

# Instituto de Física USP

## Física Moderna I Aula 13

Professora: Mazé Bechara

# Aula 13 – *Processos de criação e de aniquilação de matéria*

1. Outros processos que evidenciam o caráter corpuscular da radiação (chocantes no conceito de matéria na Física Clássica!):
  - a) O processo de **criação de matéria**, ou melhor, de um par (partícula e sua anti-partícula) pela absorção de um fóton pela matéria. O par elétron-positron – o que precisa de menos energia de um fóton. Aplicação.
  - b) O processo de **aniquilação de matéria**, ou melhor, de um par partícula e sua anti-partícula, com a criação de pelo menos dois fótons. Aplicação
2. **Apresentação do critério de correção das questões 1 e 2 da prova 1.**

# A criação de matéria ! - conceituação (impensável em física clássica)

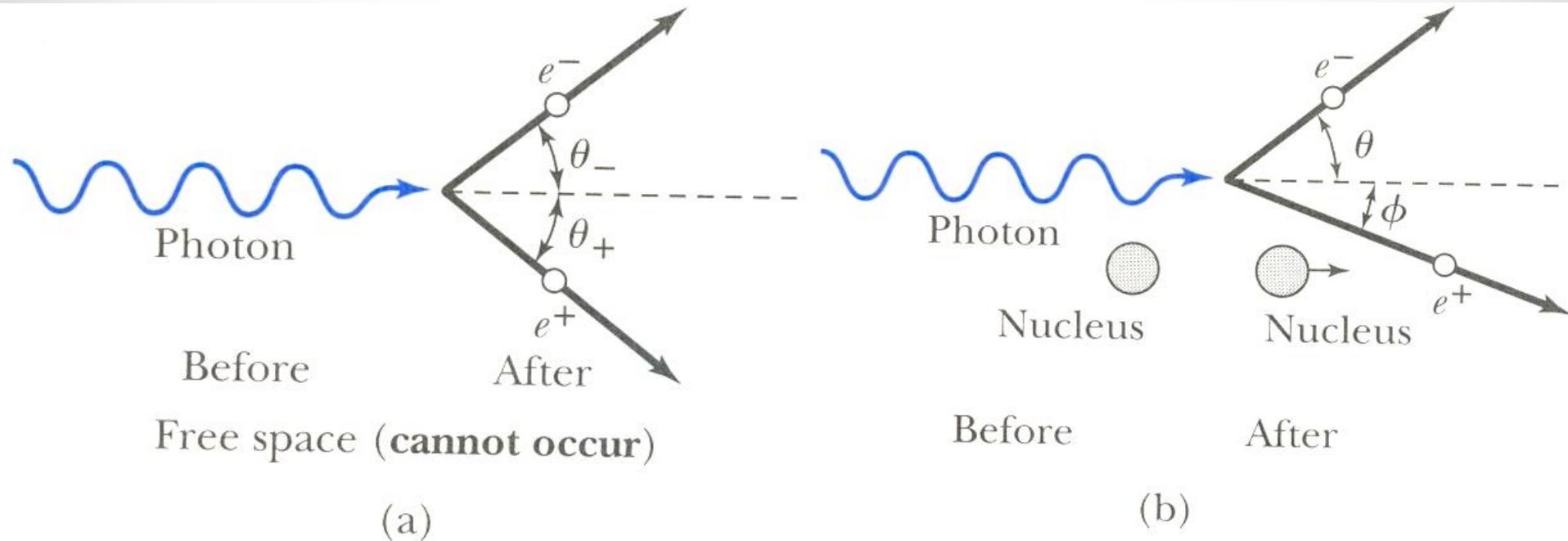
Quando fótons de energia igual ou maior do que duas vezes a energia de repouso de uma partícula material, pode ocorrer de **um fóton** ser **absorvido por um núcleo e haver a criação de um par de partícula e sua antipartícula, ou seja, de matéria.**

A partícula estável de menor energia de repouso é o elétron: 0,511MeV. Assim **fótons com 1,022MeV (raios-X ou gama!) ou mais podem criar matéria.**

Um **fóton sem interagir** com a matéria **é estável**, não desaparece, são "eternos". Assim a **criação de matéria não se faz espontaneamente.**

É preciso haver **um núcleo (matéria pesada)** para absorver parte ou **todo o momento linear do fóton na criação do par partícula-antipartícula**, ficando entretanto com parte desprezível da energia. **Sim, pode ser criado um par partícula-antipartícula em repouso** – caso no qual **todo o momento do fóton é absorvido pelo núcleo (matéria pesada)** com o qual o fóton interagiu (*Equações na aula!*).

# Processo de produção de par Elétron – Pósitron



**FIGURE 3.20** (a) A photon cannot decay into an electron–positron pair in free space, but (b) near a nucleus, the nucleus can absorb sufficient momentum to allow the process to proceed.

# *Criação de matéria - Aplicação*

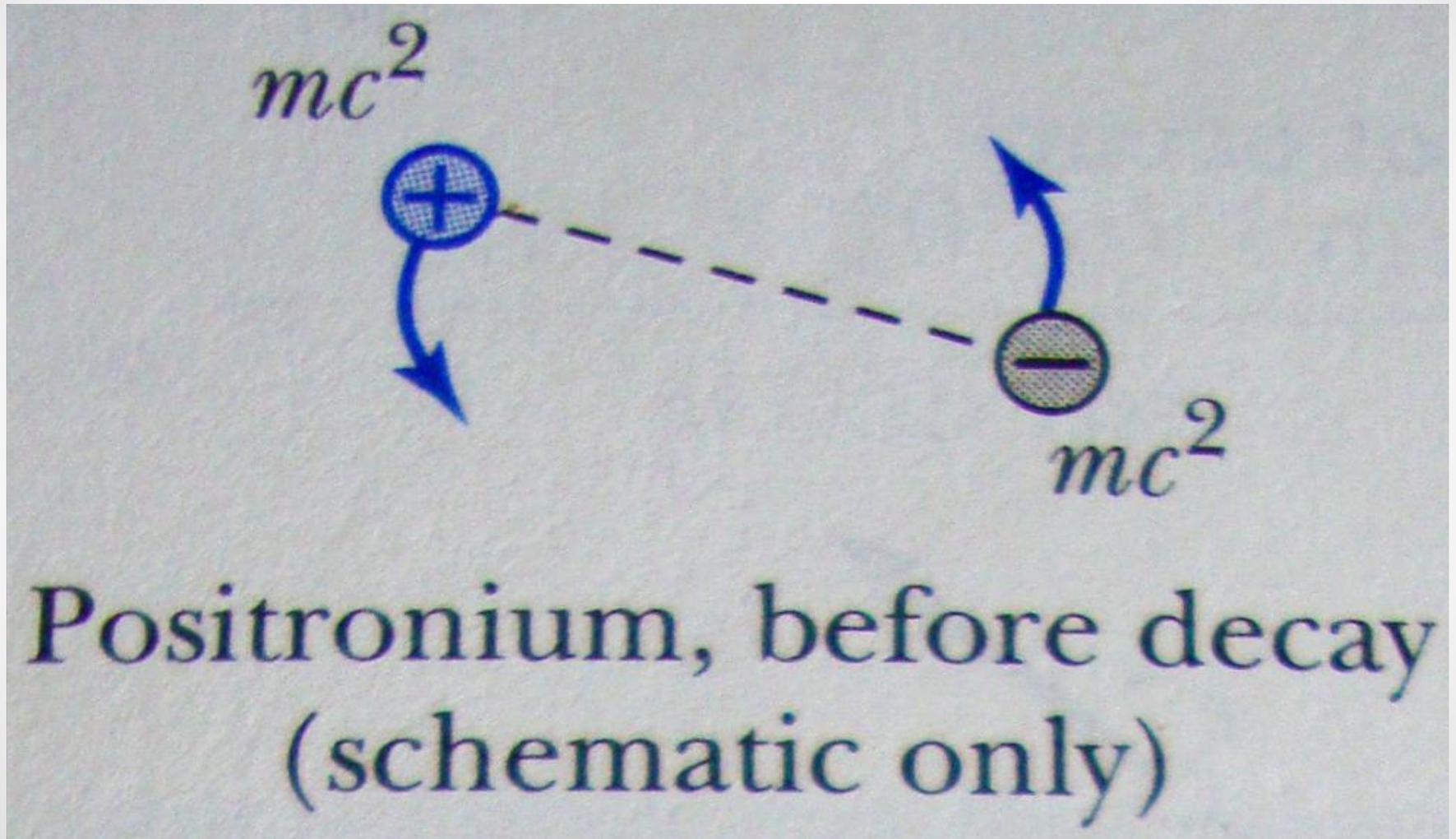
Um fóton cria um par elétron-pósitron. O elétron é criado com energia cinética de 1MeV e velocidade na direção do fóton incidente. O pósitron é criado em repouso.

- a) Determine a energia do fóton que criou o par de partículas. Justifique.
- b) Determine os momentos lineares do fóton, do elétron e do pósitron em MeV/c.
- c) Há conservação do momento linear no processo? Quem fica com o momento do fóton? Dê a resposta em % do momento do fóton.
- d) Há conservação de energia no processo? Quem fica com a energia do fóton? Dê a resposta em % da energia do fóton. Comente esta resposta levando em conta o resultado do item c

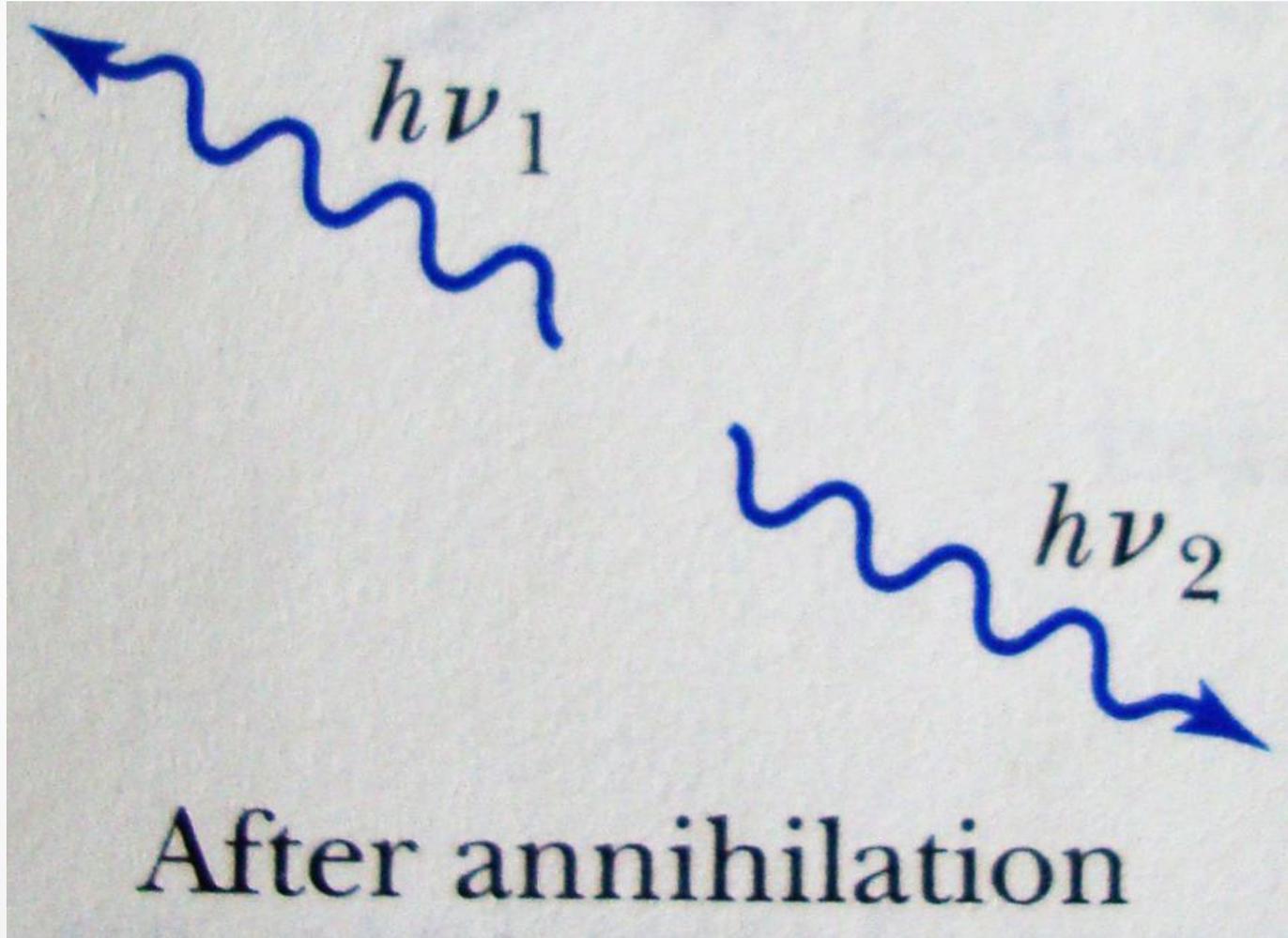
# A aniquilação da matéria – com a consequente criação de radiação eletromagnética

1. **Sempre** que uma antipartícula **interage** com a sua respectiva partícula ocorre **o aniquilamento das duas entidades com emissão de fótons – pelo menos dois deles** (radiação eletromagnética) para haver conservação de energia e momento linear no processo. **Nesse caso não há intermediários na interação.**
2. **Interagir** significa “ficarem muito próximos”, ou ainda melhor: ter uma **energia potencial de interação (energia de ligação).**
3. No caso do par elétron-pósitron esta distância é da ordem da distância entre o núcleo e o elétron de um átomo de H; a **interação entre as partículas é coulombinana atrativa, como nos átomos**, e por isto o sistema é chamado de **átomo positrônico**. A **energia de ligação é de -6,8eV**. Mas, diferentemente do H **o átomo positrônico é instável: ele decai (expressão técnica) espontaneamente em um elétron e um pósitron com meia vida de  $10^{-10}$ s**. **A meia vida é o tempo para metade dos átomos positrônicos decaírem**, ou seja, haver aniquilação do par com criação de dois fótons.
4. A aniquilação do par com a formação de três fótons ou mais pode ocorrer, mas a probabilidade é muito menor do que o decaimento com formação de dois fótons.

# O átomo positrônico – estado ligado



# Decaimento do átomo: aniquilação de par elétron-pósitron com emissão de dois fótons



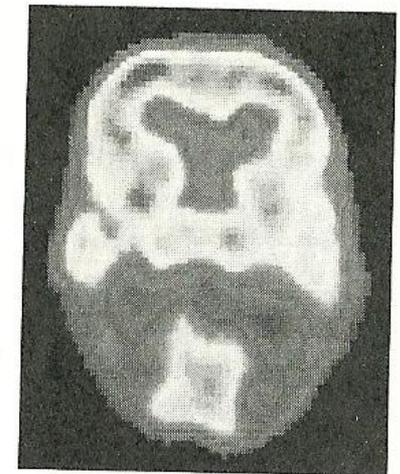
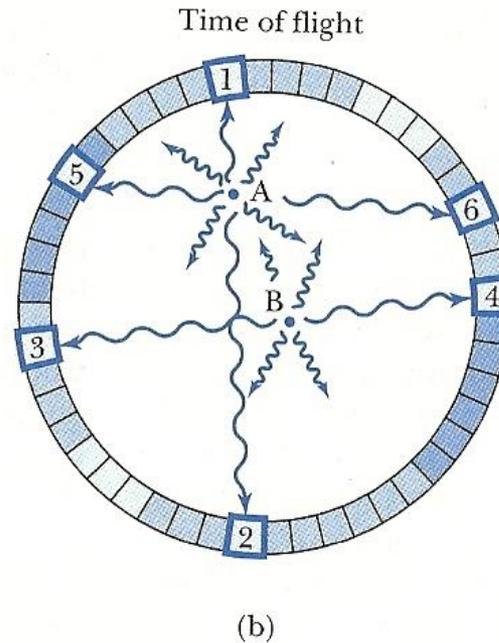
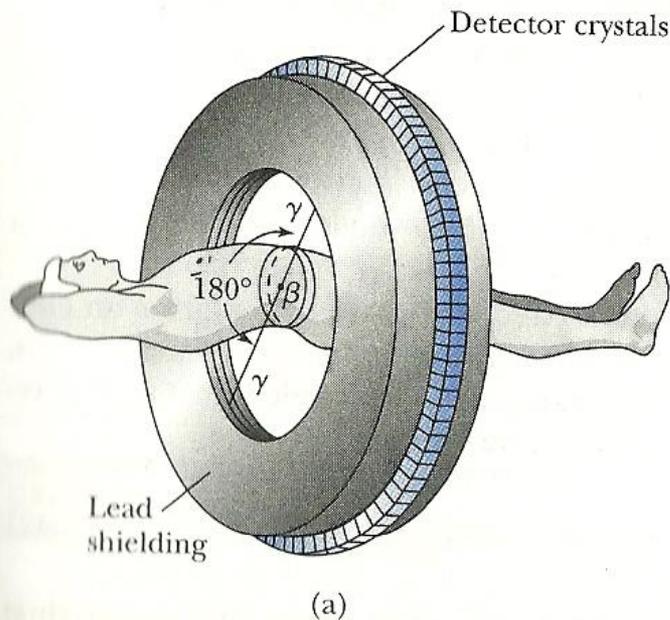
# Perguntar não ofende...

1. Por que parte ou todo o universo físico “não desaparece ou desapareceu” pela interação de matéria com a antimatéria virando radiação eletromagnética?
- Ref. Na xerox: Leandro de Paula e Miriam Gandelman; *Instituto de Física, Universidade Federal do Rio de Janeiro*; CIÊNCIA HOJE • v o l . 25 • n ° 148

# A aniquilação de um par à serviço da saúde humana: PET (Positron Emitter Tomography)

Fig. Modern Physics for Scientists and Engineers – S. Thornton, A. Rex

Summary 113



(c)

(a) Corpo posicionado depois de receber apropriado radiofármaco para se concentrar, por processos fisiológicos, na região a ser examinada: (b) O pósitron caminha poucos milímetros até se aniquilar depois de formar o par, emitindo dois fótons que detectados permitirão a localização da posição do pósitron; (c) A tomografia de um cérebro normal.

# *Funcionamento do PET*

- **Pósitrons emitidos naturalmente de radioisótopos (núcleos instáveis) como os elementos:  $^{15}\text{O}$ ,  $^{11}\text{C}$ ,  $^{13}\text{N}$  e  $^{18}\text{F}$  são injetados no corpo do paciente junto com glicose.**
- **As células cancerígenas, que têm reprodução muitíssimo rápida, absorvem muito mais calorias que as normais. Assim elas ao absorverem mais glicose que as células normais, ficam com muito mais pósitrons da glicose do que as elas, e portanto formam muitos mais pares de fótons de  $\sim 0,511\text{MeV}$ , na aniquilação de um par, depois de formar átomos positrônicos com os elétrons do corpo humano.**
- **É possível identificar tumores milimétricos porque os pósitrons andam fração de milímetros antes de se juntar ao elétron e decair em dois fótons, o que permite sua localização com precisão.**

# Questão 1 da prova 1

**(0,75)** (a) Significado da distribuição: fração de moléculas com energia cinética (do centro de massa) entre  $\varepsilon$  e  $\varepsilon+d\varepsilon$ , por  $d\varepsilon$  **(0,35)**.

A distribuição de energia cinética é a mesma para todos os tipos de moléculas, independente de massa ou estrutura **(0,20)** e também do estado físico químico **(0,20)**. Isto é consequência da proposta de Maxwell de associar o conceito de temperatura na matéria à média da energia cinética dos constituintes da matéria sob quaisquer condições e tipos de constituintes.

**(1,0)** (b) Pela resposta ao item anterior, as energias cinéticas mais prováveis e menos prováveis são as mesmas para os dois gases da mistura.

Derivando **(tem que ser feito explicitamente)** e igualando a zero. Reposta:  $kT/2$  é o valor do máximo da distribuição da energia cinética, portanto na energia cinética mais provável **(0,40)**.

Como  $f(0)=0$ , então a energia menos provável é a que zera a distribuição: ou seja, a energia cinética zero **(0,20)**.

Significado Físico: energia cinética mais provável é o valor de energia cinética do sistema em torno do qual, dentro de  $d\varepsilon$ , há o maior número de moléculas **(0,20)**.

Energia cinética menos provável é o valor de energia cinética do sistema em torno do qual, dentro de  $d\varepsilon$ , há o menor número de moléculas **(0,20)**.

# Questão 1 da prova 1

## Questão 1

**(0,5)** (c)  $dN/N = f(kT_0/2)d\varepsilon$  Era preciso determinar corretamente  $f(kT_0/2)$ .

Se calculou corretamente  $f(kT_0/2)$  mas disse que este valor é a fração de partículas:  
**ganha 0,30.**

Se escreveu uma integral correta (sem resolver) com os limites  $kT_0/2$  e  $kT_0/2 + d\varepsilon$ :  
**ganha 0,25**

Se escreveu a integral correta (sem resolver) com os limites “genéricos”  $kT/2$  e  $kT/2 + d\varepsilon$ : **ganhou 0,20**

**(0,75)** (d) **(0,5)** Sim é possível, em princípio, saber a energia cinética de cada molécula. Isto porque a dinâmica das moléculas, nesta teoria, é descrita pela 2ª lei de Newton que parte do princípio de que se pode determinar a posição e velocidade em cada instante. Portanto, em princípio se pode determinar a energia cinética de cada partícula em cada instante. Por esta razão o sistema é determinístico.

**(0,25)** Mas o tratamento é estatístico porque a distribuição, prevista pela mecânica estatístico clássica, é o comportamento do conjunto de muitas partículas cujos esta dos possíveis pela dinâmica newtoniana são igualmente prováveis. A estatística dá informações relevantes sobre o sistema de muitas partículas.

# Questão 2 da prova 1

**(1,0)** (a) Hipóteses de **Planck**:

**(0,25)** há na cavidade ondas estacionária no equilíbrio térmico. Isto porque a radiação que sai do corpo na temperatura  $T$  para a cavidade é igual a radiação que sai da cavidade para o corpo, não havendo energia eletromagnética na fronteira entre eles, o que obriga os campos elétrico e magnéticos a serem nulos em qualquer instante nesta fronteira – ou seja, ondas estacionárias.

**(0,25)** A densidade volumétrica de energia na cavidade é calculado como o produto do número de ondas estacionárias com a energia média de cada onda estacionária. O número de ondas estacionárias é determinado pelo eletromagnetismo clássico (de Maxwell).

**(0,25)** Já a energia média das ondas estacionárias é suposta igual a energia média das oscilações das cargas no interior da matéria. A energia média das oscilações é calculada usando o teorema de Boltzmann mas supondo que cada oscilação de carga é quantizada:  $E = nh\nu$  com  $n = 0, 1, 2, \dots$  Por **proposta inovadora de Planck**. Este valor médio de energia é então dependente da frequência.

**(0,25)** A **única** diferença de Planck com os pioneiros Rayleigh e Jeans é que estes últimos usaram o valor médio das oscilações contínuas das cargas na matéria com a teoria de Boltzmann, como bons físicos clássicos!

# Questão 2 da prova 1

**(1,0)** (b) Valor dos gráficos:

**(0,30)** por cada um dos dois gráficos (corpo negro e corpo real) qualitativamente corretos segundo Planck. Entendido por qualitativamente correto: que fique claro que a densidade do corpo real é em cada ponto 0,75 a densidade do corpo negro. **(0,40)** pelos dois gráficos se não estiver com a razão correta.

**(0,20)** por cada gráfico qualitativamente correto segundo Rayleigh e Jeans. Qualitativamente correto significa: coincidindo bem apenas na região de baixas frequências.

**(0,75)** (c) **(0,50)** razão correta ( $1/16$ ) e devidamente justificada. Não perdeu nota se usou relação das radianças totais em vez das densidades volumétricas de energia totais, sem justificar a proporcionalidade entre elas, o que dá a mesma razão

**(0,25)** Não muda para corpo real porque o coeficiente de proporcionalidade, coeficiente de emissão, é o mesmo nas duas temperaturas.