



# INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISA ESPACIAL – INPE

## ESPECTROPOLARIMETRIA SOLAR (PQ036)



### 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

Todas as informações recebidas na Terra de uma estrela (o Sol incluído) estão contidas nos fótons emitidos e analisados aqui na Terra. Estas informações revelam as condições físicas existentes na atmosfera estelar tais como, a temperatura, velocidade do átomo (moléculas) emissor, composição da matéria existente, campo magnético etc. Após a emissão, os fótons ficam sujeitos à absorção, à dispersão e à polarização, entre outros, devido às condições existentes na atmosfera estelar. Para se obter informações sobre a estrela, é feita a modelagem conhecida como RTE (*Radiative Transfer Equation*). Nesta são levadas em conta as condições a que o fóton emitido fica sujeito a fim de que sejam obtidas informações sobre a atmosfera estelar. Esta questão está concentrada no efeito Zeeman sobre as linhas espectrais.

A) Um sistema de coordenadas particular é dado por

$$\hat{e}_{\pm 1} = \frac{1}{\sqrt{2}} (\hat{e}_1 \pm i\hat{e}_2)$$

$$\hat{e}_3 = \hat{e}_0$$

Em termos da polarização da onda (visto através de  $-\hat{e}_0$ ), o que significa a escolha deste sistema? Correlacione com (item D) com  $\Delta m = +1, 0, -1$ .

B) Explique brevemente os efeitos Faraday e Voigt na propagação do fóton emitido e se propagando através de um meio material. Destes efeitos Faraday, Voigt, alargamento por velocidade  $v_{LOS}$  (LOS, *Line Of Sight*), alargamento da linha Doppler, qual(is) dele(s) não altera(m) a polarização da onda?

C) A linha espectral emitida pelo átomo fica sujeita a diversos tipos de alargamento e dois deles são: Doppler e  $v_{LOS}$

$$\text{Efeito Doppler } \Delta\lambda_D = 7,16 \times 10^{-7} \lambda_0 \sqrt{\frac{T}{M}}$$

( $\lambda$  em Å,  $T$  em K,  $M$  em a.m.u que para o Ferro é 56).

$$\text{Efeito devido a } v_{LOS} \Delta\lambda = \frac{\lambda_0 v_{LOS}}{c}$$

(unidades SI)

O desmembramento da linha (*splitting*) pelo efeito Zeeman é dado por  $\lambda_B = 4,67 \times 10^{-13} \lambda_0^2 B g_{eff}$  que para  $\lambda_0 = 5250 \text{ \AA}$ ,  $B = 700 \text{ G}$  e  $g_{eff} = 3$  (para  $Fe I$ ,  $\lambda_0 = 5250 \text{ \AA}$ ) resulta em  $\lambda_B \approx 30 \text{ m\AA}$ .

Dados:  $T = 5600 \text{ K}$  e  $v_{LOS} = 3 \text{ km/s}$  (valor típico encontrado na superfície solar),  $c$  é a velocidade da luz ( $3 \times 10^8 \text{ m/s}$ ).

C<sub>1</sub> Calcule  $\Delta\lambda_D$  e  $\Delta\lambda_{LOS}$  e comparar com o  $\lambda_B$  fornecido (use  $\sim$ , da ordem de). Deixe os resultados em  $\text{m\AA}$  para facilitar a comparação.

C<sub>2</sub> Tomando  $\Delta\lambda = 52,5 \text{ m\AA}$ , qual a resolução  $R = \frac{\lambda}{\Delta\lambda}$  para  $\lambda = 5250 \text{ \AA}$ ?

Para comparar a resolução do Hinode era  $90 \text{ m\AA}$  para  $\lambda = 6300 \text{ \AA}$  ou  $R \approx 70.000$

C<sub>3</sub> Dos resultados do item C<sub>1</sub> é possível identificar o *splitting* devido ao efeito Zeeman e, desse modo, determinar a intensidade do campo magnético? A direção?

C<sub>4</sub> Da expressão dada de  $\lambda_B$ , como o efeito Zeeman pode ficar evidente em relação à  $\Delta\lambda_{LOS}$  e  $\Delta\lambda_D$ ?

D) A emissão de um fóton ocorre quando da transição de um nível de energia superior (u) para um inferior (l).

D<sub>1</sub> Qual a regra de seleção (dipolo) para  $\Delta j$  e  $\Delta m$ ? ( $j$  momento angular,  $m$  número quântico magnético)

D<sub>2</sub> Para um determinado  $j$  quais os valores que  $m$  pode assumir?

D<sub>3</sub> A linha de  $Fe I = 525,02 \text{ nm}$  resulta de uma transição  ${}^7D_1 \rightarrow {}^5D_0$  ( $j = 1 \rightarrow j = 0$ ). A linha é desmembrada (*splitting*), efeito Zeeman (normal, nesse caso) de acordo com  $\lambda = \lambda_0 - (\Delta m)\lambda_B$ , onde  $\lambda_0$  é a frequência central (sem campo magnético). Identifique as linhas  $\sigma_b$  (b, blue),  $\sigma_r$  (r, red),  $\pi$  e a polarização de  $\sigma_b$  e  $\sigma_r$

E) A Figura 1 mostra a linha  $Fe I 525,02 \text{ nm}$  sujeita a dois campos distintos 0 e 0,3T (campo longitudinal)

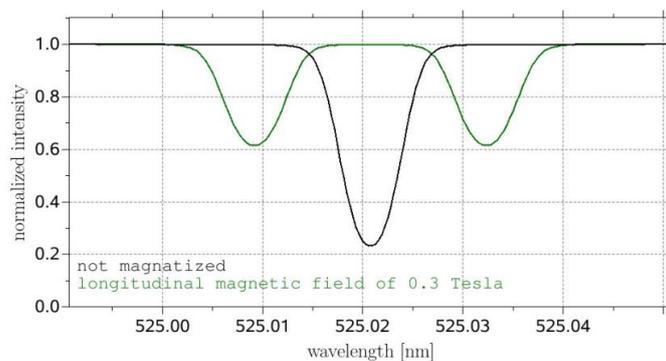


Figura 1 – Desmembramento da linha espectral 525,02 com a intensidade do campo magnético. Referência: *Investigations of small-scale magnetic features on the solar surface*, von Tino L. Riethmuller, Phd.Thesis,2013

- E<sub>1</sub> Identifique as linhas  $\sigma_b$  e  $\sigma_r$  de acordo com o item D<sub>3</sub>. Na folha de resposta fazer um pequeno desenho mostrando os resultados.  
 E<sub>2</sub> Por que não aparece para o campo de 0,3T (longitudinal) a componente  $\pi$ ?
- F) A Figura-2 mostra o efeito na linha de Fe I 525,02 nm com o aumento da intensidade do campo magnético longitudinal (em incrementos de 500G).

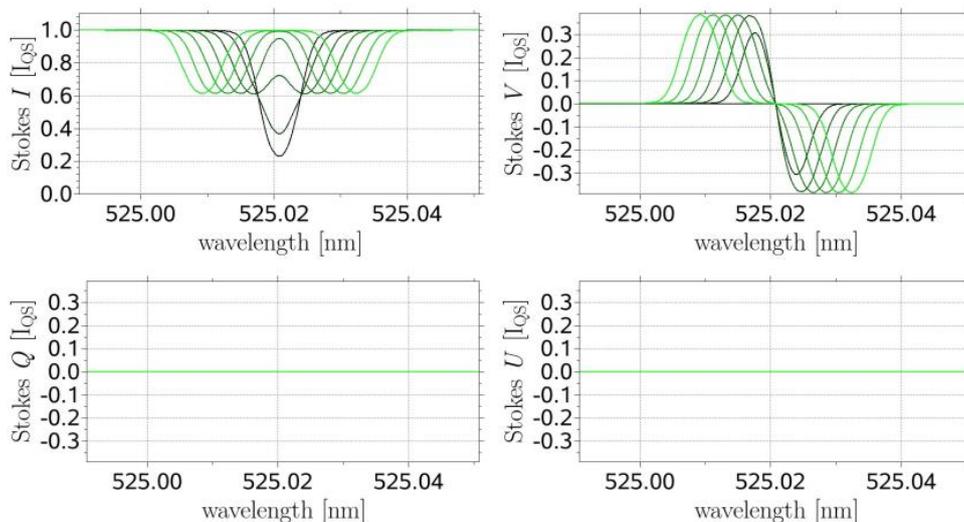


Figura 2 – Efeito Zeeman nos parâmetros de Stokes. Referência: *Investigations of small-scale magnetic features on the solar surface*, von Tino L. Riethmuller, Phd.Thesis,2013

- F<sub>1</sub> Por que os parâmetros de Stokes Q e U são zeros?  
 F<sub>2</sub> Do item F<sub>1</sub>, como fica a expressão para o grau de polarização p?

- 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

---

*Manchas solares, regiões ativas e magnetogramas* são amplamente utilizados para avaliar o nível de atividade solar. Seu uso na comunidade científica inclui diversas áreas de pesquisa que se estendem desde o interior solar, a sua atmosfera, o meio interplanetário, as magnetosferas e a atmosfera terrestre.

A respeito das regiões ativas, das manchas solares e dos magnetogramas, responda aos itens a seguir.

- A) O que são manchas solares e regiões ativas e qual a relação entre as mesmas? Quais as faixas de espectro utilizadas para observar cada uma das estruturas?
- B) Qual a configuração magnética de uma região ativa? Qual a região do Sol onde as regiões ativas são observadas e como as mesmas evoluem em função do ciclo solar?
- C) O que são magnetogramas, qual o parâmetro físico representado nos mesmos e quais observações são necessárias para construí-los?

- 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

---

Uma onda eletromagnética como a luz consiste de campos elétricos e magnéticos acoplados oscilando perpendicularmente entre si. A polarização das ondas eletromagnéticas se define convencionalmente pela direção do campo elétrico. A determinação das propriedades de polarização da radiação solar permite inferir vários parâmetros do campo magnético solar.

Desse modo, responda aos itens a seguir.

- A) Explique os tipos de polarização de uma onda eletromagnética.
- B) Explique como os parâmetros de Stokes podem ser utilizados para inferir os parâmetros de polarização de uma onda eletromagnética.
- C) Explique a utilidade das matrizes de Mueller na análise da polarização da luz.

- 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

---

- A) Descreva as camadas da atmosfera solar: características mais relevantes (temperatura, densidade e grau de ionização) e estruturas observáveis.
- B) Quais são os efeitos físicos mais relevantes na atmosfera solar que alteram o estado de polarização da luz? Como eles são usados para estudar os campos magnéticos nas diferentes camadas descritas no *item a*?
- C) Para cada uma das camadas, liste algumas linhas espectrais que podem ser usadas para fazer diagnósticos, indicando também se a linha é observável desde o solo.

- 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

---

Um *espectropolarímetro* é desenhado e construído baseando-se em requisitos científicos específicos que direcionarão sua construção.

Considerando essa premissa,

- A) Defina um objetivo científico claro para um projeto de pesquisa fictício ou de seu interesse pessoal, e enumere pelo menos cinco requisitos científicos específicos que direcionarão a construção de um espectropolarímetro. Esses requisitos podem incluir, mas não estão limitados à cobertura espectral, à resolução espectral e espacial, ao tipo de fenda, à cadência para a aquisição de espectros, à acurácia polarimétrica e à capacidade de medir simultaneamente múltiplas regiões espectrais.
- B) Escolha um espectropolarímetro existente ou conceba um instrumento hipotético que deve operar no espectro óptico e/ou infravermelho. Inclua as especificações técnicas do instrumento que sejam relevantes para o cumprimento dos objetivos científicos propostos.
- C) Relacione esses requisitos científicos diretamente às especificações técnicas do espectropolarímetro escolhido.
- D) Discuta os principais componentes ópticos do espectropolarímetro escolhido, explicando sua função e a importância no contexto do instrumento, incluindo os elementos polarimétricos.
- E) Explique como a detecção e a análise da polarização são realizadas no instrumento, incluindo uma descrição das técnicas de modulação e demodulação usadas.

Obs.: Sua resposta deve explorar como as necessidades científicas influenciam o desenho e a funcionalidade do instrumento, ilustrando a importância de cada especificação técnica e componente óptico e polarimétrico para atender aos objetivos do projeto de pesquisa.

- 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

