

Universidade de São Paulo Instituto de Física

EVIDÊNCIAS EXPERIMENTAIS DA NATUREZA QUÂNTICA DA
RADIAÇÃO E DA MATÉRIA

AULA 06

Profa. Márcia de Almeida Rizzutto
Pelletron – sala 220
rizzutto@if.usp.br
rodrigo.fernandes.me@gmail.com

2º. Semestre de 2023

Monitores: Rodrigo Fernandes de Almeida
Samuel Pizzol

Conteúdo

- | | |
|--|--------------------|
| <ul style="list-style-type: none">• Natureza Ondulatória da Radiação eletromagnética<ul style="list-style-type: none">• Radiação Térmica – Hipótese de Planck• Natureza corpuscular da Radiação eletromagnética e suas propriedades<ul style="list-style-type: none">• Efeito fotoelétrico• Efeito Compton• Produção e aniquilação de pares• Difração de raios-X | <p>Antes greve</p> |
| <ul style="list-style-type: none">• A natureza corpuscular (atômica) da matéria<ul style="list-style-type: none">• Natureza atômica da matéria• Modelo de Thomson• Modelo de Rutherford• Modelo de Bohr• A natureza ondulatória da Matéria e as propriedades ondulatórias<ul style="list-style-type: none">• Postulado de de Broglie• Difração de elétrons, | <p>Pós greve</p> |

Conteúdo

- **Natureza Ondulatória da Radiação eletromagnética**
 - **Três aulas teóricas (A1, A2 e A3)**
 - **Um experimento: Radiação de Corpo Negro – duas aulas de análise (E2ANA)**
- **Natureza corpuscular da Radiação eletromagnética**
 - **Duas aulas teóricas (A4 e A5)**
 - **Dois experimentos: Efeito Fotoelétrico e Difração de RX (E4MED, E4ANA, E5MED, E5ANA)**
- **A natureza corpuscular (atômica) da matéria**
 - **Três aulas teóricas (A6 a A8) Natureza atômica da matéria**
 - **Um experimento: Espectroscopia do Hidrogênio (E8MED e E8ANA)**
- **A natureza ondulatória da Matéria e as propriedades ondulatórias**
 - **Duas aulas teóricas (Aulas de 09 e 10)**
 - **Um experimento: Difração de elétrons (E9MED e E9ANA)**

A6	Discussão qualitativa sobre as evidências químicas para uma descrição atômica da matéria
A7	Apresentação do trabalho de Rutherford
A8	Apresentação do modelo de Bohr
E8MED	Espectroscopia do Hidrogênio - Realização das medidas
E8ANA	Espectroscopia do Hidrogênio - Análise de dados
A9	Discussão sobre a hipótese de de Broglie
A10	Discussão sobre a natureza ondulatória das partículas
E9MED	Difração de elétrons - Realização das medidas
E9ANA	Difração de elétrons - Análise de dados
EXERC	Aula de exercícios
P	Prova



A5MED-T2	A5ANA-T1 E T2
A6	
novembro	feriado
A7	A8 AU1
A8 -AU 2 T1 E8MED T2	A8 -AU 2 T2 E8MED T1
feriado	A8ANA-T1 E T2
A9	A10 - T1 E9MED T2
dezembro	
A10 - T2 E9MED T1	E9ANA T1 e T2
EXERC	PROVA

Avaliação

- 1) Relatórios (4) + relatório resumido sobre difração de elétrons – são todos obrigatórios
- 2) Provas (1),

Cálculo da média final M :

- Média dos relatórios: $R = \frac{R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + R_5}{5}$

- Nota de P

- Se $R_i (i=1, 2, 3, 4 \text{ ou } 5) = 0$: $M=0$

- Se $P \geq 3$ e $R \geq 3$: $M = \frac{P+R}{2}$

- Se $P < 3$ ou $R < 3$: $M = \min\{P, R\}$

- Se $M < 5$: Reprovação

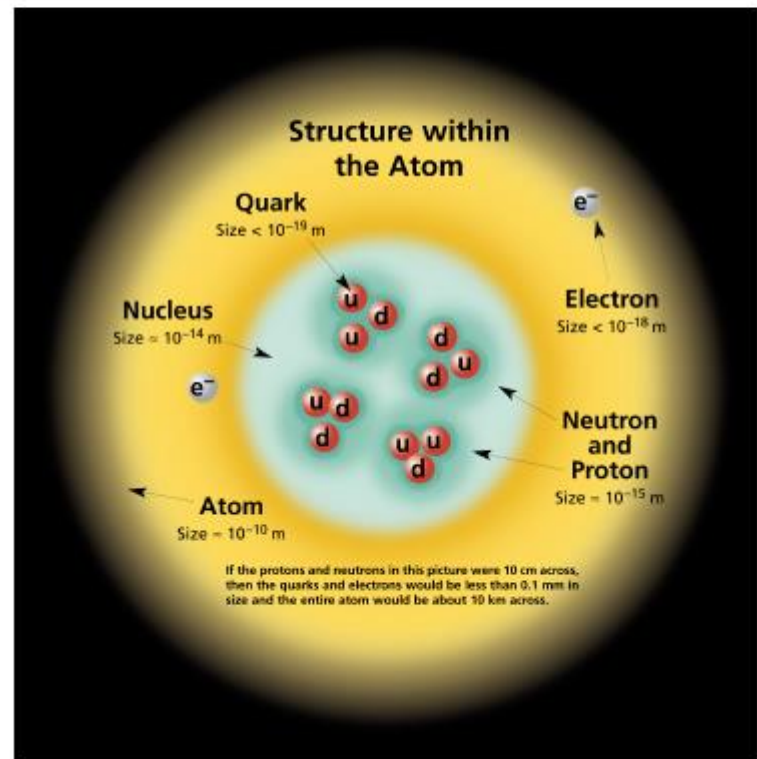
- Se $M \geq 5$: Aprovação

Lembrando que, como nas outras disciplinas experimentais, não há segunda avaliação (recuperação) nesta disciplina.

Do que todas as coisas são feitas?

- *“If, in some cataclysm, all scientific knowledge were to be destroyed, and only one sentence passed on to the next generation of creatures, what statement would contain the most information in the fewest words? I believe it is the atomic hypothesis (or atomic fact, or whatever you wish to call it) that all things are made of atoms”*

Richard Feynman



Natureza



Composta



matéria



Radiação
eletromagnética



Descrição atômica



partículas



evidências



Química



Teoria Cinética dos gases



?

Hipóteses levantadas para gás ideal + trabalhos da química, conduziram a ideia que a matéria é constituída de moléculas e átomos

A Contribuição da Química: Dalton

- Um dos primeiros cientistas a formular uma teoria atômica não especulativa (1808)
- Postulados de sua teoria (Caruso - Oguri, página 35):
- todo elemento químico é composto de pequenas partículas chamadas átomos
- todos os átomos de um mesmo elemento apresentam as mesmas propriedades
- átomos de diferentes elementos têm propriedades químicas diferentes

A Contribuição da Química: Dalton

- Postulados de sua teoria (Caruso - Oguri, página 35):
- durante uma reação química, nenhum átomo de determinado elemento desaparece ou se transforma em um átomo de outro elemento
- formam-se substâncias compostas quando se combinam átomos distintos de mais de um elemento
- em um dado composto químico, os números relativos de átomos dos seus elementos são definidos e constantes e, em geral, podem expressar-se como inteiros ou frações simples
- quando dois elementos se unem para formar uma terceira substância, presume-se que apenas um átomo de um elemento se combine com um átomo de outro elemento

A Contribuição da Química: Avogadro

- Introduziu em 1811 o conceito de molécula diferenciando do conceito de átomo (“moléculas elementares”)
- Postulou que “dois volumes iguais de dois gases quaisquer contêm o mesmo número de moléculas desde que a temperatura e a pressão sejam as mesmas”
- A *constante de Avogadro* foi medida mais tarde e reconhecida como uma constante universal por Jean Perrin

Origens do atomismo na Física

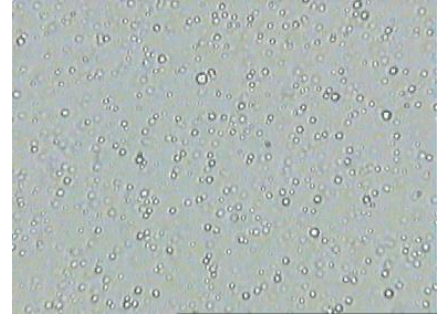
- Determinismo mecanicista:
 - fenômenos complexos podem ser explicados pela superposição de fenômenos simples de cunho mecânico
- Teoria Cinética dos Gases
 - Início com Bernoulli, em 1738
- Movimento Browniano
 - Demonstração experimental da existência de átomos e moléculas

A visão corpuscular: Movimento Browniano

Em 1828 o botânico Inglês Roberto Brown descreveu o *movimento browniano*

Com o auxílio de um microscópio observou que os grãos de pólen de diversas plantas, quando colocadas na água (líquido), dispersavam em um grande número partículas microscópicas e executam movimentos irregulares.

Partículas de uma molécula primitiva da matéria viva



No entanto ele mesmo observou este mesmo movimento para a matéria inorgânica

No início do século XX tornou-se a prova mais convincente do existência das moléculas ou seja hipótese corpuscular da matéria

O Movimento Browniano

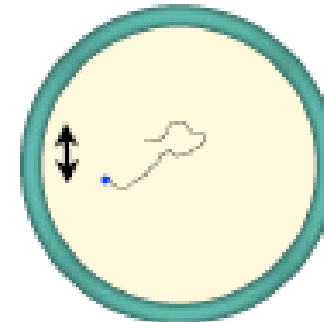
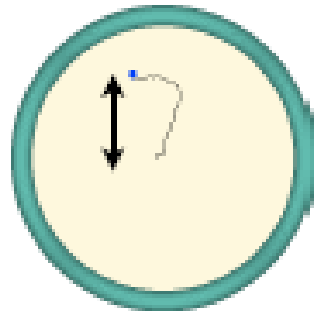
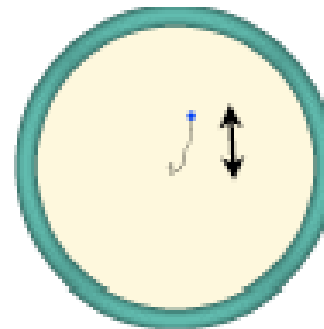
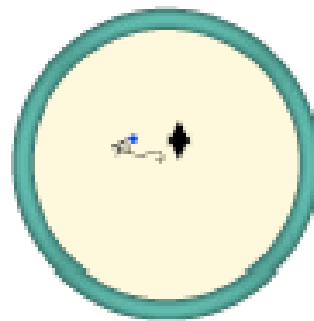
- Qual a explicação para esse fenômeno?
- Einstein acreditava firmemente na existência da átomos e moléculas
- Em sua tese de doutoramento, ele analisa o fenômeno de difusão das partículas do soluto em uma solução diluída com o objetivo de obter estimativas para o número de Avogadro e o diâmetro das partículas do soluto

O Movimento Browniano

- A explicação de Einstein para o movimento browniano se baseia na existência de moléculas
- Ele apresenta uma dedução probabilística da equação de difusão e obtém uma expressão para o deslocamento característico das partículas em suspensão
- Em sua explicação, as partículas em suspensão sofrem sucessivas colisões com as moléculas do fluido, provocando seu movimento irregular
- Um dos grandes méritos de Einstein foi obter uma relação que podia ser verificada experimentalmente, testando assim as suas hipóteses
- Animação: http://galileo.phys.virginia.edu/classes/109N/more_stuff/Applets/Brownian/brownian.html

O Movimento Browniano

- Em 1908, Jean Perrin mediu o deslocamento médio de partículas diluídas em uma solução aquosa e conseguiu medir o número de Avogadro

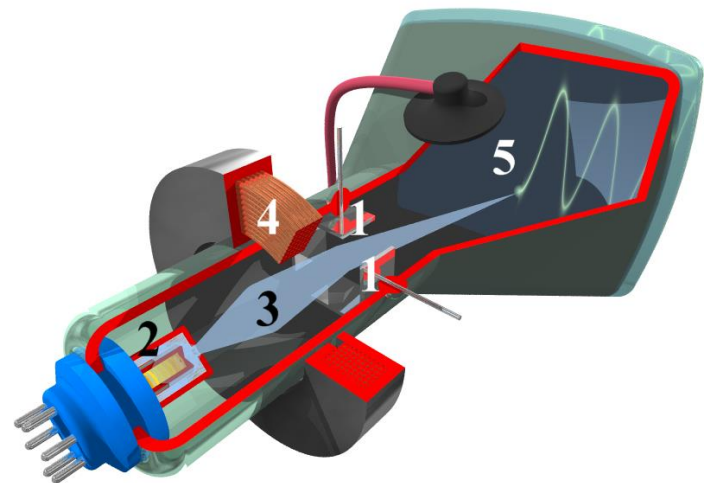
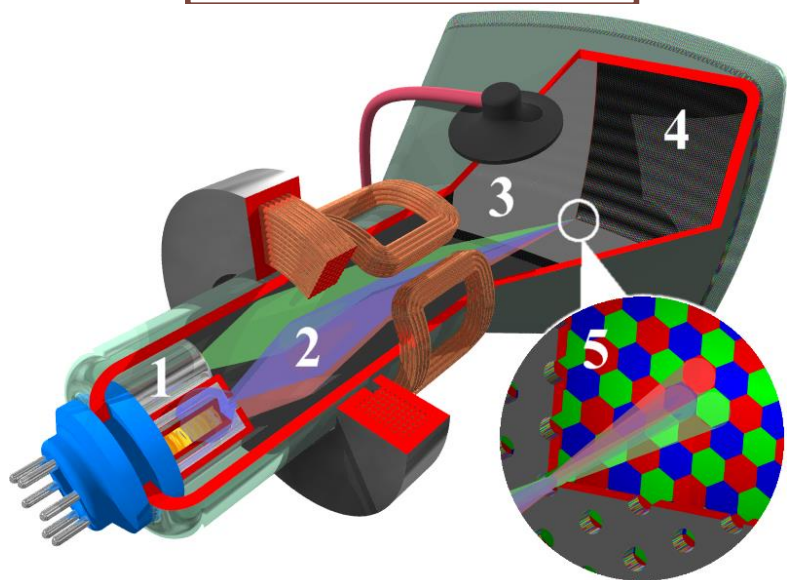


Evidências experimentais que sugeriram a divisibilidade do átomo - existência de uma subestrutura (no entanto só compreendido no século XX)

A partir de 1857, aperfeiçoamento das técnicas experimentais com trabalhos de vidros e máquina de fazer vácuo - condições de realizar experimentos para compreensão da estrutura da matéria

Tubos de raios catódicos

Descargas elétricas em gases produzidos entre eletrodos metálicos

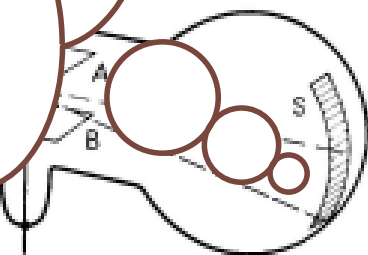


Descoberta do elétron



Em 1897, **J.J. Thomson** estava estudando descargas elétricas em tubo de raios catódicos (Laboratório Cavendish – Inglaterra), tentando entender as descargas que ocorrem dentro desses tubos e descobre o primeiro componente que faz parte do átomo: **o elétron**, uma partícula com carga elétrica negativa.

Este feixe luminoso não podia ser luz pois em 1869 o feixe luminoso (dos raios catódicos) quando aproximado a um campo magnético eram desviados enquanto que luz não sofria este efeito

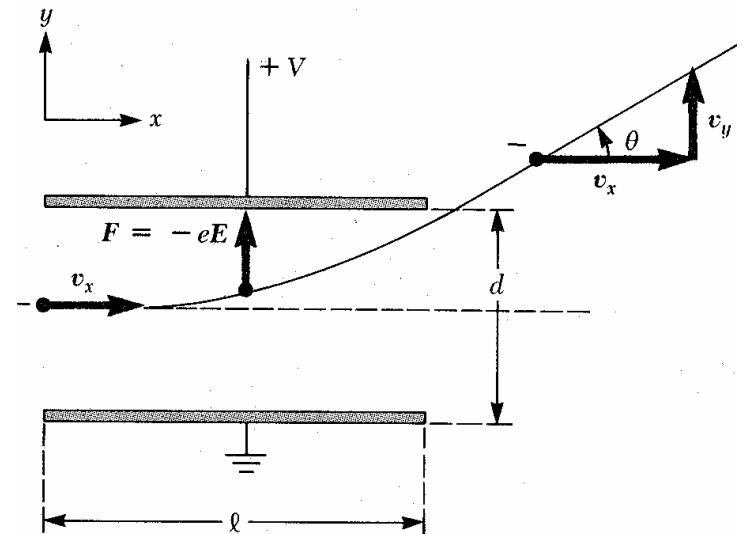
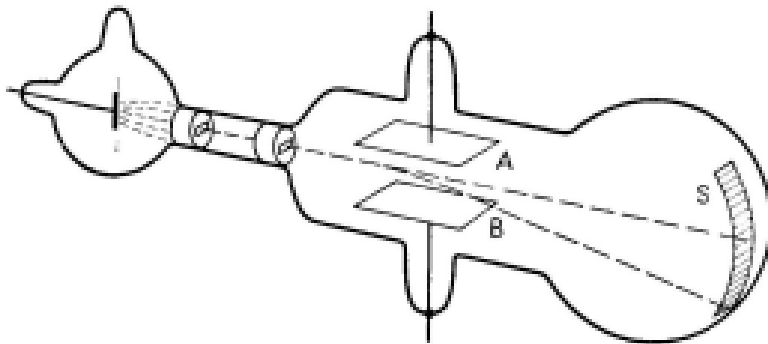


Thomson consegue medir a razão carga massa (e/m) dessas partículas deste feixe luminoso. Este corpúsculo carregado identificado era exatamente o mesmo quaisquer que fossem os elementos do catodo, anodo e do gás dentro do tubo

Medida experimental da e/m

J.J. Thomson usou de campos elétricos para verificar sua ação sobre os “raios catódicos”. Usou também campos magnéticos perpendicular ao campo elétrico para medir a razão e/m

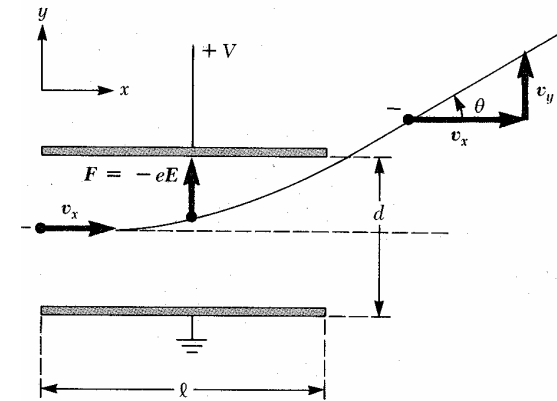
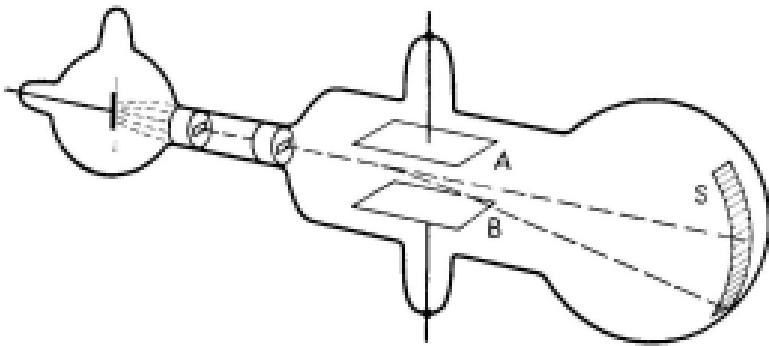
Thomson a partir da deflexão dos “raios catódicos”, do valor da tensão aplicada as placas internas do tubo, da distância entre estas placas (d), dos comprimentos destas (ℓ) e do valor do campo magnético aplicado, foi possível obter a razão e/m



Descoberta do elétron



Em 1897, **J.J. Thomson** estudando descargas elétricas em tubo de raios catódicos e tentando entender estas descargas, descobre o primeiro componente que faz parte do átomo: o **elétron**, uma partícula com carga elétrica negativa.



Thomson consegue medir a razão carga massa dessas partículas deste feixe luminoso..... $q/m = 0,7 \times 10^{11} \text{C/kg}$

Hoje: $q/m = 1,76 \times 10^{11} \text{C/kg}$

- **espectrômetro de massa**

Equipamentos utilizados para medir a razão q/m . Para tanto utiliza-se de um campo magnético onde pode-se determinar a trajetória da partícula neste campo:

B perpendicular ao movimento

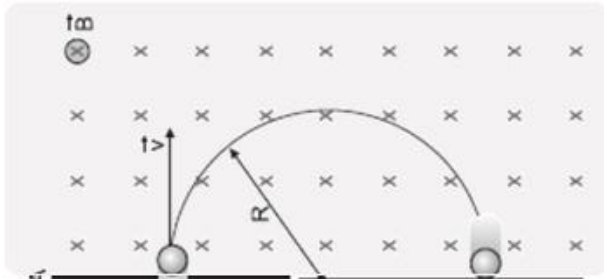
aceleração centrípeta

$$F = qvB = ma$$

$$a = \frac{v^2}{R}$$

$$qvB = m \frac{v^2}{R}$$

$$R^2 = \left(\frac{mv}{qB} \right)^2$$



Energia cinética que possui ao entrar na região de B

$$\frac{1}{2}mv^2 = q\Delta V$$

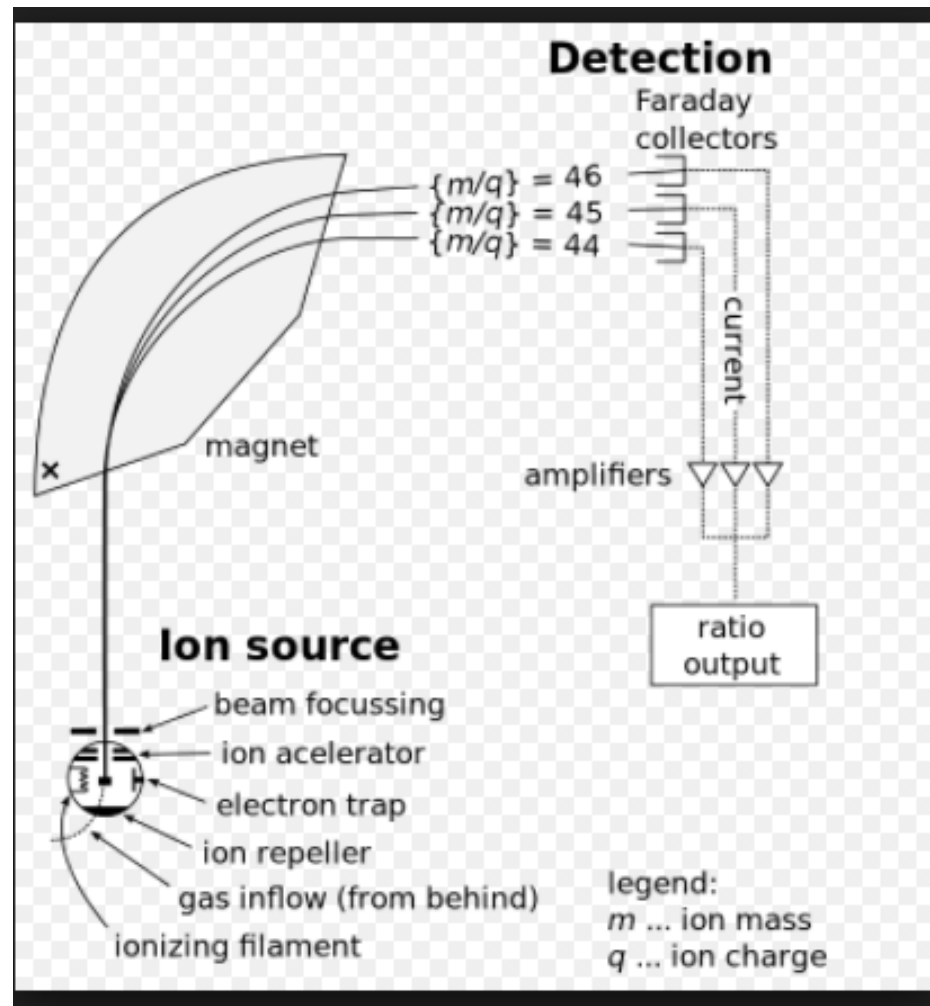
$$mv^2 = 2q\Delta V = \frac{q^2 B^2 R^2}{m}$$

$$\frac{q}{m} = \frac{2\Delta V}{B^2 R^2}$$

Experimento inicialmente realizado por F. W. Aston em 1919, e as diferenças de massa podiam ser medidas com precisão de ~ 1 parte em 10000 (hoje 1 parte em 10^9)

- **espectrômetro de massa**

Equipamentos utilizados para medir a razão q/m são encontrados em aceleradores de partículas



Medidas da Carga Elétrica do Elétron

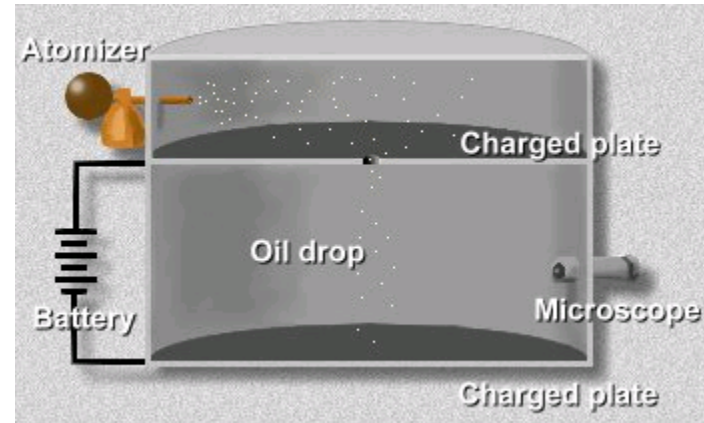
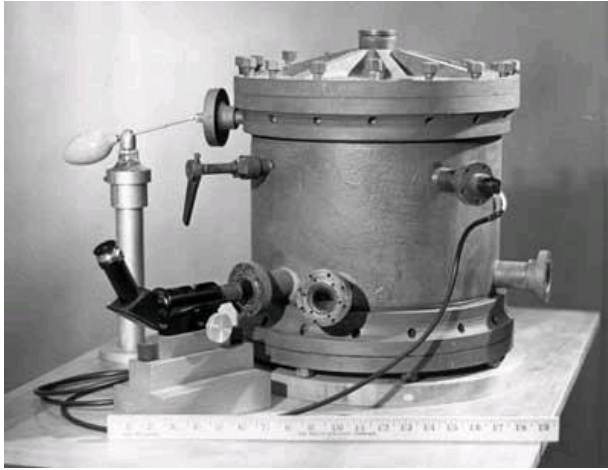
- O passo seguinte corresponde à obtenção da carga elétrica do elétron (ou corpúsculos, como Thomson chamava)
- De 1897 a 1903, Thomson e colaboradores mediram a carga elétrica do elétron
- Porém, o método usado por eles (câmara de nuvens) apresentava várias limitações e não permitiu obter resultados precisos

Medidas da Carga Elétrica do Elétron

- Millikan, Begeman e Fletcher, de 1907 a 1910, revolucionaram a medida de carga do elétron
- Eles utilizam um forte campo elétrico e óleo ao invés de vapor de água
- A principal conclusão deles foi a observação que a carga das gotículas de óleo era sempre múltipla da carga elementar obtida ²⁴

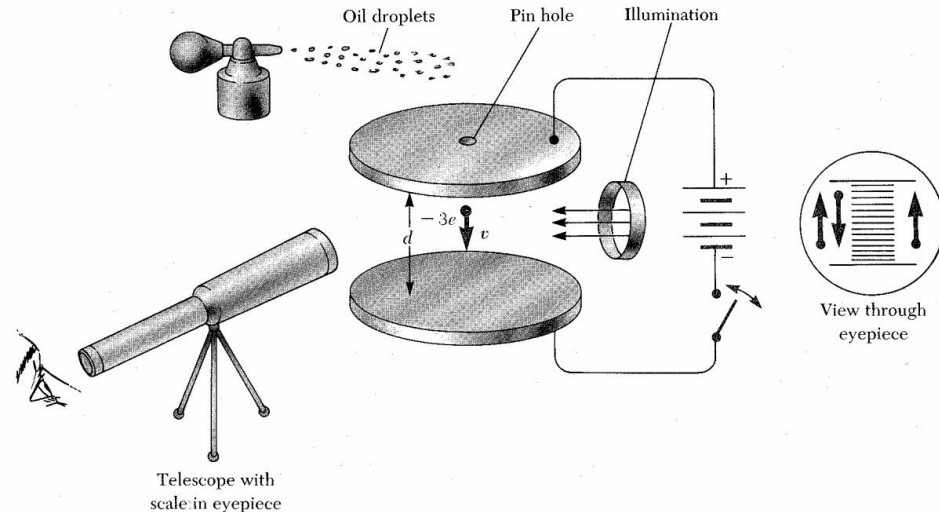
Medidas da Carga Elétrica do Elétron

❑ O equipamento experimental foi realizado por Robert A. Millikan em 1909:

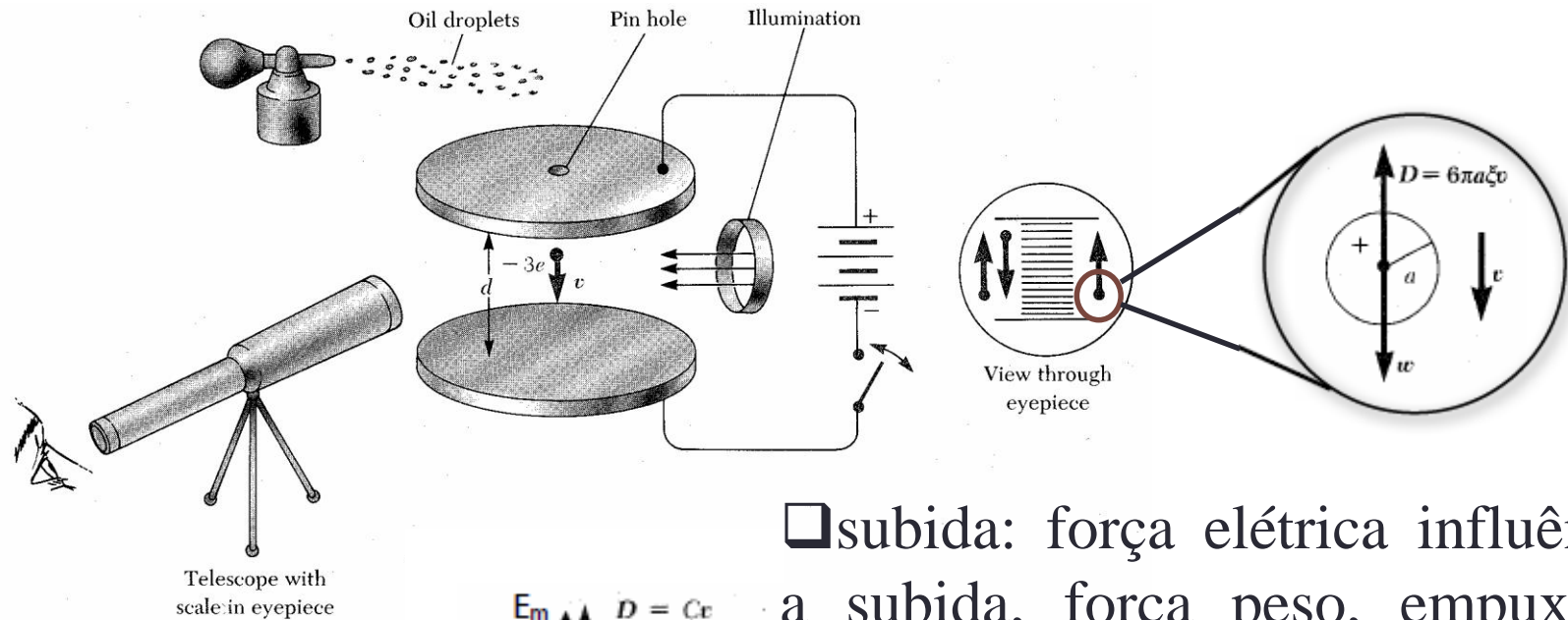


❑ Método utilizado era medir a velocidade de gotículas de óleo sob a influência da gravidade e de um campo elétrico uniforme.

❑ Usou um campo elétrico intenso Para manter uma gota carregada por período de 30 a 60 seg. (observar gotas isoladas). Equações de movimento para a descida e de subida da gota.

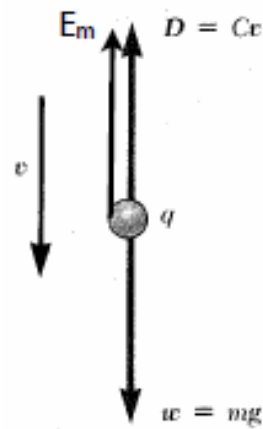


Medidas de Carga Elétrica do Elétron

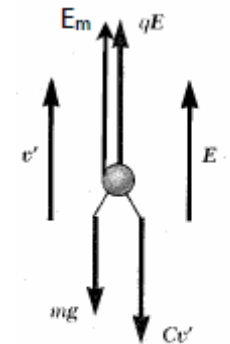


□ subida: força elétrica influencia a subida, força peso, empuxo e atrito do ar (contrário a descida)

□ Descida: a gota sofre influência do peso, empuxo e atrito do ar



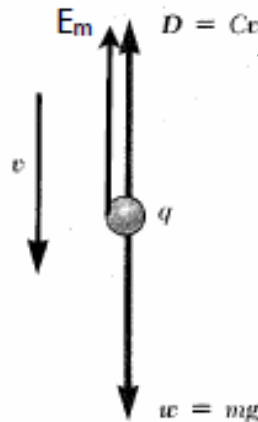
(a) Field off



(b) Field on

Medidas de Carga Elétrica do Elétron

□ Descida: a gota sofre influência do peso, empuxo e atrito do ar
SEM CAMPO

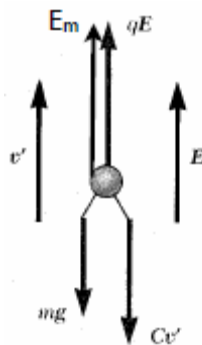


(a) Field off

$$v_d = \frac{mg}{6\pi\rho_{ar}a} = \frac{\frac{4}{3}\pi a^3 d_{ol}g}{6\pi\rho_{ar}a}$$

$$v_d = \frac{2 d_{ol} a^2 g}{9 \rho_{ar}}$$

□ subida: força elétrica influencia a subida, força peso, empuxo e atrito do ar (contrário a descida)
COM CAMPO



(b) Field on

$$v_d = v_q = \frac{L}{t_q} = \frac{2 d_{ol} a^2 g}{9 \rho_{ar}}$$

$$a = \sqrt{\frac{9\rho_{ar}L}{2t_q d_{ol}g}}$$

ρ_{ar} viscosidade do ar
 d_{ol} densidade do óleo

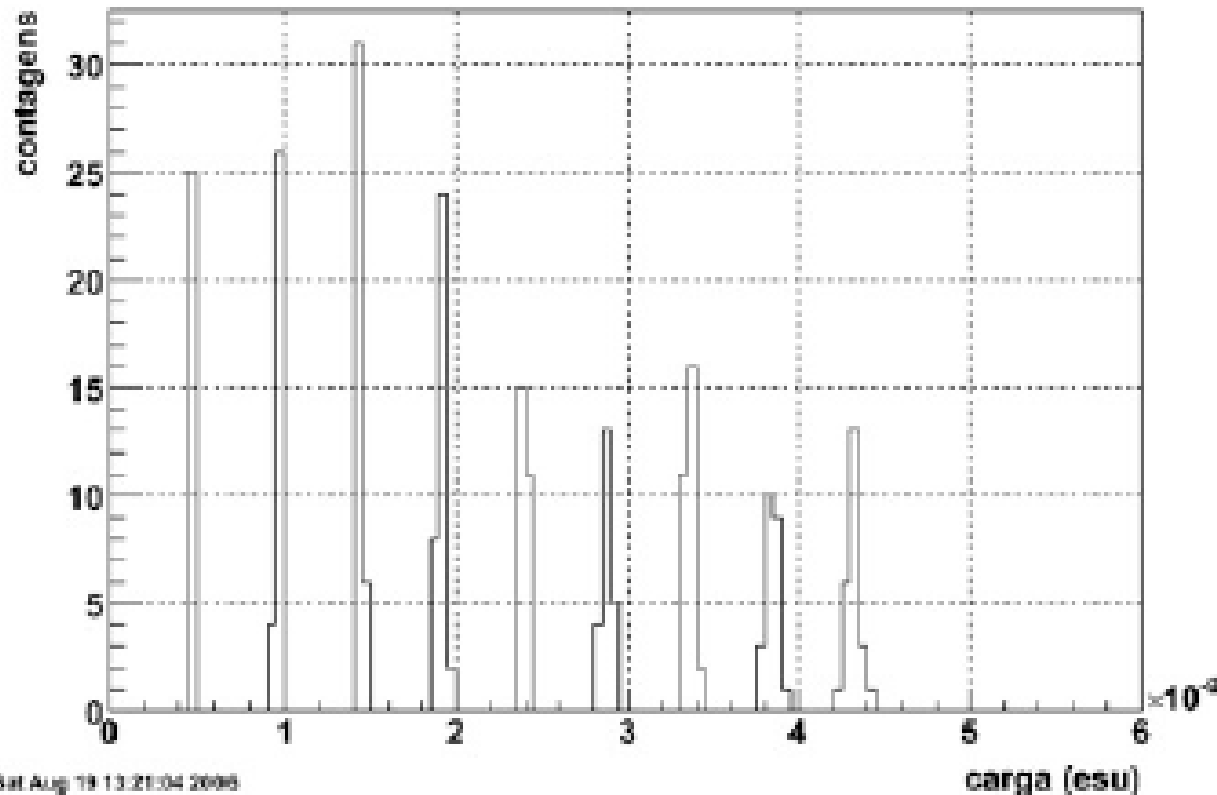
Raio da gota

Medidas de Carga Elétrica do Elétron

□ Várias medidas de tempo de queda, cálculos de velocidade e raio da gota, podemos constatar a quantização da carga elétrica

A carga do elétron é de
 $1,60217653(14) \times 10^{-19} \text{ C}$

Erro = 1%, Canal = $0.5e-10 \text{ esu}$



Natureza corpuscular da matéria

- Diversas evidências mostram que a matéria tem uma composição elementar
- E que essa composição tem um caráter corpuscular, ou seja, que a matéria é composta de pequenos corpúsculos

□ A partir das várias informações obtidas até agora poderemos começar uma discussão sobre modelos dos átomos.

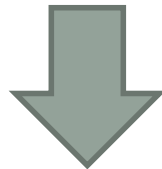
**PERGUNTA: COMO É O ÁTOMO?
QUAL O MELHOR MODELO QUE
O DESCREVE ?**

□ Para entendê-lo necessitamos olhar os espectros atômicos.

□ Sabemos que a radiação térmica emitida pelos corpos aquecidos (radiação de corpos negro) **É CONTÍNUA**



□ O espectro de emissão de átomos é discreta



□ Apenas alguns comprimentos de onda estão presentes



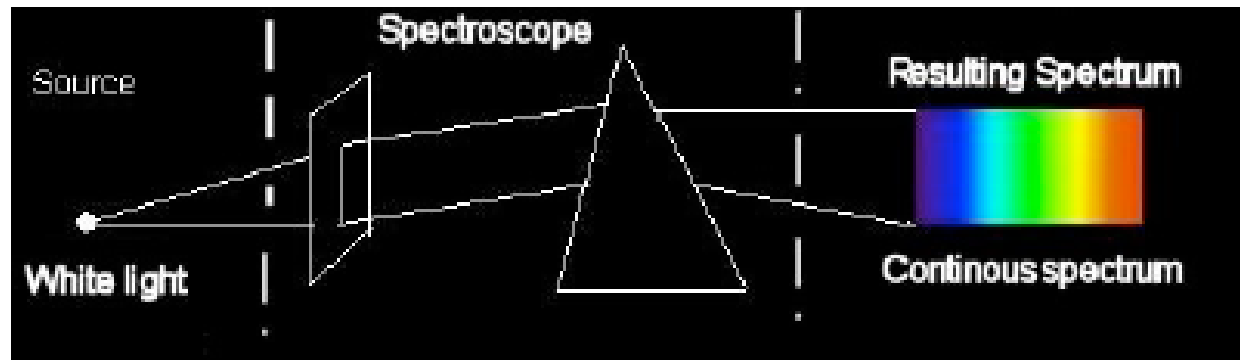
Onde vejo isto?

Espectros Atômicos

□ Newton observou que a luz solar que entrava no seu laboratório através de uma pequena fenda em sua persiana podia ser refratada por um prisma de vidro e projetada em uma tela e mostrava uma série de faixa coloridas



espectro

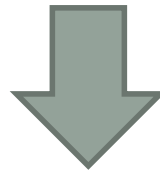


□ Os espectros de emissão dos elementos e compostos químicos podem ser divididos em três categorias:

- Espectros contínuos
- Espectros de Bandas
- Espectros de Linhas

Espectros Atômicos

- ❑ Espectros contínuos: emitidos por sólidos incandescentes, não aparecem linhas (nem claras nem escuras)
- ❑ Espectros de Bandas: são formados por grupos de linhas muito próximas umas das outras, que parecem formar bandas contínuas - pedaços de substâncias sólidas colocadas em uma chama ou submetidas a descargas elétrica
- ❑ Espectros de Linhas: são características de átomos isolados



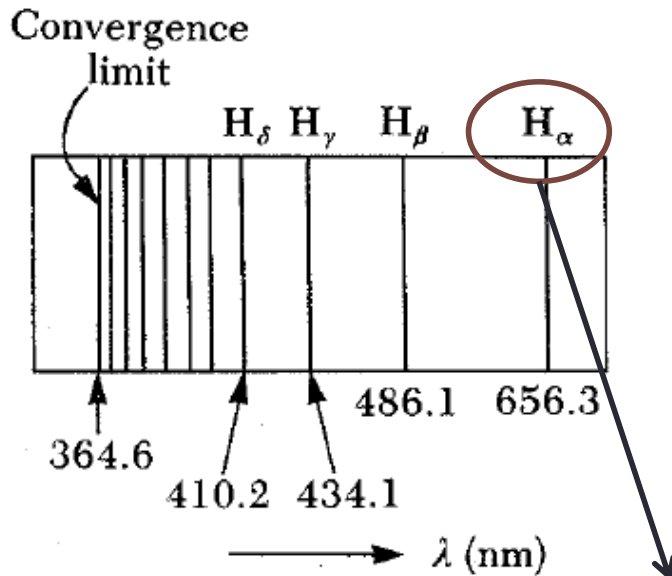
Física clássica não consegue explicar estas linhas



No final do século XIX a radiação característica emitida pelos átomos aquecidos foi exaustivamente estudada

Espectro Hidrogênio

- Espectro de emissão do átomo de Hidrogênio (átomo + simples) possui linhas discretas na **região visível e ultravioleta**:



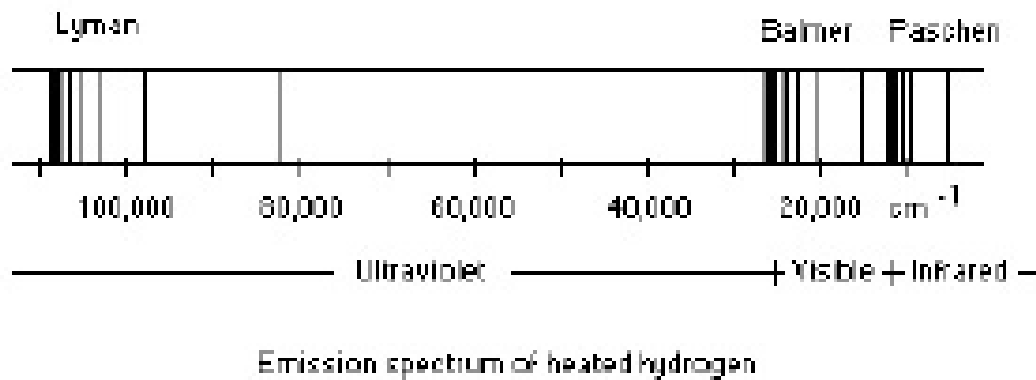
1885: J. Balmer descobriu que as linhas do espectro de hidrogênio poderiam ser calculadas através de fórmula empírica:

$$\lambda_m = 3646 \frac{m^2}{m^2 - 4}, m = 3, 4, 5$$

Corresponde a $m=3$

Espectro Hidrogênio

- Balmer previu que uma expressão mais geral que pudesse explicar as outras séries:



- 1890 Rydberg finalmente encontra uma formulação mais geral para as séries observadas:

$$K = \frac{1}{\lambda} = R_H \left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right), m = 1, 2, 3, \dots, n > m$$

$$R_H = 1.097373 \times 10^7 \text{ m}^{-1}$$

Espectro Hidrogênio

$$R_H = 1.097373 \times 10^7 \text{ m}^{-1}$$

Constante de Rydberg para o H

$$K = \frac{1}{\lambda} = R_H \left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right), m = 1, 2, 3, \dots, n > m$$

Nomes	Faixa de comprimentos de onda	Fórmulas	
Lyman	Ultravioleta	$\kappa = R_H \left(\frac{1}{1^2} - \frac{1}{n^2} \right)$	$n = 2, 3, 4, \dots$
Balmer	Ultravioleta próximo e visível	$\kappa = R_H \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right)$	$n = 3, 4, 5, \dots$
Paschen	Infravermelho	$\kappa = R_H \left(\frac{1}{3^2} - \frac{1}{n^2} \right)$	$n = 4, 5, 6, \dots$
Brackett	Infravermelho	$\kappa = R_H \left(\frac{1}{4^2} - \frac{1}{n^2} \right)$	$n = 5, 6, 7, \dots$
Pfund	Infravermelho	$\kappa = R_H \left(\frac{1}{5^2} - \frac{1}{n^2} \right)$	$n = 6, 7, 8, \dots$

Modelo atômico

- ❑ Os cientistas do final do século XIX sabiam:
 - ❑ Átomo tinha o diâmetro da ordem de 10^{-10}m
 - ❑ Era eletricamente neutro
 - ❑ Continha elétrons (partículas muito + leves que o átomo como um todo)

Problema:

encontrar um modelo que satisfizesse todos estes requisitos e fosse compatível com as fórmulas de Balmer e Rydberg

1º Proposta:

Thomson em 1904: esfera de carga positiva embebida por elétrons – carga total nula

MODELO CHAMADO DE “PUDIM DE PASSAS”

