

CdMx a 9 de mayo de 2024.

Asunto: Solicitud de Alta de Proyecto.

**DR. ROMÁN LINARES ROMERO
PRESIDENTE DEL CONSEJO DIVISIONAL
DIVISIÓN DE CIENCIAS BÁSICAS E INGENIERÍA
PRESENTE**

Estimado Dr. Linares,

Por este medio le solicito atentamente incluir como un punto del orden de día en la próxima sesión del Consejo Divisional que usted preside, la alta del proyecto del Área Académica de Física Teórica cuyo título es **Polaritones en sistemas exóticos fuertemente interactuantes**, a cargo del Dr. Miguel Ángel Bastarrachea Magnani.

Sírvase encontrar en anexo la documentación que complementa esta solicitud:

- El Documento que contiene la información del nuevo proyecto de investigación.
- La aprobación de financiamiento por dos años por parte de la *Convocatoria para Postulación de Proyectos de Investigación por Personal Académico de Ingreso Reciente* de la Dirección de Apoyo a la Investigación (DAI) de la UAM.

La agradezco su atención y quedo a sus órdenes para cualquier duda o aclaración.

ATENTAMENTE
"CASA ABIERTA AL TIEMPO"



1. Nombre.

Polaritones en sistemas exóticos fuertemente interactuantes.

2. Nombre del responsable y tiempo de dedicación al proyecto.

| Nombre | Tiempo de dedicación |
|--|----------------------|
| Dr. Miguel Angel Bastarrachea Magnani, Profesor Asociado D de Tiempo Completo, Área Académica de Física Teórica. | 10 horas. |

3. Nombre de los participantes y tiempo de dedicación al proyecto.

| Nombre | Tiempo de dedicación |
|--|----------------------|
| Dr. Miguel Angel Bastarrachea Magnani, Profesor Asociado D de Tiempo Completo, Área Académica de Física Teórica. | 10 horas. |

4. Área, Departamento y División.

Área Académica de Física Teórica, Departamento de Física, División de Ciencias Básicas e Ingeniería.

5. Objetivos generales y particulares.

Objetivo general.

El objetivo general del proyecto es progresar en el estudio teórico de las propiedades y aplicaciones de polaritones fuertemente interactuantes y sus estados macroscópicos formados en sistemas de microcavidades semiconductoras, y otras plataformas de óptica cuántica o física atómica bajo condiciones exóticas.

Objetivos particulares.

- **Investigación:** Estudiar las propiedades de polaritones que se encuentren dentro del régimen de acoplamiento ultra-fuerte entre la luz y la materia (USC por sus siglas en inglés).
- **Investigación:** Explorar aplicaciones de los efectos fuera de equilibrio en polaritones, por ejemplo, en microcavidades no ideales con fotones con una dispersión anómala (cavidades imperfectas), o en el caso de la presencia del caos (clásico y cuántico).
- **Docencia:** Consolidar nuevas líneas de generación y aplicación del conocimiento para la formación de estudiantes de licenciatura y posgrado de la UAM-I en la física de polaritones y en las tecnologías cuánticas.

6. Antecedentes.

Las tecnologías cuánticas son el conjunto de aplicaciones tecnológicas cuyo funcionamiento

depende de los fenómenos descritos por la física cuántica avanzada [1]. Han revolucionado la forma en que nos comunicamos y procesamos la información de tal suerte que numerosos países han hecho fuertes inversiones económicas para investigación en desarrollos en ciencia básica y aplicada con el objetivo de explorar su potencial [2], incluyendo México, que recientemente se ha unido al proceso [3]. El desarrollo de nuevas tecnologías cuánticas depende de la habilidad de diseñar y controlar sistemas cuánticos interactuantes. En este contexto, los fotones tienen un papel central por ser las partículas fundamentales que componen a la luz, pues la excitación, manipulación y control de los sistemas cuánticos interactuantes relevantes a las tecnologías cuánticas depende, principalmente, de medios ópticos. Sin embargo, una de las limitaciones de los fotones es que son incapaces de interactuar entre sí en el vacío. En cambio, al propagarse en la materia, pueden vestirse de sus excitaciones y logarlo.

Cuando incrementamos la intensidad del acoplamiento entre la luz y la materia surge entonces un nuevo estado cuántico híbrido denominado polaritón [4]. Los polaritones son cuasi-partículas que heredan las propiedades de sus constituyentes originales, esto es, puede ser manipulados ópticamente y poseen interacciones fuertes que dan como resultado interacciones efectivas entre fotones. Sintonizar sus propiedades ofrece entonces un recurso controlable para transferir atributos de la luz a la materia y viceversa [5]. Gracias a la capacidad moderna de controlar experimentalmente sistemas cuánticos, los polaritones se pueden crear en diversas plataformas. Es por eso que la física de polaritones es un área interdisciplinaria emergente que yace en la frontera entre la física atómica, la materia condensada y la óptica cuántica. En la última década, la búsqueda de nuevos estados polaritónicos resultantes de las interacciones fuertes ha exhibido un gran potencial tanto para ampliar nuestro conocimiento fundamental sobre la luz y la materia como para impactar en el progreso de las tecnologías cuánticas, pues hacen posible controlar la respuesta óptica de un medio, generar efectos no-lineales novedosos y crear fluidos polaritónicos con estados cuánticos macroscópicos como condensación, superfluidez, y superconductividad, esto es, los llamados fluidos cuánticos de luz [6].

Una plataforma de interés para el proyecto es la de los semiconductores dentro de microcavidades [7], donde se forman los excitones-polaritones a través de las excitaciones del semiconductor. Los sistemas de excitones-polaritones poseen un peculiar carácter gracias a sus propiedades fuera de equilibrio que, bajo interacciones fuertes, aún no se ha explorado por completo, pues constituyen un fenómeno resultante del balance entre bombeo óptico y disipación [8]. De igual forma, las implicaciones de condiciones exóticas como el de la interacción ultra-fuerte entre la luz y la materia (USC por sus siglas en inglés) [9] ha sido escasamente estudiado. Su interés radica en que los polaritones en ese régimen habría una respuesta mucho más rápida, en los estados polaritónicos con aplicaciones al cómputo cuántico [10]. Las características fuera de equilibrio de los polaritones y su alta sintonizabilidad, los hace una plataforma versátil para explorar la creación de estados cuánticos con propiedades novedosas. Dos líneas de investigación nos interesan en lo particular. Primero, la posibilidad de emplear un acoplamiento disipativo para cambiar las propiedades polaritónicas, esto es, estudiar las propiedades de los polaritones en cavidades imperfectas, pues se ha mostrado que es posible cambiar la masa efectiva de los polaritones, incluso haciéndola negativa [11]. Segundo, aplicaciones en el terreno del caos clásico, esto es, la extrema sensibilidad de la dinámica a condiciones iniciales [11], y del caos cuántico, la disciplina encargada de estudiar los rasgos propios de los sistemas caóticos en el mundo cuántico [12]. Se ha mostrado que los fluidos polaritónicos son una plataforma para el estudio del caos y éste tiene un rol clave en

protocolos de control cuántico [13,14].

Queda mucho por explorar en cuanto a sus implicaciones de los polaritones en condiciones exóticas, tanto en el terreno de la física fundamental como en el de las tecnologías cuánticas. Es por eso que las preguntas que deseamos resolver en este proyecto son ¿cómo generar nuevos estados polaritónicos en sistemas cuánticos interactuantes? ¿Cuáles serían las propiedades de esos polaritones y cómo aprovecharlas?

- [1] J. P. Dowling, et al., *Phil. Trans. R. Soc. A* 361, 3655 (2003).
- [2] M. Riedel et al., *Quantum Sci. Tech.* 4 020501 (2019).
- [3] Iniciativa Mexicana en Tecnologías Cuánticas. *Unidad de Publicaciones y Difusión del Instituto de Investigaciones en Matemáticas Aplicadas y en Sistemas*, UNAM, Septiembre, 2023.
- [4] J. J. Hopfield, *Phys. Rev.* 112, 1555 (1958).
- [5] I. Carusotto et al., *Rev. Mod. Phys.* 85, 299 (2013).
- [6] D. N. Basov, et al., *Nanophotonics* 10, 549 (2021).
- [7] H. Deng, H. Haug, and Y. Yamamoto, *Rev. Mod. Phys.* 82, 1489 (2010).
- [8] J. Bloch, et al., *Nat. Rev. Phys.* 4, 470 (2022).
- [9] N. M. Peraca, et al., *Quantum Science and Technology, Semiconductors and Semimetals*, Vol. 105, edited by S. T. Cundiff and M. Kira (Elsevier, 2020) pp. 89–151.
- [10] A. F. Kockum, et al., *Nat. Rev. Phys.* 1, 19 (2019).
- [11] M. Wurdack, et al., *Nature Comm.* 14, 1026 (2023).
- [11] E. Ott, *Chaos in Dynamical Systems*, 2nd ed. (Cambridge University Press, 2002).
- [12] M. K. Fritz Haake, et al., *Quantum Signatures of Chaos* (Springer-Verlag, Berlin, 2018).
- [13] R. Ruiz-Sánchez, et al., *Phys. Rev. B* 101, 155305 (2020).
- [14] T. Gao, et al., *Nature* 526, 554 (2015).

7. Descripción.

En el contexto de las tecnologías cuánticas, esto es, de las aplicaciones tecnológicas contemporáneas basadas en la mecánica cuántica avanzada, se propone el estudio de las propiedades de sistemas de polaritones creados en sistemas fuertemente interactuantes bajo condiciones exóticas. Los polaritones son las cuasi-partículas cuánticas que emergen como una superposición entre la luz y la materia cuando están fuertemente acopladas. Gracias a que heredan las propiedades de sus componentes fundamentales pueden ser manipulados ópticamente y también interactuar entre sí. Los polaritones son atractivos desde un punto de vista fundamental y aplicado, pues al permitir que la luz interactúe consigo misma generan novedosos efectos ópticos no lineales con aplicaciones al procesamiento de la información clásico y cuántico. Además, pueden ser generados en plataformas donde confluyen diversas áreas como la física atómica, la óptica cuántica y la materia condensada, dando como resultado un área interdisciplinaria: la física de polaritones. El proyecto propone desarrollar un formalismo teórico para el análisis y predicción de estados polaritónicos en condiciones exóticas y la exploración de sus propiedades, en particular, en el régimen del acoplamiento ultra-fuerte entre la luz y la materia, en cavidades imperfectas y en aplicaciones en el terreno del caos clásico y cuántico. El proyecto perfila nuevas líneas de investigación de frontera con carácter interdisciplinario para formar recursos humanos de alto nivel, desde prestadores de servicio social, hasta estudiantes de licenciatura, maestría, doctorado. Se espera la publicación de un artículo de investigación en revistas arbitradas internacionales por

año, para impulsar y consolidar el desarrollo de la física de polaritones y las tecnologías cuánticas en México.

8. Recursos disponibles para el desarrollo del proyecto.

El proyecto requiere del uso de equipo de cómputo para la resolución de ecuaciones numéricas. Estos recursos de cómputo están disponibles para el Área de Física Teórica y el Departamento de Física o se pueden conseguir por medio del financiamiento. Actualmente se cuenta con recursos humanos para desarrollar el proyecto, un estudiante de doctorado y dos estudiantes de maestría. Finalmente, se precisa de financiamiento para la asistencia a congresos científicos.

9. Infraestructura actual en la Universidad disponible para el proyecto.

La Universidad tiene disponible equipo de cómputo para la resolución de los cálculos numéricos relevantes al proyecto y también presupuesto para la asistencia a congresos científicos.

10. Fuentes de financiamiento.

El solicitante tiene financiamiento aprobado por dos años de la *Convocatoria para Postulación de Proyectos de Investigación por Personal Académico de Ingreso Reciente* de la Dirección de Apoyo a la Investigación (DAI) de la UAM con un monto de \$150,000.00 MXN como responsable técnico.

Además, de manera complementaria, el solicitante tiene aprobados los proyectos “Excitones-polaritones en semiconductores en microcavidades” de la *Convocatoria para participar en el Programa Especial de Apoyo a Proyectos de Docencia e Investigación de la DCBI* con un monto de \$40,000.00 MXN por un año, como responsable técnico y el proyecto “Fluidos fotónicos fuertemente interactuantes” (CBF2023-2024-1765) de la *Convocatoria de Ciencia de Frontera 2023-2024* de Conahcyt como responsable técnico con el Dr. Arturo Camacho Guardian del Instituto de Física de la UNAM como co-responsable por tres años.

11. Indicadores de desempeño.

- **Investigación.** Publicación de un artículo en revista indexada de competencia internacional al año.
- **Docencia.** Formación de recursos humanos en términos de asesoría de dos proyectos terminales de licenciatura, dos estudiantes de maestría y uno de doctorado durante el periodo en las líneas de investigación y temas afines al proyecto.
- **Preservación y divulgación de la cultura.** 1 ponencia al año en congresos especializados y dos servicios sociales dirigidos en las líneas de investigación y temas afines al proyecto.

El total de productos a generar en el periodo 2024-2027 se enlista en la siguiente tabla:

| Componente | Productos de trabajo | Cantidad |
|---------------|--|----------|
| Investigación | Artículos en revistas indexadas | 3 |
| | Presentaciones en congresos | 3 |
| Docencia | Asesoría de proyectos terminales de licenciatura | 2 |
| | Dirección de estudiantes de maestría | 2 |

| | | |
|---|--|---|
| | Dirección de estudiantes de doctorado | 1 |
| Preservación y divulgación de la cultura | Conferencias de divulgación impartidas | 3 |
| | Asesoría de servicios sociales | 2 |

12. Fecha de inicio, duración y planeación a tres años.

Se propone que el proyecto de inicio a partir del 15 de abril de 2024 con una duración de tres años.

Primer Año. Abril 2024 a Mayo 2025. Trimestres 24-I, 24-P, 24-O, 25-I.

Actividades:

- Revisión bibliográfica del estado de la cuestión del acoplamiento ultra-fuerte luz-materia y las plataformas donde se ha podido realizar experimentalmente.
- Desarrollo del formalismo teórico para el estudio de polaritones fuertemente interactuantes en el USC.
- Estudio de las propiedades de los polaritones fuertemente interactuantes en el USC.
- Predicción de efectos novedosos en el terreno de las tecnologías cuánticas.

Entregables:

- Elaboración y envío de artículo de investigación en revista internacional arbitrada.
- Asesoría de prestador de servicio social en los temas afines al proyecto.
- Dirección de Proyecto Terminal de estudiante de licenciatura en los temas afines al proyecto.
- Asesoría de estudiante de maestría en los temas afines al proyecto.
- Asesoría de estudiante de doctorado en los temas afines al proyecto.
- Presentación de contribución oral en congreso científico nacional o internacional.
- Impartición de conferencia de divulgación en el tema de polaritones.

Segundo Año. Mayo 2025 a Mayo 2026. Trimestres 25-P, 25-O, 26-I.

Actividades:

- Revisión bibliográfica del estado de la cuestión de los excitones polaritones en semiconductores dentro de cavidades imperfectas o cavidades acopladas.
- Desarrollo del formalismo teórico para el estudio de polaritones fuertemente interactuantes en cavidades imperfectas o cavidades acopladas.
- Estudio de las propiedades de los excitones polaritones en semiconductores dentro de cavidades imperfectas o cavidades acopladas.

Entregables:

- Elaboración y envío de artículo de investigación en revista internacional arbitrada.
- Asesoría de estudiante de maestría en los temas afines al proyecto.
- Asesoría de estudiante de doctorado en los temas afines al proyecto.
- Presentación de contribución oral en congreso científico nacional o internacional.
- Impartición de conferencia de divulgación en el tema de polaritones.

Tercer Año. Mayo 2026 a Mayo 2027. Trimestres 26-P, 26-O, 27-I.

Actividades:

- Revisión bibliográfica del estado de la cuestión de excitones-polaritones y sus aplicaciones al caos cuántico y clásico.
- Desarrollo del formalismo teórico para el estudio de fluidos polaritónicos interactuantes que presenten caos clásico o cuántico.
- Estudio de aplicaciones de control sobre sistemas caóticos polaritónicos.

Entregables:

- Elaboración y envío de artículo de investigación en revista internacional arbitrada.
- Asesoría de prestador de servicio social en los temas afines al proyecto.
- Dirección de Proyecto Terminal de estudiante de licenciatura en los temas afines al proyecto.
- Asesoría de estudiante de maestría en los temas afines al proyecto.
- Asesoría de estudiante de doctorado en los temas afines al proyecto.
- Presentación de contribución oral en congreso científico nacional o internacional.
- Impartición de conferencia de divulgación en el tema de polaritones.

13. Palabras clave.

Polaritones, interacción luz-materia, microcavidades semiconductoras, caos, tecnologías cuánticas.

Dr. Miguel Angel Bastarrachea Magnani.
 Responsable Técnico. Profesor Asociado D T.C
 Jefe del Área Académica de Física Teórica
 Departamento de Física, División de Ciencias Básicas e Ingeniería
 Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa (UAM-I)

Dr. Juan Morales Corona
 Jefe del Departamento de Física.
 Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa (UAM-I)

Dr. Román Linares Romero
 Director de la División de Ciencias Básicas e Ingeniería
 Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa (UAM-I)