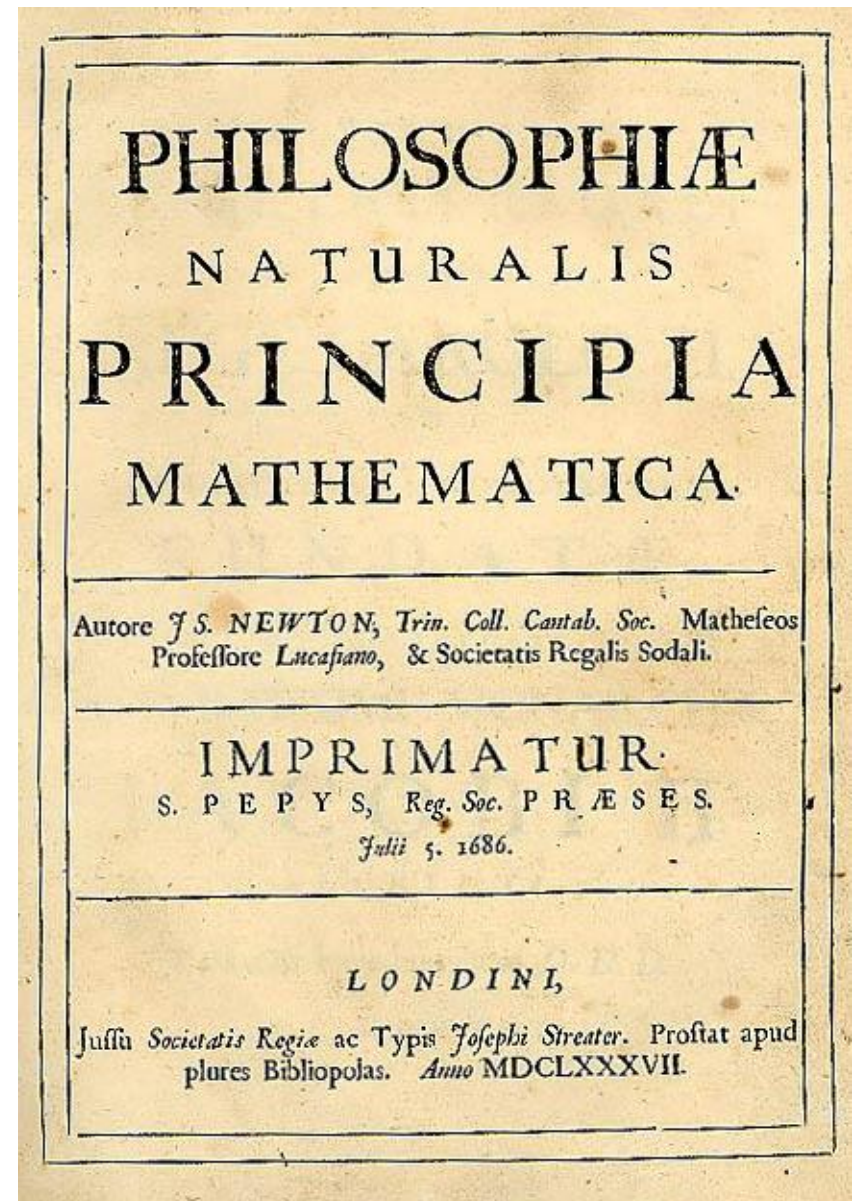


# TRIUNFO MECÂNICA NEWTONIANA

- A era pós-newtoniana foi marcada por uma série crescente de sucessos na aplicação dos princípios da dinâmica (3 Leis de Newton) e da lei da gravitação ao Sistema Solar e mesmo além dele.



# VALOR DE $G$ E MASSA DA TERRA

- Para determinar o valor da constante gravitacional  $G$ , é preciso medir a força de atração gravitacional entre duas massas conhecidas.
- Isso é muito difícil no laboratório pois a interação gravitacional é muito fraca.
- A primeira medida foi feita por Henry Cavendish (1731–1810) em 1798, utilizando um aparelho extremamente sensível, a **balança de torção**.
- Cavendish obteve  $G = 6,71 \times 10^{-11} \text{ N}\cdot\text{m}^2/\text{kg}^2$ , bastante próximo do valor atual  $G = 6,6739 \times 10^{-11} \text{ N}\cdot\text{m}^2/\text{kg}^2$ .

- Conhecendo-se o valor de  $G$ , ampliou-se o espectro de aplicação do princípio universal da gravitação de Newton.
- Foi possível, por exemplo, calcular a massa da Terra a partir da seguinte expressão vista nos slides anteriores:

$$F_{\text{queda livre}} = F_{\text{grav}} \Rightarrow mg = \frac{Gmm_T}{R_T^2} \Rightarrow m_T = \frac{gR_T^2}{G}$$

- Utilizando os valores conhecidos

$$R_T \cong 6400 \text{ km}; \quad g \cong 9,8 \text{ m/s}^2; \quad G \cong 6,71 \times 10^{-11} \text{ N.m}^2/\text{kg}^2$$

Cavendish obteve  $m_T = 5,98 \times 10^{24} \text{ kg}$ , próximo do valor atual  $m_T = 5,97 \times 10^{24} \text{ kg}$ .

- **Exercício: Refaça os cálculos.**

# MASSA DO SOL

- De acordo com a 3ª Lei de Kepler (Lei dos Períodos):

$$T^2 = k\bar{R}^3$$

onde  $T$  é o período de translação do planeta e  $\bar{R}$  é a distância média de sua órbita em torno do Sol.

- A constante  $k$  pode ser determinada a partir do movimento orbital da Terra em torno do Sol, onde  $T_T = 1 \text{ ano} = 3,16 \times 10^7 \text{ s}$  e  $\bar{R} = 1,49 \times 10^{11} \text{ m}$ .

- Além disso, Newton havia determinado a constante  $k$  como sendo (veja slides anteriores)

$$k = \frac{4\pi^2}{GM_S}$$

- Substituindo o valor de  $k$  nessa expressão tem-se:

$$M_S \cong 1,988 \times 10^{30} \text{ kg} (\approx 333.000 \text{ vezes a massa da Terra})$$

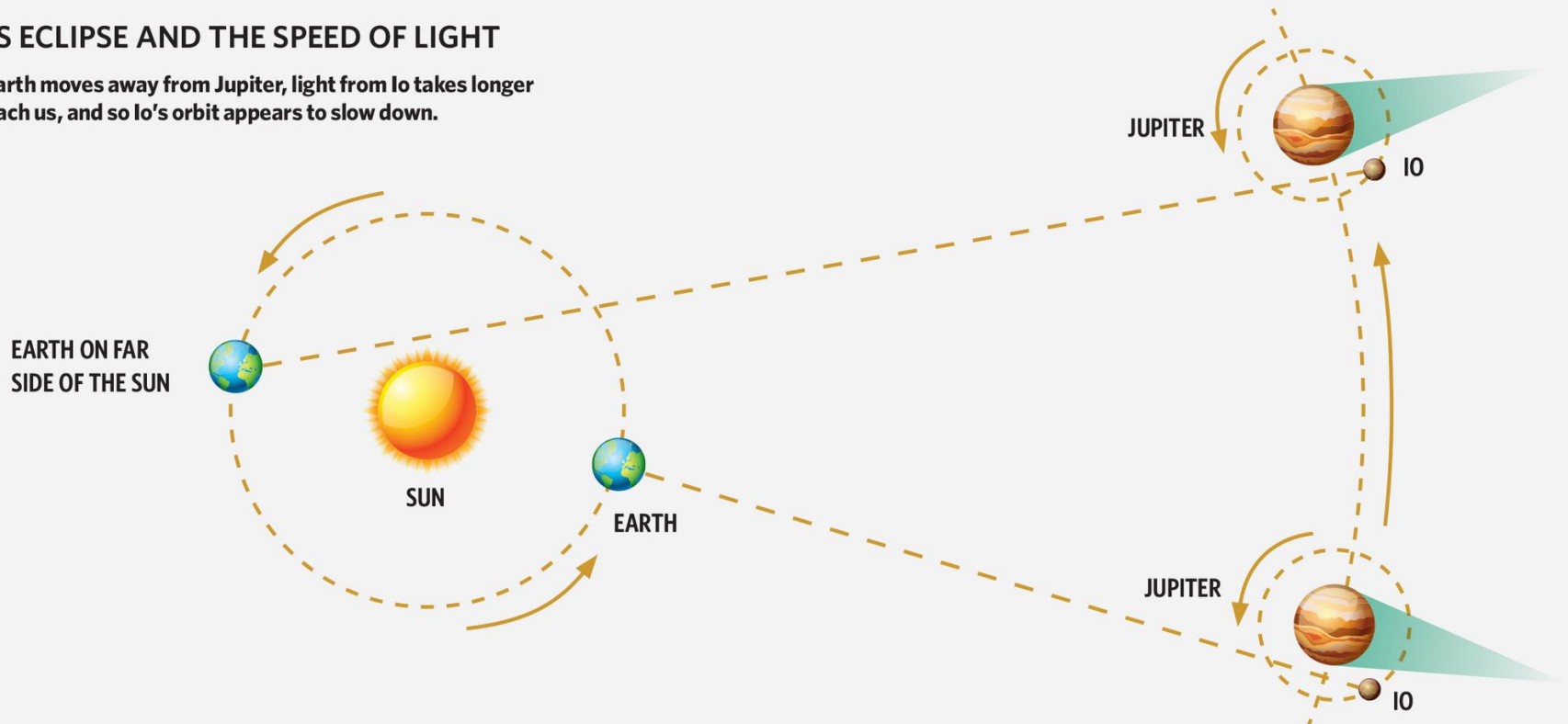
- **Exercício: Verifique esse resultado.**

# VELOCIDADE DA LUZ

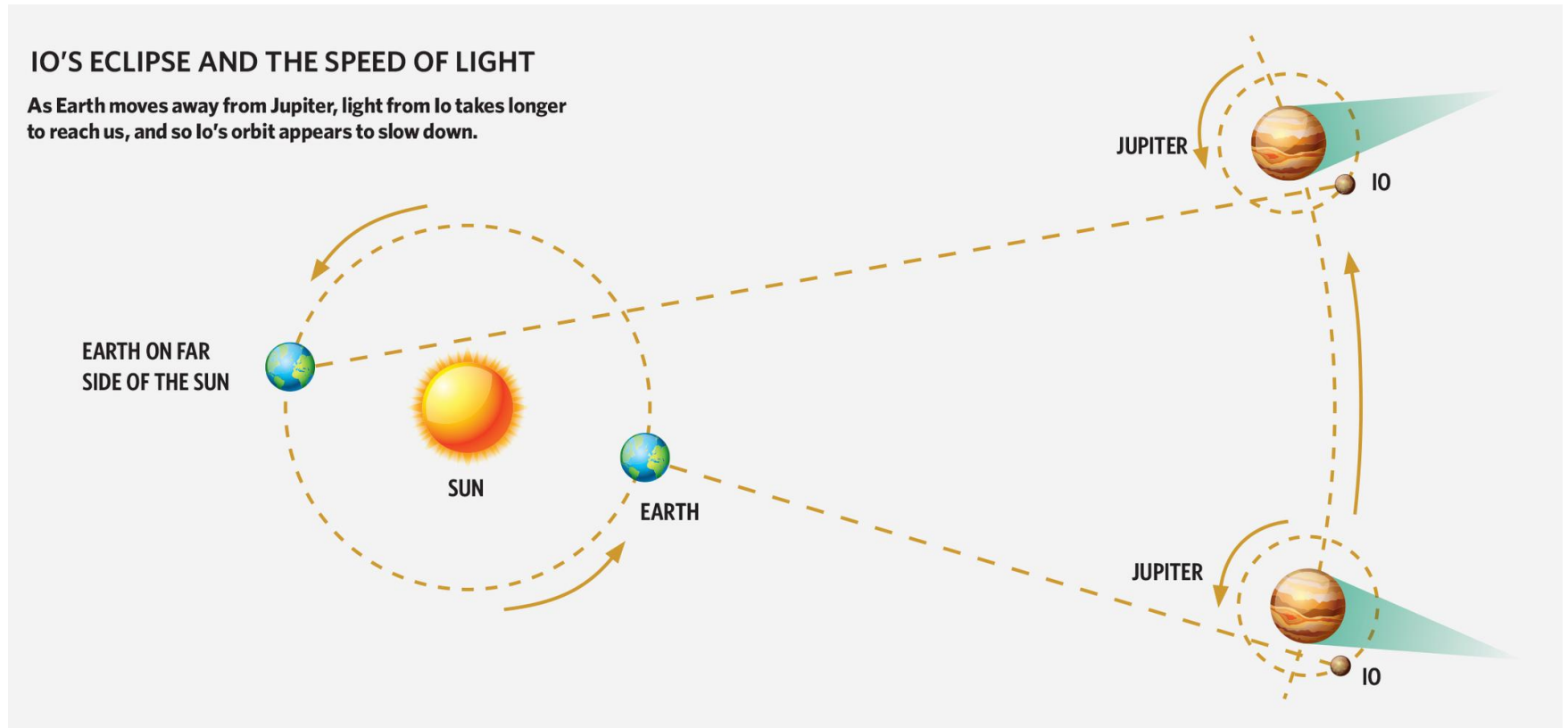
- Uma das constantes físicas mais importantes.
- Um dos satélites de Júpiter descobertos por Galileu, Io, tem um período aproximado de 42,5h. Durante parte desse período, o satélite Io permanece eclipsado por Júpiter.

## IO'S ECLIPSE AND THE SPEED OF LIGHT

As Earth moves away from Jupiter, light from Io takes longer to reach us, and so Io's orbit appears to slow down.



- Em 1675, o astrônomo Olaf Römer (1644 – 1710) verificou que o intervalo entre dois eclipses consecutivos crescia quando a Terra estava se afastando de Júpiter, e diminuía quando a Terra estava se aproximando.
- Segundo as leis de Newton, o período real deveria ser invariável.
- Portanto, Römer atribuiu as variações aparentes do período a uma velocidade finita de propagação da luz, ou seja, quando a Terra se afasta de Júpiter, a luz leva mais tempo para percorrer a distância entre os dois planetas.



# DESCOBERTA DE NOVOS PLANETAS


- A princípio, consideramos cada planeta como se movesse apenas sob a ação da atração gravitacional do Sol.
- Na realidade, o movimento de um planeta também é afetado pelas forças de atração exercidas pelos demais planetas, além de seus satélites (se os tiver), que perturbam as órbitas elípticas keplerianas.
- Estas perturbações são pequenas, porque a massa do Sol é muitíssimo maior do que a massa de qualquer planeta. Mas tiveram de ser levadas em conta, à medida que a precisão das observações astronômicas foi aumentando.
- Solução exata do problema do movimento de mais de dois corpos é extremamente difícil e só pôde ser obtida em casos especiais muito restritivos.



- Logo, utilizamos soluções aproximadas: **cálculo de perturbações** muito menores do que a força atrativa exercida pelo Sol.
- Entre 1781 e 1782, William Herschel (1738 – 1822) estudou um corpo celeste e descobriu que se tratava de um novo planeta: Urano, o primeiro planeta a ser descoberto desde a Antiguidade.
- Entretanto, as novas observações que foram sendo feitas levavam a desvios da órbita de Urano predita pelas leis de Newton.
- Essas irregularidades e desvios sistemáticos, embora pequenos (da ordem de  $20^\circ$  de arco, em média), não podiam ser explicados por perturbações devidas aos demais planetas conhecidos.



- Nessa época, o grau de confiança nas leis de Newton era tão grande que, em 1820, Friedrich Bessel (1784 – 1846) sugeriu que os desvios talvez fossem devidos a um novo planeta ainda não descoberto, mais distante que Urano.
- Contudo, determinar a órbita e a posição desse novo planeta era um problema matemático muito mais difícil do que o cálculo de perturbações.
- Em 1845, John Couch Adams (1819 – 1892) obteve uma solução para o problema, prevendo a posição do novo planeta com um erro menor do que  $2^\circ$ .
- No dia 23/09/1846, o astrônomo Johann Gottfried Galle (1812 – 1910) descobriu o planeta Netuno a cerca de  $1^\circ$  da posição predita.

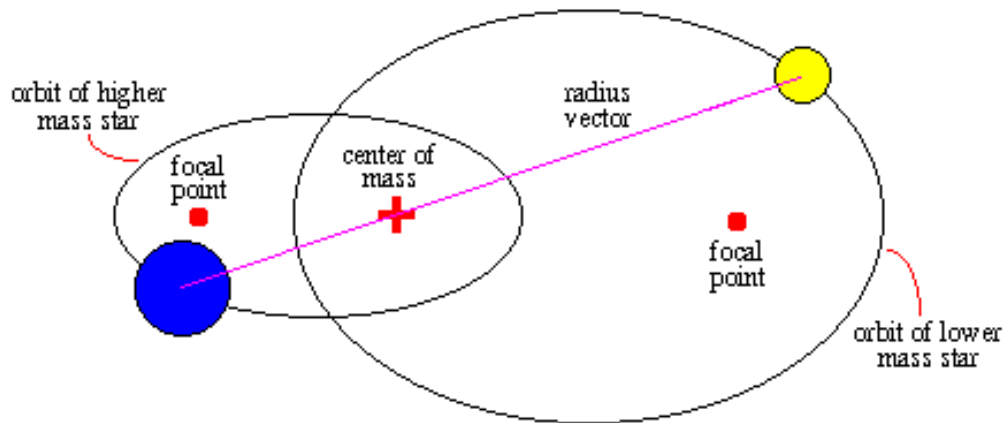
- 
- A predição da existência de Netuno foi um dos grandes triunfos da história da ciência.
  - Pela primeira vez na história, um modelo de cosmos era capaz de realizar previsões sobre novos planetas, além de descrever o movimento dos corpos celestes.
  - Isso é possível pois o modelo de Newton considera as **causas físicas** do movimento dos corpos celestes.
  - Em 1930, Clyde William Tombaugh (1906 – 1997) descobriu Plutão, com base em irregularidades observadas na órbita de Netuno.

# ALÉM DO SISTEMA SOLAR

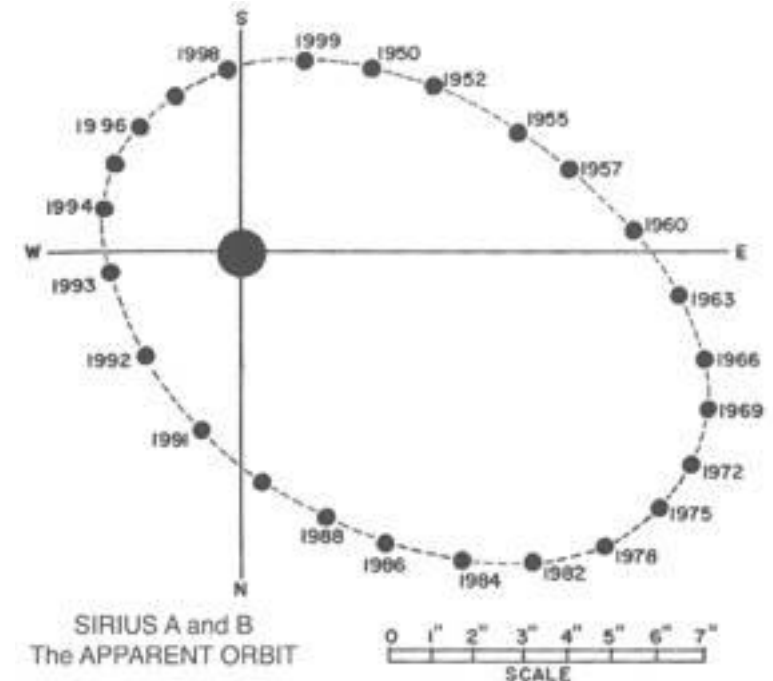
- Seria a Lei de Newton da Gravitação válida além do Sistema Solar?
- O astrônomo amador William Herschel e seu filho John descobriram que as estrelas “fixas” não são realmente fixas.
- Eles observaram vários movimentos estelares. Em particular, o Sol se desloca em direção a um ponto da constelação de Hércules, com velocidade comparável à da Terra em sua órbita.
- Os Herschels descobriram inúmeras *estrelas duplas*: um par de estrelas em órbita uma em torno da outra.
- Um exemplo é Sirius, que tem uma “companheira” bem menos luminosa, descoberta em 1862, denominada Sirius B.

- A órbita de Sirius B em torno de Sirius A (estrela Sirius mais visível) é claramente uma elipse Kepleriana, com período  $T = 50$  anos.
- Sirius está a uma distância de 8,7 anos-luz da Terra, mostrando assim que a lei da gravitação permanece válida a essa distância.

### Binary Star Orbit



<http://abyss.uoregon.edu/~js/ast122/lectures/lec10.html>

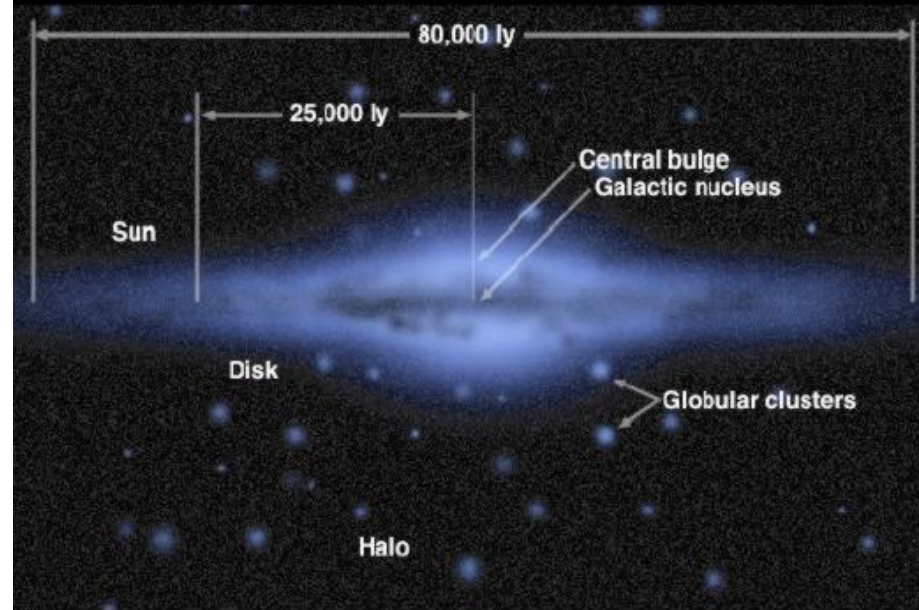
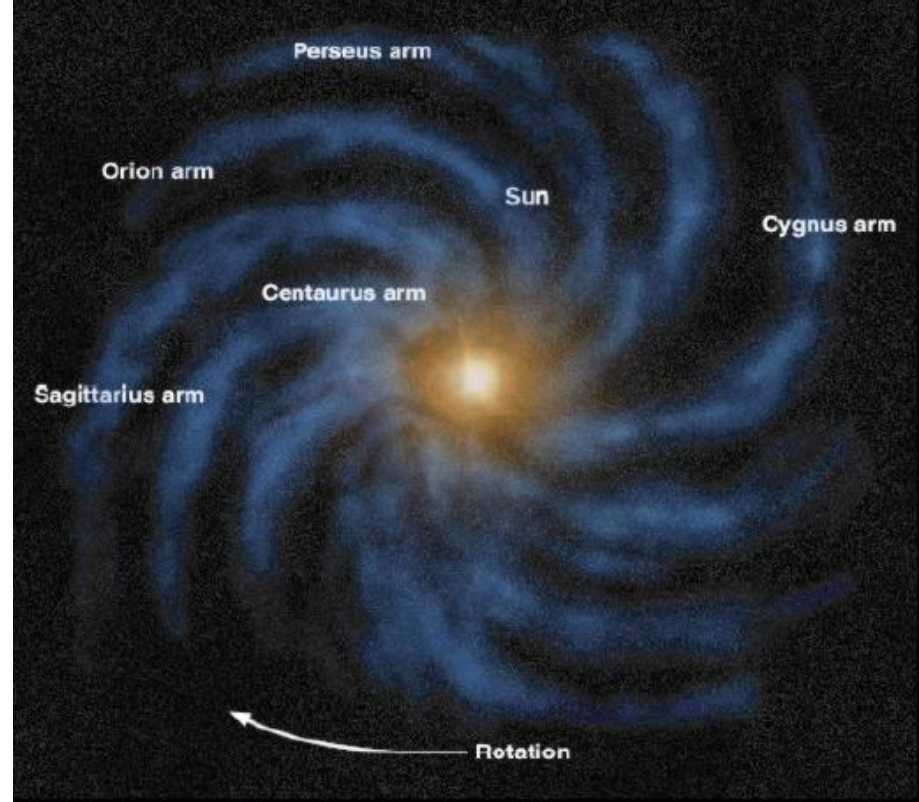


<http://vega.lpl.arizona.edu/sirius/A4.html>

- A distâncias da ordem de  $10^4$  anos-luz, observam-se aglomerados de estrelas de forma aproximadamente esférica e dimensões da ordem de  $10^5$  vezes as do Sistema Solar.

- Esses aglomerados devem ser mantidos pela atração gravitacional.

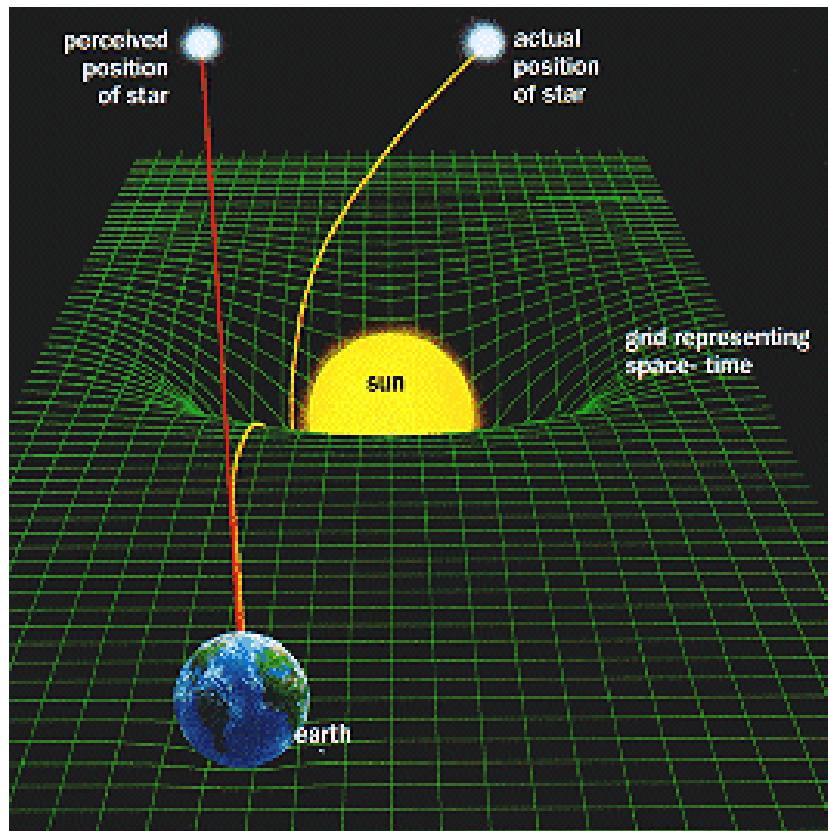
- A nossa Galáxia (Via Láctea) é uma galáxia espiral, cuja forma é resultante da condensação por atração gravitacional de uma vasta nuvem de gás em rotação lenta.



- O Sistema Solar e estrelas vizinhas estão num dos braços espirais, a cerca de 30.000 anos-luz do centro, e giram em torno dele com uma velocidade orbital da ordem de 200 km/s e um período de rotação da ordem de  $2,5 \times 10^8$  anos.
- Numa escala ainda mais vasta, observamos aglomerados de galáxias, o que também atribuímos à atração gravitacional entre elas.
- Foram observados aglomerados de até  $\sim 10^5$  galáxias e há observações de aglomerados de galáxias até a distâncias da ordem de  $10^9$  anos-luz, ou seja,  $\sim 1/10$  do raio do Universo.
- Podemos portanto corroborar a hipótese de Newton de que a lei da gravitação é realmente universal.

# SÉCULOS XX E XXI

- Em 1916, Albert Einstein (1879 – 1955) completa a **Teoria da Relatividade Geral**, na qual propõe a **curvatura do espaço-tempo** devido à presença de massas gravitacionais: a luz se curva ao passar próxima de fortes campos gravitacionais.



<http://hendrix2.uoregon.edu/~imamura/FPS/week-6/week-6.html>



- Em 1927, Georges Henri Joseph Édouard Lemaître (1894 – 1966) notou que um universo em expansão pode ser estudado de forma reversa no tempo até um único ponto original.
- Ele propôs a **teoria de expansão do Universo** e a **teoria sobre a origem do Universo** que ficou conhecida como **Big Bang**.
- **Big Bang:** Modelo cosmológico para a evolução do Universo. De acordo com o modelo, o Universo teria se expandido a partir de um único ponto com densidade e temperatura extremamente elevadas. Depois da expansão inicial, o Universo foi resfriado o suficiente para permitir a formação de partículas subatômicas. O Universo continuou a ser resfriado, dando origem a átomos e moléculas. Esses elementos primordiais se aglomeraram em nuvens gigantes e sob a ação da gravidade começaram a formar as estrelas e galáxias.

Electron

Proton

Helium nucleus

Helium atom

Galaxy

# THE BIG BANG THEORY

TIME  
BEGINSONE  
SECONDPRESENT  
DAYTime  $10^{-43}$  sec. $10^{-32}$  sec. $10^{-6}$  sec.

3 min.

300,000 yrs.

1 billion yrs.

15 billion yrs.

Temperature

 $10^{27}^{\circ}\text{C}$  $10^{13}^{\circ}\text{C}$  $10^8^{\circ}\text{C}$  $10,000^{\circ}\text{C}$  $-200^{\circ}\text{C}$  $-270^{\circ}\text{C}$ 

**1** The cosmos goes through a superfast "inflation," expanding from the size of an atom to that of a grapefruit in a tiny fraction of a second

**2** Post-inflation, the universe is a seething, hot soup of electrons, quarks and other particles

**3** A rapidly cooling cosmos permits quarks to clump into protons and neutrons

**4** Still too hot to form into atoms, charged electrons and protons prevent light from shining; the universe is a superhot fog

**5** Electrons combine with protons and neutrons to form atoms, mostly hydrogen and helium. Light can finally shine

**6** Gravity makes hydrogen and helium gas coalesce to form the giant clouds that will become galaxies; smaller clumps of gas collapse to form the first stars

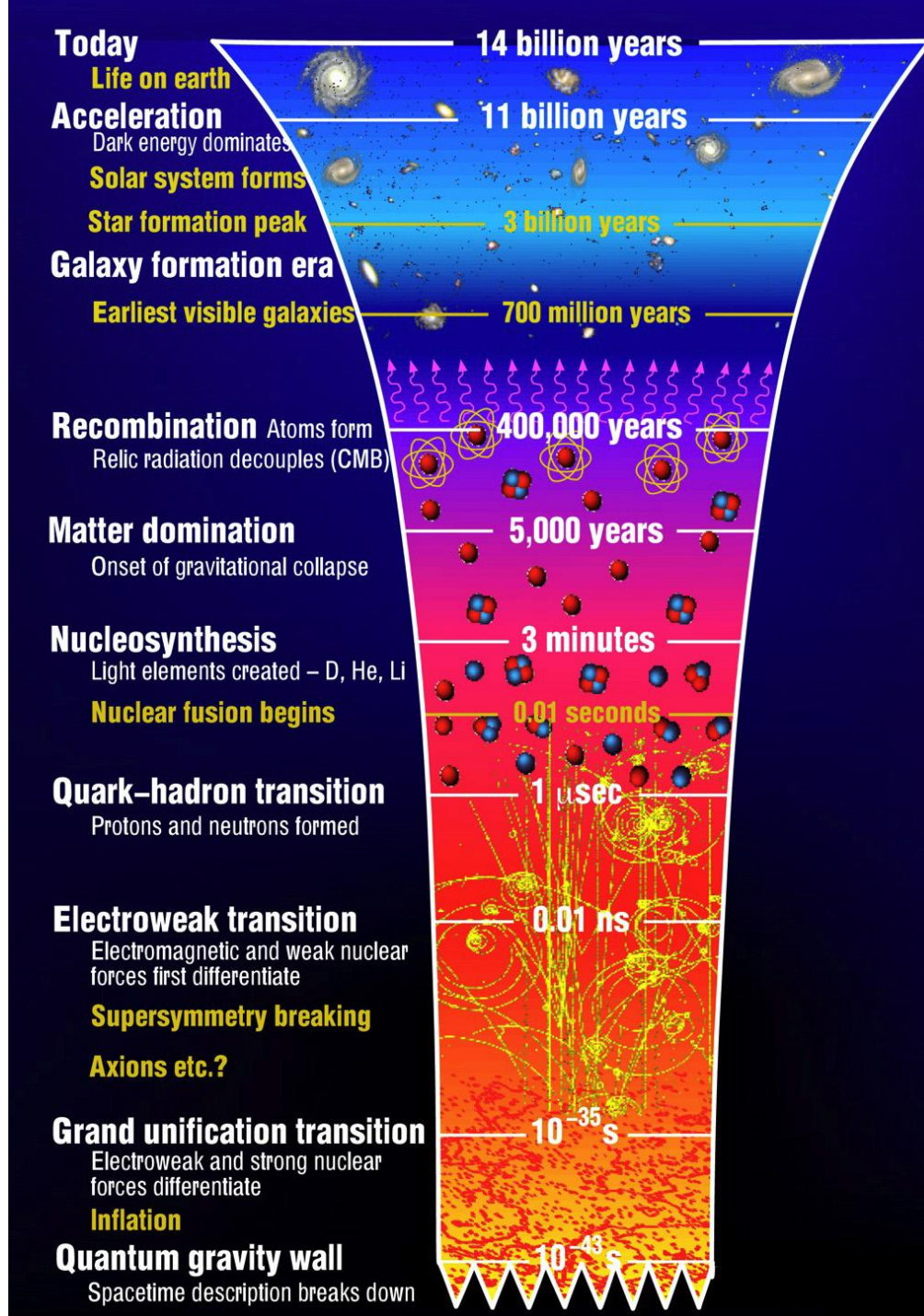
**7** As galaxies cluster together under gravity, the first stars die and spew heavy elements into space; these will eventually form into new stars and planets

NOTE: The numbers in cosmology are so great and the numbers in subatomic physics are so small that it is often necessary to express them in exponential form. Ten multiplied by itself, or 100, is written as  $10^2$ . One thousand is written as  $10^3$ . Similarly, one-tenth is  $10^{-1}$ , and one-hundredth is  $10^{-2}$ .

Source: *The Birth of the Universe*; *The Kingfisher Young People's Book of Space*

TIME Graphic by Ed Gabel





- Nos slides anteriores, foi exibido um cálculo da massa do Sol a partir do movimento de translação da Terra. Um cálculo semelhante pode ser realizado para estimar a massa da Via Láctea a partir da translação do Sol em torno do centro da galáxia.
- Entretanto, os cálculos realizados a partir do Princípio da Gravitação Universal mostram uma massa cerca de duas vezes maiores do que a massa estimada a partir de outros métodos.
- A princípio, pensou-se que a determinação através da expressão gravitacional estivesse equivocada.
- Em 1933, o astrônomo suíço Fritz Zwicky (1898 – 1974) verifica que o aglomerado de galáxias de Virgo possui massa 1000 vezes maior do que a soma das massas das galáxias individuais: possível existência de **matéria escura** e de **energia escura**.

- Atualmente, estima-se a seguinte constituição para o Universo (21/03/2013, satélite Planck, ESA and the Planck Collaboration):
- **Matéria Bariônica** (4,9% da massa-energia do Universo): moléculas, átomos, prótons, nêutrons, elétrons, etc.
- **Matéria Escura** (26,8% da massa-energia do Universo): não interage com a radiação eletromagnética, mas pode ser atraída pela gravidade e formar halos em volta das galáxias, assim como poderia também formar “galáxias”, “estrelas” e “planetas” de matéria escura, que não emitem luz.
- **Energia Escura** (68,3% da massa-energia do Universo): forma de energia desconhecida, que estaria presente em todo o Universo, possui enorme tensão e tenderia a acelerar a expansão do Universo.