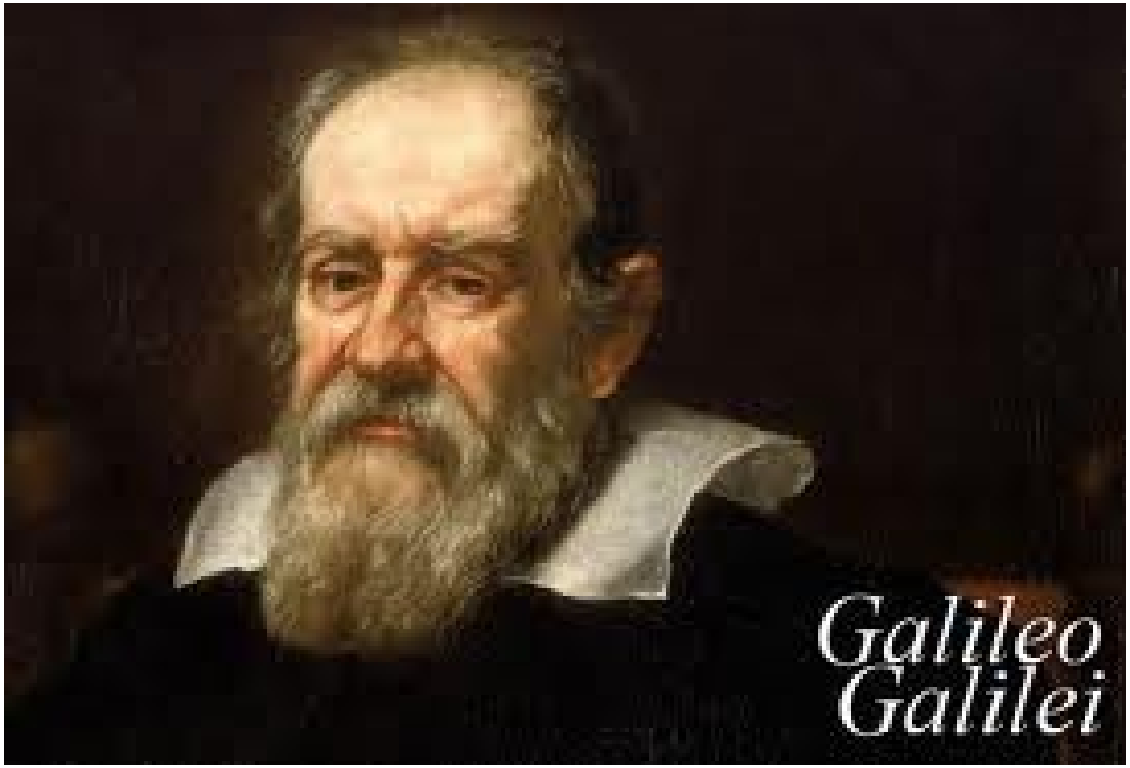
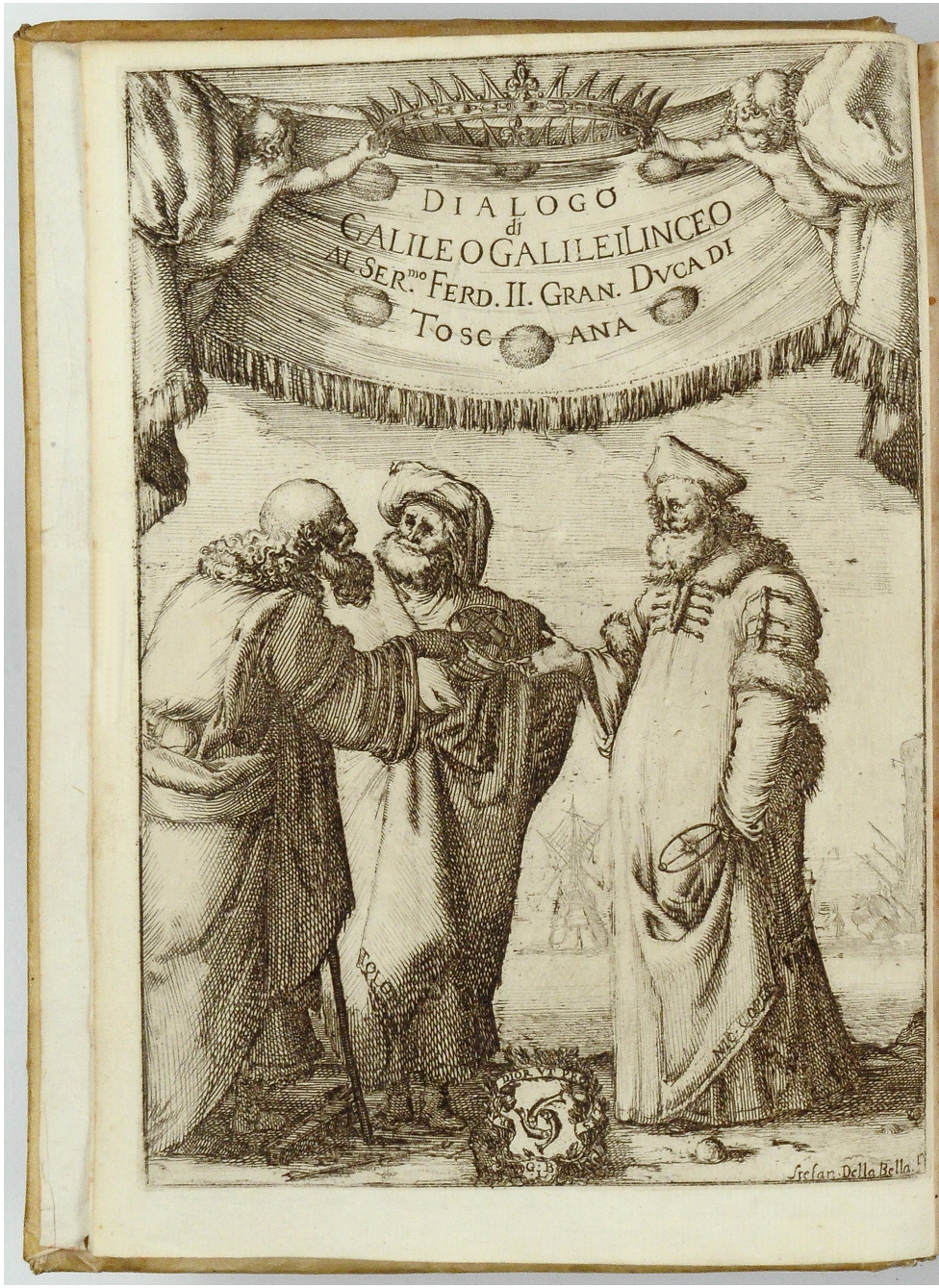
# Aristóteles

(384 - 322 AC)

- Fenômenos são determinados por algum objetivo final a ser alcançado (determinismo teleológico e não causal)
- Questão não é porque, mas sim para que um corpo se move
- Matéria é constituída de quatro elementos: terra, água, ar e fogo
- Elementos tem seu lugar natural
- Movimentos naturais e violentos
  - pedra (feita de terra) cai em busca de um objetivo: ir para o seu lugar natural
  - corpos mais pesados caem mais rapidamente porque buscam com mais urgência o seu lugar natural
  - movimento violento é produzido por causas externas
- Dois mundos regidos por leis distintas:
  - mundo celeste: perfeito e imutável
  - mundo terrestre: em transformação
- Como um projétil continua em movimento após ser solto, já que não a “forças” externas
  - Minha mão fornece um “impeto” (uma “vontade”, “força”) para a bola que a mantém em movimento enquanto se esgota?




1564 - 1642

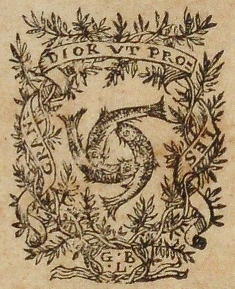



# DIALOGO
## DI
## GALILEO GALILEI LINCEO
MATEMATICO SOPRAORDINARIO
DELLO STVDIO DI PISA.
*E Filosofo, e Matematico primario del*
SERENISSIMO
## GR. DVCA DI TOSCANA.

Doue ne i congressi di quattro giornate si discorre sopra i due

MASSIMI SISTEMI DEL MONDO
TOLEMAICO, E COPERNICANO;

*Proponendo indeterminatamente le ragioni Filosofiche, e Naturali tanto per l'vna, quanto per l'altra parte.*

CON PRI  VILEGI.



IN FIORENZA, Per Gio: Batista Landini MDCXXXII.

*CON LICENZA DE' SVPERIORI.*

Diálogo sobre os Dois Principais Sistemas do Mundo (1632) :Salviati, Simplício e Sagredo

Talvez um dos primeiros livros de divulgação, já que não foi escrito em latim, mas em italiano

# Diálogo sobre os Dois Principais Sistemas do Mundo

- Galileu estuda o movimento, sem considerar suas causas
- Sem novos dados experimentais qualquer opinião sobre as causa seria mera fantasia
- Estratégia: entender a natureza passo a passo
  - Sagredo: - Dessas considerações me parece que poderíamos obter a solução real do problema discutido pelos filósofos, qual seja, o que causa a aceleração no movimento dos corpos pesados?...
  - Salviati: - O presente não me parece o momento próprio para se investigar a causa da aceleração natural, sobre a qual distintas opiniões têm sido expressas por vários filósofos...todas essas fantasias, e também outras, teriam de ser examinadas; mas isso realmente não valeria a pena. No presente, o propósito do nosso Autor é apensa investigar e demonstrar algumas propriedades do movimento acelerado (seja qual for a causa dessa aceleração)

# Questões

- O que é força
- Qual a relação entre força e movimento?
- Como as forças se relacionam quando dois objetos interagem

# Força

- Conceito intuitivo: esforço muscular feito por objetos vivos
  - Pode uma mesa sentir e/ou fazer uma força?
  - Ou ela somente entra no caminho de uma bola caindo
- Puxo uma pessoa:
  - pelo braço: ela sente uma força
  - usando uma corda: ela sente uma força
    - Mas quem exerce essa força? Eu?
- Duas pessoas puxam um mola
  - Sinto uma força conforme a mola se distende
- Penduro uma massa num mola: há uma força!
- Penduro uma massa numa corda: há uma força???
  - A corda não se distende
- Me penduro numa corda: sinto uma força?

# Força

- Bloco sobre a mesa: quais forças
  - Gravidade
  - Normal? Você realmente acredita que uma **mesa de madeira** exerce uma força para cima sobre o bloco?
- Bloco sobre a mola:
  - Mola faz uma força para cima? Ela se comprime!
  - E uma mola mais “dura”
    - Não se comprime! Ela ainda faz uma força?
- E a mesa?
  - Normal tem origem na deformação elástica da mesa

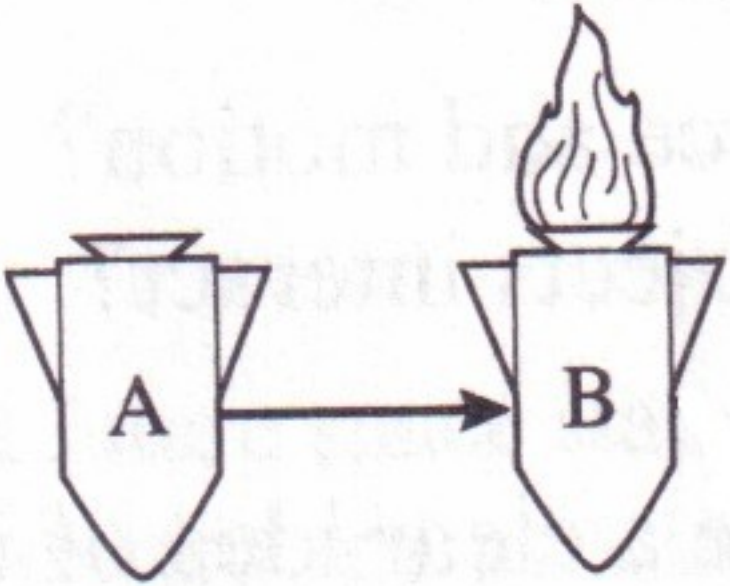
# Força

- Um empurrão ou puxão, que ocorre no ponto de contato entre um objeto e um agente (**identificável**) que exerce a força.
- Pode ser exercida por uma agente animado (vivo) ou inanimado (sem vida)
- E a gravidade, força entre ímãs (magnética)?
  - Tipo diferente que atua a distância
  - Existem outras, mas só estudaremos a gravidade
    - Como atua a distância? Qual mecanismo?
- Nesse curso todas as forças são de contato, com exceção da gravidade
  - Bem, em última análise todas a forças atuam a distância

# Leis do movimento

- Sabemos identificar forças
- Experiência do dia a dia indica que
  - movimento requer uma força, ou causa externa
  - se não há força objeto irá parar
  - objeto em repouso não implica que não haja forças
  - força é proporcional a velocidade
- Como uma bola continua indo para cima após ser solta se não há forças para cima
    - ar deslocado no mov. empurra o objeto!?

Um foguete está se movendo para o lado no espaço, com seu motor desligado, de A para B. Ele não esta perto de nenhuma estrela ou planeta, ou outra força externa. Seu motor é ligado no ponto B, e funciona por 2s, enquanto ele vai de B para algum ponto C. Qual a trajetória entre B e C? E após C, quando o motor é desligado?



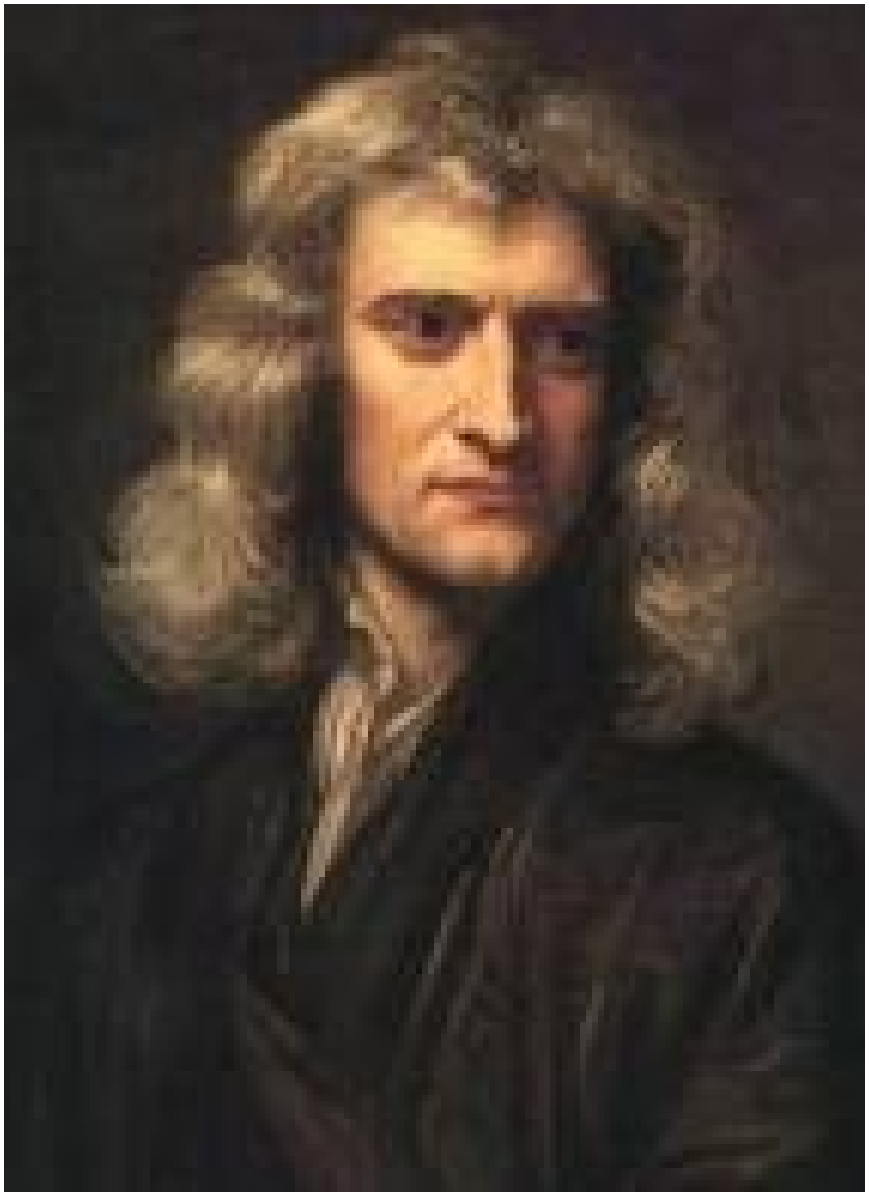
# Galileu Galilei, Diálogo sobre os dois Máximos Sistemas do Mundo Ptolomaico e Copernicano (Discurso Editorial-Imprensa Oficial, São Paulo, 2004), p226

**Salviati :** - Não desejo que digais ou respondais nada saber a não ser aquelas coisas que seguramente sabeis. Por isso, dizei-me: quando tivésseis uma superfície plana, polidíssima como um espelho e de matéria dura como o aço, e que não fosse paralela ao horizonte, mas um pouco inclinada, e sobre o qual se colocasse uma bola perfeitamente esférica e de matéria pesada e duríssima, como, por exemplo, de bronze, deixada em liberdade, o que acreditais que ela faria? Não acreditais (assim como eu) que ela ficasse parada?
**Simplício:** - Se aquela superfície fosse inclinada?
**Salviati:** - Sim, porque assim o supus.
**Simplício:** - Não acredito de modo algum que ela ficasse parada; ao contrário, estou perfeitamente seguro de que ela se moveria espontaneamente na direção do declive. (...)
**Salviati** - E qual seria a duração do movimento daquela bola, e com que velocidade? Notai que me referi a uma bola perfeitissimamente redonda e a um plano perfeitamente polido, para remover todos os impedimentos externos e acidentais. E assim também quero que seja abstraído o impedimento do ar mediante a sua resistência a ser aberto, e todos os outos obstáculos acidentais, se outros pudessem existir.
**Simplício:** - Compreendi tudo perfeitamente: quanto a vossa pergunta, respondo que ela continuaria a mover-se ao infinito, se tanto durasse a inclinação do plano, e com um movimento continuamente acelerado; (...)
**Salviati:** - Mas se outros quisessem que aquela bola se movesse para cima sobre aquela mesma superfície, acreditais que ela subiria?
**Simplício:** - Espontaneamente não, mas só arrastada ou lançada com violência.
**Salviati:** - E quando ela fosse impelida por algum ímpeto que lhe fosse violentamente impresso, qual e quanto seria o seu movimento?

**Simplício:** O movimento iria sempre enfraquecendo e retardando-se, por ser contra a natureza, e seria mais demorado ou mais breve, segundo o maior ou menor impulso e segundo o maior ou menor aclive.
**Salviati:** - Parece-me, portanto, até aqui, que vós me haveis explicado os acidentes de um móvel sobre os dois planos diferentes; e que no plano inclinado o móvel pesado espontaneamente desce e vai continuamente acelerando-se, e, que, para retê-lo em repouso, é necessário usar força; mas sobre o plano ascendente é necessário força e também para pará-lo, e que o movimento que lhe foi impresso vai continuamente enfraquecendo, até que finalmente se anula. Dizeis ainda mais que em um e em outro caso nasce uma diferença dependendo de se a declividade ou aclividade do plano for maior ou menor; de modo que a uma inclinação maior corresponde uma maior velocidade e, ao contrário, sobre o plano em aclive o mesmo móvel lançado pela mesma força move-se uma distância maior quanto menor seja a elevação. Dizei-me aora o que aconteceria com o mesmo móvel sobre uma superfície que não estivesse nem em aclive nem em declive.
**Simplício:** - (...) Como não existe declividade, não pode existir uma inclinação natural ao movimento e, não existindo aclividade, não pode existir resistência a ser movido, de modo que seria indiferente à propensão e à resistência ao movimento: parece-me, portanto, que le deveria ficar naturalmente em repouso.
**Salviati:** - Assim acredito, quando alguém o colocasse parado; mas se lhe fosse dado um ímpeto em direção a alguma parte, o que aconteceria?
**Simplício:** - Continuaria a mover-se na direção daquela parte.
**Salviati:** - Mas com que espécie de movimento? Por um movimento continuamente acelerado, como nos planos em declive, ou por um movimento sucessivamente retardado, como nos aclives?
**Simplício:** - Eu não consigo perceber causa de aceleração nem de retardamento, não existindo nem declividade nem aclividade.
**Salviati:** - Sim. Mas se não existisse causa de retardamento, muito menos deveria existir de repouso: quanto acreditais, portanto, que duraria o movimento do móvel?
**Simplício:** -Tanto quanto durasse o comprimento daquela superfície que não é nem subida nem descida.
**Salviati:** - Portanto, se esse espaço fosse ilimitado, o movimento nele seria igualmente sem fim, ou seja perpétuo?
**Simplício:** - Parece-me que sim, sempre quando o móvel fosse de matéria duradoura.

# Lei da Inércia

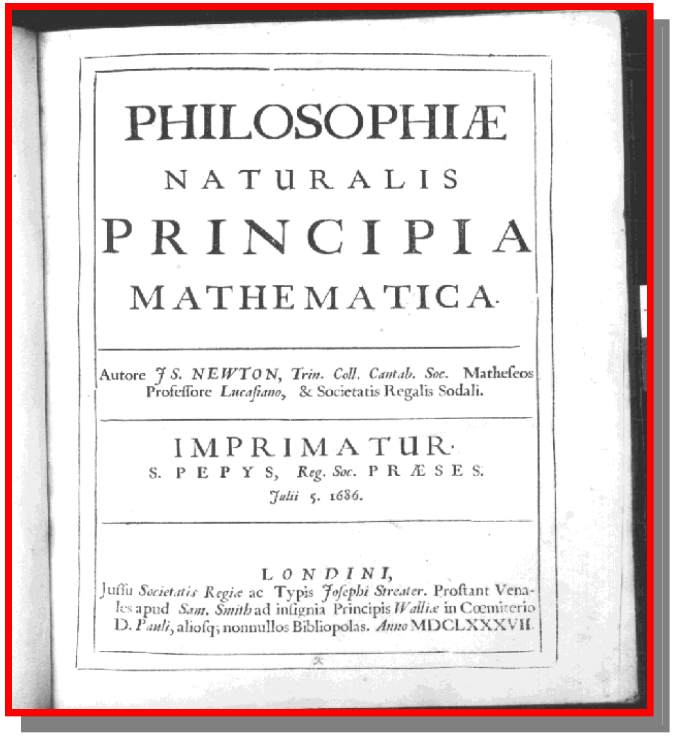
- Todo corpo persiste em seu estado de repouso, ou de movimento retilíneo uniforme, a menos que seja compelido a modificar esse estado pela ação de forças impressas sobre ele
  - Galileo abstrai, desprezando as forças de resistência do ar e de atrito



Isaac Newton (1642-1727)

# Leis de Newton

As leis que descrevem os movimentos de um corpo foram concebidas por Isaac Newton em 1665-66 (tinha 24 anos) na fazenda da família onde ele se refugou fugindo da peste negra. A publicão do trabalho aconteceu em 1687 (tinha 42 anos). O livro Philosophiae Naturalis Principia Mathematica ou Princípios **Matemáticos** da Filosofia Natural.



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. Prostant Venales apud Sam. Smith ad insignia Principis Walliæ in Cœmiterio D. Pauli, aliosq; nonnullos Bibliopolas. Anno MDCLXXXVII.

- Hoje em dia são conhecidas como as leis de Newton e foram baseadas em cuidadosas e extensivas observações dos movimentos e suas modificações.

Essas leis permitem uma descrição (e previsão) extremamente precisa do movimento de todos os corpos grandes ou pequenos, simples ou complexos.

Apenas em dois limites as leis de Newton deixam de ser válidas: dinâmica de sistemas muito pequenos (física quântica) ou com velocidades muito grandes(relatividade)

# O paradigma de Newton

experimentação

~100 anos

Tycho Brahe, astronomo (1546-1601)

Johanes Kepler, astronomo (1571-1630)

Galileu Galilei , cientista(1564-1642)

Isaac Newton (1642-1727)

**O paradigma newtoniano é possivelmente a criação mais importante e bem sucedida da história do pensamento humano!**

# 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.

pag: 67] Dele verba inter m ac n, et pro illis substitue hoc — Deinq; si rectæ RP, SQ concurrant in T et agatur TZ, figura TRZS dabitur specie et recta TZ (in qua punctum Z alicubi locabitur) dabitur positione.

pag: 78] Dele verba inter m ac n, et pro illis substitue hoc — Sit angulus DBM semper æqualis angulo dato ABC, angulusq; DCM semper æqualis angulo dato ACB.

pag: 78] Dele verba inter r ac s, et substitue hoc — Sit angulus DBM semper æqualis angulo dato ABC et angulus DCM angulo dato ACB.

pag: 81. a] Adde hæc — BL, CL vel Bm, Cm intersectio quæ jam sit m, incidat semper in rectam illam infinitam mn et curvam

pag: 84] Dele verba inter m ac n, et substitue hæc — per punctorum duo quævis B, D age rectam infinitam BD tangentibus occurrentem in punctis H, K, deinde etiam per alia duo quævis C, D age rectam infinitam

pag: 84. a] Adde hæc — Sæca autem ad libitum vel inter puncta K et H; G et L, vel extra eidem. Dein

pag: 84. a] Adde hæc — In tangente alterutra HI sitam

pag: 90] Dele verba inter m ac n, et substitue hæc — Ut sit CL. CF :: CK. CD et ob datam illam rationem

pag: 92. a] Adde hæc — Sumantur autem laterum ML, KL abscissæ ME, KQ; vel latium KL, ML abscissæ KH, MF

pag: 101. a] Adde hæc — Linea BL eadem ratione facta fuit in D et R atq; linea FL in G et H, utroq;

pag: 103. a] Adde hæc — Nam si figura fghi figuræ FGHI simili similis existens ita moveatur et interea magnitudine augeatur vel minuatur ut ejus puncta f, g, h rectas tres AB, AD, DD semper tangant; ejus punctum quartum i tangit locum rectilineum im; et ubi punctum f incidit in A rectæ fh et hi incidunt in rectas AL et LN. Ubi vero punctum g incidit in A rectæ gh, hi incidunt in rectas AK, KM et inde dantur puncta n, n, l ut supra. et simili methodo triangulum IFH locabitur ad punctum l.

vide reliqua sub finem libri.

# 1ª lei de Newton

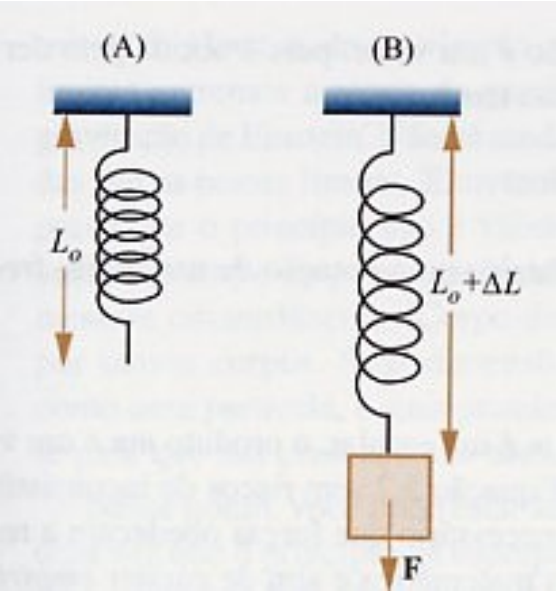
- Lex I: Corpus omne perseverare in statu suo quiescendi vel movendi uniformiter in directum, nisi quatenus a viribus impressis cogitur statum illum mutare. ”
- “ Law I: Every body persists in its state of being at rest or of moving uniformly straight forward, except insofar as it is compelled to change its state by force impressed”

# 1ª lei de Newton

- Todo corpo persiste em seu estado de repouso, ou de movimento retilíneo uniforme, a menos que seja compelido a modificar esse estado pela ação de forças impressas sobre ele
  - Corpo isolado mantém o **vetor** veloc. constante
  - Repouso e um caso particular; visto de um referencial particular
  - $\sum \vec{F} = 0 \rightarrow \vec{a} = 0 \rightarrow \vec{r}(t) = \vec{r}_0 + \vec{v}_0 t$
- Aceleração está associada a forças
  - Mas qual a relação entre $\vec{F}$ e $\vec{a}$?

# Força

- Como quantificar?
  - Molas! $\Delta x_0 \rightarrow F_0$ ; $2\Delta x_0 \rightarrow 2F_0$ ; … (Lei de Hooke)
  - É um vetor!



# $2^a$ Lei de Newton

- Um objeto qualquer
  - Força F → a; 2F → 2a ; 3F → 3a; ...
  - **a** = k **F**
  - Quem é k?
- Mesma **F** em corpos diferentes, produz **a** distintas
- k é uma propriedade intrínseca do objeto; não depende de *a* e **F**
  - como ele “responde” a força
- 2 objetos iguais: k → k/2
- 1/k é chamado de inércia do corpo, ou massa inercial: m
  - Resistência a mudança da velocidade
  - “Relacionada” a quantidade de matéria
- **a** = **F**/m ou **F**=m**a** (não é a forma original de Newton)
  - A variação do momento é proporcional a força impressa, e tem a direção da força
- $\mathbf{F}=m d^2\mathbf{x}/dt^2$ (Eq. diferencial ordinária de $2^a$ ordem)

# 2ª Lei de Newton

- Lex II: Mutationem motus proportionalem esse vi motrici impressae, et fieri secundum lineam rectam qua vis illa imprimitur.
- Mais que uma tradução!
  - Law II: The alteration of motion is ever proportional to the motive force impress'd; and is made in the direction of the right line in which that force is impress'd
- O sentido da terminologia de Newton é debatido por historiadores da ciência

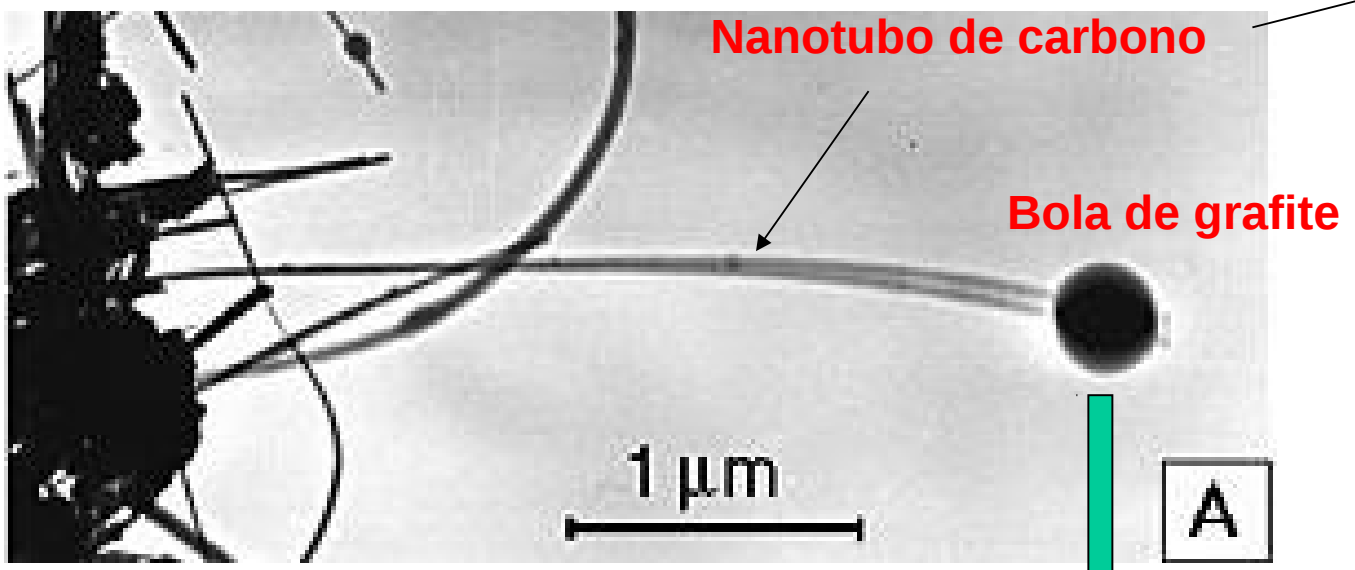
# Unidades de Massa e Força

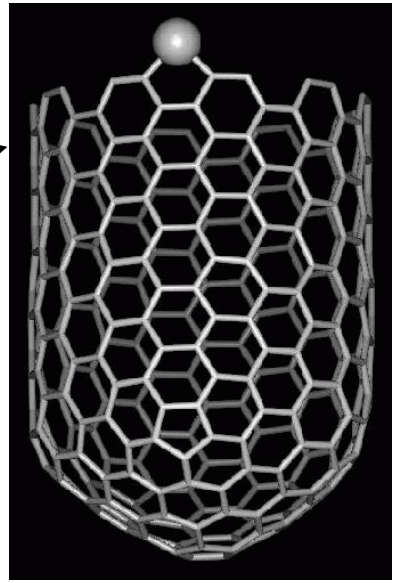
- M é uma propriedade do corpo. Como quantificar?
- Com uma **F** padrão (arbitrária), pode-se obter uma escala relativa de massas
  - $F=m_1a_1=m_2a_2 \rightarrow m_2= (a_1/a_2)\, m_1$ (note que não depende do valor de F)
- Mais conveniente, escolher uma unidade padrão (arbitrária) de massa
  - Pego um objeto e digo: É esse!
  - 1L de água a 1atm e 4$^o$C → 1 Kg (em Paris)
- Com isso e F=ma → unidade de força
  - 1N → força que da 1m/s$^2$ a 1kg
  - 1N é, aproximadamente, a força para segurar 100g (na Terra)
  - Também posso comparar massas: espectrômetro de massa
    - Mede $a_{cp}$ e compara com a massa do Carbono 12

# Instrumentos de medida de massas

**Balança de braços iguais**: comparação com massas padrão

**Balança de mola**: medida da força peso:



$$F = mg$$

$$m = 22 \times 10^{-15}\, g$$ **!!!**

gtresearchnews.gatech.edu/newsrelease/BALANCE.html

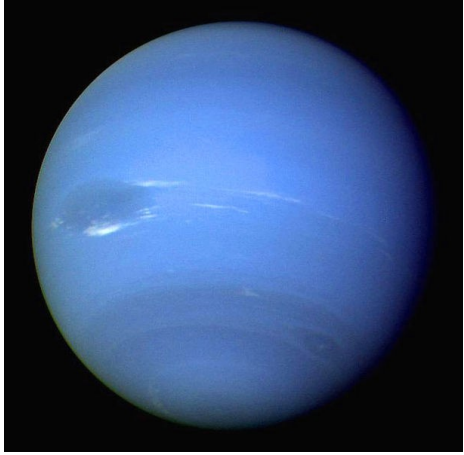
# 3ª Lei de Newton

- Forças são devidas a interações entre os objetos: a ação de uma partícula (agente) sobre outra (sistema)
- 3ª Lei: a toda ação existe uma reação de mesmo módulo direção, mas sentido oposto
  - Força de ação e reação estão em corpos distintos
  - Exemplo: livro sobre a mesa, pessoa puxando outra com uma corda
  - Bola caindo: força sobre a terra e a mesma! Porque só a bola se move?
- Pode ser deduzida da conservação do momento linear, a qual é mais geral

# Paradigma Newtoniano

- Se conheço as forças que atuam em uma partícula. F=ma me permite obter r(t) em qualquer instante de tempo futuro ou passado
  - Preciso conhecer F e as condições iniciais $r_0$ e $v_0$ !
  - Determinismo
- Se conhecer todas as forças do universo. Com suficiente habilidade matemática posso prever seu futuro (Demônio de Laplace)
  - Até prever o resultado de um fla-flu ou da loteria!
  - Newton não acreditava ser possível explicar tudo a partir da visão mecanicista da natureza

# Paradigma Newtoniano



- Extremamente bem sucedido em fazer previsões por 200 anos
  - Descoberta de Netuno (1846): irregularidades na órbita de Urânio não podiam ser explicadas pelas Leis de Newton. Estariam elas erradas?
  - Levou o homem a lua!
  - “Prediz” a matéria escura! (MOND!?)
- Mas não é válida para pequenos objetos (átomos) ou velocidades próximas a da luz

# Leis de Newton

- Então para corpos “grandes” e “baixas” velocidades; o mundo do nosso dia a dia!!!
  - Leis de Newton sempre são válidas e tudo é “lindo”?
- Porque não?

# Referenciais Inerciais

- Objeto no espaço “vazio”
  - Ref. S, vê o objeto em repouso → $\mathbf{a}=0$
  - Ref. S' ($\mathbf{a}_{s's}=0$), vê o objeto com $\mathbf{v}$=cte → $\mathbf{a}'=0$
  - Ref. S'' ($\mathbf{a}_{s''s} \neq 0$), vê (mede) $\mathbf{a}''\neq 0$ para o objeto!
    - Que força produz essa aceleração???
    - Para ter F=ma, tenho que introduzir uma força fictícia ou inercial: $\mathbf{F}_{inercial} = -m\mathbf{a}''$
    - Não consigo identificar um agente para essa força! Parece um artificio do ref. escolhido, que é não inercial.
- Leis de Newton não são válidas num referencial não inercial!!!
  - Neles $\mathbf{F}=0$ não implica $\mathbf{a}=0$

# Referenciais Inerciais

- Então primeiro tenho que saber se o ref. é inercial
  - S'' é inercial em relação a S' se ($\mathbf{a}_{S''S'}$=0) !?
    - Só se $\mathbf{a}_{S'S}$=0. Mas como sei se S não esta acelerado em relação a algum outro objeto?
    - Busca sem fim pelo referencial inercial!!!
  - Newton definiu um espaço absoluto (conceito abstrato)
    - Estrelas fixas são uma boa aproximação de um referencial inercial
    - Qualquer S, que tiver **a**=0 em relação as estrelas fixas será um referencial inercial
- Opção moderna: o ref. é inercial se a primeira lei é válida nele.
  - 1ª lei não é um caso particular da 2ª, mas uma definição de referencial inercial