

<b>TÍTULO:</b> Agujeros negros y singularidades			
<b>AÑO:</b> 2025	<b>CUATRIMESTRE:</b> 1°	<b>N° DE CRÉDITOS:</b>	<b>VIGENCIA:</b> 3 años
<b>CARGA HORARIA:</b> 60 horas de teoría y 30 horas de práctica			
<b>CARRERA/S:</b> Doctorado en Física			

### **FUNDAMENTOS**

El estudio de agujeros negros requiere del manejo de técnicas de geometría semi Riemanniana no enseñadas en un curso introductorio de Relatividad General (RG). Es, a la vez una motivación natural para aprender estas técnicas. El contenido de este curso excede el estándar de dar la definición tradicional de agujeros negros y el analizar casos estacionarios asintóticamente simple. Se introduce el concepto de superficies atrapadas, horizontes aparentes, etc, que son relevantes en el análisis numérico de colapso, y de coalescencia de agujeros negros.

### **OBJETIVOS**

Proveer las herramientas de Geometría Semi-Riemanniana requeridas para estudios complejos en RG, aplicándolas fundamentalmente al caso de agujeros negros, estacionarios y dinámicos.

### **PROGRAMA**

#### **Unidad I: Singularidades**

Singularidades de coordenadas, ejemplos “de juguete” y casos de interés: cartas en agujeros negros de Schwarzschild, Reissner Nördstrom y Kerr. Singularidades reales: bordes del espaciotiempo Extensiones maximales. Incompletitud de métricas Lorentziana, contraste con el caso Riemanniano.

#### **Unidad II: Subvariedades en Relatividad General**

Subvariedades semi-riemannianas: métrica inducida, segunda forma fundamental y vector de curvatura media. Relaciones de Gauss y Codazzi. Hipersuperficies espaciales y formulación de valores iniciales en Relatividad General. Integración en variedades. Variedades con borde: teoremas de Stokes y Gauss.

#### **Unidad III: Horizontes**

Hipersuperficies nulas, generadores. Horizontes de Killing, gravedad de superficie: casos degenerado y no degenerado. Expansión de generadores de hipersuperficies nulas: áreas transversales. Agujeros negros estacionarios: definición de carga, masa y momento angular. La solución de Kerr-Newman. Congruencias de geodésicas temporales y espaciales, expansión, shear y twist. Condiciones de energía, ecuación de Raychadhuri.

#### **Unidad IV: Agujeros negros**

Métricas conformemente relacionadas, compactificación, espaciotiempos asintóticamente simples, diagramas de Penrose, infinito nulo. Definición estándar de agujero negro, limitaciones. Agujeros negros estacionarios: i) teoremas de unicidad, ii) extensiones maximales, iii) casos sub-extremo, extremo y súper-extremo, iv) leyes análogas a las de Termodinámica en agujeros negros estacionarios. Singularidades desnudas, conjeturas débil y fuerte de censor cósmico. Inestabilidad de singularidades desnudas.

#### **Unidad V: Colapso**

Agujeros negros no-estacionarios. Superficies atrapadas. Colapso esférico. Horizontes aparentes. Solución de Vaidya. Solución de Oppenheimer-Snyder.

### **PRÁCTICAS**

A lo largo de sucesivos dictados se ha elaborado una lista de 90 problemas, se seleccionarán unos 70 entre estos. Los problemas son en general complejos, requieren el uso de programas de manipulación simbólica (Maple + grtensor). Las consultas son fuera de los horarios previstos para las clases teóricas.

### **BIBLIOGRAFÍA**

- [1] Barrett O'Neill, Semi-Riemannian Geometry with Applications to Relativity, Academic Press (1983).
- [2] Introduction to smooth manifolds; John T. Lee, GTM, Springer
- [3] Geometry, Topology and Physics; M. Nakahara, Graduate Students Series in Physics, IoP. (2003)
- [4] General Relativity; R. Wald, Chicago University Press (1984)
- [5] Numerical Relativity: Solving Einstein's Equations on the Computer; Baumgarte T.W., Sha-piro S.L., CUP (2010)
- [6] A Relativist's Toolkit, The Mathematics of Black-Hole Mechanics; Eric Poisson, CUP (2004)
- [7] P. K. Townsend, Black holes: Lecture notes, gr-qc 9707012.
- [8] Stephani, H., Kramer, D., MacCallum, M., Hoenselaers, C., & Herlt, E. (2003). Exact Solutions of Einstein's Field Equations (2nd ed., Cambridge Monographs on Mathematical Physics). Cambridge: Cambridge University Press.
- [9] Griffiths, J., & Podolský, J. (2009). Exact Space-Times in Einstein's General Relativity (Cambridge Monographs on Mathematical Physics). Cambridge: Cambridge University Press.
- [10] Juan A. Valiente Kroon, Conformal Methods in General Relativity, Cambridge University Press (2016).
- [11] Black Holes, New Horizons, edited by Sean Hardware. World Scientific (2013)

### **MODALIDAD DE EVALUACIÓN**

De la presentar una lista de problemas resueltos se resolverá la regularidad. El examen final es escrito, en la modalidad usual.

### **REQUERIMIENTOS PARA EL CURSADO**

Conocimientos básicos de Relatividad General al nivel de primeros 6 capítulos de General Relativity de Robert. Wald o bien Spacetime and Geometry de Sean Carroll.

<b>TÍTULO:</b> Elementos de cálculo dosimétrico para hadronterapia y campos mixtos			
<b>AÑO:</b> 2025	<b>CUATRIMESTRE:</b> 1°	<b>N° DE CRÉDITOS:</b>	<b>VIGENCIA:</b> 3 años
<b>CARGA HORARIA:</b> 60 horas de teoría y 60 horas de práctica			
<b>CARRERA/S:</b> Doctorado en Física			

## FUNDAMENTOS

La asignatura es de carácter teórico-práctico, con fuerte carga en la ejercitación utilizando recurso informático así como trabajos experimentales de laboratorio.

Se incluye estudio del comportamiento de la interacción entre partículas pesadas de interés para aplicaciones biomédicas, incorporando herramientas de programación y elementos teórico-prácticos para el transporte y colisión de radiación.

La carga horaria se distribuye en 2 (dos) clases semanales de 2 horas cada una, y se prevé que los estudiantes requieran de otras 2 horas semanales para estudio y ejercitación propia.

## FUNDAMENTOS

Este curso de posgrado en Física de dosimetría avanzada, transversal a áreas de física de radiaciones y dosimetría, está diseñado para proporcionar a los estudiantes una comprensión profunda y completa de la física subyacente a la interacción de la radiación con la materia, así como de las aplicaciones de estas disciplinas en la medicina y la radioterapia. Los fundamentos de este curso se basan en profundizar y especializar sobre temáticas de física nuclear, la interacción de partículas cargadas con la materia, la dosimetría y la radiobiología, y se enfocan en la aplicación de estas disciplinas biomédicas.

Los contenidos de este curso constituyen un marco completo para profundizar conocimientos y capacidades operativas en áreas como: estructura nuclear, interacción de partículas cargadas con la materia, dosimetría y la radiobiología, en contextos de aplicaciones biomédicas. Se destaca que el abordaje incluye el desarrollo de habilidades prácticas en la simulación de procesos de radiación, el análisis de datos y la aplicación de técnicas de dosimetría y radiobiología. Por tanto, al finalizar este curso, los estudiantes estarán formados con una comprensión profunda y completa de la física de radiaciones de partículas pesadas y su aplicación en la medicina y la terapia.

## METODOLOGÍA DEL TRABAJO

### 1. CLASES TEÓRICAS

Se realizarán clases teóricas en aula con una carga semanal de 4 (cuatro) horas.

### 2. CLASES DE EJERCITACIÓN PRÁCTICA

Se realizarán prácticos de ejercicios en aula, en base al contenido de las clases teóricas, con una carga horaria de 2 (dos) horas semanales.

### 3. TRABAJOS PRÁCTICOS Y DE LABORATORIO

Se realizarán trabajos en laboratorio de experimentación directa, supervisada por el docente, con una carga horaria de 2 (dos) horas semanales.

### 4. CLASES DE CONSULTA

El docente dispondrá de 2 (dos) horas semanales extra, en lugar y horario a convenir con los alumnos, para recibir consultas o profundizar temáticas de interés de los alumnos.

## CONDICIONES PARA OBTENER LA REGULARIDAD

## ASISTENCIA

Cobertura del 80% de la totalidad de las horas previstas, tanto teóricas como prácticas.

#### EXÁMENES PARCIALES

Aprobación de 2 exámenes parciales, con calificación mayor o igual al 60%.

#### TRABAJOS PRÁCTICOS Y DE LABORATORIO

Entrega y aprobación de los 6 trabajos prácticos en las fechas convenidas.

### OBJETIVOS

Objetivos generales:

Profundizar la formación de los estudiantes en el área de la dosimetría avanzada y los abordajes propios de las condiciones de campos mixtos desarrollando las capacidades para una comprensión teórica junto a habilidades y experiencia experimentales de laboratorio e instrumentación y en el manejo de metodologías computacionales para los complejos requerimientos en terapia con hadrones y, en general, campos mixtos.

Objetivos específicos:

- Proporcionar al estudiante los conceptos teóricos sobre dosimetría avanzada.
- Proporcionar al estudiante las herramientas teórico-prácticas para diseñar e implementar rutinas básicas de simulación Monte Carlo para la resolución de problemas de cálculo numérico en aplicaciones de dosimetría de campo mixto.
- Proporcionar al estudiante conocimientos y experiencia en experimentación para dosimetría de campos mixtos.

#### COMPETENCIAS DESARROLLADAS

- Adquisición de conocimientos teórico-prácticos en el área de física médica avanzada.
- Uso de radiaciones para hadronterapia.
- Uso de radiaciones para diagnóstico por imágenes.
- Manejo de metodologías de dosimetría avanzada de radiaciones.
- Manejo de técnicas de cómputo de transporte de radiación de hadrones.

### PROGRAMA

#### Unidad I: Propiedades generales del núcleo atómico

- 1.1.. Evolución del modelo nuclear
- 1.2.. Evidencia experimental en el desarrollo histórico de la física nuclear
  - 1.2.1.. Separación electromagnética de iones
  - 1.2.2.. Abundancia natural de isótopos
- 1.3.. Separación de isótopos
- 1.4.. Estabilidad nuclear
- 1.5.. Características de las fuerzas nucleares
- 1.6.. Compendio de propiedades nucleares
- 1.7.. Masa y energía de ligadura nuclear
- 1.8.. Barrera de potencial nuclear
- 1.9.. Modelo nuclear de Von Weizsäcker
- 1.10.. Spin y momentos nucleares
- 1.11.. Ejercitación del Capítulo I
  - 1.11.1.. Conceptos básicos de programación

## **Unidad II: Problema de dos cuerpos para nucleones según la energía**

- 2.1.. Deuterio en potencial central
- 2.2.. Scattering  $n_0 - p^+$
- 2.3.. Scattering  $p^+ - p^+$
- 2.4.. Comparación del modelo con datos experimentales
- 2.5.. Agregado: Repaso de potenciales cuánticos
- 2.6.. Problema de dos cuerpos a energías intermedias
- 2.7.. Scattering  $n_0 - p^+$  para energías entre 10 y 30 MeV
- 2.8.. Scattering  $n_0 - p^+$  para energías superiores a 30 MeV
- 2.9.. Scattering  $p^+ - p^+$  para altas energías
- 2.10.. Modelo de Yukawa de intercambio de piones
- 2.11.. Cálculo de Secciones Eficaces de interacción  $n_0 - p^+$  a energías intermedias
- 2.12.. Corrimiento de fase como evidencia de scattering  $n_0 - p^+$
- 2.13.. Ecuación integral del Scattering
- 2.14.. Ondas parciales en potencial  $V(r)$  y corrimiento de fase
- 2.15.. Cálculo de la sección eficaz
  - 2.15.1.. Estado fundamental del deuterio  $^3S_1$
- 2.16.. Ejercitación del Capítulo II
  - 2.16.1.. Elementos de estadística y conceptos de modelos nucleares
  - 2.16.2.. Scattering de nucleones
  - 2.16.3.. Corrimiento de fase y sección eficaz

## **Unidad III: Tracking de partículas y transporte de radiación**

- 3.1.. Repaso de colisión entre partículas cargadas
- 3.2.. Transporte de radiación y metodologías de integración numérica
  - 3.2.1.. Técnicas numéricas Monte Carlo para evaluar integrales definidas
- 3.3.. Cantidades importantes en transporte de partículas
  - 3.3.1.. Tracking y etapas en el modelado de transporte de radiación
- 3.4.. Aproximaciones para el transporte de fotones en medios materiales
- 3.5.. Penetración y alcance de partículas cargadas en la materia
- 3.6.. Pérdida de energía de partículas cargadas a nivel macroscópico
- 3.7.. Modelo de Bethe-Fano para pérdida de energía
  - 3.7.1.. Sección eficaz de Rutherford
  - 3.7.2.. Sección eficaz de colisión de Bethe-Fano
- 3.8.. Funciones acumulativas y cálculo de momentos en agua
- 3.9.. Aplicaciones:  $^1H$  y  $^{12}C$
- 3.10.. Pérdida y depósito de energía a nivel microscópico
  - 3.10.1.. Pérdida estocástica de energía en células

## **Unidad IV: Poder de frenado y energía media de excitación de iones**

- 4.0.1.. Poder de frenado electrónico
- 4.0.2.. Poder de frenado nuclear
  - 4.1.. Poder de frenado en agua para iones de hidrógeno
    - 4.1.1.. Rango en agua y energía media de ionización
  - 4.2.. Derivación de la energía de excitación
- 4.3.. Ejercitación del Capítulo IV

## **Unidad V: Interacción de partículas cargadas en material biológico**

- 5.1.. Elementos de Radioquímica
- 5.2.. Relación empírica energía-rango para iones terapéuticos
- 5.3.. Aproximaciones para Stopping Power para iones terapéuticos
- 5.4.. Relación empírica entre energía y rango de CSDA
- 5.5.. Consideraciones dosimétricas para haces de iones pesados
- 5.5.1.. Tratamiento simplificado del Efecto densidad
- 5.6.. Ejercitación del Capítulo V

#### **Unidad VI: Radioactividad natural y decaimiento nuclear**

- 6.1.. Teoría continua: una substancia
- 6.2.. Teoría continua y Branching
- 6.3.. Unidades de Radioactividad y aspectos dosimétricos
- 6.4.. Teoría general de Radioactividad
- 6.5.. Decaimiento nuclear alfa
- 6.5.1.. Estructura del espectro de emisión alfa
- 6.5.2.. Ligadura virtual
- 6.6.. Decaimiento nuclear beta
- 6.6.1.. Medición de energías de rayos  $\beta$
- 6.6.2.. Teoría de la emisión  $\beta$
- 6.6.3.. Teoría de Fermi de la Emisión  $\beta$
- 6.6.4.. Decaimiento muónico
- 6.6.5.. Evidencia sobre Neutrino-Antineutrino
- 6.6.6.. Conservación de la paridad en emisión  $\beta$
- 6.6.7.. Decaimiento nuclear Gamma
- 6.6.8.. Reglas de Selección y Probabilidad de transición Gamma
- 6.7.. Elementos básicos de programación y ejercitación del Capítulo VI
- 6.7.1.. Radioactividad y decaimiento nuclear
- 6.8.. Ejercitación del Capítulo VI

#### **Unidad VII: Reacciones nucleares y fuentes de neutrones**

- 7.1.. Introducción y generalidades de reacciones nucleares
- 7.2.. Canales nucleares de reacción
- 7.3.. Relaciones energéticas
- 7.4.. Sección eficaz para neutrones
- 7.5.. El modelo de núcleo compuesto
- 7.6.. Núcleo compuesto y experimentos
- 7.7.. Teoría de dispersión de Breit-Wigner
- 7.8.. Estados nucleares de excitación
- 7.9.. Reacciones Foto-nucleares
- 7.10.. Reacciones nucleares con iones pesados
- 7.11.. Fuentes de neutrones
- 7.12.. Termalización (slowing down) de neutrones
- 7.13.. Fisión y fusión nuclear: conceptos básicos
- 7.14.. Reacciones nucleares inducidas por neutrones
- 7.14.1.. Energías bajas e intermedias para núcleos intermedios
- 7.14.2.. Energías bajas para núcleos pesados
- 7.14.3.. Energías intermedias para núcleos pesados
- 7.14.4.. Energías altas para núcleos pesados e intermedios
- 7.14.5.. Energías muy altas para núcleos pesados e intermedios

- 7.15..Reacciones de iones pesados
- 7.16..Elementos básicos de programación y ejercitación del Capítulo VII
- 7.16.1.. Reacciones nucleares y fuentes de neutrones
- 7.17.. Ejercitación del Capítulo VII

### **Unidad VIII: Detectores de radiación para hadrones**

- 8.1.. Detectores gaseosos
- 8.2.. Detectores de estado sólido
- 8.2.1.. Detectores semiconductores
- 8.2.2.. Detectores centelladores
- 8.2.3.. Detectores termoluminiscentes
- 8.2.4.. Detectores de emulsión
- 8.3.. Detección de partículas cargadas pesadas
- 8.3.1.. Utilización de detectores para partículas cargadas pesadas
- 8.4.. Detección de neutrones
- 8.4.1.. Detección de neutrones térmicos
- 8.4.2.. Contadores de fisión
- 8.4.3.. Contadores de  $^3\text{He}$
- 8.4.4.. Detección de neutrones rápidos
- 8.5.. Elementos básicos de programación y ejercitación del Capítulo VIII
- 8.5.1.. Detectores de radiación para hadrones
- 8.6.. Ejercitación del Capítulo VIII

### **Unidad IX: Radiobiología para haces de iones**

- 9.1..Radiobiología: Introducción
- 9.2..Sobrevida celular
- 9.3..Modelo Lineal-Cuadrático y eficiencia radiobiológica
- 9.4..Mediciones de supervivencia celular
- 9.5.. Ejercitación del Capítulo IX

### **Unidad X: Elementos de tracking y simulación de neutrones**

- 10.1..Introducción: Tracking de partículas: neutrones
- 10.2..Modelos de tracking para neutrones
- 10.3..Modelado Monte Carlo de transporte de neutrones
- 10.4..Trabajo de aplicación: Transporte de neutrones
- 10.5.. Ejercitación del Capítulo X

### **Unidad XI: Radioprotección: Aplicaciones**

- 11.1..Introducción: Radioprotección
- 11.2..Modelo para blindajes para aparatos de RX en radiodiagnóstico
- 11.3..Cálculo blindajes para aparatos de RX en radiodiagnóstico
- 11.4..Trabajo de aplicación: Elementos de Radiodiagnóstico
- 11.5.. Ejercitación del Capítulo XI

### **Unidad XII: Transporte y depósito de energía para haces de protones y carbono**

- 12.1..Trabajo de aplicación: Haces de  $^1\text{H}$  y  $^{12}\text{C}$

### **Unidad XIII: BNCT: dosimetría de campo mixto**

- 13.1..Introducción BNCT

13.2..Uso de técnica de cálculo Monte Carlo para BNCT  
13.3..Información teórica y experimental  
13.3.1.. La técnica dosimétrica FriXy  
13.4..Trabajo de Ejercitación: BNCT y dosimetría de campo mixto

#### **Unidad XIV: Detectores de radiación estudiados con técnicas Monte Carlo**

14.1..Introducción al estudio de detectores  
14.2..Trabajo de Ejercitación: Estudio y caracterización de un detector tipo pozo  
14.3..Trabajo de Ejercitación: Estudio y caracterización de detectores de estado sólido  
14.4..Trabajo de Ejercitación: Estudio y caracterización de una cámara de ionización

#### **Unidad XV: Cálculos de radiobiología**

15.1..Efectos radiobiológicos a partir de dosimetría física  
15.2..Isoefectos radiobiológicos  
15.3..Trabajo de aplicación: Radiobiología

#### **Unidad XVI: Generación y procesamiento de imágenes médicas**

16.1..Aplicación: Radiografía digital y tomografía computada  
16.2..Tomografía por emisión de positrones  
16.3..Dosimetría e imágenes  
16.4..Neutrografía

### **PRÁCTICAS**

Elementos de tracking y simulación de neutrones  
Radioprotección: Aplicaciones  
Dosimetría computacional para haces de 1 H y 12 C  
BNCT: dosimetría de campo mixto  
Detectores de radiación estudiados con técnicas Monte Carlo  
Cálculos de radiobiología  
Radiografía digital y tomografía computada  
Neutrografía

### **BIBLIOGRAFÍA**

#### **ESPECÍFICA:**

ELEMENTOS DE CÁLCULO DOSIMÉTRICO PARA HADRONTERAPIA Y CAMPOS MIXTOS por M. Valente (Ed. 2022), basado en ediciones previas: 2010, 2012, 2014, 2015 y 2022.

#### **BÁSICA:**

- F. Kahn. The physics of the radiation therapy 3ra. Ed., Editorial Lippincott Williams & Wil, 2003.
- S. Cherry, J. Sorrenson and M. Phelps. Physics in nuclear medicine. Editorial Saunders, Philadelphia Third Edition 2003.
- F. Salvat, J. Fernández-Varea and J. Sempau. PENELOPE, an algorithm and computing code for Monte Carlo simulation of electron photon showers. Editorial NEA, France 2003.
- G. Battistoni et al. The FLUKA Code: An Accurate Simulation Tool for Particle Therapy, 2016.
- F. Attix. Introduction to radiological physics and radiation dosimetry. Editorial John

Wiley and Sons, 1986.

- M. Valente Física nuclear con aplicaciones Notas del curso de especialidad en FaMAF 2008. (disponible en: <http://www.famaf.unc.edu.ar/~valente>)
- M. Valente Elementos de calculo dosimetrico para hadronterapia y campos mixtos Notas del curso de posgrado en FaMAF 2010-2011-2012-2014-2015. (disponible en: <http://www.famaf.unc.edu.ar/~valente>)
- M. Valente y P. Perez Dosimetria y radiobiologia. Notas para curso de grado, Universidad de Catamarca., 2011. (disponible en: <http://www.famaf.unc.edu.ar/~valente>)
- M. Valente. Fisica de la Radioterapia. Notas para curso de posgrado universidad de la Frontera, Chile 2009-2010-2011-2012-2013-2014-2015-2016-2017-2018-2019-2020-2021. (disponible en: <http://www.famaf.unc.edu.ar/~valente>)

#### COMPLEMENTARIA:

- J. Vedelago, F. Mattea, S. Triviño, M. Montesinos, W. Keil, M. Valente, M. Romero. Smart material based on boron crosslinked polymers with potential applications in cancer radiation therapy. SCIENTIFIC REPORTS, 2021.
- A Wolfel, D. Chacón, M. Romero, M. Valente, F. Mattea. Synthesis of a metal chelating monomer for radiation polymer dosimetry. RADIATION PHYSICS AND CHEMISTRY, 2021.
- R. Figueroa, J. Guarda, J. Leiva, F. Malano, M. Valente. Dosimetry of tumor targeting imaging by convergent X-ray beam as compared with nuclear medicine. APPLIED RADIATION AND ISOTOPES, 2021.
- B. Casanelli, M. Santibáñes, M. Valente. Particle size effect on fluorescence emission for Au-infused soft tissues. RADIATION PHYSICS AND CHEMISTRY, 2020.
- F. Geser, M. Valente. A theoretical model for the cross section of the proton-boron fusion nuclear reaction. RADIATION PHYSICS AND CHEMISTRY, 2020.
- M. Valente, Water-equivalence of gel dosimeters for radiology medical imaging. APPLIED RADIATION AND ISOTOPES, 2018.
- G. Gambarini S. Agosteo S Altieri S. Bortolussi M. Carrara S. Gay C. Petrovich G. Rosi M. Valente. Dose distributions in phantoms irradiated in thermal columns of different nuclear reactors. RADIATION PROTECTION DOSIMETRY Volume: 123 Number: 4 Year: 2007.

#### MODALIDAD DE EVALUACIÓN

- Dos (2) evaluaciones parciales.
- Realización y aprobación de los 6 (seis) informes de trabajos prácticos.
- Las evaluaciones parciales serán sobre contenidos teórico-prácticos.
- El examen final contará de una evaluación escrita sobre contenidos teórico-prácticos, y una exposición oral sobre la profundización de un tema de aplicación.

#### REQUERIMIENTOS PARA EL CURSADO

Conocimientos generales de física médica. Conocimientos generales de física de radiaciones. Experiencia básica en prácticas de laboratorio.