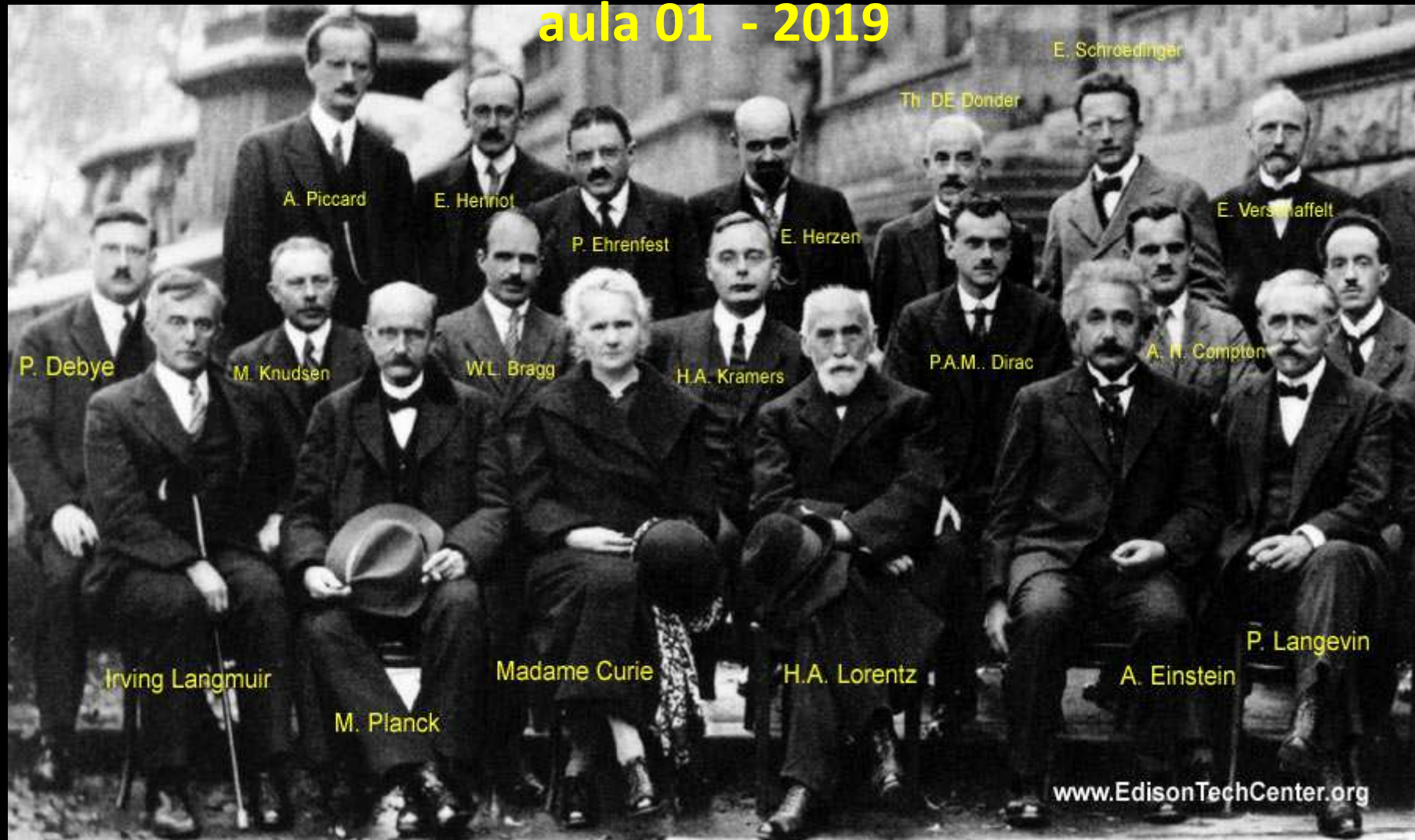


# Física Quântica (BCK0103-15 )

aula 01 - 2019



Luciano Cruz

Sala 609 – Torre 3 – Bloco A

[luciano.cruz@ufabc.edu.br](mailto:luciano.cruz@ufabc.edu.br)

# **BKC 0103-15 é um curso obrigatório para o BC&T.**

TP1 = 304

Ementa (PP do BC&T - 2015): Bases experimentais da Mecânica Quântica. Quantização de Energia e Momento Angular. Modelo de Bohr e átomo de hidrogênio. Dualidade onda-partícula. Relação de incerteza de Heisenberg. Equação de Schrodinger: função de onda, soluções de potenciais unidimensionais simples. Tunelamento. Solução da equação de Schrodinger para o átomo de Hidrogênio. Números quânticos, níveis de energia, spin e princípio de exclusão de Pauli.

## **Recomendações:**

**BIK0102-15 - Estrutura da Matéria**

**BCJ0204-15 - Fenômenos Mecânicos**

**BCJ0205-15 - Fenômenos Térmicos**

**BCJ0203-15 - Fenômenos Eletromagnéticos**

**Bom conhecimento de cálculo  
(saber derivar, integrar e entender o que isso significa...)**

## Bibliografia:

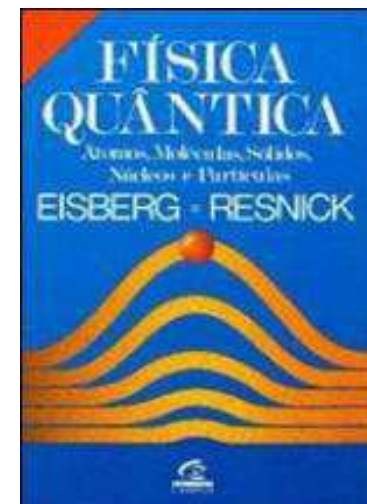
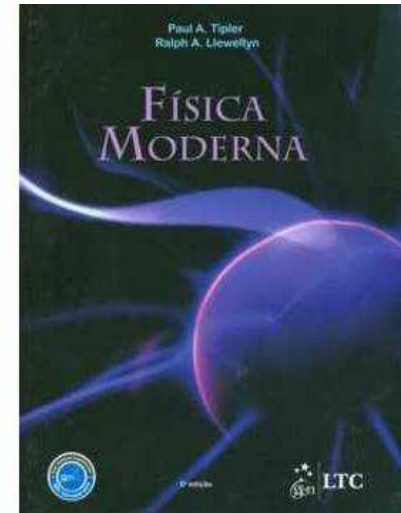
**Livro Texto:** P.A.Tipler, R.A. Llewellyn, **Física Moderna**, Grupo Editorial Nacional (gen) -LTC (2010)

**Livro auxiliar 1:** R. Eisberg, R. Resnick, **Quantum Physics of atoms, molecules, solids, and particles**, Ed. John Wiley and Sons

**Livro auxiliar 2:** H. M. Nussenzveig, **Curso de Física Básica - volume 4 (Ótica, Relatividade, Física Quântica)**, Ed. Edgard Blucher LTDA (1998)

### Outros livros complementares:

- R. A. Serway, J. W. Jewett, Jr., **Ótica e Física Moderna**, Ed. Thomson.
- H. D. Young, R. A. Freeman, Sears e Zemansky, **Física IV: Óptica e Física Moderna**, Ed. Pearson.
- David Z. Albert, **Quantum Mechanics and Experience**, Harvard University Press, 1992



Um pouco de “burocracia” sobre a disciplina...



OU

As regras do jogo!





## Informações sobre a Disciplina

Todas as informações sobre a disciplina: aulas, listas de exercícios, materiais adicionais, etc. estarão disponíveis no site do Moodle.



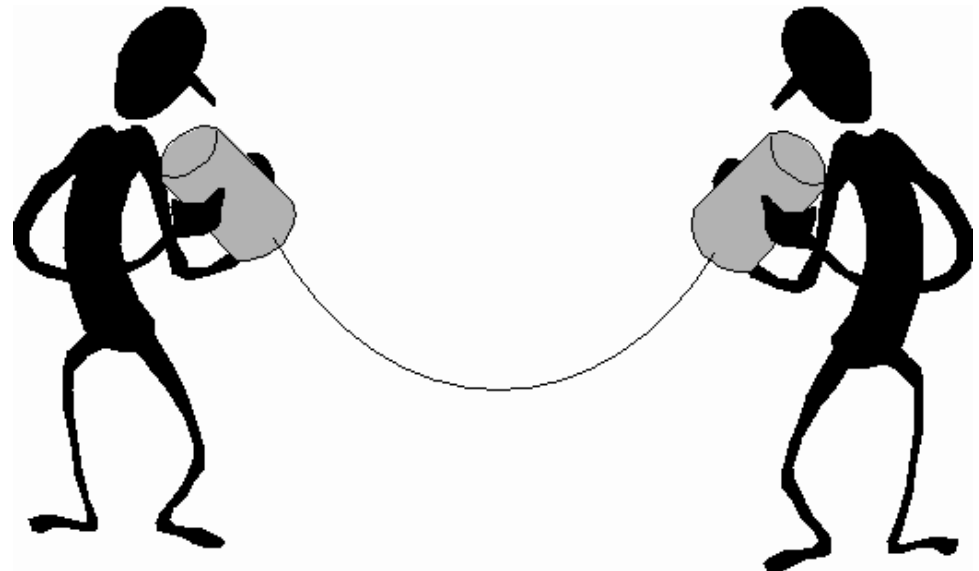
<https://moodle.ufabc.edu.br/>

Física Quântica 2019.3 - Prof. Luciano Cruz

Se você é aluno regular desta turma, você já deve estar inscrito.



Este site será o nosso canal de comunicação, sempre verifique as atualizações semanais.



# Horários e salas para aulas e atendimento

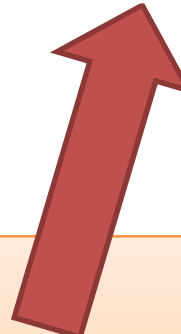
## Turma A2- Diurno - Campus Santo André

Terça das 08:00 às 10:00, sala 205-0, semanal ;  
Quinta das 10:00 às 12:00, sala 205-0, quinzenal II

## Turma B2- Diurno - Campus Santo André

Terça das 10:00 às 12:00, sala 108-0, semanal  
Quinta das 08:00 às 10:00, sala 108-0, quinzenal II

**Menos esta quinta: 25/9,  
pois terá UFABC para Todos  
Veja a programação da sala  
104-0**



Horário de atendimento:

**Quinta das 14:00 às 16:00 (semanal)** na sala 609 – torre 3 – bloco A – campus Santo André

Para tirar dúvidas também pode escrever para o email: [luciano.cruz@ufabc.edu.br](mailto:luciano.cruz@ufabc.edu.br)

Ou pelo aplicativo de mensagens do Moodle.

**A disciplina deverá ter monitores, os horários deles serão  
apresentados em breve.**

## A disciplina BKC0103 é “fracamente” UNIFICADA.

*Mesmo conteúdo e listas de exercícios,  
mas cada professor faz a sua avaliação.*

### Avaliações:

**1ª Prova - 29/10 (Terça) (P1)**

**2ª Prova – 03/12 (Terça) (P2)**

**Prova Substitutiva| Recuperação – 10/12 (Terça) (Psub| Prec)**

### Observações:

- As avaliações Substitutiva e de Recuperação ocorrerão no mesmo dia e horário. Assim, alunos que obtiverem conceito final D ou F têm o direito de realizar a Avaliação de Recuperação (Consepe 182), **que será sobre todo o conteúdo da disciplina**
- Alunos que perderem P1 ou P2 com justificativa (Consepe 181) poderão realizar a Avaliação Substitutiva, que será sobre o conteúdo da avaliação perdida. Caso o aluno que realizar a Substitutiva obtiver conceito final D ou F, ele terá direito a realizar a avaliação de Recuperação no início de 2020.1, em data e horário a ser combinado futuramente.



## Determinação do conceito da disciplina

$$MP = 0,5*(P1+P2)$$

**SOMENTE** para alunos que perderem P1 ou P2 com justificativa (Consepe 181), Psub será contabilizada no lugar da P1 ou P2 perdida.

Conceito	Faixa
A	10,0 a 8,0
B	7,9 a 6,5
C	6,5 a 5,0
D	4,9 a 4,0
F	3,9 a 0,0
O	Presença inferior a 75% das aulas

Alunos com conceito final **D** ou **F** poderão fazer a prova de recuperação (Prec).

A disciplina poderá contar com listas de exercício ou provinhas on-line que poderão compor a avaliação, mas só serão contabilizadas se “melhorem” o conceito do estudante (fase de testes do sistema de avaliação Moodle).



## Avaliação de Recuperação

A recuperação será somada a P1 e P2, sendo a média final calculada da seguinte forma:

$$MF = (MP + Prec)/2, \text{ onde } MP = (P1+P2)/2,$$

se  $MF < 5,0$  – mantem o conceito obtido antes da REC.

se  $5,0 < MF < 7,0$  – conceito C

se  $MF > 7,0$  – conceito B

**Alunos reprovados com conceito O (presença nas aulas for inferior a 75%) não tem direito a realizar a Prec.**



## 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	<b>29/10 (Ter)</b>	<b>P1</b>	<b>Primeira Avaliação</b>
	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	<b>03/12 (Ter)</b>	<b>P2</b>	<b>Segunda Avaliação da Disciplina</b>
	---	---	-----
12	<b>10/12 (Ter)</b>	<b>Psub\REC</b>	<b>Avaliação Substitutiva ou Avaliação de Recuperação</b>
13			
	<b>14 a 21/9</b>		<b>Lançamento de conceitos e faltas</b>



**Dúvidas sobre a parte “burocrática” do curso?**

Você acha que sabe como o mundo funciona? Você acha que este universo material é tudo que existe? O que é real? Quais são os mistérios que se escondem além dos seus sentidos? Na raiz da existência, mente e matéria se encontram. Pensamentos modelam a realidade. Este Universo é apenas um de infinitos. Mundos sem fim. (...)

Quem é você neste vasto Multiverso, Dr. Strange?



**Doutor Estranho (2016)**

<https://www.imdb.com/title/tt1211837/>





# Bem vindo ao Admirável Universo Quântico!



# O que é Física Quântica?

“Diferentemente da mecânica de Newton, da eletrodinâmica de Maxwell e da relatividade de Einstein, a **teoria quântica não foi criada** – nem mesmo determinada definitivamente – **por um indivíduo**, e carrega até hoje, cicatrizes dessa empolgante, porém traumática, juventude. Não há consenso geral sobre **quais sejam seus princípios fundamentais**, ou sobre **como deveria ser ensinada e o que realmente ‘significa’(...).**”

[Prefácio do livro Mecânica Quântica, D.J. Griffiths]

“Qualquer um que não se choque com a Mecânica Quântica é porque não a entendeu.”

[Niels Bohr]



- A matemática envolvida em um curso básico de quântica não é mais elaborada do que a exigida em cursos de eletromagnetismo.
- Por vezes, os conceitos são contra-intuitivos, mas para isto é preciso trabalhar a sua “vivência” dos fenômenos quânticos.

**DON'T PANIC**

*“Os argumentos mais fortes não provam nada, se as conclusões não são verificadas pela **experiência**. Ciência experimental é a rainha das ciências e a meta de todas as especulações.”*

**Roger Bacon**



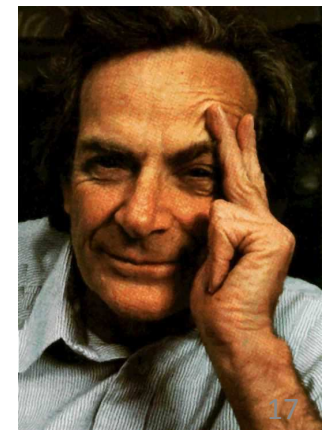
## Dilemas para a compreensão da Física Quântica

“É sempre difícil encontrar critérios fidedignos que indiquem quais e de que maneira termos linguísticos devam ser empregados. Aqui a solução é, por assim dizer, um compasso de espera a fim de que a evolução da linguagem venha, com o passar do tempo, a permitir um ajustamento à nova situação.” [Heisenberg]



“A ‘estranheza’ é apenas o conflito entre a realidade e nosso pensamento do que a realidade deveria ser.”

[Richard Feynman]





# Então, por que estudar Física Quântica?

“Quantum physics makes me so happy...  
It's like looking at the universe naked (...)”  
[Sheldon Cooper]

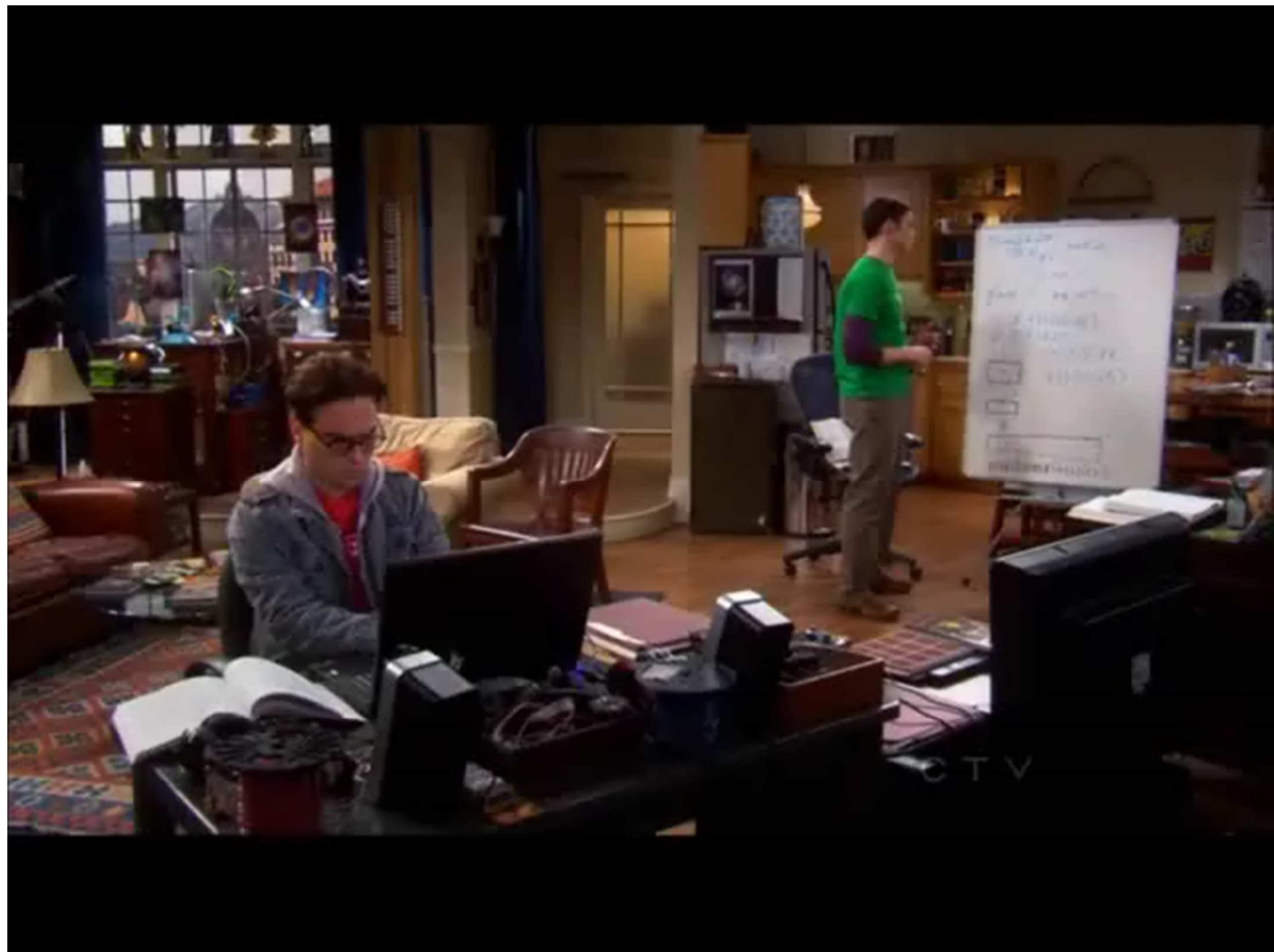


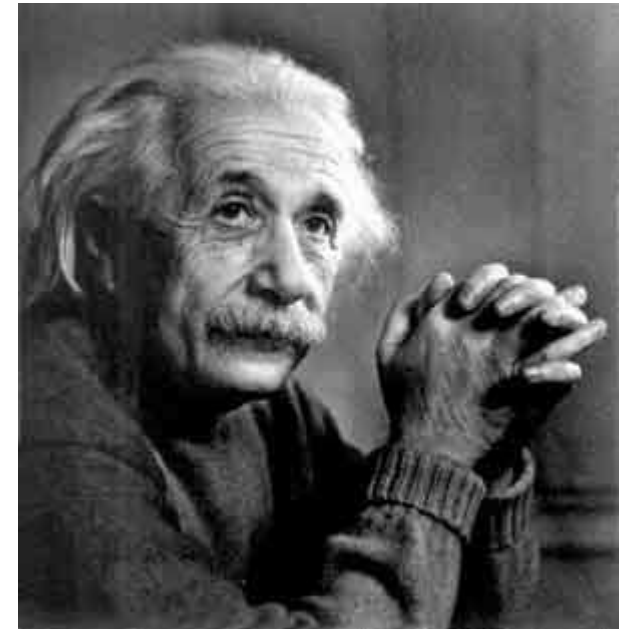
Sheldon Cooper  
O “físico” ficcional  
mais famoso da  
atualidade

“Mostrar o Vídeo do Sheldon”

<https://www.youtube.com/watch?v=H7d3YEuKsyk>



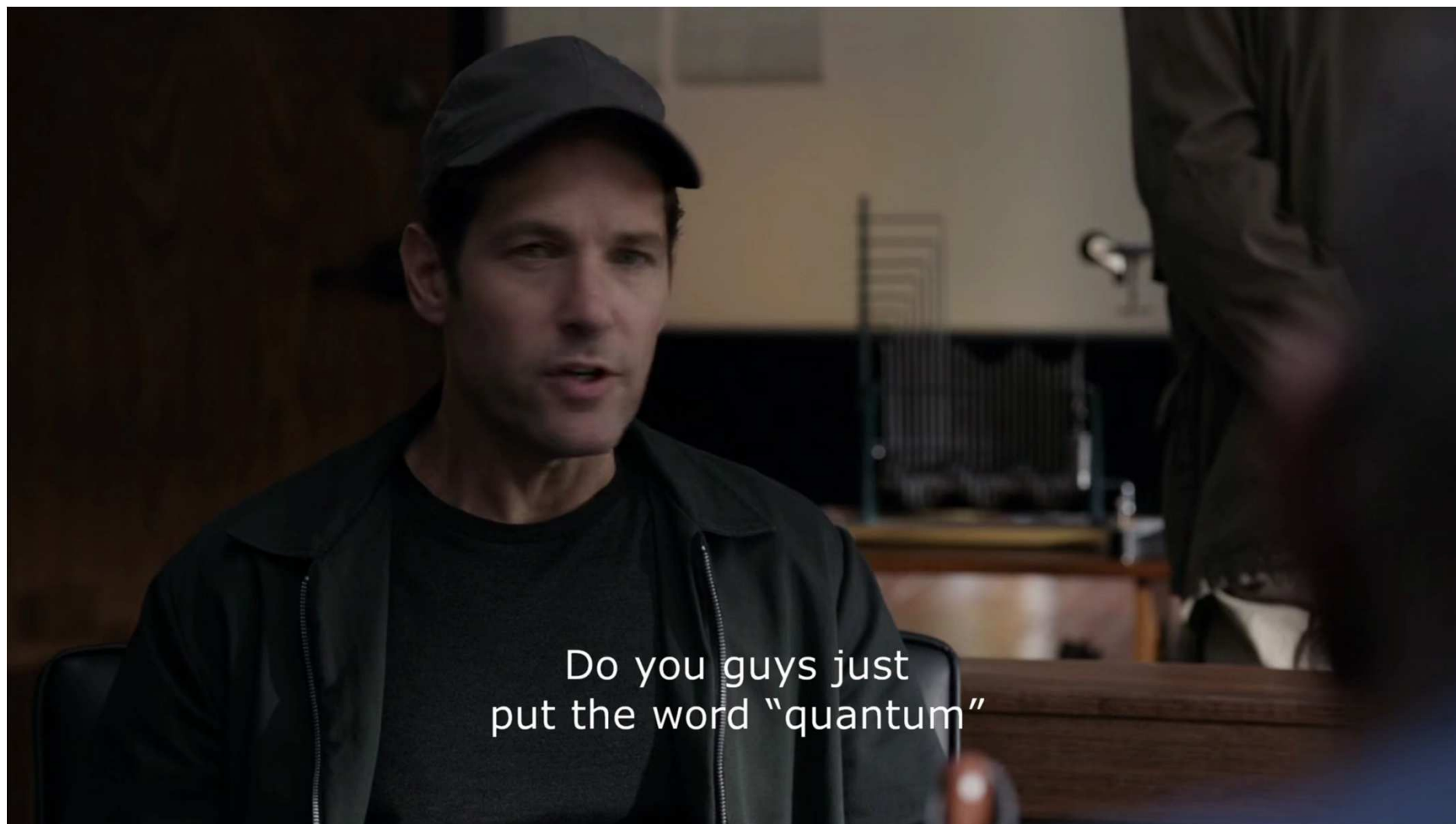




*"The important thing is to not stop questioning. Curiosity has its own reason for existence. One cannot help but be in awe when he contemplates the mysteries of eternity, of life, of the marvelous structure of reality. It is enough if one tries merely to comprehend a little of this mystery each day."*

Albert Einstein

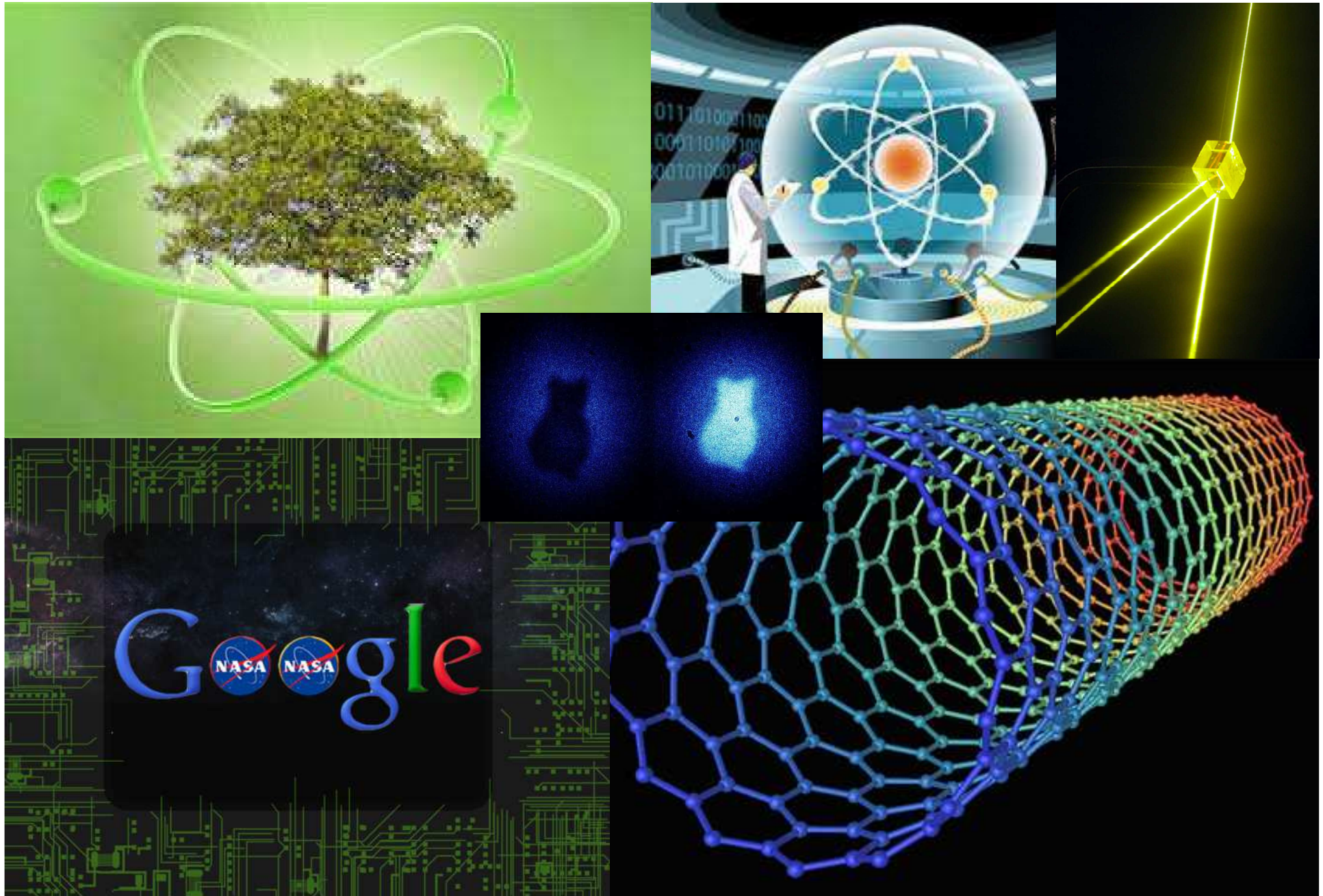
**Scott Lang:** Yeah. That's what I was thinking. Do you guys just **put the word 'quantum' in front of everything?** ([https://www.youtube.com/watch?v=a\\_7JkJD3Q9A](https://www.youtube.com/watch?v=a_7JkJD3Q9A))



**Nunca se “usou” tanto o adjetivo Quântico, muitas vezes, de jeitos muito errados ...**



Física quântica é muito mais do que ver o “universo nú” ou um adjetivo para vender mais...



# Por que aprender Física Quântica?

## **A new way to explain explanation** (David Deutsch)

[https://www.ted.com/talks/david\\_deutsch\\_a\\_new\\_way\\_to\\_explain\\_explanation](https://www.ted.com/talks/david_deutsch_a_new_way_to_explain_explanation)



## **Making sense of a visible quantum object** (Aaron O'Connell)

[https://www.ted.com/talks/aaron\\_o\\_connell\\_making\\_sense\\_of\\_a\\_visible\\_quantum\\_object](https://www.ted.com/talks/aaron_o_connell_making_sense_of_a_visible_quantum_object)



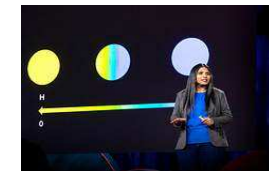
## **How quantum physics can make encryption stronger** (Vikram Sharma)

[https://www.ted.com/talks/vikram\\_sharma\\_how\\_quantum\\_physics\\_can\\_make\\_encryption\\_stronger](https://www.ted.com/talks/vikram_sharma_how_quantum_physics_can_make_encryption_stronger)



## **A beginner's guide to quantum computing** (Shohini Ghose)

[https://www.ted.com/talks/shohini\\_ghose\\_quantum\\_computing\\_explained\\_in\\_10\\_minutes](https://www.ted.com/talks/shohini_ghose_quantum_computing_explained_in_10_minutes)



## **The future of supercomputers? A quantum chip colder than outer space** (Jerry Chow)

[https://www.ted.com/talks/jerry\\_chow\\_the\\_future\\_of\\_supercomputers\\_a\\_quantum\\_chip\\_colder\\_than\\_outer\\_space](https://www.ted.com/talks/jerry_chow_the_future_of_supercomputers_a_quantum_chip_colder_than_outer_space)



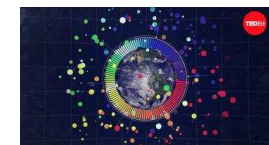
## **How quantum biology might explain life's biggest questions** (Jim Al-Khalili)

[https://www.ted.com/talks/jim\\_al\\_khalili\\_how\\_quantum\\_biology\\_might\\_explain\\_life\\_s\\_biggest\\_questions](https://www.ted.com/talks/jim_al_khalili_how_quantum_biology_might_explain_life_s_biggest_questions)



## **How quantum mechanics explain Global Warming** (Lieven Scheire)

[https://www.ted.com/talks/lieven\\_scheire\\_how\\_quantum\\_mechanics\\_explains\\_global\\_warming](https://www.ted.com/talks/lieven_scheire_how_quantum_mechanics_explains_global_warming)





Pensamos na Física  
Quântica se  
manifestando em nossa  
tecnologia e como  
percursora de um futuro  
ainda mais  
tecnológico...





Porém, talvez, a física quântica esteja nos guiando para uma compreensão mais essencial dos fenômenos que permitem a manifestação da vida em si mesma e, portanto, para o entendimento de nosso passado mais profundo, voltando muito além do surgimento da primeira célula.

Erwin Schrodinger, *What is Life?*, Cambridge, 1944.

Physics of life: The dawn of quantum biology, *Nature* **474**, 272 (2011)  
doi:10.1038/474272

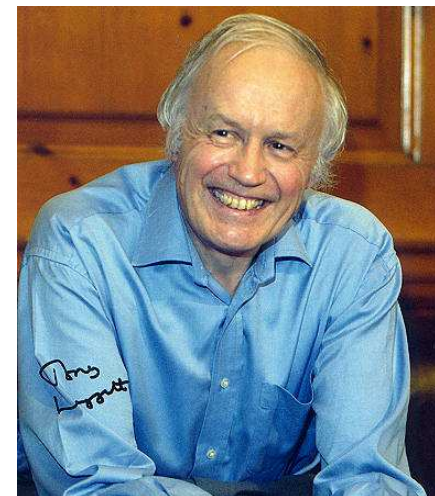
Quantum biology, *Nature Physics* **9**, 10 (2013) doi:10.1038/nphys2474

Jim Al-Khalili and Johnjoe McFadden, *Life on the Edge: The Coming of Age of Quantum Biology*, Bantam Press, 2014



**"A Mecânica Quântica é muito mais que apenas uma 'teoria', ela é uma forma inteiramente nova de ver o mundo"**

Anthony Leggett



“Atenta para as sutilezas  
que não se dão em palavras.  
Compreende o que não se deixa  
capturar pelo entendimento”



Rumi (poeta, jurista e teólogo do séc. XIII)<sup>26</sup>

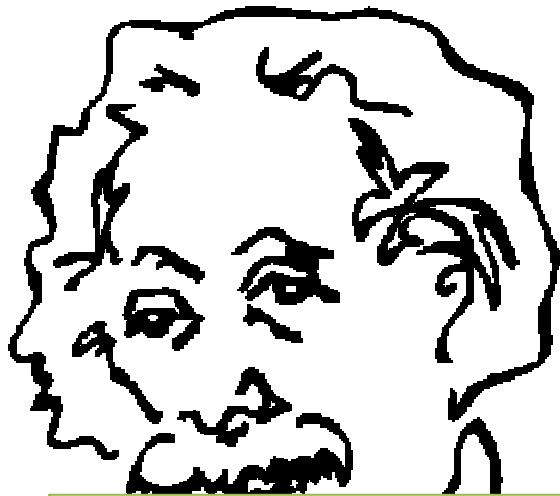
Dr. Stephan Strange: Como eu chego daqui até aí?

Maga Suprema: Como você se tornou um Doutor?

Dr. Stephan Strange: **ESTUDO E PRÁTICA. Anos disso!**



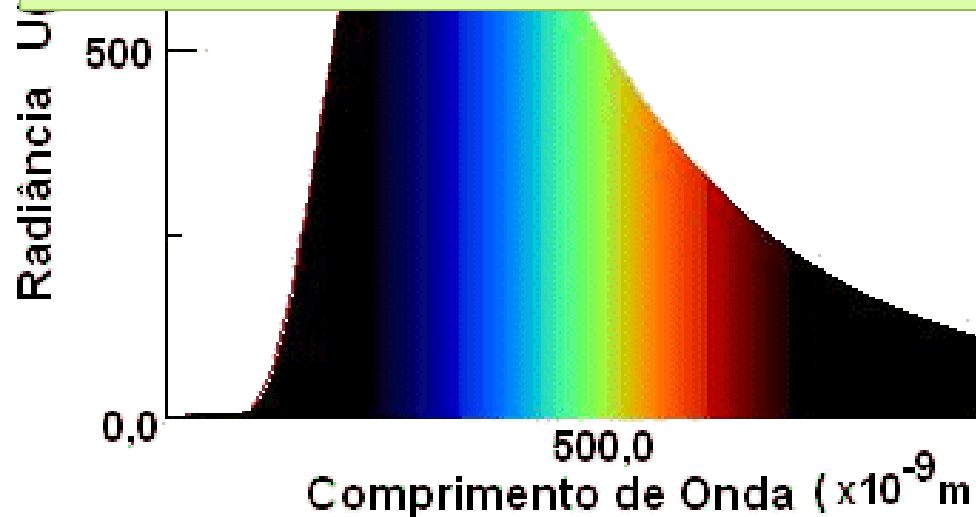
**Agora começa o conteúdo da disciplina:**



# Física Quântica – Primeiros Anos

## Os indícios da necessidade de uma teoria quântica

12





# O que é um “quantum” ?

Consultando um dicionário:

**quantum** |quântum|

(palavra latina que significa "que quantidade")

*substantivo masculino*

1. Quantidade ou soma que não se designa.
2. Quantidade referente a cada um numa repartição.
3. Montante de uma .indenização.
4. [Física] Quantidade mínima de energia que pode ser emitida, propagada ou absorvida. [A teoria dos *quanta*, criada por Max Planck em 1900, afirma que a energia radiante tem, como matéria, uma estrutura descontínua; não pode existir senão sob a forma de fragmentos, ou *quanta*, de valor  $h\nu$ , onde  $h$  é uma constante universal e  $\nu$  a .frequência da radiação. Esta teoria está na base de toda a física moderna.]  
Plural: *quanta*.

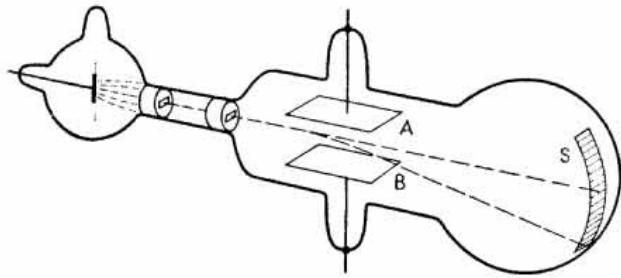


# Quantização da carga elétrica

# A determinação da quantização da carga

Pesquisas sobre campos elétricos e magnéticos levaram a descoberta da “carga elementar”. Toda a carga elétrica é sempre um múltiplo da carga elementar (carga elétrica de um elétron).

**$e$  = Valor atual:  $1,6\ 00217653 \cdot 10^{-19}$  C (carga de um elétron)**



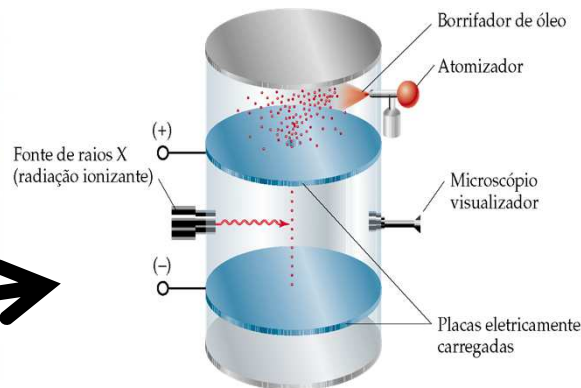
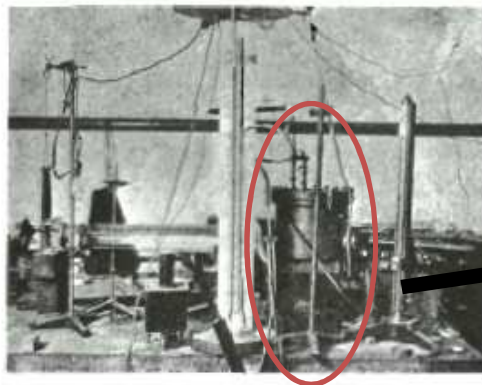
Tubos de Raios Catódicos: descoberta que havia uma relação entre carga e massa. Feixes catódicos eram formados por partículas que foram chamadas de elétrons



Michael Faraday, 1791–1867



J. J. Thomson (1856-1940)

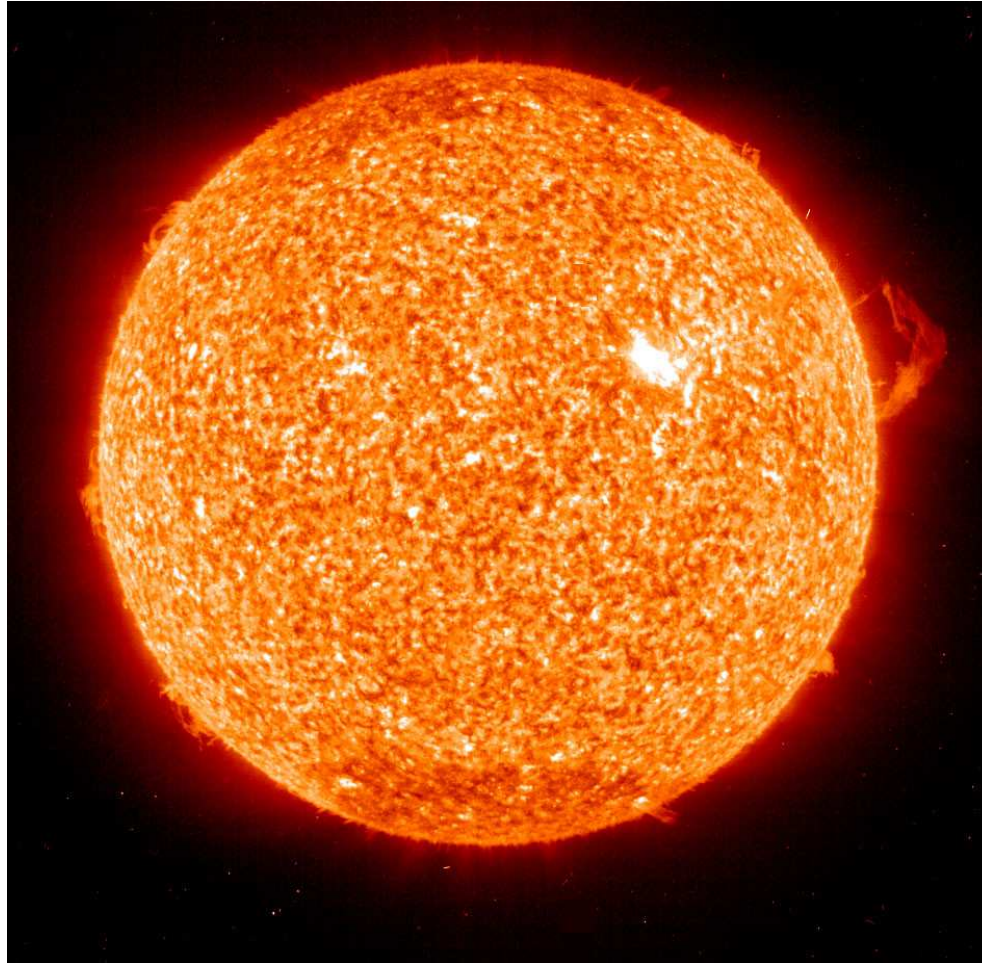


Equilibrando a força elétrica com a força da gravidade de gotículas de óleo carregadas foi possível obter a carga de um elétron.



Robert Millikan (1868-1953)

Isto já foi estudado na disciplina Estrutura da Matéria e Fen. Eletromagnéticos...



# Quantização da energia



## Radiação de corpo negro.

Há pouco mais de cem anos, o físico **Max Planck** tentando compreender a energia irradiada pelo espectro da radiação térmica, expressa como ondas eletromagnéticas produzidas por qualquer “corpo” emissor de calor, a uma dada temperatura  $T$ , chegou, depois de muitas experiências e cálculos, à revolucionária ‘constante de Planck’, que **subverteu** os princípios da física clássica.



## Mas qual era o problema?



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.

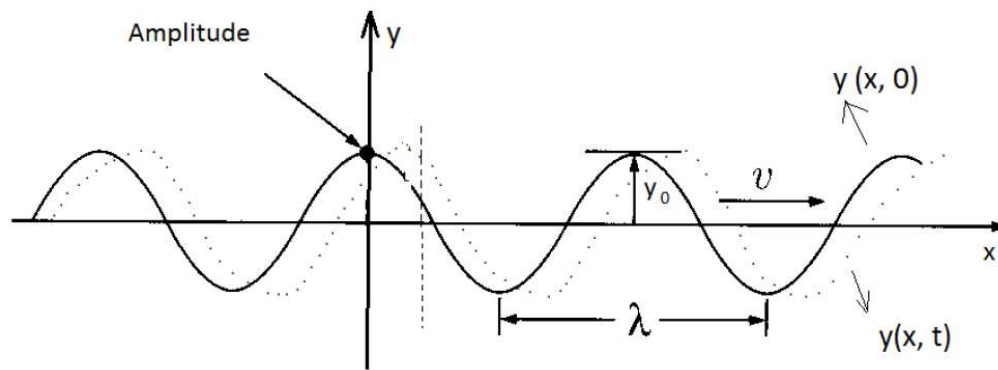


# O que é uma onda?

1. elevação e depressão da camada superficial de uma massa líquida, com sucessão rítmica; vaga
2. (...)
6. **[FÍSICA] perturbação, contínua ou transitória, que se propaga com transporte de energia através de um meio, quer em virtude das propriedades elásticas desse meio material, quer em virtude das propriedades elétricas ou magnéticas do espaço (onda eletromagnética)**
7. (...)
8. 11. figurado tumulto, turbilhão;

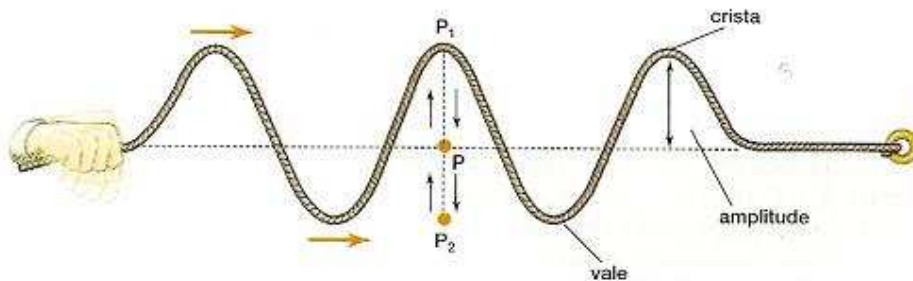
Conceitos importantes em Física Quântica: O que são ondas e o que são partículas? Quais as diferenças e semelhanças entre estes “entes” físicos?

# Ondas e suas propriedades



Onda Harmônica

$$y(x, t) = y_0 \cos[k(x - vt)] = y_0 \cos\left[\frac{2\pi}{\lambda}(x - vt)\right]$$



Onda Transversal



Onda Longitudinal

# Equação da Onda

$$\frac{\partial^2 y}{\partial x^2} = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 y}{\partial t^2}$$

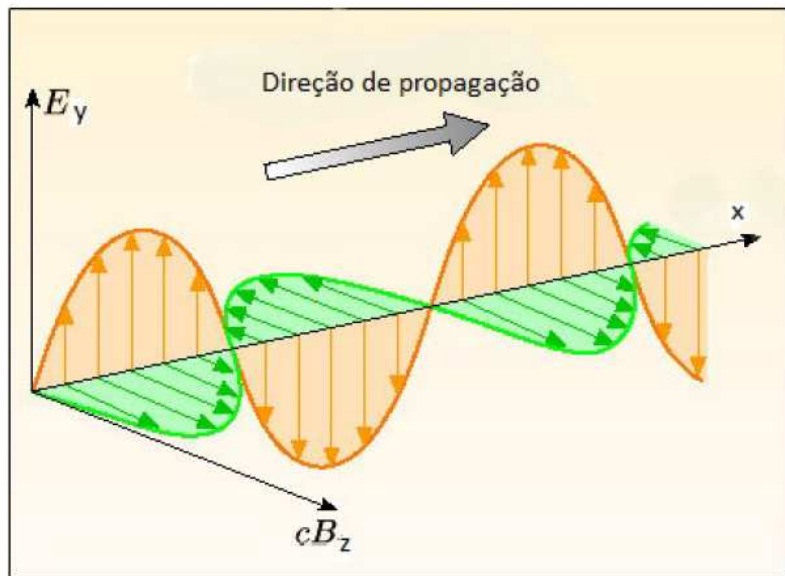
Uma equação para todas as ondas (clássicas) governar!

Ondas mecânicas e eletromagnéticas satisfazem a mesma equação física!

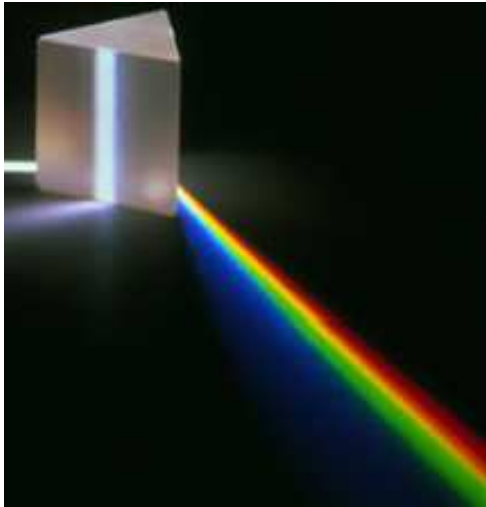
Na onda eletromagnética, o campo elétrico (E) e o magnético (B) são perpendiculares. Assim, se temos E na direção y, o campo magnético pode ser escrito como:

$$\mathbf{B}(x, t) = B_z(x, t) \hat{\mathbf{z}}$$

$$B_z(x, t) = \frac{E_0}{c} \sin \left[ \frac{2\pi}{\lambda} (x - ct) \right]$$

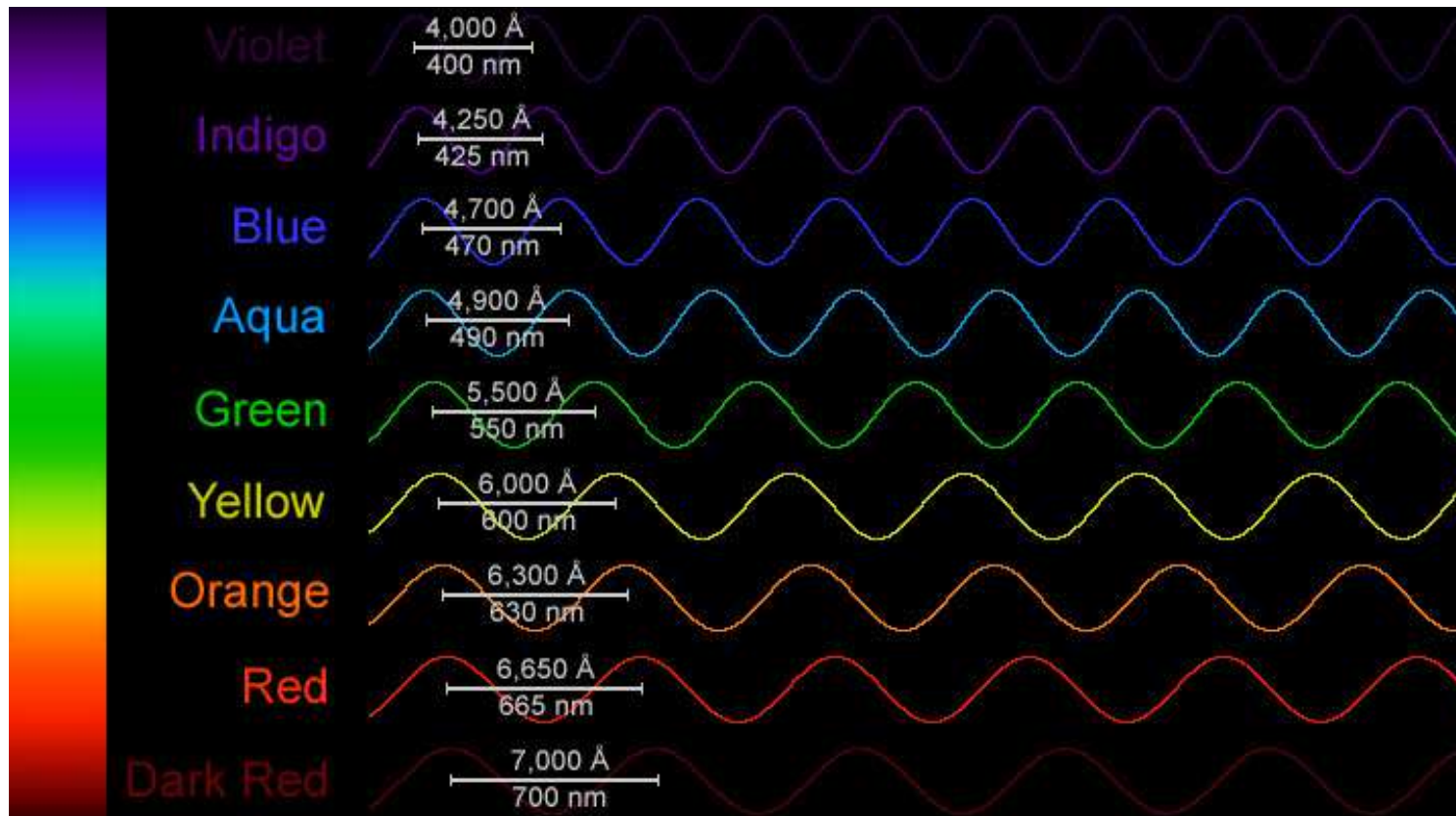


Este tópico foi visto na disciplina de Fen. Eletromagnéticos.

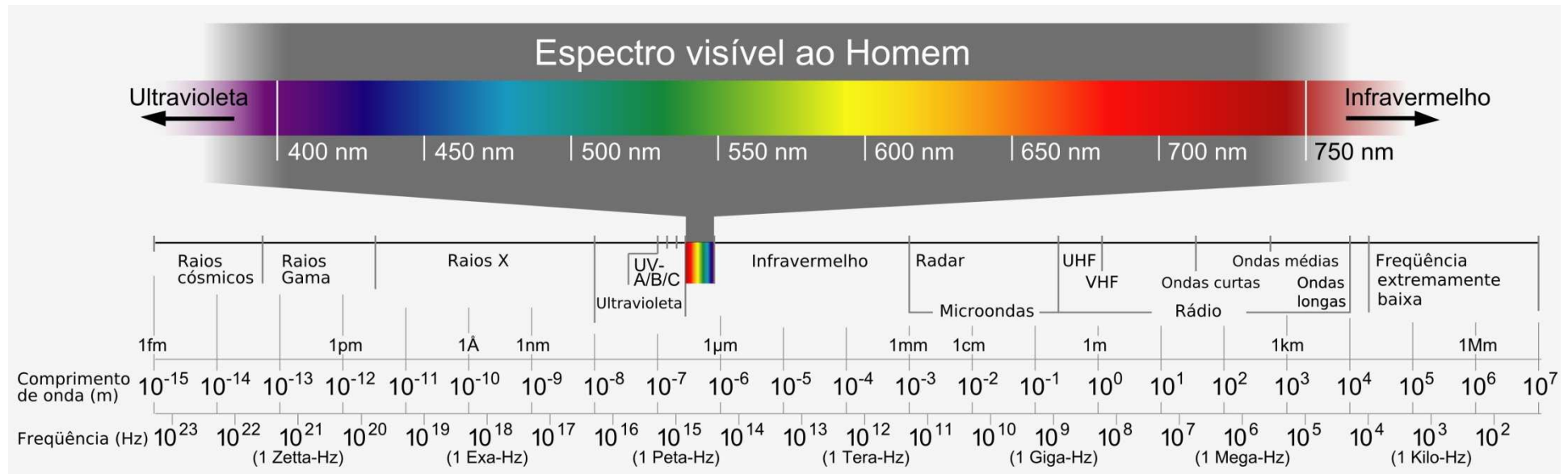


## O que é o comprimento (frequência) da luz?

Efeito de dispersão da luz branca: Separação dos diversos comprimentos de onda por um prisma (meio dispersor)



Vamos lembrar o espectro eletromagnético:



**Frequência** [oscilações por segundo – Hz ]:  $\nu$

**Comprimento de onda** [tamanho característico da onda – m]:  $\lambda$

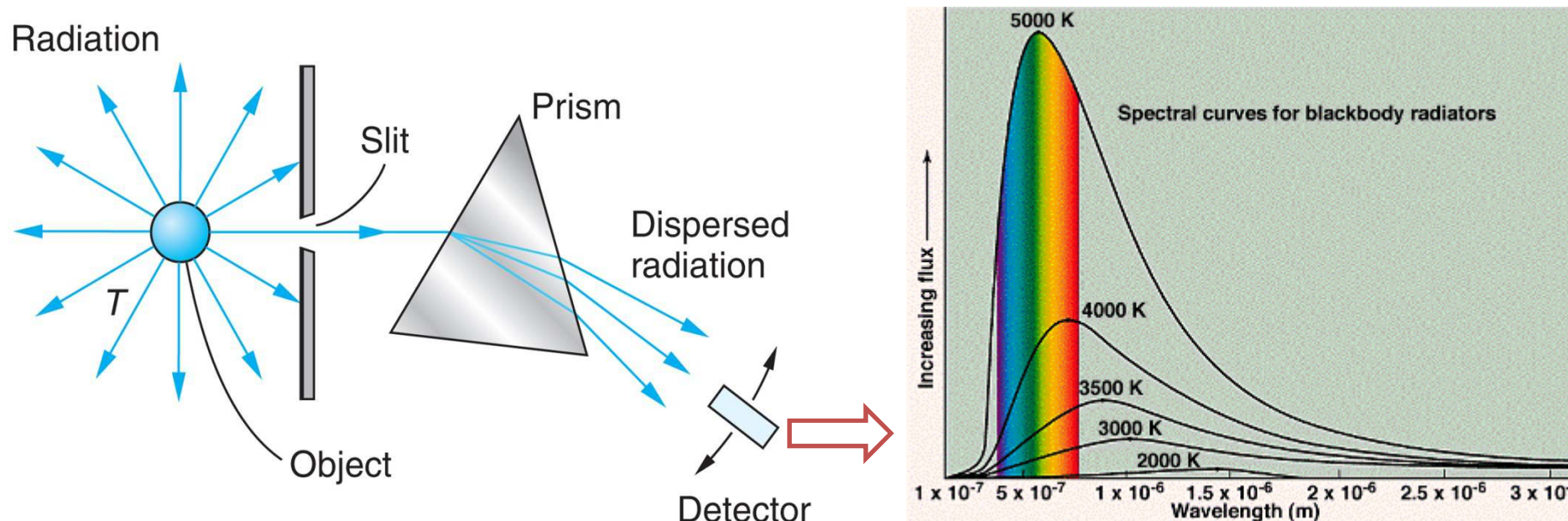
$$c = \lambda \nu$$

(Relação entre comprimento de onda e frequência; c é a velocidade da luz)

$$C = 3.10^8 \text{ m/s (velocidade da luz no vácuo)}$$



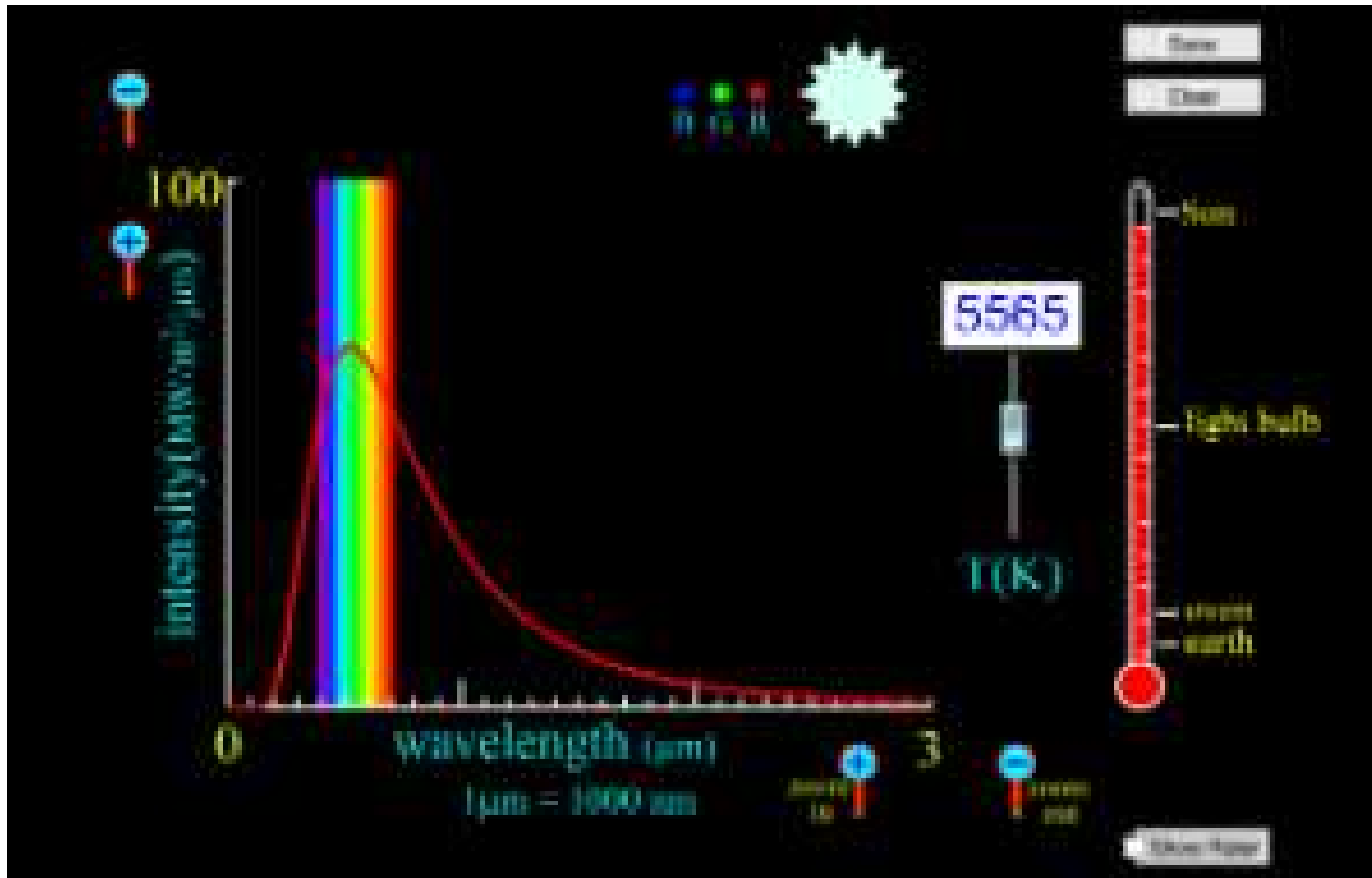
Como é feita uma medida do espectro de um corpo.



Corpos aquecidos a temperaturas inferiores a 600 °C tem a maior parte da emissão fora da região do visível (infravermelho). Para temperaturas maiores, o corpo começa a brilhar com luz própria.

Medidas da radiação térmica foram feitas por Lummer e Prengsheim em 1899 utilizando um espectrofotômetro similar ao esquema acima.

## Um experimento virtual



[http://phet.colorado.edu/pt\\_BR/simulation/blackbody-spectrum](http://phet.colorado.edu/pt_BR/simulation/blackbody-spectrum)

## Predições Clássicas para Radiação do Corpo Negro

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:

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

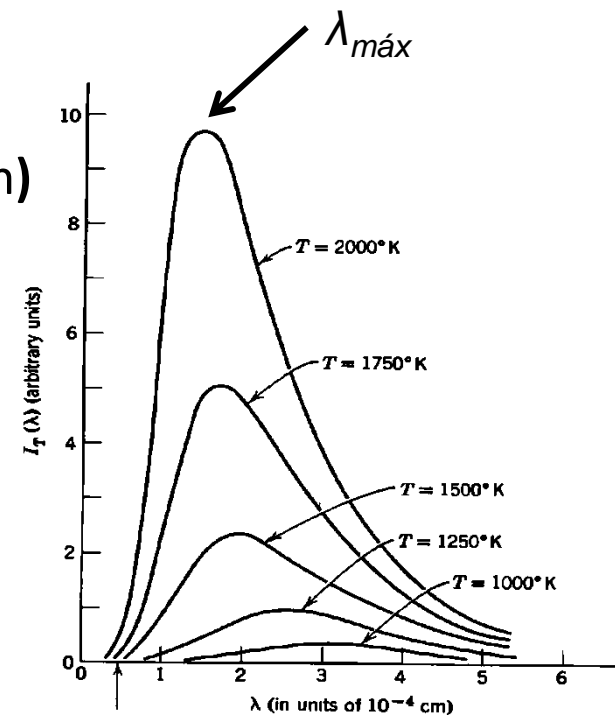
R: potência irradiada por unidade de área [W/m<sup>2</sup>]

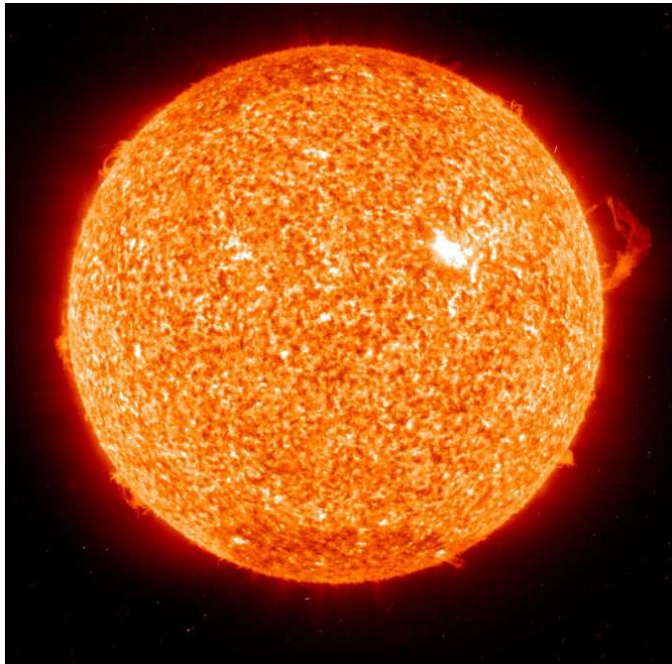
T: temperatura do corpo [K]

$\sigma$ : constante de Stefan =  $5,6704 \cdot 10^{-8}$  W/m<sup>2</sup>.K<sup>4</sup> (obtido empiricamente)

$$\lambda_{max} \propto \frac{1}{T} \iff f_{max} \propto T \quad (\text{Lei de deslocamento de Wien})$$

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





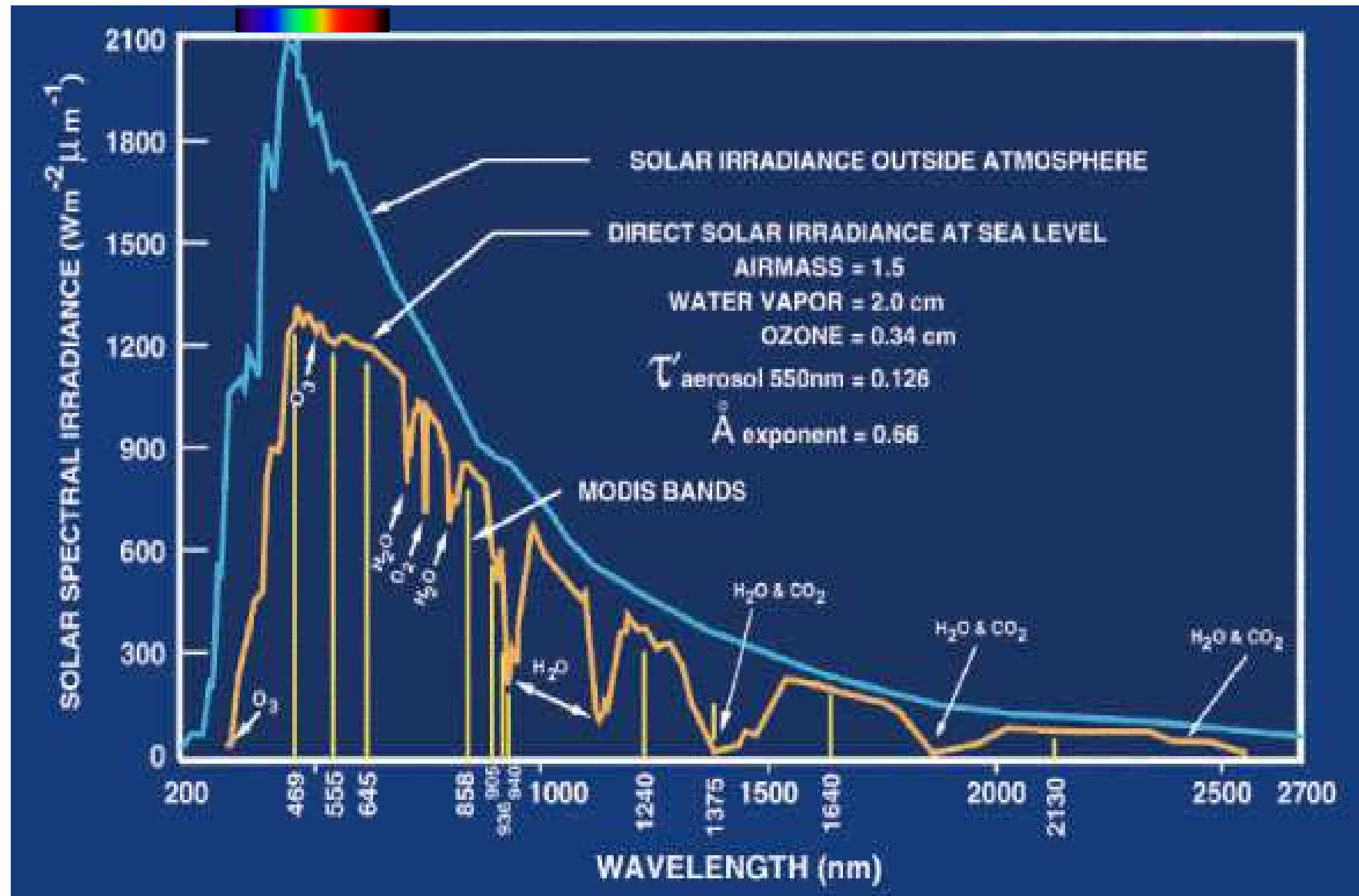
Corpos negros interessam à Astronomia porque as estrelas podem ser aproximadas como corpos negros. Uma pequena parte da radiação emitida pela estrela escapa ao espaço, de forma que o astro fica próximo ao equilíbrio termodinâmico.

**Um exemplo:** Para o Sol, a temperatura da superfície é de 5800 K. Portanto, utilizando a relação vista para o comprimento de onda com intensidade máxima, temos:

$$\lambda_{max} = \frac{2,88 \times 10^6 nm.K}{5800K} = 500nm$$

# Luz do sol

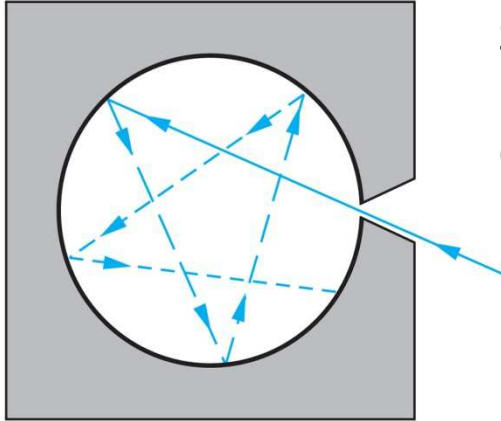
A atmosfera também é um meio dispersivo...





## Teoria de Rayleigh-Jeans (Clássico)

Cálculo da distribuição espectral  $R(\lambda)$  envolve a determinação da densidade de energia de ondas eletromagnética no interior de uma cavidade.



Se utilizarmos as expressões clássicas para a radiação de corpo negro, chegamos que a distribuição de energia por comprimento de onda emitida é dada por:

$$u(\lambda) = kTn(\lambda) = 8\pi kT\lambda^{-4}$$

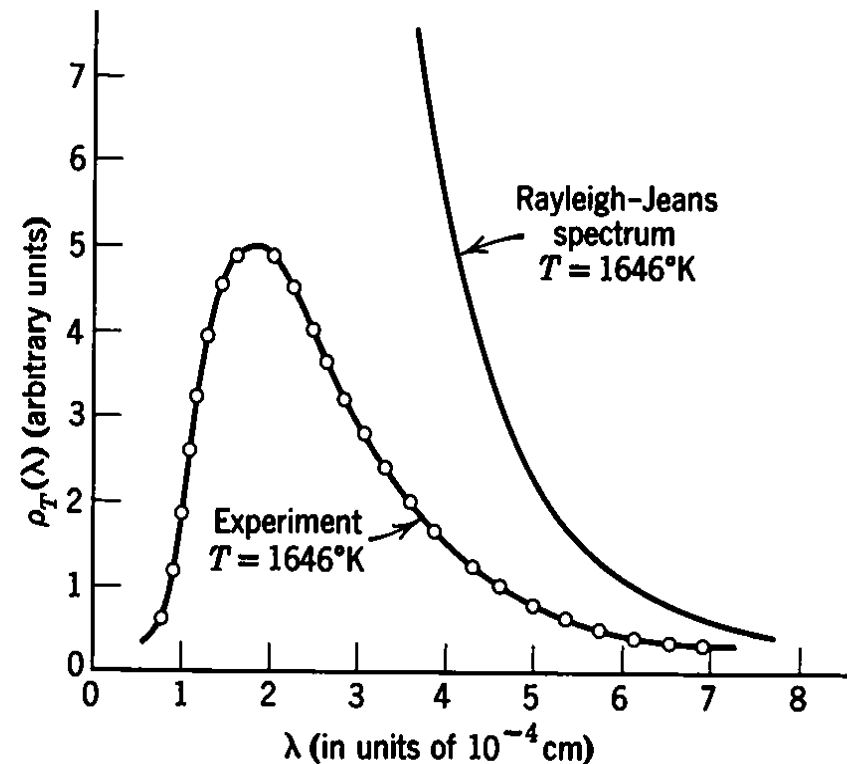
Calculando a energia total (“área sob a curva”, temos:

$$U = \int_0^{\infty} u(\lambda) d\lambda \rightarrow \infty$$

Essa discrepância para pequenos comprimentos de onda foi denominada “catástrofe do ultravioleta”

Teoria clássica não é capaz de explicar o espectro do corpo negro para a região do ultravioleta.

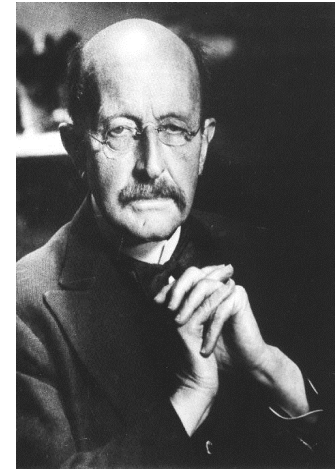
Como solucionar tal problema?



## Teoria de Planck para a radiação de corpo negro.

Em 1900, Planck afirma que após considerar algumas “hipóteses estranhas”, havia obtido uma solução “adequada” para o espectro de corpo negro. Planck percebeu que o problema poderia ser resolvido se os objetos radiantes (átomos) só pudessem emitir (ou absorver) energia em determinadas quantidades fixas, que ele chamou de quanta (plural de quantum).

Ele utilizou a estatística de Boltzmann para obter uma equação teórica que concordava com os resultados experimentais para todos os comprimentos de onda.

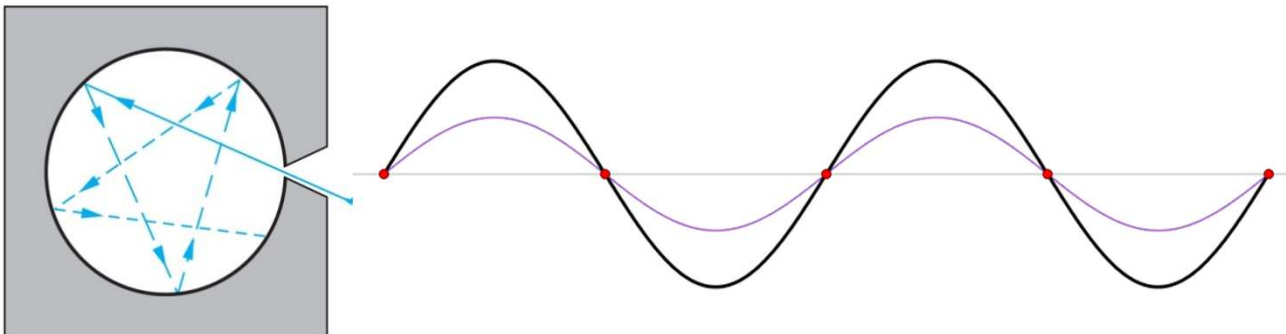


Qualquer ente físico com um grau de liberdade cuja coordenada é uma função senoidal do tempo podem possuir energias totais  $\epsilon$  dadas por:

$$E = nhf$$

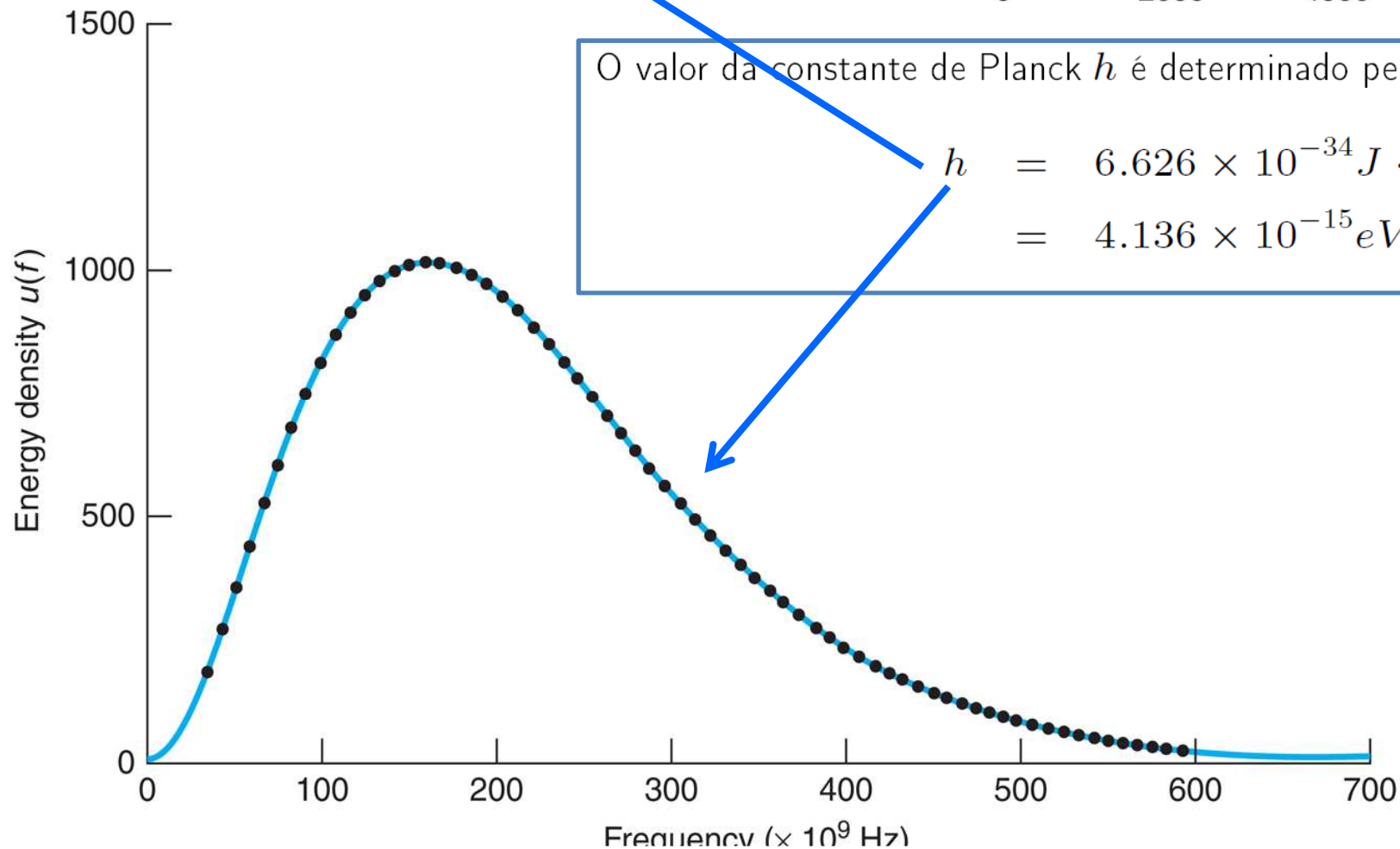
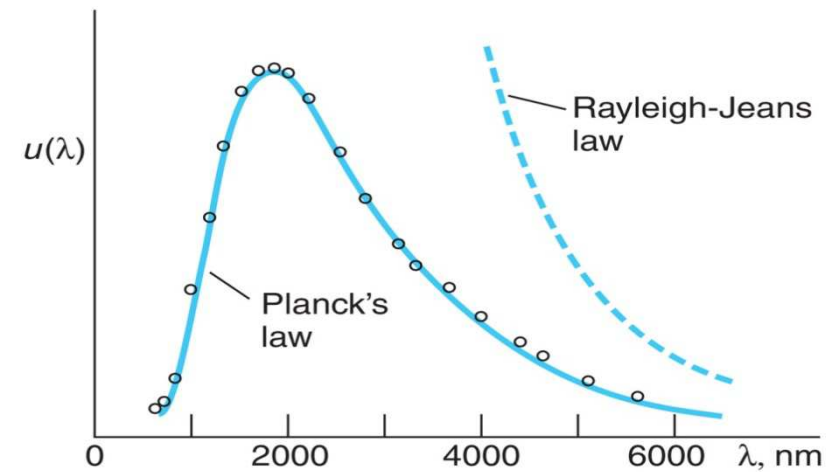
A energia de um sistema não é uma variável contínua. A energia somente pode assumir alguns valores específicos, ou seja, ela é quantizada.

Uma analogia seria as ondas estacionárias em uma corda vibrante (veja o experimento em aula)



Planck obteve uma nova expressão para a densidade de energia:

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



O valor da constante de Planck  $h$  é determinado pela experiencia

$$h = 6.626 \times 10^{-34} J \cdot \text{seg}$$

$$= 4.136 \times 10^{-15} eV \cdot \text{seg}$$

**Use a lei de Planck para mostrar que a densidade total de energia de um corpo negro é a  $T^4$ , que está de acordo com a lei de Stefan-Boltzmann**

A expressão para a energia é dada por:

$$U = \int_0^\infty u(\lambda) d\lambda = \int_0^\infty \frac{8\pi hc \lambda^{-5}}{e^{hc/\lambda kT} - 1} d\lambda$$

Se definirmos a variável  $x = hc/\lambda kT$ . Podemos escrever:

$$U = - \int_0^\infty \frac{8\pi hc \lambda^{-3}}{e^x - 1} \left( \frac{kT}{hc} \right) dx = 8\pi hc \left( \frac{kT}{hc} \right)^4 \int_0^\infty \frac{x^3}{e^x - 1} dx$$

$U \propto T^4$

**Bonus:** A lei de Planck permite obter a constante de Stefan a partir de primeiros princípios!

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

R: potência irradiada por unidade de área [W/m<sup>2</sup>]

T: temperatura do corpo [K]

$\sigma$ : constante de Stefan =  $5,6704 \cdot 10^{-8}$  W/m<sup>2</sup>.K<sup>4</sup> (obtido empiricamente)



Uma nova lei deve abranger todos os fenômenos que já eram explicados pelas antigas leis!

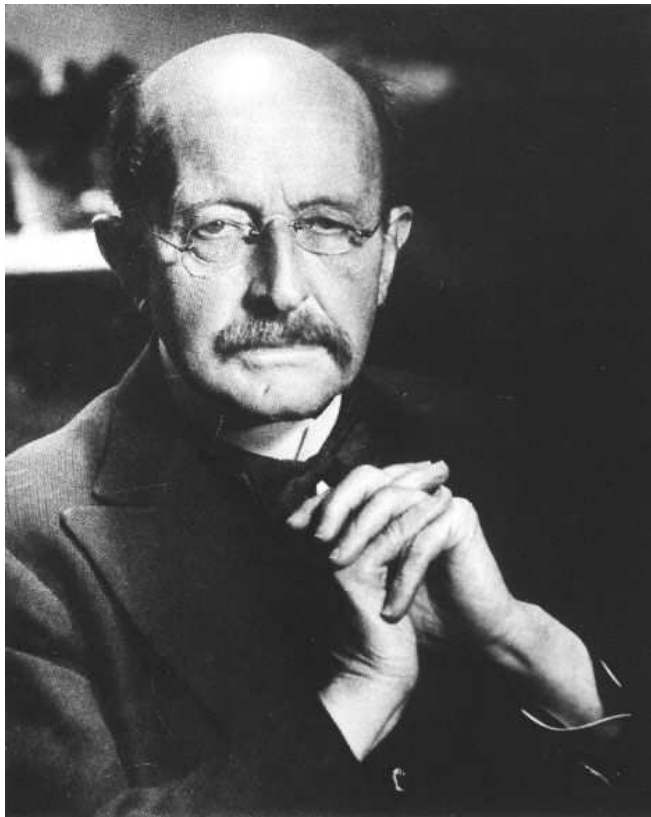
Outras demonstrações interessantes:

- i) Mostre que a lei de Planck se reduz à lei de Rayleigh-Jeans para grandes comprimentos de onda.
- ii) Mostre que a lei de deslocamento de Wien pode ser extraída a partir da fórmula de Planck.

A lista 1 está disponível no Moodle! Você já pode fazer os exercícios de 1 a 6.

A expressão de Planck para a radiação de corpo negro estava em desacordo com o que era esperado pela física conhecida até aquele momento, mas era uma fórmula que previa perfeitamente os resultados para a radiação de corpo negro.

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



Max Planck (1858 – 1947)

*Mas mesmo se a formula da radiação puder ser provada como absolutamente correta depois de tudo, ela ainda será apenas uma fórmula de interpolação encontrada por um “chute” de sorte e **isso me deixa completamente insatisfeito**. Eu tenho estado, desde o dia de sua origem, ocupado com a busca do seu real significado físico.”*

1919 – Prêmio Nobel – “A origem e desenvolvimento da teoria quântica”

<https://ia802708.us.archive.org/7/items/origindevelopmen00planrich/origindevelopmen00planrich.pdf>

## Algumas palavras de Albert Einstein sobre Planck

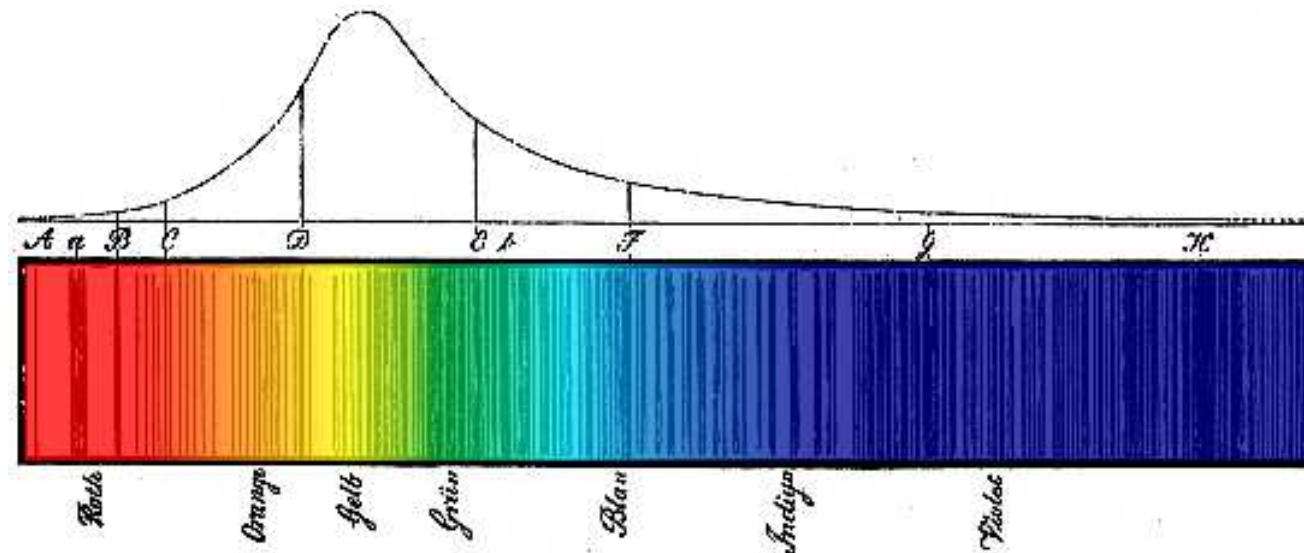
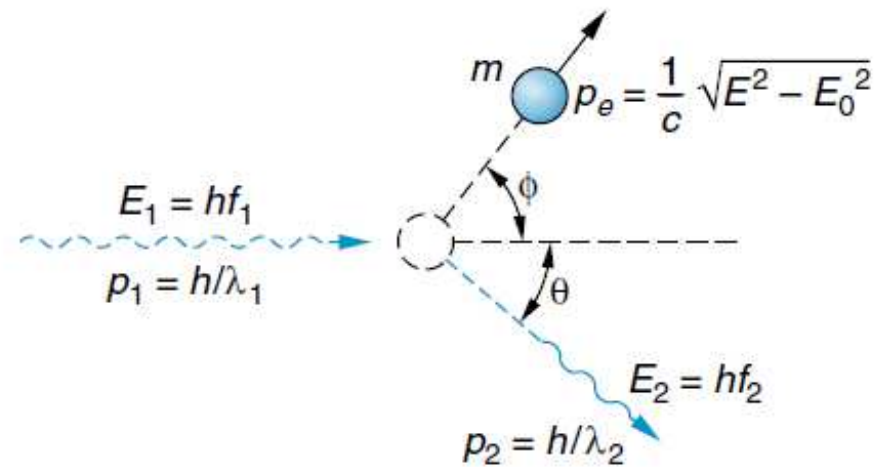
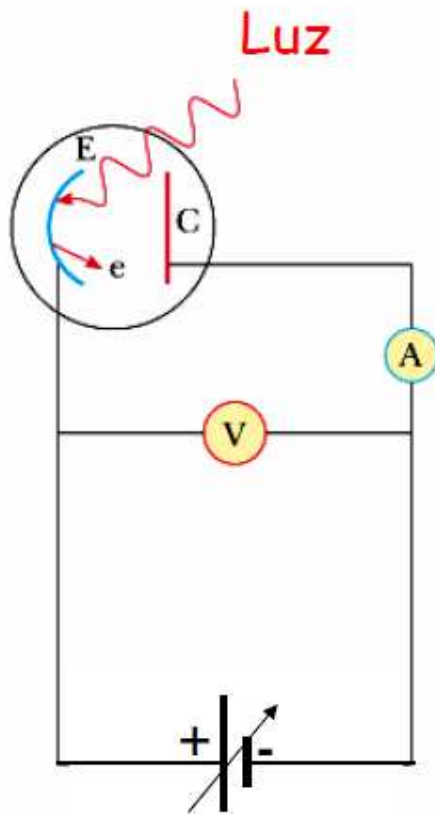
**Muitos homens dedicam-se à ciência, mas nem todos o fazem por amor.** Alguns percebem que ela lhes oferece a oportunidade de desenvolver seus talentos individuais; para esses a ciência é uma espécie de esporte que lhes propicia prazer. Outros, cientistas por alguma circunstância fortuita, querem trocar sua capacidade intelectual por um bom pagamento; poderiam ter sido políticos ou empresários **Se o Anjo do Senhor descesse e expulsasse todos esses do Templo da Ciências, temo que o Templo ficasse quase vazio. Restariam poucos fiéis, alguns de antigamente, outros contemporâneos. Max Planck estaria entre eles. Por isso o admiro. (...)**

(...) O estado mental que proporciona esse impulso é semelhante ao do crente ou do apaixonado. O esforço prolongado não decorre de um propósito ou de um plano preestabelecido. **A inspiração surge de uma necessidade da alma.**

Estou certo de que Planck desdenharia minha infantil maneira de descrevê-lo. Por que devo falar de sua grandeza? Ela não pede minha modesta confirmação. Sua obra deu um dos mais poderosos impulsos à ciência. **Suas ideias persistirão enquanto a física existir. Espero que o exemplo que brota de sua vida inspire as próximas gerações de cientistas.**

“Planck - Autobiografia científica e outro ensaios” – Ed. Contraponto.

Na próxima aula, continuaremos a discutir evidências experimentais que levaram ao surgimento da Teoria Quântica por meio dos efeitos foto-elétrico, efeito Compton e o espectro atômico.



Zu Fraunhofer's Abh. Deutschl. 1814-15.

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

Continuação: Evidências Experimentais da Física Quântica:

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





Perguntas, dúvidas, comentários, aflições?

## Cronograma e conteúdo programático da disciplina (parte 1)

Semana	Dia	Aula	Conteúdo
1	<del>24/09 (Ter)</del>	<del>1</del>	<del>Apresentação a disciplina; Evidências experimentais da teoria quântica : radiação do Corpo Negro.</del>
	---	---	-----
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	<b>29/10 (Ter)</b>	<b>P1</b>	<b>Primeira Avaliação</b>
	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 Quânticas, 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	<b>03/12 (Ter)</b>	<b>P2</b>	<b>Segunda Avaliação da Disciplina</b>
	---	---	-----
12	<b>10/12 (Ter)</b>	<b>Psub\REC</b>	<b>Avaliação Substitutiva ou Avaliação de Recuperação</b>
13			
	<b>14 a 21/9</b>		<b>Lançamento de conceitos e faltas</b>