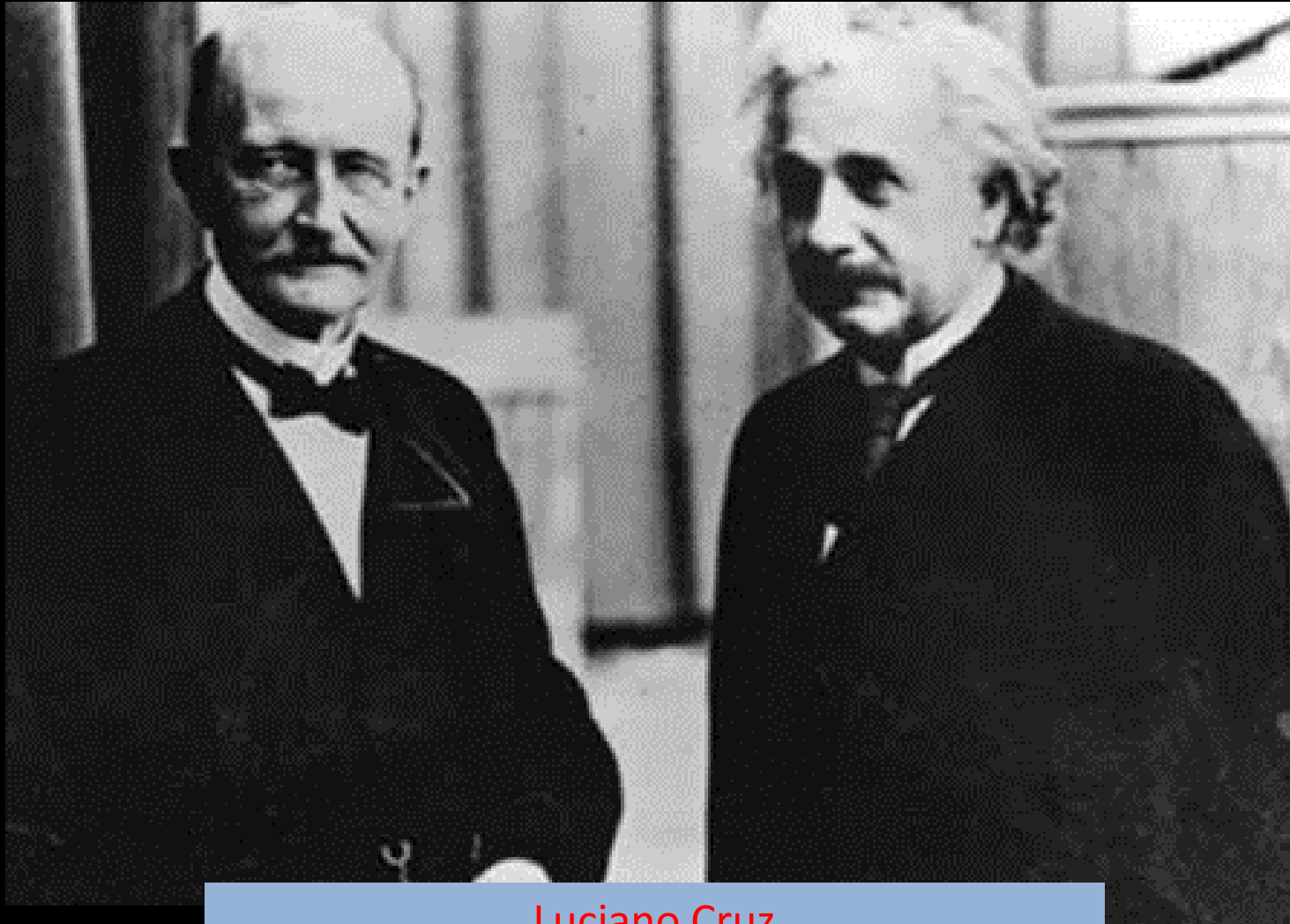


Física Quântica (BCK0103-15)

aula 02 - 2019



Luciano Cruz

Sala 609 – Torre 3 – Bloco A

luciano.cruz@ufabc.edu.br

Na última aula (24/09/19)

- Apresentação da disciplina BKC0103 (Física Quântica);
- Algumas reflexões sobre a física quântica e suas dificuldades;
- Primeiras evidências para uma teoria quântica;
- Evidências experimentais da Física Quântica: a Radiação do Corpo Negro.

Na aula de hoje (01/10/19)

Continuação: Evidências Experimentais da Física Quântica:

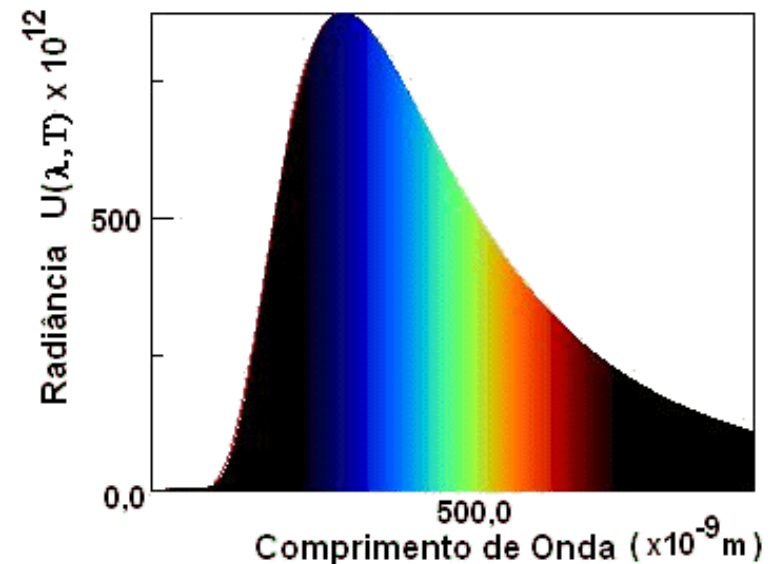
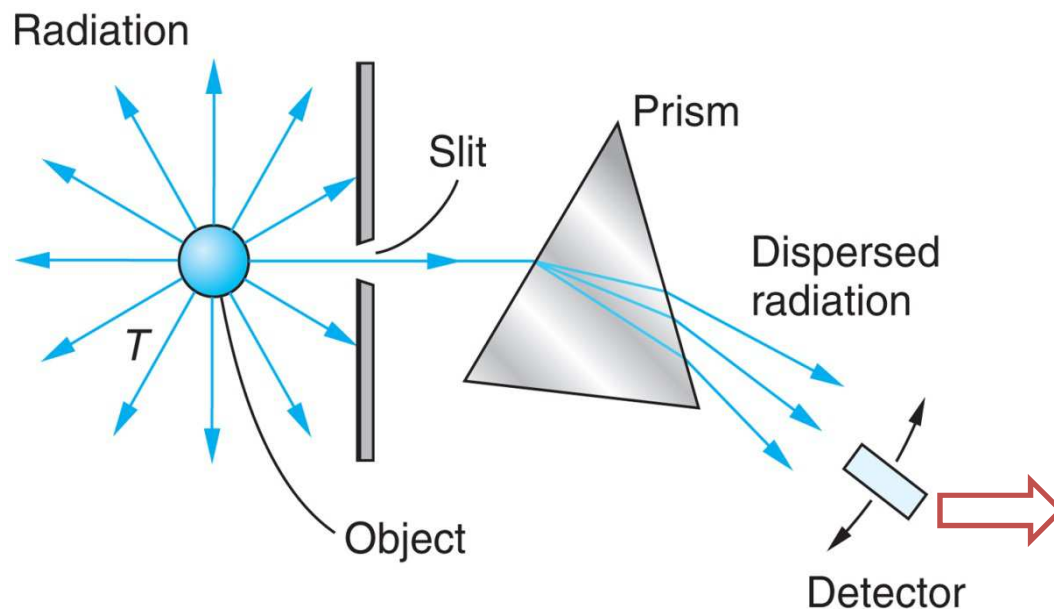
- O efeito fotoelétrico;
- O efeito Compton e os raios X;
- Espectros Atômicos.

Radiação de corpo negro.



O aspecto da radiação emitida por um corpo aquecido varia com a temperatura desse corpo. O espectro da **radiação eletromagnética** emitido por este corpo pode ser medido.

Sabemos por observação que o espectro é contínuo, mas a coloração dominante se desloca para frequências mais elevadas à medida que a temperatura aumenta.



Leis Clássicas sobre a radiação de corpo negro

Lei de deslocamento de Wien

$$\lambda_{max} \propto \frac{1}{T} \iff f_{max} \propto T$$

$$\lambda_{max} \times T = Constante = 2,88 \times 10^6 nm.K$$

Lei de Stefan-Boltzmann

Um corpo que absorve **toda** a radiação é chamado de **corpo negro ideal**.

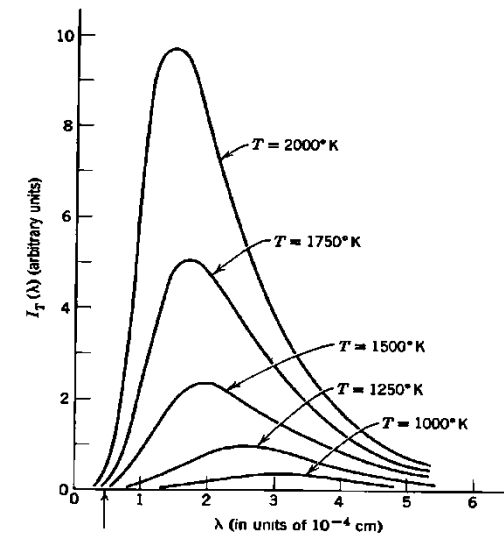
J. Stefan descobriu uma relação empírica entre a potência por unidade de área irradiada por um corpo negro e a sua temperatura:

$$\boxed{R = \sigma T^4} \quad (\text{Lei de Stefan-Boltzmann})$$

R: potência irradiada por unidade de área [W/m²]

T: temperatura do corpo [K]

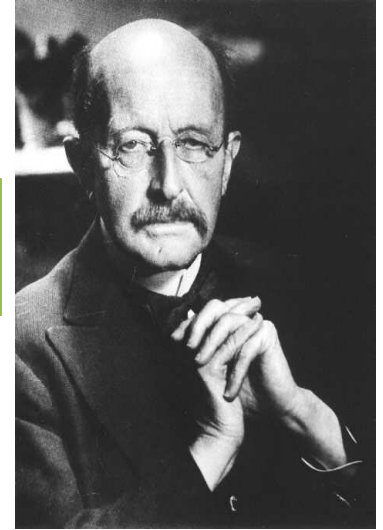
σ : constante de Stefan = $5,6704 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$ (obtido empiricamente)



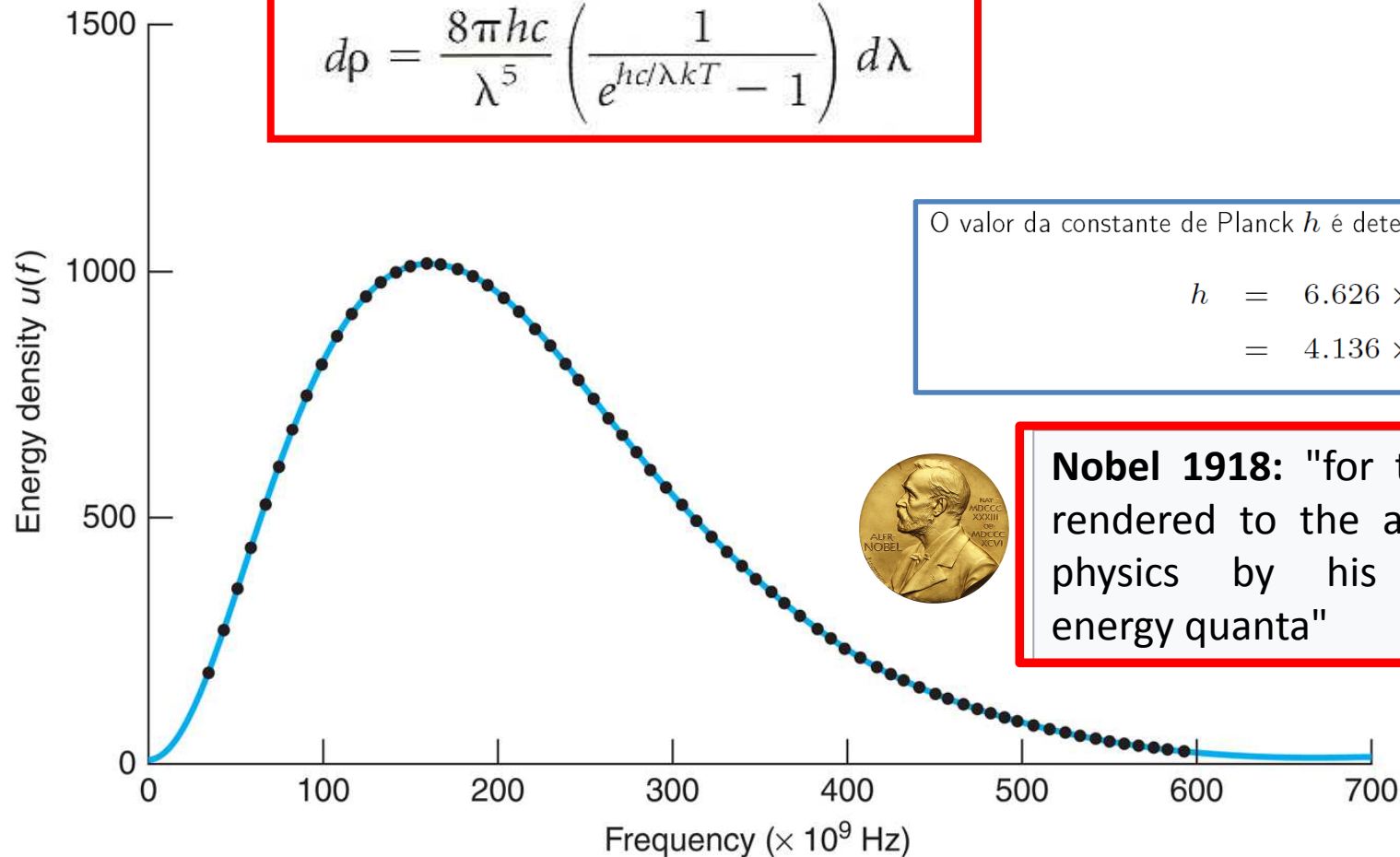
Teoria de Planck para a radiação de corpo negro.

Qualquer ente físico com um grau de liberdade cuja coordenada é uma função senoidal do tempo podem possuir energias totais e dadas por: $E = nhf$

A energia de um sistema não é uma variável contínua. A energia pode assumir somente alguns valores específicos, ou seja, ela é quantizada.



$$d\rho = \frac{8\pi hc}{\lambda^5} \left(\frac{1}{e^{hc/\lambda kT} - 1} \right) d\lambda$$



O valor da constante de Planck h é determinado pela experiencia

$$\begin{aligned} h &= 6.626 \times 10^{-34} J \cdot \text{seg} \\ &= 4.136 \times 10^{-15} eV \cdot \text{seg} \end{aligned}$$



Nobel 1918: "for the services he rendered to the advancement of physics by his discovery of energy quanta"

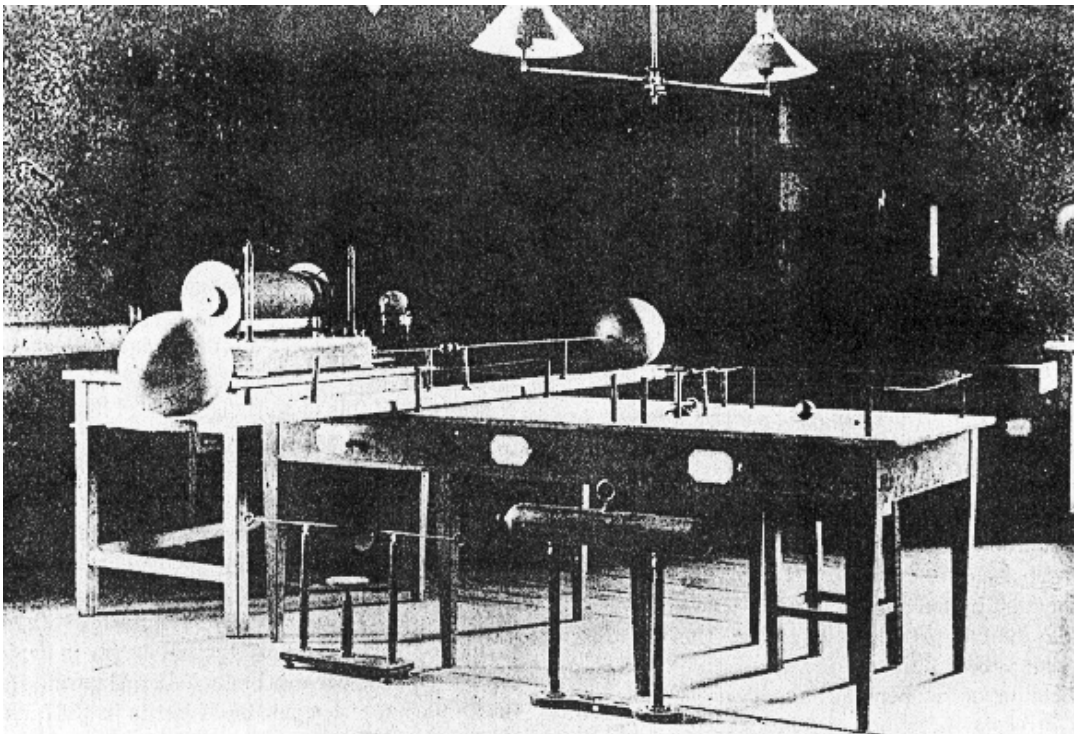
Efeito Fotoelétrico

Em 1887, Hertz realizou um experimento no qual detectou as ondas eletromagnéticas que eram previstas pela teoria de Maxwell. **Confirmando a natureza da Luz como onda eletromagnética.**

Entretanto, ele observou outros efeitos “colaterais”, que levariam a descoberta do efeito fotoelétrico e, conseqüentemente, a proposta de uma teoria corpuscular da Luz por Einstein.



Heinrich Hertz (1857-1894)



“Quando se
caminha no escuro,
por vezes, se
tropeça na luz”

Aparato experimental utilizado
por Hertz.

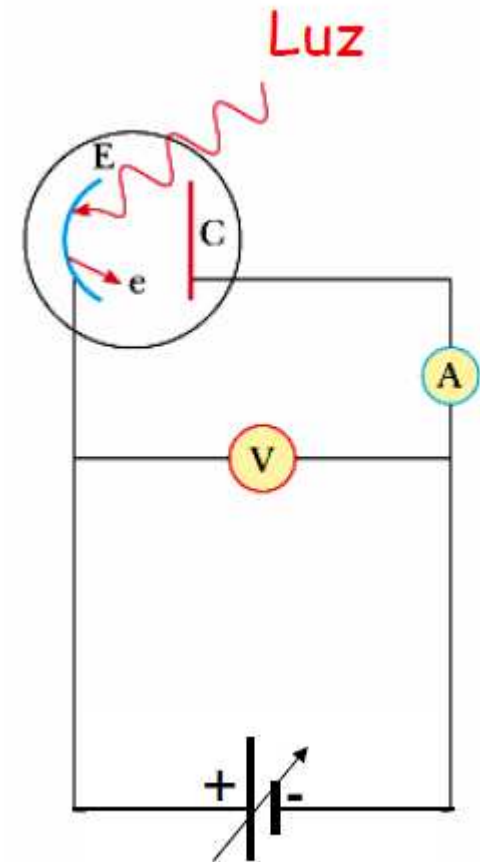
Quando luz incide na superfície de certos metais ocorre a emissão de elétrons.

Quando não incide luz na célula, não há emissão de elétrons em E. O amperímetro indica corrente nula ($A = 0$)

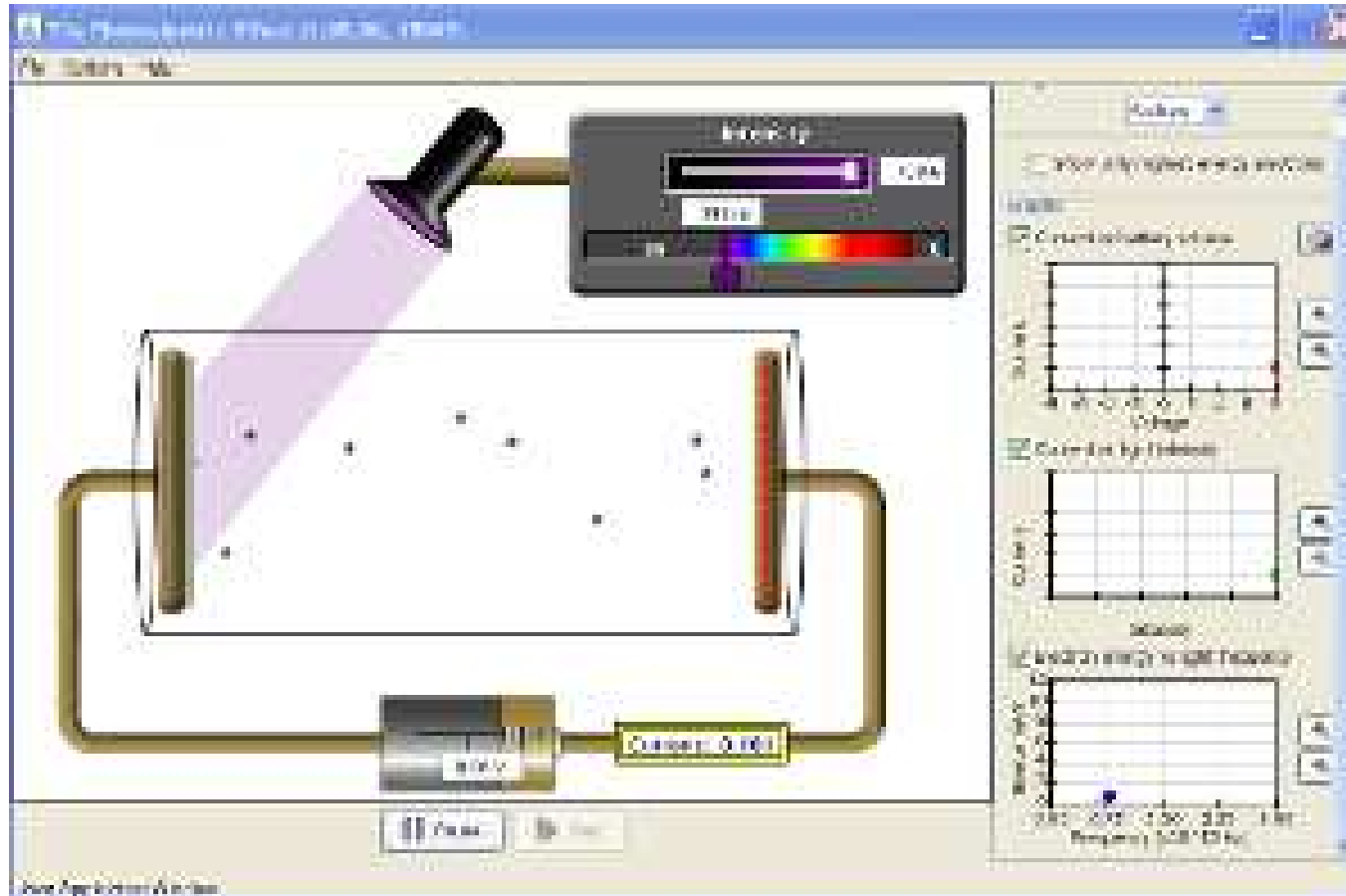
Quando luz monocromática no comprimento de onda adequado incide na placa metálica (E), ocorre emissão de elétrons da placa E que podem ser medidos no coletor (C) e temos uma indicação da corrente medida no amperímetro.

A tensão V aplicada (note que a polarização da fonte é invertida em relação a E e C) permite inferir a energia cinética dos elétrons emitidos. Se $E_{el} = eV_0$ for igual a energia dos elétrons, então a (foto)corrente medida será nula, pois os elétrons não terão energia suficiente para chegar ao coletor, ou seja:

$$\left(\frac{1}{2}mv^2 \right)_{max} = eV_0$$

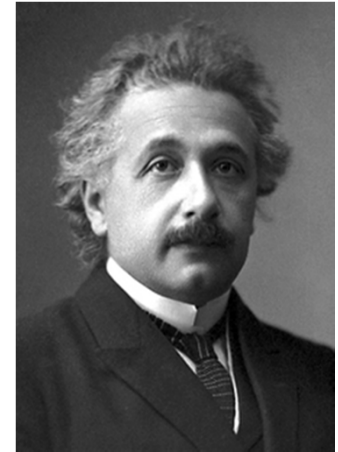


Vamos construir alguma intuição com um experimento virtual?



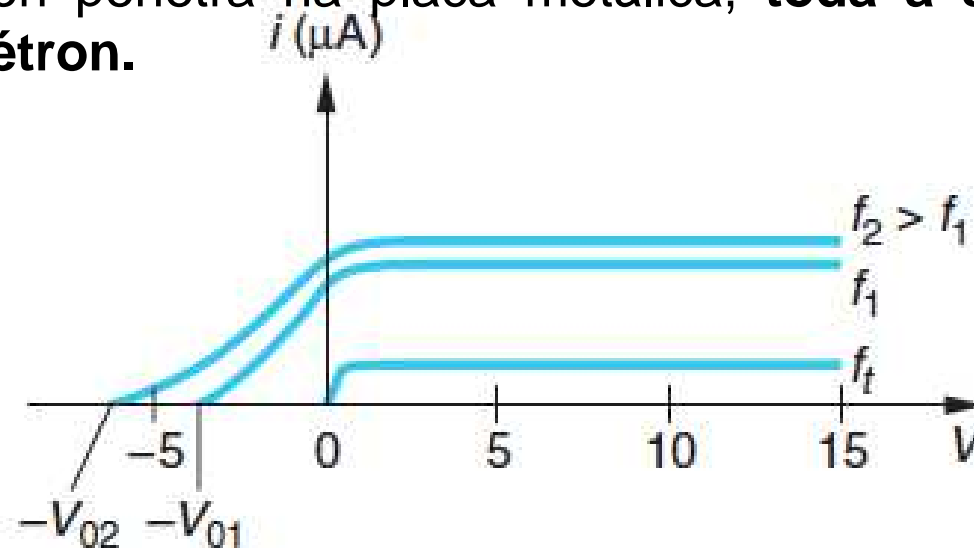
http://phet.colorado.edu/pt_BR/simulation/photoelectric

Efeito Foto-elétrico – Einstein 1905



Albert Einstein
1878 - 1955

- A explicação do efeito fotoelétrico foi o trabalho que agraciou Albert Einstein com o prêmio Nobel de Física em 1921.
- Einstein considerou a quantização da energia para o corpo negro descrita por Planck como uma característica universal da luz.
- Em vez de distribuir-se igualmente no espaço a energia é composta de quanta discretos com energia $E = hf$.
- Quando um fóton penetra na placa metálica, **toda a sua energia é fornecida ao elétron.**



A matemática do efeito fotoelétrico

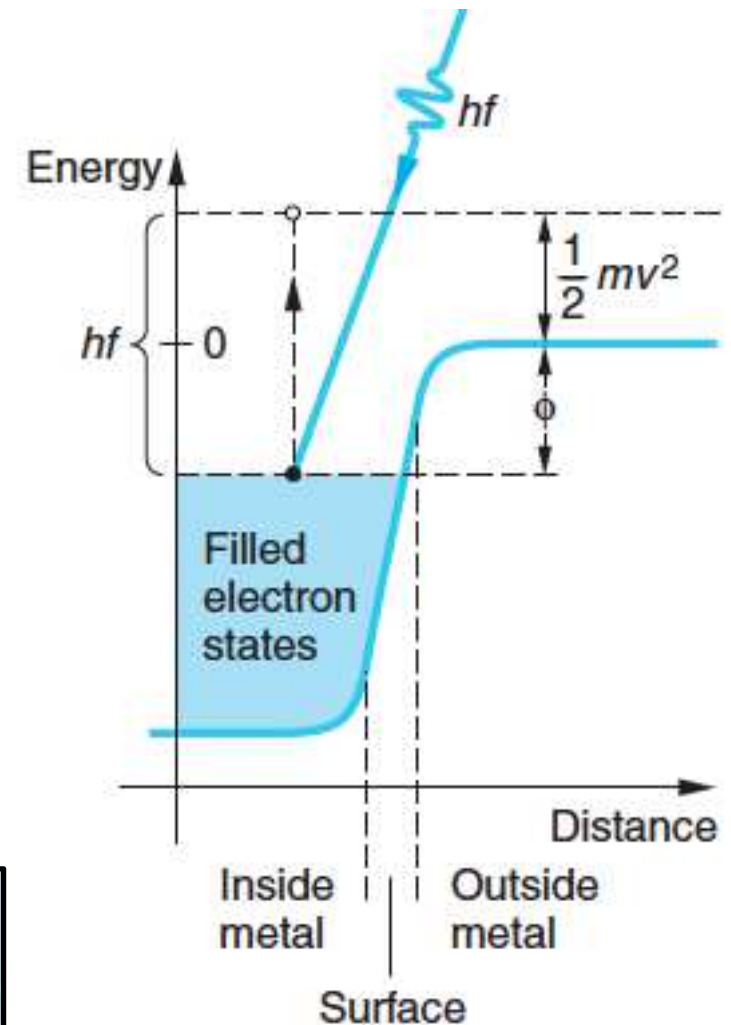
A luz é constituída por fóton de energia hf

A intensidade da luz é proporcional ao número de fótons.

Φ , que é denominada **função trabalho**, representa a energia mínima para se retirar um elétron do metal.

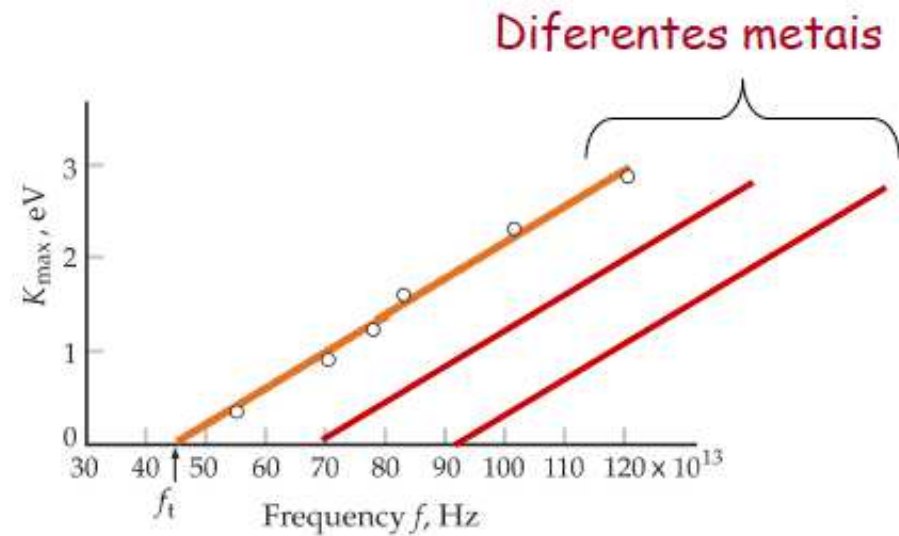
Por conservação de energia, a energia cinética máxima de um elétron que deixa o metal é dada por:

$$eV_0 = \left(\frac{1}{2}mv^2 \right)_{\max} = hf - \Phi$$



Função Trabalho: Informação sobre cada material

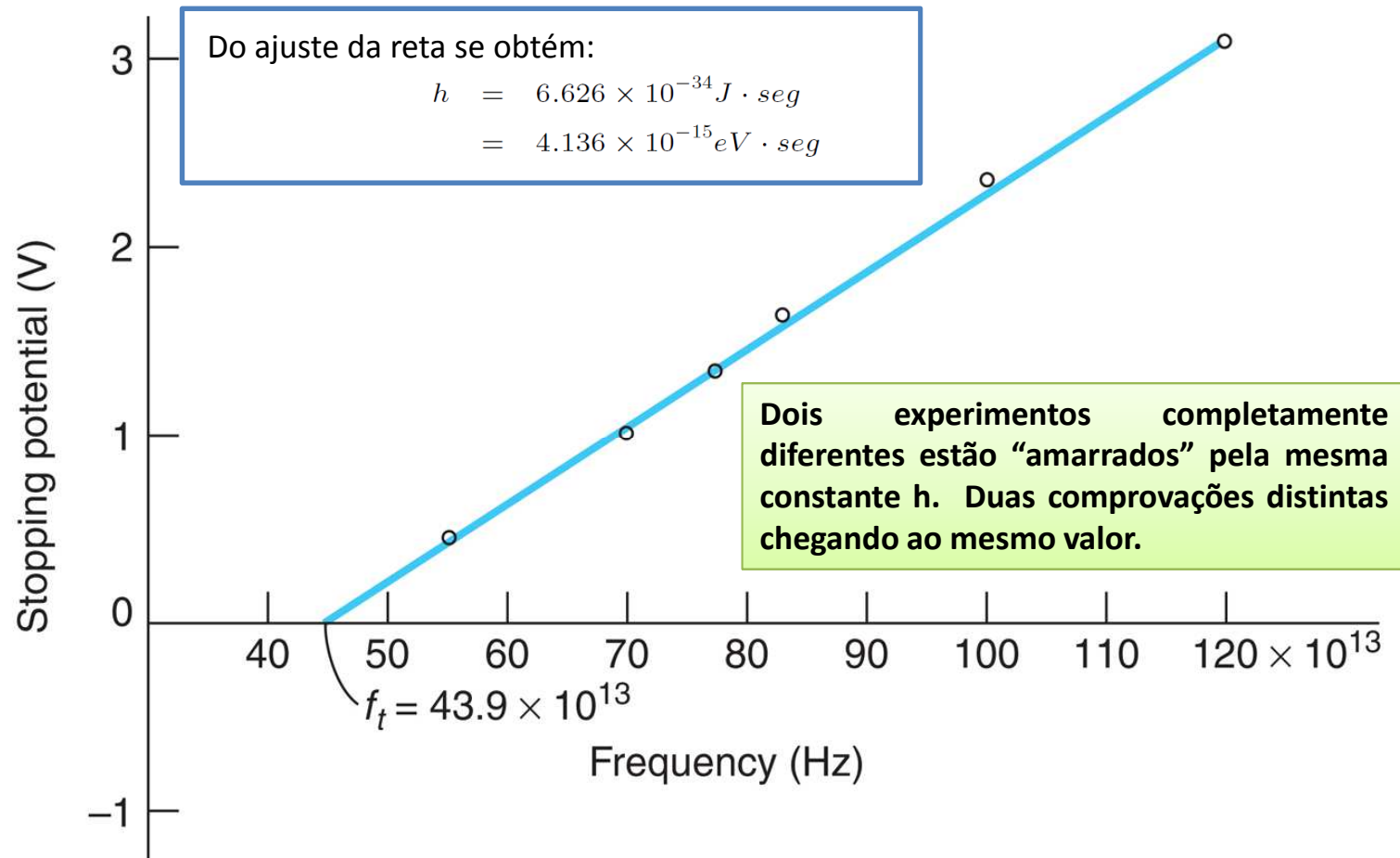
Element	Work function (eV)
Na	2.28
C	4.81
Cd	4.07
Al	4.08
Ag	4.73
Pt	6.35
Mg	3.68
Ni	5.01
Se	5.11
Pb	4.14



Diferentes metais diferentes
limiares (função de trabalho)

**A inclinação da curva é
sempre a mesma. Por quê?**

Comprovação de Millikan do efeito fotoelétrico



Robert A. Millikan
1868 - 1953

Portanto o gráfico de V vs. f deve ser uma reta cuja inclinação é a constante de Planck. Usando este fato e os dados acima Millikan obteve uma medida muito precisa de h (embora na época, 1916, ele não acreditasse em fótons). O trabalho de Millikan foi publicado em *Physical Review* 7, 355 (1916).

A frustração de Millikan

In 1915, Millikan experimentally verified Einstein's all-important photoelectric equation, and made the first direct photoelectric determination of Planck's constant h . Einstein's 1905 paper proposed the simple description of "light quanta," or photons, and showed how they explained the photoelectric effect. By assuming that light actually consisted of discrete energy packets, Einstein proposed a linear relationship between the maximum energy of electrons ejected from a surface, and the frequency of the incident light. The slope of the line was Planck's constant, introduced 5 years earlier by Planck. Millikan was convinced that the equation had to be wrong, because of the vast body of evidence that had already shown that light was a wave. If Einstein was correct, his equation for the photoelectric effect suggested a completely different way to measure Planck's constant.

Millikan undertook a decade-long experimental program to test Einstein's theory by careful measurement of the photoelectric effect, and even devised techniques for scraping clean the metal surfaces inside the vacuum tube needed for an uncontaminated experiment.

For all his efforts Millikan found what to him were disappointing results: he confirmed Einstein's predictions in every detail, measuring Planck's constant to within 0.5% by his method. But Millikan was not convinced of Einstein's radical interpretation, and as late as 1916 he wrote, **"Einstein's photoelectric equation... cannot in my judgment be looked upon at present as resting upon any sort of a satisfactory theoretical foundation,"** even though **"it actually represents very accurately the behavior"** of the photoelectric effect.

<https://www-aps.ez42.periodicos.capes.gov.br/programs/outreach/history/historicsites/millikan.cfm>

O comprimento de onda de corte do potássio é 558 nm. Qual a função trabalho do potássio? Qual é o potencial (tensão) de corte para uma luz incidente de 400 nm?

Podemos resolver esta questão com a expressão:

$$eV_0 = \left(\frac{1}{2}mv^2 \right)_{\max} = hf - \phi$$

$$V_0 = \frac{hf}{e} - \frac{\phi}{e}$$

O comprimento de onda de corte é obtido quando $V_0 = 0$. Portanto:

$$\begin{aligned} \frac{\phi}{e} &= \frac{hf_{te}}{e} = \frac{hc}{e\lambda_t} \\ &= \frac{1240 \text{ eV} \cdot \text{nm}}{558 \text{ nm}} = 2.22 \text{ eV} \end{aligned}$$

Para um comprimento de onda de 400 nm, obtemos como V_0 :

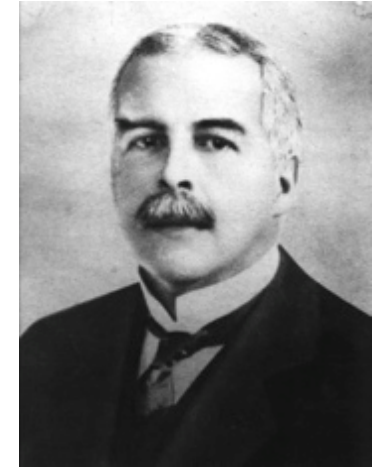
$$\begin{aligned} V_0 &= \frac{hf}{e} - \frac{\phi}{e} = \frac{hc}{e\lambda} - \frac{\phi}{e} \\ &= \frac{1240 \text{ V} \cdot \text{nm}}{400 \text{ nm}} - 2.22 \text{ eV} \\ &= 3.10 \text{ V} - 2.22 \text{ V} = 0.88 \text{ V} \end{aligned}$$

Você já pode fazer os exercícios de 7 a 11 e 15 da lista 1.

Uma curiosidade: O nome do Fóton

"Por isso, tomo a liberdade de propor para este novo átomo hipotético, que não é leve, mas desempenha um papel essencial em todo processo de radiação, o nome fóton."

Gilbert N. Lewis, 1926

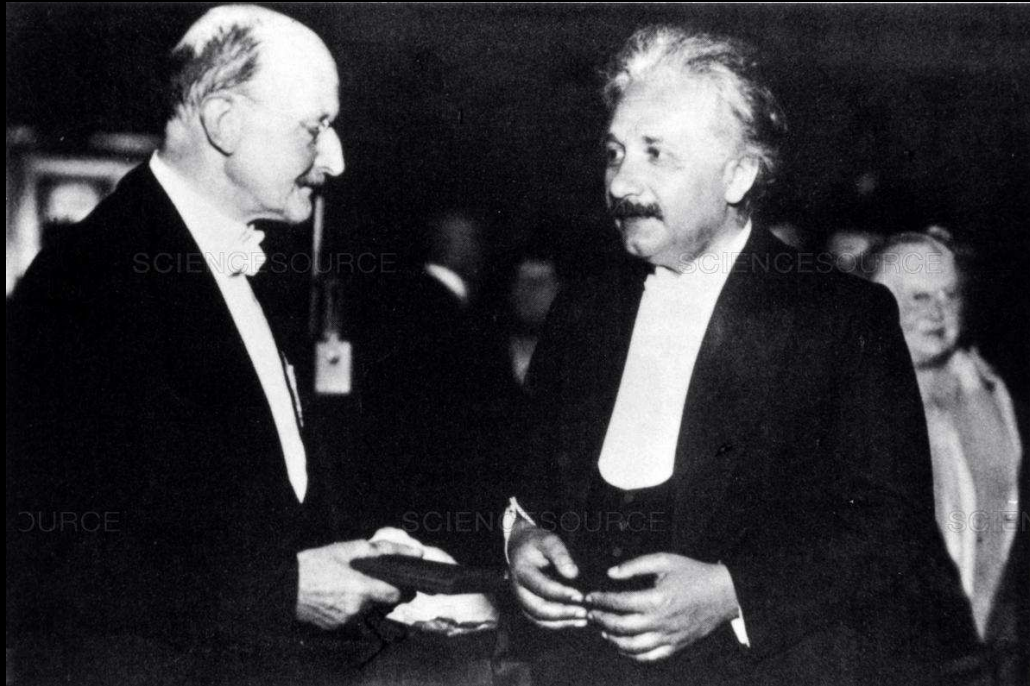


Gilbert Lewis
1875 - 1946

Fóton é o quantum de energia eletromagnética, geralmente considerado como uma partícula discreta, com massa zero, sem carga elétrica, e uma vida indefinidamente longa.

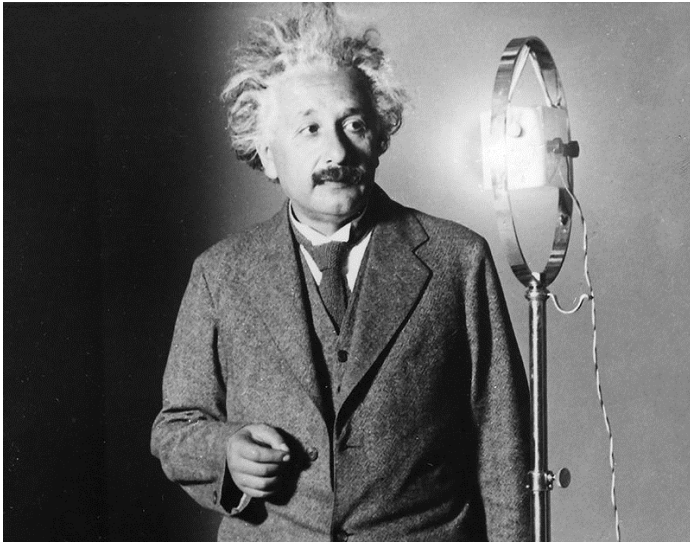
Apesar de Planck e Einstein terem criado o conceito de quanta, Einstein não usou a palavra fóton em seus primeiros escritos. A palavra "fóton" se originou a partir de Gilbert N. Lewis, sobre o papel do efeito fotoelétrico de Einstein e apareceu em uma carta ao editor da revista Nature (Vol. 118, Part 2, 18 de dezembro de 1926, página 874-875).

Fofoca científica: Lewis foi nomeado ao Nobel 35 vezes, mas nunca ganhou devido a 'desafetos' com alguns membros do comite de química do prêmio Nobel.



Trecho (final) da carta de recomendação de Planck sobre Einstein à Academia Prussiana de Ciência em 1913:

“Que ele [Einstein] possa por vezes ter errado o alvo em suas especulações, como, por exemplo, em sua hipótese dos quanta de luz, é algo pelo qual não se pode censurá-lo com muita energia, pois não é possível introduzir realmente novas ideias mesmo nas ciências mais exatas sem por vezes correr riscos.”



Premio Nobel de 1921



The Nobel Prize in Physics 1921 was awarded to Albert Einstein "for his services to Theoretical Physics, and especially for his discovery of the law of the photoelectric effect".

Einstein tem contribuições importantes em quase todas as áreas da física, mas, sem qualquer dúvida, suas contribuições mais impactantes foram aquelas relacionadas com a teoria da relatividade restrita e com a teoria da relatividade geral. No entanto, ao escolher o Prêmio Nobel de 1921, o Comitê Nobel para Física da Academia Real de Ciências da Suécia deu mais importância ao trabalho sobre o **efeito fotoelétrico**.

"To raise new questions, new possibilities, to regard old problems from a new angle, requires creative imagination and marks real advance in science. "

Albert Einstein



Premio Nobel de 1923



The Nobel Prize in Physics 1923 was awarded to Robert Andrews Millikan "for his work on the elementary charge of electricity and on the photoelectric effect."

"The fact that Science walks forward on two feet, namely theory and experiment, is nowhere better illustrated than in the two fields for slight contributions to which you have done me the great honour of awarding the the Nobel Prize in Physics for the year 1923. Sometimes it is one foot that is put forward first, sometimes the other, but continuous progress is only made by the use of both-by theorizing and then testing, or by finding new relations in the process of experimenting and then bringing the theoretical foot up and pushing it on beyond, and so on in unending alterations."

Robert Millikan

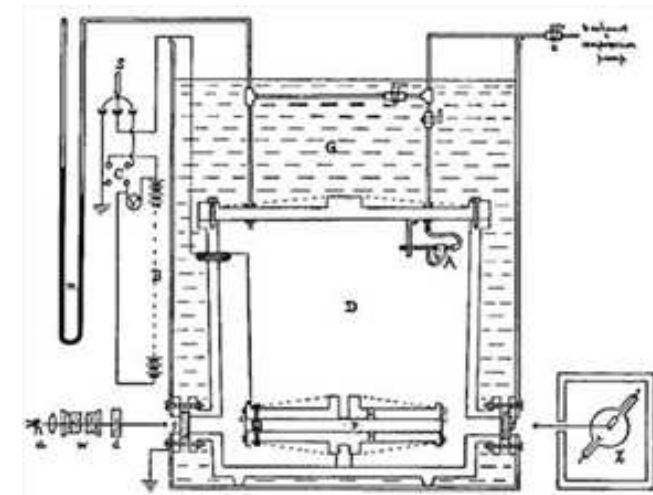


Diagrama do aparato de efeito
foto-eletrico de Millikan

Algumas aplicações atuais do Efeito Fotoelétrico



O que vem a ser **célula fotoelétrica**? São dispositivos que têm a capacidade de **transformar energia luminosa**, seja ela proveniente do Sol ou de qualquer outra fonte, **em energia elétrica**. Essa célula pode funcionar como geradora de energia elétrica ou mesmo como sensor capaz de medir a intensidade luminosa, como nos casos das portas de shoppings. O funcionamento de uma **célula fotoelétrica** está associado ao efeito fotoelétrico: elétrons arrancados do material pela luz geram uma corrente que serve para alguma coisa!

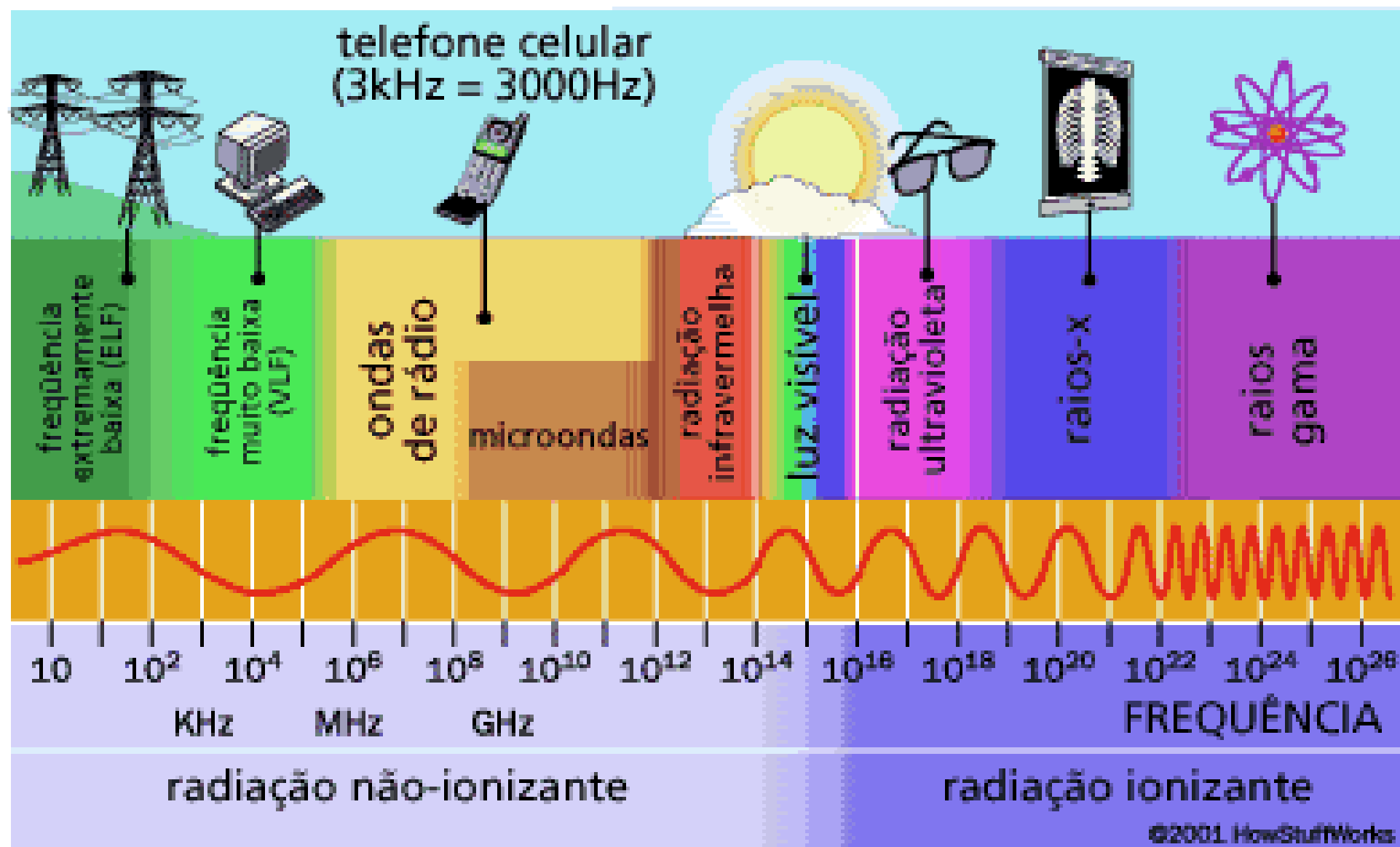


“O efeito foto-elétrico, em muitos sentidos, mudou a forma como vemos, lembramos e nos comportamos no mundo a nossa volta”

Antes de falar sobre o efeito Compton, vamos apresentar algumas informações sobre os Raios X...



Novamente o espectro eletromagnético...



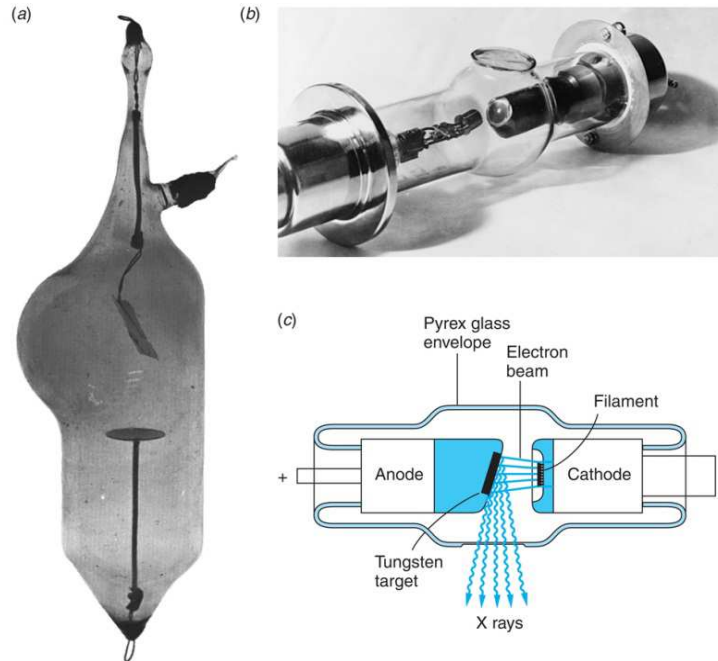
A descoberta dos raios X

- Descoberto por W. K. Roentgen em 1895
- Não eram afetados por campos magnéticos
- Demonstravam ter grande penetrabilidade.
- Foram descobertos usos para esta forma de radiação, quase que imediatamente, em medicina e outras áreas.



Wilhelm C. Roentgen
1845 - 1923

$\lambda \sim 1 \text{ nm a } 10 \text{ nm}$



A famosa radiografia da mão da mulher do Roentgen



Anna Bertha Ludwing
(a dona da famosa mão)

Comprovação de que Raios X eram ondas eletromagnéticas

- Em 1912, Max von Laue sugeriu que comprimento de onda de Raios X eram da ordem de espaçamento entre os átomos em cristais
- Os experimentos confirmaram que Raios X eram uma forma de radiação eletromagnética (veremos mais sobre interferência de ondas nas próximas aulas).



Max von Laue
1879 - 1960

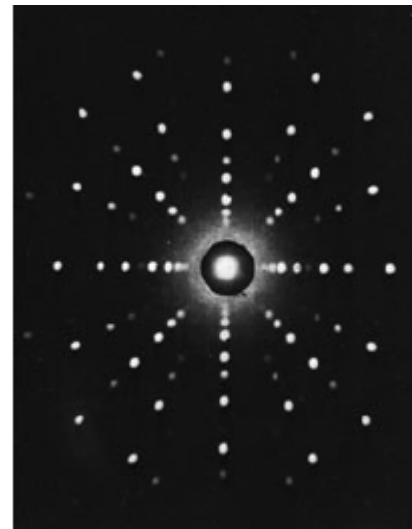
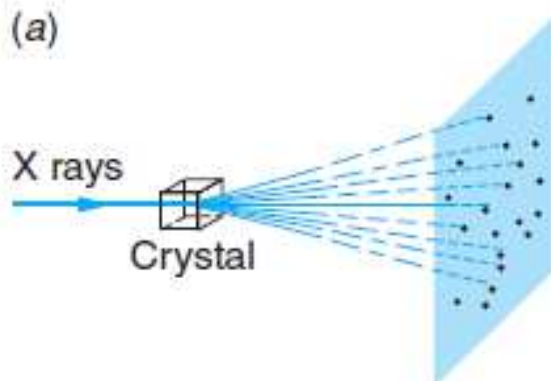
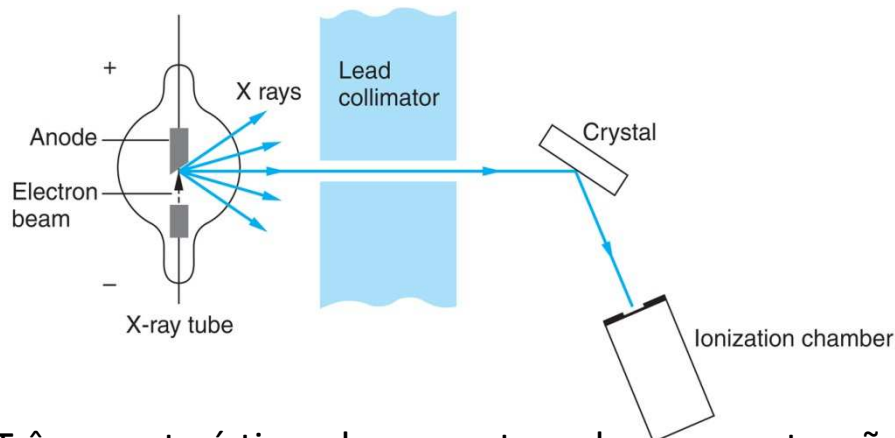


Figura de interferência é uma **assinatura** de efeito ondulatório.

Surgimento de uma nova área de pesquisa da física: **Cristalografia**.

Espalhamento de Raios X

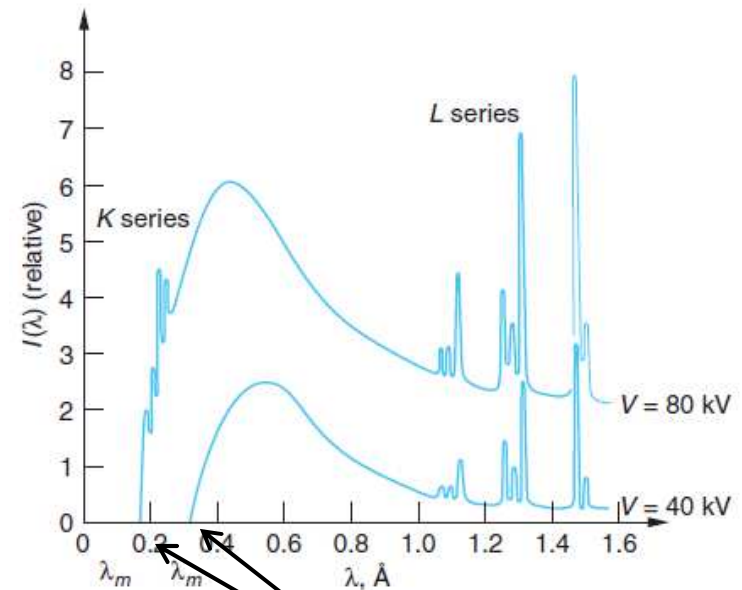
O aparato produz um feixe colimado de raios X que bombardeia um cristal a um certo ângulo. Um detector pode girar e medir os raios X espalhados em função do ângulo de espalhamento.



Três características dos espectros chamam a atenção:

- 1 – O espectro é constituído por uma série de linhas estreitas, conhecida como espectro característico, que depende da substância usada como alvo.
- 2 – Também há um espectro contínuo (bremsstrahlung: radiação produzida ao se acelerar ou frear partículas carregadas)
- 3 – O espectro contínuo apresenta um comprimento de onda de corte que não depende da substância usada no alvo, mas é função da energia dos elétrons.

A figura mostra o espectro do espalhamento em um alvo de molibdênio para duas tensões distintas.



$$\lambda_{corte} = \frac{1,24 \cdot 10^3}{V} \text{ nm}$$

[Regra de Duane-Hunt]

Einstein percebeu que a produção de Raios X por bombardeio de elétrons era o **inverso** do efeito fotoelétrico. Portanto, a equação do efeito fotoelétrico pode ser aplicada a regra de Duane-Hunt. O comprimento de onda de corte corresponde a um fóton com a energia máxima dos elétrons, ou seja, um fóton que é produzido quando o elétron perde toda a sua energia cinética em uma única colisão.

$$\lambda_{\text{corte}} = \frac{1,24 \cdot 10^3}{V} \text{ nm}$$



$$eV_0 = \left(\frac{1}{2}mv^2 \right)_{\text{max}} = hf - \phi$$

Produção de Raios X é o Inverso do efeito Fotoelétrico.

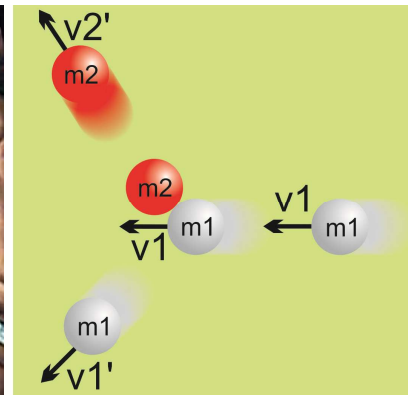
Efeito Compton

Compton observou que se o processo de espalhamento fosse considerado uma “colisão” entre a luz incidente (como uma partícula) e o elétron, que absorveria parte da energia inicial do fóton, isto geraria um novo fóton de menor energia e, portanto, menor frequência.

Compton aplicou a conservação de momento e energia em sua forma relativística para o caso da colisão fóton-elétron.



Arthur H. Compton
(1892- 1962)



Problema de colisão, similar aos vistos em Fenômenos Mecânicos ...

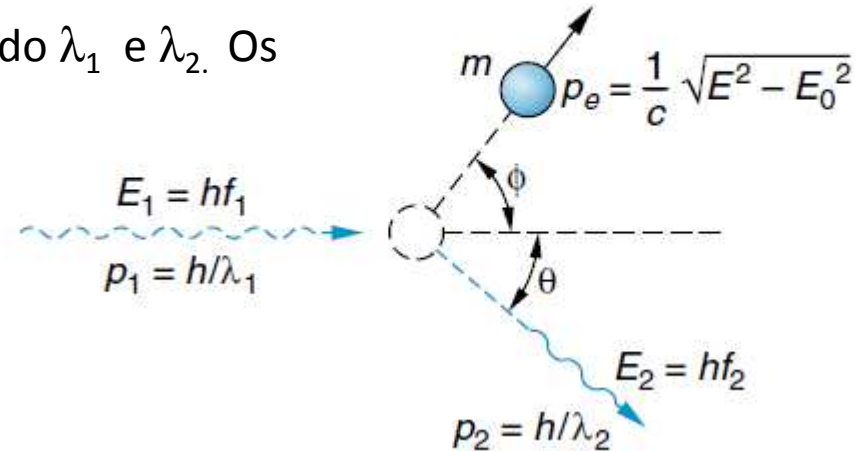
Porém, fótons se propagam a velocidade da luz. Portanto, é um problema de **colisão relativística**.

Descrição matemática do efeito Compton

Considere os comprimentos de onda espalhado λ_1 e λ_2 . Os momentos correspondentes são:

$$p_1 = \frac{E_1}{c} = \frac{hf_1}{c} = \frac{h}{\lambda_1}$$

$$p_2 = \frac{E_2}{c} = \frac{h}{\lambda_2}$$



A **conservação do momento** nos dá:

$$\mathbf{p}_1 = \mathbf{p}_2 + \mathbf{p}_e$$

$$p_e^2 = p_1^2 + p_2^2 - 2\mathbf{p}_1 \cdot \mathbf{p}_2$$

$$= p_1^2 + p_2^2 - 2p_1p_2 \cos \theta$$

Antes da colisão o elétron possuía apenas a energia de repouso $E_0 = mc^2$

Após a colisão, a energia do elétron é dada por: $(E_0^2 + p_e^2 c^2)^{1/2}$

A **conservação de energia** nos dá:

$$p_1 c + E_0 = p_2 c + (E_0^2 + p_e^2 c^2)^{1/2}$$

Da expressão anterior, passando $p_2 c$ para direita e elevando ao quadrado:

$$E_0^2 + c^2(p_1 - p_2)^2 + 2cE_0(p_1 - p_2) = E_0^2 + p_e^2 c^2$$

$$p_e^2 = p_1^2 + p_2^2 - 2p_1 p_2 + \frac{2E_0(p_1 - p_2)}{c}$$

Podemos eliminar o termo p_e^2 e obter a equação:

$$\frac{E_0(p_1 - p_2)}{c} = p_1 p_2 (1 - \cos \theta)$$

Finalmente, multiplicando cada um dos termos por $hc/p_1 p_2 E_0$ e usando que $\lambda = h/p$, temos:

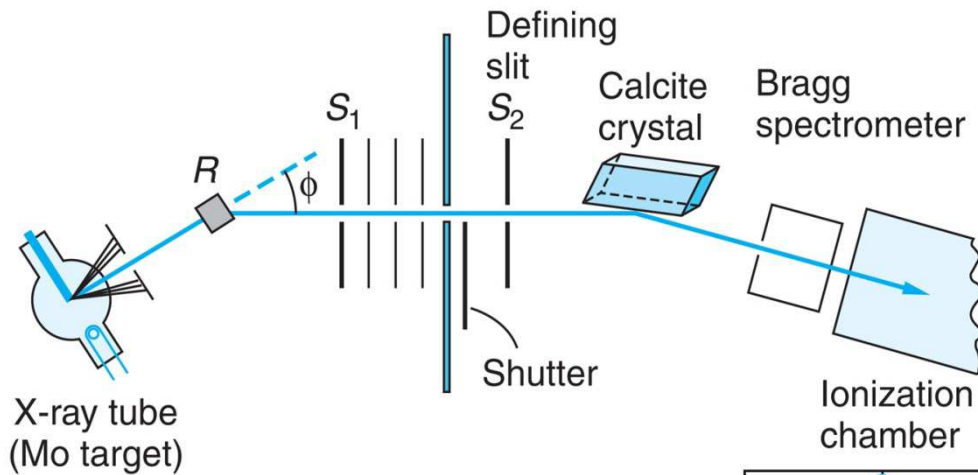
$$\lambda_2 - \lambda_1 = \frac{hc}{E_0} (1 - \cos \theta) = \frac{hc}{mc^2} (1 - \cos \theta)$$

$$\lambda_2 - \lambda_1 = \frac{h}{mc} (1 - \cos \theta)$$

Equação de Compton

$$\lambda_C = \frac{h}{mc} = \frac{hc}{mc^2} = \frac{1.24 \times 10^4 \text{ eV} \cdot \text{\AA}}{5.11 \times 10^5 \text{ eV}} \simeq 0.024 \text{\AA}$$

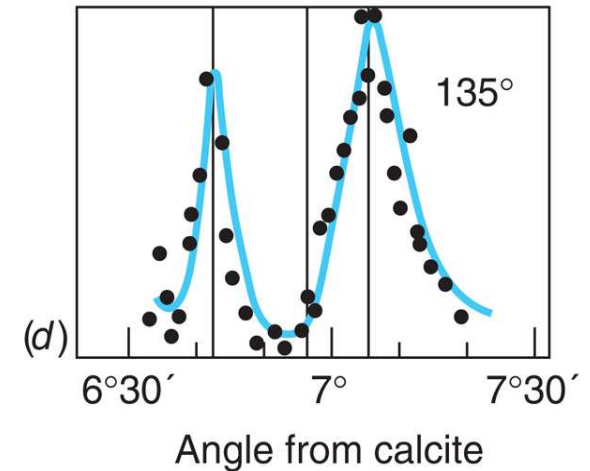
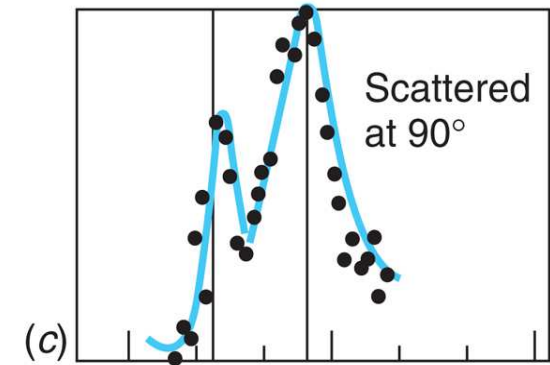
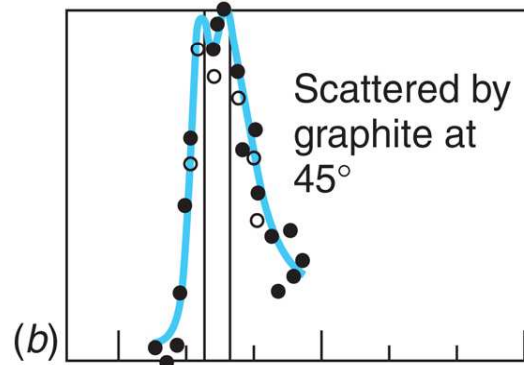
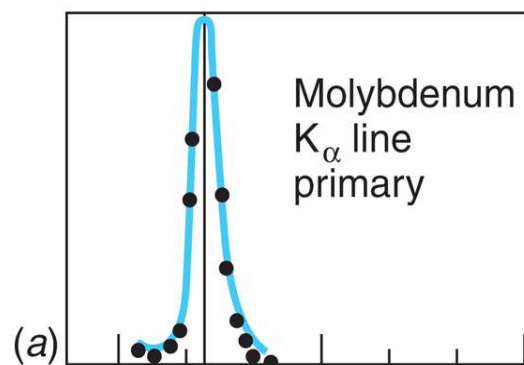
Comprimento de onda de Compton de um elétron



A equação de Compton foi satisfatoriamente confirmada por dados experimentais.

Classicamente, não é possível explicar o porquê de Raios X se comportarem como partículas no espalhamento Compton.

Mais um forte indício da necessidade de uma **teoria quântica para a luz**.





Arthur Holly Compton



Charles Thomson Rees Wilson

Premio Nobel de 1927

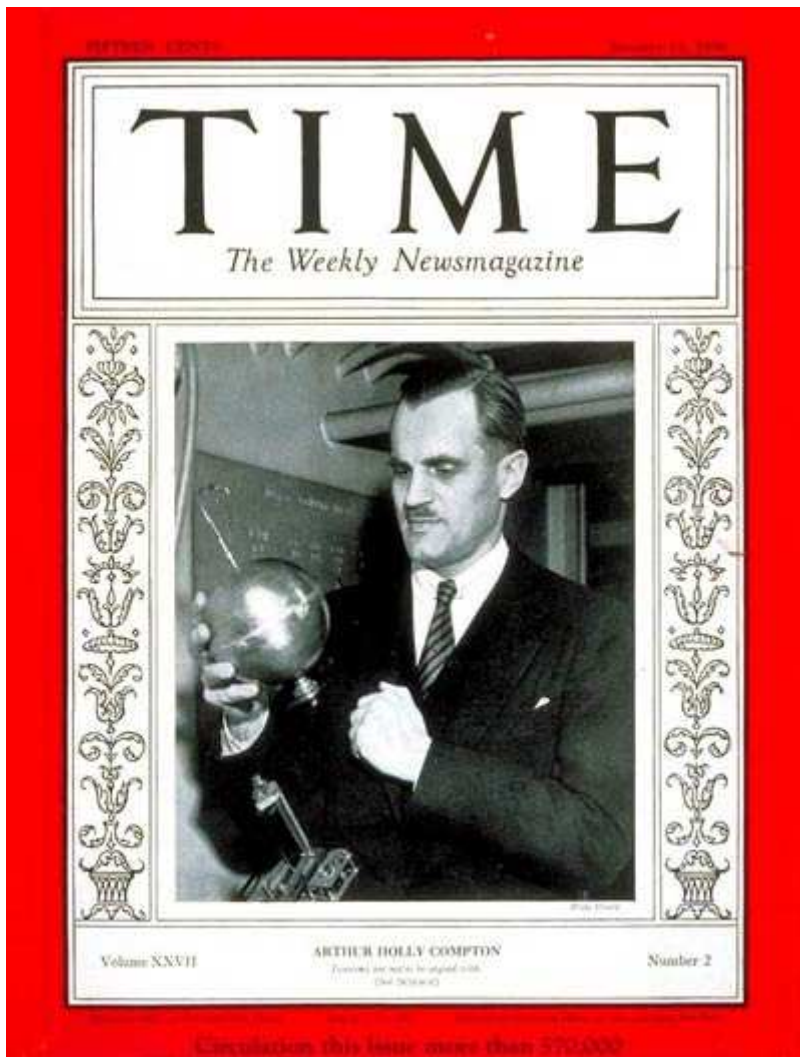


The Nobel Prize in Physics 1927 was divided equally between Arthur Holly Compton *"for his discovery of the effect named after him"* and Charles Thomson Rees Wilson *"for his method of making the paths of electrically charged particles visible by condensation of vapour"*.

O prêmio não foi para a descoberta do efeito Compton, mas pelos resultados para
"visualizar" o caminho das partículas eletricamente carregadas!

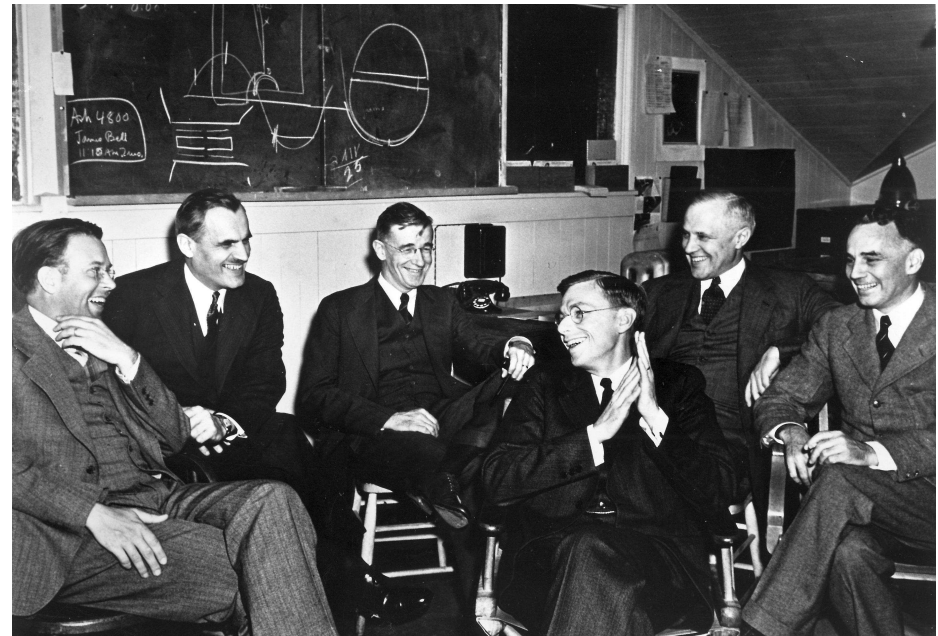
"Every great discovery I ever made, I gambled that the truth was there, and then I acted in faith until I could prove its existence."

Arthur H. Compton



Arthur Compton alcançou grande popularidade (para um físico) em seu tempo.

Arthur Compton também teve um papel fundamental no projeto Manhattan, coordenando o “Laboratório Metalúrgico”, e desenvolvendo com sucesso reatores nucleares e enriquecimento de urânio e plutônio.



Em um estudo experimental do efeito Compton, observa-se que o comprimento de onda da radiação incidente, λ_1 , sofre um aumento de 1,5% quando o ângulo de espalhamento é igual a 120° . (a) Qual o valor de λ_1 ? (b) Qual será o comprimento de onda λ_2 dos fótons difratados quando o ângulo de espalhamento for 75° ?

(a) Lembrando a equação de Compton, podemos escrever:

$$\begin{aligned}\lambda_2 - \lambda_1 &= \Delta\lambda = \frac{h}{mc}(1 - \cos\theta) \\ &= 0.00243(1 - \cos 120^\circ)\end{aligned}$$

Para um aumento de 1,5%, temos que $\frac{\Delta\lambda}{\lambda_1} = 0.015$ Portanto, temos para λ_1

$$\begin{aligned}\lambda_1 &= \frac{\Delta\lambda}{0.015} = \frac{0.00243(1 - \cos 120)}{0.015} \\ &= 0.243 \text{ nm}\end{aligned}$$

(b) Sabendo λ_1 , podemos escrever a equação de Compton como: Lembrando a equação de Compton, podemos escrever:

$$\lambda_2 = \lambda_1 + 0.00243(1 - \cos\theta)$$

Portanto, para um ângulo de 75° :

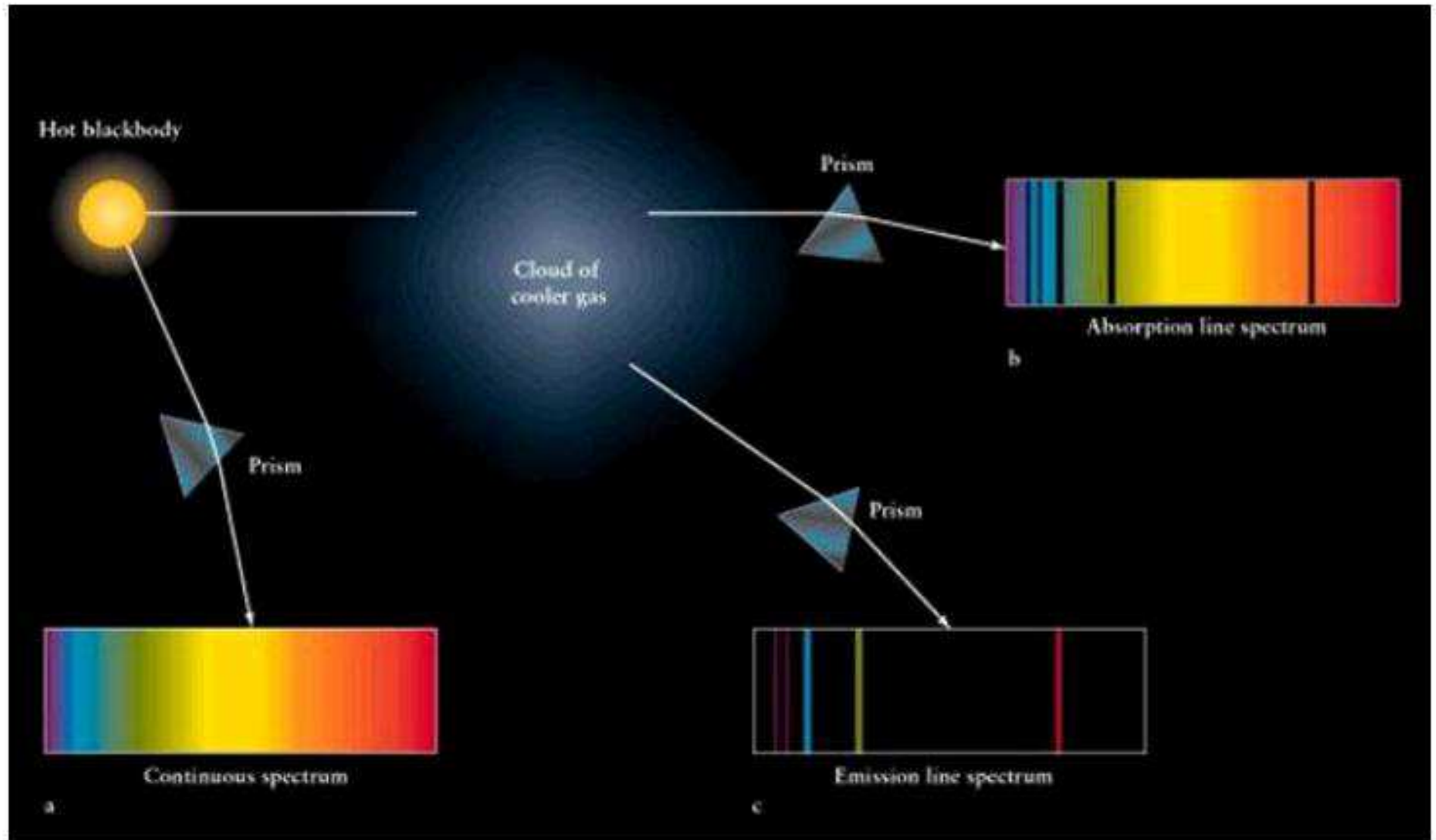
$$\begin{aligned}\lambda_2 &= 0.243 + 0.00243(1 - \cos 75) \\ &= 0.243 + 0.002 \\ &= 0.245 \text{ nm}\end{aligned}$$

Faça os exercícios 12 e 14 da lista de exercícios 1.

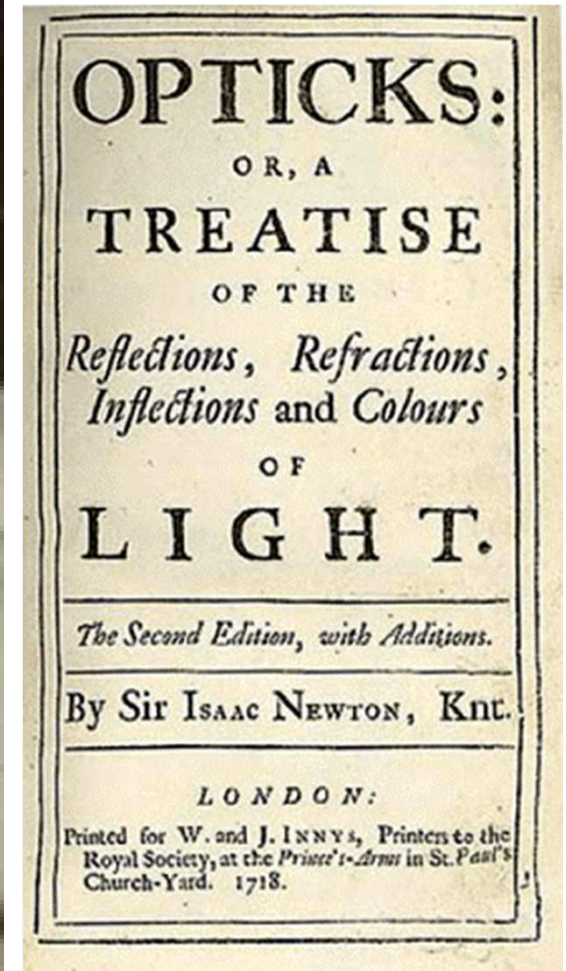
Efeito Fotoelétrico X Efeito Compton

Característica	Efeito Fotoelétrico	Efeito Compton
Região espectral do Fóton	Visível e UV	Raio X
Energia do fóton	Poucos eVs	keVs até MeVs
Antes da efeito	Um fóton e um elétron	Um fóton e um elétron
Após o efeito	Um elétron	Um elétron e um fóton (com energia inferior à do fóton inicial)
Transferência de Energia	A energia do fóton é totalmente absorvida	Apenas parte da energia do fóton é absorvida
Modelo da luz para explicar o fenômeno	Corpuscular	Corpuscular

Emissão de luz pela matéria

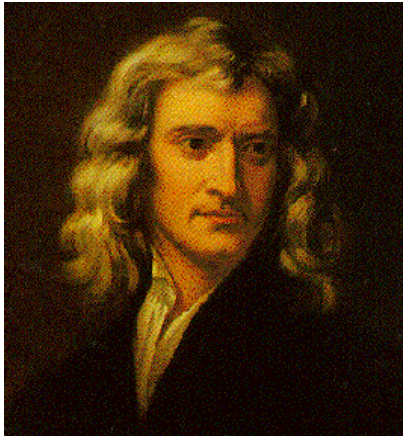


As primeiras medidas do espectro solar



Newton e seu famoso livro sobre óptica

Breve histórico dos espectros atômicos



Isaac Newton
1643 – 1727

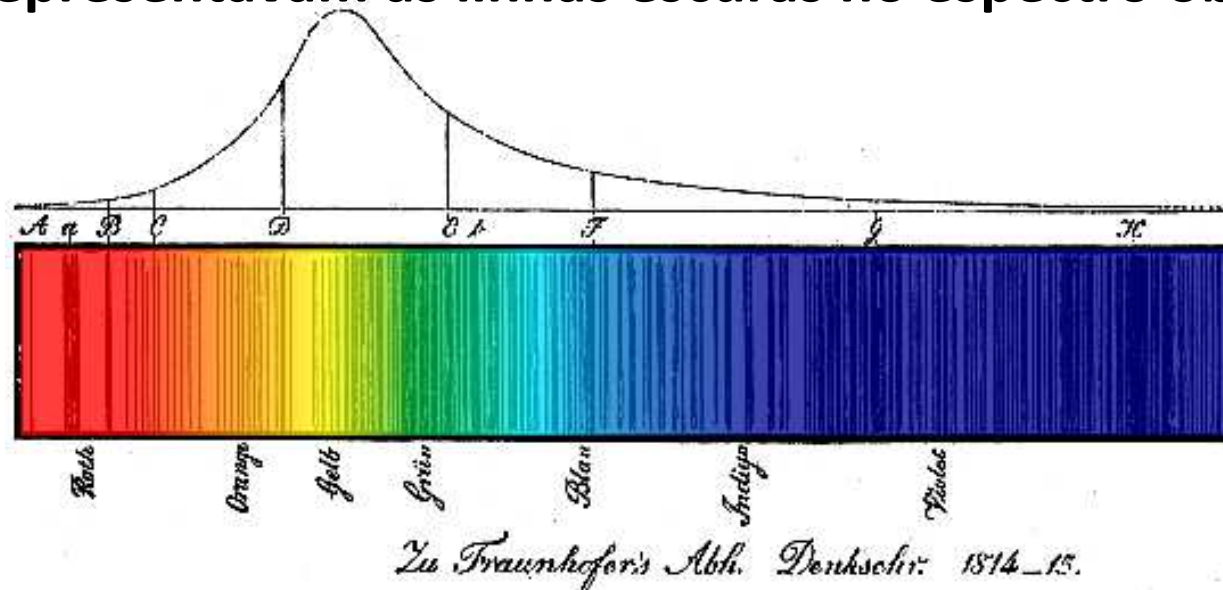
Newton observou o espectro solar usando prismas (precursor do espectrômetro).

Fraunhofer usou um sistema similar (ao de Newton) e observou também que havia mais de 600 linhas escuras no espectro do sol.

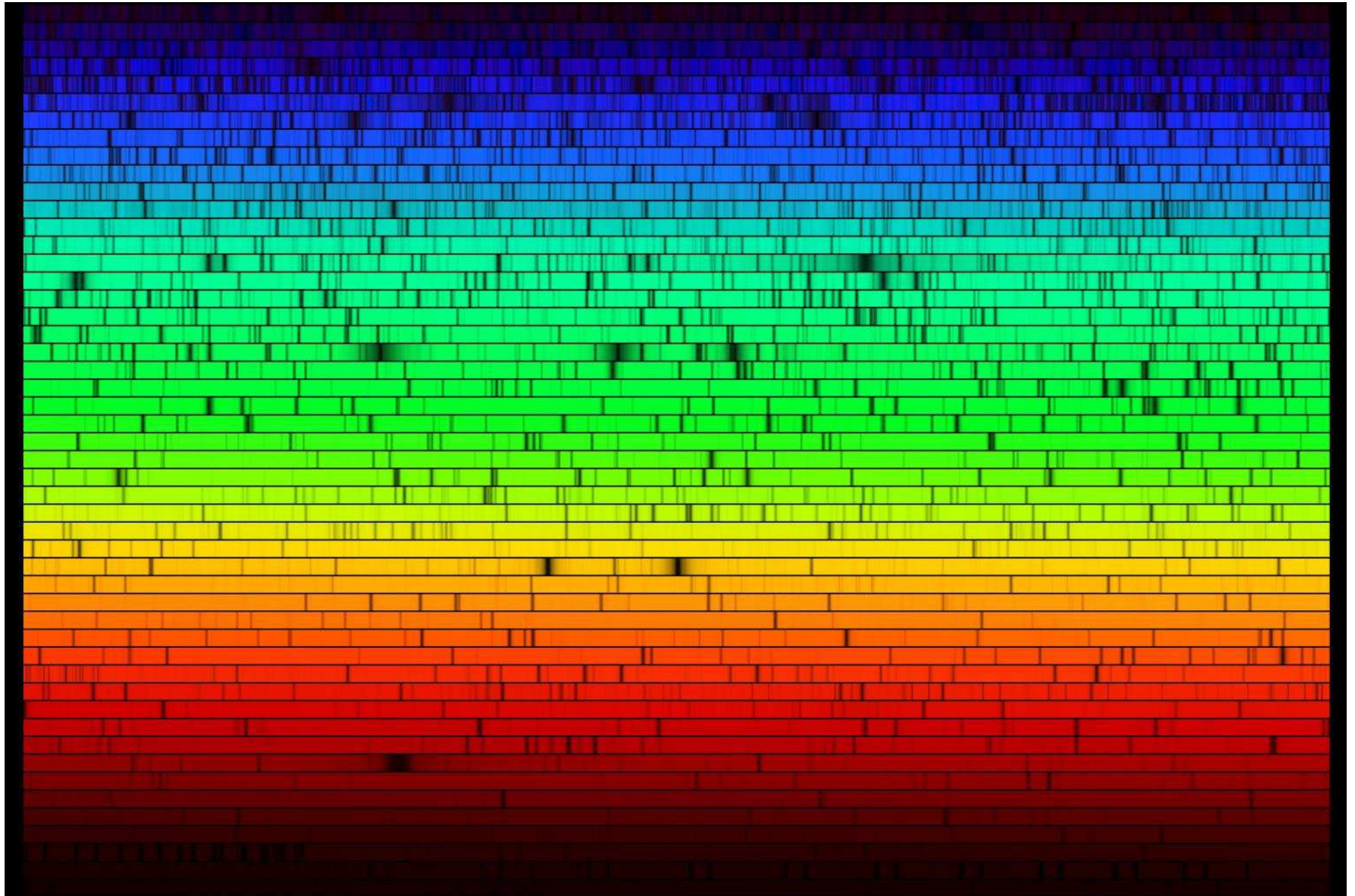


Joseph R. von Fraunhofer
1787 – 1826

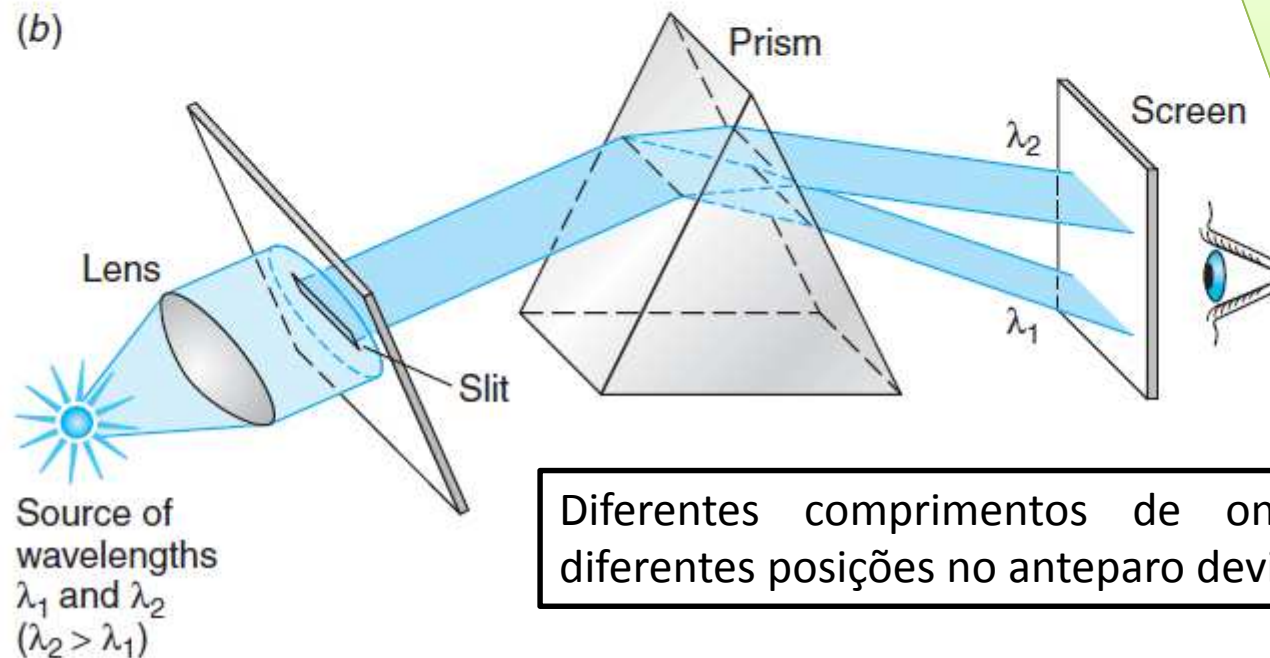
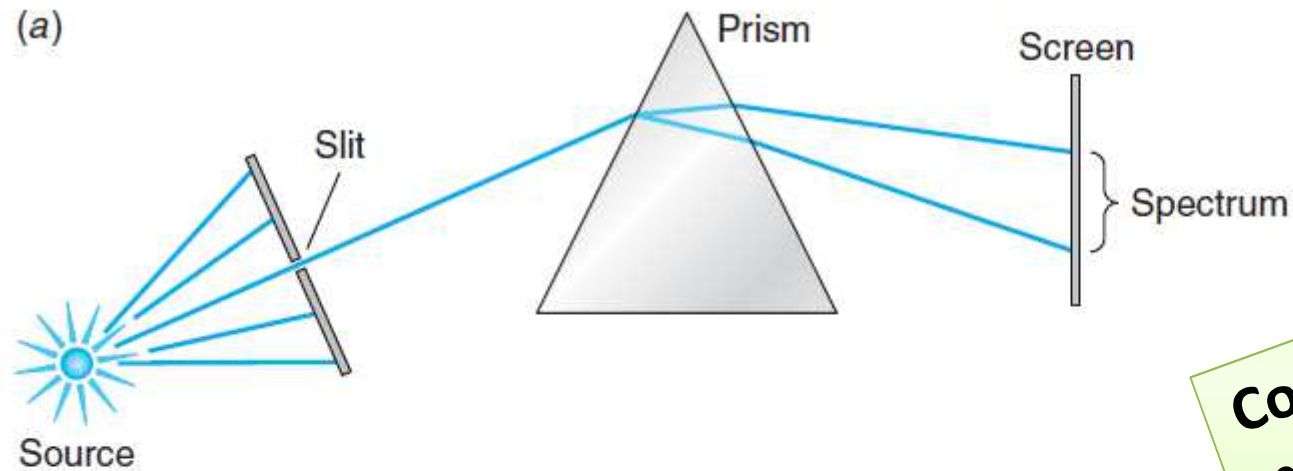
O que representavam as linhas escuras no espectro observado?



Espectro Solar – uma medida atual



Esquema Básico de um Espectrômetro

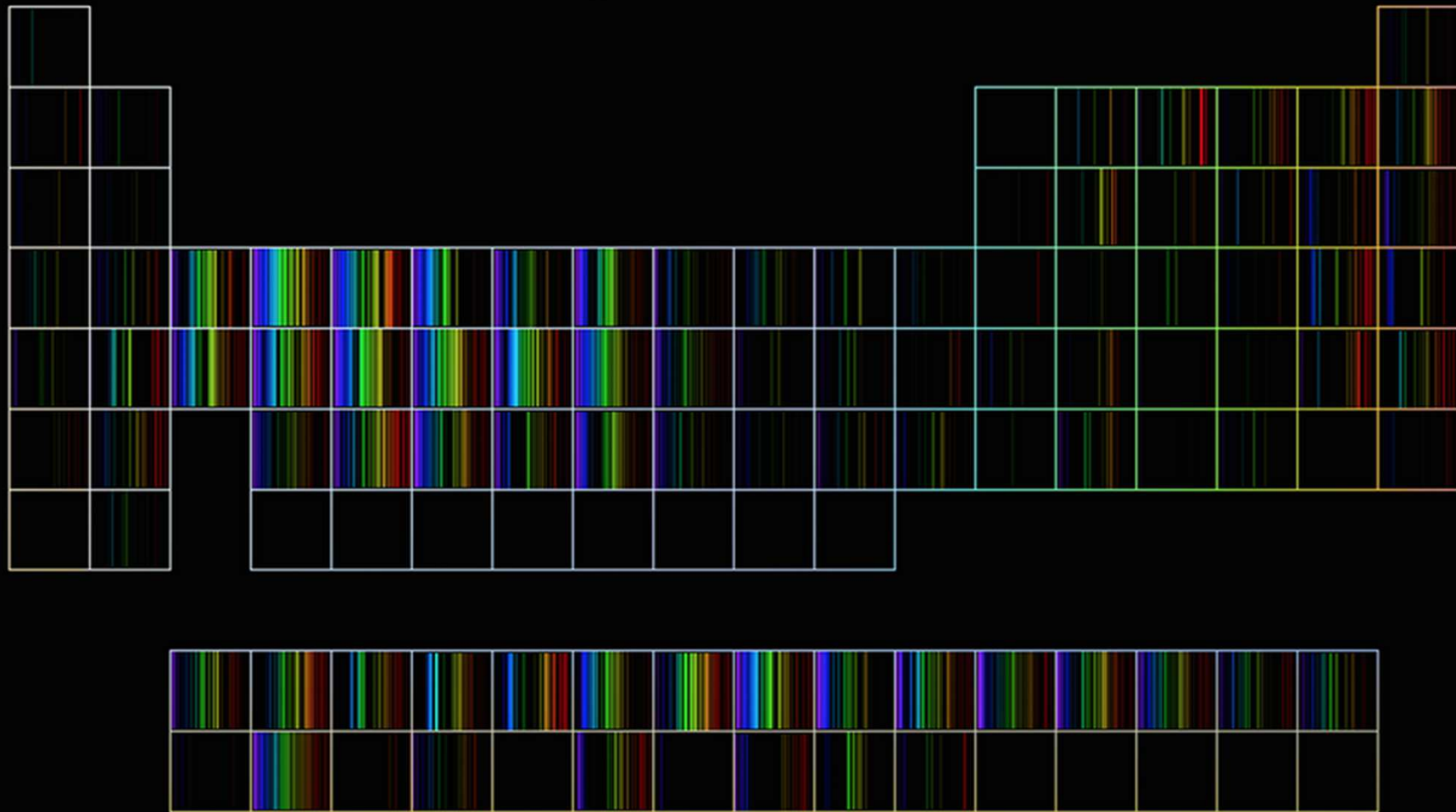


Como o que vimos
nos experimentos
de radiação de
corpo negro

Diferentes comprimentos de onda são projetados em diferentes posições no anteparo devido a dispersão do prisma.

Cada elemento possui seu próprio espectro característico
(como uma “digital” atômica)

Emission Spectra of the Elements



Medidas do espectro dos elementos químicos

No final do século XIX e início do XX, muitas observações espectrais de diversos elementos foram realizadas. Contudo, não havia ainda um modelo que explicasse o porquê dos espectros nem tão pouco que previsse a posição das linhas espectrais.

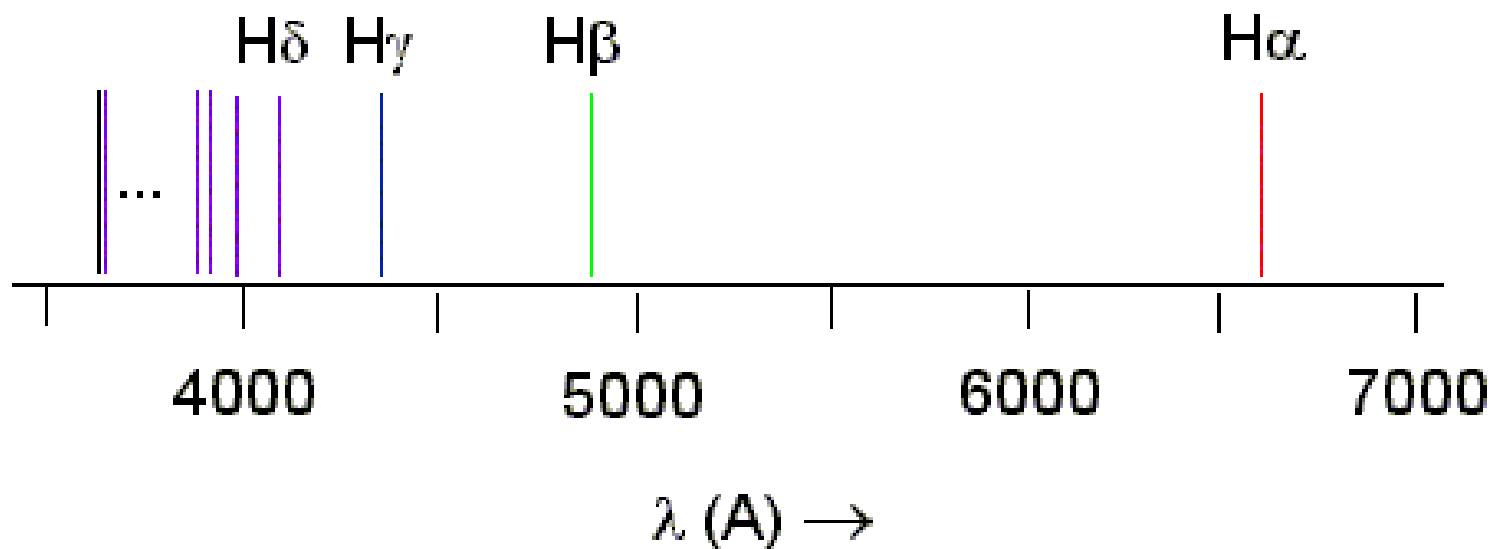
Johann Balmer (1885) observou que as linhas do hidrogênio no visível e ultravioleta poderiam ser previstas pela fórmula empírica.

$$\lambda_n = 364,6 \frac{n^2}{n^2 - 4} \text{ nm}$$



Johann J. Balmer
1825 – 1898

Nesta fórmula, n representa os inteiros maiores que 2.



A fórmula de Rydberg-Ritz para os espectros atômicos

Uma fórmula mais geral para os espectros atômicos foi obtida por Rydberg e Ritz:

$$\frac{1}{\lambda_{nm}} (cm^{-1}) = R \left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2} \right) \quad \text{Para } n > m$$

R era o mesmo valor para todas as linhas de um dado elemento, mas variava de forma regular de elemento para elemento.

$$R_H = 1,96776 \cdot 10^7 \text{ m}^{-1}$$

$$R = 1,097373 \cdot 10^7 \text{ m}^{-1}$$

Esta fórmula foi bem sucedida em predizer a posição de linhas espectrais para diversos elementos. Porém, ainda não se explicava o porquê dos espectros atômicos obedecerem a esta expressão.

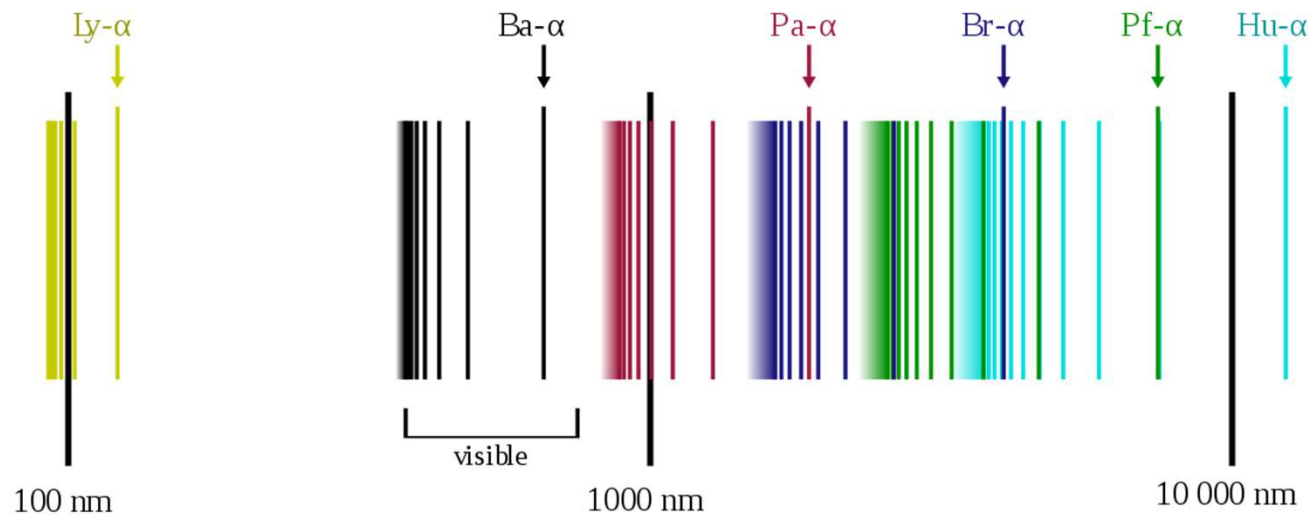
Um maior desenvolvimento teórico sobre o que é matéria foi necessário para uma explicação “satisfatória” dos espectros atômicos.



Johannes Rydberg
1854 - 1919



Walther Ritz
1878 - 1909



$$\bar{\nu} = \frac{1}{\lambda} = R_H \left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right) cm^{-1}$$

Nome	n_1	n_2	Região do espectro eletromagnético
Lyman	1	$n = 2, 3, 4, \dots$	Ultravioleta
Balmer	2	$n = 3, 4, 5, \dots$	Visível
Paschen	3	$n = 4, 5, 6, \dots$	Infravermelho
Brackett	4	$n = 5, 6, 7, \dots$	Infravermelho
Pfund	5	$n = 6, 7, 8, \dots$	Infravermelho
Humphreys	6	$n = 7, 8, 9, \dots$	Infravermelho

Calcule o comprimento de onda e determine a “cor” de uma linha observada no espectro de Balmer que tenha $n = 3$.

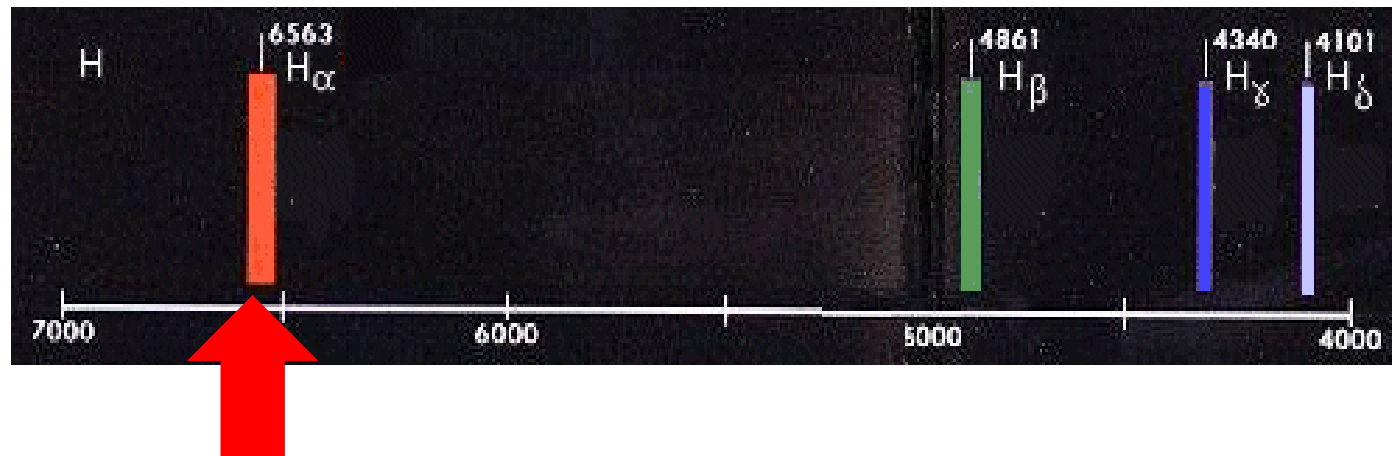
$$\lambda_n = 364,6 \frac{n^2}{n^2 - 4} \text{ nm}$$

$$\lambda_3 = 364,6 \frac{3^2}{3^2 - 4} \text{ nm}$$

$$\lambda_3 = 364,6 \frac{9}{5} \text{ nm}$$

$$\lambda_3 = 656 \text{ nm}$$

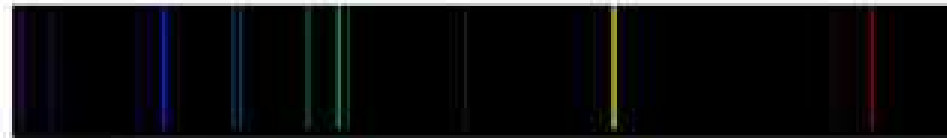
A linha observada apresenta cor vermelha.



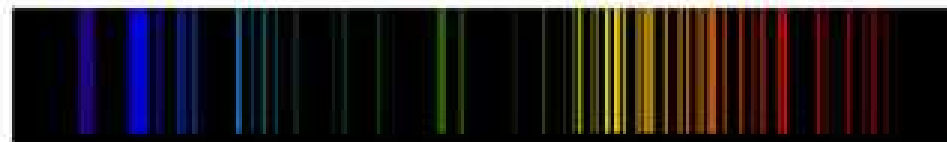
Com a fórmula de **Rydberg-Ritz** era possível prever o comprimento de emissão das linhas do espectro para um espécime atômico. Contudo, não se entendi o motivo pelo qual as linhas possuíam estes valores. Os resultados foram obtidos de forma totalmente empírica.



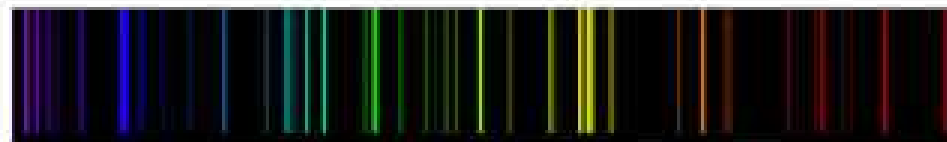
Hidrogênio



Hélio



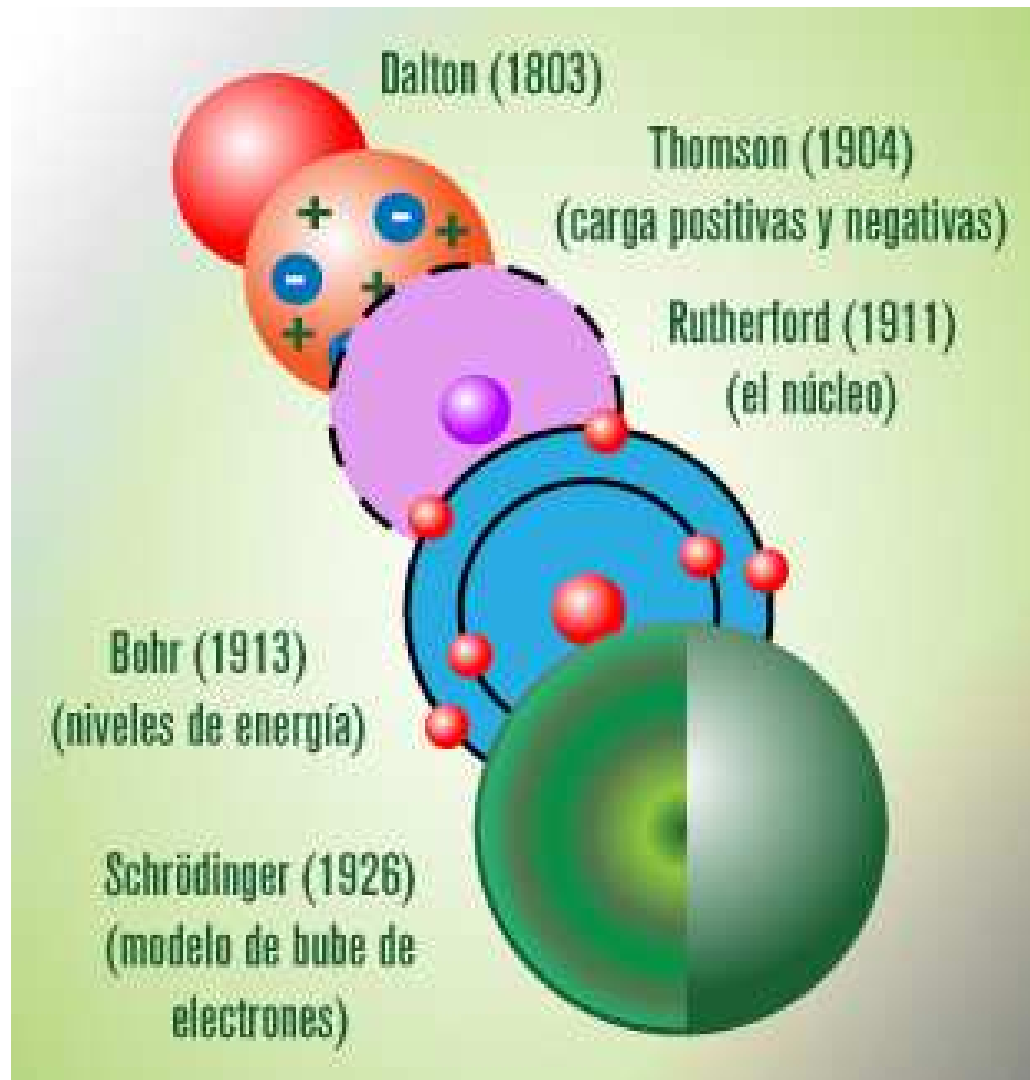
Neônio



Mercúrio

Qual seria uma explicação baseada em princípios físicos para o espectro atômico?

Na próxima aula discutiremos os modelos desenvolvidos para explicar a natureza da matéria e como a física quântica contribui para um entendimento da estrutura microscópica da matéria.



Na aula de hoje (01/10/19):

Continuação: Evidências Experimentais da Física Quântica:

- O efeito fotoelétrico;
- O efeito Compton e os raios X;
- Espectros Atômicos.

Na próxima aula (03/10/19):

- Modelos atômicos,
- Modelo quântico de Bohr,
- Experimento de Franck-Hertz,
- Hipótese de de Broglie
- Ondas de matéria.



Perguntas, dúvidas, comentários, aflições?

Cronograma e conteúdo programático da disciplina (parte 1)

Semana	Dia	Aula	Conteúdo
1	24/09 (Ter)	1	Apresentação a disciplina; Evidências experimentais da teoria quântica : radiação do Corpo Negro.
	---	---	-----
2	01/10 (Ter)	2	Evidências experimentais da teoria quântica: efeito foto-elétrico, efeito Compton, espectros atômicos
	03/10 (Qui)	3	Modelos atômicos, Modelo quântico de Bohr, Experimento de Franck-Hertz, Hipótese de de Broglie e ondas de matéria.
3	08/10 (Ter)	4	Revisitando ondas; interferência (fótons e elétrons) e interferômetros; dualidade onda-partícula e princípio de complementaridade; Princípio de incerteza de Heisenberg.
	---	---	-----
4	15/10 (Ter)	5	Interferômetros e fótons únicos, polarização da luz, postulados da física quântica e notação de Dirac
	17/10 (Qui)	6	Relação entre estados quânticos e funções de onda. Espaços discretos e contínuos na física quântica. Probabilidade e interpretações em Física Quântica.
5	22/10 (Ter)	7	Mecânica Quântica Ondulatória, Determinação eurística da Equação de Schrodinger, propriedades da equação de Schrodinger e funções de ondas.
	---	---	-----
6	29/10 (Ter)	P1	Primeira Avaliação
	31/10 (Qui)	8	Potenciais simples: poço de potencial, Espaço de estados e transições entre estados de energia; Elétrons em currais quânticos e o gato de Schrodinger.

Cronograma e conteúdo programático da disciplina (parte 2)

Semana	Dia	Aula	Conteúdo
7	05/11 (Ter)	9	Potenciais simples: poço quadrado finito; operadores e valores médios de observáveis, pontos quânticos e suas aplicações.
	---	---	-----
8	12/11 (Ter)	10	Potenciais simples: Oscilador Harmônico Quântico. Armadilhas de íons e princípios de informação quântica. Requisitos essenciais de um computador quântico.
	14/11 (Qui)	11	Potenciais simples: potenciais degraus, reflexão, Transmissão de Ondas, Tunelamento. Tempo de tunelamento em uma barreira (revisitando o princípio de incerteza de Heisenberg). Microscópios de tunelamento e mapeamento de átomos e moléculas.
9	19/11 (Ter)	12	Equação de Schrodinger em três dimensões: O cubo quântico (coordenadas cartesianas), O átomo de Hidrogênio (coordenadas esféricas), Separação de variáveis e a quantização de Momento Angular e Energia.
	---	---	-----
10	26/11 (Ter)	13	Funções de ondas do átomo de Hidrogênio; Orbitais; Significado físico dos números quânticos atômicos. Imagens, Abstrações e Interpretações.
	28/11(Qui)	14	Introdução (noções gerais) aos Átomos de muitos elétrons, spin (quarto número quântico atômico) e tabela periódica. O fim de um começo.
11	03/12 (Ter)	P2	Segunda Avaliação da Disciplina
	---	---	-----
12	10/12 (Ter)	Psub\REC	Avaliação Substitutiva ou Avaliação de Recuperação
13			
	14 a 21/9		Lançamento de conceitos e faltas