



INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISA ESPACIAL – INPE

FENÔMENOS SOLARES IONOSFÉRICOS ATMOSFÉRICOS E RAIOS CÓSMICOS (PQ041)



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

Para monitoramento e, conseqüentemente, uma melhor compreensão de fenômenos físicos (ondas atmosféricas e espalhamento de sinais eletromagnéticos na ionosfera) e químicos (aeroluminescência e formação das camadas ionosféricas) que afetam a nossa vida na Terra, especialmente nas regiões mais altas da atmosfera, como ionosfera, mesosfera e termosfera, são utilizados diversos instrumentos em solo. No estudo das camadas mais altas da atmosfera são utilizados instrumentos ativos, como por exemplo: radar meteorológico e ionossonda/digissonda; e passivos: sistema GNSS e imageadores de luminescência atmosférica.

Nesta perspectiva, sobre os instrumentos acima citados:

- A) Descreva o princípio de funcionamento, seus parâmetros obtidos, suas vantagens e desvantagens entre esses sistemas ativos e passivos.**
- B) Discuta os processos de instalação,**
 - B₁ apresentando a justificativa da instalação em determinado local;**
 - B₂ apresentando as restrições físicas e das condições naturais do local pretendido e possíveis interferências de outros instrumentos, possivelmente já instalados.**

- 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 Sol exerce uma influência significativa sobre os fenômenos terrestres, impactando desde o clima espacial até a dinâmica atmosférica e magnética da Terra. Eventos de origem solar podem interagir com o campo geomagnético, desencadeando efeitos de larga escala que podem ser medidos em diferentes partes da superfície terrestre.

Com base nisso, responda aos itens a seguir.

- A) Descreva três processos físicos que ocorrem no Sol e influenciam a formação das principais estruturas magnéticas de origem solar.
- B) Explique como a atividade solar varia ao longo do tempo.
- C) Liste as principais estruturas magnéticas interplanetárias que podem desencadear tempestades geomagnéticas quando interagem com a magnetosfera terrestre. Descreva duas delas.
- D) Discuta dois dos impactos mais significativos que resultam da interação das estruturas magnéticas solares com o ambiente 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 3

A atmosfera da Terra pode ser estudada a partir de um conjunto de equações diferenciais que descreve os princípios de conservação da Física. Adicionalmente, essas equações podem ser suplementadas pela lei dos gases ideais para os níveis mais elevados da atmosfera, onde a densidade dos constituintes é relativamente pequena. Dependendo do interesse, esse conjunto de equações auxilia tanto na previsão de geração e propagação quanto na análise diagnóstica de fenômenos atmosféricos.

Abaixo é apresentado o conjunto de equações diferenciais:

$$\begin{aligned}\frac{d\vec{V}}{dt} &= -2\vec{\Omega} \times \vec{V} - \frac{1}{\rho} \vec{\nabla}p + \vec{g} + \vec{F} \\ \frac{d\rho}{dt} &= -\rho \vec{\nabla} \cdot \vec{V} \\ \frac{dT}{dt} &= -(\gamma - 1)T \vec{\nabla} \cdot \vec{V} + \frac{Q}{c_v} \\ p &= \rho RT\end{aligned}$$

sendo, t o tempo; $\frac{d}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} + (\vec{V} \cdot \vec{\nabla})$; \vec{V} o vetor velocidade; $\vec{\Omega}$ a rotação da Terra; P a pressão; T a temperatura; ρ a densidade; \vec{g} a aceleração da gravidade; \vec{F} a força por unidade de massa; Q a quantidade de calor por unidade de massa; $\gamma = \frac{c_p}{c_v}$, c_v é o calor específico a volume constante, c_p é o calor específico a pressão constante e R é a constante dos gases pela massa molecular.

- A) Use as definições de equações diferenciais e classifique o conjunto de equações dado. Identifique fisicamente cada uma das equações acima e descreva todos os termos das equações apresentadas.
- B) Em se tratando de estudos ionosféricos, espécies ionizadas (elétrons, átomos ionizados e moléculas ionizadas) precisam ser consideradas.
- B₁ Qual seria outro princípio de conservação que deveria ser adicionado ao conjunto de equações?
- B₂ Reescreva o conjunto de equações para as espécies ionizadas.
- C) É muito útil utilizar análise de escala (identificação do grau de importância de cada termo da equação) para simplificar o conjunto de equações dependendo das dimensões espaciais e/ou temporais dos fenômenos.
- C₁ Baseado nisso, identifique e justifique fisicamente quais termos de cada uma das equações são relevantes para se estudar:
- I. ondas de gravidade ou perturbações ionosféricas propagantes;
 - II. marés atmosféricas; e
 - III. ondas planetárias.
- D) O processo de linearização das equações básicas permite simplificar o conjunto de equações e é muito utilizado para estudos de caso em que o efeito da parte não-linear é relativamente pequeno. No processo de linearização, admite-se que os campos atmosféricos possam ser escritos como a soma de um valor médio mais uma perturbação e desprezam-se os termos não lineares, por exemplo: $A = \bar{A} + A'$, sendo \bar{A} o valor médio do campo atmosférico A e A' a perturbação. Baseado nisso, linearize a equação de conservação da massa mostrada acima.

- 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

Sabe-se, já faz algum tempo, que a ionosfera existe e que ela é a responsável pelas características fundamentais da propagação de ondas de rádio na atmosfera que, por sua vez, providencia as partículas neutras que uma vez ionizadas fazem parte da ionosfera. Através das suas propriedades elétricas, a ionosfera exerce um importante papel no acoplamento eletrodinâmico entre a magnetosfera e a atmosfera, sendo uma região de extrema importância para o sistema Sol-Terra.

Sobre o tema, responda aos itens a seguir.

- A) Descreva os principais processos primários de ionização na existência da ionosfera.**
- B) Indique e descreva os processos secundários que contribuem para a existência da ionosfera.**
- C) Qual é a importância dos processos secundários em relação aos processos primários? Fundamente sua resposta.**

- 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

O campo magnético da Terra pode ser, com boa aproximação, considerado como tendo a topologia de um dipolo magnético para $r < 10 R_E$, em que r é a posição radial e R_E , o raio da Terra $\sim 6400\text{km}$. Nessa topologia a partícula carregada aprisionada pelo campo executa três movimentos periódicos. Contudo, o aprisionamento não é perfeito e, dependendo de certas condições, as partículas podem ser perdidas na atmosfera terrestre (precipitação). Por outro lado, a presença de um campo magnético no plasma introduz uma anisotropia dando origem a instabilidades (ondas). Essas ondas interagem com as partículas carregadas (interação ressonante onda-partícula) o que também pode levar à precipitação das partículas. A questão explora essas duas possíveis causas para a precipitação na Anomalia Magnética do Atlântico Sul (AMAS). Essa precipitação leva a efeitos observáveis na ionosfera equatorial nas camadas E e F.

Assuma:

- I. Tempos calmos;
- II. Movimento das partículas não relativístico

A) Identifique, descreva e associe, para cada um dos movimentos periódicos, o invariante adiabático (J_1, J_2, J_3). Para cada um dos movimentos colocar um período característico.

Se ocorrer um fenômeno que perturbe o campo magnético com período característico T_f , faça uma escala de tempo para que J_1, J_2 e J_3 . (use \gg ou \ll) seja considerado invariante adiabático.

A Figura 1 mostra a trajetória da partícula carregada sujeita aos três movimentos periódicos.

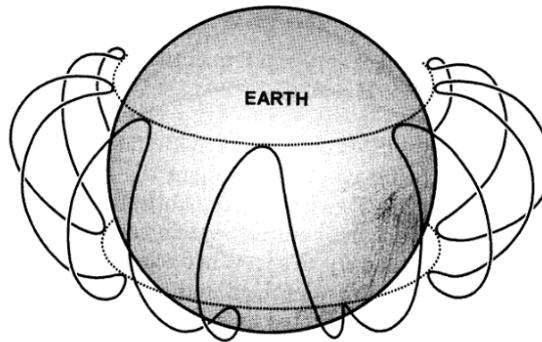


Figura 1 – Trajetória de uma partícula carregada ao redor da Terra sujeita aos três movimentos periódicos

B) A Figura 2 mostra a geometria de um espelho magnético.

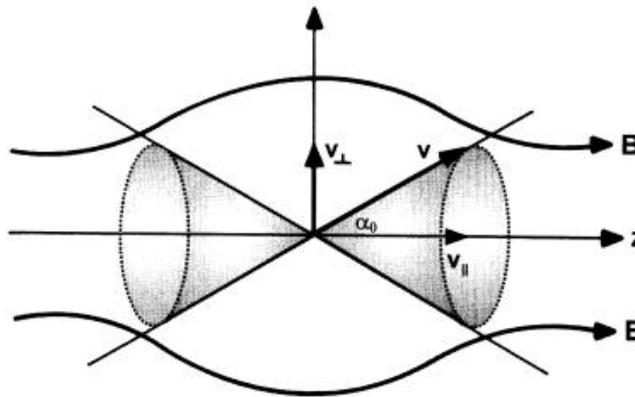


Figura 2 – Geometria de um espelho magnético

Assumir o vértice do cone para $z = z_0$ (ponto em que o campo magnético tem a menor intensidade), $\alpha = \alpha_0$, $B(z_0) = B_0$ e, para um ponto qualquer, $B = B(z)$, $\alpha = \alpha(z)$, (B é o campo magnético, α é o *pitch angle*, z é a posição axial).

Obtenha a seguinte relação para o espelho magnético:

$$\frac{\sin^2 \alpha_0}{B_0} = \frac{1}{B_m}$$

ou

$$\alpha_0 = \sin^{-1} \left[\left(\frac{B_0}{B_m} \right)^{1/2} \right] = \sin^{-1} \left[\frac{v_{\perp}}{v_0} \right]_0$$

(v_{\perp} é a velocidade perpendicular ao campo, $v(z_0) = v_0$, B_m o campo no ponto de retorno).

C) Apresente o significado físico do cone de perda e explique como a invariante adiabático J_2 tem relação com a precipitação das partículas na AMAS.

D) Trataremos agora da interação ressonante onda-partícula:

Os itens seguintes estão restritos às ondas *whistlers* e elétrons.

Tanto a onda como a partícula possuem energia e na interação onda-partícula ocorre uma troca de energia entre ambas.

São possíveis duas situações para a troca de energia:

- I. onda → partícula, a seta indica fluxo de energia;
- II. partícula → onda.

Discuta o que acontece com a onda e com a partícula nessas duas situações.

E) Uma estimativa da variação do *pitch angle* ($\tan \alpha = v_{\perp}/v_{\parallel}$) devido à interação ressonante pode ser obtida de

$$\Delta\alpha = \frac{1}{2} \left[\frac{2\Omega_{ce}}{\omega} - 1 \right] \frac{\Delta W}{W}$$

em que $\Delta\alpha$ é a variação do *pitch angle* devido a interação ressonante, Ω_{ce} é a frequência de giro dos elétrons, ω é a frequência da onda, ΔW é a variação da energia do elétron e W é a sua energia total. Esta expressão foi obtida supondo que inicialmente o elétron tenha $\alpha = 45^\circ$.

A Figura 3 mostra a velocidade de fase e de grupo para ondas RCP e LCP propagando ao longo do campo magnético.

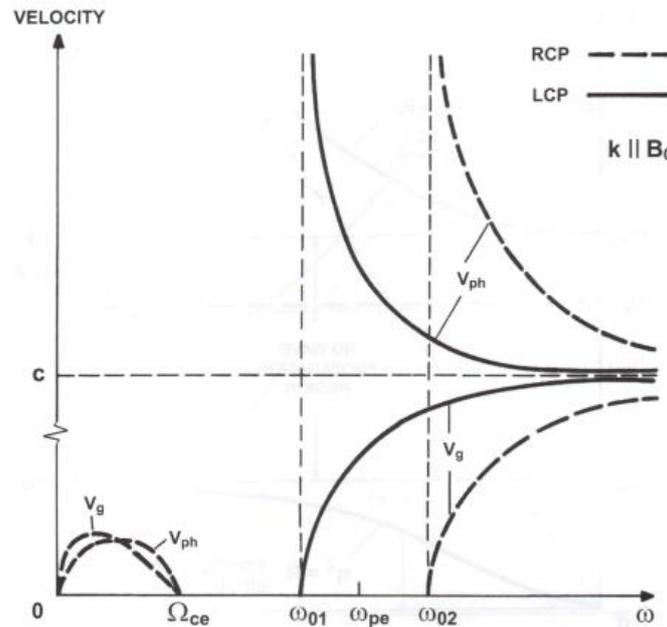


Figura 3 – Velocidade de fase e de grupo para ondas RCP e LCP

Da Figura 3 vê-se que a onda RCP se propaga para $\omega \lesssim \Omega_{ce}$ e $\omega \gtrsim \omega_{02} = \frac{1}{2} [\Omega_{ce} + (\Omega_{ce}^2 + 4\omega_{pe}^2)^{\frac{1}{2}}]$

Explique por que não é possível a interação onda - partícula para $\omega \gtrsim \omega_{02}$ e comente o que pode acontecer com ΔW e o *pitch angle* e as consequências para a precipitação na AMAS.

F) A camada dínamo é delimitada pelas alturas onde ocorre a igualdade entre a frequência ciclotrônica e a frequência de colisão da partícula carregada com a neutra. A Figura 4 mostra a delimitação da camada dínamo. Nesta Figura 4, ν_{in} é a frequência de colisão de íon-neutro, ν_{en} é a frequência de colisão elétron-neutro, $\omega_{gi} = 2\pi\nu_{ci}$ e $\omega_{ge} = 2\pi\nu_{ce}$.

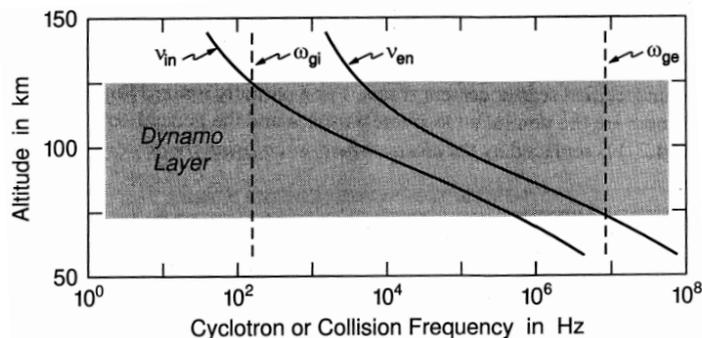


Figura 4 – Delimitação da camada dínamo

Cálculos teóricos com dados do campo magnético dentro da AMAS e fora dela e outros dados ionosféricos mostraram que:

- Dentro da AMAS a camada dínamo variou de 98 a 218 km, ao passo que, fora dela variou de 91 a 188 km, ou seja, a camada dínamo é maior na AMAS, uma consequência do campo magnético menor existente.

A relação entre a densidade de corrente, condutividade, campo elétrico e o campo magnético é dada pela relação

$$\mathbf{J} = \sigma_{\parallel} \mathbf{E}_{\parallel} + \sigma_P \mathbf{E}_{\perp} - \sigma_H \left[\frac{\mathbf{E} \times \mathbf{B}}{B} \right]$$

Em que

$$\begin{aligned} \sigma_P &= \frac{v_c^2}{v_c^2 + \omega_{ge}^2} \sigma_0 \\ \sigma_H &= -\frac{\omega_{ge} v_c}{v_c^2 + \omega_{ge}^2} \sigma_0 \\ \sigma_{\parallel} &= \sigma_0 = \frac{n_e e^2}{m_e v_c} \end{aligned}$$

σ é a condutividade (P, Pedersen, H, Hall)

É conhecido que a precipitação de partículas carregadas na AMAS leva ao aumento da condutividade do plasma por conta do aumento da densidade de partículas carregadas do plasma.

Do exposto, explique o que se pode esperar com relação à densidade de corrente na AMAS (tempos calmos) e avalie se há algum efeito da estação do ano na densidade de corrente elétrica dentro da AMAS.

- 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

