



Universidade Federal do ABC



SOCIEDADE BRASILEIRA DE FÍSICA

MNPEF Mestrado Nacional
Profissional em
Ensino de Física



Marcos no Desenvolvimento da Física

Marco #8: O átomo nuclear

Prof. Marcelo Augusto Leigui de Oliveira

leigui@ufabc.edu.br

NA ANTIGUIDADE ...

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**



NA ANTIGUIDADE ...



Os físicos jônicos:

Physis (em grego Φύσις, "Natureza")



Tales de Mileto (c 625-c 547 a.C.):
relatou que havia certas pedras na
região da Magnésia que eram capazes
de atrair pedaços de ferro.



Magnetita
(Fe_3O_4 : 69% de FeO e 31% de Fe_2O_3)

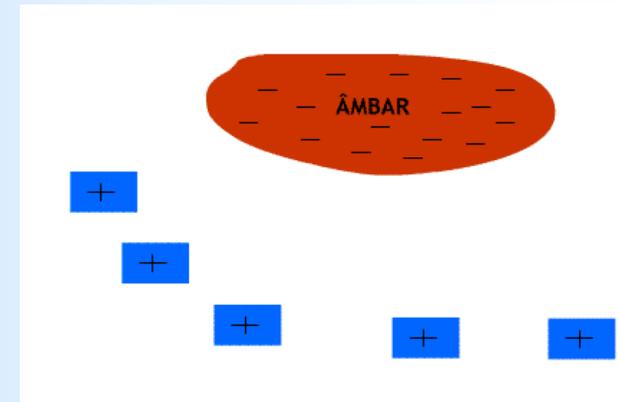
NA ANTIGUIDADE ...

Os físicos jônicos:

Physis (em grego Φύσις, "Natureza")



Tales de Mileto (c 625-c 547 a.C.): também relatou que o âmbar (*elektron*, em grego) quando atritado, podia atrair pedaços de papel.



NA ANTIGUIDADE ...

•4 elementos empedoclianianos:

água, ar, terra e fogo;



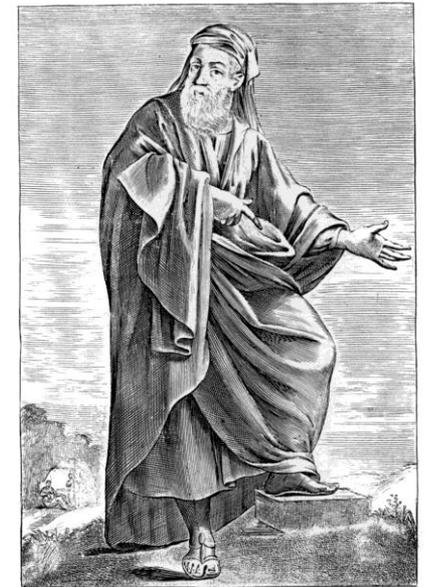
•2 forças ou princípios:

amor (*philia*) e ódio (*ekthos*), ou seja, atração e repulsão;



• A luz viaja em **linha reta**.

Os raios são emitidos pelos olhos e interagem com os corpos iluminados.



Empedocle's.

Empédocles (c 490 – c 430 a.C.)

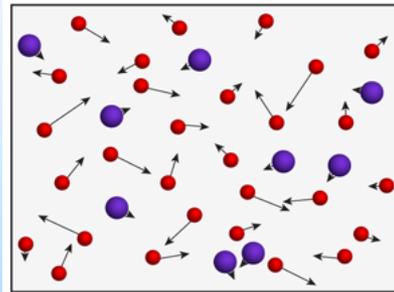


NA ANTIGUIDADE ...

Demócrito (c 460 – c 380 a.C.) e seu discípulo **Leucipo** (c 460 – c 370 a.C.)

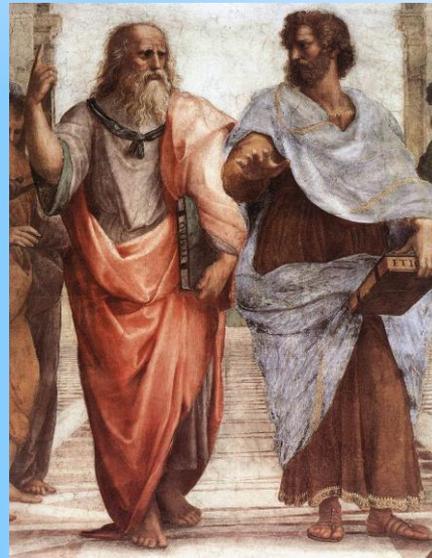
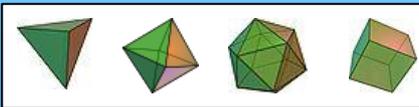


Os primeiros atomistas:
átomos (indivisíveis) em constante movimento no **vácuo**.



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

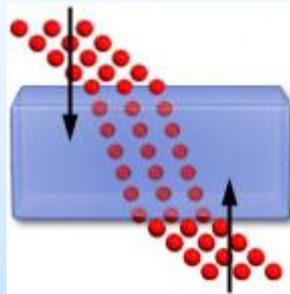
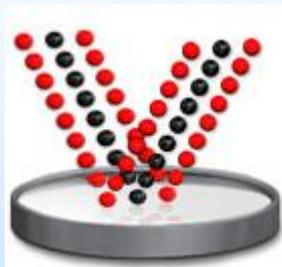
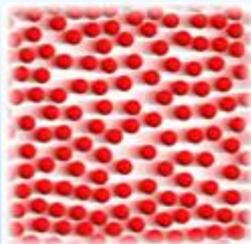
• propõe um modelo geométrico para os 4 elementos:



- rejeita a hipótese atomística: a matéria deve ser **contínua** e o vácuo não é físico;
- 5 elementos: **terra, fogo, água, ar e éter**.
- a luz é uma **onda** e propaga-se num meio muito rarefeito: o **éter**;
- achava que a luz arranca “lascas” dos corpos iluminados;

NO SÉCULO XVII

Teoria corpuscular: Newton defendia que a luz era composta por uma “multidão de pequenos corpúsculos de vários tamanhos que pulavam dos corpos iluminados”.

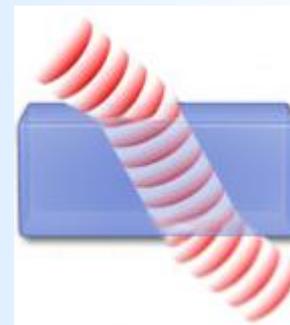
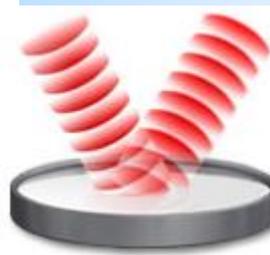
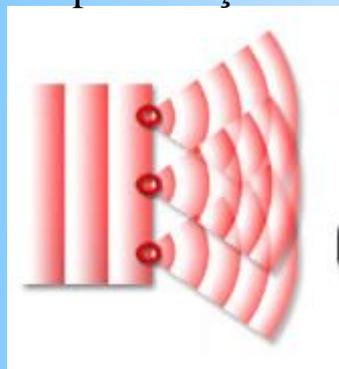


Sir Isaac Newton (1642-1727)

Teoria ondulatória: publicou *Traté de la lumière* de 1690, onde assumiu que o espaço era preenchido por um meio (éter) e que as perturbações do meio que constituíam a luz eram passadas para suas vizinhas que se tornam novas fontes de perturbação.

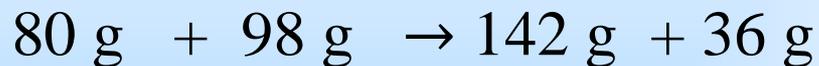


Christiaan Huygens (1629 - 1695)



NO SÉCULO XVIII

1774 Lavoisier estabelece a lei da conservação da massa: “em uma reação química, feita em recipiente fechado, a soma das massas dos reagentes é igual à soma das massas dos produtos.”



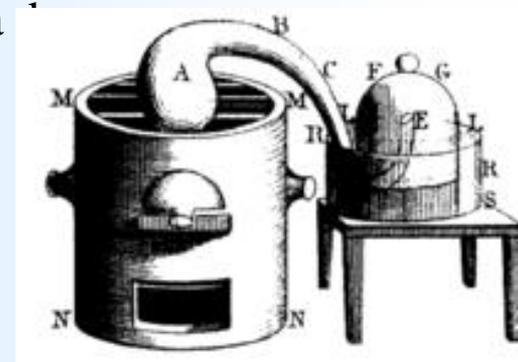
$$\sum m_i = 178 \text{ g} = \sum m_f = 178 \text{ g}$$



Antoine-Laurent de Lavoisier (1743-1794)

“Na natureza, nada se cria, nada se destrói, mas tudo se transforma.”

- **1778** Identificou e batizou o oxigênio, desmitificando a teoria *flogisto* e formulando a teoria da combustão;
- Identificou e/ou previu outros elementos: H, Si, S, ... colaborando na nomenclatura dos elementos químicos;
- Contribuiu na construção do **sistema métrico** ...

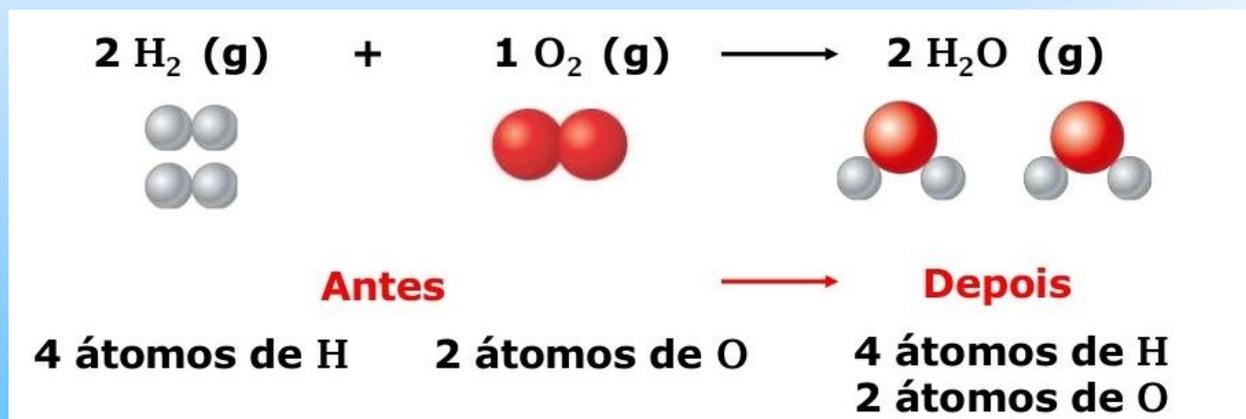


NO SÉCULO XVIII

1794 Proust estabelece a lei da composição constante: “na formação de um determinado composto, seus elementos constituintes combinam-se sempre na mesma proporção de massa, independente da origem ou modo de preparação do composto.”



Joseph Louis Proust (1754-1826)



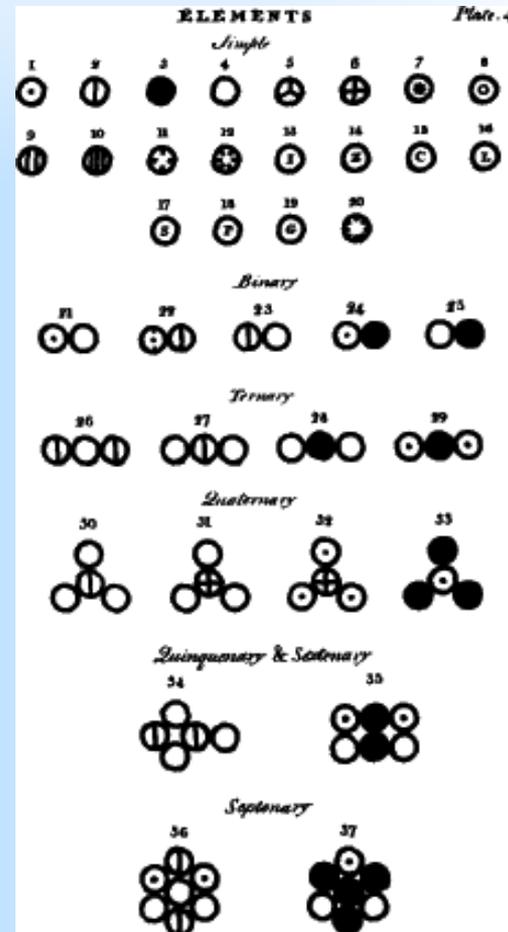
NO SÉCULO XIX

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 , ...



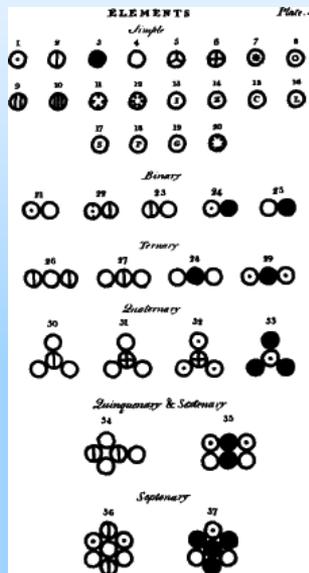
John Dalton (1766-1844)



NO SÉCULO XIX

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)

1808 Joseph-Louis Gay-Lussac: “a razão dos volumes de gases usados para produzir uma reação química é representada por pequenos números inteiros”.



Joseph-Louis Gay-Lussac (1778-1850)

NO SÉCULO XIX

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

$$N_0 = 6.02 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$$



Lorenzo Romano Amedeo Carlo Avogadro (1776-1856)

NO SÉCULO XIX

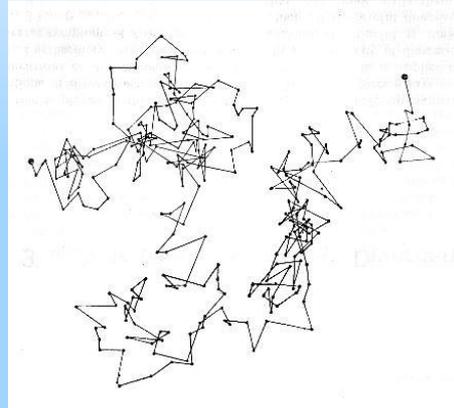
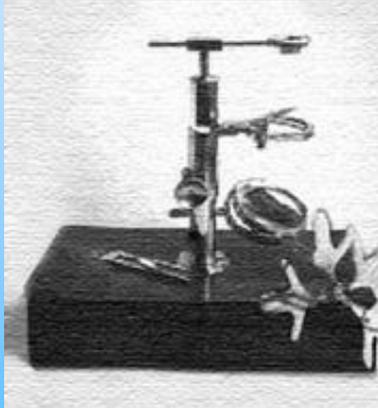
1811 Lorenzo Amedeo Avogadro: “Sob as mesmas condições de temperatura e pressão, iguais volumes de todos os gases contêm o mesmo número de moléculas”.

$$N_0 = 6.02 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$$

Lorenzo Romano Amedeo Carlo Avogadro (1776-1856)



1827 Robert Brown descobre o movimento errático de partículas de pólen sobre a água, quando vistas pelo microscópio o *movimento browniano*.



Robert Brown (1773-1858)

NO SÉCULO XIX

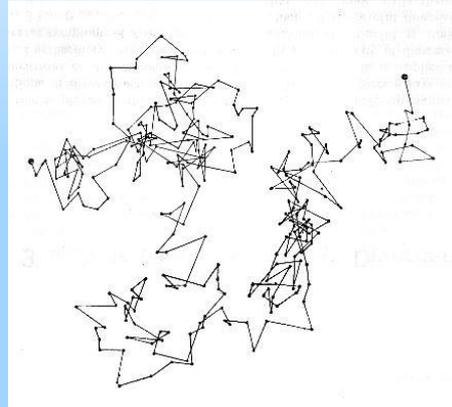
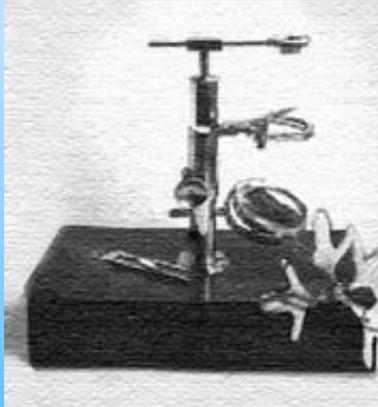
1811 Lorenzo Amedeo Avogadro: “Sob as mesmas condições de temperatura e pressão, iguais volumes de todos os gases contêm o mesmo número de moléculas”.

$$N_0 = 6.02 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$$

Lorenzo Romano Amedeo Carlo Avogadro (1776-1856)



1827 Robert Brown descobre o movimento errático de partículas de pólen sobre a água, quando vistas pelo microscópio o *movimento browniano*.



Robert Brown (1773-1858)

1865 Joseph Loschmidt obtém uma primeira aproximação do número de Avogadro, determinando o diâmetro da molécula de ar (10^{-9} m) pelo coeficiente de condensação e o livre caminho médio.

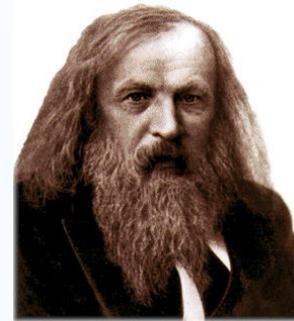
$$\text{Número de Loschmidt} = 2,686763 \times 10^{25} \text{ m}^{-3}$$



Johann Josef Loschmidt (1821-1895)

NO SÉCULO XIX

1869 Dmitri Mendeleev montou uma tabela com as propriedades periódicas dos 63 elementos conhecidos.



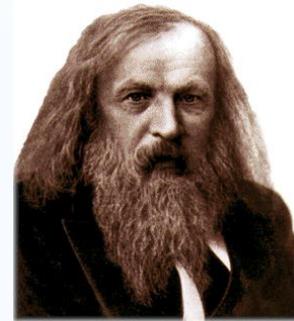
Dmitri Ivanovich Mendeleev (1834-1907)

ОПЫТЪ СИСТЕМЫ ЭЛЕМЕНТОВЪ.
ОСНОВАННОЙ НА ИХЪ АТОМНОМЪ ВѢСѢ И ХИМИЧЕСКОМЪ СХОДСТВѢ.

		Tl = 50	Zr = 90	? = 180.
		V = 51	Nb = 94	Ta = 182.
		Cr = 52	Mo = 96	W = 186.
		Mn = 55	Rh = 104,4	Pt = 197,4.
		Fe = 56	Ru = 104,4	Ir = 198
	Ni = Co = 59	Pl = 106,6	Os = 199.	
H = 1		Cu = 63,4	Ag = 108	Hg = 200
Be = 9,4	Mg = 24	Zn = 65,2	Cd = 112	
B = 11	Al = 27,4	? = 68	Ur = 116	Au = 197?
C = 12	Si = 28	? = 70	Sn = 118	
N = 14	P = 31	As = 75	Sb = 122	Bi = 210?
O = 16	S = 32	Se = 79,4	Te = 128?	
F = 19	Cl = 35,5	Br = 80	I = 127	
Li = 7	Na = 23	K = 39	Rb = 85,4	Cs = 133
		Ca = 40	Sr = 87,6	Ba = 137
		? = 45	Ce = 92	Pb = 207.
		?Er = 56	La = 94	
		?Yt = 60	Di = 95	
		?In = 75,6	Th = 118?	

NO SÉCULO XIX

1869 Dmitri Mendeleev montou uma tabela com as propriedades periódicas dos 63 elementos conhecidos.



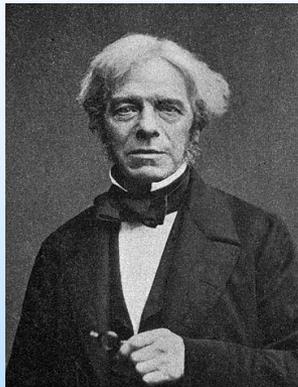
Dmitri Ivanovich Mendeleev (1834-1907)

ОПЫТЪ СИСТЕМЫ ЭЛЕМЕНТОВЪ.
ОСНОВАННОЙ НА ИХЪ АТОМНОМЪ ВѢСѢ И ХИМИЧЕСКОМЪ СХОДСТВѢ.

		Tl = 50	Zr = 90	? = 180.
		V = 51	Nb = 94	Ta = 182.
		Cr = 52	Mo = 96	W = 186.
		Mn = 55	Rh = 104,4	Pt = 197,4.
		Fe = 56	Ru = 104,4	Ir = 198.
	Ni = 59	Co = 59	Pt = 106,6	Os = 199.
H = 1		Cu = 63,4	Ag = 108	Hg = 200
Be = 9,4	Mg = 24	Zn = 65,2	Cd = 112	
B = 11	Al = 27,4	? = 68	Ur = 116	Au = 197?
C = 12	Si = 28	? = 70	Sn = 118	
N = 14	P = 31	As = 75	Sb = 122	Bi = 210?
O = 16	S = 32	Se = 79,4	Te = 128?	
F = 19	Cl = 35,5	Br = 80	I = 127	
Li = 7	Na = 23	K = 39	Rb = 85,4	Cs = 133
		Ca = 40	Sr = 87,6	Ba = 137
		? = 45	Ce = 92	Pb = 207.
		?Er = 56	La = 94	
		?Yt = 60	Di = 95	
		?In = 75,6	Th = 118?	

$m_{Cl} = 35,5?$

NO SÉCULO XIX



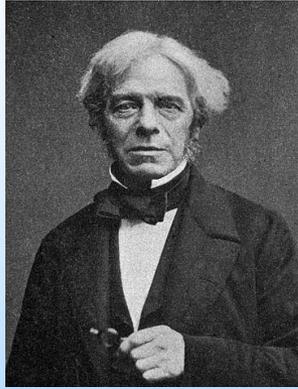
Michael Faraday (1791 - 1867),
físico e químico britânico.



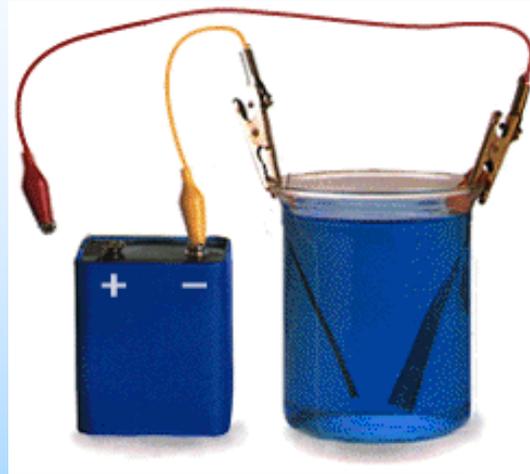
Humphry Davy (1778 - 1829),
químico britânico.

NO SÉCULO XIX

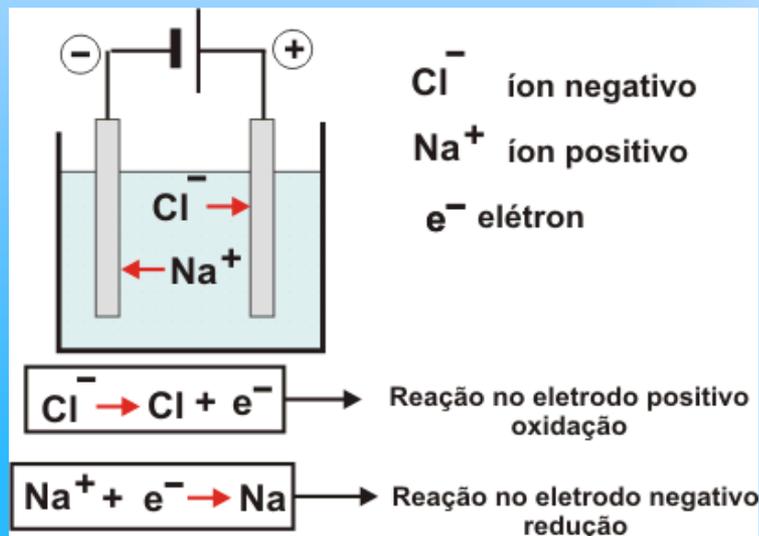
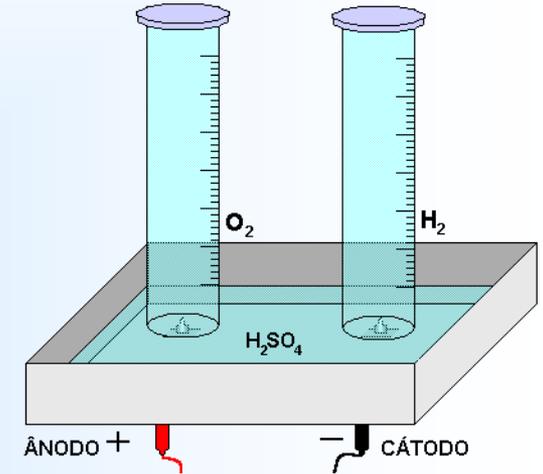
Em 1833, Michael Faraday descobre as **leis da eletrólise**:



Michael Faraday (1791 - 1867), físico e químico britânico.



Célula eletrolítica



Líquido eletrolítico ou **solução eletrolítica**:

- Sal (NaCl) + água (H_2O):
 $\leftarrow \text{Na}^+ \quad \text{Cl}^- \rightarrow$
- Ácido (H_2SO_4) + água (H_2O):
 $\leftarrow \text{H}^+ \quad \text{SO}_4^{--} \rightarrow$
- Base (NaOH) + água (H_2O):
 $\leftarrow \text{Na}^+ \quad \text{OH}^- \rightarrow$

As leis da eletrólise de Faraday

Definições:

1. **Equivalente eletroquímico** é o quociente entre a massa de material depositado (ou gás formado) pela carga elétrica que circula pela solução eletrolítica:

$$\varepsilon_e \equiv \frac{m}{q},$$

onde $[m] = \text{g}$ e $[q] = \text{C}$.

2. **Equivalente químico** é o quociente entre a massa molar (átomo-grama) e a valência do elemento:

$$\varepsilon_q \equiv \frac{M}{z},$$

onde $[M] = \text{g}$ e $[z] = \text{adimensional}$.



Célula eletrolítica

Elemento	M(g)	z	ε_q (g)	ε_e (g/C)
H	1,008	1	1,008	$1,046 \cdot 10^{-5}$
O	16,00	2	8,00	$8,291 \cdot 10^{-5}$
Cl	35,46	1	35,46	$3,675 \cdot 10^{-4}$
Ni	58,69	2	29,35	$3,040 \cdot 10^{-4}$
Cu	63,57	2	31,785	$3,294 \cdot 10^{-4}$
Zn	65,38	2	32,69	$3,385 \cdot 10^{-4}$
Ag	107,88	1	107,88	$1,180 \cdot 10^{-3}$
Pb	207,20	2	103,60	$1,073 \cdot 10^{-3}$

As leis da eletrólise de Faraday

- A carga de um íon monovalente é (a carga elementar):

$$q_1 = e = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{C}$$

- A carga de um íon de valência z é, portanto:

$$q_z = ze = z \cdot 1,602 \cdot 10^{-19} \text{C}$$

Se durante um dado tempo Δt são coletados n_i íons em um dos terminais:

$$q = n_i ze \Rightarrow n_i = \frac{q}{ze}$$

e formam-se átomos com massa total: $m = n_i \langle m_{\text{átomo}} \rangle$, onde $\langle m_{\text{átomo}} \rangle$ é a massa média de 1 átomo do elemento:

$$\langle m_{\text{átomo}} \rangle = \frac{m}{n_i} = \frac{M}{N_A} = \frac{M}{6,022 \cdot 10^{23}}$$

Então:

$$m = n_i \frac{M}{N_A} = \frac{q}{ze} \frac{M}{N_A} = \frac{1}{eN_A} \frac{qM}{z} \Rightarrow \frac{m}{q} = \left(\frac{1}{eN_A} \right) \frac{M}{z} \equiv \frac{1}{F} \frac{M}{z} \Rightarrow \boxed{\frac{m}{q} = \frac{1}{F} \frac{M}{z}}$$

onde definimos a **constante de Faraday**:

$$F \equiv eN_A = 1,602 \cdot 10^{-19} \cdot 6,022 \cdot 10^{23} = 9,647 \cdot 10^4 \text{ C/mol} \Rightarrow \boxed{F = 9,647 \cdot 10^4 \text{ C/mol}}$$



Célula eletrolítica

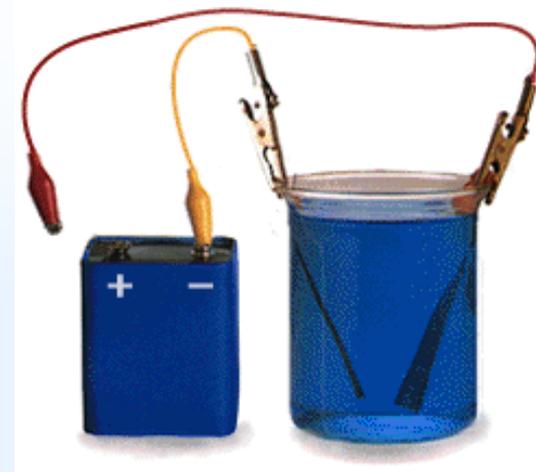
Na época, nem N_A nem e eram conhecidos, mas Faraday obteve (o produto) F experimentalmente.

As leis da eletrólise de Faraday

Relembrando-se as definições dos equivalentes eletroquímico ($\varepsilon_e \equiv \frac{m}{q}$) e químico ($\varepsilon_q \equiv \frac{M}{z}$), pode-se reescrever a equação obtida anteriormente na seguinte forma:

$$\frac{m}{q} = \frac{1}{F} \frac{M}{z} \Rightarrow \varepsilon_e = \frac{\varepsilon_q}{F}$$

que é a **segunda lei da eletrólise de Faraday**. A **primeira lei da eletrólise de Faraday** é a própria definição do equivalente eletroquímico.



Célula eletrolítica

Assim, formulamos as **2 leis da eletrólise de Faraday**:

1. Na eletrólise, a massa eletrodepositada num terminal é proporcional à carga elétrica recebida:

$$m = \varepsilon_e q$$

2. Na eletrólise, o equivalente químico é proporcional ao equivalente eletroquímico:

$$\varepsilon_q = F \varepsilon_e$$

As leis da eletrólise de Faraday

Note que para o hidrogênio:

$$\varepsilon_e = \frac{m}{q} = 1,046 \cdot 10^{-5} \text{g/C}$$



Célula eletrolítica

Elemento	M(g)	z	ε_q (g)	ε_e (g/C)
H	1,008	1	1,008	1,046 · 10 ⁻⁵
O	16,00	2	8,00	8,291 · 10 ⁻⁵
Cl	35,46	1	35,46	3,675 · 10 ⁻⁴
Ni	58,69	2	29,35	3,040 · 10 ⁻⁴
Cu	63,57	2	31,785	3,294 · 10 ⁻⁴
Zn	65,38	2	32,69	3,385 · 10 ⁻⁴
Ag	107,88	1	107,88	1,180 · 10 ⁻³
Pb	207,20	2	103,60	1,073 · 10 ⁻³

As leis da eletrólise de Faraday

Note que para o hidrogênio:

$$\varepsilon_e = \frac{m}{q} = 1,046 \cdot 10^{-5} \text{g/C} \Rightarrow \left(\frac{q}{m}\right)_{\text{H}^+} = 9,5602 \cdot 10^4 \text{C/g}$$

que é chamada de **razão carga-massa** (do hidrogênio, neste caso).



Célula eletrolítica

Elemento	M(g)	z	ε_q (g)	ε_e (g/C)
H	1,008	1	1,008	1,046·10 ⁻⁵
O	16,00	2	8,00	8,291·10 ⁻⁵
Cl	35,46	1	35,46	3,675·10 ⁻⁴
Ni	58,69	2	29,35	3,040·10 ⁻⁴
Cu	63,57	2	31,785	3,294·10 ⁻⁴
Zn	65,38	2	32,69	3,385·10 ⁻⁴
Ag	107,88	1	107,88	1,180·10 ⁻³
Pb	207,20	2	103,60	1,073·10 ⁻³

As leis da eletrólise de Faraday

Note que para o hidrogênio:

$$\varepsilon_e = \frac{m}{q} = 1,046 \cdot 10^{-5} \text{g/C} \Rightarrow \left(\frac{q}{m}\right)_{\text{H}^+} = 9,5602 \cdot 10^4 \text{C/g}$$

que é chamada de **razão carga-massa** (do hidrogênio, neste caso).



Célula eletrolítica

Note também que da 2ª lei:

$$\varepsilon_q = F \varepsilon_e \Rightarrow \frac{M}{z} = F \frac{m}{q} \Rightarrow$$

$$q = Fz \left(\frac{m}{M}\right) = Fz \left(\frac{n_i}{N_A}\right) = n_i \left(\frac{Fz}{N_A}\right)$$

Se estivermos considerando um átomo monovalente, como o de hidrogênio ($z=1$), vem:

$$q = n_i \left(\frac{F}{N_A}\right) = n_i \cdot e \Rightarrow q = n_i \cdot e$$

que é uma **lei de quantização**, isto é, as cargas só podem assumir valores múltiplos de um valor fundamental e .

Elemento	M(g)	z	ε_q (g)	ε_e (g/C)
H	1,008	1	1,008	1,046·10 ⁻⁵
O	16,00	2	8,00	8,291·10 ⁻⁵
Cl	35,46	1	35,46	3,675·10 ⁻⁴
Ni	58,69	2	29,35	3,040·10 ⁻⁴
Cu	63,57	2	31,785	3,294·10 ⁻⁴
Zn	65,38	2	32,69	3,385·10 ⁻⁴
Ag	107,88	1	107,88	1,180·10 ⁻³
Pb	207,20	2	103,60	1,073·10 ⁻³

NO SÉCULO XIX

As leis da eletrólise de Faraday

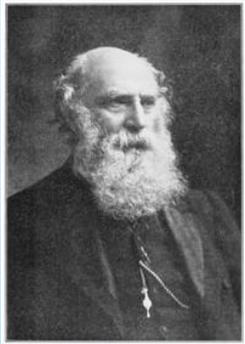
Para um átomo monovalente:

$$q = n_i \cdot e$$

que é uma **lei de quantização**, isto é, as cargas só podem assumir valores múltiplos de um valor fundamental e .



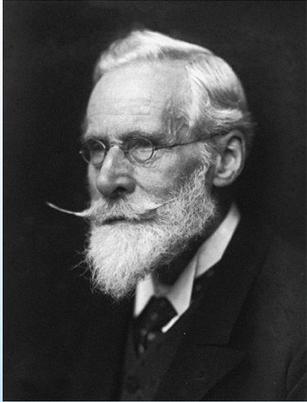
Célula eletrolítica



- Em **1874**, Stoney propôs a **unidade fundamental da eletricidade**, posteriormente, chamando-a de *elétron* (1891);
- Stoney estimou a carga do elétron em: $e \approx 10^{-20}$ C.

George Johnstone Stoney (1826 - 1911), físico irlandês.

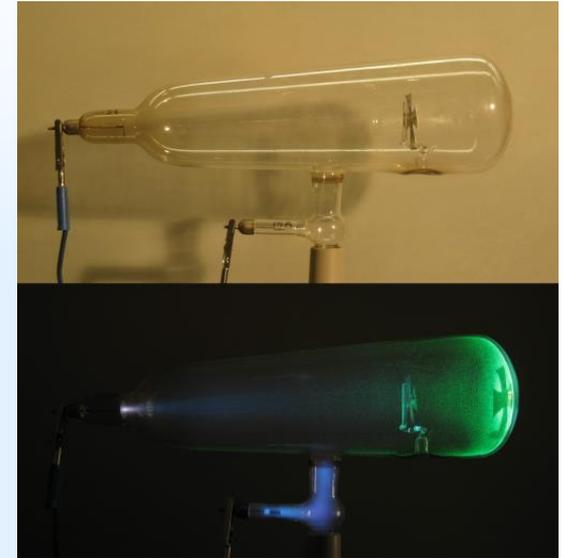
NO SÉCULO XIX



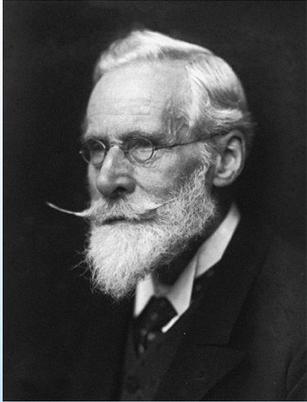
William Crookes (1826 - 1911), físico e químico britânico.

Em 1875, Sir William Crookes desenvolveu o **tubo de Crookes**, ou **tubo de raios catódicos**.

- **Raios catódicos**: emitidos pelo terminal negativo (**cátodo**)
- Produziam calor e fosforescência
- Propagam-se em linha reta, exceto sob a ação de um campo magnético
- Qual a natureza: **radiação** x **matéria**?



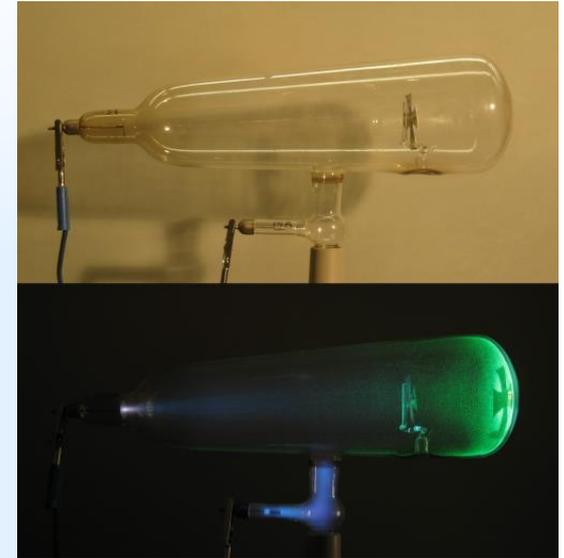
NO SÉCULO XIX



William Crookes (1826 - 1911), físico e químico britânico.

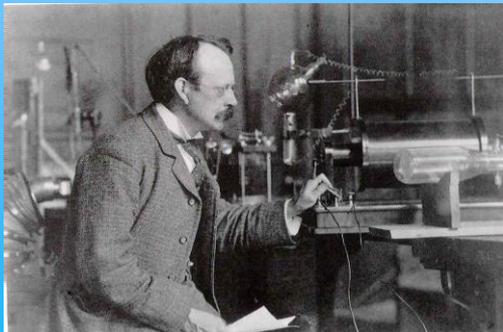
Em 1875, Sir William Crookes desenvolveu o **tubo de Crookes**, ou **tubo de raios catódicos**.

- **Raios catódicos**: emitidos pelo terminal negativo (**cátodo**)
- Produziam calor e fosforescência
- Propagam-se em linha reta, exceto sob a ação de um campo magnético
- Qual a natureza: **radiação** x **matéria**?



Em 1897, no Laboratório Cavendish da Universidade de Cambridge, o Prof. Thomson estudou os raios catódicos sob uma configuração especial de campos elétricos e magnéticos e mediu a

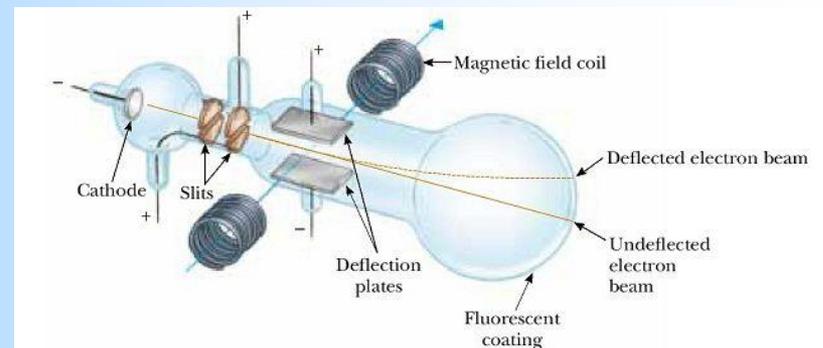
razão carga-massa do elétron: $\left(\frac{q}{m}\right)_{e^-} = 1,759 \cdot 10^8 \text{C/g}$.



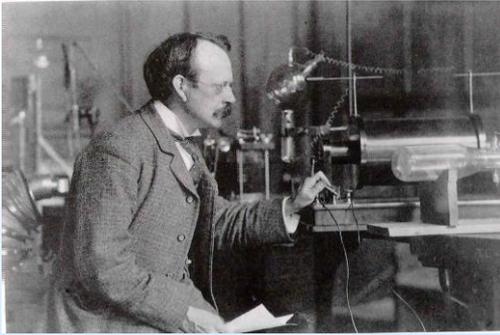
Joseph John Thomson (1856 - 1940), físico britânico.



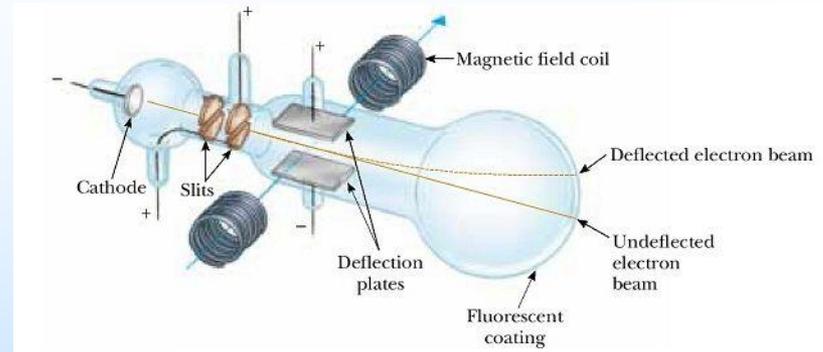
1906



O experimento de Thomson



Joseph John Thomson (1856 - 1940), físico britânico.



- A força elétrica no capacitor é: $F_E = qE$
- A força magnética no solenóide é: $F_B = qvB$

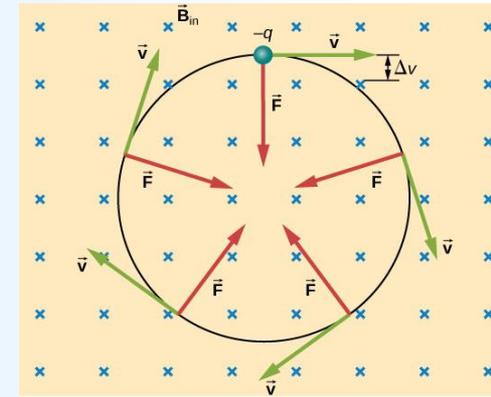
1. Thomson ajustou os campos, de tal forma que os raios catódicos não fossem defletidos (passando reto):

$$F_E = F_B \Rightarrow v = \frac{E}{B} \approx 2,4 \cdot 10^7 \text{ m/s} \approx 0,08c$$

2. Thomson desligou o campo elétrico, deixando o campo magnético:

$$F_B = F_{centrípeta} \Rightarrow \frac{q}{m} = \frac{E}{B^2 R} \Rightarrow$$

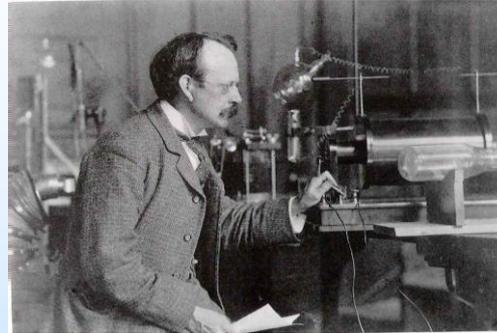
$$\left(\frac{q}{m}\right)_{e^-} = 1,759 \cdot 10^8 \text{ C/g}$$



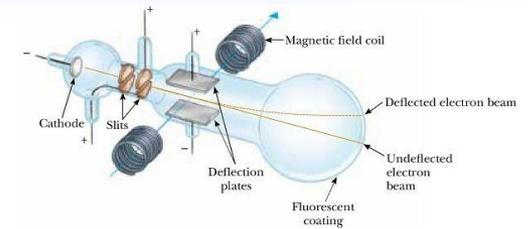
O experimento de Thomson

Comparando-se os resultados:

- Thomson: $\left(\frac{q}{m}\right)_{e^-} = 1,759 \cdot 10^8 \text{C/g}$



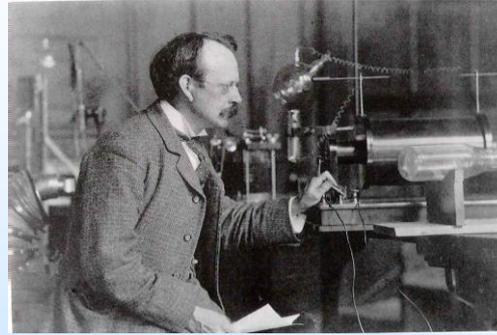
Joseph John Thomson



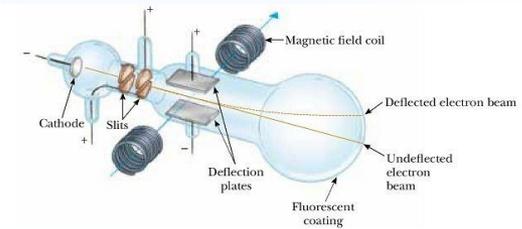
O experimento de Thomson

Comparando-se os resultados:

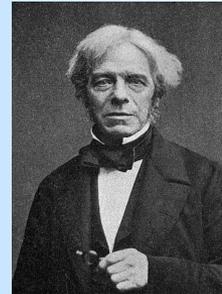
- Thomson: $\left(\frac{q}{m}\right)_{e^-} = 1,759 \cdot 10^8 \text{C/g}$



Joseph John Thomson



- Faraday: $\left(\frac{q}{m}\right)_{\text{H}^+} = 9,5602 \cdot 10^4 \text{C/g}$



Michael Faraday

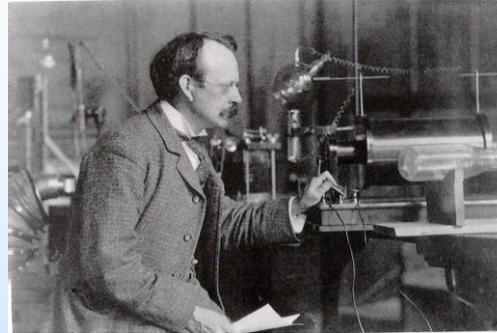


O experimento de Thomson

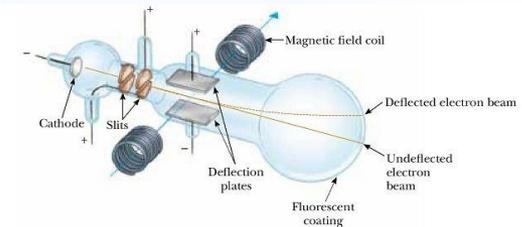


Comparando-se os resultados:

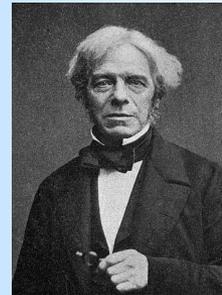
- Thomson: $\left(\frac{q}{m}\right)_{e^-} = 1,759 \cdot 10^8 \text{C/g}$



Joseph John Thomson



- Faraday: $\left(\frac{q}{m}\right)_{\text{H}^+} = 9,5602 \cdot 10^4 \text{C/g}$



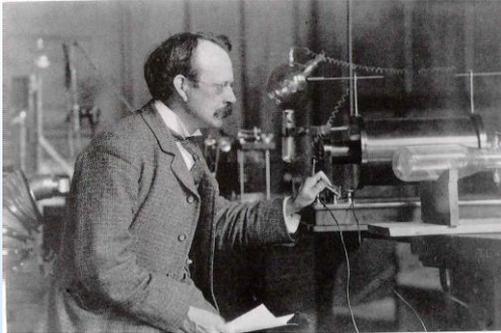
Michael Faraday



Notamos que:

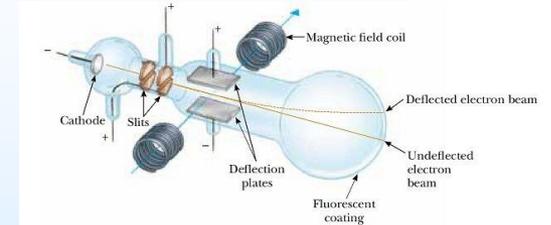
$$\frac{(q/m)_{e^-}}{(q/m)_{\text{H}^+}} = \frac{1,759 \cdot 10^8 \text{C/g}}{9,5602 \cdot 10^4 \text{C/g}} \approx 1840 \Rightarrow \boxed{\frac{m_{\text{H}^+}}{m_{e^-}} \approx 1840}$$

O modelo atômico de Thomson



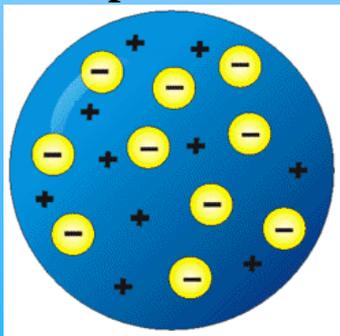
Joseph John Thomson

O resultado ($m_{e^-} \approx m_{H^+}/1840$) levou Thomson a propor, em 1904, o modelo do **pudim de ameixas** para o átomo.



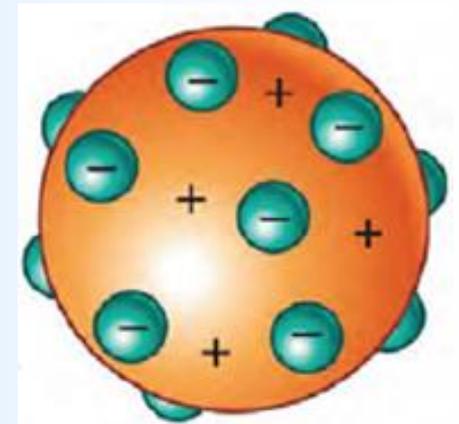
O modelo atômico de Thomson: os átomos são formados por pequenas esferas de carga positiva uniforme (os pudins) cravejadas por corpúsculos eletrificados negativamente, os elétrons (as ameixas), cujas massas são ~ 1840 vezes menores que a dos átomos.

Exemplo:



Ne ($Z=10$):

base (pudim) de carga: $q = +10e$
e 10 elétrons (ameixas): $\sum q = -10e$



\longleftrightarrow
 $\sim 10^{-10} \text{ m}$

NOS SÉCULOS XIX & XX

Radioatividade

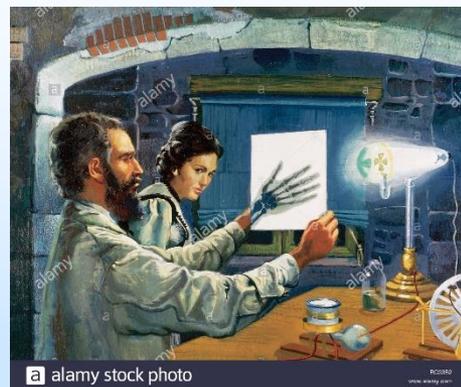


1895 Röntgen descobre os **raios-X**.



1901

Wilhelm Conrad Röntgen
(1845 - 1923)



NOS SÉCULOS XIX & XX

Radioatividade

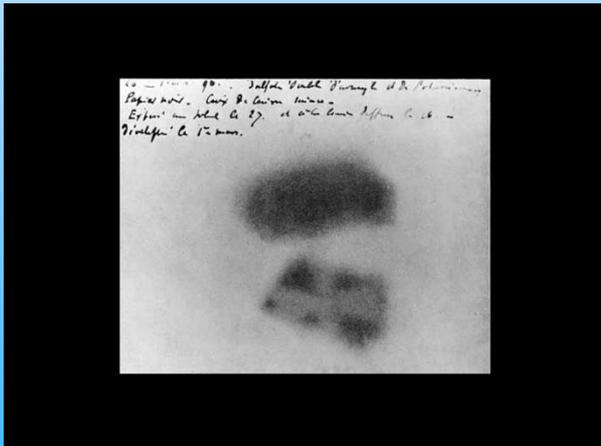
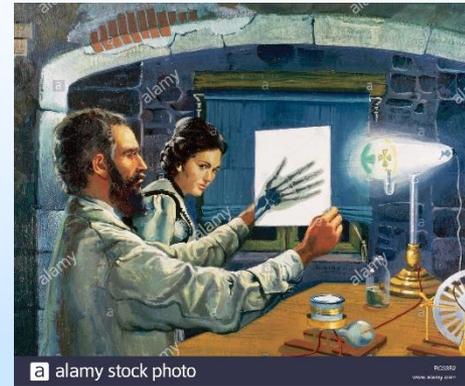


1895 Röntgen descobre os **raios-X**.



1901

Wilhelm Conrad Röntgen
(1845 - 1923)



1896 Henri Becquerel descobre que o elemento urânio emite radiação que pode escurecer uma placa fotográfica.



Antoine-Henri
Becquerel (1852 - 1908)



1903

NOS SÉCULOS XIX & XX

Radioatividade



1898++ Marya Sklodowska & Pierre Curie: radioatividade é atômica:

- *Pechblenda*, de onde mediram a radiação do urânio;
- Sintetizaram o **polônio** (Po) e o **rádio** (Ra);
- Cunharam o termo **radioatividade**.

Marie Skłodowska Curie (1867 - 1934)

Pierre Curie (1859 - 1906)



1903 (Física)

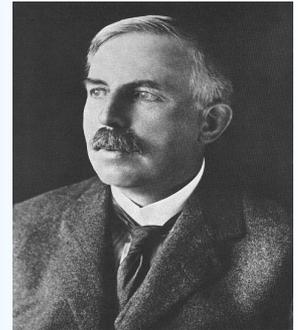


1911 (Química)

NOS SÉCULOS XIX & XX

Radioatividade

1898 Ernest Rutherford identifica 2 tipos de radiação: α e β .



Ernest Rutherford (1871 - 1937)

NOS SÉCULOS XIX & XX

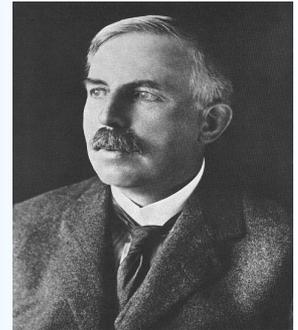
Radioatividade

1898 Ernest Rutherford identifica 2 tipos de radiação: α e β .



1908 Rutherford (Química)

Ernest Rutherford (1871 - 1937)



NOS SÉCULOS XIX & XX

Radioatividade



1898 Ernest Rutherford identifica 2 tipos de radiação: α e β .

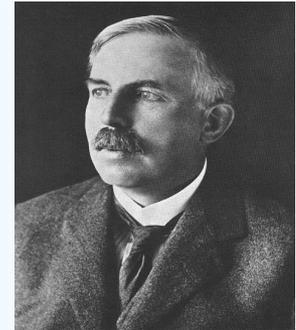


Paul Ulrich Villard
(1860 - 1934)



1908 Rutherford (Química)

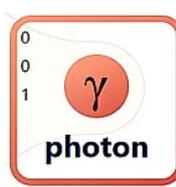
Ernest Rutherford (1871 - 1937)



1899 Paul Villard descobre o 3º tipo de radiação (γ) que Rutherford identificou como onda eletromagnética, mais energética que o raio X.

NOS SÉCULOS XIX & XX

Radioatividade



1898 Ernest Rutherford identifica 2 tipos de radiação: α e β .

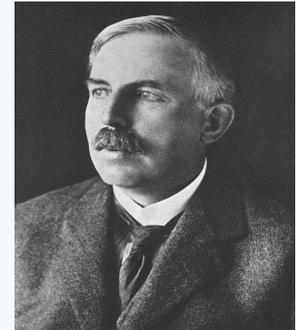


Paul Ulrich Villard
(1860 - 1934)

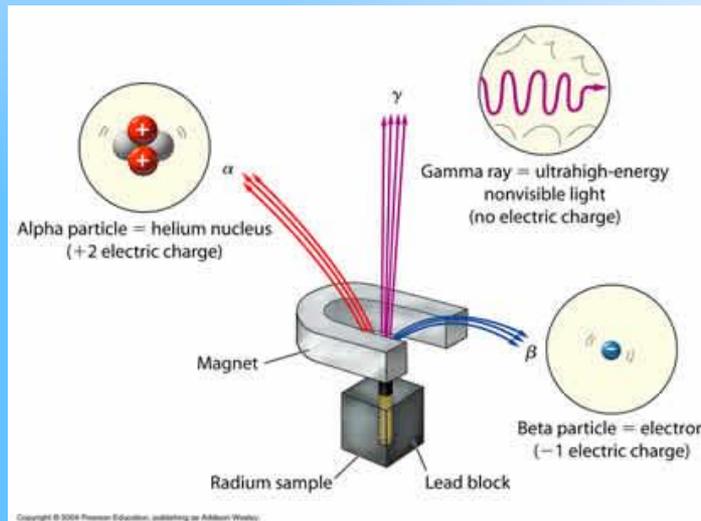


1908 Rutherford (Química)

Ernest Rutherford (1871 - 1937)

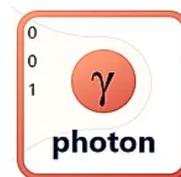


1899 Paul Villard descobre o 3º tipo de radiação (γ) que Rutherford identificou como onda eletromagnética, mais energética que o raio X.



NOS SÉCULOS XIX & XX

Radioatividade



1898 Ernest Rutherford identifica 2 tipos de radiação: α e β .

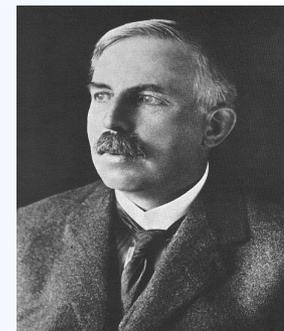


Paul Ulrich Villard
(1860 - 1934)

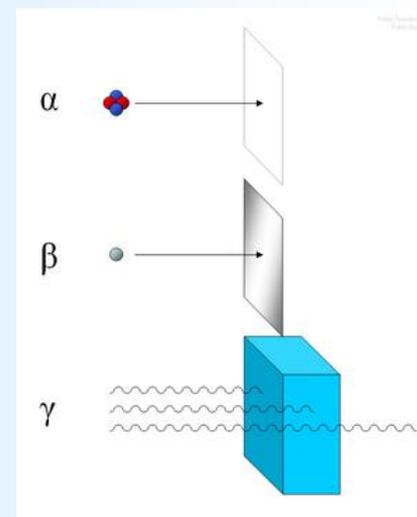
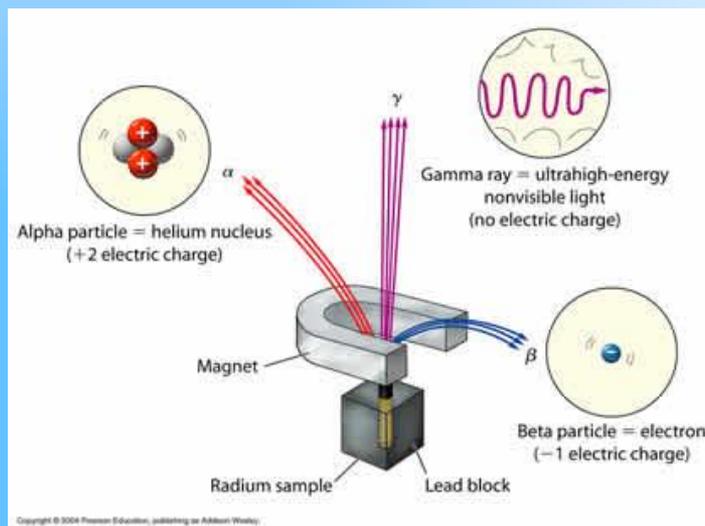


1908 Rutherford (Química)

Ernest Rutherford (1871 - 1937)

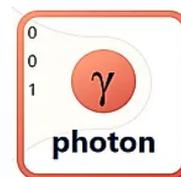


1899 Paul Villard descobre o 3º tipo de radiação (γ) que Rutherford identificou como onda eletromagnética, mais energética que o raio X.



NOS SÉCULOS XIX & XX

Radioatividade



1898 Ernest Rutherford identifica 2 tipos de radiação: α e β .

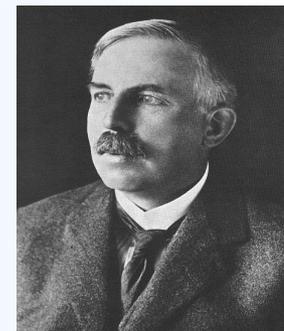


Paul Ulrich Villard
(1860 - 1934)

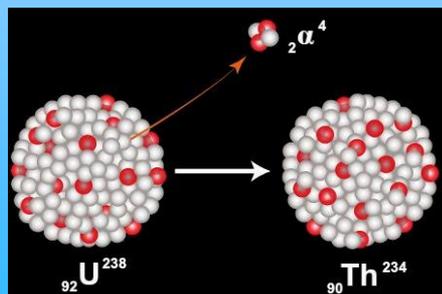


1908 Rutherford (Química)

Ernest Rutherford (1871 - 1937)



1899 Paul Villard descobre o 3º tipo de radiação (γ) que Rutherford identificou como onda eletromagnética, mais energética que o raio X.



1905 Soddy e Rutherford constatarem que o decaimento radioativo resulta na transmutação do elemento.



Frederick Soddy
(1871 - 1937)

NO SÉCULO XX

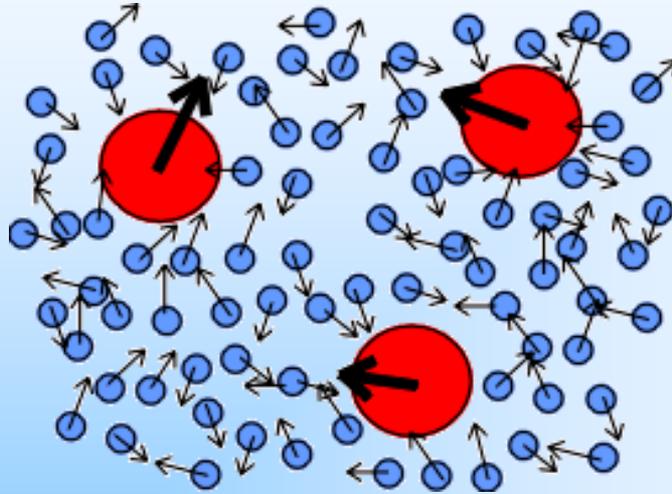


Albert Einstein
(1879-1955)



1921

1905 Albert Einstein explica o movimento browniano usando a teoria cinética dos gases e propõe um método para medir-se N_0 .



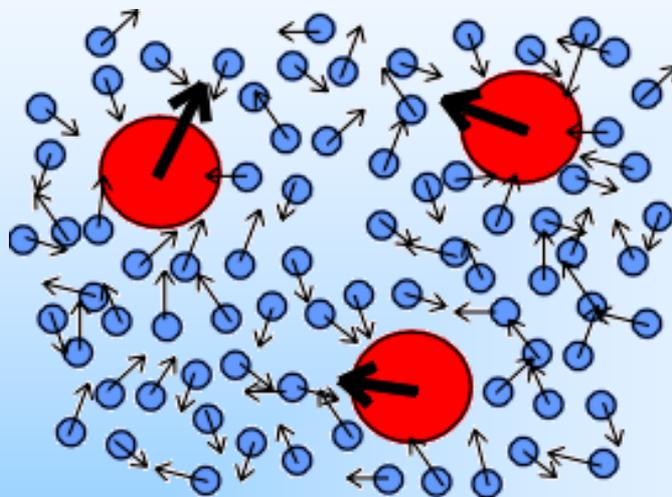
$$\langle x^2 \rangle = \frac{RT}{N_0} \frac{t}{3\pi\eta r}$$

NO SÉCULO XX



Albert Einstein
(1879-1955)

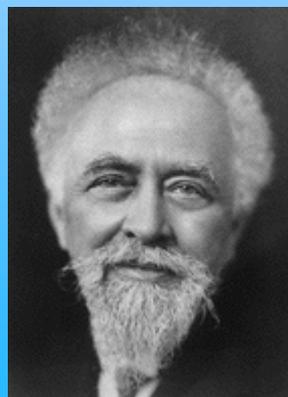
1905 Albert Einstein explica o movimento browniano usando a teoria cinética dos gases e propõe um método para medir-se N_0 .



$$\langle x^2 \rangle = \frac{RT}{N_0} \frac{t}{3\pi\eta r}$$



1921



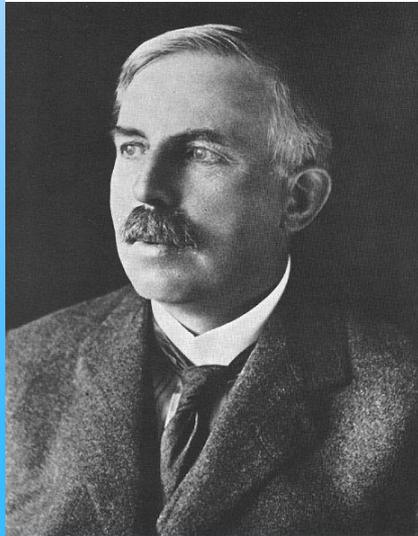
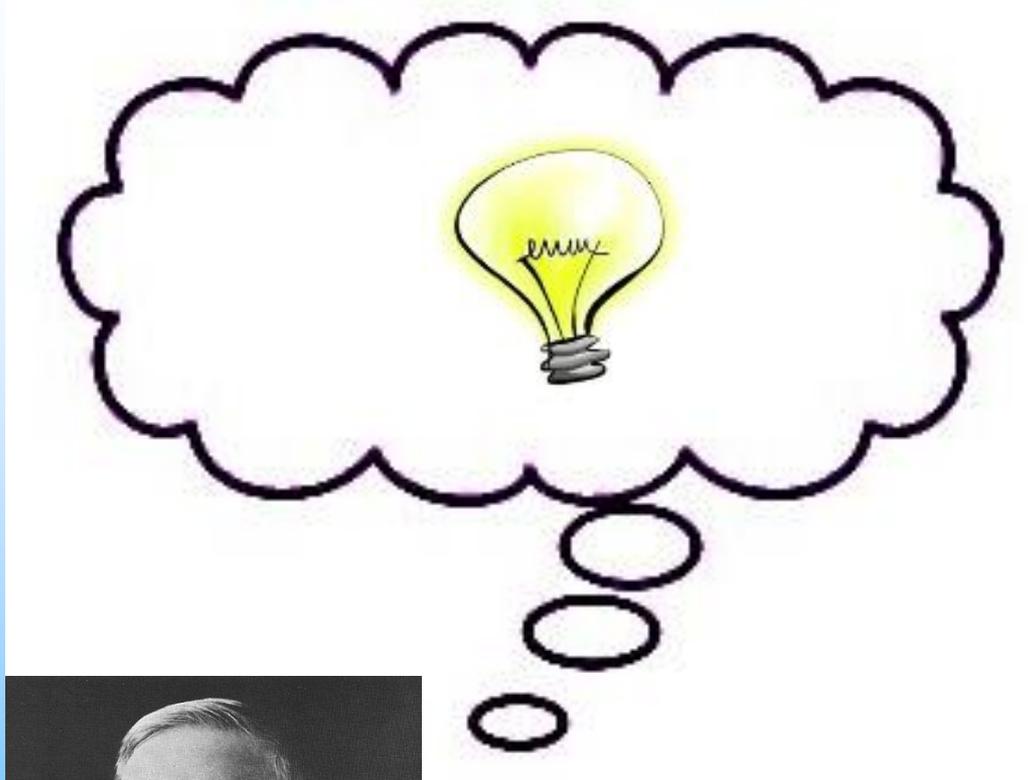
1909 Jean Perrin verifica experimentalmente com grande precisão a fórmula de Einstein.

Jean Baptiste Perrin
(1870-1942)

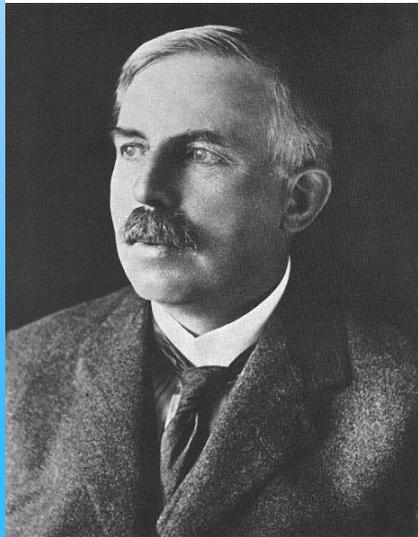
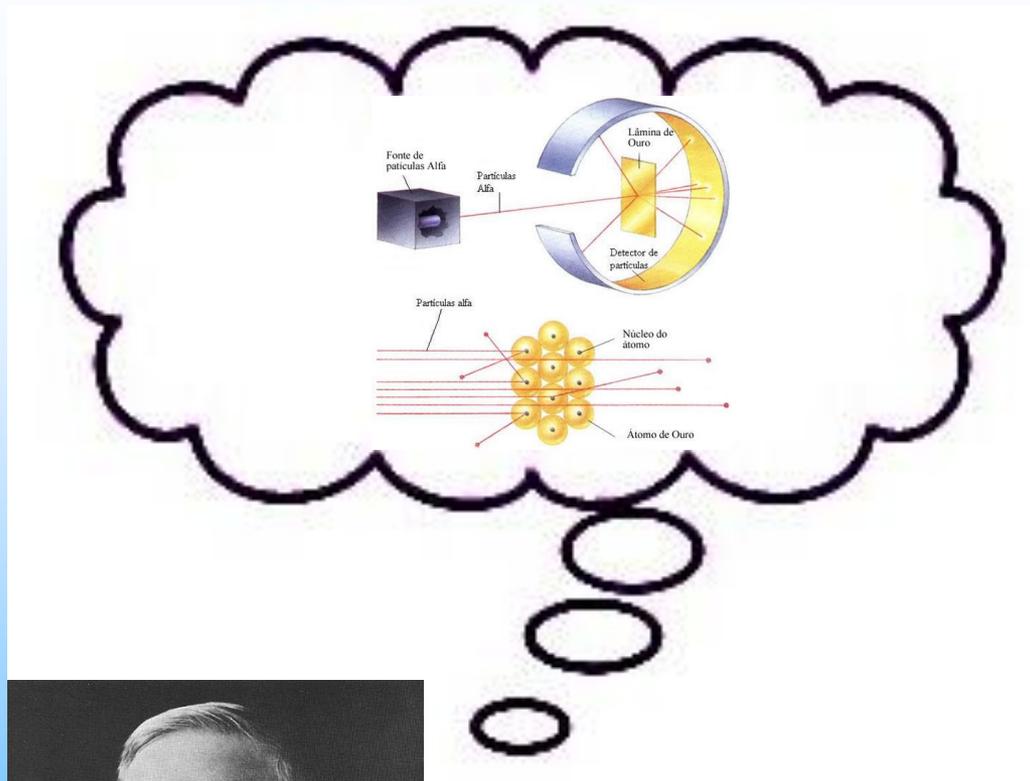


1926

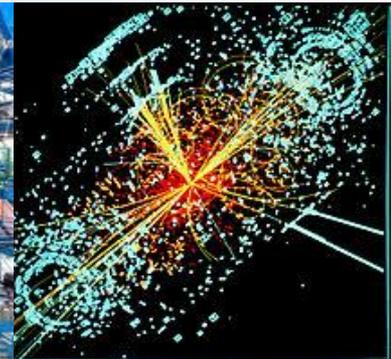
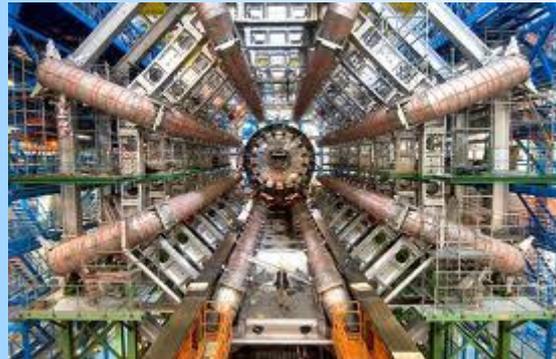
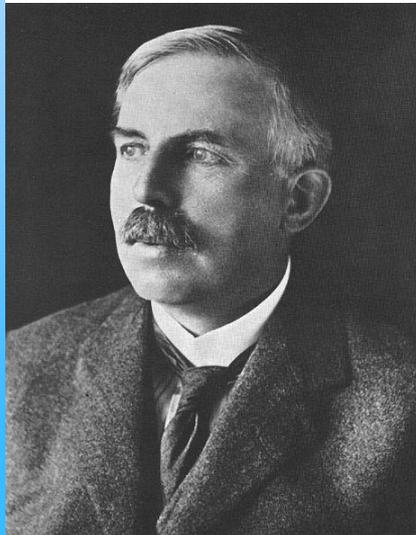
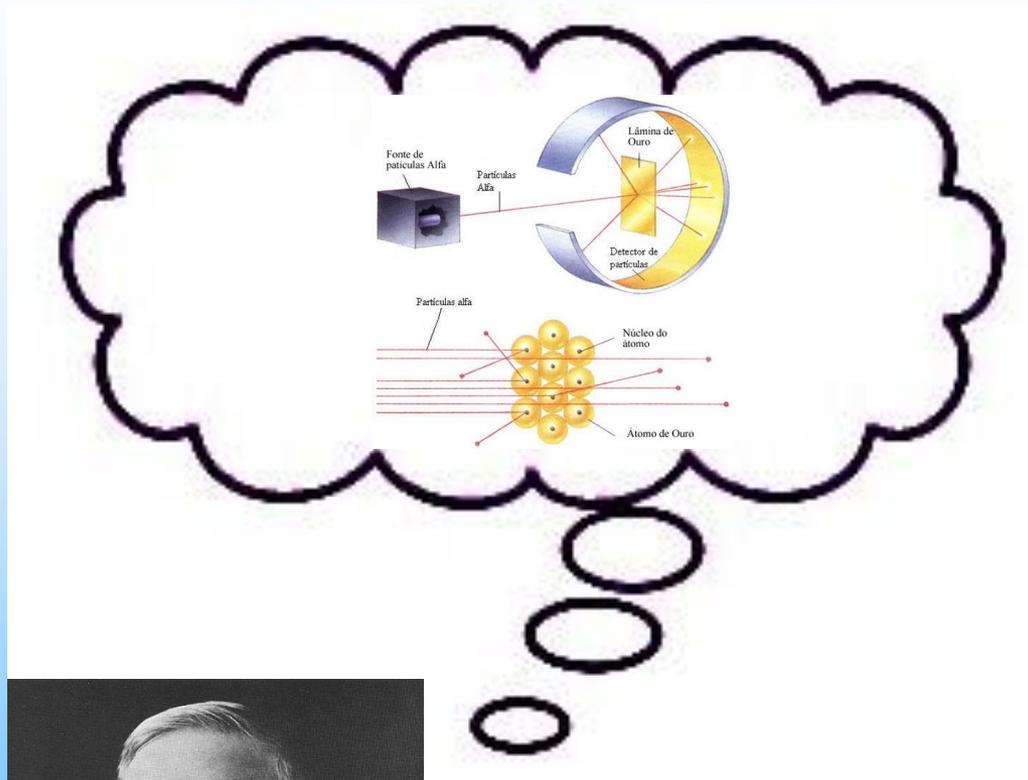
A ideia de Rutherford



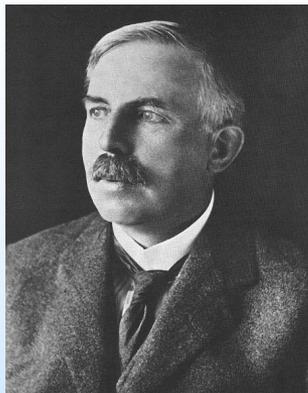
A ideia de Rutherford



A ideia de Rutherford

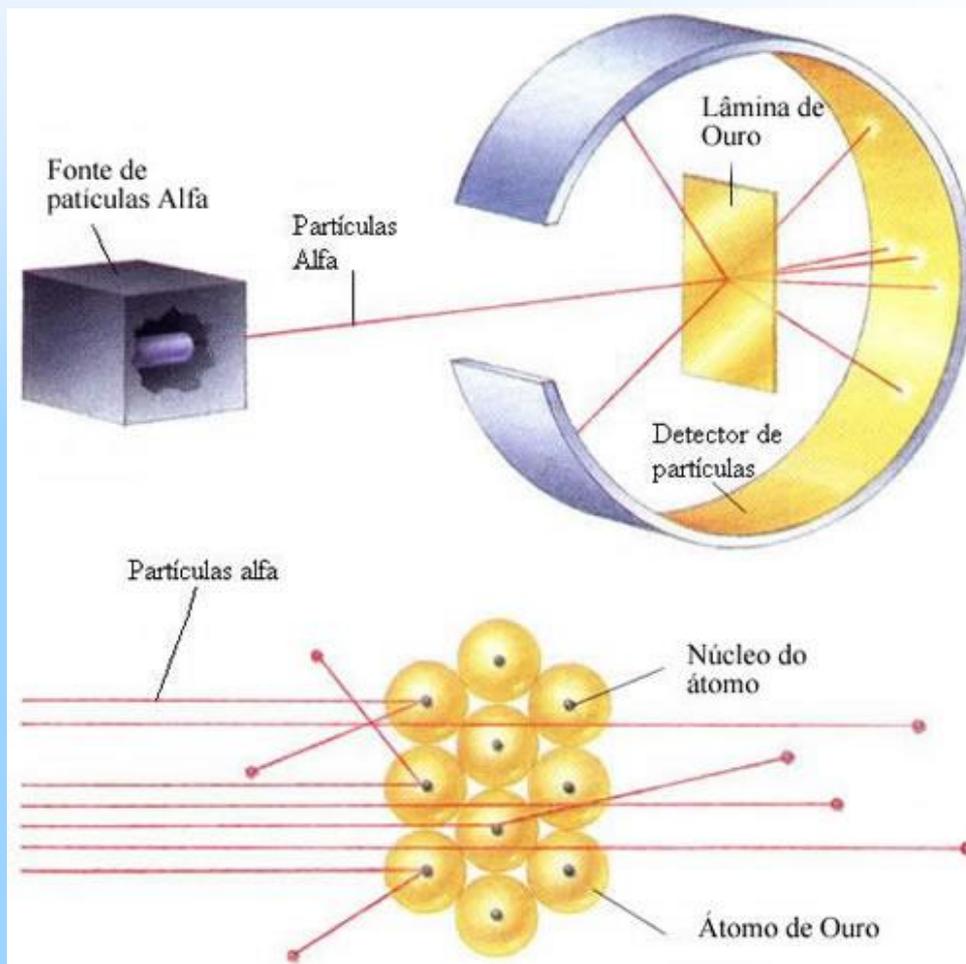
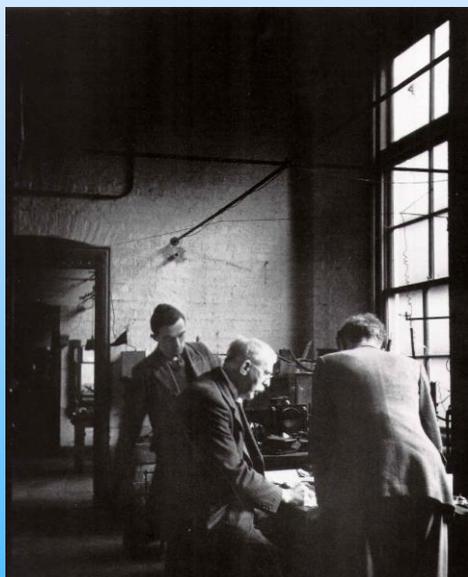


NO SÉCULO XX



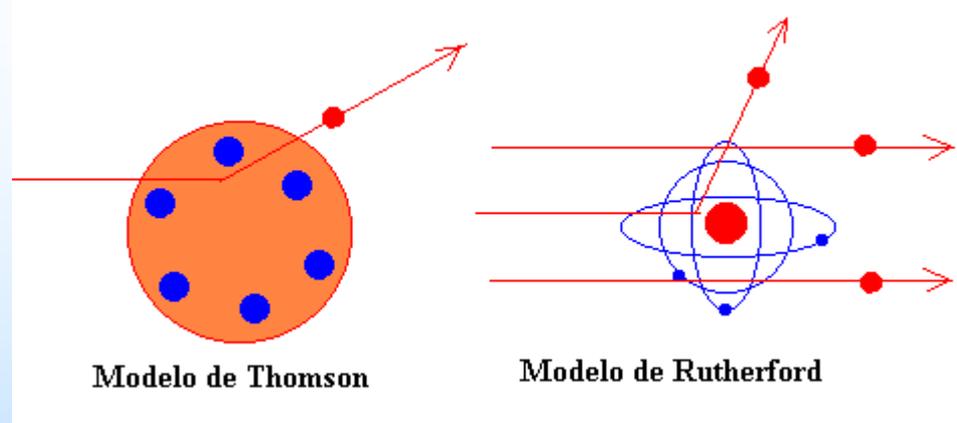
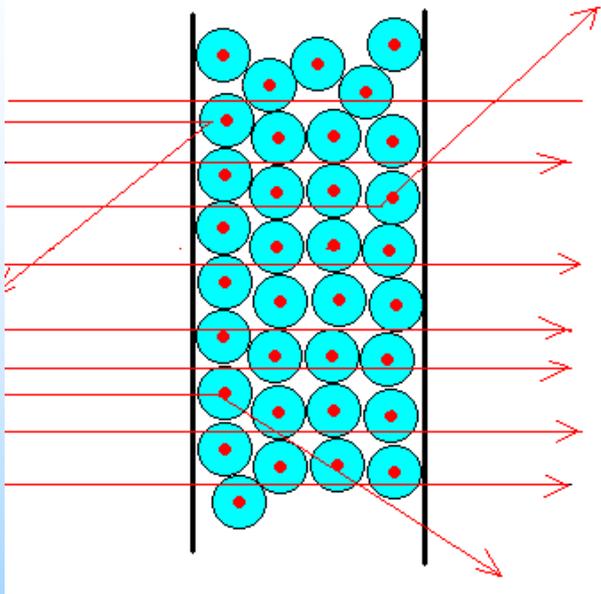
O experimento de Geiger e Marsden

1909 Rutherford e seus estudantes Geiger e Marsden fazem experimentos de espalhamentos de partícula α em folhas de ouro.



Rutherford e seus estudantes
Hans Geiger (1882 - 1945) e
Ernest Marsden (1889 - 1970)

O modelo atômico de Rutherford



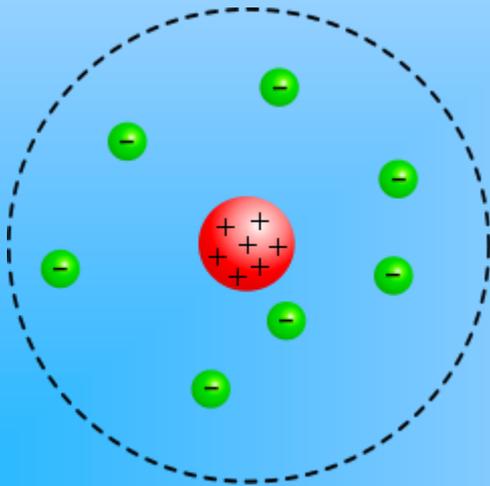
Modelo de Thomson

Modelo de Rutherford

Nascimento da
Física Nuclear

1911 Rutherford propõe seu modelo atômico:

- O átomo de um elemento A,Z é formado por A prótons, Z elétrons e (A-Z) elétrons nucleares;
- Praticamente toda a massa dos átomos está contida no núcleo com dimensão $\sim 10^{-14}$ m.



NO SÉCULO XX

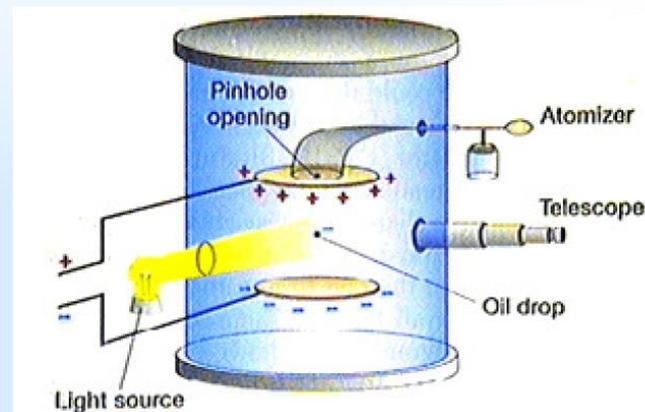


Robert Andrews Millikan
(1868 - 1953), físico
estadunidense.

1909 Robert Millikan mede a carga do elétron:



Aparato original de Millikan.

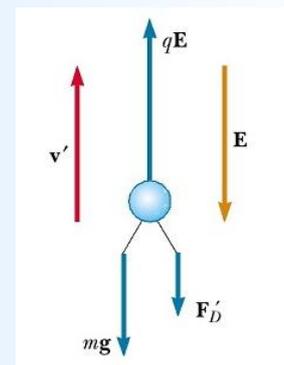


1923

A velocidade terminal das gotas é dada por: $v_t = \frac{qE - mg}{b}$.

➤ Millikan obteve o valor: $e = 1,592 \times 10^{-19} \text{ C}$;

➤ Valor aceito atualmente: $e = 1,602 \times 10^{-19} \text{ C}$.



NO SÉCULO XX



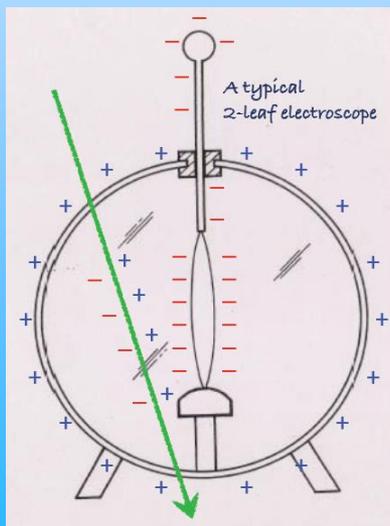
1912 Victor Hess descobre radiações de origem cósmica (raios cósmicos).



Victor Franz Hess (1883-1964), físico austríaco-americano.



1936 Hess & Anderson



7. Fahrt (7. August 1912).
 Ballon: „Böhmen“ (1680 cbm Wasserstoff). Führer: Hauptmann W. Hoffory.
 Meteorolog. Beobachter: E. Wolf. Luftelektr. Beobachter: V. F. Hess.

Nr.	Zeit	Mittlere Höhe		Beobachtete Strahlung				Temp.	Relat. Feucht. Proz.
		absolut m	relativ m	Apparat 1	Apparat 2	Apparat 3			
				g ₁	g ₂	g ₃	reduz. g ₃		
1	15h 15-16h 15	156	0	17,3	12,9	—	—	—	—
2	16h 15-17h 15	156	0	15,9	11,0	18,4	18,4	11,2	1,2 Tag vor dem Aufstiege (in Wien)
3	17h 15-18h 15	156	0	15,8	11,2	17,5	17,5	17,5	+6,4°
4	6h 45-7h 45	1700	1400	15,8	11,4	21,1	25,3	25,3	41
5	7h 45-8h 45	2750	2500	17,3	12,3	22,5	31,2	31,2	+1,4°
6	8h 45-9h 45	3850	3600	19,8	16,5	21,3	35,2	35,2	-6,3°
7	9h 45-10h 45	4800	4700	40,7	31,8	—	—	—	-9,3°
		(4400-5350)							
8	10h 45-11h 15	4400	4200	28,1	22,7	—	—	—	—
9	11h 15-11h 45	1300	1200	(9,7)	11,5	—	—	—	—
10	11h 45-12h 10	250	150	11,9	10,7	—	—	—	+16,0°
11	12h 25-13h 12	140	0	15,0	11,6	—	—	—	(nach der Landung in Pieskow, Brandenburg)

Razão de descarga 4x maior a 4880 m

NO SÉCULO XX



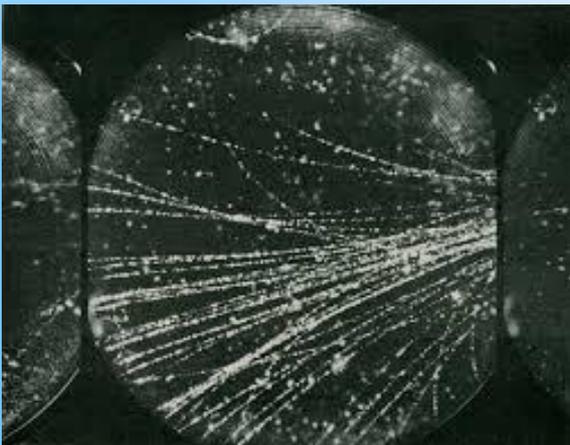
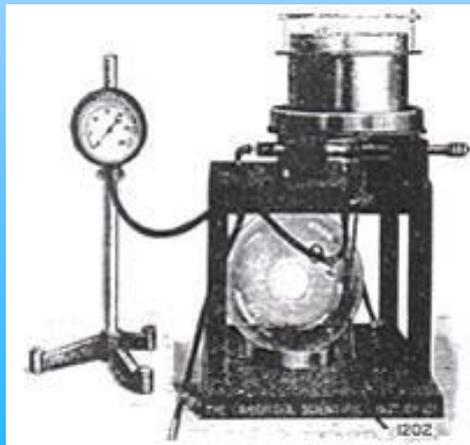
Victor Franz Hess
(1883-1964), físico
austríaco-americano.

1912 Victor Hess descobre radiações de origem cósmica (raios cósmicos).



1936 Hess & Anderson

1912 Charles Wilson desenvolve a câmara de núvens.



1927
Wilson &
Compton



Charles Thomson
Rees Wilson
(1869-1959),
físico escocês.

NO SÉCULO XX



Niels Bohr
(1885 - 1955)



1922

1913 Niels Bohr propõe um modelo de quantização das energias atômicas, através de 3 postulados:

1. Os elétrons não irradiam enquanto orbitam o núcleo (**as órbitas são estacionárias**);
2. Os átomos irradiam (ou absorvem) somente se os elétrons mudarem de um estado estacionário para outro, tal que:

$$\Delta E = hf$$

$\Delta E > 0$ na absorção

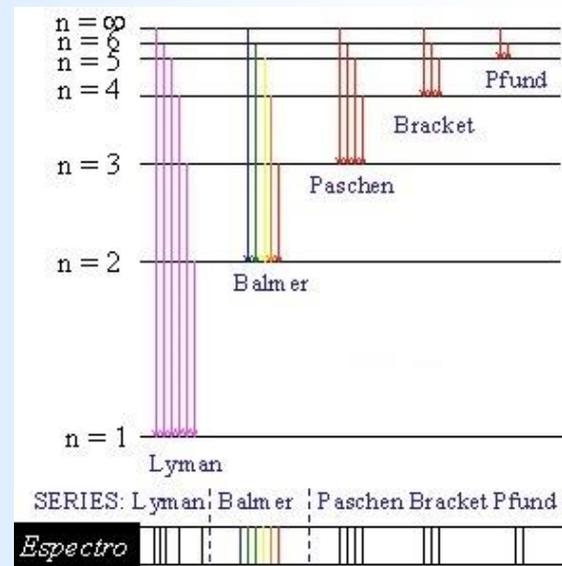
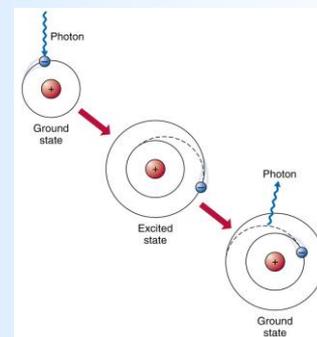
$\Delta E < 0$ na emissão

3. O **momento angular** é quantizado:

$$L_n = n\hbar = n\left(\frac{h}{2\pi}\right), \text{ onde } n = 1, 2, 3, \dots$$

e $L_n = mvr_n$ é o momento angular.

Bohr deduziu teoricamente as séries de Lyman, Balmer, etc e calculou a constante de Rydberg.

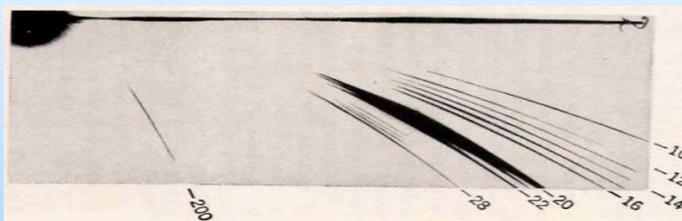


NO SÉCULO XX

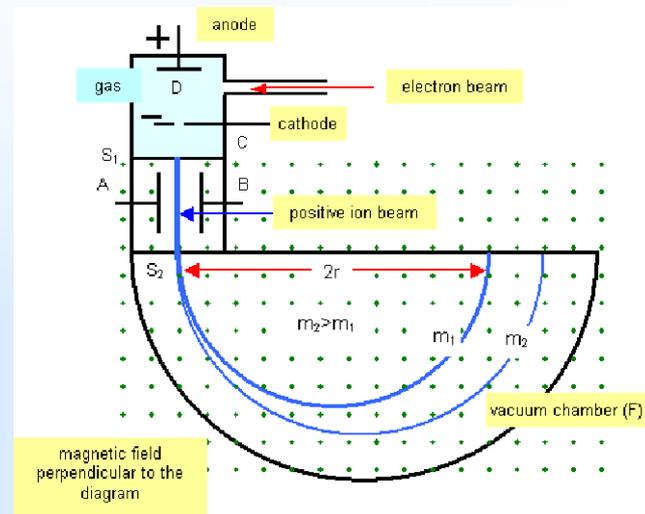


Francis William Aston
(1877-1945),
físico britânico.

1919 Francis Aston inventou um espectrógrafo de massa e formulou a “regra dos números inteiros” e explicar as diferenças de massa de isótopos.



1922
(Química)

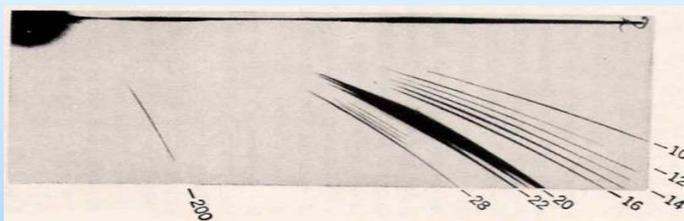


NO SÉCULO XX



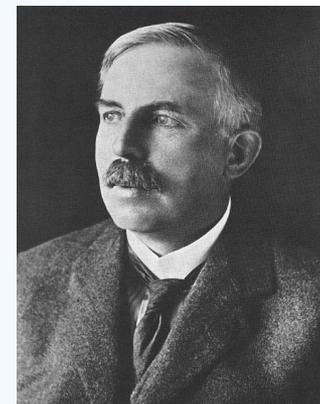
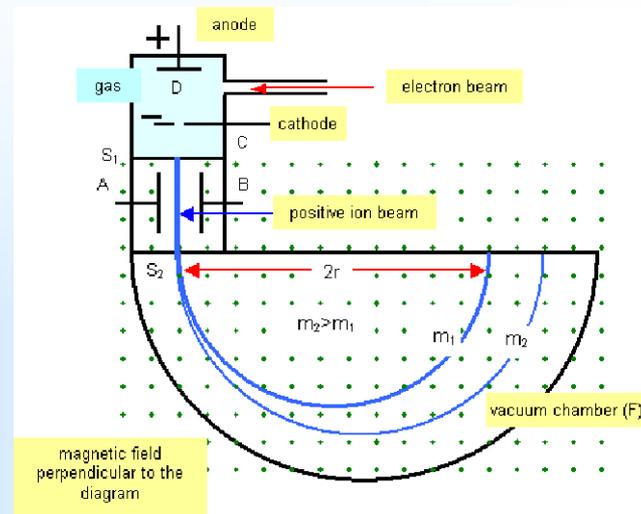
Francis William Aston
(1877-1945),
físico britânico.

1919 Francis Aston inventou um espectrógrafo de massa e formulou a “regra dos números inteiros” e explicar as diferenças de massa de isótopos.



1922
(Química)

1919 Rutherford descobre que o núcleo atômico contém vários núcleos de hidrogênio e o batiza de próton: $\alpha + N \rightarrow H^+ + x + y + \dots$

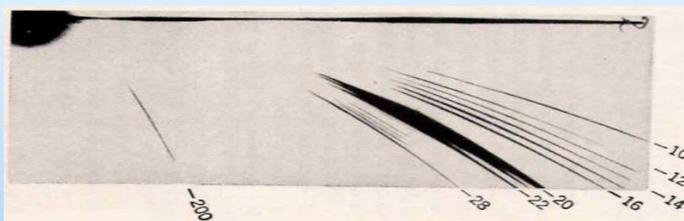


NO SÉCULO XX



Francis William Aston
(1877-1945),
físico britânico.

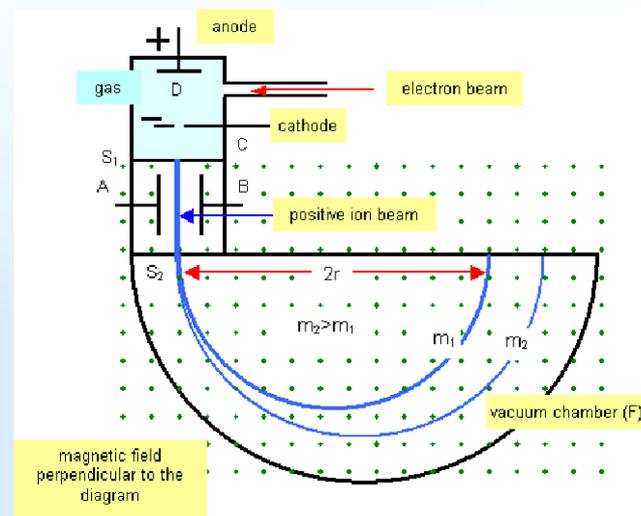
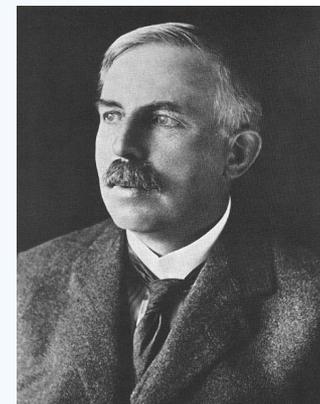
1919 Francis Aston inventou um espectrógrafo de massa e formulou a “regra dos números inteiros” e explicar as diferenças de massa de isótopos.



1922
(Química)

1919 Rutherford descobre que o núcleo atômico contém vários núcleos de hidrogênio e o batiza de próton: $\alpha + N \rightarrow H^+ + x + y + \dots$

1920 Rutherford propõe a existência do nêutron.



NO SÉCULO XX



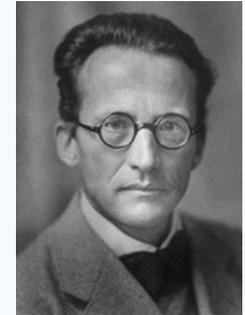
1925 Werner Heisenberg desenvolve a mecânica (quântica) matricial.



1932

$$\hat{H}\Psi = E\Psi$$

Werner Heisenberg
(1901 - 1976)



1926 Erwin Schrödinger desenvolve a mecânica (quântica) ondulatória.

$$\frac{-\hbar^2}{2m} \nabla^2 \Psi(\vec{x}, t) + V(\vec{x}, t) \Psi(\vec{x}, t) = i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \Psi(\vec{x}, t)$$

Erwin R. J. A.
Schrödinger
(1887 - 1961)



Paul Dirac
(1902 - 1984)

1928 Paul Dirac desenvolve uma nova formulação para a mecânica quântica e estende a equação de Schrödinger para o caso relativístico.



1933 Schrödinger
& Dirac

NO SÉCULO XX

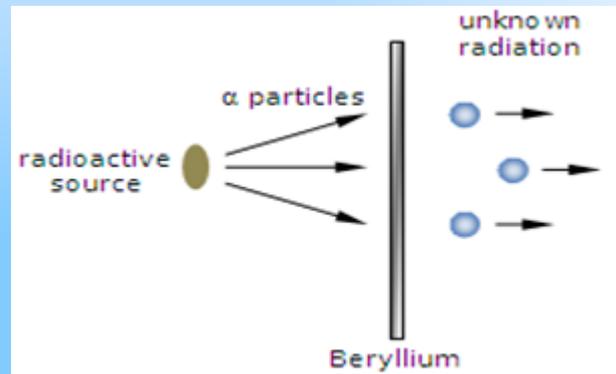


Walther Bothe
(1891-1957)

1930 Walter Bothe, em colaboração com Hebert Becker, descobriu uma radiação penetrante de carga neutra no bombardeamento do berílio com partículas alfa:



1954 Born
& Bothe

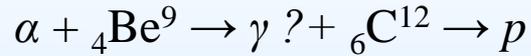


NO SÉCULO XX



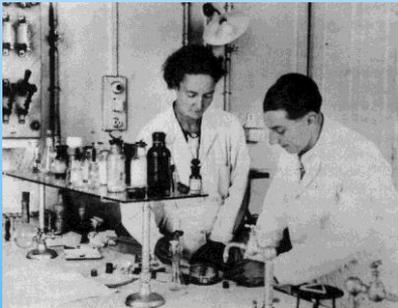
Walther Bothe
(1891-1957)

1930 Walter Bothe, em colaboração com Hebert Becker, descobriu uma radiação penetrante de carga neutra no bombardeamento do berílio com partículas alfa:

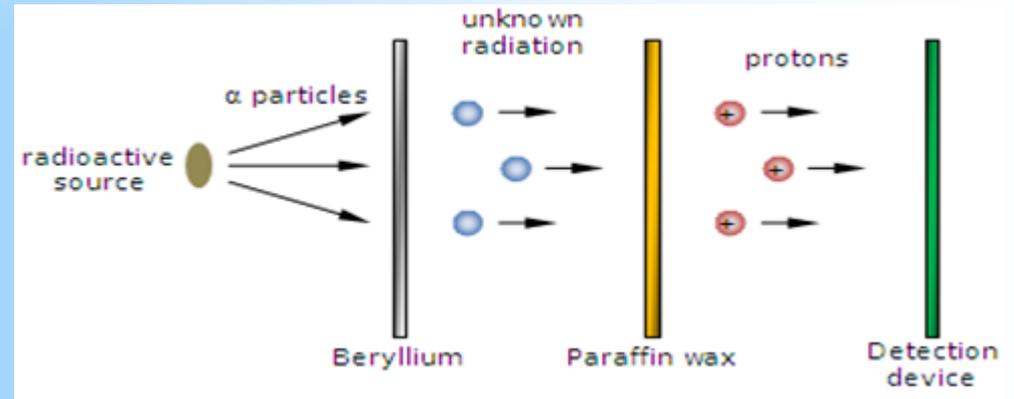


1954 Born
& Bothe

1932 Irène Curie e Frédéric Joliot verificam que esta radiação ($\gamma?$) pode ejetar prótons com alta velocidade.



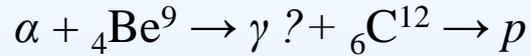
Irène Joliot-Curie (1897-1956)
&
Frédéric Joliot-Curie (1900-1958)



NO SÉCULO XX



1930 Walter Bothe, em colaboração com Hebert Becker, descobriu uma radiação penetrante de carga neutra no bombardeamento do berílio com partículas alfa:

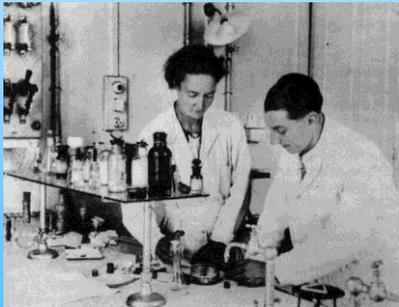


Walther Bothe
(1891-1957)



1954 Born
& Bothe

1932 Irène Curie e Frédéric Joliot verificam que esta radiação ($\gamma?$) pode ejetar prótons com alta velocidade. **1934** Descoberta da radioatividade artificial.

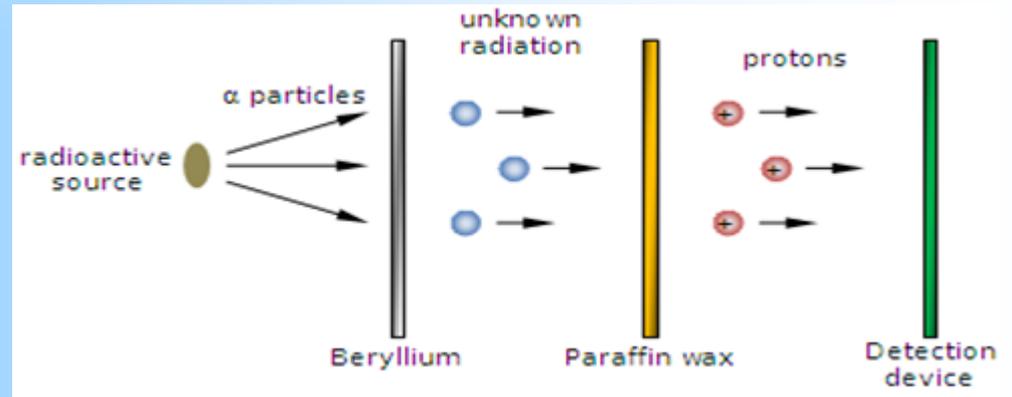


1935 Química

Irène Joliot-Curie (1897-1956)

&

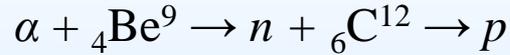
Frédéric Joliot-Curie (1900-1958)



NO SÉCULO XX



1930 Walter Bothe, em colaboração com Hebert Becker, descobriu uma radiação penetrante de carga neutra no bombardeamento do berílio com partículas alfa:

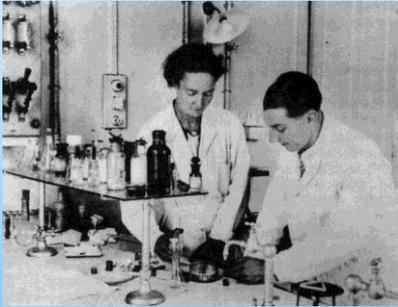


Walther Bothe
(1891-1957)



1954 Born
& Bothe

1932 Irène Curie e Frédéric Joliot verificam que esta radiação pode ejetar prótons com alta velocidade. **1934** Descoberta da radioatividade artificial.

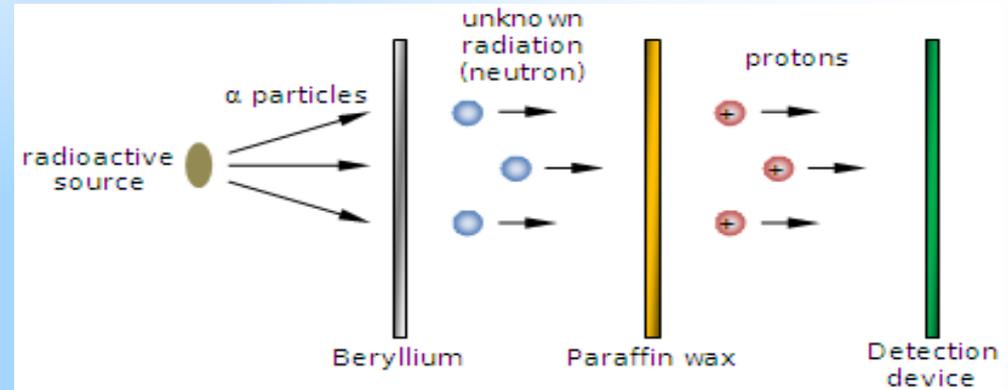


1935 Química

Irène Joliot-Curie (1897-1956)

&

Frédéric Joliot-Curie (1900-1958)



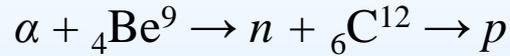
1932 James Chadwick mostra que a radiação penetrante de carga neutra tem quase a mesma massa do próton (descoberta do nêutron).

James Chadwick
(1891 - 1974)

NO SÉCULO XX



1930 Walter Bothe, em colaboração com Hebert Becker, descobriu uma radiação penetrante de carga neutra no bombardeamento do berílio com partículas alfa:

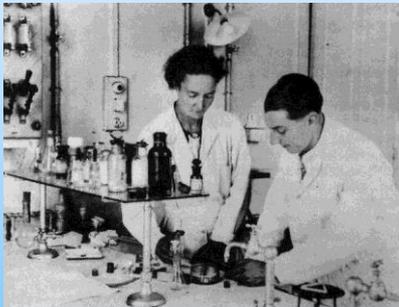


Walther Bothe
(1891-1957)



1954 Born
& Bothe

1932 Irène Curie e Frédéric Joliot verificam que esta radiação pode ejetar prótons com alta velocidade. **1934** Descoberta da radioatividade artificial.

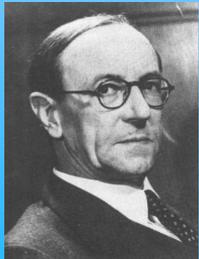
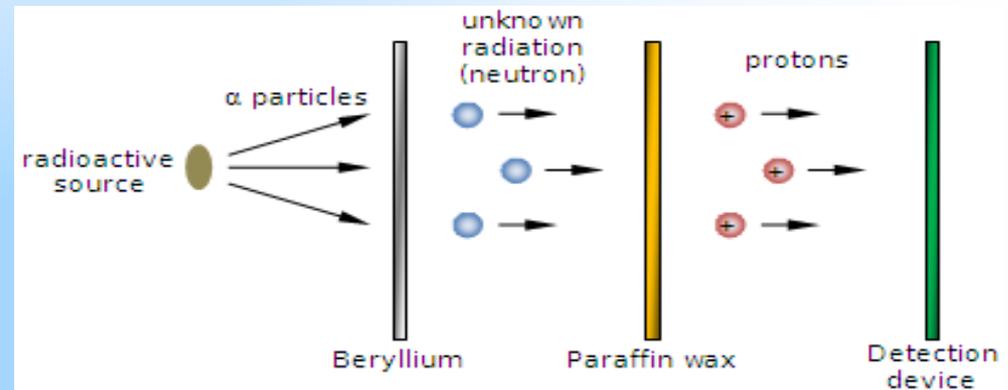


1935 Química

Irène Joliot-Curie (1897-1956)

&

Frédéric Joliot-Curie (1900-1958)



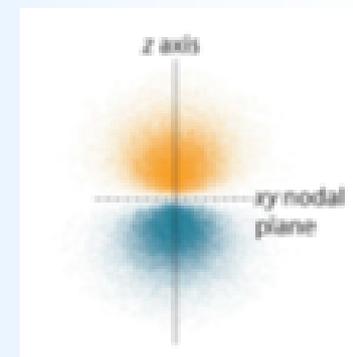
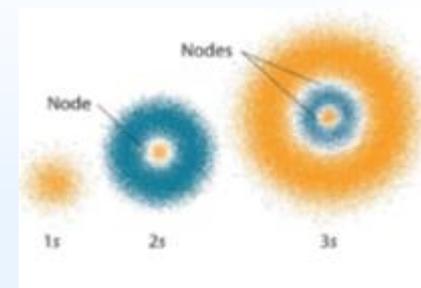
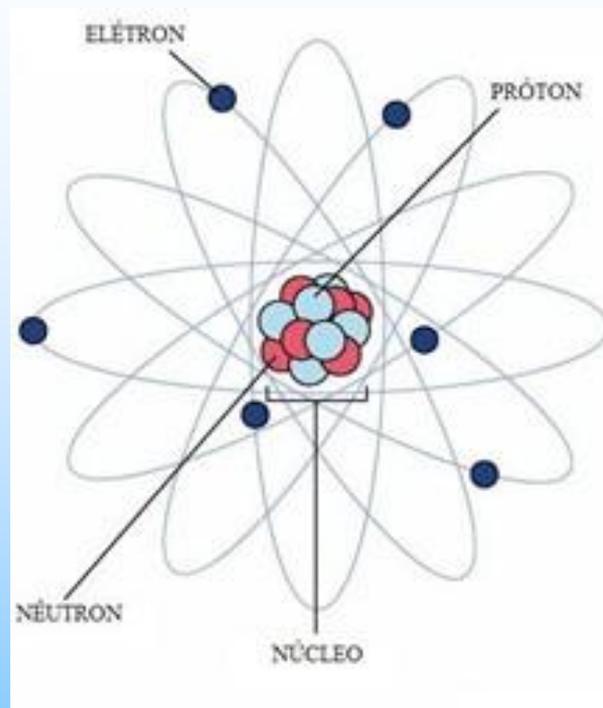
1932 James Chadwick mostra que a radiação penetrante de carga neutra tem quase a mesma massa do próton (descoberta do nêutron).



1935
Física

James Chadwick
(1891 - 1974)

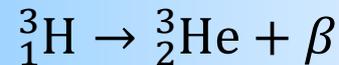
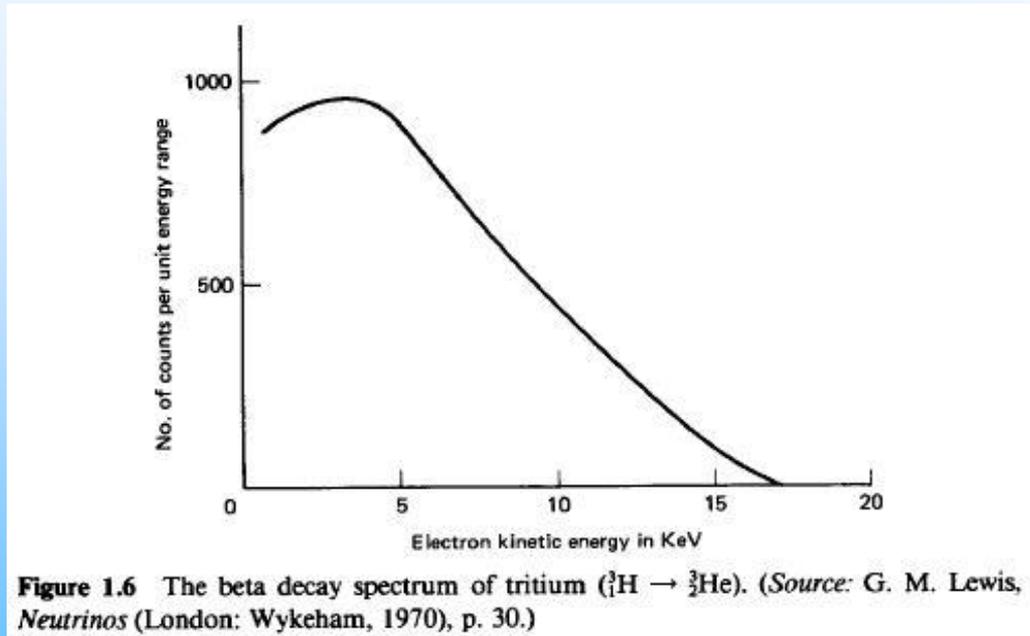
O modelo atômico



- O átomo de um elemento (A,Z) é formado por Z prótons, Z elétrons e $N=A-Z$ nêutrons;
- Os orbitais eletrônicos são representados por nuvens de probabilidade;
- Praticamente toda a massa dos átomos ($\sim 10^{-10}$ m) está contida no núcleo ($\sim 10^{-14}$ m).

O problema do decaimento β

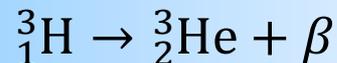
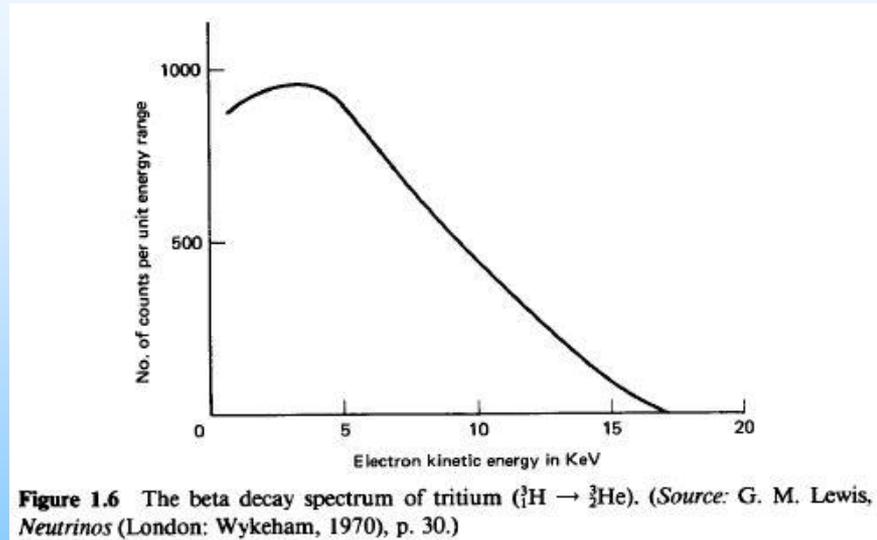
1930-... Não se sabia o porquê do espectro ser contínuo:



$$E = \left(\frac{m_A^2 - m_B^2 + m_\beta^2}{2m_A} \right) c^2$$

O problema do decaimento β

1930-... Não se sabia o porquê do espectro ser contínuo:



$$E = \left(\frac{m_A^2 - m_B^2 + m_\beta^2}{2m_A} \right) c^2$$

Bohr propôs que se abandonasse a conservação de energia!

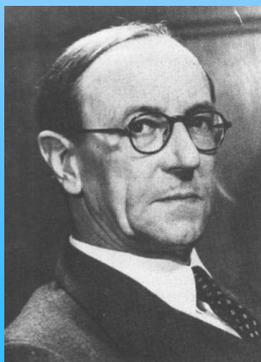
NO SÉCULO XX

O problema do decaimento β

1930-... Não se sabia o porquê do espectro ser contínuo:



Wolfgang E. Pauli
(1900 - 1958)



James Chadwick
(1891 - 1974)

1931 Pauli propôs uma partícula leve e neutra (“nêutron”) dividindo a energia com a β .

1932 A descoberta do nêutron por Chadwick e Fermi rebatiza a partícula de “neutrino”.

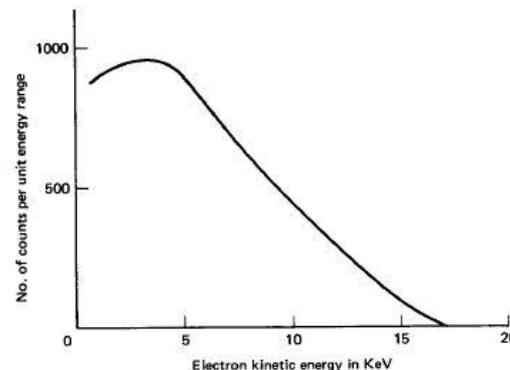
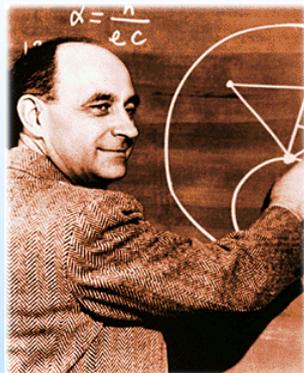


Figure 1.6 The beta decay spectrum of tritium (${}^3_1\text{H} \rightarrow {}^3_2\text{He}$). (Source: G. M. Lewis, *Neutrinos* (London: Wykeham, 1970), p. 30.)



Enrico Fermi
(1901-1954)

NO SÉCULO XX



Enrico Fermi
(1901-1954)

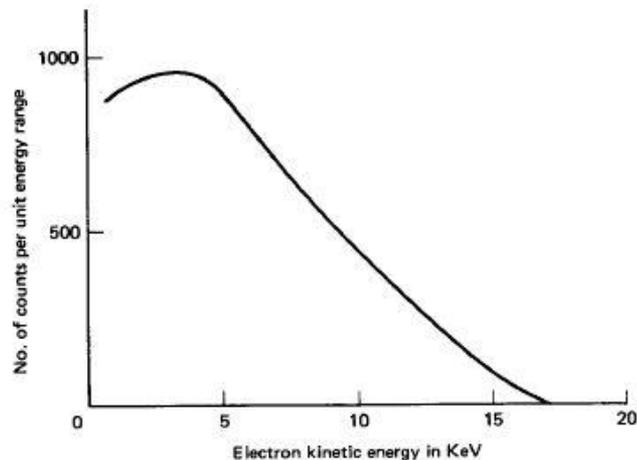
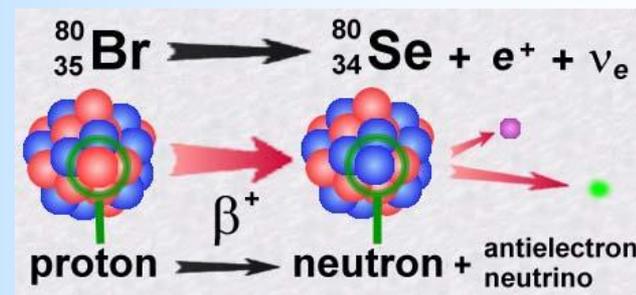
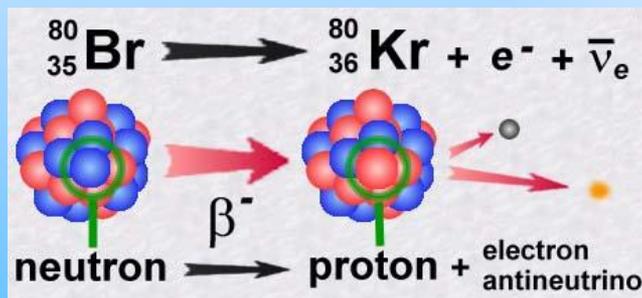


Figure 1.6 The beta decay spectrum of tritium (${}^3\text{H} \rightarrow {}^3\text{He}$). (Source: G. M. Lewis, *Neutrinos* (London: Wykeham, 1970), p. 30.)

1934 Enrico Fermi descreve a teoria do decaimento β :



1938

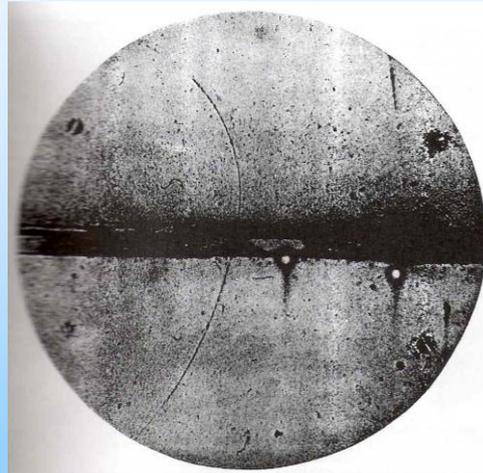
1942 Fermi monta o primeiro reator de fissão controlada.

NO SÉCULO XX



Carl David
Anderson
(1905-1991)

1932 Carl Anderson descobre o pósitron (e^+) numa câmara de Wilson.

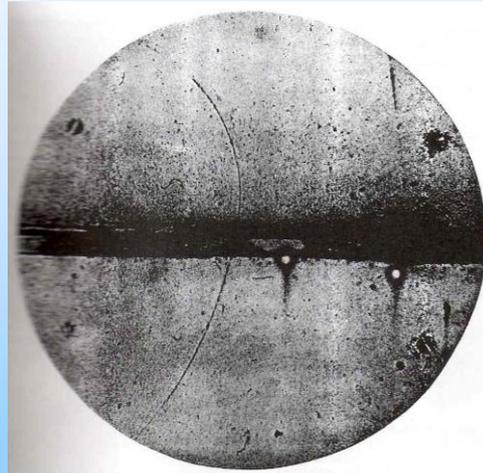


NO SÉCULO XX



Carl David
Anderson
(1905-1991)

1932 Carl Anderson descobre o pósitron (e^+) numa câmara de Wilson.



1936 Hess & Anderson



Seth Neddermeyer
(1907-1988)

1936 Anderson & Neddermeyer descobrem o múon (μ) nos raios cósmicos.

NO SÉCULO XX

1935 H. Yukawa formula a hipótese do méson para as interações nucleares.

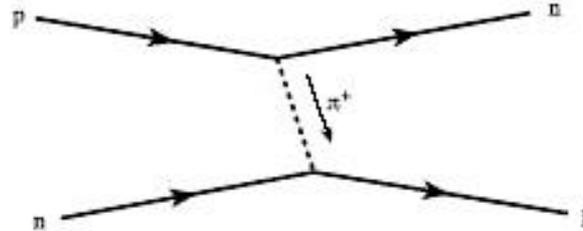
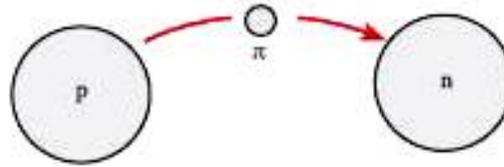


Figure 1. Typical textbook representations of pion exchange.

Hideki Yukawa
(1907-1981)

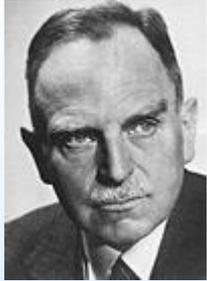
$$m_{\pi} \approx 200m_e$$

meson μ ? ↙



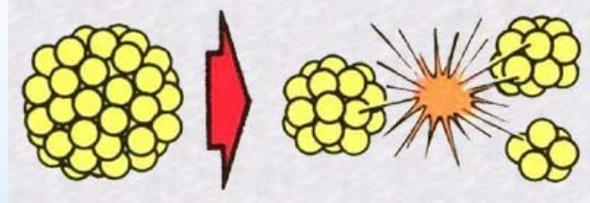
1949

NO SÉCULO XX



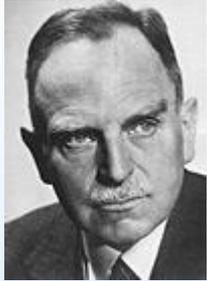
Otto Hahn
(1879-1968)

1938 Otto Hahn, juntamente com Fritz Straßmann e Lise Meitner, descobre a fissão nuclear.



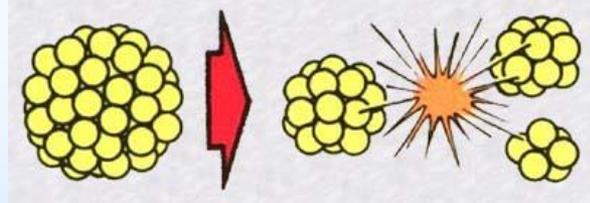
1944
Química

NO SÉCULO XX

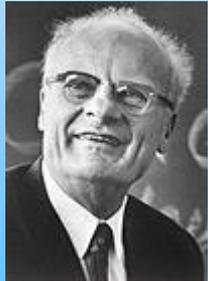


Otto Hahn
(1879-1968)

1938 Otto Hahn, juntamente com Fritz Straßmann e Lise Meitner, descobre a fissão nuclear.

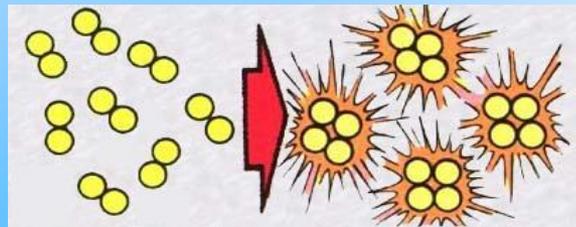


1944
Química



Hans Bethe
(1906-2005)

1938 Hans Bethe propõe a fusão termonuclear como fonte de energia das estrelas.



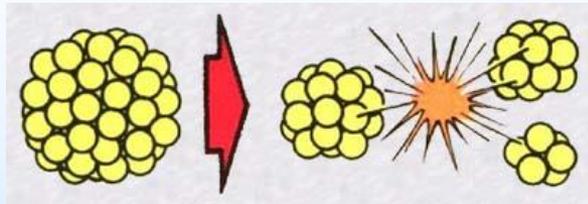
1967

NO SÉCULO XX

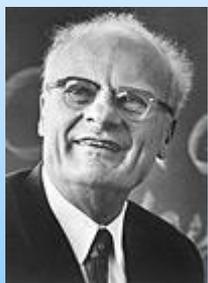


Otto Hahn
(1879-1968)

1938 Otto Hahn, juntamente com Fritz Straßmann e Lise Meitner, descobre a fissão nuclear.

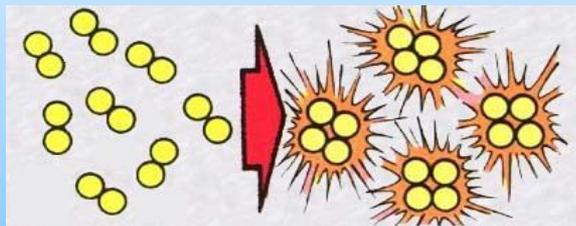


1944
Química

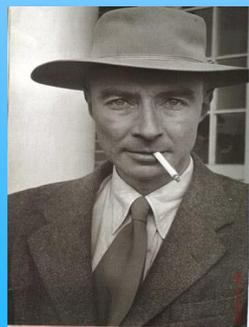


Hans Bethe
(1906-2005)

1938 Hans Bethe propõe a fusão termonuclear como fonte de energia das estrelas.



1967



Julius Robert
Oppenheimer
(1904-1967)

1945 Julius Oppenheimer testa a primeira bomba atômica.



NO SÉCULO XX



1936 S. Neddermeyer e C. Anderson
descobrem o múon nos raios cósmicos.

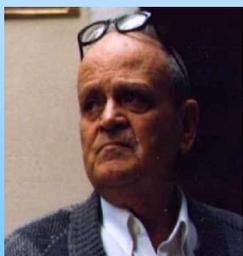
meson μ ? ↵

NO SÉCULO XX



1936 S. Neddermeyer e C. Anderson descobrem o múon nos raios cósmicos.

meson μ ? ↵



1947 César Lattes, G. Occhialini e **C. Powell** descobrem em emulsões nucleares o decaimento do pión no múon.

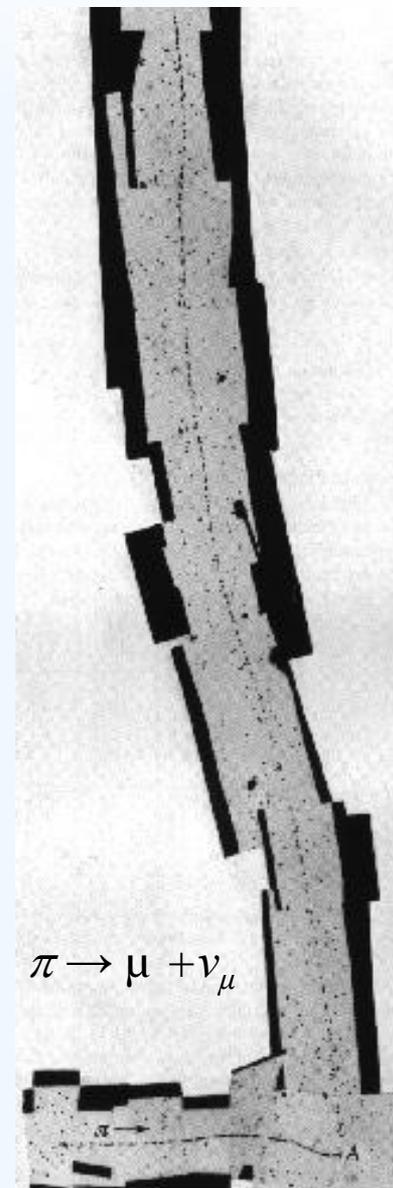


1950

Cesare M. G.
Lattes
(1924-2005)

Giuseppe P. S.
Occhialini
(1907-1993)

Cecil F.
Powell
(1903-1969)



$\pi \rightarrow \mu + \nu_{\mu}$

NO SÉCULO XX



Murray Gell-Mann
(1929-2019)

1953 M. Gell-Mann lança a hipótese da estranheza.

1953 São produzidas partículas estranhas em Brookhaven.



1969

NO SÉCULO XX



1953 M. Gell-Mann lança a hipótese da estranheza.

1953 São produzidas partículas estranhas em Brookhaven.



1969

Murray Gell-Mann
(1929-2019)



1955 O. Chamberlain e E. Segrè descobrem o antipróton.



1959

Owen Chamberlain (1920-2006) Emilio G. Segrè (1905-1989)

NO SÉCULO XX



1953 M. Gell-Mann lança a hipótese da estranheza.

1953 São produzidas partículas estranhas em Brookhaven.



1969

Murray Gell-Mann
(1929-2019)

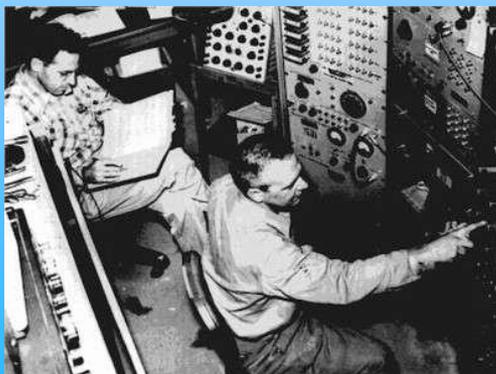


1955 O. Chamberlain e E. Segrè descobrem o antipróton.



1959

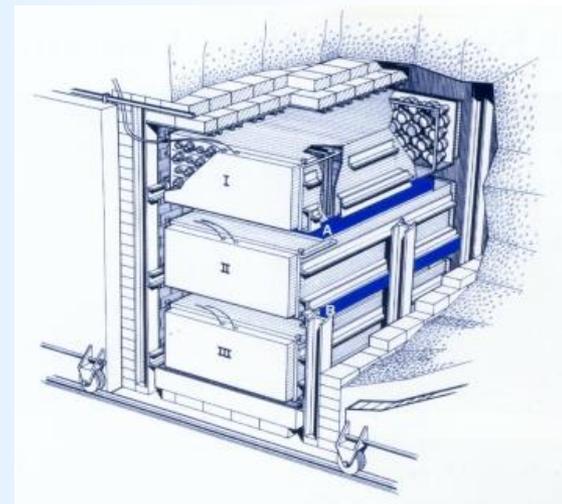
Owen Chamberlain (1920-2006) Emilio G. Segrè (1905-1989)



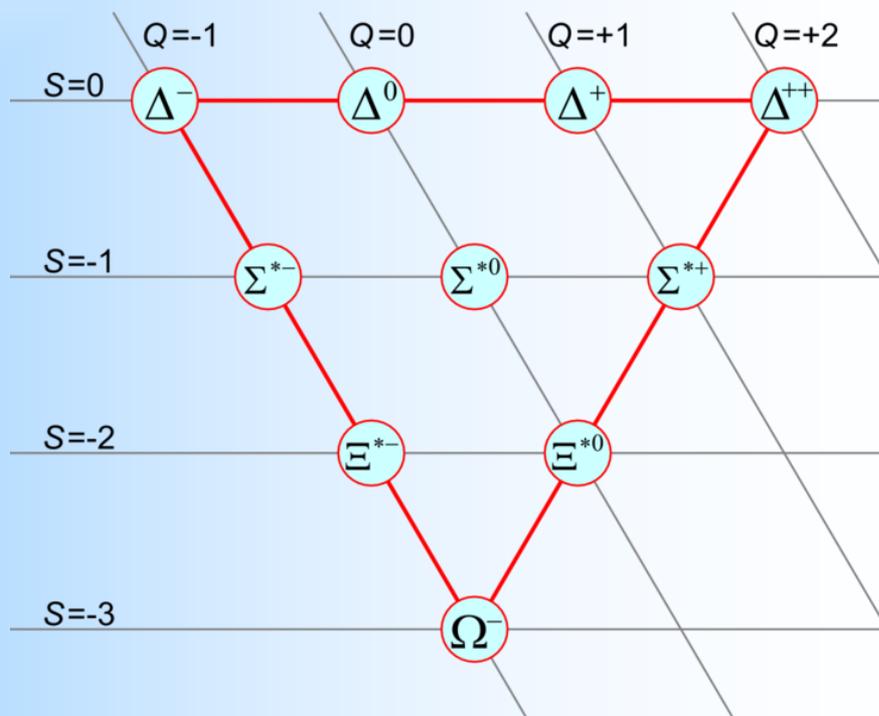
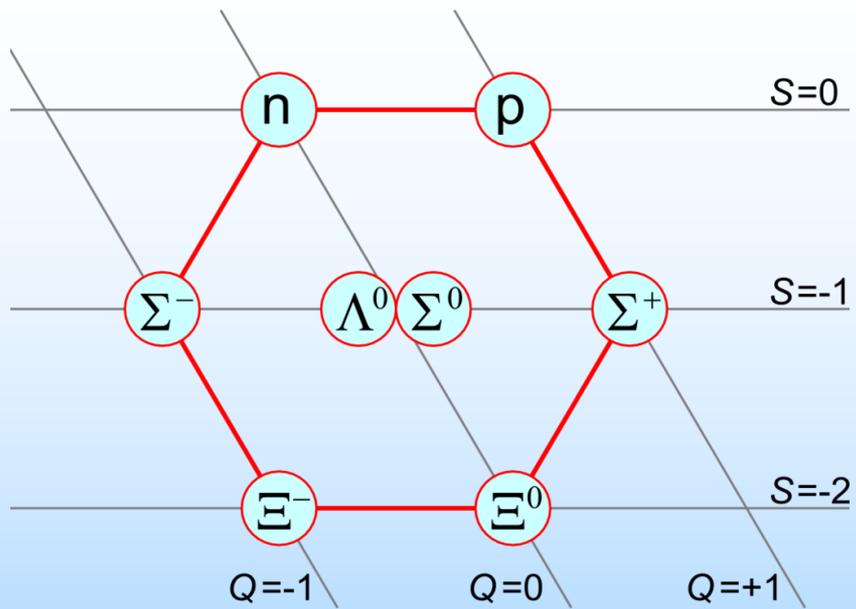
1956 F. Reines e C. Cowan detectam experimentalmente o neutrino.



1995 Reines & Perl



Frederick Reines (1918-1998) Clyde Cowan (1919-1974)



NO SÉCULO XX



1964 M. Gell-Mann propõe o modelo a quarks:



$\approx 2.16 \text{ MeV}/c^2$
 $\frac{2}{3}$
 $\frac{1}{2}$
u
 up

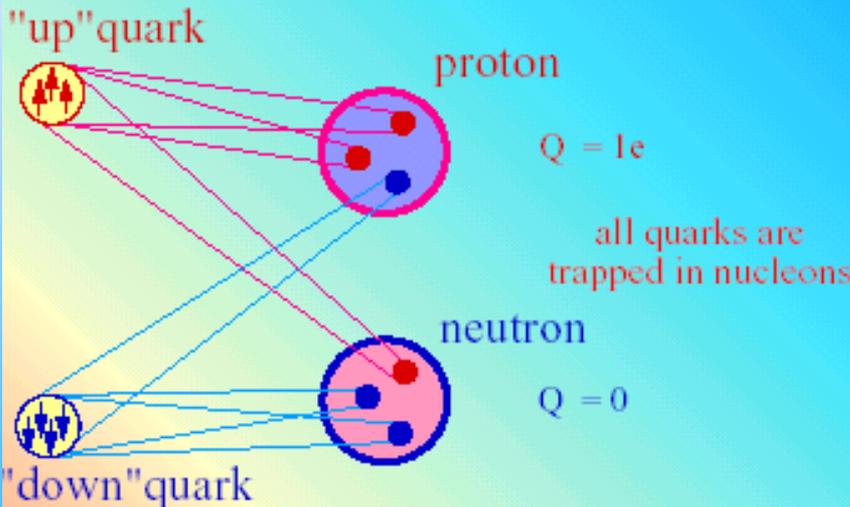
$\approx 4.7 \text{ MeV}/c^2$
 $-\frac{1}{3}$
 $\frac{1}{2}$
d
 down

$\approx 93.5 \text{ MeV}/c^2$
 $-\frac{1}{3}$
 $\frac{1}{2}$
s
 strange



1969

$Q = +\frac{2}{3}$



$Q = -1$

$Q = -\frac{1}{3}$

$Q = 0$

the poets' theatre
 JAMES JOYCE
Finnegan's Wake
 IN SCENES ARRANGED BY MARY PHANNING

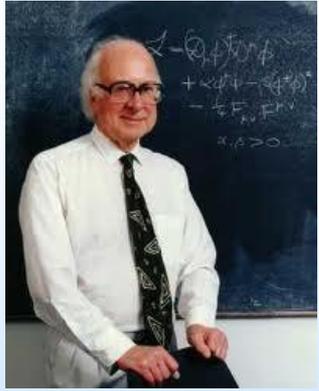
PERFORMS AT 8:30
 MONDAY, NOV. 28
 THURSDAY, DEC. 8
 NO PERFORMANCE FRIDAY, DEC. 9
 MONDAY, AFTERNOON, DEC. 1, 2-3:30

THE POETS' THEATRE LOOKSHOP
 24 PALMER ST., CAMBRIDGE

TICKETS: £2.00
 STUDENTS £1.50
 AT THE PHOENIX BANK STORE 9 BULLFINCH ST. CAMBRIDGE
 TEL. UN 4-3083

James Joyce
Three Quarks
for Muster Mark

NO SÉCULO XX



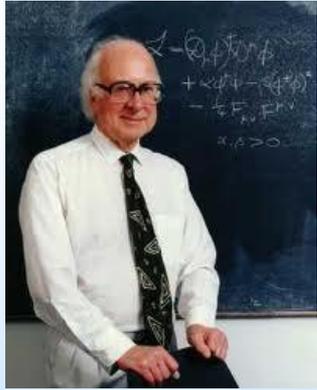
Peter Higgs
(1929-2024)

1964 P. Higgs propõe a existência de um bóson que dá origem à massa das partículas.



2013 Higgs & Eglert

NO SÉCULO XX

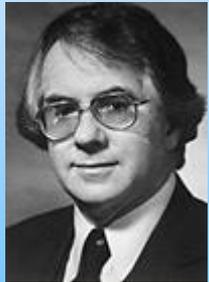


Peter Higgs
(1929-2024)

1964 P. Higgs propõe a existência de um bóson que dá origem à massa das partículas.



2013 Higgs & Eglert



Sheldon
Glasow
(1932-)

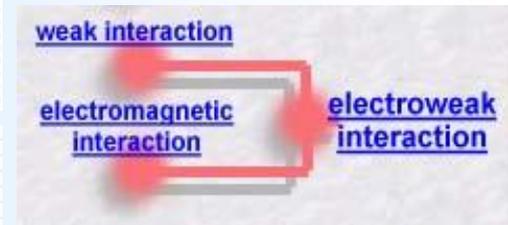
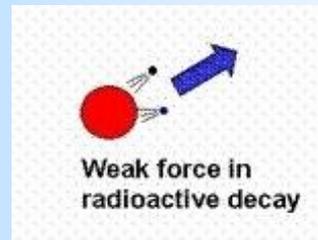
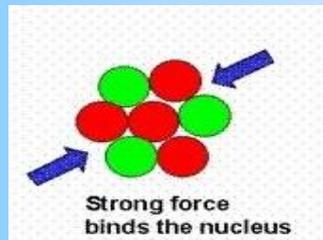
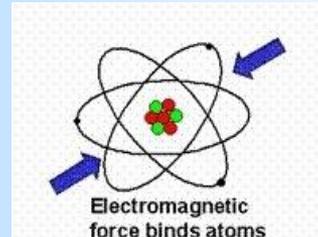
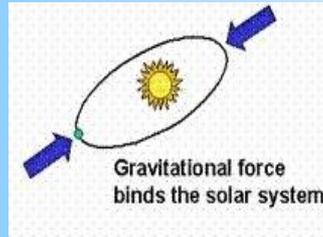


Steven
Weinberg
(1933-2021)



Abdus Salam
(1926-1996)

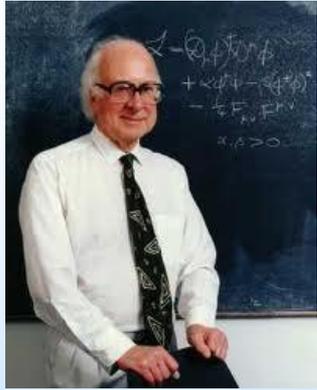
1967 S. Glashow, S. Weinberg e A. Salam propõem o modelo eletrofacó.



1979 Glashow, Weinberg & Salam

NO SÉCULO XX

$\approx 1.273 \text{ GeV}/c^2$
 $\frac{2}{3}$
 $\frac{1}{2}$
C
charm

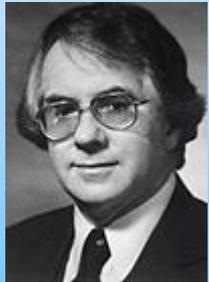


1964 P. Higgs propõe a existência de um bóson que dá origem à massa das partículas.



2013 Higgs & Englert

Peter Higgs
(1929-2024)

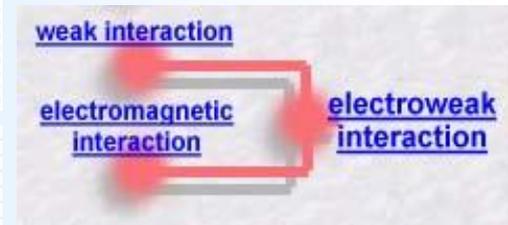
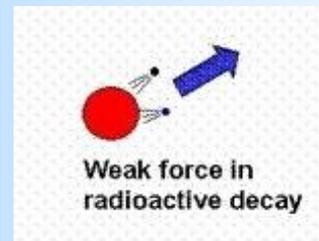
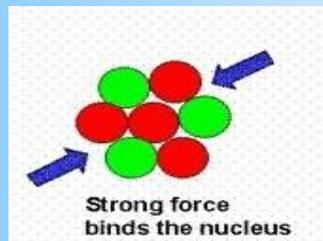
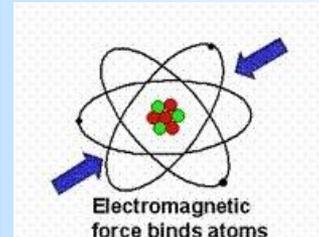
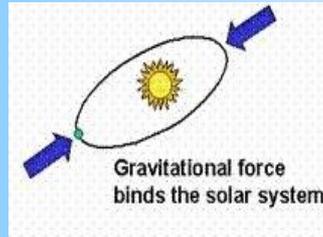


1967 S. Glashow, S. Weinberg e A. Salam propõem o modelo eletrofraco. **1970** S. Glashow lança a hipótese do quark charmoso.

Sheldon
Glasow
(1932-)

Steven
Weinberg
(1933-2021)

Abdus Salam
(1926-1996)



1979 Glashow, Weinberg & Salam

NO SÉCULO XX



Burton
Richter
(1931-2018)



Samuel C.C.
Ting
(1936-)

1974 B. Richter e S. Ting confirmam a hipótese do charme com a detecção da partícula J/Ψ .



1976 Richter & Ting

NO SÉCULO XX

$\approx 1.273 \text{ GeV}/c^2$
 $\frac{2}{3}$
 $\frac{1}{2}$
C
charm

$\approx 1.77693 \text{ GeV}/c^2$
 -1
 $\frac{1}{2}$
 τ
tau



1974 B. Richter e S. Ting confirmam a hipótese do charme com a detecção da partícula J/Ψ .



1976 Richter & Ting

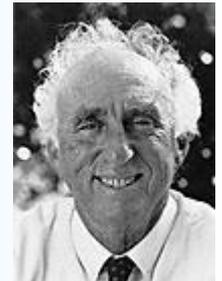
Burton
Richter
(1931-2018)

Samuel C.C.
Ting
(1936-)

1975 M. Perl descobre o lépton τ .



1995 Reines & Perl



Martin
Lewis Perl
(1927-2014)

NO SÉCULO XX



Burton
Richter
(1931-2018)

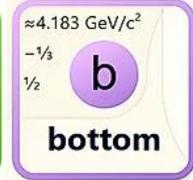
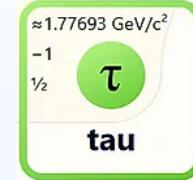


Samuel C.C.
Ting
(1936-)

1974 B. Richter e S. Ting confirmam a hipótese do charme com a detecção da partícula J/Ψ .



1976 Richter & Ting



Leon M.
Lederman
(1922-2018)

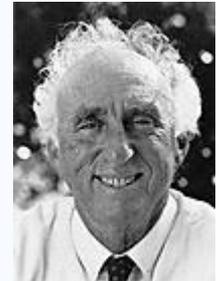


1988 Lederman,
Schwartz & Steinberger
(pela descoberta do ν_μ)



1995 Reines & Perl

1975 M. Perl descobre o lépton τ .



Martin
Lewis Perl
(1927-2014)

NO SÉCULO XX

$\approx 91.188 \text{ GeV}/c^2$ 0 1 Z Z boson	$< 0.17 \text{ MeV}/c^2$ 0 $\frac{1}{2}$ ν_{μ} muon neutrino	$\approx 1.273 \text{ GeV}/c^2$ $\frac{2}{3}$ $\frac{1}{2}$ C charm
$\approx 80.3692 \text{ GeV}/c^2$ ± 1 1 W W boson	$\approx 1.77693 \text{ GeV}/c^2$ -1 $\frac{1}{2}$ τ tau	$\approx 4.183 \text{ GeV}/c^2$ $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ b bottom



Burton Richter
(1931-2018)



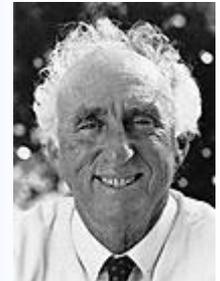
Samuel C.C. Ting
(1936-)

1974 B. Richter e S. Ting confirmam a hipótese do charme com a detecção da partícula J/Ψ .



1976 Richter & Ting

1975 M. Perl descobre o lépton τ .



Martin Lewis Perl
(1927-2014)



Leon M. Lederman
(1922-2018)

1977 L. Lederman descobre o quark bottom.



1995 Reines & Perl

1983 C. Rubbia e S. van der Meer detectam no Cern os bósons intermediários da interação fraca: W^{\pm} e Z^0 .



Carlo Rubbia (1934-) Simon van der Meer (1925-)

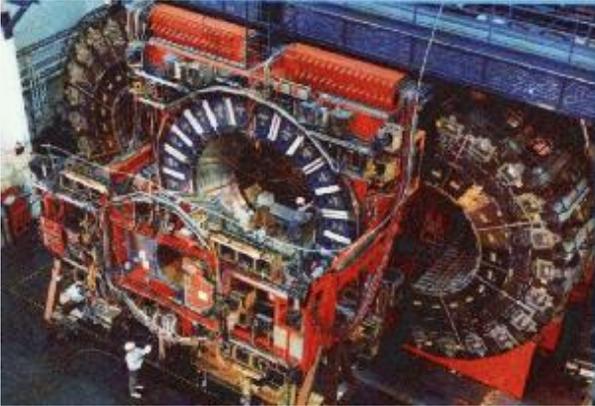


1988 Lederman, Schwartz & Steinberger (pela descoberta do ν_{μ})



1984 Rubbia & Van der Meer

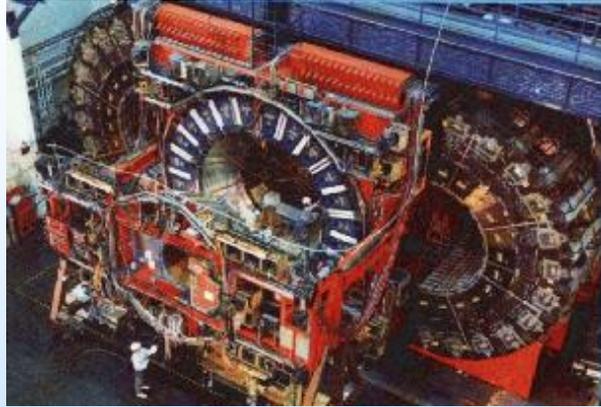
NO SÉCULO XX



1995 Ambos os experimentos CDF e D0 no Fermilab anunciam a descoberta do quark top.



NO SÉCULO XX



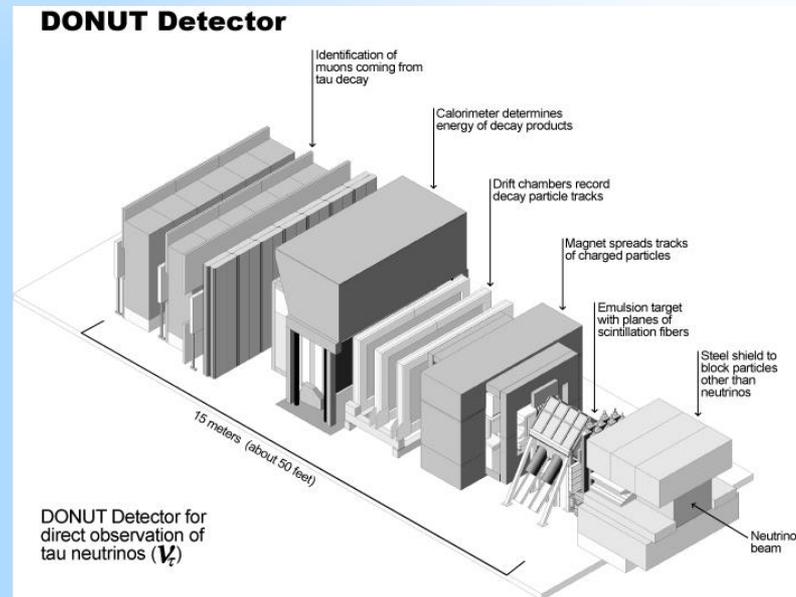
1995 Ambos os experimentos CDF e D0 no Fermilab anunciam a descoberta do quark top.



$\approx 172.57 \text{ GeV}/c^2$
 $\frac{2}{3}$
 $\frac{1}{2}$
t
top

$< 18.2 \text{ MeV}/c^2$
0
 $\frac{1}{2}$
 ν_τ
tau neutrino

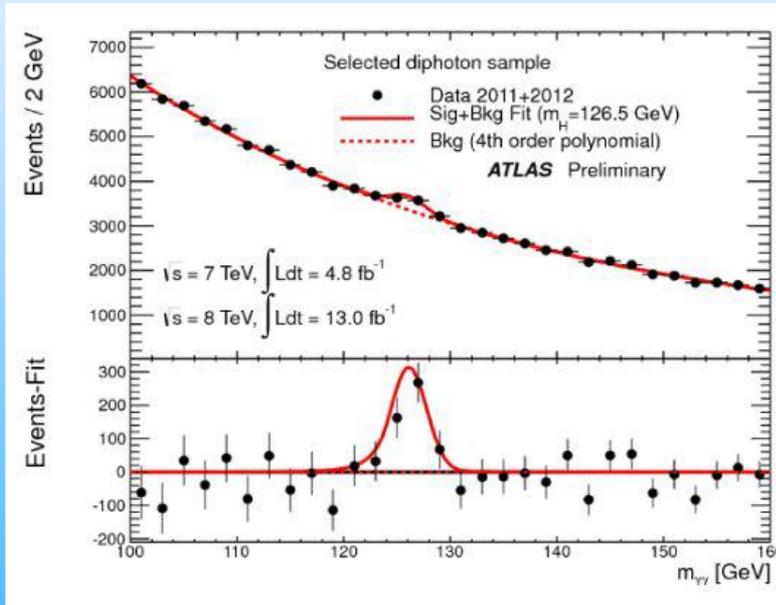
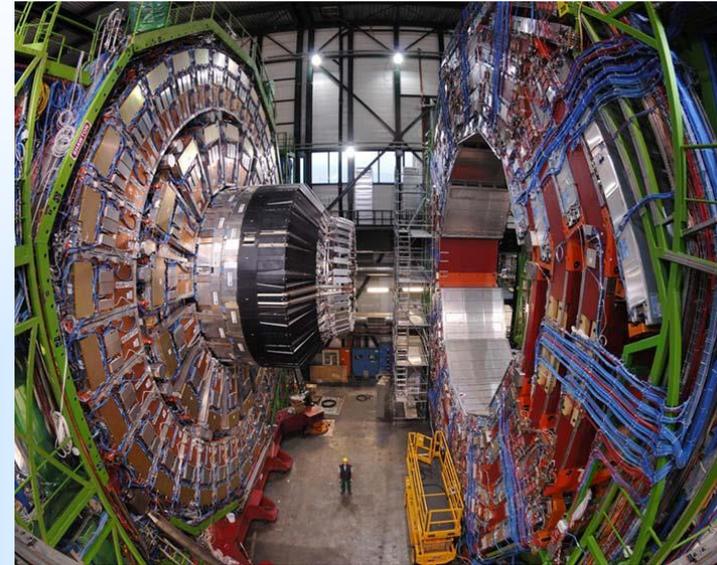
2000 o experimento Donut, do Fermilab, anuncia a descoberta do neutrino do tau (ν_τ).



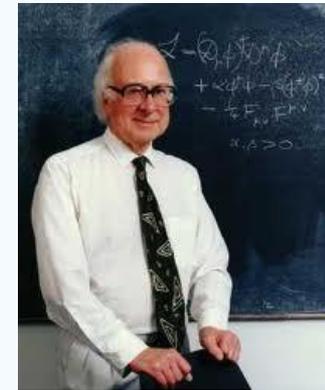
NO SÉCULO XXI



2013 O experimento CMS anuncia a descoberta de uma partícula com massa compatível com a do bóson de Higgs.

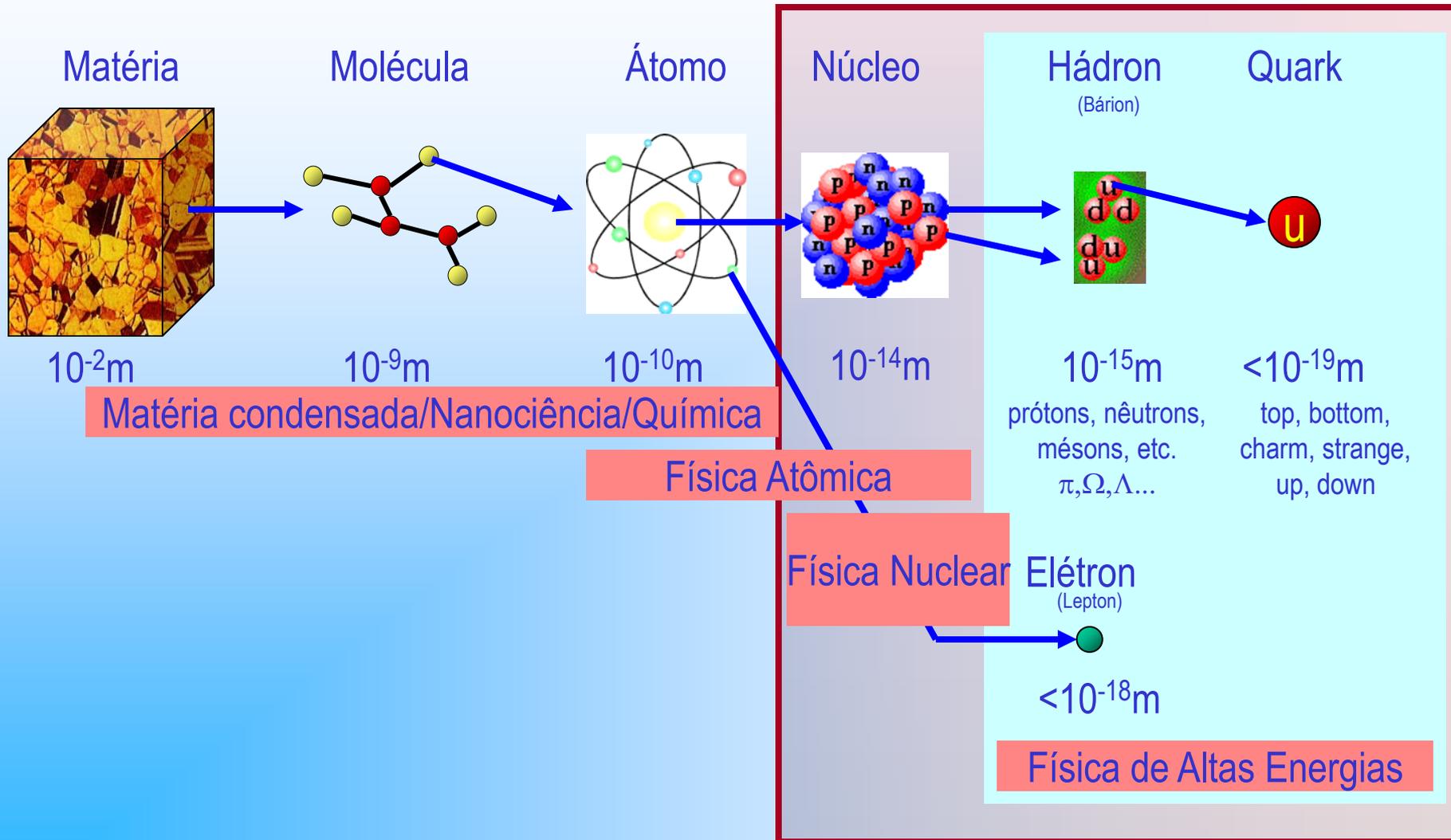


2013
Higgs &
Eglert

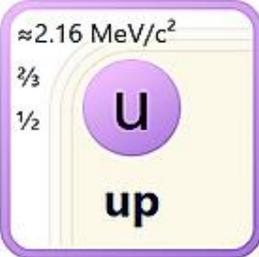
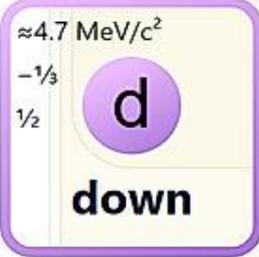
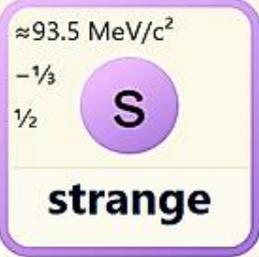
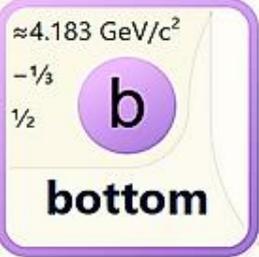
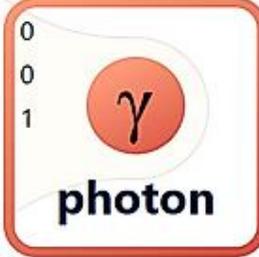
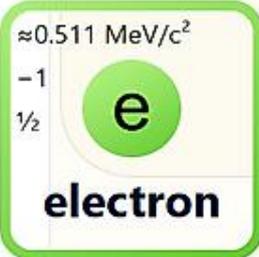
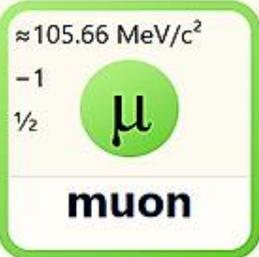
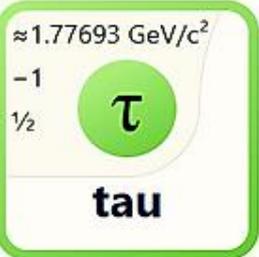
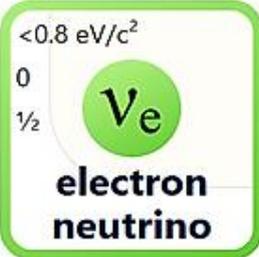
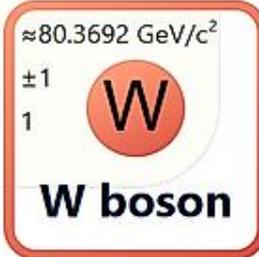


Peter Higgs
(1929-2024)

Estrutura da matéria



Standard Model of Elementary Particles

	three generations of matter (fermions)			interactions / force carriers (bosons)	
	I	II	III		
mass	$\approx 2.16 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.273 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 172.57 \text{ GeV}/c^2$	0	$\approx 125.2 \text{ GeV}/c^2$
charge	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0	0
spin	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	0
QUARKS	 <p>u up</p>	 <p>c charm</p>	 <p>t top</p>	 <p>g gluon</p>	 <p>H higgs</p>
	 <p>d down</p>	 <p>s strange</p>	 <p>b bottom</p>	 <p>γ photon</p>	
	 <p>e electron</p>	 <p>μ muon</p>	 <p>τ tau</p>	 <p>Z Z boson</p>	
LEPTONS	 <p>ν_e electron neutrino</p>	 <p>ν_μ muon neutrino</p>	 <p>ν_τ tau neutrino</p>	 <p>W W boson</p>	<p>GAUGE BOSONS VECTOR BOSONS</p> <p>SCALAR BOSONS</p>

