

CdMx a 22 de julio de 2024.

**Asunto: Solicitud de Alta de Proyecto.**

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

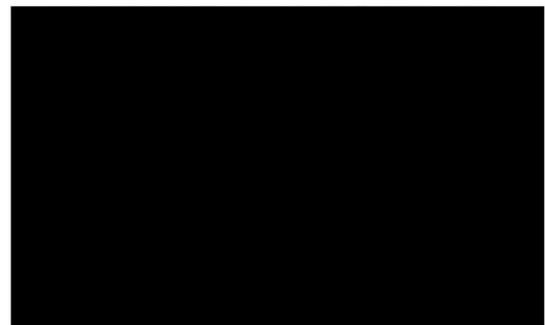
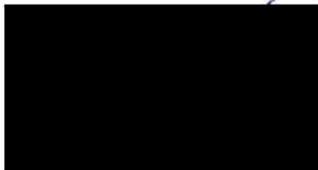
Estimado Dr. Linares, por este medio le solicito, atentamente, incluir como un punto del orden del día de la próxima sesión del Consejo Divisional que usted preside, la solicitud de alta de un proyecto de investigación del área de Física Teórica del Departamento de Física, cuyo título es La materia nuclear en las condiciones más extremas del universo, el responsable del mismo es el Dr. Luis Alberto Hernández Rosas.

Sírvase encontrar en anexo la documentación que complementa esta solicitud:

- El Documento que contiene la información del nuevo proyecto de investigación.
- Probatorios sobre 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"



## Proyecto de Investigación

### Nombre del proyecto

La materia nuclear en las condiciones más extremas del universo.

### Nombre del responsable y tiempo de dedicación al proyecto

Dr. Luis Alberto Hernández Rosas  
Profesor Tiempo Completo Asociado D  
Área Académica de Física Teórica  
Tiempo de dedicación: 10 hrs

### Nombre de los participantes y tiempo de dedicación al proyecto

Dr. Luis Alberto Hernández Rosas  
Profesor Tiempo Completo Asociado D  
Área Académica de Física Teórica  
Tiempo de dedicación: 10 hrs

### Área, Departamento y División

Área Académica: Física Teórica  
Departamento: Física  
División: Ciencias Básicas e Ingeniería

### Antecedentes

El estudio de la materia fuertemente acoplada en condiciones extremas de temperatura y densidad nos permite abordar la respuesta a preguntas fundamentales en la frontera de la ciencia: ¿Por qué no es posible encontrar quarks y gluones -los grados de libertad elementales de la Cromodinámica Cuántica (QCD)- libres bajo condiciones normales de temperatura y densidad? ¿Cuál es el mecanismo que dio lugar al 98% de la materia observada en el Universo? Las respuestas a estas y otras preguntas en esta área requieren de una estrategia para llevar a cabo el estudio sistemático de las transiciones de fase entre materia hadrónica confinada y desconfiada y de la restauración de la simetría quiral, que caracterizan a la materia que interactúa fuertemente cuando la temperatura y la densidad aumentan. Una manera de hacerlo es interpretando los resultados experimentales obtenidos mediante la colisión de núcleos pesados a altas energías, utilizando los grandes laboratorios de física

de altas energías de todo el mundo. Estas reacciones recrean algunas de las condiciones durante la evolución del Universo temprano. La evidencia experimental obtenida principalmente por los experimentos en el RHIC (Relativistic Heavy-Ion Collider) y en el LHC (Large Hadron Collider) muestra que para colisiones a las mayores energías y, por lo tanto, las mayores temperaturas alcanzadas en estas reacciones, se produce un plasma de quarks y gluones (QGP). Este plasma posee propiedades fascinantes, como el valor más bajo para el cociente entre la viscosidad de corte y la entropía en comparación con cualquier otra sustancia conocida. El origen microscópico de estas propiedades y su relación con las transiciones de fase de la materia fuertemente interactuante, cuando la temperatura y la densidad aumentan, representa uno de los temas que actualmente se estudian con gran interés en la frontera del conocimiento tanto en la física de altas energías como en la física nuclear. Sin embargo, el conocimiento adquirido y verificado está básicamente restringido a la situación donde las colisiones entre núcleos producen pequeñas densidades bariónicas mientras que el estudio de las características de esta materia, cuando la densidad bariónica aumenta, mantiene abiertas muchas interrogantes. Las preguntas que buscan respuesta incluyen la posible existencia de uno o varios puntos críticos en el diagrama de fase de la QCD donde la temperatura y los potenciales químicos bariónicos y de isospín varían y cómo estas propiedades nos ayudan a comprender la física de los objetos compactos, como las estrellas de neutrones, mediante la contribución de esta estructura de fases a la ecuación de estado de la materia nuclear en condiciones extremas.

El número de instalaciones experimentales dedicadas a dichos estudios, que están en uso o en construcción, da cuenta del interés mundial por el tema. En particular, la búsqueda de señales asociadas a la presencia de puntos críticos ha sido llevada a cabo por el programa BES-RHIC (Beam Energy Scan program at RHIC), el cual ha producido algunos resultados interesantes. No obstante, la próxima generación de instalaciones experimentales está ahora diseñada y siendo construida explícitamente para producir reacciones de alta luminosidad a energías más bajas con lo que será posible tener un control experimental sobre la producción de materia nuclear a las mayores densidades jamás alcanzadas. Una de esas instalaciones, donde pronto se llevarán a cabo este tipo de experimentos, es el complejo NICA (Nuclotron-based Ion Collider Facility) del laboratorio ruso JINR (Joint Institute for Nuclear Research) ubicado en la ciudad de Dubna, Rusia utilizando el detector MPD (Multi-Purpose Detector). El proponente junto con sus colaboradores de trabajo han llevado a cabo, a lo largo de más de una década, estudios teórico-fenomenológicos sistemáticos acerca de las propiedades del QGP. Nuestros resultados,

publicados en las mejores revistas del área a nivel mundial, incluyen predicciones acerca de la existencia y posible localización de uno de los puntos críticos, el Punto Crítico Terminal (CEP) en el diagrama de fase con temperatura y potencial químico bariónico. También, como miembros del MPD, estamos llevando a cabo estudios a nivel Monte Carlo para determinar las capacidades del detector para la identificación de algunas de las señales que hemos predicho.

La presente propuesta construye sobre estos antecedentes de colaboración entre físicos teóricos y fenomenólogos con una amplia experiencia en el área. El proyecto tiene el potencial no solo de ampliar nuestro conocimiento actual de las propiedades del tipo de materia estudiada, sino también de impulsar el entrenamiento de una nueva generación de científicos jóvenes en áreas específicas como la que planteamos estudiar así como en áreas afines.

## **Objetivos generales y particulares**

### Objetivo general

En este proyecto estudiaremos las propiedades de la materia nuclear en condiciones extremas de temperatura y densidad, que se generan en colisiones de iones pesados relativistas o que prevalecían en el Universo temprano y algunos de los sistemas que lo pueblan como son las estrellas de neutrones. Los experimentos presentes y futuros donde se producen y analizan las colisiones de iones pesados, serán estratégicos para completar el estudio del diagrama de fase de la materia fuertemente interactuante.

### Objetivos particulares

- Mediante técnicas teórico/fenomenológicas, estudiar y proponer señales experimentales para caracterizar la restauración de la simetría quiral/desconfinamiento en condiciones de alta densidad y temperatura. Estos incluyen la posibilidad de transferir el momento angular generado en colisiones periféricas a la polarización del hadrón y la ubicación del punto crítico terminal en el diagrama de fase de la QCD a partir de las fluctuaciones de esta polarización como función de la energía de la colisión.
- Analizar desde el punto de vista teórico/fenomenológico, señales que involucran campos electromagnéticos y estudiar la influencia que en estas reacciones tienen sobre observables hadrónicas.
- Estudiar señales relacionadas con el comienzo de las condiciones para que la materia producida en las colisiones esté compuesta predominantemente de mesones. Estas señales, junto con el análisis de

las fluctuaciones de las cantidades conservadas como el número bariónico y la extrañeza permitirán caracterizar de mejor manera la región en donde comienzan las transiciones de fase y el orden de la transición como función de la energía de colisión.

- Estudio de los efectos de alta velocidad angular en las colisiones de iones pesados ultra-relativistas, para determinar las consecuencias en la dinámica del plasma de quarks y gluones, y en la dinámica de la materia hadrónica.

## Descripción

El estudio de la estructura de fases de la materia fuertemente acoplada en condiciones extremas de temperatura y densidad, se ha convertido a lo largo de los últimos años en un tema de investigación que recibe cada vez mayor atención [1]. Una muestra del interés internacional en el tema es que en la actualidad se construyen complejos experimentales que habrán de dedicarse exclusivamente al estudio de este tipo de materia mediante colisiones entre núcleos de elementos pesados a altas energías [2]. Quien pone a consideración esta propuesta tiene más de una década de experiencia trabajando de manera conjunta y en colaboración con varios otros equipos de México y del mundo en el desarrollo de modelos teórico-fenomenológicos encaminados a la descripción de la materia que se produce en estas colisiones. De particular relevancia es el estudio de señales cuando la densidad bariónica es grande, situación en la que se ha especulado acerca de la existencia un punto crítico terminal que indicaría una rica variedad en la estructura de fases de la materia fuertemente acoplada [3]. En este proyecto se propone construir sobre la experiencia conjunta acumulada para continuar contribuyendo al esfuerzo internacional para determinar las propiedades de este tipo de materia. Propondremos señales para determinar la existencia del punto crítico terminal que puedan ser exploradas de manera experimental. Estas señales incluyen el comportamiento de fluctuaciones de cargas conservadas como función de la energía de la colisión así como posibles señales de la existencia de fenómenos novedosos como la vorticidad y campos magnéticos intensos en colisiones periféricas y las modificaciones que produce tomar en cuenta el desbalance entre neutrones y protones en las condiciones iniciales de la colisión.

[1] K. Fukushima and T. Hatsuda, Rept. Prog. Phys.74, 014001 (2011).

[2] K. Agarwal [CBM], arXiv:2207.14585 [hep-ex]; V. Abgaryan *et al.* [MPD], Eur. Phys. J. A 58, no.7, 140 (2022).

[3] M. Stephanov, Prog. Teo. Phys. Suppl. 153, 139 (2004).

### **Recursos disponibles para el desarrollo del proyecto**

Para la ejecución del proyecto planteado en este documento se requiere de equipo de cómputo. Muchos de los cálculos necesarios para llegar a los objetivos requieren la implementación de soluciones numéricas. Por otra parte, mucha de la investigación está ligada a la física del experimento MPD-NICA, por lo tanto en varios casos se requerirá hacer simulaciones en el software MPDroot, las cuales requieren alto poder computacional. Estos recursos están disponibles en el Área de Física Teórica, en el Departamento de Física y en la Unidad Iztapalapa. En caso de no tener el equipo suficiente y/o adecuado, se buscará financiamiento de distintas fuentes para obtenerlo.

### **Infraestructura actual en la Universidad disponible para el proyecto**

En la universidad cuenta con equipo de cómputo capaz de realizar las tareas necesarias para llevar a cabo de manera satisfactoria este proyecto.

### **Fuentes de financiamiento**

El solicitante tiene financiamiento aprobado de las siguientes convocatorias:

- 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. Proyecto “La materia nuclear en las condiciones más extremas del universo”.
- Por tres años de la *Convocatoria de Ciencia de Frontera 2023* de CONAHCyT. Proyecto CF-2023-G-433 con título: “Las diferentes fases de la materia fuertemente acoplada en condiciones extremas”. Modalidad: Grupal.
- Por un año de la *Convocatoria Programa especial de apoyo a proyectos de docencia e investigación* de la División de Ciencias Básicas e Ingeniería de la UAM Unidad Iztapalapa. Proyecto “La materia nuclear en las condiciones más asimétricas del universo”.

### **Indicadores de desempeño**

El total de productos a entregar durante los 3 años propuestos en este proyecto (2024-2027), se muestran a continuación.

Componente	Producto	Cantidad
Investigación	Artículos en revistas indizadas	6
	Presentación en congresos y/o talleres	3
Docencia	Asesoría de Proyectos terminales	4
	Dirección de estudiantes de Maestría	4
	Dirección de estudiantes de Doctorado	1
Preservación y divulgación de la cultura	Conferencias de divulgación impartidas	3
	Asesoría de Servicios Sociales	3

### Fecha de inicio, duración y planeación

La fecha de inicio del proyecto es a partir del 15 de abril de 2024 con una duración de tres años.

Año 1. Trimestres 24-I, 24-P y 24-O

- Actividades:

Calcular el propagador de campos cuánticos eléctricamente cargados escalares y fermiónicos de espín  $\frac{1}{2}$ , en presencia de campos magnéticos uniformes y constantes y de alta vorticidad. Esto es de vital importancia para este proyecto, ya que son los elementos base que permitirán hacer el estudio de la restauración de la simetría quiral para construir el diagrama de fase de la QCD.

- Entregables:

- Elaboración y envío de artículos de investigación en revista internacional arbitrada.
- Asesoría de estudiante de maestría en los temas afines al proyecto.
- Presentación con una plática en congreso científico nacional o internacional.
- Impartición de conferencia de divulgación en el tema de los efectos de los campos magnéticos en los sistemas más fundamentales del universo.

#### Año 2. Trimestres 25-I, 25-P y 25-O

- Actividades:

Para comprender las propiedades de las líneas de transición en el diagrama de fase de la materia fuertemente interactuante en términos analíticos se puede recurrir al uso de modelos efectivos, llevando a cabo la descripción desde el punto de vista de las transiciones de restauración/desconfinamiento y de la simetría quiral a altas temperatura y potencial químico bariónico [1-3]. El análisis será el estudio de las fluctuaciones de cargas conservadas bajo condiciones realistas para la masa de las excitaciones mesónicas y bariónicas involucradas para proporcionar valores para la temperatura y potencial químico bariónico donde se puede ubicar el punto crítico terminal. También planeamos estudiar los efectos de manera simultánea de campos magnéticos muy intensos y alta vorticidad en el estudio de la restauración de la simetría quiral a temperatura finita y potencial químico bariónico altos, para ubicar la posición del punto crítico terminal.

- Entregables:

- Elaboración y envío de artículos de investigación en revista internacional arbitrada.
- Dirección de Proyectos Terminales de estudiantes de licenciatura.
- Asesoría de estudiantes de maestría en los temas afines al proyecto.
- Presentación con una plática en congreso científico nacional o internacional.
- Impartición de conferencia de divulgación en el tema de los estados de materia nuclear.

#### Año 3. Trimestres 26-I, 26-P y 26-O

- Actividades:

El alineamiento del espín de los quarks/antiquarks con la vorticidad térmica se ha propuesto como un mecanismo para entender las características de la función de excitación de la polarización de hadrones [4]. Sin embargo, a la fecha, no existen modelos microscópicos para describir este alineamiento a partir de primeros principios en el caso de ocurrir en un plasma de quarks-gluones a temperatura y potencial químico bariónico finitos. Proponemos hacer uso de modelos que hemos desarrollado para describir la interacción del espín de quarks/antiquarks con la vorticidad térmica, motivada por una modificación fenomenológica de la interacción de quarks y gluones en un medio en rotación [5]. Estos modelos han sido utilizados con éxito para la descripción de la función de excitación de la polarización de Lambdas y anti-Lambdas donde hemos predicho que estas funciones tienen un máximo a bajas energías [6].

- Entregables:

- Elaboración y envío de artículos de investigación en revista internacional arbitrada.
- Dirección de Proyectos Terminales de estudiantes de licenciatura.
- Asesoría de estudiante de maestría en los temas afines al proyecto.
- Presentación con una plática en congreso científico nacional o internacional.
- Impartición de conferencia de divulgación en el tema de la descripción de las colisiones de iones pesados ultra-relativistas.

[1] A. Ayala, L. A. Hernández, M. Loewe, J. C. Rojas, R. Zamora, Eur. Phys. J. A 56, 2 (2020).

[2] A. Ayala, S. Hernández-Ortiz, Luis A. Hernández, Rev. Mex. Fis. 64, 302-313 (2018).

[3] A. Ayala, J. Phys. Conf. Ser. 761, 012066 (2016).

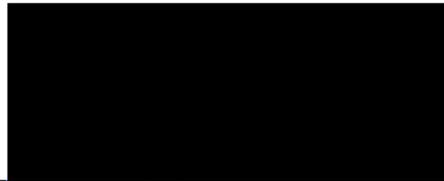
[4] I. Karpenko, F. Becattini, Nucl. Phys. A 982. 519-522 (2019); A. Ayala, E. Cuautle, G. Herrera, L. Montaña, Phys. Rev. C 65 024902, 2012.

[5] A. Ayala, D. de la Cruz, L. A. Hernández, J. Salinas, Phys. Rev. D 102, 056019 (2020); A. Ayala, D. de la Cruz, S. Hernández-Ortiz, L. A. Hernández, J. Salinas, Phys. Lett. B 801, 135169 (2020).

[6] A. Ayala, M. A. Ayala Torres, E. Cuautle, I. Domínguez, et al., Phys. Lett. B 810, 135818 (2020); A. Ayala, I. Domínguez, I. Maldonado, M. E. Tejeda-Yeomans, Phys. Rev. C 105 (2022) 3, 034907.

### **Palabras clave**

Cromodinámica Cuántica, Materia Hadrónica, Teoría Térmica de Campos, QCD Perturbativa, Campos Magnéticos, Potencial Químico, Alta Vorticidad, Diagrama de Fase de QCD.



---

Dr. Luis Alberto Hernández Rosas  
Responsable Técnico. Profesor Asociado D T.C.  
Departamento de Física  
Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa (UAM-I)