



Universidade Federal do ABC



SOCIEDADE BRASILEIRA DE FÍSICA

MNPEF Mestrado Nacional
Profissional em
Ensino de Física

ent

Marcos no Desenvolvimento da Física

Marco #4: A fórmula da entropia de Boltzmann

Prof. Marcelo Augusto Leigui de Oliveira

leigui@ufabc.edu.br

NA ANTIGUIDADE ...

NA ANTIGUIDADE ...

Os físicos jônicos:

Physis (em grego Φύσις, "Natureza")



NA ANTIGUIDADE ...

Os físicos jônicos:

Physis (em grego Φύσις, "Natureza")



Tales de Mileto (c 625-c 547 a.C.): água é o princípio de todas as coisas.



NA ANTIGUIDADE ...

Os físicos jônicos:

Physis (em grego Φύσις, "Natureza")

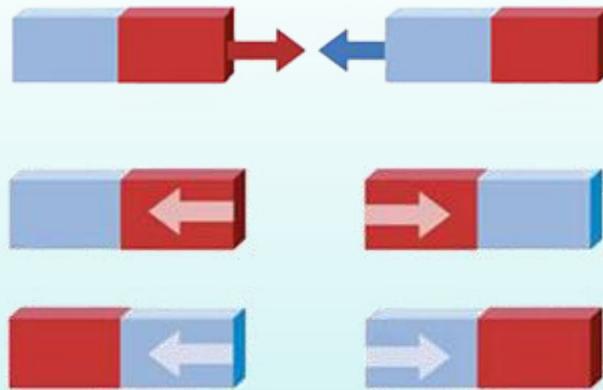


Tales de Mileto (c 625-c 547 a.C.): **água** é o princípio de todas as coisas.

Anaxímenes de Mileto (c 570 – c 500 a.C.): **ar** é o princípio de todas as coisas.



NA ANTIGUIDADE ...



Empedocle's.



Tales 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**

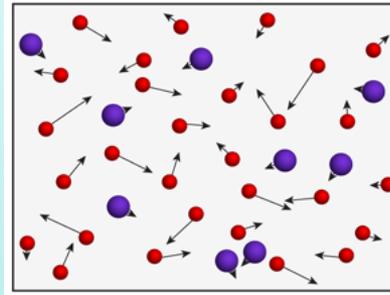
Empédocles de Acraga (atual Agrigento) (c 490 – c 430 a.C.):
4 elementos (água, ar, terra e fogo) e **2 forças** ou princípios:
amor (*philia*) e ódio (*ekthos*), ou seja, atração e repulsão.

NA ANTIGUIDADE ... OS ATOMISTAS (E O NÃO-ATOMISTA)

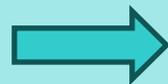
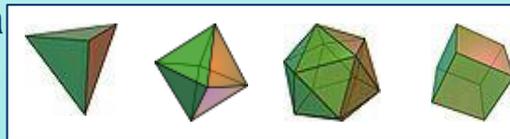


Demócrito e Leucipo: primeiros atomistas.

Demócrito de Abdera (c 460 – c 380 a.C.) e seu discípulo Leucipo de Mileto (c 460 – c 370 a.C.): **átomos** (indivisíveis) e **vácuo**.



Platão (c 427 – c 347 a.C.) propõe um modelo geométrico para os 4 elementos:



Aristóteles (384 – c 322 a.C.): rejeita a hipótese atomística, a matéria deveria ser contínua e o vácuo não é físico, e propôs uma **quintessência** para preencher o vazio: o **éter**.

Platão e Aristóteles n'A Escola de Atenas, pintura de Rafael (1509-1510).

NA ANTIGUIDADE ...



Arquimedes de Siracusa
(287 a.C. – 212 a.C.)

NA ANTIGUIDADE ...

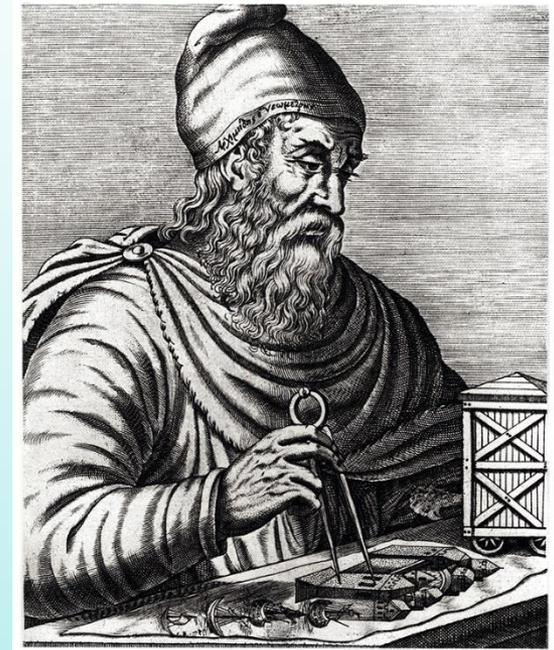
- Fundamentos da hidrostática



Arquimedes de Siracusa
(287 a.C. – 212 a.C.)

NA ANTIGUIDADE ...

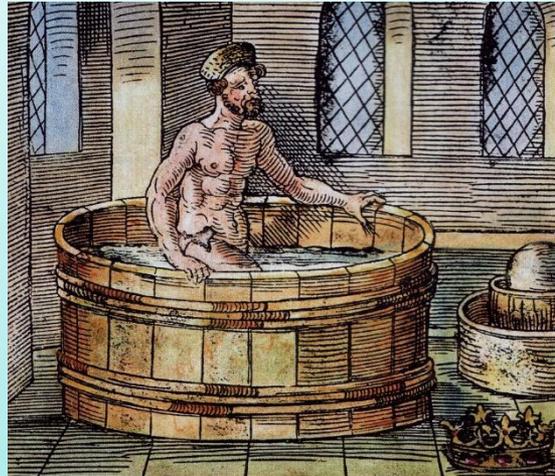
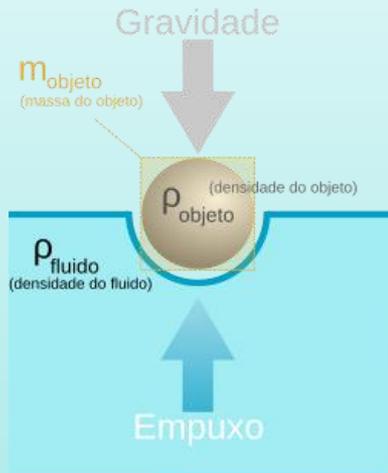
- Fundamentos da hidrostática:
 - Princípio de Arquimedes (lei do empuxo):



Arquimedes de Siracusa
(287 a.C. – 212 a.C.)

NA ANTIGUIDADE ...

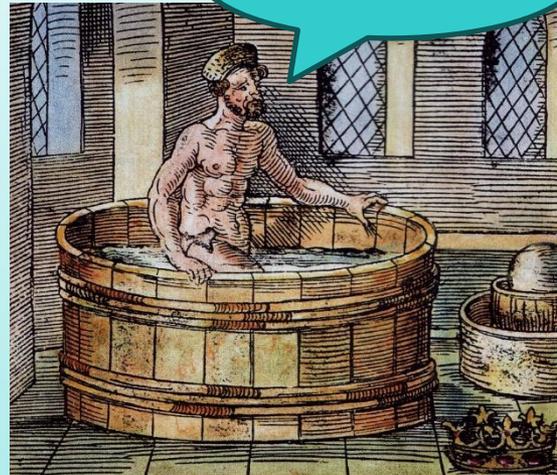
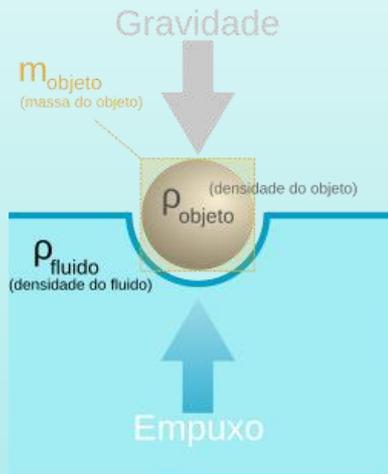
- Fundamentos da hidrostática:
 - Princípio de Arquimedes (lei do empuxo):



Arquimedes de Siracusa
(287 a.C. – 212 a.C.)

NA ANTIGUIDADE ...

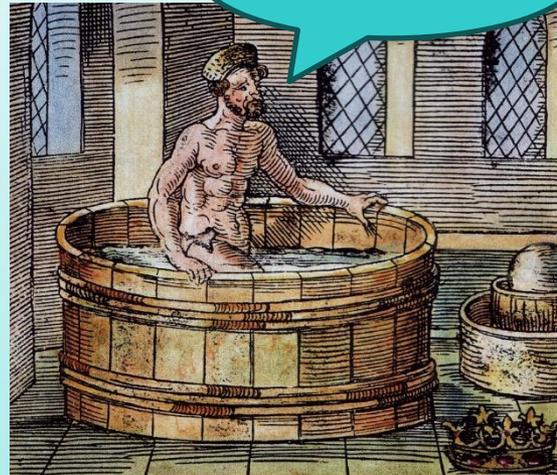
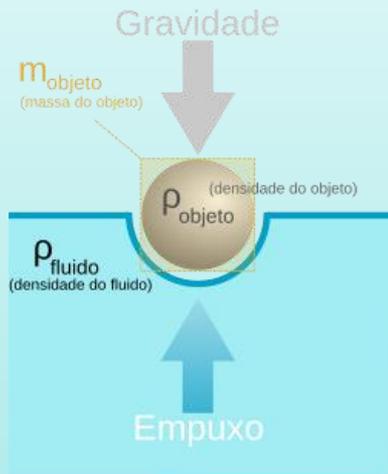
- Fundamentos da hidrostática:
 - Princípio de Arquimedes (lei do empuxo):



Arquimedes de Siracusa
(287 a.C. – 212 a.C.)

NA ANTIGUIDADE ...

- Fundamentos da hidrostática:
 - Princípio de Arquimedes (lei do empuxo):

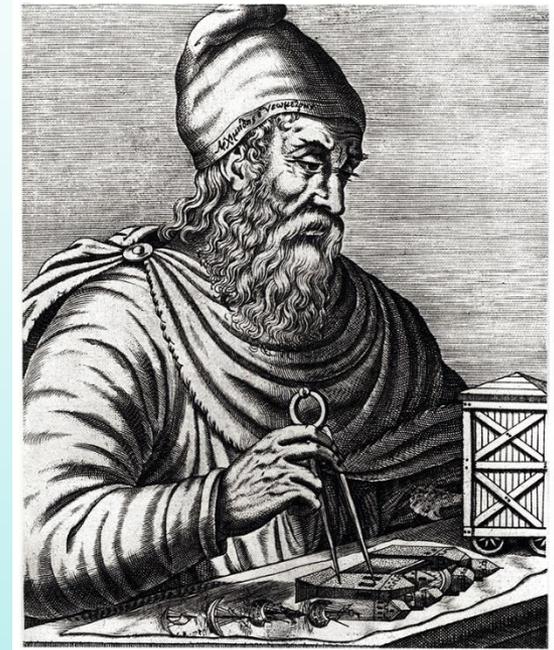
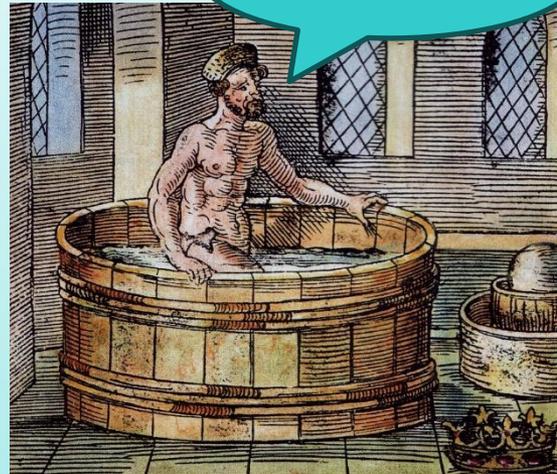
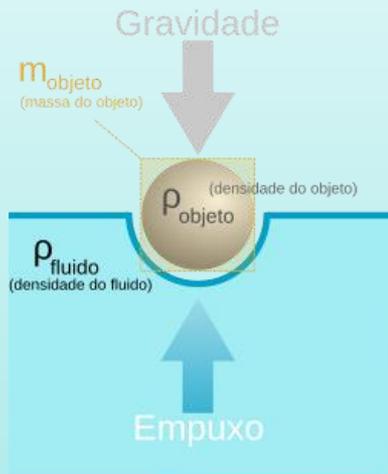


Arquimedes de Siracusa
(287 a.C. – 212 a.C.)

Ref.: *Sobre os Corpos Flutuantes*

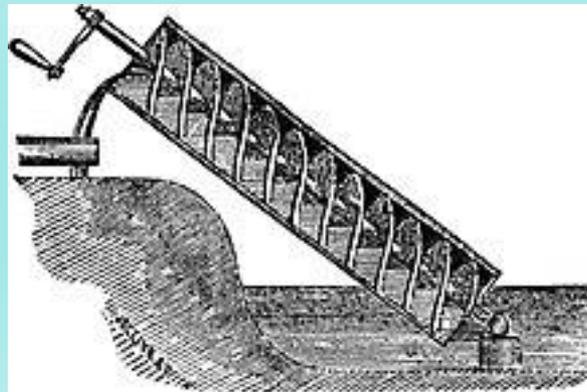
NA ANTIGUIDADE ...

- Fundamentos da hidrostática:
 - Princípio de Arquimedes (lei do empuxo):



Arquimedes de Siracusa
(287 a.C. – 212 a.C.)

O parafuso de Arquimedes:

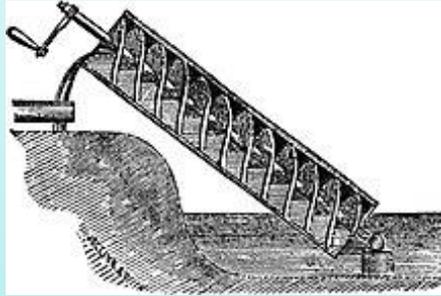


NA ANTIGUIDADE ...

➤ Fundamentos da hidrostática:



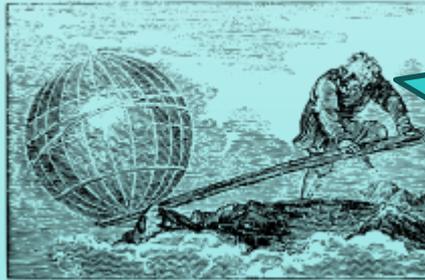
"Eureka!"



Arquimedes de Siracusa
(287 a.C. – 212 a.C.)

➤ Fundamentos da estática:

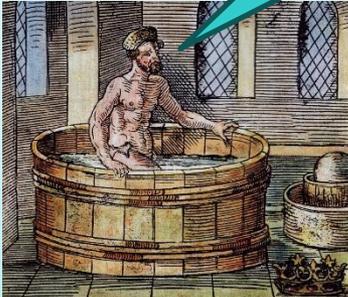
- Alavanca ?



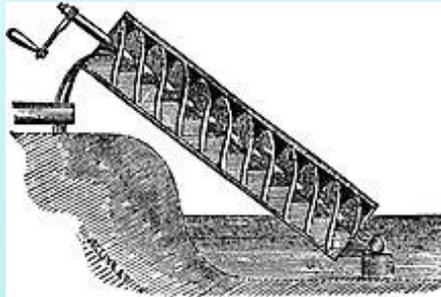
"Dê-me um ponto de apoio, e moverei o mundo!"

NA ANTIGUIDADE ...

➤ Fundamentos da hidrostática:



"Eureka!"

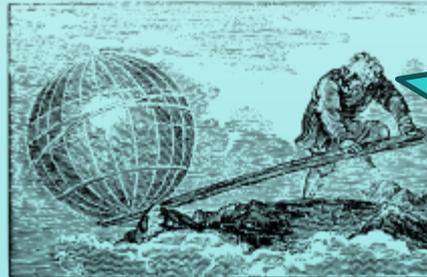
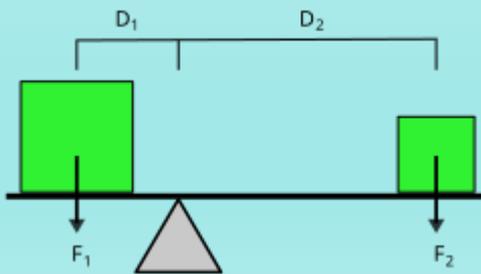


Arquimedes de Siracusa
(287 a.C. – 212 a.C.)

➤ Fundamentos da estática:

• Alavanca

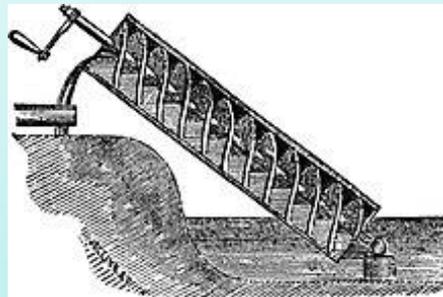
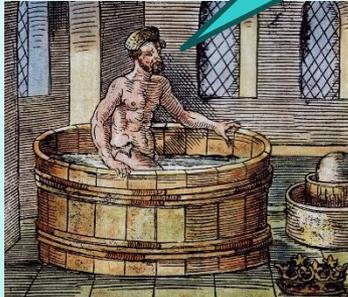
explicou o princípio:



"Dê-me um
ponto de
apoio, e
moverei o
mundo!"

NA ANTIGUIDADE ...

➤ Fundamentos da hidrostática:

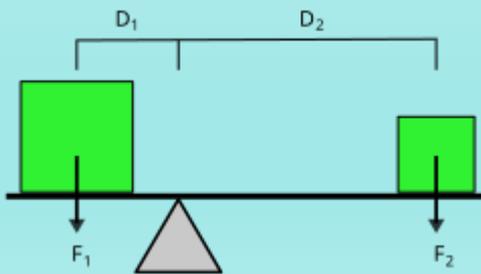
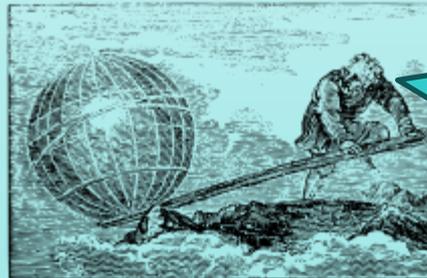


Arquimedes de Siracusa
(287 a.C. – 212 a.C.)

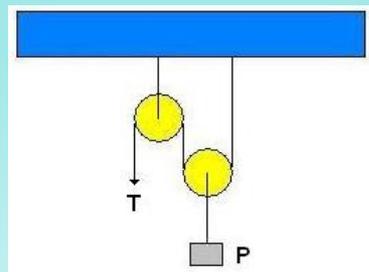
➤ Fundamentos da estática:

• Alavanca

explicou o princípio:



• Sistemas de roldanas:

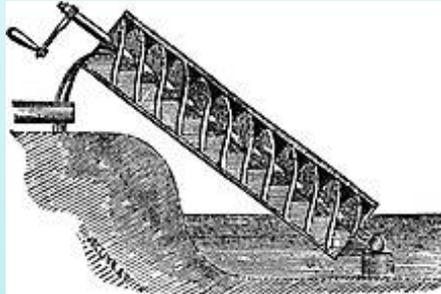


NA ANTIGUIDADE ...

➤ Fundamentos da hidrostática:



"Eureka!"

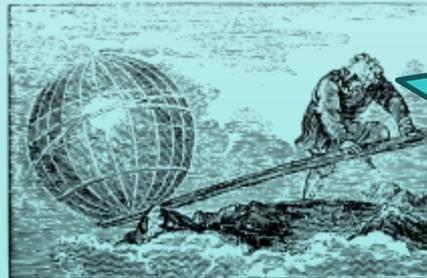


Arquimedes de Siracusa
(287 a.C. – 212 a.C.)

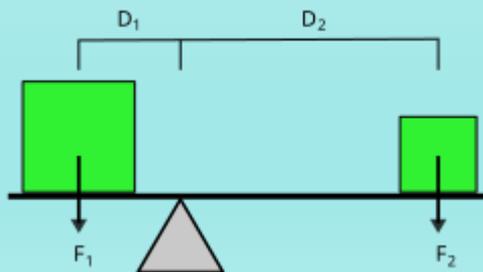
➤ Fundamentos da estática:

• Alavanca

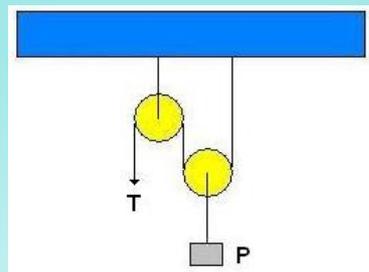
explicou o princípio:



"Dê-me um ponto de apoio, e moverei o mundo!"



• Sistemas de roldanas:

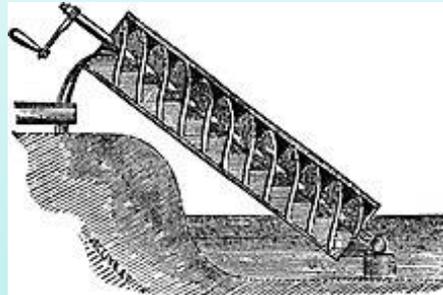
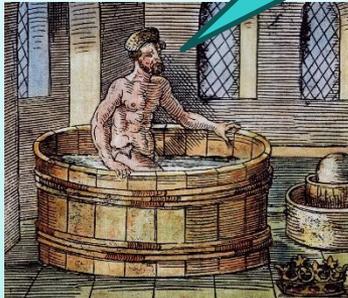


• Catapultas:



NA ANTIGUIDADE ...

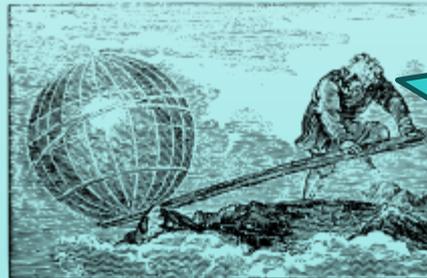
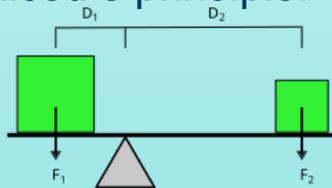
➤ Fundamentos da hidrostática:



Arquimedes de Siracusa
(287 a.C. – 212 a.C.)

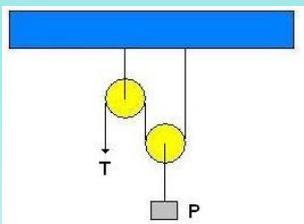
➤ Fundamentos da estática:

- Alavanca explicou o princípio:



"Dê-me um ponto de apoio, e moverei o mundo!"

- Sistemas de roldanas:
- Catapultas:



- Garra de Arquimedes:

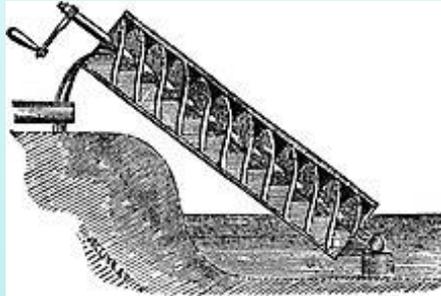


NA ANTIGUIDADE ...

➤ Fundamentos da hidrostática:

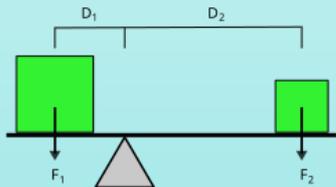


"Eureka!"

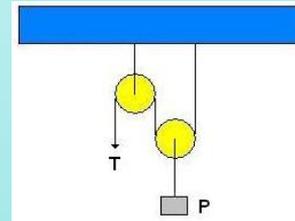


Arquimedes de Siracusa
(287 a.C. – 212 a.C.)

➤ Fundamentos da estática:



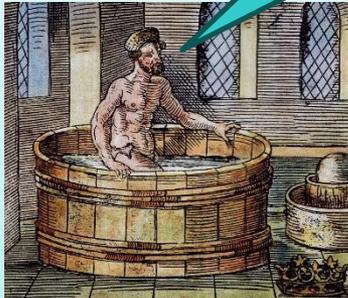
"Dê-me
um ponto
de apoio,
e moverei
o mundo!"



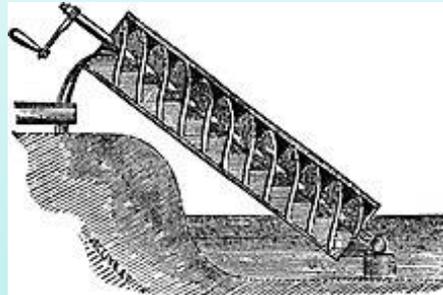
Ref.: *Sobre o Equilíbrio dos Planos*

NA ANTIGUIDADE ...

➤ Fundamentos da hidrostática:

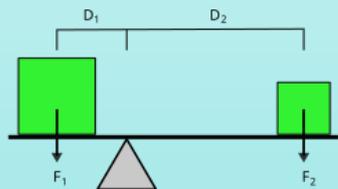


"Eureka!"

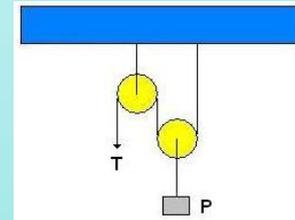


Arquimedes de Siracusa
(287 a.C. – 212 a.C.)

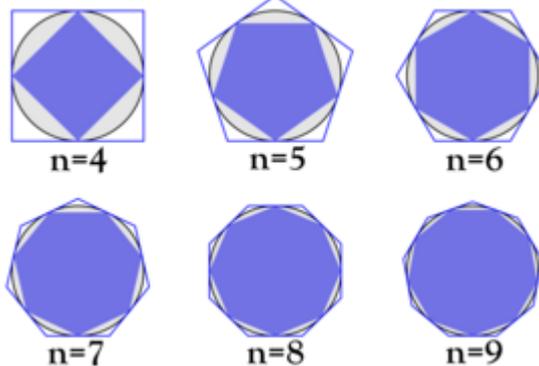
➤ Fundamentos da estática:



"Dê-me
um ponto
de apoio,
e moverei
o mundo!"



➤ Matemática:



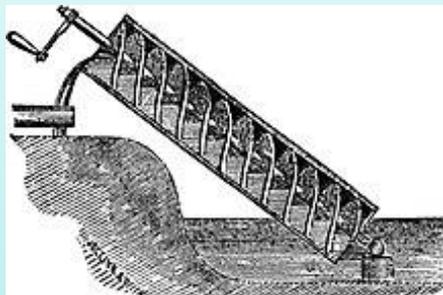
Arquimedes usou o método da exaustão para aproximar o valor de π .

NA ANTIGUIDADE ...

➤ Fundamentos da hidrostática:

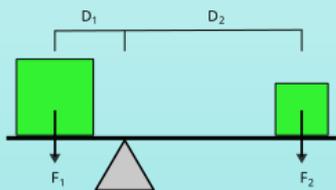


"Eureka!"

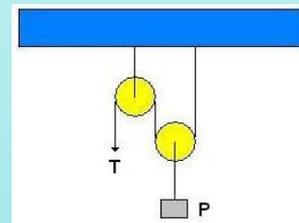


Arquimedes de Siracusa (287 a.C. – 212 a.C.)

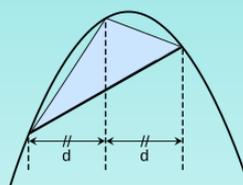
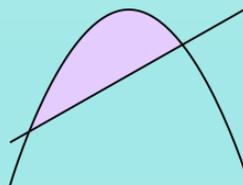
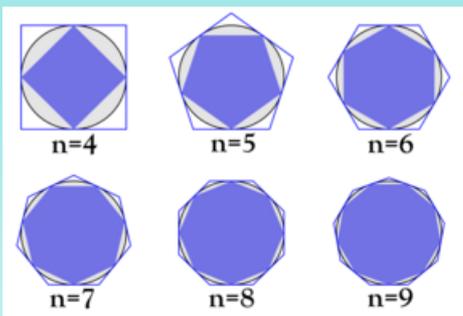
➤ Fundamentos da estática:



"Dê-me um ponto de apoio, e moverei o mundo!"



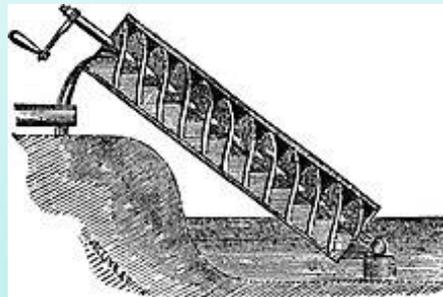
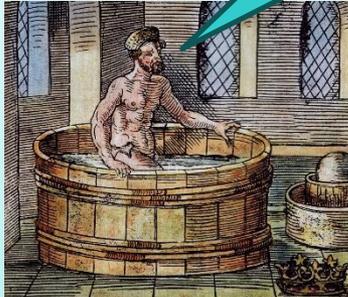
➤ Matemática:



A quadratura da parábola: a área do segmento parabólico na figura de cima é igual a 4/3 da do triângulo inscrito na figura de baixo.

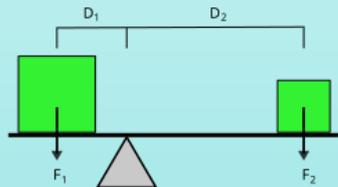
NA ANTIGUIDADE ...

➤ Fundamentos da hidrostática:

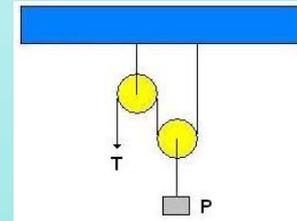


Arquimedes de Siracusa (287 a.C. – 212 a.C.)

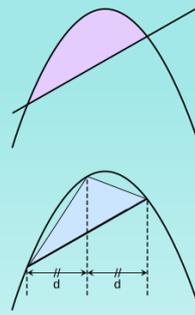
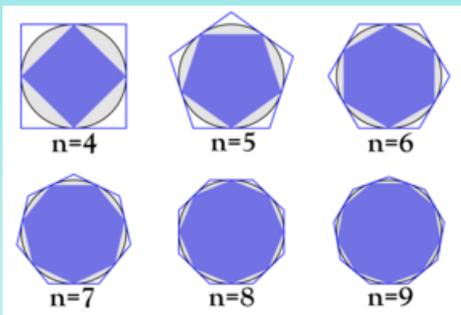
➤ Fundamentos da estática:



"Dê-me um ponto de apoio, e moverei o mundo!"



➤ Matemática:

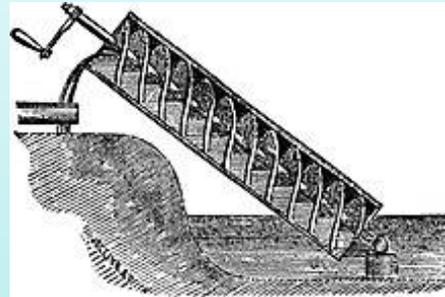


Contador de areia: ele se dispôs a calcular o número de grãos de areia que o universo poderia conter:

$$\text{miríade}^n \approx 8 \times 10^{63}$$

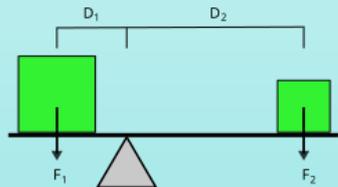
NA ANTIGUIDADE ...

➤ Fundamentos da hidrostática:

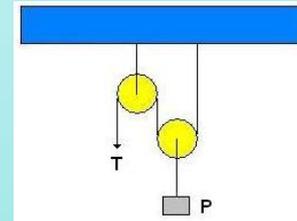


Arquimedes de Siracusa
(287 a.C. – 212 a.C.)

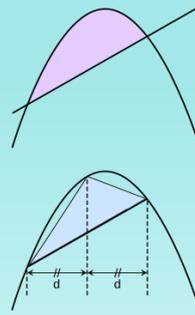
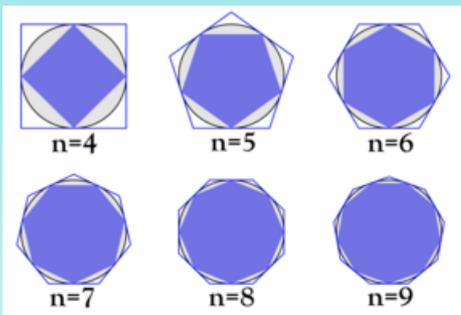
➤ Fundamentos da estática:



"Dê-me um ponto de apoio, e moverei o mundo!"



➤ Matemática:



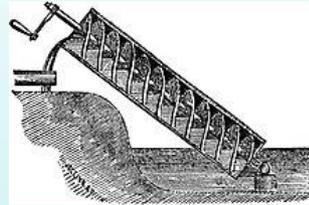
$$\frac{265}{153} < \sqrt{3} < \frac{1351}{780}$$

NA ANTIGUIDADE ...

➤ Fundamentos da hidrostática:

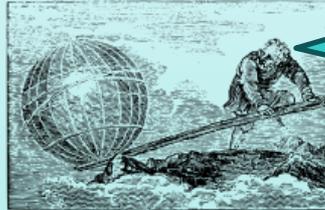
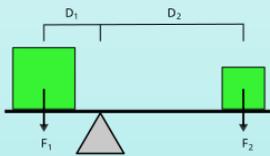


"Eureka!"

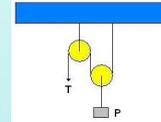


Arquimedes de Siracusa
(287 a.C. – 212 a.C.)

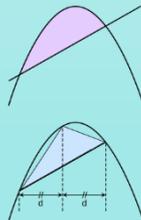
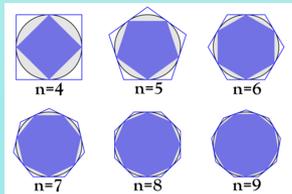
➤ Fundamentos da estática:



"Dê-me um ponto de apoio, e moverei o mundo!"

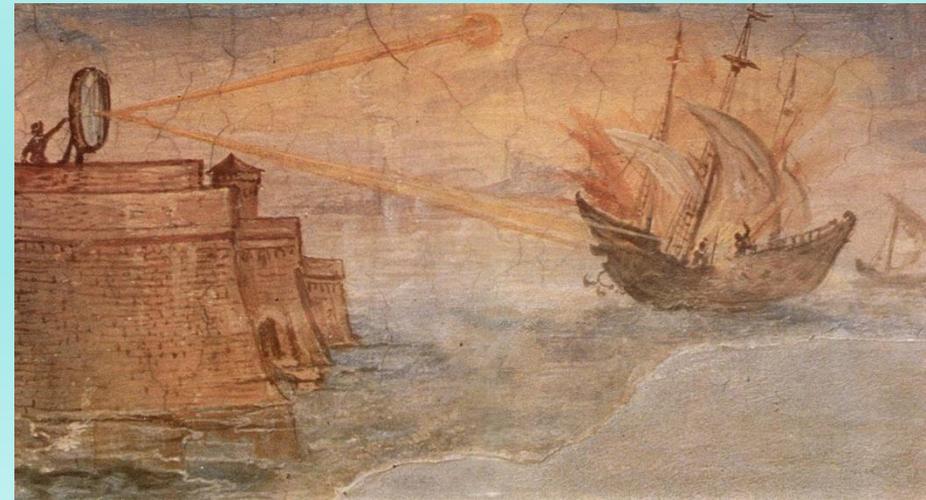


➤ Matemática:



O raio da morte:

$$\frac{265}{153} < \sqrt{3} < \frac{1351}{780}$$



MNPEF
Mestrado Nacional
Profissional em
Ensino de Física



Francisco Everton Pereira Maia

**ANALISANDO O FEITO DE ARQUIMEDES COM O AUXÍLIO DO GEOGEBRA:
PODERIA UM NAVIO SER INCENDIADO POR REFLEXÃO DE RAIOS SOLARES?**

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Augusto Leigui de Oliveira

Santo André - SP
2021

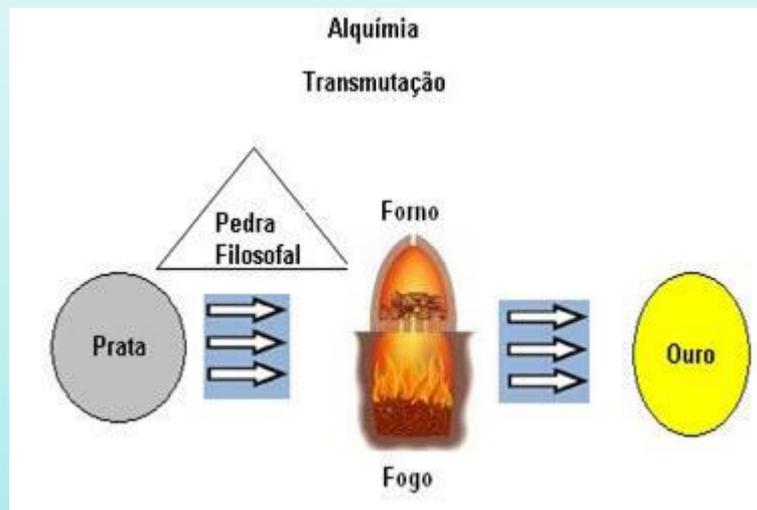
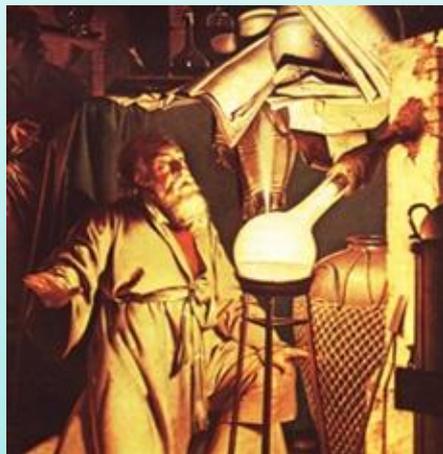


Arquimedes de Siracusa
(287 a.C. – 212 a.C.)

O raio da morte?

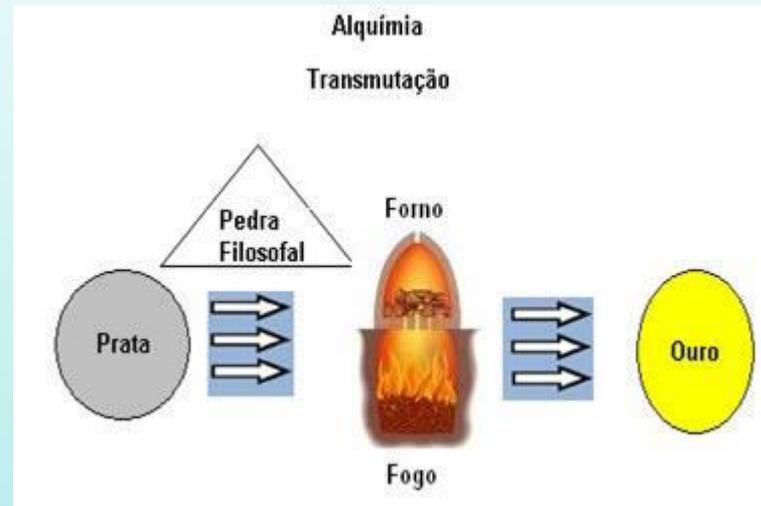
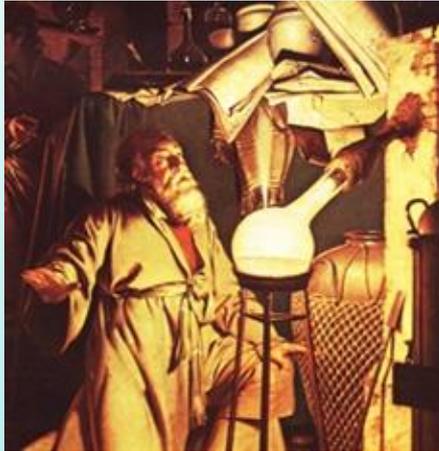


- Alquimia → Química



“A natureza tem *horror ao vácuo*?”

- Alquimia → Química



“A natureza tem *horror ao vácuo*?”



A frase “a natureza tem horror ao vácuo” é atribuída ao filósofo grego Aristóteles. Ele expressou essa ideia em suas obras, especialmente ao discutir a física e a metafísica. Aristóteles acreditava que o vácuo, ou a ausência de matéria, era impossível na natureza. Segundo sua visão, tudo deve estar preenchido por algo, e a ideia de um espaço completamente vazio era inaceitável.

Essa noção influenciou o pensamento científico por muitos séculos, até que, no século XVII, experimentos, como os de Evangelista Torricelli e Blaise Pascal, demonstraram que o vácuo poderia existir, desafiando a visão aristotélica. A frase permanece como uma reflexão sobre como as ideias científicas evoluem ao longo do tempo.

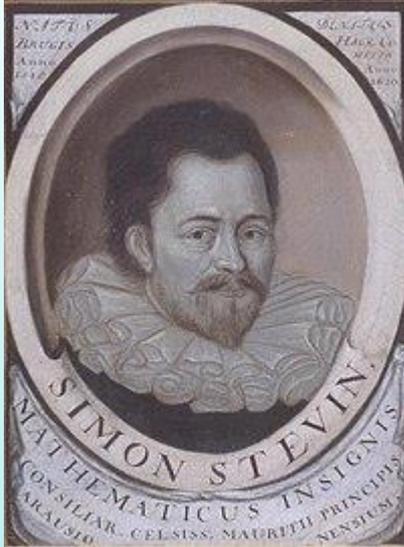
NA RENASCENÇA



Simon Stevin (1548 – 1620)

Teorema de Stevin: $P_{abs} = P_{atm} + \rho gh$

NA RENASCENÇA



Simon Stevin (1548 – 1620)

Teorema de Stevin: $P_{abs} = P_{atm} + \rho gh$



Galileu Galilei (1564 – 1642)

Trabalhos sobre hidrostática e estática:

- *Discorso intorno alle cose che stanno in su l'acqua, o che in quella si muovono* (1612);
- *Discorso del flusso e reflusso del mare* (1616);
- *Discorsi e Dimostrazioni Matematiche, intorno a due nuove scienze* (1638).

NA RENASCENÇA



Simon Stevin (1548 – 1620)

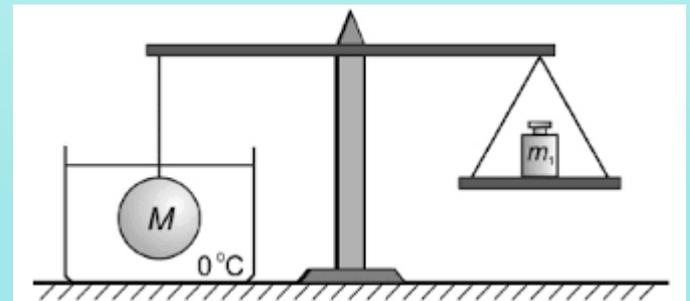
Teorema de Stevin: $P_{abs} = P_{atm} + \rho gh$



Galileo Galilei (1564 – 1642)

Trabalhos sobre hidrostática e estática:

- A balança hidrostática:



- O paradoxo de Arquimedes:

NA RENASCENÇA



Simon Stevin (1548 – 1620)

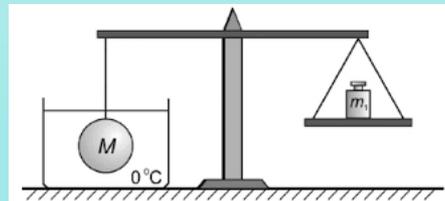
Teorema de Stevin: $P_{abs} = P_{atm} + \rho gh$



Galileo Galilei (1564 – 1642)

Trabalhos sobre hidrostática e estática:

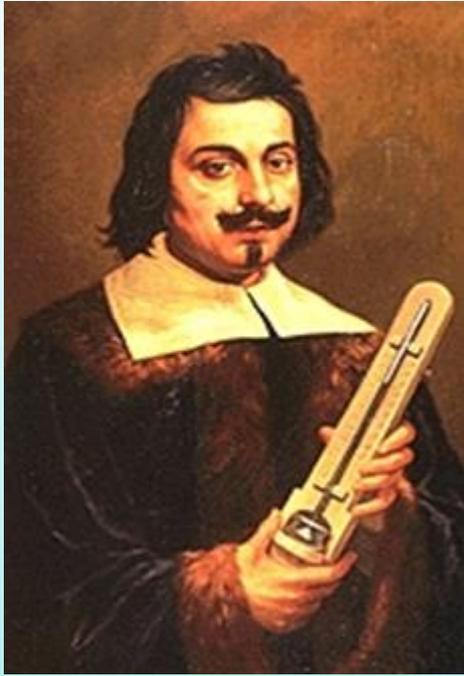
- A balança hidrostática:



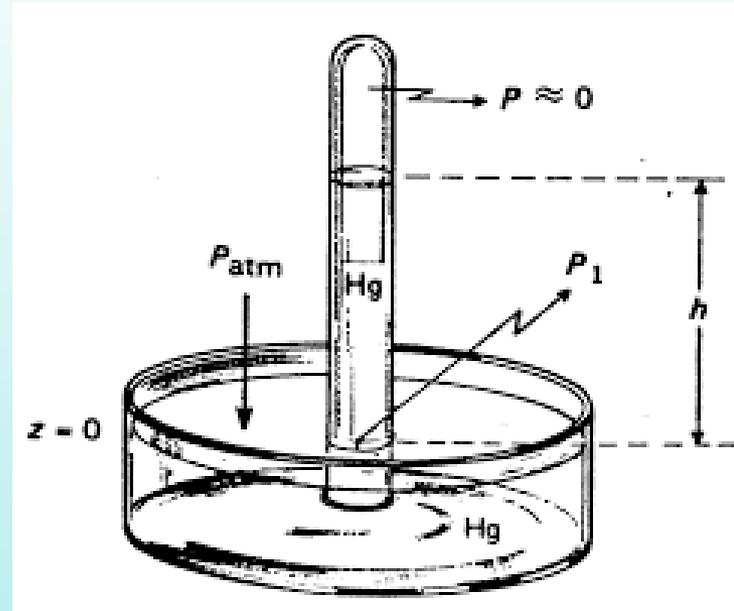
- O paradoxo hidrostático de Arquimedes/Galileu:



NO SÉCULO XVII

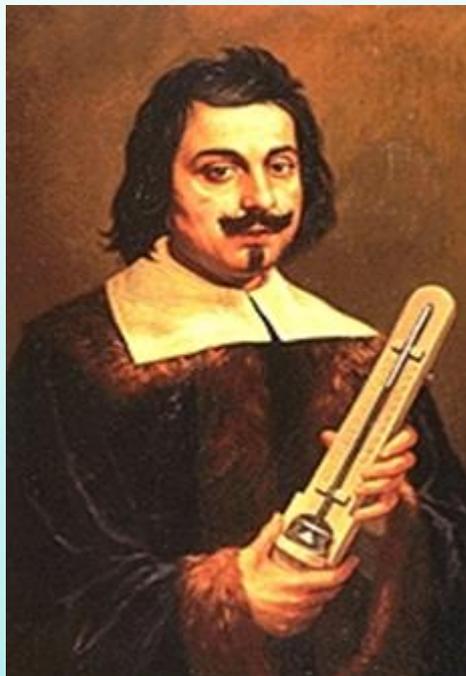


Evangelista Torricelli (1608 – 1647)

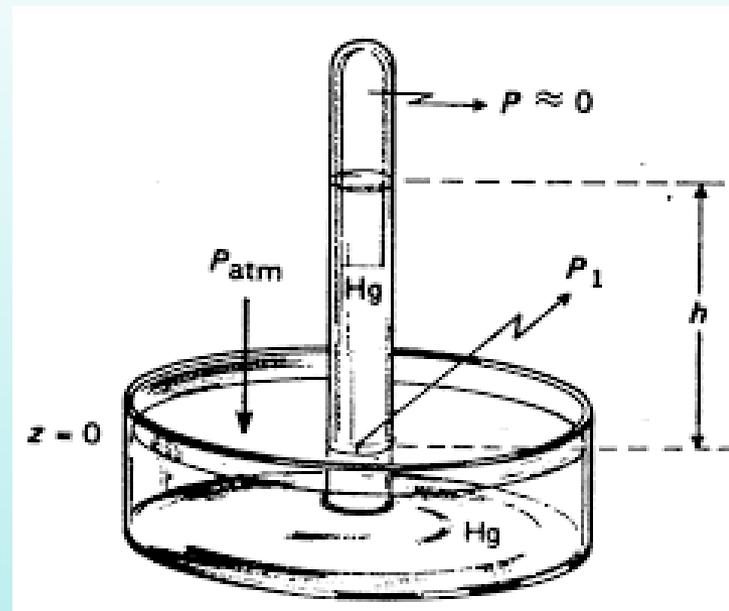


1643: o barômetro de mercúrio.

NO SÉCULO XVII



Evangelista Torricelli (1608 – 1647)



1643: o barômetro de mercúrio.



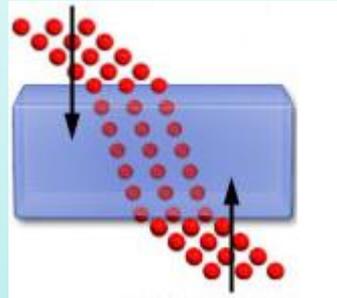
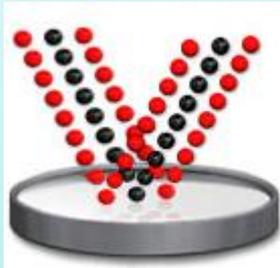
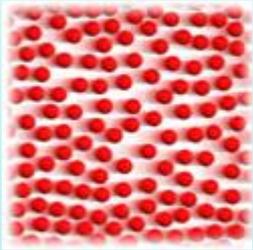
Otto von Guericke (1602-1686)



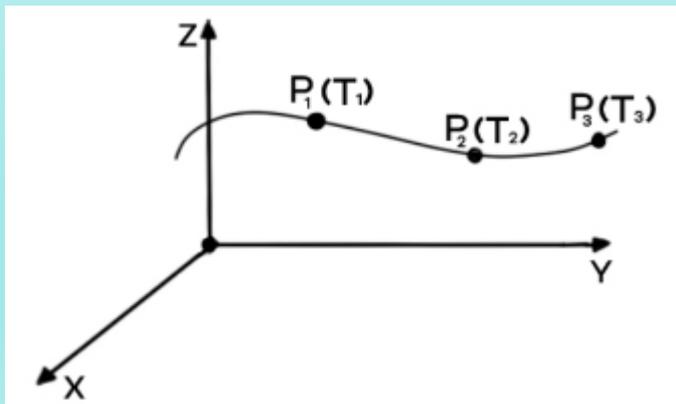
1654 Esferas de Magdeburgo

NO SÉCULO XVII

Newton adota a teoria corpuscular
(na óptica e na mecânica):



Isaac Newton (1643 - 1727)



$$1) \sum \vec{F} = 0 \Rightarrow \vec{v} = cte$$

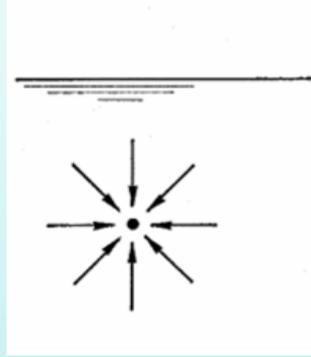
$$2) \vec{F} = \frac{d\vec{p}}{dt} = m\vec{a}$$

$$3) \vec{F}_{AB} = -\vec{F}_{BA}$$

NO SÉCULO XVII

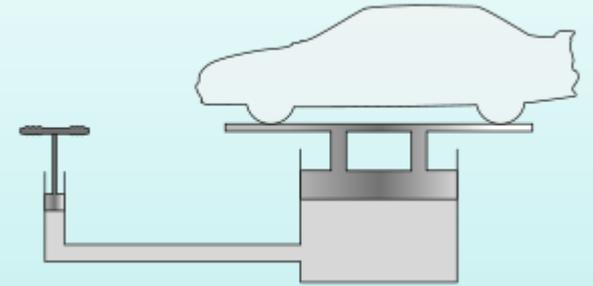


Blaise Pascal (1608 – 1647)



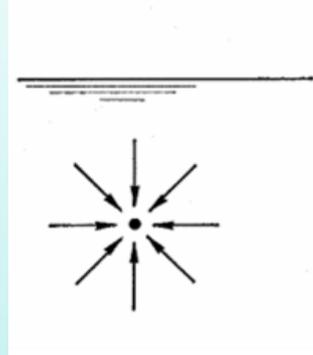
O princípio de Pascal.

$$P = \frac{F}{A}$$



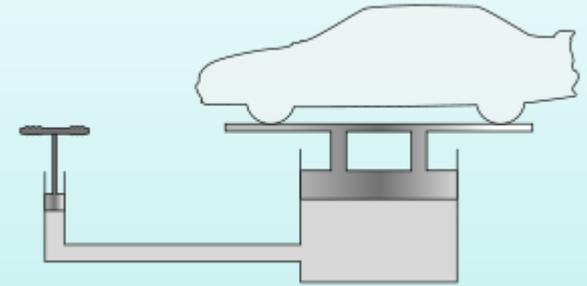
O elevador hidráulico.

NO SÉCULO XVII



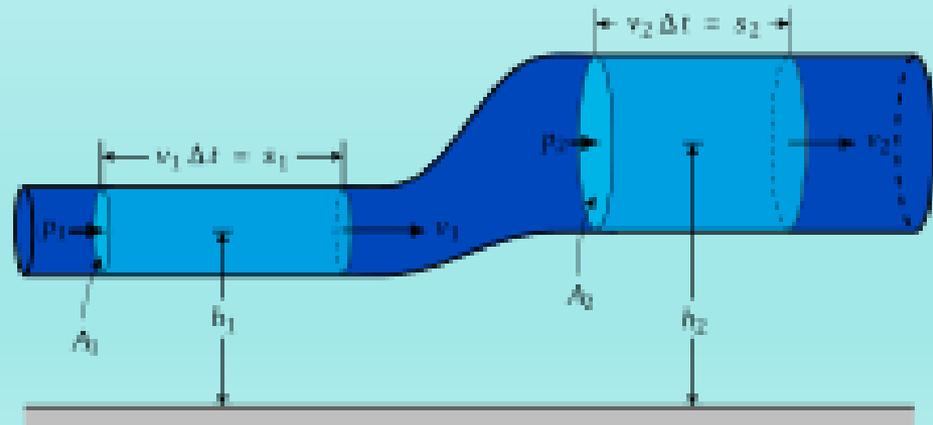
O princípio de Pascal.

$$P = \frac{F}{A}$$



O elevador hidráulico.

Blaise Pascal (1608 – 1647)



Princípio de conservação de energia.

Daniel Bernoulli (1602-1686)

NO SÉCULO XVIII

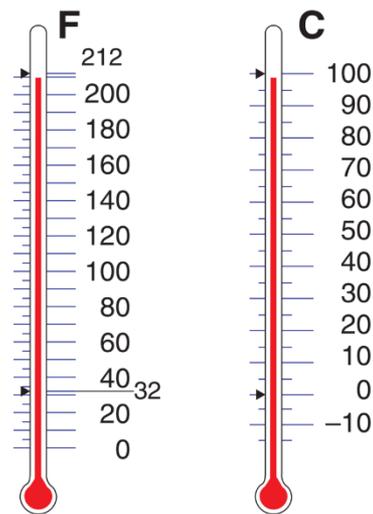
NO SÉCULO XVIII (EMERGÊNCIA DA TERMODINÂMICA)



Daniel Gabriel Fahrenheit (1686 – 1736)

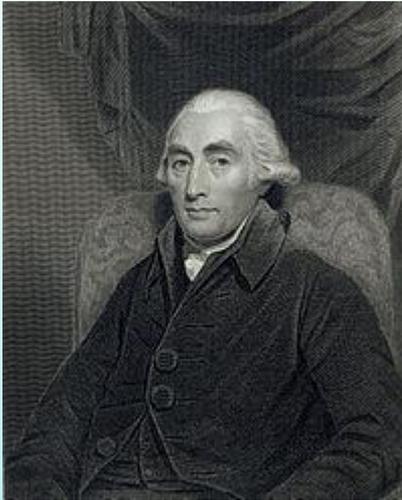


Anders Celsius (1701-1744)



$$\frac{\theta_C}{5} = \frac{\theta_F - 32}{9}$$

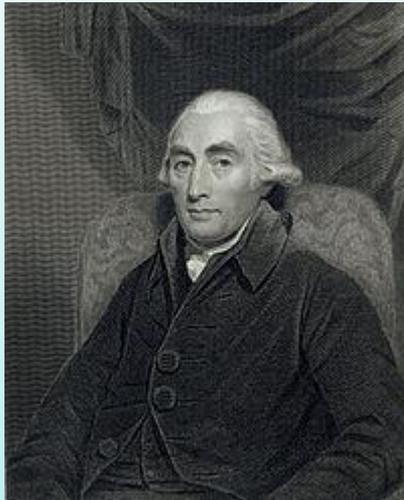
NO SÉCULO XVIII (EMERGÊNCIA DA TERMODINÂMICA)



Joseph Black (1728 – 1799)

- Calor específico: $c = \frac{Q}{m \Delta T}$
- Calor latente: $L = \frac{Q}{m}$

NO SÉCULO XVIII (EMERGÊNCIA DA TERMODINÂMICA)



Joseph Black (1728 – 1799)

- Calor específico: $c = \frac{Q}{m \Delta T}$
- Calor latente: $L = \frac{Q}{m}$

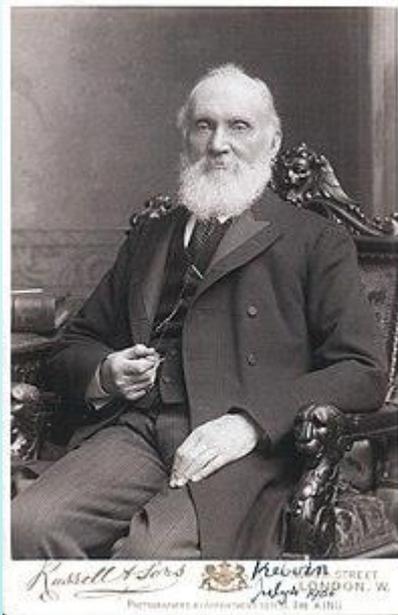


Antoine-Laurent de Lavoisier (1743-1794)

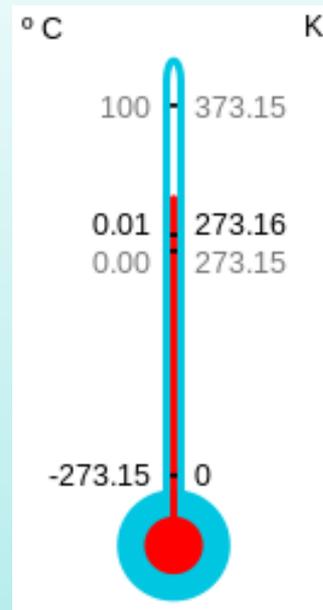
- Fundamentos da calorimetria:

$$Q = mc\Delta T$$

NO SÉCULO XIX



William Thomson (1824 – 1907)
Lord Kelvin



Kelvin to Celsius

$$^{\circ}\text{C} = \text{K} - 273.15$$

Introduz o conceito do **zero absoluto** (273,15 °C): a temperatura de menor energia possível. Teoricamente, seria a temperatura na qual a entropia atingiria seu valor mínimo que, segundo a interpretação clássica, a energia_cinética e térmica mutuamente equivalem a zero.

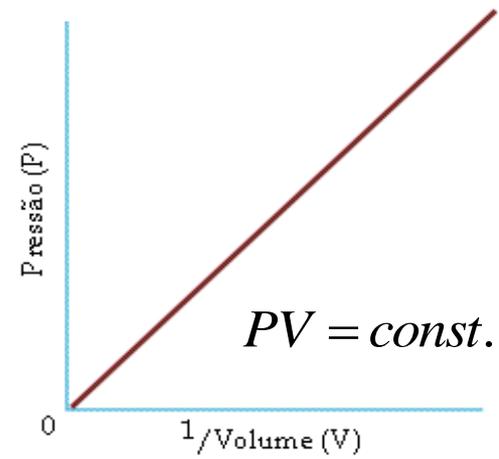
A LEI DOS GASES

A LEI DOS GASES



Robert Boyle (1627-1691)

1662 Lei de Boyle:

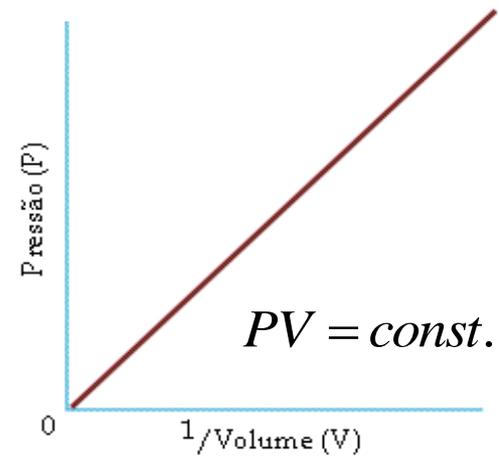


A LEI DOS GASES

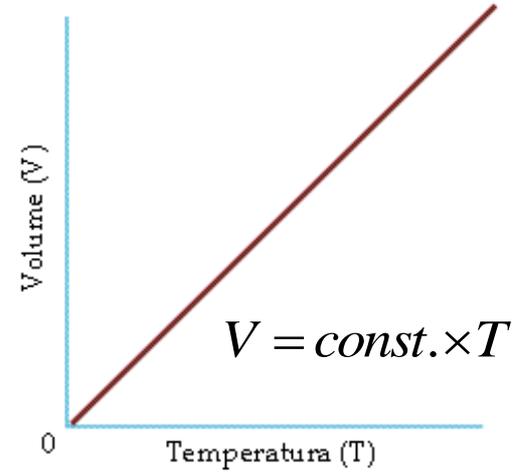


Robert Boyle (1627-1691)

1662 Lei de Boyle:



1787 Lei de Charles:
(publicada por Gay-Lussac em 1802)



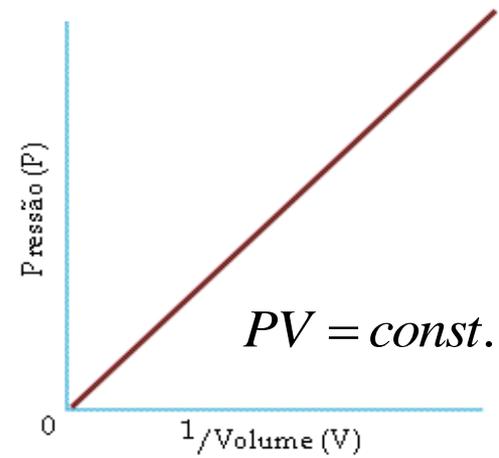
Jacques Alexandre Cesar Charles (1746-1823)

A LEI DOS GASES



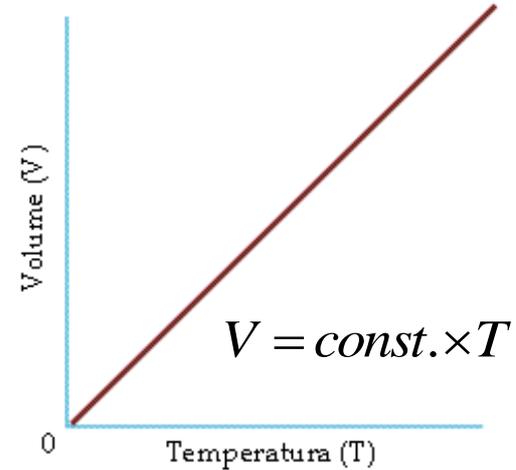
Robert Boyle (1627-1691)

1662 Lei de Boyle:



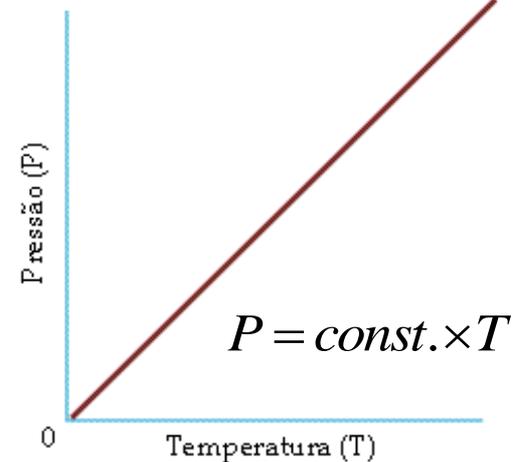
Jacques Alexandre Cesar Charles (1746-1823)

1787 Lei de Charles:
(publicada por Gay-Lussac em 1802)



Joseph-Louis Gay-Lussac (1778-1850)

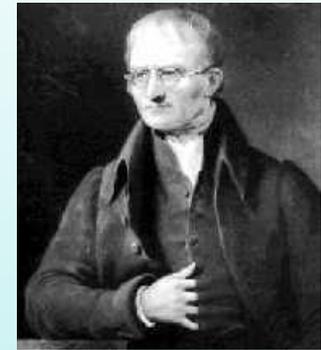
1802 Lei de Gay-Lussac:



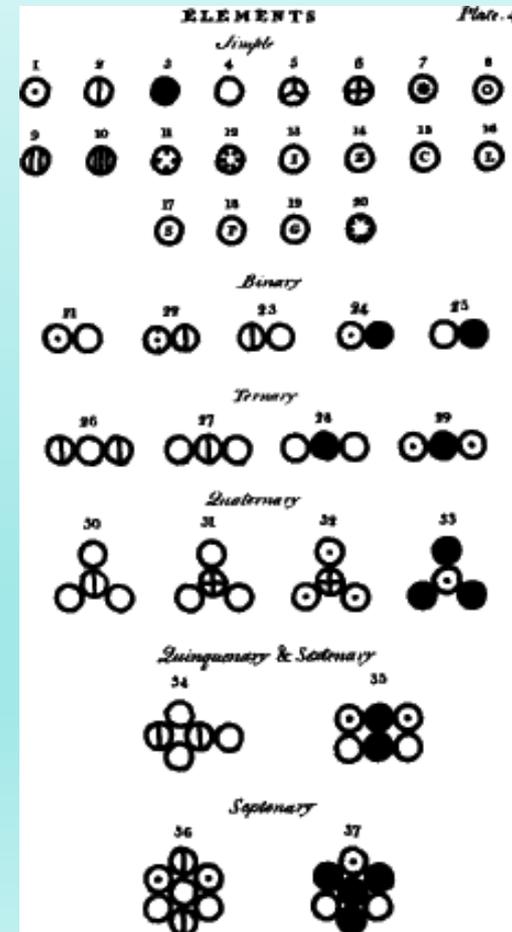
NO SÉCULO XIX

1803 Dalton estabelece uma base científica para a hipótese atomística com sua lei da composição constante: “dois elementos (A e B) que formam uma série de componentes combinam-se numa razão de pequenos números inteiros”.

CO_2 , H_2O , CO , H_2O_2 , CH_4 , C_2H_2 , ...



John Dalton (1766-1844)



NO SÉCULO XIX



Lorenzo Romano Amedeo Carlo Avogadro (1776-1856)

1811 Avogadro: “Sob as mesmas condições de temperatura e pressão, iguais volumes de todos os gases contêm o mesmo número de moléculas”.

$$V \propto n$$

hoje: $N_A \approx 6,022 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$

A LEI DOS GASES



Lei de Boyle:

$$PV = k_1,$$

$$(T, n = \text{const.})$$



Lei de
Charles:

$$V = k_2T,$$

$$(P, n = \text{const.})$$



Lei de Gay-
Lussac:

$$P = k_3T,$$

$$(V, n = \text{const.})$$



Princípio de
Avogadro:

$$V = k_4n,$$

$$(P, T = \text{const.})$$

A LEI DOS GASES



Lei de Boyle:

$$PV = k_1,$$

$$(T, n = \text{const.})$$



Lei de
Charles:

$$V = k_2T,$$

$$(P, n = \text{const.})$$



Lei de Gay-
Lussac:

$$P = k_3T,$$

$$(V, n = \text{const.})$$



Princípio de
Avogadro:

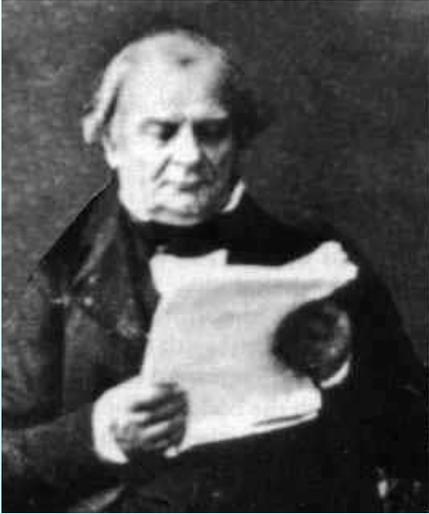
$$V = k_4n,$$

$$(P, T = \text{const.})$$

Variando-se tudo:

$$PV \propto nT$$

A LEI DOS GASES



1834 Clapeyron formula sua equação para os gases ideais:

$$PV = nRT$$

onde R é a constante dos gases, que no SI vale:

$$R = 8,31447 \text{ J/mol} \cdot \text{K}$$

Benoît Paul-Émile Clapeyron (1799-1864)

A LEI DOS GASES



1834 Clapeyron formula sua equação para os gases ideais:

$$PV = nRT$$

onde R é a constante dos gases, que no SI vale:

$$R = 8,31447 \text{ J/mol} \cdot \text{K}$$

Benoît Paul-Émile Clapeyron (1799-1864)

$$R = 8,31447 \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{mol} \cdot \text{K} = 8,31447 \text{ kPa} \cdot \ell/\text{mol} \cdot \text{K}$$

$$1 \text{ atm} = 101.325 \text{ Pa} \Rightarrow R = 8,20574 \cdot 10^{-2} \text{ atm} \cdot \ell/\text{mol} \cdot \text{K}$$

$$1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa} \Rightarrow R = 8,31447 \cdot 10^{-2} \text{ bar} \cdot \ell/\text{mol} \cdot \text{K}$$

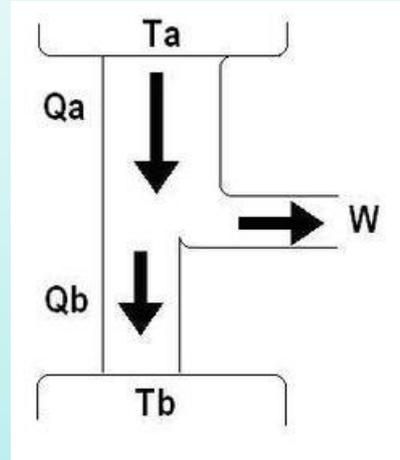
$$1 \text{ Torr} = 1 \text{ mmHg} = 133,322 \text{ Pa} \Rightarrow R = 62,364 \text{ Torr} \cdot \ell/\text{mol} \cdot \text{K}$$

ENTROPIA

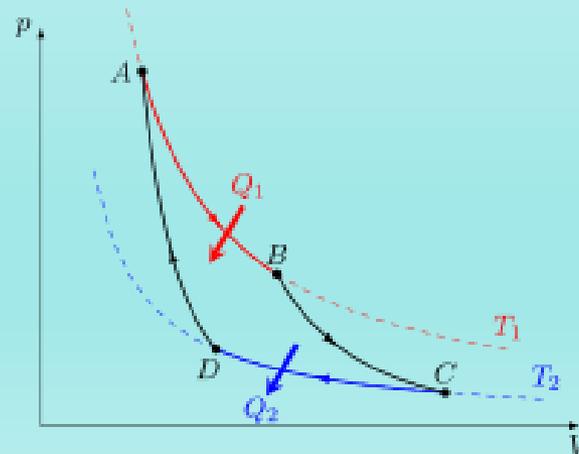


Nicolas Léonard Sadi Carnot (1796-1832)

1824 Carnot formula a segunda lei da termodinâmica:



e o ciclo de Carnot:

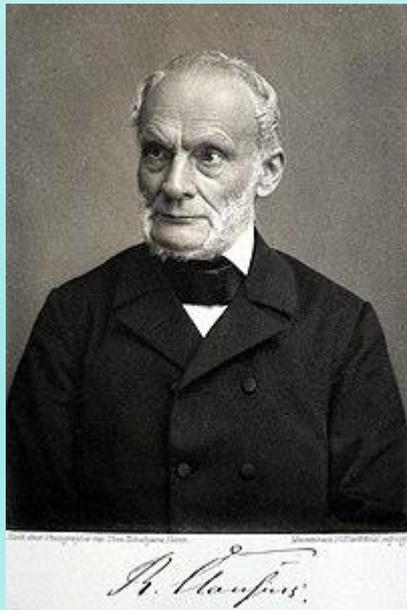
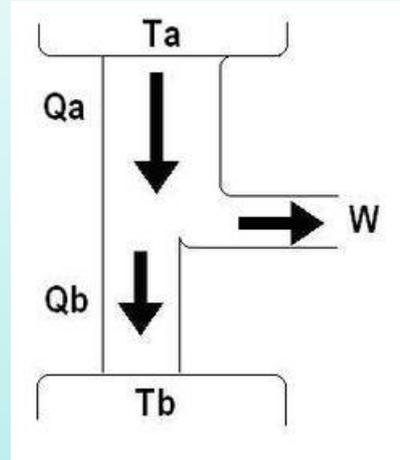


ENTROPIA



Nicolas Léonard Sadi Carnot (1796-1832)

1824 Carnot formula a segunda lei da termodinâmica:



Rudolf Clausius (1822-1888)

1865 Clausius formula o conceito de entropia:

$$\Delta S = \frac{Q}{T}$$

e define a unidade clausius (Cl):

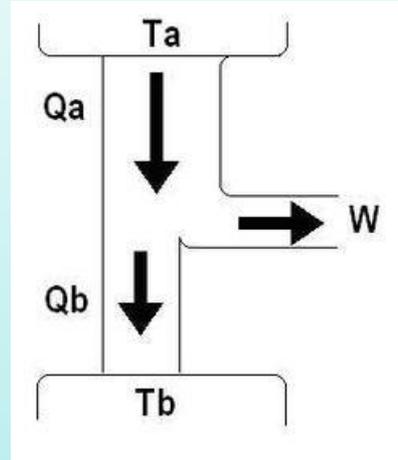
1 Cl = 1 cal/°C = 4,1868 joules por kelvin (J/K).

ENTROPIA

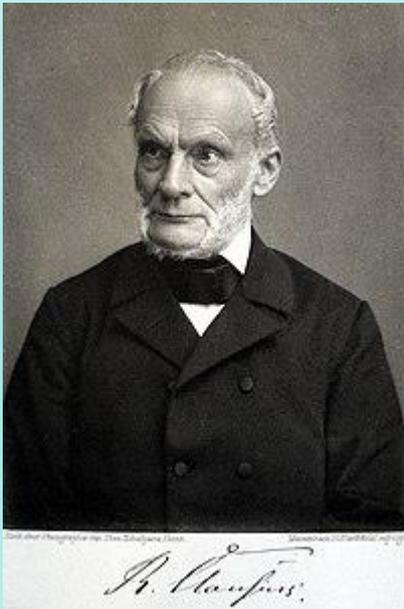


Nicolas Léonard Sadi Carnot (1796-1832)

1824 Carnot formula a segunda lei da termodinâmica:



$$\Delta S_{Univ} \geq 0$$



Rudolf Clausius (1822-1888)

1865 Clausius formula o conceito de entropia:

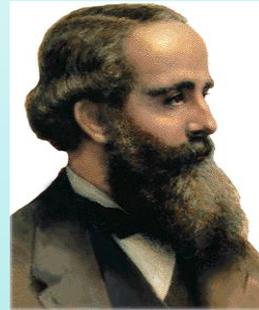
$$\Delta S = \frac{Q}{T}$$

e define a unidade clausius (Cl):

1 Cl = 1 cal/°C = 4,1868 joules por kelvin (J/K).

TEORIA CINÉTICA DOS GASES

Na década de **1860** Maxwell e Boltzmann formulam a teoria cinética dos gases.



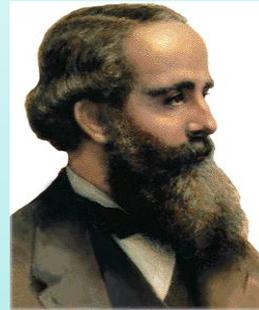
James Clerk Maxwell
(1831-1879)



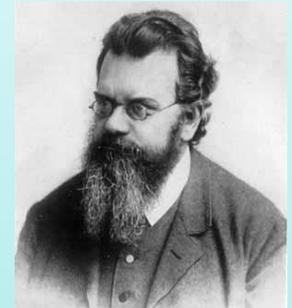
Ludwig Eduard Boltzmann
(1844-1906)

TEORIA CINÉTICA DOS GASES

Na década de **1860** Maxwell e Boltzmann formulam a teoria cinética dos gases.



James Clerk Maxwell
(1831-1879)

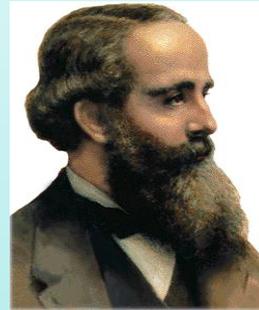


Ludwig Eduard Boltzmann
(1844-1906)

1. Um gás é uma coleção de moléculas em movimento aleatório contínuo.

TEORIA CINÉTICA DOS GASES

Na década de **1860** Maxwell e Boltzmann formulam a teoria cinética dos gases.



James Clerk Maxwell
(1831-1879)

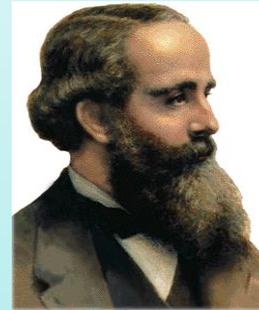


Ludwig Eduard Boltzmann
(1844-1906)

1. Um gás é uma coleção de moléculas em movimento aleatório contínuo;
2. As moléculas de um gás são pontos infinitesimalmente pequenas.

TEORIA CINÉTICA DOS GASES

Na década de **1860** Maxwell e Boltzmann formulam a teoria cinética dos gases.



James Clerk Maxwell
(1831-1879)

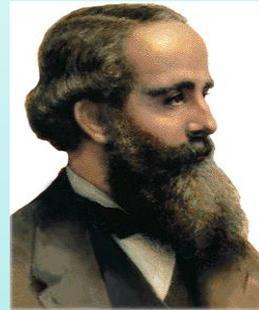


Ludwig Eduard Boltzmann
(1844-1906)

1. Um gás é uma coleção de moléculas em movimento aleatório contínuo;
2. As moléculas de um gás são pontos infinitesimalmente pequenas;
3. As partículas movem-se em linha reta até colidirem.

TEORIA CINÉTICA DOS GASES

Na década de **1860** Maxwell e Boltzmann formulam a teoria cinética dos gases.



James Clerk Maxwell
(1831-1879)



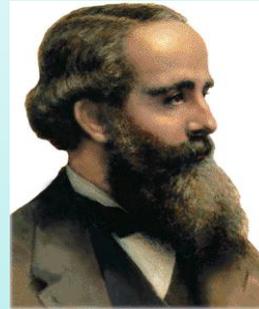
Ludwig Eduard Boltzmann
(1844-1906)

1. Um gás é uma coleção de moléculas em movimento aleatório contínuo;
2. As moléculas de um gás são pontos infinitesimalmente pequenas;
3. As partículas movem-se em linha reta até colidirem;
4. As moléculas não influenciam umas às outras, exceto durante as colisões.

TEORIA CINÉTICA DOS GASES

Na década de **1860** Maxwell e Boltzmann formulam a teoria cinética dos gases.

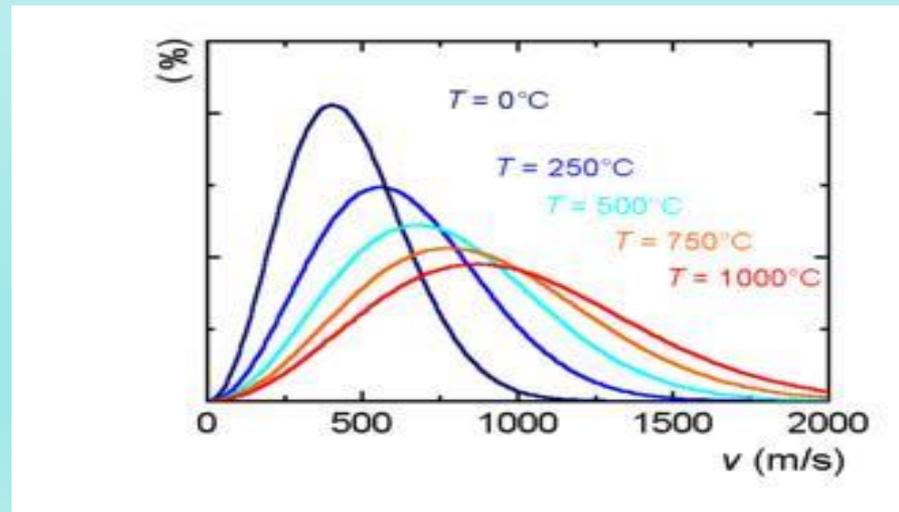
1. Um gás é uma coleção de moléculas em movimento aleatório contínuo;
2. As moléculas de um gás são pontos infinitesimalmente pequenas;
3. As partículas movem-se em linha reta até colidirem;
4. As moléculas não influenciam umas às outras, exceto durante as colisões.



James Clerk Maxwell
(1831-1879)



Ludwig Eduard Boltzmann
(1844-1906)

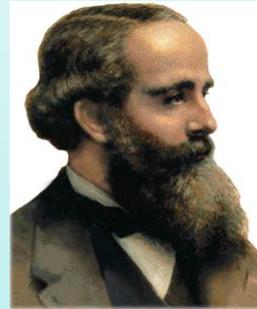


Distribuição de velocidades de Maxwell-Boltzmann.

TEORIA CINÉTICA DOS GASES

Na década de **1860** Maxwell e Boltzmann formulam a teoria cinética dos gases.

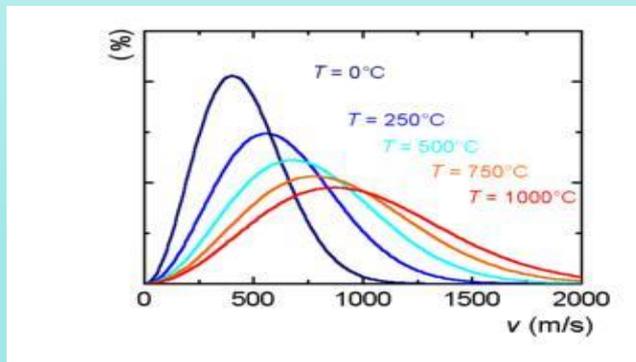
1. Um gás é uma coleção de moléculas em movimento aleatório contínuo;
2. As moléculas de um gás são pontos infinitesimalmente pequenas;
3. As partículas movem-se em linha reta até colidirem;
4. As moléculas não influenciam umas às outras, exceto durante as colisões.



James Clerk Maxwell
(1831-1879)



Ludwig Eduard Boltzmann
(1844-1906)



Distribuição de velocidades de Maxwell-Boltzmann.

A energia cinética média por molécula é:

$$\langle E_c \rangle = \frac{1}{2} m v_{rms}^2 = \frac{m}{2} \frac{3RT}{M} = \frac{3}{2} \frac{RT}{N_A} \equiv \frac{3}{2} kT,$$

onde $k = \frac{R}{N_A} = 1,38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$ é a **constante de Boltzmann**.

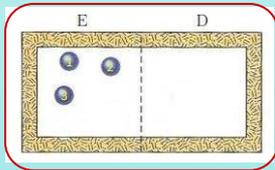
A FÓRMULA DE BOLTZMANN



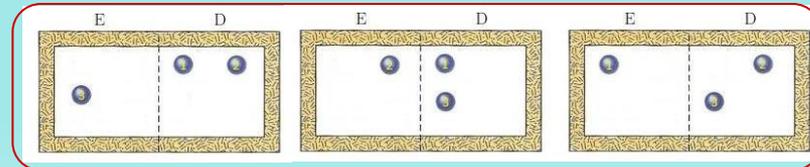
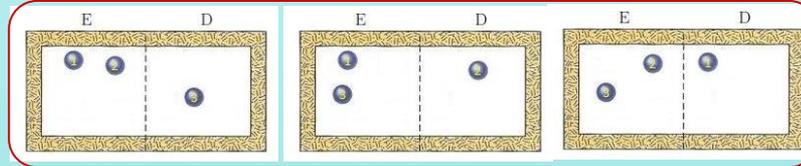
Ludwig Eduard Boltzmann (1844-1906)

Multiplicidade de estados (Ω):

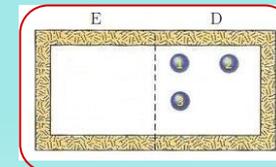
$\Omega=1$



$\Omega=3$



$\Omega=3$



$\Omega=1$

Sistemas de 2 estados.

A FÓRMULA DE BOLTZMANN

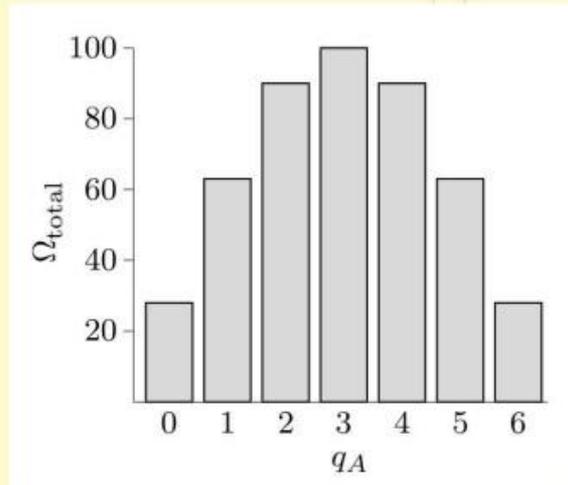


Ludwig Eduard Boltzmann (1844-1906)

Multiplicidade de estados (Ω):

q_A	Ω_A	q_B	Ω_B	$\Omega_{\text{total}} = \Omega_A \Omega_B$
0	1	6	28	28
1	3	5	21	63
2	6	4	15	90
3	10	3	10	100
4	15	2	6	90
5	21	1	3	63
6	28	0	1	28

$$462 = \binom{6+6-1}{6}$$



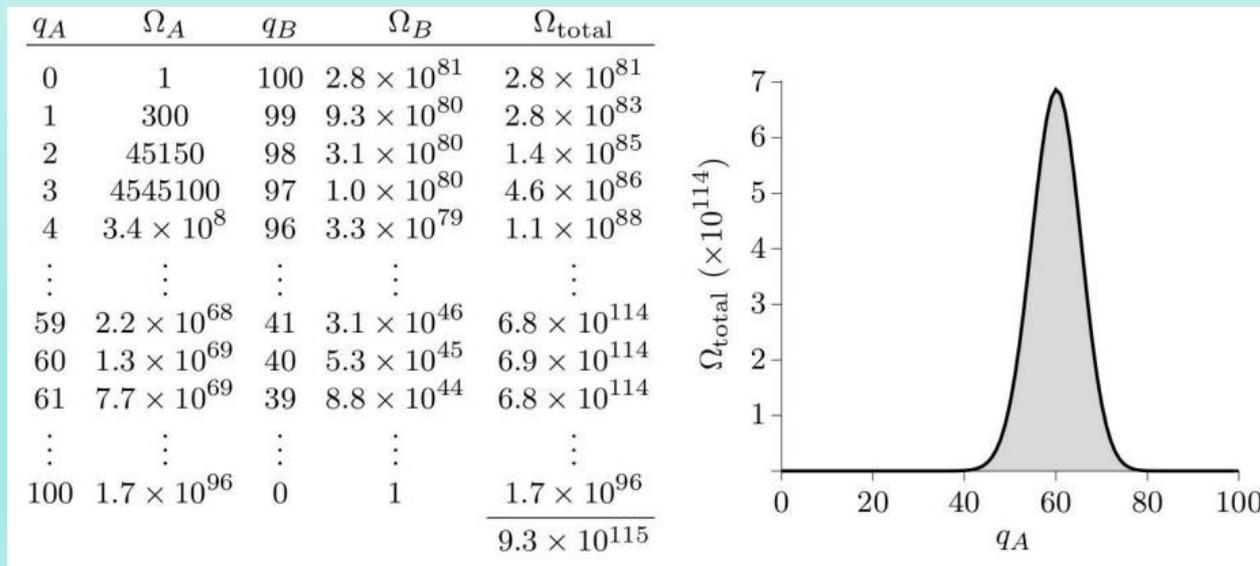
Sólidos de Einstein.

A FÓRMULA DE BOLTZMANN



Ludwig Eduard Boltzmann (1844-1906)

Multiplicidade de estados (Ω):



Sistemas interagentes (grandes q)

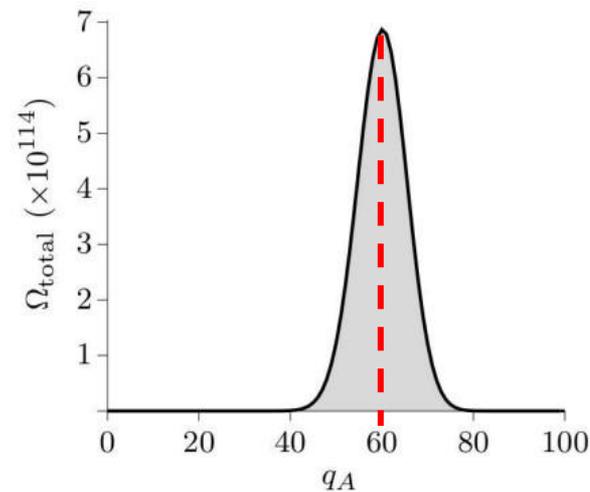
A FÓRMULA DE BOLTZMANN



Ludwig Eduard Boltzmann (1844-1906)

Multiplicidade de estados (Ω):

q_A	Ω_A	q_B	Ω_B	Ω_{total}
0	1	100	2.8×10^{81}	2.8×10^{81}
1	300	99	9.3×10^{80}	2.8×10^{83}
2	45150	98	3.1×10^{80}	1.4×10^{85}
3	4545100	97	1.0×10^{80}	4.6×10^{86}
4	3.4×10^8	96	3.3×10^{79}	1.1×10^{88}
\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots
59	2.2×10^{68}	41	3.1×10^{46}	6.8×10^{114}
60	1.3×10^{69}	40	5.3×10^{45}	6.9×10^{114}
61	7.7×10^{69}	39	8.8×10^{44}	6.8×10^{114}
\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots
100	1.7×10^{96}	0	1	1.7×10^{96}
				9.3×10^{115}



Equilíbrio termodinâmico

A FÓRMULA DE BOLTZMANN

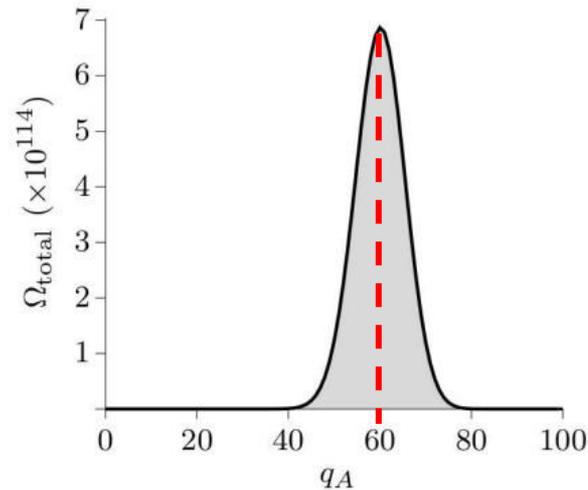
$$S = k \ln \Omega$$



Ludwig Eduard Boltzmann (1844-1906)

Multiplicidade de estados (Ω):

q_A	Ω_A	q_B	Ω_B	Ω_{total}
0	1	100	2.8×10^{81}	2.8×10^{81}
1	300	99	9.3×10^{80}	2.8×10^{83}
2	45150	98	3.1×10^{80}	1.4×10^{85}
3	4545100	97	1.0×10^{80}	4.6×10^{86}
4	3.4×10^8	96	3.3×10^{79}	1.1×10^{88}
\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots
59	2.2×10^{68}	41	3.1×10^{46}	6.8×10^{114}
60	1.3×10^{69}	40	5.3×10^{45}	6.9×10^{114}
61	7.7×10^{69}	39	8.8×10^{44}	6.8×10^{114}
\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots
100	1.7×10^{96}	0	1	1.7×10^{96}
				9.3×10^{115}



Equilíbrio termodinâmico

A FÓRMULA DE BOLTZMANN



Túmulo de Boltzmann em Viena.

