



Universidade Federal do ABC



SOCIEDADE BRASILEIRA DE FÍSICA

MNPEF Mestrado Nacional Profissional em Ensino de Física



Marcos no Desenvolvimento da Física

Marco #2: O Principia

Prof. Marcelo A. Leigui de Oliveira
leigui@ufabc.edu.br

ISAACUS NEWTON EQ. AUR. ÆT. 83.

J. Vanderbank pinxit 1725

Geo. Vertue Sculpfit 1726.

PHILOSOPHIÆ
NATURALIS
PRINCIPIA
MATHEMATICA.

R. Robij
John Robijny
1827.



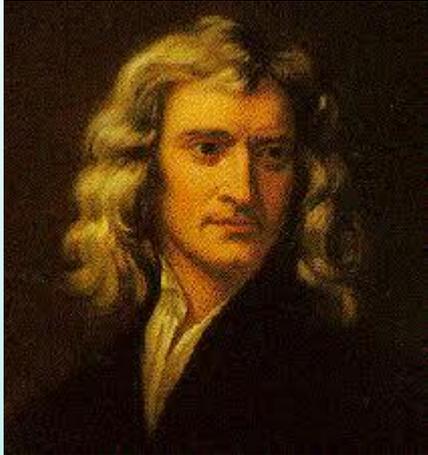
AUCTORE
ISAACO NEWTONO, EQ. AUR.

Editio tertia aucta & emendata.

LONDINI:

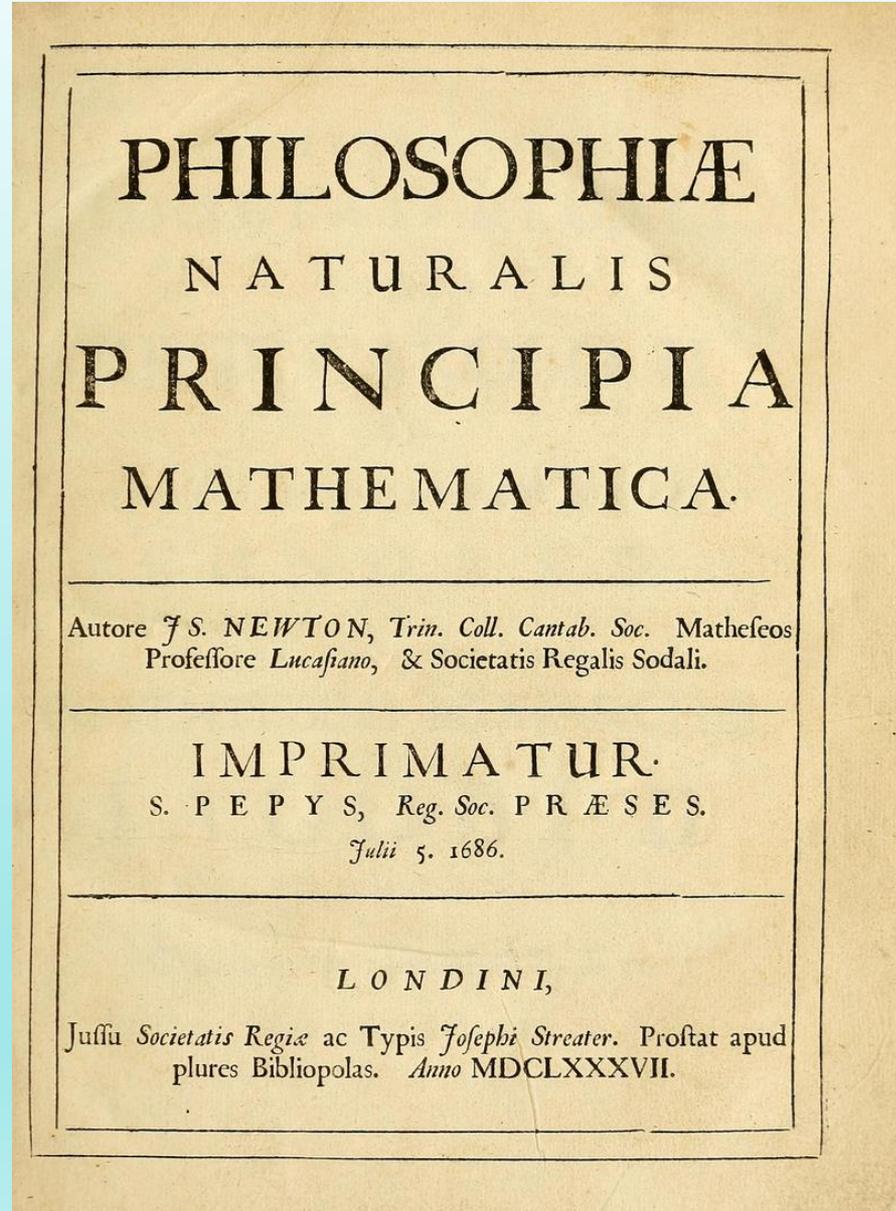
Apud GUIL. & JOH. INNYS, Regiæ Societatis-typographos.
MDCCXXVI.

Isaac Newton, *Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica*" (1687)



Sir Isaac Newton
(1642-1727)

Princípios Matemáticos
da Filosofia Natural
(1687)



PHILOSOPHIÆ
NATURALIS
PRINCIPIA
MATHEMATICA.

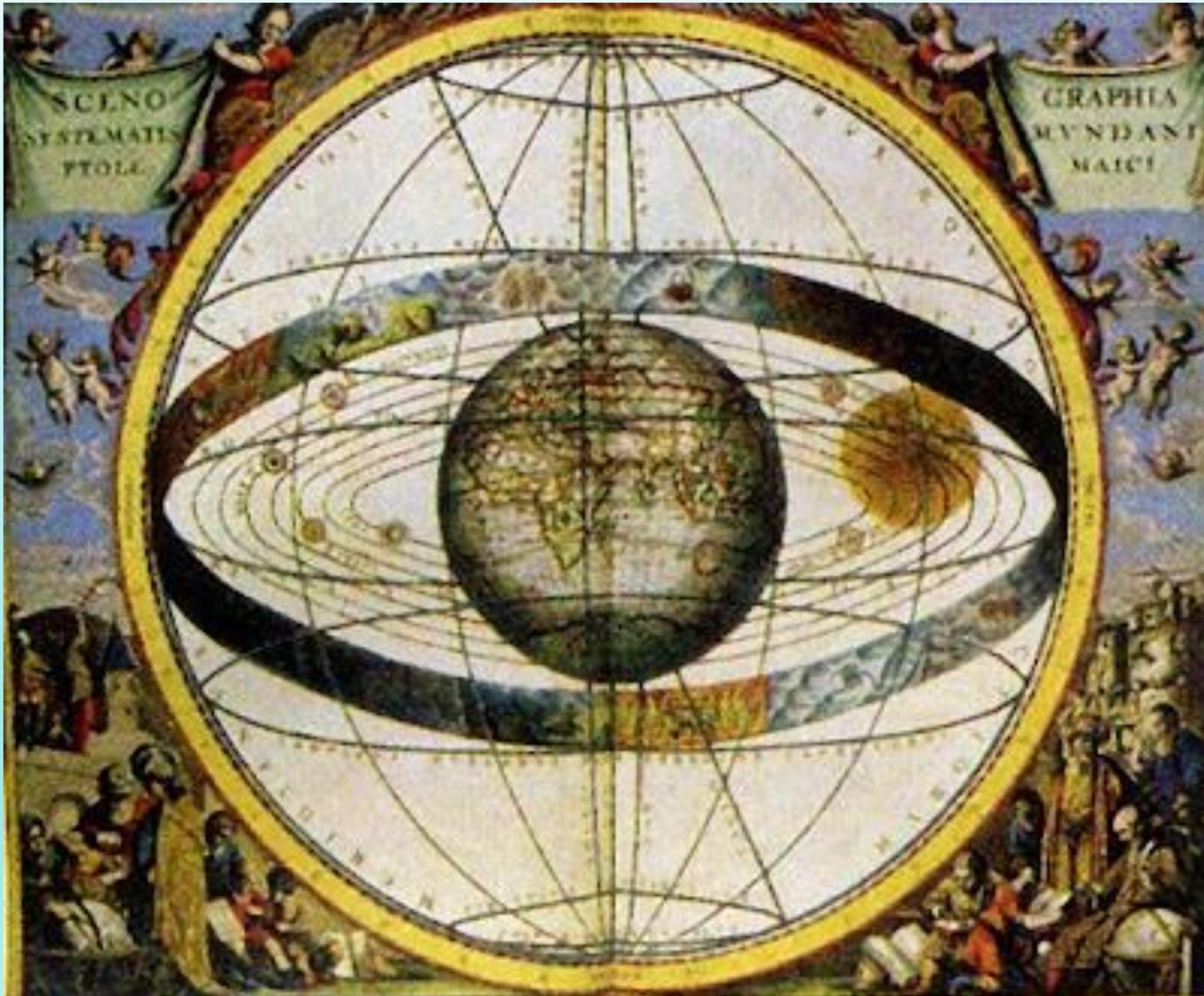
Autore *J. S. NEWTON*, *Trin. Coll. Cantab. Soc. Matheseos*
Professore Lucasiano, & Societatis Regalis Sodali.

IMPRIMATUR.
S. PEPYS, *Reg. Soc. PRÆSES.*
Julii 5. 1686.

LONDINI,

Jussu Societatis Regiæ ac Typis Josephi Streater. Prostat apud
plures Bibliopolas. Anno MDCLXXXVII.

Consenso entre os povo da Antiguidade: cosmologia geocêntrica.



GREGOS



Os físicos jônicos:

physis (em grego Φύσις, “natureza”)

Thales de Mileto (c 625-c 547 a.C.): água

Anaximandro de Mileto (c 611 – c 547 a.C.): ápeiron (indefinido)

Anaxímenes de Mileto (c 570 – c 500 a.C.): ar

Xenófanes de Colofão (c 570 – c 480 a.C.): terra

Heráclito de Éfeso (c 540 – c 470 a.C.): fogo

ARISTÓTELES



Platão (c 427 – c 347 a.C.)
e **Aristóteles** (384 – c 322 a.C.),
seu discípulo.



- Universo geocêntrico (e finito);
- Esferas naturais dos elementos (“caem” para elas);
- Mundo mutável e imperfeito (sublunar) e mundo imutável e perfeito (supralunar), feito de éter ;
- Camada de “ar superior” entre a esfera de fogo e a lunar, onde os fenômenos *meteorológicos* acontecem.

ARISTÓTELES



Aristóteles
(384-322 a.C.)



1. **Lugares naturais:** cada elemento preferia estar em um lugar diferente e específico no espaço, em relação ao centro da Terra, que também é o centro do universo.

ARISTÓTELES



Aristóteles
(384-322 a.C.)



2. **Gravidade / Leviandade:** para alcançar este lugar específico, os objetos sofreriam a ação de uma força para baixo ou para cima.

ARISTÓTELES



Aristóteles
(384-322 a.C.)



3. **Movimiento retilíneo:** é o movimento em resposta a esta força: em linha reta a uma velocidade constante.

ARISTÓTELES



Aristóteles
(384-322 a.C.)



4. **Relação com densidade e velocidade:** a velocidade é inversamente proporcional à densidade do meio.

$$F \propto 1/\rho$$

ARISTÓTELES



Aristóteles
(384-322 a.C.)



5. **Impossibilidade da existência do vácuo:** no vácuo o movimento teria velocidade infinita.

$$F \propto 1/\rho$$

ARISTÓTELES



Aristóteles
(384-322 a.C.)



6. **O éter preenchendo o espaço:** todos os pontos do espaço são preenchidos pela matéria.

ARISTÓTELES



Aristóteles
(384-322 a.C.)



7. **Um universo finito:** além da esfera das estrelas não há nada, nem o vácuo.

ARISTÓTELES



Aristóteles
(384-322 a.C.)



8. **Teoria do *continuum***: entre os átomos existiria o vácuo, por isso a matéria não poderia atômica, mas infinitamente divisível.

ARISTÓTELES



Aristóteles
(384-322 a.C.)



9. **Quintessência:** objetos muito acima da superfície da Terra não são constituídos por matéria originalmente terrestre, mas de *éter*.

ARISTÓTELES



Aristóteles
(384-322 a.C.)



10. Cosmo incorruptível e eterno: o Sol e os planetas são esferas perfeitas que não se alteram.

ARISTÓTELES



Aristóteles
(384-322 a.C.)

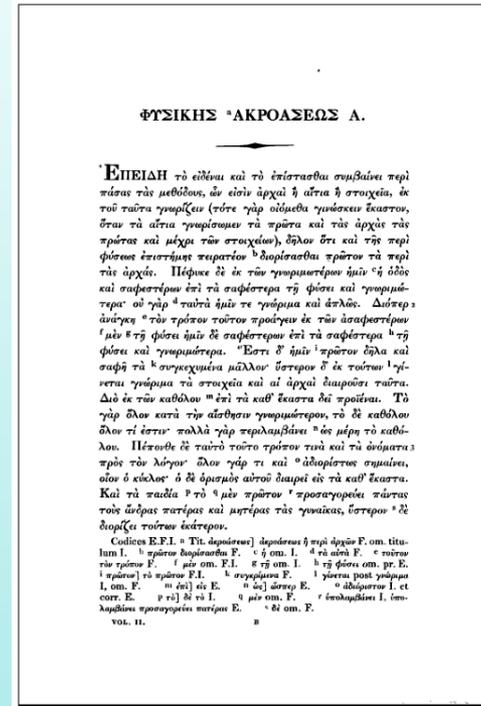


11. Movimiento circular: os planetas descrevem um movimento circular perfeito.

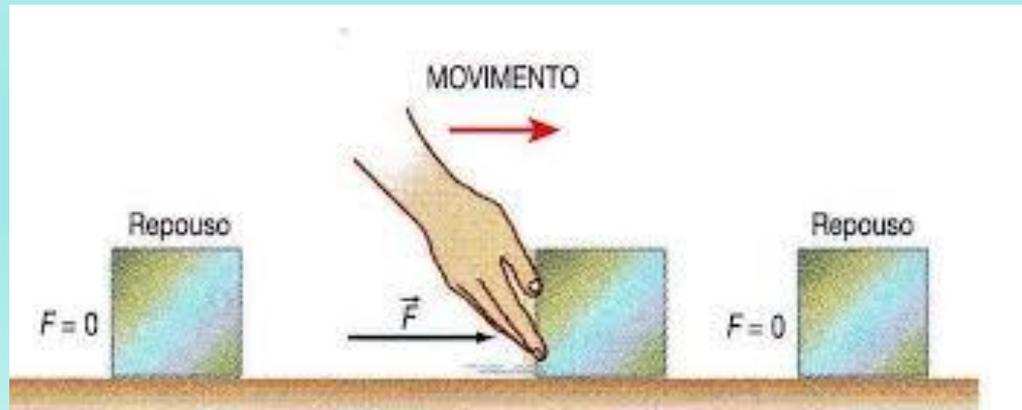
ARISTÓTELES



Aristóteles
(384-322 a.C.)



Página de Física, de Aristóteles (edição 1837) – 8 vols.



$$\vec{F} \propto \vec{v}$$

ÁRABES

Ja'far Muhammad ibn Mūsā ibn Shākir (800-873), um dos irmãos Banu Muça.

Escreveu “*O movimento astral*” e “*A força de atração*”, onde ele relata sua descoberta de que havia uma força de atração entre os corpos celestes, nada mais que o prenúncio da lei da gravitação universal de Newton.

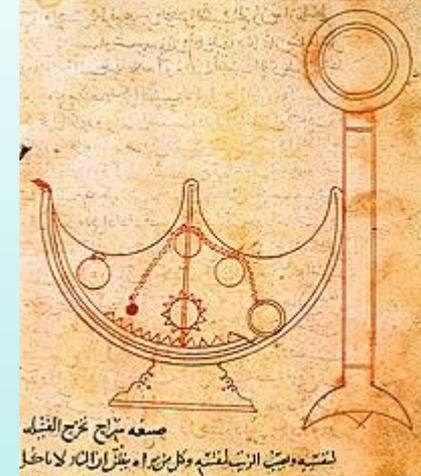


Ilustração de uma lâmpada de auto-corte, do tratado “Dispositivos Mecânicos”, de Banu Muça.

Abū ‘Alī al-Ḥasan ibn al-Haytham (965 – 1040), o “físico” Alhazen.

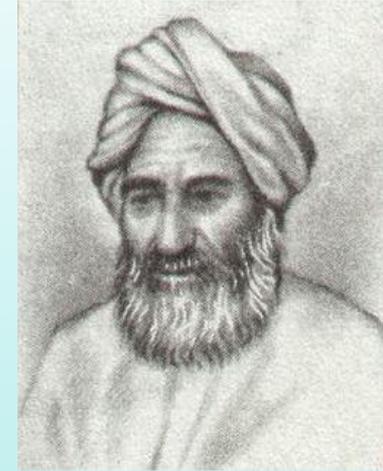
Discutiu a teoria de atração entre massas e, ao que tudo indica, ele conhecia a intensidade da aceleração devida à gravidade, além do fato de que o movimento dos corpos celestes "eram justificados por leis naturais".



ÁRABES

Abū Rayhān al-Bīrūnī, Albiruni (973-1048)

Foi o primeiro a constatar que a aceleração está relacionada a um movimento não-uniforme, fato que é uma pequena parcela do conteúdo da segunda lei de Newton. Durante um debate com Avicena, al-Bīrūnī também criticou a teoria aristotélica da gravidade ao negar a existência da levitação ou gravidade nas esferas celestes, além da noção do movimento circular como sendo uma propriedade inerente dos corpos celestes.



Hibat Allah Abu'l-Barakat al-Baghdaadi (1080-1165).

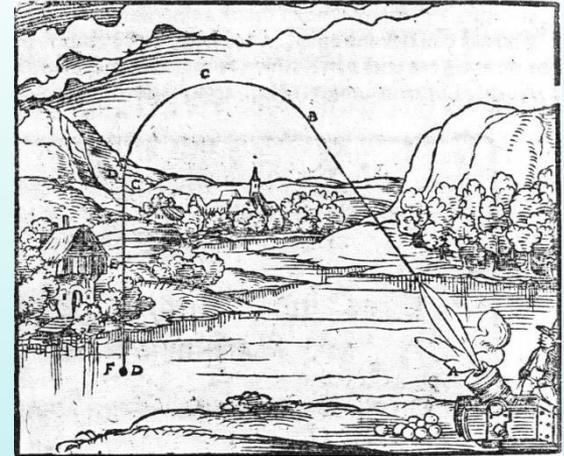
Escreveu uma crítica à física aristotélica, intitulada *al-Mu'tabar*, onde ele nega a ideia de Aristóteles de que uma força constante produz um movimento uniforme, ao constatar que uma força, quando aplicada continuamente, produz uma aceleração, um princípio fundamental da mecânica clássica e uma forma primitiva da segunda lei de Newton para o movimento. Tal como Newton, al-Baghdaadi descreve a aceleração como a taxa de variação da velocidade.

$$\vec{F} \propto \vec{a}$$

TEORIA DO ÍMPETO

- João Filopono (490-570): aceitou parcialmente a teoria de Aristóteles de que "a continuação do movimento depende da ação contínua de uma força", mas incluiu que o corpo arremessado adquire uma força motriz ou *inclinação* para o movimento forçado do agente que produz a movimento. No entanto, argumentou que essa virtude impressa era temporária, assim o movimento violento produzido chega ao fim, o corpo volta ao movimento natural.
- Avicena (980-1037) concordou que um impulso é dado a um projétil pelo lançador, mas o considerava persistente, exigindo forças externas, como a resistência do ar para dissipá-la. Avicena fez distinção entre 'força' e 'inclinação' (chamada de "mayl"). Ele concluiu que a continuação do movimento é atribuída à inclinação que é transferida para o objeto, e esse objeto estará em movimento até que o mayl se esgote. Ele também afirmou que um projétil no vácuo não pararia a menos que recebesse uma ação, o que é consistente com o conceito de inércia de Newton.
- Jean Buridan (1295-1358) cunhou o termo "ímpeto".
- Giambattista Benedetti (1530-1590) modificou a teoria crescente do ímpeto para envolver apenas o movimento linear:

"...[Qualquer] porção da matéria corporal que se move por si mesma quando um ímpeto foi impresso nela por qualquer força motriz externa tem uma tendência natural de se mover em um caminho retilíneo, não curvo."



TEORIA DO ÍMPETO

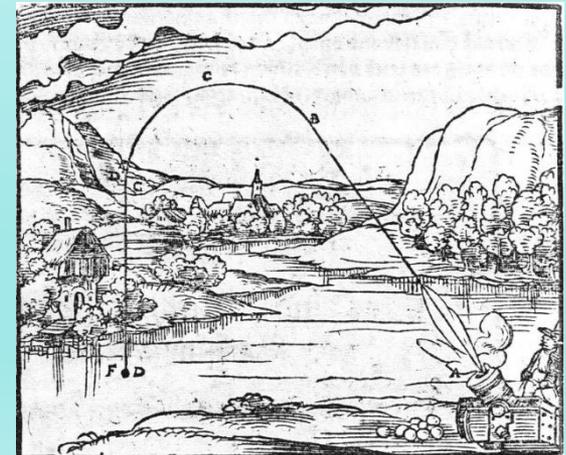
- Jean Buridan (1295-1358) mais tarde descreveu a inclinação como “ímpeto”:

ímpeto = peso x velocidade

“Quando um motor coloca um corpo em movimento, ele implanta nele um certo ímpeto, isto é, uma certa força que permite a um corpo se mover na direção em que o motor o inicia, seja para cima, para baixo, para os lados ou em um círculo. O ímpeto implantado aumenta na mesma proporção que a velocidade. É por causa desse ímpeto que uma pedra se move depois que o atirador parou de movê-la. Mas por causa da resistência do ar (e também por causa da gravidade da pedra) que se esforça para movê-lo na direção oposta ao movimento causado pelo ímpeto, o último vai enfraquecer o tempo todo. Portanto, o movimento da pedra será gradualmente mais lento e, finalmente, o ímpeto é tão diminuído ou destruído que a gravidade da pedra prevalece e move a pedra em direção ao seu lugar natural.”

“Quando algo move uma pedra com violência, além de impor-lhe uma força real, imprime nela um certo ímpeto. Da mesma forma, a gravidade não só dá movimento a um corpo em movimento, mas também dá a ele uma força motriz e um ímpeto [...]”.

“Os movimentos dos céus estão submetidos às mesmas leis dos movimentos das coisas cá de baixo, a causa que mantém as revoluções das esferas celestes é a mesma que mantém a rotação do rebole do ferreiro; há uma Mecânica única pela qual se regem todas as coisas criadas, a esfera do Sol e o pião que o menino põe em rotação. Jamais houve, talvez, no domínio da ciência física, revolução tão profunda, tão fecunda quanto esta.”



TEORIA DO ÍMPETO

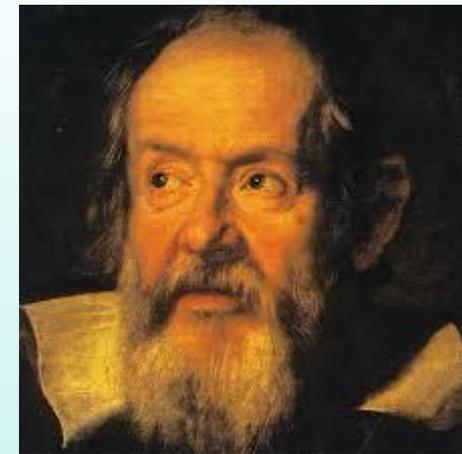
- Galileu Galilei (1564-1642):

“O corpo pesado em queda adquire ímpeto suficiente [na queda de uma determinada altura] para carregá-lo de volta a uma altura igual.”
[*Diálogo sobre os dois principais sistemas do mundo*, 1632].

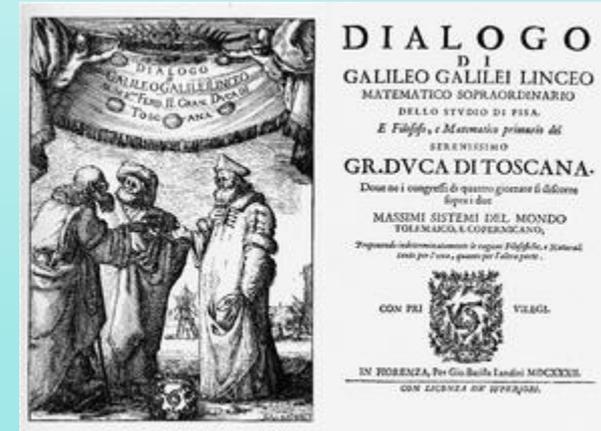
O experimento (de pensamento) do túnel:



Uma bala de canhão caindo em um túnel, indo direto para o centro da Terra e saindo do outro lado, iria além do centro e subir na superfície oposta para a mesma altura da qual caiu do outro lado, impulsionado para cima, passando do centro pelo ímpeto criado gravitacionalmente que acumulou continuamente ao cair para o centro.



Galileu Galilei
(1564-1642)



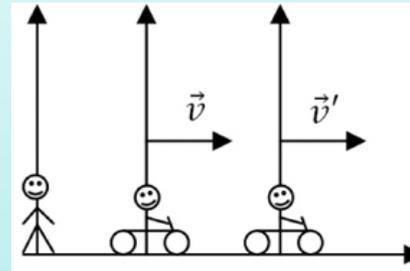
GALILEU GALILEI



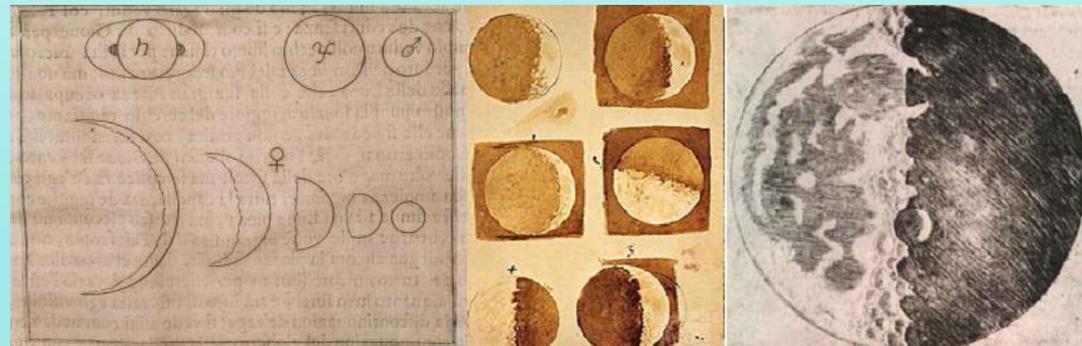
Galileu Galilei
(1564-1642)

Galileu Galilei (1564-1642):

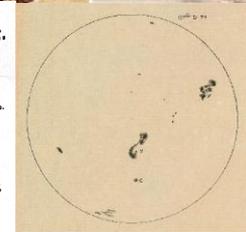
- Frequentemente é referenciado como "pai da astronomia observacional", "pai da física moderna", "pai do método científico" e "pai da ciência moderna".
- Princípio da relatividade (transformações de Galileu):
- Movimento de projéteis
- Queda livre:



- Inércia
- Pêndulos
- Hidrostática
- Termoscópio
- Precursor do uso do telescópio em astronomia
- Defensor do heliocentrismo

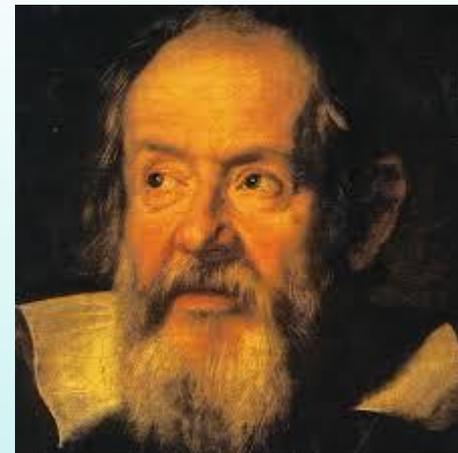


Ori.	*	*	○	*	Occ.
Ori.	○	*	*	*	Occ.
Ori.	*	*	○		Occ.

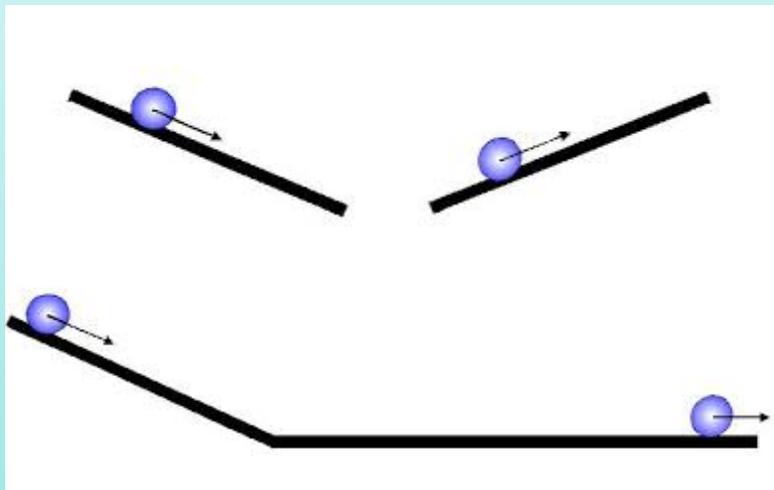


GALILEU GALILEI

Galileu foi um dos primeiros pensadores modernos a afirmar claramente que as leis da natureza são matemáticas. Em *Il Saggiatore*, ele escreveu "A filosofia está escrita neste grande livro, o universo ... Está escrito na linguagem da matemática e seus caracteres são triângulos, círculos e outras figuras geométricas; ... "



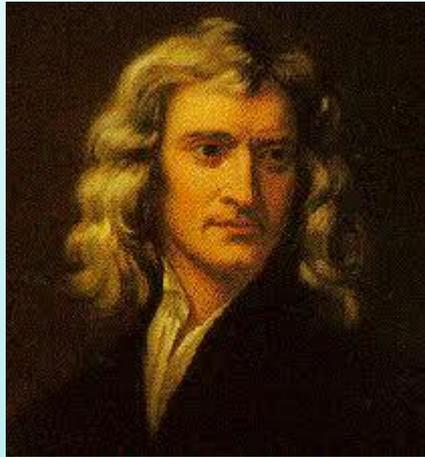
Galileu Galilei
(1564-1642)



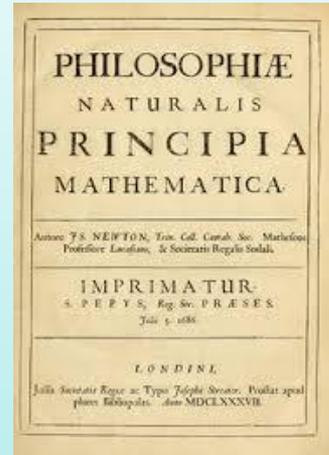
Superfície perfeitamente lisa:

$$\Delta x = \frac{1}{2} at^2 = \frac{1}{2} (g \operatorname{sen} \theta) \Delta t^2 \Rightarrow \begin{cases} \text{inércia} \\ \vec{F} \propto \vec{a} \end{cases}$$

NEWTON



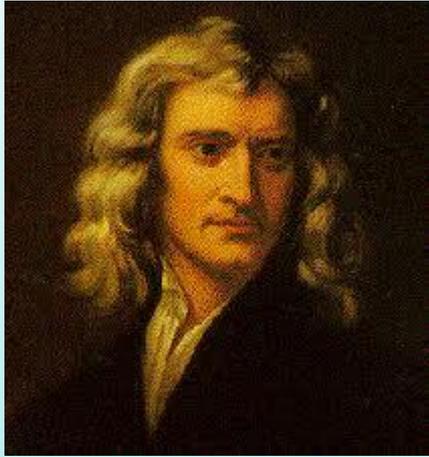
Sir Isaac Newton
(1642-1727)



Princípios Matemáticos da
Filosofia Natural (1687)

Com o seu livro *Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica* (*Princípios Matemáticos da Filosofia Natural*), publicado pela primeira vez em 5 de julho de 1687, lançou as bases da **mecânica clássica**. Newton também fez contribuições seminais à **óptica** e compartilha crédito com Gottfried Wilhelm Leibniz pelo desenvolvimento do **cálculo infinitesimal**.

NEWTON



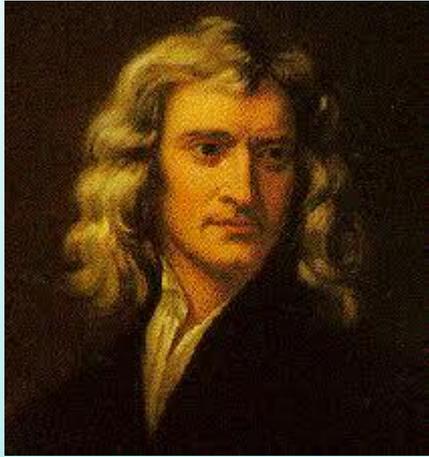
Sir Isaac Newton
(1642-1727)



Newton descobriu a lei da gravitação num “estalo” da maçã caindo em sua cabeça?

- Em 1665, após seu bacharelado, o Trinity College de Cambridge fecha, por causa da Grande Praga, e Newton retorna a Woolsthorpe. O próprio Newton contava esta estória, mas ela se popularizou após a sua sobrinha contá-la a Voltaire. A queda da maçã (que não necessariamente foi na cabeça dele) inspirou o Newton a tratar a queda dos corpos celestes e terrestres de forma igual: a mesma força que faz a maçã cair, faz a Lua orbitar em torno da Terra.

NEWTON



Sir Isaac Newton
(1642-1727)



Newton descobriu a lei da gravitação num “estalo” da maçã caindo em sua cabeça?

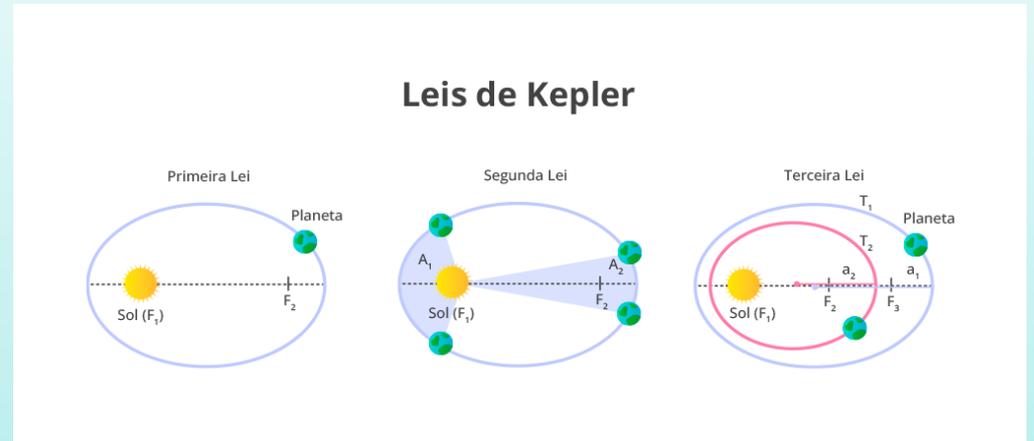
- Em 1665, após seu bacharelado, o Trinity College de Cambridge fecha, por causa da Grande Praga, e Newton retorna a Woolsthorpe. O próprio Newton contava esta estória, mas ela se popularizou após a sua sobrinha contá-la a Voltaire. A queda da maçã (que não necessariamente foi na cabeça dele) inspirou o Newton a tratar a queda dos corpos celestes e terrestres de forma igual: a mesma força que faz a maçã cair, faz a Lua orbitar em torno da Terra.
- Newton começou a perseguir que a força gravitacional varia com o inverso do quadrado da distância.

NEWTON

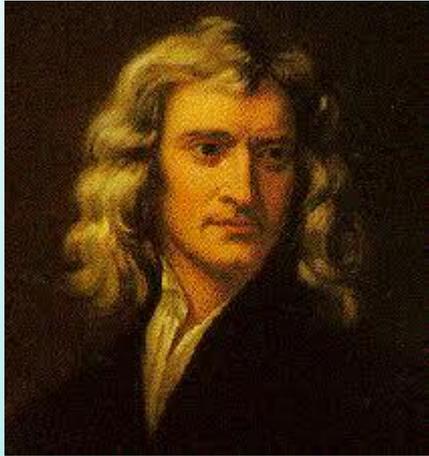


Sir Isaac Newton
(1642-1727)

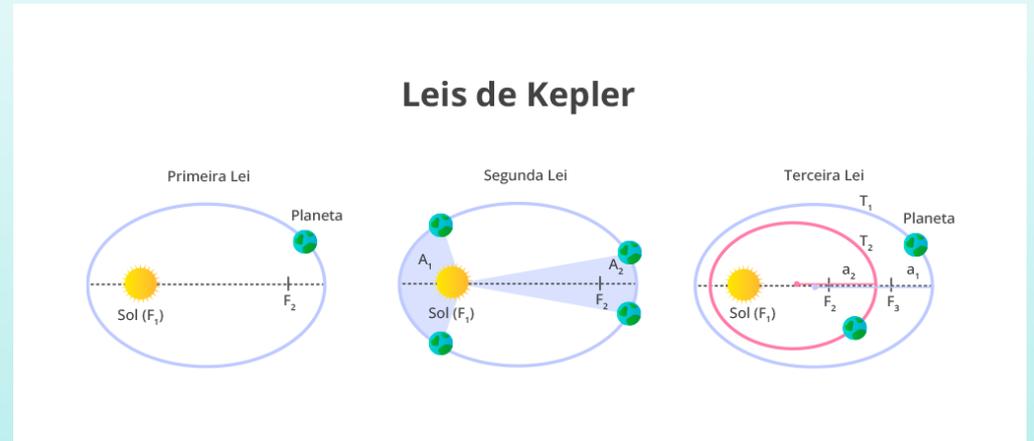
- Em 1679, Newton voltou ao seu trabalho sobre mecânica celeste, considerando a gravitação e seu efeito nas órbitas dos planetas, com referência às leis de Kepler.



NEWTON



$$F \propto \frac{1}{r^2} \Rightarrow$$



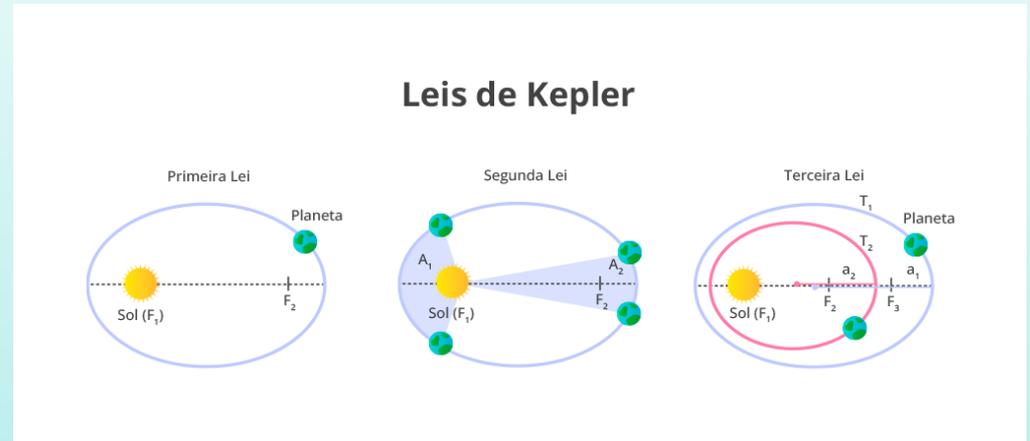
Sir Isaac Newton
(1642-1727)

- Em 1679, Newton voltou ao seu trabalho sobre mecânica celeste, considerando a gravitação e seu efeito nas órbitas dos planetas, com referência às leis de Kepler.
- O cometa Halley ressurgiu na virada dos anos 1680-1681. Após uma visita de Edmund Halley, em 1684, Newton fica sabendo que Robert Hooke demonstrara que as órbitas elípticas são resultado da força proporcional ao inverso do quadrado da distância. Newton responde que já havia feito esta demonstração, mas não encontrava o documento. Em 1685, Newton comunica o resultado a Edmund Halley, em "De motu corporum in gyrum" (Sobre o movimento dos corpos em uma órbita).

NEWTON



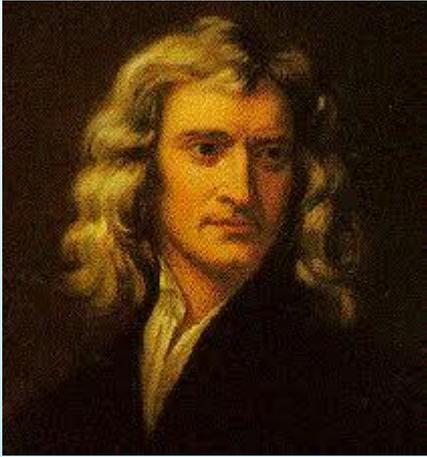
$$F \propto \frac{1}{r^2} \Rightarrow$$



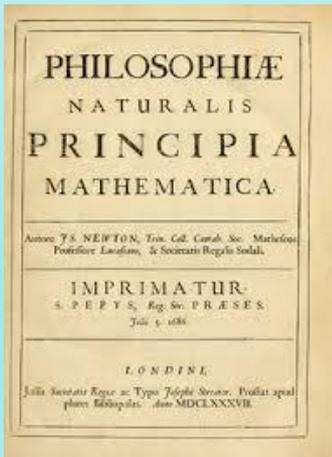
Sir Isaac Newton
(1642-1727)

- Em 1679, Newton voltou ao seu trabalho sobre mecânica celeste, considerando a gravitação e seu efeito nas órbitas dos planetas, com referência às leis de Kepler.
- O cometa Halley ressurgiu na virada dos anos 1680-1681. Após uma visita de Edmund Halley, em 1684, Newton fica sabendo que Robert Hooke demonstrara que as órbitas elípticas são resultado da força proporcional ao inverso do quadrado da distância. Newton responde que já havia feito esta demonstração, mas não encontrava o documento. Em 1685, Newton comunica o resultado a Edmund Halley, em "De motu corporum in gyrum" (Sobre o movimento dos corpos em uma órbita).
- Halley financiou e ajudou Newton a publicar o Principia.

NEWTON



Sir Isaac Newton
(1642-1727)



Princípios Matemáticos da
Filosofia Natural
(1687).

➤ 3 leis (do movimento) de Newton:

1. Lei da Inércia

$$\sum \vec{F} = 0 \Rightarrow \vec{v} = cte$$

2. Princípio Fundamental da Dinâmica:
Força e Quantidade de Movimento

$$\vec{F} = \frac{d\vec{p}}{dt} = m\vec{a}$$

3. Lei da Ação e Reação

$$\vec{F}_{AB} = -\vec{F}_{BA}$$

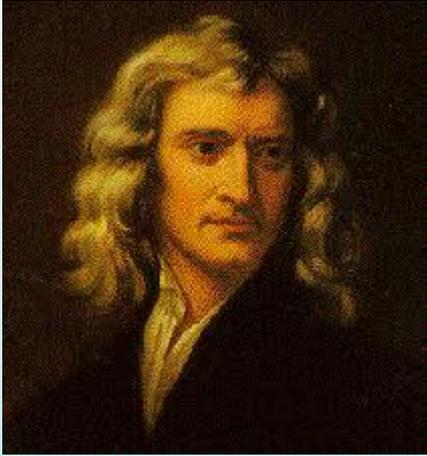
➤ Lei da Conservação da Quantidade de Movimento:

$$\sum \vec{p}_{antes} = \sum \vec{p}_{depois}$$

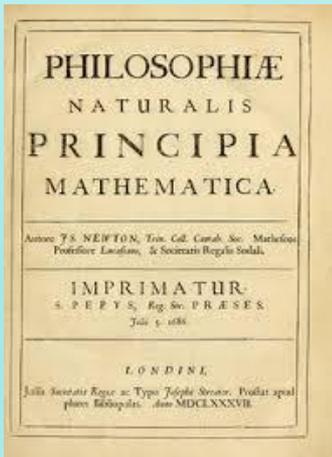
➤ Lei da Gravitação Universal:

$$\vec{F} \propto \frac{Mm}{r^2} \hat{r}$$

NEWTON



Sir Isaac Newton
(1642-1727)



Princípios Matemáticos da
Filosofia Natural
(1687).

A obra tem grande impacto (até os dias de hoje) e seu legado se manifesta de várias formas:

- **Mudança de paradigma:** transição da física aristotélica para a nova física newtoniana;
- **Fundação da mecânica clássica:** influência em cientistas posteriores como Laplace, Lagrange, Hamilton, Einstein, etc.
- **Importância na filosofia da ciência:** método científico e rigor matemático como base para a física moderna.