

## Plano de Ensino

Disciplina: Fundamentos da Relatividade Geral – NHZ3020-15 (TNA-SA)

Período de aplicação: 12 semanas 2021.1

Professor: Vilson Tonin Zanchin.

**Ementa:** Formulação covariante da relatividade restrita. Cálculo tensorial e geometria Riemanniana. Princípio básicos da Relatividade Geral. As equações da geodésica. Equações de Einstein no vácuo. Princípio de correspondência e o limite Newtoniano. Campos fracos e ondas gravitacionais. Os testes clássicos da relatividade geral. Solução de Schwarzschild e buracos negros. Tensor de energia-momento e as equações de Einstein na presença de matéria e de campos. Solução de Reissner-Nordström, Kerr e Kerr- Newman. Modelos de Friedmann-Robertson-Walker.

**Recomendações:** NHT3054-15 Teoria da Relatividade; MCTB010-13 - Cálculo Vetorial e Tensorial

### Bibliografia básica

1. E. F. Taylor, J. A. Wheeler, Exploring Black Holes: Introduction to General Relativity
2. J. B. Hartle, Gravity: An Introduction to Einstein's General Relativity
3. **B. F. Schutz, A First Course in General Relativity**
4. **R. D'Inverno, Introducing Einstein's Relativity**

### Bibliografia Complementar

1. S. Carroll, Spacetime and Geometry: An Introduction to General Relativity
2. C. W. Misner, K.S. Thorne, J. A. Wheeler, Gravitation
3. S. Weinberg, Gravitation and Cosmology: Principles and Applications of the General Theory of Relativity
4. M. P. Hobson, G. P. Efstathiou, A. N. Lasenby, General Relativity: An Introduction for Physicists
5. L. D. Landau & E. M. Lifshitz, Teoria do Campo

Ressaltamos que não há proposta de alteração da ementa em relação a sistema presencial de oferta da presente disciplina. O sistema de avaliação e o método de ensino estão sendo adaptados para o ensino remoto deste quadrimestre. O AVA escolhido é o Moodle: <https://moodle.ufabc.edu.br/>.

A lista abaixo indica o conteúdo a ser desenvolvido durante as 12 semanas de aplicação do quadrimestre 2021.1.

### **1. Formulação covariante da relatividade restrita (revisão)**

- 1.1 – O princípio de relatividade na mecânica newtoniana e as transformações de Galileu
- 1.2 – Invariância da velocidade da luz, os postulados da relatividade restrita e as transformações de Lorentz
- 1.3 – Intervalo de eventos e a geometria do espaço-tempo de Minkowski.
- 1.4 – Formulação covariante da mecânica relativística
- 1.5 – Formulação covariante do eletromagnetismo de Maxwell.

### **2. Geometria riemanniana – álgebra tensorial**

- 2.1 – Variedades, sistemas de coordenadas, curvas e superfícies
- 2.2 – Transformações de coordenadas
- 2.3 – Tensores contravariantes, covariantes e mistos
- 2.4 – Operações elementares com tensores.

### **3. Geometria riemanniana – cálculo tensorial**

- 3.1 – Derivada parcial de um tensorial
- 3.2 – Derivada de Lie
- 3.3 – Derivada covariante e conexão afim
- 3.4 – Geodésicas afim
- 3.5 – Métrica e geodésicas métricas
- 3.6 – Tensores de curvatura, de Ricci e de Einstein.
- 6.7 – Tensor de Weyl

### **4. Os princípios fundamentais da relatividade geral**

- 4.1 – Massa na teoria newtoniana
- 4.2 – Princípio de equivalência
- 4.4 – Princípio da covariância geral
- 4.5 – Princípio do acoplamento mínimo
- 4.7 – Princípio da correspondência

### **5. As equações de campo da relatividade geral**

- 5.1 – As equações do desvio geodésico

- 5.2 – A correspondência newtoniana
- 5.3 – As equações de campo no vácuo
- 5.4 – As equações completas (na presença de matéria)

## **6. Solução de Schwarzschild e os testes da relatividade geral**

- 6.1 – Soluções estáticas e estacionárias
- 6.2 – Soluções com simetria esférica
- 6.3 – Solução de Schwarzschild e suas propriedades
- 6.4 – Geodésicas na geometria de Schwarzschild
- 6.5 – O avanço do periélio de mercúrio
- 6.6 – O encurvamento da luz
- 6.7 – Red shift (efeito Doppler) gravitacional
- 6.8 – O experimento de Eötvös
- 6.9 – Outros experimentos e experimentos modernos

## **7. Tensor de energia-momento e equações de campo**

- 7.1 – Fluido incoerente e fluido perfeito
- 7.2 – O tensor de energia-momento de Maxwell
- 7.3 – As condições de energia
- 7.4 – O limite newtoniano e a constante de acoplamento

## **8. Buraco negro de Schwarzschild e outras soluções de buracos negros**

- 8.1 – Singularidades de coordenadas e de curvatura
- 8.2 – Forças de maré num buraco negro
- 8.3 – Horizontes de eventos e diagramas causais
- 8.4 – Buraco negro de Reissner-Nordström e de Kerr
- 8.5 – Evidências experimentais da existência de buracos negros

## **9. Noções sobre o modelo cosmológico de Friedmann-Robertson-Walker. (\*)**

- 9.1 – O princípio cosmológico e a cosmologia relativística
- 9.2 – As equações de Friedmann e suas soluções
- 9.3 – Lei de Hubble e o Universo em expansão.

O mapa de atividades abaixo indica o cronograma a ser seguido em cada uma das 12 semanas.

Semana (período)	Data	Unidade	Objetivos específicos	Atividades teóricas e recursos/ferramentas de EaD	Atividades práticas e recursos / ferramentas de EaD
1	02/02	1.1-1.2	Enunciar o princípio de relatividade de Galileu, entender a sua incompatibilidade com a teoria de propagação da luz. Enunciar os postulados da relatividade restrita, introduzir o conceito de intervalo (revisão).	Aulas expositivas e encontros para discussão, via Moodle e ferramentas de ensino remoto, com videoaulas, slides, notas de aula, e links para textos e materiais disponíveis na internet.	Lista de exercícios e avaliações da plataforma Moodle.
1	05/02	1.3	Definir o espaço-tempo de Minkowski, quadrivetores, tensores e transformações de Lorentz na notação covariante.	Idem ao anterior.	Idem ao anterior.
2	09/02	1.5	Revisar a formulação covariante da mecânica relativística e do eletromagnetismo de Maxwell. Resolver exercícios relativos a estes temas.	Idem ao anterior.	Idem ao anterior.
2	12/02	2.1-2.2	Definir variedades riemannianas, introduzir o conceito de coordenadas, tensores contravariantes e covariantes	Idem ao anterior.	Idem ao anterior.
3	19/02	2.3-2.4	Estabelecer as operações elementares envolvendo tensores. Resolver problemas envolvendo transformações gerais de coordenadas.	Idem ao anterior.	Idem ao anterior.
4	23/02	3.1-3.3	Identificar que a derivada parcial de um tensor não define um tensor. Definir derivada de Lie e derivada covariante e conexão afim.	Idem ao anterior.	Idem ao anterior.
4	26/02	3.4-3.5	Definir geodésica, construir as equações da geodésica a partir do conceito de conexão		
5	02/03	3.6-3.7	Construir o tensor de curvatura e analisar suas propriedades. Definir os tensores de Ricci, de Einstein e de Weyl.	Idem ao anterior.	Idem ao anterior.
5	05/03	--	Resolver problemas (exemplos) envolvendo a geometria riemanniana	Idem ao anterior.	Idem ao anterior.
6	09/03	4.1-4.2	Revisar o conceito de massa na teoria newtoniana (mecânica e gravitação). Enunciar, discutir, e entender o princípio de	Idem ao anterior.	Idem ao anterior.

			equivalência. Resolver exercícios sobre o tema.		
6	12/03	4.3-4.7	Enunciar e discutir os princípios da covariância geral, do acoplamento mínimo, e da correspondência. Exemplificar a cuprotitânica desses princípios.	Idem ao anterior.	Idem ao anterior.
7	16/03	5.1-5.2	Apresentar e interpretar a equação do desvio geodésico newtoniano e riemanniano. Discutir a aplicação do princípio da correspondência	Idem ao anterior.	Idem ao anterior.
7	19/03	5.3-5.4	Apresentar e interpretar a equações de campo da relatividade geral. Discutir o limite newtoniano	Idem ao anterior.	Idem ao anterior.
8	23/03	6.1-6.3	Definir espaços-tempos estacionários, estáticos e com simetria esférica. Apresentar a solução de Schwarzschild.	Idem ao anterior.	Idem ao anterior.
8	26/03	6.3-6.4	Obter e resolver as equações da geodésica na geometria de Schwarzschild. Analisar as propriedades mais importantes desta solução.	Idem ao anterior.	Idem ao anterior.
9	30/03	6.5-6.9	Apresentar e discutir os testes clássicos da relatividade geral. Elaborar uma tarefa sobre cada um desses testes.	Idem ao anterior.	Idem ao anterior.
10	06/04	7.1-7.2	Definir e analisar o tensor de energia-momento de um fluido incoerente e de um fluido perfeito Apresentar o tensor de energia-momento para o campo eletromagnético	Idem ao anterior.	Idem ao anterior.
11	13/04	7.3-7.4	Discutir as condições de positividade da energia. Analisar o limite newtoniano das equações de campo e determinar constante de acoplamento	Idem ao anterior.	Idem ao anterior.
11	16/04	8.1-8.2	Singularidades de coordenadas e de curvatura, determinar as forças de maré num buraco negro	Idem ao anterior.	Idem ao anterior.
12	20/04	8.3	Definir horizontes de eventos e construir diagramas causais		
12	23/04	8.4	Buraco negro de Reissner-Nordström e de Kerr	Idem ao anterior.	Idem ao anterior.
3 (16/02)	28/04	8.5	Eidências experimentais da existência de buracos negros	Idem ao anterior.	Idem ao anterior.
9 (02/04)	30/04	9.1-9.2	Enunciar princípio cosmológico e formular a cosmologia relativística. Obter as equações de Friedmann e suas soluções para os casos simples	Idem ao anterior.	Idem ao anterior.
10(09/04)	05/05	9.3	Lei de Hubble e o Universo em expansão.	Idem ao anterior.	Idem ao anterior.

**Critério de avaliação:** O conceito final do aluno será determinado pelas atividades na plataforma Moodle. Caso o aluno obtenha D ou F em seu conceito final, ele terá a oportunidade de realizar uma avaliação de Recuperação (de acordo com o cronograma), que substituirá (se o conceito obtido for superior ao anterior). Todas as atividades terão uma janela mínima de uma semana

**Controle de presença:** Será realizado por meio de atividades semanais no Moodle, no qual os estudantes que realizarem as atividades/exercícios vinculados a cada aula teórica receberão presença.

**Atendimento aos alunos:** Os encontros com os alunos serão realizados em duas modalidades, de acordo com a grade horária da disciplina. Duas vezes por semana, ocorrerão aulas (síncronas ou assíncrona) de 2h de acordo com a grade horária, e encontros de (síncronos) de 1h em horários a serem estabelecidos em comum acordo com os estudantes.

**Estratégias didáticas:** web conferências e disponibilização de conteúdo, textos, áudios ou vídeos e outras formas diversas selecionadas pelo docente. Atividades na forma de pequenas monografias serão solicitadas sobre dois temas escolhidos por cada estudante.

**Atendimento aos discentes:** Os discentes que buscam esclarecimentos de dúvidas com o seu docente, poderá fazê-lo através da plataforma Moodle (assíncrona) ou mediante combinando um horário de atendimento compatível com os horários da disciplina para videoconferências (síncronas) esporádicas.

#### **Calendário de avaliações**

- Após a conclusão de cada unidade (indicada no cronograma acima), haverá uma lista de exercícios a ser resolvida, com prazo de uma semana para a entrega.
- Após concluir cada sequência de três unidades módulo, haverá uma avaliação no Moodle envolvendo o conteúdo correspondente.
- **Todas as atividades avaliativas terão prazo de entrega de, no mínimo, 72 horas.**

Obs.: Este plano pode ser ajustado até ser ajustado até 1 (uma) semana antes da data limite para trancamento da disciplina.