



# INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISA ESPACIAL – INPE

## ASTRONOMIA MULTIMENSAGEIRA (PQ029)



### 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

---

Observatórios de Ondas Gravitacionais baseados no princípio de interferometria a laser, como o LIGO, Virgo e Kagra, produzem séries temporais de medidas da diferença de fase que a luz monocromática do laser apresenta após ter percorrido os caminhos de ida e volta nos braços perpendiculares do interferômetro. Idealmente, interferência com os feixes em fase produz sinal máximo de saída; interferência com sinais fora de fase de meio comprimento de onda da luz monocromática produzem sinal nulo.

Caso o ponto de operação seja colocado numa região intermediária entre máximo e mínimo, a passagem de uma onda gravitacional produzirá uma modulação no sinal de saída, à medida que haja diferença de fase entre os sinais de um braço e outro do interferômetro. Assim, o sinal efetivamente medido é uma série de amostras discretas de tensão, ao longo do tempo, que na ausência de sinais provenientes de fontes astrofísicas, consiste essencialmente de ruído. É comum que a taxa de amostragem do sinal seja de 16384 Hz.

A Transformada Discreta de Fourier (TDF) é uma das ferramentas mais básicas para analisar séries de tempo tomadas a intervalos discretos, como as que são produzidas por detectores interferométricos a laser, pois relaciona propriedades do conteúdo de informação no espaço direto (tempo) com o domínio de Fourier (ou de frequências).

- A) **Escreva a expressão matemática para a TDF para  $N$  amostras, considerando a variável tempo como sendo  $t$ , as amostras separadas de intervalos  $dt$ , a variável  $f$  como sendo a frequência, com amostras separadas de  $df$ . A TDF tem uma contrapartida inversa, que permite relacionar o espaço das frequências com o espaço direto (do tempo). Escreva também a expressão para a TDF inversa.**
- B) **Como a TDF é útil para a detecção de sinais como os de ondas gravitacionais que possam propiciar alertas rápidos no contexto de Astronomia multimessageira?**
- C) **Fenômenos como coalescência de buracos negros, ou de estrelas de nêutrons com buracos negros, produzem sinais relativamente rápidos no tempo (alguns décimos de segundo) na faixa de frequências para as quais os instrumentos atuais são sensíveis (aproximadamente 30-300 Hz). Isso significa que utilizar a TDF em longos segmentos de dados ( $> 1$  s), apesar de ser adequado para fontes como pulsares, é pouco sensível para eventos transientes, uma vez que a série fica constituída essencialmente de ruído. Descreva uma alternativa para a procura de sinais transientes, mas ainda com o uso da TDF.**
- D) **Discorra qualitativamente sobre métodos adicionais para a procura de transientes que, em princípio, não necessitariam da TDF.**

- 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

---

A astronomia multimessageira baseia-se em observações de objetos astrofísicos através de diferentes mensageiros cósmicos. Em 17 de agosto de 2017, a fusão de um sistema binário de estrelas de nêutrons foi observada através de ondas gravitacionais (GW170817), na qual revelaram-se fótons em diversos comprimentos de onda. Tal evento marcou o início da chamada *GW multimessenger astronomy*.

Sabe-se que ondas gravitacionais não são fontes exclusivas de sistemas binários e que outros mensageiros são possíveis.

- A) **Discuta outras possíveis fontes de ondas gravitacionais que podem ser multimessageiras e as características que qualificam seus sinais (*waveforms*).**
- B) **Apresente três exemplos, sendo um sistema binário e, os outros dois, sistemas isolados. Discorra sobre eles.**
- C) **O que provoca a emissão do sinal gravitacional em estrelas nêutrons em sistemas isolados? Indique se tais sinais podem ser detectáveis pelos interferômetros, hoje em funcionamento (bastam três).**

- 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**

O evento GW170817 detectado pelo observatório LIGO (*Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory*, ou Observatório de Ondas Gravitacionais com Interferômetro a Laser) em 17 de Agosto de 2017, teve diversas particularidades, quando comparado aos eventos anteriores registrados pelo mesmo observatório. Foi detectado inicialmente como ondas gravitacionais com frequência de aproximadamente 40 Hz, e evoluiu para frequências mais altas exponencialmente, até aproximadamente 400 Hz – considerado o instante em que os objetos envolvidos coalesceram. O intervalo de tempo decorrido foi de aproximadamente 10 segundos.

**A) Disserte, no contexto de Astronomia multimessageira, sobre o evento GW170817 e suas particularidades.**

**B) Sabendo que a massa combinada das componentes em coalescência tem a forma (em Inglês *chirp mass*)**

$$M_c = \frac{(m_1 \times m_2)^{3/5}}{(m_1 + m_2)^{1/5}}$$

e que a variação da frequência das ondas gravitacionais com o tempo, previamente à coalescência tem uma expressão teórica proveniente da Relatividade Geral que é

$$\dot{f} = \frac{96}{5} \pi^{8/3} \left( \frac{GM_c}{c^3} \right)^{5/3} f^{11/3}$$

escreva a expressão analítica para  $M_c$ .

Lembrar que nessas expressões,  $m_1, m_2$  são as massas dos objetos em coalescência,  $G$  é a constante gravitacional,  $c$  a velocidade da luz,  $f$  (em Hz) a frequência instantânea da onda gravitacional e  $\dot{f}$  com o ponto sua derivada temporal. Como você faria para ter uma estimativa de  $f$  e sua derivada temporal para este evento, de modo a estimar  $M_c$ ? Não são necessários cálculos numéricos.

- 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

---

Supernovas são muito promissoras no contexto de Astronomia multimessageira, por vários motivos:

- I. por serem muito luminosas, podem ser vistas à grandes distâncias numa ampla faixa do espectro eletromagnético;
  - II. emitem quantidades copiosas de neutrinos, sendo que esse tipo de em partícula já foi detectado diretamente na Terra no evento da SN1987A, que explodiu na Grande Nuvem de Magalhães, uma galáxia satélite da nossa Via Láctea; e
  - III. potencialmente, pela energética e escala de tempo envolvidas, são fontes transientes de ondas gravitacionais, no instante do colapso gravitacional.
- A) Considerando o potencial de as supernovas serem fontes de ondas gravitacionais durante o colapso da estrela progenitora e, portanto, fontes multimessageiras, discorra sobre o papel da massa da mesma progenitora em definir que tipo de objeto compacto é formado, estrela de nêutrons ou um buraco negro.**
- B) Dado o interesse em eventos de supernovas que emitam ondas gravitacionais que sejam acompanhados por contrapartidas de emissão de partículas como neutrinos e emissão eletromagnética em uma ampla faixa do espectro eletromagnético, quais configurações no colapso da parte nuclear de uma estrela propiciariam condições para a emissão de ondas gravitacionais?**
- C) A escala de tempo do transiente de emissão de ondas gravitacionais deve ser da ordem da escala de tempo de queda livre da configuração do caroço central. Estime essa escala.**

*Obs.: considere  $G$ , a constante gravitacional, como sendo  $7 \times 10^{-8}$  (em unidades cgs) e a densidade da configuração pré-colapso como sendo a densidade da matéria nuclear.*

- 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 resto de supernova mostra um espectro de emissão síncrotron com uma quebra para valores maiores que " $\nu_c$ ", identificável como a frequência de emissão síncrotron de elétrons relativísticos para os valores máximos de sua distribuição de energia. Uma fração desses fótons síncrotron são energizados por espalhamento Compton inverso exibindo energias máximas da ordem de TeV.

Nesse contexto:

A<sub>1</sub> Escreva a relação entre o campo magnético " $B$ ", fator de Lorentz " $\gamma$ " e a frequência síncrotron para a emissão de um elétron de energia " $E$ ". As constantes numéricas podem ser agrupadas em um coeficiente linear " $c$ ".

A<sub>1</sub> Comente a validade do uso dessa relação para estimar o campo magnético no cenário descrito acima.

A<sub>2</sub> Escreva a expressão para razão de energia entre os fótons comptonizados de máxima energia  $\nu_{CI}$  e os fótons base síncrotron com  $\nu = \nu_c$ .

A<sub>3</sub> Usando os resultados de (A<sub>1</sub>)<sup>\*</sup> e (A<sub>2</sub>), estime a ordem de grandeza do campo magnético " $B$ " na região emissora. Considere que as frequências de quebra vistas no espectro síncrotron e na componente comptonizada são  $\nu_c \sim 10^{14}$  Hz e  $\nu_{CI} \sim 10^{25}$  Hz, respectivamente.

<sup>\*</sup>Considere a constante numérica da relação do item (a), para o campo magnético em Teslas, " $c$ " =  $4.2 \times 10^{10}$  Hz/T.

- B) Suponha que em um quasar a emissão síncrotron observada é produzida por elétrons com uma distribuição de energia na forma de lei de potência e uma fração dessa radiação é auto-absorvida na presença de um campo magnético constante.

Nesse caso, faça um diagrama esquemático do espectro emitido, indicando a região desse gráfico onde a emissão é opticamente espessa e opticamente fina. Indique as inclinações espectrais assintóticas dos dois regimes para  $\log(I(\nu))$  versus  $\log(\nu)$ .

- 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

