

Fecha de presentación del Informe: Día  Mes  Año 

### 1. Datos generales del Proyecto

Código del proyecto: 71107			
Título del proyecto: Propiedades de coherencia cuántica en sistemas bosónicos de baja dimensionalidad			
Facultad o Instituto Académico: Ciencias Naturales y Exactas			
Departamento o Escuela: Física			
Grupo (s) de investigación: Grupo de Física Teórica del Estado Sólido			
Entidades: Universidad del Valle			
Palabras claves: redes ópticas, bosones, coherencia, interferencia			
Investigadores <sup>1</sup>	Nombre	Tiempo asignado	Tiempo dedicado
Investigador Principal	Karem Cecilia Rodríguez Ramírez	10	10
Coinvestigadores	Gustavo Adolfo Marín Alvarado	20	20
	Vanessa Carolina Olaya Agudelo	0	0
Otros participantes			

### 2. Resumen ejecutivo:

En este proyecto, presentamos la implementación de un interferómetro Mach-Zehnder explorando las propiedades de coherencia de ondas de materia bosónicas ultra frías. El sistema es modelado mediante la ecuación de Gross-Pitaevskii. La onda incidente es dividida 50:50 por un potencial doble pozo dependiente del tiempo. Un haz experimenta un corrimiento de fase controlado y finalmente los dos haces se recombinan. Las soluciones son obtenidas mediante diferencias finitas para la discretización espacial y Runge-Kutta para la evolución temporal. Se presentan la densidad y la fase para

<sup>1</sup> Todas las personas relacionadas en el informe y que participen en el proyecto deben haber suscrito el acta de propiedad intelectual de acuerdo con los formatos establecidos.



diferentes potenciales externos desarrollados, para cada caso la fidelidad es monitoreada para analizar la adiabaticidad del proceso dinámico.

El otro sistema bosónico bajo estudio es un sistema molecular reticular unidimensional de moléculas LiCs que se encuentra en la fase fuertemente interactuante de aislante de Mott, con una molécula por sitio preparada en el estado base y primer estado excitado rovibracional en presencia de un campo eléctrico perpendicular a la red. A grandes distancias intermoleculares, la interacción dipolo-dipolo en la aproximación de primeros vecinos domina la dinámica del problema. La entropía de entrelazamiento de von Neumann generada durante la dinámica es presentada para evoluciones temporales cortas. El potencial de éste tipo de sistemas moleculares para ser usados en protocolos de información cuántica se evidencia en la aparición temprana de un ordenamiento a largo alcance en la matriz densidad de una partícula. Las simulaciones numéricas son hechas usando el algoritmo de evolución temporal de decimación en bloque basado en el formalismo de estados producto de matriz y la descomposición de Susuki-Trotter.

In this work, we present a numerical implementation of a Mach-Zehnder interferometer, where coherence properties of ultracold bosonic matter-waves are explored. The system is modeled by the Gross-Pitaevskii equation. The incoming wave is divided 50:50 by a time-dependent double well potential, one beam travels through a controlled phase shifter and, afterwards, the two beams are recombined. The numerical solutions are achieved by means of the finite-differences method for the spatial discretization and the Runge-Kutta method for the time evolution. We present the dynamics of both the density and phase of the system. Several time-dependent external trapping potentials has been developed, and for each case the fidelity is monitored in order to analyze the adiabaticity of the dynamical process.

The other bosonic system under consideration is a LiCs strongly-interacting 1D molecular lattice system in the Mott-insulator regime, allowing one molecule per site in the lowest electronic and vibrational state in a perpendicular electric field. At large intermolecular distance and low filling, the dipole-dipole interaction in the nearest-neighbor approximation governs the dynamics exchange of the two allowed rotational levels. The generated von Neumann entanglement entropy and its monotonically growth in short-term evolutions is shown. The potential of these molecular systems to be used in quantum information protocols is enhanced by the early emergence of a long-range order in the single-particle density-matrix correlator. The numerical simulations are performed by means of the Time-Evolving Block Decimation algorithm based on the Matrix Product State formalism and the Susuki-Trotter decomposition.

### 3. Síntesis del proyecto:

El presente proyecto se enmarca dentro del área de gases atómicos y moleculares a ultra bajas temperaturas, el cual se encuentra en el foco de interés en diversas comunidades físicas y químicas, tales como la física atómica y molecular, fisico-química cuántica, materia condensada, información cuántica, entre otros.

El creciente interés se ve reflejado en la dinámica presentada en las últimas dos décadas en los premios Nobel, otorgados en los años 1997 por el enfriamiento con láser, 2001 por la realización experimental de condensado de Bose-Einstein, 2013 por la manipulación de sistemas cuánticos individuales y 2017 por el descubrimiento teórico de las fases y transiciones de fase topológicas de la materia. De tal manera que los gases, bien sea atómicos o moleculares ultra fríos cargados en trampas o redes ópticas son frecuentemente propuestos como simuladores cuánticos ya que recrean diversos problemas y modelos, sirviendo como un puente de desarrollo de nuevas herramientas experimentales, analíticas y numéricas.

El objetivo general del presente proyecto, es inferir la coherencia cuántica de sistemas bosónicos mediante dos mecanismos: a través del estudio de interferometría y a través del análisis de la dinámica fuertemente correlacionada que estos sistemas presentan de manera cuasi-local y de largo alcance.

De manera específica se propusieron dos líneas, primero la implementación numérica y posterior caracterización de la contra parte de los interferómetros de Mach-Zehnder o de Michelson-Morley pero usando ondas coherentes de materia en lugar de luz láser. Y el segundo, el análisis de la dinámica fuertemente correlacionada de sistemas bosónicos reticulares analizando posibles ordenamientos a largo alcance en presencia de campos externos.

En primer lugar analizamos las propiedades ondulatorias y coherentes de los condensados de Bose-Einstein usados en el papel de la luz láser.

Se ha desarrollado la implementación numérica concerniente al interferómetro de materia utilizando el lenguaje C/C++, el estudiante de pregrado Gustavo Adolfo Marín Alvarado es quien desarrolló el trabajo en el marco de Semilleros de Investigación. Se implementó el potencial externo dependiente del tiempo que inicia en un único pozo y evoluciona de la manera más adiabática posible hasta crear un doble pozo para realizar la separación espacial del condensado en dos haces iguales, lo cual constituye el objetivo específico 1. Se introdujo una diferencia de fase entre los haces de dos maneras diferentes: 1) por medio de un aumento de longitud recorrida por uno de los dos condensados ubicado en uno de los dos haces, mientras el otro haz permanece inalterado, introduciendo así una diferencia de fase la cual luego de una recombinación es evidenciada en el patrón de interferencia generado y visualizado en la evolución temporal de la fase del sistema de tipo Michelson-Morley. Este trabajo corresponde a

satisfacer el objetivo específico 2. 2) Adicionalmente, en el marco del mismo objetivo específico 2, se introduce otro mecanismo de corrimiento de fase incluyendo una diferencia entre los mínimos del doble pozo en lugar de aumentar la longitud de propagación de uno de los haces siguiendo los lineamientos de un interferómetro tipo Mach-Zehnder.

El procedimiento separación de los haces y posterior recombinación se ha llevado a cabo de diferentes maneras a saber:

- 1) Separación y recombinación adiabáticas (suave) de los haces.
- 2) Separación adiabática y recombinación súbita.
- 3) Separación y recombinación súbitas.

En los tres regímenes analizados se han caracterizado tanto la densidad como la fase del sistema.

Finalmente, para cuantificar la adiabaticidad del interferómetro, se utiliza la fidelidad del sistema como observable para dicha medición. El cual constituye el objetivo específico 3 del proyecto de investigación presentado. La fidelidad se mide como la probabilidad del sistema evolucionado de estar en el estado base de la trampa en un tiempo dado. De tal manera que si el sistema evoluciona siguiendo suavemente (adiabáticamente) los cambios del potencial, éste logra adaptar su estado base en todo instante de tiempo.

Los resultados obtenidos hasta el momento se consignaron en un artículo que tiene como título: *Numerical implementation of a matter-wave Mach-Zehnder interferometer (Implementación numérica de un interferómetro de Mach-Zehnder con ondas de materia)*. El cual fue sometido el 12 de Diciembre 2017 a la revista Óptica Pura y Aplicada (OPA) de la Sociedad Española de Óptica, con ISSN 2171-8814, la cual se encuentra actualmente clasificada como una revista A2 en Colciencias. El soporte se encuentra como documento Anexo 1.

Resultados principales: Se analizó la coherencia cuántica de un gas bosónico a través del estudio de interferometría, dicha coherencia se evidenció en el patrón de interferencia generado y visualizado en la evolución temporal de la fase del sistema, así como en los diferentes patrones obtenidos en la densidad de probabilidad.

Preguntas abiertas: aún quedan preguntas que han surgido en el desarrollo del problema y lo cual enriquece el trabajo de investigación. Se han encontrado tres regímenes diferentes al momento de la recombinación de los haces para el interferómetro tipo Mach-Zehnder, a saber:

- Un régimen adiabático,
- Un régimen pendular,
- Un régimen excitado.

Estos tres regímenes sin duda serán foco de estudio y los resultados están siendo consignados en la escritura de un segundo artículo en esta área de interferometría, ver documento Anexo 2.

En segundo lugar, se estudió la dinámica fuertemente correlacionada de sistemas bosónicos moleculares en el régimen degenerado en presencia de un potencial periódico que discretiza el espacio mientras que los niveles energéticos accesibles a las partículas constituyen un conjunto finito. Para estudiar la transferencia coherente de información entre las partes de un sistema bipartito de bosones, se ha estudiado un sistema de moléculas polares arregladas en una red óptica, donde se tiene una molécula “quieta” por sitio y por tanto sólo las excitaciones se mueven a lo largo de la cadena. La contratista Vanessa Carolina Olaya Agudelo es quien desarrolló el trabajo y el estudiante de doctorado Sadan García Negrete, ha estado trabajando en el tema recientemente.

Se ha logrado determinar el hamiltoniano efectivo del sistema analizando las contribuciones energéticas del problema, donde se ha estudiado el efecto de un campo eléctrico externo sobre las moléculas reticulares así como la influencia de la interacción dipolar entre las partículas, lo cual constituye la realización del objetivo específico 4. Se han realizado mediciones de observables locales como la densidad de probabilidad de las excitaciones de las moléculas o excitones y la entropía de von Neumann para analizar la transferencia de información, lo cual satisface el objetivo específico 6. Para analizar mecanismos que favorezcan la transferencia coherente de información entre las partes del sistema bipartito, para dar cumplimiento al objetivo específico 5, se han analizado varias condiciones iniciales. Se analizó el sistema con la propagación de una excitación de la molécula ubicada en el primer sitio de la cadena donde el resto permanece en su estado basal. Se concluye que la fuerte correlación entre las proyecciones cero de los niveles rotacionales involucrados constituye la principal fuente de distribución de población entre las diferentes proyecciones rotacionales. Para fortalecer esta conclusión se realizaron medidas de la matriz densidad de una partícula o una excitación en el caso del presente trabajo, y se muestra cómo la ocupación del orbital natural (autoestados de la matriz densidad con mayor autovalor) de mayor autovalor tiene mayor probabilidad para cuando la condición inicial es una molécula excitada con proyección nula a diferencia de iniciar la evolución con una molécula excitada con proyección  $+1$ ,  $-1$  o superposición de éstos dos.

Los resultados obtenidos con la propagación de una excitación de la molécula ubicada en el primer sitio de la cadena donde el resto permanece en su estado basal se encuentran consignados en un artículo que tiene como título *Single molecular-excitation propagation in one-dimensional optical lattices (Propagación de una excitación molecular en redes ópticas unidimensionales)*. El cual fue sometido el 12 de Diciembre 2017 a la revista Óptica Pura y Aplicada (OPA) de la Sociedad Española de Óptica, con ISSN 2171-8814, la cual se encuentra actualmente clasificada como una revista A2 en Colciencias. El soporte se encuentra como documento Anexo 3.

El subsecuente análisis de las correlaciones del sistemas para estudiar ordenamientos a largo alcance mediante el análisis de la matriz densidad de una partícula se consignaron en un artículo que tiene como título *Single-excitation correlation dynamics of polar molecules on 1D lattices: driving by external electric fields*. El cual fue sometido el día 28 de Mayo 2018 a la revista Materials Today: Proceedings de la editorial Elsevier, con ISSN 22147853. El soporte se encuentra como documento Anexo 4.

La revisión bibliográfica inicial se realizó exhaustivamente, pero naturalmente es indispensable la revisión periódica y constante a lo largo de toda la ejecución del trabajo.

Adicionalmente se han asistido a los *siguientes eventos* presentado los trabajo en las dos direcciones, ver certificados en el Anexo 5:

XXVII Congreso Nacional de Física, Cartagena, Octubre 3-6 de Octubre del 2017:

- 1) Numerical implementation of a mach-zhender interferometer for Bose-Einstein condensates. Presentación *poster* con autoría de Gustavo Marín y Karen Rodríguez.
- 2) Coherent collective dynamics and entanglement evolution of polar molecules on 1d lattices. Presentación *oral* con autoría de Karen Rodríguez y Vanessa Olaya.

XV Encuentro Nacional de Óptica y VI Conferencia Andina y del Caribe en Óptica y sus Aplicaciones, Bucaramanga, Noviembre 20-24 del 2017:

- 1) Implementación numérica del interferómetro de Mach-Zehnder con ondas de materia. Presentación *poster* con autoría de Gustavo Marín y Karen Rodríguez.
- 2) Propagación de una excitación molecular en redes ópticas unidimensionales. Presentación *oral* con autoría de Karen Rodríguez y Vanessa Olaya.

XXIII Latin American Symposium on Solid State Physics, Bariloche, Argentina 10-13 Abril, 2018

- 1) Controlling ultra-cold polar molecules trapped in a 1D optical lattice by means of external electric fields. Presentación *poster* con autoría de Sadan Garcia Negrete, Vanessa Olaya Agudelo y Karem Rodriguez Ramirez.

Finalmente, en el marco del tema del presente proyecto se celebra también el evento: Ultracold Matter in Optical Lattices, el cual se celebra del 3 al 6 de Julio de 2018 con la participación de:

Prof. Luis Santos de Leibniz Universität Hannover, en Hannover, Alemania.  
Prof. José Reslen de la Universidad del Atlántico, en Barranquilla, Colombia.  
Prof. Jereson Silva de la Universidad Nacional de Colombia sede Bogotá, en Bogotá, Colombia.



En el evento varios estudiantes y profesores tanto de la Universidad del Valle como de diferentes universidades de Colombia que trabajamos en temas afines nos reuniremos para discutir las perspectivas de nuestro trabajo en el campo a nivel mundial. Ver poster del evento en el Anexo 6.

#### **4. Impactos actual o potencial:**

Los impactos del presente proyecto se pueden ver desde tres puntos de vista:

1) El punto de vista académico: sin duda cada problema de ciencia básica que se ataca en la academia ayuda a los estudiantes a plantearse preguntas que le ayuden a la resolución del mismo. Esta estructura de pensamiento es la que se refleja en todo ámbito de la vida tanto cotidiana como profesional bien sea en la academia, la industria o el emprendimiento: la posibilidad de encontrar una solución a un problema que se presente. De tal manera que el impacto académico alimenta tanto al estudiante de Semillero de Investigación (Gustavo Marín) así como a la contratista recién graduada de Física (Vanessa Olaya) aportando a su formación como profesional y como persona.

2) El punto de vista de investigación: El presente proyecto se enmarca dentro de un área de investigación actual, de mucho movimiento y si se quiere “de moda” ya que es un tema donde los desarrollos experimentales, teóricos y numéricos se exponen día a día en publicaciones de alto impacto a nivel mundial. Son temas que es necesario desarrollar con mucho detalle y profesionalismo debido a la amplia comunidad que se encuentra trabajando, sin embargo, aún existen muchas preguntas abiertas y es allí donde los investigadores en la Universidad del Valle podemos contribuir. El presente proyecto deja los resultados consignados en 4 artículos, 3 de los cuales se encuentran sometidos en proceso de revisión y 1 en que se encuentra aún en borrador, esta divulgación de resultados evidencia el impacto investigativo del trabajo.

3) El punto de vista de desarrollos futuros:

Sin duda alguna, cada proyecto deja preguntas abiertas, y ellas son la semilla para un futuro proyecto de investigación, donde nuevos estudiantes se formarán y nuevos trabajos se tejerán. Como muestra de esto, aquí se deja el borrador de un escrito que aún no se concluye y cuyo nicho fue el presente proyecto.



**5. Productos:**

Tabla No. 1. **Cantidad y tipo de productos pactados en el Acta de Trabajo y Compromiso y productos finalmente presentados**

TIPO DE PRODUCTOS	No. de PRODUCTOS PACTADOS				No. de PRODUCTOS PRESENTADOS			
	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4
<b>Productos de nuevos conocimientos</b>								
Artículo en revista ISI-SCOPUS:								
Artículo completo publicado en revistas indexadas	<b>A1</b>	<b>A2</b>	<b>B</b>	<b>C</b>	<b>A1</b>	<b>A2</b>	<b>B</b>	<b>C</b>
Libros de autor que publiquen resultados de investigación						3		
Capítulos en libros que publican resultados de investigación								
Productos o procesos tecnológicos patentados o registrados								
<input type="checkbox"/> Prototipos y patentes								
<input type="checkbox"/> Software								
Productos o procesos tecnológicos usualmente no patentables o protegidos por secreto industrial								
Normas basadas en resultados de investigación								
<b>Formación de recursos humanos</b>	No. de estudiantes vinculados		No. de tesis		No. De estudiantes Vinculados		No. De tesis	
Estudiantes de pregrado					1			



TIPO DE PRODUCTOS	No. de PRODUCTOS PACTADOS		No. de PRODUCTOS PRESENTADOS	
	Semillero de Investigación			1
Estudiantes de maestría				
Estudiantes de doctorado				
Joven investigador				
<b>Productos de divulgación</b>				
Publicaciones en revistas no indexadas				
Ponencias presentadas en eventos (congresos, seminarios, coloquios, foros)	No. de ponencias nacionales 1	No. de ponencias internacionales es	No. de ponencias nacionales 4	No. de ponencias internacionales 1
<b>Propuesta de investigación</b>				
Propuestas presentadas en convocatorias externas para búsqueda de financiación.				

**Tabla No. 2. Detalle de productos**

Para cada uno de los productos obtenidos y relacionados en la tabla anterior, indique la información solicitada para cada uno, anexando copia de las respectivas constancias. Como anexo a este formato encontrará el instructivo para instructivo para la revisión de informes finales y productos

Tipo de producto:	Libro, Artículo, Software, Capítulo de libro, Memorias, Tesis, Prototipo Industrial, Diseño Industrial, Software, Patente
Nombre General:	Si el producto obtenido se encuentra en el marco de un documento o evento, indicar este nombre. Ejemplo: <b>Revista</b> Anales del Jardín Botánico de Madrid. (Año 2000). <b>Vol:</b> 1. <b>Núm:</b> 58. <b>Págs:</b> 186 - 188
Nombre Particular:	Escribir el nombre del producto generado. Ejemplo: <b>Artículo</b> Rorippa curvisiliqua (Cruciferae), nueva en Europa
Ciudad y fechas:	Ciudad y fecha de publicación o presentación del resultado.



Participantes:	Relacionar los autores del producto.
Sitio de información:	Mencionar el sitio en el cual quedará disponible el documento con los resultados del proyecto en extenso. Ejemplo: Biblioteca Central, Centro de Documentación, etc.
Formas organizativas:	Grupos, centros, institutos o laboratorio al cual se adscriben los autores del proyecto.

*La presente versión del informe contiene las observaciones de los evaluadores:*

\_\_\_\_\_  
Firma del investigador principal

\_\_\_\_\_  
VoBo. Vicedecano de Investigaciones

*Por favor presente su informe impreso y en formato digital en hoja tamaño carta, letra arial 11, con espacios de 1 1/2*