



# INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISA ESPACIAL – INPE

## MAGNETOSFERAS PLANETÁRIAS E ACOPLAMENTO ELETRODINÂMICO (PQ040)



### SUA PROVA

- Além deste caderno contendo 5 (cinco) questões discursivas **com as respectivas folhas de rascunho**, você receberá do fiscal de prova as folhas de textos definitivos;



### TEMPO

- Você dispõe de **4 (quatro) horas** para a realização da prova;
- **2 (duas) horas** após o início da prova, é possível retirar-se da sala, sem levar o caderno de questões;
- A partir dos **30 (trinta) minutos** anteriores ao término da prova é possível retirar-se da sala **levando o caderno de questões**.



### NÃO SERÁ PERMITIDO

- Qualquer tipo de comunicação entre os candidatos durante a aplicação da prova;
- Anotar informações relativas às respostas em qualquer outro meio que não seja no caderno de questões e nas folhas de textos definitivos;
- Levantar da cadeira sem autorização do fiscal de sala;
- Usar o sanitário ao término da prova, após deixar a sala.



### INFORMAÇÕES GERAIS

- Verifique se seu caderno de questões está completo, sem repetição de questões ou falhas. Caso contrário, **notifique imediatamente o fiscal da sala**, para que sejam tomadas as devidas providências;
- Confira seus dados pessoais, especialmente nome, número de inscrição e documento de identidade e leia atentamente as instruções para preencher as folhas de textos definitivos;
- Para o preenchimento das folhas de textos definitivos, use somente caneta esferográfica, fabricada em material transparente, com tinta preta ou azul;
- Assine seu nome apenas no(s) espaço(s) reservado(s) no cartão de respostas;
- Caso você tenha recebido caderno de cargo **diferente** do impresso em suas folhas de textos definitivos, o fiscal deve ser **obrigatoriamente** informado para o devido registro na ata da sala;
- O preenchimento das folhas de textos definitivos é de sua responsabilidade e **não será permitida a troca de folha de texto definitivo em caso de erro cometido pelo candidato**;
- Para fins de avaliação, serão levadas em consideração apenas os textos das folhas de textos definitivos;
- A FGV coletará as impressões digitais dos candidatos na lista de presença;
- Os candidatos serão submetidos ao sistema de detecção de metais quando do ingresso e da saída de sanitários durante a realização das provas.
- **Boa prova!**



## QUESTÃO 1

---

O estudo de magnetosferas planetárias e acoplamentos eletrodinâmicos requer o conhecimento tanto da Eletrodinâmica Clássica como da Física dos Plasmas. A presente questão, dividida em duas partes, visa a testar conhecimentos básicos do candidato nessas duas áreas. As respostas podem ser dadas de forma discursiva, em poucas linhas. Não é necessário utilizar equações ou esquemas, que podem ser introduzidos pelo candidato se auxiliarem na explicação.

### A) Eletrodinâmica

A eletrodinâmica clássica fundamenta-se em um conjunto de leis que resultaram da experimentação: (1) a lei eletrostática de Coulomb, que deu lugar à lei de Gauss; (2) a lei magnetostática de Biot-Savart, que deu lugar à lei de Ampère; e (3) a lei de Faraday. Esse conjunto de leis, com significado físico bem conhecido, constituía a eletrodinâmica antes de Maxwell. Ao analisar este conjunto de leis, Maxwell descobriu uma inconsistência, que foi resolvida teoricamente pela introdução de um novo termo na equação de Ampère. A eletrodinâmica completa de Maxwell foi amplamente confirmada por inúmeras observações posteriores, inclusive prevendo um novo fenômeno de inquestionável importância.

**A<sub>1</sub> Explique o significado físico das leis de Coulomb e de Gauss.**

**A<sub>2</sub> Explique o significado físico das leis de Biot-Savart e de Ampère.**

**A<sub>3</sub> Explique o significado físico da lei de Faraday.**

**A<sub>4</sub> Descreva como Maxwell corrigiu a inconsistência das equações empíricas da eletrodinâmica, e qual foi o novo fenômeno encontrado.**

### B) Plasmas

Os principais parâmetros que caracterizam um plasma são: a densidade  $n$  de partículas e a temperatura  $T$  de plasma. Para ser considerado um plasma o gás ionizado deve ser quase neutro em escalas macroscópicas. Isso leva aos conceitos da blindagem de Debye e do parâmetro de plasma, e das condições para definir um plasma. A primeira condição envolve o comprimento de Debye  $\lambda_D$  e a dimensão macroscópica  $L$ . A segunda condição envolve o parâmetro de plasma  $g$ . Além disso, se  $v_{pe}$  é a frequência típica de oscilações do plasma eletrônico e  $v_{en}$  a frequência de colisões dos elétrons com partículas neutras, há uma terceira condição que caracteriza um plasma.

Sobre o tema:

**B<sub>1</sub> Explique o mecanismo físico da blindagem de Debye e descreva a primeira condição para a existência de um plasma.**

**B<sub>2</sub> Explique o mecanismo físico envolvido no conceito da esfera de Debye e descreva a segunda condição para a existência de um plasma.**

**B<sub>3</sub> Explique o mecanismo físico que rege as oscilações eletrônicas e descreva a terceira condição para a existência de um plasma.**

- 1
- 2
- 3
- 4
- 5
- 6
- 7
- 8
- 9
- 10
- 11
- 12
- 13
- 14
- 15
- 16
- 17
- 18
- 19
- 20
- 21
- 22
- 23
- 24
- 25
- 26
- 27
- 28
- 29
- 30
- 31
- 32
- 33
- 34
- 35

36  
-----  
37  
-----  
38  
-----  
39  
-----  
40  
-----  
41  
-----  
42  
-----  
43  
-----  
44  
-----  
45  
-----  
46  
-----  
47  
-----  
48  
-----  
49  
-----  
50  
-----  
51  
-----  
52  
-----  
53  
-----  
54  
-----  
55  
-----  
56  
-----  
57  
-----  
58  
-----  
59  
-----  
60  
-----

## QUESTÃO 2

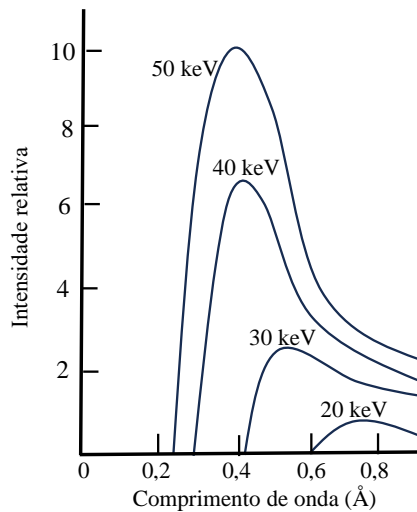
O estudo das magnetosferas planetárias e do acoplamento eletrodinâmico requer conhecimentos de fenômenos relacionados com a interação onda-partícula. A presente questão trata de conceitos básicos relacionados à produção de raios X e ao efeito Compton, e está dividida em 4 partes.

Os raios X, assim chamados por seu descobridor Roentgen, cuja natureza era desconhecida na época, são radiações de natureza eletromagnética e apresentam propriedades típicas de ondas como polarização, interferência e difração, da mesma forma que a luz e todas as outras radiações eletromagnéticas. A radiação X é frequentemente chamada de *bremsstrahlung*, do alemão *brems* (frenagem ou desaceleração) + *strahlung* (= radiação).

O processo de *bremsstrahlung* ocorre quando elétrons rápidos colidem com a matéria, tais como os raios cósmicos, nos anéis de radiação van Allen que envolvem a Terra, ou na frenagem de elétrons emergentes de aceleradores ou núcleos radioativos. Os raios X podem ser produzidos também em um tubo de raios X quando um feixe de elétrons de alta energia, acelerados por uma diferença de potencial de alguns milhares de volts, é freado ao atingir o alvo. A desaceleração dos elétrons, freados pelo material do alvo, causa a emissão de um espectro contínuo de radiação de natureza eletromagnética (mecanismo *bremsstrahlung*) e também um espectro discreto sobreposto. Portanto lidamos com a criação de fótons em vez de sua absorção ou espalhamento pela matéria.

A figura 1 a seguir representa o caso particular da emissão de raios X *bremsstrahlung*.

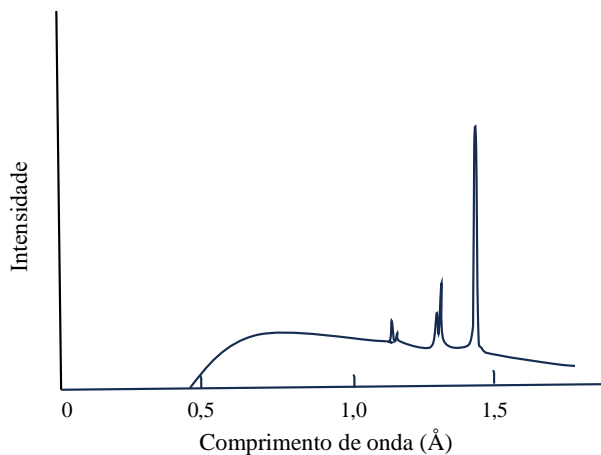
Figura 1 – Espectro contínuo de raios X para quatro diferentes valores de eV, a energia dos elétrons incidentes.



A) Segundo a teoria eletromagnética clássica, você esperaria que houvesse um comprimento de onda mínimo bem definido ( $\lambda_{min}$ ) na radiação emitida para um dado valor de energia do elétron incidente sobre o alvo de um tubo de raio X? Explique.

O espectro total de radiação X emitido por um tubo de raio X consiste num espectro discreto sobreposto a um continuum, como ilustrado na figura 2.

Figura 2 – Espectro de raio X hipotético.

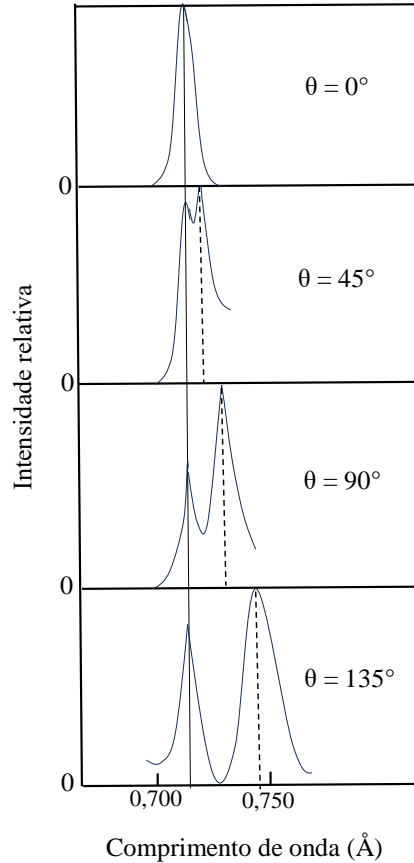


B) Explique o mecanismo físico que dá origem às linhas discretas no espectro da Figura 2.

Em 1923, a natureza corpuscular da radiação eletromagnética foi confirmada por Arthur H. Compton. Ele fez com que um feixe de raios X de comprimento de onda  $\lambda$  incidisse sobre um alvo de grafite. Mediu-se a intensidade dos raios X espalhados como função de seu comprimento de onda para vários ângulos de espalhamento. No experimento, embora o feixe incidente de raios X consistisse essencialmente de um único comprimento de onda  $\lambda$ , os raios X espalhados tinham máximos de intensidade em dois comprimentos de onda: um deles tendo o mesmo comprimento de onda incidente, e o outro,  $\lambda'$ , sendo maior que  $\lambda$  por uma quantidade  $\Delta\lambda$ . Este é o chamado *deslocamento Compton*,  $\Delta\lambda = \lambda' - \lambda$ , e varia com o ângulo segundo o qual os raios X espalhados são observados.

A figura 3 ilustra os resultados experimentais de Compton.

**Figura 3** – Resultados experimentais de Compton para quatro ângulos de espalhamento  $\theta$  diferentes.



Na figura, a linha sólida vertical à esquerda corresponde ao comprimento de onda espalhado  $\lambda$ , enquanto que as linhas pontilhadas à direita correspondem aos comprimentos de onda  $\lambda'$  espalhados. Para o caso de uma colisão entre um fóton e um elétron livre do alvo ou fracamente ligado a estrutura atômica, o *deslocamento Compton* pode ser dado por

$$\Delta\lambda = \lambda' - \lambda = \lambda_c (1 - \cos \theta) \tag{1}$$

sendo  $\lambda_c$  o comprimento de onda Compton do elétron, dado por  $\lambda_c = h/m_0 c$ ,

em que  $h$  = constante de Planck;  $m_0$  = massa de repouso do elétron,  $c$  = velocidade da luz no vácuo e  $\theta$  = ângulo dos raios X espalhados.

Como pode ser observado na equação (1), em uma colisão entre um fóton e um elétron, o deslocamento Compton  $\Delta\lambda$  depende apenas do ângulo de espalhamento  $\theta$  e não do comprimento de onda incidente  $\lambda$ .

- C<sub>1</sub>** Explique por que a presença do comprimento de onda  $\lambda'$  no efeito Compton na equação (1) não pode ser compreendida se os raios X incidentes forem encarados como uma onda eletromagnética clássica.
- C<sub>2</sub>** Ainda sobre o deslocamento Compton mostrado na Figura 3, explique a presença do outro pico espalhado (máximo indicado na linha vertical sólida) para o qual o comprimento de onda não muda.

- 1
- 2
- 3
- 4
- 5
- 6
- 7
- 8
- 9
- 10
- 11
- 12
- 13
- 14
- 15
- 16
- 17
- 18
- 19
- 20
- 21
- 22
- 23
- 24
- 25
- 26
- 27
- 28
- 29
- 30
- 31
- 32
- 33
- 34
- 35



36

---

37

---

38

---

39

---

40

---

41

---

42

---

43

---

44

---

45

---

46

---

47

---

48

---

49

---

50

---

51

---

52

---

53

---

54

---

55

---

56

---

57

---

58

---

59

---

60

---

### QUESTÃO 3

---

As *tempestades elétricas* apresentam distribuições espaciais e verticais de cargas elétricas que possibilitam a produção de raios intra-nuvem, nuvem-terra e eventos luminosos transientes (ELTs). A partir de observações com balões atmosféricos que medem o campo elétrico vertical, foi observado que entre as isotermas de 0 e -20°C existe um centro de cargas elétricas positivo menos intenso na parte inferior e um outro mais intenso de cargas elétricas negativas na parte superior da camada, independentemente do tipo de tempestade elétrica e local. Entre os mecanismos de eletrificação das nuvens, o processo de taxa de crescimento difusional relativo é um dos únicos que consegue explicar o aparecimento desta distribuição de cargas elétricas entre as isotermas de 0 e -20°C.

Baseado na descrição acima,

- A) explique como funciona o mecanismo de taxa de crescimento difusional;
- B) explique como o processo de taxa de crescimento difusional pode gerar centros de cargas elétricas negativo e positivo entre as isotermas de 0 e -20°C.

- 1
- 2
- 3
- 4
- 5
- 6
- 7
- 8
- 9
- 10
- 11
- 12
- 13
- 14
- 15
- 16
- 17
- 18
- 19
- 20
- 21
- 22
- 23
- 24
- 25
- 26
- 27
- 28
- 29
- 30
- 31
- 32
- 33
- 34
- 35

36

---

37

---

38

---

39

---

40

---

41

---

42

---

43

---

44

---

45

---

46

---

47

---

48

---

49

---

50

---

51

---

52

---

53

---

54

---

55

---

56

---

57

---

58

---

59

---

60

---

## QUESTÃO 4

---

O vento solar e o campo magnético interplanetário (IMF) propagam-se pelo Sistema Solar, encontrando obstáculos como os planetas, os cometas e as luas. Vários tipos de forças podem ser responsáveis por defletir o vento solar em torno desses corpos, sendo que as propriedades dos corpos e as condições do vento solar local determinam quais forças e processos são dominantes. No Sistema Solar, alguns planetas possuem campo magnético intrínseco como a Terra, outros planetas não possuem campo magnético intrínseco (não magnetizados) ou o campo magnético é muito fraco (fracamente magnetizados).

Considerando os planetas Vênus, Marte, Júpiter e Saturno,

- A) Explique a propagação do vento solar no meio interplanetário, perpendicularmente e paralelamente ao IMF, utilizando a equação da indução do campo magnético e o número de Reynolds magnético. O que ocorre nessa propagação quando as partículas do vento solar encontram uma magnetosfera planetária?**
- B) Explique a formação de magnetosferas induzidas em planetas não magnetizados ou fracamente magnetizados.**
- B<sub>1</sub> Cite qual (ou quais) são esses planetas entre os mencionados anteriormente.**
- B<sub>2</sub> Compare as escalas com os planetas magnetizados.**
- B<sub>3</sub> Explique quais os termos de pressão dominantes e o que pode mudar nesse cenário com as variações da atividade solar e das condições do vento solar.**
- C) Explique como é a configuração da magnetosfera dos planetas magnetizados, mencionados anteriormente, os processos físicos responsáveis pela formação e a dinâmica da magnetosfera levando em conta o papel do vento solar, do planeta, do(s) satélite(s) natural(is), comparando com a magnetosfera terrestre.**

- 1
- 2
- 3
- 4
- 5
- 6
- 7
- 8
- 9
- 10
- 11
- 12
- 13
- 14
- 15
- 16
- 17
- 18
- 19
- 20
- 21
- 22
- 23
- 24
- 25
- 26
- 27
- 28
- 29
- 30
- 31
- 32
- 33
- 34
- 35

36  
-----  
37  
-----  
38  
-----  
39  
-----  
40  
-----  
41  
-----  
42  
-----  
43  
-----  
44  
-----  
45  
-----  
46  
-----  
47  
-----  
48  
-----  
49  
-----  
50  
-----  
51  
-----  
52  
-----  
53  
-----  
54  
-----  
55  
-----  
56  
-----  
57  
-----  
58  
-----  
59  
-----  
60  
-----

**QUESTÃO 5**

---

- A) Um importante elemento para o entendimento do dínamo solar é a equação de indução magnética. Essa equação pode ser escrita da seguinte maneira

$$\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = \nabla \times (\mathbf{u} \times \mathbf{B}) - \eta \nabla \times (\nabla \times \mathbf{B})$$

Interprete fisicamente os dois termos do lado direito da igualdade dessa equação.

- B) No interior do Sol, acredita-se que o campo magnético esteja, predominantemente, na direção toroidal. **Descreva em detalhe o mecanismo de geração de um campo magnético toroidal a partir de um campo magnético poloidal inicial. De maneira opcional, faça um esboço esquematizando a sequência de passos desse mecanismo.**
- C) O efeito alfa é um importante mecanismo no dínamo solar, que permite a geração de uma corrente toroidal paralela ao campo magnético toroidal. **Descreva em detalhe o efeito alfa, mencionando a importância do valor do ângulo de torção das linhas. De maneira opcional, faça um esboço esquematizando a sequência de passos de esse mecanismo.**
- D) Qual é a direção do campo magnético resultante do efeito alfa?



- 1
- 2
- 3
- 4
- 5
- 6
- 7
- 8
- 9
- 10
- 11
- 12
- 13
- 14
- 15
- 16
- 17
- 18
- 19
- 20
- 21
- 22
- 23
- 24
- 25
- 26
- 27
- 28
- 29
- 30
- 31
- 32
- 33
- 34
- 35

36  
-----  
37  
-----  
38  
-----  
39  
-----  
40  
-----  
41  
-----  
42  
-----  
43  
-----  
44  
-----  
45  
-----  
46  
-----  
47  
-----  
48  
-----  
49  
-----  
50  
-----  
51  
-----  
52  
-----  
53  
-----  
54  
-----  
55  
-----  
56  
-----  
57  
-----  
58  
-----  
59  
-----  
60  
-----



Realização

