

Extensiones del Modelo Estándar con sectores de materia exóticos

Estudiante: XXXXXXXX

Asesor: YYYYYY

Junio de 2024

Introducción

El estudio de las teorías de campo en física avanzada es esencial para comprender los fenómenos fundamentales del universo. Sin embargo, al abordar la interacción de partículas con espines altos, nos enfrentamos a desafíos teóricos relacionados con la consistencia y la aparición de “fantasmas”. Estos fantasmas son grados de libertad no físicos que surgen en teorías de campos de espín alto y pueden tener propiedades no físicas, como términos cinéticos negativos y propagación superlumínica (Svanberg, 2022).

Por otra parte, las teorías con derivadas superiores tienen también una larga historia en la física teórica. La aparición de derivadas temporales mayores que dos en teorías no degeneradas conduce a inestabilidades, como la ausencia de un estado base, establecido como un teorema en el marco clásico. Las derivadas superiores se introdujeron en la física como herramientas para controlar el comportamiento de alta energía en las teorías de campo. Una objeción crítica hecha por Pais y Uhlenbeck concluye que, a pesar de lo que eran en ese momento características altamente deseables, el formalismo general de derivadas superiores no era adecuado para la física; el origen de esta situación es la inestabilidad de Ostrogradsky y la aparición de fantasmas (Ganz & Noui, 2021). Pese a ello, en el presente siglo la idea se ha retomado en búsqueda de teorías finitas con propiedades similares a la supersimetría (Grinstein, O’Connell, & Wise, 2008). Es posible plantear la teoría de modo que estos sean falsos grados de libertad, es decir, no pertenezcan al espectro físico, pero contribuyan a la unitariedad de teorías de derivadas superiores (Anselmi, 2018).

Si intentamos abordar la gravedad cuántica como una QFT (Donoghue & Menezes, 2019), esto nos lleva a un propagador del “gravitón” con problemas similares a los modelos Lee-Wick. Si esta descripción es posible, entonces la interacción gravitatoria necesita, por analogía, términos de derivadas superiores y, con ello, acecha el peligro de la aparición de fantasmas.

Las teorías de campo de espín alto genéricamente enfrentan problemas de consistencia debido a la presencia de estos fantasmas. Estos grados de libertad son desechados en la teoría libre, pero pueden propagarse cuando hay interacciones. El origen de estos fantasmas se encuentra en el uso de representaciones del álgebra de Lorentz con más de dos sectores de espín, lo que requiere una estructura de ligaduras difícil de mantener en la teoría interactuante (Gómez-Ávila & Napsuciale, 2013). En el estudio de teorías con derivadas superiores se ha demostrado que los estados que aparecen en la suma unitaria son solo los estables (Veltman, 1963); así, la mecánica cuántica evita la inestabilidad de Ostrogradsky. En este trabajo se utilizarán estas técnicas para estudiar la consistencia de teorías con espín mayor que uno.

Justificación

El estudio de las teorías de campo de espín alto y la resolución de problemas asociados a los fantasmas son de gran relevancia tanto en la física de partículas como en la física nuclear. La comprensión de estas teorías es fundamental para avanzar en nuestra comprensión de la estructura de la materia y los fenómenos observados en experimentos nucleares y de partículas.

Las mismas dificultades (propagación de estados fantasma, pérdida de unitariedad, ruptura de la microcausalidad) presentadas por las teorías cuánticas de campo de derivadas superiores aparecen en el estudio de teorías cuánticas de campo de espín alto ordinario. La existencia de estados hadrónicos con espín $s > 1$ motiva el deseo de tener teorías consistentes para campos de alto espín (Napsuciale, 2019). Estas inconsistencias ya se presentan en el campo fermiónico de espín $s = 3/2$ descrito por la teoría de Rarita-Schwinger, que se puede derivar de la siguiente lagrangiana:

$$L = \frac{1}{2} \epsilon^{\mu\nu\rho\sigma} \psi_\mu \gamma^5 \gamma_\nu \partial_\rho \psi_\sigma - m \psi_\sigma - m \psi'_{\mu\nu} \psi^\mu.$$

En este punto, es importante señalar que el origen de las inconsistencias tipo Velo-Zwanziger proviene de la construcción del campo como una representación irreducible del álgebra de Poincaré inducida desde una representación de Lorentz que contiene demasiados sectores de espín (Gómez-Ávila & Napsuciale, 2013). De hecho, la representación de Rarita-Schwinger se transforma como:

$$\left(\frac{1}{2}, 1\right) \oplus \left(1, \frac{1}{2}\right) \oplus \left(\frac{1}{2}, 0\right) \oplus \left(0, \frac{1}{2}\right),$$

lo que contiene ocho componentes de espín $3/2$ y ocho de espín $1/2$.

Se propuso una alternativa de forma independiente por Joos y Weinberg: utilizando un campo que se transforma como:

$$\left(\frac{3}{2}, 0\right) \oplus \left(0, \frac{3}{2}\right),$$

donde todos los grados de libertad tienen el espín correcto y solo se necesita decidir sobre la paridad del campo. Sin embargo, esto conlleva un costo: un estudio de esta representación encuentra que el único término cinético que se puede escribir tiene la forma:

$$L_K = \partial^\rho \Psi S_{\rho\mu\nu} \partial^\mu \partial^\nu \Psi,$$

donde $S_{\rho\mu\nu}$ es un conjunto completamente simétrico y sin trazas de matrices, generalizando las matrices de Dirac γ^μ [11]. Esto nos lleva a la conclusión de que, de una forma u otra, los fantasmas son compañeros inevitables de los campos de alto espín. Sin embargo, los fantasmas de derivadas superiores pueden ser más fáciles de controlar que sus contrapartes Velo-Zwanziger.

La idea de este trabajo es justificar el uso de derivadas superiores como una alternativa a otras teorías con problemas más serios que los presentados aquí, o considerar otras en las que inevitablemente aparezcan términos con derivadas superiores. Se pretende continuar con el estudio de este tipo de teorías en la física de partículas y aprender de

lo que se pueda rescatar para tener una teoría consistente. El estudio matemático de formalismos e ideas es de suma importancia para futuras aplicaciones.

Objetivos

El objetivo general de este anteproyecto es explorar las implicaciones de los fantasmas en las teorías de campo de espín alto y las posibles soluciones a los problemas de consistencia que plantean. Para ello, nos enfocaremos en los objetivos específicos:

- Analizar en profundidad la naturaleza de los fantasmas en teorías de espín alto y comprender su origen y características.
- Investigar las representaciones alternativas, como la familia de Joos-Weinberg, que no contienen más de dos sectores de espín pero requieren términos cinéticos con derivadas superiores en el Lagrangiano (Napsuciale, 2019).
- Explorar cómo los fantasmas de derivadas superiores pueden ofrecer una nueva perspectiva en la búsqueda de teorías de campo consistentes, especialmente en casos en los que las teorías de segundo orden no pueden formularse sin fantasmas.
- Estudiar la aplicación de estas ideas en la descripción de estados hadrónicos con espín mayor que uno, contribuyendo así a nuestra comprensión de la teoría nuclear.

Metodología

Este anteproyecto involucrará una revisión exhaustiva de la literatura existente sobre teorías de campo de espín alto, derivadas superiores y la presencia de fantasmas. Se realizarán cálculos teóricos y simulaciones numéricas para evaluar el impacto de los fantasmas en teorías específicas. Además, se explorarán representaciones alternativas y se analizará su viabilidad en la resolución de problemas fantasmales. Resultados Esperados

Esperamos obtener un mayor entendimiento de las teorías de campo de espín alto, los desafíos que enfrentan debido a la presencia de fantasmas y las posibles soluciones que ofrecen las derivadas superiores en representaciones novedosas. También esperamos contribuir al desarrollo de teorías de campo más consistentes y su aplicación en la descripción de estados hadrónicos. Impacto

Este anteproyecto tiene el potencial de abrir nuevas vías de investigación en el campo de la física avanzada, al abordar problemas fundamentales en teorías de campo de espín alto y su relevancia en la física nuclear y de partículas. Los resultados podrían tener aplicaciones en la interpretación de datos experimentales y en la formulación de teorías más precisas.

Cronograma

Primer semestre: Enfocarse en los cursos, iniciar revisión de la literatura

Segundo semestre: Concluir revisión de la literatura, construcción de la teoría clásica y análisis de constricciones

Tercer semestre: Cuantización canónica, e inicio de la escritura.

Cuarto semestre: Escritura de la tesis

Conclusiones

La presencia de fantasmas en las teorías de campo de espín alto es un desafío teórico significativo que requiere una atención especial. La exploración de derivadas superiores y representaciones alternativas ofrece una prometedora vía para abordar estos problemas y avanzar en la construcción de teorías de campo más consistentes. Este anteproyecto busca contribuir a esta área de investigación y abrir nuevas perspectivas en la física avanzada.

Referencias

Anselmi, D. (2018). Fakeons and Lee-Wick models. *High Energ. Phys.*, 144. doi:[10.1007/JHEP02\(2018\)141](https://doi.org/10.1007/JHEP02(2018)141)

Donoghue, J. F., & Menezes, G. (2019). Massive poles in Lee-Wick quantum field theory. *Phys. Rev. D*, 99, 065017. doi:[10.1103/PhysRevD.99.065017](https://doi.org/10.1103/PhysRevD.99.065017)

Ganz, A., & Noui, K. (2021). Reconsidering the Ostrogradsky theorem: Higher-derivatives Lagrangians, ghosts and degeneracy. *Classical and Quantum Gravity*, 38(7), 075005. doi:[10.1088/1361-6382/abe31d](https://doi.org/10.1088/1361-6382/abe31d)

Gómez-Ávila, S., & Napsuciale, M. (2013). Covariant basis induced by parity for the $(j, 0) \oplus (0, j)$ representation. *Phys. Rev. D*, 88, 096012. doi:[10.1103/PhysRevD.88.096012](https://doi.org/10.1103/PhysRevD.88.096012)

Grinstein, B., O'Connell, D., & Wise, M. B. (2008). The Lee-Wick standard model. *Phys. Rev. D*, 77, 025012. doi:[10.1103/PhysRevD.77.025012](https://doi.org/10.1103/PhysRevD.77.025012)

Napsuciale, M. (2019). High spin, high derivatives. *Journal of Physics: Conference Series*, 1208(1), 012007. doi:[10.1088/1742-6596/1208/1/012007](https://doi.org/10.1088/1742-6596/1208/1/012007)

Svanberg, E. (2022). *Theories with higher-order time derivatives and the Ostrogradsky ghost* (Master's thesis). Stockholm University Department of Physics.

Veltman, M. (1963). Unitarity and causality in a renormalizable field theory with unstable particles. *Physica*, 29(3), 186–207. doi:[10.1016/S0031-8914\(63\)80277-3](https://doi.org/10.1016/S0031-8914(63)80277-3)