



# FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS



GRADO EN FÍSICA curso 2025-26

## Ficha de Trabajo de Fin de Grado

<b>Departamento:</b>	Física Teórica
<b>Título:</b>	Precisión en el efecto Lamb en muonio
<b>Title:</b>	Precision effects in muonium Lamb shift
<b>Tutor/es:</b>	Clara Peset Martín
<b>E-mail tutor/es:</b>	cpeset@ucm.es
<b>Número de plazas:</b>	1
<b>Asignación de TFG:</b>	Asignación directa

### 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 como el (estado ligado de electrón-antimuón). 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 de QED para electrones y muones.
2. Realizar la expansión no relativista del Lagrangiano y analizar las distintas interacciones.
3. Obtener la primera corrección al efecto Lamb.
4. Estudiar la bibliografía y obtener la predicción más precisa actual para el efecto Lamb en muonio.

**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).
- G. Janka, B. Ohayon and P. Crivelli, "Muonium Lamb shift: theory update and experimental prospects," EPJ Web Conf. 262 (2022), 01001



# FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS



GRADO EN FÍSICA curso 2025-26

## Ficha de Trabajo de Fin de Grado

<b>Departamento:</b>	Física Teórica
<b>Título:</b>	Formulación simpléctica de teorías de campos cuánticos
<b>Title:</b>	Symplectic Formulation of Quantum Field Theories
<b>Tutor/es:</b>	José Alberto Ruiz Cembranos
<b>E-mail tutor/es:</b>	cembra@ucm.es
<b>Número de plazas:</b>	2
<b>Asignación de TFG:</b>	Asignación directa

### Objetivos:

La formulación geométrica de la física, especialmente en el contexto del espacio de fases, ofrece herramientas profundas para reinterpretar los fundamentos de la teoría cuántica. En este trabajo se propone estudiar cómo la estructura simpléctica del espacio de fases puede utilizarse para describir la teoría cuántica de campos.

El objetivo principal es explorar una reformulación de la teoría cuántica de campos en términos de geometría de fases, con énfasis en la equivalencia formal entre coordenadas y momentos y en la representación de operadores cuánticos mediante funciones en espacio de fases. Se prestará especial atención al papel que juegan las simetrías gauge, la estructura de los conmutadores en álgebras de Lie y las representaciones no canónicas del grupo de Poincaré y sus extensiones.

Además, se analizarán posibles generalizaciones del formalismo que permitan una integración más natural de la gravitación en esta perspectiva, considerando la posibilidad de que la métrica del espaciotiempo emerja de una dinámica simpléctica subyacente. También se estudiará el papel de la función de Wigner, la transformación de Weyl y las deformaciones de Moyal en la construcción de un marco cuántico de espacio de fases para campos.

## Metodología:

Dentro de este proyecto, los alumnos trabajarán en la aplicación directa de los conceptos y técnicas impartidas en varias asignaturas obligatorias y de itinerario de grado asociadas a la física cuántica y la relatividad general. En este sentido, las asignaturas más relacionadas con el trabajo son las asignaturas optativas de cuarto: "Mecánica Teórica" y "Campos Cuánticos", mientras que también son recomendables las asignaturas de "Coherencia Óptica y Láser", "Relatividad General y Gravitación" y "Cosmología".

En particular, los estudiantes desarrollarán un trabajo fundamentalmente teórico sobre la formulación simpléctica de la mecánica cuántica. Para ello, establecerán y desarrollarán sus conceptos básicos utilizando como variables posiciones y momentos simultáneamente. Con tal objetivo, los alumnos leerán una serie de referencias cuyos resultados deberá reproducir, interpretar y desarrollar en distintos contextos. Dependiendo del estudiante, el trabajo se centrará en distintas formulaciones, como la de Wigner, la asociada al espacio de Segal–Bargmann, cuantización funcional, cuantización por deformación, etc.

## Bibliografía:

- [1] H. J. Groenewold, "On the Principles of elementary quantum mechanics", *Physica*, 12 (1946) pp. 405–460. doi:10.1016/S0031-8914(46)80059-4 (<https://doi.org/10.1016%2FS0031-8914%2846%2980059-4>).
- [2] J. E. Moyal, "Quantum mechanics as a statistical theory", *Proceedings of the Cambridge Philosophical Society*, 45 (1949) pp. 99–124. doi:10.1017/S0305004100000487 (<https://doi.org/10.1017%2FS0305004100000487>).
- [3] H. Weyl, "Quantenmechanik und Gruppentheorie", *Zeitschrift für Physik*, 46 (1927) pp. 1–46, doi:10.1007/BF02055756 (<https://doi.org/10.1007%2FBF02055756>).
- [4] E. P. Wigner, "On the quantum correction for thermodynamic equilibrium", *Phys. Rev.* 40 (June 1932) 749–759. doi:10.1103/PhysRev.40.749 (<https://doi.org/10.1103%2FPhysRev.40.749>).
- [5] Curtright, T. L.; Zachos, C. K. (2012). "Quantum Mechanics in Phase Space". *Asia Pacific Physics Newsletter*. 01: 37–46. arXiv:1104.5269.



# FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS

GRADO EN FÍSICA curso 2025-26



## Ficha de Trabajo de Fin de Grado

<b>Departamento:</b>	Física Teórica
<b>Título:</b>	Fibrados y Teoría de Yang-Mills
<b>Title:</b>	Fiber bundles and Yang-Mills theory
<b>Tutor/es:</b>	Manuel Mañas Baena
<b>E-mail tutor/es:</b>	mmanasba@ucm.es
<b>Número de plazas:</b>	1
<b>Asignación de TFG:</b>	Asignación directa

### Objetivos:

Se estudiarán los siguientes temas:

- Fibrados.
- Conexiones, curvatura.
- Clases de Chern, forma de Chern-Weil.
- Electromagnetismo.
- Ecuaciones de Maxwell.
- Teoría de Yang-Mills para  $U(1)$ . Efecto de Aharonov-Bohm.
- Teoría de Yang-Mills para  $SU(2)$ .
- Instantones y conexiones (anti)-auto-duales.

**Metodología:**

El estudiante leerá la bibliografía aportada por el tutor.

Completará una memoria con los conceptos comprendidos, con una redacción propia.

Se mantendrán reuniones periódicas con el tutor donde el estudiante muestre los avances realizados.

**Bibliografía:**

Posible bibliografía:

Kobayashi, S., & Nomizu, K. – Foundations of Differential Geometry, Vol. 1 y 2.

Bleecker, D. – Gauge Theory and Variational Principles.

Nakahara, M. – Geometry, Topology and Physics.

Bott, R., & Tu, L. W. – Differential Forms in Algebraic Topology.

Jackson, J. D. – Classical Electrodynamics.

Frankel, T. – The Geometry of Physics.

Baez, J. C., & Muniain, J. P. – Gauge Fields, Knots and Gravity.

Ryder, L. H. – Quantum Field Theory.

Donaldson, S. K., & Kronheimer, P. B. – The Geometry of Four-Manifolds.

Freed, D. S., & Uhlenbeck, K. K. – Instantons and Four-Manifolds.



# FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS

GRADO EN FÍSICA curso 2025-26



## Ficha de Trabajo de Fin de Grado

<b>Departamento:</b>	Física Teórica
<b>Título:</b>	Interacciones fundamentales en espacio de fases
<b>Title:</b>	Fundamental Interactions in Phase Space
<b>Tutor/es:</b>	José Alberto Ruiz Cembranos
<b>E-mail tutor/es:</b>	cembra@ucm.es
<b>Número de plazas:</b>	2
<b>Asignación de TFG:</b>	Asignación directa

### Objetivos:

El espacio de fases ofrece un marco conceptual y matemático especialmente potente para describir la física clásica, donde posiciones y momentos se tratan en pie de igualdad. Este formalismo, sin embargo, ha tenido una incorporación más lenta en los desarrollos modernos de la física cuántica y, en particular, en la formulación de la teoría cuántica de campos.

En este trabajo se propone abordar el estudio de las interacciones fundamentales del Modelo Estándar, así como de la gravitación, dentro del formalismo de espacio de fases. La motivación es doble: por un lado, explorar cómo las estructuras simplécticas permiten una reformulación alternativa de la teoría cuántica con potenciales ventajas computacionales y conceptuales; por otro, estudiar las implicaciones que dicha formulación pueda tener para una eventual unificación entre la gravitación cuántica y las demás interacciones fundamentales.

La idea central será revisar el desarrollo histórico de la mecánica cuántica en espacio de fases, desde la transformación de Weyl y la función de Wigner hasta las formulaciones de Groenewold y Moyal, y extender estos métodos al contexto de campos cuánticos. En particular, se analizará cómo puede implementarse el tratamiento de campos bosónicos y fermiónicos en esta formulación, y cómo se incorporan las simetrías gauge que caracterizan al Modelo Estándar. En el caso de la gravitación, se explorarán enfoques que interpretan la geometría del espaciotiempo como una manifestación emergente de una dinámica fundamental en espacio de fases.

Este enfoque no solo busca profundizar en el marco teórico de la física fundamental desde una perspectiva menos convencional, sino también abrir nuevas líneas de análisis sobre la naturaleza de la cuantización, las simetrías y la geometría en la teoría de campos moderna.

## Metodología:

Dentro de este proyecto, los alumnos trabajarán en la aplicación directa de los conceptos y técnicas impartidas en varias asignaturas obligatorias y de itinerario de grado asociadas a la física cuántica y la relatividad general. En este sentido, las asignaturas más relacionadas con el trabajo son las asignaturas optativas de cuarto: "Mecánica Teórica" y "Campos Cuánticos", mientras que también son recomendables las asignaturas de "Coherencia Óptica y Láser", "Relatividad General y Gravitación" y "Cosmología".

En particular, los estudiantes desarrollarán un trabajo fundamentalmente teórico sobre la formulación simpléctica de la mecánica cuántica. Para ello, establecerán y desarrollarán sus conceptos básicos utilizando como variables posiciones y momentos simultáneamente. Con tal objetivo, los alumnos leerán una serie de referencias cuyos resultados deberá reproducir, interpretar y desarrollar en distintos contextos. Dependiendo del estudiante, el trabajo se centrará en distintas interacciones (electrodinámica cuántica, interacción débil, cromodinámica cuántica y gravitación).

## Bibliografía:

- [1] H. J. Groenewold, "On the Principles of elementary quantum mechanics", *Physica*, 12 (1946) pp. 405–460. doi:10.1016/S0031-8914(46)80059-4 (<https://doi.org/10.1016%2FS0031-8914%2846%2980059-4>).
- [2] J. E. Moyal, "Quantum mechanics as a statistical theory", *Proceedings of the Cambridge Philosophical Society*, 45 (1949) pp. 99–124. doi:10.1017/S0305004100000487 (<https://doi.org/10.1017%2FS0305004100000487>).
- [3] H. Weyl, "Quantenmechanik und Gruppentheorie", *Zeitschrift für Physik*, 46 (1927) pp. 1–46, doi:10.1007/BF02055756 (<https://doi.org/10.1007%2FBF02055756>).
- [4] E. P. Wigner, "On the quantum correction for thermodynamic equilibrium", *Phys. Rev.* 40 (June 1932) 749–759. doi:10.1103/PhysRev.40.749 (<https://doi.org/10.1103%2FPhysRev.40.749>).
- [5] Curtright, T. L.; Zachos, C. K. (2012). "Quantum Mechanics in Phase Space". *Asia Pacific Physics Newsletter*. 01: 37–46. arXiv:1104.5269.



# FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS



GRADO EN FÍSICA curso 2025-26

## Ficha de Trabajo de Fin de Grado

<b>Departamento:</b>	Física Teórica
<b>Título:</b>	Teorema de Stokes no abeliano
<b>Title:</b>	Non - Abelian Stokes' Theorem
<b>Tutor/es:</b>	Alexey Vladimirov
<b>E-mail tutor/es:</b>	alexeyvl@ucm.es
<b>Número de plazas:</b>	1
<b>Asignación de TFG:</b>	Asignación directa

### Objetivos:

El teorema de Stokes no abeliano es una generalización del teorema de Stokes clásico, pero aplicada en el contexto de la teoría de gauge no abeliana, como la que se usa en física teórica para describir interacciones fundamentales (por ejemplo, en la cromodinámica cuántica). El teorema de Stokes no abeliano busca expresar un Wilson loop (una traza de la integral de línea de una conexión no abeliana) como una integral de superficie que involucra la curvatura del campo. En este TFG aprendes los elementos de la geometría non-conmutativa y propiedades de Wilson lines y Wilson loops

**Metodología:**

El objetivo principal de este estudio es analizar las propiedades de las integrales con ordenamiento de camino en el contexto de objetos no conmutativos, así como establecer las reglas operativas asociadas a dichas integrales. Posteriormente, se aplican estos conceptos a sistemas físicos relevantes, como el núcleo de Collins-Soper y el potencial entre quarks estáticos, con el fin de determinar sus propiedades globales. La metodología empleada se basa en herramientas de álgebra no conmutativa, teoría de gauge y cromodinámica cuántica.

**Bibliografía:**

[1] B.Farb, R.K.Dennis, ``Noncommutative Algebra'', Graduate texts in Mathematics v.144

[2] Peskin, Schroeder, ``An Introduction to quantum field theory'', Addison-Wesley , ISBN: 9780201503975



# FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS

GRADO EN FÍSICA curso 2025-26



## Ficha de Trabajo de Fin de Grado

<b>Departamento:</b>	Física Teórica
<b>Título:</b>	Reglas de suma de QCD en desintegraciones de taus
<b>Title:</b>	QCD sum rules in tau decays
<b>Tutor/es:</b>	Juan José Sanz Cillero
<b>E-mail tutor/es:</b>	jjsanzcillero@ucm.es
<b>Número de plazas:</b>	1
<b>Asignación de TFG:</b>	Asignación directa

### Objetivos:

Este Trabajo de Fin de Grado tiene como objetivo principal el estudio teórico del ancho hadrónico total del leptón tau, utilizando herramientas fundamentales de la teoría cuántica de campos como la analiticidad de las amplitudes y QCD perturbativo con una expansión en productos de operadores (OPE).

Se pretende realizar un estudio del tratamiento teórico de este observable, incorporando correcciones perturbativas y no perturbativas, con el fin de observar el nivel de precisión alcanzable.

A partir de las fracciones de desintegración medidas experimentalmente, se buscará determinar la constante de acoplamiento de la cromodinámica cuántica (QCD) a la escala de masa del tau.

**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.
- Se tendrán reuniones presenciales periódicas entre el tutor y el alumno para la discusión y resolución de dudas.

**Bibliografía:**

- \* "QCD analysis of the tau hadronic width", E. Braaten, Stephan Narison, A. Pich, Nucl.Phys.B 373 (1992) 581-612.
- \* "The Physics of Hadronic Tau Decays", Michel Davier, Andreas Hocker, Zhiqing Zhang, Rev.Mod.Phys. 78 (2006) 1043-1109 ; hep-ph/0507078 [hep-ph].
- \* "Determination of the QCD coupling from ALEPH tau decay data", Antonio Pich, Antonio Rodríguez-Sánchez, Phys.Rev.D 94 (2016) 3, 034027 ; 1605.06830 [hep-ph].
- \* "Strong coupling from the revised ALEPH data for hadronic tau decays", Diogo Boito, Maarten Golterman, Kim Maltman, James Osborne, Santiago Peris, Phys.Rev.D 91 (2015) 3, 034003 ; 1410.3528 [hep-ph].



# FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS

GRADO EN FÍSICA curso 2025-26



## Ficha de Trabajo de Fin de Grado

<b>Departamento:</b>	Física Teórica
<b>Título:</b>	La física del quarkonio pesado
<b>Title:</b>	Heavy quarkonium physics
<b>Tutor/es:</b>	Clara Peset Martín
<b>E-mail tutor/es:</b>	cpeset@ucm.es
<b>Número de plazas:</b>	1
<b>Asignación de TFG:</b>	Asignación directa

### Objetivos:

- Estudiar y entender las limitaciones de la cromodinámica cuántica.
- Estudiar el concepto de teoría efectiva de campos cuánticos. Entender cómo en el contexto de estados ligados de quarks pesados se puede superar el límite no perturbativo.
- Aplicar el conocimiento de las teorías efectivas al problema de producción de quarks pesados.
- Contrastar con datos experimentales del LHC.

**Metodología:**

Usar técnicas modernas de teoría cuántica de campos, es decir, teorías efectivas para estudiar el límite no relativista de la ecuación de Dirac para cromodinámica cuántica. A partir de ahí desarrollar una teoría en términos de potenciales que permita desarrollar cálculos teóricos para quarkonio pesado. Estos cálculos se hacen generalmente de manera coordinada entre analíticamente y usando programas específicos para ellos.

**Bibliografía:**

- Quarks and Leptons: An Introductory Course in Modern Particle Physics

Francis Halzen, Alan D. Martin, ISBN: 978-0-471-88741-6

- An introduction to quantum field theory, M. Peskin, D. Schroeder, ISBN 0-201-50397-2

- Review of Heavy Quarkonium at weak coupling, Antonio Pineda, Prog.Part.Nucl.Phys. 67 (2012) 735-785

- The charm/bottom quark mass from heavy quarkonium at N<sup>3</sup>LO, Clara Peset, Antonio Pineda, Jorge Segovia, JHEP 09 (2018) 167



# FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS

GRADO EN FÍSICA curso 2025-26



## Ficha de Trabajo de Fin de Grado

<b>Departamento:</b>	Física Teórica
<b>Título:</b>	Determinación de funciones de fragmentación colineales a orden árbol usando el código abierto xFitter
<b>Title:</b>	Determination of collinear fragmentation functions at LO using the open source code xFitter
<b>Tutor/es:</b>	María Pía Zurita Silvestro
<b>E-mail tutor/es:</b>	marzurit@ucm.es
<b>Número de plazas:</b>	3
<b>Asignación de TFG:</b>	Asignación directa

### Objetivos:

- Familiarizarse con las bases de datos de experimentos de altas energías.
- Calcular, usando códigos abiertos, observables de relevancia para el estudio de funciones de fragmentación.
- Determinar funciones de fragmentación de vacío de distintas partículas al orden más bajo en el desarrollo perturbativo.

**Metodología:**

Los alumnos/las alumnas se familiarizarán con el problema a través de la lectura y estudio de artículos científicos relacionados con los objetivos propuestos. Para ello se les facilitará el acceso a la bibliografía relevante. El trabajo incluirá el uso de software específico y el análisis de los resultados.

Opción 1: el/la alumno/a trabajará con datos de altas y bajas energías de producción de hadrones livianos cargados.

Opción 2: el/la alumno/a trabajará con datos de altas y bajas energías de producción de mesones pesados.

Opción 3: el/la alumno/a trabajará con datos de altas y bajas energías de producción de mesones J/Psi.

**Bibliografía:**

- D. de Florian, R. Sassot, M. Stratmann, "Global analysis of fragmentation functions for pions and kaons and their uncertainties", Phys.Rev.D 75 (2007) 114010.

- P. Zurita, "Medium modified Fragmentation Functions with open source xFiGer", e-Print: 2101.01088 [hep-ph].

- I. Helenius, M. Walt, W. Vogelsang, "NNLO nuclear parton distribution functions with electroweak-boson production data from the LHC", Published in: Phys.Rev.D 105 (2022) 9, 9. - O. Zenaiev, "xFiGer project", PoS DIS2016 (2016) 033.

- V. Bertone et al. "xFiGer 2.0.0: An Open Source QCD Fit Framework", PoS DIS2017 (2018) 203.

- xFiGer Collaborations: <https://www.xfiGer.org/>



# FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS



GRADO EN FÍSICA curso 2025-26

## Ficha de Trabajo de Fin de Grado

<b>Departamento:</b>	Física Teórica
<b>Título:</b>	Ondas en el agua
<b>Title:</b>	Water Waves
<b>Tutor/es:</b>	Manuel Mañas Baena
<b>E-mail tutor/es:</b>	mmanasba@ucm.es
<b>Número de plazas:</b>	2
<b>Asignación de TFG:</b>	Asignación directa

### Objetivos:

Entender los principios físicos y técnicas matemáticas para la descripción y análisis de las ondas en el agua.

El estudiante optará entre alguna de las siguientes alternativas:

1. Aguas someras, KdV y tsunamis.
2. Aguas profundas, NLS y rogue waves.
3. Fibras ópticas y NLS.

**Metodología:**

Para las ecuaciones de Euler para un fluido ideal irrotacional se considera un problema de frontera libre para la ola en el agua. Aplicando técnicas de escalas múltiples se deriva la ecuación de Korteweg-de Vries para ondas longitudinales en aguas someras, y la ecuación de Kadomtsev-Petviashvili para el caso en que se permita una transversalidad débil. Estudio del caso de aguas profundas y la ecuación de Schrödinger no lineal.

La metodología es el estudio de temas seleccionada de la bibliografía y búsqueda bibliográfica adicional.

**Bibliografía:**

Mark J. Ablowitz, *Nonlinear Dispersive Waves*. Cambridge University Press (2011).

R. S. Johnson, *A Modern Introduction to the Mathematical Theory of Water Waves*, Cambridge University Press (1997).

G. K. Batchelor, *An Introduction to Fluid Dynamics*, Cambridge University Press (2007).

Sir Horace Lamb, *Hydrodynamics*, Dover (1945).



# FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS

GRADO EN FÍSICA curso 2025-26



## Ficha de Trabajo de Fin de Grado

<b>Departamento:</b>	Física Teórica
<b>Título:</b>	Ondas gravitatorias, su detección y fuentes astrofísicas.
<b>Title:</b>	Gravitational waves, their detection and astrophysical sources.
<b>Tutor/es:</b>	Antonio Dobado González
<b>E-mail tutor/es:</b>	dobado@fis.ucm.es
<b>Número de plazas:</b>	3
<b>Asignación de TFG:</b>	Asignación por expediente

### 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.

Las posibles opciones de trabajo serían por tanto:

Estudio de las ondas gravitatorias en relatividad Relatividad General.

Mecanismos astrofísicos y cosmológicos de producción.

Detectores presentes y futuros de ondas gravitatorias y sus aplicaciones.

**Metodología:**

Revisión de la bibliografía existente y otros recursos de internet.

El trabajo puede enfocarse desde el punto de vista teórico o desde el punto de vista de detección de ondas gravitacionales.

**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.

M. Maggiore, 2008, *Gravitational Waves*, volume 1. Oxford University Press.