

Evidências Experimentais da Natureza Quântica da Radiação e da Matéria

Aula 01

Marcelo G Munhoz
Edifício HEPIC, sala 202, ramal 916940
munhoz@if.usp.br

Disciplinas de Física Moderna

- Um pouco de contextualização!
- Mudanças na grade curricular das disciplinas de Física Moderna:

Grade Antiga	Grade Nova
Laboratório de Física Moderna	Evidências Experimentais da Natureza Quântica da Radiação e da Matéria
Física Moderna I	Introdução à Mecânica Quântica Ondulatória
Física Moderna II	Introdução à Física Nuclear e de Partículas Elementares
	Introdução à Física do Estado Sólido

Evidências Experimentais da Natureza Quântica da Radiação e da Matéria

- Proposta inovadora: conciliar aulas teóricas e experimentais na mesma disciplina
- Esta é a primeira vez que esta disciplina é oferecida presencialmente
- Ela consiste em uma **Introdução à Física Quântica** a partir de evidências experimentais.

Objetivo Geral da Disciplina

- Retomar as limitações dos modelos clássicos e introduzir o conceito da dualidade onda-partícula para a matéria e para a radiação a partir da discussão de evidências experimentais
- Consolidar o entendimento do aluno sobre o método científico a partir de experimentos envolvendo fenômenos da dualidade onda-partícula, tanto para a radiação como para a matéria

Objetivos de Aprendizagem

1. Compreender a natureza dual da radiação e da matéria, reconhecendo o seu caráter intrínseco e necessário diante das evidências experimentais
2. Consolidar a compreensão da natureza de um experimento em Física, reconhecendo seu papel na criação de novos conhecimentos, sua estrutura e sua dinâmica
3. Avaliar criticamente os resultados de uma medida, determinando os diferentes fenômenos presentes e concluindo de forma rigorosa o experimento

Estrutura da Disciplina

1. A natureza ondulatória da radiação eletromagnética
2. A natureza corpuscular da radiação eletromagnética
3. A natureza corpuscular (atômica) da matéria
4. A natureza ondulatória da matéria

Estrutura da Disciplina

1. A natureza ondulatória da radiação eletromagnética

- Três aulas teóricas (Aulas de 01 a 03)
- Um experimento: Radiação do Corpo Negro

2. A natureza corpuscular das radiações eletromagnéticas

- Duas aulas teóricas (Aulas de 04 a 05)
- Dois experimentos: Efeito Fotoelétrico e Efeito Bremsstrahlung

Estrutura da Disciplina

3. A natureza corpuscular (atômica) da matéria

- Três aulas teóricas (Aulas de 06 a 08)
- Um experimento: Espectroscopia do Hidrogênio

4. A natureza ondulatória da matéria

- Duas aulas teóricas (Aulas de 09 e 10)
- Um experimento: Difração de elétrons

Atividades

- Aulas teóricas expositivas
 - Atividades em sala de aula
- Listas de exercícios (sem nota)
- Aulas experimentais no laboratório didático
 - Realização de experimentos e elaboração de relatórios em grupo
 - A frequência é crucial! Será exigido 70% de frequência nas aulas
 - Alunos com duas faltas na mesma experiência não podem entregar o relatório. Como a entrega dos relatórios é obrigatória, o aluno deverá entregá-lo individualmente

Calendário

Data	Horário	Turma 01	Turma 02
18/ago	8h/19h	E01	
	10h/21h	E02	
25/ago	8h/19h	L01 - M1	E03
	10h/21h	E03	L01 - M1
01/set	8h/19h	L01 - M2	E04
	10h/21h	E04	L01 - M2
15/set	8h/19h	L01 - A	L01 - A
	10h/21h	L01 - A	L01 - A
22/set	8h/19h	E05	
	10h/21h	L02 - M1	L03 - M1
29/set	8h/19h	L02 - M2	L03 - M2
	10h/21h	E06	
06/out	8h/19h	L02 - A	L03 - A
	10h/21h	L02 - A	L03 - A
13/out	8h/19h	L03 - M1	L02 - M1
	10h/21h	Prova 1	

20/out	8h/19h	L03 - M2	L02 - M2
	10h/21h	E07	
27/out	8h/19h	L03 - A	L02 - A
	10h/21h	L03 - A	L02 - A
03/nov	8h/19h	E08	
	10h/21h	E09	
10/nov	8h/19h	L04 - M	E10 - 1
	10h/21h	E10 - 1	L04 - M
17/nov	8h/19h	L04 - A	L04 - A
	10h/21h	L04 - A	L04 - A
24/nov	8h/19h	E10 - 2	L05 - M
	10h/21h	L05 - M	E10 - 2
01/dez	8h/19h	L05 - A	L05 - A
	10h/21h	L05 - A	L05 - A
08/dez	9h/20h	Prova 2	
15/dez	9h/20h	Substitutiva	

Avaliação

- Relatórios (5). São todos obrigatórios!
- Provas (2), com prova substitutiva livre, sem ônus
- Atividades em aula: bônus de 0.5 na média quando pelo menos 70% das atividades forem bem avaliadas
- Média Final:
 - $M = \frac{(R + P)}{2}$, onde R é a média dos 4 relatórios e P é a média das duas provas
 - Se $R < 3$ ou $P < 3$, $M = \min(R, P)$

Bibliografia

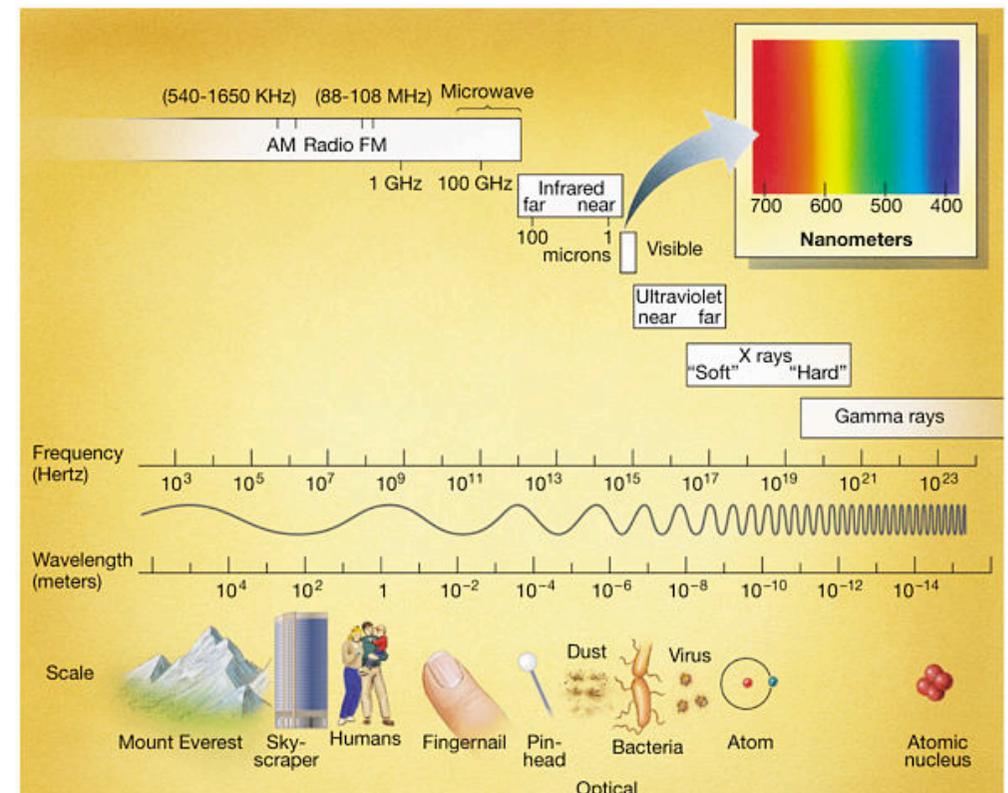
- **Física Quântica de Eisberg e Resnick**
- Física Moderna, Francisco Caruso e Vitor Oguri
- Física Moderna e Contemporânea - Volume I, Jucimar Peruzzo, Walmir Pottker e Thiago Gilberto do Prado
- Física Moderna de Paul A. Tipler e Ralph A. Liewellyn
- Notas de aula do Professor Roberto V. Ribas
- Modern Physics for scientists and engineers de T. Thornton e Andrew Rex (copyright 2000);
- Modern Physics de Serway, Moses e Moyer
- Modern Physics, Kenneth Krane

O que “existe” no mundo físico?

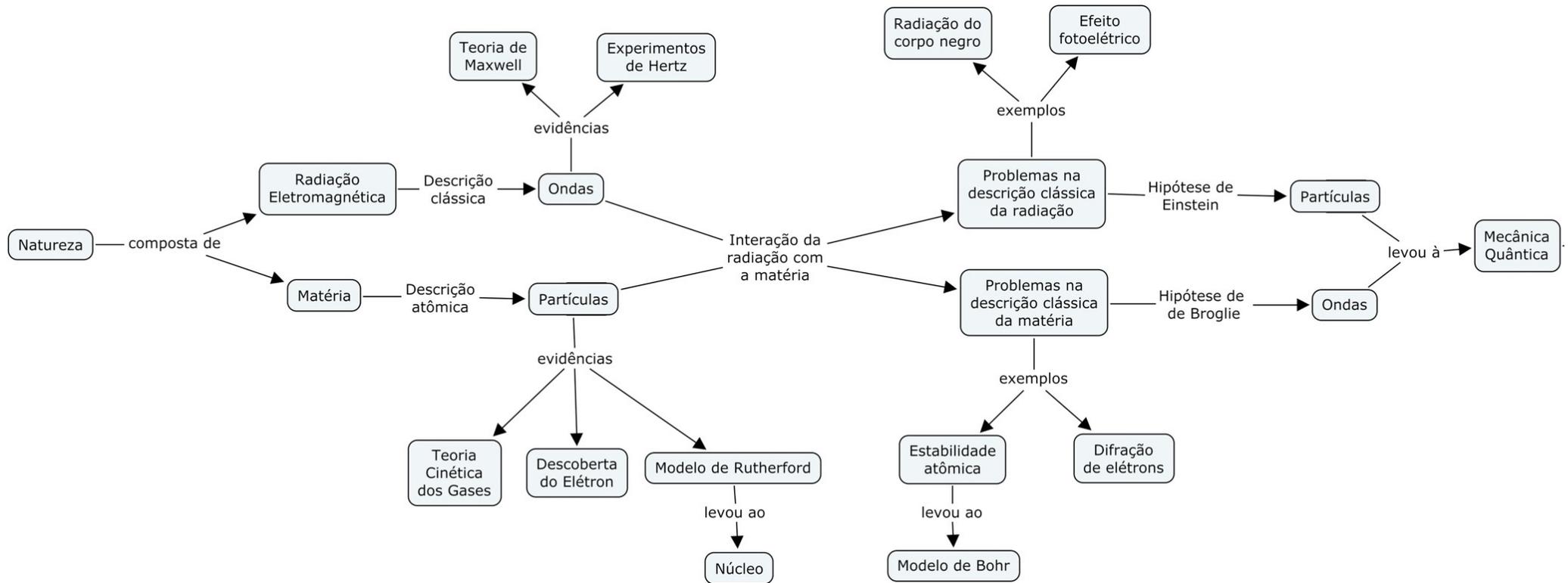
- Matéria



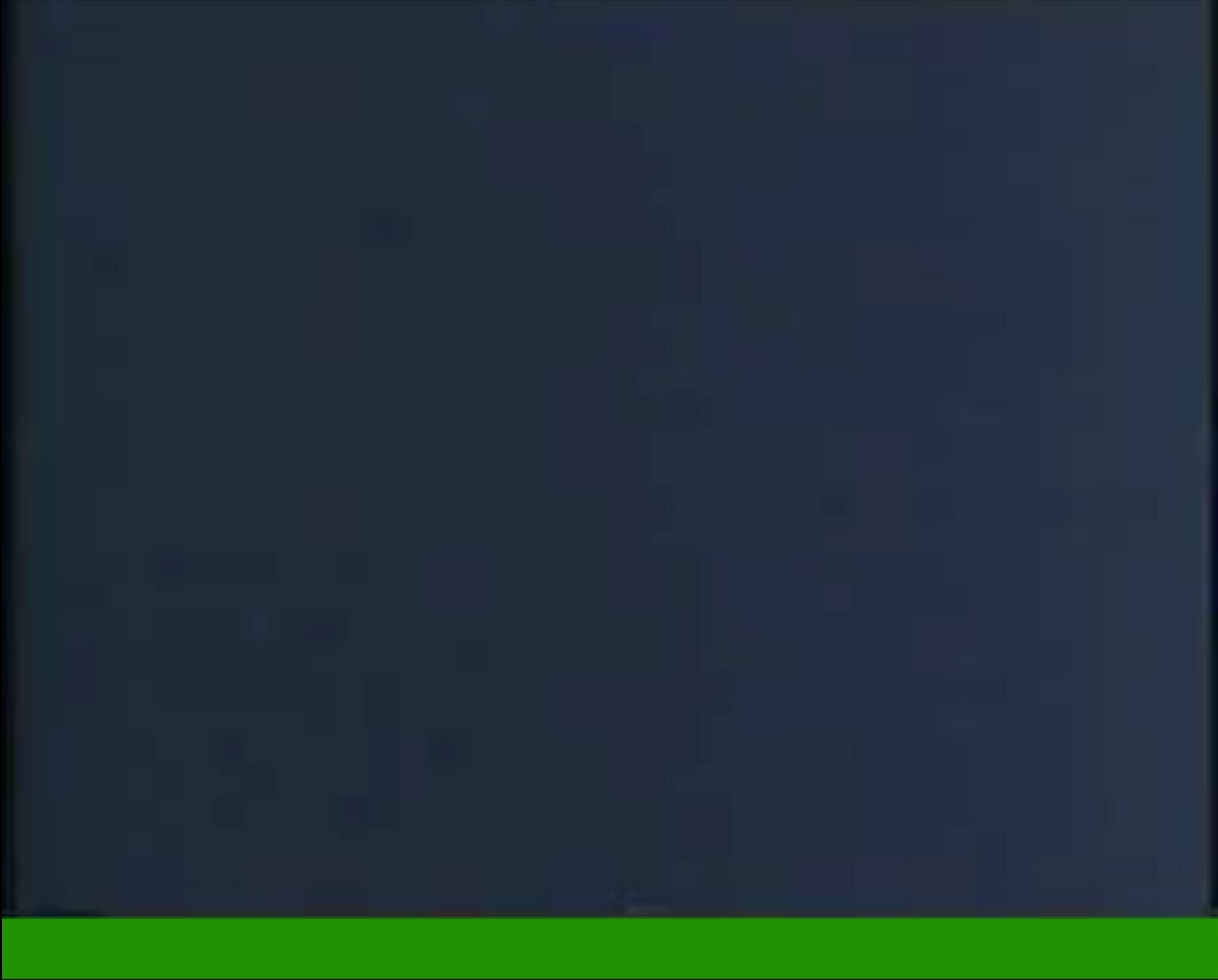
- Radiação eletromagnética



Esquema da Disciplina







A Física no final do século XIX

- "There is nothing new to be discovered in physics now. All that remains is more and more precise measurements."

Lord Kelvin

A Física no final do século XIX

- Sistemas

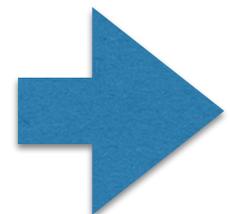
- pontuais (centro de massa, corpos celestes, etc.)
- extensos e contínuos
 - rígidos
 - fluídos
 - ondas (perturbações)

- Fenômenos

- mecânicos (movimento)
- ondulatórios
- térmicos (calor)
- eletromagnéticos
- ópticos

Alguns “pequenos” problemas sem solução...

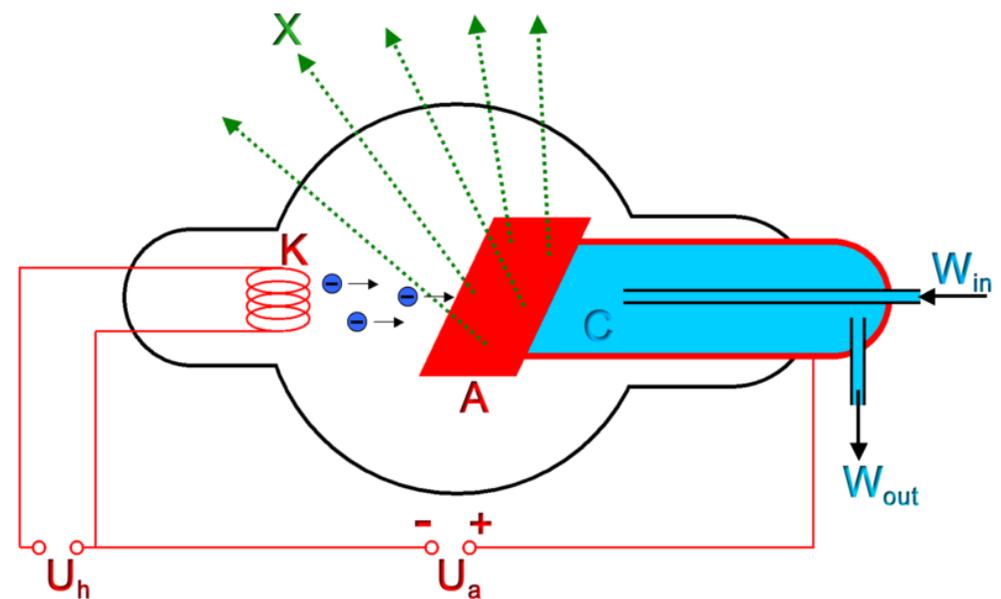
- Meio para propagação das ondas eletromagnéticas (éter?)
- Raios-X (Röntgen, nov/1895)
- Radioatividade (Becquerel, fev/1896)
- Elétron (J.J.Thomson, 1897)
- Linhas espectrais e Efeito Zeeman (P. Zeeman, 1896) –
desdobramento de linhas espectrais em átomos sob
campo magnético
- Radiação de corpo negro



Röntgen descobre os raios-X (1895)



- Röntgen trabalhava com tubos de raios catódicos
- Durante seus estudos ele observou algo bastante estranho...



Röntgen descobre os raios-X (1895)

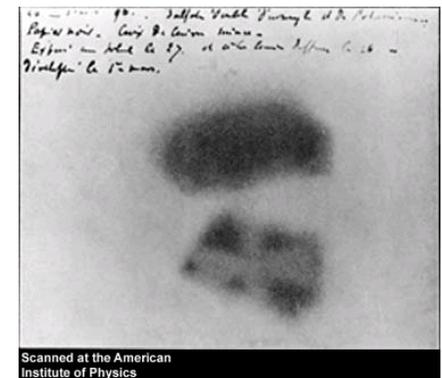
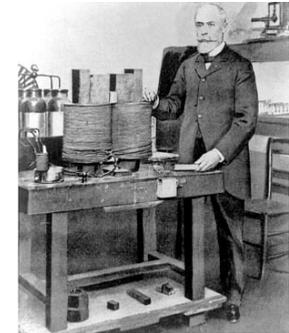


- Röntgen trabalhava com tubos de raios catódicos
- Durante seus estudos ele observou algo bastante estranho...



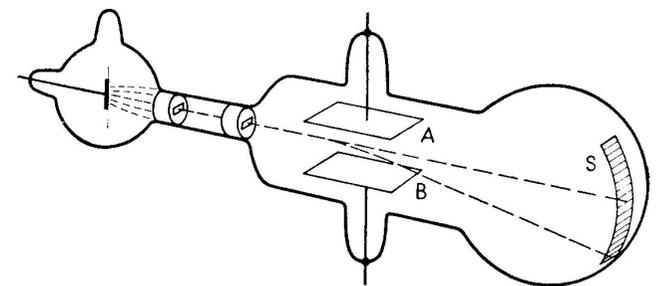
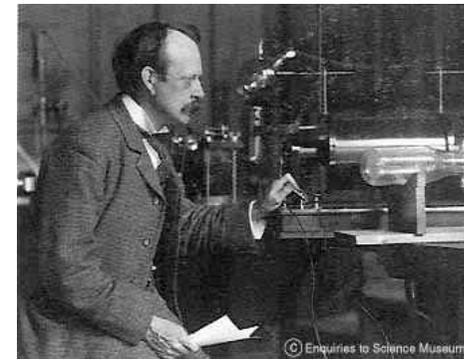
Becquerel descobre a radioatividade (1896)

- Estudava os fenômenos da fosforescência e fluorescência: materiais que emitem luz naturalmente após serem expostos à luz intensa
- Observou que alguns desses materiais (urânio), marcaram um filme fotográfico mesmo estando no escuro
- Afinal, qual a natureza dos raios-X de Röntgen e destes raios?



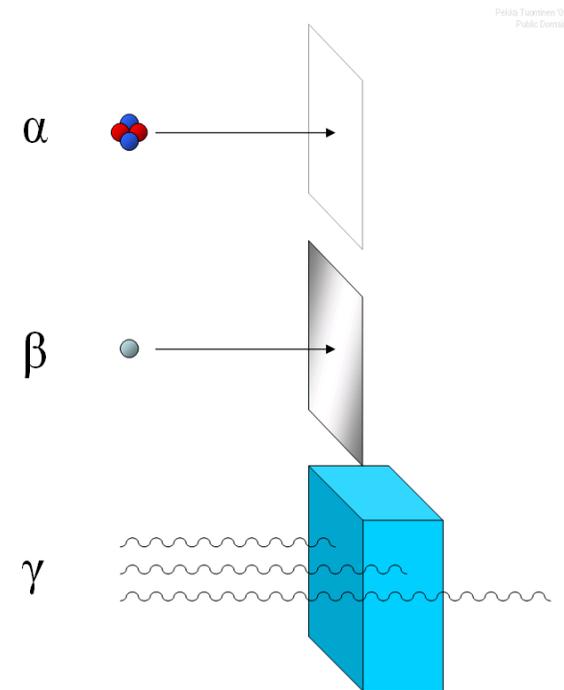
J. J. Thomson descobre o elétron (1897)

- Thomson também estudava descargas elétricas em gases utilizando tubos de raios catódicos
- Através de um experimento e princípios simples de eletromagnetismo, ele mediu a razão e/m do elétron



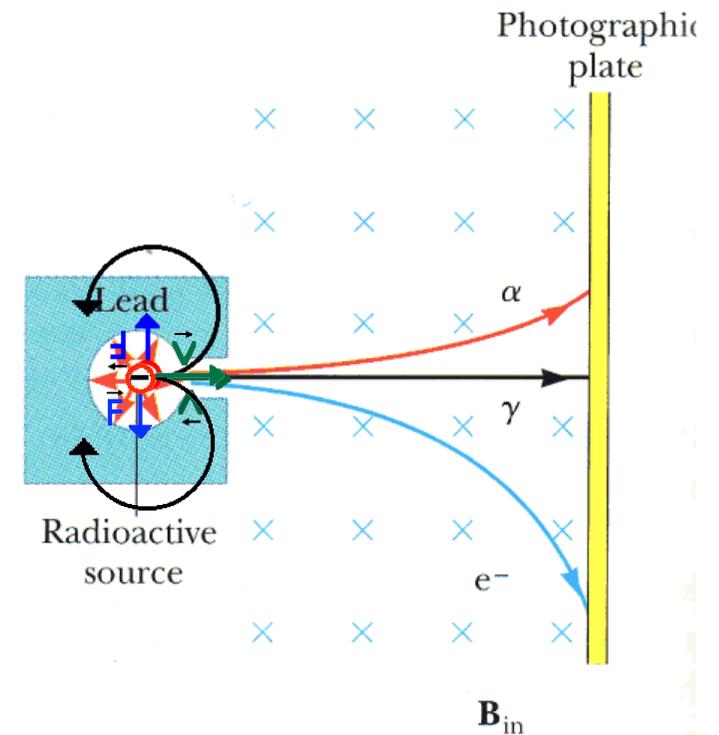
Vários tipos de radiação são observados

- 1899: E. Rutherford mostra que existe dois tipos de radiação: α e β
- 1900: Villard mostra que existe ainda um outro tipo de radiação: γ
- 1902: Pierre e Marie Curie mostram que a radiação β são elétrons
- 1908: E. Rutherford mostra que a radiação α é equivalente ao elemento He



Vários tipos de radiação são observados

- 1899: E. Rutherford mostra que existe dois tipos de radiação: α e β
- 1900: Villard mostra que existe ainda um outro tipo de radiação: γ
- 1902: Pierre e Marie Curie mostram que a radiação β são elétrons
- 1908: E. Rutherford mostra que a radiação α é equivalente ao elemento He



A Física no final do século XIX

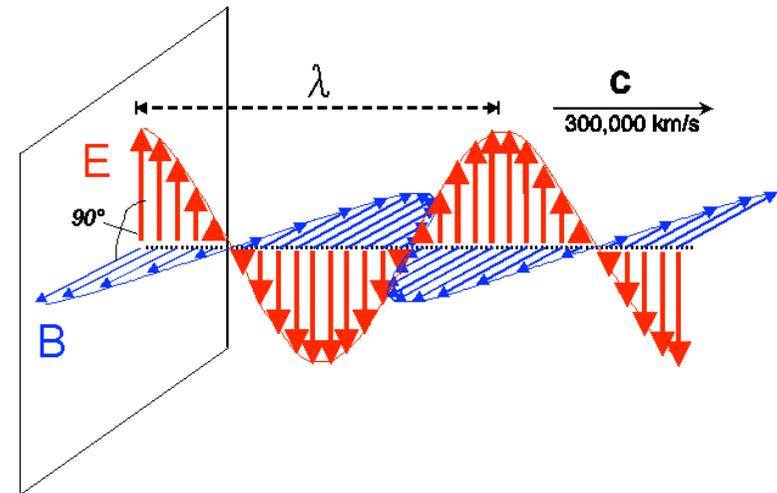
- Eletromagnetismo × Óptica:
 - uma das grandes unificações da física
 - a “aparente” resolução de um problema que durou séculos: a natureza da luz

Natureza da luz: onda ou partículas?

- Polêmica que envolveu grandes físicos e durou vários séculos
- Newton acreditava que a luz constituía-se de feixes de corpúsculos que se deslocam no vácuo em linha reta
- Christiaan Huygens era um dos que defendia a idéia de que a luz era uma onda se propagando em algum meio (qual?)
- Somente no século XIX, com experimentos de Young e Fresnel sobre a interferência e difração da luz é que a natureza ondulatória prevaleceu

Ondas eletromagnéticas

- James Clerk Maxwell estuda o efeito de correntes oscilantes em circuitos
- Essas correntes geram campos elétricos e magnéticos que variam com o tempo



Simulação de ondas eletromagnéticas

Equações de Maxwell

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0} \quad \vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \quad \vec{\nabla} \times \vec{B} = \mu_0 \vec{J} + \mu_0 \epsilon_0 \cdot \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$$

- Unificou efeitos elétricos e magnéticos
- Ondas eletromagnéticas tem o mesmo comportamento que a luz!

Ondas eletromagnéticas

- Equação das ondas eletromagnéticas:

$$\nabla^2 \vec{E} - \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = 0$$

$$\nabla^2 \vec{B} - \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial^2 \vec{B}}{\partial t^2} = 0$$

- que são equivalentes à equação de uma onda genérica:

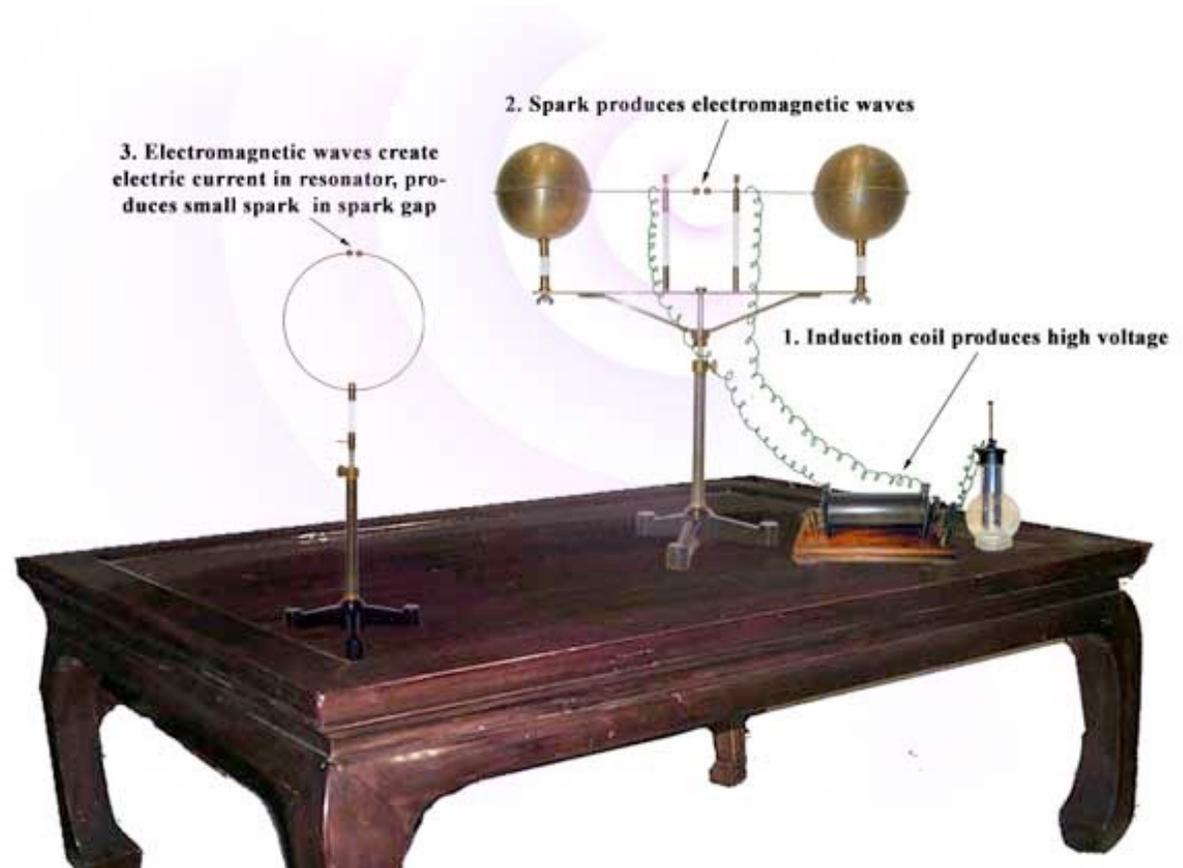
$$\nabla^2 \Psi(\vec{r}, t) - \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 \Psi(\vec{r}, t)}{\partial t^2} = 0$$

Ondas eletromagnéticas

- A velocidade das ondas eletromagnéticas é dada por $v = \sqrt{1/\mu_0\epsilon_0} = c$, ou seja, a velocidade da luz
- A energia (intensidade) da onda eletromagnética é proporcional ao quadrado da amplitude
- O “princípio da superposição” leva ao fenômeno da interferência

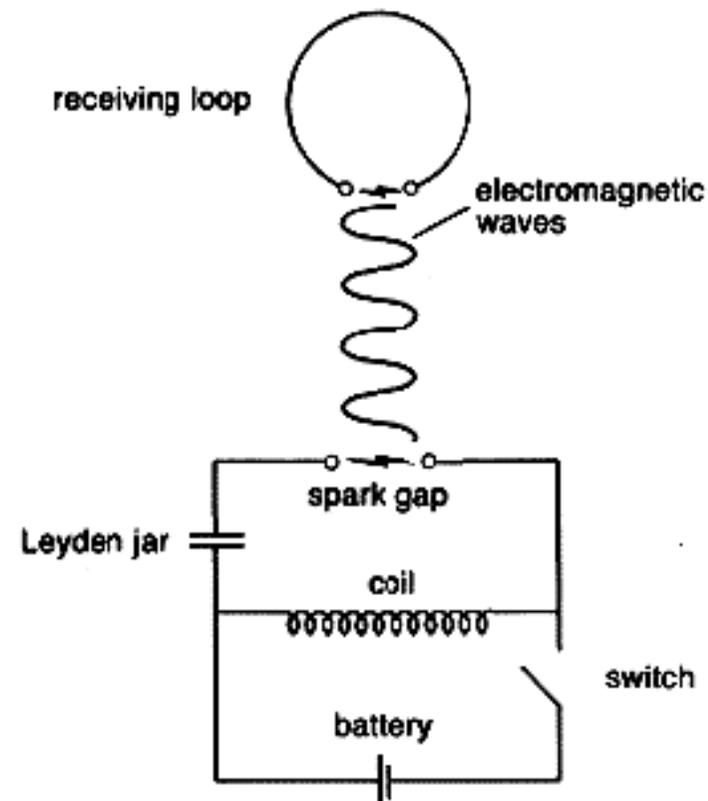
Existem essas ondas?

- Heinrich Hertz elabora experimentos para testar essa teoria (1887)



Existem essas ondas?

- Heinrich Hertz elabora experimentos para testar essa teoria (1887)



Existem essas ondas?

- Heinrich Hertz elabora experimentos para testar essa teoria (1887)



É essencial que as superfícies dos pólos do arco de faíscas sejam constantemente polidas

Radiação Eletromagnética

- Tanto a teoria como os experimentos indicam que a radiação eletromagnética tem uma natureza ondulatória, isto é, são ondas eletromagnéticas
- Porém, esse não é o fim da história!
- Veremos que essa última observação de Hertz está relacionada com uma natureza mais complexa das radiações eletromagnéticas