

LA ACTIVIDAD EXPERIMENTAL COMO ESTRATEGIA PARA EL
ACERCAMIENTO AL CONCEPTO DE MEDICIÓN DE UN SISTEMA CUÁNTICO

Trabajo de Grado para optar por el título de

Licenciado en Física

Jhonny Florez Tovar

LINEA DE PROFUNDIZACION
LA ENSEÑANZA DE LA FISICA Y LA RELACION FISICA MATEMATICA
LICENCIATURA EN FISICA
FACULTAD DE CIENCIA Y TECNOLOGIA
UNIVERSIDAD PEDAGOGICA NACIONAL

2021

LA ACTIVIDAD EXPERIMENTAL COMO ESTRATEGIA PARA EL
ACERCAMIENTO AL CONCEPTO DE MEDICIÓN DE UN SISTEMA CUÁNTICO

Trabajo de Grado para optar por el título de

Licenciado en Física

Jhonny Florez Tovar

Código: 2012246022

Asesor(a)

Sandra Bibiana Ávila Torres

LINEA DE PROFUNDIZACION
LA ENSEÑANZA DE LA FISICA Y LA RELACION FISICA MATEMATICA
LICENCIATURA EN FISICA
FACULTAD DE CIENCIA Y TECNOLOGIA
UNIVERSIDAD PEDAGOGICA NACIONAL
2021

Nota de aceptación:

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

Bogotá D.C, mayo 2021

AGRADECIMIENTOS

Por la culminación de la tesis agradezco el amor recibido, la dedicación y la paciencia con la que cada día se preocupaba mi madre, pues sin ella no lo había logrado. Tu bendición a diario a lo largo de mi vida me protege y ha llevado a cumplir este enorme logro. Gracias a mi hija por tener la paciencia de aguantar el tiempo que no he podido dedicarle, a los compañeros que acompañaron mi proceso de formación, y a los docentes que hicieron grata la estadía en la Universidad, a las personas ajenas que se interesaron por ofrecerme un poco de su tiempo, que me han otorgado felicidad y experiencia.

Resumen

En el presente trabajo se desarrollan actividades experimentales como instrumento que permita la construcción del concepto de medición de una variable dinámica desde la Mecánica Cuántica (M.C), como una apuesta a la contribución de estrategias para la comprensión de temáticas que involucran razonamiento abstracto. Las actividades experimentales presentes se diseñaron para la comprensión de nociones alrededor de la M.C. desde de los conceptos de observador, medición e incertidumbre; donde se aborda la descripción cualitativa y cuantitativa de los fenómenos, como contribución a las diversas estrategias planteadas al problema de la medición en la mecánica cuántica y sus posibles soluciones. Al mismo tiempo logra ampliar la experiencia frente a la realización de las descripciones y la esquematización del experimento, con el fin de promover un cambio que convoca la perspectiva del pensamiento clásico regido por las leyes cuánticas; por lo cual esta propuesta se realizó como parte de la construcción del saber pedagógico.

Se abordaron los autores Barinas (2016), Bohr (1988), Castrillón (2014), Dirac (1967), Espinoza (2007), Fanaro (2011), Gratton y López (2003) entre otros, para identificar conceptos de medición, principio de incertidumbre y acerca de los observables de posición y momento en mecánica cuántica. En cuanto al marco metodológico se implementó la hipótesis explicativa y deductiva, por lo que la investigación se dividió en dos momentos. En primer lugar, la metodología explicativa, incluye los principios de observación y experimentación; en segundo lugar, este trabajo investigativo se consolida dentro de los paradigmas cualitativos y cuantitativos de este modo, la información rastreada proporcionó la clasificación, interpretación y comparación; lo que involucró el dialogo entre los textos y actividades por lo que para el análisis se hizo necesario las siguientes categorías de análisis:

Experimento como estrategia para la enseñanza de la Física, Experimento en la Mecánica Cuántica y la Medición de variables desde la perspectiva clásica y cuántica.

Luego de los resultados logrados a partir de los apartados planteados muestran que el discurso normativo puede adaptarse a la diversidad de herramientas pedagógicas, sin desarraigar la teoría fundada. Este recorrido no solo depende de los docentes, convoca al direccionamiento de estrategias que acerquen a la comprensión de fenómenos desde la experimentación.

Palabras claves: Mecánica Cuántica, Teoría Cuántica, Experimental, Medición, observables y Observadores.

Tabla de contenido

Introducción.....	1
Capítulo I. Caracterización del objeto de estudio.....	5
1.1. Contexto problemático	5
1.2. Planteamiento del problema	7
1.3. Pregunta problema	8
1.4. Objetivo general.....	8
1.5. Justificación	9
1.6. Características de la Mecánica Cuántica – Antecedentes	10
1.7. Marco teórico.....	13
Capítulo II. El experimento como apropiación de saberes.....	19
2.1 El experimento como estrategia para la enseñanza de la Física	19
2.2. El experimento en Mecánica Cuántica.....	22
2.3. Medición de variables desde la perspectiva clásica y cuántica	25
2.3.2 Sobre una variable dinámica en Mecánica cuántica	30
2.4. Principio de incertidumbre	32
2.5. El experimento con polarizadores.....	35
2.6. Formalismo de la Mecánica Cuántica	37
2.6.1 Notación de Dirac	38
2.6.2 Producto interior	38
2.6.3 Operadores.....	39
2.6.3.1 Linealidad y Hermeticidad	40
2.6.4. Ecuación de valores propios o autovalores.....	41
2.6.5. Función de Onda y su relación con la medida de observables.	42

Capítulo III. Descripción de la actividad experimental a propósito del acto de medición: La calcita	44
3.1. Actividad experimental: La Calcita	45
3.1.1 Descripción instrumental Actividad experimental.....	45
3.1.2 Formalización conceptual de la actividad experimental a propósito de la medición de los observables.	50
3.1.3 Formalización matemática de la actividad experimental	53
4. Conclusiones.....	59
Bibliografía.....	i
ANEXOS.....	vii
ANEXO 1	vii
Experimento con polarizadores	vii
ANEXO 2.....	xvii
Hamiltoniano y la ecuación de valores propios.....	xvii
Anexo 3	xxvii
Cartilla Practico – Experimental “La Actividad Experimental Como Estrategia Para El Acercamiento Al Concepto De Medición De Un Sistema Cuántico”	xxvii

Índice de Tablas

TABLA 1. IDENTIFICACIÓN DE LOS ELEMENTOS PARA LA ACTIVIDAD EXPERIMENTAL.....	46
--	----

Índice de Figuras

FIGURA 3.1 POLARIZADOR 1 VERTICAL e_y , POLARIZADOR 2 – VERTICAL ROTADO UN ÁNGULO α . FUENTE: MALAVER 2016.....	35
FIGURA 3.1 DISPOSICIÓN INICIAL DE MATERIALES MOSTRANDO LA COLIMACIÓN DE UNO DE LOS ESTADOS $ v\rangle$ DE POLARIZACIÓN LINEAL MUTUAMENTE EXCLUYENTES. ELABORACIÓN PROPIA.	46
FIGURA 3.2 REPRESENTACIÓN DE UN FOTÓN ENTRANDO A LA CALCITA, SIGUE LA “TRAYECTORIA 1” Y SALE CON POLARIZACIÓN $ H\rangle$	47
FIGURA 3.3 REPRESENTACIÓN DE UN FOTÓN ENTRANDO A LA CALCITA, SIGUE LA “TRAYECTORIA 2” Y SALE CON POLARIZACIÓN $ V\rangle$	48
FIGURA 3.4 DISPOSICIÓN DE MATERIALES PARA EL SEGUNDO MOMENTO DE LA ACTIVIDAD, EXPERIMENTAL, LA CALCITA 2 HA SIDO ROTADA $\alpha = 45^\circ$ EN COMPARACIÓN A LA CALCITA 1.	49
FIGURA 3.5 A) SISTEMA DE REFERENCIA S SIN ROTACIÓN; REPRESENTA EL SISTEMA COORDENADO DE LA CALCITA 1. B) SISTEMA DE REFERENCIA S' ROTADO UN ÁNGULO α CON RESPECTO A S ; REPRESENTA EL SISTEMA COORDENADO DE LA CALCITA 2.....	54

Siglas

M.C.: Mecánica Cuántica

Introducción

La Mecánica Cuántica es una de las teorías más importante en la física moderna, desde sus inicios presenta una idea radical que gira en torno a plantear un nuevo modelo físico del átomo que plantea la explicación teórica de lo encontrado experimentalmente a principios de siglo XX, en específico al que se refiere al espectro formado por la luz emitida por un tubo de rayos catódicos, en el cual se observa un espectro no continuo y es ahí donde radica su problema, los planteamientos para la época asumían que los átomos emitían ondas electromagnéticas y estas tienen energía, cediéndola para mantener la emisión, esto haría que el electrón oscile más cerca al núcleo y finalmente este colapsara, esto llevaría a que el espectro emitido por los átomos fueran continuos. Los modelos atómicos propuestos por Dalton, Rutherford y Thompson son incapaces de responder a este fenómeno por su planteamiento netamente clásico, este problema no tendría solución sino hasta 1913 cuando Bohr propone su modelo atómico en el cual las orbitas del electrón estarían cuantizadas; es decir, los electrones que orbitan el núcleo del átomo solo pueden estar en lo que se denomina orbitas permitidas y en ninguna otra que no fueran estas; la idea explica perfectamente el fenómeno del espectro discreto formado por los tubos de rayos catódicos, además de acoplarse con la cuantización de la energía planteada por Planck en su estudio de la radiación del cuerpo negro, siendo los cimientos para esta teoría.

Si bien la teoría cuántica construye una explicación alrededor de los experimentos realizados, existieron dificultades relacionados con el problema de completitud de la teoría cuántica a principios del siglo XX, en particular al que se refiere a la dinámica lineal de la mecánica cuántica y el postulado según el cual durante la medición se producía un colapso no lineal del paquete de ondas, que se conoce como el problema de la medición (Krips, 2017).

La medición puede entenderse como el acto de comparar un objeto con un patrón de medida previamente establecido, dándole un sentido matemático al valor obtenido después de realizar la medición. Este acercamiento conlleva a pensar que, desde la perspectiva de la mecánica clásica, los valores que son obtenidos por medio de la medición son completamente consistentes con la experiencia. Desde la M.C. la medición no está definida bajo los criterios anteriores. El argumento aceptado por la teoría cuántica frente al concepto de medida específica que el problema en cuestión no es de tipo teórico, si no que está relacionado con la posibilidad de que la explicación no se puede dar en consistencia desde la perspectiva clásica (Okon E. 2014).

En este aspecto, la Mecánica Cuántica ha sido abordada desde diversas líneas de enseñanza, en donde se enmarca la posibilidad de dar cuenta que la teoría cuántica es completa y funcional alrededor de las explicaciones de los fenómenos que ocurren a escala microscópica, de esta manera, lograr que sean totalmente coherentes y consistentes con el mundo real. ¿Por qué entonces, la teoría cuántica es tan complicada de entender? Una de las dificultades más importantes frente a este problema en el proceso de enseñanza – aprendizaje de la M.C. es la imposibilidad de determinar un modelo adecuado para la enseñanza de la teoría cuántica, por tanto, existen limitaciones al momento de relacionar la fase teórica y la fase experimental (Fanaro M. A., 2011).

Las limitaciones en la teoría cuántica existen, porque se presentan diversas interpretaciones referentes a los principios de la teoría, desde el mencionado problema de la medición hasta problemas en el campo filosófico, y es importante tener en cuenta que la teoría cuántica para ser considerada como ciencia, está sujeta a un criterio de validación que exige una explicación teórica y una corroboración experimental frente a los fenómenos que estudia. A partir de las anteriores consideraciones, la teoría cuántica exige propiamente una

rigurosa formalidad, pero se hace necesario abrir un espacio de reflexión en el cual, se posibilite reformar el dominio cognoscitivo referente a la mecánica clásica, que dará paso a entender la teoría cuántica (Fanaro M., Otero M 2001).

En este trabajo se aborda el problema de la medición a partir de la construcción de actividades experimentales, el cual busca reconciliar el origen experimental de la M.C. y la teoría, tomando en cuenta artículos relacionados con la enseñanza de la teoría cuántica y los debates que sostuvieron Niels Bohr y Einstein, Podolsky y Rosen en 1935.

De esta manera se presentan 3 capítulos: En el primero se amplía la descripción del objeto de estudio con el fin de acercar al lector a la representación de los procesos de enseñanza en la Mecánica cuántica y se hace un acercamiento al contexto problemático sobre el cual reside el problema de la medición, además de configurar la ruta de acción sobre la cual se realiza esta propuesta de trabajo.

El segundo capítulo contiene el abordaje de la actividad experimental como constructo en la formación de conceptos alrededor de la física, en particular de la mecánica cuántica. Para definirla se ha elegido trazar la evolución del papel del experimento a través del tiempo hasta la contemporaneidad, de esta forma se realza su importancia en la enseñanza de la teoría cuántica. Consecuentemente y en relación con objeto de estudio se presenta un segundo apartado, en el cual se hacen explícitas las diferencias que tiene el problema de la medición de una variable dinámica desde el contexto de la mecánica clásica y desde el contexto de la M.C. Se representan caracterizaciones de los diferentes conceptos que se emplea para la descripción de un sistema, de esta manera se muestra la formalización a partir de experiencias que se describen de forma paralela al momento de abordar dichos conceptos.

Finalmente, en el tercer capítulo se abordan las actividades experimentales a partir del tratamiento descriptivo con el objeto de ampliar la experiencia del estudiante al momento

de caracterizar la noción de observador y el concepto de medición. Por lo tanto, este capítulo se centró en el diseño de estas actividades y su formalización.

Capítulo I.

Caracterización del objeto de estudio

En el desarrollo de las ciencias y en particular de la física moderna, la teoría cuántica ha sido una de las ramas de la física que ha brindado explicaciones alrededor de los fenómenos que ocurren a una escala microscópica. Desde sus inicios la mecánica cuántica ha sido eje central de debates, que corresponden directamente a discrepancias que yacen desde su propio planteamiento, y del cual surge el problema de la medición. El objeto de estudio por lo tanto se enmarca en los problemas de enseñanza de la mecánica cuántica y el que se refiere en particular al acto de medir un sistema cuántico.

1.1. Contexto problemático

Desde la perspectiva de la enseñanza en física, la Mecánica Clásica y la Mecánica Cuántica M.C. se han desarrollado bajo dos ejes fundamentales, la teoría y la experimentación (Silbas y Sinarcas, 2013). Es así como, el experimento juega un rol importante en la enseñanza de la física con un estatus prioritario en la mecánica clásica, sin embargo, en la enseñanza de la M.C. éste no ha tenido un valor significativo (Hodson 1993), esto podría deberse posiblemente a que en la M.C. se aborda comúnmente la enseñanza convencional, prioriza el formalismo matemático y por lo tanto, presenta dificultades en los estudiantes debido al alto nivel de abstracción sobre el cual reposan los modelos de ciertos fenómenos cuánticos que se han intentado explicar (Moreira y Hercovitz, 2013).

Así mismo, la práctica convencional en la enseñanza de la M.C. conlleva a una orientación de tipo algorítmica (Greca y Moreira, 2009), para sustentar la construcción conceptual de saberes que no permiten un proceso de reflexión acerca de las abstracciones y sus implicaciones, lo que sin duda no permite que se comprenda la dimensión total del objeto de

estudio, desarrollándose en torno a una práctica operativa y sin análisis. Adicionalmente, el problema del uso indiscriminado de analogías para referirse a los fenómenos sujetos al estudio de la M.C, terminan convirtiéndose en problemas de contextualización del fenómeno puesto que las comparaciones se hacen en torno a fenómenos relacionados con la mecánica clásica, sin que se realice un adecuado tránsito entre dos perspectivas totalmente diferentes y causa confusión al momento de abordar conceptos en la M.C.

Esto podría explicarse porque comúnmente la física se enseña en cierto orden: el tradicional, que involucra primero lo clásico y posteriormente lo cuántico, razón por la cual salen a la luz preconceptos clásicos los cuales generan algún beneficio en el proceso del aprendizaje pero, por otro lado, un buen número de preconceptos se convierten en obstáculos representacionales dado que se pueden considerar los mismos principios para ambos casos sin tener en cuenta que difieren en sus planteamientos fundamentales (Greca y Hercovitz, 2013). Por lo que las caracterizaciones de estos conceptos en la M.C. deben estar sujetos y orientados a la reflexión conceptual debido a que los fundamentos son por lo general alejados de la intuición. En relación con esto, algunos de los problemas de la enseñanza de la M.C. surgen cuando se abordan conceptos que están previamente bien definidos desde el contexto de la mecánica clásica y se intentan relacionar con la perspectiva cuántica, por ende, no se tiene una plena claridad alrededor de estos conceptos (Greca, 2000), lo que conlleva a errores conceptuales reflejados en la práctica educativa y donde se ve la imposibilidad de resolver problemas como, dificultades en la argumentación y cierta apatía por el nuevo saber que se enseña, se asume la labor pedagógica como un trabajo repetitivo con una escasa reflexión e investigación.

Un claro ejemplo de lo anterior es el que conlleva la introducción del concepto de medición en la M.C, esta es por mucho una de las implicaciones más grandes que sufre el

aprendizaje de este campo de estudio dado que, desde sus inicios el problema de la medición este arraigado al desarrollo de tipo teórico y conceptual de la teoría cuántica. La medición desde la perspectiva clásica no depende del observador o experimentador ya que el sistema se comporta de la misma forma si es observado o no, y si se hacen mediciones de una variable con el sistema en las mismas condiciones el valor que se obtiene no varía. En contraparte existe la perspectiva cuántica donde el observador influye en el comportamiento del sistema y las mediciones que se realicen de una variable están sujetas a probabilidades de que el sistema se encuentre en cierto estado; esto supone una dificultad en la forma en que los estudiantes puedan potencialmente comprender este concepto sin que haya errores o malas interpretaciones.

1.2. Planteamiento del problema

Las caracterizaciones de los conceptos que se realizan actualmente en la M.C. y en particular del concepto de medición, se ven obstaculizados por la falta de información que se tiene cuando se modifican los modelos científicos de un determinado fenómeno, sin explicación alguna (Sinarcas & Solbes 2013). De esta manera no existen métodos de enseñanza completamente eficaces que permitan abordar conceptos fundamentales como la medición en la mecánica cuántica. Por lo que se hace necesario una reconstrucción de saberes que fomente la transición desde la perspectiva clásica a la cuántica del concepto de medida al momento de abordar la teoría cuántica. De esta manera, es importante considerar alternativas que faciliten este proceso, dado que el modelo tradicional no supe las necesidades al momento de dar explicaciones de forma exitosa.

Con esto, la actividad experimental cumple un rol de mediadora en los procesos de enseñanza-aprendizaje puesto que esta involucra como el formalismo de una teoría y la

práctica experimental (Greca, 2000), por lo que se propone que juegue un papel activo al momento de dar cuenta de los aspectos que giran alrededor del ámbito conceptual, en donde se encuentra la principal limitante del abordaje comúnmente tradicional que se le brinda a la M.C. Así mismo, es necesario ampliar el campo conceptual referente a los fenómenos que estudia la M.C. ya que la estructura de la teoría es tal, que para estudiarla se hace necesario introducir la idea de un observador externo al sistema de estudio; esta característica permite ver la necesidad de hacer uso de herramientas como la actividad experimental, que permita extender la comprensión del concepto de medida y lleve a la reflexión continua de la enseñanza.

1.3. Pregunta problema

¿Cómo a partir de una actividad experimental se puede abordar el concepto de la medición de una variable dinámica desde el contexto de la Mecánica Cuántica?

1.4. Objetivo general

Desarrollar una actividad experimental como herramienta que permita construir el concepto de medición de una variable dinámica desde la Mecánica Cuántica.

1.4.1. Objetivos específicos

- Establecer una revisión bibliográfica en torno al concepto de medición de una variable dinámica y sobre el papel del experimento para la enseñanza de la física y en particular de la Mecánica Cuántica.
- Realizar un análisis sobre el concepto de la medición de una variable dinámica desde el contexto clásico y cuántico que permita dilucidar su diferencia en cada contexto.

- Diseñar la actividad experimental que evidencie el papel del observador y el proceso de medida de una variable dinámica desde el contexto de la Mecánica Cuántica y que contribuya a futuras investigaciones.
- Generar un aporte al campo de investigación de la enseñanza de la mecánica cuántica a partir de una cartilla pedagógica dirigida a los estudiantes y que recoja los estudios realizados durante la investigación.

1.5. Justificación

Los desarrollos alrededor del siglo XX, hasta la actualidad consideran que la teoría cuántica ha tenido un papel relevante en la evolución tecnológica del hombre. En su aspecto divulgativo, la enseñanza de la M.C. ha logrado la reestructuración de conceptos a nivel metacognitivo, lo que conlleva así un cambio de paradigmas originados desde la perspectiva clásica. Además, se implica el hecho de que la teoría cuántica explica el comportamiento de la materia tanto a escala atómica como macroscópica aplicándose esta última en superconductores, gases cuánticos diluidos y luz láser, lo que genera que se tenga un pleno conocimiento del mundo del que nos rodea.

Por lo anterior, al momento de abordar la teoría cuántica, se debe tener claridad de los conceptos sobre las cuales se fundamenta, lo que hace necesario establecer estrategias que permitan disminuir las dificultades de enseñanza- aprendizaje de fenomenologías particulares de la M.C, buscar la construcción y el afianzamiento de conceptos, encaminados hacia la discusión y reflexión conceptual, algunos enriquecidos por el formalismo matemático pero no con el enfoque operacional como eje central de su desarrollo (Cuesta Beltran & Mosquera Suarez, 2017).

Esta propuesta atiende al perfil del Licenciado en Formación en Física, por lo que es pertinente contribuir con alternativas que logren acercar a los estudiantes al pensamiento

cuántico, en este caso el que corresponde al concepto de medición desde la Mecánica Cuántica de una forma dinámica y experimental.

1.6. Características de la Mecánica Cuántica – Antecedentes

Con el fin de atender la problemática de la enseñanza de la mecánica cuántica y el que se refiere en particular al uso de la actividad experimental como mediadora en los procesos de la enseñanza se ha realizado la siguiente revisión de textos bibliográficos que se toman como punto de referencia para el desarrollo de esta investigación:

1. Walteros, L. en el 2016 en su trabajo de grado titulado “*Actividades experimentales para la construcción de explicaciones alrededor de los fundamentos básicos de la Mecánica Cuántica*”, aborda actividades experimentales relacionadas con los experimentos de Stern Gerlach propuestos por Feynman para trabajar los principios de la M.C como, por ejemplo, en el concepto de superposición los estados propios en un sistema cuántico y la noción del observador. A partir de ello construye una actividad experimental que involucra el estudio y comportamiento de la luz y realiza diferentes montajes en donde explica cómo se puede realizar un acercamiento a los fundamentos básicos de la M.C. y brinda un enfoque de tipo fenoménico, adicionalmente realiza una formalización matemática usada por Feynman en el experimento de Stern Gerlach y la relaciona con esta actividad experimental. Este trabajo permite en la presente investigación dar un preámbulo para formalizar algunos conceptos básicos que giran en torno al entendimiento de la M.C, como es la noción del observador, las implicaciones que tiene al momento de considerarlo en el estudio de los sistemas cuánticos, la importancia del experimento en la enseñanza de las temáticas abordadas en la mecánica cuántica y finalmente, la construcción de actividades experimentales que giran en torno a los principios que rigen la Teoría Cuántica.

2. Malaver J en el 2016 presenta el trabajo de grado titulado “*La medición de una variable de estado desde el contexto clásico y desde el contexto cuántico*”, en este trabajo se realiza un desarrollo sobre la actividad experimental en la física y en particular en la M.C. Abarca desde sus inicios la importancia que tiene el experimento en la construcción de conceptos en las ciencias y el concepto de la medición de una variable desde un contexto de la mecánica clásica y la M.C. haciendo uso de comparaciones, permite determinar las diferencias de conceptos básicos de ambas teorías, planteando una actividad experimental que usa un montaje de óptica y el estudio de la luz, lo dimensiona para relacionar aspectos de la Teoría Cuántica, como el observador, el observable y la ecuación de Schrödinger para determinar que la medición de una variable de un sistema cuántico viene predeterminada por el montaje experimental, que en la teoría se presenta datos probabilísticos. Malaver concluye que el concepto de medida de una variable en la M.C. queda en términos del aparato de medida y por lo tanto el observador afecta drásticamente al sistema. La importancia de trabajo para la investigación se encuentra en reconocer los aspectos a tener en cuenta al momento de abordar el concepto de medición desde los dos contextos, tanto el clásico como el contexto cuántico, así como la caracterización de los sistemas para realizar la transición de conceptos que están previamente establecidos en la Mecánica Clásica.

3. López G presenta en el 2014 su trabajo de grado titulado “*Enseñanza de la Mecánica Cuántica en la escuela media a partir del concepto de superposición*” desarrollada en la Universidad Nacional de Colombia, en esta investigación se realiza una sistematización de aula en la escuela media frente a unas experiencias sobre la enseñanza de los fundamentos de la M.C. a partir del análisis de los sistemas cuánticos de Qubits, generado por la observación de la experiencia con el interferómetro. Su finalidad es implementar una estrategia que permita evidenciar el principio de superposición y contextualiza su idea en la

aplicación práctica que tiene para el área de informática cuántica. Así pues, López concluye que se puede realizar actividades experimentales que permitan introducir conceptos de la M.C. en la escuela media. A partir de esto, concluye su investigación que al momento de abordar estos principios es necesario tener claro que los conceptos cuánticos suelen ser ajenos a la experiencia por lo que se tiene que realizar reflexiones críticas frente a las actividades experimentales propuestas. Este trabajo de maestría evidencia el campo de acción frente al planteamiento de montajes que permiten al estudiante construir conceptos en la teoría cuántica, en particular el de superposición. A medida que avanzan las distintas actividades experimentales, se hace uso de nuevas propuestas que orientan la práctica educativa a una renovación curricular y adopta nuevos enfoques metodológicos que permiten abordar y describir temas de avanzada en el desarrollo social y tecnológico. Por último, se analizó las observaciones que realiza frente a futuros trabajos de este tipo, adecuado a la actividad experimental para que se presente adecuadamente.

4. Rozo M, Walteros A, Cortes C. en el 2019 presentan el artículo “La actividad experimental como una parte fundamental de la física moderna: el caso de la mecánica cuántica” de la revista *Tecné Episteme Didaxis* de la Universidad Pedagógica Nacional de Colombia, en este artículo se realiza una propuesta metodológica al momento de abordar los fundamentos de la teoría cuántica, para ello utiliza un enfoque fenoménico como herramienta para definir la noción de estado y el principio de superposición necesarios para entender la Teoría Cuántica. Por lo tanto, desarrollan actividades experimentales donde involucran al estudiante para dar explicaciones en torno al fenómeno estudiado y se fundamenta en tres ejes fundamentales: maneras de proceder, maneras de pensar y, maneras de construir y reconstruir conceptos. Con lo cual se concluye que existe la necesidad de plantear otras formas de abordar la enseñanza de la M.C, que reconcilie el experimento y la teoría de tal

manera que le permita a la actividad experimental jugar un rol fundamental en este proceso. Desde este artículo, la presente investigación retoma el hecho de plantear una metodología en donde se involucre directamente las experiencias y el uso de analogías que permiten tener un acercamiento a la noción de observador y al principio de superposición. De tal manera, realizaron las consideraciones pertinentes para poder plantear los experimentos a través de las formalizaciones hechas por Dirac y la importancia de establecer la relación frente a la representación matemática del estado del sistema, la superposición y el comportamiento de los sistemas cuando se realiza una medición.

1.7. Marco teórico

El problema de la medición en la mecánica cuántica es catalogado como un problema de tipo ontológico (Fortin, 2016), haciendo referencia que el problema cuántico ontológico es aquel en donde los resultados o situaciones de los objetos cuánticos no tienen un comportamiento como el que se esperaría, de acuerdo con nuestra manera usual (clásica) de pensar y considerar los fenómenos físicos y del cual puede surgir diversas interpretaciones.

En consecuencia, el problema de la medición ha sido abordado desde distintas perspectivas propuestas desde principios del siglo XX hasta la actualidad, en donde se hace hincapié en la mayoría de los casos a problemas en la instrumentación con la que se mide hasta la descripción de los fenómenos que nos ofrece la teoría cuántica (Okon, 2014). Asimismo, es importante reconocer que la interpretación de Copenhague nos ofrece el panorama más aceptado alrededor del problema de la medición y la cual será utilizada en el presente trabajo, dada la importancia que tiene al momento de brindar una solución.

1.7.1 Marco teórico pedagógico

La actividad experimental en la enseñanza de las ciencias en especial de la física supone un reto para los docentes y estudiantes desde hace muchos años, diversas propuestas de enseñanza se han planteado e implementado en diferentes aulas, sin embargo, se resalta el rol del experimento en la enseñanza y destaca la importancia de la explicación que pueda dar los estudiantes al fenómeno que observan y estudian (Malagon, 2013).

Es un proceso que se desarrolla en 3 pasos esenciales para que el experimento no solo cause interés en el estudiante, sino que suministre conceptos y genere análisis en ellos que fortalezcan su proceso de aprendizaje: 1). La ampliación de la experiencia, 2). La construcción de formas de hablar del fenómeno de estudio y 3). La concreción de supuestos conceptuales (Malagon, 2013).

Andrés Z. en el año 2006, sigue por la misma línea conceptual y expone una propuesta análoga en donde la actividad experimental presenta ideas acerca de la epistemología del experimento, declarando que la concepción “estándar” se basa en darle un rol verificativo a la teoría y su contraparte “la no estándar” refiere que el análisis de datos supone 3 elementos fundamentales: el procedimiento material, el procedimiento instrumental y la interpretación de los datos obtenidos. Esto a su vez puede ser interpretado como una forma de otorgar a la actividad experimental un papel significativo en las aulas de clases puesto que se centra en la importancia de la observación de un fenómeno, el estudio de su comportamiento y la toma de datos, lo que puede orientar a los estudiantes hacia la generación de hipótesis y análisis del objeto o fenómenos que se estudian a nivel tanto macroscópicos como microscópicos, así como la medición de variables, comportamiento y evolución.

Teniendo en cuenta lo anterior, las perspectivas que tienen los diferentes autores citados se hacen primordial que el experimento se vea involucrado en las diferentes temáticas que se

enseñan en ciencias y en particular en la MC, -depende posiblemente, de los objetivos de aprendizaje con los que se oriente -. En adición, este tipo de abordaje desde la actividad experimental facilita la enseñanza para la aprehensión de conceptos y un proceso de ampliación del conocimiento.

Para Solbes V. (2013), la transición de la idea del experimento desde una mirada clásica hacia una cuántica supone hacer modificaciones a la forma en como se muestra el experimento a los estudiantes y como los datos y medidas que se obtienen pueden ser interpretados de diversas formas por la escala a la que se trabaje (microscópica o macroscópica).

1.7.2. Marco teórico disciplinar

El concepto de medición en ciencias naturales ha formado parte fundamental del desarrollo de las teorías y concepciones que se tienen sobre el mundo; desde que el hombre empezó a darle explicación a los fenómenos naturales que ocurren a su alrededor. Y es que la medición de una variable ha permitido a diversos exploradores como a científicos, estudiar el comportamiento de un objeto y/o sistema con el fin de comprender y poder describir el mundo físico. En este punto, el experimento toma un papel fundamental en el desarrollo de las diversas interpretaciones que se tiene sobre el mundo; el diseño de un montaje, la observación de lo que se evidencia en el experimento y la medición conforman el eje central para la actividad experimental.

Isaac Newton (1687) en su libro “*Philosophia naturalis principial mathematica*” dio un precedente para que diversos fenómenos pudieran ser estudiados y analizados experimental y matemáticamente; gracias a esto, es que es posible describir el movimiento de los cuerpos a nivel macroscópico. A partir de estas concepciones se puede medir una variable dinámica en un sistema e identificar la forma en cómo evoluciona al interactuar con él, también medir

más de una variable dinámica a la vez y determinar en su totalidad el comportamiento del sistema. Ahora bien, existen diversos sistemas para los cuales, medir el cambio de una variable, su evolución, y describir su comportamiento en general es distinta. Por lo tanto, es necesario el uso de otras leyes y parámetros para realizar la descripción de estos sistemas.

Sin embargo, existen sistemas que se rigen bajo criterios diferentes a los clásicos, por ejemplo, se encuentran los fenómenos a una escala atómica -del orden de $10^{-11} m$ en el S.I, en donde se presenta una alta complejidad y dificultad para interactuar con los fenómenos que allí suceden y donde se hace necesario hablar de los distintos estados de un sistema (estado cuántico) pues son muy diferentes a los macroscópicos.

Para Niels Bohr (1935-1938) “el mundo cuántico” y las propiedades físicas que rigen a estos sistemas microscópicos están caracterizadas por un modelo atómico en el cual las órbitas del electrón están cuantificadas, es decir, los electrones que orbitan el núcleo del átomo solo pueden estar en lo que se denomina orbitas permitidas y en ninguna otra que no sean estas, algo que difiere con respecto a otros modelos atómicos propuestos para la época. Por otra parte, Bohr, aborda el problema de la medición a partir de los debates que sostuvo con Einstein, Podolsky y Rosen quienes refutaban la idea, la cual afirma que las propiedades físicas de los sistemas cuánticos de un modo fundamental dependían de las condiciones experimentales y por ende de la medición.

De lo anterior, surge la necesidad de hablar propiamente de la medición en un sistema cuántico, por lo tanto, para esta investigación se abordan las principales nociones que rigen este concepto desde esta perspectiva. Cuando se habla de un estado en un sistema cuántico, a diferencia del sistema mecánico clásico, al realizar varias mediciones del sistema en una “misma condición” es posible obtener valores distintos en la variable que se mide; por esta razón, se habla de la probabilidad de encontrar a un sistema en un estado u otro, debido a que

el comportamiento de un estado cuántico para un observable antes de realizar una medida es incierto, pero se encuentra dentro de las probabilidades dependiendo de la variable dinámica que se desee inspeccionar en el sistema cuántico. Una forma de representar matemáticamente el estado de un sistema cuántico es a través de un vector de estado, este es propio del operador que representa alguna propiedad del sistema, y permite dar cuenta de los posibles valores que puede tomar un sistema cuando se quiere medir. Paul Dirac (1926), desarrolla un trabajo matemático en el que describe por medio de la notación Bra-Ket las magnitudes medibles en el sistema, esto con el fin de poder explicar su estado y usa como base el espacio vectorial complejo propuesto por Hilbert.

Por su parte, Heisenberg (1927) afirma que el hecho de que cada partícula lleva asociada consigo una onda, impone restricciones en la capacidad para determinar al mismo tiempo su posición y su momento. Gracias a este principio se abre paso al estudio de los sistemas cuánticos desde perspectivas distintas a las propuestas por Schrödinger. Con esto se perfila lo fundamental para el estudio de estos sistemas a través del uso de los operadores.

Los operadores son aquellos que representan una magnitud física -es decir una magnitud observable- desde el contexto de la M.C, estos se representan mediante un operador lineal autoadjunto que actúa sobre objetos en el espacio de Hilbert del sistema físico considerado, este operador debe ser hermítico¹ para poder medirse y obtener uno de los posibles estados propios del observable y cumplir con la propiedad asociativa². Teniendo en cuenta estas consideraciones, surge la ecuación de valores y vectores propios la cual, brinda un

¹ Operadores hermíticos: En la mecánica matricial un operador Hermítico es quien cumple con las dos siguientes condiciones en general. 1. $A = A^t$ (una matriz A es igual a la transpuesta conjugado complejo de sus elementos).

² Propiedad asociativa: Un operador en mecánica cuántica debe cumplir con la propiedad asociativa bajo la multiplicación, si X, Y, Z son observables entonces $(XY)Z = X(YZ)$

formalismo matemático con relación a los posibles valores o estados que puede tomar una variable dinámica, es decir, un operador en un sistema de estudio.

Capítulo II

El experimento como apropiación de saberes

La apropiación social del conocimiento es una de las condiciones fundamentales para enfrentar algunos retos en la cultura científica. Por ello, se plantea la necesidad de tomar acciones para formar estudiantes para participar en las diferentes etapas de los procesos en ciencia y tecnología. Promovido por esta idea Olive (2009), concluye que se debe generar la construcción de modelos en donde se haga presente nuevos enfoques metodológicos y se promueva la formación de grupos de trabajo que partan desde la recuperación y sistematización de saberes y el estudio de un fenómeno en particular, dando lugar a la construcción de espacios para el diálogo de conocimiento.

Esto, a su vez significa que el interés de promover una cultura científica y tecnológica se relaciona directamente con:

“El desarrollo de capacidades de los grupos sociales para identificar problemas y construir propuestas para solucionarlos, participando en procesos de generación, evaluación y uso de conocimientos científicos y tecnológicos para modificar su entorno de acuerdo con sus intereses y preferencias” (Lazo Ramirez , y otros, 2009).

Dado que el experimento es partícipe de la cultura científica, este se puede articular a la apropiación de saberes, donde se tiene una finalidad común, y es la de posibilitar ambientes o escenarios para la innovación, estableciendo relaciones de intercambio y transformación del conocimiento.

2.1 El experimento como estrategia para la enseñanza de la Física

En el entorno educativo de la enseñanza de la física, la actividad experimental y la teoría juegan un papel fundamental en el proceso de enseñanza - aprendizaje. El experimento se ha

constituido como base en la ciencia, por tanto, debe estar de ligado a la educación y las prácticas para la comprensión y abstracción de conceptos pues la actividad experimental le permite al estudiante la apropiación de saberes (Duran M, 2016). Esta perspectiva dota a la actividad experimental como mediadora en los procesos de enseñanza en la física; sin embargo, los modelos de enseñanza tradicionalistas le otorgan un papel secundario en el que se prioriza la fase teórica y conceptual, debido a que existe una brecha en la cual la mayoría de las aulas no existen herramientas para comprender los fundamentos de las teorías y su evolución en ciencias (Sinarcas & Solbes , 2013).

Desde esta figura, el desarrollo de la actividad experimental en la contemporaneidad ha sido caracterizada desde diferentes perspectivas de estudio, argumentado el valor para potenciar objetivos relacionados con el conocimiento conceptual y procedimental. Se presenta a través de un continuo que va desde la caracterización estándar de la ciencia hasta una concepción que responde más a los aspectos metodológicos relacionados del proceder científico. Para definir las concepciones epistemológicas de la actividad experimental se hace necesario plantear, por un lado, las experiencias que están relacionadas con los hechos dados directamente por la naturaleza (Arruda y Laburu, 1998) y, por otra parte, la visión del racionalismo crítico y los axiomas extraídos por los hombres los cuales repercuten directamente en la forma en cómo se perciben los fenómenos.

Como consecuencia se puede encontrar una correspondencia entre los efectos y el experimento para corroborar su veracidad y una comprensión del mundo físico. Desde la perspectiva epistemológica de la concepción estándar de la actividad experimental basada en el enfoque empírico, se hace la siguiente descripción de sus principales características:

Según Maite Ma. (2006), la actividad experimental sustenta la verificación sobre la teoría, por lo que, bajo este enfoque, si la teoría no es demostrable bajo la actividad experimental,

esta se rechaza ampliamente. Por lo tanto, se puede inferir que la concepción estándar de la actividad experimental se rige bajo un carácter totalmente objetivo, donde su principal fuente es la observación, y en la cual los procedimientos e instrumentación que se usa para realizar una medición no debe alterar el sistema medido.

Se puede exponer en contraparte con lo anterior la perspectiva de la actividad experimental denominada concepción no estándar descritas por (Abd-El Khalick y Lederman, 2000a), que exponen lo siguiente:

“La actividad empírica define los procesos que se plantea una comunidad con un cuerpo de conocimientos en común, posibilitando la comprobación de las teorías ya establecidas, discrepan de las predicciones realizadas por estas, además de resolver problemas, cuyo objeto de estudio se pone en función de explorar nuevos dominios para la construcción de explicaciones”.

A fin de que la actividad experimental debe entenderse no solamente como herramienta verificativa de la teoría, si no que permita ampliar el campo de conocimientos, de tal manera que se ponga en tela de juicio una teoría, fomentando espacios reflexivos y que estén encaminados a construir nuevas explicaciones alrededor de los fenómenos estudiados en cuestión.

De esta forma se configura como un recurso para plantear prácticas en donde se tengan en cuenta el favorecimiento del análisis de los resultados obtenidos; de manera que se busca que estas posibiliten la reflexión y propicien un desarrollo cognitivo. Es así, como se sustituye la estructura de tipo receta sobre el cual reposan muchas de las actividades experimentales que se ubican en el modelo tradicional de las mismas. Por otra parte, las características de las concepciones permiten cambiar la forma a la que se refiriere al hablar

directamente de una metodología experimental y más propiamente de la actividad experimental en donde se concibe como parte de un constructo de conocimientos y contribuye a incluir una diversidad de métodos.

2.2. El experimento en Mecánica Cuántica

Los esfuerzos por reestructurar la enseñanza – aprendizaje de la física cuántica han sido numerosos estos últimos años; esto se puede deber posiblemente a que, no se utiliza adecuadamente las herramientas al momento de diseñar una propuesta pertinente para presentar un temario (Cuesta Beltran & Mosquera Suarez, 2017). En el caso de los fenómenos cuánticos los conceptos y los modelos involucrados están más alejados de las percepciones cotidianas que los tópicos asociados a la física clásica, por lo que se entiende que dista de ser llevado de la misma manera al aula que estos (Sinarcas & Solbes , 2013). La visión deformada que se tiene en la enseñanza de la física cuántica al momento de presentarse en el aula provoca que estos fenómenos físicos -en específico la M.C. - no sean comprendidos con facilidad ya que esta trabaja causas y efectos complejos y altamente contraintuitivos y así mismo, se hace necesario tener un tratamiento correcto de las formalizaciones matemáticas que esta requiere, algo casi imposible de entender para los estudiantes (Johnston et al., 1998).

Seguido a esto, existe una interpretación equivocada sobre los pocos aportes que puede realizar la actividad experimental a la enseñanza de la M.C. que se ve opacada debido al énfasis que se da al presentar teorías que están centradas sólo en formalismos matemáticos y no en comprender el fenómeno a través de la observación, tampoco busca hacerse una relación y transición en la práctica experimental de fenómenos clásicos a los cuánticos. Por lo que se hace necesario abordar la teoría cuántica con un criterio que se salga de lo que usualmente plantean los libros, pues estos presentan la teoría cuántica estándar mediante un

conjunto de principios, postulados, leyes o reglas fundamentales, cargadas de formalismos y sin un panorama que brinde claridad sobre lo que realmente define cada concepto de la teoría cuántica (Vaidman, 2003).

De esta manera, la actividad experimental debe jugar un rol de mediadora en la construcción y adquisición de aprendizaje en relación con la enseñanza de la M.C. y sobre algunas temáticas particulares que se tratan en este trabajo como es el caso de la medición de una variable dinámica, y al que se refiere al principio de incertidumbre, ya que su desarrollo se planteó bajo un profundo tratamiento matemático en 1927 por Heisenberg, bajo las condiciones de la mecánica matricial en la cual los observables, que es lo que podemos medir de un sistema cuántico, son representados por medio de matrices.

Según Malagón (2013), la actividad experimental se rige bajo 3 parámetros fundamentales, el primero permite a través del experimento la ampliación de la experiencia, en el cual, se presentan algunos casos en donde no se tiene una experiencia sensible apreciable, y que no permite tener una relación directa de observación que aparezca frente a la conciencia. Un ejemplo desde la mecánica cuántica es el caso del principio de incertidumbre en donde la teoría explica que la observación de un fenómeno perturba el objeto observado, por lo que el observador debe dar cuenta de ello, algo que se puede considerar demasiado contra intuitivo para no ser revisado desde la perspectiva experimental.

Por otra parte, la actividad experimental permite la construcción de formas de hablar del fenómeno. Un aspecto importante del proceso de construcción de un fenómeno o fenomenología es que a su vez que el ámbito de la experiencia se transforma, también lo hace el ámbito del lenguaje con el que es posible referirse a esa experiencia (Malagón, 2013). Así, N. Bohr desarrolla su propia interpretación de la mecánica cuántica, en donde es imposible hablar del mundo atómico, utilizando el mismo lenguaje que se usa para describir eventos u

objetos, enfatizando que cuando se realiza una pregunta acerca de la naturaleza, también se debe especificar el procedimiento experimental con el que se va a responder esta pregunta, por lo tanto, realizar este experimento, altera el estado del objeto, concluyendo que el resultado del experimento está estrechamente relacionado con el procedimiento experimental que se utilice alrededor de la medición en M.C.

Finalmente se encuentra la concreción de supuestos conceptuales en donde se incluye además todo el bagaje del espacio experimental, el proceso de elaboración de instrumentos de medida y la construcción de escalas de medida de las magnitudes involucradas en la constitución de la fenomenología estudiada (Malagon, 2013). Sobre la concreción de supuestos conceptuales, es imprescindible hablar acerca de las diversas rutas de constitución y ampliación de la experiencia fenoménica, en la cual se articula el planteamiento de problemas conceptuales y la orientación de procesos de formalización; en esta etapa es de vital importancia hacer una reflexión acerca de los conceptos que giran alrededor de la mecánica cuántica, tal es el caso, de medida y el principio de incertidumbre en donde se ven presentes los resultados probabilísticos y se evidencia su carácter indeterminista.

Así mismo, en el recorrido de las propuestas que en la actualidad destacan la enseñanza de la M.C. en torno a las actividades experimentales, se destaca la capacidad que tiene el hombre al momento de abordar las implicaciones que conllevan a una visión cuántica de la naturaleza. Bajo este proceder se rige un enfoque fenoménico como herramienta para la enseñanza de la M.C., de esta manera se plantean y desarrollan actividades experimentales entendidas como la estrategia para involucrar a estudiantes y docentes en la construcción de explicaciones en torno al fenómeno (Rozo Clavijo, Walteros, & Cortes, 2019). Este tipo de planteamientos hace que en la actividad experimental exista una riqueza conceptual puesto que lleva al estudiante a originar preguntas y situaciones problema, no únicamente para

realizar una descripción y justificar la teoría, lo que permite mostrar su relevancia en la construcción de conocimiento.

La formalización de conceptos a partir del origen de situaciones problemas en torno al fenómeno hace que el estudiante tenga que realizar reflexiones acerca de este, lo que le permite la construcción y reconstrucción de conceptos. Además de maneras de proceder frente a la experiencia observada, lo que sin duda lo lleva a la formalización del experimento realizando una descripción de cualidades y características, propiedades en la construcción de explicaciones que le sirven al estudiante para hablar del fenómeno (Rozo Clavijo, Walteros, & Cortes, 2019).

Finalmente, este enfoque práctico experimental permite en el campo de la enseñanza de la M.C. cambiar la visión que se tiene de la actividad experimental en relación con la relevancia que se la da para la formación científica. Permitiéndole ampliar el campo de acción frente a la forma de enseñar conceptos y fenómenos de física. Lo que fomenta así, una transformación de las perspectivas que se tienen sobre el experimento para que este sea utilizado para trabajar fenómenos microscópicos (Rozo Clavijo, Walteros, & Cortes, 2019).

2.3. Medición de variables desde la perspectiva clásica y cuántica

En este apartado, se realizará una descripción con respecto a la medición de una variable en mecánica clásica y en mecánica cuántica, teniendo en consideración conceptos como medida, incertidumbre, observador y como estos son determinantes al momento de efectuar una medición alrededor de un fenómeno físico.

2.3.1. Sobre la medida clásica de una variable dinámica

Cuando se habla de medición en mecánica clásica se hace referencia a la comparación entre una representación de tipo matemático y el valor obtenido al realizar la medición de un

sistema en específico. En la mecánica de Newton (1687), los sistemas estudiados se distinguen por gozar de una posición determinable en principio con arbitraria precisión, siendo el objetivo principal de la mecánica clásica, poder describir el movimiento de una partícula en el espacio y su evolución temporal. Las variables que determinan la evolución de un sistema respecto a su movimiento en mecánica clásica son la posición (x) y el momento (p) las cuales son denominadas variables dinámicas.

En efecto, se puede encontrar distintas formas (métodos) que se usan para representar cuantitativamente la posición de una partícula en el espacio. La descripción precisa de la posición en el espacio se hace generalmente a partir de un punto de referencia contenido dentro de un espacio relativo. De tal manera se reconocen tres elementos esenciales para describir en forma precisa la posición de un punto P en el espacio. En primer lugar, está un sistema de referencia que tiene un origen O respecto del cual describimos el punto P . El segundo elemento es un sistema de coordenadas, este en general es un sistema de coordenadas cartesianas que describe un espacio euclídeo, para definir la ubicación $P = \{P_X, P_Y, P_Z\}$ con base en un sistema de referencia $O : \{0,0,0\}$. Finalmente, el último elemento es un sistema de unidades utilizado para expresar las coordenadas. Así, la descripción en un caso general de cualquier posición P en el espacio se hace a partir de un punto de referencia O .

La posición referida al punto O , constituye lo que matemáticamente se conoce como un vector. De tal manera que, para el proceso de medición de la posición de una partícula en mecánica clásica, basta con conocer los 3 elementos anteriormente mencionados y para cuando la partícula se está moviendo, se incluirá un cuarto que será el tiempo, además, se pueden reconocer los diferentes sistemas de coordenadas, puesto que la descripción

matemática del vector puede variar y depende del sistema de referencia con el cual se describe.

Con respecto a la variable dinámica momento (\vec{p}), la medición de esta viene dada por la cantidad de movimiento asociada a un sistema. Está caracterizada de manera clásica como el producto de la masa de una partícula y su velocidad. Así, si se conoce el valor de la masa de la partícula a la cual se quiere describir su movimiento, es necesario medir la velocidad a la que esta se mueve; adicionalmente, las posiciones están dadas por instantes, pero, cuando se habla de velocidad se pretende describir el movimiento de la partícula en el tiempo; es decir, conocer la posición en un espacio relativo en un rango de tiempo. En este punto se hace necesario seleccionar un rango de espacio, que estará dado entre dos puntos denotados como $(x_f - x_i)$ donde x_i hace referencia a la posición inicial y x_f a la posición final de la partícula en su movimiento y el rango de tiempo de este movimiento es el tiempo que tarda en recorrer dicho espacio $(t_f - t_i)$ en el cual t_i es el tiempo inicial asociado al punto inicial x_i , y t_f es el tiempo final asociado a la posición final x_f .

Entonces, es importante hablar acerca del estado de movimiento en los sistemas clásicos, pues está relacionado con conocer su comportamiento en términos del movimiento que realiza y poder describir tanto matemática como experimentalmente lo que allí sucede. Las formas de estar de un sistema se relacionan con la cualidad del movimiento y este define el estado mecánico del mismo. Por lo tanto, al hablar de ese estado mecánico de una partícula u objeto, este queda completamente determinado si se conoce su posición y cantidad de movimiento, siendo estas simultáneamente medibles durante la práctica experimental, ya que estas variables están perfectamente definidas en el tiempo y en principio con la precisión que se desee. Por ejemplo, si se conoce matemáticamente y con precisión las posiciones y

velocidades de un sistema de N partículas contenido dentro de un rango de espacio determinado, teóricamente se pueden dar razón del comportamiento del sistema con funciones vectoriales, las cuales proporcionan por medio de ecuaciones, las posiciones de una partícula en cualquier instante de tiempo.

Así, para saber cómo evolucionan las variables en un sistema dinámico con el paso del tiempo se hace uso de ecuaciones diferenciales, las cuales permiten describir el comportamiento del sistema y su evolución. Al solucionarlas se obtienen familias de funciones que dan cuenta de los cambios en la posición y momento del sistema en el tiempo si se conocen las condiciones iniciales (Cuentos cuánticos, 2010). Las anteriores características frente a los sistemas mecánicos clásicos son solo una manera de expresar en qué casos se puede presentar la medición frente a los diversos sistemas y las formas de estar de estos. Adicionalmente de estas categorizaciones, se dispondrá de información acerca del “¿Cómo se mide?”, con el fin de construir una base más fundamentada que permita emitir un juicio asertivo sobre la concepción de medición desde la perspectiva clásica. En el proceso de medición, el instrumento o aparato con el que se realice la práctica experimental es determinante para conocer los valores que se obtengan al realizar la medición de la variable que se quiere conocer, por dos razones principales:

La primera, las escalas y unidades de medida de un instrumento, estas están determinadas por la persona que diseña, y crea el instrumento, tomando en cuenta los estándares del SI (Sistema Internacional de medidas), y también por una magnitud física medible, es de resaltar que las unidades que se utilicen en el aparato pueden trabajarse de dos formas, la primera, las que surgen de forma empírica durante el diseño del aparato y en donde es posible relacionar unidades de medida ya existentes; y la segunda, aparatos de medida con unidades ya existentes y establecidas para medir una variable.

La segunda, al momento de realizar una medición, los instrumentos influyen en los resultados medidos por la construcción y estructura del aparato, su sensibilidad y precisión, esto es determinante en los valores que se obtienen al hacer mediciones de una variable en el sistema. La sensibilidad en un aparato de medida está dada por la facultad que tiene de medir los cambios de una variable dinámica dentro de un rango dado, es decir, la capacidad que este tiene de medir valores ya sea pequeños o grandes, por ejemplo, en el rango de valores influye la escala respecto al objeto medido. La precisión de un aparato se relaciona con qué tan bien está construido, influyen los materiales con que se ensambla, el proceso de construcción y que tan perfeccionado esté, esto se relaciona así, con el margen de error que puedan tener los datos que se midan de la variable dinámica, entre mejor esté construido el aparato y mayor sea su precisión, menor será su margen de error al momento de tomar datos.

Otro concepto importante es el de la incertidumbre de medida, este se define como el intervalo de “duda” al cual se le asocia un valor, y donde se aproxima al valor numérico “medido” con el instrumento; un ejemplo de esto es cuando se mide con una cinta métrica, la medición que se realiza de algún objeto con esta cinta puede resultar en un valor que está entre dos de las líneas que marcan los milímetros, ¿bajo qué condiciones se da razón de un valor exacto de la medida del objeto?, cuando esto sucede se ve manifestada la incertidumbre en que se le da un valor a la medición y se realiza las aproximaciones al valor verdadero.

En este sentido, se aclara que hay dos tipos de estimaciones, la estimación en cálculo o cálculo estimativo, refiriéndose a los resultados que pueden establecerse en operaciones aritméticas, el segundo referido a los juicios acerca de una medida de una determinada cantidad o bien la valoración del resultado de una medida (Segovia y Castro, 2013). En los procesos de estimación de medida están implicados todos los componentes de estimación en cálculo, lo que hace que estimar en medida, en cierto grado de exactitud, sea complejo y

suponga el manejo de habilidades como la comprensión de la cualidad que se va a medir y el concepto de unidad³.

La medición está sujeta, de esta manera a dos causales de errores, el primero es de carácter convencional, en el cual los errores accidentales o aleatorios aparecen cuando se hace mediciones repetidas sobre una misma variable y se obtiene diferentes resultados, con igual probabilidad de estar por arriba o por abajo del valor real; la siguiente causal de error deviene de los errores de tipo sistemático, que es una desviación constante de todas las medidas siempre hacia arriba o hacia abajo del valor real producido por la calibración del instrumento de medida. De tal manera que para los sistemas clásicos los errores de carácter experimental se trabajan por medio de estimaciones y para algunos casos es despreciable, tal como se afirma:

“Los errores que en las mediciones clásicas aparecen, pueden ser sustraídos cuando no es necesaria una rigurosidad inusitada, por lo que el tratamiento estadístico no tiene una relevancia considerable en el valor de los datos medidos. Cuando las incertidumbres se puedan obviar, se dice que se mide sistemas macroscópicos” (Malaver, 2016, p. 13).

2.3.2 Sobre una variable dinámica en Mecánica cuántica

Para hablar de lo que se considera cómo grande o pequeño desde la perspectiva de la M.C., se considera que un sistema puede ser observado únicamente cuando existe una interacción con algo externo a este, dicha interacción altera al sistema, o lo modifica. En el caso de los sistemas clásicos la alteración que produce tal interacción se considera insignificante o que se puede despreciar y esto se asocia al concepto de lo que es grande o macroscópico. Para el

³ Concepto de unidad: aplicación mental de un instrumento de medida, iteración de la unidad para ser la estrategia más comúnmente utilizada para la estimación de medida.

caso de la M.C. esta interacción afecta al objeto, entonces, no se desprecia y se asocia al concepto de lo que es pequeño o microscópico.

La existencia de la física cuántica supuso una ambigüedad inevitable al describir estos sistemas microscópicos, denominados atómicos y sub- atómicos. Sobre su actividad diaria, el físico describe y calcula trayectorias clásicas de las partículas, no solo para interpretar datos, sino también para diseñar el aparato con el que se produce estos. Por ejemplo, como un físico de alta energía reconstruye eventos que involucran un laberinto de partículas, producido por una colisión subatómica compleja (Kripp H, 1999); pero, el comportamiento de estos sistemas rara vez pueden describirse totalmente desde un contexto clásico.

Con lo dicho anteriormente, surge lo que se conoce como el “problema de la medición” en la M.C. Descrito por primera vez, en los debates sobre la “interpretación de Copenhague” de Niels Bohr. Bohr sostenía que las propiedades físicas de los sistemas cuánticos dependían de un modo fundamental de las condiciones experimentales, que incluían las condiciones de medición, afirmando que “el procedimiento de medición ejerce una influencia fundamental sobre las condiciones en las cuales se basa la propia definición de la cantidad física en cuestión” (Bohr, 1935, p. 1025). Consiguiente, la consolidación de la idea propuesta por Bohr en la escuela de Copenhague fue rechazada por Albert Einstein (Kripp H. 1999). El desacuerdo de Einstein con Bohr está registrado en el conocido artículo EPR (Einstein, Podolsky, Rosen de 1935). La argumentación de Einstein surge desde una posición realista, bajo condiciones ideales, las observaciones y en general las mediciones, reflejan una realidad externa que existe de forma independiente. En particular, EPR expresa un criterio de realidad física desde un punto de vista que, siempre que sean reales, cuando observamos objetos bajo condiciones ideales se ve cosas en sí mismas, esto es como existen independientemente de ser percibidas. Por lo que, los objetos existen independientemente de nuestras observaciones,

además que, al verlos, muestran como son en realidad. Por lo que las observaciones ideales reflejan la forma en que las cosas son no solo durante, si no también inmediatamente antes y después de la observación.

La propuesta del artículo EPR fue ampliamente rechazada por Bohr y Heisenberg; como lo veremos en este capítulo, se expresa el acuerdo que se tiene por la idea propuesta por Bohr, referente a la posición de considerar los actos de observación y medición como constituyentes de los fenómenos. En consecuencia, se puede decir que, al realizar una medición sobre un sistema cuántico, este se perturba de manera incontrolable lo que podría conllevar a no tener certeza acerca del estado antes de realizar la medición por lo cual el estado del sistema queda definido por el observador.

De tal modo que, el estado del sistema cuántico se puede interpretar como las posibles diferentes formas de estar el sistema en un instante de tiempo y en relación con una cualidad específica. Para describir el estado de un sistema y su evolución temporal, se hace uso de las variables dinámicas que en mecánica cuántica se denominan como observables. Desde la perspectiva de la mecánica cuántica no es posible caracterizar de forma simultánea los observables de posición y momento que en mecánica clásica son variables dinámicas, por lo que en principio difiere del estado en mecánica clásica, esta particularidad en la M.C. es conocida como el principio de incertidumbre.

2.4. Principio de incertidumbre

El principio de incertidumbre de Heisenberg surge como una consecuencia matemática relacionada con las propiedades corpusculares de la luz y ondulatorias de la materia, y sus consecuencias en el proceso de medición. Un punto esencial en el tratamiento de un sistema cuántico es que no es posible extraer el valor de cualquier magnitud arbitraria, es decir que

aparecen incompatibilidades entre distintos observables, que son lo que podemos medir. Para Heisenberg las cualidades físicas se presentan a través de matrices, dichas matrices en general siguen la regla de la no conmutatividad bajo la operación de la multiplicación, es decir si, A y B son matrices, entonces AB no es igual a BA . Por lo tanto, si se acude a dos matrices que exhiben distintas propiedades de una partícula, en general no se cumple la propiedad de que $AB = BA$, y plantea la imposibilidad medir simultáneamente con precisión las propiedades en cuestión. De tal manera que el orden en que se midan las propiedades implica un grado de incertidumbre en la medición. No es lo mismo medir A y después B que B y posteriormente A.

En síntesis, el principio de incertidumbre de Heisenberg se puede describir como “la observación de un fenómeno perturba el objeto observado, por consiguiente, el observador debe dar cuenta de esta perturbación” (Kasahara, 2003). De los observables que se pueden medir en mecánica cuántica, por ejemplo, posición y momento, el principio de incertidumbre matemáticamente se expresa con la siguiente relación:

$$\Delta x \Delta p \geq \frac{\hbar}{2} \quad (1)$$

Siendo Δx la incertidumbre de la posición y, Δp la incertidumbre del momento, en general para distintas propiedades de una partícula. Al generalizar en tres dimensiones se llega al principio de incertidumbre de Heisenberg: si x, y, z son las coordenadas de una partícula y p_x, p_y, p_z son los respectivos momentos de la partícula, se cumple que

$$\Delta x \Delta p_x \geq \frac{\hbar}{2} \quad (2)$$

$$\Delta y \Delta p_y \geq \frac{\hbar}{2} \quad (3)$$

$$\Delta z \Delta p_z \geq \frac{\hbar}{2} \quad (4)$$

Se observa que no hay condiciones con respecto a los productos $\Delta x \Delta p_y$, $\Delta x \Delta p_z$, y en particular para otras combinaciones, de esta manera se establece únicamente límites para $\Delta x \Delta p_x$, $\Delta y \Delta p_y$, $\Delta z \Delta p_z$, por lo se puede tener situaciones en que $\Delta x \Delta p_x \gg \hbar$, y aún sigue siendo compatible con el principio de incertidumbre. El valor de \hbar (*constante reducida de plank*)⁴ es del orden de $1,054 \times 10^{-34} J \cdot s$, por lo que es difícil tener un valor cercano a este, a nivel macroscópico en el que $\Delta x \Delta p_x$ sea comparable con \hbar , por este motivo el principio de incertidumbre es despreciable en mecánica clásica.

De manera experimental el principio de incertidumbre se debe principalmente a la cuantificación de la radiación electromagnética; se origina porque para observar una partícula es necesario dispersar por lo menos un fotón. Por tanto, el fotón se convierte en el intermediario necesario entre la partícula y el observador, perturbándolo de una manera incontrolable. Concretamente, se puede hablar de la peculiaridad de que la partícula observada se rige bajo el dominio cuántico y el aparato o instrumento de medida con el que se observa obedece al dominio de las leyes clásicas. Tal cualidad le quita el carácter determinista a la M.C. y la convierte en una mecánica de tipo indeterminista. Bohr era consciente de la necesidad de utilizar un lenguaje clásico para describir los resultados de estos experimentos. Con relación a esto, el siguiente experimento permite evidenciar cómo

⁴ Constante de Planck: Constante fundamental en la Mecánica cuántica, es la constante de se define como « el cuanto de acción ». Denominada así, porque es el producto entre la energía implicada y el tiempo empleado, además constituye el límite especial entre los micro y macro-fenómenos. La importancia del cuanto de acción es que establece una conexión entre las propiedades que se excluyen recíprocamente que son dialécticamente contradictorias de los micro objetos, esta conexión se expresa mediante las ecuaciones de Louis de Broglie (Dualismo Ondulatorio, relación de indeterminación) Solo puede tomar valores discretos, es decir múltiplos enteros de \hbar .

se puede medir una variable dinámica en un sistema cuántico, teniendo en cuenta que el observador lo altera al efectuar una medida.

2.5. El experimento con polarizadores

Este experimento consiste en tener una fuente de luz y la ubicación de dos polarizadores lineales, estos están dispuestos en distintas inclinaciones con el fin de evidenciar qué sucede al hacer incidir el haz de luz a través de ellos. Así mismo, como se conoce teórica y experimentalmente, el haz de luz está compuesto por una cantidad de fotones los cuales interactúan con los polarizadores y estos permiten el paso de una cierta cantidad de ellos, dejándolos en un estado de polarización ya sea vertical u horizontal. La disposición de los polarizadores varía dependiendo de la experiencia, en este caso nos centraremos siguiente experimento:

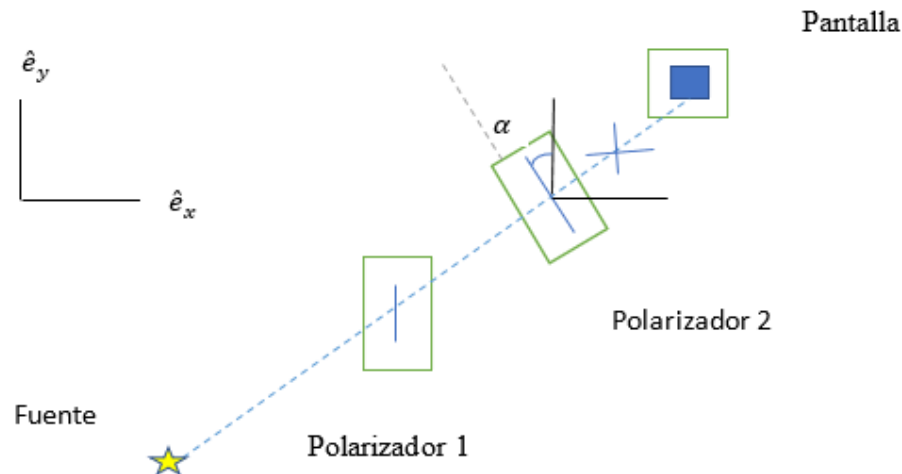


Figura 2.1 Polarizador 1 vertical \hat{e}_y , polarizador 2 – vertical rotado un ángulo α . Fuente: Malaver 2016.

Aquí, uno de estos fotones sale de la fuente e incide sobre el polarizador 1, este lo deja en un estado de polarización determinado - bien sea horizontal o vertical-, cuando llega al polarizador 2 (rotado 45° con respecto al eje de incidencia) y se realiza una medición, el fotón

queda en un estado determinado por el polarizador 2, eso indica que, si se realiza una nueva medición bajo los mismos parámetros del polarizador 1, en términos probabilísticos queda con un 50% de probabilidad de encontrarlo en un estado de polarización lineal horizontal y otro 50% de encontrarlos en un estado de polarización vertical, por lo que puede decirse que, el polarizador 2 mide otro estado de polarización del fotón bajo un marco de referencia rotado distinto la inicial.

La caracterización del experimento anterior (Anexo 1) permite considerar la polarización de la luz como el observable, y se adopta allí la interpretación de Copenhague (Bohr), por lo que el estado de polarización del fotón se ve drásticamente afectado por el observador (Polarizador), así pues, el proceso de medida del estado final de polarización sobre el fotón no depende del estado de polarización en que se encontraba antes de realizar dicha medición, y se concluye que al realizar la medición sobre un sistema cuántico, esta interacción deja al sistema en uno de los posibles estados propios del observador, que es lo que se había descrito anteriormente.

Se establece entonces que existe una aparente contradicción: por un lado se tienen los resultados de las variables obtenidos por el aparato de medida, en donde se llega a un valor preciso en la medida cuando se realiza la medición, y por otro lo que indica la teoría, en donde no se puede determinar previo a la medición en qué estado se encuentra el sistema con precisión, por ende, se tienen previsiones probabilísticas ya que para la teoría, el sistema se encuentra en una superposición de estados, antes de realizar la medida.

Entonces en la interpretación de la M.C. de Bohr se impone la necesidad de un lenguaje clásico, ya que para él los observadores y los aparatos experimentales tienen una naturaleza macroscópica -desde un contexto clásico-. Con esto la posición de Bohr pretendía

proporcionar una interpretación, cuyo objetivo principal era proteger el formalismo exitoso de la M.C.

2.6. Formalismo de la Mecánica Cuántica

Bajo la necesidad de establecer un formalismo que diera cuenta del comportamiento a cerca de los sistemas cuánticos, se plantean dos mecánicas, la ondulatoria propuesta por Erwin Schrödinger y la mecánica matricial por Werner Heisenberg. Desde cada perspectiva surgen algunas diferencias, por ejemplo, para describir un estado. Para Schrödinger un estado era una función de onda y una cantidad observable, un operador actuando sobre el espacio vectorial generado por funciones de onda. Por su parte, para Heisenberg, tanto los estados como las cantidades observables eran matrices.

En cuestión la idea es determinar qué mecánica es la correcta, la mecánica ondulatoria propuesta por Schrödinger, o la mecánica matricial de Heisenberg. El problema fue resuelto por John Von Neumann, quien llega a la conclusión que ambas mecánicas son diferentes maneras de describir los fenómenos cuánticos y se debe describir en una estructura del espacio de Hilbert, ya mencionado anteriormente.

Para este trabajo de investigación, un estado cuántico se representa por funciones complejas, estas se consideran vectores en un espacio vectorial denominado espacio de Hilbert. Dado que los estados cuánticos se consideran vectores se emplea con ellos las operaciones y propiedades propias de estos objetos matemáticos. Se señalarán en este apartado, las propiedades de los vectores aplicados a los estados, por lo tanto, se hablará de estados ortogonales, estados propios, de producto interno, entre otros.

2.6.1 Notación de Dirac

La notación de Dirac, también llamada la notación bra – ket, es la notación estándar para describir los estados cuánticos en la teoría de la mecánica cuántica. Unifica en una misma simbología la descripción de los operadores y de los observables que se tienen en la mecánica matricial y la descripción que se realiza desde la mecánica ondulatoria con operadores diferenciales actuando como operadores.

Consideremos una función ψ que expresa una función de onda de un sistema cuántico, este se expresará como $|\psi\rangle$, que llamaremos ket (generalmente los estados se expresan por medio de letras del alfabeto griego). Dado que estas funciones en general son complejas se definirá su complejo conjugado ψ^* como $\langle\psi|$, que llamaremos bra.

2.6.2 Producto interior

El producto interior definido entre dos estados - equivalente al producto escalar-, toma dos funciones de estado ϕ, ψ las opera entre sí, y su resultado por lo general es un número complejo. La definición del producto interior tiene la forma:

$$\langle\phi|\psi\rangle = \int_V \phi^*(\vec{r}, t) \psi(\vec{r}, t) dV \quad (5)$$

Donde la integral esta evaluada en un volumen, y se ha expresado las funciones ϕ, ψ con dependencia en el espacio y el tiempo, ya que son estados que hacen referencia a la dinámica del sistema. Haciendo uso de las propiedades del producto interior se pueden llegar a una serie de conceptos y notación, presentadas a continuación:

- Un estado, o función de onda esta normalizado si cumple: $\langle\psi|\psi\rangle = 1$
- Dos estados, o funciones de onda son ortogonales si se cumple: $\langle\phi|\psi\rangle = 0$

- Un conjunto de funciones $\{\psi_i\}$, forma un conjunto ortonormal si se cumple

$$\langle \psi_i | \psi_j \rangle = \delta_{ij}$$

2.6.3 Operadores

En un estado de un sistema físico descrito por una función, se puede actuar, al medir o modificar sus parámetros (Cuentos cuánticos, 2011). Para la representación de las acciones que se le puede hacer a un sistema se utilizarán los objetos matemáticos conocidos como operadores. Un operador es un objeto matemático que actúa sobre un ket que representa una función y como resultado se obtiene otra función. Por ejemplo, se puede contar con un sistema en un estado definido por la función $|f\rangle$, tenemos un operador \hat{A} -generalmente un operador se expresa con letra mayúscula y un circunflejo-, dicha actuación del operador se expresa:

$$\hat{A}|f\rangle = |g\rangle \quad (6)$$

Donde $|g\rangle$ es una nueva función que representa otro estado del sistema. Se puede deducir que actuar sobre un sistema, en general cambia su estado cuántico.

Por lo expresado anteriormente, el término operador expresa un sentido más allá del matemático, y está relacionado con las cantidades físicas que se pueden medir en un sistema para determinar su estado, un análogo a lo que describen las variables en mecánica clásica. Por lo tanto, el operador también representará de cierta forma el aparato de medida, con el cual se realizan mediciones para determinar los valores asociados a estos estados. Por lo tanto, si se desea definir el estado dinámico de un sistema en mecánica cuántica se hace uso de las variables de posición y momento, y estas variables resultan ser incompatibles (principio de Heisenberg). Para representar las actuaciones físicas sobre un sistema desde el

uso de operadores, es necesario exigir que este operador tenga las propiedades de linealidad y hermeticidad, de tal manera que el operador represente un observable.

2.6.3.1 Linealidad y Hermeticidad

Los operadores representan aparatos de medición en el proceso de medir una cantidad física susceptible de ser medida, dicho operador se representa por medio de una matriz y los valores propios de esta, las cantidades físicas que se quieren medir. El uso de matrices para el estudio matemático de los fenómenos que ocurren a escala microscópica se debe a que existen observables incompatibles.

Para que un matriz pueda representar cantidades físicas debe cumplir con las siguientes condiciones:

- Un operador es lineal si cumple simultáneamente:

$$\hat{A}(f + g) = \hat{A}f + \hat{A}g \quad (7)$$

$$\hat{A}(cf) = c\hat{A}f$$

Donde c es un número complejo.

- Dado un operador \hat{A} , podemos calcular su operador hermítico asociado o adjunto asociado \hat{A}^* .

- Un operador es hermítico si cumple con las siguientes propiedades; siendo \hat{A} una matriz entonces:

$$\hat{A} = \hat{A}^t ; \hat{A} \text{ es un operador Hermítico (Mecánica Matricial)}$$

$\langle f | \hat{Q} g \rangle = \langle Q f | g \rangle$; Q es un operador Hermítico, donde f y g son funciones cualesquiera o funciones de onda.

En general, la importancia de los Operadores Hermíticos desde la mecánica matricial se da porque sus entradas pueden incluir números complejos, pero los valores propios de esta

matriz siempre son valores reales, de esta manera una matriz hermítica tiene la capacidad de representar cantidades físicas reales que se pueden medir en un laboratorio, siendo los valores propios de la matriz los valores que puede tomar la cantidad física representada como un operador matricial, estos valores propios se dan al momento de hacer uso de la ecuación de valores propios. De igual forma los valores propios generados por un operador mecánico - cuántico en la mecánica ondulatoria también deben ser reales, asegurándose que describa cantidades físicas medibles en el laboratorio.

2.6.4. Ecuación de valores propios o autovalores

Anteriormente hemos señalado que al hacer actuar un operador sobre una función de estado se obtendrá otra función. Sin embargo, algunas funciones tras aplicar el operador, devuelve la misma función multiplicada por un escalar, por lo general complejo. A este conjunto de funciones se les denomina funciones propias -auto funciones-, a los números que multiplican dichas funciones propias tras la actuación del operador se denominan valores propios, - autovalores-. La representación matemática de lo anterior se expresa de la siguiente forma: dado un operador \hat{A} , existe un conjunto de funciones $\{f_a\}$, donde las a son números complejos que determinan qué valor propio toma la función considerada de modo que:

$$\hat{A}f_a = af_a \quad (8)$$

Estas funciones propias de un observable son un conjunto de funciones ortonormales, esto implica que se pueden entender como una base de funciones de estado, es decir, cualquier función que represente un estado se puede escribir como la combinación lineal de las funciones propias de un observable. En el marco de esta interpretación es imposible determinar el por qué se registran valores bien definidos como resultados de la medición, en cuanto que la teoría predice superposiciones sin valor definido en los estados de los aparatos

de medición (Kripp H. 1999). Esta interpretación dota a la medición de un carácter especial, capaz de producir una evolución indeterminista en el estado, con probabilidades dadas por la regla de Born, que conduce al sistema a uno de los estados posibles del aparato con valor bien definido (Véase ejemplo polarizadores).

2.6.5. Función de Onda y su relación con la medida de observables.

Para describir el movimiento de una partícula libre en un espacio, se requiere su estudio en el continuo, eso significa que la partícula se puede encontrar en un número infinito de estados posibles. Una manera de expresar el estado del sistema es dar todas las amplitudes de que la partícula se encuentre en un estado cualquiera partiendo de un estado base inicial.

Una función de onda $\psi(x)$ se expresa como $\langle x|\psi\rangle$ que representa una densidad de amplitud, por ejemplo, de que un electrón estando en un estado $|\psi\rangle$ se encuentre en el estado base $|x\rangle$, es decir que este distribuido de cierto modo a lo largo de una línea recta, y se encuentre en una determinada región Δx , por otra parte, se interpretará el módulo al cuadrado de ψ , como la probabilidad de encontrar el electrón dentro del intervalo Δx .

Para una partícula con momento definido p y una energía definida E correspondiente, la amplitud de encontrarse en cualquier posición x es:

$$\langle x|\psi_p\rangle = C(x) \propto e^{+ipx/\hbar} \quad (9)$$

La anterior ecuación expresa la conexión de los estados base correspondientes a diferentes posiciones en el espacio, con otro sistema de estados base, que pueden ser todos los estados de momento definido. Por otro lado, la función $C(x)$ dependerá del estado particular que tome $|\psi\rangle$, por lo tanto, esta corresponderá a la función de onda $\psi(x)$.

Debe señalarse que la formulación matemática para definir el estado dinámico de un sistema cuántico está dada bajo los parámetros de la ecuación de Schrödinger, antes de realizar la medición, es decir, la función de onda de la partícula evoluciona de acuerdo con la ecuación propuesta por Erwin Schrödinger. Mediante la ecuación de valores propios se obtiene, los valores propios y posteriormente la probabilidad de que el sistema estando en un estado base, se pueda encontrar en otro estado. Desde este contexto la mecánica cuántica es una teoría completamente probabilística. Pero luego de que el observador dispone una serie de instrumentos para realizar una medida, el sentido probabilístico de la mecánica cuántica cambia a ser uno completamente determinístico, dejando a un lado la ecuación de Schrödinger, para quedar bajo proceso físico conocido como el colapso de la función de onda⁵. Esto es en particular determina el problema de la medición, y durante el cual se ha hecho énfasis desde los inicios de la teoría cuántica.

Sin duda alguna la reconciliación entre la teoría y la experimentación a estado a la reticencia durante más de 70 años. Lo sorprendente es que la imposibilidad de esta reconciliación no nace en la imposibilidad del observador por realizar mediciones, sino que es una indeterminación inherente a la realidad física. Por lo tanto, es natural referirse que el acto de medir está profundamente relacionado en crear la realidad de lo que se quiere medir. Esta reflexión conlleva a generar una visión completamente distinta de la teoría cuántica, ya que es fundamental para desafiar el entendimiento de esta teoría, alejada de los principales problemas de completitud ampliamente debatidos por grandes físicos como Einstein.

⁵ El colapso de la función de onda es un proceso relacionado con la medida de un observable sobre un sistema cuántico y la determinación del estado resultante obtenido en la medida. Es decir, cuando se hace una observación o medición del sistema, se obtiene el valor propio correspondiente al estado del observable.

Capítulo III

Descripción de la actividad experimental a propósito del acto de medición: La calcita

La actividad experimental ha jugado un papel fundamental en las ciencias y en particular en la física, en la cual es participe en el desarrollo de teorías, principalmente en el rol que desempeña al momento de abordar conceptos donde permite que se facilite la comprensión de estos. De esta manera el proceso de enseñanza – aprendizaje en los últimos años se ha consolidado, a tal grado que la relevancia de la actividad experimental esta al mismo nivel que la formalización teórica en torno a brindar explicaciones del fenómeno.

El proceder que tiene la actividad experimental, en este caso de la teoría cuántica y para uso de la investigación, se regirá bajo un enfoque fenoménico, que correlaciona de forma exitosa la observación de un fenómeno y la descripción de lo que se percibe que sirve como herramienta para la construcción de explicaciones alrededor del acto de medir y su relación con el principio de incertidumbre. En particular se revisa para inspeccionar lo que implica simultáneamente una medición de los observables de posición y momento, y que se puede extender a otras relaciones.

Luego, se realiza una formalización que se basa en experiencias similares, con el objetivo de realizar un acercamiento a resultados equivalentes y es la comprensión de la alteración que produce el proceso de medición en un sistema cuántico, que difiere de la medición en un sistema clásico.

En la formalización utilizada, se le asignó un ket a cada estado de polarización de la luz - $|H\rangle$ (estado horizontal) y $|V\rangle$ (estado vertical)-, con el fin de realizar una serie de operaciones que corroboran que la función de onda asociada al sistema cuántico antes de realizar la medición tiene relaciones probabilísticas, ya que la medida de probabilidad por ejemplo de

encontrar una partícula en una región del espacio un de la posición se da por medio del producto de la función por su conjugada, como se presentó en el capítulo anterior, mientras que en el proceso de medición se colapsa la función de onda a un valor.

Adicionalmente para llegar a la misma determinación de los observables de posición y momento en mecánica cuántica, se hará una relación análoga con respecto a la polarización de un haz de luz – visto como un flujo de fotones-, que es un fenómeno fácilmente visualizable. Es válido trabajar con la polarización de los fotones porque es determinado como una cualidad medible de un sistema cuántico.

Finalmente, la actividad experimental propuesta exige que el análisis se realice bajo las ideas de la física cuántica, lo que permite una nueva construcción conceptual alejada de las concepciones de la física clásica y un cambio de pensamiento de orden clásico a uno cuántico. De modo que se busca que proporcione explicaciones sobre lo que se observa y se genere reflexiones sobre acto de medir y sus implicaciones en la teoría cuántica.

3.1. Actividad experimental: La Calcita

La siguiente actividad experimental tiene como objetivo que los estudiantes relacionen, comprendan y construyan explicaciones alrededor de los efectos que se observan en la polarización de un fotón y cómo se puede relacionar con la medición de los observables de posición y momento en mecánica cuántica, además de las implicaciones que conlleva realizar el acto de medir en un sistema cuántico.

3.1.1 Descripción instrumental Actividad experimental

El diseño del experimento consta de un láser monocromático rojo ($\lambda = 635nm$), un cristal transparente de calcita que desdobla en dos haces polarizados perpendiculares entre sí el haz de luz incidente y que coinciden con las direcciones de vibraciones preferentes del

crystal, una placa oscura ubicada en una de las salidas, que servirá como barrera y no dejará pasar los fotones polarizados en una dirección determinada, y dos fotodiodos de avalancha que servirán como detectores.

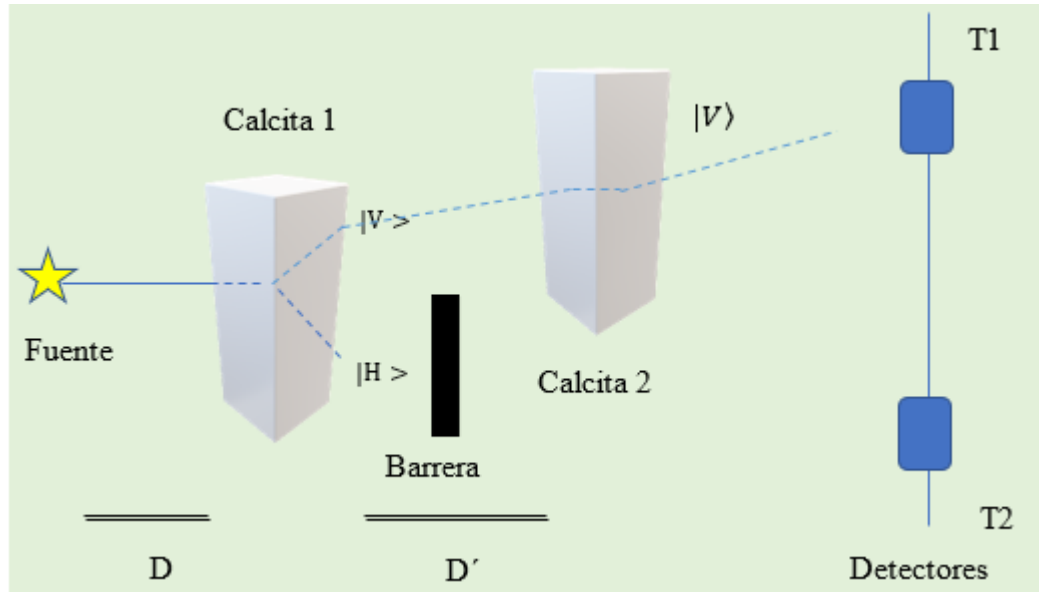


Figura 3.1 Disposición inicial de materiales mostrando la colimación de uno de los estados $|v\rangle$ de polarización lineal mutuamente excluyentes. Elaboración propia.

La disposición de los materiales en la actividad experimental está representada en la Fig. 3.1, así como en la Tabla 1 se encuentra la identificación de los materiales. Es importante aclarar que los fotones que salen de la fuente están con el mismo estado inicial, es decir resultan de una combinación lineal de dos estados propios del observable (polarización vertical $|V\rangle$ y polarización horizontal $|H\rangle$).

Tabla 1. Identificación de los elementos para la actividad experimental

Nombre en la representación	Elemento utilizado
Fuente	Laser Monocromático rojo ($\lambda = 635nm$)
Crystal de Calcita 1 y 2	Calcita: Cristal Birrefringente

Barrera	Material oscuro (Cartulina Negra)
Detector T1 y T2	Fotodiodos de Avalancha

En una descripción general, la fuente emite un haz de fotones. La calcita, actúa como un polarizador lineal; ésta, posee propiedades birrefringentes que hace que los fotones polarizados vertical u horizontalmente sigan “trayectorias” distintas, por ejemplo, un fotón polarizado horizontalmente seguirá la trayectoria 1 dentro de cristal (Ver figura 3.2) y un fotón polarizado verticalmente seguirá una trayectoria 2 (ver figura 3.3); los detectores (T1 Y T2), son los encargados de mostrar la llegada de los fotones y estarán ubicados de tal manera que coincidan con las trayectorias determinadas por los estados de polarización en que se encuentra la luz al salir de la calcita; y la barrera permite bloquear alguno de los dos haces de fotones polarizados, que resulta de la interacción del haz original al atravesar la calcita.

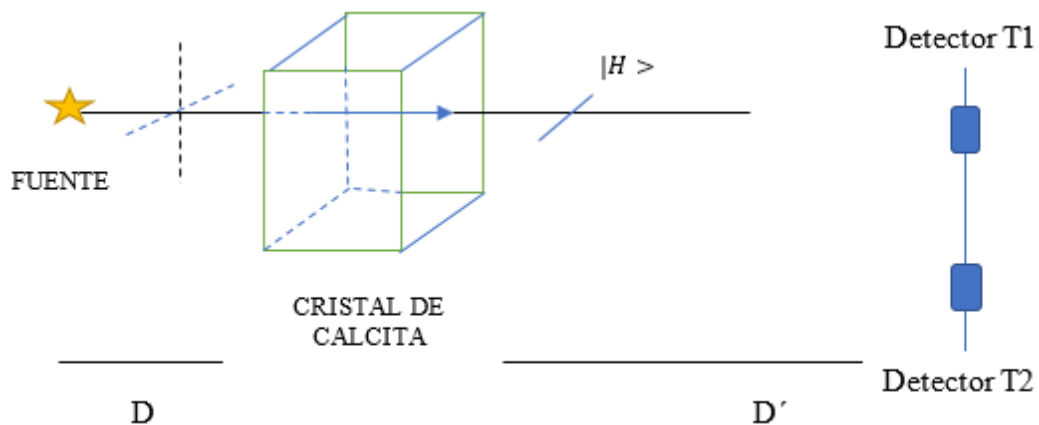


Figura 3.2 Representación de un fotón entrando a la calcita, sigue la “trayectoria 1” y sale con polarización $|H\rangle$

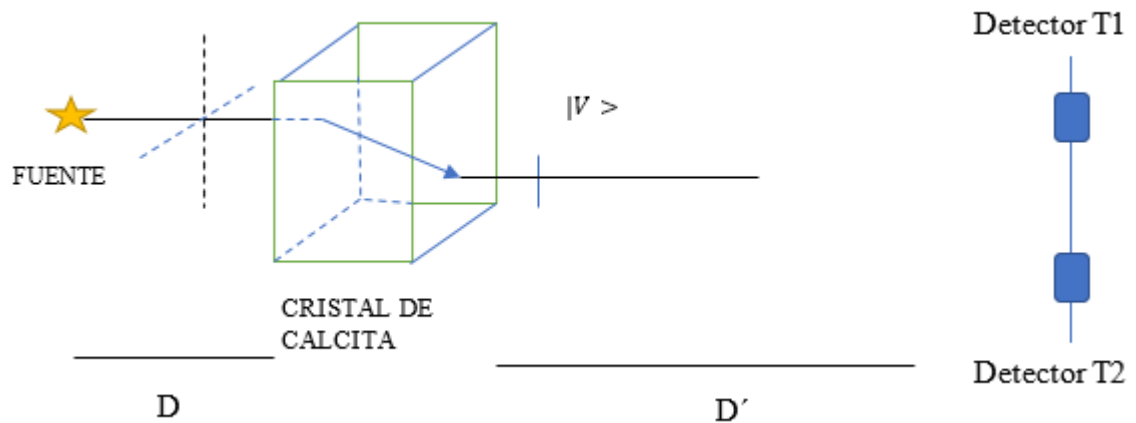


Figura 3.3 Representación de un fotón entrando a la calcita, sigue la “trayectoria 2” y sale con polarización $|V\rangle$.

Para un primer momento, los elementos de la actividad experimental se disponen según Figura 3.1. Se tiene la fuente de haz de fotones (ubicada en la parte izquierda de la representación), se coloca el primer cristal de calcita (Aparato A) a una distancia D de la fuente. Posteriormente se ubica un segundo cristal de calcita a una distancia D' y finalmente se disponen los fotodiodos (T1 y T2). De esta manera se hace incidir el haz producido por la fuente en el eje incidente de la calcita, el cual debe generar el mayor grado de separación al dividir los haces polarizados. Posteriormente se coloca la barrera que impide el paso de uno de los dos haces polarizados por el cristal en el Aparato A. Para el otro haz, se ubica una segunda calcita (Aparato B) con la misma disposición espacial y eje de incidencia de la calcita 1.

Finalmente, se colocan los detectores (T1 y T2) al final del montaje, éstos permitirán la detección de los fotones. En este punto, es adecuado preguntarse ¿qué sucede con el haz que sale de la primera calcita y pasa por la segunda calcita? ¿Se evidencia algún registro en los detectores T1 y T2? ¿Cómo se podría explicar este comportamiento? Es importante hacer

estos cuestionamientos, ya que se espera que, mediante la respuesta de las preguntas anteriores, el estudiante logre evidenciar que, al realizar la medición de un sistema, éste queda en términos del aparato de medición que da cuenta una cualidad específica del sistema, como lo es la polarización lineal.

Para el segundo momento, se utilizará la siguiente disposición: la configuración inicial de la fuente y de la calcita 1 es la misma que en el primer momento, por otra parte, se toma la calcita 2 y se rota un ángulo $\alpha = 45^\circ$ respecto al eje de incidencia de la calcita 1. Los detectores (T1' y T2') se configuran de acuerdo con la disposición de los haces separados por la segunda calcita. El montaje de los materiales para este segundo momento se puede ver en la Figura 3.4.

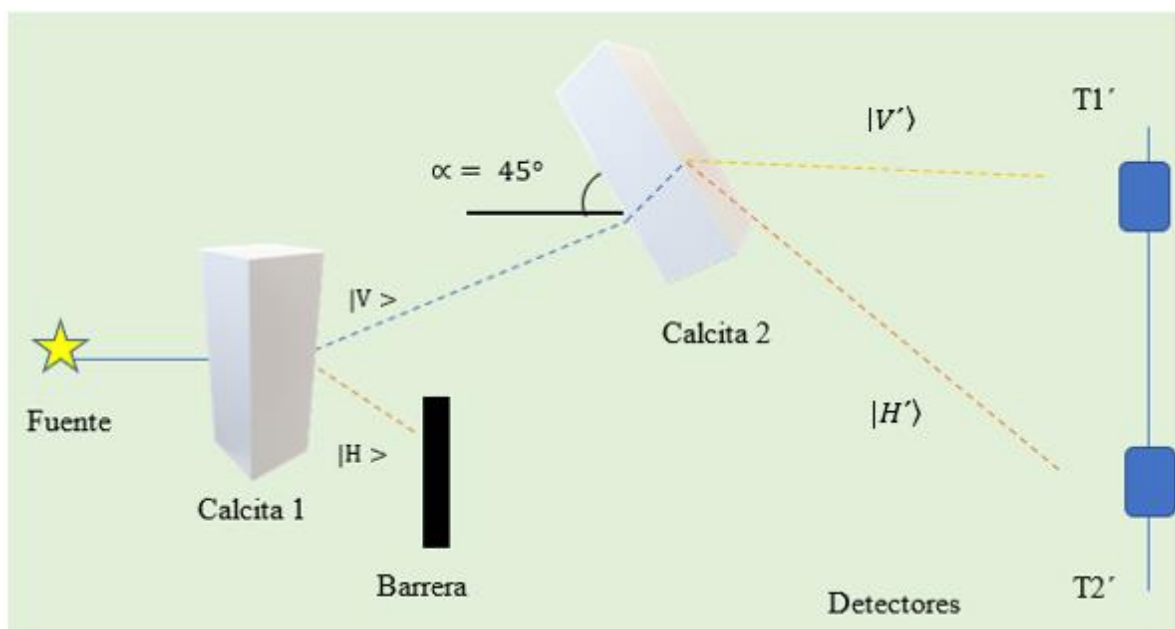


Figura 3.4 Disposición de materiales para el segundo momento de la actividad, experimental, la calcita 2 ha sido rotada $\alpha = 45^\circ$ en comparación a la calcita 1.

Al igual que en el primer momento, al revisar esta nueva disposición para la calcita 2, es importante cuestionarse ¿qué sucede con el haz que sale de la primera calcita y pasa por la

segunda calcita? ¿Se evidencia algún registro en los detectores T1' y T2'? ¿Existe alguna diferencia al rotar la calcita 2? ¿Cómo puede describir esta diferencia respecto a lo que se vio en el primer momento? ¿Cómo se podría explicar este comportamiento? En este punto, se espera que el estudiante llegue a una aproximación frente a la formalización conceptual del fenómeno, cuando construye mediante un conjunto de palabras las características de lo observado respondiendo a los cuestionamientos. De esta forma, se espera que la actividad experimental propuesta amplie la experiencia de lo que se considera como el acto de medir y se logre construir una idea respecto a la medición, que posteriormente acerque a la relación existente entre los observables de posición y momento.

3.1.2 Formalización conceptual de la actividad experimental a propósito de la medición de los observables.

En el primer momento Figura 3.1, se observa que el haz filtrado de la calcita 1, llega a la calcita 2 con una polarización lineal determinada, ya sea $|V\rangle$ o $|H\rangle$. Esto se debe a que, al realizar una medición sobre el haz de fotones, éste ha quedado determinado en uno de los estados que son mutuamente excluyentes, esto es verificable por que al momento de salir de la calcita 2, se ha encendido únicamente uno de los detectores, en el caso específico el detector T1. Si no se hubiera realizado el acto de medir con la calcita 1, encontraría una detección tanto en T1 como T2, correspondiente al principio que propone que los fotones están en un estado de superposición, es decir, que se encuentran tanto en un estado $|V\rangle$ y $|H\rangle$ con una cierta probabilidad para cada uno antes de realizar cualquier medición.

Para Bohr, como se ha mencionado anteriormente, este comportamiento de debía principalmente al hecho de que, al realizar cualquier medición de un sistema cuántico, el observador lo perturba o lo afecta drásticamente. Por lo tanto, se considera que antes de

realizar una medición, el sistema está en una superposición de estados y al momento de realizar el acto de la medición, el sistema se define por un estado determinado.

Si bien la anterior afirmación tenía fuertes opositores, como el mismo Einstein quien después debió aceptar bajo los argumentos brindados por Bohr, solo es posible determinar con exactitud el estado de un sistema cuántico realizando una medición, y al realizar una medición se escoge un valor, de forma que el resto de los estados posibles del observable son desechados. Esto es congruente con la actividad experimental, ya que se ha medido el estado de polarización del fotón y éste ha quedado determinado por uno de los dos posibles estados.

Los efectos de esta actividad experimental son análogos a los obtenidos a la relación de medición de un observable expuesto en el principio de incertidumbre, el cual indica que, al determinar el estado de posición o momento de un sistema cuántico, éste da un resultado exacto únicamente al medir dicha cualidad, no es posible la medición simultánea de las dos.

En el segundo momento Figura 3.4, a modo de descripción general, el haz de fotones que sale de la calcita 1, se encuentra con un estado de polarización lineal definido, por convención el fotón se encuentra en un estado $|V\rangle$ o $|H\rangle$, esto ya se ha verificado con el planteamiento de la actividad experimental en el primer momento, de esta forma, llega a la calcita 2 que se encuentra rotada $\alpha = 45$. Cuando los fotones salen de la calcita 2 se ha encendido T1' y T2' simultáneamente. De esta manera si se registra un conteo de 200 fotones, por ejemplo, entonces 100 habrán llegado a T1' y los otros 100 a T2'. Así al encenderse ambos detectores se puede considerar que los fotones antes de la medición con la calcita 2 están con un estado de polarización lineal previamente determinado por la calcita 1 y al llegar a la calcita 2 se encuentra en un estado superpuesto respecto al nuevo aparato de medida, si no fuera de esta

manera se hubiera presentado el resultado del momento 1, en donde solo uno de los detectores se encendió.

Ahora bien, cuando la Calcita 2 fue rotada con respecto al eje de incidencia de la primera calcita, se produjo un cambio en la medición del estado de polarización de los fotones que salieron de la Calcita 1, de esta manera se puede establecer que la calcita 2 determina otro estado de polarización, distinto al estado de polarización lineal de la primera calcita. En este caso la calcita 1 estaría determinando desde la mecánica cuántica un observable 1 y la calcita 2 rotada sería un observable 2, los dos observables medirían cualidades diferentes y serían no compatibles entre sí.

Bajo el contexto de la mecánica cuántica estándar, existe una implicación que conlleva a este resultado y es que al medir la polarización del fotón nuevamente bajo esta disposición instrumental, se ha variado el observable (la calcita rotada $\alpha = 45$), quedando en términos de este nuevo observable, de tal manera que se pierde toda la información anterior al realizar dicha medición, que corresponde a que los detectores se encienden simultáneamente en el segundo momento. En general se puede determinar que, al realizar la medición simultánea de dos observables no compatibles, no se puede tener resultados determinados, congruente a lo que se afirma desde el principio de incertidumbre de Heisenberg.

Los efectos de esta actividad experimental en su segundo momento Figura 3.4 se pueden interpretar como semejantes a la medición de los observables de posición y momento, en donde, estos dos observables quedan representados por la calcita 1 y calcita 2. Desde la teoría, estos resultan ser incompatibles entre sí tal como se mencionó en la sección 2.4; para cualquier función de onda, sí es posible determinar de forma reproducible la posición de un

sistema cuántico, cuando se busque determinar el momento lineal se tendrá siempre un resultado probabilístico.

Es importante aclarar que la disposición de la segunda calcita en el segundo momento de la actividad experimental puede variar, por ejemplo, se puede tener en una rotación distinta a la planteada inicialmente con respecto al eje de incidencia de la calcita 1, y se llegará a los mismos resultados probabilísticos en la medición de la polarización al pasar por la calcita 2 y llegar a los detectores, ya que estos se encenderán simultáneamente. No es posible que mientras se tenga la calcita 2 rotada se llegue a otro resultado distinto. Por conveniencia en la práctica se ha escogido la rotación de 45° ya que permite tener la misma probabilidad de detectar a los fotones cuando lleguen a los fotodiodos como se muestra en el formalismo matemático presentado en la siguiente sección.

Por su parte los fotodiodos se escogieron para la actividad experimental por que permiten bajo módulos de conteo de fotones, la detección de luz en regímenes de baja intensidad, su funcionamiento se basa en un semiconductor en modo Geiger, en el cual un portador de carga generado por la incidencia de un único fotón produce una variación macroscópica de la corriente de salida. Este registro puede darse a través de una interfaz que es fácilmente reproducible en programas diseñados para esta finalidad tales como Python y LIDIAR.

3.1.3 Formalización matemática de la actividad experimental

La siguiente formalización permitirá describir el indeterminismo que existe al realizar la medición de los observables de posición y momento simultáneamente, a partir de la actividad experimental propuesta, de esta manera se busca que se tenga una mayor claridad con respecto al cambio de cómo se da el acto de medir desde la perspectiva cuántica y superando el determinismo característico del contexto clásico.

La experiencia con polarizadores (Anexo 1) hace referencia a la superposición de estados, de esta manera se utilizarán algunos términos que se relacionan a continuación. En cuanto al montaje propuesto para la actividad experimental, se puede afirmar que éste se encuentra en dos conjuntos de estados base, que se refieren a formas de representar estados bien definidos de polarización en los que se encuentra los fotones. Suponemos el estado inicial $|\beta\rangle$ como la combinación lineal de los estados propios del sistema (polarización vertical $|V\rangle$ y polarización horizontal $|H\rangle$ para un haz de luz) entonces queda descrito como:

$$|\beta\rangle = \cos \varphi |V\rangle + \sin \varphi |H\rangle \quad (10)$$

Donde φ es el ángulo que forma el vector de estado $|\beta\rangle$, que representa la polarización previa a la primera calcita, con respecto al sistema de referencia S que representa los estados de polarización que mide la primera calcita. Ahora los estados posibles de la calcita 2 son $|H'\rangle$ y $|V'\rangle$, los cuales se representan en términos de $|H\rangle$ y $|V\rangle$ rotados un ángulo α , con respecto al eje de incidencia de la calcita, la figura 3.5 muestra la posición de los ejes coordenados con respecto a cada calcita.

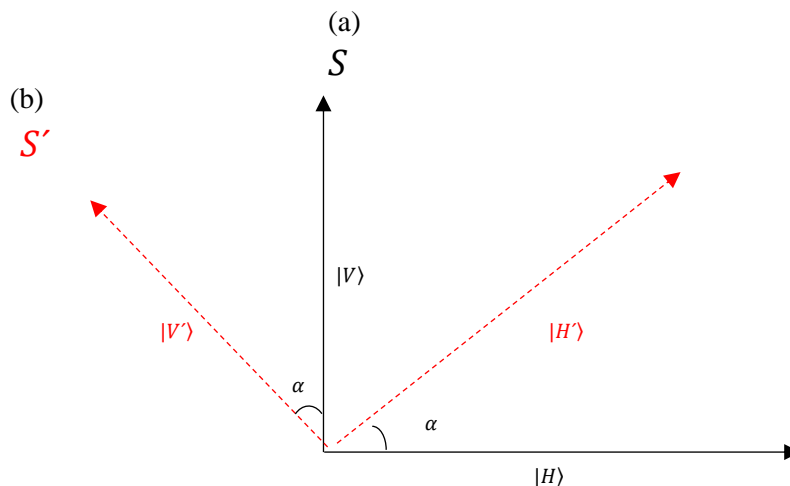


Figura 3.5 a) Sistema de referencia S sin rotación; representa el sistema coordinado de la calcita 1. b) Sistema de referencia S' rotado un ángulo α con respecto a S ; representa el sistema coordinado de la calcita 2.

De tal manera se puede expresar la base del sistema coordinado S en términos de la base S', así:

$$|H\rangle = \cos \alpha |V'\rangle + \sin \alpha |H'\rangle \quad (11)$$

$$|V\rangle = -\sin \alpha |V'\rangle + \cos \alpha |H'\rangle \quad (12)$$

En el caso de la matriz de rotación, se tiene que:

$$S' = \begin{pmatrix} \cos \alpha & \sin \alpha \\ -\sin \alpha & \cos \alpha \end{pmatrix} \quad (13)$$

Por lo tanto, para el caso de rotación de 45°:

$$|H\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|V'\rangle + |H'\rangle) \quad (14)$$

$$|V\rangle = -\frac{1}{\sqrt{2}}(|V'\rangle - |H'\rangle) \quad (15)$$

Podemos representar la calcita 2 como el operador $B = \begin{bmatrix} b_1 & 0 \\ 0 & b_2 \end{bmatrix}$, siendo b_1 y b_2 distintos,

ya que representan una base ortonormal, donde se asigna una magnitud medible que sería la polarización de la calcita 2 y cada valor b_i representa uno de los autovalores de B.

En este caso, se define para el estado $|H\rangle$ la probabilidad de que el sistema quede en un estado propio del observable 2, a través de la siguiente expresión:

$$P = (\langle H|B|H\rangle)^2 \quad (16)$$

$$\begin{bmatrix} 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b_1 & 0 \\ 0 & b_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1/\sqrt{2} \\ 1/\sqrt{2} \end{bmatrix} \quad (17)$$

$$b_1 \left(\frac{1}{\sqrt{2}}\right)^2 + b_2 \left(\frac{1}{\sqrt{2}}\right)^2 = \frac{1}{2}b_1 + \frac{1}{2}b_2 = 1 \quad (18)$$

→ $\left. \begin{array}{l} b_1 \rightarrow 50\% \text{ de probabilidad de que se encuentre en ese estado} \\ b_2 \rightarrow 50\% \text{ de probabilidad de que se encuentre en ese estado} \end{array} \right\} \text{Superposición}$

Por otra parte, para el estado $|V\rangle$, la probabilidad de que el sistema quede en un estado propio del observable 2 es:

$$P = (\langle V|B|V\rangle)^2 \quad (19)$$

$$\begin{bmatrix} -1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b_1 & 0 \\ 0 & b_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -1/\sqrt{2} \\ 1/\sqrt{2} \end{bmatrix} \quad (20)$$

$$b_1 \left(\frac{1}{\sqrt{2}}\right)^2 + b_2 \left(\frac{1}{\sqrt{2}}\right)^2 = \frac{1}{2}b_1 + \frac{1}{2}b_2 = 1 \quad (21)$$

$b_1 \rightarrow 50\%$ de probabilidad de que se encuentre en ese estado

$b_2 \rightarrow 50\%$ de probabilidad de que se encuentre en ese estado

Por tanto, se obtiene la probabilidad de que los fotones queden en un estado propio del observador B. Se concluye que los resultados obtenidos después de realizar el montaje experimental, muestran que, al efectuar la medición de un nuevo observable sobre el sistema éste queda en un estado de superposición con respecto al observable asociado a la calcita 2. Eso quiere decir que los estados propios $|V\rangle$ y $|H\rangle$ del observable 1, no son propios para el observable 2. Así, los estados $|V\rangle$ y $|H\rangle$ propios del observable 1, se han descrito como combinaciones lineales de los estados propios del observable 2, para llegar a la relación probabilística que de cuenta de la medición a través de la calcita 2.

Lo mencionado anteriormente constituye un acercamiento a la medición de los observables de la posición y momento ya que, se indica que al realizar la medición de estos dos observables simultáneamente no se puede tener valores bien definidos y lo que se puede encontrar es la probabilidad de encontrar el sistema en un estado propio del observador, además de comprobar la incompatibilidad que existe entre estos observables. Se establece entonces que la actividad experimental expuesta concuerda con la relación de los observables

de posición y momento, ya que exhibe resultados probabilísticos, acorde con el principio de incertidumbre. Esto es importante ya que existe una correlación entre el experimento y la teoría, y muestra de manera análoga que es posible plantear actividades experimentales que den cuenta de los procesos de medición en la mecánica cuántica.

Se puede concluir que la actividad experimental propuesta expone de manera satisfactoria y se puede considerar como un acercamiento con respecto a lo que sucede sobre las mediciones de observables desde la perspectiva de la mecánica cuántica, en cuanto que le permite al estudiante interpretar y relacionar, además de formalizar una noción de lo que sucede con el acto de medir.

Se puede entonces llegar a estar de acuerdo con la idea de Heisenberg y más tarde Bohr, en donde sustentan la imposibilidad de medir con exactitud el par de observables posición y momento, considerándolos como observables incompatibles, con base en esta idea al realizar una nueva medición, esta borra cualquier información que se tenía anteriormente del sistema (medición previa de un observable incompatible), que más tarde se conocería como “el borrador cuántico” (Paz, La Física Cuántica, 2017)

En la actualidad las paradojas y preguntas debido al problema de la medición han planteado un sin número de interpretaciones en la mecánica cuántica, en donde se mencionan las variables ocultas que continúan la línea de Einstein en buscar una interpretación “completa” de la realidad física, y otras que desarrollan la interpretación de Bohr mediante otros formalismos como es el denominado “historias” de la mecánica cuántica. Sin embargo, estas interpretaciones están cargadas de resoluciones filosóficas en relación con las dificultades expuestas en la M.C. estándar, por lo que desde esta perspectiva la interpretación que brinda fundamentos consistentes con los experimentos es la que se consolidó como la interpretación de Copenhague.

Como producto final de la investigación, se realiza una cartilla de enseñanza práctico-experimental (Anexo 3) donde se evidenciará el proceso que se llevó a cabo para aproximar a los estudiantes al concepto de medida de un observable desde el contexto de la mecánica cuántica.

4. Conclusiones

1. La actividad experimental propuesta en este trabajo permite correlacionar los resultados probabilísticos de la teoría cuántica con los resultados obtenidos durante la práctica experimental. De esta manera, se destaca la posibilidad de diseñar diferentes montajes experimentales para el abordaje de distintos conceptos de la mecánica cuántica y en particular al que se refiere al concepto de medición.
2. Dentro de la práctica, la actividad experimental permite ser entendida como una estrategia la cual busca acercar al estudiante al fenómeno, permitiéndole tener una experiencia sensible que conlleve a formular nuevas interpretaciones de manera efectiva en relación con lo observado. En este sentido, la interpretación de algunos conceptos difiere en el contexto de la teoría clásica y la cuántica. Aquí la actividad experimental permite realizar una transición desde estas perspectivas logrando que el sujeto pueda a través de la construcción de explicaciones propuestas, evidenciar estos cambios conceptuales.
3. La actividad experimental que aquí se presenta, expone de forma explícita un carácter probabilístico en donde no es posible determinar en su totalidad el estado que describe el sistema. La medición constituye el eje central de esta interpretación, además, considerar la posibilidad de medir simultáneamente dos variables incompatibles, como por ejemplo la posición y momento, permite hacer evidente una de las características de la teoría cuántica “la probabilidad”.
4. Las actividades experimentales diseñadas en esta investigación permiten al sujeto la construcción de algunos conceptos desde la mecánica cuántica como la medición, el principio de incertidumbre, y el papel que juega el observador en el experimento, por

medio de los interrogantes planteados con el fin de desarrollar interpretaciones acordes al pensamiento cuántico.

5. A través de la conceptualización y formalización de la actividad experimental tomando una postura fenoménica, se ha logrado brindar explicaciones del por qué los aparatos de medición arrojan valores definidos cuando se realiza una medición, y por otro lado antes de realizar la medición el estado del sistema se encuentra en una superposición de estados, correspondiente a la teoría.

Bibliografía

- Andrés Z., M. M. (2006). *La actividad experimental en física: visión de estudiantes universitarios*. Recuperado el 30 de Mayo de 2020, de http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1011-22512006000100003&lng=es&tlng=es
- Barinas, J. (2016). *Estimación y expresión de la incertidumbre en las medidas experimentales*. Recuperado el 5 de Junio de 2019, de Universidad Nacional de Colombia: <http://bdigital.unal.edu.co/56648/7/jaimeorlandobarinasolaya.2016.pdf>
- Campos, J. A. (2013). *Sistemas cuánticos individuales*. Recuperado el 29 de Febrero de 2020, de Educación química: http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-893X2013000100014
- Castrillón, J. F. (2014). Mecánica cuántica fundamental, una propuesta didáctica. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 1-12. Recuperado el 15 de Diciembre de 2019, de https://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S1806-11172014000100023&lng=en&nrm=1&tlng=es
- Cuentos cuánticos. (2010). *Los Cuentos En PDF*. Recuperado el 25 de Agosto de 2020, de <https://cuentos-cuanticos.com/los-cuentos-en-pdf/>
- Cuesta Beltran , Y. J., & Mosquera Suarez, C. J. (2017). *Algunas Reflexiones en torno a las Implicaciones de la NdC en Educación en Ciencias: el caso de la Enseñanza de la*

Mecánica Cuántica. . Recuperado el 22 de Enero de 2020, de Tecné, Episteme Y Didaxis: TED.: <https://revistas.pedagogica.edu.co/index.php/TED/article/view/4834>

Dirac, P. (1967). *Representaciones.* En P. Dirac, *Principios de la mecánica cuántica.* Barcelona, España:: Ariel. Recuperado el 4 de Enero de 2020

Duran M, R. C. (2016). *El experimento del tubo de Rubens y la simulación una propuesta de aula para la comprensión del sonido como onda longitudinal en el curso de física de ondas.* Recuperado el 13 de Agosto de 2019, de Universidad pedagógica Nacional de Colombia,:

<http://repository.pedagogica.edu.co/bitstream/handle/20.500.12209/2034/TE-19735.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Espinoza, M. (2007). *La reducción de lo posible. René Thom y el determinismo causal.* Recuperado el 30 de Noviembre de 2019, de Theoria: philsci-archive.pitt.edu

Fanaro, M. A. (2007). *El método de caminos múltiples de Feynman como referencia para introducir los conceptos fundamentales de la mecánica cuántica en la escuela secundaria.* Recuperado el 12 de Agosto de 2019, de Caderno Brasileiro de Ensino de Física:

https://www.researchgate.net/publication/224860941_EL_METODO_DE_CAMINOS_MULTIPLES_DE_FEYNMAN_COMO_REFERENCIA_PARA_INTRODUCIR_LOS_CONCEPTOS_FUNDAMENTALES_DE_LA_MECANICA_CUANTICA_EN_LA_ESCUELA_SECUNDARIA/link/09e414f9f2d41e873c000000/download

- Fanaro, M. A. (2011). Enseñanza de la mecánica cuántica en la escuela media: análisis de los aspectos afectivos de los estudiantes. *Revista de Investigación*, 85-91. Recuperado el 13 de Mayo de 2019, de https://www.researchgate.net/publication/262593112_Ensenanza_de_la_mecanica_cuantica_en_la_escuela_media_analisis_de_los_aspectos_afectivos_de_los_estudiantes.
- Feynman, R. P. (2011). Seis Piezas Fáciles. Critica Drakontos. Recuperado el 9 de Msro de 2019
- Fortin, S. y. (2016). *Problemas ontológicos de la mecánica cuántica*. Recuperado el 7 de Octubre de 2019, de Diccionario Interdisciplinar Austral: http://dia.austral.edu.ar/Problemas_ontologicos_de_la_mecanica_cuantica
- García, E. (2010). *Filosofía de las prácticas experimentales y enseñanza de las ciencias*. Recuperado el 12 de Junio de 2019, de Praxis filosófica, 1: <http://www.scielo.org.co/pdf/pafi/n31/n31a01.pdf>
- Goicolea, J. M. (2010). *Principios de la mecánica*. Recuperado el 22 de Noviembre de 2019, de En Cursos de mecánica : <http://w3.mecanica.upm.es/~goico/mecanica/libro/>
- Gratton, J. (2003). *Introducción A La Mecánica Cuántica*. Recuperado el 12 de Febrero de 2019, de Universidad de Buenos Aires.
- Kasahara , J. (2003). *El problema de la Materia en Heiseberg*. Santiago de Chile: Universidad de Chile.

- Krips, H. (2017). *Medición en teoría cuántica*. Recuperado el 12 de Enero de 2020, de En
Diccionario Interdisciplinar Austra:
http://dia.austral.edu.ar/Medición_en_teoría_cuántic
- Kwiat, H. W. (s.f.). *Visión cuántica en la oscuridad*. Recuperado el 22 de Enero de 2020, de
Investigación y Ciencia: <https://eltamiz.com/2010/07/21/cuantica-sin-formulas-el-detector-de-bombas-de-elitzur-vaidman/>
- Lazo Ramirez , L., Rueda Romero , X., Sosa Peinado, E., Garcia Franco, A., Garcia, J., &
Feltreto, R. (2009). Educación, comunicación y apropiación de la ciencia desde una
perspectiva pluralista: experiencias en la construcción del diálogo para la apropiación
social de los conocimientos. *Revista Iberoamericana de ciencia, tecnología y
sociedad*, 1-22.
- Lopez, G. (s.f.). *Enseñanza de la mecánica cuántica en la escuela media a partir del
concepto de superposición* . Obtenido de Universidad Nacional de Colombia.
- Malagon, F. S. (2013). *La actividad experimental: construcción de fenomenologías y
procesos de formalización*. Recuperado el 15 de Enero de 2020, de Praxis Filosófica
nueva serie: <http://www.scielo.org.co/pdf/pafi/n36/n36a06.pdf>
- Malaver, J. (Universidad Pedagógica Nacional de Colombia,). *La medición de una variable
de estado desde el contexto clásico y desde el contexto cuántico*. Recuperado el 5 de
Junio de 2020, de Universidad Pedagógica Nacional de Colombia,.
- Martínez, A. (11 de Agosto de 2009). *La Mecánica Cuántica*. Recuperado el 15 de Enero de
2020, de <http://la-mecanica-cuantica.blogspot.com/2009/08/el-acto-de-medicion.html>

Martínez, A. (15 de Diciembre de 2014). *La polarización y la cuántica en Órbita Laika*.

Recuperado el 12 de Octubre de 2020, de <https://cuentos-cuanticos.com/2014/12/15/la-polarizacion-y-la-cuantica-en-orbita-laika/>

Okon, E. (2014). *El problema de la medición en mecánica cuántica*. Recuperado el 10 de

Enero de 2020, de Revista Mexicana De Física - History and philosophy of physics: <http://www.um.es/~oller/>

Paz, J. P. (2017). *La Física Cuántica*. Buenos Aires: Siglo veintiuno.

Paz, J. P. (2017). *La Física Cuántica*. Buenos Aires: Siglo Veintiuno.

Ramanujan, A. (13 de Marzo de 2013). *Obstinados navegantes en océanos de Incertidumbre*.

[*El enigma cuántico*. Recuperado el 12 de Febrero de 2020, de <http://ramanujan25449.blogspot.com/2013/03/el-enigma-cuantico-el-problema-de-la.html>

Rivero, B. (2008). *ntroducción a la Metodología de la Investigación*. (E. Shalom, Ed.)

Recuperado el 12 de Enero de 2020, de <http://rdigital.unicv.edu.cv/bitstream/123456789/106/3/Libro%20metodologia%20investigacion%20este.pdf>

Rosenblum, B. a. (2006). *El Enigma Cuantico*.

Rozo Clavijo, M., Walteros, L. A., & Cortes, C. (2019). *La actividad experimental como una*

parte fundamental para la enseñanza de la física moderna: el caso de la mecánica cuántica. Obtenido de Tecné, Episteme y Didaxis: ted,.

- Sánchez. (2018). Fundamentos Epistémicos de la investigación cualitativa y cuantitativa: Consensos y Dissensos. *Revista Digital de Investigación en Docencia Universitaria*, 13 (1). Recuperado el 12 de Febrero de 2020, de <http://www.scielo.org.pe/pdf/ridu/v13n1/a08v13n1.pdf>
- Sinarcas, V., & Solbes, J. (2013). Dificultades en el aprendizaje y la enseñanza de la Física Cuántica en el bachillerato. *Enseñanza de las Ciencias: revista de investigación y experiencias didácticas*, 9-25.
- Vaidman, L. (2003). *The Meaning of the Interaction-Free Measurements*. Recuperado el 12 de Enero de 2020, de Foundations of Physics, : <http://www.tau.ac.il/~vaidman/lvhp/m87.pdf>
- Vanney, C. E. (2016). *Interpretaciones de la mecánica cuántica*. Recuperado el 5 de Abril de 2020, de En Diccionario Interdisciplinar Austral, editado por Claudia E. Vanney, Ignacio Silva y Juan F. Franck.: http://dia.austral.edu.ar/Interpretaciones_de_la_mecánica_cuántica
- Walteros, L. (2016). *Actividades experimentales para la construcción de explicaciones alrededor de los fundamentos básicos de la mecánica cuántica*. Recuperado el 3 de Abril de 2020, de Universidad Pedagógica Nacional de Colombia: Colombia, Bogotá, Colombia.

ANEXOS

ANEXO 1

Experimento con polarizadores

La siguiente actividad experimental descrita, ayudara a la construcción de los conceptos relacionados con el estado de un sistema, por medio de polarizadores. Los polarizadores son materiales que solo dejan pasar la luz polarizada de una determinada manera.

Ahora bien, descrito las ecuaciones de una onda polarizada es imprescindible decir que, en mecánica cuántica, su tratamiento no es de tipo ondulatorio, sino más bien corpuscular, así algunas cualidades de la luz cambian respecto a su interpretación, pero se mantiene la polarización, para este caso se trabajara, diciendo que el fotón, es el que guarda el estado de polarización.

En los análisis que siguen se supondrá que los polarizadores son ideales, es decir que permiten el paso del 100% de luz incidente que esta polarizada, en este caso el 100% de fotones polarizados en el eje de polarización, y bloquea totalmente los fotones que se encuentran perpendicular al eje de polarización.

La representación del experimento que se presenta, es una imagen de tipo ilustrativo que refleja una relación al fenómeno en cuestión, la representación del fotón será puntual, además este saldrá de una fuente y posteriormente se encontrara con dos polarizadores lineales, estos polarizadores dejaran al fotón en disposición vertical \hat{e}_y , o en disposición horizontal \hat{e}_x , la convención de los ejes varia con respecto a la fig.2.1, para este caso el polarizador 2 permite saber el estado del fotón, que sale del polarizador 1, finalmente la pantalla ubicada detrás del

polarizador 2, entregara la información acerca de la cualidad estudiada en el fenómeno, en este caso el estado final de polarización del fotón.

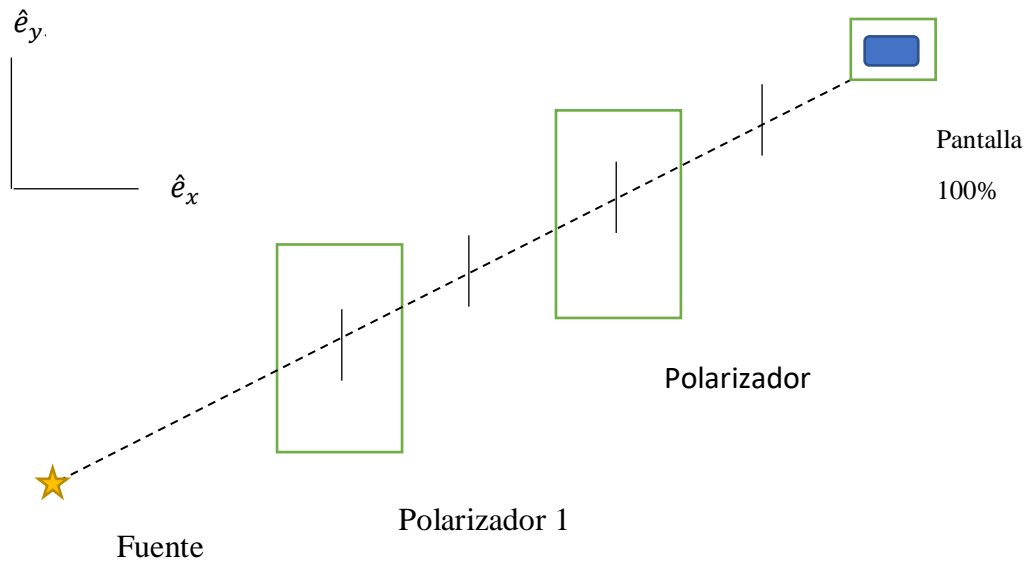


Figura 5 **Nota.** Fuente: Malaver 2016. Tesis de pregrado, Polarizadores verticales (\hat{e}_y).

En la figura 4 se muestra el estado final del fotón, al atravesar el polarizador 1 y el polarizador 2, quedando finalmente en el estado de polarización \hat{e}_y , como se evidencia el estado del fotón no varía después de pasar el polarizador 1, cabe resaltar que el fotón, antes de que pase por el polarizador número 1, no se tiene información alguna sobre su estado de polarización.

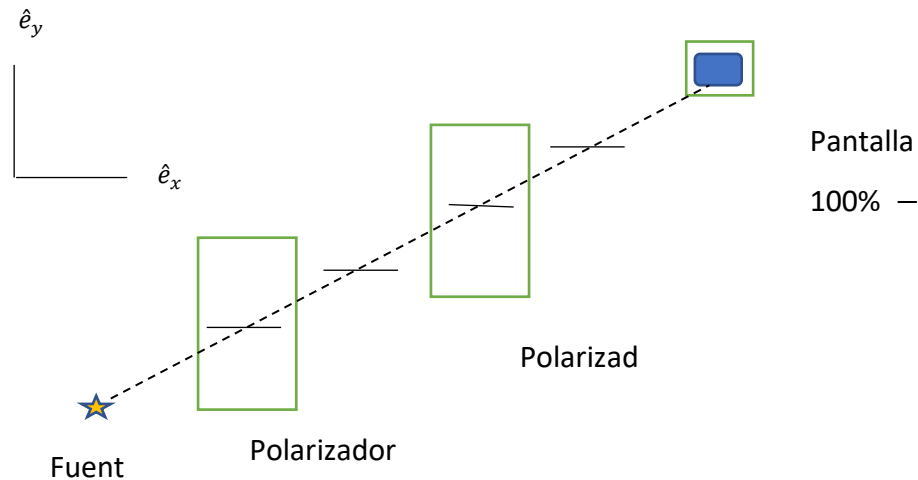


Figura 6 **Nota.** Fuente: Malaver 2016. Tesis de pregrado; Fig.2.5 Polarizadores horizontales (\hat{e}_x)

En la figura 5 se muestra el estado final del fotón, al atravesar el polarizador 1 y el polarizador 2, finalmente queda en el estado de polarización \hat{e}_x , como se evidencia el estado del fotón no varía después de pasar el polarizador 1, cabe resaltar que el fotón, antes de que pase por el polarizador número 1, no se tiene información alguna sobre su estado de polarización.

En la figura 6, el fotón pasa por el polarizador 1, quedando en el estado \hat{e}_y , cuando atraviesa el polarizador 2, no se detecta ningún fotón en la pantalla.

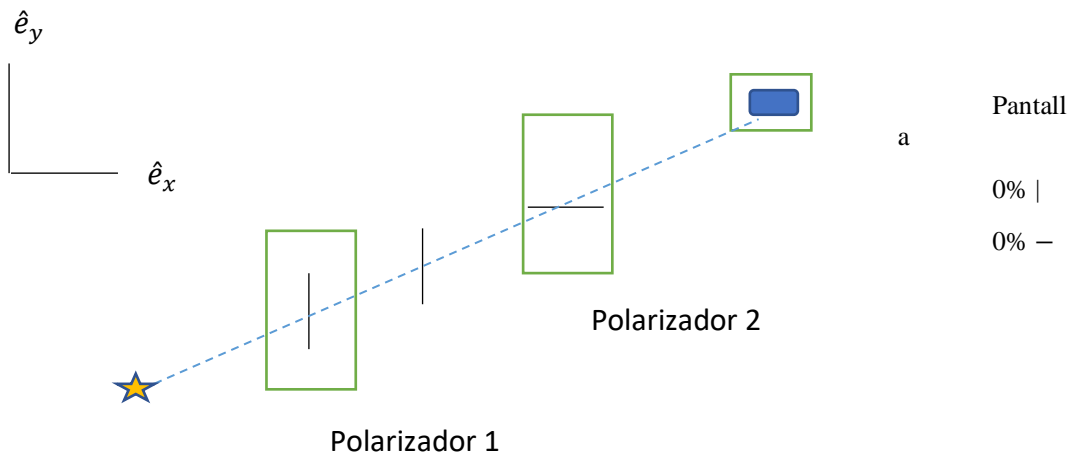


Figura 7 **Nota.** Fuente: Malaver 2016. Tesis de pregrado. Polarizador 1 (vertical), polarizador 2 (horizontal)

A partir de los fenómenos físicos en mecánica cuántica, estos pueden ser representados por lo que se denomina vectores de estado (Albert 1994, p 30 citado López 2014), de esta manera a los sistemas físicos se les asocia un espacio vectorial, para el caso particular de estudio, el espacio de Hilbert⁶. En especial, los estados cuánticos son representados por vectores unitarios, por lo tanto, cualquier vector cuya magnitud no sea uno, no representa un estado cuántico.

Para la descripción formal del experimento, haremos uso de las bases vectoriales que se describen en el Apéndice 1 y la notación de Dirac. En este caso particular se hará una distinción sobre los estados de polarización en los que se encuentra el fotón al pasar cada uno de los polarizadores correspondientes. Para el caso del estado de polarización, en el que el polarizador deja al fotón en el estado \hat{e}_y , la notación en el espacio vectorial será descrita por el vector de estado $|\hat{e}_y\rangle$. De igual forma la caracterización para el estado de polarización,

⁶ Espacio de Hilbert: generalización del concepto de espacio Euclídeo. Extendiendo la nociones y técnicas algebraicas, geométricas aplicadas a una o dos dimensiones a más dimensiones. Formalmente se define como un espacio de producto interior que es completo frente a la norma vectorial descrita por el producto interior.

en el que el polarizador deja al fotón en el estado \hat{e}_x , la notación en el espacio vectorial será descrita por el vector estado $|\hat{e}_x\rangle$.

Además, se hace uso de las representaciones de los aparatos Stern- Gerlach realizadas por Feynman para extraer los estados de polarización del fotón. Para los casos puntuales de los tres experimentos descritos.

- El estado de polarización del fotón, al pasar por el polarizador con el eje de polarización vertical queda descrito por: $\begin{Bmatrix} P\hat{e}_y \\ P\hat{e}_x \end{Bmatrix}$.
- El estado de polarización del fotón, al pasar por el polarizador con el eje de polarización horizontal queda descrito por $\begin{Bmatrix} P\hat{e}_y \\ P\hat{e}_x \end{Bmatrix}$.

Por la notación bra ket, se escribe en la parte derecha el estado inicial y en la parte izquierda el estado posterior.

$$\langle \textit{Estado final} | \textit{Estado inicial} \rangle$$

Cada experimento se puede trabajar bajo dicha notación bra ket, haciendo uso de los vectores estado. Por lo tanto:

- Experimento 1: $\langle \hat{e}_y | \hat{e}_y \rangle$ 100% - 1
- Experimento 2: $\langle \hat{e}_x | \hat{e}_x \rangle$ 100% - 1
- Experimento 3: $\langle \hat{e}_x | \hat{e}_y \rangle$ 0 % - 0

La interpretación brindada para dicha notación, se refiere al comportamiento del fotón, al pasar por los polarizadores 1 y 2, para el caso del primer experimento se define que un fotón que se encuentre en el estado de polarización \hat{e}_y , y llegue a un estado de polarización

\hat{e}_y , es de 100% o de 1, hablando en términos probabilísticos Ec.(8) .Para el caso de los otros dos experimentos se hace la misma inferencia. Por lo tanto, se considera que \hat{e}_y y \hat{e}_x son estados ortogonales entre sí, y forman una base. Su significado experimental se asocia a estados bien definidos, o estados base.

De tal forma se pueden denotar estos estados base, como vectores base, describiéndolos en forma matricial, de modo que $|\hat{e}_x\rangle = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}$, $|\hat{e}_y\rangle = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}$, $\langle \hat{e}_x| = \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix}$, $\langle \hat{e}_y| = \begin{bmatrix} 0 & 1 \end{bmatrix}$, por lo que cualquier combinación en términos de estos estados base, darán información sobre cualquier estado ubicado en este espacio. La forma matricial de las amplitudes de probabilidad es (Walteros MA, 2016):

$$\langle \hat{e}_x | \hat{e}_x \rangle = \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} = 1 \quad (5)$$

$$\langle \hat{e}_y | \hat{e}_y \rangle = \begin{bmatrix} 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} = 1 \quad \langle i | j \rangle = \delta_{ij} = \begin{cases} 0 & \text{si } i \neq j \\ 1 & \text{si } i = j \end{cases} \quad (6)$$

$$\langle \hat{e}_x | \hat{e}_y \rangle = \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} = 0 \quad (7)$$

Otra configuración posible con respecto a los polarizadores, en cuanto que solo se ha estudiado, el comportamiento cuando estos se ubican vertical y horizontalmente únicamente es la que se plantea a continuación, tal configuración se da cuando uno de estos se encuentra a cierta inclinación con respecto al eje de referencia.

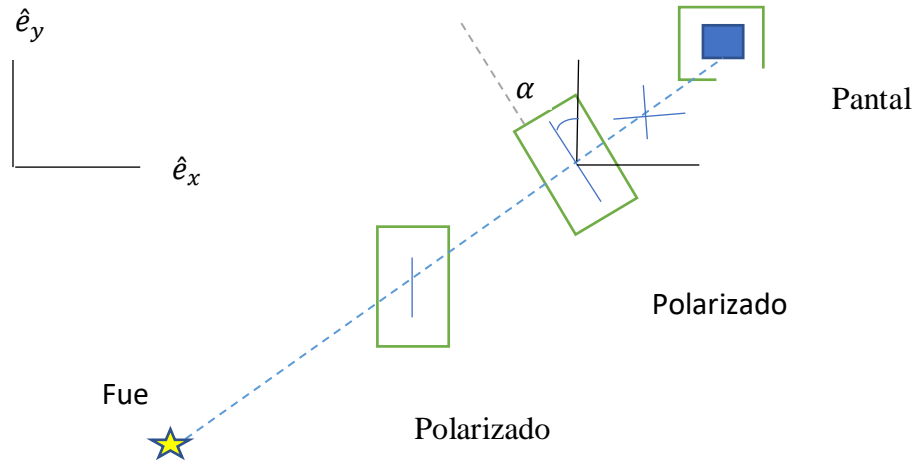


Figura 8 Nota. Fuente: Malaver 2016. Tesis de pregrado. Fig. 2.7 Polarizador 1 vertical \hat{e}_y , polarizador 2 – vertical rotado un ángulo α .

La interpretación clásica de este montaje (figura 7), indica que el polarizador obliga a girar la dirección de la luz, cuanto mayor sea el ángulo α , formado por la dirección de polarización con la dirección de propagación de la luz, menor será la intensidad de la luz que atraviesa, y viceversa, entre menor sea el ángulo α , la intensidad de la luz que pasa será mayor. Por simplicidad de la experiencia se ha tomado el ángulo $\alpha = 45^\circ$. Ahora representaremos el estado del fotón en términos del montaje para posteriormente colocarlo en los estados base, descritos en la ecuación (6) y (7).

El fotón al momento de pasar por el polarizador 1, queda polarizado en un estado vertical al que se ha llamado \hat{e}_y , al momento de pasar por el polarizador 2, el fotón queda en un estado \hat{e}_y , y en un estado \hat{e}_x , esta afirmación quedara concretada más adelante. El estado final de polarización se representará con el ket $|\alpha \rangle$, que tendrá propiedades de tipo vectorial como la normalización y la norma. Por lo tanto, la probabilidad queda descrita como:

$$P = |\langle \text{Estado final} | \text{Estado inicial} \rangle|^2 \quad (8)$$

Para cada situación descrita en el experimento de polarizadores, se puede establecer la probabilidad de encontrar el fotón en un determinado estado.

Experimento 1: El fotón pasa por el polarizador 1 con orientación \hat{e}_x , y sale del polarizador 2 con orientación \hat{e}_x .

$$P = |\langle \hat{e}_x | \hat{e}_x \rangle|^2 = \left| [1 \ 0] \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \right|^2 = |1|^2 = 1 \quad (9)$$

Experimento 2: El fotón pasa por el polarizador 1 con orientación \hat{e}_y , y sale del polarizador 2 con orientación \hat{e}_y .

$$P = |\langle \hat{e}_y | \hat{e}_y \rangle|^2 = \left| [0 \ 1] \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \right|^2 = |1|^2 = 1 \quad (10)$$

Experimento 3: El fotón pasa por el polarizador 1 con orientación \hat{e}_y , y después de atravesar el polarizador 2 con orientación \hat{e}_x , no se detecta ningún fotón en la pantalla.

$$P = |\langle \hat{e}_x | \hat{e}_y \rangle|^2 = \left| [0 \ 1] \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \right|^2 = |0|^2 = 0 \quad (11)$$

Experimento 4: El fotón pasa por el polarizador 1 con orientación \hat{e}_y , y pasa el polarizador rotado 45° , quedando en un estado $|\alpha \rangle$.

$$P = |\langle \alpha | \hat{e}_y \rangle|^2 = \left| [0 \ 1] \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} \right|^2 = \left| 0 \cdot \frac{1}{\sqrt{2}} + 1 \cdot \frac{1}{\sqrt{2}} \right|^2 = \left| \frac{1}{\sqrt{2}} \right|^2 = \frac{1}{2} = 0,5 \quad (12)$$

Ahora se puede escribir cualquier estado del sistema cuántico, en términos de sus estados base, o estados bien definidos.

- $|\hat{e}_x\rangle = |\hat{e}_x\rangle + 0|\hat{e}_y\rangle = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}$ Exp.1
- $|\hat{e}_y\rangle = 0|\hat{e}_x\rangle + |\hat{e}_y\rangle = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}$ Exp.2
- $|\alpha\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|\hat{e}_x\rangle + |\hat{e}_y\rangle) = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix}$ Exp.4

Haciendo uso de la descripción de los experimentos anteriores, se puede introducir el concepto de superposición de estados, específicamente para el experimento 4, se puede inferir que el polarizador 2 que se encuentra rotado un ángulo $\alpha = 45^\circ$, deja al sistema en un sistema combinado. Esto es en términos probabilísticos un 50 % de posibilidades de detectarlo en la pantalla en un estado de polarización vertical \hat{e}_y , y otro 50% de encontrarlo en un estado de polarización \hat{e}_x . Concretamente desde la visión de mecánica cuántica, el fotón está en polarizado en un estado vertical \hat{e}_y , y en un estado \hat{e}_x , al mismo tiempo.

Otras configuraciones respecto a la disposición de los polarizadores, generara otros estados finales, como se han dicho anteriormente, podrán denotarse en términos de sus estados base.

LISTA DE FIGURAS ANEXO 1

- FIGURA 8. REPRESENTACIÓN DE UN HAZ DE LUZ INCIDIENDO SOBRE LA CALCITA, EL HAZ SE SEPARA EN DOS RAYOS $|H\rangle$ y $|V\rangle$, ESTOS RAYOS AL SALIR TIENEN DIRECCIONES PERPENDICULARES DE POLARIZACIÓN.**ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.**
- FIGURA 9. REPRESENTACIÓN DE UN FOTÓN ENTRANDO A LA CALCITA CON POLARIZACIÓN $|H\rangle$, SALE CON POLARIZACIÓN $|H\rangle$**ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.**
- FIGURA 10. REPRESENTACIÓN DE UN FOTÓN ENTRANDO A LA CALCITA CON POLARIZACIÓN $|V\rangle$, SALE CON POLARIZACIÓN $|V\rangle$**ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.**
- FIGURA 11. REPRESENTACIÓN DE UN FOTÓN PASANDO POR EL CRISTAL DE CALCITA, PROYECTADO EN DOS ESTADOS EXCLUYENTES $|H\rangle$ y $|V\rangle$**ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.**
- FIGURA 15 REPRESENTACIÓN GRÁFICA DEL INTERFERÓMETRO, COMPUESTO DE UN DES DOBLADOR Y DOS ESPEJOS.**ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.**
- FIGURA 16. REPRESENTACIÓN DEL INTERFERÓMETRO, CON DOS APARATOS DE DESDOBLADORES DE HAZ, AL QUE SE LES DENOMINA APARATO A Y APARATO B**ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.**
- FIGURA 17. REPRESENTACIÓN DEL INTERFERÓMETRO CON UN MURO DESLIZANTE OBSTACULIZANDO $|x-\rangle$, SE DESTRUYE EL PATRÓN DE INTERFERENCIA EN LA PANTALLA.**ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.**
- FIGURA 18. REPRESENTACIÓN DEL INTERFERÓMETRO, LA TRAYECTORIA DEL FOTÓN TOMA $|x+\rangle$, Y POSTERIORMENTE LLEGA A B.**ERROR! BOOKMARK NOT DEFINED.**

ANEXO 2

Hamiltoniano y la ecuación de valores propios

Ahora bien, veremos algunas propiedades de los operadores aplicadas al operador Hamiltoniano. El operador \hat{H} , actúa sobre una función de onda $|\phi\rangle$, según la regla de autovalores y autovectores, se cumple que:

$$\hat{H}|\phi\rangle = |\chi\rangle \quad (13)$$

Por lo tanto, se tiene que $|\chi\rangle$, también es una función de onda, actuando en el espacio de Hilbert. Se dice que \hat{H} es lineal si, actuando sobre una combinación lineal de vectores se obtiene:

$$\hat{H}(a|\phi\rangle + b|\chi\rangle) = a\hat{H}|\phi\rangle + b\hat{H}|\chi\rangle \quad \text{siendo } a, b \in \mathcal{C} \quad (14)$$

Adicionalmente tenemos que corroborar que \hat{H} , sea hermítico, dicha propiedad corresponde a que este operador pueda diagonalizarse, y simultáneamente se comprueba que los valores propios sean reales y que los vectores propios sean ortogonales. Entonces para \hat{H} :

$$\langle \chi | \hat{H} | \phi \rangle^* = \langle \phi | \hat{H} | \chi \rangle \quad (15)$$

Si se cumple, esta propiedad \hat{H} , es un operador lineal, en este apartado no se trabajará con vectores ni valores propios asociados a \hat{H} , pero se ha determinado que si \hat{H} , es un operador lineal, entonces su significado está directamente relacionado a que básicamente el operador queda definido como un observable. Por otro lado, cabe destacar que, si un operador no es hermítico, no puede ser lineal, por lo que no estaría definido en el proceso de medición

como un observable. Finalmente se puede deducir que toda cantidad que se pueda medir es un observable.

Respecto a una variable dinámica de un sistema, el bra ket corresponde a los estados de lo que sucede en un instante particular, bajo el nombre de variables dinámicas, se sobreentiende las cantidades asociadas a las coordenadas, las componentes de la velocidad, el momento y el momento angular de las partículas como funciones de esta, de igual manera que para la mecánica clásica.

Para determinar el estado del sistema en la notación de Dirac, haremos uso del algebra que relaciona la formalización con el experimento, de acuerdo con esta se tiene las siguientes propiedades:

Siendo α un operador, y el ket $|\phi\rangle$ que describe un estado del sistema en función del ket $|\Psi\rangle$, entonces:

$$|\Psi\rangle = \alpha|\phi\rangle \quad (16)$$

$$\alpha(|\phi\rangle + |\chi\rangle) = \alpha|\phi\rangle + \alpha|\chi\rangle \quad (17)$$

$$\alpha\{c|\phi\rangle\} = c\alpha|\phi\rangle \quad \text{siendo } c, \text{ un constante} \quad (18)$$

Nótese que la ecuación Ec (15) relacionada a la notación de Dirac corresponde a las ecuaciones planteadas al momento de determinar si \hat{H} es un operador lineal. De la misma manera se corresponde al utilizar las propiedades de dicha notación para el bra, tales propiedades se extienden considerando que los números que intervienen en el espacio de Hilbert son complejos.

Ahora bien, si se quiere determinar el caso puntual de una de las experiencias descritas en los experimentos anteriores, se denotará el observador $A < i|j >$, por lo que si el estado inicial es $|\phi >$ y, posterior a eso se verifica si queda en un estado $|\chi >$, entonces:

$$\begin{aligned} \langle \chi|A|\phi \rangle &= \langle \chi|i \rangle \langle i|A|j \rangle \langle j|\phi \rangle \quad \text{Siendo } |i \rangle \langle i| = 1; \\ &|j \rangle \langle j| = 1 \end{aligned} \quad (19)$$

Si consideramos que $A|\phi > = |\psi >$, por lo tanto:

$$\chi |\psi \rangle = \langle \chi|A|\phi \rangle \quad (20)$$

Podemos concluir que cuando se realiza una observación sobre un sistema cuántico, frente a las variables dinámicas, tiene sentido hablar de la probabilidad de obtener resultados particulares cuando se miden simultáneamente dos observables que conmutan⁷. Por lo tanto, no es posible llevar a cabo una observación de un sistema que este en un estado definido sin alterar y trastornar dicho estado a fines de realizar una medición. De esta manera se llega a la conclusión que es imposible medir simultáneamente dos observables. Aunque en el caso particular que estas variables conmuten tiene sentido hablar acerca de que, al realizar las dos mediciones, estas no interfieren entre sí, o dichas mediciones se pueden considerar consecuencia de medir simultáneamente y considerar un resultado particular de cualquiera de dichas mediciones, o presentarse el caso de considerar una sola medición compleja en el cual se ven involucrado dos números, en vez de uno. Los estados para los cuales dicha medición da con certeza un resultado en particular son los autoestados comunes (Dirac P.1967).

⁷ Operadores que conmutan: No cumplen con la regla de la conmutatividad bajo la multiplicación.

Ecuación de valores propios

La formalización frente a la ecuación de valores propios se presenta al considerar los vectores ket y bra se pueden representar como un conjunto de números como se ha visto al momento de formalizar el experimento de polarización. De esta se manera se procede de igual forma al referirse a los operadores lineales, para obtener una representación completa que permita representar todas las cantidades abstractas mediante un conjunto de números.

Ahora bien, suponemos una matriz diagonalizada, la cual para nuestro caso supondrá una serie de valores físicos obtenidos experimentalmente e_1, e_2, e_3 , siendo estos valores distintos entre sí, al cual se le asocia una magnitud medible que viene dada por el observador (que puede ser algún valor de energía):

$$E = \begin{bmatrix} e_1 & 0 & 0 \\ 0 & e_2 & 0 \\ 0 & 0 & e_3 \end{bmatrix} \quad (21)$$

Cada uno de los valores colocados en la diagonal principal de la matriz representa no solo una cantidad observable, medible, si no que representa uno de los autovalores propios de la matriz E, para este caso puntual, se considera que no hay degeneración, puesto que todos los valores propios son diferentes.

Ahora consideremos el vector relacionado para la descripción del caso de los polarizadores en el que el estado $|\psi\rangle$ toma los siguientes valores $|\psi\rangle = (1/\sqrt{3}, 1/\sqrt{3}, 1/\sqrt{3})$, siendo que el vector ya esta normalizado, podemos corroborar realizando $\langle \psi | \psi \rangle$.

$$\langle \psi | \psi \rangle = \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{3}} & \frac{1}{\sqrt{3}} & \frac{1}{\sqrt{3}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{3}} \\ \frac{1}{\sqrt{3}} \\ \frac{1}{\sqrt{3}} \end{bmatrix} = 1 \quad (22)$$

Según la interpretación brindada para el experimento de polarizadores podemos contemplar que el vector está dado en tres dimensiones, y que cada uno de los componentes cuadráticos del vector representa una probabilidad, entonces cada término representaría la probabilidad estadística de un tercio.

Ahora tomaremos la matriz E que representa un aparato de medida, en general el observable del sistema, por lo tanto, la probabilidad quedará descrita en forma matricial como:

$$\langle \psi | E | \psi \rangle = \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{3}} & \frac{1}{\sqrt{3}} & \frac{1}{\sqrt{3}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_1 & 0 & 0 \\ 0 & e_2 & 0 \\ 0 & 0 & e_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{3}} \\ \frac{1}{\sqrt{3}} \\ \frac{1}{\sqrt{3}} \end{bmatrix} \quad (23)$$

El producto matricial de los factores de estas matrices es sumamente fácil, puesto que la matriz se encuentra diagonalizada, realizando las operaciones involucradas se obtiene que:

$$e_1 \left(\frac{1}{\sqrt{3}} \right)^2 + e_2 \left(\frac{1}{\sqrt{3}} \right)^2 + e_3 \left(\frac{1}{\sqrt{3}} \right)^2 = \frac{1}{\sqrt{3}} e_1 + \frac{1}{\sqrt{3}} e_2 + \frac{1}{\sqrt{3}} e_3 \quad (24)$$

Para este caso puntual, la interpretación que se brinda es de igual manera que la descripción anterior, en términos probabilísticos a cada uno de los términos cuadráticos del vector normalizado $|\psi\rangle$ asociado a cada autovalor propio de la matriz E. Por lo que el valor

e_1 tiene un tercio de probabilidad de ser obtenido, el valor e_2 también tiene una probabilidad de un tercio de ser obtenido, y finalmente e_3 , con una probabilidad de un tercio de ser obtenido. Lo que supone que los tres valores tienen la misma probabilidad de ser obtenidos. Esta afirmación es bastante útil, para experimentos en donde el montaje requiera la descripción de una cualidad que tenga ser descrita en términos de sus características propias y no cuantitativas, como en el caso de las líneas espectrales, al utilizar un prisma y separar un haz de luz blanca, por lo que cada valor descrito en la ecuación anterior puede relacionarse como las líneas espectrales con una misma intensidad y con una misma probabilidad de ocurrir.

Sin embargo, las matrices que se han considerado hasta el momento son matrices cuyos valores son reales, al igual que ocurrió con los vectores, no se hace necesario que los componentes de las matrices sean propiamente reales, también pueden ser imaginarios y complejos, este tipo de matrices con valores imaginarios y complejos serán de utilidad en la mecánica cuántica para describir los operadores, u observables, y se denominan matrices hermitianas, anteriormente mencionadas. Una de las condiciones que exige, se refiere a que la diagonal principal de la matriz debe tener valores reales y que cada uno de los otros sea igual al complejo conjugado de su simétrico respecto a la diagonal. La formalidad de una matriz hermítica queda expuesta a continuación:

$$H = (H^*)^T \quad (25)$$

O lo que es lo mismo que la transpuesta del conjugado complejo:

$$H = (H^T)^* \quad (26)$$

Para el caso de la mecánica cuántica el caso del conjugado del complejo es algo que sucede con cierta frecuencia, por lo tanto, se le asocia el nombre de adjunta hermitiana, o matriz transconjugada, de la cual se puede denotar de la siguiente manera:

$$H^\dagger = H \quad (27)$$

Que corresponde a la notación que utilizan algunos libros de texto, y que se ajusta a la notación propuesta para la mecánica cuántica. Es importante recalcar que cuando una matriz H actuando como un operador sobre un operando x , se tiene que escribir primero el operador a la derecha y el operando a la izquierda, ya que en el producto de vectores y matrices no se cumple la regla de la conmutatividad, de forma tal que actúa sobre el de la forma $H x$. Esto es válido para cualquier aplicación de operadores.

Recordemos que los valores propios de una matriz que representa a una cantidad física son los valores que dicha cantidad física puede tomar, dicho de esta manera, la ecuación de valores propios queda determinada de la siguiente manera:

$$H x = r x \quad (28)$$

Siendo r los valores propios de la matriz H , determinados por un vector $x = (x_1, x_2, x_3, \dots)$, realizando las operaciones correspondientes, la ecuación para determinar los autovalores propios de cualquier matriz, por ende, de cualquier operador es:

$$\det(H - rI) = 0 \quad (29)$$

Siendo la ecuación (29) conocida como la ecuación característica de la matriz H . Posteriormente de obtener los valores propios asociados a la matriz H , podemos determinar

los auto vectores propios asociados a con cada autovalor, recurriendo a la misma ecuación característica.

En la mecánica ondulatoria ya hemos mencionado que una cantidad observable como la energía puede ser representada como un operador que actúa sobre una función de onda en una ecuación propia, en donde el lado derecho de la ecuación especifica la función de onda multiplicada por λ , que a su vez es el autovalor propio que se medirá en el laboratorio asociado con la característica del observable.

$$H\psi = \lambda\psi \quad (30)$$

Por lo que la ecuación característica del hamiltoniano H queda determinada como:

$$\det(H - \lambda I) = 0 \quad (31)$$

Ejemplificaremos lo antes mencionado en un sencillo ejercicio de aplicación, frente a una cantidad medible en un sistema físico. La ecuación (32) es la ecuación de Schrödinger independiente del tiempo, para este caso H será:

$$H = \xi \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix} \quad (32)$$

Siendo ξ una constante con unidades de energía. Puesto que se ha considerado que se trata de un sistema con dos estados, podemos representar la función de onda como:

$$\psi = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} \quad (33)$$

Reemplazando en la ecuación característica, se obtiene:

$$\det \left(\begin{bmatrix} \xi - \lambda & \xi \\ \xi & -\xi - \lambda \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} \right) = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (34)$$

La solución del determinante nos conlleva a los autovalores que son posibles para el sistema de dos estados $\lambda = \pm\sqrt{2}\xi$. Para el caso de $\lambda = \sqrt{2}\xi$, entonces tenemos:

$$\begin{aligned} (\xi - \lambda)x_1 + \xi x_2 &= 0 \\ (\xi - \sqrt{2}\xi)x_1 + \xi x_2 &= 0 \\ \psi_1 = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 1 \\ \sqrt{2} - 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} + [\sqrt{2} \quad -1] \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (35)$$

De igual forma se procede para el caso de $\lambda = -\sqrt{2}\xi$, obteniendo:

$$\psi_2 = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ -\sqrt{2} - 1 \end{bmatrix} \quad (36)$$

En lo que respecta a la solución la función propia, esta no encuentra normalizada, de esta manera se puede expresar, manteniendo la notación ket de la función de onda como:

$$\psi_1 = \frac{1}{\sqrt{2(2 - \sqrt{2})}} |x_1\rangle + \frac{\sqrt{2} - 1}{\sqrt{2(2 - \sqrt{2})}} |x_2\rangle \quad (37)$$

$$\psi_2 = \frac{1}{\sqrt{2(2 + \sqrt{2})}} |x_1\rangle + \frac{(2 + \sqrt{2})}{\sqrt{2(2 + \sqrt{2})}} |x_2\rangle \quad (38)$$

De modo que las ecuaciones propias para el sistema de dos estados corresponden a:

$$H\psi = \sqrt{2}\psi_1 \quad (39)$$

$$H\psi = -\sqrt{2}\psi_2 \quad (40)$$

Siendo $\sqrt{2}, -\sqrt{2}$ los autovalores propios del observable H.

Anexo 3

**Cartilla Practico – Experimental “La Actividad Experimental Como Estrategia
Para El Acercamiento Al Concepto De Medición De Un Sistema Cuántico”**

LA ACTIVIDAD EXPERIMENTAL COMO ESTRATEGIA PARA EL ACERCAMIENTO AL CONCEPTO DE MEDICIÓN DE UN SISTEMA CUÁNTICO

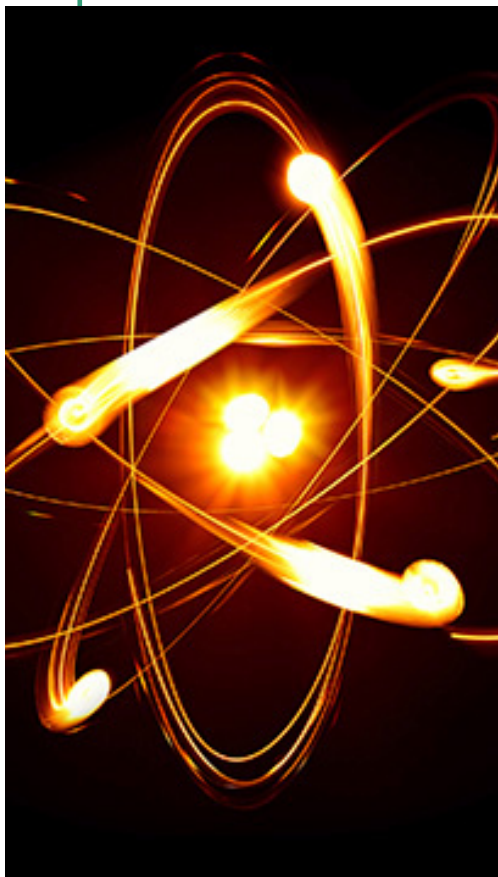
Cartilla de enseñanza Práctico- experimental

Elaborada por:
Jhonny Florez Tovar
Línea de la enseñanza de la física y su relación
física- matemática.
Universidad Pedagógica Nacional



INTRODUCCIÓN

La siguiente cartilla es un aporte al campo de la investigación dirigida a docentes en formación y estudiantes a partir de los estudios realizados sobre la teoría cuántica y en particular a la medida de las variables dinámicas desde este contexto. La actividad experimental se usa como instrumento que permite la construcción del concepto de medición de una variable dinámica desde la Mecánica Cuántica (M.C). El objetivo de las actividades propuestas es la comprensión de nociones alrededor de la (M.C.) desde de los conceptos de observador, medición e incertidumbre; donde se aborda la descripción cualitativa y cuantitativa de los fenómenos en referencia como contribución a las diversas estrategias planteadas al problema de la medición en la mecánica cuántica y sus posibles soluciones. Al mismo tiempo logra ampliar la experiencia frente a la realización de las descripciones y la esquematización del experimento, con él fin de promover un cambio que convoca la perspectiva del pensamiento clásico a uno regido por las leyes cuánticas; por lo cual esta propuesta se realizó como parte de la construcción del saber pedagógico.



ALGUNAS CONSIDERACIONES

La mecánica cuántica cambia completamente la forma en como se estudia la dinámica de los cuerpos en comparación con la mecánica clásica -la cual estudia el mundo macroscópico- por lo tanto es necesario realizar cambios en las definiciones de los conceptos más básicos para el estudio del mundo físico.

MEDICIÓN DESDE LA MECÁNICA CUÁNTICA

Para hablar de lo que se considera cómo grande o pequeño desde la perspectiva de la mecánica cuántica, hay que abordar la conceptualización de que un sistema puede ser observado únicamente teniendo una interacción con algo externo a este, dicha interacción altera al sistema, o lo modifica. En el caso de los sistemas clásicos la alteración que produce tal interacción se considera insignificante o que se puede despreciar y, esto se asocia al concepto de lo que es grande o macroscópico. Para el caso de la mecánica cuántica, esta interacción afecta al objeto, entonces, no se desprecia y se asocia al concepto de lo que es pequeño o microscópico.

Se puede decir entonces, que al realizar una medición sobre un sistema cuántico, este se perturba de manera incontrolable conllevando a que no se tenga certeza acerca del estado antes de realizar dicha medición, y por lo cual el estado del sistema queda definido por el observador.

Un estado en un sistema cuántico, a diferencia del sistema mecánico clásico, cuando se realiza varias mediciones del sistema en una "misma condición" es posible obtener valores distintos en la variable que se mide; por esta razón, se habla de la probabilidad de encontrar a un sistema en un estado u otro. Esto se debe a que el comportamiento de un estado cuántico para un observable antes de realizar una medida es incierto, pero se encuentra dentro de las probabilidades dependiendo de la variable dinámica que se desee inspeccionar en el estado cuántico. Para describir el estado de un sistema y su evolución temporal, se hace uso de las variables dinámicas. Desde la mecánica cuántica no es posible caracterizar de forma simultánea los observables de posición y momento que son variables dinámicas, por lo que en principio difiere del estado en mecánica clásica, esta particularidad en la mecánica cuántica es conocida como el principio de incertidumbre.

Las características mencionadas exponen el problema de la medición y uno de los retos de la mecánica cuántica, ya que se centra en la discrepancia entre la parte experimental y la teoría -en donde se obtienen resultados distintos-. De tal manera que cuando se realiza una medición sobre un sistema de manera experimental, se obtiene datos exactos, en contraparte la teoría apunta a que no es posible determinar con exactitud en qué estado se encuentra el sistema, lo que se puede conocer es la probabilidad de que quede en uno de esos posibles estados después de realizar la medición.

TEORÍA

El observador y la ecuación de valores propios, relación en el proceso de medida.

En mecánica cuántica el observador es quien realiza la medición sobre el sistema cuántico. Estos quedan descritos mediante Operadores lineales. Los posibles estados en los que se puede encontrar el sistema son descritos por vectores de estado, de tal manera que cuando se realiza una medición del sistema cuántico, éste queda determinado por el observador, por lo que se puede decir que actuar sobre el sistema, cambia su estado cuántico. La relación entre el observador y el estado de un sistema cuántico queda matemáticamente expresada en la ecuación de valores propios.

Al hacer actuar un operador sobre una función de estado se obtiene otra función. Un conjunto de funciones que responden al actuar del operador devolviendo la misma función multiplicada por un número, se conoce con funciones propias, y al número que multiplica dichas funciones tras la acción del operador se denominan valores propios.



https://imagenes.20minutos.es/files/article_amp/uploads/2017/12/11/597225.jpg

PREGUNTAS ORIENTADORAS

Las siguientes preguntas son propuestas previo a la actividad experimental. El espacio está abierto a nuevas preguntas y/o hipótesis...

A continuación, se enumeran las preguntas propuestas (trate de responderlas teniendo en cuenta sus experiencias previas):

1. Desde sus experiencias previas, ¿cree que exista alguna diferencia al medir en un sistema macroscópico y uno microscópico?
2. ¿Cómo cree usted que es posible medir en un sistema microscópico?
3. Para usted ¿Qué es una variable dinámica?
4. ¿Cómo se determina el estado de un sistema en Mecánica clásica, y que variables describen por completo dicho estado?
5. Desde el contexto-cuántico, ¿Es posible determinar completamente el estado de un sistema conociendo solo el observable posición o momento ? explique.
6. ¿Cuál cree que es el significado de los valores propios, al efectuarse una medición? Explique.

RESPUESTAS:

1. _____

2. _____

3. _____

4. _____

5. _____

6. _____



PRÁCTICA EXPERIMENTAL

Objetivos

- Realizar un montaje experimental que permita mostrar cómo se mide desde la mecánica cuántica.
- Por medio de la observación, hacer una diferenciación entre la medición desde el contexto clásico y cuántico.
- Aproximar a la comprensión de cómo se concibe la medición de los observables de posición y momento.

La actividad experimental ha jugado un papel fundamental en las ciencias y en particular en la física, siendo participe en el desarrollo de las teorías, principalmente en el rol que desempeña al momento de abordar conceptos, permitiendo que se facilite la comprensión de estos. De esta manera el proceso de enseñanza – aprendizaje en los últimos años se ha consolidado, a tal grado que la importancia de la actividad experimental esta al mismo grado que la propia teoría.

El proceder que tiene la actividad experimental en la teoría cuántica y para uso de este trabajo, se regirá bajo un enfoque fenoménico, que correlaciona de forma exitosa la observación de un fenómeno y la descripción de lo que se percibe, y que sirve como herramienta para la construcción de explicaciones alrededor del concepto de medición desde la perspectiva de la mecánica cuántica. Consecuentemente se realiza una formalización que se ha producido en experiencias similares, con el objetivo de acceder al mismo resultado y es la comprensión de la alteración que produce el proceso de medición en un sistema cuántico, que difiere de la medición en un sistema clásico.

Las actividades experimentales planteadas a continuación tendrán como objetivo principal la comprensión del concepto de medición de una variable dinámica en mecánica cuántica, y mostraran como a diferencia del contexto clásico, el observador interviene de forma determinante en el resultado. Además, se le asignara un ket a cada estado $|H\rangle$ (estado horizontal) y $|V\rangle$ (estado vertical)-, con el fin de realizar una serie de operaciones que reafirmen el hecho de que un sistema cuántico colapsa al momento de observarlo obteniendo efectos probabilísticos en la teoría y datos exactos en las mediciones experimentales que se realicen sobre este.

ACTIVIDAD EXPERIMENTAL: LA CALCITA

OBJETIVO: CONSTRUIR LA NOCIÓN DE OBSERVADOR Y RELACIONARLO CON LA MEDIDA EN LA MC.

PROCEDIMIENTO:

El diseño del experimento consta de un láser monocromático rojo (Longitud de onda = 635nm), un cristal transparente de calcita que desdobra en dos haces polarizados perpendiculares entre sí el haz de luz incidente y que coinciden con las direcciones de vibraciones preferentes del cristal, una placa oscura ubicada en una de las dos salidas, que servirá como barrera y no dejará pasar los fotones polarizados en una dirección determinada, y dos fotodiodos de avalancha que servirán como detectores.

La disposición de los materiales en la actividad experimental está representada en la Fig.1, así como la tabla 1 se encuentra la identificación de los materiales. Es importante esclarecer que los fotones que salen de la fuente están con el mismo estado inicial, están en combinación lineal de dos estados propios del sistema (polarización vertical $|V\rangle$ y polarización horizontal $|H\rangle$).

En una descripción general, la fuente emite un haz de fotones. La calcita, actúa como un polarizador lineal; ésta, posee propiedades birrefringentes que hace que los fotones polarizados vertical u horizontalmente sigan "trayectorias" distintas, por ejemplo, un fotón polarizado horizontalmente seguirá la trayectoria 1 dentro de cristal (Ver figura 2) y un fotón polarizado verticalmente seguirá una trayectoria 2 (ver figura 3); los detectores (T1 Y T2), son los encargados de mostrar las posibles "trayectorias" recorridas por el fotón; y la barrera permite bloquear alguno de los dos haces de fotones polarizadores que son producto de que el haz original atraviesa la calcita

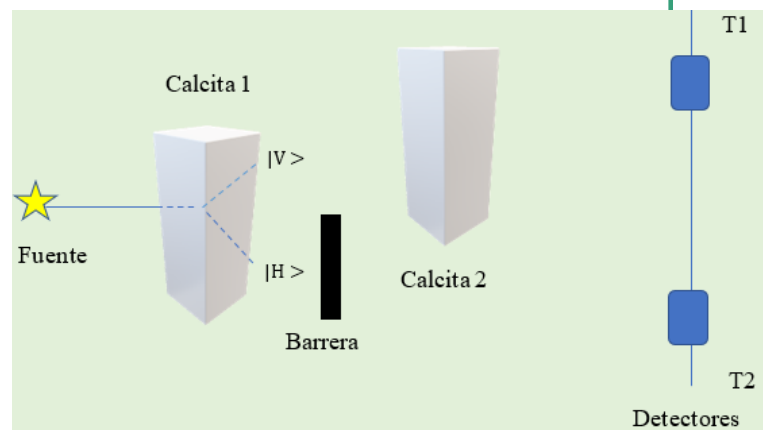
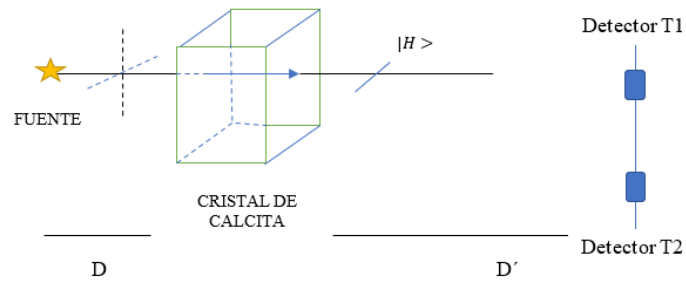


Figura 1. Montaje experimental 1° momento

Tabla 1. Identificación de los elementos para la actividad experimental

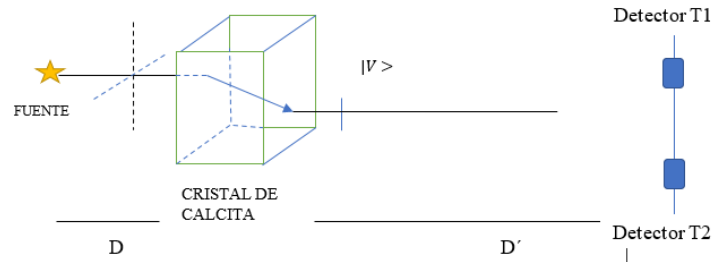
Nombre en la representación	Elemento utilizado
Fuente	Láser Monocromático rojo ($\lambda = 635nm$)
Cristal de Calcita 1 y 2	Calcita: Cristal Birrefringente
Barrera	Material oscuro (Cartulina Negra)
Detector T1 y T2	Fotodiodos de Avalancha

MONTAJE Y DISEÑO EXPERIMENTAL



Representación de un fotón entrando a la calcita, sigue la "trayectoria 1" y sale con polarización $|H\rangle$.

FIGURA 2



Representación de un fotón entrando a la calcita, sigue la "trayectoria 2" y sale con polarización $|V\rangle$.

FIGURA 3

Estudiantes ¡Sonrían!

Para un primer momento, los elementos de la actividad experimental se disponen según Fig.1, se colocará la fuente de haz de fotones -ubicación en la parte izquierda de la representación-, se ubicará el primer cristal de calcita (Aparato A) a una distancia D de la fuente. Posteriormente se ubica un segundo cristal de calcita a una distancia D' y finalmente se ubican los fotodiodos (T1 y T2). Si es posible colocar estas distancias en el gráfico.

De esta manera se hace incidir el haz producido por la fuente en el eje incidente de la calcita, posteriormente se coloca la barrera que impide el paso de uno de los dos haces polarizados por el cristal transparente de calcita 1. Se ubica una segunda calcita (Aparato B) con las mismas propiedades y colocación que el aparato A.

Finalmente se coloca los detectores (T1 y T2) al final del montaje, que permitirán la detección del fotón, entonces es adecuado preguntarse ¿Qué sucede con el haz colimado de la primera calcita, se evidencia algún registro en los detectores? ¿Por qué?. Es importante hacer estas consideraciones ya que se espera que, mediante la respuesta de las preguntas anteriores, el estudiante logre evidenciar que, al realizar la medición de un sistema, este queda en términos del aparato de medición que mide una cualidad específica como lo es la polarización.

Para el segundo momento se utilizará la siguiente disposición: se toma la calcita 2 y se rota un ángulo 45° con respecto al eje de incidencia de la calcita 1. La disposición de los materiales se realiza según Figura 4 Al igual que en el primer momento es necesario preguntarse ¿Qué sucede con el haz que sale de la primera calcita y pasa por la segunda calcita? ¿Se evidencia algún registro en los detectores T1' y T2'? ¿Existe alguna diferencia al rotar la calcita 2? ¿Cómo puede describir esta diferencia respecto a lo que se vio en el primer momento? ¿Cómo se podría explicar este comportamiento?

FORMALIZACIÓN CONCEPTUAL DE LA ACTIVIDAD EXPERIMENTAL

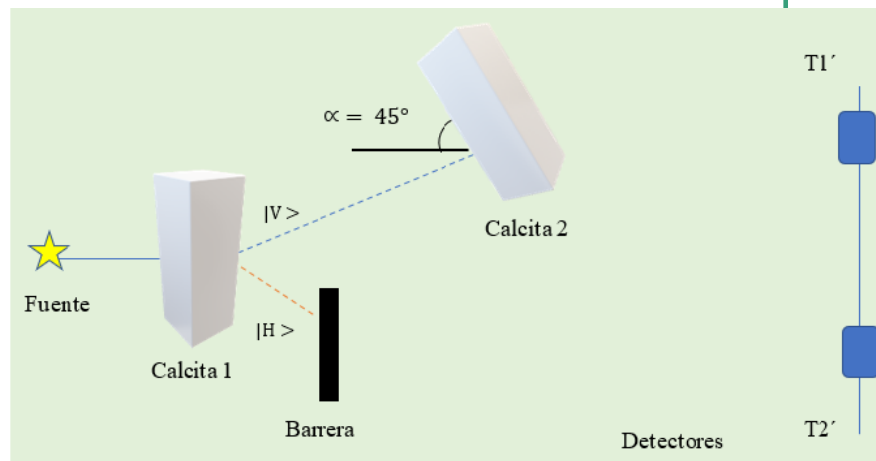


Figura 4. Disposición de materiales para el segundo momento de la actividad experimental, la calcita 2 ha sido rotada 45° en comparación a la calcita 1.

En el primer momento Figura 1, se observa que el haz filtrado de la calcita 1, llega a la calcita 2 con una polarización lineal determinada, ya sea horizontal o vertical. Esto se debe a que, al realizar una medición sobre el fotón, éste ha quedado determinado en uno de los estados que son mutuamente excluyentes, esto es verificable por que al momento de salir de la calcita 2, se ha encendido el detector T1. Si no hubiera realizado el acto de medir con la calcita 1, se hubiera detectado tanto en T1 y T2, correspondiente al principio que propone que los fotones están en un estado de superposición, es decir, que se encuentran tanto en un estado de polarización vertical $|V\rangle$ y polarización horizontal $|H\rangle$ con una cierta probabilidad para cada uno antes de realizar cualquier medición.

Los efectos de esta actividad experimental son análogos a los obtenidos a la relación de medición de una variable dinámica expuesta en el principio de incertidumbre, el cual indica que al determinar el estado de posición de un sistema cuántico esta dado con exactitud si únicamente se mide dicha cualidad.

Para el segundo momento Figura 4, a modo de descripción general el haz de fotones que sale de la calcita 1 llega a la calcita 2 que se encuentra rotada 45°, cuando sale de la calcita 1, el fotón se encuentra con un estado de polarización lineal, por convención el fotón se encuentra en un estado esto ya se ha verificado con el planteamiento de la actividad experimental en el primer momento.

Cuando los fotones salen de la calcita 2 se ha encendido T1' y T2' simultáneamente. De esta manera si se registra un conteo de 200 fotones por ejemplo, entonces 100 habrán llegado a T1' y los otros 100 a T2', así al encenderse ambos detectores se puede considerar que los fotones antes de la medición con la calcita 2 están con un estado de polarización lineal previamente determinado y al llegar a la calcita 2 se encuentra en un estado superpuesto respecto a la nueva medida, si no fuera de esta manera se hubiera presentado el resultado anterior en donde solo uno de los detectores se encendió.

¡QUÉ ES LO QUE SUCEDE ...!

Ahora bien, cuando la Calcita 2 fue rotada con respecto al eje de incidencia de la primera calcita, se produjo un cambio en la medición del estado de polarización de los fotones que salieron de la Calcita 1, de esta manera se puede establecer que la calcita 2 determina otro estado de polarización, distinto al estado de polarización lineal de la primera calcita. En este caso la calcita 1 estaría determinando desde la mecánica cuántica un observable 1 y la calcita 2 rotada sería un observable 2, los dos observables medirían cualidades diferentes y serían no compatibles entre sí.

Bajo el contexto de la mecánica cuántica estándar, existe una implicación que conlleva a este resultado y es que al medir la polarización del fotón nuevamente bajo esta disposición instrumental, se ha variado el observable (la calcita rotada) y quedando en términos de este nuevo observable, de tal manera que se pierde toda información anterior que se tenía antes de realizar dicha medición, que corresponde a que los detectores se hubieran encendido simultáneamente. En general se puede determinar que, al realizar la medición simultánea de dos observables no compatibles, no se puede tener resultados determinados, congruente a lo que se afirma en el principio de incertidumbre de Heisenberg.

Los efectos de esta actividad experimental en su segundo momento Figura 4 se pueden interpretar como análogos a la medición de los operadores de posición y momento, en la cual, estos dos observables quedan representados por la calcita 1 y calcita 2. Desde la teoría estos resultan ser incompatibles entre sí, en donde para cualquier función de onda sí es posible determinar de forma reproducible la posición de un sistema cuántico, cuando se busque determinar el momento lineal se tendrá siempre un resultado probabilístico.

Es importante aclarar que la disposición la segunda calcita en la actividad experimental puede variar, por ejemplo, se puede tener en una rotación distinta a la planteada inicialmente con respecto al eje de incidencia de la calcita 1, y se llegará a los mismos resultados de tipo probabilísticos en la medición de la polarización al pasar por la calcita 2 y llegar a los detectores, ya que estos se encenderán simultáneamente

FORMALIZACIÓN DE LA ACTIVIDAD EXPERIMENTAL

La siguiente formalización permitirá describir el indeterminismo que existe al realizar la medición de dos variables dinámicas de posición y momento simultáneamente a partir de la actividad experimental propuesta, de esta manera se busca que se tenga una mayor claridad con respecto al cambio de cómo se da el acto de medir desde la perspectiva cuántica y superando el determinismo característico del contexto clásico.

De la actividad experimental, se puede afirmar que este se encuentra en dos conjuntos de estados base, que se refieren a formas de representar estados bien definidos de polarización en los que se encuentra los fotones. Suponemos el estado inicial como la combinación lineal de los estados propios del sistema (polarización vertical $|V\rangle$ y polarización horizontal $|H\rangle$ para un haz de luz polarizado) entonces queda descrito como:

$$|\beta\rangle = \cos \varphi |V\rangle + \sin \varphi |H\rangle$$

Donde ψ (φ) es el ángulo formado entre el eje de incidencia de la calcita y la horizontal. Ahora los únicos estados posibles de la calcita 2 son $|H'\rangle$ y $|V'\rangle$, los cuales se representan en términos de $|H\rangle$ y $|V\rangle$ rotados un ángulo alfa (α), con respecto al eje de incidencia de la calcita:

$$|H\rangle = \cos \alpha |V'\rangle + \sin \alpha |H'\rangle$$

$$|V\rangle = -\sin \alpha |V'\rangle + \cos \alpha |H'\rangle$$

En el caso de la matriz de rotación, se tiene que:

$$S' = \begin{pmatrix} \cos \alpha & \sin \alpha \\ -\sin \alpha & \cos \alpha \end{pmatrix}$$

FORMALIZACIÓN DE LA ACTIVIDAD EXPERIMENTAL

Por lo tanto, para el caso de rotación de 45°:

$$|H\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|V'\rangle + |H'\rangle)$$

$$|V\rangle = -\frac{1}{\sqrt{2}}(|V'\rangle - |H'\rangle)$$

Podemos representar la calcita 2 como el operador $B = \begin{bmatrix} b_1 & 0 \\ 0 & b_2 \end{bmatrix}$. Siendo b_1 y b_2 distintos, se le asigna entonces una magnitud medible que sería la polarización de la calcita 2 y cada valor representa uno de los autovalores de B . Por lo tanto, para el valor de $|H'\rangle$, la probabilidad de que el sistema quede en un estado propio del observable 2 es:

$$P = (\langle H|B|H\rangle)^2$$

$$\begin{bmatrix} 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b_1 & 0 \\ 0 & b_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1/\sqrt{2} \\ 1/\sqrt{2} \end{bmatrix}$$

$$b_1 \left(\frac{1}{\sqrt{2}}\right)^2 + b_2 \left(\frac{1}{\sqrt{2}}\right)^2 = \frac{1}{2}b_1 + \frac{1}{2}b_2 = 1$$

→ $b_1 \rightarrow 50\%$ de probabilidad de que se encuentre en ese estado
 $b_2 \rightarrow 50\%$ de probabilidad de que se encuentre en ese estado } Superposición

Por tanto, se obtiene la probabilidad de que los fotones queden en un estado propio del observador B. Se concluye que los resultados obtenidos después de realizar el montaje experimental, muestran que, al efectuar la medición de un nuevo observable sobre el sistema éste queda en un estado de superposición con respecto al observable asociado a la calcita 2.

NOTA: Solo se ha presentado la solución cuando se toma el valor del ket $|H'\rangle$, por lo que se deja propuesto el ejercicio para que el estudiante halle la solución del ket $|V'\rangle$.

PARA PENSAR Y REFLEXIONAR ...

Responda relacionando la actividad experimental desarrollada anteriormente.

1. Desde sus experiencias previas, ¿cree que exista alguna diferencia al medir en un sistema macroscópico y uno microscópico?

2. ¿Cómo cree usted que es posible medir en un sistema microscópico?

3. Para usted ¿Por que cree que se habla de observables de posición y momento ?

4. De acuerdo a su opinión y las nociones adquiridas a partir de las actividades experimentales . ¿ Que diferencia existe entre medir desde el contexto clásico y desde el contexto cuántico.?

5. ¿Desde que contexto -clásico o cuántico-, es posible determinar completamente el estado de un sistema midiendo un único observable? explique.



PARA PENSAR Y REFLEXIONAR ...

6. ¿Cuál cree que es el significado de los valores propios, al efectuarse una medición?
Explique.

En los siguientes espacios podrá responder sus preguntas y o hipótesis propuestas:

7

8.

Observaciones, aportes y/o comentarios:



PALABRAS Y CONCEPTOS CLAVES

- Experimento: "Es la acción y efecto de experimentar, realizar acciones destinadas a descubrir o comprobar ciertos fenómenos, tratar de ratificar o desmentir hipótesis" (Pérez J.).
- Fenómeno: Un fenómeno es la forma en como la naturaleza manifiesta su comportamiento evidenciando así sus características y permitiendo en algunos casos su estudio.
- Macroscópico: Es todo objeto y/o ente que puede ser observado y estudiado a simple vista. La interacción de quién estudie un sistema macroscópico no altera su comportamiento.
- Microscópico: Es todo objeto y/o ente que para ser observado y estudiado requiere de instrumentos o aparatos especiales (por ejem: microscópico) por su tamaño y dificultad de estudio. La interacción con estos sistemas altera su comportamiento.
- Medida: "Es la acción y efecto de medir haciendo comparaciones con una cantidad u objeto con una unidad y escala ya establecida" (Pérez J.).
- Variable dinámica: Es aquella que da razón del comportamiento de un sistema en relación a su movimiento.
- Estado: Es la forma de estar de los sistemas al hacer la medición de una o varias de sus propiedades.
- Observador: Es la persona y/o instrumento que interactúa con un sistema con el fin de describir su comportamiento haciendo mediciones.
- Observable: Desde la mecánica cuántica un observable es una variable en el sistema la cual puede ser medida y observada.
- Superposición: Desde la física, la superposición se refiere a que un sistema puede encontrarse como la suma de varios posibles estados.
- Principio de incertidumbre: propuesto por Heisenberg (1927) el cual afirma que el hecho de que cada partícula lleva asociada consigo una onda, impone restricciones en la capacidad para determinar al mismo tiempo su posición y su velocidad (Heisenberg 1927).
- Trayectoria: Desde la mecánica, la trayectoria son los lugares que "ocupa" un cuerpo o sistema cuando está en movimiento (Merino M.).
- Fotón: Un fotón es una partícula elemental de la materia que está caracterizada desde la mecánica cuántica por ser componente de la luz.

CONCLUSIONES FINALES PARA EL DOCENTE

- Lo mencionado durante el desarrollo de esta cartilla se puede constituir como un acercamiento a la medición de las variables dinámicas de la posición y momento ya que, se indica que al realizar la medición de estos dos observables simultáneamente no se puede tener valores bien definidos y lo que se puede encontrar es la probabilidad de encontrar el sistema en un estado propio del observador, además de comprobar la incompatibilidad que existe entre estas. Se establece entonces que la actividad experimental expuesta concuerda en cuanto a los resultados con la medición de las variables dinámicas que relaciona el principio de incertidumbre. Esto es importante ya que existe una correlación entre el experimento y la teoría, y muestra de manera análoga que es posible plantear actividades experimentales que den cuenta de los procesos de medición en la mecánica cuántica.
- la actividad experimental propuesta expone de manera satisfactoria y se puede considerar como un acercamiento con respecto a lo que sucede sobre las mediciones de las variables dinámicas desde la perspectiva de la mecánica cuántica, en cuanto permite al estudiante interpretar y relacionar, además de formalizar una noción de lo que sucede con el acto de medir.
- La interpretación de algunos conceptos difiere de la teoría clásica a la cuántica. La actividad experimental permite realizar una transición desde estas perspectivas logrando que el sujeto pueda a través de la construcción de explicaciones propuestas evidenciar estos cambios conceptuales.
- La medición desde la perspectiva de la mecánica cuántica es un proceso que involucra una fuerte interacción entre dos sistemas físicos: el aparato de medición y el objeto medido. Esta interacción es clave ya que genera cambios en estos dos sistemas físicos y crea correlaciones entre ellos.

BIBLIOGRAFÍA

- Castrillón, J., Freire Jr., O., & Rodríguez, B. (2014). Mecánica cuántica fundamental, una propuesta didáctica. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 36(1), 1-12. <https://doi.org/10.1590/s1806-11172014000100023>
- Dirac, P. (1967). Representaciones. En P. Dirac, *Principios de la mecánica cuántica* (A.Montes, Trad., págs. 64-89). Barcelona, España: Ariel.
- Fortin, Sebastian y López, Cristian. 2016. "Problemas ontológicos de la mecánica cuántica". En *Diccionario Interdisciplinar Austral*, editado por Claudia E. Vanney, Ignacio Silva y Juan F. Franck. URL=http://dia.austral.edu.ar/Problemas_ontológicos_de_la_mecánica_cuántica
- Krips, Henry. 2017. "Medición en teoría cuántica". En *Diccionario Interdisciplinar Austral*, editado por Claudia E. Vanney, Ignacio Silva y Juan F. Franck. URL=http://dia.austral.edu.ar/Medición_en_teoría_cuántica
- Malagón, F., Sandoval, S., & Ayala, M. (2013). La actividad experimental: construcción de fenomenologías y procesos de formalización. *Praxis Filosófica nueva serie*, 1(36), 119-138. Recuperado de <http://www.scielo.org.co/pdf/pafi/n36/n36a06.pdf>
- Malaver, J.(2016). La medición de una variable de estado desde el contexto clásico y desde el contexto cuántico. (Tesis de pregrado). Universidad Pedagógica Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia.
- Mendez Y. (2013). Elaboración de una cartilla acerca de las características, origen y evolución de los virus con actividades tendientes a desarrollar competencias argumentativas y propositivas en estudiantes de educación básica. Tesis de maestría. Universidad Nacional de Colombia.
- Roza, M., Walteros, A. y Cortés C. (2019). La actividad experimental como una parte fundamental para la enseñanza de la física moderna: el caso de la mecánica cuántica. *Tecné, Episteme y Didaxis: ted*, 45, 191-206.