



Instituto de Física da USP



Física V – 4300311 - período noturno  
2<sup>o</sup>. SEMESTRE DE 2012

Cronograma proposto  
cronograma realizado

prof.<sup>a</sup> Maria José (Mazé) Bechara

| dia    | aula | semana | ASSUNTO  |
|--------|------|--------|--|
| 31 / 7 | 1    | 1      | Apresentação dos Protagonistas: Alunos do 1 <sup>o</sup> semestre de 2012; Professora; Monitor. Apresentação da disciplina: O conteúdo e o enfoque da disciplina: O contexto histórico e conceitual da Física Clássica no qual surge a Física Quântica:  |
| 02/8   | 2    | 1      | <b>Relação Ciência, Filosofia, Sociedade e as revoluções científicas</b> , em particular, a que possibilitou a Física Quântica. As áreas atuais na Física. <b>Entrando no conteúdo do Tópico I: As grandes sínteses da Física Clássica que serão descartadas ou modificadas na Física Quântica (ATENÇÃO – REOLHANDO O QUE SE PENSA APREENDIDO!) (i) O determinismo; (ii) A natureza corpuscular OU a natureza ondulatória. A Relatividade especial (determinística) e as mudanças conceituais em relação à Física clássica – os conceitos de espaço-tempo; massa-energia. Uma representação qualitativa da matéria: (i) A sua.</b>   |
| 03/8   | 3    | 1      | Modelos mecânicos (cinéticos) da matéria. Da termodinâmica dos gases aos modelos mecânicos de matéria gasosa, líquida e sólida. A relação entre as variáveis do estado termodinâmico: pressão, volume, <b>temperatura e energia interna e grandezas da dinâmica dos constituintes da matéria no modelo mecânico</b> (cinético) mais básico. A medida da energia interna (termodinâmica) da matéria: o calor específico molar a volume constante. A estimativa dos modelos mecânicos do calor específico molar a volume constante em gases mono, bi e poliatômicos e nos sólidos cristalinos com uso do princípio da equipartição da energia. <b>A Mecânica Estatística Clássica (Maxwell-Boltzmann). Hipóteses e bases de partida.</b> |

**Continuação do programa realizado de física V no 2º SEMESTRE/2012-  
noturno**

**Profa. Mazé Bechara**

| <b>DIA</b> | <b>aula</b> | <b>semana</b> | <b>ASSUNTO</b>  |
|------------|-------------|---------------|---|
| 07/8       | 4           | 2             | Uma mecânica para um sistema de muitas partículas: a mecânica estatística clássica: i. O teorema de Boltzmann para a distribuição de grandezas físicas contínuas e discretas. A independência das distribuições espacial e de velocidades e o determinismo na estatística clássica. II. A distribuição de velocidades (Gaussiana) no equilíbrio termodinâmico a partir do teorema de Boltzmann – velocidade mais provável e velocidade média. Iii. A distribuição de módulo de velocidades (Maxwelliana) no equilíbrio termodinâmico a partir da distribuição de velocidades. Medidas experimentais dos módulos de velocidade. Iv. Aplicação. Conceito e cálculo de velocidade mais provável, menos provável, média do módulo e média do módulo ao quadrado.  |
| 09/8       | 5           | 2.            | Medidas experimentais dos módulos de velocidade. Aplicação. Conceito e cálculo de velocidade mais provável, menos provável, média do módulo e média do módulo ao quadrado. 2. Aplicação: A distribuição da energia cinética a partir da distribuição de módulos da velocidade. 3. Aplicação: a distribuição espacial das moléculas na superfície da Terra (atmosfera é um exemplo): 1.1 Desprezando a gravidade terrestre; 1.2 Levando em conta a gravidade na aproximação de força de gravidade constante.   |
| 10/8       | 6           | 2             | O experimento de Perrin: atestando o acerto da teoria de Boltzmann e determinando experimentalmente o número de Avogadro, de forma direta. Teorema de equipartição de energia. Movimento MHS de um sistema de N constituintes. O valor média da energia e o $c_v$ supondo MHS-tridimensional. O modelo de sólidos (resulta em $c_v$ constante). A distribuição de energia (Atenção cuidado!) de um sistema MHS unidimensional; Distribuição de energias de MHS supondo energias quantizadas: $e=ne_0$ com $n=0,1,2,3..$ (proposta de Planck – <i>nunca antes observada na Física!</i> ): valor média da energia. Oscilações tridimensionais – os sólidos e o cálculo da energia média e do $c_v$ (resulta em $c_v$ variável com a temperatura!). <i>Obs. Esse cálculo foi feito pela primeira vez por Einstein.</i>   |
| 14/8       | 7           | 3             | Os sólidos condutores segundo o modelo de Drude para a corrente. A energia média e o $c_v$ experimental! <i>Uma outra falha na teoria de Boltzmann, que não se resolve com a quantização da energia!</i> Os constituintes da matéria são neutros, mas têm cargas em movimentos com aceleração. A emissão de energia eletromagnética por efeito de temperatura e a definição de corpo negro. Características experimentais da radiação de corpo negro: Lei de Stefan – Boltzmann para a intensidade (radiança) total emitida pelo corpo negro, a Lei de deslocamento de Wien e a radiança espectral. Relação da emissão do corpo negro, ou forno ideal, com a de um forno real na mesma temperatura. Aplicação das leis empíricas: a emissão da superfície do Sol. A onda no interior da cavidade de um sólido em equilíbrio com a matéria na temperatura T – ondas estacionárias. |
| 16/8       | 8           | 3             | Determinação teórica da radiança espectral do corpo negro ou da intensidade espectral por efeito de temperatura: 2. A determinação de Rayleigh e Jeans da radiação de uma cavidade, no contexto da Física Clássica. Comparação com os resultados experimentais e a chamada “catástrofe do ultravioleta”. 3. A proposta de Planck de quantização das energias dos osciladores da matéria e as implicações: na energia média da radiação eletromagnética da cavidade e na radiança espectral emitida. Comparação com os resultados experimentais. A Lei de deslocamento de Wien: consequência da radiança determinada por Planck.   |
| 17/8       | 9           | 3             | Aplicação relativa a corpo negro. Revisão sobre ondas eletromagnéticas: Fontes, tipos de ondas que geram e suas frentes de ondas. Atividade sobre a Intensidade e distribuição de energia na frente das ondas monocromáticas simétricas: planas, cilíndricas e esféricas. A proposta de Einstein de granulação na energia da onda eletromagnética – os fótons. Distinguindo a quantização de Einstein da de Planck. O número de fótons por unidade de tempo nas frentes da onda eletromagnética monocromáticas. A compatibilidade possível entre as visões de Maxwell e Einstein na intensidade das fontes.   |

---

**Continuação do programa realizado de física V no 2º SEMESTRE/2012-  
noturno**

**Profa. Mazé Bechara**

---

**DIA aula semana ASSUNTO**

---

- 21/8 10 4 Efeito fotoelétrico – o que é e o que se observa. Características da emissão fotoelétrica que podem e as que não podem ser descritas pelo caráter ondulatório do feixe de luz. A proposta de Einstein para descrever o efeito fotoelétrico. Como a proposta de Einstein permite a descrição de todas as características do efeito fotoelétrico. Aplicação.
- 23/8 11 4 O Efeito Compton – o que é . As características dos espectros espalhados. Determinação da diferença de comprimentos de onda em função do ângulo do espalhamento segundo a ideia fotônica. Condições para ocorrer absorção do fóton pelo elétron da matéria (efeito fotoelétrico) ou espalhamento do fóton pelo elétron da matéria. Aplicação
- 24/8 12 4 Aplicações de natureza dual da radiação eletromagnética – os fótons. Raios-X: Descoberta e principais características. O tubo de raios-X e as características do espectro produzido. A frequência mínima do espectro.

- 
- 28/8 13 5 Os processos que geram a estrutura grossa e a estrutura fina do espectro na visão fotônica. Aplicação. A antimatéria – o que é. 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.
- 30/8 14 5 Aplicação. A competição entre vários processos dos que mais ocorrem na interação da radiação eletromagnética, raios-X e raios- $\gamma$ , com a matéria. A compatibilidade entre as visões ondulatória e fotônica. Evidências experimentais da existência de estrutura nos átomos (até aqui na disciplina e na história da Física no início dos anos 1900). Os espectros de linha de matéria gasosa – espectros de emissão e de absorção de radiação eletromagnética (REM).
- 31/8 15 5 Os espectros de linha de matéria gasosa – espectros de emissão e de absorção de radiação eletromagnética (REM) dos átomos – o que são, condições para serem observados e porque se entende serem espectros dos átomos. (a) Características dos espectros da absorção e da emissão. Modelo de Thomson – a primeira tentativa de descrever os átomos estáveis como fruto da interação eletromagnética, com possibilidade de apresentar espectro de linhas.

---

**04/9 a 09/9 recesso da semana da Pátria**

---

- 11/9 16 **6 Aplicações e dúvidas – venha preparado!** Dúvidas dos Tópicos I e II e Aplicações do tópico II: questões do Guia: 14, 43,38 e 35.
- 13/9 17 O experimento de Geiger, Marsden e Rutherford de espalhamento elástico de partículas alfa por folhas de ouro e outros elementos, e seus resultados experimentais conflitantes com o modelo atômico de Thomson. A proposta de Rutherford para a interação com tais resultados – discussão qualitativa. Conceitos e definições: espalhamento elástico de um feixe de partículas por um “alvo” espalhador; ângulo de espalhamento, parâmetro de impacto no espalhamento; relação entre o parâmetro de impacto e o ângulo de espalhamento. O conceito e uma expressão da seção de choque diferencial para qualquer força de interação.

---

**14/9 6 1ª prova – conteúdo das aulas 1 a 16**

---

**Continuação do programa realizado de física V no 2º SEMESTRE/2012-  
noturno**

**Profa. Mazé Bechara**

| <b>DIA</b> | <b>aula</b> | <b>semana</b> | <b>ASSUNTO</b>  |
|------------|-------------|---------------|---|
| 18/9       | 18          | 7             | Determinação da seção de choque diferencial para o espalhamento elástico por interação repulsiva coulombiana ou a seção de choque de Rutherford. Comparação com os resultados experimentais. A previsão do espalhamento de Rutherford para o que se mede nos detectores em situações específicas de feixe e arranjo experimental. Comparação com os resultados experimentais. A dimensão nuclear a partir de resultados experimentais de Rutherford. Aplicação.   |
| 20/9       | 19          | 7             | Os átomos no modelo nucleado de Rutherford segundo a Física clássica e sua instabilidade. As hipóteses do modelo de Bohr para a estrutura e as transições atômicas. Determinações no contexto do modelo de Bohr para um elétron interagindo com o núcleo: raios, velocidades e energias permitidos no movimento do elétron em relação ao núcleo em cada estado atômico. O átomo de hidrogênio – resultados do modelo. Comparação com os resultados experimentais.   |
| 21/9       | 20          | 7             | Aplicações relativas ao modelo de Bohr. O átomo positrônico e o processo de aniquilação de partículas (questão 5 da prova). O átomo positrônico no modelo de Bohr, e o processo de aniquilação de partículas (questão 5 da prova). Princípio de correspondência de Bohr: o que é. Aplicações. Átomos de muitos elétrons – os raios e velocidades das órbitas dos elétrons comparadas com a do H; o modelo de camadas. O processo que gera a estrutura fina dos espectros de raios X.  |
| 25/9       | 21          | 8             | Comentários sobre as soluções das questões da prova. Critérios de correção. Princípio de correspondência de Bohr: o que é.  |
| 27/9       | 22          | 8             | O Experimento de Franck e Hertz – mais uma evidência da quantização nos estados atômicos. Princípio de correspondência de Bohr. Aplicações. A regra de Quantização de Wilson-Sommerfeld. Aplicações: MHS unidimensional, partícula em movimento dentro de uma caixa; átomo de hidrogênio.   |
| 28/9       | 23          | 8             | A proposta de de Broglie de caráter dual da matéria: enunciado e as relações de conexão entre as grandezas ondulatórias (frequência, comprimento de onda) e as mais características de partículas (energia e momento linear). A velocidade da onda da partícula material com velocidades não relativísticas ou relativísticas. As regras de quantização que decorrem das ondas estacionárias das partículas na proposta de de Broglie: no átomo de H, na partícula presa em uma caixa com movimento de velocidade constante. Comparação com a quantização de Wilson-Sommerfeld. |

**Continuação do programa realizado de física V no 2º SEMESTRE/2012-  
noturno**

**Profa. Mazé Bechara**

| DIA   | aula | semana           | ASSUNTO  |
|-------|------|------------------|--|
| 2/10  | 24   | 09               | As expressões e os valores numéricos de comprimentos de onda de partículas em movimentos não relativísticos e relativísticos, e as possibilidades de observação da onda associada. Experimentos que revelam a onda de partículas - sequencia histórica (com entendimento dos experimentos). A onda composta de duas ondas monocromáticas (clássicas) – Batimento. As relações dispersão na onda de batimento. Outros pacotes de onda e as relações de dispersão. O pacote gaussiano ou o de menor relação de dispersão. As relações de dispersão quando valem as relações de de Broglie – as relações de incerteza de Heisenberg. Interpretações e consequências: a impossibilidade de partícula parada; a largura natural das energias ( $E$ , portanto, nas linhas emitidas) nos estados atômicos. |
| 04/10 | 25   | 09.              | Determinação da energia ou energia de ponto zero, a partir do princípio de incerteza: MHS (cálculo), átomo de hidrogênio (estimativa). Princípio de Complementaridade de Bohr. Primeiros postulados da interpretação probabilística da função de onda na Mecânica Quântica, devida à Max Born. O experimento de Young na interpretação da função de onda de Max-Born, o princípio de complementaridade e o de incerteza. Outros postulados da interpretação de Max-Born para a onda da partícula. Propriedades das funções de onda decorrentes da interpretação probabilística de Max Born.  |
| 05/10 | 26   | 09               | Outros postulados da interpretação de Max-Born para a onda da partícula. A equação geral da mecânica quântica de Schroedinger. Propriedades das funções de onda decorrentes da interpretação probabilística de Max Born. Aplicação: funções de onda e seus resultados na interpretação de Max Born.  |
| 09/10 | 27   | 10               | Completando a Aplicação: funções de onda e seus resultados na interpretação de Max Born. Estados estacionários na mecânica de Schroedinger – um conjunto de soluções possíveis para os potenciais conservativos na física clássica. (Ou as equações de Schroedinger independente do tempo; ou os auto-estados de energia; ou os estados de energia constante.) Estados estacionários e ligados de uma partícula presa em uma caixa em movimento unidimensional com potencial finito nos extremos da caixa – as auto-funções de energia em termos de constantes não nulas. A solução das funções de auto-funções da energia e seus auto-valores no caso de potencial infinito nos extremos da caixa.  |
| 11/10 | 28   | 10.              | O poço de potencial infinito – complementando. Comparação com resultado de de Broglie (ondas estacionárias) e Wilson-Sommerfeld. O poço de potencial finito: determinação gráfica dos valores de energia; determinação das constantes da função de onda. Estados estacionários do oscilador harmônico – discussão semi-quantitativa. Comparação das energias dos estados estacionários com a proposta de Planck e resultados da quantização de Wilson-Sommerfeld.  |
| 12/10 | 10   | feriado de N. S. | Aparecida  |

**Continuação do programa realizado de física V - 2º SEMESTRE/2012-  
noturno**

**Profa. Mazé Bechara**

| <b>DIA</b> | <b>aula</b> | <b>semana</b> | <b>ASSUNTO</b>   |
|------------|-------------|---------------|--|
| 16/10      | 29          | 11            | As características gerais dos movimentos de estados ligados na mecânica quântica: na função de onda e a nas energias. Um potencial nuclear para a interação de uma partícula alfa com as outras partículas de um núcleo – discussão qualitativa. A possibilidade de existirem núcleos estáveis e os que decaem com emissão de uma alfa. A ortonormalidade dos auto-estados de energia dos estados ligados: uma base para descrever todas as funções de onda. As combinações lineares de auto-estados de energia: densidade de probabilidade variável no tempo e a possibilidade de emissão como proposto por Bohr. Os estados mistos: a relação entre as constantes e o valor média da energia.  |
| 18/10      | 30          | 11            | <b>Esclarecimentos de dúvidas dos alunos.</b> A partícula livre. As auto-funções de energia e de momento linear – a onda plana. A impossibilidade de normalização da função de onda e a não quantização da energia. A partícula na condição inicial e sua evolução dinâmica. O princípio de incerteza e a onda plana. O pacote de ondas planas – uma partícula localizada no espaço. Reinterpretação da conservação da partícula: (a) Os fluxos de incidência, reflexão e transmissão e a equação da conservação da partícula. O caso particular das ondas planas.   |
| 19/10      | 11          | 14            | <b>2ª PROVA - CONTEÚDO PROVA: ATÉ A AULA 29</b>  |
| 23/10      | 31          | 12            | Potenciais não ligados: a interpretação de “partes” da função onda: “onda incidente”, “onda refletida” e “ondatransmitida” na solução de potenciais não ligados, em p articular no caso de ondas planas. Os coeficientes de reflexão e transmissão. Uma “barreira” de potencial. As posições e energias da partícula na Física Clássica. Discussão qualitativa no caso da quântica: a possibilidade de penetrar na região classicamente proibida – o efeito túnel. Os auto estados de energia e seus auto-valores para um potencial “degrau”. As condições físicas que anulam as constantes da solução geral.  |
| 25/10      | 32          | 12            | Os auto estados de energia e seus auto-valores para um potencial “degrau” – continuação: os fluxos e os coeficientes de reflexão e de transmissão. As densidades de probabilidades e as energias. Interpretações. Uma barreira de potencial: A solução das auto-funções de energia na mecânica de Schroedinger. A densidade de probabilidade e a comparação com resultado da Física Clássica - o efeito túnel. As características das densidades de probabilidades e a condição inicial da partícula. Os fluxos de incidência, reflexão e transmissão e a equação da conservação da partícula. Os coeficientes de reflexão e transmissão da partícula opela barreira e a relação da conservação da partícula. Características gerais dos potenciais ligados e não ligados. |
| 26/10      | 33          | 12            | Discussão das soluções e critérios da 2ª prova   |

**Continuação do programa realizado de física V no 2º SEMESTRE/2012-  
noturno**

**Profa. Mazé Bechara**

| <b>DIA</b>     | <b>aula</b> | <b>semana</b>   | <b>ASSUNTO</b>   |
|----------------|-------------|---|--|
| 30/10          | 34          | 13  | A caixa tridimensional de potencial infinito. A degenerescência em energia no caso da caixa cúbica. A conveniência de se usar as coordenadas esféricas para potenciais centrais. Os operadores energia e momento angular e quadrado de momento angular em coordenadas esféricas. A equação de auto-estados de energia de um potencial central. A solução dos auto-estados de energia pelo método de separação das variáveis angulares da radial. (a) A parte angular de todas as auto-funções de energia de qualquer potencial central: conservação e quantização do módulo do momento angular e de sua componente z.  |
| 01/11          | 35          | 13  | A solução da parte angular do potencial central – continuação: (b) Uma imagem vetorial do momento angular e da sua componente quantizada, O potencial coulombiano atrativo para o átomo de H na teoria de Schroedinger – a equação da parte radial: auto-funções de energia e seus auto-valores. Os estados degenerados em energia e em L. Comparação com os resultados de Bohr e as regras de transição. As funções de onda e as densidades volumétricas de probabilidade. A simetria esférica nas densidades volumétricas de probabilidade. As densidades radiais de probabilidade. Aplicação: o valor mais provável e o valor médio da distância do elétron ao núcleo no estado fundamental: comparação com o raio do movimento relativo no Modelo de Bohr. |
| 02/11          | 13          | <b>Recesso de finais</b>                                    |  |
| 6/11           | 36          | 14  | As densidades radiais de probabilidade: cálculo e significado. Aplicação de densidade radial de probabilidade: o valor mais provável (“raio” mais provável), o menos provável e o valor médio (“raio” médio”) da distância entre o elétron e o núcleo no estado fundamental do átomo de H. Estados mistos, as grandezas físicas constantes e a possibilidade de transições no átomo de H. Aplicação  |
| 08/11          | 37          | 14  | Discussão de dúvidas dos estudantes.   |
| 09/11          | 38          | 14  | Discussão de dúvidas dos estudantes e Aplicações.  |
| 13/11          | 39          | 15  | Discussão de dúvidas dos alunos  |
| 15/11          | 15          | <b>feriado da república</b>                                 |  |
| 16/6           | 15          | <b>recesso da república</b>                                 |  |
| 20/11          | 16          | <b>recesso escolar - Dia da Consciência negra</b>           |  |
| 22/11          | 40          | 16  | Discussão de dúvidas dos alunos - Aula integradora de conteúdo da disciplina -   |
| 23/11          | 16          | <b>3ª prova – até a aula 40</b>                             |  |
| 27/11          | 42          | 17  | discussão da 3ª prova  |
| 29/11          | 17          | <b>prova final obrigatória – conteúdo de todas as aulas</b> |  |
| <b>THE END</b> |             |   |  |

**“Tudo vale a pena se a alma não é pequena”.**  
**Fernando Pessoa**