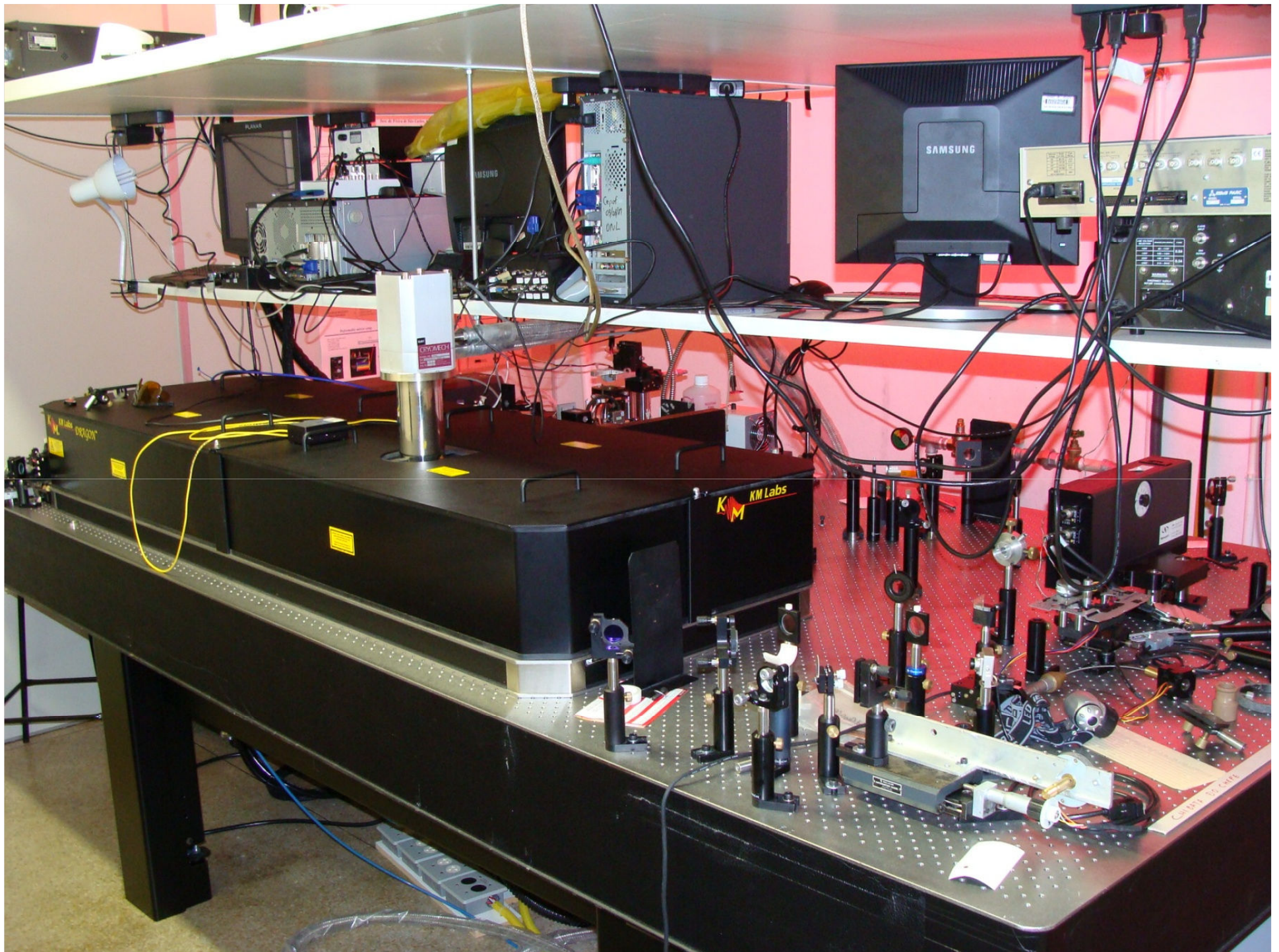


# Laser e Aplicações

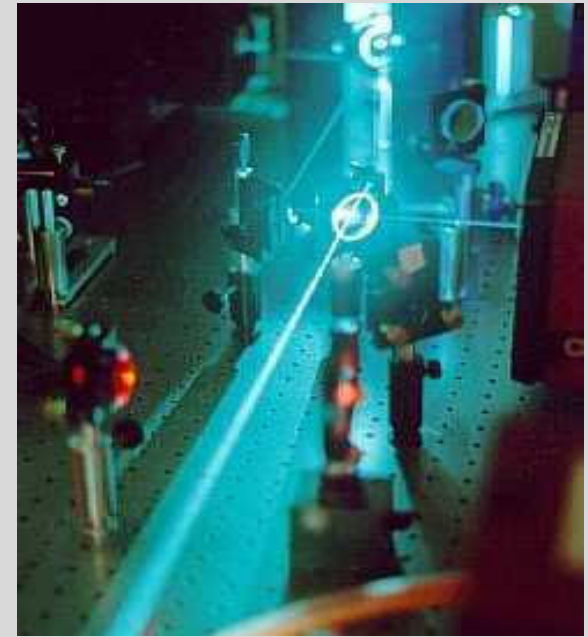
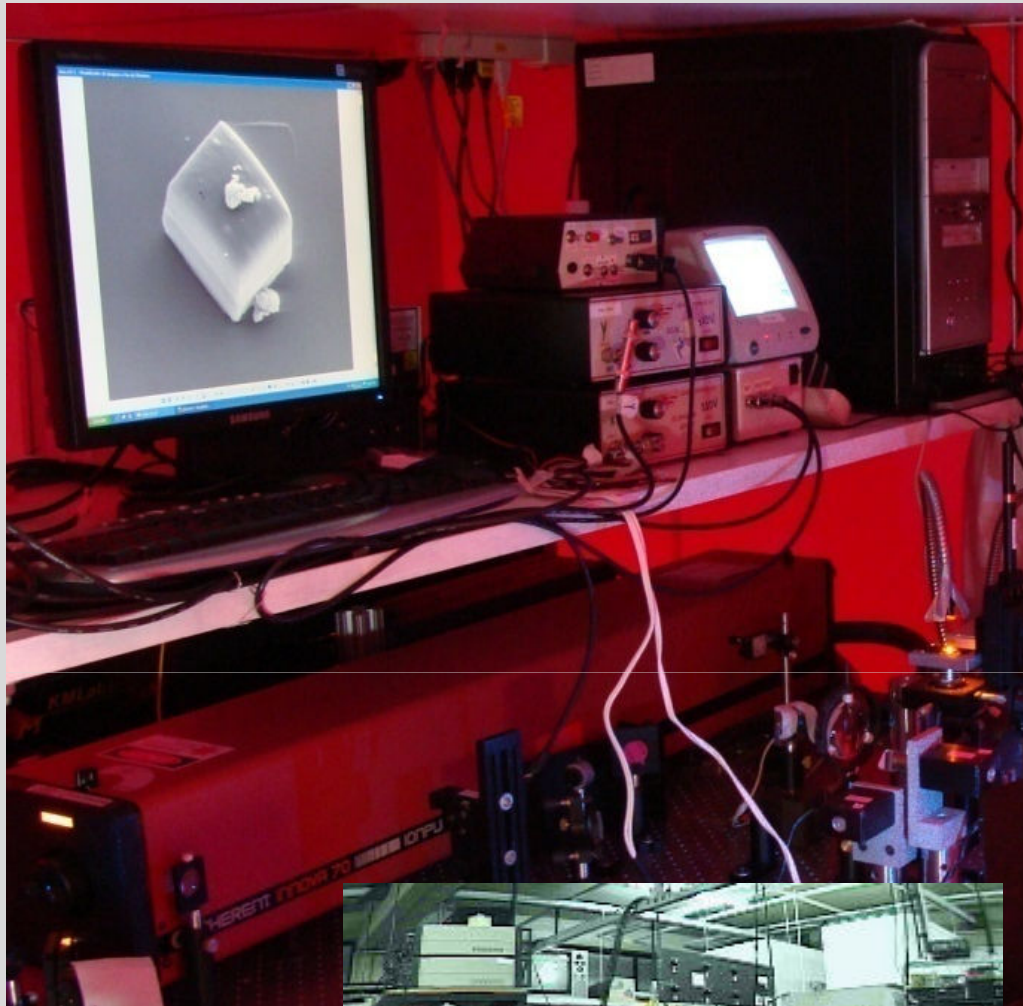
A photograph of a laser light show at night. Numerous bright green laser beams fan out from a central point on the left, creating a starburst effect. To the right, several thick, vertical blue laser beams descend from the top of the frame. In the background, a crowd of people is visible, some holding up phones to capture the light. A string of colorful, star-shaped decorations hangs across the middle ground. The overall scene is dark, with the laser lights providing the primary illumination.

Prof. Cleber R Mendonça  
Instituto de Física de São Carlos  
USP



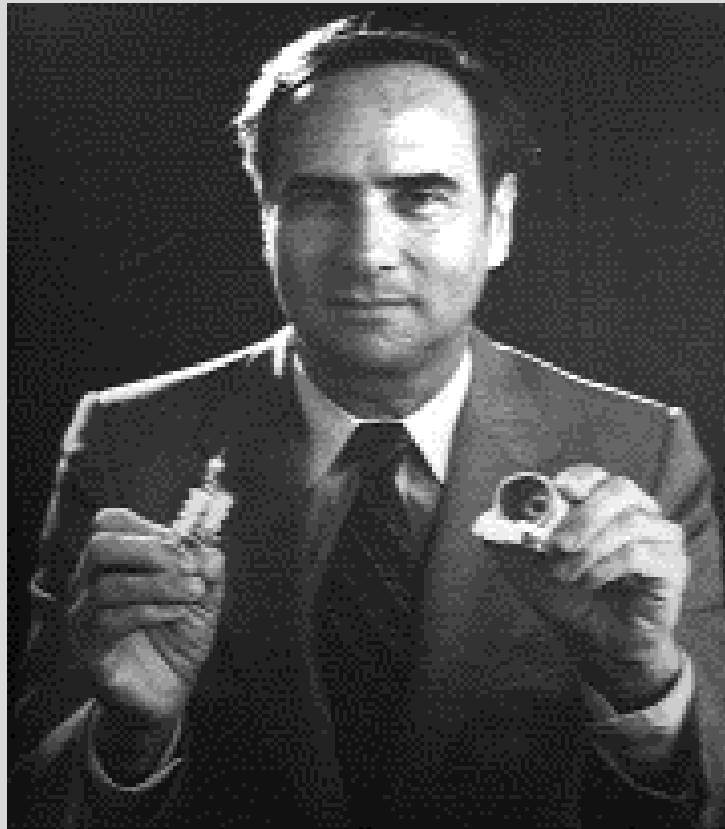






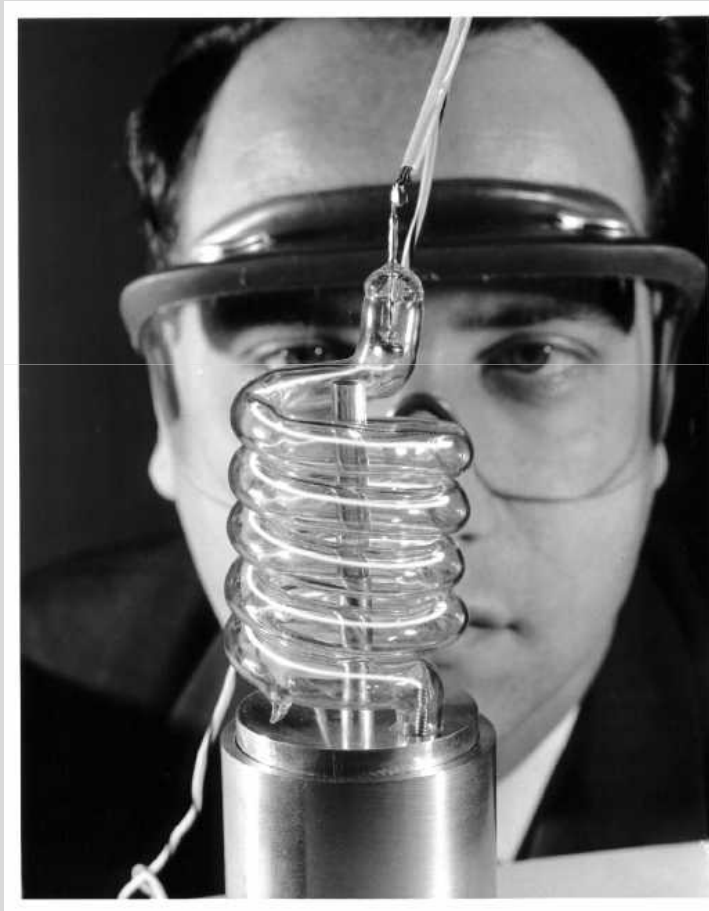
# LASER

**1960** - T. H. Maiman: laser de rubi



# LASER

**1960 - T. H. Maiman: laser de rubi**



“Uma solução em busca de um problema”



# Os primórdios

## Radiação térmica

Radiação emitida por um corpo devido a sua temperatura



# Os primórdios

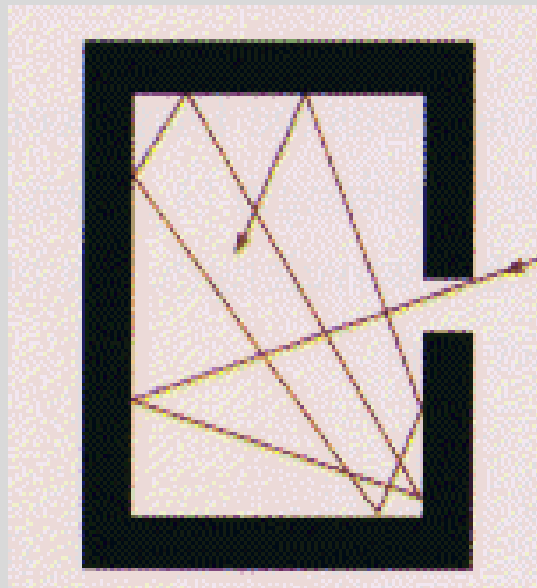
## Radiação térmica

Como descrever a energia por unidade de volume e frequência irradiada por um corpo aquecido em função da frequência e da temperatura?

$$\rho(\nu, T)$$

# Radiação de Corpo Negro

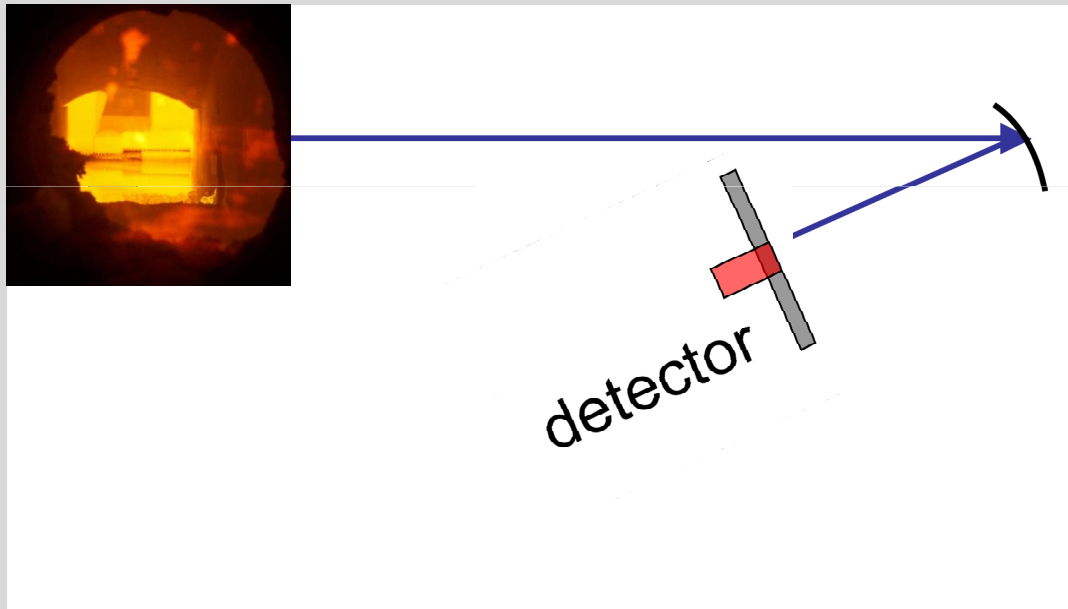
- O Corpo Negro ideal absorve toda a radiação incidente. (por isso é negro na temperatura ambiente)
- A refletividade é nula e a emissividade é  $e = 1$ .
- **Lei de Kirchhoff:** *Num corpo negro ideal, em equilíbrio termodinâmico a temperatura  $T$ , a radiação total emitida deve ser igual a radiação total absorvida*





# Radiação de Corpo Negro: alguns resultados

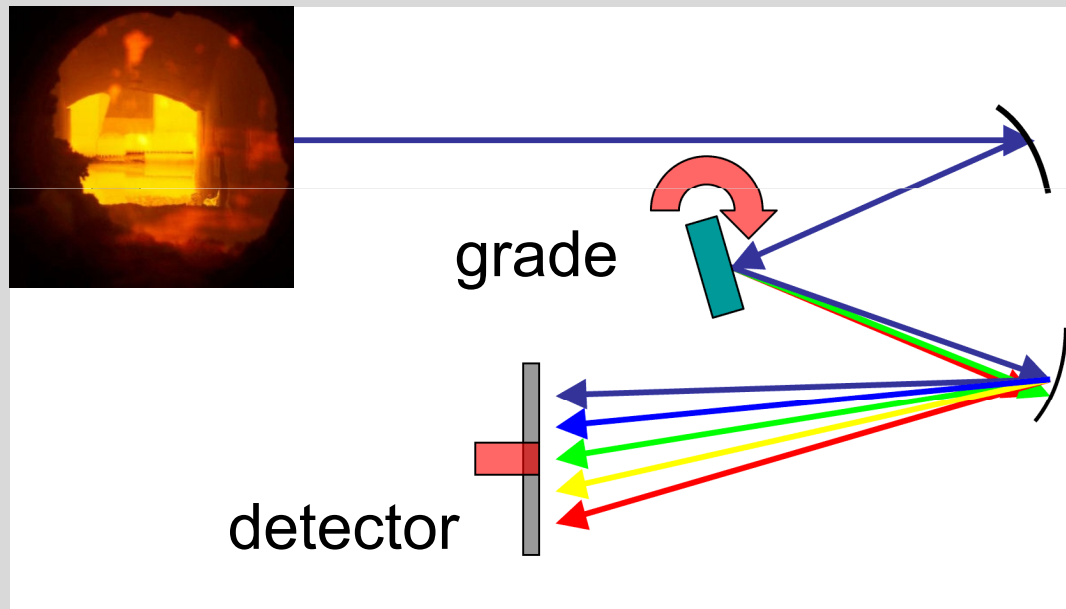
experimentalmente



- intensidade emitida

# Radiação de Corpo Negro: alguns resultados

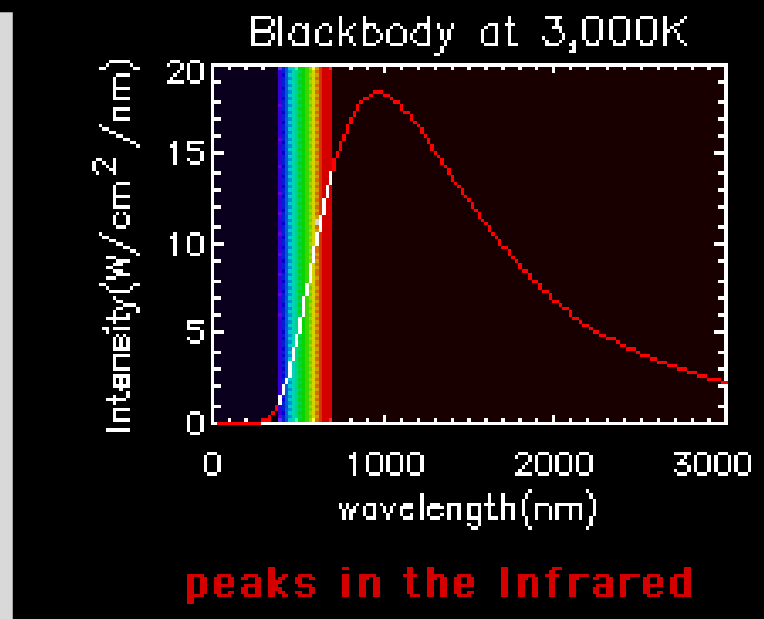
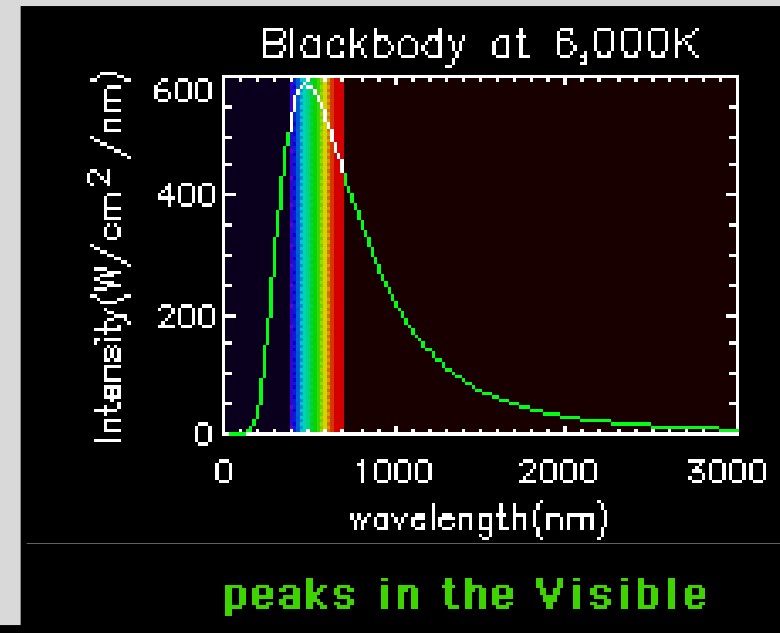
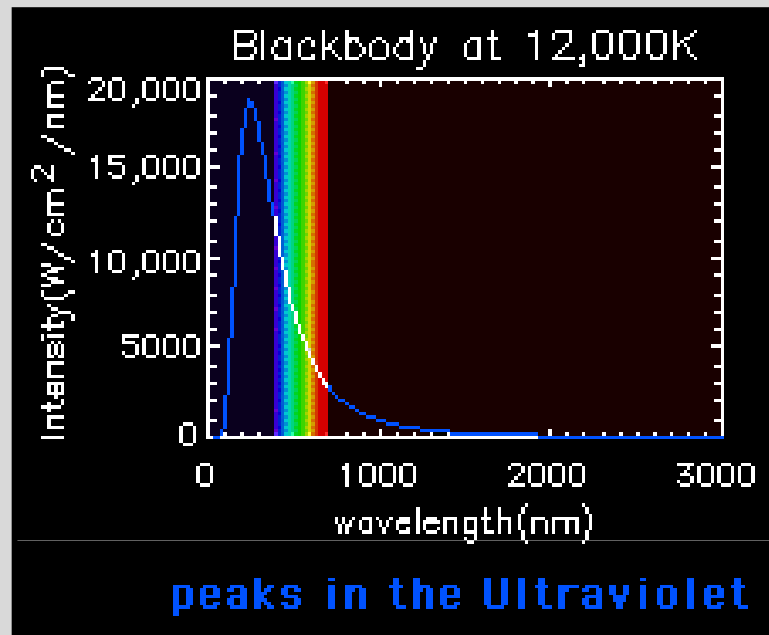
experimentalmente



- intensidade emitida
- espectro emitido

# Radiação de Corpo Negro: alguns resultados

resultado experimental





# Radiação de Corpo Negro: alguns resultados



Lei de Stefan-Boltzmann (1879)

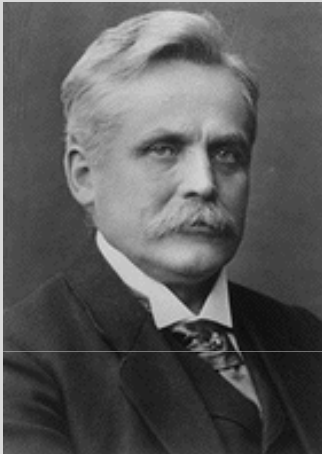
$$R = \sigma T^4$$

$R$  – Radiância total (potência total irradiada/área)

$\sigma$  – constante de Stefan-Boltzmann  
(com valor de  $5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$ )

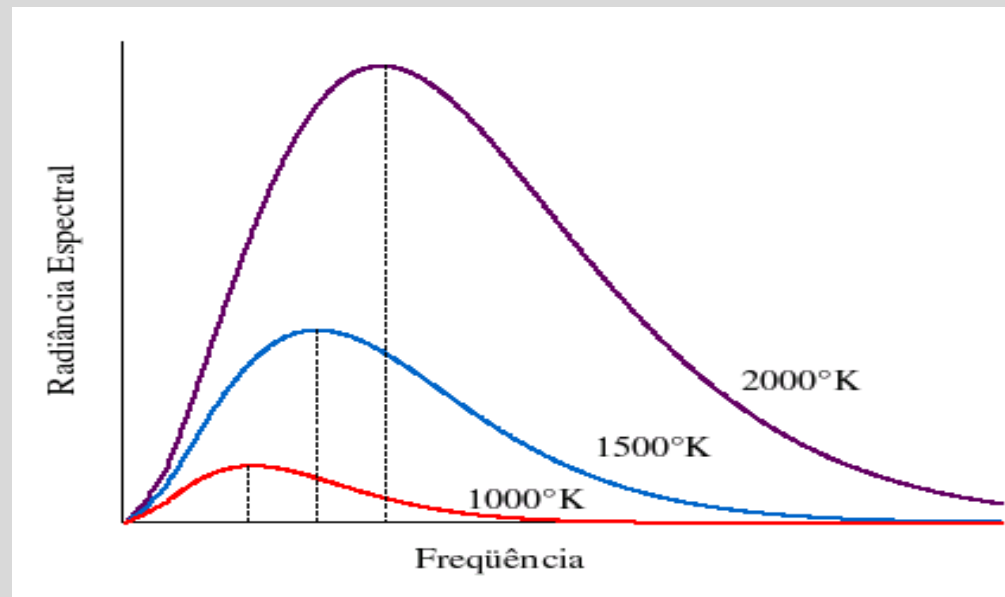
# Radiação de Corpo Negro: alguns resultados

## Lei do deslocamento de Wien (1893)



$$\lambda_{\max} T = \text{constante} \quad \text{ou} \quad \nu_{\max} \propto T$$

*constante de Wien:*  $2.898 \times 10^{-3} \text{ m.K}$



# Radiação de Corpo Negro

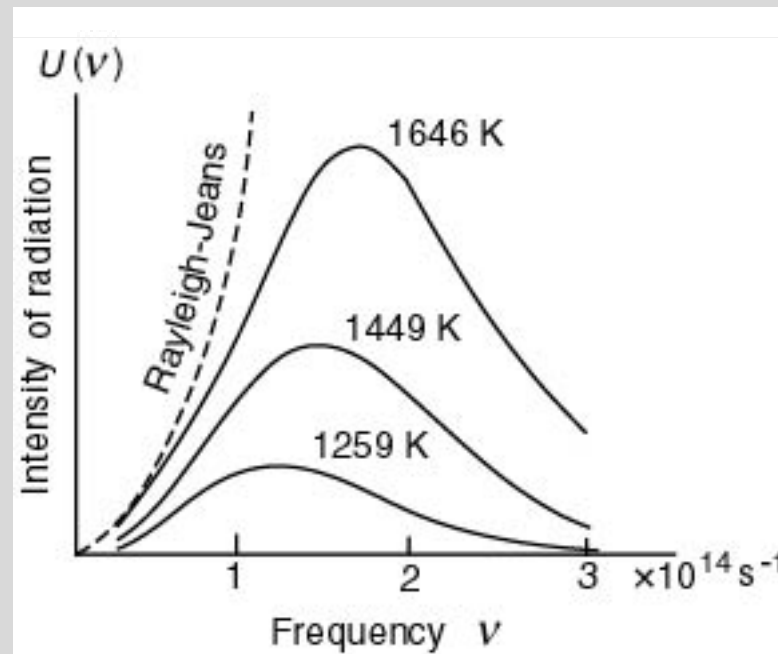
## Lei de Rayleigh-Jeans (1900-1905)

*Teoria clássica*



$$\rho(\nu, T) = \frac{8\pi\nu^2}{c^3} kT$$

$k = 1.3807 \text{ erg/K}$



Para baixas frequências a teoria clássica se aproxima dos resultados experimentais

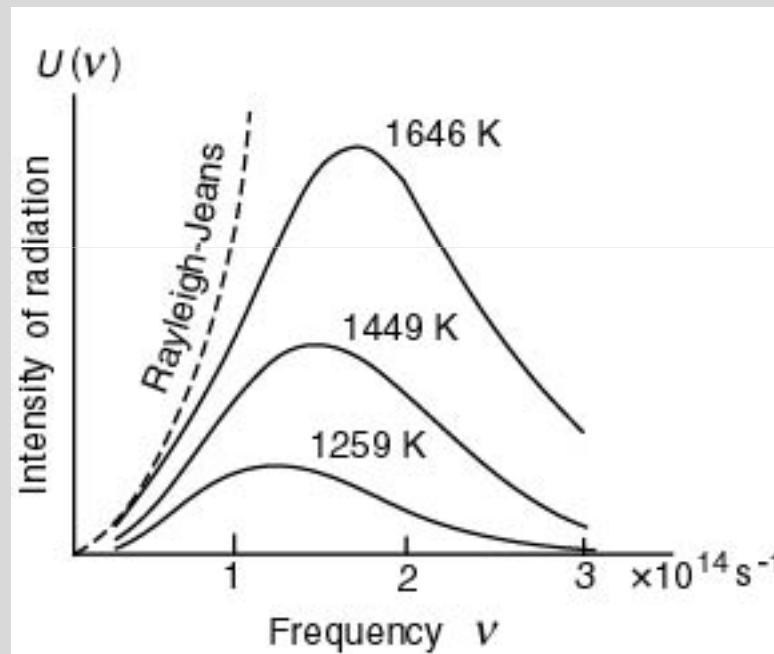


# Radiação de Corpo Negro

## Lei de Rayleigh-Jeans



### Catástrofe do Ultra-Violeta



**Falha da Teoria Clássica:** de alguma forma a teoria clássica está errada

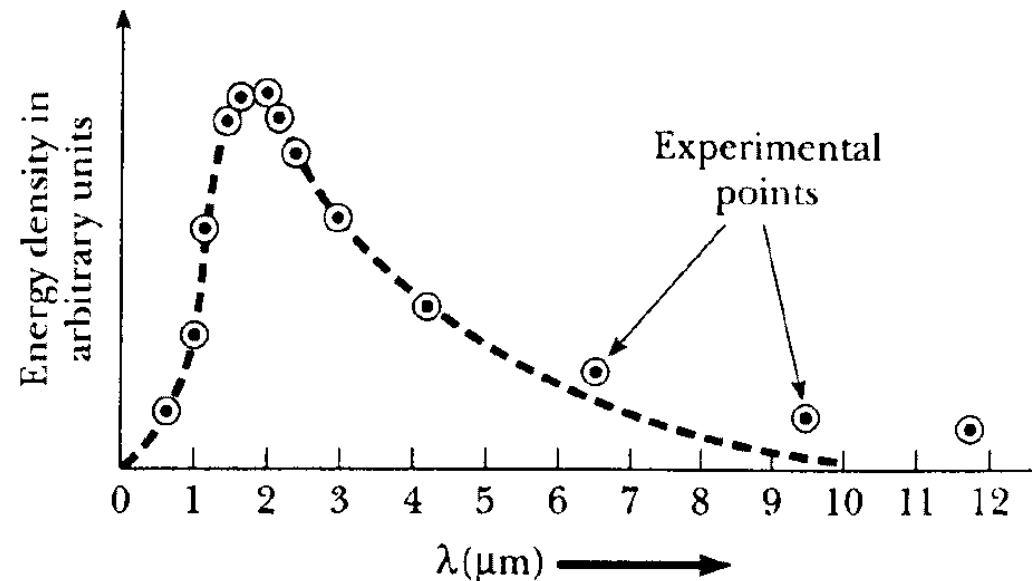
# Radiação de Corpo Negro: *a revolução dos quanta*



Anunciada publicamente  
em 19/10/1900

## Lei de Planck (1900)

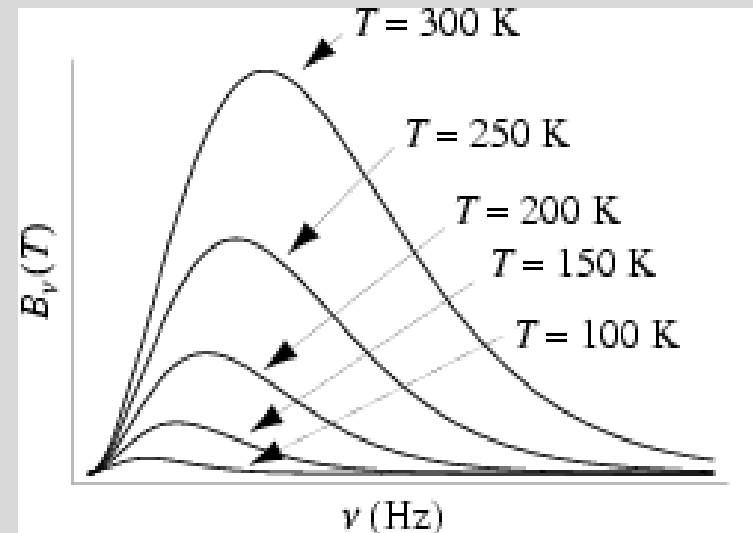
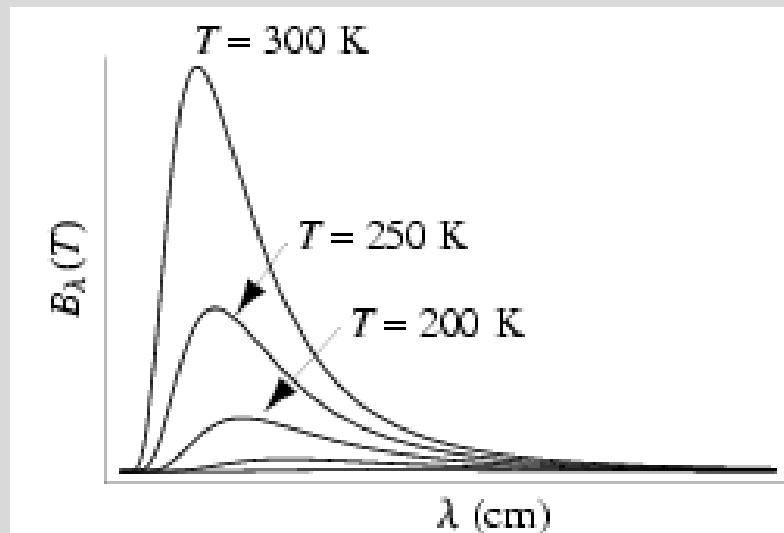
$$\rho(\nu, T) = \frac{8\pi h \nu^3}{c^3} \frac{1}{e^{h\nu/kT} - 1},$$
$$h = 6.63 \times 10^{-27} \text{ erg.s}$$



# Radiação de Corpo Negro: *a revolução dos quanta*

## Lei de Planck (1900)

$$\rho(\nu, T) = \frac{8\pi h \nu^3}{c^3} \frac{1}{e^{h\nu/kT} - 1}$$



em acordo com

- **Stefan-Boltzmann:** radiância total cresce rapidamente com T
- **Lei de Wien:** pico desloca para baixa frequência com T



# Radiação de Corpo Negro: *a revolução dos quanta*

Lei de Planck (1900)

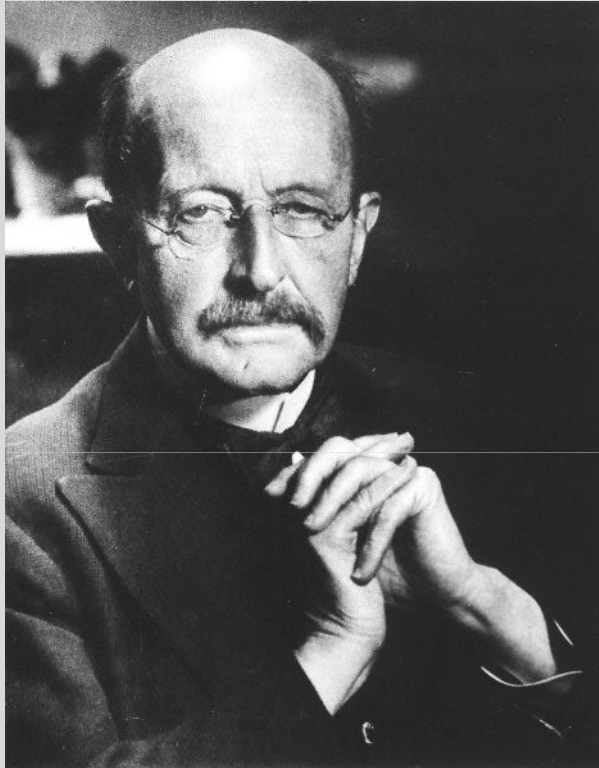
$$\rho(\nu, T) = \frac{8\pi h \nu^3}{c^3} \frac{1}{e^{h\nu/kT} - 1}$$

Para baixas frequências

$$h\nu / kT \ll 1 \rightarrow \rho(\nu, T) = \frac{8\pi \nu^2 kT}{c^3}$$

a teoria de Planck concorda com  
Lei de Rayleigh-Jeans

# *A revolução dos Quanta*



*Planck, 12 de dezembro de 1900:*

Emissão de radiação é feita por pacotes (***quanta***), com energia proporcional à frequência (cor).

$$E = h\nu$$

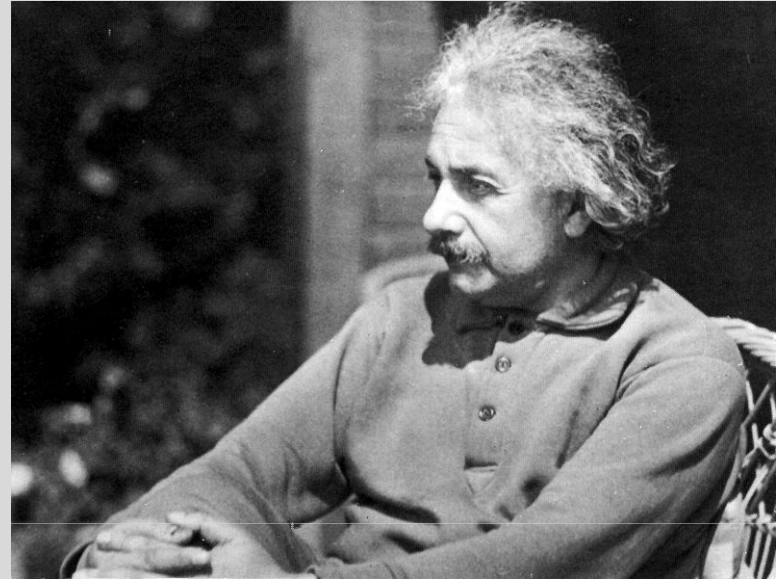


Constante de Planck

# *A revolução dos Quanta*

Einstein (1905)

Argumentos estatísticos:  
Luz comporta-se *como se fosse* constituída de corpúsculos – *fótons*



- Explicação do efeito fotoelétrico
- Prêmio Nobel de Física (1922)

$$E = h\nu$$

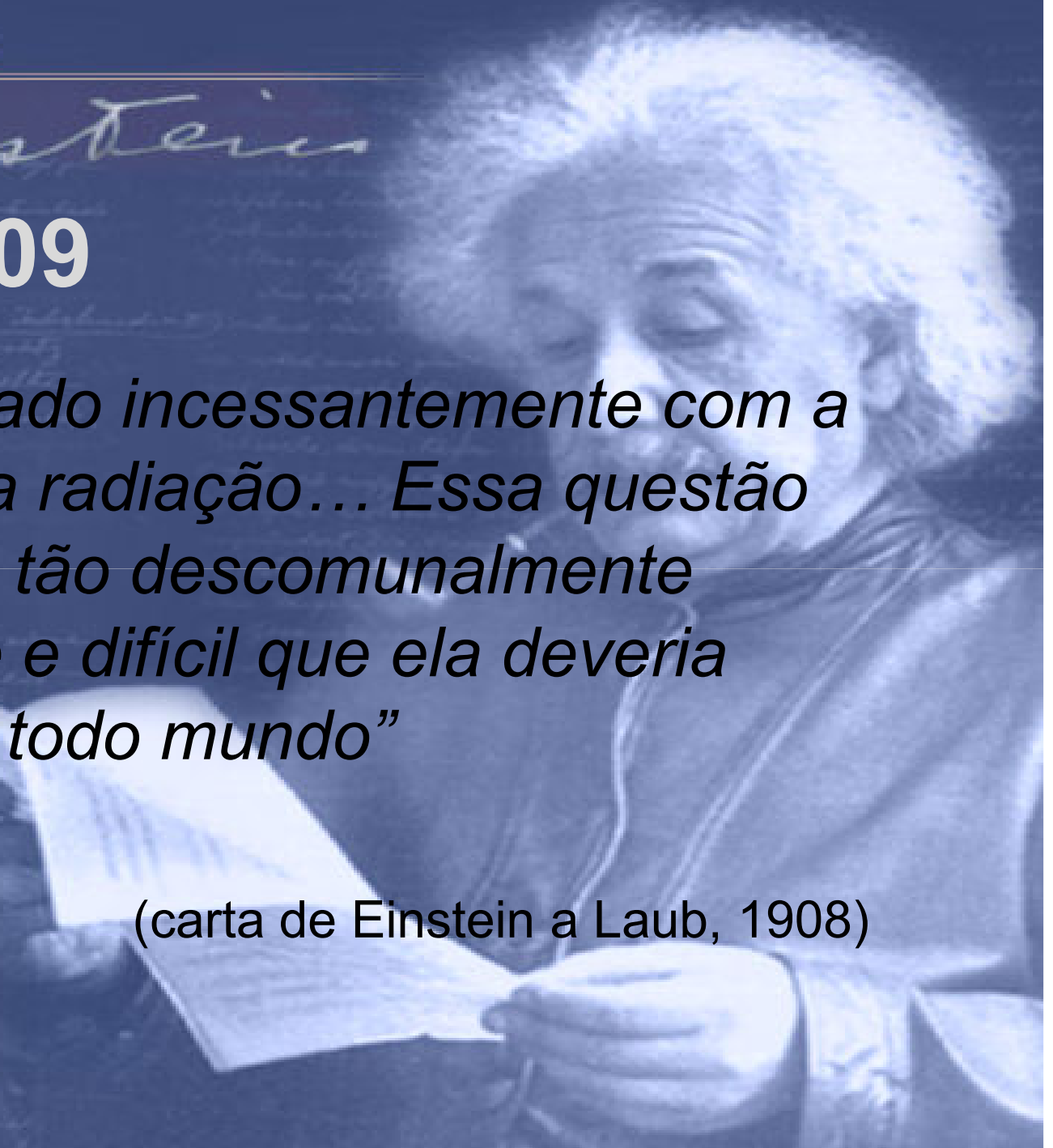
*Nenhuma menção ao momentum do fóton, nem à dualidade onda-partícula!*



## 1906-1909

*“Estou ocupado incessantemente com a questão da radiação... Essa questão quântica é tão descomunalmente importante e difícil que ela deveria preocupar todo mundo”*

(carta de Einstein a Laub, 1908)



## **Silêncio sobre a teoria da luz 1909-1916**

- Manifestação de Einstein no 1º Congresso de Solvay (1911):

*“Insisto no caráter provisório desse conceito [quanta de luz] que não parece ser reconciliável com as conseqüências experimentalmente verificadas da teoria ondulatória”.*

- Proposta indicando Einstein para a Academia de Ciências Prussiana (assinada por Planck, Nerst, Rubens e Warburg), 1913:

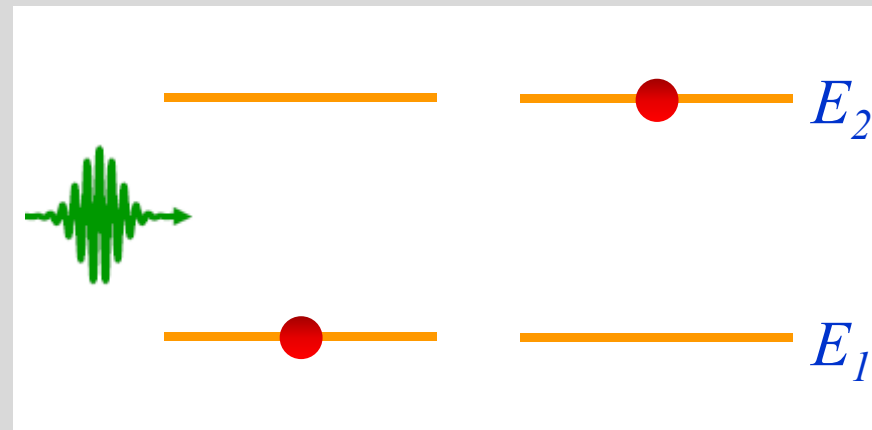
*“Que ele tenha algumas vezes errado o alvo em suas especulações, como por exemplo em sua hipótese dos quanta de luz, não pode realmente ser usado contra ele, pois não é possível introduzir idéias realmente novas mesmo nas ciências mais exatas sem algumas vezes assumir um risco”.*

# Absorção e emissão de radiação 1916-1917

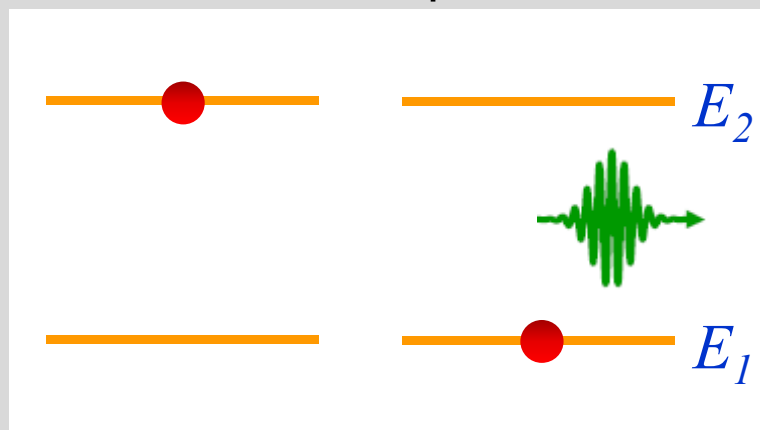
- *“Uma luz esplêndida baixou sobre mim acerca da absorção e emissão de radiação”* (carta a Besso, novembro de 1916)
- Três artigos:
  - Relação entre processos de emissão espontânea, estimulada e absorção
  - Uma nova dedução da lei de Planck, baseada em hipóteses gerais sobre a interação entre a radiação e a matéria
  - Quantum de luz com energia  $h\nu$  carrega momentum  $h\nu/c$

# Absorção, emissão espontânea e estimulada

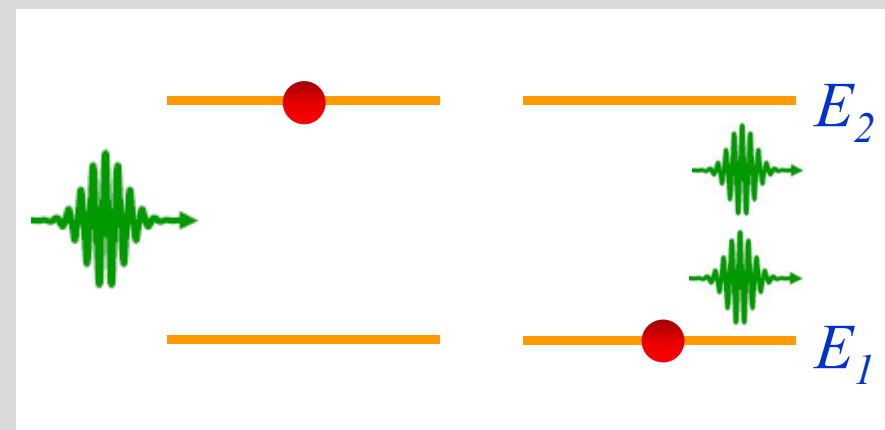
Absorção



Emissão espontânea

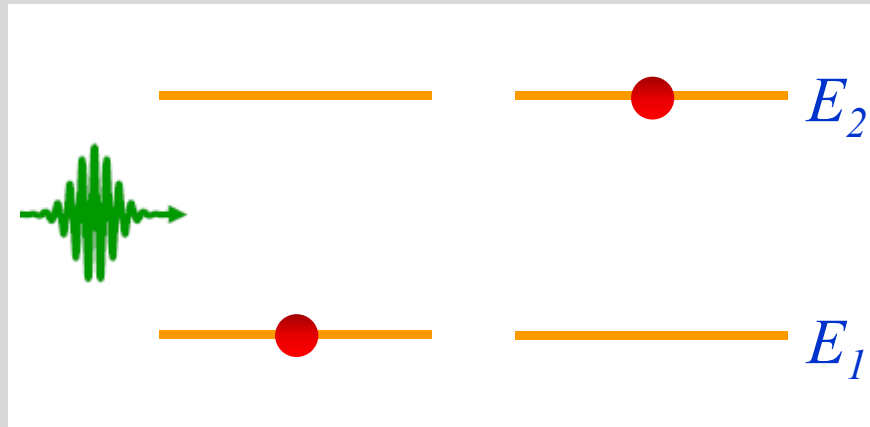


Emissão estimulada





# Absorção

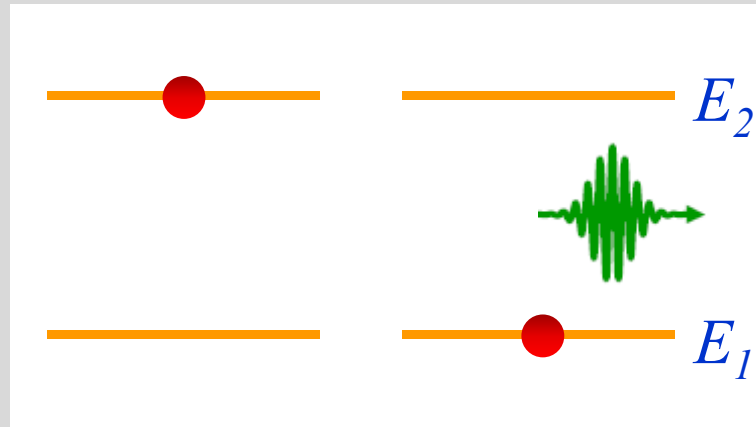


Taxa de transição

$$R_{1 \rightarrow 2} = B_{12} \rho(\nu)$$

Com  $\rho(\nu)$  sendo a densidade de energia da radiação eletromagnética

# Emissão espontânea

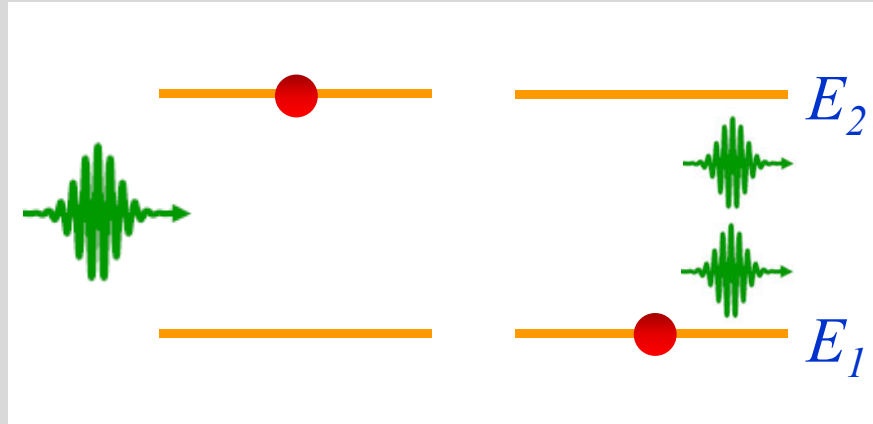


Taxa de emissão espontânea

$$A_{21}$$

não depende de  $\rho(\nu)$ , ou seja, processo não envolve campo

# Emissão estimulada



Taxa de emissão estimulada

$$B_{21}\rho(\nu)$$

depende de  $\rho(\nu)$ , ou seja, do campo presente

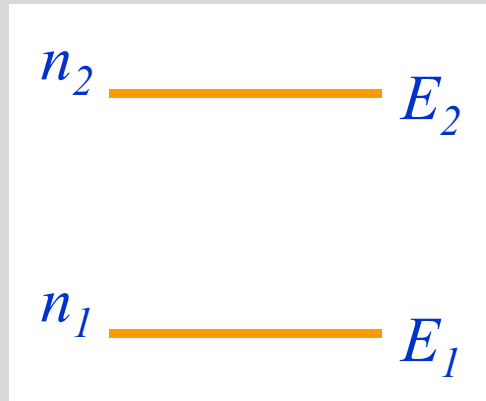
Probabilidade total do átomo transicionar de  $2 \rightarrow 1$

$$R_{2 \rightarrow 1} = A_{21} + B_{21}\rho(\nu)$$

espontânea

estimulada

# Emissão estimulada



Considerando  $n_1$  átomos em  $E_1$  e  $n_2$  átomos em  $E_2$ , em equilíbrio térmico a temperatura  $T$  com o campo da radiação  $\rho(\nu)$

Então, a taxa total de absorção deve ser igual a de emissão

$$n_1 R_{1 \rightarrow 2} = n_2 R_{2 \rightarrow 1}$$

$$n_1 B_{12} \rho(\nu) = n_2 [A_{21} + B_{21} \rho(\nu)]$$

de onde obtemos

$$\rho(\nu) = \frac{\frac{A_{21}}{B_{21}}}{\frac{n_1}{n_2} \frac{B_{12}}{B_{21}} - 1}$$



# Emissão estimulada

Usando o fator de Boltzmann para as populações relativas  $n_1$  e  $n_2$

$$\frac{n_1}{n_2} = e^{(E_2 - E_1)/kT} = e^{h\nu/kT}$$

temos

$$\rho(\nu) = \frac{\frac{A_{21}}{B_{21}}}{\frac{B_{12}}{B_{21}} e^{h\nu/kT} - 1}$$

# Emissão estimulada

Esta equação deve ser consistente com o espectro da radiação de corpo negro (radiação em equilíbrio térmico)

$$\rho(\nu) = \frac{\frac{A_{21}}{B_{21}}}{\frac{B_{12}}{B_{21}} e^{h\nu/kT} - 1}$$

$$\rho(\nu) = \frac{8\pi h\nu^3}{c^3} \left( \frac{1}{e^{h\nu/kT} - 1} \right)$$

De onde concluímos que

$$\frac{B_{12}}{B_{21}} = 1$$

$$\frac{A_{21}}{B_{21}} = \frac{8\pi h\nu^3}{c^3}$$

Coeficientes **A** e **B** de Einstein, obtidos em 1917

# Coeficientes A e B de Einstein

coef. de absorção = coef. de emissão estimulada

$$\frac{B_{12}}{B_{21}} = 1$$

razão entre a emissão espontânea e emissão estimulada

$$\frac{A_{21}}{B_{21}} = \frac{8\pi h\nu^3}{c^3}$$

vai com  $\nu^3$ , ou seja, quanto maior a diferença de energia maior a probabilidade de emissão espontânea em relação a estimulada

# Coeficientes A e B de Einstein

podemos ainda obter

$$\frac{A_{21}}{B_{21}\rho(\nu)} = e^{h\nu/kT} - 1$$

Portanto,

$$h\nu \gg kT$$

- emissão espontânea mais provável que a estimulada  
(transições eletrônicas)

$$h\nu \ll kT$$

- emissão estimulada “predominante”  
ocorre a T ambiente para transições de microondas

# Conceito por trás do LASER

***L*** ight

***A*** mplification by

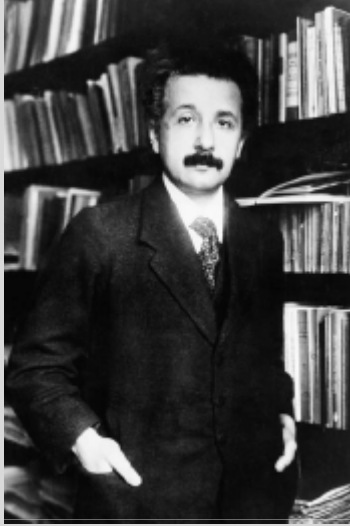
***S*** timulated

***E*** mission of

***R*** adiation



# Conceito por trás do LASER



- Einstein (1917) estabelece dois tipos de emissão  
    espontânea (mais provável)  
    estimulada (muito fraco)

- **Idéia fundamental do LASER**

Mecanismo para fazer a emissão estimulada prevalecer sob a emissão espontânea.



Como conseguir  
fazer isso ?

# Conceito por trás do LASER

- “Quando a luz incide num conjunto de átomos, a emissão e a absorção são igualmente prováveis” (Einstein, 1917)
- Normalmente ocorre absorção pois os átomos se encontram no estado fundamental
- Se conseguirmos ter mais átomos excitados que no nível fundamental ( $n_2 > n_1$ )

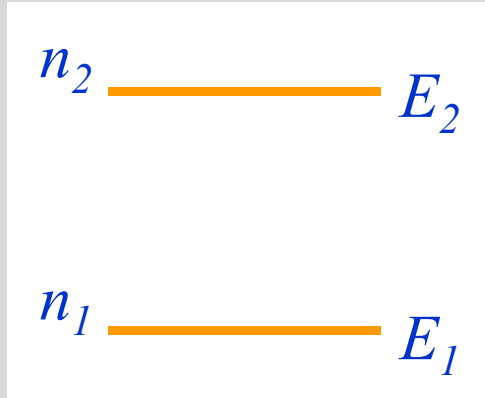
fótons emitidos tem maior probabilidade estimular a emissão do que de serem absorvidos

podemos ter amplificação em vez de absorção

a esta situação denominamos

**Inversão de população**

# Inversão de população

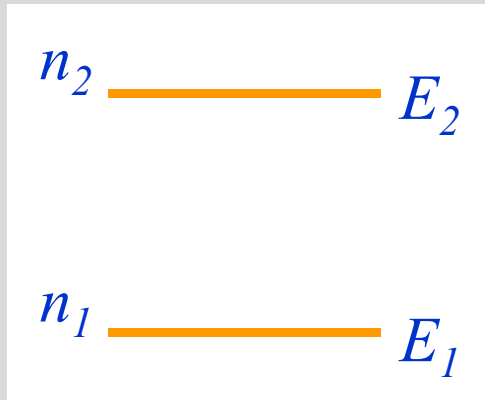


no equilíbrio térmico (Boltzmann)

$$\frac{n_2}{n_1} = e^{-(E_2 - E_1)/kT}$$

Estados de maior energia sempre menos populados que o estado fundamental

# Inversão de população



no equilíbrio térmico (Boltzmann)

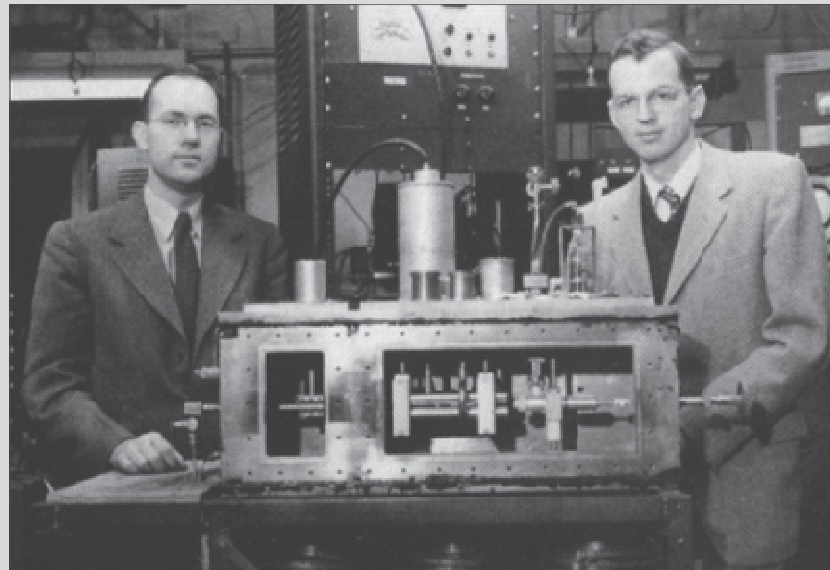
$$\frac{n_2}{n_1} = e^{-(E_2 - E_1)/kT}$$

Estados de maior energia sempre menos populados que o estado fundamental

$n_2 > n_1$  apenas se a T for negativa (???)

## Alguns anos mais tarde...

- Maio de 1952 – Nikolay Basov e Alexander Prokhorov (Instituto Lebedev) descrevem princípio do **MASER** (Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation)
- 1953 – Charles Townes, J. P. Gordon e H. J. Zeiger constroem primeiro maser na Universidade de Colúmbia



## Alguns anos mais tarde...

- 1951 – **V. A. Fabrikant** “*A methods for the application of electromagnetic radiation (ultraviolet, visible, infrared and radio waves)*” patenteado na União Soviética
- 1958 – **C. Townes e Arthur L. Schawlow**, “*Infrared and Optical Masers*”, Physical Review
- 1958 – **Gordon Gould**, definição do termo “LASER”
- 1960 – **Townes e Schawlow**, US patent
- 1960 – **Theodore Maiman**, Invenção do primeiro laser (laser de Rubi)



# A Patente: invenção do LASER

- Gordon Gould, 1957 –  
estudante de doutorado na  
Universidade de Columbia  
(ganhou patente em 1977)
- Arthur Schawlow e Charles  
Townes (1958)



Gould



Schawlow

PHYSICAL REVIEW

VOLUME 112, NUMBER 6

DECEMBER 15, 1958

## Infrared and Optical Masers

A. L. SCHAWLOW AND C. H. TOWNES\*

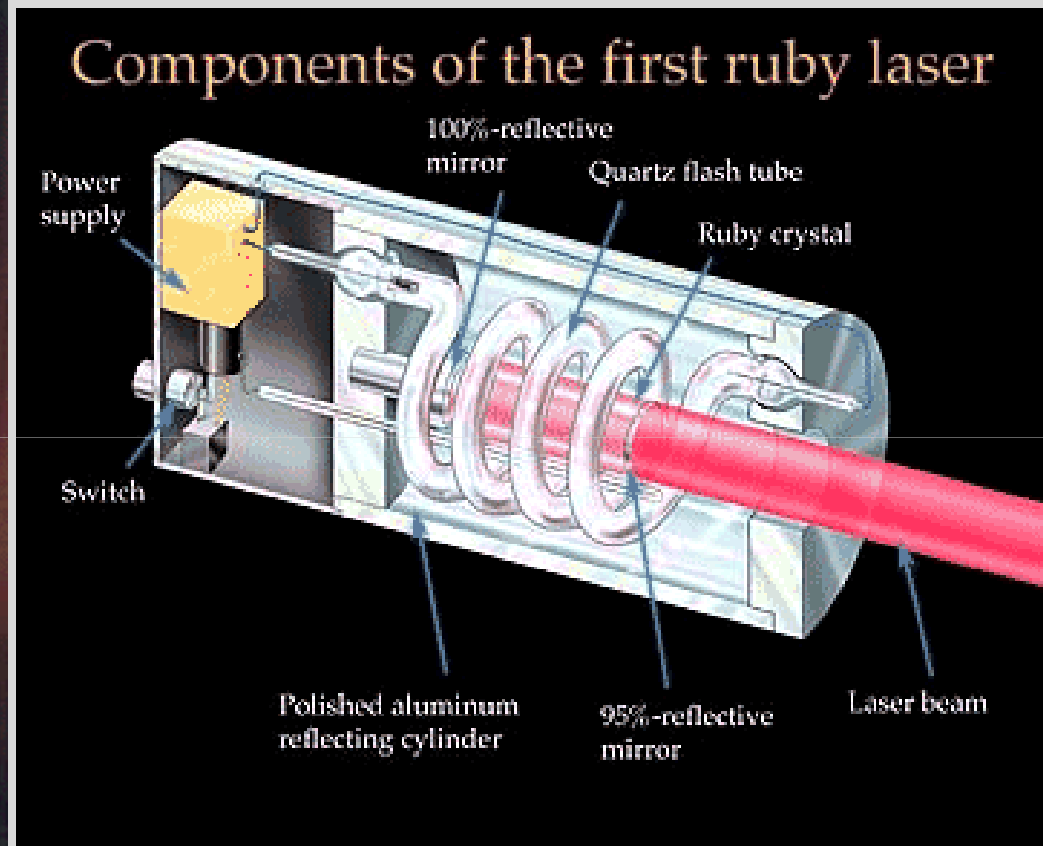
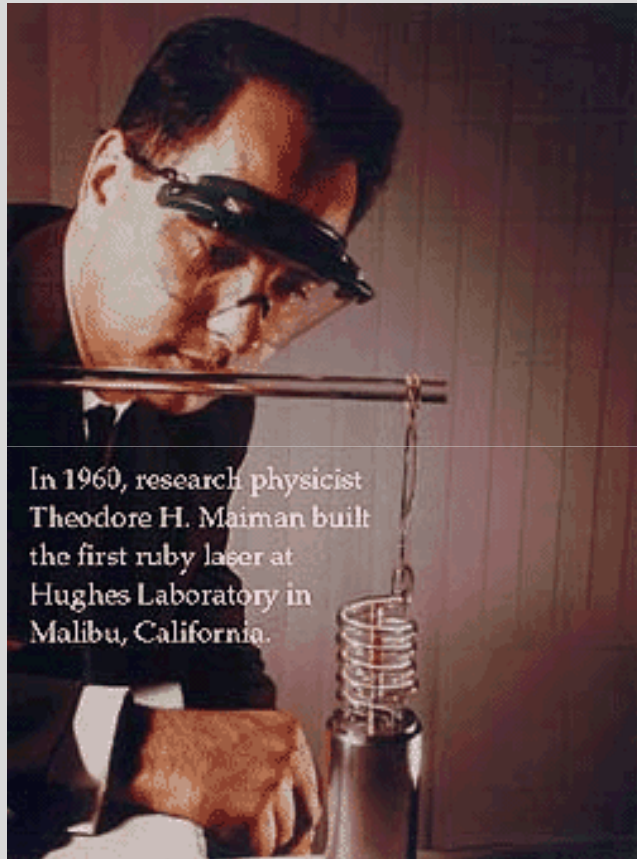
*Bell Telephone Laboratories, Murray Hill, New Jersey*

(Received August 26, 1958)

# Do MASER ao LASER

- Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation
- Dificuldades:
  - Diferença de energia entre níveis na região óptica é muito maior, mais difícil de inverter população
  - Comprimento de onda é muito menor, problemas de precisão na sintonização da cavidade (muitos modos)
  - Razão  $A/B$  é muito maior (pois cresce com  $\nu^3$ ): emissão espontânea é mais importante

# O primeiro LASER, Maiman 1960



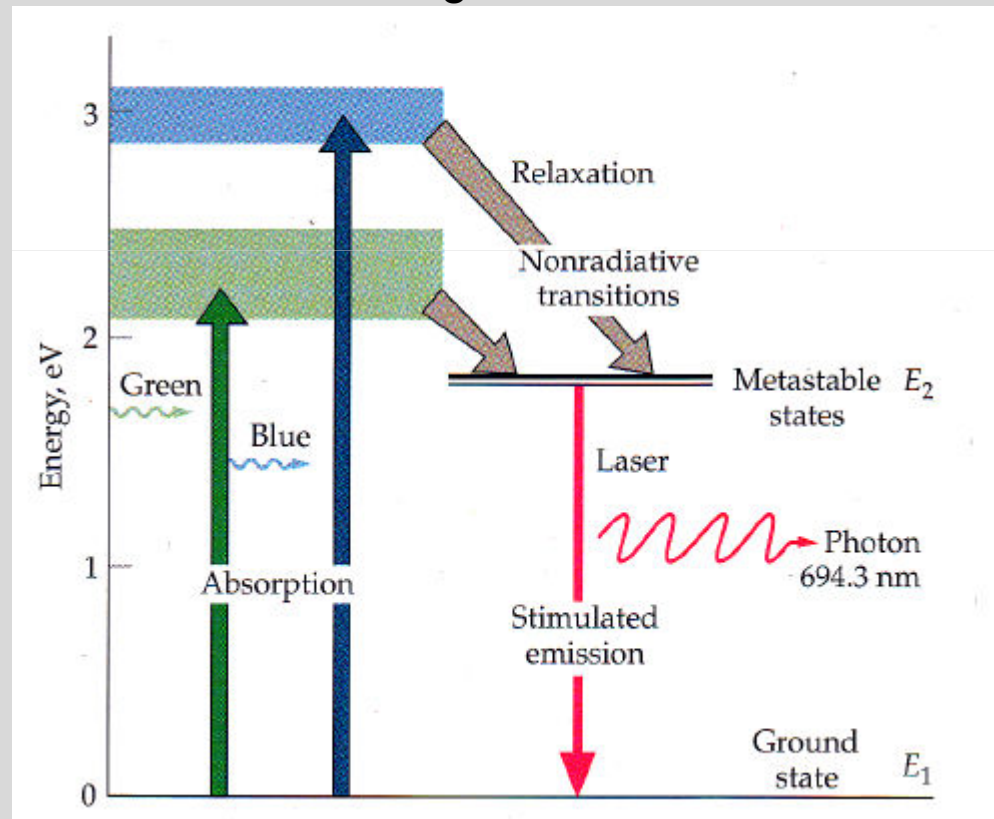
T. H. Maiman, Nature. 187, 493, 1960

# O truque de Maiman

Como inverter a população ?

Sistema de 3 níveis de energia para desvincular absorção da emissão estimulada

níveis energia do  $\text{Cr}^{+3}$  no rubi



Sistema fora do equilíbrio (mantido pela excitação)



# Prêmio Nobel de Física de 1964



Charles Hard  
Townes



Nicolai Basov

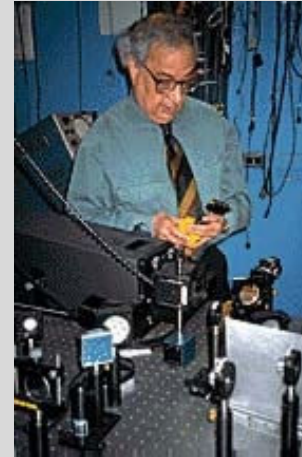


Mikhailovich  
Prokhorov

"for fundamental work in the field of quantum electronics, which has led to the construction of oscillators and amplifiers based on the maser-laser principle"

# Desenvolvimento rápido

- Fevereiro de 1961, Ali Javan (MIT): Laser contínuo de He-Ne
- 1962, Robert Hall (GE): Laser de semicondutor
- 1964, Kumar Patel (Bell Labs): laser de CO<sub>2</sub>
- 1966, Sorokin e Lankard, Schäfer et al.: lasers de corantes (sintonizáveis)



Javan



Hall



Patel





# Prêmio Nobel de Física de 1981



Nicolaas  
Bloembergen



Arthur Leonard  
Schawlow

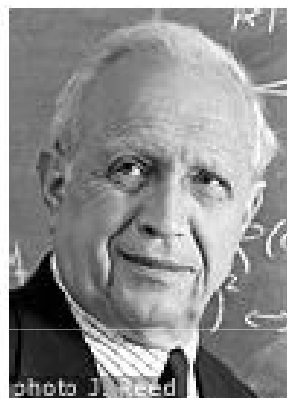


Kai M. Siegbahn

The Nobel Prize in Physics 1981 was divided, one half jointly to Nicolaas Bloembergen and Arthur Leonard Schawlow *"for their contribution to the development of laser spectroscopy"* and the other half to Kai M. Siegbahn *"for his contribution to the development of high-resolution electron spectroscopy"*.



# Prêmio Nobel de Física de 2005

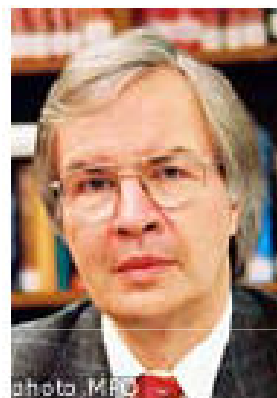


**Roy J.  
Glauber**

"for his contribution to the quantum theory of optical coherence"



**John L. Hall**

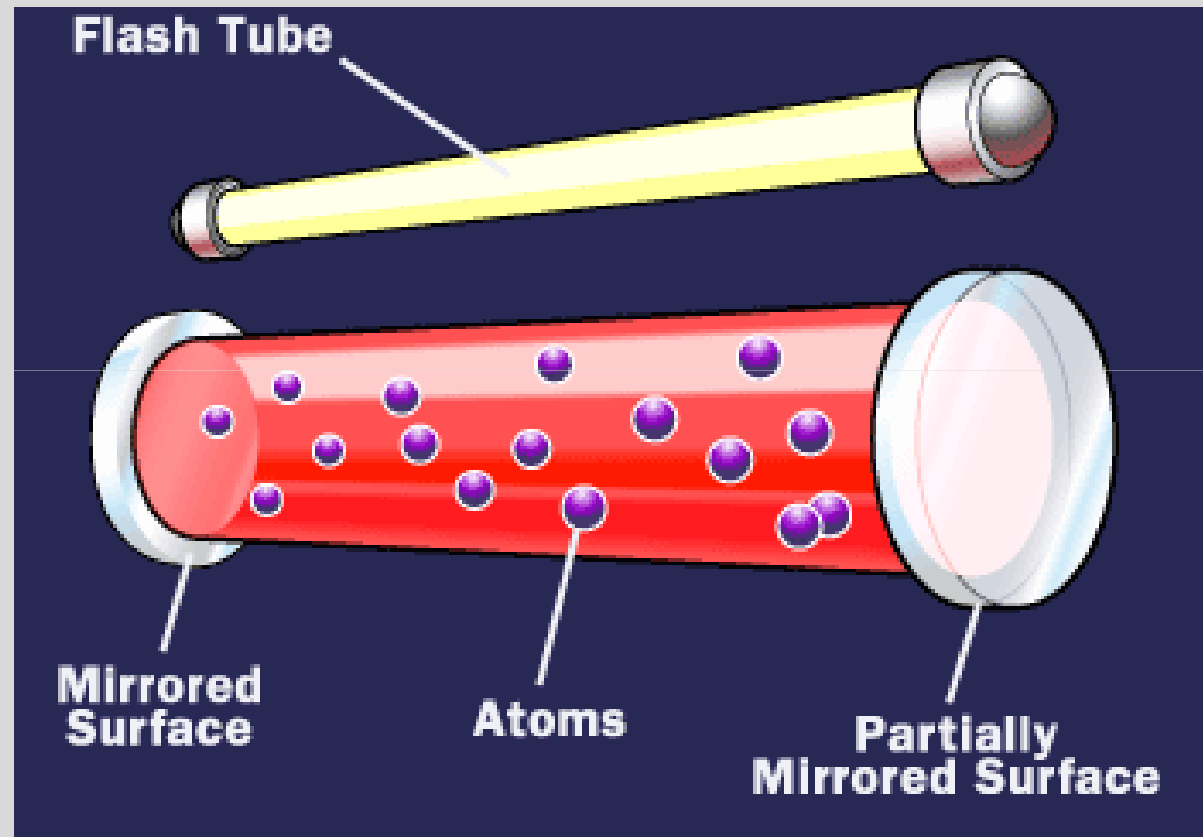


**Theodor W.  
Hänsch**

"for their contributions to the development of laser-based precision spectroscopy, including the optical frequency comb technique"

# O LASER

descrição geral de um laser

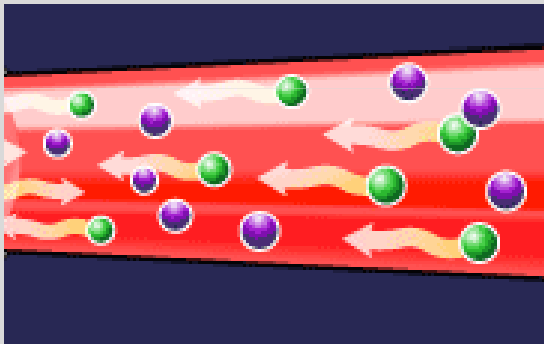


Excitação  
Espelhos  
Meio ativo

# O LASER

## COMPONENTES FUNDAMENTAIS:

1) meio ativo:



Sólido: rubi, semicondutor, Nd:YAG,  
Ti:Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, esmeralda e outros

Líquido: corante orgânico

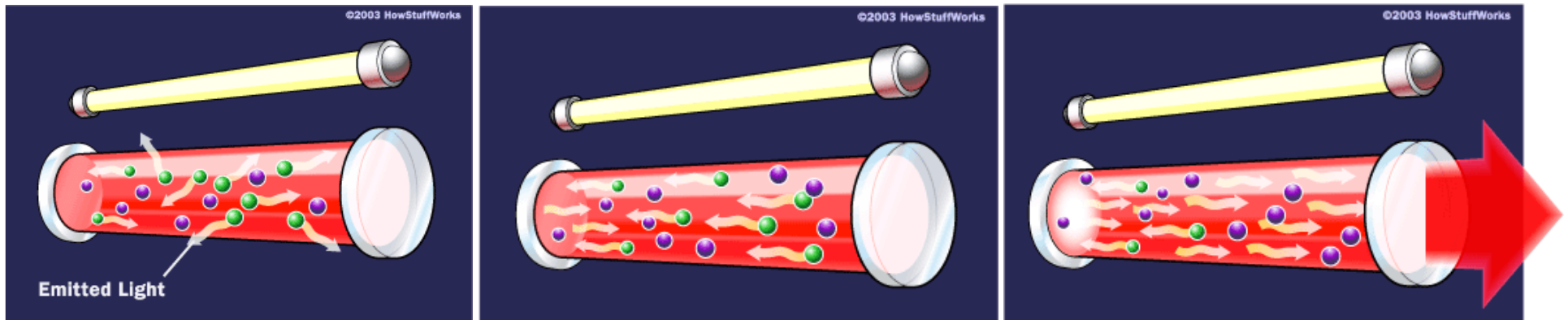
Gasoso: He-Ne, argônio, CO<sub>2</sub>, etc.

# O LASER

## COMPONENTES FUNDAMENTAIS:

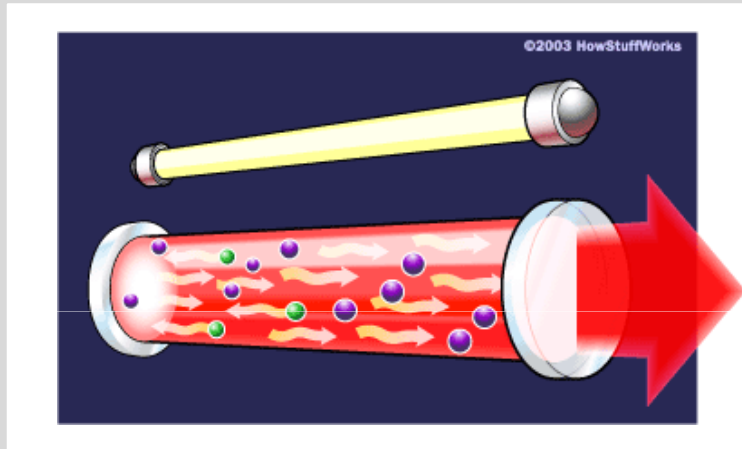
2) luz - dá origem à emissão estimulada

3) cavidade ressonante - aumenta a intensidade de luz dentro da cavidade => aumenta a emissão estimulada



# O LASER

## Princípio de funcionamento e propriedades



Se não existir cavidade : emissão espontânea => luminescência:

- a) emissão em todas as direções
- b) ausência de coerência

Com a cavidade : emissão estimulada

- a) colimação
- b) coerência

# Tipos de laser

**MEIO ATIVO:** *qual material será sujeito a excitação e emitirá radiação*

**TIPO DE EXCITAÇÃO:** *como a excitação é feita*



# Tipos de laser

Meios ativos

**Gasoso**

**Sólido**

**Líquido**

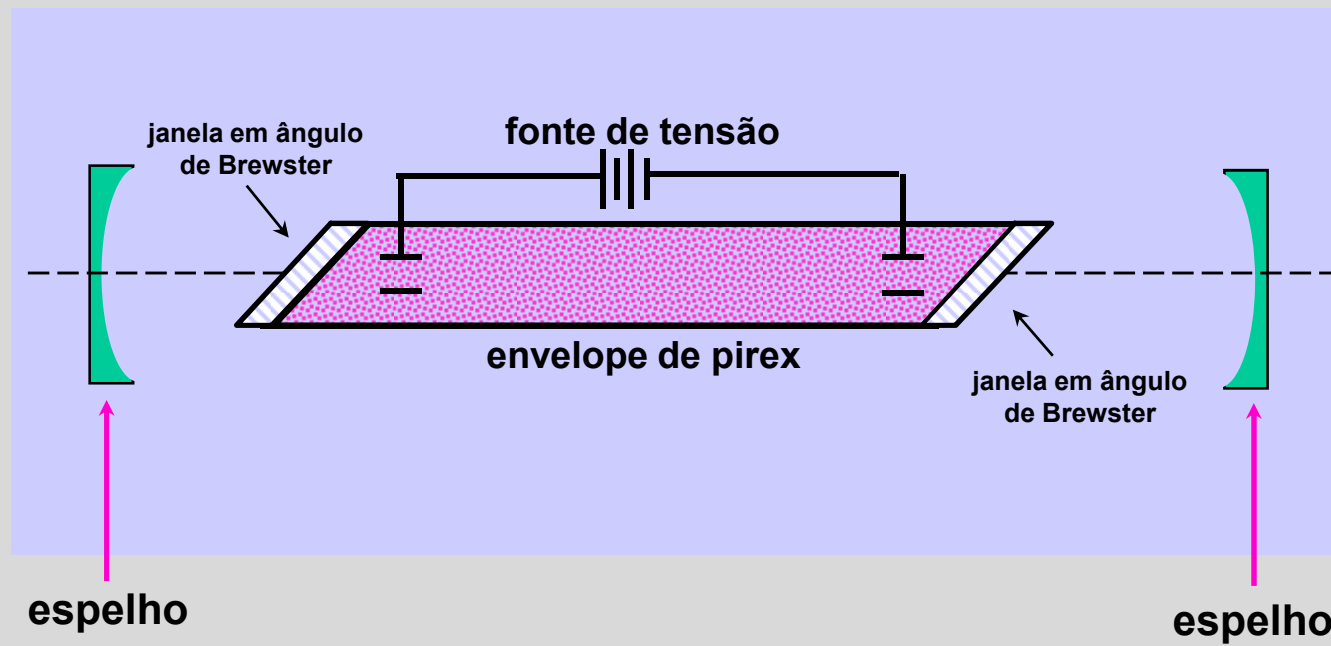
He-Ne  
CO<sub>2</sub>  
Nitrogênio

Rubi  
Nd:YAG  
Ti:Safira  
Semicondutor

Corantes

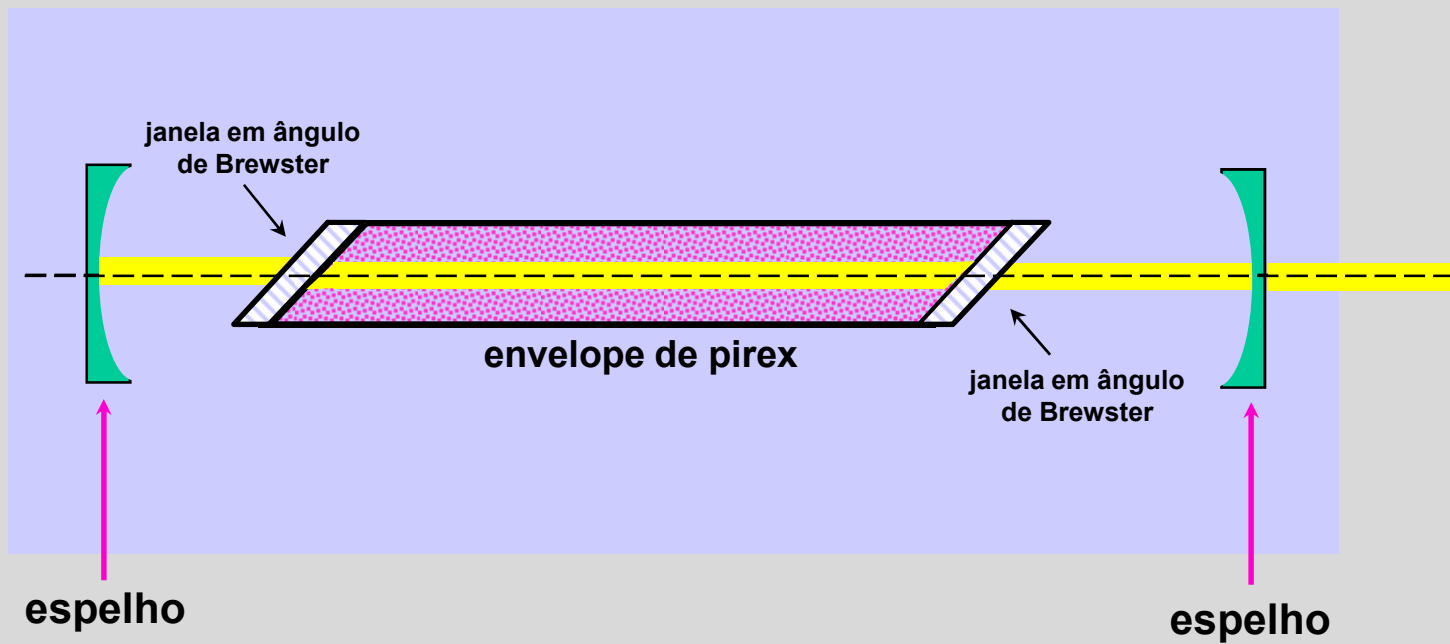
# Tipos de laser

laser com excitação por corrente elétrica



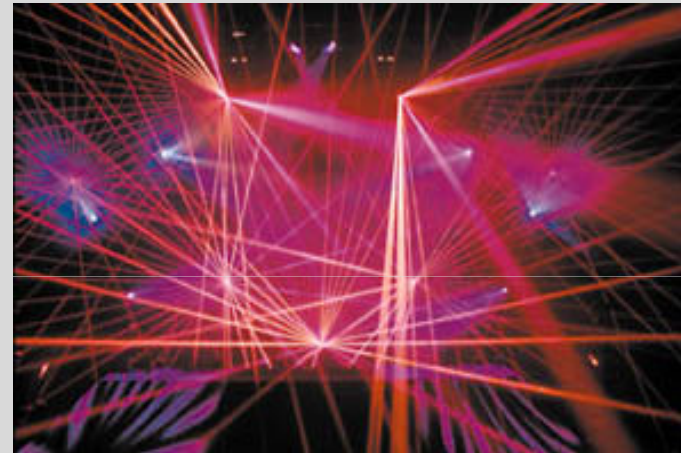
# Tipos de laser

laser com excitação óptica



# Características da luz do laser

- Alta monocromaticidade
- Direcionalidade
- Intensidade
- Coerência
- Sintonização



## Um longo caminho...

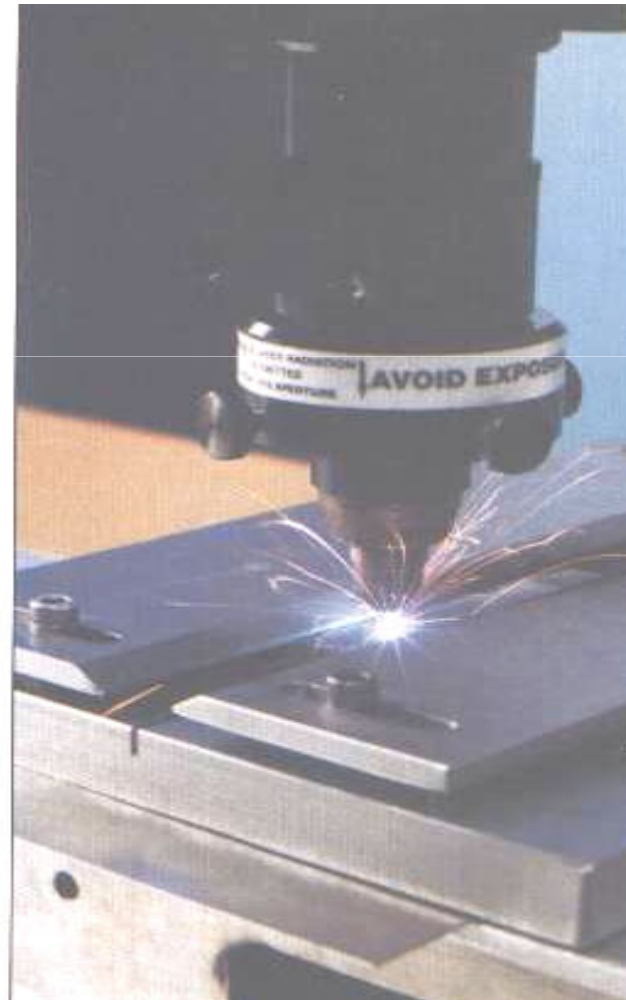
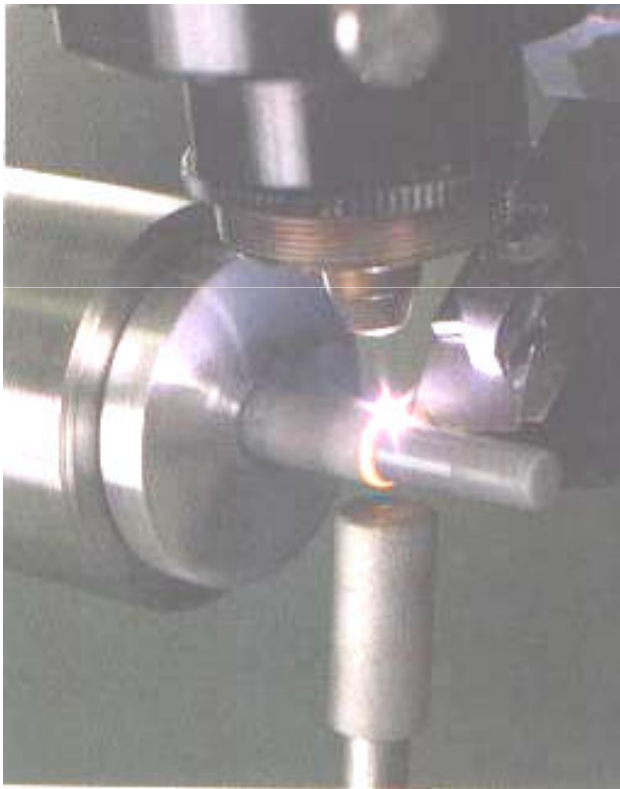
- Início da década de 1960: laser era considerado “uma solução em busca de um problema”
- Aplicações: telemetria, corte de materiais, medicina, CD's e DVD's, comunicações, circuitos impressos, padrões de tempo
- Pesquisa básica: óptica não linear, espectroscopia de alta resolução, pinças óticas, esfriamento e armadilhas de átomos, etc
- Novos desenvolvimentos: lasers de raio X, pulsos ultra curtos, etc

# **Aplicações do LASER**

- 1) Uso industrial**
- 2) Área médica**
- 3) Uso militar**

# Aplicações Industriais

## a) Corte de materiais



# Aplicações Industriais

## a) Corte de materiais

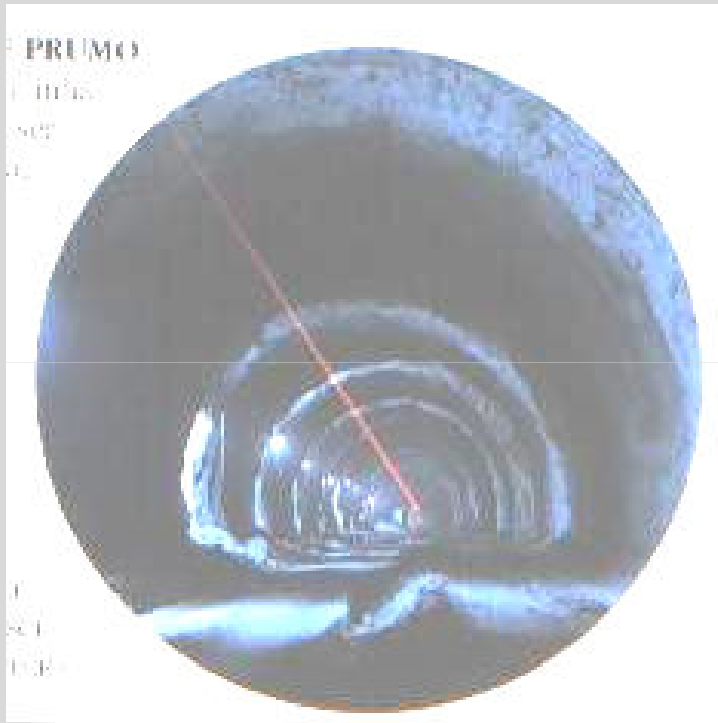




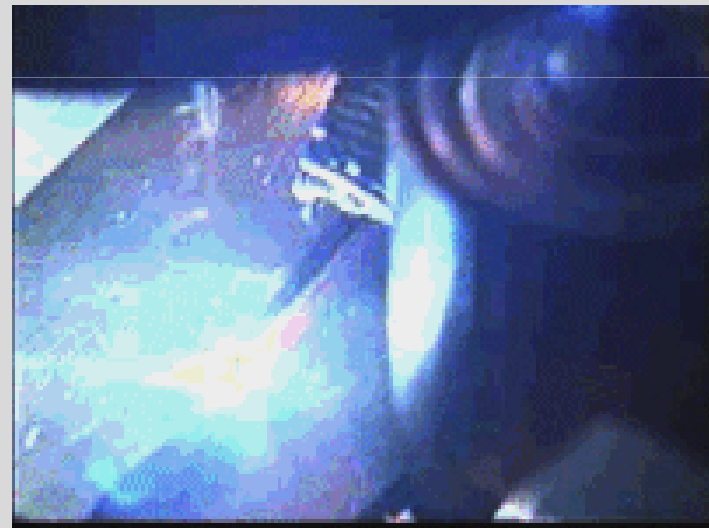


# Aplicações Industriais

## c) Alinhamento

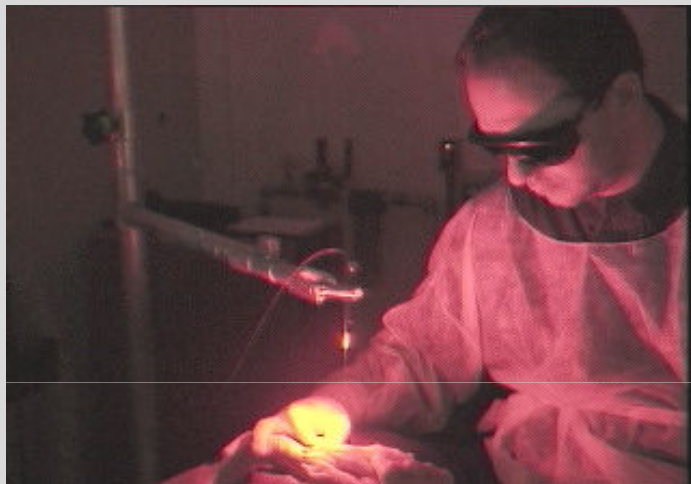


## d) Solda



# Aplicações Médicas e Odontológicas

## a) Medicina



# Laser em Medicina e Odontologia

## ***Odontologia***

- *Laser de Alta Potência*
- *Laser de Baixa*
- *Materiais dentários*

## ***Medicina***

- *Tratamento de câncer*
- *Renegação hepática*



# Laser de Baixa Potência



Aplicação do laser 660 nm



Lesão inicial - 40 dias



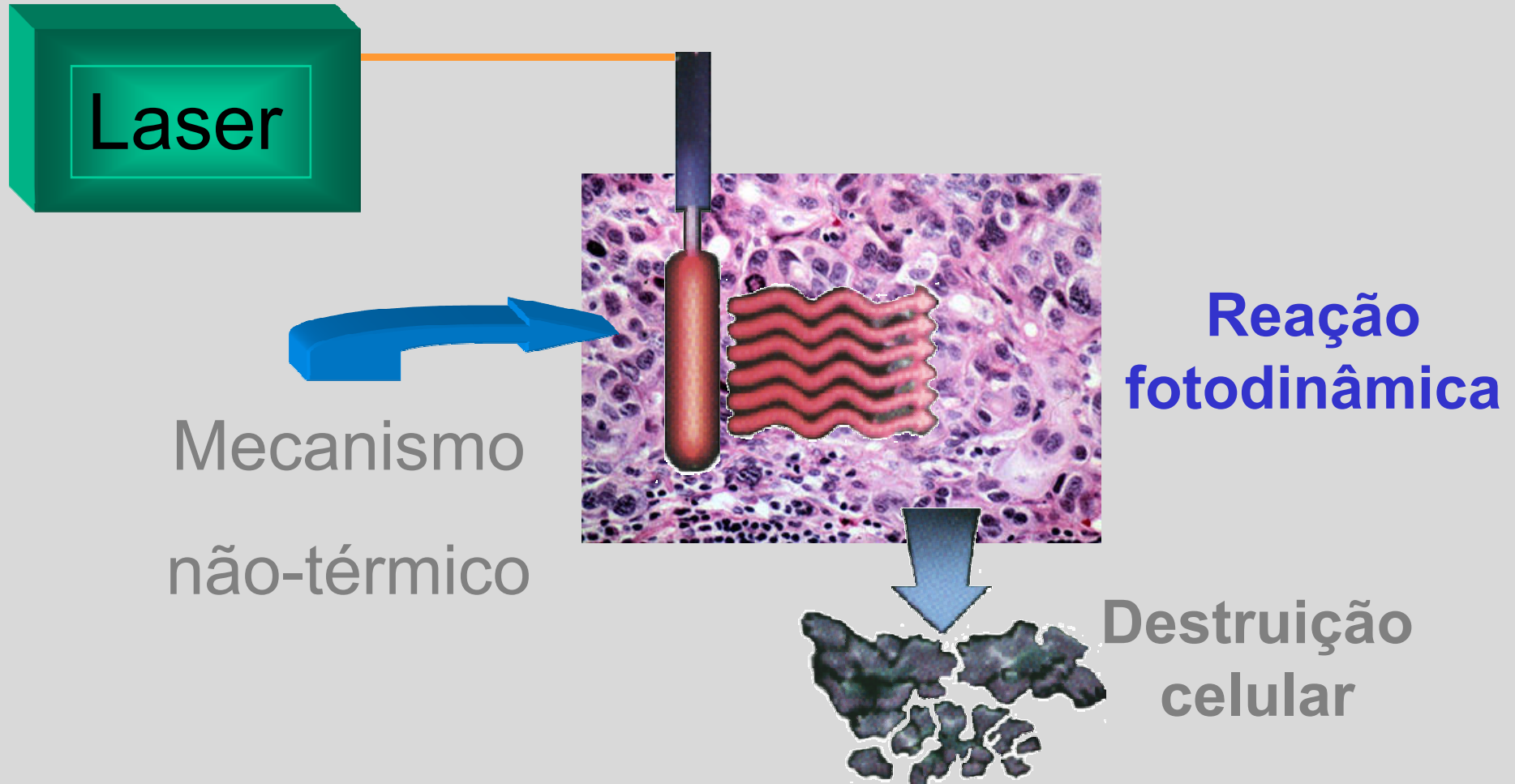
19 dias após a 1ª aplicação

# Terapia Fotodinâmica

Tratamento de tumores malignos usando conjunção de droga com luz laser



# Terapia Fotodinâmica



# Aplicações Médicas

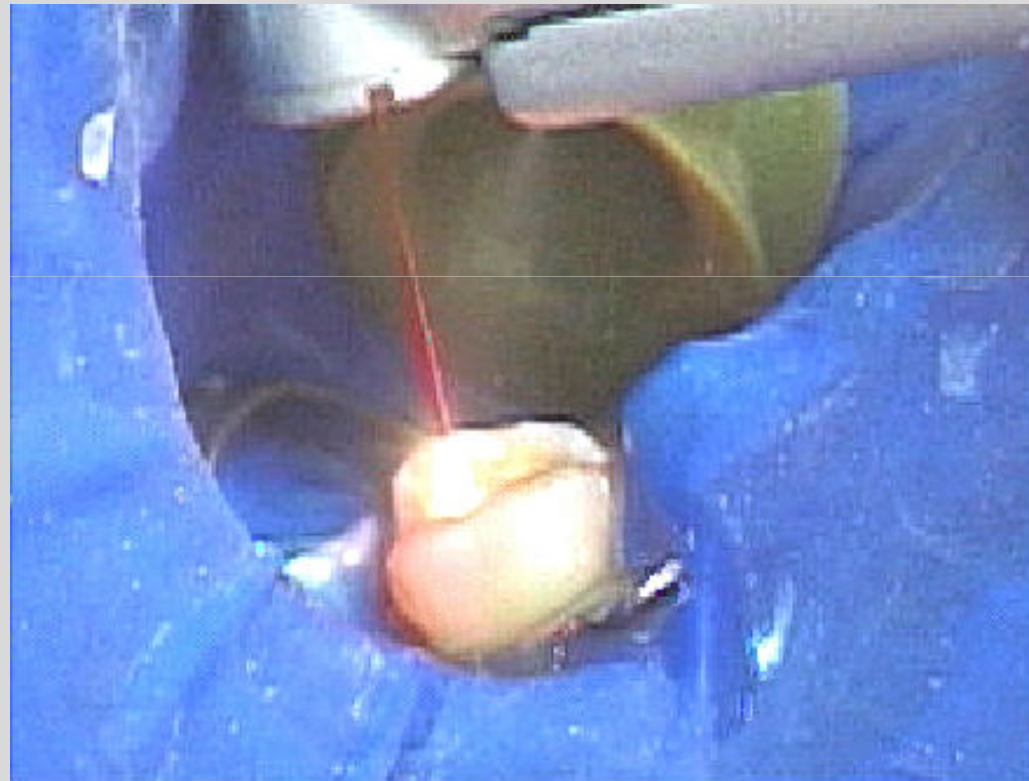
## Oftalmologia





# Aplicações Médicas

## Odontologia



# Laser de Alta Potência

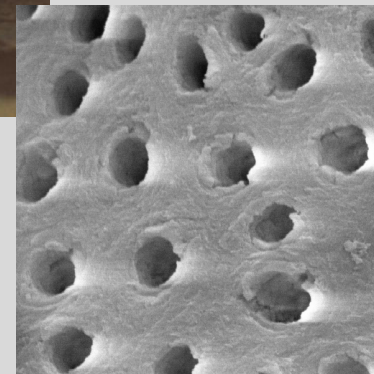
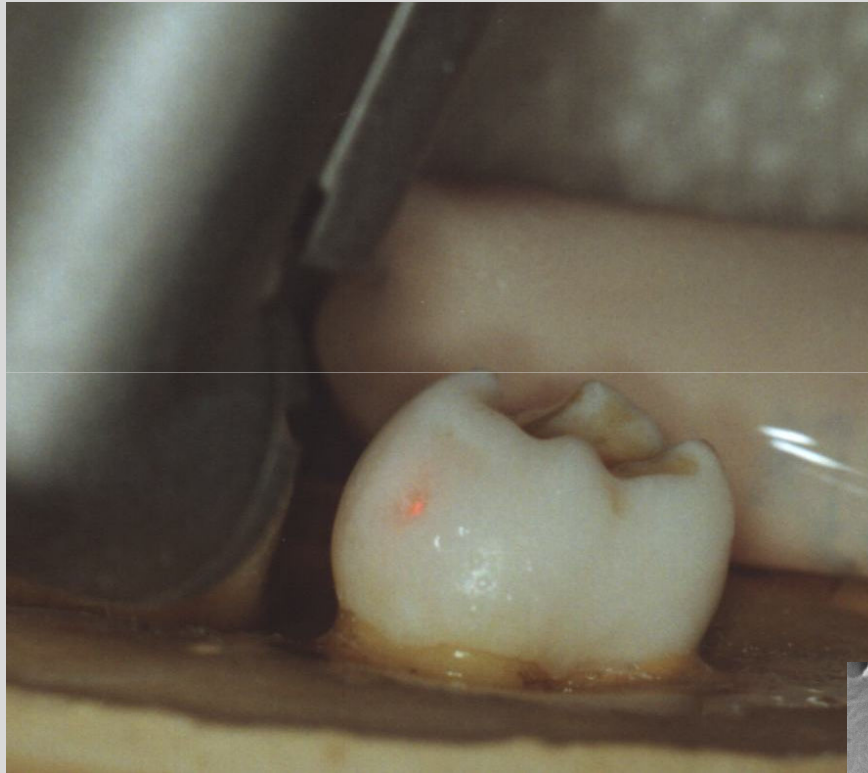


- Remoção de tecido cariado
- Remoção de pigmentação melânica racial

Laser de Nd:YAG  
Er:YAG

# ***Remoção de tecido cariado***

Laser de Er:YAG

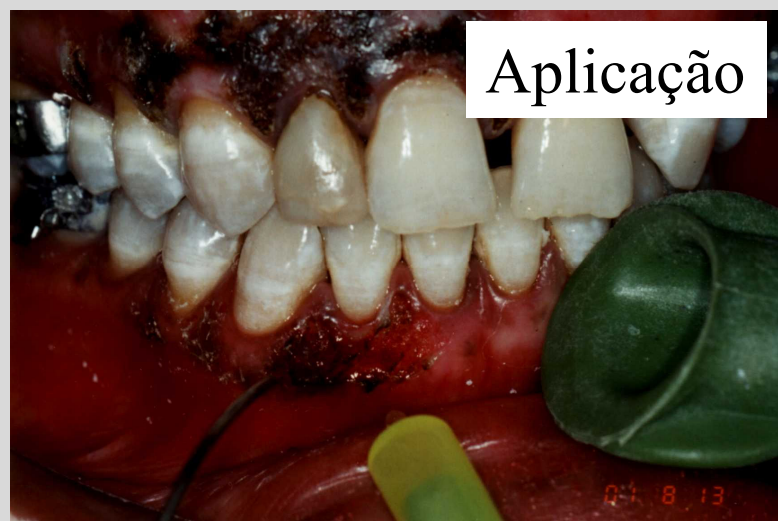


# Remoção de pigmentação melânica



Laser de CO<sub>2</sub>

Laser de Nd:YAG



# Aplicações Militares

## Mira laser





# Aplicações Militares

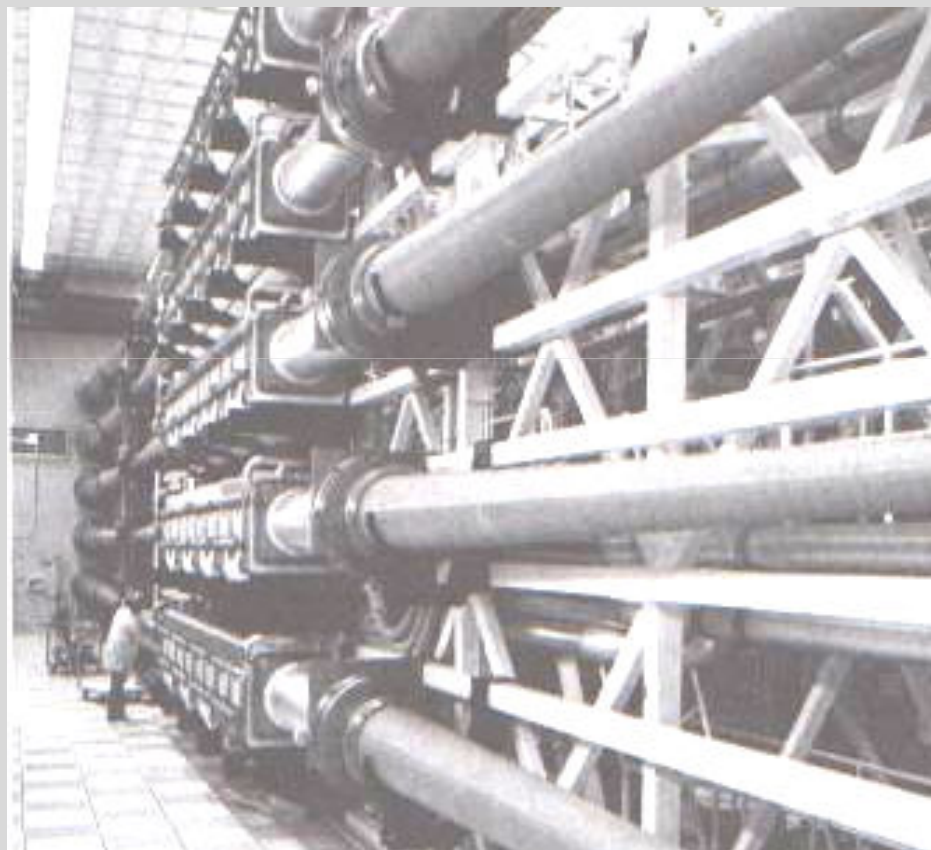
Star war



Guia de míssel

# Outras Aplicações

## Energia



# Outras Aplicações

## Monitoramento de poluição





# Outras Aplicações

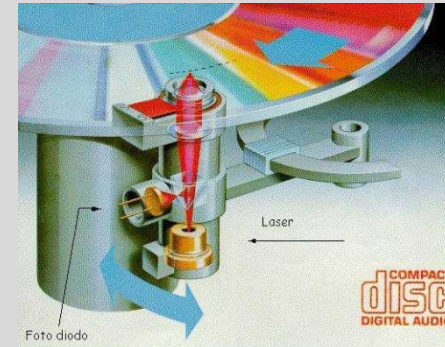
## Comunicações ópticas



# Aplicações

**Ainda mais....**

CD player



Leitor de código de barras



**Leitor de código  
de barras**

Paquímetro a laser

Sensor de distância

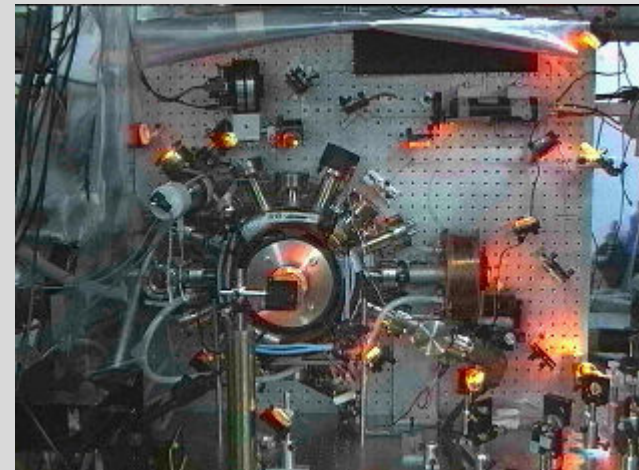
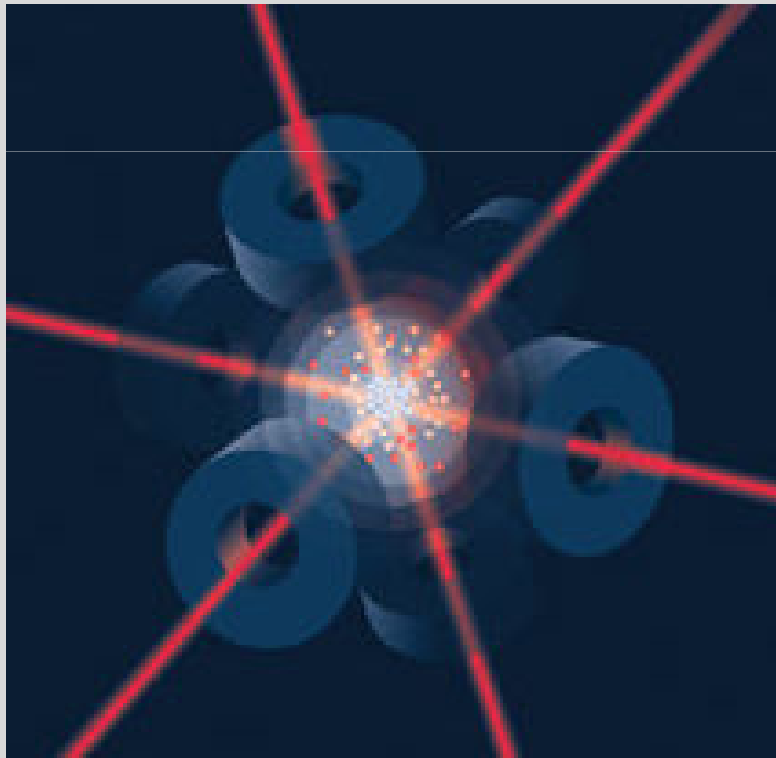
Laser pointer



# Física Atômica e Molecular

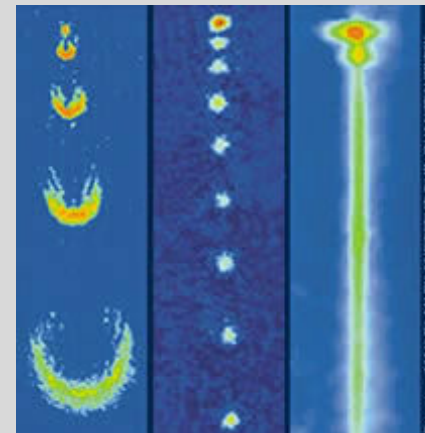
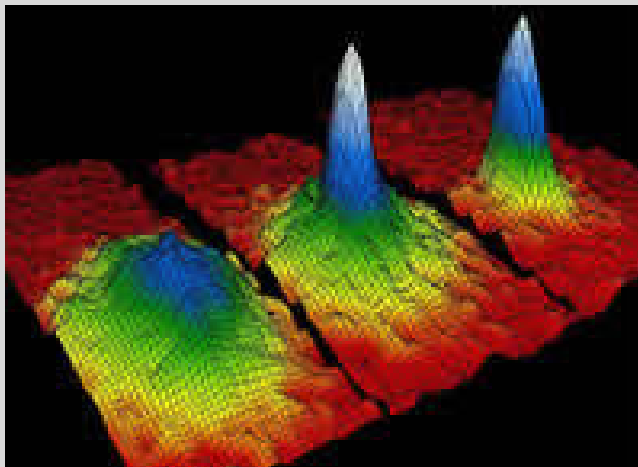
Pesquisa básica em escala atômica, investigando a física de gases diluídos Bose-condensados, interações átomo-átomo na presença de campos ópticos, espectroscopia de altíssima resolução e tópicos relacionados.

## Aprisionamento de átomos

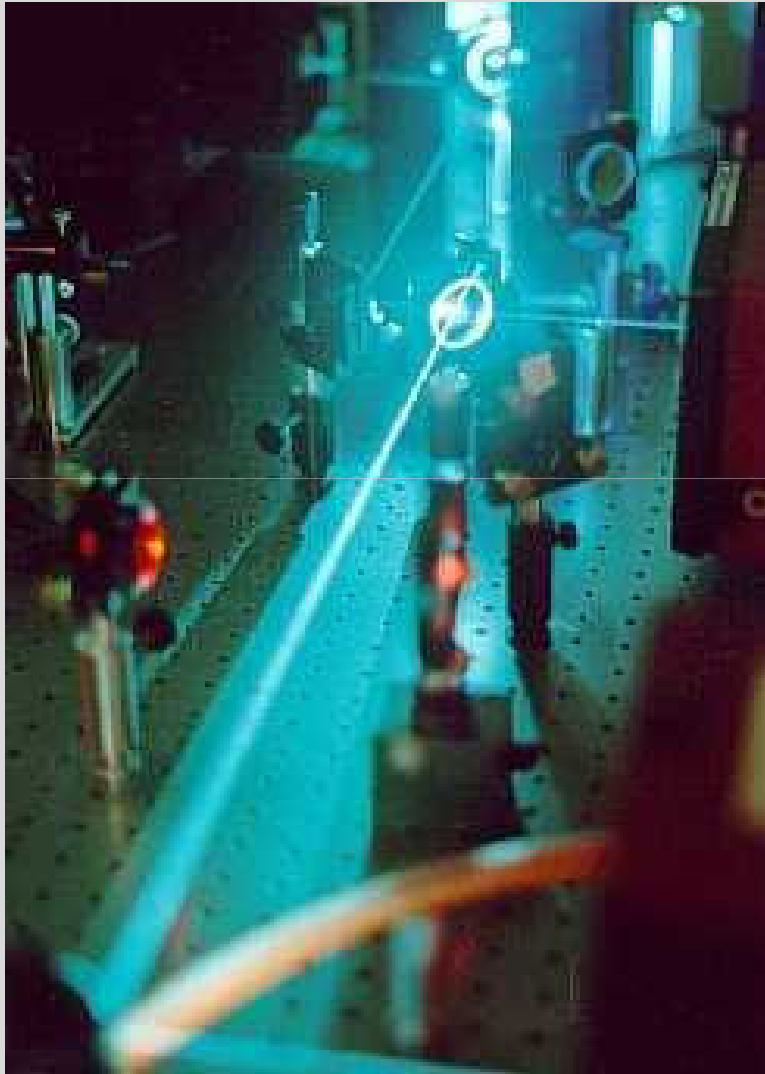


# Física Atômica e Molecular

## Condensação de Bose - Einstein



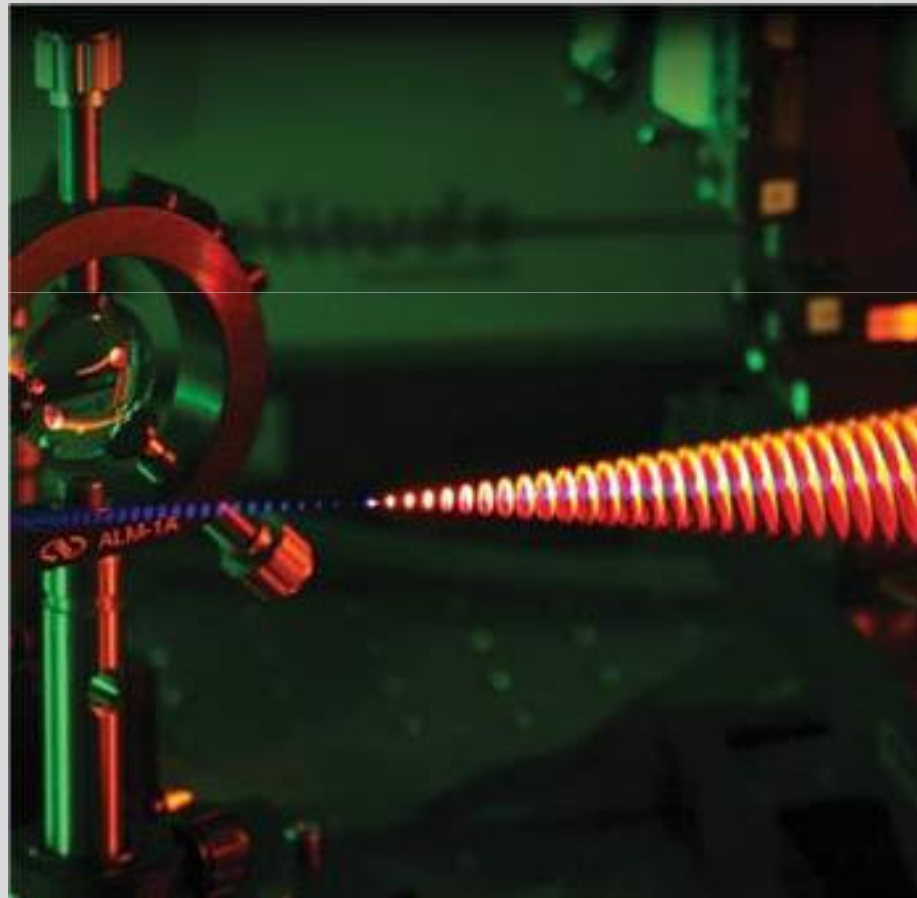
# Óptica Não-Linear



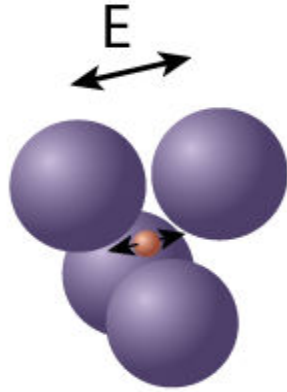
- *Estudar novos processos ópticos em materiais, processos estes que são não convencionais.*

# Óptica Não-Linear

Pulsos laser ultracurtos e de altas intensidades



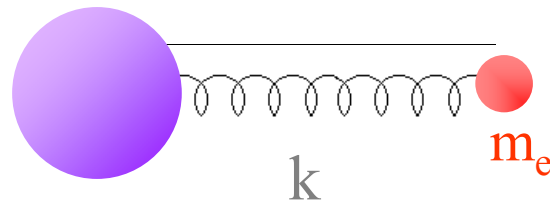
# Óptica Linear



oscilador harmônico

$$E_{\text{rad.}} \ll E_{\text{inter.}}$$

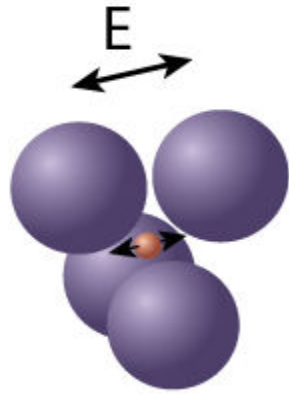
eletron num sistema massa-mola



frequencia de oscilação

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m_e}}$$

# Óptica Linear



oscilador harmônico

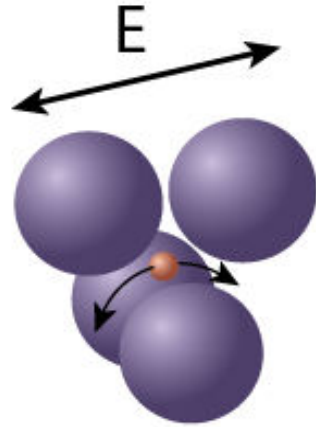
$$E_{\text{rad.}} \ll E_{\text{inter.}}$$

resposta linear

$$P = \chi E$$



# Óptica Não-Linear



altas intensidades luminosas

$$E_{\text{rad.}} \sim E_{\text{inter.}}$$

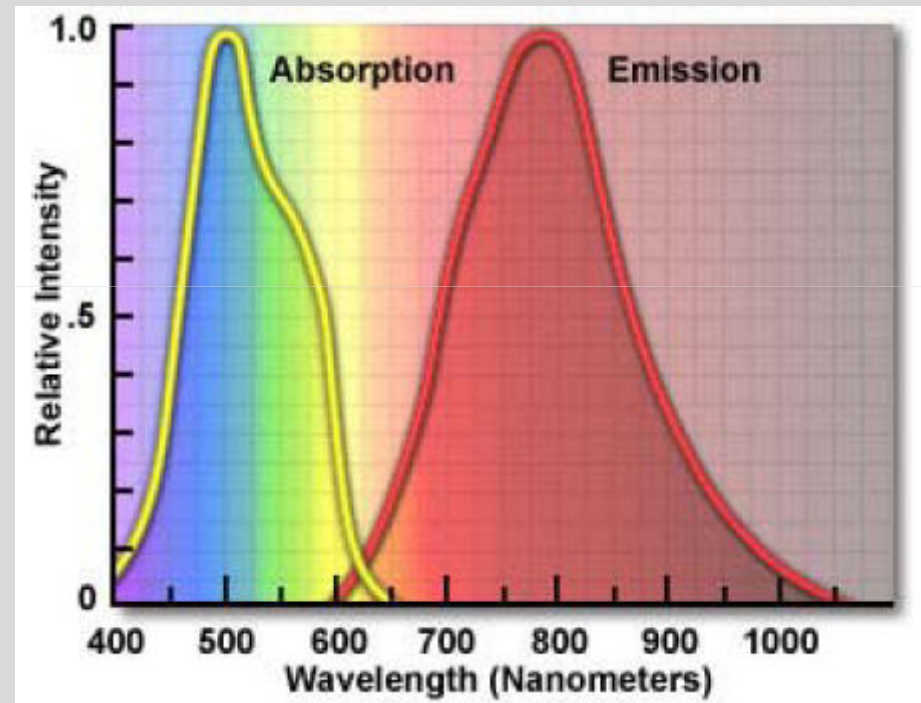
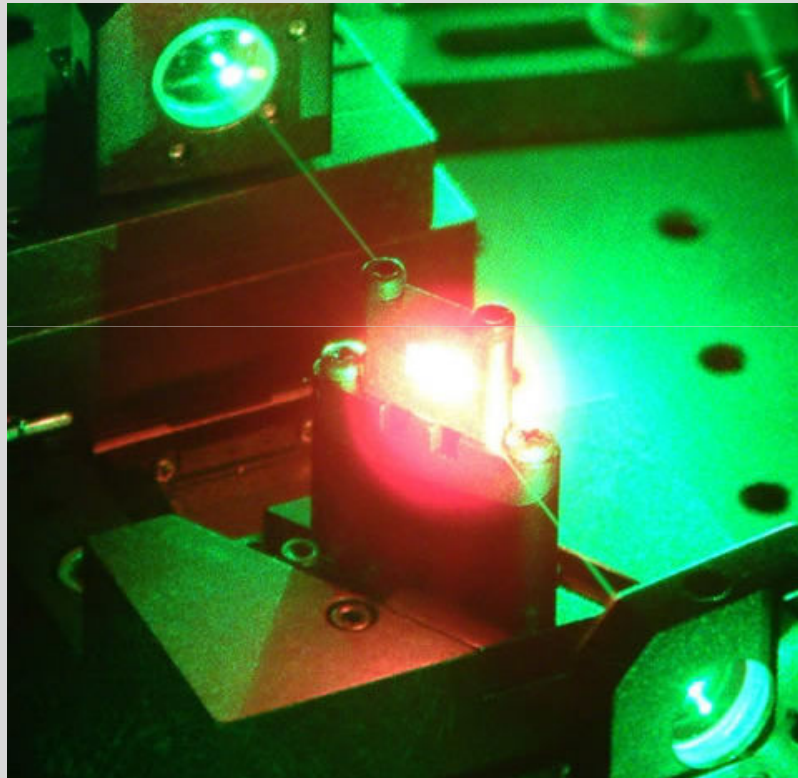
oscilador não harmônico

resposta não linear

$$P = \chi^{(1)} E + \chi^{(2)} E^2 + \chi^{(3)} E^3 + \dots$$

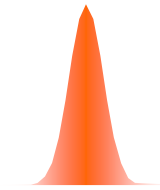
# Pulsos ultracurtos

cristal Ti:safira



# Pulsos ultracurtos

Lasers de Ti:Safira



100 fs



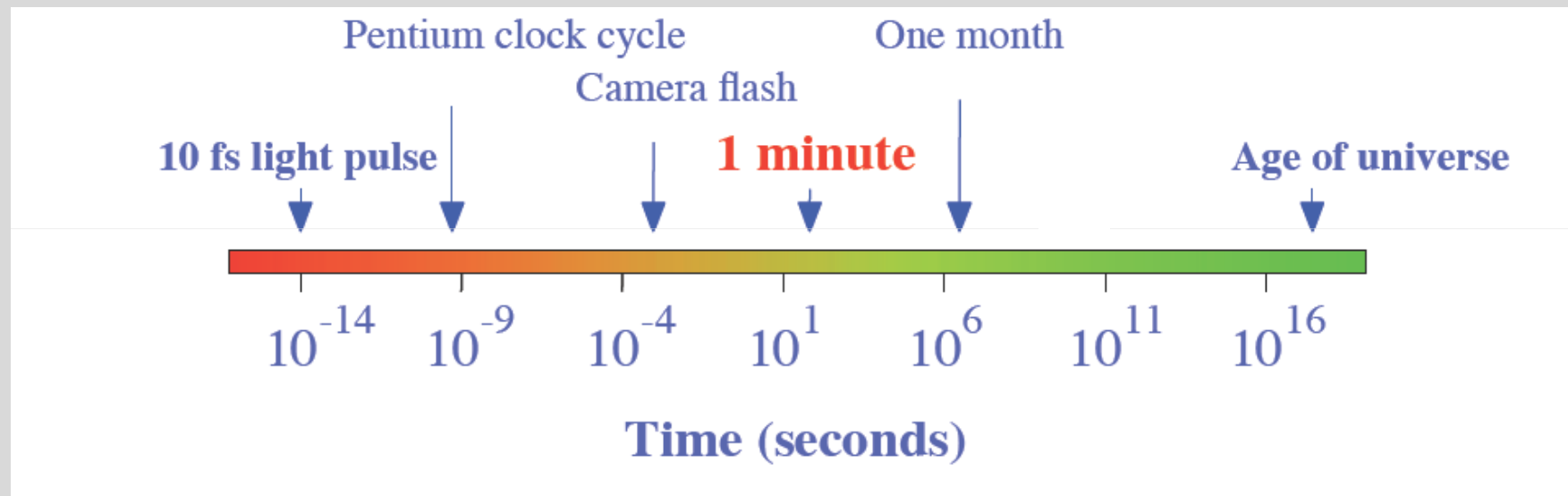
50 fs



20 fs

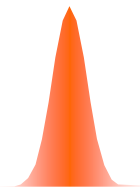
# Pulsos ultracurtos

$$1 \text{ fs} = 10^{-15} \text{ s}$$



# Pulsos ultracurtos

Lasers de Ti:Safira



100 fs



50 fs



20 fs

## Pulsos muito intensos

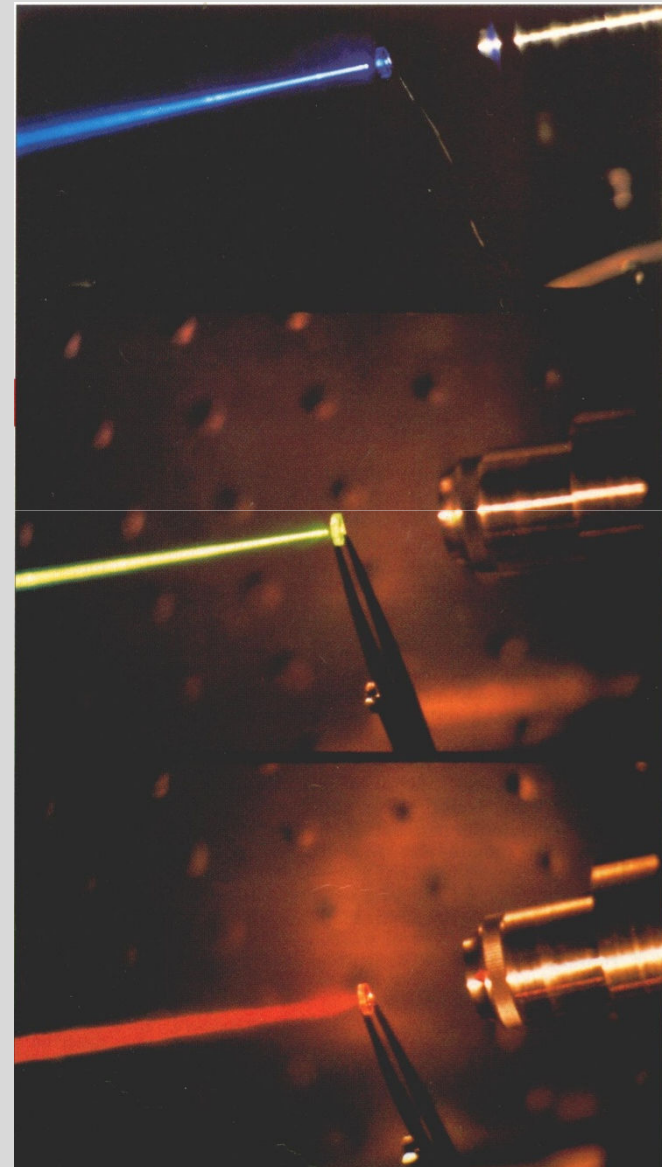
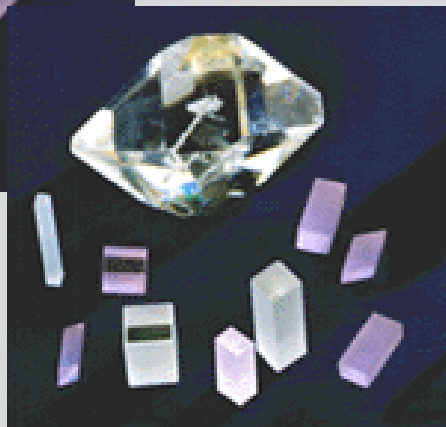
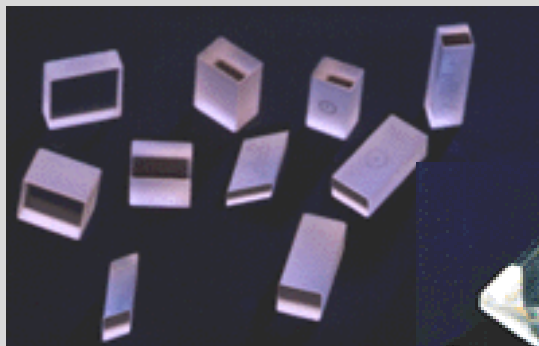
intensidade do pulso

$\sim 100 \text{ GW/cm}^2$

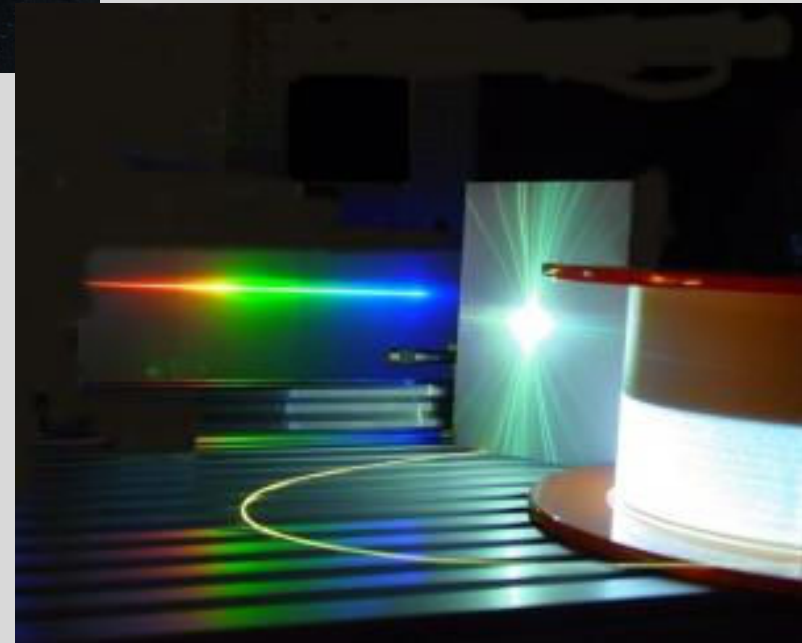
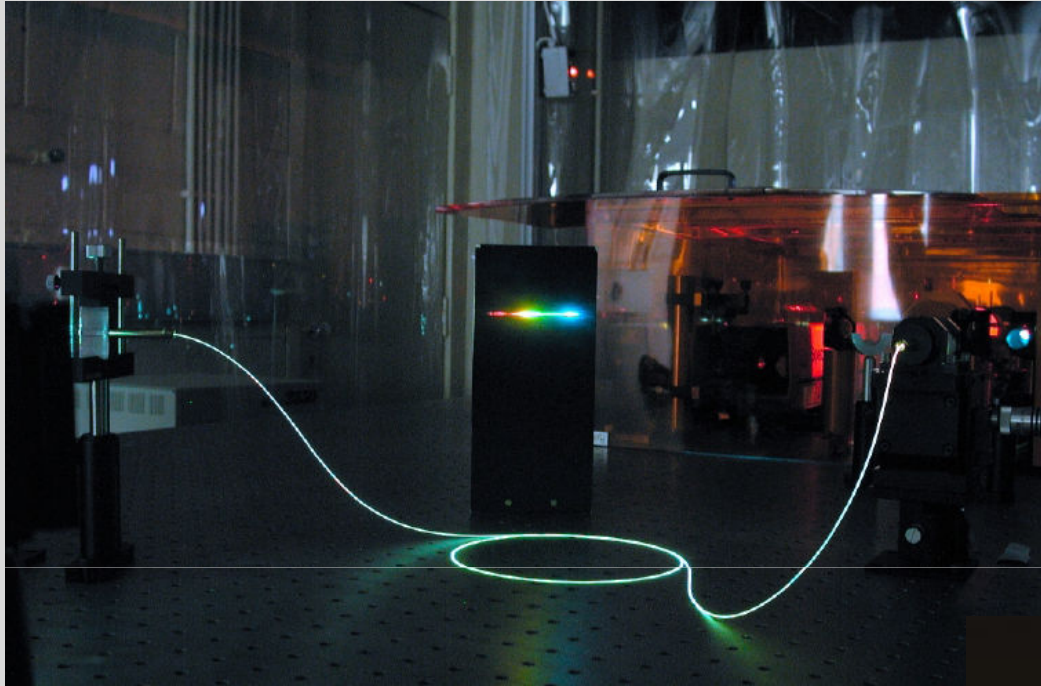
$1 \times 10^{11} \text{ W/cm}^2$

Laser pointer:  $1 \text{ mW/cm}^2$  ( $1 \times 10^{-3} \text{ W/cm}^2$ )

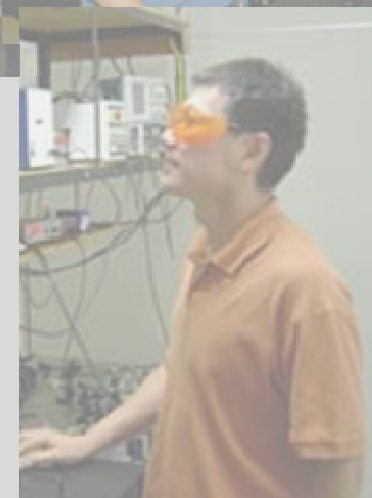
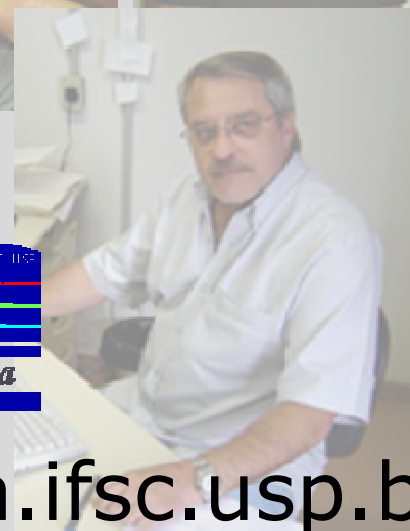
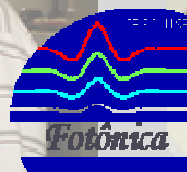
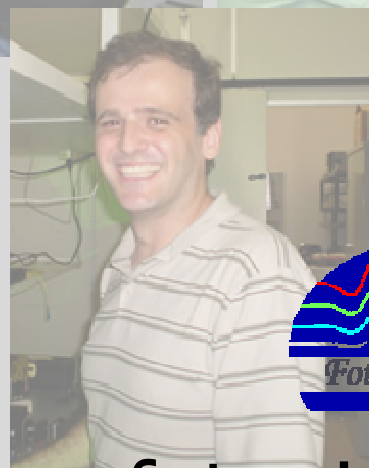
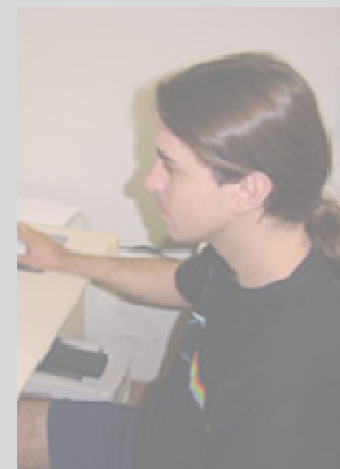
# Processos ópticos não-lineares



# Processos ópticos não-lineares



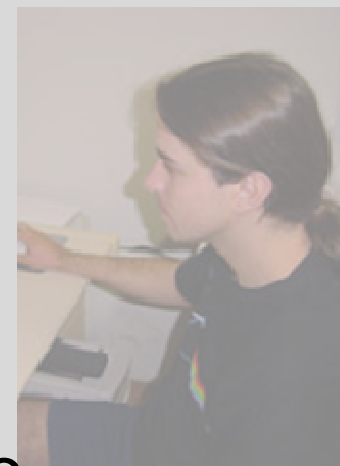
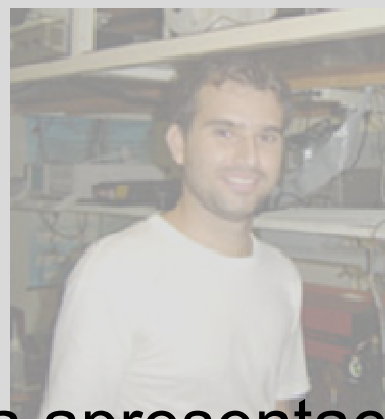
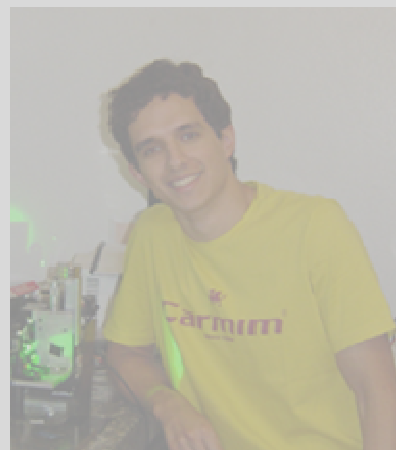




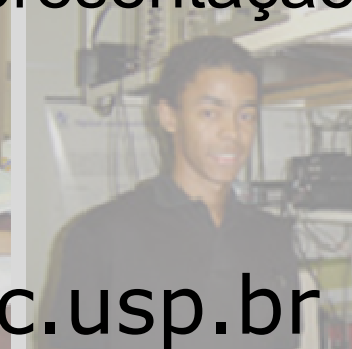
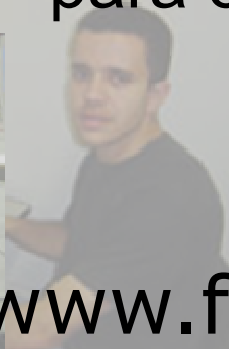
Obrigado!

[www.fotonica.ifsc.usp.br](http://www.fotonica.ifsc.usp.br)





para cópia desta apresentação



[www.fotonica.ifsc.usp.br](http://www.fotonica.ifsc.usp.br)  
*presentations*

