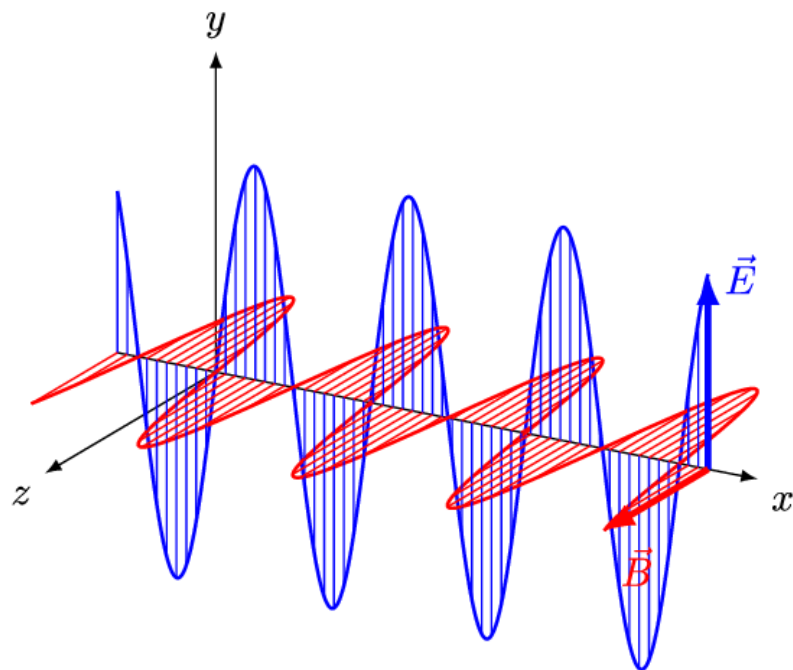


Relatividade Geral:

Desvio para o vermelho gravitacional

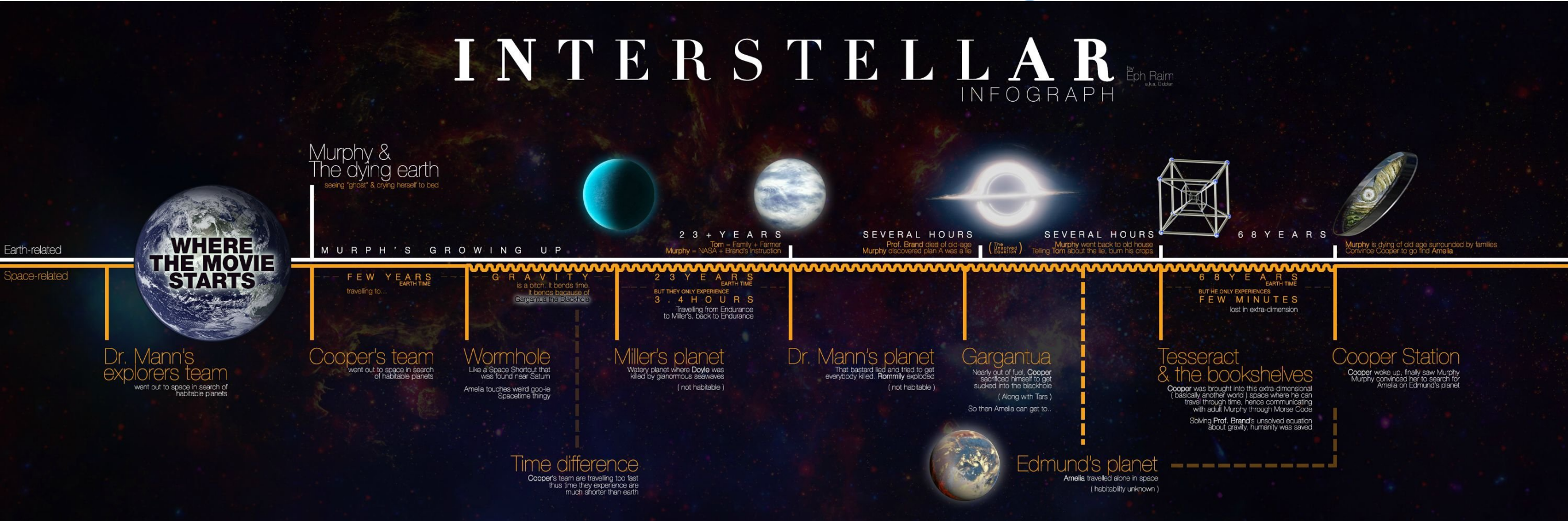
Tempo passa “mais lentamente” perto de grandes massas.

Logo, se próximo ao solo da Terra temos um fenômeno com um período de 1 segundo, esse mesmo fenômeno seria observado por alguém distante do solo com um período maior!



Relatividade Geral:

Desvio para o vermelho gravitacional

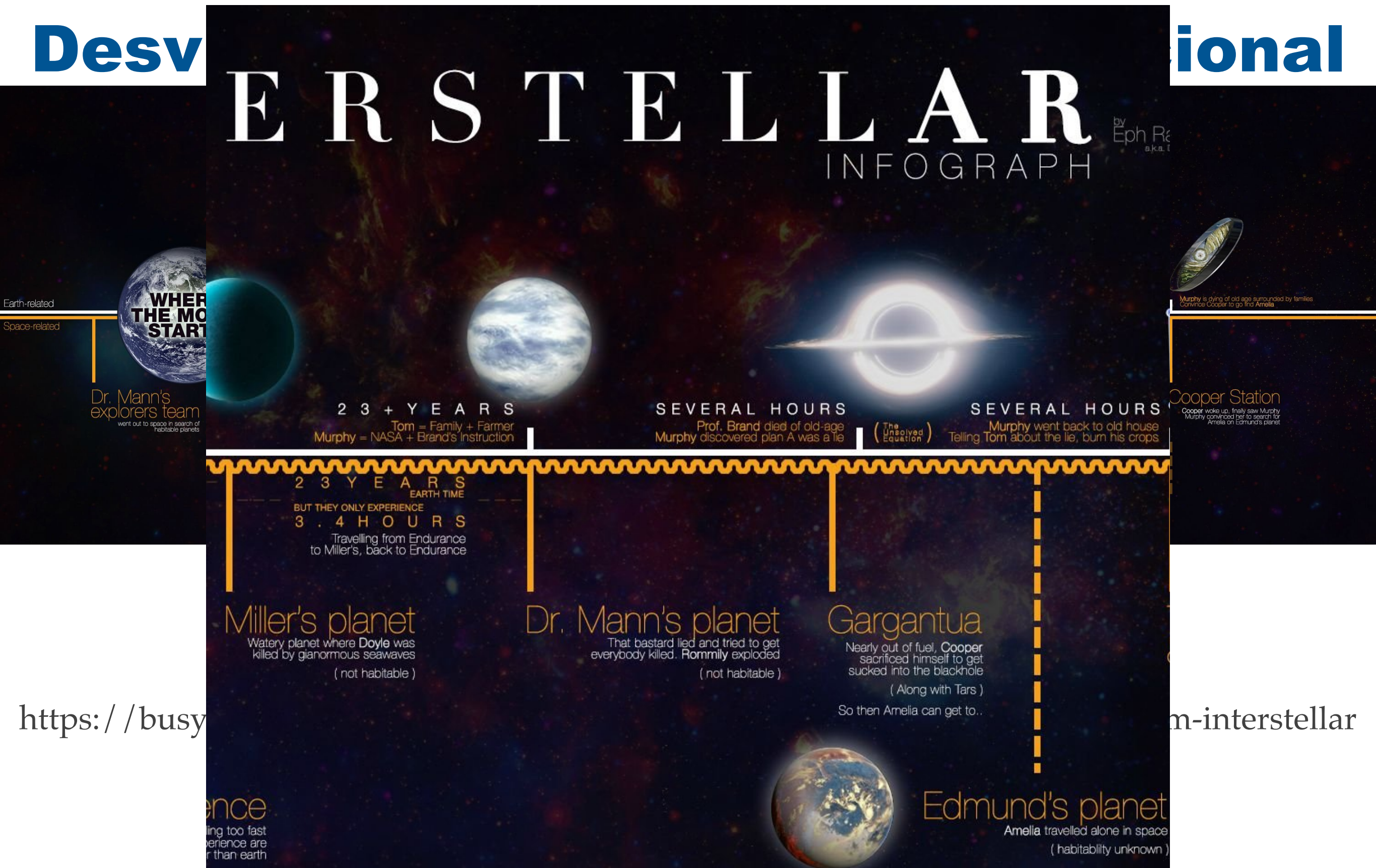


<https://busy.org/@bharathcrypto/my-mini-review-on-my-all-time-favourite-film-interstellar>

Relatividade Geral:

Desv

ional



<https://busy>

m-interstellar

Relatividade Geral:

E há uma forma mais “humana” de medir essa dilatação temporal?

Será que esse efeito de dilatação temporal não se aplicaria somente às ondas eletromagnéticas? Teria mesmo relação com nossa percepção humana de tempo?

O efeito é sabidamente pequeno aqui na Terra, não dá para perceber facilmente quando viajamos de avião ou escalamos uma alta montanha.

Mas quando alta precisão é necessária, o efeito é crucial. E é continuamente levado em consideração para o GPS.

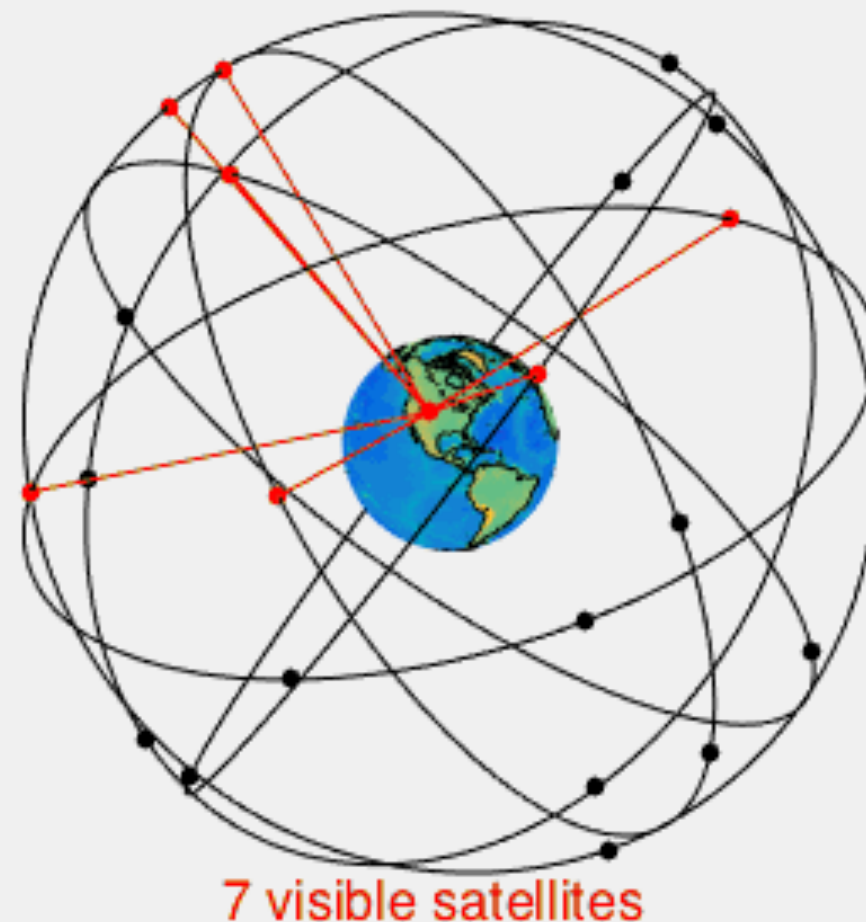
Relatividade Geral:

E há uma forma mais “humana” de medir essa dilatação temporal?

Será que esse efeito de dilatação temporal não se aplicaria somente às ondas eletromagnéticas com nossa percepção humana de tempo?

O efeito é sabidamente facilmente quando v

Mas quando alta pr
continuamente leva



não dá para perceber
mos uma alta montanha.

é crucial. E é
GPS.

E afinal funciona?

Até o momento, não há qualquer evidência clara de qualquer fenômeno de grande escala que relatividade geral não explique. Ademais, levou a várias previsões e aplicações antes não imaginadas.

A gravitação Newtoniana também segue funcionando muito bem em certos sistemas (os que satisfazem o “limite Newtoniano”). Mas, de forma geral, claramente Relatividade Geral está em melhor acordo com os dados.

E Relatividade Geral vai seguir funcionando sempre? Não sabemos... Há um indício claro de problemas: fenômenos quânticos.