



FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS

GRADO EN FÍSICA curso 2023-24



Ficha de Trabajo de Fin de Grado

Departamento:	Física Teórica	
Título:	Cosmología con cartografiados extragalácticos	
Title:	Cosmology with extragalactic surveys	
Supervisor/es:	Jacobo Asorey Barreiro	
E-mail supervisor/es	jaasorey@ucm.es	
Número de plazas:	2	
Asignación de TFG:	Selección directa <input checked="" type="checkbox"/>	Selección por expediente <input type="checkbox"/>

Objetivos:

La cosmología es uno de los principales campos que actualmente nos permite validar nuevos modelos o extensiones al modelo estándar, principalmente cuando tratamos de describir la física a escalas cosmológicas. Este Trabajo Fin de Grado propone la revisión de distintas predicciones teóricas cosmológicas y su comparación con distintos tipos de observables cosmológicos: supernovas de tipo Ia, radiación cósmica de fondo, ondas gravitacionales y la distribución de estructura a gran escala, obtenida con cartografiados extragalácticos.

En el trabajo se abordará el desarrollo analítico de algunos modelos cosmológicos siguiendo la bibliografía y luego se procederá a comparar con datos para poder determinar qué modelo. Los objetivos principales del trabajo serían:

1. Derivar y representar las distintas historias de expansión y crecimiento de estructuras para distintos modelos cosmológicos.
2. Representar distintas observaciones cosmológicas, profundizando en cómo se han determinado. En particular, se podrá enfocar el trabajo sobre el desarrollo de los funcionales de Minkowski como observables cosmológicos que describen la topología de la distribución de estructura a gran escala.
3. Finalmente, comparar o ajustar las funciones teóricas derivadas con las observaciones para determinar los parámetros cosmológicos que mejor se ajustan y evaluar los resultados en comparación con bibliografía de referencia.

Metodología:

El alumno hará una revisión bibliográfica del tema, derivando algunas de las ecuaciones teóricas más comunes en cosmología como la historia de la expansión del Universo para varios modelos. Posteriormente, usará datos cosmológicos para ajustar los distintos modelos a diferentes observables cosmológicos y ver cuáles se ajustan mejor a las observaciones, reproduciendo resultados previos de la

bibliografía. En particular, el trabajo se podrá enfocar al uso de los funcionales de Minkowski como observables cosmológicos al utilizar la topología de la distribución de materia para extraer información cosmológica.

Bibliografía:

- E. Abdalla et al., “Cosmology intertwined: A review of the particle physics, astrophysics, and cosmology associated with the cosmological tensions and anomalies”, JHEAp 34 (2022) 49-211
- T. Matsubara, Statistics of smoothed cosmic fields in perturbation theory I: Formulation and useful formulas in second-order perturbation theory, arXiv: astro-ph/0006269
- C. Blake, Using the topology of large-scale structure in the WiggleZ Dark Energy Survey as a cosmological standard ruler, MNRAS, 437, 2488
- D. Brout et al., The Pantheon+ Analysis: Cosmological Constraints, arXiv:2202.04077
- S. Alam et al., Completed SDSS-IV extended Baryon Oscillation Spectroscopic Survey: Cosmological implications from two decades of spectroscopic surveys at the Apache Point Observatory, Physical Review D, Volume 103, Issue 8, article id.083533
- DES Collaboration, T. M. C. Abbott et al., Dark Energy Survey Year 3 results: Cosmological constraints from galaxy clustering and weak lensing, Physical Review D, Volume 105, Issue 2, article id.023520



FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS

GRADO EN FÍSICA curso 2023-24



Ficha de Trabajo de Fin de Grado

Departamento:	Física Teórica
Título:	Campos cuánticos en espaciotiempos curvos
Title:	Quantum fields in curved spacetimes
Supervisor/es:	Luis J. Garay y Álvaro Parra López
E-mail supervisor/es	luisj.garay@ucm.es , alvaparr@ucm.es
Número de plazas:	1
Asignación de TFG:	Selección directa <input checked="" type="checkbox"/> Selección por expediente <input type="checkbox"/>

Objetivos:

Se estudiarán algunos aspectos de la teoría cuántica de campos en espaciotiempos curvos mediante el análisis de modelos sencillos. Entre las posibles tareas a realizar, se hallan el estudio de la producción gravitacional de partículas debida a la expansión del espaciotiempo o la radiación de Hawking en los procesos de colapso gravitatorio completo, así como su realización en modelos análogos de gravedad. Adicionalmente, se analizarán las ambigüedades inherentes al proceso de cuantización de campos relativistas en estos procesos.

Metodología:

Estudio de la bibliografía recomendada, análisis del estatus actual a través de algunos artículos científicos sobre el tema y cálculos propios de la teoría cuántica de campos en espaciotiempos curvos.

Se recomienda haber cursado o estar cursando "Electrodinámica clásica", "Campos Cuánticos", "Relatividad General y Gravitación" y "Mecánica Cuántica".

Bibliografía:

- V. F. Mukhanov, Physical Foundations of Cosmology, Cambridge University Press, 2005
- V. F. Mukhanov and S. Winitzki, Introduction to Quantum Effects in Gravity, Cambridge University Press, 2007
- R. Wald, Quantum field theory in curved spacetime and black hole thermodynamics, University of Chicago Press, 1994

- C. Barceló, S. Liberati and M. Visser, Analogue Gravity, Living Rev. Relativ. 8, 12 (2005)



FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS

GRADO EN FÍSICA curso 2023-24



Ficha de Trabajo de Fin de Grado

Departamento:	Física Teórica	
Título:	Ambigüedades de vacío en teoría cuántica de campos	
Title:	Quantum field theory in non-trivial spacetimes	
Supervisor/es:	Luis J. Garay, Álvaro Álvarez Domínguez	
E-mail supervisor/es	luisj.garay@ucm.es, alvalv04@ucm.es	
Número de plazas:	1	
Asignación de TFG:	Selección directa <input checked="" type="checkbox"/>	Selección por expediente <input type="checkbox"/>

Objetivos:

Usando las herramientas de la teoría cuántica de campos en espaciotiempos curvos, se analizará la cuantización canónica de campos de materia en espaciotiempos no triviales. En particular, se describirá cómo la actuación de agentes externos clásicos dependientes del tiempo pueden dar lugar a fenómenos de creación de partículas. Estos fenómenos comprenden desde la producción gravitacional debida a la expansión del universo hasta el efecto Schwinger debido a la aplicación de un campo eléctrico homogéneo. Uno de los objetivos fundamentales del trabajo es identificar las dificultades inherentes a este proceso de cuantización tales como la aparición de ambigüedades en la elección del vacío cuántico.

Metodología:

Cálculos propios de la teoría cuántica de campos en espaciotiempos curvos, así como el estudio de la bibliografía recomendada, análisis del estatus actual a través de algunos artículos científicos sobre el tema.

Se recomienda haber cursado o estar cursando "Electrodinámica clásica", "Campos Cuánticos", "Relatividad General y Gravitación" y "Mecánica Cuántica".

Bibliografía:

- N.D. Birrell, P.C.W. Davies, Quantum fields in curved space, Cambridge University Press, 1982.
- R. Wald, Quantum field theory in curved spacetime and black hole thermodynamics, University of Chicago Press, 1994.

- V. Mukhanov, S. Winiktzki, Introduction to Quantum Effects in Gravity, Cambridge University Press, 2007.



FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS

GRADO EN FÍSICA curso 2023-24



Ficha de Trabajo de Fin de Grado

Departamento:	Física Teórica	
Título:	El destino final del Universo	
Title:	The final fate of the Universe	
Supervisor/es:	María del Prado Martín Moruno	
E-mail supervisor/es	pradomm@ucm.es	
Número de plazas:	2	
Asignación de TFG:	Selección directa <input checked="" type="checkbox"/>	Selección por expediente <input type="checkbox"/>

Objetivos:

El nacimiento de la cosmología como ciencia llegó de la mano de la formulación de la teoría de la Relatividad General. Esto permitió plantearse cuestiones como cuál será el futuro del Universo desde un punto de vista científico riguroso.

Los objetivos de este trabajo son:

- Conocer y comprender cuáles eran las predicciones sobre la evolución futura del Universo según los modelos cosmológicos homogéneos e isótropos desarrollados antes del descubrimiento de la expansión acelerada actual del Universo.
- Entender cómo las predicciones sobre el destino del Universo pueden cambiar si consideramos otros modelos cosmológicos alternativos al actual modelo cosmológico estándar.
- Se podrán considerar parametrizaciones del factor cósmico de escala útiles para describir distintos destinos cósmicos y/o motivar esos destinos teniendo en cuenta ecuaciones de estado particulares para la energía oscura.

Metodología:

- Estudio de la bibliografía básica recomendada, realizando los cálculos necesarios para entender los distintos modelos cosmológicos.
- Análisis del estado actual del tema a través de algunos artículos científicos.
- Realización de cálculos en un marco cosmológico descrito por la métrica de Friedmann-Lemaître-Robertson-Walker.

Se recomienda haber cursado o estar cursando “Geometría Diferencial y Cálculo Tensorial”, “Relatividad General y Gravitación” y “Cosmología”.

Bibliografía:

- R. M. Wald, “General Relativity”, The University of Chicago Press, 1984.
- A.R. Liddle and D.H. Lyth, Cosmological Inflation and Large-Scale Structure, Cambridge (2000).
- M. Bouhmadi-López, C. Kiefer and P. Martín-Moruno, “Phantom singularities and their quantum fate: general relativity and beyond”, Gen. Rel. Grav. 51 (2019) no.10, 135, doi:10.1007/s10714-019-2618-y [arXiv:1904.01836 [gr-qc]].
- L. Fernández-Jambrina, “New futures for cosmological models”, Phil. Trans. A. Math. Phys. Eng. Sci. 380 (2022) no.2222, 20210333 doi:10.1098/rsta.2021.0333 [arXiv:2111.09068 [gr-qc]].



FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS

GRADO EN FÍSICA curso 2023-24



Ficha de Trabajo de Fin de Grado

Departamento:	Física Teórica
Título:	Introducción a gravedad cuántica
Title:	Introduction to quantum gravity
Supervisor/es:	Mercedes Martín Benito
E-mail supervisor/es	m.martin.benito@ucm.es
Número de plazas:	2
Asignación de TFG:	Selección directa <input checked="" type="checkbox"/> Selección por expediente <input type="checkbox"/>

Objetivos:

El principal objetivo de este trabajo es introducirse en el problema de la cuantización no perturbativa de la gravedad. Revisaremos las distintas motivaciones que llevan a tratar de construir un formalismo cuántico para el campo gravitatorio. Como formalismo particular de gravedad cuántica, nos centraremos en la gravedad cuántica de lazos. Aprenderemos los conceptos básicos en los que se basa esta teoría, abordando desde su perspectiva el análisis de escenarios concretos como pueden ser agujeros negros o modelos cosmológicos.

Metodología:

Estudio del estatus actual del tema a través de la bibliografía recomendada y de algunos artículos científicos de revisión especializados.
Se recomienda haber cursado o estar cursando "Mecánica Cuántica", "Mecánica Teórica", "Relatividad General y Gravitación" y "Campos Cuánticos".

Bibliografía:

- R. Wald, General Relativity, University of Chicago Press, 1984.
- P.A. Dirac, Lectures on Quantum Mechanics, Dover Publications, 2001.
- T. Thiemann, Modern Canonical Quantum General Relativity, Cambridge University Press, 2007.
- C. Rovelli and F. Vidotto, Covariant Loop Quantum Gravity: An Elementary Introduction to Quantum Gravity and Spinfoam Theory, Cambridge University Press, 2014.
- 100 Years of General Relativity: volume 4 (Loop Quantum Gravity: the first 30 years). Editores: Abhay Ashtekar & Jorge Pullin, World Scientific, 2017.



FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS

GRADO EN FÍSICA curso 2023-24



Ficha de Trabajo de Fin de Grado

Departamento:	Física Teórica	
Título:	Teoría de las ecuaciones cosmológicas de perturbaciones en el gauge Newtoniano	
Title:	Cosmological perturbation theory in the Newtonian gauge	
Supervisor/es:	Javier de Cruz Pérez	
E-mail supervisor/es	jadecruz@ucm.es	
Número de plazas:	1	
Asignación de TFG:	Selección directa <input checked="" type="checkbox"/>	Selección por expediente <input type="checkbox"/>

Objetivos:

El principio cosmológico establece que el universo, en escalas del orden de cientos de megapársecs, es homogéneo e isotrópico. Sin embargo, para poder explicar las observaciones de las anisotropías del fondo cósmico de microondas y la distribución de las galaxias, entre otras muchas observaciones, necesitamos de la teoría de perturbaciones. Los objetivos principales serán:

- Obtener las ecuaciones de perturbaciones a partir de las ecuaciones de campo de Einstein en el gauge Newtoniano.
- Estudiar la evolución de las perturbaciones de los bariones y la materia oscura en las diferentes etapas de la historia cósmica.
- Calcular el power spectrum de la materia en el presente para poder estudiar la distribución de las galaxias en el universo.

Metodología:

El alumno deberá llevar a cabo un estudio de la bibliografía proporcionada y realizar las diferentes tareas asignadas por el supervisor con el fin de poder progresar en la realización de los objetivos marcados. Mediante reuniones periódicas se realizará un seguimiento del progreso y se proporcionará la ayuda necesaria para poder continuar.

Bibliografía:

1. L. Amendola and S. Tsujikawa. Dark Energy: Theory and Observations. Cambridge University Press, 2015.
2. S. Dodelson. Modern Cosmology. Amsterdam: Academic Press, 2003.
3. P.J.E. Peebles and B. Ratra. The Cosmological Constant and Dark Energy. Rev. Mod. Phys. 75 (2003) 559-606. astro-ph/0207347.
4. C-P. Ma and Bertschinger. Astrophys. J. 455 (1995) 7-25. astro-ph/9506072.



FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS

GRADO EN FÍSICA curso 2023-24



Ficha de Trabajo de Fin de Grado

Departamento:	Física Teórica
Título:	Estudio de la dinámica de las ecuaciones cosmológicas de los modelos de campo escalar.
Title:	Study of the dynamics of the cosmological equations for the scalar field models.
Supervisor/es:	Javier de Cruz Pérez
E-mail supervisor/es	jadecruz@ucm.es
Número de plazas:	1
Asignación de TFG:	Selección directa <input checked="" type="checkbox"/> Selección por expediente <input type="checkbox"/>

Objetivos:

Se conoce como energía oscura a la componente responsable de la expansión acelerada del universo que observamos hoy en día. El modelo estándar de la cosmología se basa en la alternativa más simple, es decir, considera que dicha energía es una constante. La falta de una explicación satisfactoria a nivel teórico de esta constante en términos de principios fundamentales ha motivado el estudio de diferentes modelos cosmológicos. Entre las diferentes opciones una de las más populares es la de describir la energía oscura en términos de un campo escalar con un potencial asociado. Los objetivos principales serán

- Obtener las ecuaciones cosmológicas para los modelos de campo escalar a partir de la acción.
- Analizar la dinámica del sistema de ecuaciones cosmológicas en las diferentes etapas de la evolución del universo para diferentes formas del potencial.

Metodología:

El alumno deberá llevar a cabo un estudio de la bibliografía proporcionada y realizar las diferentes tareas asignadas por el supervisor con el fin de poder progresar en la realización de los objetivos marcados. Mediante reuniones periódicas se realizará un seguimiento del progreso y se proporcionará la ayuda necesaria para poder continuar.

Bibliografía:

1. L. Amendola and S. Tsujikawa. Dark Energy: Theory and Observations. Cambridge University Press, 2015.
2. S. Dodelson. Modern Cosmology. Amsterdam: Academic Press, 2003.
3. P.J.E. Peebles and B. Ratra. The Cosmological Constant and Dark Energy. Rev. Mod. Phys. 75 (2003) 559-606. astro-ph/0207347.



FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS

GRADO EN FÍSICA curso 2023-24



Ficha de Trabajo de Fin de Grado

Departamento:	Física Teórica
Título:	Física cuántica en formalismo simpléctico sobre universos en expansión
Title:	Quantum physics in symplectic formalism on expanding universes
Supervisor/es:	José Alberto Ruiz Cembranos
E-mail supervisor/es	cembra@ucm.es
Número de plazas:	2
Asignación de TFG:	Selección directa <input checked="" type="checkbox"/> Selección por expediente <input type="checkbox"/>

Objetivos:

El concepto de espacio-tiempo dinámico emerge dentro de la teoría de la relatividad general propuesta por Albert Einstein en 1915. Catorce años más tarde, en 1929, Edwin Hubble aportó la primera evidencia observacional de que nuestro universo se estaba expandiendo. Desde entonces, este concepto ha resultado fundamental para entender tanto la interacción gravitacional como la evolución del Universo a gran escala.

El objetivo de este trabajo consiste en analizar el formalismo simpléctico de la mecánica cuántica dentro de espacio-tiempos dinámicos y universos en expansión. La descripción más elegante de la física clásica consiste en su formulación simpléctica. Esta formulación, trata en pie de igualdad posiciones y momentos simultáneamente. Sin embargo, desde el artículo de W. Heisenberg en 1927, sobre el denominado principio de incertidumbre, la idea de poder realizar el mismo planteamiento dentro de la física cuántica se puso en cuestión.

La física cuántica sí admite un tratamiento simultáneo de posiciones y momentos. Aunque los primeros trabajos sobre el tema se remontan a los avances de H. Weyl, E. Wigner, H. Groenewold y J. Moyal en los años 30 y 40, la formulación cuántica simpléctica aún no se ha generalizado en los programas docentes ni en los grados ni en los postgrados de física.

En este trabajo se trata de estudiar dicha formulación simpléctica de la mecánica cuántica en espacio-tiempos dinámicos y universos en expansión.

Metodología:

Dentro de este proyecto, el alumno trabajará 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, para un correcto aprovechamiento del trabajo es altamente recomendable que el alumno esté matriculado en (o haya superado) las asignaturas optativas de cuarto: “Mecánica Teórica”, “Campos Cuánticos” y “Relatividad General y Gravitación”, mientras que son recomendables las asignaturas de “Coherencia Óptica y Láser” y “Cosmología”.

En particular, el estudiante desarrollará un trabajo fundamentalmente teórico sobre la formulación simpléctica de la mecánica cuántica en espacio-tiempos curvos. Para ello, establecerá y desarrollará sus conceptos básicos utilizando como variables posiciones y momentos simultáneamente. Con tal objetivo, el alumno leerá una serie de referencias cuyos resultados deberá reproducir, interpretar y desarrollar en distintos contextos.

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
- [6] Cohen, L. (1966). "Generalized Phase-Space Distribution Functions". *Journal of Mathematical Physics*. 7 (5): 781–786. Bibcode:1966JMP.....7..781C (<https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1966JMP.....7..781C>). doi:10.1063/1.1931206 (<https://doi.org/10.1063%2F1.1931206>).

[7] G. Baker, "Formulation of Quantum Mechanics Based on the Quasi-probability Distribution Induced on Phase Space," *Physical Review*, 109 (1958) pp. 2198–2206. doi:10.1103/PhysRev.109.2198 (<https://doi.org/10.1103%2FPhysRev.109.2198>)

[8] Fairlie, D. B. (1964). "The formulation of quantum mechanics in terms of phase space functions". *Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society*. 60 (3): 581–586.

[9] C. L. Mehta "Phase-Space Formulation of the Dynamics of Canonical Variables", *J. Math. Phys.*,5 (1964) pp. 677–686. doi:10.1063/1.1704163 (<https://doi.org/10.1063%2F1.1704163>)

[10] M. Oliva, D. Kakofengitis, and O. Steuernagel (2018). "Anharmonic quantum mechanical systems do not feature phase space trajectories". *Physica A*. 502: 201–210. arXiv:1611.03303

[11] Marinov, M.S. (1991). "A new type of phase-space path integral". *Physics Letters A*. 153 (1): 5–11. Bibcode:1991PhLA..153....5M (<https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1991PhLA..153....5M>). doi:10.1016/0375-9601(91)90352-9 (<https://doi.org/10.1016%2F0375-9601%2891%2990352-9>).

[12] Curtright, T. L. Time-dependent Wigner Functions (<http://www.physics.miami.edu/~curtright/TimeDependentWignerFunctions.html>)



FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS

GRADO EN FÍSICA curso 2023-24



Ficha de Trabajo de Fin de Grado

Departamento:	Física Teórica	
Título:	Mecánica cuántica en espacio de fases sobre geometrías de agujero negro	
Title:	Quantum mechanics in phase space on black hole geometries	
Supervisor/es:	José Alberto Ruiz Cembranos	
E-mail supervisor/es	cembra@ucm.es	
Número de plazas:	2	
Asignación de TFG:	Selección directa <input checked="" type="checkbox"/>	Selección por expediente <input type="checkbox"/>

Objetivos:

Los agujeros negros constituyen el último estadio de la evolución de algunos objetos estelares. Tales estructuras fueron predichas dentro de la teoría de la relatividad general y su existencia se ha comprobado observacionalmente mediante distintos métodos indirectos. Directamente no pueden observarse desde el punto de vista de la física clásica puesto que no pueden ni emitir ni reflejar luz. La situación es distinta desde el punto de vista cuántico, tal y como demostró Stephen Hawking.

El objetivo de este trabajo consiste en analizar la física cuántica en geometrías de agujero negro en el formalismo de espacio de fases. De hecho, la descripción más elegante de la física clásica consiste en su formulación en espacio de fases. Esta formulación, trata en pie de igualdad posiciones y momentos simultáneamente. Sin embargo, desde el artículo de W. Heisenberg en 1927, sobre el denominado principio de incertidumbre, la idea de poder realizar el mismo planteamiento dentro de la física cuántica se puso en cuestión.

La física cuántica sí admite un tratamiento simultáneo de posiciones y momentos. Aunque los primeros trabajos sobre el tema se remontan a los avances de H. Weyl, E. Wigner, H. Groenewold y J. Moyal en los años 30 y 40, la formulación en espacio de

fases aún no se ha generalizado en los programas docentes ni en los grados ni en los postgrados de física.

En este trabajo se trata de estudiar la física cuántica en geometrías de agujero negro dentro del formalismo de espacio de fases.

Metodología:

Dentro de este proyecto, el alumno trabajará 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, para un correcto aprovechamiento del trabajo es altamente recomendable que el alumno esté matriculado en (o haya superado) las asignaturas optativas de cuarto: “Mecánica Teórica”, “Campos Cuánticos” y “Relatividad General y Gravitación”, mientras que son recomendables las asignaturas de “Coherencia Óptica y Láser” y “Cosmología”.

En particular, el estudiante desarrollará un trabajo fundamentalmente teórico sobre física cuántica en geometrías de agujero negro dentro del formalismo de espacio de fases. Para ello, establecerá y desarrollará los conceptos básicos asociados utilizando como variables posiciones y momentos simultáneamente. Con tal objetivo, el alumno leerá una serie de referencias cuyos resultados deberá reproducir, interpretar y desarrollar en distintos contextos.

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

[6] Cohen, L. (1966). "Generalized Phase-Space Distribution Functions". Journal of Mathematical Physics. 7 (5): 781–786. Bibcode:1966JMP.....7..781C (<https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1966JMP.....7..781C>). doi:10.1063/1.1931206 (<https://doi.org/10.1063%2F1.1931206>).

[7] G. Baker, "Formulation of Quantum Mechanics Based on the Quasi-probability Distribution Induced on Phase Space," Physical Review, 109 (1958) pp. 2198–2206. doi:10.1103/PhysRev.109.2198 (<https://doi.org/10.1103%2FPhysRev.109.2198>)

[8] Fairlie, D. B. (1964). "The formulation of quantum mechanics in terms of phase space functions". Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society. 60 (3): 581–586.

[9] C. L. Mehta "Phase-Space Formulation of the Dynamics of Canonical Variables", J. Math. Phys.,5 (1964) pp. 677–686. doi:10.1063/1.1704163 (<https://doi.org/10.1063%2F1.1704163>)

[10] M. Oliva, D. Kakofengitis, and O. Steuernagel (2018). "Anharmonic quantum mechanical systems do not feature phase space trajectories". Physica A. 502: 201–210. arXiv:1611.03303

[11] Marinov, M.S. (1991). "A new type of phase-space path integral". Physics Letters A. 153 (1): 5–11. Bibcode:1991PhLA..153....5M (<https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1991PhLA..153....5M>). doi:10.1016/0375-9601(91)90352-9 (<https://doi.org/10.1016%2F0375-9601%2891%2990352-9>).

[12] Curtright, T. L. Time-dependent Wigner Functions (<http://www.physics.miami.edu/~curtright/TimeDependentWignerFunctions.html>)



FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS

GRADO EN FÍSICA curso 2023-24



Ficha de Trabajo de Fin de Grado

Departamento:	Física Teórica	
Título:	Los primeros tres segundos: de la inflación cosmológica al Big Bang	
Title:	The first three seconds: From inflation to the hot Big Bang	
Supervisor/es:	Javier Rubio Peña	
E-mail supervisor/es	javier.rubio@ucm.es	
Número de plazas:	2	
Asignación de TFG:	Selección directa <input checked="" type="checkbox"/>	Selección por expediente <input type="checkbox"/>

Objetivos:

Las variaciones de temperatura en el Fondo Cósmico de Microondas constituyen una instantánea de las perturbaciones de densidad primordiales que dieron lugar a la formación de estructuras en el Universo primitivo. Pero... ¿de dónde vienen esas perturbaciones iniciales y la materia que actualmente forma galaxias y cúmulos de galaxias? En este Trabajo Fin de Grado, estudiaremos las limitaciones de la teoría del Big Bang para contestar estas preguntas y su respuesta dentro del paradigma inflacionario. Más concretamente, se pretende que el alumno alcance uno o varios de los siguientes objetivos:

- Extender la cuantización canónica de campos en espacio-tiempo de Minkowski a entornos cosmológicos extremos donde conceptos familiares como "estado de vacío" o "partícula" están mal definidos.
- Demostrar que el tratamiento mecánico cuántico de las fluctuaciones de vacío en un espacio-tiempo de tipo de Sitter conduce a un espectro de perturbaciones de densidad en excelente acuerdo con las observaciones y a un fondo cósmico de ondas gravitacionales todavía por descubrir.
- Discutir la transición de un Universo post-inflacionario frío y vacío al Universo caliente y altamente entrópico que observamos hoy, analizando fenómenos no perturbativos de creación de partículas como la resonancia paramétrica o las inestabilidades espinoles.

Metodología:

Reuniones periódicas con el supervisor y estudio guiado de capítulos de libros, apuntes y artículos científicos de carácter introductorio propuestos en la bibliografía,

derivando algunas de las expresiones más relevantes en el campo. En algunas tareas concretas, el trabajo podría incluir la utilización de programas de cálculo numérico y/o simbólico relacionados con los objetivos propuestos, pero siempre a nivel usuario.

Se recomienda haber cursado o estar matriculado en las asignaturas optativas "Mecánica Cuántica", "Relatividad General y Gravitación" y "Campos Cuánticos". Los contenidos de las asignaturas "Coherencia Óptica y Láser" y "Cosmología" podrían resultar útiles, pero no son estrictamente necesarios.

Bibliografía:

[1] Introduction to Quantum Effects in Gravity, Viatcheslav Mukhanov y Sergei Winitzki, Cambridge University Press, 2007. Also online

[2] Notas del curso "QFT in the Early Universe"
<https://javierrubioblog.com/teaching/qftearlyuniverse/>

[3] Inflationary Perturbations: the Cosmological Schwinger Effect, Jerome Martin, [arXiv:0704.3540](https://arxiv.org/abs/0704.3540).

[4] The Quantum Mechanics of the Scalar Field in the New Inflationary Universe, Alan. H. Guth, So-Young Pi, *Phys.Rev.D* 32 (1985) 1899-1920

[5] Towards the theory of reheating after Inflation, Lev Kofman, Andrei Linde, Alexei Starobinsky, [arXiv:hep-ph/9704452](https://arxiv.org/abs/hep-ph/9704452).