FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS

GRADO EN FÍSICA curso 2026-27

Ficha de Trabajo de Fin de Grado

Departamento:	Física Teórica
Título:	Propiedades de los diagramas de Feynman desde la teoría de grafos
Title:	Properties of Feynman diagrams from the graph theory
Tutor/es:	Alexey Vladimirov
E-mail tutor/es:	alexeyvl@ucm.es
Número de plazas:	1
Asignación de TFG:	Asignación directa

Objetivos:

Los diagramas de Feynman representan las correcciones cuánticas en la teoría cuántica de campos. Las expresiones asociadas a estos diagramas son integrales con una estructura particular que emana de la representación de grafos del proceso. Parte de las estructuras y propiedades de las loop integrales pueden ser extraídas mediante la teoría de grafos. Este trabajo está dedicado a la derivación de las relaciones entre los grafos y las loop integrales y investigacion de las relaciones entre grafos duales (uniquiness relation).

Metodología:

El método principal del proyecto consiste en la representación de cualquier diagrama de Feynman en términos de polinomios de grafos (específicamente, los polinomios de Symanzik y Kirchhoff). Estos polinomios vinculan la topología del grafo con la integral resultante. Por tanto, empleando métodos elementales de la teoría de grafos (como el corte o la reducción de aristas/edges), es posible obtener las propiedades principales de las integrales. Aunque la mayor parte del trabajo es puramente teórica, es recomendable tener conocimientos en algún programa de álgebra simbólica para simplificar los cálculos complejos.

Bibliografía:

[1] Peskin, Schroeder, ``An Introduction to quantum field theory'', Addison-Wesley , ISBN: 9780201503975
[2] S.Weinzierl, "Feynman Graphs", arxiv: 1301.6918
[3] V.Smirnov, "Analytic Tools for Feynman Integrals", ISBN:9783642348853

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS

GRADO EN FÍSICA curso 2026-27

Ficha de Trabajo de Fin de Grado

Departamento:	Física Teórica
Título:	Propagadores del quark y del gluón en un QCD campo de fondo
Title:	Quark and gluon propagators in the QCD background field
Tutor/es:	Alexey Vladimirov
E-mail tutor/es:	alexeyvl@ucm.es
Número de plazas:	1
Asignación de TFG:	Asignación directa

Objetivos:

Los propagadores físicos del gluón o del quark incorporan las interacciones de estas partículas con el medio (vacío de QCD). El objetivo de este trabajo es considerar dichos propagadores en el escenario de un campo de fondo (background field) más general y evaluar sus primeras correcciones. Es fundamental tener en cuenta la simetría gauge y demostrar la restauración de dicha simetría en el resultado final.

Metodología:

Este trabajo se divide en dos partes. La primera parte está dedicada al estudio del método de la integral funcional en la teoría cuántica de campos; particularmente, se abordará su formulación, el cálculo de las integrales funcionales más elementales y la generación de diagramas de Feynman. La segunda parte se centra en la derivación de un propagador (función de Green de dos puntos) mediante el formalismo de la integral funcional para QCD en presencia de un campo de fondo externo.

Bibliografía:

[1] Peskin, Schroeder, ``An Introduction to quantum field theory'', Addison-Wesley , ISBN: 9780201503975
[2] I.Balitski, V.Braun, "QCD evolution for string operators" Nucl.Phys.B 311 (1989) 541-584
[3] J Zinn-Justin "Quantum Field Theory and Critical Phenomena", ISBN-13: 978-0198518730

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS

GRADO EN FÍSICA curso 2026-27

Ficha de Trabajo de Fin de Grado

Departamento:	Física Teórica
Título:	La producción y aniquilación de quarkonio en NRQCD
Title:	Quarkonium production and annihilation in NRQCD
Tutor/es:	Clara Peset
E-mail tutor/es:	cpeset@ucm.es
Número de plazas:	1
Asignación de TFG:	Asignación directa

Objetivos:

- Estudiar, entender y desarrollar la teoría de campos efectiva no relativista para QCD: separación de escalas, grados de libertad, simetrías a bajas energías y matching.
- Describir procesos de producción y aniquilación inclusivos en los que interviene un estado de quarkonio pesado
- Comparar la predicción teórica de QCD con medidas experimentales de experimentos como LHCb o Belle II.

En su caso, comparar también con los datos simulados en retículo si están disponibles.

Metodología:

Las teorías de campo efectivas no relativistas son técnicas modernas que nos permiten estudiar el límite no relativista de la ecuación de Dirac para cromodinámica cuántica.
A partir de ahí se desarrollarán cálculos de observables relacionados con la producción y la aniquilación de quarkonio pesado.
Éstos cálculos y la comparación con datos experimentales, generalmente se llevan a cabo de manera híbrida entre métodos analíticos y usando programas específicos para ellos.

Bibliografía:

- An introduction to quantum field theory, M. Peskin, D. Schroeder, ISBN 0-201-50397-2
- "Introduction to Effective Field Theories", A. Manohar, Les Houches Lect.Notes 108 (2020)
- "Rigorous QCD Analysis of Inclusive Annihilation and Production of Heavy Quarkonium", G. Bodwin, E. Braaten, P. Lepage, Phys.Rev.D 51 (1995) 1125-1171

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS

GRADO EN FÍSICA curso 2026-27

Ficha de Trabajo de Fin de Grado

Departamento:	Física Teórica
Título:	Reglas de suma de QCD en desintegraciones de taus
Title:	QCD sum rules in tau decays
Tutor/es:	Juan José Sanz CIllero
E-mail tutor/es:	jjsanzcillero@ucm.es
Número de plazas:	2
Asignación de TFG:	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.

Acorde a esto se plantean dos posibles orientaciones del Trabajo de Fin de Grado:

1) Estudio de la anchura total integrada de desintegración hadrónica del leptón tau para la extracción de la constante de acoplamiento fuerte.

2) Estudio de la distribución espectral de la anchura hadrónica del leptón tau y extracción de condensados de la OPE mediante reglas de suma pesadas con pesos adecuados.

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].

* "QCD and Resonance Physics. Theoretical Foundations", Mikhail A. Shifman, A.I. Vainshtein, Valentin I. Zakharov, Nucl.Phys.B 147 (1979) 385-447.

* "QCD and Resonance Physics. Applications", Mikhail A. Shifman, A.I. Vainshtein, Valentin I. Zakharov, Nucl.Phys.B 147 (1979) 448-518.

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS

GRADO EN FÍSICA curso 2026-27

Ficha de Trabajo de Fin de Grado

Departamento:	Física Teórica
Título:	Extracción de funciones de fragmentación de hadrones cargados
Title:	Extraction of charged hadron fragmentation functions
Tutor/es:	María Pía Zurita Silvestro
E-mail tutor/es:	marzurit@ucm.es
Número de plazas:	1
Asignación de TFG:	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 hadrones cargados.

Metodología:

El alumno/a se familiarizará con el problema a través de la lectura y estudio de artículos científicos relacionados con los objetivos propuestos. Para ello se le facilitará el acceso a la bibliografía relevante. El trabajo incluirá el uso de software específico y el análisis de los resultados.

Bibliografía:

- D. de Florian, R. Sassot, M. Stratmann, "Global analysis of fragmentation functions for pions and kaons and their uncertainies", Phys.Rev.D 75 (2007) 114010.
- P. Zurita, "Medium modified Fragmentation Functions with open source xFitter", e-Print: 2101.01088 [hep-ph].
- O. Zenaiev, "xFitter project", PoS DIS2016 (2016) 033.
- V. Bertone et al. "xFitter 2.0.0: An Open Source QCD Fit Framework", PoS DIS2017 (2018) 203.
- xFitter Collaboration: https://www.xfitter.org/

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS

GRADO EN FÍSICA curso 2026-27

Ficha de Trabajo de Fin de Grado

Departamento:	Física Teórica
Título:	Funciones de distribuciones partónicas en el fotón
Title:	Photon parton distribution functions
Tutor/es:	María Pía Zurita Silvestro
E-mail tutor/es:	marzurit@ucm.es
Número de plazas:	1
Asignación de TFG:	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 distribución partónicas.

- Determinar funciones de distribución partónicas colineales en el fotón utilizando datos de colisiones fotón-fotón medidas en experimentos de altas energías.

Metodología:

El alumno/a se familiarizará con el problema a través de la lectura y estudio de artículos científicos relacionados con los objetivos propuestos. Para ello se le facilitará el acceso a la bibliografía relevante. El trabajo incluirá el uso de software específico y el análisis de los resultados.

Bibliografía:

- S. Soldner-Rembold, "Photon structure at LEP", hep-ex/9709020 [hep-ex]
- P. Zurita, "Medium modified Fragmentation Functions with open source xFitter", e-Print: 2101.01088 [hep-ph].
- O. Zenaiev, "xFitter project", PoS DIS2016 (2016) 033.
- V. Bertone et al. "xFitter 2.0.0: An Open Source QCD Fit Framework", PoS DIS2017 (2018) 203.
- xFitter Collaboration: https://www.xfitter.org/

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS

GRADO EN FÍSICA curso 2026-27

Ficha de Trabajo de Fin de Grado

Departamento:	Física Teórica
Título:	Impulso transverso en colisiones fotón-fotón y TMD FFs
Title:	Transverse momentum in photon-photon collisions and TMD FFs
Tutor/es:	María Pía Zurita Silvestro
E-mail tutor/es:	marzurit@ucm.es
Número de plazas:	1
Asignación de TFG:	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 dependientes de impulso transverso.

- Estudiar la posibilidad de utilizar datos dependientes del impulso transverso provenientes de colisiones fotón-fotón en la determinación de funciones de fragmentación dependientes del impulso transverso.

Metodología:

El alumno/a se familiarizará con el problema a través de la lectura y estudio de artículos científicos relacionados con los objetivos propuestos. Para ello se le facilitará el acceso a la bibliografía relevante. El trabajo incluirá el uso de software específico y el análisis de los resultados.

Bibliografía:

- S. Soldner-Rembold, "Photon structure at LEP", hep-ex/9709020 [hep-ex]
- P. Zurita, "Medium modified Fragmentation Functions with open source xFitter", e-Print: 2101.01088 [hep-ph].
- xFitter Collaboration: https://www.xfitter.org/
- V. Moos, I. Scimemi, A. Vladimirov, P. Zurita, "Determination of unpolarized TMD distributions from the fit of Drell-Yan and SIDIS data at N4LL", JHEP 11 (2025) 134

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS

GRADO EN FÍSICA curso 2026-27

Ficha de Trabajo de Fin de Grado

Departamento:	Física Teórica
Título:	Método de campos de fondos y factorización en difusión inelastica profunda
Title:	Background field methos and factorization in deep intelastic scattering
Tutor/es:	Ignazio Scimemi
E-mail tutor/es:	ignazios@ucm.es
Número de plazas:	1
Asignación de TFG:	Asignación directa

Objetivos:

Los teoremas de factorización están en la base de la computación de secciones eficaces hadrónicas en los colisionadores de partículas. Gracias a estos teoremas se puede escribir las secciones eficaces como producto o convoluciones de distribuciones fundamentales. El objetivo es familiarizar el estudiante con los conceptos de cromodinámica cuántica a través de su aplicación a procesos interesantes para los colisionadores modernos.

Metodología:

A partir de las nociones adquiridas en teorías de campos se estudiará la QCD y los conceptos fundamentales de la renormalización a través de libros de texto. La parte de métodos de campos de fondo se estudiará a partir de artículos originales, que se intentará reproducir.

Bibliografía:

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

An Introduction to Quantum Field Theory Sterman, George, Cambridge University Press 1993; ISBN-10 : 0521311322, ISBN-13 : 978-0521311328.

"Soft backgrounds fields ..", M. Jaarsma et al. *JHEP* 11 (2025) 014

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS

GRADO EN FÍSICA curso 2026-27

Ficha de Trabajo de Fin de Grado

Departamento:	Física Teórica
Título:	Distribuciones partonicas
Title:	Parton distributions
Tutor/es:	Ignazio Scimemi
E-mail tutor/es:	ignazios@ucm.es
Número de plazas:	1
Asignación de TFG:	Asignación directa

Objetivos:

Familiarizarse con conceptos básicos de las funciones partónicas y sus propiedades (evolución con las escalas, dependencia del sabor,extracción)

Metodología:

A partir de cálculos de perturbativos se pueden definir varias distribuciones partónicas. Los cálculos a un bucle permiten evidenciar las propiedades del grupo de renormalización de estas distribuciones. A través de estudios en la literatura se pueden distinguir entre varios tipos de distribuciones para los estados inicial (PDF y TMDPDF) y final (funciones de fragmentacion (FF) y TMDFF).

Bibliografía:

An Introduction to Quantum Field Theory Sterman, George, Cambridge University Press 1993; ISBN-10 : 0521311322, ISBN-13 : 978-0521311328.

Foundations of perturbative QCD, John Collins, *Camb.Monogr.Part.Phys.Nucl.Phys.Cosmol.* 32 (2011) 1-624

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS

GRADO EN FÍSICA curso 2026-27

Ficha de Trabajo de Fin de Grado

Departamento:	Física Teórica
Título:	Estudio de la dispersión mesón-mesón y de las propiedades y naturaleza de las resonancias hadrónicas más ligeras
Title:	Study of meson-meson scattering and of the properties and nature of the lightest hadronic resonances
Tutor/es:	Jacobo Ruiz de Elvira
E-mail tutor/es:	jacobore@ucm.es
Número de plazas:	2
Asignación de TFG:	Asignación directa

Objetivos:

Aunque la Cromodinámica Cuántica (QCD) está firmemente establecida como la teoría que describe las interacciones fuertes, el espectro hadrónico continúa siendo un tema de interés y debate. Desde un punto de vista teórico, esta dificultad se debe a que QCD es una teoría no perturbativa a la escala de energía hadrónica, lo que impide obtener predicciones precisas mediante métodos perturbativos convencionales. Por ello, el estudio del espectro hadrónico requiere el uso de herramientas teóricas alternativas, como las teorías efectivas y los métodos dispersivos.

El objetivo de este trabajo es, en primer lugar, profundizar en los conceptos fundamentales de la teoría cuántica de campos y de la física de partículas, así como introducir las herramientas teóricas necesarias para el estudio de las interacciones entre hadrones. En segundo lugar, estas herramientas se aplicarán al análisis de diversos procesos de dispersión mesón-mesón y al estudio de las propiedades y naturaleza de las resonancias hadrónicas generadas en dichas interacciones.

Metodología:

El enfoque del trabajo será teórico-práctico. En una primera fase, se celebrarán reuniones periódicas en las que se introducirán los conceptos fundamentales y se orientará a los estudiantes mediante la recomendación de bibliografía relevante. En una segunda fase, se abordará el estudio del estado del arte a través de la lectura crítica de artículos científicos. Asimismo, se propondrán diversos problemas y cálculos con el objetivo de afianzar y consolidar los conocimientos adquiridos. Finalmente, y dependiendo del perfil e intereses del estudiante, el trabajo se centrará en el análisis de un determinado proceso hadrónico mesón-mesón y en el estudio de las resonancias que se generan en dicho proceso.

Bibliografía:

- M. E. Peskin and D. V. Schroeder, “An Introduction to quantum field theory”, Avalon Publishing, 1995.

- F. Halzen, and A. Martin, "Quarks & Leptons: An introductory course in modern particle physics", John Wiley & Sons, (1984).

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

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS

GRADO EN FÍSICA curso 2026-27

Ficha de Trabajo de Fin de Grado

Departamento:	Física Teórica
Título:	Física subatómica con transformadas integrales en colisiones binarias
Title:	Subatomic physics with integral transforms in binary neutron star collisions
Tutor/es:	Felipe J. Llanes Estrada
E-mail tutor/es:	fllanes@fis.ucm.es
Número de plazas:	2
Asignación de TFG:	Asignación directa

Objetivos:

1) Comprender las transformadas integrales más frecuentes en el análisis de señales dadas por series temporales, incluyendo las transformadas de Fourier (para el análisis de frecuencias), de Laplace (para el análisis de transitorios), de Hilbert (para la frecuencia y fase instantáneas), de Mellin (para las propiedades de escala), etc. Ser finalmente capaz de extraer características básicas de una serie de datos mediante estas y otras transformadas similares.

2) Comprender el efecto de varios fenómenos de física microscópica, como pueden ser la ecuación de estado de las estrellas de neutrones, los fenómenos de transporte, o los cambios de fase de materia nuclear a materia de física de partículas en las propiedades cuasiestáticas macroscópicas de una estrella de neutrones. Comprender también su efecto en los trenes de ondas gravitacionales que puedan surgir en los observatorios de tercera generación.

3) Demostrar competencia en cálculo numérico, manejo de herramientas básicas de inteligencia artificial para acelerar la escritura de programas adecuados. Dominio de las asignaturas relevantes del grado y las competencias transversales propias del trabajo de fin de grado.

Metodología:

Los alumnos(as) estudiarán la teoría básica de las transformadas integrales y las aplicarán a casos de libro de texto para entender su funcionamiento.
A continuación estudiarán programas estándar, y emplearán asistentes de programación basados en inteligencia artificial gratuitos y disponibles en la web, para acelerar el desarrollo de programas que calculen dichas transformadas integrales. Adecuarán los programas entendiendo su funcionamiento línea a línea y efectuando los cambios necesarios.
Al ofrecerse tres plazas, podrán tratar distintas transformadas integrales en cada uno de los trabajos.

Una vez tengan algún software funcional, practicarán introduciendo series de datos de detecciones reales de ondas gravitacionales de los observatorios Advanced Ligo, Virgo, etc. de segunda generación que están funcionando actualmente, y que los ofrecen en red, https://www.gw-openscience.org/

En paralelo, estudiarán el efecto que las distintas suposiciones sobre la materia nuclear que compone las estrellas de neutrones tiene sobre los trenes de ondas gravitacionales en la fase final de la colisión, que aún no ha sido detectada pero que se espera lo sea en los detectores de tercera generación.

La memoria del trabajo estará escrita en registro académico libre de faltas gramaticales o de ortografía.
Asignaturas (orientativamente) más relevantes: Métodos Matemáticos II, Física Nuclear, Física de Partículas, Relatividad General, Estadística y Tratamiento de Datos, Física Computacional.

Bibliografía:

1) F. Halzen y A. Martin, "Quarks and leptons: introductory course in modern particle physics", Wiley 1991 (para comprender aspectos básicos de la física de partículas).
2) E. Johnston, N. Harrigan y M. Gimeno-Segovia, "Programming Quantum Computers: Essential Algorithms and Code Samples", O'Reilly Media 2019.
3) Felipe J. Llanes-Estrada y Eva Lope-Oter, "Hadron matter in neutron stars in view of gravitational wave observations", Prog.Part.Nucl.Phys. 109 (2019) 103715.
4) Juan J. Gálvez Viruet y Felipe J. Llanes Estrada, "Dynamical implementation of canonical second quantization on a quantum computer", Phys.Rev.D 110 (2024) 11, 116018
5) The Elements of Style, de William Strunk JR. y E.B. White, (guía para escribir de manera clara y concisa un trabajo universitario).
6) J. Hartle, Gravity: An Introduction to Einstein's General Relativity. Cambridge University Press, 2021.
7) Trabajos de fin de grado anteriores como ejemplo (curso 2024-25) y en general material UCM proporcionado por los tutores.
8) Peter Ring, Peter Schück, The Nuclear Many Body Problem, Springer-Verlag New York-Heidelberg-Berlin, 1980.

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS

GRADO EN FÍSICA curso 2026-27

Ficha de Trabajo de Fin de Grado

Departamento:	Física Teórica
Título:	Neutrinos: Oscilaciones, masas, naturaleza y violación de CP
Title:	Neutrinos: Oscillations, masses, nature and CP violation
Tutor/es:	Antonio Dobado González
E-mail tutor/es:	dobado@fis.ucm.es
Número de plazas:	3
Asignación de TFG:	Asignación por expediente

Objetivos:

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

Es muy recomendable que los alumnos interesados en este TFG cursen también las asignaturas de Campos Cuánticos y Partículas Elementales.

Metodología:

Revisión de la bibliografía existente y otros recursos de internet.

El TFG puede enfocarse en una de las cuatro características de los neutrinos mencionadas en el título.

Bibliografía:

Lect.Notes Phys. 629 (2004) 169-21441st Internationale Universitaetswochen fur Theoretische Physik (International University School of Theoretical Physics): Flavor Physics (IUTP 41), 169-21, e-Print: hep-ph/0307149 [hep-ph]

Neutrino Masses from the Point of View of Economy and Simplicity
S. Bilenky.
https://arxiv.org/abs/1907.01472

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS

GRADO EN FÍSICA curso 2026-27

Ficha de Trabajo de Fin de Grado

Departamento:	Física Teórica
Título:	Cotas de física atómica para sectores oscuros
Title:	Atomic bounds on dark sectors
Tutor/es:	Clara Peset Martín
E-mail tutor/es:	cpeset@ucm.es
Número de plazas:	1
Asignación de TFG:	Asignación por expediente

Objetivos:

Las partículas fundamentales son tipicamente 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 particula (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 potencial

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, combinándo 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. 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 spectr