



# FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS

GRADO EN FÍSICA curso 2023-24



## Ficha de Trabajo de Fin de Grado

|                             |   |   |
|-----------------------------|---|---|
| <b>Departamento:</b>        | Física Teórica  |   |
| <b>Título:</b>              | Partículas fundamentales en el límite no relativista  |   |
| <b>Title:</b>               | Fundamental particles in the non-relativistic limit   |   |
| <b>Supervisor/es:</b>       | Clara María Peset Martín                              |   |
| <b>E-mail supervisor/es</b> | cpeset@ucm.es   |   |
| <b>Número de plazas:</b>    | 1   |   |
| <b>Asignación de TFG:</b>   | Selección directa <input checked="" type="checkbox"/> | Selección por expediente <input type="checkbox"/> |

### Objetivos:

Las partículas fundamentales son típicamente objetos relativistas, pero existen diversos escenarios en el que su comportamiento es no relativista, por ejemplo en estados ligados como los átomos simples o de Rydberg, o en la aniquilación de materia oscura en nuestro Universo. En este Trabajo de Fin de Grado se propone obtener un primer contacto con la física de partículas en su límite no relativista. Los objetivos del trabajo son

1. Analizar la formulación Lagrangiana y las ecuaciones de movimiento para una partícula (pseudo)escalar y (pseudo)vectorial.
2. Realizar la expansión no relativista de los Lagrangianos y analizar las distintas interacciones.
3. A partir del Lagrangiano no relativista y la aproximación de Born, obtener los distintos tipos de potenciales generados por las partículas.
4. Estudiar los niveles de energía afectados por los potenciales calculados.
5. Estudiar numéricamente sistemas físicos que se vean afectados por los resultados obtenidos e interpretar su posible impacto. Por ejemplo los átomos de Rydberg.

### Metodología:

El alumno se familiarizará con el problema a través de la lectura y estudio de libros y

artículos científicos introductorios relacionados con los objetivos propuestos. El trabajo se desarrollará principalmente mediante cálculo analítico, combinando los resultados con el análisis numérico en la última parte. Se facilitará el acceso a la bibliografía más relevante.

**Bibliografía:**

- M. E. Peskin and D. V. Schroeder, "An Introduction to quantum field theory", Avalon Publishing, 1995.
- A. Galindo and P. Pascual, "Quantum Mechanics I", Springer-Verlag, 1990.
- A. Pineda and J. Soto, "Potential NRQED: The Positronium case," Phys. Rev. D **59**, 016005 (1999).
- C. Frugiuele and C. Peset, "Muonic vs electronic dark forces: a complete EFT treatment for atomic spectroscopy," JHEP **05** (2022), 002



# FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS

GRADO EN FÍSICA curso 2023-24



## Ficha de Trabajo de Fin de Grado

|                             |   |   |
|-----------------------------|---|---|
| <b>Departamento:</b>        | Física Teórica  |   |
| <b>Título:</b>              | El momento magnético anómalo del muón                 |   |
| <b>Title:</b>               | The anomalous magnetic moment of the muon             |   |
| <b>Supervisor/es:</b>       | Jacobo Ruiz de Elvira Carrascal, Clara Peset Martín   |   |
| <b>E-mail supervisor/es</b> | Jacobore@ucm.es, cpeset@ucm.es                        |   |
| <b>Número de plazas:</b>    | 1   |   |
| <b>Asignación de TFG:</b>   | Selección directa <input checked="" type="checkbox"/> | Selección por expediente <input type="checkbox"/> |

### Objetivos:

La discrepancia actual entre la predicción teórica y los resultados experimentales del momento magnético anómalo del muón es uno de los problemas más apasionantes del modelo Estándar de Partículas y una posible indicación de Nueva Física.

En este trabajo se pretenden introducir los conceptos básicos de teoría cuántica de campos y teoría de la dispersión y que el estudiante adquiera los conocimientos necesarios para entender tanto la determinación teórica como experimental del momento magnético del muón.

### Metodología:

El enfoque será teórico-práctico, en el que las nociones básicas serán introducidas al mismo tiempo que se plantearán distintos problemas para facilitar su comprensión.

Se estudiará el concepto clásico de momento magnético, y como correcciones cuánticas producen un momento magnético anómalo. Para entender el resultado teórico, se estudiarán las simetrías en un problema de colisión, el concepto de amplitud, factor de forma, sección eficaz y desfase. También se abordará el desarrollo en ondas parciales, las propiedades analíticas de la amplitud, la expansión de alcance efectivo y propiedades de baja energía de la amplitud. Si el tiempo lo permite, se prestará especial atención a las contribuciones hadrónicas al momento magnético anómalo del muón.

El trabajo es individual y requiere conocimientos previos de mecánica cuántica. El haber cursado la asignatura de campos cuánticos también será de ayuda para el alumno.

**Bibliografía:**

- Jegerlhener, F., The anomalous magnetic moment of the muon, Springer, 2013.

- Taylor, J.R., Scattering Theory: The Quantum Theory of Nonrelativistic Collisions. John Wiley & Sons, 1972.

- Martin A. D., Spearman T. D., Elementary Particle Theory, North-Holland PC, 1970.

- Griffiths D., Introduction to elementary particles, Wiley, 1987.



# FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS

GRADO EN FÍSICA curso 2023-24



## Ficha de Trabajo de Fin de Grado

|                             |   |   |
|-----------------------------|---|---|
| <b>Departamento:</b>        | Física Teórica  |   |
| <b>Título:</b>              | Introducción al estudio de las estructuras hadrónicas |   |
| <b>Title:</b>               | Introduction to the study of hadron structure         |   |
| <b>Supervisor/es:</b>       | Ignazio Scimemi                                       |   |
| <b>E-mail supervisor/es</b> | ignazios@ucm.es                                       |   |
| <b>Número de plazas:</b>    | 1   |   |
| <b>Asignación de TFG:</b>   | Selección directa <input checked="" type="checkbox"/> | Selección por expediente <input type="checkbox"/> |

### Objetivos:

Las distribuciones de momento y spin de quarks y gluones dentro de los hadrones son elementos esenciales para la física de altas energías en aceleradores de partículas. Con este trabajo vamos a introducir unos conceptos como las distribuciones partónicas en una dimensión (PDF) o 3 dimensiones (TMD, GTMD, etc), los jets, los métodos de cálculos de amplitudes de probabilidad para física de altas energías, las teorías efectivas que permiten escribir las probabilidades (dadas por secciones eficaces). Entre estas últimas las más adecuadas son SCET (Soft Collinear Effective Theory) o bien el método de campo de fondo.

### Metodología:

El trabajo necesita una buena preparación en teoría de campos. A partir de allí se va estudiando textos/artículos donde se exponen los conceptos y métodos de las teorías efectivas o los métodos de cálculo. El trabajo consiste en reproducir algunos resultados de una forma no trivial o bien elaborar sobre las nociones aprendidas. Se podrán desarrollar pequeños códigos para ilustrar a través de gráficos los resultados obtenidos.

### Bibliografía:

**Introduction to Soft-Collinear Effective Theory**, Thomas Becher, A. Broggio, A. Ferroglia, Lect.Notes Phys. 896 (2015) pp.1-206, e-Print: 1410.1892 [hep-ph]  
**Lecture notes on Soft-Collinear Effective Theory**, I. W. Stewart,  
<https://ocw.mit.edu/courses/physics/8-851-effective-field-theory-spring->

2013/lecture-notes/MIT8\_851S13\_sctnotes.pdf

**Scattering Amplitudes**; H. Elvang, Yu-tin Huang, e-Print: 1308.1697 [hep-th]

**Transverse spin physics** V. Barone, P. Ratcliff, 2003 by World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd. , ISBN 981-238-101-5.

**A short review on recent developments in TMD factorization and implementation**, I. Scimemi, Adv. High Energy Phys. 2019 (2019) 3142510, e-Print:1901.08398 [hep-ph]

**QCD: Renormalization for the Practitioner**, Pascual, P.; Tarrach, R. ISBN 10: 3662204126 ISBN 13: 9783662204122, Editorial: Springer, 2014

**An Introduction To Quantum Field Theory** Peskin, Michael E., ISBN 10: 0367320568 ISBN 13: 9780367320560, Editorial: CRC Press, 2019



# FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS

GRADO EN FÍSICA curso 2023-24



## Ficha de Trabajo de Fin de Grado

|                             |   |   |
|-----------------------------|---|---|
| <b>Departamento:</b>        | Física Teórica  |   |
| <b>Título:</b>              | Renormalones en QCD                                   |   |
| <b>Title:</b>               | Renormalons in QCD                                    |   |
| <b>Supervisor/es:</b>       | Alexey Vladimirov                                     |   |
| <b>E-mail supervisor/es</b> | alexeyvl@ucm.es                                       |   |
| <b>Número de plazas:</b>    | 1   |   |
| <b>Asignación de TFG:</b>   | Selección directa <input checked="" type="checkbox"/> | Selección por expediente <input type="checkbox"/> |

### Objetivos:

En la constante de acoplamiento débil, las interacciones en la teoría cuántica de campos se presentan con los diagramas de Feynman. Parece que el número de diagramas de Feynman crece rápidamente con el orden, y por lo tanto, la serie es divergente. Esta divergencia se llama "renormalón", y se puede calcular explícitamente en algunas aproximaciones. El objetivo es calcular la contribución "renormalón" a la masa del quark y demostrar su impacto en la determinación de las masas de los quarks.

### Metodología:

El principal método para determinar la contribución del "renormalón" es calcular el diagrama con inserciones de loop de quarks. La suma de todas las posibles inserciones de loop diverge, y señala la posición del polo del "renormalón". En este trabajo, aprenderás las bases del cálculo de un loop y la renormalización. Trabajarás con series asintóticas y sumarás estas series utilizando representaciones integrales.

### Bibliografía:

- [1] Peskin & Schroeder, **Introduction to quantum field theory**
- [2] M.Beneke, **Renormalons**, hep-ph/9807443
- [3] T.Muta, **Foundation of Quantum Chromodynamics**



# FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS

GRADO EN FÍSICA curso 2023-24



## Ficha de Trabajo de Fin de Grado

|                             |   |
|-----------------------------|---|
| <b>Departamento:</b>        | Física Teórica  |
| <b>Título:</b>              | Sección transversal de dispersión inelástica profunda semi-inclusiva                                    |
| <b>Title:</b>               | Cross-section of Semi-Inclusive Deep-Inelastic Scattering   |
| <b>Supervisor/es:</b>       | Alexey Vladimirov   |
| <b>E-mail supervisor/es</b> | alexeyvl@ucm.es   |
| <b>Número de plazas:</b>    | 1   |
| <b>Asignación de TFG:</b>   | Selección directa <input checked="" type="checkbox"/> Selección por expediente <input type="checkbox"/> |

### Objetivos:

La dispersión profunda semi-inclusiva (SIDIS en inglés) es uno de los principales procesos para estudiar la estructura interna de los nucleones. La descripción de este proceso se realiza con teoremas de factorización, los cuales expresan la sección eficaz en términos de funciones de estructura polarizadas, las cuales, a su vez, son integrales de distribuciones elementales de partones. El objetivo de este trabajo es derivar la expresión para la SIDIS polarizada en orden principal.

### Metodología:

La computación propuesta implica muchos aspectos de la teoría cuántica de campos, como la elaboración de la cinemática, el cálculo de diagramas de Feynman (a primer orden), e integración sobre el espacio de fases. Utilizando el ejemplo no trivial de SIDIS, aprenderás cómo la QCD moderna describe los datos. Además, podrás comparar las medidas experimentales con tu cálculo.

### Bibliografía:

- [1] Peskin & Schroeder, **Introduction to quantum field theory**
- [2] A.Bacchetta, et al, **Semi-inclusive deep inelastic scattering at small transverse momentum, hep-ph/0611265**
- [3] T.Muta, **Foundation of Quantum Chromodynamics**





# FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS

GRADO EN FÍSICA curso 2023-24



## Ficha de Trabajo de Fin de Grado

|                             |   |   |
|-----------------------------|---|---|
| <b>Departamento:</b>        | Física Teórica  |   |
| <b>Título:</b>              | QCD con campo de background                           |   |
| <b>Title:</b>               | QCD with background field                             |   |
| <b>Supervisor/es:</b>       | Alexey Vladimirov                                     |   |
| <b>E-mail supervisor/es</b> | alexeyvl@ucm.es                                       |   |
| <b>Número de plazas:</b>    | 1   |   |
| <b>Asignación de TFG:</b>   | Selección directa <input checked="" type="checkbox"/> | Selección por expediente <input type="checkbox"/> |

### Objetivos:

El método de campo background es un procedimiento útil para calcular la acción efectiva de una teoría cuántica de campos. El objetivo del TFG es estudiar cómo se realiza este procedimiento dentro de la Cromodinámica Cuántica (QCD) y, utilizando este método, calcular un observable (que será seleccionado en función del interés).

### Metodología:

En este trabajo, aprenderás sobre la formulación de integrales funcionales en teorías cuánticas de campo, y el procedimiento de fijación de calibre. Separando los componentes de background y dinámicos de los campos, obtendrás la acción efectiva de QCD, que es muy útil en aplicaciones prácticas. Usando esta acción, calcularás alguna observable (por ejemplo, la función beta de QCD).

### Bibliografía:

- [1] Peskin & Schroeder, **Introduction to quantum field theory**
- [2] J. Zinn-Justin, **Quantum Field Theory and Critical Phenomena**
- [3] L.F. Abbott, **Introduction to the Background Field Method**



# FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS

GRADO EN FÍSICA curso 2023-24



## Ficha de Trabajo de Fin de Grado

|                             |   |
|-----------------------------|---|
| <b>Departamento:</b>        | Física Teórica  |
| <b>Título:</b>              | Diagramas de telaraña y exponenciación para bucles de Wilson  |
| <b>Title:</b>               | Web-diagrams and exponentiation for Wilson loops  |
| <b>Supervisor/es:</b>       | Alexey Vladimirov   |
| <b>E-mail supervisor/es</b> | alexeyvl@ucm.es   |
| <b>Número de plazas:</b>    | 1   |
| <b>Asignación de TFG:</b>   | Selección directa <input checked="" type="checkbox"/> Selección por expediente <input type="checkbox"/> |

### Objetivos:

Las líneas de Wilson describen el transporte paralelo de campos en las teorías de calibre, como QCD, QED y gravedad cuántica. Son una parte esencial del aparato moderno de las teorías cuánticas de campos. La expansión perturbativa para bucles de Wilson se puede presentar de una forma especial, como un exponente de diagramas web. Los diagramas web son una subclase de los diagramas de Feynman que obedecen a la conectividad de color.

### Metodología:

En este trabajo aprenderás sobre la generación de diagramas de Feynman y el cálculo de los factores de color en QCD. Estudiarás las propiedades de la expansión perturbativa de todo orden para bucles de Wilson y (usando el álgebra de color) encontrarás las reglas de exponenciación y definirás diagramas web.

### Bibliografía:

- [1] F. Van der Veken, I. Cherednikov, and T. Mertens, **Wilson Lines in Quantum Field Theory**
- [2] C.D. White, **An Introduction to Webs**, [\[1507.02167\]](#)
- [3] A. Vladimirov, **Exponentiation for products of Wilson lines within the generating function approach** [\[1501.03316\]](#)



# FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS

GRADO EN FÍSICA curso 2023-24



## Ficha de Trabajo de Fin de Grado

|                             |   |
|-----------------------------|---|
| <b>Departamento:</b>        | Física Teórica  |
| <b>Título:</b>              | Teoría electrodébil y potencial del Higgs en el Modelo Estándar y más allá                              |
| <b>Title:</b>               | Electroweak theory and Higgs potential in the Standard Model and beyond                                 |
| <b>Supervisor/es:</b>       | Juan José Sanz Cillero  |
| <b>E-mail supervisor/es</b> | jjsanzcillero@ucm.es  |
| <b>Número de plazas:</b>    | 2   |
| <b>Asignación de TFG:</b>   | Selección directa <input checked="" type="checkbox"/> Selección por expediente <input type="checkbox"/> |

### Objetivos:

Estudiar y presentar el procedimiento seguido por Glashow, Weinberg & Salam que los llevó a la unificación de las fuerzas electromagnética y débil. Se busca hacer especial hincapié en los distintos contratiempos que surgieron, así como en situar cronológicamente el desarrollo del marco teórico del modelo electrodébil mediante los distintos experimentos que se llevaron a cabo.

Se plantea también estudiar el Mecanismo de Higgs y el potencial del Modelo Estándar. Se estudia el proceso de ruptura espontánea de simetría y la aparición de vacíos no-triviales que no son invariantes bajo las transformaciones de simetría del Modelo Estándar. De igual modo se planteará, en la medida de lo posible, estudiar algunas extensiones y posibles fenómenos más allá del Modelo Estándar.

### Metodología:

Se hará un estudio bibliográfico siguiendo las referencias básicas y continuando el estudio a partir de ellas.

Se reproducirán algunos cálculos básicos y se hará uso de software de cálculo simbólico para los análisis más complejos.

### Bibliografía:

- S. Weinberg, "The Making of the standard model", Eur. Phys. J. C 34 (2004), 5-13; doi:10.1140/epjc/s2004-01761-1 ; [arXiv:hep-ph/0401010 [hep-ph]].

- J.F. Donoghue, E. Golowich and B.R. Holstein, “Dynamics of the standard model”, Camb. Monogr. Part. Phys. Nucl. Phys. Cosmol. 2 (1992), 1-540; doi:10.1017/CBO9780511524370 .
- S. Coleman, “Aspects of Symmetry: Selected Erice Lectures”, doi:10.1017/CBO9780511565045 .
- [Standard Model Extended by a Heavy Singlet: Linear vs. Nonlinear EFT](#), [G. Buchalla](#), [O. Cata](#), [A. Celis](#), [C. Krause](#), *Nucl.Phys.B* 917 (2017) 209-233 , e-Print: [1608.03564](#) [hep-ph].
- [Role of dimension-eight operators in an EFT for the 2HDM](#), [Sally Dawson](#), [Duarte Fontes](#), [Samuel Homiller](#), [Matthew Sullivan](#), *Phys.Rev.D* 106 (2022) 5, 055012 , e-Print: [2205.01561](#) [hep-ph]



# FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS

GRADO EN FÍSICA curso 2023-24



## Ficha de Trabajo de Fin de Grado

|                             |  |   |
|-----------------------------|--|---|
| <b>Departamento:</b>        | Física Teórica   |   |
| <b>Título:</b>              | El momento magnético anómalo del muon: QCD vs nueva física |   |
| <b>Title:</b>               | The muon anomalous magnetic moment: QCD vs new physics     |   |
| <b>Supervisor/es:</b>       | Juan José Sanz Cillero                                     |   |
| <b>E-mail supervisor/es</b> | jjsanzcillero@ucm.es                                       |   |
| <b>Número de plazas:</b>    | 2  |   |
| <b>Asignación de TFG:</b>   | Selección directa <input checked="" type="checkbox"/>      | Selección por expediente <input type="checkbox"/> |

### Objetivos:

El momento magnético anómalo del muon ( $g-2$ ) representa una de las observables medidas con mayor precisión en física de partículas. Por este motivo es un óptimo lugar para buscar efectos de nueva física, que excedan a lo que se denomina el Modelo Estándar de partículas. En concreto, se viene observando desde hace años importantes discrepancias entre las mediciones experimentales y las predicciones teóricas que podrían estar indicando la existencia de física más allá del Modelo Estándar. Para ello, es necesario tener un conocimiento preciso de nuestras predicciones, en particular de las contribuciones debidas a las interacciones fuertes de la Cromodinámica Cuántica (QCD).

En concreto, en este TFG se propone abordar los siguientes objetivos:

- Estudio bibliográfico del problema de la discrepancia entre la medición experimental y la predicción teórica del momento magnético anómalo del muon.
- Cálculo de procesos de QCD básicos que contribuyen al momento magnético anómalo del muon. Estas contribuciones vienen principalmente de la región energética en que la interacción fuerte de QCD es no-perturbativa, requiriendo el uso de teorías efectivas.
- Relevancia y análisis numérico de estas contribuciones de QCD al momento magnético anómalo del muon.

### Metodología:

Dentro de este proyecto, es muy recomendable que el alumno esté cursando o haya cursado las asignaturas de Partículas Elementales, Campos Cuánticos y Simetrías y Grupos en Física.

Se desarrollará un trabajo principalmente teórico y bibliográfico, acompañado por algunos cálculos y manejo de datos básicos. Se aprenderá a manejar con soltura el cálculo de diagramas de Feynman a nivel árbol y al nivel de un *loop* en procesos básicos. Se utilizará resultados de QCD perturbativo y del Lagrangiano efectivo de QCD a bajas energías.

**Bibliografía:**

- Pseudoscalar pole light-by-light contributions to the muon ( $g-2$ ) in Resonance Chiral Theory, A. Guevara, P. Roig & J.J. Sanz-Cillero, JHEP 06 (2018) 160; e-Print: 1803.08099 [hep-ph]
- The anomalous magnetic moment of the muon in the Standard Model, T. Aoyama, N. Asmussen, M. Benayoun, J. Bijnens, T. Blum et al., Phys.Rept. 887 (2020) 1-166; e-Print: 2006.04822 [hep-ph]
- Update of the ALEPH non-strange spectral functions from hadronic  $\tau$  decays, Michel Davier, Andreas Höcker, Bogdan Malaescu, Chang-Zheng Yuan & Zhiqing Zhang, Eur.Phys.J.C 74 (2014) 3, 2803; e-Print: 1312.1501 [hep-ex]
- Rho meson properties in the chiral theory framework, J.J. Sanz-Cillero & Pich, Eur.Phys.J.C 27 (2003) 587-599; e-Print: hep-ph/0208199 [hep-ph]
- Pade approximants and resonance poles, Pere Masjuan, Juan Jose Sanz-Cillero, Eur.Phys.J.C 73 (2013) 2594; e-Print: 1306.6308 [hep-ph]
- Review of Particle Physics, P.A. Zyla (Particle Data Group), PTEP 2020 (2020) 8, 083C01
- Muon  $g-2$  and  $\Delta\alpha$  connection, [Alexander Keshavarzi](#), [William J. Marciano](#), [Massimo Passera](#), [Alberto Sirlin](#), *Phys.Rev.D* 102 (2020) 3, 033002, e-Print: [2006.12666](#) [hep-ph]



# FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS

GRADO EN FÍSICA curso 2023-24



## Ficha de Trabajo de Fin de Grado

|                             |  |  |
|-----------------------------|--|--|
| <b>Departamento:</b>        | Física Teórica   |  |
| <b>Título:</b>              | Neutrinos. Oscilaciones, masas, naturaleza y violación de CP |  |
| <b>Title:</b>               | Neutrinos. Oscillations, masses, nature and CP violation     |  |
| <b>Supervisor/es:</b>       | Antonio Dobado   |  |
| <b>E-mail supervisor/es</b> | dobado@fis.ucm.es  |  |
| <b>Número de plazas:</b>    | 2  |  |
| <b>Asignación de TFG:</b>   | Selección directa <input type="checkbox"/>                   | Selección por expediente <input checked="" type="checkbox"/> |

### Objetivos:

Obtener una comprensión actualizada de los aspectos más relevantes de la fenomenología de los neutrinos y su descripción teórica.

### Metodología:

Revisión de la bibliografía existente y otros recursos de internet.

### Bibliografía:

Kai Zuber, Neutrino Physics. Taylor and Francis Group. 2004.

Mohapatra et al. Rep. Prog. Phys. 70 (2007) 1757

Bilenky, Phys. Part. Nucl. 50 (2019) 6, 645



# FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS

GRADO EN FÍSICA curso 2023-24



## Ficha de Trabajo de Fin de Grado

|                             |  |  |
|-----------------------------|--|--|
| <b>Departamento:</b>        | Física Teórica                             |  |
| <b>Título:</b>              | Ondas gravitatorias y su detección.        |  |
| <b>Title:</b>               | Gravitational waves and their detection.   |  |
| <b>Supervisor/es:</b>       | Antonio Dobado                             |  |
| <b>E-mail supervisor/es</b> | dobado@fis.ucm.es                          |  |
| <b>Número de plazas:</b>    | 2  |  |
| <b>Asignación de TFG:</b>   | Selección directa <input type="checkbox"/> | Selección por expediente <input checked="" type="checkbox"/> |

### Objetivos:

Obtener una comprensión teórica de las ondas gravitatorias en el contexto de la relatividad general. Mecanismos de producción astrofísicos y cosmológicos así como de los sistemas que han permitido su descubrimiento y el estudio de sus propiedades. Potencial como herramienta de observación astrofísica.

### Metodología:

Revisión de la bibliografía existente y otros recursos de internet.

### Bibliografía:

C. W. Misner, K. S. Thorne and J. A. Wheeler, 1973, *Gravitation*, W.H. Freeman, San Francisco.

T. Padmanabhan, 2010, *Gravitation*, Cambridge University Press.

K.S. Thorne, Rev. Mod. Phys. 90 (2018) 4, 040503





# FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS

GRADO EN FÍSICA curso 2023-24



## Ficha de Trabajo de Fin de Grado

|                             |   |
|-----------------------------|---|
| <b>Departamento:</b>        | Física Teórica  |
| <b>Título:</b>              | Dispersión de partículas en mecánica cuántica   |
| <b>Title:</b>               | Scattering in quantum mechanics   |
| <b>Supervisor/es:</b>       | Clara María Peset Martín  |
| <b>E-mail supervisor/es</b> | cpeset@ucm.es   |
| <b>Número de plazas:</b>    | 1   |
| <b>Asignación de TFG:</b>   | Selección directa <input type="checkbox"/> Selección por expediente <input checked="" type="checkbox"/> |

### Objetivos:

La dispersión de partículas fundamentales es una parte básica del estudio de la fenomenología de partículas fundamentales. La relación entre la sección eficaz de dispersión y la matriz  $S$  (el teorema óptico) es la base de los experimentos de colisión de partículas tanto circulares (por ejemplo el LHC) como de objetivo fijo (como MAMI o NA64). Las partículas fundamentales son típicamente objetos relativistas, pero existen diversos escenarios en el que su comportamiento es no relativista, por ejemplo en estados ligados como los átomos simples o de Rydberg, o en la aniquilación de materia oscura en nuestro Universo. En este Trabajo de Fin de Grado se propone obtener un primer contacto con la física de partículas en su límite no relativista. Los objetivos del trabajo son

1. Analizar y comprender el concepto de sección eficaz clásico y cuántico.
2. Desarrollar la teoría de dispersión cuántica y obtener el teorema óptico.
3. Análisis en ondas parciales y la aproximación de Born.
4. Desarrollar la fórmula de Deser para el efecto de potenciales de corto alcance.
5. Aplicar los conocimientos adquiridos a sistemas físicos como pueden ser: la longitud de dispersión en la dispersión de protones o la formación de pionio en la dispersión de piones cerca del umbral.

**Metodología:**

El alumno se familiarizará con el problema a través de la lectura y estudio de libros y artículos científicos introductorios relacionados con los objetivos propuestos. El trabajo se desarrollará principalmente mediante cálculo analítico, combinando los resultados con el análisis numérico en la última parte. Se facilitará el acceso a la bibliografía más relevante.

**Bibliografía:**

- Landau, L. D.; Lifshitz, E. M. (2003). *Quantum Mechanics: Non-relativistic Theory*. Amsterdam: Butterworth-Heinemann.
- D. J. Griffiths, "Introduction to quantum mechanics", Cambridge University Press, 1995.
- J. J. Sakurai, J. Napolitano "Modern Quantum Mechanics." 2nd edition, Cambridge University Press, 2017
- S. Deser, M. L. Goldberger, K. Baumann and W. E. Thirring, "Energy level displacements in pi mesonic atoms," Phys. Rev. 96 (1954)